

une poignée d'auteurs publièrent des calculs perturbatifs d'ordre élevé dans l'esprit de celui de Karplus et N. Kroll. Curieusement, les physiciens utilisèrent plus les diagrammes pour étudier les interactions nucléaires que pour les interactions électromagnétiques des électrons et des photons.

Les diagrammes mal utilisés

Des dizaines de nouvelles particules, tels les mésons (dont on sait maintenant qu'ils sont des particules composites, constituées des quarks et de leurs contreparties en antimatière), apparaissaient dans les accélérateurs de particules. Or les diagrammes n'étaient pas facilement transposables aux particules nucléaires, qui interagissent fortement. Alors que les théoriciens exploitaient la petitesse de la charge de l'électron pour ordonner leurs développements perturbatifs en électrodynamique quantique, la force du couplage entre particules nucléaires (g^2) était beaucoup plus grande, comprise

entre 7 et 57 et non $1/137$. Les théoriciens traitaient la diffusion des particules nucléaires comme ils traitaient la diffusion photon-électron, par une série de diagrammes de Feynman de plus en plus compliqués, chacun faisant intervenir un nombre plus important de vertex. Chaque diagramme d'ordre supérieur faisait intervenir des facteurs g^2 supplémentaires et ces diagrammes dominaient alors les termes d'ordre plus bas. Feynman mit en garde Enrico Fermi en 1951 : « Ne crois à aucun calcul en théorie des mésons qui fasse intervenir des diagrammes de Feynman ! »

En dépit de la mise en garde de Feynman, des dizaines de jeunes théoriciens utilisèrent (et continuent aujourd'hui) des diagrammes pour les forces nucléaires. Plus de la moitié de tous les articles incorporant des diagrammes dans la *Physical Review* entre 1949 et 1954 traitaient de physique nucléaire.

Certains physiciens se servirent des diagrammes pour décrire les collisions dans les nouveaux accélérateurs. Tout à coup dépassés par une faune de particules nucléaires

Faire de la physique avec les diagrammes de Feynman

Les diagrammes de Feynman sont un outil puissant pour calculer en théorie quantique. Dans ce type de calculs, la quantité pertinente est un nombre complexe, ou une « amplitude », dont le carré du module correspond à une probabilité. Par exemple, si $A(t, x)$ représente l'amplitude qu'une particule soit au point x à l'instant t , la probabilité correspondante est alors $|A(x, t)|^2$.

En électrodynamique quantique, les amplitudes sont construites à partir d'un certain nombre d'ingrédients. Pour illustrer le propos, nous pouvons par exemple noter :

- l'amplitude associée au trajet d'un électron de x à y : $B(x, y)$;
- l'amplitude associée au trajet d'un photon de x à y : $C(x, y)$;
- l'amplitude associée à l'interaction de l'électron et du photon : eD .

Feynman introduisit ses diagrammes pour garder la trace de toutes ces possibilités. Ici e représente la charge de l'électron, le paramètre caractérisant l'intensité de l'interaction des photons et des électrons.

Les règles pour utiliser ces diagrammes sont simples :

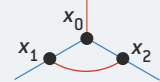
- à chaque vertex, deux lignes électroniques rencontrent une ligne de photon ;
- on dessine tous les diagrammes topologiquement distincts correspondant au processus d'interaction envisagé ;
- on construit ensuite l'expression mathématique correspondant à chaque diagramme : on substitue un facteur $B(x, y)$ pour chaque ligne d'électrons virtuels, $C(x, y)$ pour chaque ligne de photons virtuels, eD pour chaque vertex, et on intègre sur tous les points faisant intervenir des particules virtuelles. Comme le facteur e est petit, ($e^2 \sim 1/137$), les diagrammes faisant intervenir peu de vertex contribuent plus à l'amplitude globale que les diagrammes plus complexes. Les physiciens calculent ainsi une approximation de l'amplitude A , avec une série de termes de plus en plus compliqués. Par exemple, considérons la façon dont un électron interagit avec un champ électromagnétique. D'un point de vue quantique, un tel champ est décrit comme un ensemble de photons. Dans le cas le plus simple, l'électron (la ligne en bleu) diffusera sur un seul photon (ligne rouge) en un seul vertex (le cercle noir au point x_0) :

$$A_{(1)} = eD$$

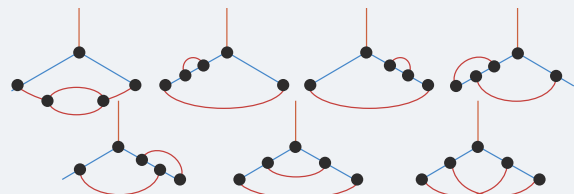
Seules des particules réelles apparaissent dans ce diagramme, donc la seule contribution à l'amplitude de probabilité provient du vertex. Mais de nombreux

autres événements peuvent perturber le malheureux électron. Au niveau suivant de complexité, l'électron incident peut envoyer un photon virtuel, avant d'interagir avec le photon réel puis de réabsorber le photon virtuel :

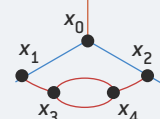
$$A_{(2)} = e^3 \int D B(1,0) D B(0,2) D C(1,2)$$



Dans ce diagramme, les lignes d'électrons et de photons se rencontrent en trois points, et par conséquent l'amplitude pour cette contribution est proportionnelle à e^3 (l'intégrale porte sur les coordonnées des points x_1 et x_2). Des choses encore plus compliquées peuvent arriver. Au niveau suivant de complexité, sept diagrammes de Feynman distincts entrent en ligne de compte :



On traduit le diagramme en haut à gauche en termes de son amplitude associée :



$$A_{(3)}^a = e^5 \int D B(1,0) D B(0,2) D C(1,3) D B(3,4) D B(4,3) D C(4,2)$$

L'amplitude totale pour la probabilité de diffusion sur le champ électromagnétique s'écrit :

$A = A_{(1)} + A_{(2)} + A_{(3)}^a + A_{(3)}^b + \dots$, la probabilité d'interaction étant égale à $|A|^2$.

Robert Karplus et Norman Kroll ont mené pour la première fois ce type de calcul en utilisant les diagrammes de Feynman en 1949. Huit ans plus tard, plusieurs autres physiciens ont trouvé des erreurs algébriques dans leurs calculs, dont la correction n'affectait que le cinquième chiffre après la virgule du résultat original. Par un calcul entamé dans les années 1980, Tom Kinoshita (à l'Université Cornell) est allé jusqu'aux diagrammes contenant huit vertex et a pris en compte 891 diagrammes de Feynman distincts. Le calcul est précis jusqu'à la treizième décimale.

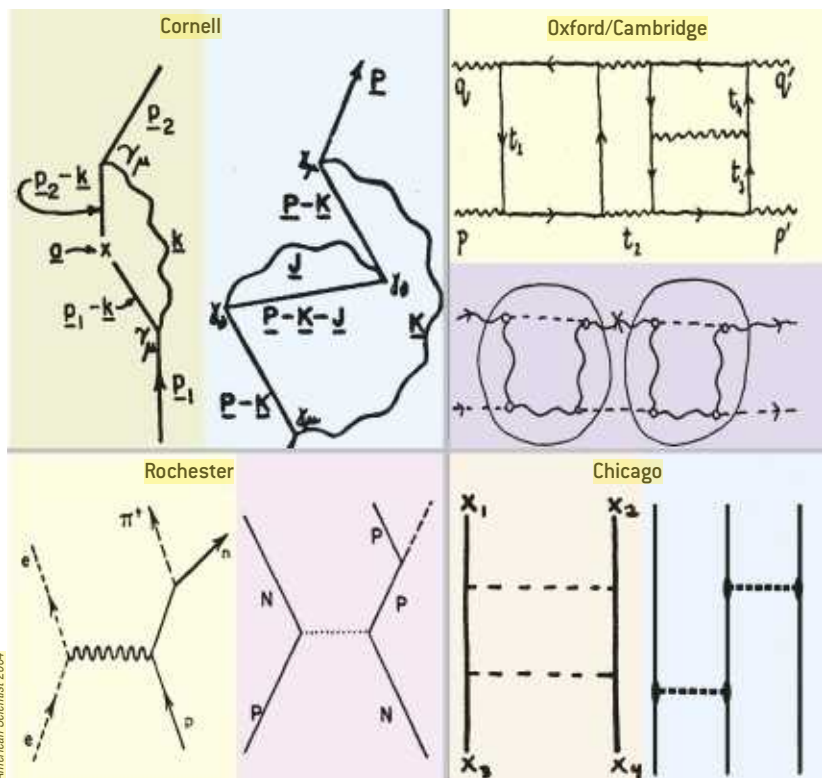
inattendues qui surgissaient des grands accélérateurs, les théoriciens faisaient appel aux diagrammes pour suivre quelle particule participait à quelle interaction, un système de gestion plus proche de la classification botanique que du calcul perturbatif. D'autres théoriciens les utilisaient pour distinguer les effets physiques en compétition : si un diagramme faisait intervenir deux vertex de force nucléaire (g^2), mais seulement un vertex de force électromagnétique (e), alors la contribution de ce processus physique serait plus importante qu'un diagramme avec deux facteurs e et un seul facteur g même si aucun des deux diagrammes ne pouvait être formellement évalué. Au début des années 1960, un groupe gravitant autour de Geoffrey Chew à Berkeley poussa les diagrammes un cran plus loin. Ils tirèrent les diagrammes du cadre que F. Dyson avait défini, pour les utiliser comme base d'une nouvelle théorie des particules nucléaires.

Chacun son style de diagramme

Pendant les années 1950 et 1960, les physiciens ont malmené le cordon ombilical reliant les diagrammes aux règles d'utilisation de F. Dyson. Les physiciens ont bricolé les diagrammes, en ajoutant un nouveau type de ligne par-ci, en abandonnant une convention par-là, en adoptant d'autres conventions d'étiquetage, pour faire ressortir des propriétés qui leur semblaient pertinentes. Ces « pastiches » n'apparaissaient cependant pas aléatoirement, mais selon les besoins de tel ou tel groupe de physiciens. Des écoles se créaient lorsque des mentors et leurs étudiants aménageaient les diagrammes afin de mieux coller à leurs besoins en calcul. Les diagrammes dessinés par les étudiants en thèse à Cornell commencèrent à se ressembler, tout en ayant de moins en moins de similarité avec ceux des étudiants de Colombia, de Rochester ou de Chicago.

Les théoriciens adaptaient les diagrammes de Feynman à l'étude des particules en interaction forte, alors que les calculs perturbatifs y étaient impossibles. Un physicien compara cet empressement à utiliser les diagrammes de Feynman en physique nucléaire à « l'engouement pour la crâniométrie de Franz Gall à la mode au XIX^e siècle ». Pendant le quart de siècle qui suivit l'introduction des diagrammes par Feynman, les physiciens ont griffonné avec frénésie des diagrammes, ce qui conduisit un autre prix Nobel, Philip Anderson, à se demander si lui et ses collègues n'avaient pas subi un lavage de cerveau de la part de Feynman. Pour des générations de théoriciens, formés depuis le début à aborder tout calcul à l'aide de cet outil de choix, les diagrammes de Feynman venaient avant toute chose.

L'histoire de la diffusion des diagrammes de Feynman témoigne de la pédagogie nécessaire pour élaborer les outils de la recherche et enseigner aux utilisateurs leur mise en œuvre. Des contacts personnels et un mentor individuel sont restés le mode de diffusion prédominant des années après la publication des règles d'utilisation des diagrammes. Les travaux personnels que les postdoctorants donnaient à leurs étudiants n'exigeaient souvent pas beaucoup plus que le dessin des diagrammes de Feynman appropriés, sans même devoir traduire le diagramme en son expression mathématique. Ces étudiants appre-



American Scientist 2004

5. Les mentors et les étudiants ont utilisé de nouvelles manières de dessiner les diagrammes. Des « airs de famille » apparaissent sur ces paires. Dans chaque cas, le premier diagramme (à gauche ou en haut) provient d'un instructeur, alors que le second est exécuté par un élève.

naient que tout calcul devait être précédé par le tracé d'un diagramme de Feynman.

Entre-temps, des traditions locales émergèrent et firent apparaître des diagrammes ayant de moins en moins de points en commun avec les instructions originales de Dyson. Ses dérivations *ab initio* et ses règles strictes avaient guidé les étudiants de N. Kroll à Colombia, par exemple, mais étaient considérées comme superflues par les étudiants à Rochester et complètement ignorées par les élèves de G. Chew à Berkeley.

Il demeure donc impossible de séparer la pratique de la recherche de la façon dont les scientifiques ont été formés. Les diagrammes de Feynman ne se trouvent pas dans la nature ; de plus, les physiciens théoriciens ne naissent pas tels, ils sont le produit de leur formation. Pendant la décennie des années 1950, diagrammes et utilisateurs furent formés par un même procédé pédagogique, de postdoctorant à postdoctorant, de mentor à disciple.

David Kaiser enseigne à l'Institut de technologie du Massachusetts (MIT). Cet article est tiré d'un livre sur la diffusion des diagrammes de Feynman dans la physique d'après-guerre, à paraître chez Chicago University Press. Nous remercions la revue *American Scientist* de nous en avoir autorisé la publication.

F. DYSON, *The radiation theories of Tomonaga, Schwinger and Feynman*, in *Physical Review*, vol. 75, pp. 486-502, 1949.

R. FEYNMAN, *The theory of positrons*, in *Physical Review*, vol. 76, pp. 749-759, 1949.

R. FEYNMAN, *Space-time approach to quantum electrodynamics*, in *Physical Review*, 76 : 769-789, 1949.

Auteur & Bibliographie