

dessiner dix millions de diagrammes en arbre et calculer la valeur de chacun. Une approche récursive, introduite dans les années 1980 par Frits Berends, de l'Université de Leyde, aux Pays-Bas, et Walter Giele, maintenant au Fermilab, aux États-Unis, a permis de résoudre le problème pour les diagrammes en arbre, mais n'a pu être étendue aux boucles.

L'introduction d'une seule boucle fait exploser à la fois le nombre de diagrammes et la complexité de leur calcul. La force brute, même avec l'aide d'ordinateurs de plus en plus nombreux et puissants, finit par céder devant le nombre croissant de particules ou de boucles mises en jeu.

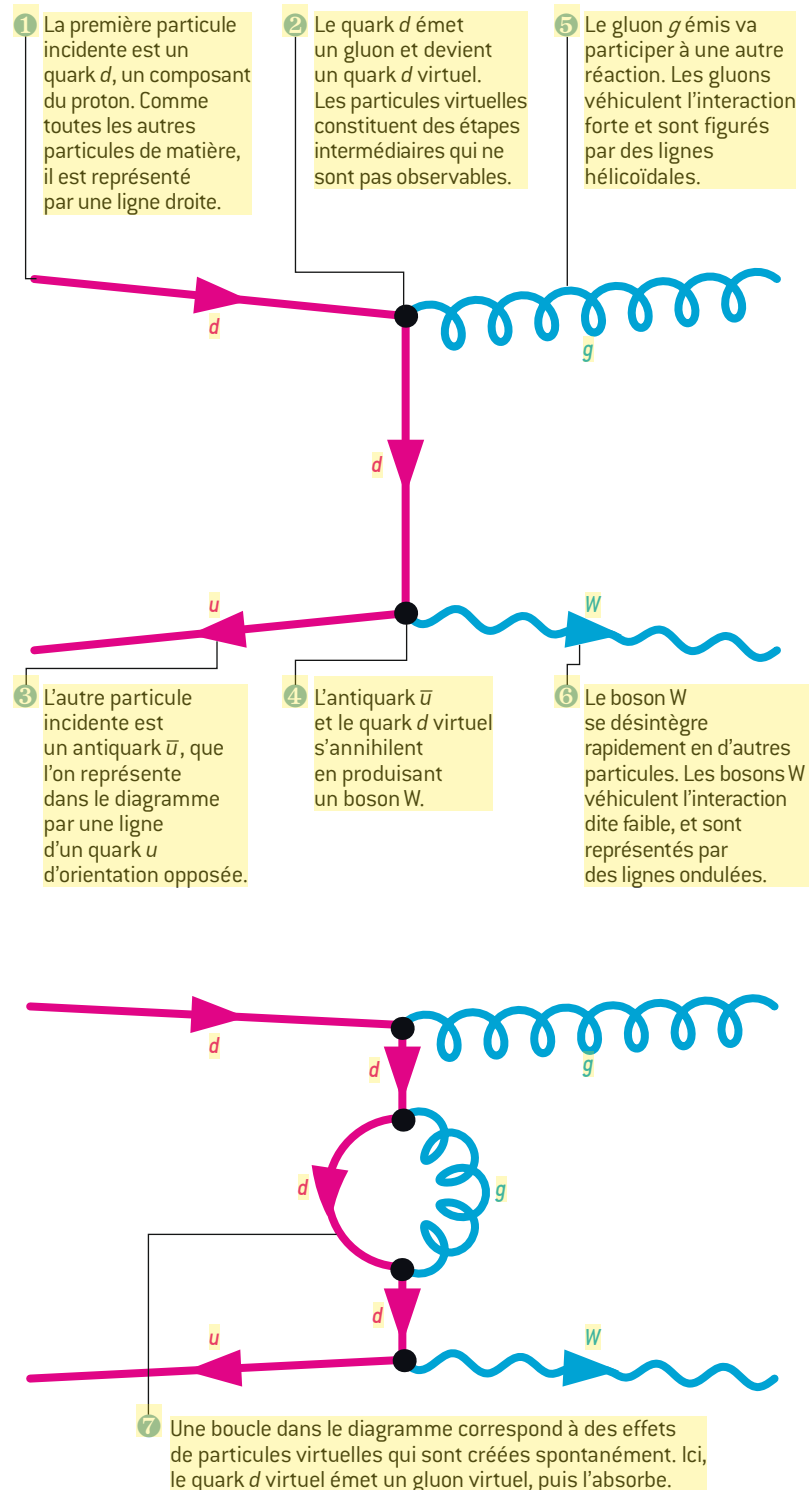
Une alternative fondée sur l'unitarité

Plus grave encore, ce qui était au départ une façon concrète de visualiser le monde microscopique peut au contraire le faire disparaître dans l'obscurité. Le grand nombre de diagrammes et leur complexité font perdre de vue la physique sous-jacente. De façon surprenante, le résultat final de calculs laborieux peut être assez simple. Des diagrammes distincts peuvent se compenser quand on les additionne, et parfois des formules formées de millions de termes finissent par se réduire à un seul. Ces compensations suggèrent que les diagrammes de Feynman ne sont pas les bons outils pour la tâche – c'est un peu comme si on voulait enfoncer un clou avec une plume. Il doit exister une meilleure façon de s'y prendre.

Au fil des ans, les physiciens ont essayé de nombreuses autres techniques. Petit à petit, une ébauche d'alternative aux diagrammes de Feynman s'est dessinée. Notre propre participation à ces efforts a commencé au début des années 1990, quand deux d'entre nous (Z. Bern et D. Kosower) ont montré que la théorie des cordes simplifie les calculs de la chromodynamique quantique en résumant tous les diagrammes de Feynman pertinents à une seule formule. Grâce à ce résultat, nous avons analysé une réaction qui n'avait jamais été comprise en détail auparavant : la diffusion de deux gluons d'où émergent trois gluons, avec une boucle de particules virtuelles. Ce processus était très compliqué pour l'époque, mais il pouvait être entièrement décrit par une formule d'une remarquable simplicité, tenant sur une unique page.

QUAND LES PARTICULES ENTRENT EN COLLISION

Tout autour de nous, sans cesse, les particules élémentaires s'attirent, se repoussent, se heurtent ou s'annihilent. Pour résumer de façon simple le calcul des probabilités des interactions, Richard Feynman a créé une représentation par des diagrammes. Ceux présentés ci-dessous décrivent deux quarks qui interagissent et disparaissent en donnant naissance à un gluon et un boson W. Le diagramme se lit de gauche à droite. Les particules incidentes viennent du côté gauche, les produits de la réaction partent vers la droite.



Zvi Bern, Lance Dixon, David Kosower et Harald Ita

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.

