

lors de la naissance de l'océan, alors que celui-ci était encore peu profond. Ce mécanisme explique la présence de gisements pétroliers importants au pied des talus continentaux, voire plus au large. Les techniques d'aujourd'hui rendent possibles les forages en haute mer, mais les coûts associés sont énormes. C'est pourquoi la croissance fine de la structure des réservoirs pétroliers d'origine turbidique est un gros enjeu. Par ailleurs, les installations pétrolières posées au fond sont parfois directement menacées par les glissements et les avalanches. L'IFREMER collabore avec les pétroliers tant pour les aider à apprécier le risque associé aux avalanches que pour les aider à établir la structure sédimentaire des pièges à pétrole.

Quels enjeux ?

C'est ainsi qu'IFREMER et la Société *Elf-Aquitaine Production* (qui fait aujourd'hui partie de *Total*) ont lancé en 1998 le projet de recherche ZaiAngo visant à explorer, décrire et comprendre la marge continentale face au Gabon, au Congo et à l'Angola et plus particulièrement le réseau de vallées sous-marines du Zaïre. Ce projet faisait suite à la découverte par 1350 mètres de fond du champ pétrolier Girasol à l'intérieur de certaines paléovallées sous-marines du Zaïre. Situées au large de l'Angola, ces vallées vieilles de 15 millions d'années sont recouvertes aujourd'hui par près de 2000 mètres de sédiments. L'objectif principal du projet était de mieux connaître leur structure interne.

Outre ces applications industrielles, vers où se dirige la recherche sur les avalanches sous-marines ? Pour le

moment, notre connaissance de ce phénomène est surtout empirique. Pour progresser, il va nous falloir associer la collecte de données d'observation *in situ* et la modélisation. Depuis quelques années, on tente de placer des instruments de mesure dans le passage des avalanches afin de préciser leurs caractéristiques. Pour le moment, les problèmes de capteurs et d'ancrage restent difficiles à résoudre, mais il est d'ores et déjà clair que les géologues disposeront de stations d'observations utilisables d'ici à quelques années. Quant à la modélisation, elle devra combiner le développement de codes numériques et la réalisation d'expériences de calibration en bassin afin de simuler les différents types d'avalanche. On espère ainsi apprécier plus précisément ce qui déclenche les avalanches, ainsi que leur impact tant sur le fond que sur les structures industrielles qu'elles rencontrent sur leur chemin, tels les câbles sous-marins, les pipelines ou gazoducs, les têtes de puits de forage... Plus généralement, on voudrait aussi connaître leur influence sur les écosystèmes des profondeurs marines.

Bruno SAVOYE, géologue, est responsable du Laboratoire de sédimentologie marine du Centre IFREMER de Brest.

B. SAVOYE, *Océans, marge et pétrole profond*, in *Accès*, pp. 262-263, 2002.

N. BABONNEAU et al., *Morphology and architecture of the present canyon and channel system of the Zaire deep-sea fan*, in *Marine and Petroleum Geology*, vol. 19, pp. 445-467, 2002.

A. HUGOT et al., *Nouvelle modélisation des écoulements gravitaires sous-marins : application à l'effondrement de Nice de 1979*, in *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 333, série II, 133-139, 2001.

Auteur & Bibliographie

Abonnement Spécial Été



54 € seulement
au lieu de ~~77,80 €*~~

30% de réduction

Les avantages de l'abonnement

- ☒ Je profite d'un tarif avantageux
- ☒ Je bénéficie de tous les services de www.pourlascience.com
- ☒ Je reçois **Pour La Science** directement chez moi, avant sa parution en kiosque
- ☒ Je lis un n° de plus de **Pour La Science**

En application de l'article 27 de la loi du 6 janvier 1978, les informations ci-dessus sont indispensables au traitement de votre commande. Elles peuvent donner lieu à l'émission de documents d'avis et de notification auprès de Pour La Science. Pour plus d'informations, vous pouvez être amené à recevoir des propositions d'autres organismes. En cas de refus de votre part, il vous suffira de nous prévenir par simple courrier.

*Par rapport au prix hors taxes

Offrez-vous **Pour La Science**
13 n°s au prix de 12 !

BON D'ABONNEMENT

À retourner, accompagné de votre règlement à
Abonnements **Pour La Science** - 8 rue Férou - 75278 Paris cedex 06

☐ **OUI**, je m'abonne à **Pour La Science**
avec l'offre spéciale été : 13 n°s dont 1 spécial
pour **54 €** seulement au lieu de **77,80 €***

☐ Je règle par :

☐ Chèque ci-joint

☐ Carte bancaire

Numéro de la carte :

_____ ** Date d'expiration _____

Signature :

**Inscrire les 3 derniers chiffres de la série de 7 figurant au dos de votre carte.

Mes coordonnées :

Nom : _____

Prénom : _____

Adresse : _____

Ville : _____

Code Postal : _____

ENPLSES

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

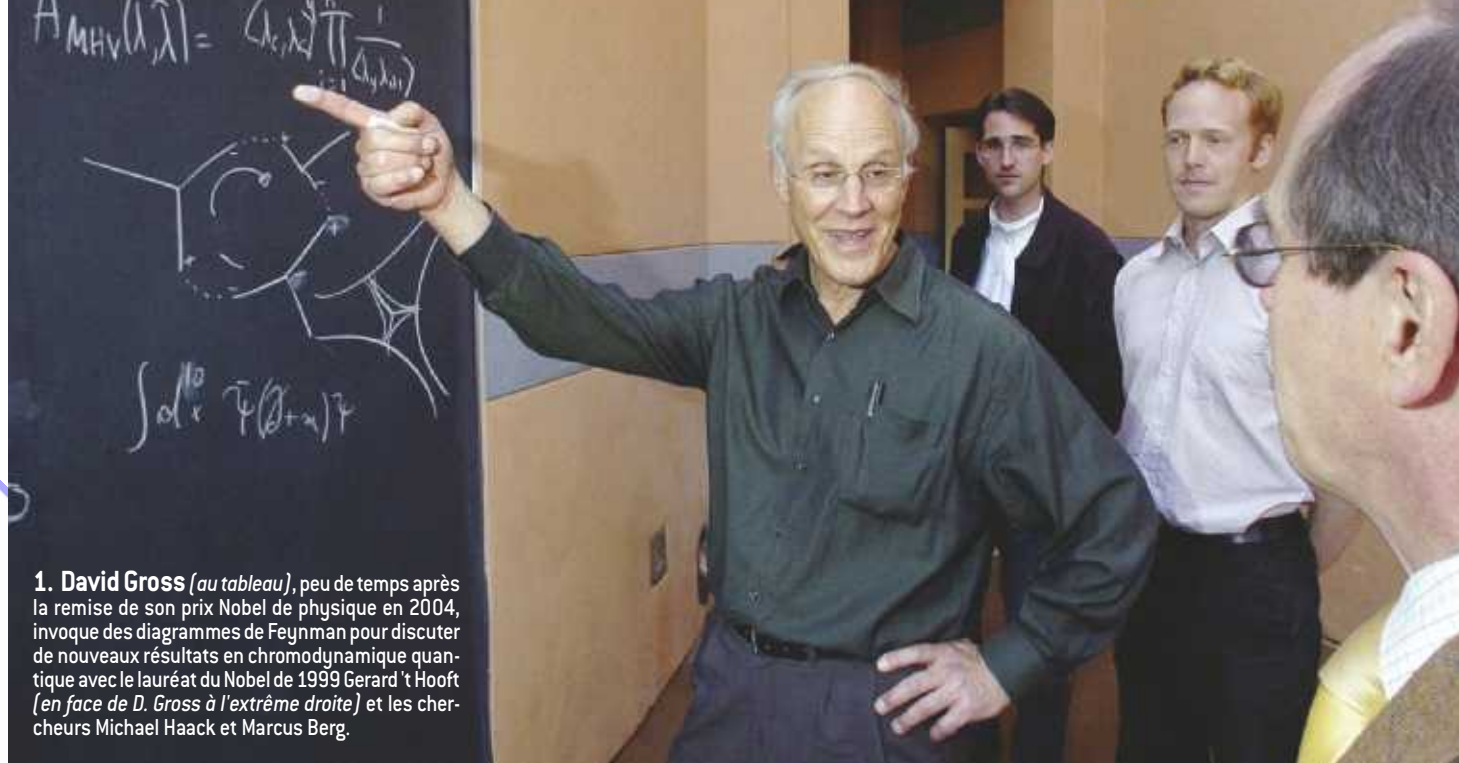
partir de rien. Ces particules virtuelles restituent l'énergie empruntée et disparaissent en un temps très court déterminé par le principe d'incertitude de Heisenberg.

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 millièmes 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.

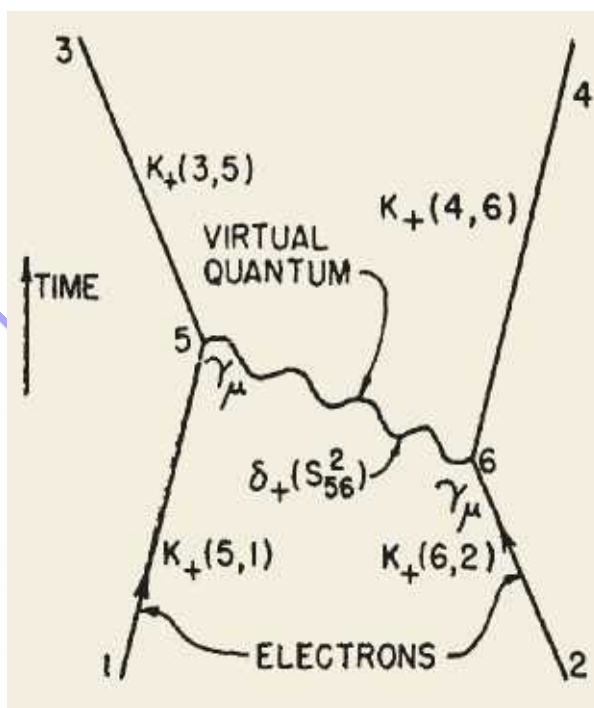
toutefois bien difficile... Un étudiant de Heisenberg avait tenté le calcul de l'interaction de deux électrons en e^4 dans les années 1930 et s'était noyé dans des centaines de termes. Chacun s'étendait sur quatre ou cinq lignes d'algèbre. En raison des difficultés liées aux infinis et à la lourdeur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

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 ravis 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 !

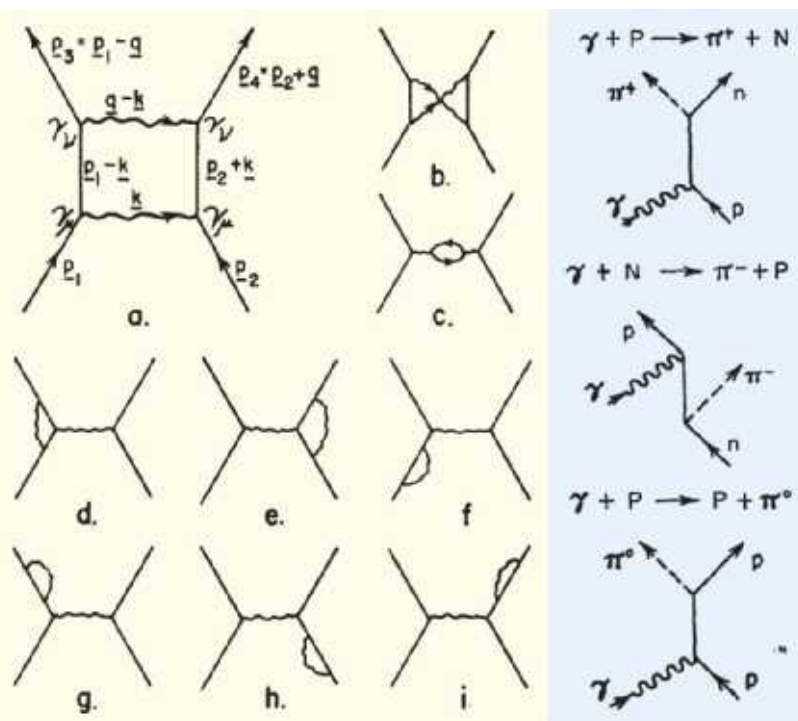
Feynman est grand, et Dyson est son prophète

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-itiro, 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.



Archives Emilio Segrè, 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 :

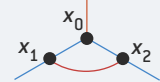
- à chaque vertex, deux lignes électroniques rencontrent une ligne de photon ;
- on dessine tous les diagrammes topologiquement distincts correspondant au processus d'interaction envisagé ;
- on construit ensuite l'expression mathématique correspondant à chaque diagramme : on substitue un facteur $B(x,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

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

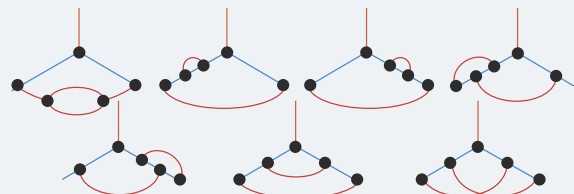
Seules des particules réelles apparaissent dans ce diagramme, donc la seule contribution à l'amplitude de probabilité provient du vertex. Mais de nombreux

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.

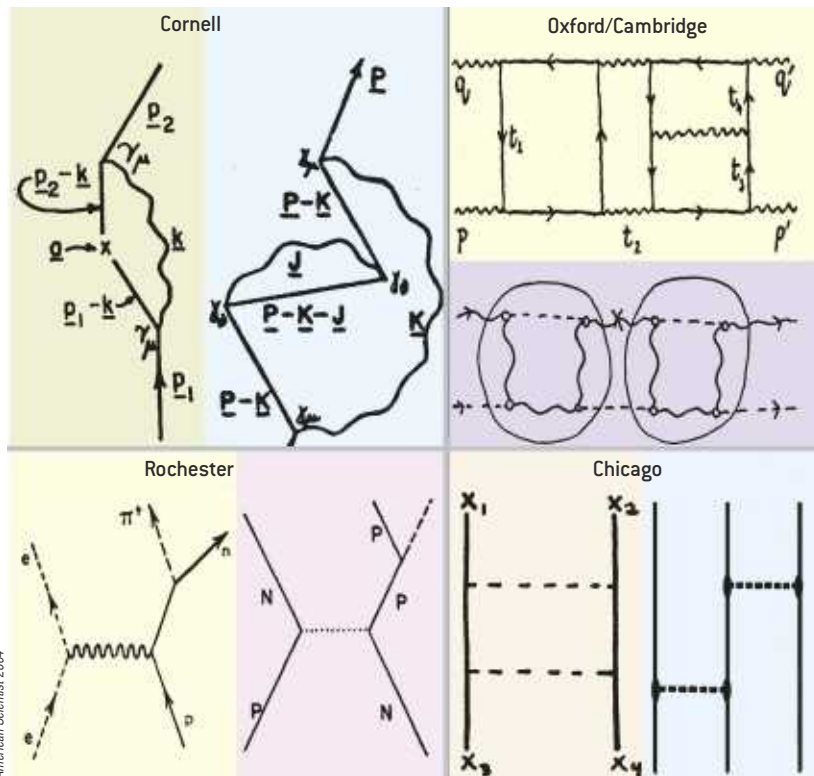
inattendues qui surgissaient des grands accélérateurs, les théoriciens faisaient appel aux diagrammes pour suivre quelle particule participait à quelle interaction, un système de gestion plus proche de la classification botanique que du calcul perturbatif. D'autres théoriciens les utilisaient pour distinguer 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

À l'aube de la pensée

Quand Homo sapiens est-il devenu moderne ?

Au moment où il a acquis la capacité de penser symboliquement, répondent les préhistoriens. La découverte de petites coquilles percées suggère que cela remonterait à au moins 75 000 ans.

Kate Wong

Le Cap, Afrique du Sud. Christopher Henshilwood, de l'Université de Bergen, en Norvège, pose dans ma main un petit morceau de carton bleu qu'il vient de sortir d'un sac en plastique. Dessus, 19 coquillages pas plus grands qu'un grain de blé forment trois lignes horizontales. À première vue, il s'agit des restes d'une poignée de mollusques sans intérêt. Mais pour l'œil expert, c'est peut-être l'un des plus grands trésors de l'humanité. Les petits coquillages ont été découverts dans la grotte de Blombos, dans la partie Est du littoral Sud-africain. Tous de la même taille, ils sont percés d'un trou sur le côté opposé à leur orifice. D'après Ch. Henshilwood, il s'agirait de perles ouvragées il y a 75 000 ans par des représentants de notre espèce. Autrement dit, les coquillages de Blombos seraient les plus anciens bijoux jamais fabriqués par l'homme, et une preuve que nos ancêtres ont commencé à se comporter semblablement à nous à une époque bien plus reculée qu'on ne le pensait auparavant.

Un Big Bang comportemental

Comme l'attestent des fossiles découverts en Éthiopie, près du village de Herto, en 2003, l'homme anatomiquement moderne, *Homo sapiens*, est apparu en Afrique il y a au moins 160 000 ans. Tout dernièrement, une nouvelle datation de restes humains, découverts il y a plusieurs décennies sur un autre site éthiopien, à Omo Kibish, indique que l'homme moderne, toujours sur le plan anatomique, pourrait même être apparu il y a 195 000 ans.

La question de savoir à quelle époque l'homme est devenu moderne sur le plan cognitif est bien plus difficile. Durant les 20 dernières années, l'idée prédominante était que l'humanité avait connu une révolution comportementale il y a environ 40 000 ans – une hypothèse fondée sur l'étude des vestiges culturels laissés par *Homo sapiens* en Europe au cours de la dernière période glaciaire. De fait, avant 40 000 ans (Paléolithique moyen), il semble que les *Homo sapiens* européens fabriquaient des outils de pierre relativement archaïques, selon des techniques déjà utilisées des dizaines de milliers

d'années auparavant. Mais au Paléolithique supérieur (entre 40 000 et 10 000 ans), en un clin d'œil à l'échelle géologique, de la vallée du Rhône à la Russie, nos ancêtres se sont mis à fabriquer des armes perfectionnées, à échanger des biens sur de longues distances et ils nous ont laissé des vestiges d'une riche production artistique : autrement dit, ils avaient acquis des comportements qualifiés de modernes par les préhistoriens. Le Paléolithique supérieur, semble-t-il, coïncide avec l'ultime grand saut en avant accompli par notre espèce.

Nous ignorons s'il s'agit d'une coïncidence, mais c'est aussi durant cette transition entre le Paléolithique moyen et le Paléolithique supérieur que l'homme moderne a fini de coloniser l'Europe, un territoire jusqu'alors peuplé de Néandertaliens. La plupart des sites de fouilles n'ayant pas laissé de fossiles humains, l'identité des premiers hommes qui ont réalisé des industries caractéristiques du Paléolithique supérieur n'est pas établie avec certitude. Il est néanmoins communément admis qu'ils s'agissait d'*Homo sapiens*. Certains chercheurs ont avancé que c'est la confrontation entre les deux espèces cousines qui aurait conduit l'« envahisseur » à exprimer une habileté créative jusqu'alors latente.

D'autres spécialistes pensent que l'explosion culturelle, flagrante en Europe il y a 40 000 ans, serait la conséquence d'une transition plus ancienne qui se serait opérée en Afrique. L'un d'eux, Richard Klein, de l'Université de Stanford, estime que cette transition africaine, qui délimite ce que les spécialistes nomment *Middle Stone Age* (l'âge de pierre moyen), et *Later Stone Age* (l'âge de pierre tardif), aurait eu lieu 50 000 à 10 000 ans auparavant. Ces deux périodes sont les équivalents, sur le grand continent, du Paléolithique moyen et du Paléolithique supérieur en Europe. D'après le préhistorien américain, la transition africaine ne résulterait pas de la rencontre entre deux humanités (à cette époque, *Homo sapiens* est seul en Afrique), mais serait la conséquence d'une mutation génétique survenue il y a environ 50 000 ans, qui aurait bouleversé notre fonctionnement cérébral et libéré nos capacités d'innovation.

Comme preuve de ce scénario, R. Klein invoque un site du centre du Kenya : Enkapune Ya Muto, la « grotte du crépuscule ». Des lames en obsidienne, des petits racloirs et,