

varient en sens contraire, avec pour conséquence un débit d'information très voisin pour la plupart des langues – même si l'anglais et le japonais se démarquent (leurs débits d'information sont respectivement supérieur et inférieur à la moyenne).

Précisons qu'on parle ici des valeurs moyennes. Des différences de débit d'information demeurent à toutes les échelles : chez un locuteur confronté à diverses situations, entre individus, entre populations... Un individu peut ainsi s'adapter au contexte, non seulement en parlant plus ou moins vite, mais également en choisissant les mots employés, les tournures de phrases, etc. Les locuteurs d'une même langue présentent également des différences de débit « normal » d'élocution, certaines personnes parlant naturellement plus vite que d'autres. Dans notre étude, par exemple, les locuteurs français les plus rapides avaient un débit comparable à celui des locuteurs japonais les plus lents.

Ni trop vite ni trop lentement...

Pourquoi le débit moyen d'information ne varie-t-il pas dans des proportions plus importantes ? Un débit trop faible serait socialement pénalisant, car des interactions efficaces nécessitent l'échange d'informations. À l'inverse, un débit moyen trop rapide aurait des coûts physiologique et cognitif trop élevés. En effet, si chacun peut accélérer momentanément son débit de parole (et donc son débit d'information), cela requiert à la fois un supplément d'énergie biomécanique de la part du locuteur et un supplément de ressources neurocognitives de la part de l'auditeur. Plusieurs travaux récents suggèrent d'ailleurs que le cerveau traite plus efficacement les informations présentées à un rythme compris dans une plage étroite, voisine de celle que nous avons observée ; ils se fondent pour cela sur l'analyse des réseaux neuronaux mobilisés par l'audition et la compréhension du langage.

Nous poursuivons actuellement nos recherches en augmentant le nombre de langues étudiées (nous avons ajouté le turc et le coréen, ainsi que plusieurs langues d'Afrique subsaharienne et de Chine), avec l'intention de relier la densité d'information

Hier soir, j'ai ouvert la porte d'entrée pour laisser sortir le chat. La nuit était si belle que je suis descendu dans la rue prendre le frais.
J'avais à peine fait quelques pas que j'ai entendu la porte claquer derrière moi. J'ai réalisé, tout d'un coup, que j'étais enfermé dehors. Le comble c'est que je me suis fait arrêter alors que j'essayais de forcer ma propre porte !

昨夜、私は猫を外に出してやるために玄関を開けてみると、あまりに気持ちのいい夜だったので、新鮮な空気を吸おうと、ついふらっと庭へ降りたのです。すると後ろでドアが閉まって、カチッと言う音が聞こえ、自分自身を締め出してしまったことに気が付いたのです。挙げ句の果てに、私は無理矢理ドアをこじ開けようとしていたところを逮捕されてしまったのです。

Last night I opened the front door to let the cat out. It was such a beautiful evening that I wandered down the garden for a breath of fresh air. Then I heard a click as the door closed behind me. I realised I'd locked myself out. To cap it all, I was arrested while I was trying to force the door open !

3. CE TEXTE est l'un de ceux qui ont été traduits dans plusieurs langues pour tester les différences de densité syllabique d'information, de débit syllabique et de débit d'information. En japonais, langue où chaque syllabe porte peu d'information (la densité syllabique est faible), il comporte près de deux fois plus de syllabes qu'en anglais.

à la complexité structurelle des systèmes linguistiques. Les questions sont multiples : quelles différences observe-t-on entre les langues où les mots sont souvent polysyllabiques et celles où ils sont plutôt monosyllabiques ? Comment la densité syllabique d'information varie-t-elle entre les langues aux schémas syllabiques très simples (CV ou CVC par exemple) et celles où ces schémas sont plus complexes (CCVCC par exemple) ? Etc.

Pour comparer les langues, il est également intéressant d'aller au-delà de la notion mathématique d'information que nous avons considérée, pour se pencher sur la notion plus générale de signification. Si les informations sont transmises à des débits comparables d'une langue à l'autre, des différences notables existent quant à ce qui est considéré comme une information pertinente à transmettre explicitement. Le mandarin et le japonais, par exemple, recourent à des éléments grammaticaux nommés classificateurs. Ceux-ci spécifient la forme, la taille ou d'autres caractéristiques physiques ou fonctionnelles des éléments dénombrés. Ainsi, la phrase « Trois chats boivent du lait » dite en japonais se traduit littéralement en français par « Trois animaux-chats du lait boivent ». Sur un autre plan, en japonais, les formules de politesse ont un rôle social très codifié et font partie de l'information jugée essentielle à transmettre lors de la communication.

Nos résultats soulignent qu'il existe plusieurs profils de langues. Ainsi, le mandarin se fonde sur des syllabes denses en information (notamment grâce aux tons) transmises à un débit assez lent, tandis que l'espagnol utilise des syllabes moins denses en information, mais émises plus vite. Cependant, le fait qu'une langue soit plus rapide ou plus dense en information ne la rend pas plus efficace pour communiquer, puisque le débit d'information reste quasi constant. ■

■ BIBLIOGRAPHIE

F. Pellegrino *et al.*,
A cross-language perspective on speech information rate,
Language, vol. 87, pp. 539-558,
2011.

J. Vaissière, **La phonétique**,
Collection Que sais-je ?, Presses
Universitaires de France, 2006.

Bernard Comrie *et al.*, **Atlas des langues : L'origine et le développement des langues dans le monde**, Acropole, 2004.

Physique théorique

Boucles et arbres, à la recherche d'une nouvelle physique

Zvi Bern, Lance Dixon et David Kosower

On calcule les probabilités des processus impliquant les particules élémentaires à l'aide de diagrammes dits de Feynman. Une nouvelle méthode simplifie ces calculs et remet au goût du jour certaines théories unificatrices.





L'ESSENTIEL

■ **Les concepts et les méthodes introduits il y a plus de 60 ans par Richard Feynman ont atteint leurs limites dans les calculs de processus complexes en physique des particules.**

■ **Grâce à une nouvelle approche, les physiciens peuvent calculer de façon plus précise les résultats des collisions entre particules dans les grands collisionneurs tel le LHC.**

■ **À un niveau plus fondamental, ces méthodes novatrices apportent un souffle nouveau à la recherche d'une théorie unifiée.**

Kenn Brown and Chris Wren, Mondoline Studios

Par un jour ensoleillé de printemps, l'un d'entre nous (L. Dixon) se rendait à l'aéroport de Heathrow à Londres. En entrant dans la station *Mile End* du métro londonien, il repéra un inconnu, un parmi les plus de trois millions de passagers quotidiens, et se posa la question suivante : quelle est la probabilité que cette personne sorte à *Wimbledon*, par exemple ? Comment répondre à une telle question, sachant que toutes sortes d'itinéraires s'offrent à l'usager du métro ? En réfléchissant à cette énigme, il se rendit compte qu'elle s'apparente aux problèmes épineux rencontrés par les physiciens qui cherchent à prédire les résultats des collisions entre particules dans les expériences modernes.

Le collisionneur LHC (*Large Hadron Collider*, ou grand collisionneur de hadrons) du CERN, près de Genève, accélère des protons qui vont se percuter à des vitesses proches de celle de la lumière. Pour étudier ce qui ressort de ces collisions, les physiciens ont construit des détecteurs qui repoussent les limites de la technologie. Interpréter ce que les machines mesurent est un défi tout aussi grand, même s'il est moins visible. Au premier abord, cela peut sembler étrange, car le modèle standard des particules élémentaires et de leurs interactions est bien établi ; les théoriciens l'utilisent tous les jours pour prévoir les résultats d'expériences. Pour effectuer les calculs, nous nous servons d'une technique développée il y a plus de 60 ans par le physicien américain Richard Feynman. Cette méthode est omniprésente. Les physiciens des particules l'ont apprise à l'université, et tous les livres et articles pour le grand public s'appuient sur les concepts de Feynman.

Pourtant, cette technique est devenue insuffisante pour traiter les problèmes les plus complexes. Elle offre un moyen intuitif et approximatif pour étudier les processus les plus simples, mais elle est trop lourde pour les processus plus compliqués ou pour les calculs de haute précision. Ces dernières années, nous avons développé avec nos collègues une nouvelle façon d'analyser les interactions de particules, qui contourne la complexité de la technique de Feynman. Nommée « méthode d'unitarité », elle revient à une façon très économique de prévoir ce qu'un usager du métro va faire en décomposant le trajet en un nombre limité de séquences avec une probabilité associée à chaque choix dans le parcours. De nombreux problèmes théoriques de la phy-

sique des particules, impossibles à traiter avec les méthodes classiques, ont pu être résolus grâce à cette nouvelle idée. Obtenir des solutions nous permet de mieux comprendre la théorie actuelle de la nature et ainsi de repérer toute mesure qui serait le signe d'une nouvelle découverte. Cette méthode a aussi produit de nombreux résultats pour une version idéalisée du modèle standard qui intéresse particulièrement les physiciens en tant que possible tremplin vers la théorie ultime de la nature.

Plus qu'une astuce de calcul

L'approche fondée sur l'unitarité est plus qu'une astuce de calcul. Elle suggère une vision radicalement nouvelle des théories des interactions entre particules, qui seraient gouvernées par des symétries cachées : une élégance insoupçonnée du modèle standard. En particulier, elle est à l'origine d'un étrange retournement de situation concernant les tentatives menées depuis des décennies pour unifier la théorie quantique et celle de la relativité générale d'Einstein en une théorie quantique de la gravitation.

Jusque dans les années 1970, les physiciens supposaient que la gravitation se comporte comme les autres interactions fondamentales, et cherchaient à l'englober dans les théories existantes. Mais quand ils appliquaient la technique de calcul de Feynman, ils trouvaient des résultats aberrants ou étaient bloqués par la difficulté des calculs. Découragés, les physiciens se sont tournés vers des idées plus révolutionnaires telles la supersymétrie, et plus tard la théorie des cordes.

En revanche, la méthode d'unitarité nous a permis d'effectuer des calculs envisagés dans les années 1980, mais qui semblaient à l'époque hors de portée. En particulier, elle se révèle exempte de certaines incohérences rencontrées avec la méthode de Feynman. La gravitation ressemble bien aux autres interactions, mais d'une façon inattendue : elle se comporte comme l'interaction forte, qui agit dans le noyau atomique et en lie les différents composants, mais en double exemplaire.

L'interaction forte est transmise par des particules nommées gluons ; la gravitation est supposée transmise par des particules nommées gravitons. Dans le nouveau schéma, le graviton se comporte comme deux gluons agissant de conserve. Cette

idée est assez étrange, et même les spécialistes n'arrivent pas encore à se faire une bonne image de ce que cela signifie. Néanmoins, la propriété de double exemplaire offre une perspective nouvelle pour unifier la gravitation avec les autres interactions fondamentales.

Ce qui rendait la technique de Feynman si convaincante et pratique, c'est qu'elle donne une recette graphique simple pour représenter des calculs très compliqués. Elle résume ces derniers par des diagrammes qui correspondent aux différentes voies d'interaction de deux particules (ou plus) qui entrent en collision (les particules entrantes et sortantes étant fixées). Suivant un ensemble de règles détaillées que Feynman et ses collègues (notamment Freeman Dyson) ont établies, le théoricien calcule la valeur associée à chaque diagramme. La somme de ces valeurs détermine la probabilité du processus considéré.

Mais il y a une difficulté de taille : le nombre de diagrammes à dessiner est énorme, et en principe infini. Dans les applications pour lesquelles Feynman a initialement conçu ses règles, cet inconvénient n'avait pas d'importance. Il étudiait l'électrodynamique quantique, qui décrit les interactions des électrons et des photons. Ces interactions sont régies par un paramètre, le couplage, qui vaut environ $1/137$. La petite valeur de ce couplage garantit que les diagrammes compliqués contribuent peu à la probabilité totale du processus considéré et peuvent donc être ignorés. C'est comme si l'on disait qu'il

est plus probable qu'un usager du métro choisisse un itinéraire simple.

Deux décennies plus tard, les physiciens ont étendu la technique de Feynman à l'interaction forte. Ils ont ainsi créé la « chromodynamique quantique », qui est aussi régie par un couplage, mais sa valeur est très supérieure à celle du couplage électromagnétique. *A priori*, un couplage plus intense augmente le nombre de diagrammes compliqués que les théoriciens doivent inclure dans leurs calculs. Heureusement, à très courte distance ou très haute énergie, comme pour les collisions au LHC, le couplage de l'interaction forte diminue et, pour les collisions les plus simples, les théoriciens peuvent là encore se limiter aux diagrammes de Feynman les plus élémentaires.

Des diagrammes trop problématiques

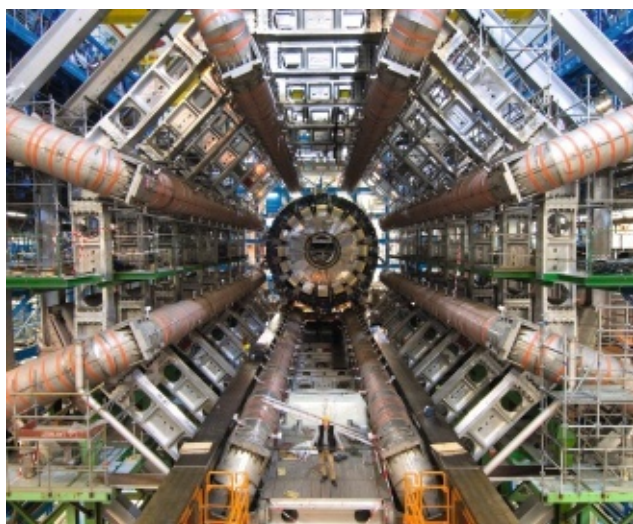
Mais pour les collisions complexes, toute la lourdeur de la technique de Feynman resurgit. On classe les diagrammes de Feynman en fonction du nombre de lignes externes et du nombre de boucles qu'ils contiennent (voir l'encadré page 76). Les boucles représentent une des composantes fondamentales de la théorie quantique : elles mettent en jeu des particules « virtuelles », qui, bien qu'inobservables, ont un effet mesurable. Ces particules obéissent aux principes habituels de la physique, comme la conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement, mais leur

masse peut différer de celle de la particule « réelle » correspondante. Les boucles représentent des cycles de vie éphémère : les particules naissent, puis s'annihilent très peu de temps après. Leur masse détermine leur durée de vie : plus elles sont lourdes, plus cette durée est brève.

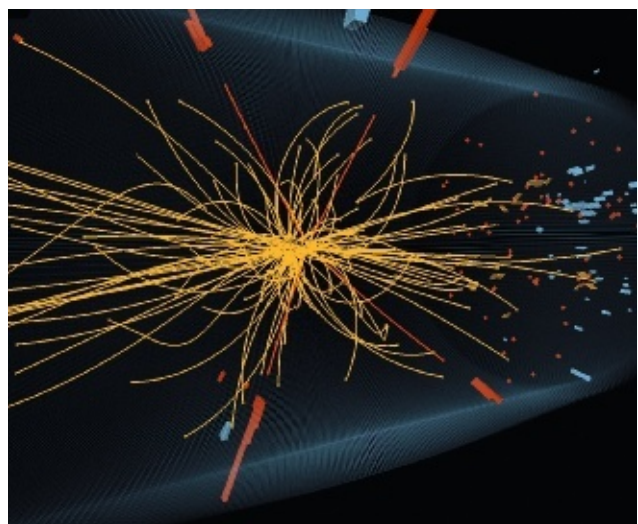
Les diagrammes de Feynman les plus simples ne comportent pas de boucles et sont appelés diagrammes en arbre. En électrodynamique quantique, le diagramme le plus simple de tous représente deux électrons qui se repoussent en échangeant un photon. Les diagrammes se compliquent par l'ajout progressif de boucles. Cette technique de calcul est qualifiée de perturbative. Cela signifie qu'on part d'une estimation approchée (représentée par les diagrammes en arbre) et qu'on l'améliore progressivement en ajoutant des termes *a priori* de plus en plus petits (représentés par les diagrammes à boucles).

Par exemple, le photon échangé entre deux électrons peut disparaître spontanément et se transformer en un électron et un antiélectron virtuels, qui se recombinent très peu de temps après pour redonner naissance à un photon. À mesure que le nombre de leurs particules virtuelles augmente, les diagrammes décrivent les effets quantiques avec une précision croissante.

Toutefois, même les diagrammes en arbre peuvent être un défi. Dans le cas de la chromodynamique quantique, si vous aviez le courage de considérer une collision entre deux gluons incidents qui produit huit gluons sortants, vous devriez



LE DÉTECTEUR ATLAS DU CERN (à gauche, lors de sa construction) enregistre le signal de centaines de particules produites lors de la collision entre deux protons de haute énergie (à droite, une reconstitution



numérique d'une collision dans le détecteur CMS). Les expérimentateurs estiment la probabilité qu'un événement se produise et la comparent avec les calculs théoriques.