

idée est assez étrange, et même les spécialistes n'arrivent pas encore à se faire une bonne image de ce que cela signifie. Néanmoins, la propriété de double exemplaire offre une perspective nouvelle pour unifier la gravitation avec les autres interactions fondamentales.

Ce qui rendait la technique de Feynman si convaincante et pratique, c'est qu'elle donne une recette graphique simple pour représenter des calculs très compliqués. Elle résume ces derniers par des diagrammes qui correspondent aux différentes voies d'interaction de deux particules (ou plus) qui entrent en collision (les particules entrantes et sortantes étant fixées). Suivant un ensemble de règles détaillées que Feynman et ses collègues (notamment Freeman Dyson) ont établies, le théoricien calcule la valeur associée à chaque diagramme. La somme de ces valeurs détermine la probabilité du processus considéré.

Mais il y a une difficulté de taille : le nombre de diagrammes à dessiner est énorme, et en principe infini. Dans les applications pour lesquelles Feynman a initialement conçu ses règles, cet inconvénient n'avait pas d'importance. Il étudiait l'électrodynamique quantique, qui décrit les interactions des électrons et des photons. Ces interactions sont régies par un paramètre, le couplage, qui vaut environ $1/137$. La petite valeur de ce couplage garantit que les diagrammes compliqués contribuent peu à la probabilité totale du processus considéré et peuvent donc être ignorés. C'est comme si l'on disait qu'il

est plus probable qu'un usager du métro choisisse un itinéraire simple.

Deux décennies plus tard, les physiciens ont étendu la technique de Feynman à l'interaction forte. Ils ont ainsi créé la « chromodynamique quantique », qui est aussi régie par un couplage, mais sa valeur est très supérieure à celle du couplage électromagnétique. *A priori*, un couplage plus intense augmente le nombre de diagrammes compliqués que les théoriciens doivent inclure dans leurs calculs. Heureusement, à très courte distance ou très haute énergie, comme pour les collisions au LHC, le couplage de l'interaction forte diminue et, pour les collisions les plus simples, les théoriciens peuvent là encore se limiter aux diagrammes de Feynman les plus élémentaires.

Des diagrammes trop problématiques

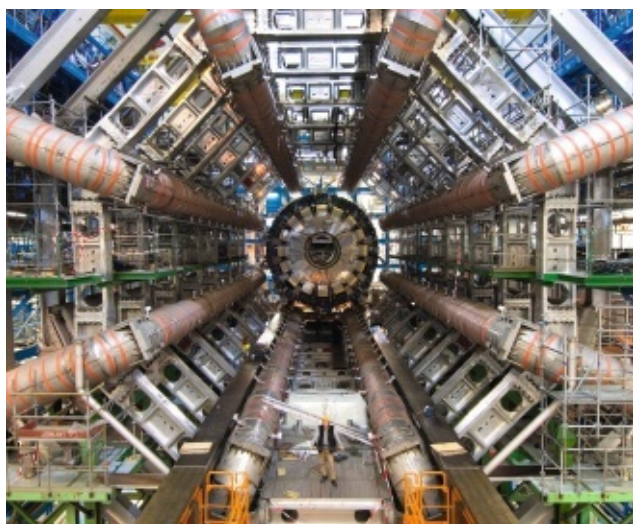
Mais pour les collisions complexes, toute la lourdeur de la technique de Feynman resurgit. On classe les diagrammes de Feynman en fonction du nombre de lignes externes et du nombre de boucles qu'ils contiennent (voir l'encadré page 76). Les boucles représentent une des composantes fondamentales de la théorie quantique : elles mettent en jeu des particules « virtuelles », qui, bien qu'inobservables, ont un effet mesurable. Ces particules obéissent aux principes habituels de la physique, comme la conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement, mais leur

masse peut différer de celle de la particule « réelle » correspondante. Les boucles représentent des cycles de vie éphémère : les particules naissent, puis s'annihilent très peu de temps après. Leur masse détermine leur durée de vie : plus elles sont lourdes, plus cette durée est brève.

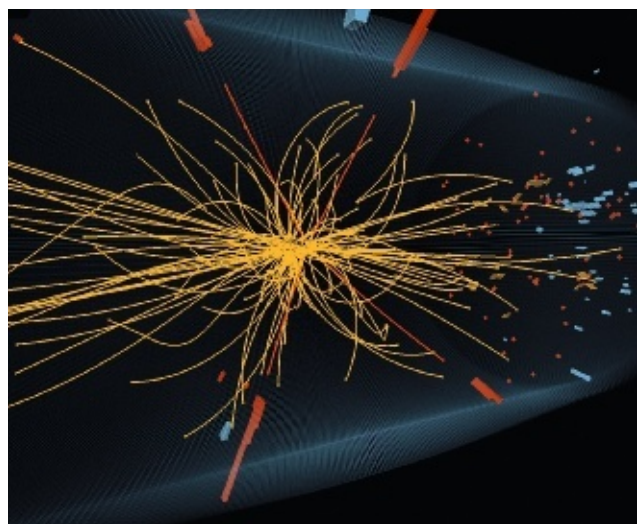
Les diagrammes de Feynman les plus simples ne comportent pas de boucles et sont appelés diagrammes en arbre. En électrodynamique quantique, le diagramme le plus simple de tous représente deux électrons qui se repoussent en échangeant un photon. Les diagrammes se compliquent par l'ajout progressif de boucles. Cette technique de calcul est qualifiée de perturbative. Cela signifie qu'on part d'une estimation approchée (représentée par les diagrammes en arbre) et qu'on l'améliore progressivement en ajoutant des termes *a priori* de plus en plus petits (représentés par les diagrammes à boucles).

Par exemple, le photon échangé entre deux électrons peut disparaître spontanément et se transformer en un électron et un antiélectron virtuels, qui se recombinent très peu de temps après pour redonner naissance à un photon. À mesure que le nombre de leurs particules virtuelles augmente, les diagrammes décrivent les effets quantiques avec une précision croissante.

Toutefois, même les diagrammes en arbre peuvent être un défi. Dans le cas de la chromodynamique quantique, si vous aviez le courage de considérer une collision entre deux gluons incidents qui produit huit gluons sortants, vous devriez



LE DÉTECTEUR ATLAS DU CERN (à gauche, lors de sa construction) enregistre le signal de centaines de particules produites lors de la collision entre deux protons de haute énergie (à droite, une reconstitution



numérique d'une collision dans le détecteur CMS). Les expérimentateurs estiment la probabilité qu'un événement se produise et la comparent avec les calculs théoriques.

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.

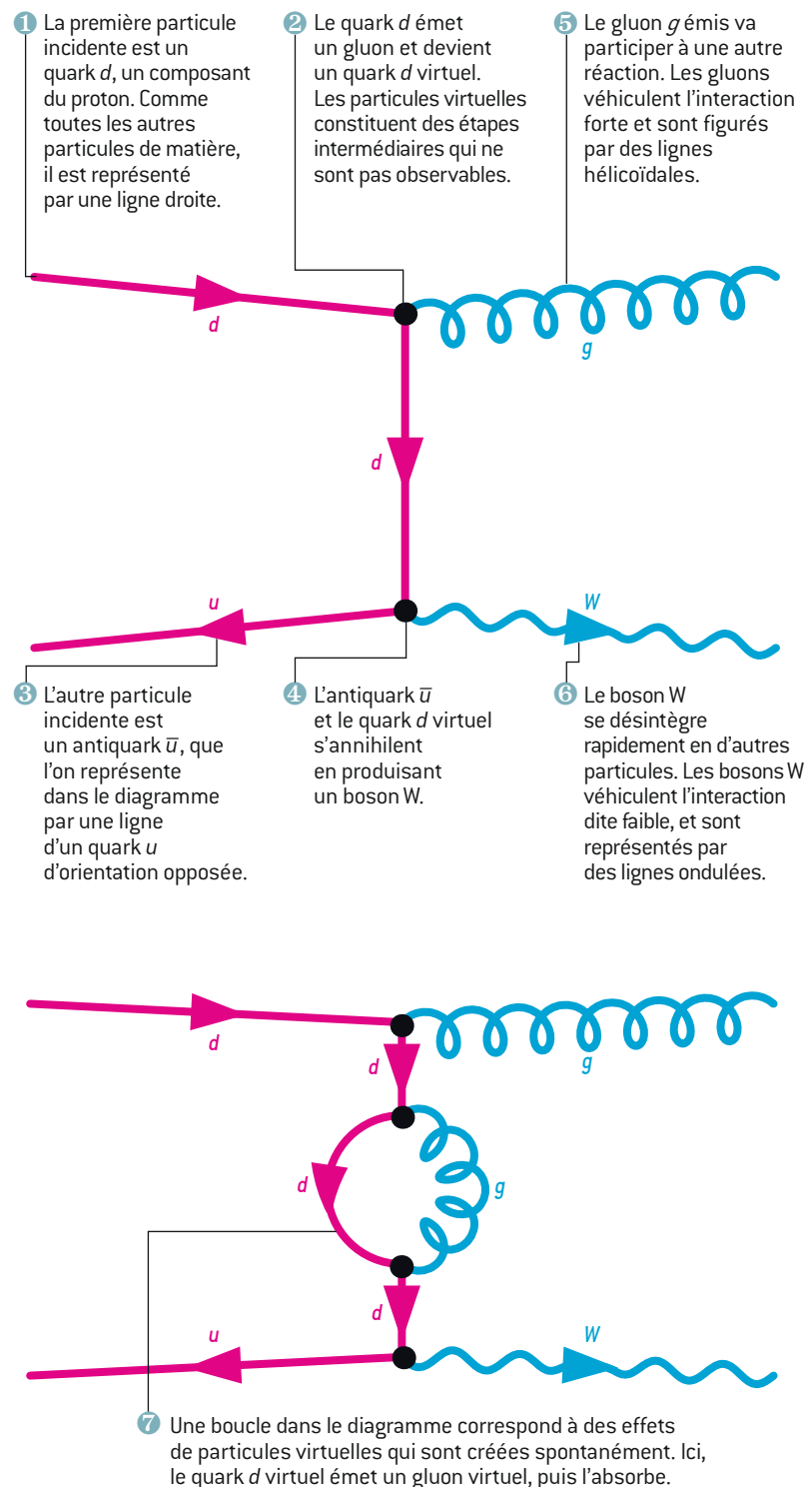
Une alternative fondée sur l'unitarité

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