

diagrammes de Feynman, les physiciens peuvent se la représenter de façon globale. Nous nous concentrons sur les propriétés qui régissent le processus dans son ensemble – l'unitarité et des symétries spéciales auxquelles la méthode d'unitarité donne la prééminence. Dans des cas particuliers, nous pouvons faire des prévisions théoriques avec une parfaite précision, ce qui aurait exigé un nombre infini de diagrammes avec la technique de Feynman.

Cette méthode offre d'autres possibilités, comme la décomposition des processus. Une équipe de l'Institut d'étude avancée de Princeton – Ruth Britto, Freddy Cachazo, Bo Feng et Edward Witten – a montré que, pour les diagrammes en arbre, il était possible de calculer la probabilité d'un processus impliquant cinq particules à partir d'une interaction à quatre particules suivie d'un dédoublement de l'une d'elles. Ce résultat est surprenant, car les deux processus semblent très différents. Il est ainsi possible de fractionner un problème en éléments plus simples.

Le LHC est le lieu idéal pour tester l'efficacité de la méthode: les collisions de protons sont très complexes. Feynman les avait autrefois comparées à la démarche qui consisterait à fracasser des montres suisses les unes sur les autres pour comprendre leur mécanisme, et sa technique de calcul a bien du mal à suivre ce qui se passe pendant le choc. Les protons ne sont pas des particules élémentaires, mais de petits assemblages de quarks et de gluons liés par l'interaction forte. Quand ils se heurtent violemment, les quarks et les gluons interagissent, et d'autres quarks et gluons sont produits. Ils s'agrègent finalement en particules composites qui émergent du collisionneur en jets étroits.

Ce fatras peut cacher des particules nouvelles, des symétries nouvelles, voire de nouvelles dimensions de l'espace-temps. Il est difficile de les distinguer des phénomènes déjà connus. Les différences sont minimes et passent facilement inaperçues. Cependant, avec la méthode d'unitarité, nous pouvons décrire la physique ordinaire avec une précision telle que les phénomènes inédits se détacheront bien.

Par exemple, Joe Incandela, de l'Université de Californie à Santa Barbara, l'actuel porte-parole de l'expérience CMS du LHC qui implique plus de 2000 physiciens, nous a suggéré un problème concernant la traque par son équipe de particules exotiques, celles qui consti-

tuent la matière noire, dont on suppose l'existence, mais qui n'a pas encore été identifiée. Si le LHC produit certaines de ces particules – qui interagissent très peu avec la matière ordinaire –, elles échapperont au détecteur CMS, en donnant l'impression que de l'énergie a disparu. Cette perte d'énergie signalerait la production de ces particules. Malheureusement, d'autres particules ont le même comportement. Par exemple, le LHC produit souvent un boson Z, lequel se désintègre une fois sur cinq en deux neutrinos qui, eux aussi, échappent au détecteur. Comment prédire le nombre de ces particules dont les effets imitent ceux des particules de matière noire ?

Appliquer la méthode aux collisions du LHC

L'équipe de J. Incandela proposait d'estimer le nombre de neutrinos produits dans le détecteur CMS et de voir s'ils expliquent entièrement la perte apparente d'énergie. Dans le cas contraire, cela pourrait signifier que le LHC crée de la matière noire. Cette idée est typique des méthodes indirectes utilisées par les physiciens qui n'ont pas les moyens d'observer directement certains types de particules. Mais pour que cette stratégie donne un résultat, l'équipe de J. Incandela avait besoin de connaître précisément le nombre de neutrinos: avec une précision insuffisante, cette stratégie échouerait. Avec plusieurs collègues, nous avons étudié le problème à l'aide des nouveaux outils théoriques et nous avons pu donner à J. Incandela l'assurance que la précision était suffisante. L'équipe CMS a appliqué sa technique et a obtenu des contraintes très strictes sur les particules de matière noire. Notre technique avait démontré son utilité.

Ce succès nous a incités à aller plus loin, avec des projets plus ambitieux. Au sein d'une équipe internationale, nous avons calculé la probabilité que les collisions au LHC produisent une paire de neutrinos accompagnée de quatre jets – un jet est un ensemble de particules se déplaçant sensiblement dans la même direction. Effectués au moyen des diagrammes de Feynman, de tels calculs auraient pris une dizaine d'années. La méthode d'unitarité nous a permis d'en venir à bout en moins d'une année. À notre grande satisfaction, une autre équipe du LHC, l'expérience ATLAS, a déjà comparé nos valeurs avec ses données, et les résultats sont pour l'instant en excellent accord.

LES AUTEURS



Zvi BERN est professeur de physique à l'Université de Californie à Los Angeles.



Lance DIXON est professeur au Centre de l'accélérateur linéaire de Stanford.



David KOSOWER est chercheur à l'Institut de physique théorique du Centre de recherche du CEA [Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives] à Saclay.

BIBLIOGRAPHIE

C. F. Berger *et al.*, Precise predictions for W+4 jet production at the Large Hadron Collider, *Physical Review Letters*, vol. 106, n° 9, 2011.

K. Stelle, Supergravity : Finite after all ?, *Nature Physics*, vol. 3, pp. 448-450, 2007.

D. Kaiser, Un outil universel de la physique, *Pour la Science*, n° 333, juillet 2005.

S. K. Blau, Lovely as a tree amplitude : Hidden structures underlie Feynman diagrams, *Physics Today*, vol. 57, n° 7, p. 19, 2004.

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.

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.

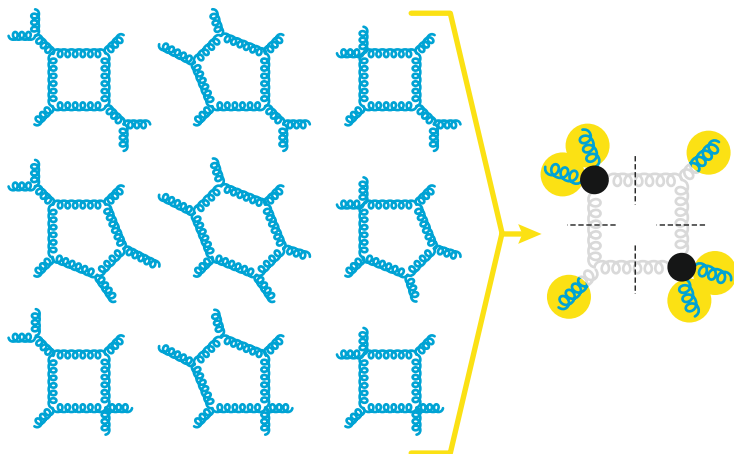
Une issue possible est l'existence de particules non encore découvertes qui mettraient au pas ces effets quantiques. Cette idée, incorporée par les théories dites de supergravité, a été très étudiée dans les années 1970 et au début des années 1980. Mais l'enthousiasme est retombé quand des arguments 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

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.

