

Un outil universel de la physique

Les diagrammes inventés par Richard Feynman ont sorti l'électrodynamique quantique d'une impasse calculatoire. Ils ont bouleversé la pratique de la physique des particules et de bien d'autres domaines.

David Kaiser

Le légendaire physicien George Gamow expliquait un des avantages de son métier : il pouvait s'allonger sur un divan et fermer les yeux, personne ne savait s'il travaillait ou dormait. La facétie fait sourire, mais c'est une mauvaise représentation du travail des théoriciens dont la recherche n'est pas constituée de pensées abstraites déconnectées de la pratique calculatoire.

Depuis le milieu du XX^e siècle, les physiciens théoriciens utilisent des « hiéroglyphes », dénommés diagrammes de Feynman, qui les aident à effectuer des calculs difficiles. Toutefois, les physiciens ont dû apprendre à s'en servir.

Le physicien théoricien américain Richard Feynman inventa ces diagrammes à la fin des années 1940 afin de simplifier les calculs quantiques des interactions électromagnétiques (électrodynamique quantique ou QED pour *Quantum electrodynamics*). Ces diagrammes intéressèrent vite les spécialistes du noyau atomique et de la physique des particules, puis les spécialistes du problème à n corps en théorie de la matière condensée. À la fin des années 1960, des physiciens commencèrent à les utiliser pour mener des calculs en théorie de la gravitation. Les diagrammes de Feynman ont amélioré la pratique calculatoire des physiciens, tout comme les calculs par ordinateur ont permis le décryptage du génome.

Les physiciens englués

Feynman présenta ses diagrammes novateurs lors d'un colloque organisé dans un hôtel des Pocono Mountains en Pennsylvanie au printemps 1948. Vingt-huit théoriciens s'y étaient réunis pendant plusieurs jours pour d'intenses discussions et la plupart travaillaient à des problèmes d'électrodynamique quantique « non triviaux », selon l'euphémisme de l'époque.

En électrodynamique quantique, les électrons et les autres particules fondamentales échangent des photons virtuels (des particules « fantômes » de lumière) qui véhiculent l'interaction électromagnétique. Une particule virtuelle emprunte son énergie au vide pour commencer une existence éphémère à

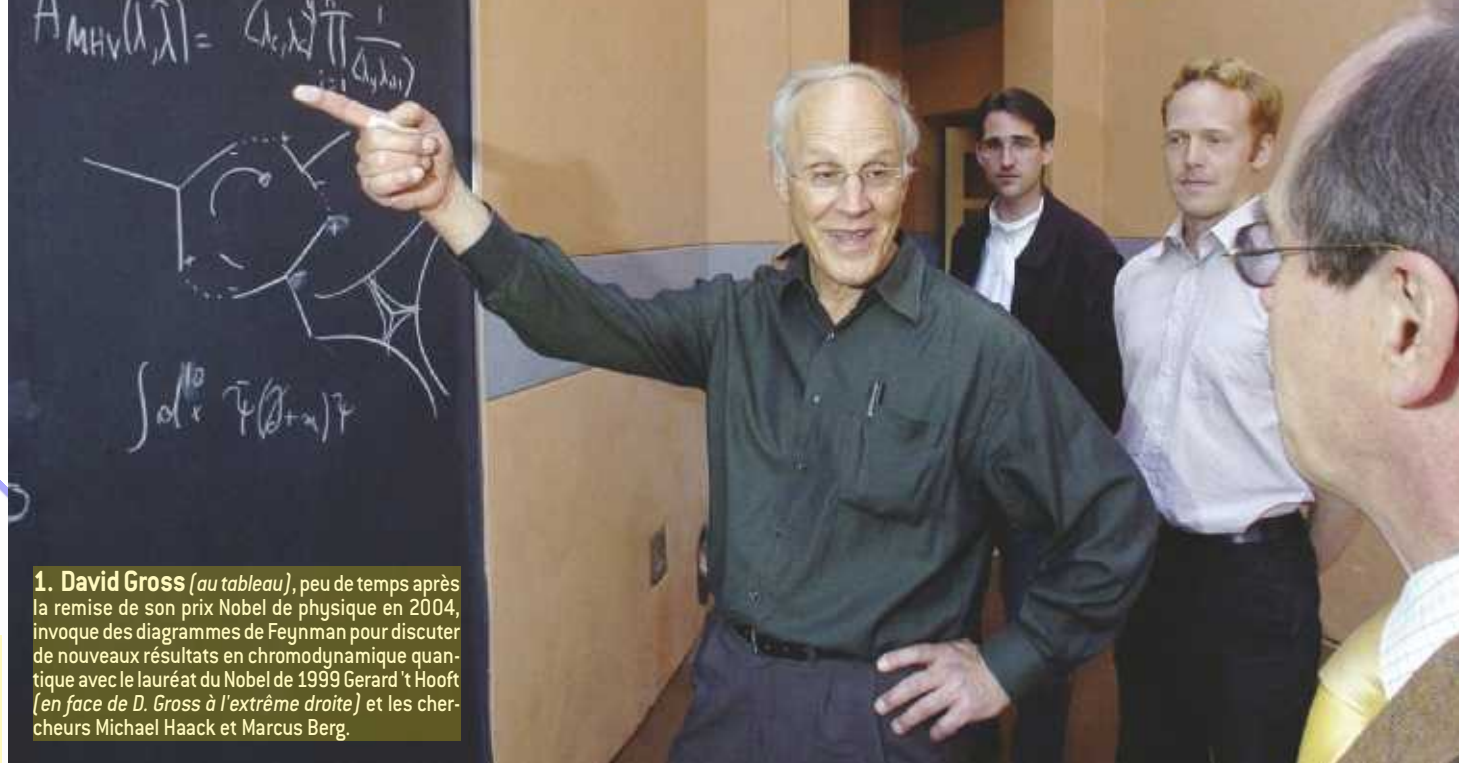
partir de rien. Ces particules virtuelles restituent l'énergie empruntée et disparaissent en un temps très court déterminé par le principe d'incertitude de Heisenberg.

Deux difficultés principales sabordaient les efforts des physiciens. D'abord, ils savaient, depuis le début des années 1930, que l'électrodynamique quantique conduisait à des quantités infinies. Les physiciens répondaient à des questions élémentaires (par exemple : quelle est la probabilité pour que deux électrons se rencontrent ?) par des approximations acceptables du premier ordre ; hélas, dès qu'ils tentaient de pousser leurs calculs à une précision supérieure, la validité des calculs s'effondrait. La source de la difficulté était le photon virtuel, susceptible d'emprunter une quantité quelconque d'énergie, voire une quantité infinie, tant qu'il la restituait vite : des quantités infinies surgissaient.

Le second problème était le formalisme, d'une insupportable lourdeur, un cauchemar algébrique où il fallait combiner les contributions des différents termes. Les électrons pouvaient interagir en échangeant un nombre arbitraire de photons : plus ils échangeaient de photons, plus les expressions, qu'il fallait sommer, devenaient inextricables.

Tous les espoirs n'étaient cependant pas perdus : Heisenberg, Pauli, Dirac et les autres architectes de l'électrodynamique quantique pensaient qu'ils pouvaient simplifier ce calcul compliqué, en raison de la faible valeur de la charge e de l'électron (e^2 est approximativement égal à $1/137$ dans des unités adéquates). À chaque fois que l'on introduit un nouveau photon échangé par une paire d'électrons, on introduit un facteur e^2 . Un scénario où les électrons n'échangent qu'un photon comporte donc un facteur e^2 , celui où les électrons échangent deux photons ne pèse que d'un facteur e^4 , beaucoup plus petit. Ce dernier événement ne contribuerait au calcul total qu'un centième de l'échange d'un seul photon. Le terme correspondant à l'échange de trois photons serait un dix millième de fois plus petit ; aussi les calculs pourraient-ils être tronqués après quelques termes.

Ce calcul est une méthode dite perturbative : on ne conserve que les premiers termes, car les contributions des suivants sont supposées insignifiantes. Le calcul est



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.

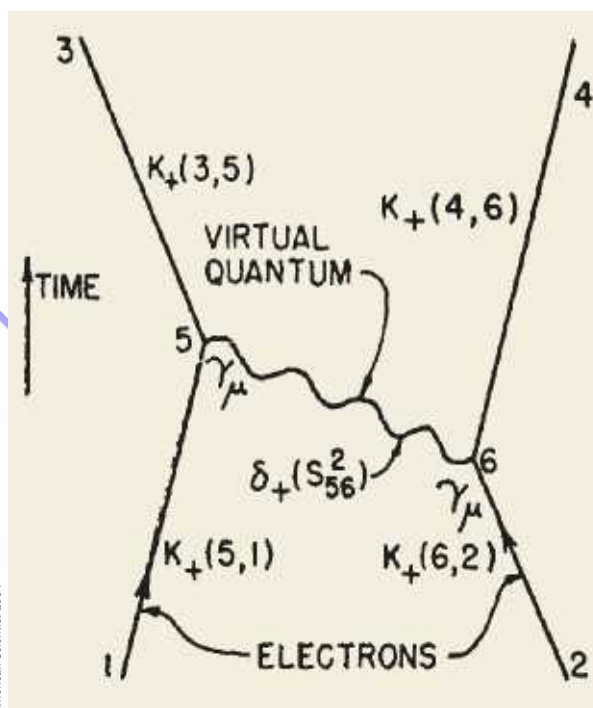
toutefois bien difficile... Un étudiant de Heisenberg avait tenté le calcul de l'interaction de deux électrons en e^4 dans les années 1930 et s'était noyé dans des centaines de termes. Chacun s'étendait sur quatre ou cinq lignes d'algèbre. En raison des difficultés liées aux infinis et à la lourdeur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