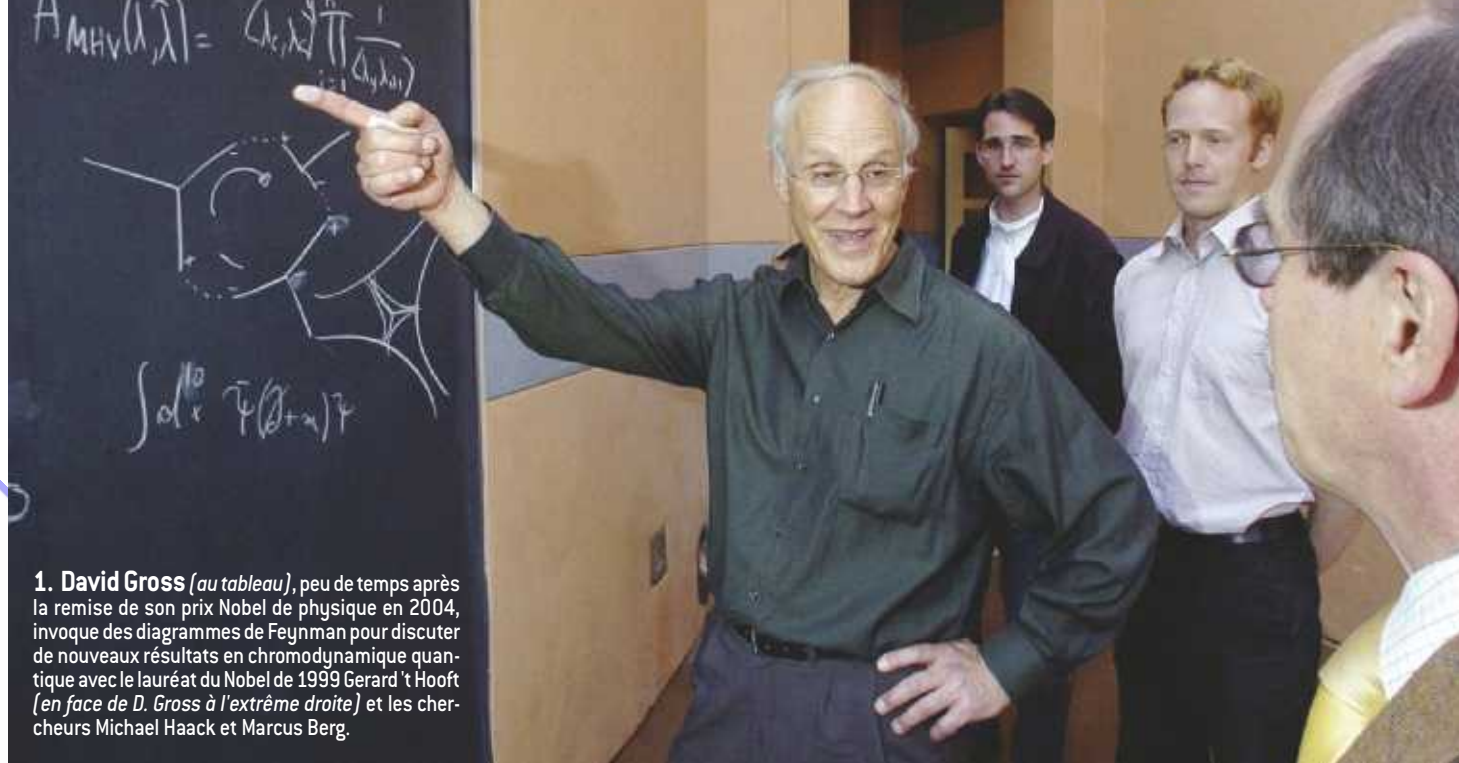




1. David Gross (au tableau), peu de temps après la remise de son prix Nobel de physique en 2004, invoque des diagrammes de Feynman pour discuter de nouveaux résultats en chromodynamique quantique avec le lauréat du Nobel de 1999 Gerard 't Hooft (en face de D. Gross à l'extrême droite) et les chercheurs Michael Haack et Marcus Berg.

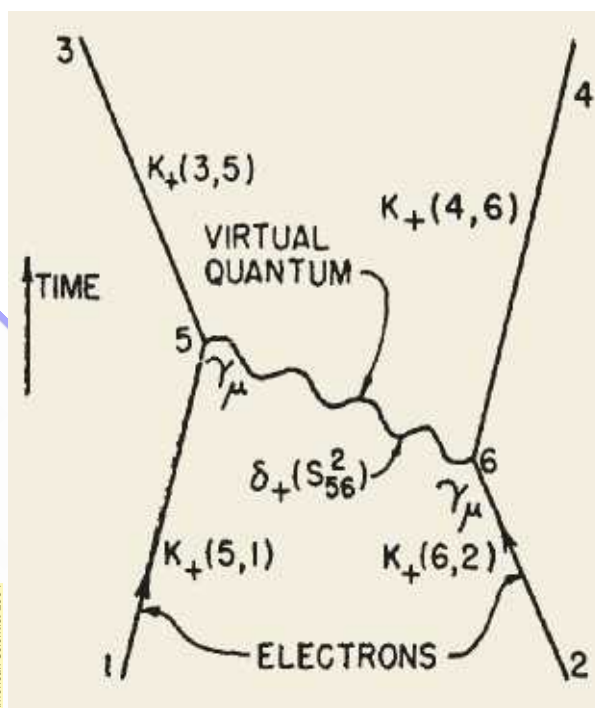
toutefois bien difficile... Un étudiant de Heisenberg avait tenté le calcul de l'interaction de deux électrons en e^4 dans les années 1930 et s'était noyé dans des centaines de termes. Chacun s'étendait sur quatre ou cinq lignes d'algèbre. En raison des difficultés liées aux infinis et à la lourdeur des calculs, l'électrodynamique quantique était devenue, dans les années 1940, un casse-tête inextricable.

Le remède de Feynman

Lors du séminaire de Pocono, Feynman annonça à ses collègues théoriciens que ses diagrammes permettaient de se frayer un chemin dans les méandres des calculs. Dans l'un de ses premiers exemples, il examina la diffusion d'un électron par un autre électron. Il dessina un diagramme similaire à celui qui fut reproduit dans son premier article sur le sujet (voir la figure 2 ci-contre). Ce diagramme représentait des événements en deux dimensions : une dimension spatiale sur l'axe horizontal, le temps sur l'axe vertical.

Le graphe dessiné correspond à l'une des expressions mathématiques – il y en a une infinité – que l'on additionne pour calculer la probabilité de diffusion des deux particules l'une sur l'autre en fonction de leurs caractéristiques (quantités de mouvement, spins, etc.). Il s'agit ici de l'expression mathématique la plus simple et on l'interprète physiquement comme la propagation de deux électrons qui échangent un seul photon. Ses deux lignes droites brisées sont associées aux deux électrons, tandis que la ligne ondulée est associée au photon virtuel. Chaque élément du diagramme (chaque demi-droite, le segment de ligne ondulée, les deux points de croisement ou « vertex ») représente un facteur mathématique, et le diagramme lui-même représente une expression compliquée – une intégrale (ici à huit dimensions) où la fonction à intégrer est le produit des facteurs associés aux éléments du diagramme.

Dans un tel diagramme, chaque vertex fait intervenir la valeur e de la charge de l'électron. Le diagramme dessiné par Feynman est donc d'ordre e^2 ; c'est l'ordre le plus bas, car l'échange de plus d'un photon introduit des facteurs e



American Scientist 2004

2. Diffusion électron-électron décrite par l'un des plus simples des diagrammes inventés par Richard Feynman. Ce diagramme transpose la vision quantique de la répulsion de deux particules de même signe, ici deux électrons. En physique classique, l'interaction se fait à travers le champ électromagnétique du premier électron qui agit sur le second et réciproquement ; en physique quantique, le champ est véhiculé par des photons. Un électron 1 (segment en bas à droite) émet un photon virtuel (ligne ondulée) qui frappe alors un second électron 2 (ligne continue en bas à droite). La trajectoire rectiligne du premier électron est d'angle différent à cause du recul lors de l'émission du photon : la trajectoire du second électron est modifiée par l'impact du photon. Comme le suggérait le titre *Approche spatio-temporelle* de l'article qui accompagnait les diagrammes, Feynman dessina à l'origine des diagrammes où les dimensions étaient l'espace et le temps. Ici, l'axe horizontal représente l'espace. Explicitons les notations : $K(5,1)$ est la probabilité que l'électron 1 se déplace des points 1 à 5, $K(6,2)$ la probabilité que l'électron 2 se déplace de 2 à 6. $K(3,5)$ et $K(4,6)$ s'interprètent similairement. $\delta_+(s_{56}^2)$ est la probabilité qu'un photon virtuel se déplace de 5 à 6. γ_μ est un facteur lié au spin de l'électron.

additionnels. La valeur de ce graphe était une bonne approximation de la probabilité de diffusion des deux électrons. Cependant, Feynman et son auditoire savaient que les deux électrons peuvent échanger un nombre arbitraire de photons.

Feynman utilisa ses diagrammes pour décrire ces différentes possibilités. Par exemple, les électrons avaient neuf façons différentes d'échanger deux photons, chaque échange faisant intervenir quatre vertex (pour lequel le terme mathématique correspondant était multiplié par un facteur e^4 et non e^2).

La différence avec le couplage à un seul photon était que la plupart des intégrales correspondant aux diagrammes à deux photons divergeaient (devenaient infinies), comme l'avaient vu les physiciens pendant deux décennies. Feynman montra comment certains infinis problématiques étaient supprimés par des astuces de calcul, qu'il avait pour certaines trouvées, et pour d'autres empruntées (une procédure que les physiciens baptisèrent renormalisation). L'ordre des opérations avait son importance : Feynman partait des diagrammes pour écrire les intégrales pertinentes, et ensuite seulement modifiait ces intégrales pour éliminer les infinis.

Avec ses diagrammes, Feynman, qui avait résolu un vieux défi, espérait un triomphe ou au moins un bon accueil. Or le sort s'acharna contre Feynman durant le colloque. D'abord, sa présentation succédait à une présentation marathon du prodige adulé de Harvard, Julian Schwinger. Schwinger avait élaboré différentes techniques (sans diagrammes) pour supprimer les infinis des calculs de l'électrodynamique quantique, et les auditeurs étaient rivés à leur siège, ne s'arrêtant que brièvement pour le repas, pendant que Schwinger calli-

graphiait sa démonstration. Au contraire, la présentation de Feynman fut rapide et brouillonne : personne ne suivait ce que Feynman faisait. Il dut subir de nombreuses interruptions de Niels Bohr, Paul Dirac ou Edward Teller, pour qui les diagrammes contredisaient les principes de la mécanique quantique selon lesquels on ne peut localiser exactement une particule. D'autres physiciens exaspérés exigeaient des règles claires gouvernant l'utilisation des diagrammes. Feynman quitta le colloque déçu, voire déprimé.

La frustration de Feynman à Pocono a souvent été commentée ; ce qui reste étonnant est que l'incompréhension a perduré. Même des amis proches et des collègues de Feynman avaient du mal à comprendre et à utiliser ces diagrammes. Des experts et collègues de Feynman, tels que Hans Bethe, ne parvenaient pas à saisir ce que Feynman faisait et lui demandaient constamment de les guider.

D'autres théoriciens qui avaient assisté au colloque de Pocono, dont Robert Marshak de Rochester, ne savaient utiliser ces nouvelles techniques et demandaient à Feynman de mener les calculs à leur place. En 1953, cinq bonnes années après que Feynman a inventé sa nouvelle technique, un des grands théoriciens de Standford, Leonard Schiff, écrivait, dans une lettre de recommandation, qu'un étudiant avait l'extraordinaire talent de bien manier les diagrammes !

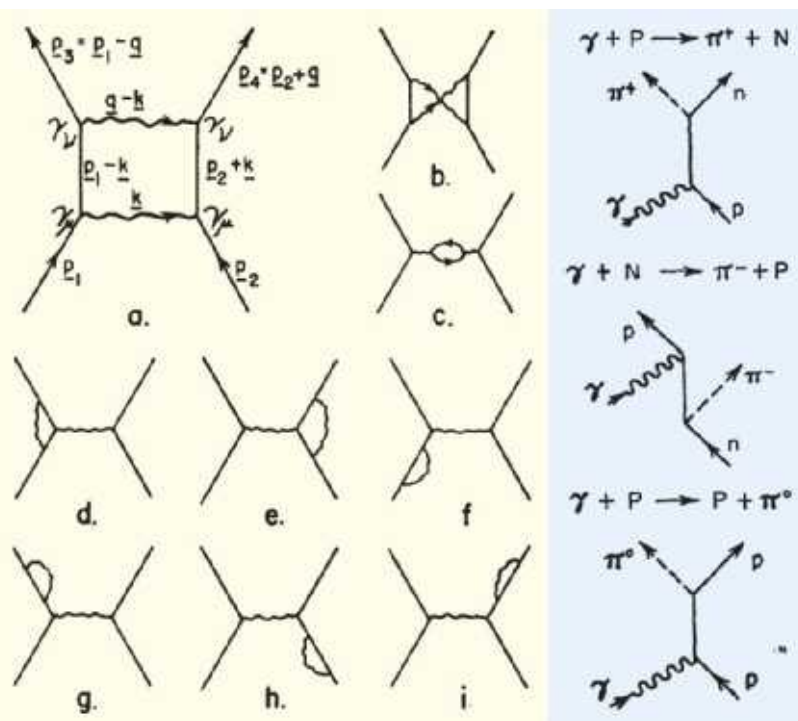
Feynman est grand, et Dyson est son prophète

À force de persévérance, les diagrammes se sont frayé un chemin, en particulier grâce à Freeman Dyson, qui avait étudié les mathématiques à Cambridge avant de partir pour les États-Unis. Il arriva à Cornell à l'automne 1947 pour étudier avec Hans Bethe. Il y rencontra Feynman, juste au moment où celui-ci élaborait sa nouvelle approche de l'électrodynamique quantique et ils discutèrent longuement des diagrammes. Ce dialogue se poursuivit lorsqu'ils traversèrent le pays en voiture l'été suivant, quelques mois après la présentation de Pocono.

Plus tard, Dyson assista à une école d'été en physique théorique à l'Université du Michigan et il eut l'occasion de parler à Schwinger comme il avait parlé à Feynman. À la fin de l'été, Dyson prit un poste à l'Institut des études avancées à Princeton, dans le New Jersey.

Peu de temps après son arrivée à Princeton, F. Dyson soumit un article à la *Physical Review* qui comparait les méthodes de Feynman et de Schwinger. (Il analysait aussi les méthodes d'un théoricien japonais, Tomonaga Sin-iti, qui avait travaillé sur ce problème pendant et après la guerre ; Schwinger était arrivé indépendamment à une approche très similaire à celle de Tomonaga.) F. Dyson démontrait que les trois démarches étaient mathématiquement équivalentes. Cet article de F. Dyson, ainsi qu'un autre plus conséquent l'hiver suivant, furent tous deux publiés quelques mois avant les propres articles de Feynman. Aussi, des années après la publication des articles de Feynman, la paire d'articles de F. Dyson était citée plus souvent que ceux de Feynman.

F. Dyson y justifiait les règles d'utilisation des diagrammes, et comblait les lacunes de l'exposé de Feynman au séminaire de Pocono ; il proposait un mode d'emploi qui



3. Cet ensemble des diagrammes (à gauche) où sont répertoriées les différentes façons dont deux électrons échangent deux photons virtuels fut ajouté par Feynman à son article princeps sur l'utilisation des diagrammes. Pour comptabiliser les interactions des particules élémentaires, les physiciens utilisèrent des diagrammes de Feynman (à droite) même lorsque les calculs perturbatifs n'étaient pas légitimes.