

La formule était tellement simple qu'avec David Dunbar, qui travaillait à l'époque à l'Université de Californie à Los Angeles, nous pouvions comprendre la diffusion presque entièrement en termes du principe d'unitarité, qui exige que l'addition des probabilités de tous les résultats possibles donne 100 pour cent. L'unitarité est implicite dans la technique de Feynman, mais tend à être masquée par la complexité des calculs. Nous avons donc

développé une technique alternative qui la place au premier plan. Déjà dans les années 1960, des physiciens avaient eu l'idée de fonder les calculs sur l'unitarité. La suggestion n'avait pas abouti, mais comme souvent en science, elle est réapparue sous une nouvelle forme.

La clef du succès de la méthode d'unitarité est d'éviter l'utilisation directe de particules virtuelles, qui sont la principale raison pour laquelle les diagrammes de

Feynman deviennent aussi compliqués. Ces particules ont des effets à la fois réels et fictifs. Par définition, les effets fictifs doivent s'annuler et disparaître dans le résultat final, si bien qu'ils constituent une sorte de bagage excédentaire dans les calculs.

Calculer l'interaction de façon plus globale

La méthode peut être comprise par analogie avec un système de métro complexe comme celui de Londres, où il existe de multiples itinéraires entre deux stations données. Supposez que nous voulions connaître la probabilité qu'un usager entré à *Mile End* sorte à *Wimbledon*. La technique de Feynman additionne les probabilités de tous les itinéraires concevables. Si on pouvait la transposer, les diagrammes de Feynman incluraient des trajets à travers la roche, en plus des trajets dans les couloirs et les tunnels. Ces trajectoires irréalistes sont les analogues des contributions fictives des boucles de particules virtuelles. Elles s'annulent au bout du compte, mais doivent être conservées pendant les étapes intermédiaires.

Avec l'unitarité, nous ne prenons en compte que les itinéraires qui ont un sens. Nous calculons la probabilité qu'une personne emprunte tel ou tel itinéraire en décomposant le problème : quelle est la probabilité que la personne passe par un tourniquet donné, un couloir donné ou un autre, et ce à chaque étape du voyage ? Cette procédure réduit considérablement la taille des calculs.

Le choix entre la méthode de Feynman et la méthode d'unitarité n'est pas une question de juste ou de faux. Toutes deux expriment les mêmes principes physiques de base et donneraient à la fin les mêmes valeurs de probabilité. Mais elles représentent différents niveaux de description. Un unique diagramme de Feynman, parmi les dizaines de milliers pour une collision complexe, est comparable à une unique molécule dans une gouttelette de liquide. En principe, on peut déterminer le comportement du fluide en suivant chacune de ses molécules, mais c'est fastidieux, voire irréaliste, et très peu éclairant. On a tout intérêt à considérer des propriétés plus globales telles que la vitesse du fluide, sa densité et sa pression.

De même, au lieu de considérer une interaction de particules comme étant construite élément par élément à partir de

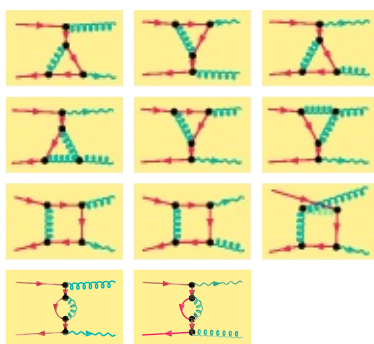
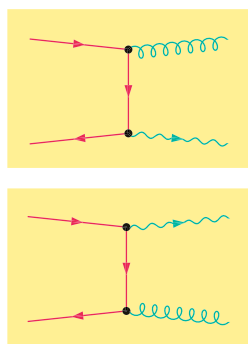
UNE MYRIADE DE DIAGRAMMES

Pour calculer la probabilité d'un processus entre particules, il faut considérer toutes les façons dont les particules peuvent interagir. Chaque diagramme de Feynman représente une possibilité. Une interaction quark-antiquark peut produire plus d'un gluon, ou impliquer plus d'une boucle de particules virtuelles, ou les deux à la fois. Les calculs deviennent rapidement impossibles à gérer.

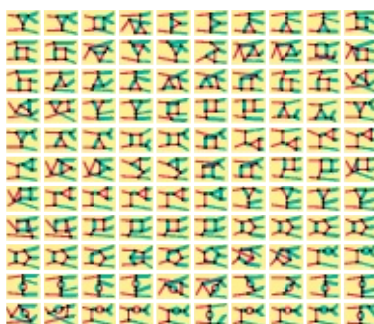
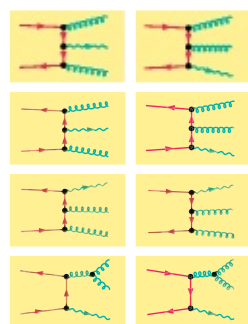
Zéro boucle (arbre)

Une boucle

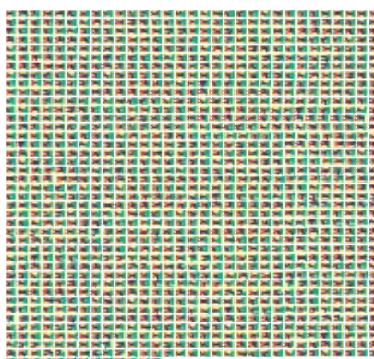
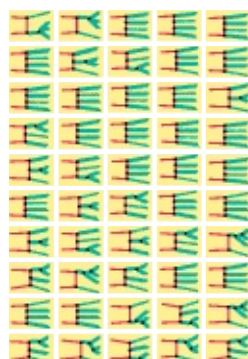
Un gluon



Deux gluons



Trois gluons



Zvi Bern, Lance Dixon, David Kosower et Harald Ita

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.