



Archives Emilio Segre, Institut américain de physique

4. Richard Feynman et d'autres physiciens s'étaient réunis en juin 1947 sur l'île de Shelter, dans l'État de New York, quelques mois avant la rencontre à l'hôtel de Pocono. Debout à gauche, Willis Lamb et John Wheeler. Assis, de gauche à droite, Abraham Pais, Richard Feynman, Hermann Feshbach et Julian Schwinger. Sur la photographie de droite,



Victor Weisskopf (à gauche) et Freeman Dyson sont en route pour Copenhague en 1952. Les démonstrations et les explications de F. Dyson ont montré aux physiciens comment utiliser les diagrammes de Feynman, alors que les postdoctorants formés pendant cette période à l'*Institute for Advanced Studies* de Princeton en ont démocratisé l'utilisation.

incluait une liste d'instructions pour le tracé des diagrammes et expliquait comment il fallait écrire l'expression mathématique associée. F. Dyson établit aussi comment les infinis pouvaient être éliminés de n'importe quel calcul, quelle que soit sa complexité (Tomonaga, Schwinger et Feynman n'avaient abordé que le premier terme de correction perturbative et ce dans des cas particuliers).

Dyson convertit l'*Institute for Advanced Studies* de Princeton en usine à diagrammes de Feynman. Pour comprendre comment, il faut considérer les changements dans la formation postdoctorale pendant cette période. Avant la Seconde Guerre mondiale, seule une petite fraction des physiciens qui finissaient leur thèse aux États-Unis poursuivait une formation postdoctorale ; il était encore courant à l'époque de prendre un poste soit dans l'industrie, soit à l'Université juste après la thèse. En physique théorique, ceux qui poursuivaient des études après la thèse s'expatriaient généralement vers les centres européens. Ce n'était qu'à Cambridge, Copenhague, Göttingen ou Zurich que les théoriciens pouvaient « apprendre la musique », pour reprendre l'expression célèbre de I. Rabi, au lieu d'annoncer le « livret » de la recherche. À leur retour, un bon nombre de ces mêmes physiciens américains, parmi lesquels Robert Oppenheimer, et Rabi, se consacrèrent à la formation des jeunes théoriciens.

L'*Institute for Advanced Studies*, sous la houlette d'Oppenheimer, devint l'un des centres clés pour la formation des jeunes théoriciens. Après avoir dirigé le laboratoire de Los Alamos pendant la guerre, Oppenheimer quitta son poste de Berkeley en 1947 pour prendre la tête de l'Institut, en partie afin de se rapprocher de Washington où il était consultant, et transforma l'Institut en un « hôtel intellectuel » des physiciens théoriciens.

F. Dyson arriva à l'automne 1948 et se joignit à une cohorte de 11 autres jeunes théoriciens. Un des nouveaux bâtiments n'avait pas été achevé dans les temps et le petit groupe de postdoctorants passa l'essentiel du semestre entassé dans une même pièce. Ces conditions de vie débouchèrent sur des collaborations intenses sous la houlette de F. Dyson qui forma ses pairs aux calculs à l'aide de dia-

grammes. Un des calculs les plus célèbres fut publié par deux collègues de F. Dyson à l'Institut, Robert Karplus et Norman Kroll. Ils menèrent jusqu'à l'ordre e^4 le calcul du moment magnétique de l'électron, qui caractérise l'interaction d'un électron avec un champ magnétique externe. C'était un calcul monumental faisant intervenir une longue liste de diagrammes de Feynman compliqués, et les postdoctorants calculèrent qu'un électron devait avoir un moment magnétique de 1,001147 au lieu de 1 (dans les unités appropriées), résultat dont la précision à six chiffres confirmait les dernières mesures expérimentales. Karplus et N. Kroll ont montré ainsi que les diagrammes de Feynman permettaient des calculs longtemps jugés impossibles.

Plus des quatre cinquièmes des articles qui utilisent des diagrammes de Feynman dans la *Physical Review*, entre 1949 et 1954, ont été soumis directement par les postdoctorants de Princeton, ou par des étudiants qu'ils avaient formés dans leur nouveau poste. La vaste majorité des 114 auteurs qui utilisèrent les diagrammes pendant cette période le firent parce qu'ils y avaient été initiés soit par F. Dyson, soit par un de ses nouveaux apprentis. Des années plus tard, Schwinger se plaignit que les diagrammes de Feynman avaient « amené le calcul aux masses » ; les diagrammes lui semblaient un instrument « de pédagogie, certainement pas de la physique ».

Les diagrammes ne firent pas leur nid partout. Il fallait bien plus que les résultats de recherche publiés ou des ouvrages pédagogiques pour bien utiliser les diagrammes. Les clés de la réussite furent le travail des mentors et la mobilité des postdoctorants. La technique des diagrammes se répandit aussi au Japon et en Grande-Bretagne, alors que le durcissement de la Guerre froide étouffa, jusque dans les années 1950 (et les rencontres « Atomes pour la paix »), leur diffusion en Union soviétique.

En dépit des commentaires désobligeants de Schwinger, l'efficacité des diagrammes pour les calculs perturbatifs en électrodynamique quantique était indéniable. Au vu des progrès qu'ils autorisaient, on aurait pu penser que leur utilisation se généraliserait vite : ce ne fut pas le cas. Seule

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 :

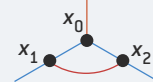
- à chaque vertex, deux lignes électroniques rencontrent une ligne de photon ;
- on dessine tous les diagrammes topologiquement distincts correspondant au processus d'interaction envisagé ;
- on construit ensuite l'expression mathématique correspondant à chaque diagramme : on substitue un facteur $B(x, y)$ 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) :

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

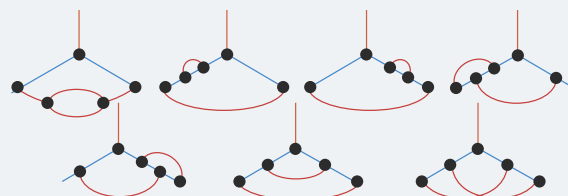
Seules des particules réelles apparaissent dans ce diagramme, donc la seule contribution à l'amplitude de probabilité provient du vertex. Mais de nombreux

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 :

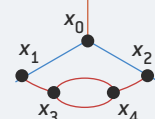
$$A_{(2)} = e^3 \int D B(1,0) D B(0,2) D C(1,2)$$



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.