

T I M J A M E S

M A G I Q U E
Q U A N T I Q U E

COMMENT LA PHYSIQUE QUANTIQUE
PEUT TOUT EXPLIQUER...
SAUF LA GRAVITÉ!

DUNOD



T I M J A M E S

M A G I Q U E
Q U A N T I Q U E

COMMENT LA PHYSIQUE QUANTIQUE
PEUT TOUT EXPLIQUER...
SAUF LA GRAVITÉ!

Préface de Charles Antoine
Traduit de l'anglais par Benjamin Peylet

DUNOD

Copyright © Tim James 2019
First published in Great Britain in 2019 by Robinson,
an imprint of Little, Brown Book Group

Copyright © Tim James 2019
Cet ouvrage a été publié au Royaume-Uni en 2019 par Robinson,
et imprimé par Little, Brown Book Group, sous le titre original :
*Fundamental : How Quantum and Particle Physics Explain
Absolutely Everything (Except Gravity)*.

Direction artistique (couverture) : Élisabeth Hébert
Photographie de couverture : Adobe stock © Sergii

© Dunod, 2020 pour la traduction française
11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff
www.dunod.com

ISBN : 978-2-10-081233-2

Ce document numérique a été réalisé par [PCA](#)

*Ce livre est dédié aux élèves de Northgate High
School.*

L'AUTEUR

Tim James est professeur de sciences au collège et lycée, YouTubeur, blogueur et Instagrammeur. Élevé par des missionnaires au Nigéria, il est tombé amoureux de la science à quinze ans et n'a jamais cessé de l'aimer. Après avoir obtenu un master de chimie et s'être spécialisé dans le calcul numérique pour la mécanique quantique, il se consacre à l'enseignement et à la diffusion de la science.

*« Même quand les scientifiques sont sûrs de leur coup,
la nature a le chic pour les surprendre. »*

Nemesis, Isaac Asimov

Préface

Quel plaisir d'avoir découvert ce livre de Tim James ! Et quel plaisir de vous savoir à votre tour en route dans son exploration !

« Un livre doit avoir la force d'une poignée de main », m'a un jour confié le poète Christian Bobin. Et le sourire réjoui du lecteur passionné ! ajouterais-je volontiers, tant ce petit livre réussit le tour de force d'exposer avec simplicité et humour les concepts les plus élaborés de la physique quantique.

Nul besoin d'être géomètre pour entrer ici. Encore moins d'être expert quantique ! Il suffit d'être curieux et de ne pas avoir peur de muscler ses neurones autant que ses zygomatiques.

Car si la rigueur et la précision sont de mise dans cet ouvrage complet, c'est avec une légèreté aérienne et parfois malicieuse que Tim James nous entraîne dans la découverte du monde quantique, de ses concepts clefs, et des applications modernes qui en découlent et peuplent notre quotidien.

Mais ce n'est pas seulement un vent de fraîcheur aux effluves quantiques que fait souffler cet amoureux des sciences. Il est en effet le témoin d'un changement dans notre façon d'envisager la vulgarisation et la transmission de la physique quantique. Car il est temps aujourd'hui de révolutionner notre manière de transmettre cette science, elle qui a transfiguré notre façon de voir le monde depuis bientôt cent ans.

Et si vous lisez ces lignes, vous êtes sûrement familiers de citations presque plus célèbres que leurs auteurs suggérant que la

physique quantique serait une science extrêmement difficile, quasi inaccessible, absurde et incompréhensible même, réservée à une élite intellectuelle dont les efforts pour percer son mystère originel resteraient vains, tels des Sisyphe perdus sur le rocher de l'abstraction.

À l'instar du pétillant Tim James, je refuse cet état de fait et reste persuadé qu'une nouvelle génération de « passeurs quantiques » est en train d'éclorre et permettra, reprenant les mots du grand physicien Freeman Dyson, à tout un chacun de se sentir dans les années à venir « *at home with quantum ideas* »...

Et si le monde quantique défie aujourd'hui notre sens commun et remet en cause toutes nos certitudes dans tous les domaines, le donner à connaître – à défaut de comprendre – au plus grand nombre est un acte social autant que politique. Un acte nécessaire et salvateur tant l'omniprésence quantique semble se conjuguer au futur (que ce futur soit singulier ou pluriel, comme ceux des mondes parallèles).

Insoumise et transgressive, la physique quantique est comme la poésie pour Jean-Pierre Siméon, elle « illimite le réel et récuse la segmentation et l'immobilisation du sens ». De façon évidente, elle est l'outil intellectuel idoine pour appréhender le monde de demain.

Qu'on se le dise, la physique quantique n'est pas compliquée, elle est étrange. Elle « semble » étrange. Pour l'instant en tous cas. En fait, elle attend juste son heure, l'heure d'un nouveau Jules Vernes pour reprendre les mots visionnaires du philosophe Michel Serres. Et cela tombe bien que vous ayez ce livre entre les mains, car son insondabilité supposée se languit d'être percée par votre regard neuf et curieux.

Drôle, léger et profond, avec des analogies originales, parlantes et tranchantes, le livre de Tim James participe de cette révolution de la démocratisation scientifique et saura parler à tous les lecteurs, des plus novices aux plus érudits. Le genre de livre dont le monde a aujourd'hui besoin.

Le genre de livre que j'aurais aimé écrire.

Le genre de livre qui ouvre des portes sur les toits.
Bon voyage !

Charles Antoine, Auteur de *Schrödinger à la plage* Le 9 décembre
2019

Prologue

La fin

La Nature a perdu la tête. Quand on va au plus profond, jusqu'aux lois fondamentales de la physique, tout en bas, dans la cave, on débarque dans un royaume chaotique et fou où connaissance et imagination se confondent.

Ce ne devrait pas être une surprise, après tout ; il paraît censé de s'interroger sur l'état mental d'un univers qui permet à l'étoile de mer d'exister. Cependant, même quand on est habitué aux excentricités de la nature, la physique quantique a de quoi surprendre.

Tout commence à la fin du xix^{e} siècle, une époque où les gens étaient bien contents d'eux. Ils avaient cartographié les étoiles, isolé l'ADN et s'apprêtaient à briser l'atome. Leur savoir était presque complet, au point qu'ils paraissaient à l'aube du couronnement final : la fin de la science.

Il restait évidemment quelques casse-tête scientifiques étranges, que personne n'avait résolus, mais c'étaient de petites curiosités mineures qui pendouillaient dans un coin, comme les fils qui dépassent d'une jolie tapisserie. Et il fallut que nous tirions sur ces fils, et tout ce que nous tissions depuis des siècles se délita soudain pour découvrir un nouveau paysage. Un paysage quantique.

Richard Feynman, prix Nobel, avait ouvert une série de conférences sur la physique quantique par ces mots : « Mes étudiants en physique ne la comprennent pas. Je ne la comprends pas. Personne ne la comprend. »¹ La sentence est déprimante, venant de celui que certains considèrent comme le plus grand théoricien de la physique quantique. Si quelqu'un d'aussi brillant que Feynman ne parvenait pas à tout saisir de ce sujet, comment nous autres, pauvres mortels, le pourrions-nous ?

Ce qu'il fallait comprendre, toutefois, c'est que Feynman ne disait pas que la physique quantique est trop *compliquée* pour être comprise. Il la jugeait en fait trop *étrange*.

Mettons que quelqu'un vous demande d'imaginer un triangle à quatre côtés, ou vous dise de penser à un nombre plus petit que dix mais plus grand qu'un milliard. Ces instructions n'ont rien de compliqué, toutefois vous auriez bien du mal à vous y conformer car elles n'ont pas de sens. C'est précisément ce à quoi va ressembler notre voyage en pays quantique.

C'est un monde de triangles à quatre côtés et de nombres qui n'obéissent pas aux règles habituelles. Un endroit où des univers parallèles et des paradoxes vous guettent à chaque coin de rue, où les objets ne se préoccupent plus ni de l'espace ni du temps.

Malheureusement, nos cerveaux ne sont pas conçus pour assimiler des folies de ce genre. Le monde sous nos yeux n'est pas assez étrange pour nous donner une idée juste de la nature telle qu'elle est au fond. C'est pourquoi, songeant à la physique quantique, le physicien Niels Bohr a dit que « le langage ne peut plus être que poésie »².

L'erreur que beaucoup commettent est de trouver la physique quantique si perturbante qu'ils se jugent trop peu intelligents pour la saisir. Ne soyez pas déstabilisés. Si vous trouvez tout cela bizarre et dérangent, parfait ; vous avez de votre côté les plus grands esprits de l'histoire.

C'est de ceux qui affirment tout comprendre à la physique quantique que vous devriez vous méfier. Quelque chose cloche chez ces gens-là.

1

Rougir de fierté

UNE LUMINEUSE HISTOIRE

La physique quantique est née du désir de comprendre la lumière, une énigme qui a creusé bien des têtes, et ce depuis des millénaires. Le philosophe grec Empédocle fut le premier à théoriser sa nature, quelque part autour du v^e siècle av. J.-C.

Il pensait que l'œil humain contenait une pierre de feu magique qui dardait ses rayons vers l'extérieur, illuminant ainsi tout ce que nous regardions¹. Une idée poétique, qui présentait un défaut évident : si nos yeux généraient la lumière à la manière de torches, nous devrions être capables de voir dans le noir.

Empédocle est aussi le type qui nous a légué l'idée aujourd'hui démentie des quatre substances élémentaires (feu, eau, air et terre). Il a même suggéré que la diversité biologique s'expliquait par la présence de membres isolés rampant un peu partout dans le monde et s'agglutinant au hasard pour former les corps des animaux.

On peut ainsi dire que, du point de vue de l'histoire des sciences, le boulot d'Empédocle fut d'imaginer les idées les plus folles afin que tous les autres puissent le contredire. Cela dit, s'agissant des rayons lumineux, il nous a fallu mille trois cents ans pour nous en rendre compte.

Ce n'est qu'après l'érudit arabe Alhazen autour de l'an mille (965-1040) que nous avons abandonné cette idée. Alhazen fit une expérience, il disséqua un œil de cochon et prouva que la lumière rebondissait dans cette cavité comme dans une chambre noire. Ainsi, la lumière émanait plutôt des objets autour de nous, et nos yeux ne faisaient que se mettre en travers de son chemin².

Il peut sembler bizarre que plus d'un millénaire fût nécessaire pour nous assurer que nos yeux ne lançaient pas des rayons laser, mais c'était une autre époque. Tout le monde croyait alors que les humains conféraient aux objets leur raison d'exister. Il était inutile qu'ils aient une apparence quand personne ne les regardait.

Heureusement, la suggestion d'Alhazen qui proposait que l'expérience passe avant l'ego humain s'imposa progressivement et nous décidâmes que la lumière, quelle que fût sa nature, émanait des objets eux-mêmes et passait par nos yeux en ligne droite. Puis vint la Renaissance.

On peut estimer que le scientifique et philosophe le plus important de la Renaissance fut René Descartes, qui nous légua la nouvelle grande idée quant à la physique de la lumière.

Descartes observa que, lorsqu'une bougie est allumée, la lumière atteint tous les coins de la pièce en même temps, de la même manière que les vaguelettes nées au centre de l'étang parviennent au même moment sur tous ses bords. La lumière, se dit-il en conséquence, devait être un phénomène du même type. Il devait y avoir une substance invisible qui nous entourait en toute direction, et la lumière était le résultat d'ondes et de vaguelettes se déplaçant dans ce milieu³.

Le seul qui n'était pas trop d'accord avec cette idée de vague dans l'espace était Isaac Newton, qui s'était donné pour mission principale de contredire tous ceux qu'il considérait comme moins intelligents que lui (c'est-à-dire à peu près tout le monde).

Newton remarqua que, si la lumière était une vague se déplaçant dans un milieu, elle devrait infléchir sa course quand elle croisait un obstacle, comme une vague modifie légèrement sa trajectoire autour d'un rocher. En conséquence, les contours des ombres devraient être flous, or, ils sont très nettement dessinés au contraire, si bien qu'il est plus sensé d'imaginer la lumière comme constituée de particules, qu'il appela des « corpuscules »⁴.

La théorie corpusculaire de la lumière s'imposa inévitablement contre la théorie ondulatoire de Descartes, principalement en vertu

de la notoriété de Newton et de la hargne qu'il mettait à écraser quiconque le défiait.

Si bien que Newton aurait été horrifié d'apprendre les résultats de l'expérience de Thomas Young, qui montra que l'inverse était vrai soixante-dix ans après sa mort. La mort de Newton, veux-je dire. Thomas Young ne fit que bien peu d'expériences après la sienne.

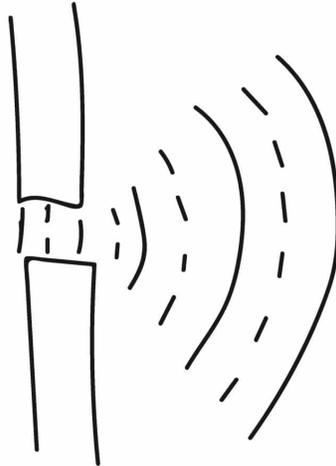
NOUVELLE VAGUE

Thomas Young était doté de l'un des plus beaux esprits que le XVIII^e siècle ait produits. Il est peut-être plus connu pour sa traduction de la pierre de Rosette, ce qui fit de lui le premier homme à avoir déchiffré les hiéroglyphes⁵. Il fut également le premier à identifier les récepteurs de la couleur dans nos yeux. Il écrivit plusieurs livres de médecine, parlait quatorze langues, jouait d'une douzaine d'instruments de musique et développa une théorie moderne de l'élasticité⁶.

L'expérience de Young qui fit vraiment des vagues dans la théorie de la lumière date de 1801. On la connaît sous le nom d'expérience de la double fente.

Revenons à l'image des vaguelettes qui parcourent un étang. Imaginez un front régulier de vagues se déplaçant sur une surface liquide calme, et passant par une digue interrompue en son milieu. Quand les vagues passent par l'interstice, elles s'évasent légèrement, un processus nommé diffraction.

La raison qui explique ce déploiement est que le bord de la vague dissipe son énergie dans l'eau environnante. Vu du dessus, on obtient une disposition semblable au schéma ci-après, où les crêtes des vagues sont figurées par des lignes pleines, et les creux par des pointillés.



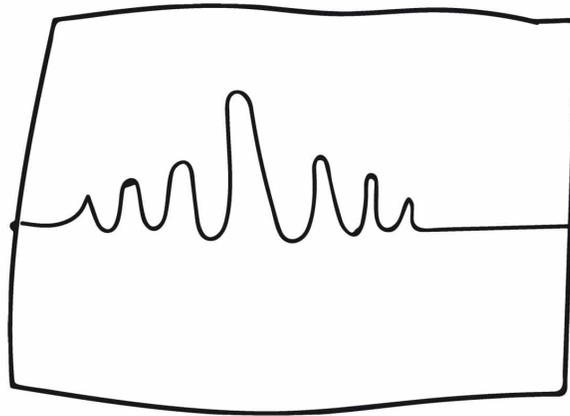
Perçons à présent notre digue de deux trous. La même chose se passe, seulement cette fois, on obtient deux vagues qui sont diffractées en même temps, puis se superposent et se mélangent. Vu du dessus, cela donne :



Par endroits, les vagues se superposent parfaitement, la crête de la première correspond exactement à la crête de la seconde, si bien qu'on observe une méga-crête à la surface de l'eau. Entre ces méga-crêtes, on constate l'effet inverse, où la crête de l'une rencontre le creux de l'autre. En ces endroits, les vagues se neutralisent, et la surface de l'eau est presque lisse.

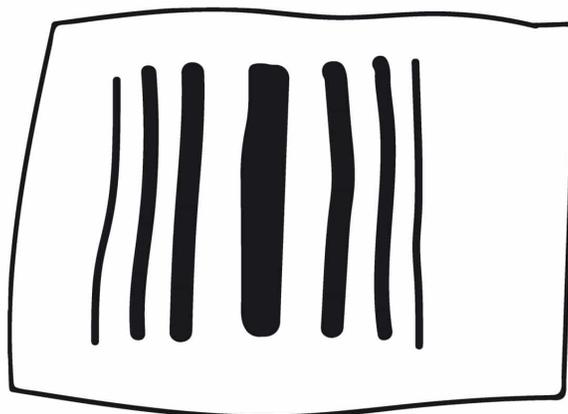
Si on place à présent un écran au bout de l'étang, les vagues mélangées le frappent avec des alternances de méga-crêtes et de

presque rien neutralisé. Si on regarde cet écran de face plutôt que du dessus, voilà le schéma qu'on observe :



Ce qu'on voit là est un effet d'interférence entre deux vagues qui sont diffractées à la sortie d'une double fente, un schéma alternant hautes et basses intensités. Ce phénomène est appelé « superposition ».

Ce que fit Thomas Young, c'est reproduire ce schéma de superposition d'ondes, mais avec la lumière à la place de l'eau. En allumant une chandelle contre un mur percé de deux trous, Young obtint une alternance de bandes de lumière zébrée, ombre et lumière, sur son écran de détection, très semblable au schéma obtenu quand on mélange des vagues (voir ci-après).



Si la lumière était faite de particules comme l'affirmait Newton, celles-ci devraient se faufiler par les ouvertures pour venir s'écraser

toutes ensemble en formant un gros pâté sur l'écran placé de l'autre côté. Les zébrures qu'on obtient ne peuvent s'expliquer que si la lumière a, d'une manière ou d'une autre, une nature ondulatoire.

L'objection de Newton sur la précision des contours d'une ombre tenait toujours, mais à présent qu'il était mort, quelques-uns osaient remettre en question ses enseignements. Quand on regarde une ombre de très près, on observe en réalité des contours flous, seulement ces flous sont tout petits et il est facile de les rater. C'est impossible à expliquer par le biais d'une théorie corpusculaire de la lumière ; en revanche, cela peut s'interpréter comme une onde qui s'infléchit au passage d'un obstacle.

La substance qui transporte ces ondes, ce milieu cher à Descartes, trouva bientôt un nom sophistiqué, l'éther luminifère. Et voilà ! La nature de la lumière était établie. Enfin, presque.

L'idée de Descartes était fondamentalement en avance sur son temps et ne fut acceptée qu'après cette preuve expérimentale. Ce qui nous pousse à penser qu'il ne faut jamais juger une situation sans avoir tout Descartes en main, une blague pour laquelle je serais presque tenté de présenter mes excuses. Presque.

LA CATASTROPHE DU SIÈCLE

Dans la première décennie du xx^e siècle, plus personne ne se demandait de quoi la lumière était faite. Young avait donné la réponse. Quelques détails n'entraient cependant pas dans les cases, le plus célèbre d'entre eux étant les interactions de la lumière avec un objet chaud. Et pour comprendre ce mystère, je vais devoir vous refourguer un tuyau.

Imaginez un tuyau d'arrosage dont l'embout est branché au bas d'une boîte. Quand on ouvre l'eau, la boîte se remplit peu à peu, jusqu'à ce que ça déborde. Mais supposez maintenant qu'on y ajoute un couvercle pourvu de trois trous, un petit, un moyen, un grand.

Quand on ouvre l'eau cette fois, la boîte se remplit toujours, puis elle se met à déborder par les trous au sommet. On devrait noter un

gros bouillon sortant du gros trou, et un petit écoulement venu du plus petit. On ne peut pas dire que cet appareillage soit très utile, mais enfin, rien de compliqué jusqu'ici. On fourre de l'eau en bas, ça sort par les trous en haut.

C'est une bonne analogie avec la façon dont un objet brille quand il s'échauffe. Quand un objet chauffe, il absorbe et absorbe l'énergie calorifique jusqu'à ce qu'il ne puisse plus la contenir, alors celle-ci s'épanche hors de l'objet sous forme de lumière.

Le tuyau dans cette analogie représente la chaleur appliquée à l'objet et les trous, différents types de lumière émis. Le plus petit représente les infrarouges (trop peu énergétiques pour être vus), le trou du milieu est la lumière visible (de rouge à violet) et le plus gros trou les ultraviolets (trop énergétiques pour être vus).

Les objets sombres sont les plus efficaces pour cette conversion chaleur-lumière, car ils absorbent toute l'énergie qui les frappe. C'est pourquoi l'objet théorique qui absorbe parfaitement la chaleur est appelé un « corps noir » dans le jargon des physiciens (même s'il n'est pas vraiment noir).

Tout cela est très bien décrit par une équation simple, la loi de Rayleigh–Jeans, qui donne une bonne approximation du phénomène, surtout aux températures faibles à modérées. Mais quand ça chauffe vraiment, quelque chose de très étrange se produit.

En toute logique, le plus gros de la lumière émise par un objet chaud devrait être restitué sous forme d'ultraviolets puisque c'est la lumière de plus haute énergie (le plus gros trou dans notre analogie du tuyau). Mais en réalité, presque toute la lumière émise par l'objet prend une valeur moyenne.

Eh oui, il y a bien un peu d'infrarouge et un peu d'ultraviolet, mais un objet chaud émet surtout du jaune/orange, ce qui n'a aucun sens. Ce serait comme si on remplissait la boîte d'eau et que tout jaillissait par le trou moyen plutôt que par le gros.

En réalité, la situation est encore plus troublante que dans notre analogie à trois trous, parce que la lumière peut prendre toutes les valeurs qu'elle veut ; elle n'est pas limitée à trois choix. Une image

plus juste serait ainsi celle d'une fente au sommet de la boîte de laquelle l'eau ne jaillirait qu'au centre, ignorant les côtés sans qu'on sache comment ni pourquoi.

Le physicien autrichien Paul Ehrenfest parlait de ce problème comme de la « catastrophe des ultraviolets »⁷, et les manuels de physique lui ont emboîté le pas depuis en la nommant « catastrophe ultraviolette ».

Cette situation illustre un désaccord entre la théorie et l'expérience. Dans ces cas-là, en science, c'est la théorie qui doit changer. On ne peut exiger d'une expérience qu'elle produise tel ou tel résultat. Si la théorie ne prévoit pas les données obtenues, bye bye la théorie.

La catastrophe est survenue en raison des idées apparemment incorrectes sur le fonctionnement de l'énergie lumineuse. Personne n'aurait pu deviner qu'ajuster légèrement ces idées allait nous mettre sur la voie de la révolution quantique. Par ailleurs, celui qui trouva la réponse n'envisageait rien de si radical. Il voulait simplement inventer une ampoule bon marché.

PLANCK ET VOUS !

Max Planck était le plus jeune d'une famille de six enfants. Il sortit de l'école en 1875, avec un an d'avance. Il voulut s'inscrire à l'université de Munich pour y étudier la physique mais le professeur von Jolly (c'est vraiment son nom), qui examina sa candidature, tenta de l'en dissuader sous prétexte que la physique était pratiquement achevée alors et que ce serait en conséquence gâcher un si bel esprit⁸.

Jolly grimaça, mais Planck tint bon. Il insista pour suivre le cours qu'il avait choisi. Il se fichait bien de découvrir quelque chose de nouveau, car il ne tenait pas à entrer dans l'histoire. Il voulait simplement comprendre le fonctionnement du monde et ne comptait pas qu'on le lui interdise. Planck ne cachait pas ses intentions.

Jolly, impressionné par cette détermination, décida d'admettre Planck, qui devint bientôt l'une des figures les plus respectées de la

physique européenne. Ses conférences étaient paraît-il si populaires que l'on s'y pressait épaule contre épaule pour y assister. Des rumeurs parlent même d'auditeurs s'évanouissant sous l'effet de la chaleur, ce que tout le monde faisait mine d'ignorer de peur que Planck ne mette fin à la leçon.

Cette réputation attira l'attention des hommes du Bureau des normes allemand, qui l'appelèrent à l'aide dans leur quête pour mettre au point l'éclairage électrique public. L'électricité faisait fureur à l'étranger, mais elle était chère, et ils voulaient déterminer l'installation la plus efficace à mettre en place. Planck accepta l'offre avec joie et se mit au travail, analysant la relation entre la chaleur et la lumière qu'émet une ampoule⁹.

Le filament d'une ampoule est en gros un « corps noir ». Tandis qu'il s'échauffe de l'intérieur, sa surface extérieure absorbe toute l'énergie et la réémet sous forme de lumière, essentiellement dans le domaine du visible. Mais quand il chauffe plus encore, il n'émet pas le genre de lumière que prévoit la loi de Rayleigh–Jeans, si bien que Planck choisit d'inventer une nouvelle loi, dans laquelle il considérait l'énergie lumineuse comme une sorte de gaz.

Dans un gaz, des groupes de particules volent en tous sens, et quand elles entrent en collision, elles partagent leur chaleur. Par l'effet du simple hasard, certaines particules seront de faible énergie et d'autres d'énergie élevée, mais la plupart convergeront vers une valeur moyenne ; c'est ce que nous appelons la température.

Planck se rendit compte que la distribution de l'énergie correspondait à ce qu'il constatait dans ces expériences avec des ampoules. Quand on chauffe un objet, la lumière émise s'étale autour d'une valeur moyenne de l'énergie, avec malgré tout quelques rayons aux extrémités hautes et basses du spectre. Planck supposa donc que l'énergie se partage entre les rayons lumineux ainsi qu'elle le fait entre les particules d'un gaz.

Le truc, c'est que ce phénomène n'apparaît dans un gaz que parce qu'il est composé de particules. Si l'idée de Planck était la bonne, cela signifiait que la lumière elle aussi était faite de particules.

Il appela ces minuscules grains de lumière des « quanta », du latin *quantitas*, quantité, et poursuivit son travail, pas plus perturbé que ça.

Soyons clairs : Planck n'affirmait pas réellement que la lumière se composait de particules. C'eût été absurde. Il ne faisait qu'employer une astuce mathématique un peu idiote, car le cas était désespéré, afin que ses résultats prennent sens. Tout le monde savait bien que la lumière était une onde se déplaçant dans l'éther luminifère depuis les expériences de Young. L'idée corpusculaire de Newton était morte depuis des lustres.

Pour Planck, les quanta de lumière étaient une solution intermédiaire qu'il ne fallait pas prendre au sérieux. Naturellement, quand il reçut un article de recherche affirmant que les quanta existaient vraiment, Planck ne sut plus où se mettre.

2

En morceaux

ALBERT COMMENT ?

Planck oublia bien vite son idée des particules de lumière. En 1905, il était devenu rédacteur en chef des *Annalen der Physik*, l'une des revues de physique les plus prestigieuses du monde. Il recevait donc énormément de suggestions fantaisistes directement dans son casier, dont il écartait la plupart.

L'article qu'il reçut en mars de cette année, qui affirmait que la lumière était réellement faite de particules et que ce n'était pas une simple astuce mathématique, paraissait au premier abord appartenir à ce groupe d'idées que Planck mettait bien vite de côté. Il était écrit par un inconnu de vingt-six ans, un physicien amateur vivant en Suisse qui n'aurait pas eu le droit d'enseigner au-dessus du niveau lycée. Pourtant, la physique de l'article, par ailleurs sans défaut, éclaircissait une énigme qu'on essayait de résoudre depuis des années.

Planck était sceptique, au point qu'il envoya d'abord l'un de ses assistants en Suisse afin de vérifier que ce monsieur « A. Einstein » était bien réel, qu'il ne s'agissait pas d'un pseudonyme employé pour parer au ridicule¹. Mais dès qu'il découvrit qu'Einstein était un authentique être humain (bien que très inexpérimenté : il n'avait même pas de doctorat !), Planck publia l'article. Son idée absurde de quanta lumineux n'était peut-être pas si fantaisiste, après tout.

L'article d'Einstein traitait de ce que l'on appelle l'effet photoélectrique. En résumé, quand on envoie de la lumière sur un bout de métal propre, les électrons de la couche extérieure des atomes métalliques peuvent en être délogés et s'envoler loin de la surface.

La raison de cet effet est que les électrons absorbent la lumière ; si le rayonnement qui les percute est suffisamment énergétique, un électron peut l'absorber et se retrouver délogé. Cela n'a rien de très surprenant en soi. Ce qui est surprenant, c'est que cela ne marche pas avec toutes les couleurs.

Tous les métaux sont uniques mais, en règle générale, le rouge, l'orange et le jaune laissent de marbre une surface métallique, tandis que le vert, le bleu et le violet déclencheront des émissions d'électrons. Le vert, le bleu et le violet transportent plus d'énergie que le rouge, l'orange et le jaune, c'est donc compréhensible, mais ce qui est étrange, c'est que si vous augmentez la luminosité d'un rayonnement rouge (jusqu'à égaler un bleu), il ne se passe rien.

L'énergie quantique se mesure en électronvolts (eV pour les intimes) et une lumière rouge de 10 eV contient la même quantité d'énergie qu'une lumière bleue de 10 eV. Comment expliquer qu'une lumière bleue et une lumière rouge d'énergie égale n'ont pas le même effet ? Est-ce que 10 eV de rouge ne valent pas 10 eV de bleu ? Einstein montra que, quand on prend au sérieux la théorie des quanta de Planck, ce n'était pas le cas, en effet. Dix ne vaut plus dix.

UNE POMME POUR DEUX NOBEL

Imaginez quelqu'un tenant une pomme à bout de bras. Si vous tirez avec un pistolet à eau sur sa main (ne me demandez pas pourquoi, c'est toujours comme ça, les analogies en physique), la pomme restera en place tant que le jet ne sera pas assez puissant. Mais s'il l'est, l'énergie de l'eau surpasse la poigne et la pomme s'envole.

De la même manière, un électron est lié à un atome par une certaine quantité d'énergie et, si on augmente la luminosité de la lumière incidente, on devrait pouvoir l'en arracher à un moment, quelle que soit la couleur du rayonnement. Toutefois, ce n'est pas ce qui se passe en laboratoire. Nous devons donc une fois encore jeter notre théorie à la poubelle et essayer autre chose.

Si on reprend notre rayonnement rouge et qu'on le découpe en petits morceaux comme Planck le suggérait, chacun de ces morceaux contiendra une certaine quantité d'énergie. Un rayonnement bleu peut être divisé de la même manière, on obtient alors le même nombre de morceaux, mais chacun sera un peu plus costaud que les morceaux rouges.

Plutôt que de penser à l'énergie lumineuse comme à un jet d'eau uniforme, il faut l'imaginer en termes de particules. Les quanta de lumière rouge seront par exemple l'équivalent de balles de ping-pong. Si on jette des balles de ping-pong sur la main qui tient la pomme, peu importe leur nombre, la pomme ne bougera pas. On aura beau les envoyer par seaux entiers, chaque interaction entre la pomme et une balle sera insignifiante, et rien ne sera déplacé. Ce n'est pas une question d'intensité.

Par contraste, un quantum de lumière bleue aurait plutôt l'effet d'un boulet de canon. Tirez une seule particule vers la pomme de votre cobaye, cela suffira à l'emporter. Et probablement sa main avec. De l'importance de bien choisir son cobaye.

Une centaine de balles de ping-pong déploient peut-être la même énergie globale qu'un seul boulet de canon, mais celui-ci aura largement plus d'impact. Par conséquent, l'énergie totale d'un rayonnement lumineux n'a pas d'importance s'il est découpé en particules. Tout ce qui compte, c'est sa couleur. C'est bien ce que nous observons.

Selon Einstein, la théorie des quanta de Planck avait une signification physique réelle. Ce n'était pas qu'une façon de nous rapprocher de la réponse, c'était la réponse elle-même. La lumière est bel et bien composée de particules. Peu après la preuve d'Einstein, le chimiste Gilbert Lewis (1875–1946) décida que ces particules avaient besoin d'un nom plus sexy que « quanta de lumière » et commença ainsi à employer le mot *photon* (lumière, en grec), qui leur colla à la peau².

Planck et Einstein reçurent tous deux le prix Nobel pour leur nouvelle approche de la physique de la lumière, en 1918 et 1921 respectivement. Gilbert Lewis n'obtint rien, malheureusement, mais il

avait une moustache fantastique, si bien que tout le monde était content.

M. EINSTEIN ? VOUS ÊTES ENCORE LÀ ?

La preuve d'Einstein sur la nature corpusculaire de la lumière ne fit pas que confirmer la théorie de Planck, elle volait aussi dans les plumes de la théorie ondulatoire de Young.

D'un côté, l'effet photoélectrique et la catastrophe ultraviolette ne pouvaient s'expliquer que si la lumière est composée de particules. De l'autre, l'expérience de la double fente montrait qu'elle doit être une onde d'un certain type, évoluant dans un milieu.

Quand deux hypothèses se contredisent, les scientifiques règlent la dispute au moyen d'expériences capables de les départager. Mais, par Newton et sa pomme, que faire quand ce sont les expériences elles-mêmes qui se contredisent ? C'était une situation sans précédent en science, au point qu'il fallut inventer une stratégie de contournement.

Peut-être était-il possible d'expliquer les résultats de la double fente d'Young en termes de photons ? Sont-ils projetés en éventail à la manière d'une mitrailleuse, si bien qu'ils s'entrechoquent en vol et génèrent ainsi le motif zébré ?

La meilleure façon de confirmer cela serait d'empêcher les photons d'interagir lors de leur parcours au travers de la double fente. Plutôt que de les projeter tous d'un coup, il fallait essayer de les envoyer individuellement, remplaçant la mitrailleuse par un fusil de sniper.

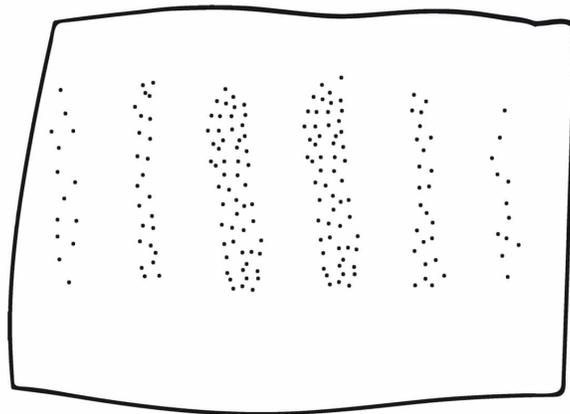
De nombreuses versions de cette expérience ont été tentées à travers les années, mais la meilleure, et de loin, fut celle d'Akira Tonomura en 1994, alors qu'il travaillait pour Hitachi³. Eh oui, cette entreprise qui construit des réservoirs, des frigos et des vibromasseurs est aussi à l'origine de l'expérience de la double fente la plus précise jamais réalisée.

Les détails de l'installation de Tonomura sont bien différents de ceux de Thomas Young, mais les objectifs sont les mêmes, si bien que par souci de simplicité et de facilité, j'emploierai la même terminologie, même si ce n'est pas aussi simple que ça.

Dans son expérience, Tonomura pouvait modifier la luminosité de la source qui envoyait les photons vers les deux fentes. Un écran détecteur fait d'un matériau qui s'illumine au contact était placé de l'autre côté. Chaque particule qui venait le frapper créait donc un minuscule point de lumière.

Quand un gros paquet de lumière était tiré vers les fentes, comme dans l'expérience originale de Young, Tonomura obtenait le motif zébré attendu. Mais quand il diminuait l'intensité jusqu'à émettre photon par photon, il obtenait un truc complètement bizarre.

Durant les premières minutes, rien ne se passait. Chaque photon tiré vers les fentes frappait le détecteur en un point aléatoire. Mais tandis qu'il l'observait, la disposition des points commença à s'organiser en rubans. Ils ne frappaient pas du tout l'écran au hasard, en fait. Ils le frappaient ainsi... Ça vous rappelle quelque chose ?



Cela devrait être impossible, puisque chaque particule est tirée individuellement. Pour obtenir le motif zébré, il faut qu'un photon qui passe par une fente se mélange à un autre passé par l'autre fente. Si les photons sont tirés individuellement, il n'y a pas de mélange possible. Comment les photons créent-ils un motif d'interférence

alors que rien n'interfère avec eux ? Les photons passeraient-ils par les deux fentes en même temps ?

PANTALON QUANTIQUE

Je me souviens d'avoir une fois tiré un pantalon de pyjama du baquet de linge pour découvrir que je le portais déjà sur moi. Pendant quelques secondes, je suis resté interdit, m'estimant le possesseur d'un pantalon quantique capable d'exister dans une superposition d'endroits.

C'est alors qu'on m'a fait remarquer que je possédais en réalité deux fois le même pantalon, ce dont je ne m'étais jamais rendu compte. Pour ma défense, je réfléchissais à cette époque à la physique quantique et, en physique quantique, l'explication simple n'est jamais la bonne. Elle ne marche jamais.

L'expérience de la double fente montre que la lumière peut se comporter comme une particule quand on l'expulse d'un émetteur et comme une onde quand elle passe dans les fentes.

En physique « classique », la physique d'Isaac Newton dans laquelle le monde se comporte de façon raisonnable, les particules et les ondes sont des choses distinctes. La physique quantique commençait à brouiller cette distinction.

MINUSCULES SAUTEURS

Alors qu'Einstein recevait son prix Nobel en Suède, un jeune physicien danois amateur de football⁴, nommé Niels Bohr, appliquait la théorie quantique à des atomes entiers.

Les atomes sont constitués de particules appelées protons, qui se regroupent dans un noyau central, et électrons, qui lévitent à l'extérieur de celui-ci comme des abeilles autour d'une ruche. (NB : les neutrons, qui sont présents dans le noyau, n'avaient pas encore été découverts à l'époque.)

On savait que la lumière émise par un atome est spécifique de cet atome. Le fer chauffé à blanc émet des fréquences différentes de celles qu'émet le nickel, par exemple, et inversement, il absorbe différemment les lumières colorées qui l'éclairent. C'était auparavant difficile à expliquer car la lumière était vue comme une substance ondulatoire et homogène. Pourquoi donc n'interagit-elle avec la matière qu'à certaines valeurs précises ?

Dès qu'on a su qu'un rayon de lumière est composé de particules d'énergie spécifique, il est devenu possible d'expliquer sa façon d'interagir avec la matière. L'énergie des photons ayant une valeur donnée, il devenait raisonnable de penser que c'est aussi le cas de l'énergie des électrons.

Dans la théorie quantique de l'atome de Bohr, les électrons ne gravitent pas autour du noyau au hasard. Ils se déplacent à la surface de sphères invisibles situées à des distances bien précises. Bohr appelait ces sphères les « couches électroniques », même si, évidemment, il aurait dû les appeler des Bohrbits.

L'atome de Bohr était une version tridimensionnelle d'un système solaire. Encore aujourd'hui, les représentations populaires de l'atome suivent ce schéma. La différence entre les électrons d'un atome et une planète, c'est que les planètes peuvent orbiter autour du Soleil à n'importe quelle distance. La gravité exerce une force en tous points de l'espace et diminue en douceur avec la distance, si bien que toutes les orbites sont permises pourvu qu'on se déplace suffisamment vite pour ne pas être aspiré.

Les couches électroniques de la physique quantique sont différentes. Les électrons ne sont pas autorisés à absorber n'importe quelle énergie, car celle-ci s'avale seulement à des valeurs spécifiques (on dit qu'elle est quantifiée).

Un électron de faible énergie se déplace sur une couche proche du noyau mais, s'il absorbe un photon, il augmente son niveau d'énergie et peut orbiter sur une couche plus éloignée. Comme les distances entre les couches sont fixes, seuls certains sauts énergétiques sont permis, ce qui explique que, selon l'atome, seuls certains rayons lumineux interagiront avec lui.

Supposez que franchir la distance entre deux couches nécessite un saut de 20 eV. Si un électron absorbe un photon de 20 eV, il peut effectuer un saut parfait. Mais si nous tirions un photon de 19 eV vers l'atome, rien ne pourrait se passer. Un saut de 19 eV n'est pas permis. Le photon continuera à baguenauder comme si l'atome n'était pas là.

Si c'est vrai, cela signifie que les électrons ne peuvent adopter de niveaux d'énergie intermédiaires, entre les couches. Quand un électron absorbe un photon et passe à une couche plus lointaine, il ne franchit aucun *no man's land* entre les deux. Il passe apparemment de la couche proche à la couche lointaine en un instant, ce que l'on appelle un « saut quantique ». Je ne dis pas qu'il se téléporte d'une couche à l'autre... mais ça y ressemble drôlement.

Un saut quantique, c'est un électron qui disparaît d'une couche pour réapparaître dans une autre, tout en absorbant un photon (s'il gagne de l'énergie) ou en en émettant un (s'il en perd), simultanément. Ironie du sort, dans le langage courant, le saut quantique a tendance à désigner un changement colossal, alors qu'il s'agit littéralement de la plus petite modification possible !

Bohr ne savait pas pourquoi les électrons orbitaient à certains niveaux d'énergie et sautaient quantiquement entre niveaux différents, bien sûr, mais cela expliquait ce qu'il voulait expliquer, alors il a décidé de ne pas s'en préoccuper.

Au fond, Bohr a créé un collage à partir d'idées physiques existantes comme un enfant qui aurait dérobé différents bouts de tissu dans le placard de ses parents pour les assembler en une œuvre sincère, bien que très laide. Et comme personne n'avait fait mieux, tout le monde accepta sans rien dire et l'aimanta au frigo.

L'EFFET DE BOHR

Le saut quantique, cependant, explique un autre fait crucial. Les protons exercent une force qui attire les électrons. C'est cette force que les électrons doivent surpasser pour que l'effet photoélectrique

se manifeste. Nous appelons cette propriété attractive d'une particule sa « charge », et cette charge est de deux types que nous nommons arbitrairement « positive » (dans le cas du proton) et « négative » (le cas de l'électron). Des particules de charges identiques se repoussent comme les pôles identiques de deux aimants, tandis que des particules de charges opposées s'attirent.

Nous connaissons la charge depuis l'époque de Benjamin Franklin et de son expérience avec des éclairs et un cerf-volant (ce n'est pas une légende urbaine, cette expérience a vraiment eu lieu⁵). Ce qu'est vraiment la charge est un peu compliqué (le chapitre 12 en parle), mais que vous sachiez ou non ce qui crée la charge, une question se pose : si les électrons sont de charge opposée aux protons et sont attirés par eux, comment se fait-il qu'ils ne tombent pas en spirale vers le noyau, rétrécissant ainsi l'atome ? Pourquoi les atomes persistent-ils, en d'autres termes ?

La réponse de Bohr est que cela violerait le principe de l'énergie quantique. Un électron sur la couche la plus proche du noyau est au plus bas niveau de l'échelle énergétique. S'il se mettait à spiraler vers l'intérieur, il se retrouverait à toutes sortes de niveaux d'énergie prohibés.

La seule manière de perdre encore de l'énergie une fois perché sur le barreau le plus bas, ce serait de sauter de l'échelle, et de cesser d'être, tout simplement. Les électrons peuvent bien vouloir désespérément se rapprocher du noyau, le principe de l'énergie quantique est plus profond que la loi d'attraction des charges.

ROIS DES ÉLECTRONS

À peu près au moment où la physique quantique germait en Europe, le parrain indiscutable de la physique des particules était le physicien britannique Joseph John Thomson (1856–1940), l'homme qui montra que l'électron portait une charge négative, et qui d'ailleurs avait découvert l'électron.

Aujourd'hui, les cendres de Thomson sont enterrées au côté de celles d'Isaac Newton et, à l'université Cambridge, le département

des sciences est situé sur l'avenue J. J. Thomson. Oh, et il était chevalier. Et puis il a eu le prix Nobel. De même que six de ses étudiants.

A-t-il pour autant inventé le pantalon quantique ?

Découvrir l'électron et ses propriétés a été le couronnement de la carrière de Thomson. Il avait démontré leur existence en déviant des arcs électriques et en mesurant leur masse. Comme l'électricité avait une masse, il était évident qu'elle était faite de particules qui en ont une aussi.

Quand il annonça sa découverte le 30 avril 1897, plusieurs personnes s'approchèrent de lui à la fin de la conférence afin de le féliciter pour son canular réussi⁶. Rien ne pouvait être plus petit qu'un atome, tout le monde le savait bien !

Les électrons existent pourtant, pas de doute. Deux mille fois plus légers que le plus petit des atomes, l'atome d'hydrogène, mais réels néanmoins. Thomson avait d'abord voulu les nommer « corpuscules » en l'honneur de Newton, tandis que le physicien américain Carl Anderson voulait les nommer « négatrons »⁷ (ce qui aurait été le meilleur nom possible, nous sommes d'accord), mais « électron » l'emporta finalement.

Parmi les étudiants célèbres de Thomson, citons Ernest Rutherford, qui découvrit le noyau atomique, et Niels Bohr, qui montra que les électrons orbitaient en couches autour du noyau.

Toutefois, la découverte la plus révolutionnaire d'un étudiant de Thomson fut que les électrons ne sont pas des particules tout le temps. Ils adoptent parfois le comportement d'une onde, à la manière des photons. Une découverte que l'on doit à George Thomson, le fils de J. J.

George s'intéressait à cette histoire de lumière se comportant parfois comme une particule, parfois comme une onde. Il décida de déterminer si c'était aussi le cas des électrons.

Si les électrons avaient des propriétés ondulatoires, il ne pouvait s'agir que de très petites ondes, bien sûr, puisqu'on ne les avait jamais détectées jusque-là. Afin de diffracter des électrons au cours d'une expérience de double fente, il lui faudrait donc une double

fente minuscule (plus l'onde est petite, plus l'écart entre les fentes doit être petit), ce qui n'était pas facile à construire.

Pour contourner le problème, il se procura des pellicules en celluloïde, comme celles qu'on utilise dans les caméras de cinéma. Dans cette substance, les atomes sont disposés en rangs à intervalles réguliers, sorte de double fente à l'échelle atomique. Il n'avait plus qu'à tirer un flux d'électrons là-dessus.

Évidemment, le rayon se sépara de l'autre côté pour donner le motif zébré, ce qui signifiait que les électrons interféraient les uns avec les autres (NB : ce sont en réalité des électrons que Tonomura employa dans son expérience décrite plus haut, mais je craignais qu'annoncer dès ce moment-là que les électrons aussi sont des ondes ne provoque une panique de masse, des émeutes et la fin de la civilisation telle que nous la connaissons, si bien que j'ai menti).

Il s'avérait ainsi que les électrons, dont tout le monde savait qu'il s'agissait de particules, pouvaient se superposer et se diffracter comme des ondes lumineuses. Et un prix Nobel pour George, un !

C'est quand même chouette que J. J. Thomson ait reçu le prix Nobel 1908 pour avoir prouvé que les électrons sont des particules et que son fils l'ait à son tour remporté en 1937 pour avoir démontré le contraire. J'aime assez imaginer les dîners de Noël gênants chez les Thomson, George et J. J. assis face à face, astiquant chacun sa médaille la mine renfrognée, cotillons sur la tête, et puis M^{me} Thomson mal à l'aise entre les deux... « Qui reprendra du pudding ? »

3

Aristocrates, bombes et pollen

LE DUC DE LA DUALITÉ

J'ai un vieux souvenir perdu dans les brumes de ma jeunesse, celui d'avoir subi un entretien d'entrée à l'université devant quatre scientifiques distingués qui m'avaient demandé ce que je savais de la théorie quantique. Je l'avais bêtement mentionnée dans ma lettre de motivation, si bien qu'ils me passèrent sur le gril à ce sujet afin de me faire changer ma couche électronique.

J'ai vaguement évoqué quelques informations sur les ondes et les particules en essayant de faire croire que je maîtrisais mon sujet, jusqu'à ce que l'une des juges lève la main, stoppe ma tirade et me demande très doucement : « Donc, un électron, c'est une onde ou une particule ? ». Puis elle s'est assise et m'a regardé m'embrouiller. Cette expérience ne m'a pas laissé amer, mais en toute honnêteté, la question qu'elle m'avait posée n'admettait pas de réponse.

Ce mystère des électrons et des photons qui se comportent de plusieurs manières a été appelé la « dualité onde-particule », une expression employée d'abord par un noble français, Louis Victor Pierre Raymond, 7^e duc de Broglie (prononcez « Breuil »). Louis avait servi dans l'armée durant la Première Guerre mondiale et avait insisté pour aller à l'université ensuite, à la fois en histoire et en physique, des matières qu'il jugeait indispensables à la compréhension du passé et de l'avenir de l'humanité.

La théorie quantique avait alors le vent en poupe, aussi décida-t-il de consacrer sa thèse à cette énigme majeure. Était-il possible que des choses dans l'univers ne soient ni ondes ni particules, et n'adoptent ces formes qu'en fonction des expériences que nous réalisons ? Les électrons et les photons sautent-ils d'un état à

l'autre ? Notre maigre cerveau de chimpanzé était-il seulement capable de concevoir les agissements de la nature au niveau quantique ?

S'agissant des ondes, nous sommes capables de calculer l'énergie qu'elles transportent à partir de leur fréquence (combien de vagues vous frappent toutes les secondes) ou de leur longueur d'onde (quelle distance sépare leurs crêtes).

Comme nous pouvons également calculer l'énergie d'une particule en mouvement à l'aide de sa masse et de sa vitesse, de Broglie posa cette question : et si ces deux énergies étaient égales ? Si nous connaissons les propriétés de quelque chose en termes de particules, nous pouvons calculer son énergie puis reconfigurer notre cerveau pour la considérer comme une onde, dont nous venons de déterminer l'énergie. L'énergie sert de traductrice entre la physique ondulatoire et la physique des particules.

Cette suggestion ne rencontra d'abord que le scepticisme. Sommes-nous vraiment prêts à considérer que toute particule a une longueur d'onde et toute onde une masse ? Heureusement pour de Broglie, Albert Einstein aimait beaucoup son idée, et il la soutint lors de ses conférences (ce qui ne fait jamais de mal).

L'approche de de Broglie considère qu'on peut prendre n'importe quelle particule et calculer sa « longueur d'onde associée ». Une fois qu'on l'a déterminée, on peut construire une double fente à la bonne taille au travers de laquelle on fait passer cette particule pour obtenir un motif d'interférence de l'autre côté. Nous sommes peut-être incapables de concevoir comment une chose peut à la fois être une onde et une particule en même temps, cela ne nous empêche pas de le formuler mathématiquement et d'en retirer des données fiables.

Surtout, ça marchait. En 1944, Ernest Wollan employa la théorie de de Broglie pour diffracter des neutrons, des milliers de fois plus lourds que les électrons, au travers d'un cristal de sel de table¹. Les protons peuvent être diffractés de la même façon, même si, bizarrement, nous ignorons qui a tenté le coup en premier. Avec le recul, j'aurais probablement dû me dispenser d'affirmer que c'était moi dans cette lettre de motivation.

UN PEU DE DIFFRACTION

Apprendre que protons, neutrons et électrons se comportent tous comme des ondes est à la fois étrange et profond. Tous les objets du monde sont faits de ces particules, donc tout ce que nous considérons comme de la matière, notre propre corps compris, a quelque chose d'une onde. Votre corps a une longueur d'onde et si on trouvait une manière de vous propulser au travers de la double fente appropriée, vous pourriez vous diffracter.

Pour les curieux : un humain moyen propulsé par un canon à trente mètres par seconde aurait une longueur d'onde au sens de de Broglie d'à peu près 0,000000000000000000000000000003 mètre. Si nous trouvions un moyen d'aligner tous les atomes du corps de cet humain moyen avec une double fente de cette taille, nous observerions bien une diffraction. On pourrait par exemple faire l'expérience avec notre cobaye précédent, celui dont on a arraché la main avec un boulet de canon.

Le record actuel de diffraction d'un objet plus gros qu'une particule unique est tenu par Sandra Eibenberger qui, en 2013, a réussi à faire interférer avec elle-même une molécule de $C_{284}H_{190}F_{320}S_{12}N_4$. Ce sont donc 810 atomes qui sont passés au travers des deux fentes à la fois². Pas tout à fait un corps humain, mais il y a un début à tout.

ENTRE ICI, HEISENBERG

Avant d'être un professeur de chimie hors-la-loi au Nouveau-Mexique interprété par Bryan Cranston, Werner Heisenberg était l'un des meilleurs mathématiciens du monde. À la différence de Planck, Einstein et de Broglie, qui se concentraient sur les résultats expérimentaux, Heisenberg portait davantage son attention sur les théories bien établies, qu'il tordait jusqu'au point de rupture sans se soucier des conséquences pour les laborantins.

Il était notoirement ignare en physique du monde réel. Durant sa soutenance de thèse, il dut admettre n'avoir aucune idée du

fonctionnement d'une simple pile quand on lui posa la question³ (ce que je trouve rassurant : de toute évidence, même Heisenberg eut à subir des entretiens humiliants).

Malgré son incompetence pratique, son excellence mathématique était unique. En 1920, il fut embauché pour travailler avec Arnold Sommerfeld, l'un des physiciens qui avaient aidé Bohr à construire sa théorie atomique.

Sommerfeld lui donna une énigme à résoudre qui impliquait les mathématiques cachées derrière la manière dont la lumière se divise, un mystère que Heisenberg perça en moins d'une nuit. Seulement, sa solution était si complexe que Sommerfeld la rejeta, supposant qu'il n'avait pas pu trouver si vite la bonne réponse. Jusqu'à ce que, quelques mois plus tard, un physicien alors bien plus célèbre nommé Alfred Landé publie exactement la même idée et rafle tous les honneurs⁴.

Peu après cette expérience, Heisenberg changea d'emploi pour travailler avec Niels Bohr à l'Institut de Physique théorique de Copenhague, au Danemark, qui était devenu la Mecque de la recherche quantique. Peut-être était-il déçu que Sommerfeld n'ait pas reconnu son génie, ou bien voulait-il plutôt travailler pour un prix Nobel (Sommerfeld avait été nommé quatre-vingt-une fois sans jamais l'emporter). Quoi qu'il en soit, Heisenberg déménagea et devint le meilleur élève de Bohr et l'un de ses plus proches amis.

Ce fut l'âge d'or d'Heisenberg. Il était entouré des esprits les plus affûtés d'Europe, en train de concevoir la plupart des méthodes et équations que nous utilisons encore aujourd'hui en physique quantique. Heisenberg et Bohr randonnaient ensemble en montagne, sortaient en ville pour des rencontres galantes et passaient tout leur temps éveillé à discuter du comportement étrange des particules. C'était une époque où Heisenberg était vraiment heureux et respecté.

Malheureusement, la deuxième moitié de sa vie est plus controversée. Quand le nazisme se répandit en Europe, de nombreux scientifiques fuirent le carnage et s'installèrent en Amérique. Heisenberg resta, lui, et fut recruté par les nazis pour les aider à construire leur bombe atomique.

Selon certains historiens, Heisenberg tenta de saboter le projet de l'intérieur car, dans des entretiens d'après-guerre, il décrivit avec précision le moyen de l'amener à terme, alors que celui-ci n'avait jamais abouti. Peut-être avait-il compris comment faire et s'était-il bien gardé de le dire afin de miner l'effort de guerre nazi⁵.

Toutefois, on découvrit en 2002 une correspondance entre Heisenberg et Bohr, et le tableau qui en ressort n'est pas si reluisant. Il semblerait qu'Heisenberg ne voyait aucun problème à travailler sur la bombe, et que le projet échoua faute de disposer d'une bonne équipe (les scientifiques compétents avaient franchi l'océan), lui-même étant très mauvais dès lors qu'il franchissait la porte du laboratoire⁶. Il faut croire que tout l'équipement devait fonctionner avec des piles.

Personne ne connaît exactement le positionnement éthique d'Heisenberg durant ces années. Il s'est tout de même attiré les foudres des autorités en louant les travaux d'Albert Einstein, un physicien juif, et n'évita de gros ennuis que parce que sa mère l'en tira. Madame Heisenberg était une bonne amie de Madame Himmler, voyez-vous, la mère de Heinrich Himmler, commandant de la SS, et quand Heisenberg se mit dans le pétrin, elle appela son amie et dit (je paraphrase) : « Dis à ton fils de laisser le mien tranquille ! »⁷

Sur ces questions politiques, je soupçonne Heisenberg de ne pas s'être beaucoup creusé la tête quant aux implications éthiques de son travail. Il se contentait de vouloir résoudre les problèmes de physique que les gens lui soumettaient.

Porter un jugement rétrospectif est difficile, parce que nous ne disposons pas de tous les éléments. N'oublions pas non plus que les Alliés ne comptaient pas que des saints dans leurs rangs. Robert Oppenheimer, l'homologue d'Heisenberg côté américain, avait tout de même tenté d'empoisonner son directeur de thèse en plongeant, comme dans un conte de fées, une pomme dans des produits toxiques. Ce qu'on pourrait appeler une tentative de meurtre⁸.

Bref, si nous laissons de côté les aspects politiques de la seconde moitié de sa vie, la contribution d'Heisenberg à la théorie quantique

est inestimable.

ÉLIMINER LES DISTRACTIONS

Un été, alors qu'il se débattait contre un sévère accès de rhume des foies, Heisenberg décida d'aller passer des vacances sur l'île d'Heligoland, de laquelle toute plante productrice de pollen est absente. Durant cette pause, il découvrit une nouvelle approche mathématique de la théorie quantique, à l'origine de ce qui devait le rendre célèbre : le principe d'incertitude⁹.

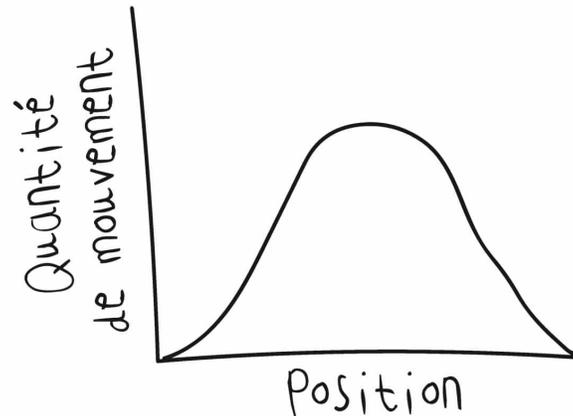
Les particules ont des propriétés bien définies que l'on peut mesurer. Leur position, leur vitesse, leur masse, ce genre de chose. Si nous connaissons tout de l'état initial d'une particule, nous pouvons, en théorie, prédire ce qui se passera l'instant suivant. Et le suivant. Et celui d'après.

Cette philosophie déterministe naquit avec Isaac Newton, et c'est elle qui donna toute son importance à la physique. Quand les mystiques d'antan clamaient qu'il fallait massacrer des vierges et boire du sang de pigeon pour prédire l'avenir, Newton montra que c'était possible avec seulement quelques équations et une précision de 100 %.

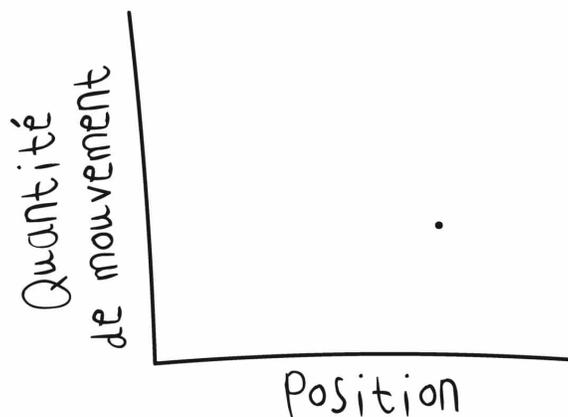
Mais de Broglie et compagnie découvrirent que toutes les particules ont aussi des propriétés ondulatoires. Se demander « où » est une particule et « à quelle vitesse » elle se déplace sont deux questions séparées dans la physique de Newton. Or, comme les ondes sont, par définition, constamment en mouvement, et qu'elles s'étalent sur toute une région, les concepts de vitesse et de localisation ne sont plus indépendants.

Si vous avez une information sur la localisation d'une onde, elle vous permet également d'avoir une information sur sa vitesse, et vice versa. Les deux propriétés sont liées. Heisenberg appliqua une idée similaire aux particules. Leur mouvement et leur position ne pouvaient pas vraiment être traités séparément, parce qu'elles n'étaient que partiellement particulaires.

Si nous prenons une particule pour laquelle nous n'avons rien mesuré, nous pouvons décrire sa quantité de mouvement (le produit de sa masse et de sa vitesse) et sa position probables avec un graphique tel que celui-ci :

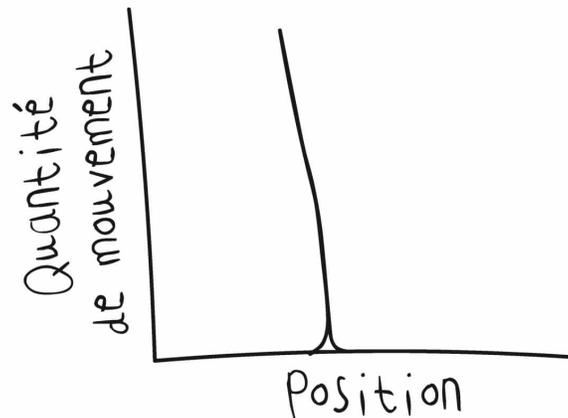


Tout ce que nous savons, c'est que les caractéristiques physiques de la particule se situeront quelque part sous cette cloche. Quand nous prenons une mesure, nous écrasons la cloche jusqu'à la réduire à un point placé quelque part sur le graphique, qui donne les deux valeurs à la fois : la position de la particule et sa quantité de mouvement.



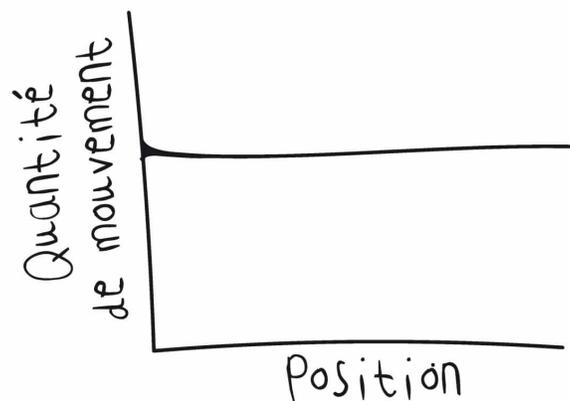
Dans ce diagramme, il nous suffit de lire l'axe horizontal pour trouver la position de la particule, et l'axe vertical pour découvrir la quantité de mouvement. Simple et efficace.

Mais Heisenberg savait que les ondes se comportent différemment. Dans le cas d'une onde, essayez de définir ses caractéristiques, et vous obtiendrez un pic de ce genre :



On sait exactement où est la particule puisqu'on a réduit sa position à une seule valeur sur l'axe horizontal, mais sur l'axe vertical, on trouve toute une gamme de valeurs possibles pour sa quantité de mouvement. La position et la quantité de mouvement ne sont pas ici séparées comme en physique classique, si bien que, quand on connaît la position de la particule, on perd toute certitude quant à sa quantité de mouvement.

Si on prend les choses en sens inverse, on pourra mesurer précisément la quantité de mouvement d'une particule, mais alors elle se mettra à exister en plein d'endroits à la fois :



La quantité de mouvement et la position sont des propriétés liées en théorie quantique. Nous pouvons connaître soit la position d'une

particule, soit sa quantité de mouvement, mais pas les deux à la fois.

EN A-T-ON LA CERTITUDE ?

C'est la première « relation d'incertitude » et la plus souvent citée : on ne peut jamais connaître la position et la quantité de mouvement d'une particule en même temps, et si vous connaissez l'une, vous perdez toute information sur l'autre. Avec l'évolution de la théorie quantique, d'autres paires de propriétés liées sont apparues (je vous en présenterai certaines plus tard), mais l'incertitude originelle d'Heisenberg fait encore aujourd'hui trembler les fondations de la physique.

Pour le dire simplement, la théorie quantique stipule qu'il est impossible de tout connaître d'un objet, parce qu'il y aura toujours quelque chose qu'on ne pourra pas mesurer. Si vous en savez beaucoup sur une propriété, vous avez automatiquement perdu de l'information sur une autre.

La vision newtonienne de l'univers dans lequel nous accédons au futur en connaissant le présent a été pulvérisée par un matheux binoclard souffrant d'un rhume des foins. Il est impossible de tout connaître du présent, donc prédire correctement le futur n'arrivera jamais.

On tombe parfois sur de mauvaises descriptions du principe d'incertitude d'Heisenberg qui disent que notre matériel n'est pas assez sophistiqué pour déterminer toutes les propriétés d'une particule, mais c'est un mauvais résumé. La qualité du détecteur n'entre pas en ligne de compte, pas plus que la précision de la mesure. Il est impossible de déterminer complètement les propriétés d'une particule parce que ce n'est pas seulement une particule. C'est aussi une onde.

Demander ses caractéristiques à un électron revient à demander « C'est quoi la lettre de Guerre et Paix ? » ou « Quelle est la couleur de l'arc-en-ciel ? » C'est amputer la description d'un aspect irréductible.

Comme Heisenberg le dit lui-même : « Nous ne pouvons pas connaître, par principe, tous les détails du présent. »¹⁰ La théorie quantique nous force à abandonner le rêve de Newton de prédire le futur avec précision.

Dans le monde de tous les jours, c'est facile de connaître la position d'un objet et sa vitesse. C'est même la base de tous les sports. Le football quantique serait injouable (quoique hilarant) car, si on lançait la balle avec une quantité de mouvement connue, il deviendrait impossible de savoir où elle se trouve. Elle se transformerait en un nuage flou dans les airs et, même si l'on pouvait voir à quelle vitesse bouge celui-ci, on ne saurait pas exactement où se mettre pour le réceptionner. La seule raison pour laquelle le principe d'incertitude passe inaperçu dans la vie de tous les jours, c'est que nous sommes très très grands comparés aux « nuages d'incertitude ». Cela ne pose pas de problème dans nos tâches quotidiennes, mais dès que nous voulons mesurer une particule individuelle, nous percutons le mur de l'ignorance.

Cela signifie aussi qu'une particule n'est jamais au repos. Si un électron arrêta ses déplacements autour du noyau, sa position serait bien définie et sa quantité de mouvement unique (égale à zéro). Il se comporterait entièrement comme une particule, et sa nature ondulatoire s'évanouirait. Cela n'arrive jamais, donc les particules sont en mouvement perpétuel.

Pour citer Heisenberg :

« Il était presque trois heures du matin quand les résultats finaux de mes calculs s'étalèrent sous mes yeux. [...] Au début, j'étais très alarmé. J'avais le sentiment que, sous la surface des phénomènes atomiques, j'observais un intérieur à la beauté étrange, et je me sentis pris de vertige à la pensée que je devais à présent sonder ce trésor de structures mathématiques que la nature avait si généreusement déposé à mes pieds. J'étais bien trop excité pour dormir, aussi, alors que poignait l'aube, je me dirigeai vers la pointe sud de l'île où se tenait un rocher qui se jetait dans la mer et que j'avais eu envie d'escalader. J'y parvins sans trop de problèmes, et là, j'attendis que le soleil se lève. »¹¹

4

Apprivoiser la bête

OH, DOCTEUR SCHRÖDINGER !

La théorie atomique de Bohr, avec ses couches d'électrons et ses sauts quantiques, n'était pas encore au goût de tout le monde. Elle n'expliquait pas pourquoi seules certaines couches électroniques étaient autorisées et les données qu'elle prédisait ne correspondaient pas toujours à celles obtenues au cours des expériences.

Bohr avait assemblé son atome avec des bouts issus de différentes théories, comme un enfant produirait un nouveau jouet avec les bras de sa vieille poupée et le corps de son nounours. Il savait bien que sa construction ne durerait pas éternellement. Il devait y avoir une théorie plus propre, plus élégante, à laquelle personne n'avait encore pensé. Celui qui la trouva fut Erwin Schrödinger, un homme auquel les gazettes mondaines prêtaient attention pour sa vie personnelle bien plus que pour ses travaux.

Schrödinger était un excentrique, un libéral spirituel, un génie portant nœud papillon. Au cours d'une longue carrière de cinquante années, sa plume prolifique s'intéressa à bien des domaines, dont la science, les arts et la philosophie. Il était banni de la société polie où son mode de vie faisait scandale, car il vivait au sein d'un ménage à trois, entouré de sa femme et de sa maîtresse, Anny et Hilde, tout en ayant des enfants avec au moins deux autres femmes (contrairement à une légende urbaine tenace, les surdoués en science ont parfois une vie intime très remplie et de nombreuses relations avec qui la partager).¹

Aussi intéressantes qu'elles soient, cependant, ses histoires de zizi-panpan ne sont pas ce qui valut à Schrödinger son prix Nobel

(dommage, le discours de réception aurait été mémorable). Il mérita cet honneur pour avoir concocté une meilleure façon d'expliquer l'atome.

UN JOLI CADEAU DE NOËL

Schrödinger détestait Noël. Il était connu pour son opposition à tout événement enrobé du moindre vernis religieux, c'est pourquoi, en décembre 1925, il décida de s'isoler des festivités dans une villa perdue en Suisse. Sa femme resta au foyer, mais « une vieille amie de Vienne », dont l'identité n'est pas connue², l'accompagnait dans sa retraite. Bien qu'il ait cessé d'écrire son journal autour de cette période, si bien que personne ne sait exactement ce qu'il y fit, on sait tout de même qu'il emporta dans ses bagages un problème de physique pour les vacances.

Schrödinger ne s'intéressait pas beaucoup à la théorie quantique au départ. C'était un physicien doué, mais son domaine d'expertise était le comportement des ondes, pas des particules. Électrons, photons, protons, tout cela l'ennuyait. Jusqu'à ce que, bien sûr, on découvre qu'il fallait parfois penser à ces particules comme à des ondes.

Schrödinger savait qu'existaient déjà des douzaines d'équations pour prédire le comportement des électrons considérés comme des particules, mais personne n'avait inventé de méthode pour les décrire comme des ondes. Il se souvint plus tard de cette époque : « cette idée jusqu'au-boutiste peut être fausse mais, d'un autre côté, le point de vue contraire qui néglige les ondes, a entraîné tant de difficultés qu'il paraît opportun d'insister lourdement sur l'approche opposée. »³

Tout le monde utilisait la physique des particules pour décrire l'atome, mais s'il obtenait une équation d'onde équivalente, celle-ci pourrait peut-être apporter des éclaircissements. En gros, Schrödinger s'efforçait de paraître bizarre et différent. Au vu de ses succès avec le sexe opposé et du prix Nobel négligemment posé sur sa table de nuit, il avait peut-être raison.

De son propre aveu, Schrödinger n'était pas assez calé en mathématiques pour imaginer une nouvelle loi⁴, pourtant, il s'est surpris lui-même durant cet hiver mystérieux. Alors que l'année nouvelle commençait à peine, il émergea de sa retraite en brandissant ce que tout le monde cherchait : une équation qui prédisait correctement les énergies des électrons autour du noyau.

Schrödinger mit de côté la question de la dualité onde-particule et se concentra sur les aspects uniquement ondulatoires. Il imagina étirer chaque électron autour de la surface des atomes comme on étale du beurre sur une tartine ; la membrane électronique ainsi obtenue pouvait entourer le noyau et vibrer à certaines fréquences.

Avec quelques données initiales, telles que la masse et la force d'attraction qu'exerce le noyau, l'équation de Schrödinger prédit correctement, à l'aide de ce qu'il appelle une « fonction d'onde », la forme tridimensionnelle (au sein des limites posées par Heisenberg) dans laquelle l'électron d'un atome vibre.

Une fonction d'onde permet de générer une liste de propriétés de l'électron considéré en un point particulier de l'espace et du temps : l'amplitude de l'onde, sa longueur, sa vitesse de propagation, etc.

L'équation de Schrödinger, quant à elle, prédit l'évolution dans le temps de cette fonction d'onde et ainsi des propriétés et du comportement de l'électron. De plus, elle explique enfin pourquoi seules certaines valeurs sont autorisées.

LÀ OÙ ON VA, ON N'A PAS BESOIN DE PARTICULES

Comme tout électron dans un atome est piégé par le noyau, des restrictions s'imposent à son comportement. Par exemple, une onde ne peut admettre qu'un nombre entier d'ondulations, comme sur le schéma ci-dessous. À gauche, une onde simple, à droite, une onde double.



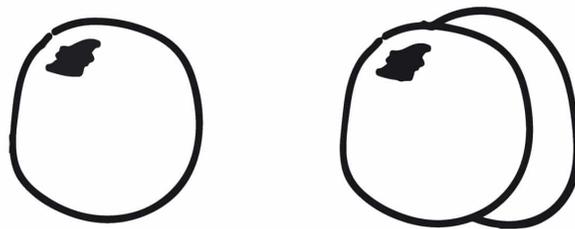
Impossible d'avoir trois quarts d'onde, cela ne rentrerait pas pile dans la ligne. Seules des formes précises sont autorisées.

Ces ondes autorisées sont appelées « harmoniques », un nom qui sonne vaguement musical, et cela n'a rien d'une coïncidence. Les formes du schéma plus haut correspondent aux notes que l'on peut obtenir avec un instrument à cordes, chaque forme produisant dans l'air un son différent.

Quand vous grattez une corde de guitare ou de banjo, elle vibre avec une énergie très précise. Une note différente donnera une harmonique différente (une onde autorisée). L'équation de Schrödinger montre que les électrons liés à un noyau se comportent tout aussi musicalement.

Il faut imaginer cela avec des dimensions supplémentaires, évidemment, puisque les atomes ne sont pas des lignes droites, mais si on peut calculer les harmoniques d'une oscillation dans les trois dimensions, on devrait obtenir les formes que peuvent adopter les ondes électroniques. C'est un calcul difficile à faire (et trop compliqué pour Schrödinger), mais heureusement d'autres mathématiciens y arrivèrent bien vite.

La première harmonique de l'électron est sphérique (à gauche ci-dessous). La deuxième ressemble à deux balles écrasées l'une contre l'autre, une derrière et une devant (à droite sur le schéma).



Ces formes, sphérique et en haltères, nous disent où trouver une onde électronique. Plutôt que de petites billes se déplaçant autour du noyau, il faut imaginer les électrons comme des surfaces vibrantes prenant des formes bulbeuses ayant le noyau pour centre. Quand on monte dans les niveaux d'énergie, des formes plus compliquées apparaissent (trop tarabiscotées pour que je les dessine, mes capacités artistiques se limitent plus ou moins à ces

croquis de sphères mais, si vous êtes curieux, googlez les termes « orbitale S », « orbitale P », « orbitale D » et « orbitale F »).

Ces régions autour du noyau où évoluent les électrons ne doivent plus être considérées comme des orbites, c'est pourquoi nous les appelons plutôt des « orbitales ». Des Schrödingong auraient mieux sonné, certes.

Tout cela explique enfin d'où vient la quantification de l'énergie. Seules certaines harmoniques conviennent à un noyau, si bien qu'un atome donné ne peut admettre que certaines valeurs précises d'énergie. Dans la théorie des couches de Bohr, les niveaux d'énergie étaient quelque chose qu'on devait sortir du chapeau. Dans la théorie plus avancée des fonctions d'onde de Schrödinger, ils deviennent des prédictions de la théorie.

Encore mieux, l'équation de Schrödinger nous enseigne que ces orbitales ne se lient que selon certains angles, une prédiction confirmée par toute la chimie. Le tableau périodique des éléments lui-même doit son aspect à l'équation de Schrödinger.

L'équation de Schrödinger se débarrasse aussi de ces sauts quantiques bien encombrants. Ce qu'il se passe quand un électron se déplace d'une orbitale interne à une orbitale externe est analogue au cas d'une corde à sauter tournoyante qui change de longueur d'onde quand vos mains modifient leur vitesse. La transition est un peu moche mais c'est un processus continu plutôt qu'instantané. Le photon émis ou absorbé quand un électron passe d'une orbitale à l'autre est le produit d'une onde électronique oscillant vers une nouvelle forme.

LE HIC

L'équation de Schrödinger permet de calculer une fonction d'onde et de prédire ses changements. La fonction d'onde elle-même fournit ensuite une description complète de tout ce que nous voudrions savoir sur l'électron. C'était sans aucun doute un triomphe de beauté mathématique. Du moment que personne ne demandait tout ce que cela signifiait.

Tout ce qu'il fallait faire, c'était d'y fourrer des données pertinentes, de tourner la manivelle, et les symboles sur la feuille recrachaient des prévisions fiables, décrivant ce qui arrive à un électron dans les circonstances données. Mais qu'est-ce que c'est *exactement* qu'une onde électronique ?

Plus inquiétant encore, l'équation de Schrödinger ne fournit pas les bonnes réponses à moins d'inclure un « nombre imaginaire » dans sa somme. Je sais bien que nous suivons dans ce livre une approche non mathématique de la physique quantique, mais les nombres imaginaires sont très importants pour mon histoire et je ne peux m'en dispenser facilement. Alors, accrochez-vous à vos bretelles, ça va « mathématiser » !

L'IMAGINATION AU POUVOIR

Voilà comment ça se passe. Si on multiplie par exemple moins deux par plus deux, on obtient un résultat négatif, en l'occurrence moins quatre. On peut l'écrire : $-2 \times 2 = -4$.

Si on multiplie moins deux par lui-même, en revanche, on obtient un nombre positif : plus quatre. Cela s'écrit : $-2 \times (-2) = 4$.

Tout le monde sait que la racine carrée de quatre, c'est deux (sinon, désolé pour le spoiler). Mais ce n'est pas tout. La racine carrée de quatre est en réalité deux *et* moins deux, puisque ces deux valeurs, multipliées par elles-mêmes, donnent quatre.

Cela signifie que la racine carrée de moins quatre n'est pas moins deux, puisque moins deux multiplié par lui-même ne donne pas moins quatre. Alors, où sont les racines carrées des nombres négatifs ? Il semblerait qu'aucun nombre multiplié par lui-même ne puisse donner un résultat négatif.

Afin de résoudre ce paradoxe, des mathématiciens inventèrent un nouveau type de nombres postés perpendiculairement à la ligne numérique que nous imaginons d'habitude. Ces nombres se définissent comme les racines carrées des nombres négatifs. René Descartes les appelait « imaginaires ». Il est vrai qu'ils ne paraissaient pas très réels⁵.

On les représente avec la lettre i , définie comme la racine carrée de -1 . Le nombre $2i$ est la racine de -4 , $3i$ la racine de -9 , $4i$ la racine de -16 , etc.

Selon certains, ces nombres imaginaires, c'est un peu de la triche. Mais les mathématiciens inventent souvent des concepts qui n'ont apparemment aucun sens, jusqu'à ce que la science en découvre une utilisation possible. Après tout, les nombres négatifs paraissaient ridicules fut un temps. Peut-on tenir moins cinq objets dans sa main ?

Les nombres négatifs ne sont pas « réels » dans le sens où nous ne pouvons pas les dénombrer dans nos mains, mais ils sont bien utiles tout de même. Les charges des électrons et des protons s'annulent, si bien que les nombres positifs et négatifs constituent un bon système pour représenter cela.

De la même manière, les fonctions d'onde des électrons ne fonctionnent que si l'on inclut les nombres imaginaires dans l'équation. Si la méthode de Schrödinger marche (et elle marche), cela signifie que les propriétés des électrons n'oscillent pas seulement dans les trois dimensions habituelles, mais aussi dans la dimension imaginaire. Qu'est-ce qui te prend, Mère Nature ?

BORN TO BE ALIVE

Le premier à avoir essayé de donner du sens à ce que représente vraiment une fonction d'onde électronique est Max Born, un physicien allemand. Le côté aléatoire de la physique quantique, conséquence directe du principe d'incertitude de Heisenberg, intriguait Born.

Quand on mesure une particule, on découvre ses propriétés, position, quantité de mouvement, etc. (dans les limites posées par Heisenberg), mais ce qui est très étrange, c'est que, puisque ces propriétés sont un peu floues avant la mesure, répéter celle-ci encore et encore aboutit à des résultats différents.

Si on répète une expérience classique (normale, à notre échelle) encore et encore, on obtient le même résultat. Faites rouler une

balle sur un plan incliné et vous pourrez prédire avec certitude son point d'arrivée. Dans le monde d'Isaac Newton, l'aléatoire ou le hasard n'existent pas. Il n'y a que les prédictions des lois de la physique.

Même un lancer de pièce à pile ou face n'est pas aléatoire pour un physicien classique. L'impulsion qu'on lui donne au départ, l'angle qu'elle adopte dans les airs, son interaction avec le sol, tout cela contribue à prédire sur quelle face elle atterrira.

Si on disposait d'un ordinateur suffisamment puissant dans lequel on entrerait toutes les données possibles, on pourrait prédire correctement un lancer de pile ou face. La seule raison pour laquelle on considère ça comme aléatoire est qu'il nous est impossible de faire de tels calculs en un instant. Mais en physique quantique, c'est différent. Il semblerait qu'une part d'aléatoire authentique subsiste dans ses résultats.

Vous avez peut-être déjà entendu le proverbe : « La folie, c'est de répéter la même erreur et d'espérer un résultat différent. » On l'attribue souvent à Einstein, mais il est en réalité tiré d'un pamphlet des *Narcotics Anonymous*⁶. Cependant, il paraît sensé. Il faudrait être fou pour croire que, si on fait exactement la même chose, le résultat sera différent ! Aussi fou qu'un physicien quantique, semble-t-il.

Prenez l'expérience de la double fente. Au début, vous lancez un paquet d'électrons, de protons ou de n'importe quoi vers la double fente, et vous obtenez un motif zébré sur l'écran détecteur. Mais il est impossible de prédire exactement dans quelle bande une particule donnée se retrouvera avant de l'avoir lancée. Au mieux, vous pouvez essayer de deviner, en vous fondant sur des probabilités.

Il peut y avoir 40 % de chance qu'elle arrive dans la bande centrale, 20 % de chance qu'elle finisse dans une des deux bandes suivantes, 10 % dans les deux d'après, etc. (enregistrez ces valeurs pour plus tard).

Quand vous lancez un électron sur la piste, sa destination peut ainsi bel et bien changer à chaque essai. Le principe d'incertitude de

Heisenberg nous pousse à abandonner l'idée de futurs prévisibles et à accepter au contraire que les choses arrivent selon des lois probabilistes, selon l'humeur d'une déesse quantique élégante bien que plutôt dérangée. La position d'une particule n'est pas précise tant que nous ne l'avons pas mesurée (elle est incertaine) et quand nous faisons cette mesure, nous ne pouvons prédire qu'une position probable, et non absolue.

Born décida donc de calculer les solutions de Schrödinger pour une onde électronique qui passe par la double fente, et il découvrit que « l'amplitude » (la hauteur) de l'onde correspondait à des valeurs familières.

Le pic au centre de l'écran détecteur (où l'amplitude est le plus élevée) donne une valeur de 6,32. Les deux bandes suivantes ont une intensité de 4,47, et les deux d'après 3,16. Ces nombres paraissent ne suivre aucune règle mais, en réalité, si : ce sont les racines carrées des pourcentages que nous suggérions plus haut, 40 pour cent, 20 pour cent, 10 pour cent, etc.

Si on résout l'équation de Schrödinger pour une onde électronique, et qu'on multiplie les résultats par eux-mêmes (on les élève au carré), ils correspondent aux probabilités des positions d'arrivée des particules de l'expérience.

Il semblerait que la fonction d'onde de Schrödinger serve à calculer la racine carrée des probabilités de présence d'un électron. Super. Merci, Born. C'est parfaitement clair à présent. Je me demande bien ce que je ne comprenais pas avant.

MAIS QU'EST-CE QUE ÇA VEUT DIRE ?

L'interprétation de Born de l'équation de Schrödinger semble impliquer que les probabilités, une invention humaine pour deviner quel cheval va gagner la course, sont en réalité une loi inhérente de l'univers à laquelle les particules doivent se plier.

Les particules sont vraiment des particules mais leur position est déterminée par des ondes de probabilité constamment changeantes. Dans cette interprétation de la théorie quantique, il faut abandonner

l'idée que quoi que ce soit puisse avoir une position précise et dire que les positions sont déterminées au hasard, suivant une loi de probabilité.

Les crêtes de l'onde de Schrödinger correspondent aux positions où une particule a le plus de chances d'être détectée. À l'inverse, c'est dans les creux de la fonction d'onde que la particule a le moins de chance de se trouver. Électrons, protons et photons ne sont pas des ondes, finalement, mais leurs positions probables, si.

Il est impossible de prédire exactement la position d'une particule en un temps donné, mais en utilisant l'équation de Schrödinger (et en supposant que la position des particules oscille dans une direction imaginaire en plus des directions réelles), il est possible de calculer un résultat probable pour une mesure.

Les particules peuvent ainsi subir la même expérience à répétition mais finir en différents endroits, car leur destin n'est jamais gravé dans le marbre. Toute cause entraîne de nombreux effets potentiels et la déesse quantique choisit entièrement au hasard lequel s'appliquera. Parfois un électron sera d'un côté de l'atome, mais puisque sa position oscille dans l'espace, il peut aussi exister de l'autre côté.

Si tout cela vous paraît indigeste et confus, voici un petit détail rigolo pour alléger l'atmosphère : la petite fille de Max Born est Olivia Newton-John, chanteuse et actrice qui donna la réplique à John Travolta dans le film *Grease* de 1978.

Malheureusement, *Grease* ne parle que très peu de mécanique quantique, à moins de décider que les « frissons » de la chanson (« *I've got chills* ») sont une métaphore de la fonction d'onde et que quand les frissons se multiplient (« *They're multiplying* »), la fonction d'onde est multipliée par elle-même (élevée au carré) afin d'obtenir une probabilité pour la position finale de l'électron.

Si c'était bien le cas, il serait exact de dire qu'une fois l'équation de Schrödinger résolue, nous nous retrouvons avec une crise philosophique sur les bras : il nous faut accepter que le résultat d'une expérience est réellement aléatoire. Nous avons perdu le contrôle (« *And I'm losing control* »).

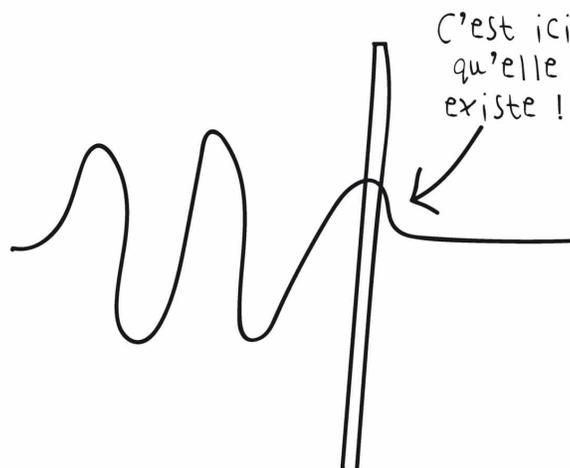
LA LUMIÈRE AU BOUT DU TUNNEL

L'interprétation de la fonction d'onde à la sauce Born est audacieuse. Il existe de plus un moyen de la vérifier. Il suffit de lancer des particules contre les murs pour voir si elles y restent collées.

Si on imagine un objet classique (ordinaire), comme une balle de tennis, lancé contre un mur, on ne se pose pas de question, on sait ce qu'il va se passer. La balle va entrer en collision avec le mur, y rester un petit instant puis rebondir.

L'interprétation de Born dans le cas des particules quantiques propose un autre scénario. La position d'une particule peut être décrite comme une onde de probabilité en oscillation constante.

Si on lance un électron contre un mur, il faut le considérer comme une onde. Chaque crête signifie « la particule a de grandes chances d'être là », chaque creux « la particule n'est probablement pas là ». Donc, si l'onde approche d'un mur, certaines de ses crêtes se trouveront de l'autre côté du mur, comme ici :



Quand la particule atteint le mur, comme dans le schéma, la plupart de ses positions probables restent d'un côté (les crêtes de l'onde sont surtout à gauche) mais une minuscule fraction dépasse le mur et passe de l'autre côté de temps en temps. Ce n'est pas fréquent puisque la fonction d'onde prend des valeurs très faibles en ces endroits (ce n'est qu'une toute petite crête), mais à l'occasion un

électron devrait apparaître de l'autre côté par l'action du simple hasard.

Cet effet, appelé effet tunnel, a été observé et documenté de nombreuses fois. Il est exactement conforme aux prédictions de Born. Il y a même un dispositif électronique nommé jonction Josephson qui consiste en deux matériaux séparés par une couche d'isolant. Un électron est habituellement bloqué par ce genre de barrière mais, grâce à l'effet tunnel, il devient possible de transporter des électrons au travers et de contrôler le flux de courant en modifiant l'épaisseur de l'isolant.

Il faut attendre des centaines de milliardièmes de secondes pour que l'effet tunnel se produise⁷. C'est une expérience au fond similaire à celle de la double fente. Une particule a le choix entre rebondir contre le mur ou passer par le tunnel, tout comme elle a le choix de la fente qu'elle emprunte. La seule différence, c'est que dans l'expérience de la double fente, la probabilité se divise en deux possibilités à 50 % chacune, tandis que, dans le scénario du tunnel, la probabilité de se retrouver de l'autre côté de la barrière est très faible, cela n'arrive pas très souvent.

L'effet tunnel explique aussi l'origine de la radioactivité. Un noyau atomique recrache parfois quelques protons et neutrons de manière aléatoire (ce qu'on appelle la radiation alpha). Ce serait impossible dans le cadre classique puisque protons et neutrons ne pourraient pas passer au travers des autres particules qui les enchâssent dans le noyau.

À présent, nous pouvons décrire la position de toutes les particules comme une fonction d'onde, dont une petite partie dépasse de l'atome. De temps en temps, par hasard, nous devrions voir des particules passer par le tunnel jusqu'au bord de l'atome et se retrouver à l'extérieur comme par magie, ce qui est exactement ce qu'on observe dans le cas de la radioactivité.

À MOTS CHOISIS

Avant 1926, la théorie quantique, c'était un paquet de fils vaguement reliés, et Schrödinger est celui qui en a fait une tresse. Il a montré que la dualité onde-particule est liée aux niveaux d'énergie des couches électroniques... ce qui explique la forme des orbitales atomiques et toute la chimie... ce qui nous permet d'émettre des prédictions sur les particules via les probabilités.

Dans certains cercles, on admet grossièrement que la première génération de physiciens quantiques, les Planck, Einstein, de Broglie et Bohr, faisaient de la « théorie quantique », quand les trucs plus sophistiqués de Schrödinger, Born et Heisenberg seraient plutôt de la « mécanique quantique ».

Tout le monde n'est pas aussi pointilleux sur cette distinction et la mécanique quantique sert habituellement d'expression générique pour désigner à la fois la physique d'avant et d'après 1926. Mais, pour les puristes, la théorie quantique commence avec Planck, la mécanique quantique avec Schrödinger.

5

De plus en plus bizarre

TOUT CE QU'ON SAIT EST FAUX

Vous aurez peut-être déjà remarqué que toutes les théories de la mécanique quantique proposées jusqu'ici se sont révélées fausses. Pour qui n'est pas familier du fonctionnement de la science, cela peut surprendre ; c'est un peu comme si les scientifiques étaient dans un état d'incertitude perpétuel (un petit jeu de mots sur Heisenberg, quelqu'un ?). Mais c'est normal, en réalité.

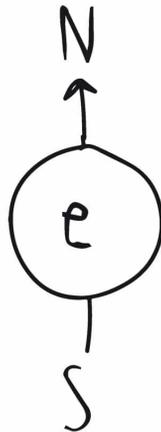
Les scientifiques sont le plus efficaces quand ils prennent une idée qu'ils poussent jusque dans ses dernières limites afin de découvrir le moment où elle ne fonctionne plus, car tout est soumis à la critique et rien n'est sacro-saint. C'est toujours plus facile d'être confiant dans une idée plutôt que d'en être certain, parce que c'est ainsi plus facile d'admettre qu'on peut avoir tort. L'équation de Schrödinger, aussi brillante soit-elle, n'échappe pas à la règle.

Schrödinger avait délibérément ignoré la charge de l'électron car elle reste constante et n'a pas besoin d'être prise en compte. Cela signifie toutefois que tout l'édifice s'écroule dès qu'on approche l'électron d'un aimant.

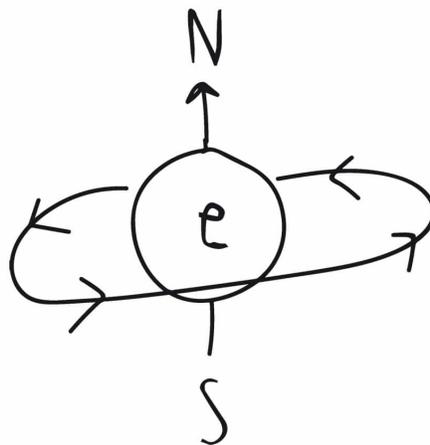
Le magnétisme et les charges électriques ont une forte influence réciproque. Un aimant en mouvement peut forcer des électrons à se déplacer dans un câble, et un courant électrique circulaire produit un champ magnétique autour de lui. Une équation censée décrire l'électron mais qui ignore les effets du magnétisme sur la charge est forcément incomplète.

TU ME FAIS TOURNER LA TÊTE

J'explorerai le lien entre charge électrique et magnétisme au chapitre 11. Pour l'instant, disons seulement que les électrons transportent avec eux un petit champ magnétique, comme si c'était de minuscules barres aimantées, avec un pôle Sud et un pôle Nord. Je les imagine comme transpercés en leur centre par de tout petits harpons qui indiqueraient la direction de leur champ magnétique :



Un champ magnétique peut être généré en faisant passer du courant dans un fil circulaire. On a donc posé l'hypothèse que les propriétés magnétiques d'un électron individuel naîtraient des mêmes causes. Les électrons doivent simplement tourner sur eux-mêmes en permanence comme des gyroscopes afin de générer leurs pôles magnétiques.



Malheureusement, quand on calcule le rayon qu'un électron doit avoir pour générer un champ magnétique de la bonne intensité,

nous obtenons un résultat supérieur à la taille d'un atome entier. Expliquer le champ magnétique d'un électron parce que celui-ci tourne autour d'un axe ne fonctionne clairement pas.

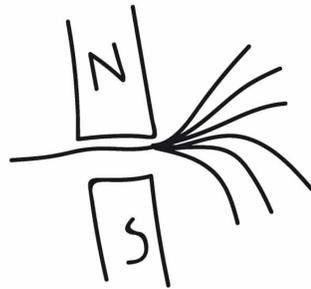
Le magnétisme d'un électron doit être dû à une autre propriété que sa charge, une propriété étrange, mais le temps qu'on le comprenne, tout le monde imaginait déjà des électrons tournoyant, si bien qu'on s'est retrouvé coincé avec un nom peu intuitif pour désigner cette mystérieuse propriété : le spin des électrons. Cela ne signifie pas que les électrons tournent sur leur axe (« *to spin* », en anglais), c'est seulement le mot qu'on emploie pour parler de la nature magnétique des électrons.

Afin de sonder ce qui se passait vraiment avec ce « spin », le duo allemand composé d'Otto Stern et Walter Gerlach décida de mesurer le spin de particules en les faisant circuler dans un champ magnétique légèrement plus important d'un côté, afin d'engendrer une force résultante sur la particule (plutôt que d'annuler son effet).

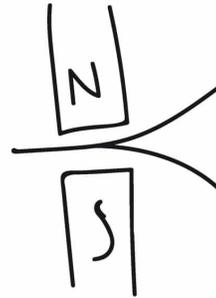
En soumettant une particule à ce champ magnétique, on aurait dû constater une déviation selon un certain angle dépendant du « spin » de la particule à ce moment. Encore une fois, on savait déjà que la particule ne tournait pas vraiment sur elle-même, mais quelle que fût la nature exacte du spin, on aurait dû obtenir des particules déviées dans tous les sens.

Ce que découvrirent Stern et Gerlach à la place, c'est que les particules déviaient dans deux directions seulement. Le spin (peu importe ce que c'est) était toujours de même valeur, et il allait soit dans la direction du champ magnétique, soit dans la direction opposée. Pas d'intermédiaire, ce qui signifiait que le spin, comme l'énergie, est une autre propriété discrète¹ (ce qui ne veut pas du tout dire qu'elle ne se fait pas remarquer, même si c'est aussi le cas, mais qu'elle n'est pas continue).

Attendu



Obtenu



Arrivés là, il eût été sensé d'arrêter d'employer le mot spin, et de parler de charge magnétique ou quelque chose comme ça. Mais les physiciens s'entêtèrent et, histoire d'être encore plus super hyper limpides, plutôt que de choisir des termes comme « horaire » et « anti-horaire », Stern et Gerlach nommèrent les deux types de spin « up » et « down », « haut » et « bas » (voir l'[annexe I](#) pour une discussion un peu plus détaillée du spin et du magnétisme).

L'équation de Schrödinger a été dûment modifiée ensuite par le physicien Wolfgang Pauli afin de prendre en compte le spin, ce qui nous valut l'équation de Pauli.

Pauli traînait la réputation d'être incompetent dans un labo, pire encore que Heisenberg, à tel point que ses collègues parlaient « d'effet Pauli » pour désigner le dysfonctionnement spontané des appareils de mesure quand il entrait dans une pièce. Mais, tout comme Heisenberg, c'était un excellent théoricien, et son équation fut une modification fantastique de celle de Schrödinger.

L'équation de Schrödinger nous donne la position probable d'une particule quand on la mesure et la version de Pauli nous parle de son spin probable. La définition de la fonction d'onde doit ainsi être étendue : elle devient la liste de toutes les propriétés probables d'une particule, son spin, son énergie, sa quantité de mouvement, sa position, son film préféré et tout le reste.

LE CHOIX DE L'ÉLECTRON

Bon. Voilà notre faisceau d'électrons divisé en deux selon leur spin, à l'aide d'un passage de Stern-Gerlach, dont ils ont émergé séparés en deux lots égaux. Des électrons ont la propriété « spin up », d'autres la propriété « spin down ». À présent, imaginons qu'on prenne seulement le faisceau sortant « spin up », et qu'on l'envoie dans un deuxième passage. Juste pour le fun.

Tous les électrons de ce faisceau ont la même trajectoire, comme on pouvait s'y attendre. On a envoyé uniquement des électrons « spin up », naturellement, ils ressortent tous dans la même direction, vers le haut. Mais supposez maintenant qu'on incline le second passage à quatre-vingt-dix degrés par rapport au précédent. Le faisceau d'électrons « spin up » est cette fois divisé en deux : un faisceau part à gauche, l'autre part à droite.

Le spin est apparemment déterminé quel que soit l'axe qu'on impose. Si on place nos aimants horizontalement, on obtient deux faisceaux, un gauche et un droit.

Voilà donc nos électrons séparés en deux catégories, up et down, et les électrons up encore subdivisés en up-gauche et up-droit.

Prenons maintenant le faisceau up-gauche et orientons-le vers un nouveau passage, vertical comme le premier cette fois. Nous voilà avec un faisceau d'électrons up-gauche qui traversent un passage vertical. Nous devrions donc obtenir de l'autre côté un seul faisceau d'électrons up. Eh bien pas du tout. La moitié des électrons repart vers le bas.

NE LA LAISSE PAS TOMBER, ELLE EST SI FRAGILE...

Imaginez des gens venus à l'hôpital pour déterminer leur groupe sanguin. D'abord, ils passent un test qui sépare le groupe A du groupe B. Puis, on prend le groupe A et on les envoie faire un deuxième test pour séparer les A+ et les A-. Ceci fait, on prend les A+ et on leur refait passer le premier test, et c'est là qu'on découvre que certains ont spontanément modifié leur sang pour appartenir à présent au groupe B. C'est ce que font les électrons avec leur spin, apparemment. Comment se fait-ce ?

Eh bien, on a supposé qu'en envoyant nos électrons up dans le passage gauche/droite, ils restaient up. Mais cela ne peut expliquer ce que l'on constate expérimentalement. Techniquement, quand on envoie des électrons up dans un passage gauche/droite, tout ce qu'on connaît à la sortie, c'est leur caractère gauche ou droit. On ne sait plus rien de leur caractère up ou down, et il n'y a pas de raison de supposer qu'il est toujours valable. Tout se passe comme si mesurer le spin gauche/droit d'un électron lui faisait oublier son spin up/down !

Et nous voici avec une nouvelle relation d'incertitude de Heisenberg sur les bras : nous ne pouvons jamais connaître deux axes de spin d'une particule simultanément. Les spins verticaux et horizontaux peuvent être mesurés individuellement, mais mesurer l'un brouille l'autre, tout comme mesurer la position d'une particule brouille sa quantité de mouvement.

Mais il y a plus étrange encore.

Les propriétés d'une particule sont effacées si on mesure la propriété complémentaire, ce qui impliquerait que c'est l'acte de mesure lui-même, au départ, qui a obligé la particule à adopter une propriété.

L'expérience de Stern–Gerlach montre que la propriété de spin *que l'on ne mesure pas* se perd, et qu'on ne peut la récupérer qu'en la mesurant une nouvelle fois. Apparemment, les propriétés des particules ne sont littéralement pas là quand on ne les regarde pas ! Si bien que l'antique idée d'Empédocle selon laquelle ce sont nos yeux qui confèrent une apparence aux objets pourrait bien receler un soupçon de vérité, après tout.

À BIEN Y REGARDER

Si on se rappelle à présent l'expérience de la double fente, il faut bien avouer qu'on l'a peut-être mal comprise alors. On a supposé qu'une particule avait une position précise quand elle passe par la double fente, mais ce n'est peut-être pas le cas. Peut-être que le résultat de l'expérience naît du fait que l'électron n'est pas un

électron du tout, qu'il existe dans un état fantomatique complètement flippant, et qu'il ne devient une particule avec des propriétés bien définies que quand on le mesure sur l'écran de détection.

L'équation d'onde de Schrödinger nous permet de calculer la probabilité du résultat d'une mesure sur une particule, mais tant qu'on ne mesure pas vraiment ce résultat, rien n'est décidé. La particule ne passe par aucune des deux fentes, parce qu'à ce moment-là ce n'est pas encore une particule dotée de propriétés.

Ce qu'il faudrait faire, ce serait placer une espèce de minuscule caméra à côté de chaque fente et regarder ce que fait la particule au moment de prendre sa décision. Si elle est vraiment là, on devrait pouvoir la voir au moment où elle décide. Pourquoi n'y a-t-on pas pensé plus tôt ?

Bon, je dois vous avouer quelque chose. L'expérience en question n'emploie pas vraiment de mini-caméra placée à côté des fentes, mais rentrer dans les détails de l'appareillage de mesure est vite fastidieux, alors on va simplement imaginer qu'il s'agit bien de petites équipes de tournage placées là.

Avant Stern et Gerlach, on se serait attendu à enregistrer des images d'une particule passant par les deux fentes à la fois. Ce qui se passe, en réalité, est l'un des résultats les plus étranges de la physique. Avec une caméra qui filme les fentes, les électrons se mettent à passer les uns après les autres comme des particules classiques, et le motif zébré quantique disparaît.

Placer une caméra sur les fentes est une forme de mesure et d'une manière ou d'une autre cela force une particule à se comporter en particule. Quand on ne les filme pas, les particules ondulent, et dès qu'on allume la caméra, elles arrêtent tout ça et se comportent normalement. C'est le genre d'attitude qu'on attend des politiciens, pas des particules. Je veux dire, comment diable, au nom de Max Planck et de son ampoule basse consommation, une particule peut-elle savoir si notre caméra est éteinte ou allumée ?

C'est ce qu'on appelle le « problème de la mesure », pour des raisons évidentes. Quand on n'observe pas une particule, sa quantité de mouvement, son énergie, son spin et même sa position ondulent en une sorte de néant indéterminé que nous ne voyons jamais

directement. C'est la mesure qui la force d'une façon ou d'une autre à adopter des propriétés dans le monde réel. Apparemment, les particules se soucient de savoir si on se préoccupe d'elles.

6

La boîte et le chat

RECETTE DANOISE

Alors que les observations pleuvaient et que les équations se renforçaient, deux camps émergèrent, chacun avec son idée de la bonne attitude à adopter pour s'accommoder de ces bizarreries.

Le premier camp, c'était celui des philosophes qui désiraient comprendre la nature profonde de la mécanique quantique. Des gens comme Einstein, Schrödinger et de Broglie.

Le second rassemblait les adeptes du calcul qui souhaitaient se servir de la mécanique quantique sans s'embarrasser de sa signification. Les plus éminents d'entre eux étaient Bohr et Heisenberg, qui travaillaient à Copenhague.

En 1930, Heisenberg écrivit un livre intitulé *Les Principes physiques de la théorie quantique*, dans lequel il résumait les idées que Bohr et lui avaient échafaudées avec les années. Il dénommait cette vision « *das Copenhagen giest* », littéralement « le fantôme de Copenhague », même si quelque chose comme « l'esprit » ou « l'âme » traduirait mieux sa pensée. J'ai bien peur que la mécanique quantique ne suffise pas à prouver l'existence des fantômes, en revanche elle a de jolies choses à dire sur les morts-vivants (ne zappez pas, ça va venir).

« L'interprétation de Copenhague » de la mécanique quantique est une perspective pragmatique selon laquelle les lois profondes de la physique sont trop éloignées de notre expérience humaine pour que nous puissions les comprendre un jour.

Selon elle, tout comme les couleurs se mélangent pour former du blanc, les propriétés d'une particule se mélangent pour former un

« état de superposition » dans lequel son spin n'est ni up ni down et sa position partout et nulle part. Elle est tout et rien à la fois.

Comme l'écrit Heisenberg lui-même, « les particules ne sont pas réelles en elles-mêmes, elles forment un monde de potentialités ou de possibilités plutôt que de choses et de faits. »¹

Les particules se moquent qu'on les comprenne. Elles ne vont pas se plier à nos limitations humaines. Nous n'avons pas d'autres choix que de les considérer pour ce qu'elles sont. Soit vous en tombez amoureux, soit vous partez en courant. Les fonctions d'onde se propagent d'une façon mi-réelle mi-imaginaire, les mesures les modifient et on ne peut rien dire de plus à ce propos. Fin de la discussion.

ON RÉSUME

Ce qui est un peu énervant, c'est que Bohr et Heisenberg n'ont jamais couché sur le papier tous les détails de leur vision. Il était parfois possible d'obtenir d'eux une réponse précise à une question donnée mais, comme les particules quantiques, ils restaient dans le flou à moins d'être contraints et forcés d'en sortir. Voici tout de même un résumé rapide de cette vision.

Quand on ne la mesure pas, la nature existe dans une pluralité d'états (ou une absence d'état) qu'on appelle superposition. Quand on prend une mesure, on écrase cette superposition telle une mouche contre un mur, on l'oblige à devenir une chose et une seule.

L'équation de Schrödinger nous donne le résultat probable de la mesure mais rien n'est décidé avant que celle-ci ait lieu. À ce moment, on dit que la superposition se « réduit » à un état, comme une bulle qu'on éclate. Ce qui reste, c'est la version ordinaire, réduite, d'une particule, qu'on appelle parfois l'état pur (« *eigenstate* »). C'est l'objet qu'on étudie en mécanique classique. Cependant, avant d'établir la mesure, il nous faut travailler avec des ondes de probabilité à la place.

Il est impossible de savoir à l'avance dans quel état pur une fonction d'onde va se réduire, parce que l'univers lui-même ne l'a

pas encore décidé. On se contente de prendre la mesure et de constater ce qu'il se passe. Et voilà comment Bohr et Heisenberg parvenaient à retrouver le sommeil.

L'interprétation de Copenhague est, selon bien des gens, une tricherie sournoise, éhontée. Elle n'explique rien et propose de nous satisfaire de notre ignorance. Les critiques l'ont baptisée l'interprétation « calcule et tais-toi »², car elle court-circuite l'intuition et exige platement d'utiliser l'équation les yeux fermés, ce qui ne paraît pas juste, d'une certaine manière. Les questions qu'elle soulève sont plutôt vertigineuses, en plus :

1. Comment une particule peut-elle exister dans des états multiples ou dans aucun état ?
2. Pourquoi la mesure enferme-t-elle la particule dans un état pur ?
3. Pourquoi le résultat est-il aléatoire ?
4. Pourquoi est-il impossible de connaître toutes les propriétés en même temps ?
5. Pourquoi le monde de tous les jours suit-il des lois classiques alors que les particules s'en affranchissent ?

L'interprétation de Copenhague répond à ces cinq questions par un haussement d'épaules et un « c'est comme ça mon pote. » Ce qui ne convenait pas du tout à certains, au premier rang desquels se trouvait Einstein.

ASSEZ !

Einstein et Bohr entretenaient une relation amour-haine assez compliquée. Chacun respectait l'intelligence de l'autre mais ils étaient en complet désaccord sur la mécanique quantique. À chaque fois qu'ils assistaient ensemble à une conférence, un argument finissait par enflammer le débat et ils s'envoyaient des tonnes de lettres à la figure, publiques et privées, afin d'expliquer à l'autre à quel point il avait tort. Si Twitter avait existé à l'époque, leurs joutes verbales auraient trouvé leur place aux côtés des disputes

mythiques de Selena Gomez contre Justin Bieber, ou de Kanye West contre tout Internet.

Dans une fameuse lettre à Max Born, Einstein affirma qu'il ne pouvait accepter qu'une théorie rende la nature aléatoire, lettre qu'il acheva par ces mots : « La théorie dit beaucoup de choses, mais elle ne nous apprend rien sur le secret du Grand Ancien. Je suis pour ma part persuadé qu'il ne joue pas aux dés. »³ Le « grand ancien » était le code d'Einstein pour évoquer Dieu.

Selon Heisenberg, qui entretenait de bonnes relations avec les deux, quand Bohr entendait Einstein affirmer que Dieu ne joue pas aux dés, il répondait ainsi : « Ce n'est pas à nous de dire à Dieu comment diriger le monde. »⁴ #cassé

L'IMBÉCILE REGARDE LE DOIGT

La principale objection d'Einstein envers l'interprétation de Copenhague était que, selon lui, le but de la physique est de comprendre le fonctionnement du monde. La nature nous dit quelque chose au travers de la mécanique quantique, et il s'agit de comprendre quoi. Tel qu'il l'envisageait, Bohr abandonnait pile quand ça devenait intéressant.

Lors d'un échange houleux avec Abraham Pais du camp Copenhague, Einstein évoqua la bêtise du problème de la mesure et demanda à Pais s'il croyait que la Lune cessait d'exister quand il ne la regardait pas⁵. Selon l'interprétation de Copenhague, les choses n'ont pas de propriétés définies avant qu'on ne les mesure, si bien que, si personne n'observe la Lune, sa fonction d'ondes est techniquement en état de superposition, existant en toute une variété d'endroits et d'états en même temps.

Le problème, c'est qu'il s'agit d'une objection fondée sur une intuition plutôt que sur une preuve. Croire que la Lune existe même quand on ne l'observe pas ne prouve rien. Pourquoi ne pourrait-elle pas disparaître quand personne ne la mesure ? Peut-on prouver que ce n'est pas le cas ?

Selon Bohr, l'esprit humain avait évolué dans le but de cueillir plus facilement des baies dans les plaines africaines, pas pour concevoir une physique complexe. Tôt ou tard, nous finirions bien par être bloqués. Un humain tentant de saisir la mécanique quantique, c'est comme un robinet qui essaierait de comprendre l'intrigue de *Quantum of Solace*, un film sur James Bond. À bien y penser, d'ailleurs, ce serait aussi comme un humain essayant de comprendre *Quantum of Solace*. C'est tout simplement impossible.

Ce qui filtra de ces débats dans l'esprit du public, c'est qu'Einstein était complètement dépassé, tandis que Bohr était prudemment déclaré vainqueur. Dans certains comptes rendus, on voit Einstein dépeint sans bienveillance comme un autrefois grand qui ne peut plus prétendre appartenir à l'avant-garde de la physique, et qui peste que la science, c'était mieux avant.

Cela reconfortait sûrement bien du monde, leur donnant la satisfaction de se dire que même Einstein a ses limites, mais en réalité il comprenait parfaitement la mécanique quantique. C'est pourquoi il essaya si fort de percer le défaut de la cuirasse.

LE CÉLÈBRE CHAT ZOMBIE

Bohr avait éludé d'un haussement d'épaules les dés divins et la lune farceuse d'Einstein, ramenés au rang d'objection intuitive ne changeant rien au fait scientifique. Puis Schrödinger décida de s'attaquer au colosse de Copenhague.

J'aime bien l'imaginer resserrant son nœud papillon, remontant ses manches et tapant dans les mains d'Einstein encore sur le ring en lui lançant quelque chose comme « Sors de là, Al, laisse ton pote Schrödi s'en charger », tandis que l'acclame un petit harem de pom-pom girls, dont cinq sont enceintes de lui.

Schrödinger opta pour une approche différente et attaqua la superposition plutôt que la mesure. En novembre 1935, il publia dans la revue *Naturwissenschaft* un article qui, avançait-il, allait mutiler l'interprétation de Copenhague pour de bon. Dans cet article, on trouvait ce qui allait devenir le paradoxe du chat de Schrödinger.

Imaginez un chat enfermé pendant une heure dans une boîte en acier. Dans celle-ci, un produit radioactif est placé à côté d'un compteur Geiger, qui détecte l'éventuelle émission d'une particule. Il est impossible de prédire qu'une telle émission se produira dans l'heure, mais il reste possible de choisir un matériau dont la fonction d'ondes indiquerait pour cet événement, et durant cette durée, une probabilité de 50 %.

La particule émise a 50 % de chance de rester dans le noyau et 50 % de chance de s'en échapper par effet tunnel et d'aller frapper le détecteur. Voilà où ça devient intéressant : le compteur Geiger est relié à un appareil diabolique qui libère un marteau et pulvérise un flacon d'acide cyanhydrique près du chat.

Selon l'interprétation de Copenhague, la particule emprunte les deux voies, elle existe dans une superposition de lieux, dans le noyau et en dehors, si bien que le marteau est à la fois immobile et en mouvement. Le flacon est par conséquent lui aussi brisé et intact, et le chat mort et vivant, simultanément. Si vous tirez jusqu'au bout les conséquences logiques de l'interprétation de Copenhague, il est obligatoire d'accepter cette absurdité et il y a quelque chose de pourri au royaume de la superposition.

J'ignore pourquoi Schrödinger n'a pas imaginé une fléchette ou autre qui aurait été capable d'exécuter le chat sans douleur, plutôt que de choisir un dispositif qui corrode le chat durant plusieurs minutes au sein d'un bain acide. Schrödinger était un type bizarre.

Son choix du chat n'est pas très clair non plus. Il possédait un chien nommé Burschie⁶, ça, c'est certain, et il aurait paraît-il eu un chat appelé Milton⁷, mais c'est moins sûr. Peut-être avait-il écrit son article un matin où Milton avait jugé bon de déféquer sur son bureau, ce que Schrödinger décida d'immortaliser ? Qui sait ?

On trouve parfois l'expérience de Schrödinger mal résumée sous la forme « on ne sait pas si le chat est mort ou vivant si bien qu'il faut imaginer les deux à la fois ». Cette description passe à côté de l'essentiel.

L'interprétation de Copenhague dit littéralement qu'une particule peut être dans des états superposés, ce qui signifie que tout ce qui

interagit avec elle l'est aussi. Quand on ouvre la boîte, on réduit la fonction d'onde du chat en un état pur, mort ou vivant, avec 50 % de chance pour chacun, mais, avant cela, le chat est mort et vivant, simultanément.

C'est pour ça que mener l'expérience en vrai n'aurait pas de sens. On n'observera jamais le chat de Schrödinger dans sa superposition d'états puisque c'est précisément ce qu'explique l'interprétation de Copenhague : on ne mesure que l'état pur dans lequel une superposition d'états s'est réduite, jamais la superposition elle-même. Ouvrir la boîte dans le monde réel ne nous laissera pas accéder à la superposition mort/vivant, mais à un état pur, classique : soit un chaton bien vivant, soit un cadavre et un gros sentiment de culpabilité.

7

Le monde est une illusion

TU ME VOIS, TU ME VOIS PAS

Le film Disney/Pixar *Toy Story* et ses suites parlent de mécanique quantique, en fait. Les personnages principaux sont des jouets qui, quand leur propriétaire Andy les observe, se comportent comme des jouets ordinaires, mais qui s'animent quand Andy ne les regarde plus.

Andy ne voit jamais les jouets dans leur état animé et n'observe que leur comportement classique. Il paraît aussi ne jamais remarquer leurs changements de position entre deux sessions de jeu (il a grand cœur, certes, mais il n'est pas très observateur). S'il les scrutait d'un peu plus près, il pourrait bien noter que ces jouets se trouvent dans une position légèrement différente à chaque fois qu'il les regarde.

Les particules sont un peu pareilles. Elles se comportent très différemment selon qu'on les regarde ou pas. On peut tenter de deviner où elles se retrouveront grâce à l'équation de Schrödinger, mais il est impossible de prévoir exactement ce qu'on trouvera une fois entré dans la pièce.

Supposons qu'Andy se mette soudain à conserver un rapport précis de la position et de l'état de chacun de ses jouets. Il remarquera peut-être qu'il ne peut décrire leur état observé qu'en termes de probabilités. Par exemple, il pourrait y avoir 90 % de chances que Woody se trouve à la même place que la dernière fois, mais il est aussi concevable (la probabilité est non nulle) qu'il soit à l'autre bout de la pièce, ou même en dehors de la maison.

Si Andy était « Copenhaguien », il inventerait une chouette explication mathématique à tout ça. Ses jouets existent

simultanément en tous lieux, disposés selon toutes les configurations possibles, jusqu'à ce qu'il entre dans la pièce. À ce moment, leur superposition se réduit jusqu'à l'état classique. Mais voici la question qui vous propulsera vers l'infini et au-delà : qu'y a-t-il de si spécial chez Andy pour que sa présence dans la pièce soit ce qui déclenche la modification de la fonction d'onde de ses jouets ?

Dans le premier *Toy Story*, il y a une scène dans laquelle Woody explique à un groupe de ses congénères qu'il leur faudra briser « les règles » des jouets. Mais quelles sont-elles, et qui les fixe ?

Si nous installions une caméra dans la chambre d'Andy, les jouets s'animent-ils ? Et si nous les observions mais qu'ils l'ignoraient ? Pourquoi s'animent-ils quand d'autres jouets les observent ? Pourquoi le chien Buster ne compte-t-il pas ? Un robot doté d'une intelligence artificielle compterait-il ? Un chimpanzé déclencherait-il une réduction de la fonction d'onde ? Et quand Sid le méchant garçon entend Woody parler et qu'il fait une crise de nerfs qui le poussera à abandonner l'école et à s'engager chez les éboueurs dans *Toy Story 3* (regardez bien, c'est Sid, aucun doute) ?

Essayer de tirer toutes les conséquences philosophiques du problème de la mesure dans *Toy Story* est un cauchemar. C'est pourtant exactement ce qu'on fait en mécanique quantique. Le problème de la mesure n'est pas seulement contre-intuitif, il pose des questions très profondes sur la nature de la réalité.

Parfois, ce problème est confondu avec le principe d'incertitude de Heisenberg, mais ce n'est pas exactement la même chose. Le problème de la mesure énonce qu'une particule choisit l'état dans lequel elle est au moment où on l'observe. Le principe d'incertitude affirme que, quand on l'observe, on se retrouve obligé d'abandonner toutes les autres informations à son propos.

On peut construire une analogie du principe d'incertitude : Andy a des problèmes de vue. Il est obligé de porter des lunettes teintées. Quand il regarde ses jouets sans ses lunettes, il peut voir de quelle couleur ils sont, mais l'image est floue. Il est sûr de leur couleur, pas de leur forme. Et s'il met ses lunettes, les contours de ses jouets deviennent bien définis mais il ne peut plus connaître leur couleur

puisqu'ils les regardent au travers de verres colorés. Il peut choisir de mesurer la couleur ou la forme, mais pas les deux à la fois.

AVOIR UN BON COPAIN

En 1932, le physicien John von Neumann décida d'analyser mathématiquement l'expérience de la double fente sous tous ses aspects, afin de déterminer à quelle étape se produit la réduction du paquet d'ondes. Il fallait bien que le processus de mesure recèle un événement spécial qui l'explique.

Il étudia la libération de la particule, son départ de l'émetteur, sa collision avec les fentes, son passage à travers elles, son émergence de l'autre côté, etc., calculant à chaque étape la fonction d'onde. Au bout du compte il dut admettre, un brin irrité, qu'aucune étape n'était particulière. Chaque étape d'une expérience de mécanique quantique est physiquement équivalente à toutes les autres¹.

Cela met à mal l'interprétation de Copenhague parce que, si l'on ne trouve rien qui soit capable de réduire la fonction d'onde, pourquoi se réduit-elle ? Bohr et Heisenberg haussèrent encore les épaules, Einstein gratta son crâne échevelé et Schrödinger referma la porte de sa chambre. Mieux vaut ne pas demander ce qui se passait à l'intérieur.

La solution au problème de la mesure la plus commentée (et la moins bien résumée) vint finalement d'un physicien hongrois, Eugen Wigner, qui étendit l'expérience du chat de Schrödinger afin d'y inclure le scientifique qui la menait.

On a un chat dans une boîte qui existe dans une superposition d'états, mort et vivant, et quand le scientifique ouvre la boîte, il le trouve réduit en l'un de ses états purs. 50 % de chances pour chaque. Maintenant, supposez qu'on mène l'expérience dans une pièce fermée, tandis que Wigner attend dehors.

Si on prend l'interprétation de Copenhague au sérieux, alors la particule déclenche et ne déclenche pas le détecteur, ce qui tue et ne tue pas le chat tout à la fois. Depuis la perspective de Wigner,

son copain scientifique va donc ouvrir la boîte et découvrir simultanément le chat mort et le chat vivant, ce qui le mettra lui-même dans une superposition d'états, soulagé à la vue du chat vivant et, en même temps, cherchant horrifié la pelle et la balayette. Ce n'est que quand Wigner ouvrira la porte du laboratoire et découvrira ce qui s'y trame que la fonction d'onde de son ami se réduira².

C'est absurde. L'ami de Wigner ne peut pas être superposé car on n'a jamais observé un esprit humain dans cet état. Jamais un humain observe et n'observe pas tout à la fois. La conscience n'existe qu'en des états purs. Donc, affirma Wigner, la conscience est ce qui réduit la fonction d'ondes.

Selon Wigner, quand on parle de mesure, on parle littéralement d'un esprit conscient effectuant une opération et, comme l'esprit ne peut pas exister en état de superposition, les particules qu'il observe ne le peuvent pas non plus.

Attention, Wigner n'était pas un poids plume allumé qui aurait trouvé son diplôme d'avocat quantique dans une pochette Google. Il avait décroché un prix Nobel et traînait une réputation de physicien dur à cuire. Introduire la conscience dans le débat ne le réjouissait pas, mais il ne voyait pas d'alternative.

LE HÊTRE QUI N'ÉTAIT PAS

La conscience était et demeure un mystère, mais comme on pouvait décrire toutes les autres étapes de la chaîne expérimentale, la réduction de la fonction d'onde devait advenir dans un esprit conscient, le seul endroit qu'on ne comprenait pas bien.

L'interprétation de Wigner implique toutefois quelques conséquences surréalistes. Pour commencer, elle signifierait que l'esprit a un effet sur les particules plutôt que l'inverse.

Ensuite, elle implique que l'univers entier était dans un état superposé depuis des milliards d'années, jusqu'à ce que des créatures conscientes évoluent pour devenir capables de l'observer. Il faut bien que, à un certain moment tôt dans l'histoire de l'humanité,

alors qu'elle était moins répandue et sa population faible, la Lune n'ait pas été observée. Aurait-elle sauté à ces occasions ? Si oui, pourquoi la Terre n'a-t-elle pas perdu sa position stable en orbite autour du Soleil pour dériver dans le néant ?

Est-ce que quelque chose regarde la Lune en permanence afin d'empêcher cela ? Se pourrait-il qu'un esprit suprême observe consciemment l'univers à chaque seconde afin qu'il tienne en place quand personne d'autre ne surveille ?

À ce sujet, voici une épigramme rigolote qu'aurait écrite le philosophe et théologien Ronald Know au sujet de l'observation :

*Il était un jeune homme qui dit « Dieu
doit trouver insolite
de penser qu'un hêtre
doit continuer d'être
quand la cour est déserte. »*

Réponse :

*« Monsieur, votre étonnement m'étonne,
je suis toujours dans la cour.
Et c'est pourquoi le hêtre
continuera d'être
puisqu'il est observé par Votre bien dévoué, Dieu. » ³*

IL CHANGEAIT LA VIE

L'idée de conscience de Wigner était audacieuse mais, naturellement, elle fut très mal interprétée, particulièrement par certains membres du mouvement New Age. Peut-être êtes-vous passé à côté des enseignements de la prétendue « spiritualité quantique », mais je peux vous en faire le topo.

Quand on cherche « mécanique quantique » sur Internet, on tombe, au milieu des articles scientifiques authentiques, sur des histoires de cristaux, de gymnastique, de politique de gauche, de

bouddhisme, d'hindouisme, de végétarianisme, de yoga, d'identité de soi et de méditation. Ce sont bien sûr des sujets intéressants, qui méritent tous d'être traités, mais ils n'ont rien à voir avec la mécanique quantique.

La spiritualité quantique est le lieu où le « développement personnel » pointe le bout de son nez, parce que, selon de nombreux professeurs, comme la conscience influe sur la réalité, il devient possible de faire advenir les choses par la seule pensée. Je paraphrase un peu mais, vu qu'ils font pareil avec la mécanique quantique, c'est de bonne guerre.

Je dois ici bien clarifier les choses : la spiritualité est un sujet important auquel tout un chacun devrait s'intéresser à un moment ou à un autre de sa vie. D'ailleurs, bien des fondateurs de la mécanique quantique avaient un côté très spirituel (surtout Schrödinger et Pauli). Mais il faut absolument séparer ce qui est vrai de ce qui ne l'est pas.

Observer quelque chose pourrait provoquer la réduction de la fonction d'onde, mais ne détermine en rien l'état pur qu'on obtiendra. Celui-ci reste aléatoire.

Tout état pur a une « amplitude de probabilité » qui lui est associée via l'équation de Schrödinger. Celle-ci nous donne la probabilité de son apparition, et c'est ce qui détermine l'état final ; ce n'est pas la mesure.

Bien qu'il pourrait être acceptable de dire que la conscience cause la matérialisation d'un état pur, il est toujours faux de penser qu'on pourrait avoir une quelconque influence sur le résultat produit. Nous ne sommes que des observateurs de la réalité, nous n'influons pas sur sa forme au sens quantique. Si vous voulez changer le monde, j'ai bien peur qu'il vous faille adopter la bonne vieille méthode : être quelqu'un de bien.

La version de Wigner de l'interprétation de Copenhague a été par le passé une contribution importante au débat. Elle résout élégamment le paradoxe du chat puisque la conscience de l'animal est ce qui réduit sa propre fonction d'onde. Mais soyons honnêtes : c'est encore de la triche.

Elle affirme que nous ignorons comment se réduit une fonction d'onde, comme nous ignorons ce qu'est la conscience, mais que ces deux choses intangibles malgré tout collaborent d'une manière ou d'une autre pour présenter le monde à nos yeux. Encore une fois, cela revient à jeter le mystère dans une cave sombre pour dire ensuite que c'est là que tout se passe mais qu'il est interdit de regarder !

Le cerveau est mystérieux, mais mystérieux ne veut pas dire qu'il n'obéit pas aux lois de la nature. Seulement qu'on ne connaît pas encore bien tous les détails. Il n'y a pas de raison d'invoquer l'aide du surnaturel pour tenir compte de l'observation quantique ; il y en a même de bonnes de s'en dispenser.

8

Quantum de la mort

ALBERT EINSTEIN ATTAQUE LA THÉORIE QUANTIQUE !

C'était le titre du *New York Times* le 4 mai 1935, alors que le plus grand physicien du monde, 56 ans cette année-là, se retournait contre sa propre création tel Frankenstein abandonnant son monstre. Einstein avait toujours eu du mal avec la mécanique quantique bien sûr ; en 1935 il vouait tout son temps à sa chute, avec l'aide de son jeune assistant Nathan Rosen.

Après des années de sang, de sueur et de larmes, et le coup de pouce d'un physicien russe nommé Boris Podolsky, ils finirent par trouver le défaut dans la cuirasse de Bohr avec ce qui allait être connu sous le nom de paradoxe d'Einstein-Podolsky-Rosen, ou paradoxe EPR pour les intimes¹. Einstein avait-il enfin gagné le débat ?

FAUT-IL VRAIMENT EXÉCUTER LE CHAT ?

L'équation de Schrödinger décrit une particule comme une suite de racines carrées de propriétés probables qui changent avec le temps (une fonction d'onde). Or il n'y a aucune raison de la limiter à une unique particule.

Un atome d'hélium présente deux électrons occupés à tourner autour de son noyau. Comme elles peuvent se mélanger, les fonctions d'onde de chaque électron peuvent se combiner en une seule « fonction d'onde de deux électrons ». Elle est un peu plus compliquée à appréhender sur le plan mathématique mais ne présente aucun problème en termes de physique.

On peut même aller plus loin et fusionner notre fonction d'onde de deux électrons avec les fonctions d'onde des protons et du neutron du noyau, ce qui nous donne la fonction d'onde de tout l'atome. En pratique, le calcul devient difficile, ce qui nous oblige à quelques simplifications (voir l'[annexe II](#)), mais en théorie, nous pouvons calculer la fonction d'onde de tout ce que nous voulons, peu importe le nombre de particules qu'elle contient.

Commençons par combiner la fonction d'onde de deux électrons. Chaque valeur que nous calculons sur cette fonction d'onde considère alors la paire comme une unité plutôt que comme des électrons individuels.

La fonction d'onde d'une paire d'électrons peut nous dire que l'un a un spin up, l'autre un spin down, mais elle ne peut pas nous dire quelle particule correspond à quel spin avant la mesure. Comme on a combiné les fonctions d'onde, le résultat décrit l'ensemble plutôt que ses membres individuels.

Schrödinger qualifie ces particules d'« intriquées » puisque leurs propriétés deviennent liées et que nous ne pouvons prédire quelle particule émergera dotée d'une propriété particulière au moment de la mesure².

Nous pouvons imaginer une analogie convenable en reprenant la boîte de Schrödinger mais en enfermant cette fois deux chats à l'intérieur. En termes classiques, les deux chats sont distincts. Mitaine est une chatte rousse à pelage hirsute et longues moustaches, alors que Pantoufle est un chat noir à pelage épais et petites moustaches. Mais en mécanique quantique, tout ce que nous pouvons dire est qu'il existe dans la boîte les états « chatte rousse » et « chat noir », de même que « pelage épais », « pelage hirsute », « moustaches longues » et « moustaches courtes ».

Nous pourrions ouvrir la boîte pour découvrir qu'un des chats est devenu noir à pelage hirsute et petites moustaches, tandis que l'autre est à présent roux à pelage épais et longues moustaches. Il est alors impossible de savoir lequel était Mitaine à l'origine.

Mitaine n'existe plus parce que les caractéristiques qui la définissaient ne sont plus un seul ensemble, elles se sont

mélangées avec celles de Pantoufle. J'ai donc bien peur que le chat doive cesser d'exister, bien qu'il puisse se trouver hybridé avec un autre chat, par intrication. Ce n'est peut-être pas si mal ?

DIVISEZ POUR MIEUX BROUILLER

Imaginez une particule dans un état non mesuré. Son spin est une superposition simultanée de up et de down. À présent, coupez-la en deux (ne vous souciez pas du comment, disons que vous pouvez) pour former deux particules filles à partir de l'originale. La fonction d'onde de l'originale, la particule mère, a été fracturée, mais toute l'information est conservée. Les particules filles ont les propriétés combinées du parent, bien qu'il soit toujours impossible de savoir laquelle a hérité de quoi.

Armé de notre bon sens classique, nous pourrions conclure que l'une des particules est de spin up et l'autre de spin down. Mais la mécanique quantique dit que les propriétés des particules ne sont pas déterminées avant la mesure. La paire existe dans un état up/down global et ni l'une ni l'autre des particules filles n'a décidé de quel côté elle basculera.

Bien sûr, si on en mesure une, elle devra choisir un état pur. Mettons qu'elle choisisse up. La fonction d'onde globale pour la paire est toujours up/down, et comme l'une des particules a choisi up, la particule non mesurée doit opter pour down au même moment.

La particule non mesurée n'est pas autorisée à rester dans une superposition d'états car la fonction d'onde globale, selon Schrödinger, est up/down en permanence. Si nous mesurons l'une des particules dans un état pur, l'autre doit choisir l'état pur inverse.

Toutefois, afin que la particule non mesurée se réduise dans l'état down, celle qui a été mesurée doit le lui signaler. Un message doit passer entre les deux, du genre « Je me suis réduite en spin up, tu ferais mieux de te réduire en spin down tout de suite ! »

La distance qui sépare les deux particules n'a pas à entrer en ligne de compte. On pourrait tenter l'expérience aux deux coins

d'une pièce ou aux deux pôles d'une planète, le résultat serait le même. La mécanique quantique prédit que des particules intriquées au sein d'une paire se transmettent l'information en un temps nul, et c'est là qu'intervient le paradoxe EPR. Un signal ne peut aller à une telle vitesse, car cela violerait la théorie de la relativité restreinte.

RELATIVEMENT SIMPLE

La mécanique quantique a été un travail d'équipe. Planck était le manager, Einstein le capitaine, Bohr le gardien de but (sa véritable position sur le terrain), de Broglie, Born, Sommerfeld et Pauli les milieux, Heisenberg et Schrödinger les avants-centres, Stern et Gerlach les défenseurs. D'ordinaire, Schrödinger se baladait autour des bancs de touche pour draguer les femmes des autres. Oh et leur mascotte était un chat. Évidemment.

Plus de trente prix Nobel ont été décernés pour le développement de la mécanique quantique. Einstein, aussi emblématique soit-il, n'était qu'un parmi d'autres. La théorie de la relativité restreinte, d'un autre côté, c'était quasiment Einstein à lui tout seul.

Il y a deux théories de la relativité : la théorie générale qu'il a publiée en 1916 et la restreinte, de 1905. Je parlerai de la générale vers la fin de l'ouvrage, mais le paradoxe EPR ne se préoccupe que de la restreinte, aussi, mieux vaut-il s'y familiariser maintenant.

La théorie de la relativité restreinte affirme deux choses :

1. Aucun point de vue n'est privilégié quand il s'agit de mesurer.
2. La vitesse de la lumière est la même pour tout le monde, peu importe le mouvement.

Le premier postulat signifie qu'il est impossible d'affirmer qu'une mesure est objective. Par exemple, vous pensez peut-être que vous êtes immobile en cet instant. C'est faux. Vous orbitez autour du Soleil et votre corps est à présent à 90 kilomètres de l'endroit où il se trouvait au début de cette phrase. En d'autres termes, votre vitesse et sa direction sont différentes selon le point de vue de celui qui tient le compteur. Dans votre perspective, votre vitesse est nulle, mais du

point de vue du Soleil, vous bougez à 30 km/s environ. La relativité restreinte affirme que les deux réponses sont valides, seulement, elles sont relatives à des référentiels différents.

Imaginez que vous tiriez une flèche à 20 m/s alors qu'une amie roule à bicyclette dans la même direction au même moment, s'éloignant à 15 m/s de vous (sa main a dû être réparée après que vous l'avez explosée à coups de boulets de canon).

De votre point de vue, la flèche se déplace à 20 m/s, mais votre amie dirait naturellement qu'elle ne va qu'à 5 m/s par rapport à elle et au vélo. Les deux valeurs sont vraies, parce que toutes les vitesses sont également valides. À part la vitesse de la lumière. Là, c'est 299 792 458 m/s pour tout le monde. Partout. Tout le temps.

Vous avez peut-être appris à l'école que la lumière ralentit quand elle traverse le verre, mais c'est un peu trompeur. Les photons sont absorbés et réémis par des atomes au sein du verre, ce qui prolonge le temps de trajet total, mais la vitesse des photons entre deux atomes est toujours 299 792 458 m/s. C'est une constante de l'univers.

Si vous projetez la lumière d'une lampe torche, la vitesse du rayon est 299 792 458 m/s. Votre amie, toujours en train de pédaler à vos côtés, atteint cette fois 100 m/s (elle est très en forme) ! Si vous lui demandez à quelle vitesse va le rayon de son point de vue, elle dirait aussi 299 792 458 m/s. Pareil que vous. Mais cela paraît choquant. Si elle se déplace aux côtés du rayon à 100 m/s, elle devrait donner une vitesse inférieure à la vôtre, comme elle l'avait fait avec la flèche. Pourtant, la relativité restreinte n'est pas d'accord. La vitesse de la lumière est la même pour tout le monde.

Quand bien même elle pédalerait à 99 % de la vitesse de la lumière, son odomètre indiquerait encore que le rayon de lumière se déplace à 299 792 458 m/s. On s'attendrait à ce que la réponse soit différente, mais non. C'est toujours la même à tous les coups.

Supposez maintenant qu'elle pédale vers vous et que le rayon va à sa rencontre, droit sur elle. Ne devrait-elle pas estimer qu'il va plus vite ? Non, répond Einstein. Elle voit le rayon arriver à la même vitesse.

Il existe un moyen simple de prouver que la vitesse de la lumière est la même pour tous les observateurs (voir l'[annexe III](#)) mais prenons ça pour l'instant comme argent comptant et explorons ses étranges implications.

Si deux personnes se déplacent à des vitesses différentes et qu'elles mesurent la même vitesse pour la lumière, quelque chose doit se tordre entre leurs référentiels. Si elles mesurent deux scénarios différents mais obtiennent la même réponse, quelque chose cloche, et le coupable, dit Einstein, c'est le temps lui-même.

Si on accepte les deux postulats de la relativité restreinte, le temps doit passer à des vitesses différentes pour deux observateurs en mouvement. Pour qui se déplace vite, sa montre ralentit, résultat, un rayon de lumière lui paraît tout aussi rapide puisqu'il se déplace dans le temps plus lentement. Le temps ralentit pour votre amie sur son vélo, si bien que, quand elle mesure la vitesse du rayon de lumière qui la dépasse, il lui paraît tout aussi rapide.

Elle ne sent toutefois pas cette dilatation du temps. Si elle regardait sa montre, elle ne constaterait pas de différence dans le mouvement des aiguilles. Toutes les particules de son cerveau vivent dans un temps allongé aussi. De son point de vue, c'est vous qui vivez dans un temps distordu. Elle vous voit vous agiter comme dans un film joué en accéléré, et ni elle ni vous ne vivez dans le temps « juste », parce que toutes les mesures se valent.

Pas possible, hein ? Eh bien, en 1971, Richard Keating et Joseph Hafele ont voulu tester la relativité restreinte en synchronisant deux horloges atomiques puis en les séparant et en leur appliquant différentes vitesses. L'une se trouvait à bord d'un avion classique (son billet était au nom de Mr Clock) et tourna huit fois autour du monde tandis que l'autre restait au sol.

À la fin du vol, Hafele et Keating comparèrent l'heure de Mr Clock à celle de sa congénère restée au sol et découvrirent que Clock était en retard, de la valeur exacte qu'avait prédite Einstein.

C'est un petit effet bien sûr (Mr Clock n'avait que quelques nanosecondes de retard), mais plus vous allez vite, plus vous vieillissez lentement. Jusqu'à un certain point.

L'effet de dilatation du temps ne peut pas continuer éternellement parce qu'il existe une vitesse minimale pour le passage du temps : il peut s'arrêter complètement. Et devinez à quelle vitesse ? À 299 792 458 m/s. La vitesse de la lumière est la vitesse à laquelle le temps s'arrête, c'est pourquoi rien ne peut aller plus vite que ça.

Quand on parle de vitesse de la lumière et qu'on dit que rien ne peut aller plus vite, on n'emploie pas la bonne tournure. On ferait mieux de dire que plus on va vite, plus le temps passe lentement, jusqu'à ce qu'on arrive à 299 792 458 m/s et là le temps s'arrête.

La lumière n'a rien de particulier en elle-même. Ce qui est particulier, c'est que l'univers impose une vitesse maximum, et qu'il se trouve que c'est la vitesse à laquelle la lumière se déplace. La distorsion du temps impose une vitesse limite à toute chose, ce qui rend impossible l'intrication quantique.

En relativité restreinte, aucune information entre deux particules ne peut s'échanger avec une vitesse supérieure à 299 792 458 m/s... et pourtant, l'information partagée par deux particules intriquées semble bien y être obligée. La particule qui a choisi le spin up doit envoyer plus vite que la lumière un communiqué à son partenaire, lui disant de se réduire. Un phénomène qu'Einstein qualifia « d'inquiétante action à distance ».

CODE QUANTUM

Einstein, Podolsky et Rosen ont souligné ce désaccord entre la mécanique quantique et la relativité restreinte, mais ils ont aussi proposé une solution : la mécanique quantique avait tort et Einstein raison. Grosse surprise de ce côté-là.

Les particules intriquées doivent certainement choisir à l'avance de quel type sera leur spin si jamais on les mesurait. Elles passent cet accord au moment où elles sont générées dans l'intricateur (le petit nom que je donne à un appareil qui crée des paires intriquées), puis elles se contentent de suivre le plan de vol convenu.

Elles ont ensemble une conversation de ce genre :

UN ÉLECTRON : Hé mec, si jamais on tombe dans un détecteur de spin de Stern-Gerlach, choisis le spin up, je prends le down, OK ?

L'AUTRE ÉLECTRON : Attends, pourquoi moi je prends le up ?

LE PREMIER : *Soupir* Faut toujours que tu fasses le difficile comme ça ?

L'AUTRE : Comme quoi ?

LE PREMIER : Comme le mec difficile.

L'AUTRE : Je fais pas le difficile, gars, je dis juste qu'on devrait se partager les spins équitablement, ç'tout.

C'est exactement ainsi qu'Einstein l'a décrit.

Dans sa vision de l'intrication, les particules ne décident pas ce qu'elles seront au moment de la détection, elles ont une réponse prédéterminée que nous nous contentons de découvrir. Les superpositions n'existent pas vraiment. Ce n'est que de l'ignorance.

Supposez qu'on ait un chat rouge et un chat vert, qu'on place tous deux dans des boîtes et qu'on envoie aux deux bouts du système solaire. Si on ouvre l'une des boîtes et qu'on découvre un chat rouge, on sait exactement ce que l'autre boîte contient. L'information « un chat vert » n'a traversé l'univers que de manière métaphorique, il n'y a pas de violation de la relativité puisque rien ne parcourt vraiment la distance qui nous sépare.

Mais selon la vision quantique, les chats n'ont pas encore choisi leur couleur : ils en décideront au hasard et se communiqueront leur choix au moment de la mesure, plus vite que la lumière, par télépathie. Alors qu'Einstein pensait que les propriétés des chats ont toujours été là, et qu'on ne peut simplement pas les voir avant de les mesurer.

Après la publication de cet article, Einstein et Rosen continuèrent à travailler en lien étroit ; leur amitié ne faiblit pas. Podolsky, de son côté, tomba dans une obscurité relative. Certains historiens ont avancé qu'il avait même travaillé comme espion pour le KGB durant la guerre froide, sous un nom de code terriblement cool : Quantum³.

Oh et au fait, je sais que toutes mes analogies en mécanique quantique paraissent se réduire à ouvrir ou fermer des boîtes. Je vais essayer de faire mieux pour la prochaine. Promis.

BELL DE JOUR

La théorie d'Einstein avait déjà fait son lit de lauriers pour s'y reposer quand arriva d'Irlande du Nord un scientifique nommé John Stewart Bell, qui jeta une bonne poignée de sable dans les rouages de la machine durant les années 1960. Passionné de science depuis toujours, Bell détestait la prétention et s'est donné beaucoup de mal pour expliquer la physique au grand public. C'est en se pliant à cet exercice à propos du paradoxe EPR qu'il tomba sur un élément curieux.

Le théorème de Bell, qui lui valut de se trouver sur la liste des candidats au Nobel⁴, était une manière révolutionnaire de tester en laboratoire le paradoxe EPR. Il est malheureusement mort avant que le comité Nobel ait pris sa décision, or, le prix Nobel n'est jamais décerné à titre posthume. Mais son théorème, lui, est bien vivant.

Intriquons deux particules que nous appellerons Alice et Bob, et envoyons-les chacune dans un passage de Stern-Gerlach différent, aux deux coins de la pièce. Les portes du passage peuvent être alignées verticalement, horizontalement ou en diagonale pour chaque mesure prise et, pour l'instant, disons qu'Einstein avait raison : chaque particule prédétermine le spin qu'elle adoptera au moment de la mesure.

Les portes verticales séparent les spins up et down, les portes horizontales distinguent les spins gauche et droit, et les diagonales... Hum... nord-est/sud-ouest ?

Les spins verticaux et horizontaux d'une particule sont indépendants, mais le spin diagonal ne l'est pas. Le spin vertical ou horizontal d'une particule affectera toujours la direction qu'elle prendra si on la mesure en diagonale.

Pensez-y. Si on règle nos deux détecteurs verticalement, alors si Alice est up, il y a 100 % de chance que Bob soit down. Si on installe

le détecteur de Bob à angle droit, toutefois, on ignore quel résultat on obtiendra. Alice sera toujours up, mais Bob pourra partir à droite comme à gauche avec 50 % de chance.

Mais si le détecteur de Bob est réglé avec un angle de 45° , cela le place à mi-chemin entre les deux valeurs extrêmes, ce qui signifie qu'on peut prédire son spin avec une précision à mi-chemin elle aussi entre 50 et 100 %. Autrement dit, nous pouvons prédire correctement quelle diagonale Bob choisira trois fois sur quatre.

Si une particule est up, son spin diagonal a 75 % de chance d'être nord-est (pointant légèrement vers le haut), inversement, si son spin est down, il y a 75 % de chance pour qu'une mesure diagonale pointe au sud-ouest (pointant légèrement vers le bas).

Selon Einstein, Alice et Bob ont tous deux choisi auparavant s'ils seront up ou down, ce qui signifie, précise Bell, qu'ils auront une petite préférence dans leur décision s'agissant de la diagonale.

On ne peut pas mesurer le spin diagonal et le spin vertical d'un électron en même temps (maudit Heisenberg), mais on peut mesurer son partenaire intriqué ! Si on mesure le spin vertical d'Alice et qu'on obtient up, Bob aura prédéterminé un spin opposé (down), et ce choix influera sur sa décision diagonale. Si Alice est up, Bob a 75 % de chance de partir au sud-ouest après son passage en diagonale.

Maintenant, reproduisons cette expérience cent fois. Si on a installé le détecteur d'Alice en vertical, alors dans 75 % des cas où elle aura choisi le spin up, Bob partira au sud-ouest, et vice versa.

Si, d'un autre côté, Bob et Alice n'ont rien décidé du tout avant la mesure, le résultat de l'expérience ne respectera pas la règle des 75 %. La valeur obtenue sera différente. Ce qui répondra sûrement à la question de l'existence de la superposition.

En 1982, le physicien français Alain Aspect réussit à construire un intricateur pour de vrai selon les spécifications de Bell, et conduisit l'expérience EPR dans l'espoir de valider l'idée d'Einstein et de renvoyer pour de bon l'interprétation de Copenhague aux oubliettes⁵.

Bell espérait que l'expérience conduirait à une correspondance à 75 % pour Alice et Bob, ce qui aurait prouvé l'existence de propriétés cachées décidées à l'avance par les particules. Mais les mesures ne collèrent pas. Pas du tout. Le chiffre de 75 % proposé par Bell n'a jamais été observé, ce qui signifie que l'explication classique d'Einstein du paradoxe EPR par la prédétermination était fautive.

Les particules ne décident pas à l'avance ce qu'elles seront quand on les mesurera. D'une manière ou d'une autre, elles décident de leur état au moment de la mesure, même séparées par des distances que la relativité restreinte interdit. L'étrangeté quantique a triomphé.

Cela ne prouve pas nécessairement que les particules s'envoient des messages plus rapides que la lumière. D'ailleurs, très franchement, personne ne sait exactement ce que ça prouve.

Que quelque chose se passe entre les particules qui va plus vite que la lumière est une explication possible. Une autre serait que les particules sont liées par de minuscules trous de ver qui transcenderaient les dimensions de notre univers. Une autre encore est que les particules intriquées ne seraient pas séparées du tout, et qu'une illusion spatiale nous ferait croire à nous, humains, qu'elles le sont, alors qu'en fait elles restent ensemble.

Il nous est impossible de donner un sens à cela, mais deux particules intriquées restent bel et bien en communication quelle que soit la distance qui les sépare. Ce que vous faites subir à une particule sur la Terre affectera instantanément sa jumelle sur la Lune, sans qu'un message ait le temps de passer entre les deux. Votre propre explication de ce phénomène est tout aussi valable qu'une autre. Personnellement, j'opte pour une histoire de gobelins.

9

Téléportation, machines à remonter le temps et gros quanta

INSTAGRAM INSTANTANÉ

Si on intrique deux électrons sur Terre et qu'on les envoie dans l'espace, dans des directions opposées, le lien d'intrication leur permet de communiquer instantanément. Pourrions-nous utiliser cela pour envoyer des signaux plus vite que la lumière ? Malheureusement, la réponse paraît négative.

Supposons que nous ayons deux particules intriquées, de spins indéterminés, et que nous les enfermions dans deux boîtes séparées. Non, attendez, j'avais dit que j'éviterai les boîtes dans les analogies ! Enfermons-les plutôt dans deux poulets. On envoie un poulet sur Mars, l'autre sur Neptune.

Plus tard, un colon martien ouvre le poulet pour voir à l'intérieur, et la particule adopte un spin up. Intéressant, se dit-elle. Elle sait instantanément que l'autre expérimentatrice, là-bas sur Neptune, dispose d'une particule down dans son poulet. Mais elle n'a aucun moyen de la prévenir autrement qu'en envoyant un signal par les moyens habituels.

Il n'y a aucun moyen d'envoyer un signal par intrication parce que tout ce que ce lien fait, c'est de dire quel état pur une particule a adopté. Nous n'avons aucun contrôle là-dessus (c'est aléatoire), et donc aucun contrôle non plus sur le message que se transmettent deux particules intriquées.

Si notre expérimentatrice pouvait d'une manière ou d'une autre convaincre une particule d'adopter l'état up ou down, elle pourrait se servir d'une batterie de poulets pour chiffrer une information en binaire, que son amie décoderait sur Neptune. Mais c'est impossible.

Une superposition ne peut être influencée sans être mesurée, et toute mesure la réduit, ce qui rend le procédé inutile. La seule information que vous pourriez découvrir par intrication, ce serait le résultat noté dans le carnet d'expériences d'un autre scientifique. Communiquer plus vite que la lumière paraît hors de question. La téléportation, d'un autre côté...

TÉLÉPORTATION, SCOTTY !

Le 4 juillet 2017, un groupe de physiciens travaillant en Chine a publié un article sur leur nouveau record du monde : la téléportation à plus grande distance jamais effectuée¹. Le précédent record datait de 2012, quand un groupe de recherche avait réussi à téléporter quelque chose sur une distance de 143 km au travers des montagnes des îles Canaries². Le nouveau record multipliait cette performance d'un facteur dix.

L'équipe, menée par Pan Jianwei, a effectué cette téléportation quantique depuis son laboratoire du Tibet vers le satellite *Micus*, en orbite à 1 400 km au-dessus du sol. Il s'agit donc d'une téléportation de la Terre vers l'espace, ce qui chatouille tout particulièrement le fan de *Star Trek* en moi.

La téléportation quantique a été évoquée en 1993 par Asher Peres, William Wootters et Charles Bennett, qui travaillaient alors à l'université de Montréal³. Comme on l'a vu, la relativité restreinte interdit les sauts quantiques mais, grâce à l'intrication, une information portant sur l'état de la particule peut contourner ce problème.

Revenons, une fois plus, à Bob et Alice. Après leur création dans l'intricateur, on les envoie en deux lieux entre lesquels on souhaite téléporter quelque chose. Bob est envoyé dans un satellite et Alice reste dans un laboratoire sur Terre. On ignore encore les propriétés individuelles d'Alice et Bob (c'est bien ce qui les intrique), on connaît seulement leur état global.

À présent, on introduit une troisième particule, celle qu'on veut téléporter. Appelons-la Cathy. L'état de Cathy nous est connu et, si

on la met en contact avec Alice, on peut les intriquer toutes les deux en un état de superposition qui leur sera propre.

Il faut s'assurer qu'on ne mesure pas Alice par inadvertance durant ce processus, car cela réduirait le lien d'intrication qu'elle entretient avec Bob. Toutefois, au prix de quelques précautions (comme d'utiliser un appareil appelé CNOT et des portes d'Hadamard), on peut forcer Cathy à abandonner son état pur et à s'intriquer avec Alice.

Pour ce faire, on ouvre une pièce dans laquelle on sait qu'Alice se trouve, mais on ne regarde pas à l'intérieur. On tient la porte à Cathy pour qu'elle s'y introduise. Les états de Cathy et Alice sont à présent superposés, si bien qu'on a perdu de l'information à propos de chacune, mais l'identité originelle de Cathy est là, quelque part, partagée entre elles.

Comme on a intriqué Alice et Cathy sans rompre le lien entre Alice et Bob, l'information concernant Cathy est à présent partagée avec lui aussi, bien qu'il soit dans l'espace. On a construit un scénario à triple intrication que Schrödinger aurait sans nul doute applaudi des deux mains.

Si on se débrouille bien, on devrait à présent prendre une mesure qui livrera un peu d'information sur Cathy et Alice, mais pas tout, laissant le reste intriqué avec Bob.

Supposez qu'on prenne une mesure qui révèle la couleur des cheveux de Cathy et Alice, mais pas la couleur de leurs yeux. L'information couleur des cheveux est réduite, mais la couleur des yeux est toujours là. Si on envoie un message radio vers le satellite de Bob pour demander aux expérimentateurs de déterminer la couleur de ses yeux, il y a de fortes chances qu'ils soient de la même couleur que ceux de Cathy.

Cathy n'a pas elle-même été transférée dans l'espace, seulement une partie de son identité. C'est un peu comme si Bob était une toile vierge sur laquelle on est venu coller la photo volée de Cathy.

Peres et Wootters voulaient appeler ce phénomène la téléphérésie quantique, mais Bennett affirma que « téléportation » était bien plus cool, ce en quoi il n'avait pas tort⁴.

Il faut cependant garder en tête certaines limites. Tout d'abord, Cathy conserve ses propriétés jusqu'à ce qu'elle entre en superposition avec Alice. Ce qui signifie qu'on ne peut transformer Bob en Cathy tout en conservant la Cathy d'origine. Si on veut transférer les propriétés de Cathy, il faut les lui arracher. C'est ce qu'on appelle le principe de « non-clonage », qui affirme qu'on peut transférer mais pas dupliquer l'information quantique.

Ensuite, il est impossible de transférer l'information sans disposer d'un appareil de mesure sur le lieu de destination pour la détecter. Une fois la mesure prise sur Cathy et Alice, il est toujours nécessaire d'envoyer un signal classique indiquant à l'expérimentateur côté Bob quelle propriété il doit mesurer. Si on a envoyé l'information sur la couleur des yeux (on n'a aucun contrôle sur ce choix), il serait complètement inutile de mesurer la couleur des cheveux de Bob, déjà réduite.

Évidemment, le vrai processus ne mesure pas la couleur des yeux mais des choses comme le spin et l'énergie, mais comme ces propriétés sont la façon dont on identifie ces particules, cela revient au même.

En effectuant ces téléportations suffisamment de fois, on pourrait en théorie transférer une à une toutes les propriétés d'une particule vers une autre, perchée à bord d'un satellite. Et si la particule dans le satellite devient identique à celle restée sur Terre, on l'aura en tout état de cause téléportée.

EST-CE QUE JE VOUS AI DIT QUE LA MÉCANIQUE QUANTIQUE VOYAGEAIT DANS LE TEMPS ?

Enfin, presque. L'expérience en question s'intitule « la gomme quantique à effet retardé ». On la trouve dans la section interdite de la bibliothèque de Poudlard, car elle corrompt l'esprit innocent des jeunes physiciens.

Créez une paire de particules intriquées et envoyez-en une (Alice) dans une installation à double fente classique, avec un écran de l'autre côté. Puis, envoyez séparément Bob dans un détecteur de

particules qui réduira sa fonction d'onde si on l'allume, mais conservera sa superposition si on le laisse éteint.

Comme Bob et Alice sont intriqués, ce qui arrive à l'un dans le détecteur affectera immédiatement l'autre dans la double fente. Si le détecteur est allumé quand Bob s'approche, il se réduira, ce qui obligera Alice à faire de même ; elle passera donc au travers d'une seule des deux fentes comme une particule classique. Mais si le détecteur est éteint, Bob continuera sa vie de fonction d'onde de probabilité et Alice passera par les deux fentes en même temps, pas plus réduite que Bob, jusqu'à ce qu'elle heurte l'écran quelque part dans l'une des zébrures.

Recommencez quelques centaines de fois et la correspondance sera parfaite. Si le détecteur de Bob est allumé 15 % du temps, 15 % des particules Alice frapperont l'écran de façon classique, et les 85 % restants joueront les zèbres.

Si vous placez les doubles fentes près de l'endroit où Alice est générée dans l'intricateur (mot qui commence à m'évoquer un chouette super-vilain dans les *X-Men*), Alice les franchira et sera obligée de choisir entre le comportement d'une particule ou celui d'une onde, selon que Bob a été détecté ou pas. Mais que se passe-t-il si le détecteur de Bob est à un kilomètre de là ?

Quand Alice arrive à la double fente, Bob n'a pas encore atteint le détecteur ni découvert s'il était allumé ou éteint. Si Bob est détecté, elle doit passer les doubles fentes en tant que particule, mais si Bob n'est pas détecté, elle doit passer comme une onde. Or Bob n'ayant pas encore décidé, Alice ne sait pas si le détecteur est allumé ou non. Que va-t-elle faire ?

Nous avons retardé le choix d'Alice (se réduire ou non) afin qu'elle le prenne après l'instant où elle aurait dû le prendre, si bien qu'on a forcé l'effet à se produire avant sa cause. Une machine pareille serait pure folie, n'est-ce pas ? Eh bien, en 1999, Yoon-Ho Kim en a construit une. Et Alice a fait le bon choix à tous les coups⁵. Comment, par Niels Bohr et tous les saints, est-ce seulement possible ?

Si les expérimentateurs réglent le détecteur pour mesurer Bob 42 % des fois, alors 42 % des particules d'Alice passent en tant que particules. Et si le détecteur de Bob est allumé 89 % du temps, 89 % des particules d'Alice passent en tant que particules. Peu importe le nombre de fois où ils allument le détecteur, Alice parvient toujours au bon ratio.

Tout se passe comme si Alice pouvait lire dans l'avenir et savait ce que Bob allait lui communiquer par le biais de leur lien d'intrication. L'information intriquée n'est pas seulement instantanée, elle peut encore aller plus vite que ça ! Alors, peut-on envoyer des messages vers le passé depuis le futur ?

Imaginez qu'on tire trois paires de particules intriquées au cours de cette expérience, et qu'on traque les électrons Alice. Le passage déterminé pour Bob est si long qu'il lui faudra vingt-quatre heures pour le franchir. L'un des scientifiques, au bout de cette durée, ira éteindre et allumer le détecteur de Bob selon un schéma bien établi qui décrira la météo locale. « On, Off, On » signifiera qu'il fait beau, « Off, On, Off », qu'il pleut.

La particule Alice frappera l'écran en suivant ce schéma aussi, ce qui apprendra à l'expérimentateur l'ordre dans lequel sa collègue allumera et éteindra le détecteur de Bob dans le futur. Et on aura envoyé un message vers le passé avec succès.

Malheureusement, une fois de plus, un grain de sable vient gripper la machine. Il est impossible de savoir, en regardant une particule Alice individuelle, si elle est passée par les deux fentes ou par une seule. Chaque particule frappe l'écran en un endroit aléatoire, qui peut être le résultat d'un comportement classique comme quantique. On n'observe l'effet zébré quantique qu'après le passage de milliers de paires Alice/Bob et après avoir calculé les pourcentages.

Cela signifie que l'effet de voyage dans le temps ne peut être observé qu'à la fin de l'expérience, pas pendant. On ne voit les effets quantiques que si l'on efface notre connaissance du comportement d'Alice à chaque passage individuel. D'où son nom : la gomme quantique à effet retardé.

Ce phénomène, quelle que soit sa nature, se passe dans une boîte, dans une poule, et on ne le constate qu'après les faits. Franchement, la mécanique quantique est un peu allumeuse.

LE MONDE N'A PAS À AVOIR UNE SIGNIFICATION

Dans l'interprétation de Copenhague, les effets quantiques dominent jusqu'à un certain point nommé « coupure d'Heisenberg », après lequel la physique classique prend le relais. Tout ce qui est plus petit que la coupure d'Heisenberg obéit aux équations de Schrödinger, tout ce qui est plus grand suit les lois de Newton. C'est du jargon physicien pour dire « on n'a aucune idée de ce qui se passe, en fait ».

Le problème, c'est que, à cause de l'intrication, la coupure d'Heisenberg ne peut pas vraiment exister. Si on applique la mécanique à une particule unique, on peut sans problème l'étendre à deux, trois, quatre particules, autant qu'on veut. L'intrication peut relier n'importe quel nombre de particules, il doit donc être possible de décrire l'équation d'onde de Schrödinger de tout un peuple, tout un pays, toute une planète.

On devrait observer des étrangetés quantiques en permanence, alors que, bien sûr, ça n'arrive jamais. C'est l'une des cinq grandes questions dont j'ai parlé, et il se trouve que c'est une de celles pour lesquelles les progrès de ces dernières années ont été réels.

Prenez par exemple la mesure d'une particule intriquée qui nous donnerait son spin, par exemple up. Comme sa partenaire d'intrication se voit instantanément attribué un spin down, les deux ne sont plus liées ensemble. L'intrication est brisée puisque les deux particules ne sont plus gouvernées par la même fonction d'onde. Nous pouvons les décrire comme des états purs indépendants.

À présent, prenez l'acte de mesurer en lui-même. Ce qu'il se passe, quand on mesure une particule, c'est qu'elle s'intrique avec une particule de notre détecteur, coupant au passage tout lien d'intrication qu'elle pouvait précédemment entretenir avec une autre.

Mesurer une particule appartenant à une paire intriquée revient à échanger une intrication contre une autre, ce qui signifie que mesurer quelque chose est fondamentalement la même chose que s'intriquer avec elle. Même si on ne mesure qu'une seule particule.

Si une particule solitaire est dans une superposition d'états spin up/spin down avant la mesure, on peut en fait la considérer comme intriquée avec elle-même. Les deux résultats qu'elle peut fournir sont liés par la même fonction d'onde et quand on effectue une mesure, on brise cette auto-intrication.

LE CHAT DE SCHRÖDINGER EST SAUVÉ/TUÉ

Si on jette une pièce, on s'attend à deux résultats possibles, pile ou face. Pourtant, techniquement, il existe une troisième possibilité. La pièce pourrait atterrir sur la tranche et tourbillonner à mi-chemin entre pile et face.

Imaginez que vous approchiez lentement votre doigt vers elle alors qu'elle tourbillonne. Dès que vous la touchez, elle s'écroule d'un côté ou de l'autre, se réduit et met fin à sa danse éphémère. La pièce représente une particule disposant de deux états possibles, le tourbillon une superposition et votre doigt est un appareil de mesure qui vient réduire la fonction d'onde.

Jusqu'ici, on reste à Copenhague. Sauf que l'analogie est trompeuse. Le doigt qui touche la pièce n'est pas un autre type d'objet. C'est un détecteur fait de particules, soumis aux mêmes lois quantiques que la pièce. Aussi, au lieu d'un doigt, nous devrions imaginer le détecteur comme une autre pièce qu'on fait tourbillonner sur la table vers celle qui nous intéresse. Le détecteur est en superposition tout comme la pièce, et quand ils se rencontrent, ils se cognent et les deux se réduisent vers un état pur.

Si on ajuste les vitesses de rotation pile comme il faut, les pièces pourraient en théorie s'emmêler et rester dans une superposition combinée, tels des partenaires de danse : une paire intriquée. Ça n'arrive pas souvent pour de vraies pièces, mais pour les particules, c'est la routine, du moment que leurs fonctions d'onde sont alignées.

Mais songez à la difficulté de synchroniser ainsi une centaine de pièces en rotation, tourbillonnant en une seule grande intrication ! Même si vous y arriviez, ce serait une situation très précaire. Une seule pièce rebelle sur la table, une seule pièce extérieure au système venue s'y ajouter, et tout pourrait s'écrouler. Ainsi, plus nombreuses sont les particules qui participent à l'interaction, plus il est difficile de les superposer ensemble.

Il n'existe pas un nombre de particules spécifique qui ferait soudain basculer un système sous les lois classiques. Seulement, les objets classiques sont composés de tant de particules qu'il est pratiquement impossible de les synchroniser toutes. Le monde classique naît de l'instabilité des superpositions, mais aucune loi n'interdit qu'un gros objet puisse être superposé.

Un chat peut contenir des milliers de milliards de particules et si on les intrique toutes en parfaite harmonie, les superpositions s'appliqueront à tout le chat. On a peu de chance de le croiser dans la rue, cela dit, parce qu'une seule molécule d'oxygène qui viendrait le toucher ficherait tout en l'air.

Schrödinger disait qu'un chat ne pouvait pas être mort et vivant en même temps car la métaphysique l'interdisait. Il voyait juste, mais pour la mauvaise raison. La particule radioactive dans la boîte peut être en état de superposition, mais dès qu'elle s'intrique avec quelque chose de plus gros, il devient de moins en moins probable qu'elle reste ainsi superposée.

Même si on arrivait par miracle à rendre toutes les particules d'un chat cohérentes et intriquées, la superposition mort/vivant perdrait sa cohérence à la première interaction avec la boîte elle-même. La seule façon de conserver l'état mort/vivant simultané serait d'isoler le chat de son environnement. Et c'est ce que fit le physicien Aaron O'Connell en août 2014.

GROS QUANTA

Le « chat », dans l'expérience d'O'Connell, était en réalité un bout de métal en forme de plongeur d'un soixantième de millimètre de

large, à peu près l'épaisseur d'un cheveu. Le plongeur était suspendu au-dessus d'une piscine miniature dans une boîte refroidie à quelques degrés au-dessus du zéro absolu afin d'empêcher les particules qu'elle contenait d'interagir hors de propos. Une quelconque vibration du métal réduirait le tout mais, si les particules sont suffisamment froides, l'objet réagit comme une seule grosse particule.

Le plongeur était relié à un circuit hors de la boîte mesurant l'intensité du courant qui le traversait, ce qui permettait à O'Connell de détecter son comportement sans avoir à ouvrir la boîte. Une fois l'appareillage dans son état refroidi, O'Connell l'a allumée avant d'aspirer tout l'air à l'intérieur pour éviter que ne se forment des intrications. La magie quantique pouvait alors opérer.

Le plongeur s'est mis à vibrer, doucement et vigoureusement en même temps. Les particules bougeaient à la fois peu et beaucoup ; toutes les deux ou trois nanosecondes, les atomes se trouvaient en deux endroits à la fois, près de la position d'équilibre et très éloigné de celle-ci. O'Connell avait construit la première machine quantique.

En mai 2018, Michael Vanner est passé à la vitesse supérieure en construisant un tambour quantique qu'on pouvait frapper et ne pas frapper en même temps. Dans son expérience, une membrane de 1,7 mm (l'épaisseur d'un grain de sable) se trouve sur le passage de photons, qui a le choix de la frapper ou non. En état superposé, les deux options sont choisies, si bien que le tambour vibre en absorbant la quantité de mouvement des photons, mais il reste aussi immobile puisque les photons choisissent aussi le chemin le moins vibrant.

Les vibrations sont trop petites pour être détectées à l'œil nu – seuls quelques photons frappent la membrane toutes les secondes –, mais cet appareillage hautement sensible de Vanner est capable de détecter les photons sur les deux chemins à la fois, ce qui signifie que la membrane vibre et reste immobile. L'expérience de Vanner est d'autant plus remarquable qu'elle peut être menée à température ambiante.

Le plus important phénomène quantique jamais observé avait toutefois eu lieu un an auparavant, mais complètement par accident.

En 2017, une équipe de chercheurs menée par David Lidzey menaient des expériences sur la bactérie *Chlorobaculum tepidum*, envoyant des rayons laser sur des spécimens placés dans des boîtes aux parois réfléchissantes, dans l'espoir d'affecter les électrons de leurs cellules photosynthétiques.

Ce dont ils ne se sont pas rendu compte, et qui fut remarqué l'année suivante par Chiara Marletto⁶, c'était que les photons du laser s'intriquaient avec les électrons des bactéries, ce qui les plaça en superposition avec le faisceau lumineux. Ce qui avait rendu cela possible était que les boîtes étaient tellement gorgées de lumière que les bactéries ne pouvaient plus interagir avec rien d'autre que la lumière elle-même, si bien que les liens d'intrication qu'elles tissaient avec les lasers pouvaient subsister pendant un temps raisonnable. Les phénomènes quantiques s'appliquent également, apparemment, aux êtres vivants.

Nous vivons une époque réellement fascinante de l'histoire de la physique. Ce qui s'apprête à arriver est sans précédent. On a toujours supposé que la mécanique quantique restait confinée dans l'univers de l'infiniment petit, du microscopique, du monde d'*Ant-man*. Mais ces dernières années, nous avons réussi à appliquer des règles quantiques à des objets quotidiens du monde macroscopique. Le temps du gros quantum a commencé.

10

La mécanique quantique
prouve que je suis Batman

IL Y A PLUS D'UNE FAÇON D'ÉCORCHER UN CHAT DE SCHRÖDINGER

Dès qu'on essaye de comprendre quelque chose en mécanique quantique, la même grosse question revient : peut-on faire mieux que le haussement d'épaules à la mode de Copenhague, accompagné de son fameux « c'est comme ça » ?

La majorité des manuels de physique enseignent l'interprétation de Copenhague parce que Bohr était la grosse légume du domaine, et que sa façon de faire a été la seule disponible durant des décennies. De nos jours, cependant, l'interprétation de Copenhague a de la concurrence.

Évidemment, il nous faut tôt ou tard abandonner nos idées classiques, et toute interprétation de la mécanique quantique contient une bonne part de bizarreries, mais, depuis l'époque des saints de Copenhague, une foultitude d'approches alternatives ont été développées.

Il est difficile de décider quelle interprétation de la mécanique quantique inclure dans un livre tel que celui-ci, car, en vérité, on pourrait en remplir des bibliothèques entières. J'ai décidé de me fier à mon instinct et de discuter trois perspectives quantiques inventées par de gros amateurs de science-fiction et étendues à partir des travaux des géants de la physique.

OUBLIEZ TOUT CE QUE J'AI DIT

En 1927, Louis de Broglie a prononcé un discours lors de la cinquième conférence de Solvay, à Bruxelles. Ces conférences qui rassemblaient tout le raout de la physique étaient organisées par l'industriel belge Ernest Solvay qui avait gagné des millions dans les années 1860 grâce à son invention, une méthode industrielle pour produire du carbonate de sodium (les cristaux de soude utilisés dans la fabrication du verre).

Solvay voyait ses conférences comme une colo d'été pour scientifiques. Il s'agissait de rassembler dans la même pièce pendant un mois les gens les plus intelligents du monde et de les laisser écumer les plus gros sujets. Des discours étaient prononcés, des débats organisés et, si aucune conclusion n'émergeait, on distribuait des armes contondantes.

La première conférence en 1911 était consacrée à la théorie quantique de Planck et d'Einstein. La deuxième (1913) portait sur la structure de la matière, la troisième (1921) sur les atomes et la lumière, la quatrième (1924) sur l'électricité et la cinquième enfin s'était intéressée à l'interprétation de Copenhague et à l'opportunité d'abrèger son règne ou de le proroger pour l'éternité. Dans le public de ces conférences historiques se trouvaient Schrödinger, Heisenberg, Sommerfeld, de Broglie, Bohr, Planck, Curie, Einstein et bien d'autres.

Il existe une photographie emblématique de tous ces scientifiques en trois rangées les unes au-dessus des autres, on dirait la photo de classe la plus *nerd* de tous les temps. Marie Curie est la seule femme, Schrödinger arbore le seul nœud papillon et le chimiste Paul Debye est le seul à avoir osé la moustache à la Chaplin, qui allait passer de mode dès la décennie suivante, pour des raisons évidentes.

Durant cette conférence, un Louis de Broglie affable, à la voix douce, a élaboré ce qu'il estimait être une alternative fonctionnelle à l'interprétation de Copenhague. Il en était venu à la conclusion que son introduction d'une dualité onde-particule était une erreur, et que les électrons et les photons n'étaient que des particules. Ils ne possédaient pas les caractéristiques d'une onde mais baignaient dans une substance qui, elle, en contenait. Les particules étaient

ballottées par ces « ondes pilotes » invisibles, ce qui expliquait qu'elles se déplacent selon des trajectoires ondulatoires.

Selon la légende, alors qu'il exposait ses idées, le rude Wolfgang Pauli l'apostropha bruyamment, conformément à sa réputation d'interrompre les discours qu'il estimait mauvais. Pauli était un excellent physicien (c'est d'ailleurs lui qui a développé la théorie de l'intrication que j'ai tenté d'expliquer dans les deux précédents chapitres), mais sa présence pouvait être intimidante. De Broglie, lui, était un type plutôt gentil.

De Broglie accueillit avec dignité l'interruption de Pauli, admettant que son hypothèse n'était pas exempte de défauts. Malgré cela, à la fin du discours l'assistance s'intéressa davantage aux questions de Pauli qu'aux réponses de de Broglie, et l'idée des ondes pilotes fut promptement oubliée.

Ce n'est qu'en 1952 qu'elle fut exhumée par David Bohm, physicien nucléaire qui avait découvert l'amour de la science en feuilletant dans son enfance des magazines de science-fiction¹, avant de travailler sur le projet Manhattan durant la Seconde Guerre mondiale.

Durant son enfance, Bohm fut un supporter de Copenhague, mais après avoir été cajolé par Einstein, il commença à sentir que cette interprétation reposait trop sur une confiance aveugle, et il s'intéressa aux ondes pilotes de de Broglie.

Il semblait même qu'existaient de réelles preuves expérimentales à son crédit. Si on envoie une onde d'eau vers une double fente comme Thomas Young, on obtient bien sûr une figure d'interférence, mais si on ajoute un tout petit objet, une goutte d'huile, à la surface des vagues, elle chevauchera les vagues comme un bateau la tempête, jusqu'à aboutir dans l'une des zébrures sur l'écran. C'est toujours une particule, mais sa destination finale a été déterminée par l'onde pilote.

Le défi, c'est que ce système implique que l'électron suive toujours la même trajectoire, alors que dans les expériences quantiques il peut aboutir dans n'importe laquelle des zébrures, apparemment au hasard. Afin de le relever, Bohm proposa que,

quand chaque électron est émis, il emporte avec lui des variables cachées : de minuscules variations d'énergie et de quantité de mouvement que nous ne pouvons pas détecter mais qui l'entraînent sur des chemins différents au passage de la double fente.

Mathématiquement, la vision bohémienne de la mécanique quantique ajoute une couche de complexité supplémentaire, car il faut définir les valeurs de ces ondes pilotes (appelées potentiels quantiques), ce qui nécessite une nouvelle équation en plus de celle de Schrödinger. Mais, du côté des avantages, cette interprétation explique pourquoi les propriétés d'une particule semblent être décidées au moment de la détection : les propriétés telles que le spin et la position sont conférées par l'onde pilote plutôt que par la particule. C'est pourquoi il semble parfois que les particules n'ont pas de propriétés : elles n'en ont pas en effet. C'est l'onde pilote qui en a.

BOHM SWEET BOHM

Si on se range dans le camp de Broglie–Bohm, le comportement quantique n'est pas réellement aléatoire, puisqu'on pourrait, en théorie, expliquer les résultats de la double fente en termes de physique classique. En 2010, le physicien français Yves Couder a justement créé une expérience dans ce but précis.

Couder a construit une double fente dans un réservoir d'eau et a déposé de petites gouttes d'huile à la surface pour noter leurs déplacements. Les gouttes représentaient les particules, l'eau les ondes pilotes.

Couder a constaté que les gouttes d'huile suivaient le paysage des ondes d'eau et s'accumulaient de l'autre côté des fentes tout comme des photons ou des électrons². Serait-il possible que les particules se trouvent en un endroit précis après tout, et qu'elles surfent sur les ondes comme des objets classiques ?

La conclusion était tentante. Elle aurait délogé l'interprétation de Copenhague de son trône. Mais c'était trop beau pour être vrai. Des recherches plus abouties menées par John Bush et, fort à propos, le

petit-fils de Niels Bohr, Tomas, échouèrent à reproduire les résultats de Couder³. Ils en conclurent que ce dernier avait commis quelques erreurs en toute bonne foi dans son installation.

Quand on essaye de répliquer l'expérience de la double fente avec de vrais objets et de vraies vagues, on obtient des résultats classiques, pas de zébrures. Il semble impossible d'expliquer les résultats de la double fente au sein d'une mécanique bohémienne, à moins que les ondes pilotes soient un genre d'ondes particulières qui ne se comportent pas de manière classique. C'est peut-être là l'astuce, bien sûr, mais tout ce qu'on obtient avec ça, c'est qu'on a ôté l'étrangeté des particules pour la coller sur les ondes pilotes, ces ondes pilotes que, comme c'est bizarre, on ne peut justement pas observer.

LA POIGNÉE DE MAIN

L'interprétation transactionnelle, que je vais évoquer à présent, balaye l'interprétation de Copenhague et tend son doigt bien haut à la face du sens commun, mais elle est tellement cool que je ne résiste pas à vous la présenter.

Cette fois-ci, l'idée est due à Richard Feynman, qui a fait remarquer qu'au niveau quantique, la physique marche aussi bien à l'envers qu'à l'endroit au niveau temporel. Une particule qui se déplace vers le passé est l'inverse d'une particule qui se déplace vers l'avenir, deux possibilités complètement autorisées l'une comme l'autre. Les particules n'ont pas de préférence de ce côté-là. Un électron qui émet un photon peut tout aussi bien être vu comme un électron qui absorbe un photon à reculons. Ces deux événements sont tout aussi réels l'un que l'autre.

Cinquante ans plus tard, un professeur de physique auteur de science-fiction nommé John Cramer a décidé de partir de cette idée de Feynman et d'avancer à partir de là. Et de reculer aussi, je suppose.

Le comportement d'une particule est décrit par une fonction d'onde, mais, rappelez-vous, on doit l'élever au carré pour en tirer

une réponse. Cramer s'est demandé si on pouvait expliquer ce besoin de deux fonctions d'onde identiques par le fait qu'il existe vraiment deux fonctions d'onde, mais qu'on n'en voit qu'une, sa partenaire se déplaçant à rebrousse-temps.

Disons que notre particule se dirige vers une double fente. Sa fonction d'onde normale se déplace en avant dans le temps (on l'appelle la fonction « retardée »), jugeant les différents trajets qu'elle pourra emprunter. Mais dans le même temps (façon de parler), les particules du détecteur envoient à rebrousse-temps des fonctions d'onde (qu'on appelle fonctions « avancées ») vers notre particule depuis le futur. La particule qui envoie le plus puissant signal à rebrousse-temps est celle avec laquelle notre particule finira par interagir.

Cramer imagine ça comme un échange économique, dans lequel une particule émet une offre et le détecteur une confirmation. La particule qui approche de la fente et la particule du détecteur synchronisent leurs fonctions d'onde au cours de ce qu'il appelle une poignée de main quantique, menant à une intrication mélangeant le passé, le présent et le futur.

Les expériences de gomme quantique à effet retardé, ces drôles de machins dans lesquels Alice sait ce que Bob fera dans l'avenir, deviennent soudain très simples à expliquer. Une particule sait si elle sera détectée dans le futur puisqu'elle reçoit un message du futur qui le lui dit.

Il est intéressant de noter que Cramer ne croit pas que son interprétation empêche le libre arbitre humain⁴. Il fait une analogie avec le paiement par carte bancaire. L'onde d'offre est la carte, l'onde de confirmation est la banque. Mais on choisit quand même ce qu'on achète.

On pourrait toutefois lui opposer que, croyant choisir d'acheter du lait d'amande, il serait possible que ces amandes nous aient dicté notre conduite depuis le futur. Peut-être que toutes les décisions qu'on prend ne sont que le résultat d'événements futurs qui guident nos choix présents. Avez-vous vraiment décidé d'acheter ce livre ou vous ai-je influencé depuis ce chapitre ? Wououou Hououou (je fais super bien le fantôme).

AND I WILL ALWAYS LOVE HUGH

L'année même où David Bohm publiait sa théorie de l'onde pilote, Erwin Schrödinger prononçait à Dublin un discours pour expliquer pourquoi il n'acceptait toujours pas l'interprétation de Copenhague. Il affirma que, au risque de passer pour un fou, son équation n'avait jamais eu pour but de décrire une situation dans laquelle les particules choisissent leurs propriétés au moment de la mesure⁵.

Dans une superposition, deux ensembles de propriétés flottent autour de la même particule : jusque-là, on savait. Mais d'où vient cette idée qui voudrait qu'on jette un de ces ensembles à la poubelle au moment de la mesure ? Rien dans l'équation ne dit ça. De fait, si on prend cette équation (qui marche à tous les coups) au sens littéral, elle nous apprend qu'après la mesure les deux résultats possibles sont toujours là, bien qu'on ne puisse en voir qu'un pour une raison inconnue.

L'équation de Schrödinger est progressive, elle décrit des évolutions graduelles, mais quand une particule interagit avec un détecteur, Bohr affirme qu'on devrait soudain changer notre fusil d'épaule et se mettre à utiliser plutôt une équation particulière en escalier. Pourquoi cela ?

L'équation de Schrödinger ne dit rien de tel. Tous les résultats se produisent, il n'y a pas de « réduction ». Quand on mesure un spin up chez un électron, le spin down existe toujours quelque part. Il faut seulement qu'on détermine où il se cache. C'est là qu'intervient Hugh Everett III.

Obsédé de science-fiction et fumeur invétéré, Everett avait un master de mathématiques et un bac de chimie quand il a décidé de se lancer dans un doctorat de physique pour compléter le trio. Sous la supervision de John Archibald Wheeler, Everett fut chargé d'inventer une nouvelle version de la mécanique quantique, qui ne ferait pas appel aux probabilités.

Tous les membres du club de Copenhague étaient amoureux de l'aléatoire, mais Wheeler comptait contre-attaquer. Il posa donc ce défi à son étudiant le plus brillant, et il ne fut pas déçu du résultat. Everett trouva une réponse qui non seulement se débarrassait du

hasard, mais qui élucidait le problème de la mesure par-dessus le marché.

Quand une particule est mesurée au cours d'une expérience, tous les résultats possibles sont réalisés. Celui qu'on observe est enregistré dans le carnet du labo, mais tous les autres résultats sont là aussi. Seulement, ils sont dans un univers différent.

Everett avait déterminé que la superposition était le principal casse-tête de la mécanique quantique, il avait donc éliminé cette idée à l'aide de réalités superposées, plutôt que de propriétés superposées. Quand une particule se trouve face à un choix, l'univers se sépare en plusieurs branches et chacune est empruntée en parallèle par différentes versions parallèles de la même particule.

Une superposition ne serait pas une particule existant dans des états contradictoires, ce seraient des univers entiers empilés les uns sur les autres comme des feuilles de papier-calque.

Du moment qu'une particule ne s'intrique pas trop avec son environnement, tous les univers impliqués resteront en contact étroit. Mais dès qu'il y a intrication (avec l'écran d'un détecteur, disons), ils divergent et deviennent des réalités indépendantes.

Dans un de ces univers, une particule passe par la fente gauche et, dans l'autre, elle choisit la droite. Les deux résultats restent entremêlés, ce qui explique la figure d'interférence sur le trajet, mais dès que l'écran est atteint, chaque version de la particule le frappe en un endroit différent, chacun dans son propre monde.

Si on mesure les fentes avec une caméra, on ne découvre pas vraiment quelle fente la particule choisit ; on apprend dans quel univers on se trouve. Ainsi, quand vous déterminez qu'une particule passe par la gauche, une version parallèle de vous-même l'observe passer par la droite. Dans l'idée d'Everett, qu'on appelle l'interprétation des « univers multiples », plus besoin de manipuler des probabilités et des mesures. Il suffit d'accepter qu'on n'observe qu'une tranche unique d'un immense univers en forme de gâteau.

Imaginez que dans 40 % des univers parallèles une particule est destinée à aboutir dans la zébrure du milieu. En toute logique, on a 40 % de chance de se trouver dans l'un d'eux, sans qu'on en soit sûr

au début de l'expérience. Tout ce qu'on peut dire, c'est qu'il y a 40 % de chance que la particule frappe le centre de l'écran.

L'électron ne décide pas du tout où il va au hasard. Des électrons parallèles vont partout au même moment, mais comme on n'observe qu'une seule version parmi toutes ces options, nous avons l'impression d'un résultat aléatoire. C'est bien plus élégant que l'interprétation de Copenhague, puisque cela ne nous oblige pas à dégager la moitié des résultats sans aucune raison. On reconnaît seulement qu'ils se produisent dans un autre plan de la réalité.

LE MATOU REVIENT (IL EST TOUJOURS VIVANT)

Enfin une bonne nouvelle ! Lorsque votre chat est dans une superposition d'états mort/vivant, cela signifie en fait qu'il est mort dans un des univers parallèles et vivant dans un autre. Si vous ouvrez la boîte pour y trouver un civet de chat, séchez donc vos larmes : un de vos moi alternatifs vient lui de découvrir un chat en pleine forme.

L'interprétation des mondes multiples permet également de rendre compte du paradoxe EPR tout en sauvegardant la relativité restreinte. En effet, si deux particules intriquées sont envoyées aux deux extrémités du Système solaire, leurs propriétés peuvent très bien préexister à toute mesure, comme Einstein le pensait. Seulement, les différents résultats sont obtenus dans deux univers distincts.

Dans un univers le spin d'Alice est up et celui de Bob est down, et dans un autre c'est le contraire. Avant la mesure, on ne sait pas qui est qui et on suppose donc que le résultat final est aléatoire, mais ceci résulte simplement du fait que les deux univers concernés n'ont pas encore « décohéré ». Dès qu'on effectue la mesure pour découvrir qu'on se trouve dans l'univers où le spin d'Alice est up, les deux univers se séparent à tout jamais. L'autre, celui dans lequel le spin d'Alice est down et celui de Bob est up, est emporté au loin dans le multivers.

Personne ne sait comment fonctionne cette séparation, mais cela surviendrait à chaque fois qu'une particule tranche entre plusieurs options. Selon Everett, le problème n'était pas la mesure, c'était le choix.

Là, maintenant, alors que vous lisez ceci, les particules de votre corps sont constamment soumises à de tels choix, sur leur façon de vibrer ou de se mouvoir. Dans un univers, elles prennent une direction, et dans un autre la direction opposée. Vu le nombre de particules qui peuplent l'univers, et son grand âge, le nombre de choix qui ont eu lieu est si gigantesque qu'il n'a même pas de nom.

À chaque nanoseconde, votre corps, du simple fait d'exister, force des milliards de milliards d'univers à se séparer les uns des autres et se décohérer à jamais. Le nombre de réalités parallèles ainsi créées depuis le Big Bang est si grand que personne n'a même osé tenter de le calculer. Ce qui nous amène naturellement à...

LE TRUC LE PLUS IMPORTANT DU LIVRE

Au fil des années, des lumières du calibre de Richard Feynman et Stephen Hawking ont apporté leur soutien à l'interprétation des univers multiples d'Everett⁶. Cependant, quand elle fut dévoilée, on la jugea ridicule, au point qu'Everett abandonna tout ça pour travailler avec les services de renseignement du Pentagone.

À sa mort, il exigea que ses cendres soient jetées à la poubelle, parce qu'il était dénué de tout sentiment⁷, et parce qu'il avait beau mourir dans cet univers, il restait vivant dans bien d'autres.

On peut l'affirmer puisque chaque voie est choisie dans une réalité au moins, des idées et des événements différents naissent dans des univers différents, si bien que chaque univers parallèle contient sa propre version de l'histoire. Tout ce qu'on peut imaginer a probablement eu lieu quelque part.

Les lois de la physique tiennent toujours, bien sûr. Pas d'univers où la peau humaine serait de la matière des nuages et où les

grenouilles s'illumineraient quand on les siffle. Mais, tant qu'on s'en tient aux règles standards, tout arrive au moins en un endroit.

Dans un univers, l'Amérique n'a pas gagné la Guerre d'indépendance. Dans un univers, le mur de Berlin est toujours debout. Dans un univers, les Osmonds ont continué de jouer du rock après « Crazy Horses » et n'ont plus jamais sorti de ballades sirupeuses. Enfin, surtout, dans un univers, loin, très loin au fond des multi-possibilités, moi, Tim James, je suis Batman.

DÉCISIONS

Le débat fait rage. À l'heure où j'écris ces lignes, aucune expérience ne permet de départager les différentes interprétations de la mécanique quantique, si bien qu'aucune interprétation ne peut vraiment prétendre au titre.

L'interprétation de Copenhague a tenu la corde durant la majeure partie du xx^e siècle, et c'est encore la plus populaire. Mais c'est aussi la plus énervante, car elle oblige à ajouter des trucs en plus et à accepter plusieurs choses comme des articles de foi.

L'interprétation de Broglie–Bohm est la plus compliquée sur le plan mathématique et elle force à inclure des variables cachées et des ondes pilotes invisibles, mais si elle était confirmée, on aurait une explication en termes classiques du problème de la mesure, et rien que pour ça, il convient de la garder dans la boucle.

L'interprétation transactionnelle est unique en son genre parce que c'est la seule qui explique pourquoi l'équation de Schrödinger emploie deux fonctions d'onde au lieu d'une seule, mais elle ne prédit pas l'existence d'un univers où je suis Batman, nous sommes ainsi forcés de la rejeter pour cette seule raison.

L'interprétation des univers multiples évite d'avoir à ajouter quoi que ce soit aux équations (seulement de nouveaux univers). C'est de loin la plus élégante. Est-ce trop dur à avaler, cette idée que toute l'existence se sépare constamment en branches parallèles ?

Choisir la bonne interprétation n'est pas encore possible. Nous disposons d'hypothèses également valides, en soutenir une plutôt qu'une autre est à ce stade affaire de préférence, rien de plus. Mais on a bien le droit d'avoir des préférences, après tout.

En 2013, Maximilian Schlosshauer a demandé lors d'une conférence à un groupe de trente-trois physiciens quantiques l'interprétation qu'ils préféreraient⁸. Quatorze choisirent Copenhague, six les univers multiples (dans cet univers tout du moins, dans d'autres, ils ont choisi autrement), personne n'opta pour l'interprétation transactionnelle ni celle de Broglie–Bohm et quelques autres donnèrent leur vote à d'autres options dont je n'ai pas parlé.

Quatre ne se prononcèrent pas. Peut-être était-ce les scientifiques les plus purs du lot. Après tout, si une question est soulevée dont les réponses n'admettent aucune preuve, le plus honnête est de répondre « je ne sais pas ».

Mais comme l'a dit Isaac Asimov, les humains sont des créatures émotionnelles autant qu'intellectuelles⁹, et pourvu qu'on n'affirme pas que notre choix est absolu, il n'y a pas de mal à avoir une préférence. Alors, choisissez celle qui vous fait le plus mal à la tête et continuons.

11

Au bout du champ

UNE QUESTION DIFFICILE

Jusqu'ici, on a employé le terme de « particule » avec beaucoup de liberté. Mais il est temps de préciser les choses. Si l'on compte parler de physique des particules après tout, mieux vaut savoir ce que « particule » veut dire.

La plus claire des définitions que les physiciens emploient parfois est « quelque chose qui se tient tout seul et ne s'effondre pas spontanément ». Votre corps est une grosse particule en ce sens, puisque vos bras ne tombent pas tout seuls, en général, si bien que vous correspondez à la définition.

Votre corps est cependant une particule composée, car bien qu'il ait tendance à rester entier, il peut être séparé en particules plus petites (vos organes) qui elles aussi se tiennent toutes seules. Les organes à leur tour peuvent être séparés en des particules appelées cellules, qui elles-mêmes se décomposent en molécules, puis en atomes et enfin en protons, neutrons et électrons.

Mais un électron, autant qu'on le sache, n'est pas composé de particules plus petites. Pas de sous-électron. Et il se tient tout seul. C'est donc un type très particulier de particule, distinct des atomes, des molécules et des cellules. Il n'a pas de structure interne, c'est une particule *élémentaire*.

LE FANTASTIQUE M. FARADAY

L'histoire des particules élémentaires débute au ^{xix}e siècle, avec à la manœuvre ce que la science faisait alors de plus proche du grand

spectacle, Michael Faraday. Faraday était né pauvre. Fils de forgeron, il voulait rendre la science accessible à tous les curieux qui s'y intéressaient de près. Pour cela, Faraday se mit à donner des conférences scientifiques publiques à la Royal Institution (Académie des sciences du Royaume-Uni), dans lesquelles il fascinait les spectateurs au moyen de réactions chimiques et de phénomènes physiques. C'est lors d'une de ces conférences qu'il révéla ses découvertes sur le magnétisme, une force pas comme les autres.

Le magnétisme fonctionne dans le vide. Des aimants s'attirent ou se repoussent même si rien entre eux ne permet de communiquer de signal. Il fonctionne aussi au travers de barrières solides, ce qui est surprenant puisque les autres forces nécessitent un contact direct pour pousser ou tirer un objet.

De nos jours, rien de tout cela ne paraît remarquable, car nous vivons dans un monde de téléphones portables et de routeurs WiFi, mais au XIX^e siècle, la notion d'effet à distance tenait de la sorcellerie. Afin d'expliquer le fonctionnement des aimants, Faraday disait alors qu'il fallait concevoir le magnétisme comme un « champ » plutôt que comme une matière.

Tout aimant crée une distorsion dans la géométrie de l'espace qui l'entoure, sur laquelle peuvent venir se greffer d'autres objets magnétiques. Ces régions d'espace déformé imposent un certain comportement aux particules qui les franchissent, bien qu'elles ne soient pas composées de matière.

Un champ est ainsi une substance non matérielle semblable à un fluide qui dicte leur mouvement aux particules. Il peut être plus fort en certains endroits mais il est impossible de l'observer directement. On se contente de constater son influence.

Cela fait hausser le sourcil parce qu'on est habitué à ce qu'un truc soit composé d'autres trucs. Une chose qui existerait sans être du tout composée de trucs est difficile à appréhender. C'est pourtant ainsi que sont les champs. L'espace vide pourrait avoir des propriétés, semble-t-il.

Ça me rappelle une blague : vous avez entendu parler de l'épouvantail qui a gagné le prix Nobel ? On ne voyait que lui dans

son champ d'activité.

Je ne présenterai aucune excuse pour cette blague, pas plus que Faraday n'en présenta pour avoir introduit les champs en physique. Il est tout simplement impossible d'expliquer le magnétisme, la charge électrique ou la gravité sans la notion de champ. En plus, les champs peuvent communiquer entre eux.

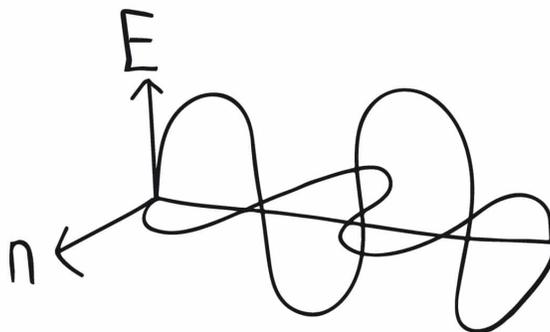
BALLADE SUR LES CHAMPS

Si vous prenez un aimant et que vous l'agitez de bas en haut, vous créez une onde verticale dans le champ magnétique, mais ce n'est pas tout. Faraday découvrit que ce faisant, vous créez aussi une perturbation dans le champ électrique, perpendiculaire à la perturbation magnétique.

Cette onde électrique entraîne à son tour le champ magnétique, qui lui rend la pareille à nouveau, et ainsi de suite indéfiniment.

L'onde initiale dans le champ magnétique est ainsi portée à la fois par les champs électrique et magnétique qui vibrent l'un et l'autre à contretemps.

Ce sont les « ondes électromagnétiques », qu'on représente dans les schémas comme des rubans ondulants, avec les valeurs des champs sur des axes perpendiculaires comme sur la figure ci-après (le champ électrique ondule selon l'axe vertical E, le champ magnétique selon l'axe horizontal n).



Il semble impossible de séparer ces deux champs, électrique et magnétique, car quand l'un vibre il entraîne l'autre. C'est pourquoi

on les désigne parfois collectivement comme un unique « champ électromagnétique » plutôt que comme deux champs distincts emboîtés.

Comme vous pouvez l'imaginer, les mathématiques nécessaires à la description de ces champs superposés sont diaboliquement compliquées. On doit assigner, à chaque point de l'espace, une valeur qui nous indiquera la manière dont ce point influera sur les particules qui l'empruntent.

On imagine de petites flèches (appelées vecteurs) en chaque point du champ, pointant dans la direction vers laquelle la particule sera entraînée. Ensuite, il faut inclure un vecteur du champ électrique à angle droit avec le premier vecteur, magnétique celui-là, qui aura lui aussi son mot à dire sur le mouvement de la particule qui passait par là.

À présent, songez à ce qu'il peut se passer si on déplace un aimant et qu'on crée une onde dans le champ électromagnétique. Suivre les variations d'un nombre infini de flèches changeant toutes de valeur et de direction, tournant à angle droit les unes par rapport aux autres, voilà qui n'est pas simple, surtout pour Faraday qui n'avait jamais étudié les maths à l'école et ne pouvait pas calculer bien plus loin que les fractions simples.

C'est le jeune physicien écossais James Clerk Maxwell qui vint en aide à Faraday, juste au moment où les gens commençaient à douter de cette histoire de théorie des champs. Il échafauda les mathématiques qui permettraient de la tester véritablement.

Les équations de Maxwell aidaient à prédire les interactions précises des champs électrique et magnétique, et leurs résultats coïncidaient avec les données. La fidélité de Faraday envers les champs portait enfin ses fruits et, franchement, ce n'était pas trop tôt.

Les équations de Maxwell contenaient aussi une prédiction plutôt dérangeante. Il s'avérait que les ondes électromagnétiques se propageaient dans l'espace à une vitesse hautement spécifique : 299 792 458 m/s. Ça vous rappelle quelque chose ? Bien sûr : c'est la vitesse de la lumière.

EMBRASEZ-MOI

Un samedi soir de 1846 (le 11 avril pour être précis), Faraday accompagnait son ami Charles Wheatstone dans la salle de conférences de la Royal Institution. Wheatstone devait y tenir un discours en public, mais il décida finalement de faire une crise d'angoisse et s'échappa en courant du bâtiment, laissant Faraday sur le carreau. Afin de ne pas décevoir l'assistance, Faraday se lança dans un discours improvisé à propos d'une idée qui lui était venue récemment¹.

Il émit l'hypothèse que lorsque les particules s'agitent dans un objet, elles génèrent des ondes électromagnétiques qui voyagent dans l'espace jusqu'à ce qu'elles soient interceptées par nos globes oculaires, ce qui nous signale leur présence.

La correspondance entre les équations de Maxwell et la vitesse expérimentale mesurée pour la lumière était trop parfaite pour n'être qu'une simple coïncidence. L'intuition de Faraday était juste, apparemment. Le substrat responsable des ondes lumineuses (à propos duquel René Descartes et Thomas Young s'étaient disputés) était le champ électromagnétique.

En faisant vibrer un électron (une particule dotée de propriétés électriques et magnétiques), on crée une onde qui se déplace à la vitesse de la lumière. On ne la voit pas toutefois, car le rayon est de trop faible énergie pour nos yeux, mais une antenne radio pourrait la capter.

Si on fait vibrer l'électron plus vite, des millions d'oscillations à la seconde, les distorsions électromagnétiques deviennent visibles ; l'électron brille, d'abord rouge puis orange, jaune, vert, bleu, indigo et finalement violet.

Si on le fait vibrer encore plus vite, les ondes deviennent si énergétiques qu'elles en redeviennent invisibles. Nos yeux ne les voient plus, de la même façon que nos oreilles n'entendent pas les ultrasons. L'électron à ce stade émet des ultraviolets et des rayons X.

En un sens très réel, nos téléphones portables, nos émetteurs radio, nos relais Wi-Fi, nos appareils Bluetooth, nos fours à micro-

ondes, nos télécommandes infrarouges et nos scanners à rayon X ne sont guère que des lampes torches. La fréquence de leur lumière (une mesure pour quantifier la vitesse d'oscillation de leur fonction d'onde) peut être trop faible ou trop élevée pour nos yeux, mais toutes les ondes électromagnétiques sont de même nature.

Il n'y a pas de différence conceptuelle entre le faisceau d'une lampe qui passe au travers d'une glace et le faisceau de rayons X qui passe au travers de la peau. C'est l'énergie de l'onde et les espaces entre les couches électroniques du matériau qui déterminent si l'onde sera réfléchi ou si elle passera au travers. Le principe est le même dans les deux cas.

Les humains ne voient qu'une fraction des couleurs que transportent les ondes électromagnétiques, et Faraday nous a ouvert les yeux sur l'ampleur de notre cécité. Les étoiles que vous distinguez la nuit n'émettent pas seulement de la lumière visible ; elles envoient des ondes radio, des micro-ondes, des infrarouges, des ultraviolets, des rayons X et des rayons gamma aussi.

Le simple fait que nous puissions voir les étoiles la nuit nous indique que le champ électromagnétique est également présent dans l'espace comme sur Terre, sans quoi il n'y aurait pas de substrat pour transférer cette énergie jusqu'à nous. Le champ électromagnétique baigne le cosmos de bord à bord. Vous êtes en plein dedans en ce moment même.

Quand vos yeux perçoivent les mots inscrits sur cette page, c'est parce que des électrons à sa surface sautent de couche électronique en couche électronique, ce qui perturbe le champ électromagnétique dans lequel vous baignez. Ces perturbations électromagnétiques se déplacent dans le champ jusqu'à votre visage et atteignent finalement vos globes oculaires où elles sont absorbées par les électrons de votre rétine, ce qui provoque le passage d'un courant le long du nerf optique jusqu'à votre cerveau. Les vibrations du champ électromagnétiques sont, littéralement, la seule chose que vous ayez jamais vue.

GLACE CREUSE ET DRAPS TENDUS

Ces champs qui vibrent en douceur, de façon continue, tout cela est très classique. Or nous savons, grâce à Planck et Einstein, que l'énergie lumineuse est en petits morceaux : les photons. C'est pour ça qu'en 1930, le physicien reclus Paul Dirac a décidé d'inventer une façon d'expliquer le champ électromagnétique en termes quantiques : une théorie quantique des champs.

Il n'est jamais très sage de poser un diagnostic médical a posteriori sur une personne après sa mort, mais il est bien probable que Dirac présentait des troubles du spectre autistique. Il ne voyait aucun intérêt à la vie sociale qu'il jugeait absurde, aucun désir de publicité ou de glamour. Il prenait tout ce qu'on lui disait au sens le plus littéral et était si timide que ses étudiants inventèrent pour rigoler le « Dirac », une unité de fréquence de parole égale à un mot par heure².

Moi aussi, j'aime rigoler : vous avez déjà entendu parler du tracteur magique ? Il roulait sur la route et pouf, il a tourné au champ.

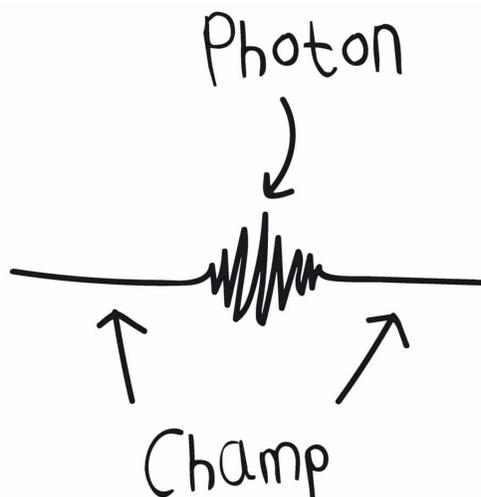
Cette blague est rigolote (pas très mais quand même) parce que tourner au champ peut vouloir dire « devenir un champ », et qu'il est absurde d'imaginer un tracteur qui se transforme littéralement en champ. Un gros objet bien distinct comme un tracteur n'a rien à voir avec un champ tout lisse. Les objets et les champs sont des choses différentes. On ne peut pas convertir l'une en l'autre. C'est pourtant exactement ce que fait la théorie quantique des champs.

Un photon est une particule (elle se tient toute seule) mais comme elle a des propriétés ondulatoires (et qu'une onde est une oscillation du substrat), il doit y avoir une sorte de champ dont la vibration donne un photon.

En termes classiques, on imagine les champs électromagnétiques ondulant de bas en haut, mais en termes quantiques, on imagine l'énergie comme un pic isolé sur le champ, un peu comme les pics d'un électrocardiogramme.

Le champ électromagnétique est le fond placide de notre univers, mais quand une région particulière s'agite, elle s'agglomère et forme un petit nœud convoluté d'énergie concentrée. Ce paquet de

perturbations du champ est un « quantum du champ électromagnétique ». Une bosse sur la toile de fond. Un photon.



Dessiner le champ quantique en trois dimensions est un peu compliqué, c'est pourquoi la plupart des analogies imaginent les champs comme des surfaces planes sur lesquelles les particules apparaissent, comme dans le diagramme ci-contre ([p. 152](#)).

Une image éclairante est celle d'un drap lisse tendu sur un matelas. Si on pince un endroit du drap, on crée un monticule de tissu, qui représente un quantum du champ. Une particule de drap, si vous voulez.

Ces quanta de champ peuvent être transférés d'un point à un autre, ce qui donne une impression de mouvement dans l'espace. Il convient seulement de se rappeler que le champ est un tissu en trois dimensions qui nous entoure dans toutes les directions et que les photons naissent de son excitation.

J'aime m'imaginer ça comme analogue à la boule de glace qu'on extrait du bac. La surface plane de la glace avant qu'on y plonge la cuillère est le champ électromagnétique exempt de perturbation, et les sphères qu'on y creuse sont les photons qu'on détecte dans nos expériences.

En vrai, on ferait mieux d'appeler le champ électromagnétique « champ photonique », mais vous savez comme moi combien les

scientifiques sont attachés à leurs vieilleries terminologiques (n'est-ce pas, Monsieur « spin » ?).

VOUS N'ÊTES PAS FAIT DE PARTICULES

Paul Dirac a réussi à expliquer mathématiquement comment on pouvait extraire les photons du champ photonique/électromagnétique. Il a aussi montré que, puisque toutes les particules ont des propriétés ondulatoires, toutes les particules peuvent être conçues comme les quanta de leur champ propre³.

Il y a un champ d'électron partout dans l'univers, superposé au champ électromagnétique, et quand on le perturbe, on en fait jaillir un électron. Toutes les particules, dont celles qui composent votre corps, ne sont que les vibrations d'excitation de champs souterrains invisibles.

Les particules qui vous constituent et l'espace vide autour de vous ne sont pas deux ensembles séparés. Vous êtes composé de paquets d'énergie flottant à travers des champs de néant. Je vous laisse le choix de voir ça comme magnifique ou comme perturbant.

12

Lignes et rides

UNE THÉORIE POUR LES GOUVERNER TOUTES

L'espoir de Paul Dirac était qu'un jour, les théories quantiques des champs seraient capables d'expliquer tous les phénomènes physiquement concevables. Chaque particule y serait traitée comme un quantum au sein d'un champ, et les interactions entre les champs soutiendraient les interactions entre particules. L'idée avait le potentiel de rebattre totalement les cartes. Malheureusement, elle était si compliquée que personne ne pouvait plus jouer.

Les mathématiques de la théorie quantique des champs sont difficiles. Follement difficiles. L'Institut Clay offre même un million de dollars à qui résoudra l'un des défis les plus corsés de la théorie (le problème de l'existence de la différence de masse dans une théorie Yang-Mills, si vous ne saviez pas quoi faire ce week-end).

Afin d'essayer de progresser dans ce maquis inextricable, Dirac a suggéré d'y aller petit à petit et de ne considérer que les deux particules/champs les plus simples : photons et électrons. Il baptisa leur interaction « l'électrodynamique quantique », QED pour les intimes. Il espérait qu'on puisse élaborer une théorie QED complète sur laquelle viendraient ensuite s'ajouter les autres particules.

À la fin de son livre de 1930, *Les Principes de la mécanique quantique*, Dirac conclut ainsi : « Il semble que des idées physiques absolument nouvelles soient ici requises. » C'est un euphémisme, ce qui n'est pas surprenant quand on connaît la nature réservée de Dirac.

Ses mots dérivèrent au sein de la communauté des physiciens comme une douce brise de défi et finirent par capter l'attention d'un homme qui était, de l'avis de tous, son complet opposé. Le rebelle le

plus charismatique et chaleureux de la science : Richard Phillips Feynman.

LE PETIT TAMBOUR

Né à New York en 1918, d'un père vendeur d'uniformes, Richard Feynman démontra d'énormes capacités pour la physique dès son premier contact avec elle. Son QI officiel était de 123 (bien mais rien d'extraordinaire) mais, parvenu à l'âge adulte, Feynman était considéré comme le scientifique le plus doué sur Terre, sur le même plan qu'Einstein.

Pour vous donner une idée de son intelligence, en 1958 quand la NASA lança le satellite *Explorer II*, il y eut un dysfonctionnement lors de l'ascension et le satellite n'atteignit jamais son orbite. Feynman paria avec les ingénieurs de la NASA qu'il pouvait calculer le lieu où il tomberait, plus vite que leur ordinateur. Non seulement il remporta son pari, mais son calcul s'avéra plus précis que le leur. Deux points¹.

Feynman était aussi l'attraction principale de toutes les fêtes où il était invité. Il y régala ses nombreux amis de ses talents de perceur de coffre, de joueur de bongo et de jongleur de cirque. On lui déroulait le tapis rouge pour ses conférences hebdomadaires et il passait son temps libre dans des bars topless à faire des calculs sur les serviettes et y dessiner les danseuses, ou parfois les spectateurs².

Conteur de talent, farceur invétéré, Feynman était le Han Solo de la physique. Par-delà tout ça, il était pourvu du plus bel esprit de sa génération.

Il avait entamé ses études au MIT avant d'aller à Princeton (avec un sans-faute à l'examen d'entrée) finir son doctorat sous la direction de John Archibald Wheeler, celui-là même qui guida Hugh Everett sur le chemin de l'interprétation des univers multiples.

Alors qu'il était au beau milieu de sa thèse, il fut recruté par Robert Oppenheimer pour aider l'armée américaine à concevoir la bombe

atomique. Oppenheimer le décrivit comme « le plus brillant de tous les jeunes physiciens ici présents »³, ce qui prend tout son sens quand on sait qu'ici désignait en l'occurrence le laboratoire national de Los Alamos, un établissement conçu exclusivement dans le but de réunir les plus brillants scientifiques du monde.

Après la guerre, Feynman acheva un post-doctorat à Cornell puis accepta un poste de professeur à Caltech, où il chercha à se débarrasser de l'arrière-goût déplaisant que lui avaient laissé ses travaux sur la bombe. Il décida alors de consacrer sa vie à trois choses seulement : la pensée, l'enseignement, le bien-être des étudiants⁴.

L'enseignement et le bien-être des étudiants ne lui posèrent pas de problème. Son surnom était « le grand explicateur ». Ses cours étaient si bons que même ses collègues plus âgés venaient y assister, car ils comprenaient mieux leur propre sujet quand c'était lui qui l'expliquait. Ne lui restait ainsi que la troisième chose : la pensée. Or, il décida de penser au défi de Dirac.

JE SUIS JUSTE DESSINÉE COMME ÇA

Développer une théorie quantique des champs complète pour les électrons et les photons n'allait pas sans poser de gros problèmes. Littéralement. De nombreux calculs aboutissaient à des résultats infinis ou nécessitaient une infinité de variables pour obtenir un résultat, ce qui ne pouvait convenir, s'agissant d'un univers fini (rendez-vous à l'annexe IV pour aller un peu plus loin sur ces questions).

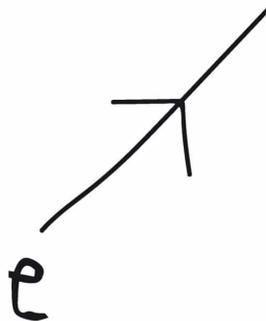
Il est difficile de cerner ce qui séparait Feynman des autres génies de l'époque, mais je crois personnellement que cela tient au fait qu'il était physicien avant d'être mathématicien.

Attention, il ne faut pas le sous-estimer : c'était un mathématicien virtuose, presque sans équivalent. Mais pour lui, les équations n'étaient qu'un langage, pas un objectif. Il restait concentré sur ce qu'elles décrivent et ne se laissait pas distraire par les symboles. Comme le langage mathématique que tout le monde employait pour

s'attaquer à la QED était encombrant et ne produisait que des réponses partiellement correctes, Feynman décida d'inventer des mathématiques d'un nouveau genre, pour se faciliter la vie.

Commencez par imaginer un électron qui se balade l'air de rien dans l'univers. En termes de théorie quantique des champs, il nous faut le décrire comme un quantum d'énergie dans le champ électronique se propageant de loin en loin. On décrit ainsi sa trajectoire au moyen d'une équation appelée (fort à propos) un propagateur.

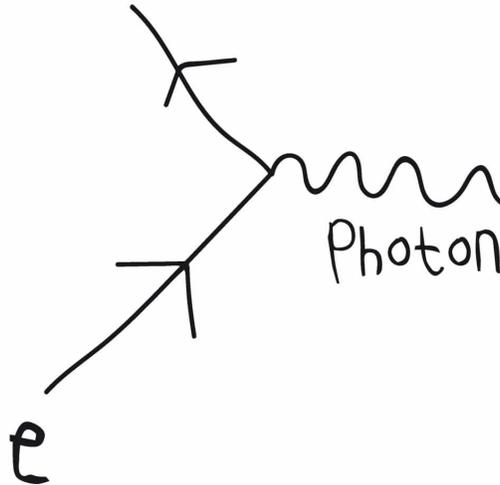
Dans le nouveau système mathématique de Feynman, on remplace l'équation de propagation de l'électron par une ligne fléchée toute simple.



(NB : à rigoureusement parler, ce symbole représente un électron en mouvement, et il n'est pas obligatoire qu'il soit rectiligne de bas en haut ; il peut tout aussi bien décrire une courbe ou s'enrouler autour d'un noyau.)

Maintenant que l'électron se déplace sur sa trajectoire, un photon s'approche et se fait absorber, ce qui envoie valser l'électron dans une autre direction. En termes de théorie quantique des champs, on doit décrire un quantum du champ photonique qui rencontre notre électron tandis qu'un transfert d'énergie a lieu entre les deux champs.

On représente un propagateur de photon par une ligne ondulée. L'interaction se dessine comme ça :



Si on commence notre lecture en bas, on voit un électron qui se propage dans son champ, qui interagit avec le champ photonique (il absorbe un photon) puis qui repart dans une autre direction après avoir absorbé de l'énergie. Mais le schéma peut tout aussi bien décrire le processus inverse : un électron émet un photon et recule dans une autre direction, comme la main de quelqu'un qui tire au revolver.

Le point où les trois lignes se rejoignent est le « vertex » du diagramme. On le gère mathématiquement au moyen de ce qu'on appelle une constante de couplage, qui n'est qu'un nombre mesurant la facilité avec laquelle deux champs échangent de l'énergie. Plus il est élevé, plus deux quanta (deux particules) ont des chances d'interagir.

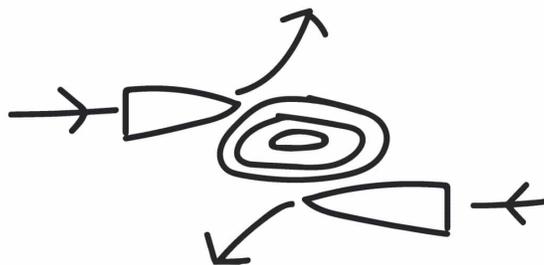
Tout cela paraît terriblement simple et c'est ce qui fait toute la puissance de cette approche de Feynman. Les diagrammes de Feynman nous dispensent de pages entières d'un jargon mathématique superflu qu'ils résument à l'essentiel. On prend le propagateur de l'électron qui arrive, le propagateur du photon, le propagateur de l'électron qui repart et la constante de couplage, on les multiplie entre eux et on obtient une prédiction quant à cette interaction photon-électron. C'est une théorie électrodynamique quantique qui marche.

LA CHARGE ENFIN EXPLIQUÉE

Un rayon de lumière ordinaire est composé de photons qui obéissent à certaines lois quant à leur direction, leur énergie et leur vitesse. Mais deux électrons qui se croisent peuvent échanger un photon comme des footballeurs qui se passent la balle, or, en raison du principe d'incertitude de Heisenberg, il est impossible de savoir quelle direction emprunte le photon échangé. On peut dire qu'un échange a eu lieu, mais pas quel électron était le donneur et lequel le receveur, cela nous donnerait trop d'information sur sa quantité de mouvement et sa position.

Ces échanges de photons entre électrons sont des sortes de vaguelettes temporaires, plutôt que de gros rayons de lumière permanents, entre les protagonistes. Ce ne sont clairement pas les photons les plus représentatifs.

Imaginez deux navires voguant à la surface d'un lac, se croisant à faible distance l'un de l'autre. Les remous que chacun génère vont se rencontrer dans l'espace qui les sépare, ce qui créera une perturbation temporaire à la surface de l'eau qui les repoussera l'un comme l'autre. Les navires ne se touchent jamais, mais cette fluctuation temporaire dans le champ aquatique, entre eux, leur permet d'échanger de l'énergie, et ils dévient de leur course rectiligne.



Nos petits bateaux sur le schéma représentent les électrons, les remous dans l'eau (les cercles concentriques qui les séparent) sont le photon échangé, qui n'existe que pour un moment, celui du transfert d'énergie.

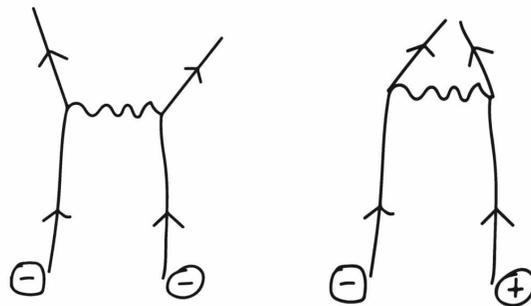
Ces vaguelettes momentanées dans le champ électromagnétique sont appelées des « photons virtuels » afin de les distinguer des

véritables photons, permanents, qui composent les rayons lumineux. Un peu comme on a parlé de remous pour désigner la perturbation aquatique qui repousse nos bateaux plutôt que de vagues, des objets qui parcourent l'océan de façon indépendante.

Les photons virtuels n'existent pas pour très longtemps et n'ont pas à suivre les lois habituelles de la physique, si bien qu'on peut leur assigner toute sorte de propriétés exotiques afin de rendre compte de n'importe quel phénomène observé.

Un photon virtuel peut transférer de l'énergie entre électrons, les forçant à se repousser, mais si les particules sont de charge opposée, on peut donner au photon virtuel une « énergie négative » qui les attire l'une vers l'autre comme un tourbillon⁵.

Le schéma représentant deux particules de même charge qui se repoussent est proposé ci-dessous à gauche, et l'attraction de deux particules de charge opposée est à droite. Les calculs sont un peu plus difficiles pour ces schémas parce qu'il nous faut y inclure deux constantes de couplage (les vertex des schémas) et cinq propagateurs (un pour chaque ligne), mais les réponses que génère la QED sont pile ce qu'il faut.



La charge électrique se révèle être une mesure de l'intensité de l'interaction d'une particule avec le champ photonique et de la manière de réagir des photons virtuels.

Le physicien Julian Schwinger (qui a partagé le Nobel avec Feynman) a dit qu'il nous fallait ainsi imaginer qu'un électron émet et absorbe des photons virtuels en permanence avec lui-même, comme quelqu'un qui jonglerait en courant. Il crée un nuage de photons virtuels autour de lui quand il se déplace, et les autres

particules viennent se cogner contre ce nuage. La QED explique la nature véritable de la charge électrique.

CASSER LA LOI

L'une des choses sur lesquelles je me suis appuyé tout au long de ce livre est qu'une cause entraîne toujours un effet et qu'aucun effet ne se produit sans cause. On n'a jamais rien sans rien, et quelque chose ne devient jamais rien. Ce principe, énoncé par Émilie du Châtelet en 1759, est souvent résumé par la formule de Lavoisier « rien ne se perd, rien ne se crée : tout se transforme », une idée qu'on retrouve dans le premier principe de la thermodynamique, la conservation de l'énergie. C'est ce principe que les photons virtuels sont autorisés à ignorer.

L'incertitude de Heisenberg nous enseigne qu'il est impossible d'établir des mesures précises sur une particule. La quantité de mouvement et la position ne sont jamais fixes ensemble, ainsi une particule ne peut pas se tenir tranquille. La théorie quantique des champs étend cette idée et dit que tout ce qui est vrai d'une particule doit aussi l'être du champ qui lui correspond, ce qui entraîne qu'il est tout aussi impossible d'assigner des valeurs fixes à un champ.

Les champs quantiques tremblotent en permanence, et comme ces tremblements sont des particules virtuelles, même un champ vide crée et détruit en permanence d'innombrables particules virtuelles. Tout point de l'espace autour de vous regorge et pétille de particules virtuelles qui naissent et éclatent en moins d'un clin d'œil. L'espace vide ne l'est pas vraiment.

Feynman a calculé que l'énergie de toutes les particules virtuelles qui apparaissent dans un volume équivalent à celui d'une ampoule électrique serait suffisante pour faire bouillir tous les océans. Seulement, on ne remarque pas toute cette énergie car elle disparaît aussi vite qu'elle est apparue.

Cela signifie que dans le cadre de la QED on *peut avoir* rien sans rien, parce que le « rien » est instable et que le principe d'incertitude ne l'autorise pas à rester en place. Dans le vide, de l'énergie

apparaîtra nécessairement au bout d'un moment. Cela peut paraître complètement fou, mais on doit avaler ça, parce que la QED a des arguments de poids.

C'EST LA THÉORIE LA PLUS PRÉCISE DE L'HISTOIRE DES SCIENCES

Feynman n'était pas seul à concevoir une théorie quantique des champs complètement fonctionnelle pour les électrons et les photons. Il a partagé son prix Nobel avec Shinichiro Tomonaga et Julian Schwinger, évoqués plus haut, qui avaient chacun leur propre méthode pour calculer les prédictions de la QED.

Les versions de Schwinger et Tomonaga étaient cependant bien plus lourdes et incluaient beaucoup de travail excessif, que Feynman prouva superflu. (Les approches de Feynman et Schwinger étaient si radicalement différentes que personne ne se rendit compte qu'ils travaillaient en réalité sur le même problème, jusqu'à ce qu'un ami commun, Freeman Dyson, fît le lien un après-midi, à l'arrière d'un bus surchauffé qui roulait en direction d'Ithaca⁶.)

Les diagrammes de Feynman sont élégants, mais on n'obtient pas de prix Nobel avec de jolis dessins. Croyez-moi, j'ai soumis des douzaines de mes illustrations pour ce livre au comité Nobel, ils ne m'ont jamais répondu. La QED s'en est mieux sortie. Il faut dire que les diagrammes de Feynman ne sont pas de simples croquis, ils sont dotés d'un solide pouvoir prédictif.

L'un des exemples de la puissance de la QED est sa capacité à calculer l'intensité du couplage des champs électronique et photonique (la quantité de quanta échangés). Le calcul le plus exhaustif de ce nombre a été réalisé en 2012 par Makiko Nio et son équipe, qui calculèrent le résultat de 12 762 diagrammes de Feynman contenant chacun dix vertex entre les champs électronique et photonique.

La valeur théorique de la constante de couplage des champs était de 0,00729735256. La valeur mesurée par l'expérience fut de

0,00729735257. Un accord entre la théorie et l'expérimentation qui se confirmait jusqu'à la dixième décimale⁷.

Feynman comparait cette précision à un calcul de la distance New York–Los Angeles qui tomberait juste à l'épaisseur d'un cheveu près. Aucune autre prédiction scientifique ne s'en approche seulement.

S'il y a une théorie scientifique qui trouve grâce à vos yeux, n'importe laquelle, depuis celle qui édicte que l'air chaud monte à celle qui vous explique le fonctionnement des virus, je vous conseille d'accepter aussi la QED, parce que ses preuves sont plus solides encore. Et si les chiffres ne vous ont pas convaincu, une autre prédiction de la QED devrait vous donner matière à réflexion. Ou plutôt, antimatière à réflexion.

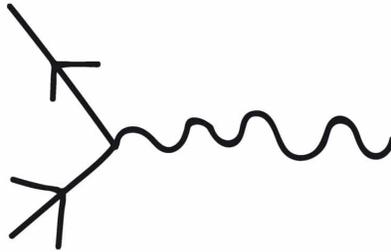
COMME TIRÉ D'UN FILM

Quand Dirac évoqua des particules apparaissant dans des champs, il remarqua qu'elles devraient pour cela y laisser des trous. Pour en revenir à l'analogie du pot de glace, chaque coup de cuillère dans le bac crée une particule de glace, mais aussi un cratère de même taille à la surface du bac.

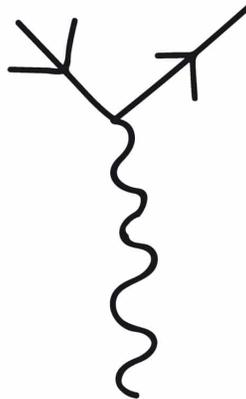
On peut reboucher ce trou en rendant la particule au vide, mais il semble bien que générer une particule génère dans le même temps une particule-trou. Une antiparticule.

La QED de Feynman prédit l'existence d'antiparticules aussi, mais elles apparaissent dans des circonstances différentes. Il n'y a pas un champ électronique à partir duquel se créent une particule et un trou, il y a deux champs : un pour les électrons, et un autre pour les anti-électrons, et le champ photonique est couplé aux deux.

Revenons à nos diagrammes de Feynman pour un électron absorbant (ou émettant) un photon.

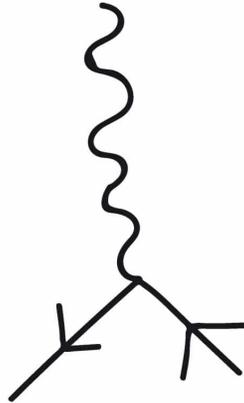


L'un des aspects très pratiques de ces diagrammes de Feynman, c'est qu'ils restent valides sous tous les angles, si bien qu'on peut les faire pivoter et obtenir une réponse tout aussi correcte. Ainsi, si on tourne ce diagramme de 90° , on en obtient un autre...



Si on lit ce dernier diagramme de bas en haut, un quantum dans le champ photonique se propage dans l'espace, puis décide au hasard de mourir, transférant son énergie dans le champ électronique (un photon se transforme en un électron). Mais en regardant de plus près, on remarque quelque chose d'étrange. La flèche du propagateur de l'un des électrons est à l'envers.

Le propagateur de droite représente l'électron, mais la particule de gauche doit être un genre d'électron à l'envers généré au même moment. Et on peut encore faire pivoter le diagramme...



Les lignes fléchées nous présentent maintenant un électron (à gauche) et un anti-électron (à droite) s'approchant l'un de l'autre et s'annulant mutuellement pour produire un photon. (NB : pour des raisons mathématiques, la collision produit en réalité deux photons et non un seul, mais cela ne modifie pas notre schéma⁸.)

« À quoi ressemble un anti-électron ? » demandez-vous. Eh bien, ça ressemble à un électron, mais de charge opposée. Un électron positif plutôt que négatif. Mais, si un électron tient sa charge du fait qu'il jongle avec des photons dans une direction, est-ce que pour avoir une charge opposée il doit jongler dans l'autre sens ? Feynman, un peu cryptique, a répondu oui.

En 1949, il montra que si on prend le propagateur d'un électron normal et qu'on change la direction du temps dans l'équation (ce qui revient à inverser la flèche sur le diagramme), on obtient le propagateur d'un anti-électron. Les antiparticules sont, selon Feynman, des particules normales qui reculent dans le temps⁹.

Cette idée d'électron qui remonte le temps est dénigrée par certains physiciens modernes, car on ne peut pas sérieusement prétendre qu'un électron peut voyager dans le temps. Ce qui sonne à mes oreilles comme les objections d'Einstein contre la superposition. Il n'aimait pas ce que ça impliquait mais il est encore impossible de déterminer si c'est vrai ou faux ; tout ce qu'on peut dire, c'est que les équations marchent. Ce que ça signifie devient une question de goût. Les particules d'anti-matière existent et elles se comportent exactement comme Feynman avait dit qu'elles le feraient.

CONSTRUISEZ VOUS-MÊME VOTRE DÉTECTEUR DE PARTICULES

L'antimatière fut découverte par Carl Anderson à l'aide d'un appareil appelé « chambre à brouillard ». Sa conception est tellement simple que n'importe qui pourrait en construire une. J'en ai moi-même construit plusieurs et je suis aussi peu doué que Heisenberg dans un labo, même si moi je sais au moins comment changer les piles d'une alarme-incendie (détail amusant : une alarme-incendie est indispensable dans tous les labos dans lesquels je travaille).

Voici comment faire : munissez-vous d'une cuve transparente et doublez les bords d'une bande de feutre imbibée d'alcool (du propan-2-ol, ou « alcool à friction », c'est celui qui marche le mieux). Refermez la cuve et déposez le tout sur une couche de glace pour refroidir le bas. Cela produira une fine atmosphère de vapeur d'alcool dans la cuve, et toute particule qui franchira ses murs de plastique y laissera une traînée, une ligne discrète et blafarde, apparemment venue de nulle part.

On peut aussi placer un aimant dans la cuve et les particules chargées y suivront des trajectoires courbes autour de l'aimant ; la charge et le magnétisme étant des propriétés du même champ.

Carl Anderson étudiait les rayons cosmiques (des débris de particules venues de l'espace qui nous tombent du ciel, constamment) et voulait compter les électrons qui atteignent la surface de la planète. Quand il le fit, la plupart se comportèrent exactement comme prévu, mais quinze lignes dessinèrent des trajectoires contraires autour de l'aimant. Anderson observait en réalité des électrons de charge positive. De l'antimatière venue de l'espace¹⁰.

Les antiélectrons furent nommés « positrons ». Un proton à la charge inversée reçut l'appellation décevante d'antiproton, de même qu'un neutron inversé, appelé antineutron. On peut d'ailleurs se demander ce que peut être un neutron inversé, particule neutre comme l'indique son nom. J'en parlerai au prochain chapitre.

Grâce à la QED, notre image de la réalité se compliquait beaucoup, car elle nous léguait sept particules/champs à gérer :

protons, antiprotons, neutrons, antineutrons, électrons, positrons et photons.

Les photons n'ont pas d'homologues en antimatière, ce qui est complètement normal si on suit la vision de Feynman sur l'inversion du temps. Si l'antimatière est vraiment de la matière qui remonte le temps, les photons ne peuvent qu'être leur propre antiparticule car ils ne font pas l'expérience du temps.

Comme je l'ai déjà dit en parlant de relativité restreinte, le temps ralentit pour un objet jusqu'à ce qu'il atteigne la limite de vitesse universelle. Les photons voyageant déjà à cette vitesse, ils n'ont aucune notion du temps. Les photons ne vieillissent pas, ils ne peuvent donc pas rajeunir non plus.

L'ARME PRÉFÉRÉE DES SUPER-VILAINS

Les particules d'antimatière ont une faible espérance de vie, car dès qu'elles croisent de la matière ordinaire (qui constitue la majeure partie de l'univers), elles s'annulent en produisant des photons. Pas d'inquiétude, cependant, vous pouvez vous procurer vos propres particules d'antimatière ici, sur terre, pour la modique somme, ô tellement modique, de soixante-deux mille milliards de dollars le gramme¹¹.

Bien sûr, l'antimatière est si difficile et si chère à produire qu'elle n'est générée qu'en quantités infimes par des physiciens des particules dotés d'une patience infinie. Le record de conservation d'antimatière au moment où j'écris ces lignes est un extraordinaire seize minutes et demi pour 309 atomes d'antihydrogène (un antiproton autour duquel orbite un positron), réalisé en 2011¹².

La raison principale qui rend la piste technologique de l'antimatière intéressante est que l'énergie dégagée lors d'une collision matière–antimatière est tellement élevée qu'une cuillère à café de ce carburant suffirait à propulser une fusée jusqu'à Alpha du Centaure. Cela pourrait aussi convenir pour accélérer un vaisseau spatial de taille moyenne jusqu'à un quart de la vitesse de la lumière,

ce qui vous permettrait de faire le voyage en quelques années plutôt que quelques siècles.

Ce genre de débauche d'énergie est aussi ce qui rend l'antimatière intéressante pour l'industrie de l'armement, bien sûr, et la notion de bombe d'antimatière a été évoquée, à l'occasion, par des militaires. Selon ce que nous en ferons, l'antimatière pourrait devenir la principale force de destruction sur la planète ou au contraire le seul moyen valable pour s'échapper de celle-ci.

13

Les particules font de la gonflette

CASSEUR D'AMBIANCE

Année 1936. La structure de l'atome a été révélée et la théorie quantique des champs fournit des prédictions précises. La dernière fois qu'on a été aussi sûrs de notre coup, c'était juste avant que Max Planck ne se mette à traficoter des ampoules électriques, ce qui ne se reproduira certainement pas ! Comment se pourrait-il qu'il y ait autre chose ?

Eh bien, comme le dit le poète Robbie Burns : « les plans les mieux préparés des souris et des hommes ne tiennent pas compte de la présence du champ de muons ».

Carl Anderson avait découvert, en 1936, l'antimatière en observant les traces du passage de positrons dans une chambre à brouillard. C'était fantastique mais personne n'a été trop surpris puisque c'était une prédiction de la QED. Ce qui a saisi tout le monde de stupeur en 1936 était une autre trace, dans la chambre à brouillard d'Anderson. Une trace qui se comportait comme un électron, en deux cents fois plus lourd.

Cette particule, baptisée le muon, avait les propriétés de l'électron, se couplait au champ photonique et suivait la règle des diagrammes de Feynman. Seulement, elle était énorme, et complètement superflue dans le cadre de nos théories, pour autant qu'on puisse en dire.

Aucun atome ne contient de muons, ce sont des particules à courte durée de vie, à peu près deux millièmes de seconde. Elles sont ainsi présentes dans l'univers mais n'y servent apparemment à rien, ce qui poussa le lauréat du Nobel Isidor Rabi à lâcher un « mais qui a commandé ça ? » étonné quand on lui apprit l'existence

de ce nouveau champ qu'aucune théorie n'avait prédit ni ne réclamait¹.

Leur poids élevé signifie que les muons sont très énergétiques et, de même qu'une corde de guitare pleine d'énergie passe à une vibration plus douce, les fluctuations du champ de muon transfèrent rapidement leur énergie au champ électronique, dégradant les particules lourdes en particules plus légères (un langage technique pour dire que les muons deviennent des électrons).

Tout recommença en 1974 quand Martin Perl découvrit le tauon (souvent appelé tau tout court), un électron encore plus lourd, et même cette fois trois mille cinq cents fois plus lourd, avec une durée de vie encore plus courte².

Électrons et positrons n'étaient pas uniques, il fallait croire. Ce n'étaient que les membres les plus légers d'une famille de particules comprenant électrons, muons, tauons et leurs anti-jumeaux. Ces six particules sont collectivement appelées les « leptons », du grec *leptos*, qui signifie léger, et leur existence est légèrement dérangement.

Il fut un temps où nous pensions que toutes les lois de la physique conspiraient de conserve pour permettre ou encourager la vie. La découverte du muon et du tauon défiait cette croyance, car il apparaissait que la nature faisait parfois des choses qui n'avaient absolument rien à voir avec nous. La vie se porte admirablement bien sans muon ni tauon. Quelles que soient leurs raisons d'exister, nous n'avons apparemment pas besoin d'eux.

Muons et tauons ont bien quelques fonctions ésotériques utiles, comme de nous permettre de sonder l'intérieur des pyramides (ils sont plus lourds et pénètrent plus profondément que ne le ferait un faisceau d'électrons) mais à part ça, il semblerait que la nature ait tripliqué les électrons sans raison. Et le problème ne s'arrête pas aux leptons.

LA MÉNAGERIE DES PARTICULES

Les particules des rayons cosmiques sont difficiles à détecter parce que la plupart interagissent avec notre atmosphère avant d'atteindre la surface du globe. Afin d'y voir plus clair, Cecil Powell a décidé de coller un paquet de détecteurs en haut des montagnes andines, pour voir ce qui tombait là. À de telles hauteurs, en 1947, il a découvert une particule qu'il appela le pion, doté de la même charge qu'un neutron (c'est-à-dire une charge nulle), en moins lourd.

Quelques mois plus tard, le kaon était identifié par Clifford Butler, avec une technique similaire. Puis, en 1950, on découvrit la particule lambda, qui se comporte comme un proton lourd. Puis ce fut le tour des particules xi, éta et oméga, et voilà qu'au début des années 1960, il y avait plus de quatre cents particules nouvelles à étudier³.

Notre collection bien rangée tournait à la pagaille désorganisée. Des casseurs d'ambiance pointaient leur nez toutes les cinq minutes. Robert Oppenheimer remarqua à ce propos qu'on devrait tout simplement remettre le prix Nobel à tout physicien qui parviendrait à *ne pas* découvrir de nouvelles particules⁴. Enrico Fermi exprima sa frustration ainsi : « Si j'avais envie de retenir autant de noms, j'aurais fait de la botanique !⁵ »

La théorie quantique des champs était supposée être une description élégante, bien que mathématiquement complexe, des lois fondamentales de la physique. Cet atroce brouet de particules ne correspondait plus du tout à la photo de l'emballage.

Cela rappelait ce qui s'était passé en chimie au siècle précédent. De nouveaux éléments chimiques étaient constamment découverts, dotés d'une grande variété de propriétés, et ce bazar ne fut mis en ordre que lorsqu'on réalisa que les atomes étaient faits de plus petits éléments, les protons, neutrons et électrons, bien connus aujourd'hui. Les physiciens se sont mis à espérer qu'un scénario similaire se déroulerait pour les particules.

Quatre cents espèces de particules, la ménagerie tournait au zoo. Il fallait que quelqu'un découvre un ordre dans ce chaos, comme Feynman était venu mettre de l'ordre dans notre compréhension des électrons et des photons. Ironie de l'histoire, celui qui réalisa cette tâche monumentale fut le rival de Feynman : Murray Gell-Mann.

Le bureau de Gell-Mann était dans le même couloir que celui de Feynman, leurs portes face à face, et on notait souvent une grande tension entre les deux, sûrement accentuée par le fait qu'ils avaient tous deux reçu le prix Nobel.

Feynman était un fêtard invétéré qui appréciait la compagnie des femmes (il s'est marié trois fois) et lisait peu de livres. Gell-Mann était un universitaire distingué qui était entré à Yale à quinze ans, parlait de nombreuses langues et passait son temps à lire des articles de linguistique et d'archéologie. Gell-Mann menait une vie tranquille, Feynman une vie de patachon (je note tout de même que Feynman ne buvait pas d'alcool et poussait à la sobriété).

Malgré leurs désaccords et leurs modes de vie opposés, les deux hommes suspectaient que les protons et les neutrons n'avaient en réalité rien de fondamental. On avait découvert des tonnes de particules plus légères, ce qui impliquait une structure interne faite de choses plus petites. La course s'engagea, à celui qui le premier aboutirait à une nouvelle théorie quantique des champs capable de les décrire.

Feynman désignait ces sous-protons et sous-neutrons hypothétiques des « partons ». Il travailla beaucoup pour trouver une façon de les observer. Mais ce fut Gell-Mann qui écrivit la théorie permettant de les décrire en détail, et il les nomma « kworks », tout simplement parce qu'il aimait bien cette sonorité (si vous avez déjà rencontré ces petites choses et que vous vous posez des questions sur l'orthographe du mot, attendez un peu).

En analysant les masses, les charges, les spins et les durées de vie de cette abondance de particules découvertes, Gell-Mann montra que toutes pouvaient se décrire comme des combinaisons de kworks, dont il nota deux variétés, nommées *up* et *down*.

Les kworks *up* ont une charge positive de $+2/3$, les kworks *down* de $-1/3$. Si on combine deux *up* et un *down*, on obtient $+2/3 + 2/3 - 1/3 = +1$... un proton. Si on combine à l'inverse deux *down* et un *up*, on obtient $-1/3 - 1/3 + 2/3 = 0$, ce qui nous donne le neutron.

Trois kworks *up* deviennent une particule appelée delta. Un kwork *up* avec un anti-kwork *down* aboutit à un pion, etc. Le zoo de particules était une illusion, et protons comme neutrons des

particules composées plutôt que fondamentales. Les kworks sont ce qui compte en la matière, car ils sont la matière.

Oh et, au fait, c'est comme ça qu'on peut avoir un anti-neutron. Un neutron habituel n'a pas de charge, mais les kworks qui le constituent, si. On peut ainsi avoir deux anti-*down* et un anti-*up*, pour un total de zéro charge, mais c'est un anti-zéro, pas un zéro tout court. Elle est pas belle, la vie ?

LE CRI DE LA MOUETTE

Un soir, alors qu'il lisait une version non corrigée du roman *Finnegans Wake* de James Joyce, l'Irlandais moderniste, Gell-Mann tomba sur un poème qui s'ouvrait sur ce vers : « *Three quarks for Muster Mark* ».

Il fut immédiatement frappé par ce non-mot « quark », car il décrivait quelque chose allant par trois, tout comme souvent les particules qu'il proposait. La phonétique correspondait au son qu'il avait choisi, ou presque, si bien qu'il l'adopta. Joyce comptait probablement à ce que quark rime avec Mark, mais Gell-Mann décida qu'il devait plutôt rimer avec orque⁶.

Dans le poème, le mot représente le cri d'une mouette, on peut donc supposer qu'en Californie, où Gell-Mann vivait, les mouettes font « kwork » plutôt que « kwark ».

En Europe, les gens le prononcent plutôt « kwark », mais c'est contre la volonté de Gell-Mann. Il faut le prononcer « kwork », ou affronter l'ire des mouettes californiennes.

Notons que donner à une particule un nom inspiré d'un bruit d'oiseau est loin d'être ce qu'on a fait de plus étrange. Le physicien Alan Guth a nommé « inflaton » une particule hypothétique de son invention, parce qu'elle était censée être capable de gonfler l'univers, et Frank Wilczek a baptisé une particule imaginaire « axion », d'après une fameuse marque de détergent⁷.

HAUT EN COULEUR

Les quarks ont été découverts expérimentalement quelques années après la proposition de Gell-Mann, au cours d'un processus qui tirait des leptons (électrons, muons et tauons) sur des neutrons pour observer leurs trajectoires. Si les neutrons étaient un seul bloc de matière dans le champ « neutronique », les électrons devraient subir un recul à angle droit, mais s'ils étaient en réalité composés d'une sous-structure à base de quarks, comme Gell-Mann l'avait prédit, les leptons seraient simplement déviés de leur trajectoire par les charges partielles des quarks⁸.

Le résultat de l'expérience correspondait aux prédictions de Gell-Mann. On en tira au passage un nouveau type de particules et une théorie quantique des champs pour le noyau.

Protons et neutrons sont constitués de trois quarks, plus des milliers de quarks virtuels apparaissant autour en vertu du principe d'incertitude de Heisenberg. Les trois quarks qui demeurent constants sont appelés « quarks de valence », et ce sont eux qui déterminent l'identité globale de la particule.

On sait que les quarks interagissent avec le champ photonique puisqu'ils ont une charge électrique, mais une question évidente se pose : pourquoi deux quarks *up*, tous deux positifs, ne se repoussent-ils pas ? Deux particules de même charge ne traînent jamais ensemble. Il fallait que quelqu'un explique pourquoi le noyau des atomes n'explose pas en petits morceaux au moment même de sa formation.

Le physicien japonais Hideki Yukawa émit l'hypothèse qu'une force bien plus puissante que l'électromagnétisme tenait les protons et les neutrons ensemble. Son attraction serait supérieure à la répulsion des charges. En fait, il l'imaginait si forte qu'il l'appela (préparez-vous) : la force forte⁹.

La différence d'intensité entre la force électromagnétique et la force forte est monumentale. Les interactions électromagnétiques sont du genre à déplacer des électrons autour des atomes et déclencher des réactions chimiques, autrement dit : elles mettent le feu. Les énergies mises en jeu dans le cadre de la force forte, d'un

autre côté, déplacent des protons et des neutrons au cœur du noyau de l'atome. Elles déclenchent des explosions nucléaires.

La force électromagnétique étant une histoire de couplages de particules au champ photonique et de communication via photons virtuels, en toute logique la force forte devait avoir son propre champ avec lequel les quarks pourraient se coupler, que Gell-Mann appela le champ gluonique. Z'avez compris ? Gluon ? Comme la glu ?

Ensuite, il nous faut la propriété qui va avec. La capacité d'une particule à se coupler au champ photonique est appelée la charge électrique. Gell-Mann avait besoin de nommer la faculté des quarks de se coupler au champ des gluons. Il choisit le terme de couleur, ce qui n'arrangea rien.

La gluance aurait été un terme plus intuitif, mais Gell-Mann avait ses raisons. À la différence de la charge électrique, dont on connaît deux variétés (positive et négative), la charge de couleur en admet trois, ce qui lui rappelait les couleurs primaires de la lumière.

Les quarks rouges, verts et bleus s'associent grâce aux gluons et les couleurs s'annulent de sorte qu'un proton ou un neutron sont « blancs ». Les quarks n'ont pas de couleur, en fait, j'en parle dans l'annexe V, mais on les dessine en général comme ça, histoire de rendre les choses aussi confuses que possible.

La théorie quantique des champs de Feynman, qui concernait les électrons et les photons, était l'électrodynamique quantique, Gell-Mann appela donc sa théorie des quarks et des gluons la chromodynamique quantique (QCD en abrégé), du grec *chroma*, la couleur.

ON SE POSE UNE COLLE

La grosse différence entre la QED de Feynman pour les leptons et la QCD de Gell-Mann pour les quarks, c'est que, dans la QED, tout peut être décrit en termes d'opposés. Attraction et répulsion, positif et négatif, matière et antimatière, etc. Toutes ces choses se gèrent en renversant les équations et les diagrammes. Mais avec la force forte, il y a trois sortes de couleurs, ce n'est donc plus une question

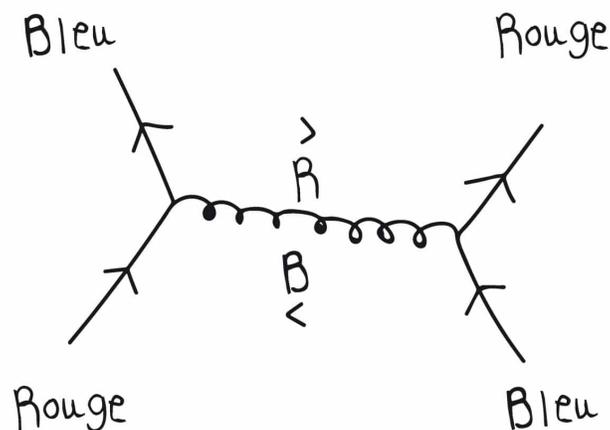
de simple renversement. Quand il y a trois variétés possibles, le terme « opposé » ne s'applique plus.

En plus, l'antimatière dispose de ses anticouleurs, nommées antirouge, antibleu et antivert. Ce sont donc en réalité six couleurs dont il faudra tenir compte pour clarifier la QCD. La charge électrique est la résultante de photons se comportant de manière opposée, mais les gluons sont différents, et c'est leur comportement étrange que Gell-Mann devait rationaliser.

Un genre plus compliqué de diagramme de Feynman était nécessaire, qui autoriserait le transfert des couleurs.

Les électrons et les positrons gardent leur charge, mais les quarks peuvent échanger leurs couleurs. Si on a deux quarks, disons un rouge et un bleu, le champ gluonique peut échanger leur couleur, le rouge devient bleu et le bleu rouge.

Les diagrammes de la QCD emploient les lignes bouclées pour représenter les gluons ; les interactions entre deux quarks se calculent (se dessinent) ainsi :



Le gluon qui se balade entre les deux transporte une charge bleue vers la gauche et une charge rouge vers la droite, ce qui signifie que les gluons virtuels sont multicolores quand ils font la navette entre les deux.

Cet échange de couleurs explique pourquoi la force forte est toujours attractive, alors que l'électromagnétisme peut aussi bien attirer que repousser. Comme les gluons virtuels sont multicolores, il

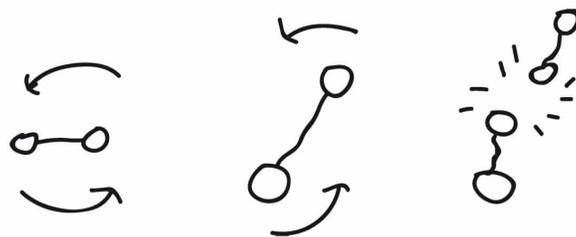
faut toujours un quark à chaque extrémité. Les gluons, par définition, transfèrent des couleurs d'un quark à l'autre, aussi, si on en efface un, le gluon se retrouve avec une charge colorée sans pouvoir la déposer nulle part.

Les quarks ont des couleurs, ce qui est une autre façon de dire qu'ils se couplent avec le champ gluonique. Ils n'existent jamais tout seuls, parce qu'une partie de leur identité est d'être « liés à d'autres quarks via les gluons ». La force forte est toujours attractive.

Le terme approprié pour décrire cela est celui de « confinement de couleur ». Les quarks se trouvent toujours par paires (les mésons), trio (les baryons), quartet (les tétraquarks), etc. On n'observe jamais de quark tout nu, même si les physiciens, pervers notoires, ont désespérément essayé.

On peut prendre deux quarks reliés par un fil gluonique (un méson) et les faire tourner dans un champ magnétique jusqu'à ce que le fil lâche.

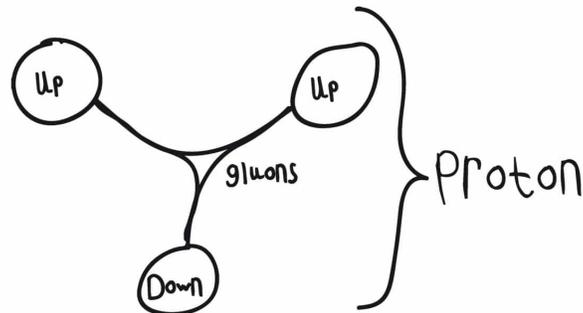
Malheureusement, quand on mène cette expérience, les gluons emmagasinent de l'énergie en excès qu'ils transfèrent instantanément dans le champ des quarks, ce qui crée de nouveaux quarks aux nouvelles extrémités du fil. Un méson devient deux mésons. Les quarks n'existent jamais seuls, même quand on tente de les séparer.



Dans la QED de Feynman, les photons n'ont pas de charge (ils sont la cause de la charge), mais dans la QCD de Gell-Mann, les gluons ont bel et bien une couleur, tout comme les quarks, ce qui entraîne que les gluons interagissent entre eux, qu'ils s'échangent des arcs-en-ciel quantiques à volonté.

À l'origine, il paraissait sensé de penser un proton comme un trio de quarks entre lesquels des gluons se déplacent pour former un

triangle, mais comme les gluons se parlent entre eux et s'accrochent les uns aux autres, on en est venu à imaginer plutôt une structure en Y pour décrire ce fil gluonique entre les quarks.



Cela signifie que les gluons peuvent s'accrocher les uns aux autres sans qu'il y ait besoin de quarks pour cela. Ils forment leurs propres structures gluon-gluon en nids d'oiseau, qu'on appelle les boules de glu.

D'un certain côté, toutes ces complications supplémentaires font de la QCD une théorie plus impressionnante, plus subtile que celle de Feynman. D'un autre, la QED est beaucoup plus élégante. Elle ne nécessite qu'une seule particule médiatrice quand la QCD en réclame plusieurs (huit types de gluons, afin de pouvoir échanger toutes les combinaisons de couleurs). Dieu merci, les quarks ne sont que de deux types. Pas vrai ?

UN CHARME ÉTRANGE

Les quarks *up* et *down* de Gell-Mann, c'est super. En les combinant dans le bon ordre, on obtient presque toutes les particules du zoo. Le mot important dans cette phrase, c'est bien sûr « presque ».

Une particule en particulier, le kaon, ne peut pas être décrite comme une combinaison de quarks *up* et *down*. Elle se comporte comme un quark *up* collé à une version plus lourde d'un quark *down*.

Comme on savait qu'existaient des versions plus lourdes des électrons (les muons et les tauons), Gell-Mann décida qu'il devait en être de même pour le quark *down*. Le comportement des kaons

étant résolument étrange, Gell-Mann baptisa ce troisième quark ainsi. Voici donc établie la liste de tous les quarks nécessaires à la QCD :

UP	
DOWN	ÉTRANGE

Franchement. Regardez-moi ça.

Gell-Mann avait eu besoin d'outils mathématiques avancés pour prédire les quarks *up* et *down*, pourtant, pas besoin d'avoir un prix Nobel pour voir qu'il manque quelque chose dans ce tableau... Si le quark *down* a un partenaire plus lourd, ne paraît-il pas probable qu'il en aille de même pour le quark *up* ? Ne serait-ce pas beaucoup plus joli, beaucoup plus net, s'il y avait un quatrième quark ?

Le physicien Sheldon Glashow croyait à ce quatrième type de quark et travailla à déterminer quelles propriétés il devait avoir. Quelques preuves mineures suggéraient son existence (des particules appelées K^+ et K^0 étaient censées se transformer en particules plus légères, et ça n'arrivait pas, malgré les prédictions de la théorie à trois quarks de Gell-Mann) ; malgré tout, Glashow partait surtout d'une intuition selon laquelle l'univers se devait d'être joli.

La plupart du temps, les scientifiques sont des têtes de mule sceptiques qui refusent ne serait-ce que de considérer une idée sans disposer de preuves solides, mais parfois, ils sont humains et nourrissent un espoir.

Glashow croyait que la nature était belle en un sens profond et nomma sa particule tant espérée le quark charme, parce que sa nature charmante complétait la symétrie des quarks. Son optimisme fut récompensé en 1974. Parfois, en physique, il faut simplement espérer que la nature sache ce qu'elle fait.

TIERCÉ GAGNANT ?

Dans le chef-d'œuvre de science-fiction d'Arthur C. Clarke *Rendez-vous avec Rama* (1973), l'humanité découvre un bâtiment extraterrestre abandonné, construit par une espèce obsédée par le nombre trois. Elle contient des combinaisons à trois membres, des trios de structures. Toutes les décisions prises par cette mystérieuse espèce ont été copiées en trois exemplaires. La nature a une obsession semblable.

L'année qui a précédé la découverte du quark charme et d'ailleurs l'année où *Rendez-vous avec Rama* a été publié, Makoto Kobayashi a poussé l'idée de symétrie et de bel arrangement un cran plus loin. On trouvait dans la QED trois particules matérielles, les électrons, muons et tauons, une tendance similaire pouvait donc peut-être s'observer dans la QCD.

Le frère plus lourd du quark *up* était le quark charme, celui du *down* le quark étrange. Y avait-il une troisième génération ? Kobayashi, qui ne croyait pas aux scénarios perdants, appela ces méga-quarks *bottom* et *top* afin de compléter l'ensemble. Ils furent tous deux découverts respectivement en 1977 et 1995.

À la fin de *Rendez-vous avec Rama*, de nombreuses questions en suspens demeurent, sur la nature des extraterrestres et leur choix de tout faire par trois. C'est pareil en physique des particules.

Pourquoi y a-t-il trois générations de quarks et de leptons ? Nul ne le sait. Y en aurait-il une quatrième ? Nul ne le sait. Est-ce que les trois générations seraient liées d'une manière ou d'une autre aux trois couleurs ? Personne ne le sait.

Peut-être un jour sera-t-on capable de dépasser le confinement des fils gluoniques et d'analyser un quark isolé, afin d'en apprendre plus sur leur comportement. Peut-être un jour attrapera-t-on un quark charme nu, ou un étrange ou un *up*. Et peut-être un jour, si on a beaucoup de chance, on apercevra bottom de culotte !

14

Chéri, où est passé
mon Higgs ?

SA MAJESTÉ, LA REINE DE LA PHYSIQUE

Les journaux de la terre entière ont déclaré que le 4 juillet 2012 était un grand jour pour la science. Le titre « Les scientifiques prouvent l'existence de la particule de Dieu » barrait la une des plus grands journaux, les actualités télés annonçaient que « la pierre angulaire manquante de la physique des particules » avait été découverte, et même le *New York Times* déclarait que « les physiciens [avaient] trouvé une particule insaisissable qui détiendrait la clé de l'Univers »...

Le célèbre boson de Higgs venait d'être découvert, et tout le monde s'échinait à expliquer pourquoi cela faisait un tel raffut. C'est que le boson de Higgs est plutôt compliqué, en réalité, et à vrai dire impossible à résumer en une petite phrase choc.

Il est même si compliqué qu'en 1993, le ministre des Sciences du Royaume-Uni, William Waldegrave, proposa une bouteille de champagne au premier scientifique du pays qui pourrait lui lister ses propriétés au seul recto d'une feuille¹. Ce n'est pas mon but ici (de toute façon, je préfère le milk-shake) mais je vais quand même tenter de vous donner une idée de ce qu'est le Higgs.

Ce qui le rend si important, c'est qu'il valide une prédiction des physiciens vieille de presque cinquante ans, qui entraîna la construction du Grand collisionneur de hadrons, le LHC, la plus grosse machine jamais construite.

Comment savait-on que le jeu en vaudrait la chandelle ? Je pourrais inventer une particule là tout de suite, que j'appellerais le tenlon, qui donnerait envie de regarder sa montre quand on le trouve. Construirait-on une machine pour autant ?

Maintenant que j'y pense, comment les physiciens théoriciens déterminent-ils qu'une hypothèse quelconque vaut le coup d'enquêter ? Il y a tellement de particules/champs et d'interactions possibles, comment savoir si les équations sont bonnes ? Y aurait-il une loi ultime prescrivant l'élaboration de nouvelles lois en physique ?

La réponse est oui, et elle nous vient d'un des plus brillants cerveaux scientifiques de tous les temps, d'ailleurs terriblement sous-évalué : Amalie « Emmy » Noether.

Au début du xx^e siècle, Noether était l'une des deux femmes autorisées à assister aux cours de l'université d'Erlangen en Allemagne. Elle avait dû pour cela obtenir l'autorisation de chacun des professeurs concernés. Croyez-le ou pas, son utérus ne l'empêcha pas de comprendre les mathématiques (étonnant, non ?) et elle écrivit une série d'articles époustouflants qui attirèrent l'attention du très respecté David Hilbert.

Hilbert aida Noether à obtenir un poste de conférencière à l'université de Göttingen, devenant la seule femme de l'équipe enseignante. C'était un emploi non rémunéré, bien sûr, et ses cours devaient être annoncés au nom de Hilbert, mais, malgré tout, elle avait réussi à mettre un pied dans le milieu universitaire².

Ce qui changea la donne fut sa découverte d'un principe fondamental pour guider la physique théorique : le théorème de Noether. Il est bien dommage que, pour être traitée à l'égal des hommes, une femme doive damer le pion à tous les physiciens du globe, mais d'un autre côté... Ça fait d'elle une héroïne qui déchire pas mal. Les hommes ne lui montraient pas le respect qui lui était dû, alors elle les a battus sur le terrain mathématique avec un théorème à la portée si grande qu'il constitue les fondations de la QED et de la QCD, de même qu'il résout des énigmes de la relativité sur lesquelles même Einstein s'était cassé les dents.

Le théorème de Noether s'intéresse à la découverte de ce que les physiciens appellent la « symétrie », une idée avec laquelle j'ai un peu joué déjà. Quand on étudie un événement ou une particule, on utilise des équations qui nous donnent l'énergie cinétique (le mouvement) et l'énergie potentielle (la position dans le champ) du

système. La différence entre ces deux énergies est appelée un lagrangien. Toutes les lois de la physique en ont un.

On peut toujours altérer les détails d'un scénario qu'on étudie. Si on mène l'expérience devant un gros aimant, mettons, ou qu'on change la masse d'une particule, cela modifiera parfois le lagrangien, et parfois non. Si nos changements *ne* modifient *pas* le lagrangien, toutes les équations sont identiques et nous pouvons dire que la théorie est symétrique. Si un changement *modifie* le lagrangien, les équations changent aussi, et la théorie contient une « brisure de symétrie ».

Le théorème de Noether dit que si une théorie est symétrique, il y a nécessairement une propriété associée aux particules qui ne change pas non plus.

Par exemple, supposez qu'on étudie une particule et qu'on décide de la déplacer d'un mètre sur la droite. Le comportement de la particule sera le même. Notre théorie est donc symétrique pour la position.

Le théorème de Noether dit que le changement de position d'un endroit à l'autre est obtenu par l'application d'une quantité de mouvement à la particule. Donc, la quantité de mouvement doit être « conservée » ; autrement dit, elle ne peut être ni créée, ni détruite. Les particules peuvent échanger de la quantité de mouvement durant les collisions, mais le total avant et après reste le même, quoi qu'il arrive.

Autre exemple du théorème de Noether : quand on déplace une particule en avant dans le temps, les lois de la physique ne se modifient toujours pas. Elles sont symétriques vis-à-vis du temps, il faut donc qu'il y ait une propriété associée à cela ; il se trouve que c'est l'énergie (puisque l'on parle de cause et d'effet). Émilie du Châtelet avait déjà prouvé que l'énergie n'est jamais créée ni détruite, Noether nous en a donné la raison sous-jacente.

La charge est une autre quantité conservée, et ceci est dû à la manière dont vibre la fonction d'onde d'une particule. C'est pourquoi les particules de lumière (les photons) créent toujours les particules de matière et d'antimatière en tandem. La charge doit être conservée, aussi un photon, neutre électriquement, ne peut-il

produire un électron sans que sa contrepartie de charge positive, un positron, ne vienne remettre le compteur à zéro. Et ce ne sont que quelques exemples.

Le théorème de Noether nous indique quelles propriétés peuvent changer et lesquelles ne le peuvent pas dans une loi physique. Il a joué un rôle central dans les travaux de Dirac, Feynman et Gell-Mann quand il s'est agi de déterminer comment des théories quantiques des champs pouvaient fonctionner. Noether nous a transmis une loi des lois de la physique. Il est difficile d'exagérer son importance.

Malheureusement, elle fut chassée d'Allemagne lors de la montée du nazisme, car elle était juive, et se réfugia en Amérique. L'avantage, c'est qu'elle y fut reçue par une communauté accueillante de scientifiques qui reconnurent en elle leur reine indiscutée. Elle gagna enfin une réputation à sa hauteur, et son éloge funèbre dans le *New York Times*, écrit par Einstein, la décrit comme « le génie mathématique le plus important depuis l'apparition de l'éducation supérieure des femmes »³.

DU CALME, PETIT

L'une des quantités conservées qui émergea du théorème de Noether s'appelle le nombre leptonique. Inutile d'être un génie pour le comprendre : le nombre de leptons dans l'univers ne change pas. C'est une loi de symétrie mais elle est énervante car, sur le papier, elle semble *trop* symétrique. En effet, il existe un processus connu au cours duquel cette symétrie est brisée.

On l'appelle la désintégration bêta et on doit sa découverte à Marie Curie (l'autre reine de la physique). Elle survient quand un proton au cœur d'un noyau instable se transforme en neutron, ce qui arrive apparemment au hasard. Quand c'est le cas, il recrache un électron qui s'enfuit loin de l'atome et qu'on détecte sous forme de radioactivité.

Dans les termes de la loi de Noether, cela paraît sensé, car il faut que la charge soit conservée. Si un neutron neutre se transformait

en proton positif, il faudrait qu'il génère aussi un électron. Mais si le nombre de leptons doit être conservé, n'a-t-on pas outrepassé la loi en générant un électron là où il n'y en avait pas auparavant ?

L'explication proposée par Wolfgang Pauli est qu'une autre particule doit avoir été générée. Un anti-lepton d'un genre particulier, dépourvu de charge.

Enrico Fermi baptisa cette particule hypothétique le neutrino, littéralement le « petit neutre », et on l'a chassé durant vingt-cinq ans pour prouver que Noether avait raison. Pas de chance, les neutrinos sont les particules les plus discrètes de la physique, elles n'interagissent avec presque rien, si bien que ce n'était pas une tâche facile.

Prenez les neutrinos fabriqués au cœur du Soleil, où protons et neutrons se transforment constamment les uns en les autres. Un photon met à peu près dix mille ans pour rebondir jusqu'à la surface du Soleil depuis son cœur. Durant ce long trajet, il est absorbé et réémis par chaque particule qu'il rencontre. Un neutrino suit le même parcours en vingt-trois secondes.

La Terre est sous un bombardement constant de neutrinos solaires, et presque tous la traversent en un battement de cils. À peu près soixante-cinq milliards de neutrinos sont passés au travers de votre petit doigt pendant que vous lisiez cette phrase.

Pas facile de construire un détecteur pour détecter un truc pas du tout intéressé par une quelconque détection. Le plus grand détecteur de neutrinos au monde est Super-Kamiokande (Super-K) près de Hida, au Japon, situé un kilomètre sous la surface d'une montagne (afin de filtrer le rayonnement cosmique).

Super-K contient un réservoir de cinquante mille tonnes d'eau ultra-pure que des milliers de milliards de neutrinos traversent à chaque seconde, la plupart sans interagir avec rien. Mais de temps en temps, ils arrachent un électron à un atome, ce que l'on peut détecter comme une faible lueur.

Il se trouve que les neutrinos existent bel et bien. Ainsi, le nombre leptonique est conservé. Il a fallu vingt-cinq ans pour les trouver, mais ils sont une preuve élégante de la validité du théorème de

Noether. Oh et, bien sûr, il en existe trois générations, le neutrino-électron, le neutrino-muon et le neutrino-tau.

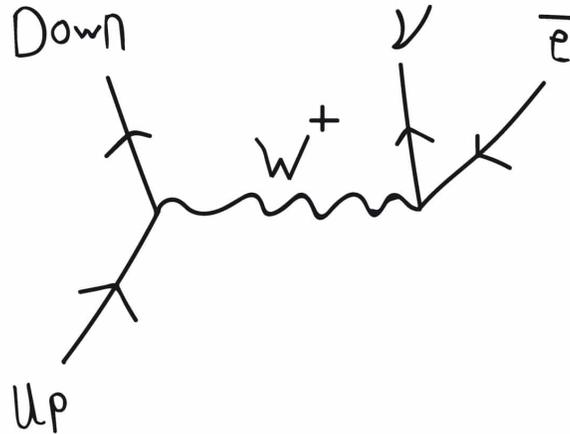
SIGNE DE FAIBLESSE

La raison de la rareté des interactions mettant en jeu les neutrinos est qu'ils ont très peu de propriétés et qu'ils ne se couplent pas avec les champs habituels. Ils n'ont pas de couleur, donc ne communiquent pas avec le champ gluonique. Ils n'ont pas de charge et ne parlent pas davantage avec les champs électromagnétiques et photoniques.

Mais les neutrinos interagissent de temps en temps avec les électrons. Et on sait que les quarks en émettent quand ils se transforment d'*up* en *down*, il doit donc y avoir un champ avec lequel ils interagissent pour ce faire. Quelque chose de bien plus faible. On l'a appelé le champ faible, d'ailleurs. Je vous assure.

Prenez un quark *up* de charge $+2/3$. Quand il se transforme en *down*, sa charge devient $-1/3$, si bien qu'il perd une charge de $+1$ d'une manière ou d'une autre. On a toujours pensé que la charge demeurerait mais le champ faible pourrait bien nous donner tort.

Le champ faible pourrait arracher des charges positives à un quark sous la forme d'une « particule faible » virtuelle de charge positive. Les particules virtuelles n'ont toutefois pas une longue durée de vie. Elles se dégradent très vite et transfèrent leur énergie dans les champs de positrons et de neutrinos afin de conserver la charge et le nombre leptonique. On explique la transformation d'un quark *up* en quark *down* ainsi :



Cela se lit de bas en haut. On commence avec un quark *up*. Il se couple avec le champ faible et génère une particule faible positive (W^+) pour se transformer lui-même en quark *down*.

Ce quantum faible chargé positivement se dégrade ensuite et produit un neutrino standard (symbole « nu », la lettre grecque) et un positron afin de conserver la charge positive (noté e , comme un électron, mais avec une barre au-dessus). Le processus inverse arrive parfois aussi, excepté que la particule faible est alors un W^- .

Vous croyez sûrement que la particule du champ faible est dotée d'un nom qui tue, qui rimerait avec photon et gluon, mais j'ai bien peur qu'arrivé à ce stade tout le monde en ait eu un peu marre. Du coup, on l'a appelée particule W . W^+ quand elle porte une charge positive, et W^- quand sa charge est négative.

La propriété dont doit être dotée une particule pour se coupler au champ faible et émettre des particules W s'appelle l'« isospin faible ». Elle peut adopter deux valeurs, $+1/2$ et $-1/2$. Les quarks, les leptons et les neutrinos sont pourvus d'un isospin faible mais sa constante de couplage est très basse, on observe donc rarement son influence.

Mais, par le fantôme bouffeur de chat de Schrödinger, que se passe-t-il quand deux neutrinos se rencontrent ? Ils ont tous deux un isospin faible, ce qui signifie qu'ils doivent créer des particules virtuelles entre eux. Cela ne peut arriver au travers des interactions W^+ et W^- toutefois, puisque les neutrinos n'ont pas de charge. Il faut qu'il y ait une troisième particule faible disponible, sans charge celle-

ci. Sheldon Glashow la baptisa particule Z. Car sa charge est égale à zéro, je suppose ?

Les particules Z et W ont été observées en 1973 et en 1983 respectivement, dans le détecteur Gargamelle (la mère de Gargantua dans le *Pantagruel* de Rabelais, pas l'ennemi des Schtroumpfs), en Suisse.

Les découvertes de Z et W ont permis de vérifier le comportement des neutrinos, confirmé l'existence du champ faible et prouvé une fois encore que les lois de symétrie de Noether étaient correctes. Mais, comme vous le savez à présent, la physique quantique est un Rubik's Cube démoniaque : dès qu'on en résout un bout, on en embrouille un autre.

UNE IDÉE INUTILE

Toutes les théories quantiques des champs font intervenir deux types d'objets : les particules de matière (quarks, électrons, neutrinos) et les particules vectrices de force (photons, gluons, W/Z).

Les particules de matière ont reçu le nom collectif de fermions ; elles occupent un certain espace. Les particules vectrices de force sont les bosons, qui peuvent coexister au même endroit.

Votre corps est composé de fermions (électrons et quarks), c'est pourquoi vous occupez un certain volume. Un rayon de lumière, lui, est constitué de bosons (des photons en l'occurrence), et c'est pourquoi les rayons lumineux peuvent se croiser sans s'entrechoquer, à la différence des sabres laser. En ce sens, les bosons sont un peu décevants.

Quand une particule interagit avec le champ faible, cela implique souvent une modification de sa charge. Le champ électromagnétique et le champ faible sont donc de toute évidence couplés. La première théorie quantique des champs pour le champ faible était intitulée flavo-dynamique quantique (QFD, *quantum flavour-dynamic*) mais comme le champ faible et le champ électromagnétique communiquent entre eux, la théorie complète, qui inclut tous les photons et les interactions faibles, s'appelle théorie

« électrofaible ». Elle valut le prix Nobel à Steven Weinberg, Abdus Salam et Sheldon Glashow.

C'est une théorie très symétrique, mais son élégance est aussi son plus cruel défaut, car le champ photonique et le champ faible sont complètement différents.

Les particules W et Z sont de courte portée, les photons voyagent pour l'éternité. La force faible nécessite trois particules différentes, l'électromagnétisme une seule. Et puis, il y a la pire brisure de symétrie possible : les particules W et Z ont une masse, pas les photons. Ce n'est pas ce qu'on attend de bosons vecteurs de force capables de coexister au même endroit. Il faut que quelque chose ait brisé la symétrie entre le champ photonique et le champ faible.

Au milieu des années 1960, trois personnes trouvèrent la solution en même temps. Robert Brout, François Englert et Peter Higgs ont suggéré qu'il était possible de préserver la symétrie électrofaible de la même manière que Pauli avait résolu le problème de symétrie des leptons : en ajoutant un nouveau champ (et donc une nouvelle particule).

Au commencement de l'univers, affirmaient-ils, dans les premiers instants de la création, les champs électromagnétique et faible étaient identiques. Mais un troisième champ restait dans l'ombre, et quand il « s'alluma », tout changea.

Ce champ n'est pas comme les autres : sa valeur au repos est non nulle. Il vaut quelque chose partout. En raison de cette propriété singulière ; ce nouveau champ avait acquis la capacité de créer par lui-même des particules de natures différentes plutôt que d'une seule. Ces quanta sont appelés des bosons de Goldstone, d'après le physicien Jeffrey Goldstone, et ils se couplent majoritairement au champ faible.

Avant que ce champ n'ait pointé le bout de son nez, les particules vectrices du champ faible n'avaient pas de masse et étaient de portée infinie, comme les photons. Mais quand les bosons de Goldstone sont venus se mélanger à eux, leur caractère se modifia et elles devinrent les particules W^+ , W^- et Z.

Il me plaît d'imaginer le champ faible couché précautionneusement sur ce nouveau champ excentrique comme du papier peint sur un mur. Il y a trois sortes de bosses sur ce mur (les bosons de Goldstone) qui repoussent le papier peint faible, si bien que l'observateur ordinaire pensera qu'il y a trois genres de particules faibles.

Comme le champ photonique ne se couple pas avec ce champ additionnel, ses particules ne sont pas affectées. Elles peuvent devenir les photons que nous connaissons. Boum ! La symétrie a été brisée avec succès... du moment qu'on arrive à détecter ce champ flippant. Ce qui, sans surprise, est impossible.

L'idée d'un champ non nul qui « s'allume » à l'aube des temps, disposant de trois genres de particules, n'était pas seulement exotique : elle était impossible à tester, puisque les bosons de Goldstone sont cachés dans les particules faibles, ce qui les rend invisibles.

Les journaux auxquels Brout, Engler et Higgs proposèrent leurs articles les refusèrent tous. L'un d'eux répondit même qu'il n'avait « visiblement pas de pertinence physique »⁴. C'était mathématiquement joli, mais il était impossible d'en tester le contenu, ce qui poussa Higgs à marmonner à l'un des membres de son équipe de recherche que « cet été, j'ai découvert un truc complètement inutile »⁵.

MIROIRS BRISÉS

On sait tous que l'histoire se finit bien, cela dit, on ferait donc mieux de regarder ce nouveau champ d'un peu plus près. Dans certains articles, on trouve des allusions aux particules faibles qui « mangeraient » les bosons de Goldstone. Comment ça se passe ? La réponse réclame l'étude d'une propriété des particules dont je n'ai pas parlé jusqu'ici, parce qu'elle aussi paraît complètement inutile.

Charge, couleur, spin, isospin faible, etc., tout cela détermine comment les particules interagissent avec les champs, mais la

théorie quantique des champs de Dirac prédit une autre propriété, la chiralité, du grec *cheir*, la main. C'est une propriété des particules, et elle ne sert à absolument rien.

La chiralité peut être mathématiquement décrite mais elle n'a pas de signification évidente en physique. On sait seulement que chaque particule/champ semble osciller d'une chiralité à l'autre, comme le tic-tac d'une horloge, et on appelle les deux chiralités gauche et droite, comme si les particules étaient alternativement gauchères et droitières. Mais cela ne signifie pas qu'elles lèvent leurs minuscules petites mains gauche et droite en alternance, comme un mauvais danseur de disco. Enfin, quoique. On n'en sait rien, après tout.

Durant le plus clair de l'histoire de la mécanique quantique, la chiralité est restée là, dans les équations, à osciller de droite à gauche sans rien fichier d'autre. Les particules passent en chiralité droite, et repassent à gauche. Et encore. Et encore. Jusqu'à ce qu'on introduise le champ faible.

En 1956, Chien-Shiung Wu et son équipe menaient des expériences sur des atomes de cobalt afin de tester la symétrie de la force faible. La force nucléaire forte et l'électromagnétisme fonctionnent de la même manière quel que soit le côté où les particules se tournent, mais Wu a découvert que la force faible brisait cette symétrie. Les particules des désintégrations radioactives ne sont émises que par des atomes de chiralité gauche.

Bien qu'une particule du genre d'un quark ait un isospin faible (la propriété du champ faible) en permanence, sa capacité à interagir avec le champ faible n'apparaît que dans sa configuration gauche. On dit qu'une particule gauchère a une « hypercharge faible de +1 », tandis qu'une particule droitière a une « hypercharge faible de 0 ». Cela nous indique si oui ou non elle se couplera au champ faible.

Parvenu à ce point, vous vous dites peut-être que toute la physique quantique n'est qu'un amas absurde de propriétés assignées au hasard lors du Big Bang, sans rime ni raison. Désolé. Si vous souhaitez que les lois de la physique soient mieux organisées que ça, j'ai bien peur qu'il vous faille trouver un autre univers. Je recommande chaudement celui dans lequel je suis Batman. À moins que vous n'y soyez déjà, auquel cas, restez-y.

FERME LA BOUCHE QUAND TU MANGES UN BOSON

Revenons au boson Z, particule sans charge ni couleur. C'est en gros un photon, à deux différences près : il est doté d'une masse et il se couple au champ faible quand il est de chiralité gauche.

Comme le boson Z alterne entre le couplage et l'absence de couplage au champ faible, son hypercharge faible passe de + 1 à 0 tout le temps. Mais regardez qui arrive, en haut de la colline ! Incroyable, c'est Emmy Noether !

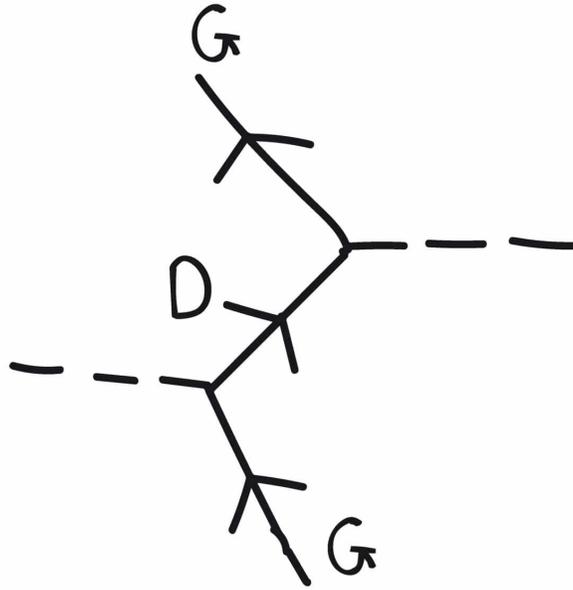
« Devinez quoi, dit-elle. L'hypercharge faible est une propriété conservée aussi. » Une fois ces mots prononcés, elle s'efface dans le lointain, un malin sourire aux lèvres.

Selon le théorème de Noether, si le boson Z allume et éteint son hypercharge, cette propriété doit partir et revenir quelque part. C'est une propriété conservée, elle ne peut donc s'évanouir ni apparaître. Il doit y avoir un champ qui peut absorber et donner une hypercharge faible au boson Z. C'est exactement ce que fait le champ de Brout–Engler–Higgs.

À chaque fois que le boson Z devient gaucher, il aspire l'hypercharge faible du champ (il absorbe un boson de Goldstone), et quand il redevient droitier, il rend son hypercharge au champ (il émet un boson de Goldstone).

Je visualise la particule Z comme un de ces dentiers de farce et attrape qu'on remonte et qui claquent des dents, s'ouvrent et se ferment en continu, avalant et recrachant des hypercharges faibles sur leur passage.

Dans le diagramme de Feynman, cela signifie qu'une particule Z se couple et se découple au champ de Brout–Engler–Higgs constamment, si bien qu'en découvrant une particule Z, on découvre le boson de Goldstone qu'elle a « dans la bouche » en même temps.



Ce diagramme de Feynman présente une particule Z qui zigzague vers le haut de la page, passant d'une chiralité gauche (G) à une chiralité droite (D), émettant un boson de Goldstone au passage, lequel emporte avec lui l'hypercharge faible (la ligne pointillée). La particule Z voyage un moment dans l'état D puis repasse à l'état G, absorbant un boson de Goldstone et regagnant son hypercharge faible. Et ça continue, encore et encore.

QUI S'EN FICHE ?

Quand deux particules interagissent, leurs champs se couplent. Mais si une particule change constamment d'identité, le couplage peut disparaître.

Tout se passe comme si une particule Z changeait d'humeur toutes les secondes, de joyeuse et souriante à sombre et sérieuse. Si vous voulez lui raconter une blague, il faut être rapide, car elle va redevenir gaie comme une porte de prison rapidement, et l'interaction sera perdue. Pareil si vous comptiez lui parler de la mort de votre poney : dépêchez-vous parce que, dans un instant, elle va vous l'enterrer sous les jeux de mots douteux.

Comme la particule Z change de personnalité, il devient plus difficile d'interagir avec elle. Or, une particule avec laquelle il est difficile d'interagir ne se laisse pas facilement influencer. Les particules Z foncent dans les champs qui les entourent comme des balles dans le brouillard. En revanche, une particule qui ne change pas de personnalité sera plus facile à affecter.

En d'autres termes, les changements de chiralité rapides font que la particule maintiendra sa trajectoire, tandis que des changements de chiralité lents rendent la particule facile à dévier. Nous venons de décrire la différence entre quelque chose de lourd et quelque chose de léger !

Un photon se fait balader à droite et à gauche parce qu'il n'a pas de masse, mais il est difficile d'attraper une particule Z qui conserve sa quantité de mouvement, ce qui la rend très lourde. Le changement de chiralité se révèle être l'origine de la masse elle-même, et le champ de Brout–Englert–Higgs permet aussi bien à la particule Z d'avoir une masse qu'au photon de ne pas en avoir !

Cela ne concerne pas que la particule Z. Un muon change de chiralité plus vite qu'un électron. Il serait donc encore plus difficile de le ralentir et il devrait se présenter comme une particule plus lourde. Or, c'est bien le cas.

En fait, les W^+ , W^- , électrons, muons, tauons et tous les quarks changent de chiralité constamment, si bien que leur hypercharge doit se conserver au travers du champ de Brout–Englert–Higgs. Chaque particule se couple donc à ce champ par un mécanisme appelé couplage Yukawa. C'est la raison même pour laquelle les particules peuvent avoir une masse. Pas si inutile que ça, hein ?

LE CHAMP QUI CONSERVAIT LA MASSE ET BRISAIT LA SYMÉTRIE

Comme on l'a vu, il est impossible de détecter le champ de Brout–Englert–Higgs. Les bosons de Goldstone qui permettent aux particules de changer de chiralité (de gagner de la masse) sont mélangés aux particules elles-mêmes, et on ne peut pas les isoler.

Le prix Nobel Leon Lederman a écrit tout un livre sur cette frustration. Il voulait à l'origine l'appeler *The God-damn Particle* (*La Foutue Particule*), parce que ces bosons sont sacrément durs à repérer, mais l'éditeur n'était pas très satisfait de ce titre, qu'il a raccourci en : *The God Particle* (*La Particule de Dieu*). Beaucoup plus consensuel⁶.

Comment détecte-t-on un champ dont les particules sont toujours mélangées aux autres ? C'est là que Peter Higgs est allé plus loin que Brout et Englert, et c'est pourquoi on a commencé à parler de champ de Higgs tout court (aussi peut-être parce que c'est plus court).

Comme ce champ est différent des autres, Higgs a estimé qu'il pourrait tenter un nouveau truc : des ondes de choc. Les autres champs sont de valeur nulle en tout point de l'espace, mais pas le champ de Higgs. Donc, si on y met un grand coup, on devrait pouvoir faire s'y déplacer une compression momentanée, détectable comme un quantum momentané dans le champ de Higgs. Un boson de Higgs.

Techniquement, le boson de Higgs ne fait rien d'intéressant, il se contente de prouver que le champ de Higgs existe. C'est pourquoi les physiciens étaient bien embêtés en 2012 pour expliquer son importance. La circonférence du LHC est de 27 kilomètres. Il a coûté 9 milliards de dollars, soit à peu près 6 milliards d'euros, à la construction, et exige 1 milliard de dollars annuels de fonctionnement. Il consomme 1,3 térawatt d'électricité par an. Alors, quand un journaliste demande : « Mais qu'est-ce qu'il fait, ce boson de Higgs ? », il ne serait pas très malin de lui répondre : « Bah rien. »

C'est le champ de Higgs et les bosons de Goldstone qui font des trucs intéressants, mais ceux-là sont glissants comme des anguilles, si bien qu'on est obligé de créer une particule inutile dans le champ seulement pour voir qu'il est bien là. Le boson de Higgs ne confère pas leur masse aux particules, il prouve une théorie quant à la manière dont elle l'acquière. C'était tout l'objectif du LHC.

On prend un paquet de hadrons (les particules constituées de quarks) et on les envoie dans un gigantesque tube qui forme un

anneau, où on les accélère par électromagnétisme comme dans une énorme centrifugeuse. Refroidis à quelques degrés au-dessus de la température du vide spatial, se déplaçant à 99,9 % de la vitesse de la lumière, ces hadrons sont ensuite projetés les uns contre les autres en différents endroits de l'anneau. L'énergie émise se retrouve répartie dans tous les champs.

On entend parfois ce processus décrit comme si des quarks étaient projetés les uns contre les autres et que des particules qu'ils contiendraient en tombaient, mais ce n'est pas exact. Il n'y a aucune particule dans les quarks, mais quand on les écrase à grande vitesse, l'énergie émise est si colossale qu'elle se transfère à tous les autres champs : la collision crée des électrons, des muons, des tauons, des neutrinos, de l'antimatière, des gluons, des photons, des W, des Z et, si on a du bol, ça secoue le champ de Higgs et on observe un petit signal sur le détecteur.

L'annonce tant attendue fut finalement faite dans un centre de conférence plein à craquer, en France, le 4 juillet 2012. Elle s'appuyait sur une présentation PowerPoint rédigée en Comic Sans, carrément. Une particule dotée des propriétés attribuées par la théorie au boson de Higgs avait enfin été détectée.

Peter Higgs, qui assistait à la conférence, se mit à pleurer alors que retentissait un tonnerre d'applaudissements. Sa quête des 48 années passées arrivait à son terme. Son hypothèse était vérifiée.

EMMY N'AIME QU'EUX

La liste complète des particules en théorie quantique des champs est longue. Prenez par exemple les quarks. On commence avec les six champs principaux : *up*, *down*, étrange, charme, *top* et *bottom*. Chacun se décline en trois couleurs possibles (rouge, vert et bleu), ce qui nous fait dix-huit particules/champs. Il faut ensuite inclure tous les antiquarks, ce qui nous amène à trente-six. On ajoute les versions chirales gauche et droite et nous voilà à soixante-douze.

La plupart des variations sont presque identiques, toutefois, alors plutôt que de mettre toutes les versions possibles dans un gigantesque tableau périodique des particules, on peut en dresser la liste simplifiée que voici :

Fermions (matière)			Bosons (forces)
Quark up Quark down	Quark charme Quark étrange	Quark top Quark bottom	Photons Gluons × 8 W ⁺
Électron Neutrino-électron	Muon Neutrino-muon	Tauon Neutrino-tauon	W ⁻ Z Higgs

Ce que vous avez sous les yeux représente un siècle d'expériences scientifiques emballées dans un paquet surmonté d'un joli nœud : le théorème de Noether.

Sur les fondations qu'elle a posées, Dirac, Feynman, Gell-Mann, Weinberg, Salam, Glashow, Higgs et bien d'autres ont élevé un monument d'ingéniosité d'une magnifique complexité.

On l'appelle le modèle standard de la physique des particules, parce qu'il modélise toutes les particules et toutes les interactions entre elles. Il est le succès qui couronne toute la physique.

Pour certains, le LHC est du gâchis. Il est toutefois bon de se rappeler que cette machine a été pensée pour tester la plus grande des théories de l'univers. La théorie quantique des champs et le théorème de Noether nous posent la question la plus grandiose de toutes. Il était juste que notre réaction soit de construire la réponse la plus grandiose de toutes.

15

Le problème avec G

TOUT, POUR TOUJOURS, OU PRESQUE

La réalité dans laquelle nous vivons doit presque toute sa beauté et sa complexité aux trois forces de la théorie quantique des champs : la force nucléaire forte, l'électromagnétisme et l'interaction faible.

Sans la force forte, les noyaux au centre des atomes ne seraient pas stables et les protons s'échapperaient avant que quoi que ce soit puisse se former. Les gluons et les quarks qui maintiennent tout ensemble expliquent que nous jouissions d'un univers qui ne soit pas constitué que d'hydrogène. Le carbone, l'azote, l'oxygène, le phosphore, le soufre, le sodium, le chlore, le calcium et le fer de votre corps, tout le tableau périodique des éléments en réalité, doivent leur existence aux lois de la chromodynamique quantique.

Ces éléments, quand on les combine, forment les molécules complexes de la chimie, dans lesquelles des électrons s'échangent de l'énergie par des transferts de photons, ce qui rend possible les réactions chimiques. Et ce n'est pas tout : le sol qui vous porte, qui vous repousse, ne le fait que parce que les électrons de vos pieds et les électrons de la terre sont capables d'exercer une force les uns sur les autres, grâce à l'interaction entre électrons et photons.

Quand vous poussez ou que vous tirez quelque chose, que vous sentez une friction ou un frottement, que vous flottez, que vous vous sentez aspiré ou tout autre phénomène décrit par la mécanique newtonienne, ce que vous expérimentez vraiment est la répulsion électrique du champ photonique, sans parler du fait que seule l'existence de la lumière vous permet de voir tout cela. Toute la chimie, toute la physique classique, toute l'optique découlent des lois de l'électrodynamique quantique.

Et puis il y a la biologie en majesté. La plus complexe des sciences, dont les structures les plus simples sont des chaînes moléculaires longues de milliards d'atomes. Tandis que ces brins d'ADN se copient dans vos cellules, des mutations entraînent l'apparition de nouveaux caractères qui se transmettront, permettant à une espèce de diverger et d'évoluer avec le temps. Ces mutations sont parfois le résultat d'erreur de transcription lors de la copie, mais cet effet reste limité. Le véritable don de la Terre à la vie, ce sont les particules radioactives filtrées par l'atmosphère qui viennent perturber le processus codant ; des restes de vent solaire et de phénomènes astronomiques provoqués par la désintégration des particules dans l'espace glacé.

Sans les bosons Z et W, ces désintégrations radioactives ne se produiraient pas et la vie sur Terre resterait confinée à quelques douzaines de bactéries barbotant dans une flaque. Et sans les bosons Z et W, les quarks au cœur du Soleil ne pourraient pas transformer les protons en neutrons, ce qui empêcherait la fusion nucléaire et donc le soleil de briller. L'incomparable splendeur de la biodiversité et la possibilité de la vie même ne sont possibles que grâce aux lois de la théorie électrofaible.

Les quarks et les leptons qui composent votre corps, les photons et les gluons, les bosons qui leur ordonnent d'interagir, le Higgs qui vous confère votre masse et les neutrinos qui maintiennent le tout en équilibre, tout cela est compris dans le modèle standard de la physique des particules et les théories quantiques des champs sous-jacentes.

Nous ne savons pas tout, il reste de grosses questions bien juteuses à résoudre, mais la théorie quantique des champs nous indique la bonne direction. Nous avançons dans son royaume à pas comptés, c'est vrai, mais nous avons cessé de trébucher à l'aveuglette. Tout événement dans l'histoire de l'Histoire est le résultat d'une interaction entre particules à travers les champs, et nous disposons aujourd'hui d'un cadre pour les expliquer toutes. Exceptée une. Ce dont les théories quantiques des champs sont incapables de rendre compte. La gravité.

PLUS FAIBLE QUE FAIBLE

L'histoire de la pomme qui tombe sur la tête de Newton est un peu apocryphe. En fait, il la vit tomber d'un arbre près de sa maison, dans le Lincolnshire, quand une idée l'a frappé¹.

La plupart des forces qui s'exercent sur une pomme qui tombe se résument en des mécaniques plutôt simples. La tige qui se sépare de la branche est le résultat d'un réarrangement d'atomes. Durant sa chute, la pomme se « cogne » à des particules d'air, ce qui ralentit son accélération, et dès qu'elle touche le sol, on peut appliquer des lois encore plus simples pour expliquer pourquoi elle tombe, roule et se brise de telle ou telle façon.

Tous ces phénomènes sont le résultat d'interactions de particules à particules, et presque toutes s'expliquent dans le cadre des théories électrodynamiques classique (l'électromagnétisme) et quantique (QED). Mais pourquoi la pomme est-elle tombée ? Telle est la question véritable.

Newton n'a pas inventé la gravité. Les objets ne flottaient pas dans les airs avant 1687. Ce dont il prit conscience, c'est que la gravité est une force en elle-même. Les pommes ne tombent pas vers le bas parce qu'elles préfèrent le sol, comme l'avait supposé Aristote. Elles accélèrent durant leur chute, ce qui veut dire que quelque chose les attire.

On le prouve facilement en montrant qu'une pomme qui tombe depuis un arbre se cogne plus fort que si on la lâche de quelques centimètres du sol. Il est clair que plus longtemps on tombe, plus on va vite. Or, si quelque chose accélère la pomme, cela veut dire que quelque chose exerce une force.

La prise de conscience de Newton, c'est que les objets dotés d'une masse (ce qu'Einstein modifiera plus tard pour y inclure l'énergie) communiquent entre eux au travers d'un substrat invisible et attractif que nous appelons aujourd'hui le champ gravitationnel. Tout comme la force faible, l'électromagnétisme et la force forte, la gravité est une force fondamentale de la nature.

D'instinct, vous supposez peut-être que la gravité est la plus forte des quatre. En réalité, elle est plus faible que la force faible d'un

facteur mille milliards. La seule raison pour laquelle la gravité est à prendre en compte, c'est que sa portée est infinie et qu'elle agit sur *absolument tout*. Tous les quarks, les leptons, les gluons, les photons, les W, les Z et les Higgs, tous tombent entre les griffes de son avidité sans borne.

Alors que les forces forte, faible et électromagnétique sautillent joyeusement d'une particule à l'autre sans prendre garde à la gravité, celle-ci les guette dans l'ombre et relie subtilement toute chose, en silence et sans scrupule. Rien ne lui échappe. Pas même la lumière. Pas même le temps.

Là, tout de suite, alors que vous lisez ce livre, celui-ci est attiré par votre visage et vice-versa. Vous ne remarquez pas cette action de la gravité parce qu'il lui faut des planètes entières avant qu'on y prenne garde, mais autour de vous, tout s'écrase vers tout, très, très lentement.

On peut défier la gravité pour un temps, à petite échelle – un aimant parviendra ainsi à décoller un trombone du sol sans problème – mais la vérité est qu'elle retient tout à la surface de la Terre et qu'elle ne lâchera rien sans un immense effort.

Les autres forces s'expliquent en introduisant des particules virtuelles qui circulent dans la matière. De même, une particule analogue peut être introduite pour rendre compte de la gravité : le graviton.

Découvrir le graviton risque d'être coton, en revanche ; la gravité est tellement faible qu'afin d'amasser suffisamment d'énergie pour agiter le champ gravitationnel, il nous faudrait un collisionneur de particules de la taille de la galaxie, à peu près. Et quand bien même on en aurait un, l'énergie d'une telle collision serait telle qu'elle créerait un trou noir au point d'impact qui capturerait les gravitons, si bien qu'on ne les verrait pas. À moins qu'on trouve un nouveau moyen de détecter les particules et les champs, les gravitons resteront invisibles.

L'EXCLUE

La gravité est différente des trois autres forces de bien des façons. Ce n'est pas une petite asymétrie (comme on en voit entre l'électromagnétisme et la force faible), c'est le Quasimodo incontesté de la physique. Voici quelques-unes des verrues qu'on rencontre quand on parle de la gravité :

1. La gravité est la plus faible de toutes les forces de la nature, d'un facteur colossal. Si on représente l'intensité des trois autres forces comme des points sur une ligne, on pourrait les placer à quelques centimètres les unes des autres, car elles sont plutôt comparables sous ce rapport. La gravité, elle, se situerait quelque part dans la constellation d'Andromède.
2. À l'aide de la théorie quantique des champs, on peut prédire l'énergie du vide spatial (en additionnant toutes les particules virtuelles). L'énergie totale dans le vide devrait se situer autour de 10^{105} joules par centimètre cube. Mais quand on la mesure pour de vrai, ce que l'on peut faire en observant l'influence de la gravité sur les galaxies, on tombe sur 10^{-15} joule par centimètre cube. La valeur prédite par la théorie quantique des champs et la valeur mesurée grâce à la gravité diffèrent de plusieurs millions de quadrillions². La théorie quantique des champs peut se vanter de produire les prédictions les plus précises de toute la science, comme on l'a vu, mais dès qu'on inclut la gravité dans l'équation, on obtient la *pire* prédiction scientifique jamais réalisée.
3. Une des caractéristiques des fermions (les particules matérielles comme les quarks, les électrons et les neutrinos) est qu'ils occupent leur propre espace. C'est le principe d'exclusion de Pauli, qui nous dit que l'identité des particules, dont leur énergie et leur position, est exclusive. Les fermions restent séparés à tout prix, mais quand on amasse assez de gravité au même endroit au cœur d'un trou noir, les particules s'écrasent les unes dans les autres. Dans les théories quantiques des champs, le principe d'exclusion de Pauli est inviolable. Dans les théories de la gravité, il est plutôt facile à briser.

4. La théorie qui nous décrit le fonctionnement de la gravité est la théorie de la relativité générale d'Einstein, qui relie l'énergie, la masse, le temps, la lumière et l'espace vide. Officiellement, Einstein l'a découverte en 1916. Ce qu'on sait moins, c'est qu'il l'a d'abord découverte en 1912 mais qu'il a jeté l'équation à la poubelle sans le dire à personne³, sûrement parce qu'il la jugeait fausse.

La relativité générale nous décrit l'espace vide comme se courbant autour des objets pour créer des distorsions qu'on perçoit comme de la gravité. La théorie coïncide parfaitement avec les expériences et repose sur une hypothèse clé : en tout point l'espace est lisse et clairement défini. En mécanique quantique, toutefois, le principe d'incertitude de Heisenberg nous dit que ça ne peut jamais arriver. Tous les champs et toutes les particules s'agitent, si bien qu'une théorie qui suppose un espace lisse ne peut être correcte. Les gravitons eux-mêmes devraient respecter le principe d'incertitude de Heisenberg alors que la gravité ne le respecte apparemment pas.

5. Les trois autres champs de force sont posés sur le substrat de l'espace vide. Les particules peuvent en être éjectées mais la forme des champs obéit à une géométrie raisonnable. En relativité générale, cependant, l'espace vide peut se courber.

Toutes les particules habituées à se déplacer en ligne droite se retrouvent soudain avec autour d'elles un espace qui change de forme, et nous n'avons aucun moyen d'expliquer comment cela les affecte. On peut utiliser la gravité pour expliquer ce qui arrive à un gros tas de particules, mais la gravité appliquée à une seule particule ne peut se calculer facilement.

La gravité n'est pas simplement l'enfant qui joue seul dans son coin pendant un goûter d'anniversaire. C'est la petite brute qui tape tout le monde dans le dos, qui casse les lampes et urine sur la télé. La théorie quantique des champs fonctionne à merveille jusqu'à ce qu'on y ajoute la gravité, et là, tout s'effondre. Voilà pourquoi c'est si excitant !

L'ARBRE DE LA CONNAISSANCE

Tout objet proche de la surface de la Terre est attiré par celle-ci sous l'effet de la gravité. Newton a découvert que la même force était à l'œuvre pour tous les soleils, les lunes et les planètes du cosmos, car la gravitation est une loi universelle qui s'applique à tous les cieux et à toutes les terres. Grâce à lui, deux domaines apparemment distincts de la réalité ont été reliés par une explication simple.

Quelques siècles plus tard, Einstein découvrit que les lois de l'énergie entraient dans le même cadre et il les incorpora au sein de la relativité. Une fois de plus, il montra que deux branches séparées de la physique étaient reliées par un lien auparavant caché.

Avant lui, Michael Faraday avait montré que les champs électrique et magnétique, qu'on pensait distincts, n'étaient que deux facettes du même champ, nous donnant au passage une explication unifiée qui englobait l'électricité, le magnétisme et la lumière.

Puis les physiciens quantiques prirent ces lois de l'électromagnétisme et leur adjoignirent la physique des particules pour obtenir la QED, avant de combiner la QED avec la radioactivité et que la force faible nous mène à la théorie électrofaible.

C'est toujours la même chose. On commence en des domaines différents de la connaissance, des endroits apparemment sans liens, et tandis qu'on les arpente et qu'on tire les conséquences logiques de leurs lois, on découvre des passages entre des théories déconnectées comme des brindilles qui se rejoignent pour former les branches d'un arbre. Plus on étudie l'univers, plus les branches se rejoignent.

L'arbre de la connaissance actuel est un réseau de théories qui s'élève à partir de trois souches. La première est la relativité ; elle explique l'astronomie, la cosmologie et la gravité. La deuxième est la théorie électrofaible ; elle explique la masse, la lumière, la radioactivité, les forces classiques et la chimie. La troisième est la chromodynamique quantique ; elle explique le noyau de l'atome. Nous sommes très proches d'unifier les deux dernières souches.

On découvre en ce moment même des moyens ingénieux de combiner la théorie électrofaible et la chromodynamique quantique afin d'aboutir à la « grande théorie unifiée » (GUT en anglais), qui rendra compte de tout le modèle standard à elle seule.

Si on parvient à élaborer une GUT valide, toute la physique s'expliquera à partir de deux souches : la relativité générale pour la gravité et la théorie quantique complète des champs pour tout le reste. Pourra-t-on finalement unir ces deux-là pour former un tronc unique ? Y a-t-il une théorie du tout qui expliquera les contradictions entre la gravité et les forces quantiques ? On l'ignore. Mais on va quand même tout essayer pour y aboutir.

LE COMMENCEMENT

Il y a un siècle, nous croyions détenir les réponses. La physique quantique nous a depuis appris l'humilité. La science, plutôt que de parvenir à son dénouement, n'en est qu'à ses balbutiements. C'est une situation excitante. La tâche qui nous attend est immense, mais que nous soyons parvenus si loin en si peu de temps nous donne beaucoup d'espoir.

Les humains naissent non seulement avec une soif de connaissance mais aussi avec un cerveau capable d'en acquérir. Nous détestons la phrase « Nul ne le sait », et nous sommes bien décidés à découvrir notre place exacte dans le grand Tout. C'est pourquoi nous ne cessons jamais de répondre aux questions ni de questionner les réponses. L'univers est peut-être d'une complexité inimaginable, mais si nous parvenons à comprendre la mécanique quantique, qui sait ce dont nous serons capables à l'avenir ?

Pour cette raison, et pour beaucoup d'autres, je pense sincèrement que la science sauvera notre espèce.

Chronologie de la physique quantique

Le progrès scientifique suit rarement une ligne droite. Parfois, on invente une théorie dont les prédictions avaient été vérifiées des années auparavant par accident, sans qu'on s'en soit rendu compte. Avec le recul, il est possible de disposer les pièces du puzzle de façon à ce qu'elles racontent une histoire, quitte à perdre parfois en précision historique.

Dans ce livre, je me suis concentré sur le récit afin de rendre plus compréhensible ce sujet très compliqué. Il m'a fallu parfois malmener la chronologie pour cela. Voici, par souci de précision, une chronologie exacte des événements.

- 1618 Descartes décrit la lumière comme des ondes dans le plenum.
- 1672 Newton affirme que la lumière est faite de corpuscules.
- 1801 Young, grâce à son expérience de la double fente, montre que la lumière est de nature ondulatoire.
- 1842 Faraday émet l'hypothèse que la lumière est une onde électromagnétique.
- 1861 Maxwell lui donne raison.
- 1897 J. J. Thomson découvre l'électron.
- 1899 Rutherford découvre que la radioactivité est composée de particules.
- 1900 Planck invente les quanta de lumière.
- 1905 Einstein prouve que toute matière est faite d'atomes *et* que la lumière est faite de photons *et* il publie la théorie de la relativité restreinte ($E = mc^2$). Pour son anniversaire, il s'accorde un gâteau.
- 1908 Rutherford découvre le noyau de l'atome.

- 1912 Einstein découvre la relativité générale. Il n'en parle à personne.
- 1913 Bohr propose que l'énergie de l'électron est quantifiée, en couches.
- 1915 Noether démontre son théorème. Les femmes sont les meilleures.
- 1916 Einstein publie sa théorie de la relativité générale. Cette fois, il en a parlé.
- 1917 Rutherford découvre le proton.
- 1922 Stern et Gerlach mènent leur expérience. Elle n'a alors aucun sens.
- 1924 De Broglie suggère la dualité onde-particule.
- 1926 Schrödinger écrit son équation d'onde.
- 1926 Born interprète la fonction d'onde comme la racine carrée du comportement et des propriétés probables.
- 1927 Pauli adapte l'équation de Schrödinger pour qu'elle contienne le « spin ».
- 1927 Heisenberg découvre le principe d'incertitude.
- 1927 George Thomson montre que les électrons peuvent être diffractés comme des ondes.
- 1927 De Broglie présente l'interprétation de l'onde-pilote.
- 1928 Dirac élabore la théorie des champs quantiques.
- 1930 Heisenberg met au propre l'interprétation de Copenhague. Einstein n'est pas content.
- 1930 Pauli émet l'hypothèse de l'existence des neutrinos.
- 1932 Chadwick découvre le neutron.
- 1932 Von Neumann tente de découvrir la source de la réduction de la fonction d'onde. Il ne trouve rien.
- 1932 Anderson découvre le positron.
- 1933 Fermi propose le champ faible.
- 1935 Schrödinger suggère qu'on tue/ne tue pas un chat.
- 1935 Yukawa propose la force nucléaire forte pour expliquer la stabilité du noyau.

- 1935 Einstein, Podolsky et Rosen publient un paradoxe.
- 1936 Découverte du muon.
- 1939 Naissance de Batman.
- 1947 Découverte du pion.
- 1947 Découverte du kaon, qui se comporte bizarrement.
- 1949 Feynman, Schwinger et Tomonaga créent une version fonctionnelle de la QED.
- 1952 Bohm étend l'interprétation de l'onde-pilote.
- 1956 Les neutrinos-électrons sont enfin découverts.
- 1956 Wu découvre que le champ faible est asymétrique pour la chiralité (et donc l'hypercharge faible).
- 1957 Everett propose l'interprétation des univers multiples.
- 1961 Wigner suggère que la conscience pourrait provoquer la réduction de la fonction d'onde.
- 1962 Découverte du neutrino-muon.
- 1964 Bell propose une façon de tester le paradoxe EPR.
- 1964 Gell-Mann peaufine la chromodynamique quantique, y incluant des quarks up, down et étranges.
- 1964 Glashow propose l'existence du quark charme. Évidemment.
- 1964 Brout, Englert et Higgs proposent un nouveau champ pour expliquer la masse.
- 1968 Découverte des quarks *up*, *down* et étrange.
- 1968 Weinberg, Salam et Glashow complètent la théorie électrofaible.
- 1971 Hafele, Keating et Mr Clock vérifient la relativité.
- 1973 Kobayashi propose l'existence de quarks top et bottom.
- 1973 Découverte du boson Z.
- 1974 Découverte du tauon.
- 1974 Découverte du neutrino-tauon.
- 1977 Découverte du quark bottom.
- 1982 Aspect réussit à mettre en place l'expérience de Bell et prouve que la physique classique ne peut expliquer

- l'intrication.
- 1983 Découverte des bosons W^+ et W^- .
 - 1986 Cramer propose l'interprétation transactionnelle.
 - 1993 Peres, Wootters et Bennett parlent de téléportation quantique.
Tonomura mène l'expérience de la double fente sur un électron unique et prouve sans ambiguïté possible que les particules interfèrent avec elles-mêmes.
 - 1994
 - 1995 Découverte du quark *top*.
 - 1998 Début de la construction du LHC.
Kim construit la première gomme quantique à effet retardé, montrant une intrication quantique qui paraît remonter le temps. On suppose qu'un message a été envoyé à Cramer en 1986 à cette occasion.
 - 1999
 - 2005 Couder fournit quelques preuves tendant à valider l'interprétation de de Broglie–Bohm.
 - 2008 Premier démarrage du LHC.
 - 2012 Découverte du boson de Higgs au LHC.
 - 2014 O'Connell parvient à placer un objet classique en état de superposition pour la première fois.
 - 2015 Bohr (petit-fils) exclut potentiellement l'explication de Broglie-Bohm.
 - 2017 Jianwei réalise le record de téléportation quantique vers un satellite.
 - 2017 Lidzey intrique des bactéries par erreur avec un rayon laser.
 - 2018 Vanner crée un tambour quantique.

Annexe I

Le spin d'un peu plus près

Le spin est toujours un multiple quantifié de la constante de Planck, le nombre qu'on obtient en divisant l'énergie d'une particule par sa fréquence associée, toujours égal à $6,6 \times 10^{-34}$ joule seconde. Les valeurs de spin des particules sont des multiples entiers ou demi-entiers de cette constante, par exemple $1/2$ (constante de Planck), $3/2$ (constante de Planck), 2 (constante de Planck), $5/2$ (constante de Planck), etc. Elles peuvent être négatives comme positives.

Les particules dont les spins sont demi-entiers sont appelées les fermions, les particules de spin entier sont les bosons. Ces deux types de particule se comportent très différemment (je donne des exemples au chapitre 14). Toutes les particules ne sont pas magnétiques, même si toutes les particules ont un spin.

Il y a un terme pour désigner le caractère magnétique d'une particule : le moment magnétique de spin. Le moment magnétique de spin détermine la force du champ magnétique de la particule. Il est donné par la formule suivante :

$$\mu = g \frac{e}{2Mc} S$$

Le symbole μ est le moment magnétique de spin de la particule, qu'on peut interpréter comme la « charge magnétique ». Le symbole

g désigne le facteur de Landé, une valeur propre à chaque particule qui relie les autres propriétés entre elles.

M représente la masse, e la charge électrique, c la limite de vitesse universelle (voir le [chapitre 8](#)) et S la matrice de spin, une grille de deux lignes par deux colonnes qui permet de décrire les différents spins possibles de la particule.

Pour un objet de tous les jours, le « spin » désigne une rotation. On peut définir ce « spin » à l'aide de ce qu'on appelle le « moment angulaire », qui mesure la masse, la vitesse de rotation et le sens de rotation (le sens des aiguilles d'une montre, ou le sens inverse). Mais dans le cas du spin de la mécanique quantique, ces nombres ne suffisent plus et il nous faut définir quatre directions possibles (on les appelle les vecteurs de spin). On désigne parfois le spin par l'expression « moment angulaire intrinsèque », parce que c'est une propriété qui ressemble au moment angulaire, mais elle fait partie intégrante de l'identité de la particule et existe même quand cette dernière est stationnaire.

Ce que cette équation nous révèle, c'est que le moment magnétique de spin d'une particule est le produit de toutes ces propriétés prises ensemble. Dans l'expérience de Stern-Gerlach, ce qu'ils mesuraient en réalité, c'était le moment magnétique de spin des atomes d'argent, mais comme la masse, la charge et g étaient identiques pour toutes les particules, les deux directions possibles pour elles étaient déterminées par S , la propriété de spin. Ce n'était donc pas vraiment une mesure du spin de chaque particule (on ne connaît aucun moyen de le faire directement, on ne sait même pas à quoi ressemblerait une expérience qui le permettrait), même si le magnétisme nous permet de mesurer des différences de spin.

Ce qu'il est important de noter aussi, c'est que, pour qu'une particule soit magnétique, elle doit avoir un spin et une charge électrique. Une particule dotée d'un spin mais dépourvue de charge, comme un neutrino (dont on parle au chapitre 14), a un spin $1/2$. Dans l'équation, le 0 à la place de e (pas de charge) entraîne forcément $\mu = 0$. La charge électrique et le magnétisme sont toujours liés.

Annexe II

Résoudre Schrödinger

Résoudre l'équation de Schrödinger pour un électron unique orbitant autour d'un unique proton (un atome d'hydrogène), c'est jouable. Mais cela se complique rapidement quand on inclut plus de particules.

Un atome d'hélium a deux protons, deux neutrons et deux électrons, il faut donc tenir compte des interactions des électrons avec un des protons, des interactions des électrons avec l'autre proton, des électrons entre eux, des protons et neutrons entre eux et enfin les combiner toutes.

Plus les atomes et les molécules sont gros, plus on a d'interactions à gérer, jusqu'au point où même de très puissants ordinateurs auront du mal à tenir compte de tout. Il est alors inévitable d'avoir recours à des approximations pour, à la fois, gagner du temps de calcul et obtenir quand même des réponses proches de la solution complète de Schrödinger.

L'approximation orbitale est l'une de ces approximations fréquemment employées. On imagine l'atome comme ayant un électron unique dont on augmente l'énergie jusqu'à le pousser dans les plus hautes couches électroniques.

Quand on essaye de déterminer la forme d'un atome doté de vingt-six électrons, par exemple, on s'en sort souvent en imaginant

un atome d'hydrogène dont on augmente l'énergie de son électron vingt-six fois, jusqu'à ce que cela ait l'air correct.

Le résultat final ressemble à un enfant qui tenterait d'imiter les adultes en se perchait sur des échasses et en enfilant de grands vêtements. Ce n'est pas vraiment un portrait fidèle mais cela donne une idée de ce à quoi ressemblerait une version plus précise de la méthode.

L'approximation de Born–Oppenheimer est une autre technique. On émet l'hypothèse que l'énergie et les vibrations du noyau sont tellement lentes par rapport à celles de l'électron qu'on peut les ignorer. On imagine que les électrons orbitent ou ondulent autour d'un point positif unique, dont la vie n'intéresse personne. Cela nous permet de nous concentrer sur les électrons et leurs interactions sans nous soucier des phénomènes propres au noyau.

Mais la palme de l'approximation revient sans conteste à une méthode appelée théorie de la fonctionnelle de la densité, inventée par Walter Kohn et John Pople, qui se partagèrent le Nobel pour son invention en 1998.

La théorie de la fonctionnelle de la densité, ou DFT pour les membres de l'amicale des *nerds*, est une méthode magnifique pour résoudre la fonction d'onde d'une molécule truffée de particules. Plutôt que de modéliser chaque particule comme un point individuel et de calculer l'énergie de chaque interaction l'une après l'autre, la DFT ne considère qu'un « nuage électronique » qui représente tous les électrons en un seul gros tas.

Une fois qu'on a mélangé tous les électrons et calculé « l'épaisseur » de la densité des électrons, on peut en déduire le comportement de l'atome ou de la molécule dans le temps. Les zones où le nuage est le plus dense correspondent aux endroits où les électrons ont le plus de chances de se trouver, les zones où il est le plus ténu aux endroits où ils ont peu de chances d'être observés.

Un calcul DFT sur une petite molécule peut être effectué en quelques heures et vous fournit une réponse précise à plus de 90 %. Quand on compare cela à la résolution de l'équation de Schrödinger complète, qui prendrait des années pour une grosse molécule, on

comprend pourquoi cette technique est devenue le standard industriel du calcul quantique.

Annexe III

La bicyclette d'Einstein

Cet exercice très simple, qui illustre la constance de la vitesse de la lumière, vient du vulgarisateur et présentateur télé Carl Sagan. Il a imaginé un scénario où un cycliste pédale vers vous, quand soudain un gros camion vient lui couper la route. Le cycliste est forcé de dévier.

Le camion ne vient pas vers vous, donc la lumière qui vient de son flanc s'approche de vous à la vitesse habituelle que les physiciens notent c , pour « constante ». Le cycliste, lui, pédale vers vous, donc la lumière qu'il émet s'approche de vous à la vitesse $c +$ sa vitesse. Cela signifie que la lumière du vélo vous atteindra avant la lumière du camion.

Quand le camion bloque la route devant le cycliste, celui-ci le contourne d'un côté, et la lumière qu'il émet depuis sa nouvelle position (qui vous indique qu'il a dévié sa course) vous atteindra d'abord, suivie peu après de la lumière du camion qui lui coupe la route.

Ce que vous devriez voir, ce serait donc le cycliste déviant sa course sans raison (la lumière du camion ne vous est pas encore parvenue) puis un peu après un camion s'arrêtant au milieu de la route. Dans ce scénario, vous allez vous demander pourquoi le

cycliste a dévié quelques secondes trop tôt. Bien sûr, ce n'est pas comme ça que ça se passe.

La lumière du camion et celle du vélo qui dévie vous parviennent au même moment, ce qui rend l'histoire plus compréhensible. Mais comme le vélo se déplace plus vite, le rayon de lumière qu'il émet aurait dû vous parvenir en premier. La seule façon d'expliquer cela, c'est que la vitesse de la lumière émise par le cycliste n'était pas $c +$ sa vitesse, mais c tout court, tout comme la lumière issue du camion. La vitesse de la lumière est la même, partout, quel que soit le mouvement de l'observateur ou de la source de lumière.

Annexe IV

Apprivoiser l'infini

De nombreux problèmes en physique théorique viennent de la notion d'infini. Prenons par exemple l'expérience de la double fente. On peut percer deux trous dans un mur vers lesquels on envoie un photon et calculer sa position d'arrivée probable en combinant les deux chemins possibles.

Si on perce un troisième trou dans le mur, l'histoire ne change pas beaucoup. On calcule trois chemins possibles au lieu de deux pour le photon, et on empile les probabilités des trois. Pareil pour quatre, quarante ou quatre cents trous. Mais arrive un moment où le mur est si plein de trous qu'il en devient un espace vide.

Dans ce cas, on doit calculer une infinité de chemins pour le photon, puisqu'il y a une infinité de trous (pas de mur = infinité de trous). Pourtant, si on envoie un photon sur un écran détecteur sans mur entre les deux, le photon suit une ligne droite. Comme si le photon « reniflait » (ce sont les mots de Feynman) l'infinité de chemins possibles puis choisissait d'emprunter la route classique sans un regard pour l'infini.

Autre piège de la QED : l'interaction d'une particule avec elle-même. Un électron est doté d'une charge négative, ce qui signifie qu'il interagit avec les autres particules négativement chargées. Techniquement, un électron devrait donc interagir avec lui-même,

mais comme il est infiniment proche de lui-même, l'auto-interaction aboutit à un nombre de réponses infinies quand on essaye de la calculer.

Ces deux exemples sont très embêtants parce que l'infini n'est pas une chose réelle en physique. Elle existe dans le monde abstrait des mathématiques, mais dans l'univers réel, il n'y a rien d'infini (l'univers ne pourrait pas le contenir). Donc, quand une théorie prédit une réponse infinie, c'est que quelque chose cloche dans la théorie.

Quand une équation tend vers l'infini, les scientifiques disent qu'elle « explose », et la physique théorique consiste souvent à tenter de désamorcer les bombes de ce genre. D'habitude, elle y parvient en modifiant les équations, ou en en dérivant de nouvelles, ou encore en changeant les valeurs initiales pour obtenir des réponses plus raisonnables.

L'une des astuces les plus grossières est tout simplement de couper les nombres quand ils deviennent trop grands (ce qu'on appelle la régularisation). Mais c'est terriblement primitif, à peine mieux que de se lamenter sur l'équation et d'ignorer le problème.

Une approche plus sophistiquée consiste à faire ce qu'on appelle une « renormalisation ». L'idée cette fois est de choisir (d'inférer de ce qu'on sait) les propriétés des champs et de résoudre un paquet d'équations différentes avec ces valeurs, jusqu'à obtenir les réponses qui conviennent. Plus on inclut de détails, plus on tombe près des résultats expérimentaux.

C'est l'équivalent mathématique du portrait-robot d'un criminel établi à partir des témoignages de ceux qui l'ont aperçu. On commence par quelques hypothèses, la structure de son visage par exemple, et on demande aux témoins d'extrapoler à partir de là. On obtient ainsi différents croquis à partir du même point de départ, et on regarde s'ils correspondent.

S'ils sont raisonnablement semblables, vous les comparez à une photo d'un criminel connu (une valeur du monde réel) et vous vérifiez s'il leur ressemble. Si oui, cela veut dire que vos hypothèses de départ et vos méthodes de dessin sont bonnes. Sinon, on efface et on recommence avec d'autres hypothèses et d'autres techniques

de dessin, jusqu'à réussir. C'est une forme d'essais-erreurs, pour être honnête, mais ça fonctionne.

Annexe V

Peindre avec toutes les couleurs des quarks

Quand vous percevez la couleur d'un objet, ce que vous détectez en réalité, ce sont des vibrations dans le champ électromagnétique. Atomes et molécules harmonisent leurs électrons avec une certaine quantité d'énergie, qui correspond à l'énergie des photons émis ou réfléchis.

Un photon de haute énergie vous tape dans l'œil : votre cerveau propose un violet pour en rendre compte. S'il avait été de basse énergie, il vous aurait proposé rouge.

Les particules élémentaires n'ont pas ce genre d'apparence, seulement les photons qu'elles émettent. Ce n'est pas facile de se le représenter, car la plupart des objets de notre expérience quotidienne ont une couleur. Quand on imagine une balle de tennis, sa surface est jaune pourrait-on dire naïvement. En réalité, les électrons de la balle de tennis transfèrent de l'énergie dans le champ photonique à une certaine valeur, que votre cerveau interprète comme du jaune.

Les quarks aussi transfèrent de l'énergie dans le champ photonique (ils ont une charge électrique), mais ces énergies sont bien trop élevées pour que vos yeux les captent. La véritable

« couleur » des quarks serait la même que celle d'un faisceau de rayons X ou de rayons gamma, c'est-à-dire invisible.

On peut en dire autant d'un électron unique se déplaçant dans l'espace. À moins qu'une particule entre en collision ou se fasse attraper par un atome et perde de l'énergie (qu'elle émettrait sous la forme d'un photon), on ne la verra jamais s'approcher ou s'éloigner de nous.

Les électrons qui se déplacent dans l'eau produisent des traces bleues brillantes (un phénomène appelé radiation de Cherenkov) mais sont un peu plus violets dans l'air (de la couleur de l'éclair), et d'un rose ou d'un vert léger dans la neige. Le noyau d'un atome, et les quarks, protons et neutrons qu'il contient sont, eux, absolument indétectables pour un œil humain.

Remerciements

Quand j'avais quatorze ans, mon professeur de sciences, M. Evans, m'a donné un manuel de physique quantique. Je suis rapidement tombé amoureux du sujet et je voulais écrire mon propre livre, depuis ce temps. J'ai adoré travailler sur ce livre, et je souhaitais remercier tous ceux qui m'ont permis de réaliser ce rêve de *nerd*.

D'abord et avant tout, je remercie Bree Anne Kelly (qui peut-être aime la science encore plus que moi). L'aide de Bree a été vitale pour la structure du livre, elle m'a fait des retours sur ce qui ne fonctionnait pas et m'a aidé à trouver le ton juste, si bien que le produit fini est aussi drôle à lire qu'il l'a été à écrire.

Je voudrais remercier mon complice, le meilleur auteur que je connaisse, Karl Dixon. Karl m'a transmis des notes inestimables sur le style m'a aidé à peaufiner de nombreuses blagues, et m'a permis de garder le sourire tout du long, même lors des moments désagréables.

Merci à Andrew « Hercules » Pettitt, pour ces ajustements indispensables et son polissage des chapitres d'ouverture. Il m'a aussi empêché de me perdre dans des explications embrouillées et incohérentes. *Merci, mon ami* [en français dans le texte, NdT] !

Merci à Marcus Loft et Phil Pavet de vous être assurés que ma physique était correcte et que mes analogies ne faisaient pas perdre les faits de vue.

Merci à Becky, encore une fois, pour sa patience indéfectible alors que j'écrivais ce projet passion, et de m'avoir laissé faire ce qu'il

fallait.

Merci à mon agent sans peur, Jen Christie, qui m'a aidé à vendre ce livre, et qui a parié sur moi... une nouvelle fois.

Merci à tous chez Robinson et Little, Brown pour votre aide, merci d'avoir achevé le travail avec autant de facilité : merci à Duncan Proudfoot pour sa confiance sur un sujet si ambitieux, à Amanda Keats pour avoir coordonné le mammoth éditorial, à Beth Wright, ma conseillère en communication, pour m'avoir aidé à faire passer le mot. Merci à Andy Hine et Kate Hibbert pour avoir négocié tous les trucs internationaux, et un très grand merci à mon éditeur Howard Watson, dont l'attention aux détails est hors pair. Ce fut un privilège de travailler avec vous tous.

Je veux aussi remercier plusieurs auteurs dont les livres m'ont été indispensables, et même si je ne les ai pas rencontrés directement : Hagen Kleinert, Tom Lancaster, Stephen Blundell, David Tong, Anthony Zee et Leonard Susskind, merci de m'avoir aidé à comprendre les bouts que je ne comprenais pas, et à me sentir plus à l'aise avec ceux que je comprenais déjà. Oh et merci à Carly Rae Jepsen pour la musique que j'ai écouté en écrivant.

Merci, Seishi Shimizu, d'être une source d'inspiration pour moi, en tant que scientifique et en tant qu'auteur.

Merci à mon père, Paul, d'avoir toujours cru en moi. Et, surtout, merci à tous ceux qui ont acheté mon premier livre, c'est la raison principale pour laquelle il y en a un deuxième. Le soutien des amis, de la famille, de mes élèves et de complets étrangers a été bouleversant. J'espère que je pourrai encore vous rendre ce service à tous.

Index

Alhazen [1](#)
Ampoule [1](#)
Anderson, Carl [1](#), [2](#), [3](#)
Annalen der Physik [1](#)
Anti-électron [1](#)
Anti-neutron [1](#)
Antihydrogène [1](#)
Antimatière [1](#), [2](#), [3](#)
 armement [1](#)
 qui remonte le temps [1](#)
Antiparticules [1](#)
Approximation
 de Born–Oppenheimer [1](#)
 orbitale [1](#)
Asimov, Isaac [1](#)
Aspect, Alain [1](#)
Balles de ping-pong [1](#)
Batman [1](#), [2](#)
Bell, John Stewart [1](#)
Bennett, Charles [1](#)

Bohm, David [1](#)
Bohr, Niels [1](#), [2](#), [3](#), [4](#), [5](#), [6](#), [7](#), [8](#), [9](#), [10](#)
Bohr, Tomas [1](#)
Bombe atomique [1](#)
Born, Max [1](#), [2](#)
Boson(s) [1](#), [2](#)
 de Goldstone [1](#)
 de Higgs [1](#), [2](#), [3](#)
 Z [1](#)
Boulet de canon [1](#)
Brisure de symétrie [1](#)
Broglie, Louis (duc de) [1](#), [2](#), [3](#)
Brout, Robert [1](#)
Burns, Robbie [1](#)
Bush, John [1](#)
Butler, Clifford [1](#)
Catastrophe des ultraviolets [1](#)
Chambre à brouillard [1](#), [2](#)
Champ [1](#)
 de Brout–Engler–Higgs [1](#)
 de Higgs [1](#)
 des gluons [1](#)
 électrique [1](#)
 électromagnétique [1](#)
 faible [1](#), [2](#), [3](#), [4](#)
 gluonique [1](#), [2](#)
 magnétique [1](#), [2](#)
 d'un électron [1](#)
 photonique [1](#), [2](#), [3](#), [4](#)
 quantique [1](#)

Charge [1](#)
de l'électron [1](#), [2](#)
de couleur [1](#)
électrique [1](#)
Chat de Schrödinger [1](#)
Châtelet, Émilie du [1](#), [2](#)
Chiralité [1](#), [2](#), [3](#)
origine de la masse [1](#)
Chromodynamique quantique [1](#)
Voir QCD
Clarke, Arthur C. [1](#)
Conférence de Solvay [1](#)
Confinement de couleur [1](#)
Conscience [1](#)
Conservation
de la charge [1](#)
hypercharge faible [1](#)
quantité de mouvement [1](#)
Constante de couplage [1](#)
Corps noir [1](#), [2](#)
Couches électroniques [1](#)
Coudier, Yves [1](#)
Couleur [1](#)
Couplage Yukawa [1](#)
Coupure d'Heisenberg [1](#)
Cramer, John [1](#)
Curie, Marie [1](#), [2](#), [3](#)
Debye, Paul [1](#), [2](#)
Descartes, René [1](#), [2](#)
Désintégration [1](#)

bêta [1](#)
Diagramme(s) de Feynman [1](#), [2](#), [3](#), [4](#), [5](#)
couleurs [1](#)
Dirac, Paul [1](#), [2](#), [3](#)
Dualité onde-particule [1](#)
Dyson, Freeman [1](#)
Effet
 Pauli [1](#)
 photoélectrique [1](#), [2](#), [3](#)
 tunnel [1](#), [2](#)
Ehrenfest, Paul [1](#)
Eibenberger, Sandra [1](#)
Einstein, Albert [1](#), [2](#), [3](#), [4](#), [5](#), [6](#), [7](#), [8](#)
 lettre à Born [1](#), [2](#), [3](#)
Électrodynamique quantique [1](#)
 Voir QED
Électron [1](#), [2](#), [3](#)
 propriétés ondulatoires [1](#)
Empédocle [1](#)
Énergie du vide [1](#)
 spatial [1](#)
Englert, François [1](#)
Équation(s)
 d'onde de Schrödinger [1](#), [2](#)
 de Maxwell [1](#)
 de Pauli [1](#)
 de Schrödinger [1](#), [2](#), [3](#), [4](#), [5](#), [6](#), [7](#)
Êta et oméga [1](#)
État pur [1](#), [2](#), [3](#)
 amplitude de probabilité [1](#)

Éther luminifère [1](#)
Everett, Hugh [1](#), [2](#)
Expérience(s)
 de la double fente [1](#), [2](#), [3](#), [4](#)
 de Stern et Gerlach [1](#), [2](#), [3](#)
 qui se contredisent [1](#)
Faraday, Michael [1](#), [2](#)
Fermi, Enrico [1](#)
Fermions [1](#), [2](#), [3](#)
Feynman, Richard [1](#), [2](#), [3](#), [4](#)
 Han Solo de la physique [1](#)
Fonction d'onde [1](#), [2](#), [3](#)
 réduction [1](#), [2](#)
Football quantique [1](#)
Force forte [1](#), [2](#), [3](#), [4](#)
Franklin, Benjamin [1](#)
Gargamelle [1](#)
Gaz [1](#)
Gell-Mann, Murray [1](#)
Gerlach, Walter [1](#)
Glashow, Sheldon [1](#), [2](#), [3](#)
Gluons virtuels [1](#)
Goldstone, Jeffrey [1](#)
Gomme quantique à effet retardé [1](#), [2](#)
Grand collisionneur de hadrons [1](#)
 Voir LHC
Grande théorie unifiée [1](#)
 Voir GUT
Gravité [1](#), [2](#), [3](#)
Graviton [1](#)

GUT [1](#), [2](#)
Guth, Alan [1](#)
Hadrons [1](#)
Hafele, Joseph [1](#)
Harmoniques [1](#)
Heisenberg, Werner [1](#), [2](#), [3](#)
Heligoland [1](#)
Higgs, Peter [1](#), [2](#)
Hilbert, David [1](#)
Himmler, Heinrich [1](#)
Hypercharge faible [1](#)
Infini [1](#)
Institut Clay [1](#)
Institut de Physique théorique de Copenhague [1](#)
Interférence [1](#)
Interprétation
 de Broglie–Bohm [1](#)
 de Copenhague [1](#), [2](#), [3](#), [4](#), [5](#), [6](#), [7](#), [8](#)
 objection d'Einstein [1](#)
 des univers multiples [1](#), [2](#)
 solution de Wigner [1](#)
 transactionnelle [1](#), [2](#)
Intrication [1](#), [2](#), [3](#), [4](#)
 triple [1](#)
Jonction Josephson [1](#)
Joyce, James [1](#)
Kaon [1](#), [2](#)
Keating, Richard [1](#)
KGB [1](#)
Kim, Yoon-Ho [1](#)

Know, Ronald [1](#)
Kobayashi, Makoto [1](#)
Kohn, Walter [1](#)
Lagrangien [1](#)
Lambda [1](#)
Landé, Alfred [1](#)
Lavoisier, Antoine [1](#)
Lederman, Leon [1](#)
Leptons [1](#), [2](#)
Lewis, Gilbert [1](#)
LHC [1](#), [2](#), [3](#), [4](#), [5](#)
Libre arbitre [1](#)
Lidzey, David [1](#)
Loi(s)
 de Rayleigh–Jeans [1](#)
 probabilistes [1](#)
Lumière [1](#), [2](#), [3](#)
Machine quantique [1](#)
Magnétisme [1](#), [2](#)
Marletto, Chiara [1](#)
Masse de l'électron [1](#)
Maxwell, James Clerk [1](#)
Mécanique quantique [1](#), [2](#)
Méson [1](#)
Messages vers le passé depuis le futur [1](#)
Mesure [1](#), [2](#)
Modèle standard [1](#), [2](#)
Moment
 angulaire [1](#)
 intrinsèque [1](#)

magnétique de spin [1](#)
Muon [1](#)
Neumann, John von [1](#)
Neutrinos [1](#), [2](#), [3](#)
Neutrons [1](#)
New Age [1](#)
Newton, Isaac [1](#), [2](#), [3](#), [4](#)
Newton-John, Olivia [1](#)
Nio, Makiko [1](#)
Noether, Emmy [1](#), [2](#), [3](#), [4](#)
 éloge funèbre [1](#)
Nombre
 imaginaire [1](#)
 leptonique [1](#), [2](#)
Nuage électronique [1](#)
O'Connell, Aaron [1](#), [2](#)
Onde(s)
 de probabilité [1](#)
 électromagnétiques [1](#), [2](#), [3](#)
 nature [1](#)
 pilotes [1](#), [2](#)
 vitesse [1](#)
Oppenheimer, Robert [1](#), [2](#), [3](#)
Orbitale S [1](#)
Pais, Abraham [1](#)
Paradoxe EPR [1](#), [2](#), [3](#), [4](#), [5](#)
Particule(s) [1](#), [2](#), [3](#)
 de dieu [1](#), [2](#)
 élémentaire [1](#)
 et champ [1](#)

faible [1](#)
intriquées [1](#)
liste complète [1](#)
virtuelles [1](#)
W [1](#)
Z [1](#), [2](#), [3](#)
Pauli, Wolfgang [1](#), [2](#), [3](#)
Peres, Asher [1](#)
Perl, Martin [1](#)
Photons [1](#), [2](#), [3](#), [4](#), [5](#)
 expérience du temps [1](#)
 virtuels [1](#)
Pile ou face [1](#)
Pion [1](#)
Planck, Max [1](#), [2](#)
Plus vite que la lumière [1](#)
Podolsky, Boris [1](#)
Positrons [1](#)
Potentiels quantiques [1](#)
Powell, Cecil [1](#)
Principe
 d'exclusion de Pauli [1](#)
 d'incertitude [1](#), [2](#), [3](#), [4](#)
 de Heisenberg [1](#), [2](#)
Problème de la mesure [1](#), [2](#), [3](#), [4](#)
 solution de Wigner [1](#)
Projet Manhattan [1](#)
 bombe atomique [1](#)
Propagateur [1](#)
Propriétés

d'une particule [1](#)
liées [1](#)
Proton [1](#)
QCD [1](#), [2](#), [3](#), [4](#), [5](#)
QED [1](#), [2](#), [3](#), [4](#), [5](#), [6](#), [7](#), [8](#), [9](#), [10](#)
Quanta [1](#)
Quantité de mouvement [1](#)
Quantum du champ électromagnétique [1](#)
Quantum of Solace [1](#)
Quark(s) [1](#), [2](#), [3](#), [4](#)
 bottom [1](#)
 charme [1](#)
 de valence [1](#)
 down [1](#)
 étrange [1](#)
 kworks [1](#)
 top [1](#)
 up [1](#)
Rabi, Isidor [1](#)
Radiation alpha [1](#)
Radioactivité [1](#), [2](#)
Rayons cosmiques [1](#)
Rebrousse-temps [1](#)
Réduction de la superposition [1](#)
Régularisation [1](#)
Relation d'incertitude de Heisenberg [1](#)
Relativité
 générale [1](#), [2](#)
 restreinte [1](#)
Renormalisation [1](#)

Rosen, Nathan [1](#)
Rutherford, Ernest [1](#)
Sagan, Carl [1](#)
Salam, Abdus [1](#)
Saut quantique [1](#)
Schlosshauer, Maximilian [1](#)
Schrödinger, Erwin [1](#), [2](#), [3](#)
 interprétation de Copenhague [1](#)
Schwinger, Julian [1](#), [2](#)
Solvay, Ernest [1](#)
Sommerfeld, Arnold [1](#)
Spin [1](#), [2](#), [3](#)
 down [1](#)
 up [1](#)
Spiritualité quantique [1](#)
Stern, Otto [1](#)
Super-Kamiokande [1](#)
Superposition(s) [1](#), [2](#), [3](#), [4](#), [5](#)
 de réalités [1](#)
Symétrie [1](#), [2](#)
 brisure [1](#)
 électrofaible [1](#)
Tauon [1](#)
Télépathie [1](#)
Téléportation [1](#)
Température [1](#)
Temps [1](#)
Tenlon [1](#)
Théorème
 de Bell [1](#)

de Noether [1](#), [2](#), [3](#)

Théorie

de l'atome de Bohr [1](#)

de la fonctionnelle de la densité [1](#)

de la relativité restreinte [1](#)

électrofaible [1](#), [2](#), [3](#)

quantique [1](#)

quantique des champs [1](#), [2](#), [3](#), [4](#), [5](#), [6](#), [7](#)

pour le noyau [1](#)

Thomson, George [1](#)

Thomson, Joseph John [1](#)

Tomonaga, Shinichiro [1](#)

Tonomura, Akira [1](#), [2](#)

Toy Story [1](#)

Travolta, John [1](#)

Tuyau d'arrosage [1](#)

Univers multiples [1](#)

intrication [1](#)

Vanner, Michael [1](#)

Variables cachées [1](#)

Vecteur(s) [1](#)

de spin [1](#)

Vertex [1](#)

Vitesse

de la lumière [1](#), [2](#), [3](#)

limite [1](#)

Voyage dans le temps [1](#)

W+ [1](#), [2](#)

Weinberg, Steven [1](#)

Wheatstone, Charles [1](#)

Wheeler, John Archibald [1](#), [2](#)

Wigner, Eugen [1](#)

Wilczek, Frank [1](#)

Wollan, Ernest [1](#)

Wootters, William [1](#)

Wu, Chien-Shiung [1](#)

Young, Thomas [1](#)

Yukawa, Hideki [1](#)

Table

[Couverture](#)

[Page de titre](#)

[Copyright](#)

[Dédicace](#)

[L'auteur](#)

[Exergue](#)

[Préface de Charles Antoine](#)

[Prologue. La fin](#)

[Chapitre 1. Rougir de fierté](#)

[Une lumineuse histoire](#)

[Nouvelle Vague](#)

[La catastrophe du siècle](#)

[Planck et vous !](#)

[Chapitre 2. En morceaux](#)

Albert comment ?

Une pomme pour deux Nobel

M. Einstein ? Vous êtes encore là ?

Pantalon quantique

Minuscules sauteurs

L'effet de Bohr

Rois des électrons

Chapitre 3. Aristocrates, bombes et pollen

Le duc de la dualité

Un peu de diffraction

Entre ici, Heisenberg

Éliminer les distractions

En a-t-on la certitude ?

Chapitre 4. Apprivoiser la bête

Oh, Docteur Schrödinger !

Un joli cadeau de Noël

Là où on va, on n'a pas besoin de particules

Le hic

L'imagination au pouvoir

Born to be alive

Mais qu'est-ce que ça veut dire ?

La lumière au bout du tunnel

À mots choisis

Chapitre 5. De plus en plus bizarre

Tout ce qu'on sait est faux

Tu me fais tourner la tête

Le choix de l'électron

Ne la laisse pas tomber, elle est si fragile...

À bien y regarder

Chapitre 6. La boîte et le chat

Recette danoise

On résume

Assez !

L'imbécile regarde le doigt

Le célèbre chat zombie

Chapitre 7. Le monde est une illusion

Tu me vois, tu me vois pas

Avoir un bon copain

Le hêtre qui n'était pas

Il changeait la vie

Chapitre 8. Quantum de la mort

Albert Einstein attaque la théorie quantique !

Faut-il vraiment exécuter le chat ?

Divisez pour mieux brouiller

Relativement simple

Code Quantum

Bell de jour

Chapitre 9. Téléportation, machines à remonter le temps et gros quanta

Instagram instantané

Téléportation, Scotty!

Est-ce que je vous ai dit que la mécanique quantique voyageait dans le temps ?

Le monde n'a pas à avoir une signification

Le chat de Schrödinger est sauvé/tué

Gros quanta

Chapitre 10. La mécanique quantique prouve que je suis Batman

Il y a plus d'une façon d'écorcher un chat de Schrödinger

Oubliez tout ce que j'ai dit

Bohm sweet Bohm

La poignée de main

And I will always love Hugh

Le matou revient (il est toujours vivant)

Le truc le plus important du livre

Décisions

Chapitre 11. Au bout du champ

Une question difficile

Le fantastique M. Faraday.

Ballade sur les champs

Embrassez-moi

Glace creuse et draps tendus

Vous n'êtes pas fait de particules

Chapitre 12. Lignes et rides

Une théorie pour les gouverner toutes

Le Petit Tambour

Je suis juste dessinée comme ça

La charge enfin expliquée

Casser la loi

C'est la théorie la plus précise de l'histoire des sciences

Comme tiré d'un film

Construisez vous-même votre détecteur de particules

L'arme préférée des super-vilains

Chapitre 13. Les particules font de la gonflette

Casseur d'ambiance

La ménagerie des particules

Le cri de la mouette

Haut en couleur

On se pose une colle

Un charme étrange

Tiercé gagnant ?

Chapitre 14. Chéri, où est passé mon Higgs ?

Sa Majesté, la Reine de la physique

Du calme, petit

Signe de faiblesse

Une idée inutile

Miroirs brisés

Ferme la bouche quand tu manges un boson

Qui s'en fiche ?

Le champ qui conservait la masse et brisait la symétrie

Emmy n'aime qu'eux

Chapitre 15. Le problème avec G

[Tout, pour toujours, ou presque](#)

[Plus faible que faible](#)

[L'exclue](#)

[L'arbre de la connaissance](#)

[Le commencement](#)

[Chronologie de la physique quantique](#)

[Annexe I. Le spin d'un peu plus près](#)

[Annexe II. Résoudre Schrödinger](#)

[Annexe III. La bicyclette d'Einstein](#)

[Annexe IV. Apprivoiser l'infini](#)

[Annexe V. Peindre avec toutes les couleurs des quarks](#)

[Remerciements](#)

[Notes](#)

[Index](#)

Notes

Prologue : La fin

- [1.](#) R. P. Feynman, *QED : The Strange Theory of Light and Matter* (Londres, Penguin, 1985).
- [2.](#) S. Giles, *Theorising Modernism : Essays in Critical Theory* (Londres, Routledge, 1993).

Chapitre 1 : Rougir de fierté

1. A. Marmodoro, *Aristotle on Perceiving Objects* (Oxford, Oxford University Press, 2014).
2. J. Gribbin et M. Gribbin, *Science : A History in 100 Experiments* (Londres, William Collins, 2016).
3. E. Zalta, *Stanford Encyclopedia of Philosophy* (22 août 2017) <https://plato.stanford.edu/entries/descartes-physics/> (accédé le 15 décembre 2018).
4. I. Newton, *Opticks* (1704, nouvelle édition à New York, Dover Publications, 1952).
5. NdT : Thomas Young fut le premier à déchiffrer les hiéroglyphes, même s'il s'était trompé sur environ la moitié d'entre eux, ce pourquoi Champollion, dont la connaissance du copte lui avait permis d'aboutir à une bien meilleure traduction, refusera toute sa vie d'accorder la paternité de sa découverte à Young.
6. A. Robinson, *The Last Man Who Knew Everything* (Londres, Oneworld Publications, 2006).
7. P. Ehrenfest, "On the Necessity of Quanta" (1911), traduction L. Navarro et E. Perez, *Arch. Hist. Exact Sci.*, vol. 58 (2004), pp. 97–141.
8. A. Lightman, *The Discoveries* (New York, Vintage, 2006).
9. E. Cartmell et G. Fowles, *Valency and Molecular Structure* (4^e édition, Londres, Butterworths, 1977).

Chapitre 2 : En morceaux

1. F. Swain, *The Universe Next Door* (Londres, John Murray, 2017).
2. G. Lewis, “The Conservation of Photons”, *Nature*, vol. 118, no. 2981 (1926), pp. 874 – 5.
3. A. Howie, “Akira Tonomura (1941 – 2012)”, *Nature*, vol. 486, no. 7403 (2012), pp. 324.
4. N. Blaedal, *Harmony and Unity : The Life of Niels Bohr* (Lexington, Plunkett Lake Press, 2017).
5. B. Franklin, “Experiments and Observations on Electricity”, *Pennsylvania Gazette* (19 octobre 1752).
6. J. J. Thomson, *Recollections and Reflections* (Londres, G. Bell and Sons, 1936).
7. I. Asimov, *Words of Science* (Londres, Harrap, 1974).

Chapitre 3 : Aristocrates, bombes et pollen

1. E. Wollan et L. Borst, "Physics Section III Monthly Report for the Period Ending December 31, 1944", *Oak Ridge, Tennessee Clinton Laboratories, Metallurgical Report*, no. M-CP-2222 (1945).
2. S. Eibenberger *et al.*, "Matter-wave Interference with Particles Selected from a Molecular Library Masses Exceeding 10,000 amu", *Phys. Chem. Chem. Phys.*, vol. 15 (2013), pp. 14696–700.
3. D. Cassidy, "The Sad Story of Heisenberg's Doctoral Oral Exam", *APS News*, vol. 7, no. 1 (1998).
4. J. Gribbin, *In Search of Schrodinger's Cat* (Londres, Transworld, 1984)
5. D. Charles, "Heisenberg's Principles Kept Bomb From Nazis", *New Scientist*, no. 1837 (1992).
6. J. Glanz, "Letter May Solve Nazi A-Bomb Mystery", *New York Times* (7 janvier 2002).
7. G. Blazeski, "The Nazis were harassing Heisenberg, so his mother called Himmler's mom & asked her if she would please tell the SS to give her son a break", *Vintage News* (8 avril 2017) :
<https://www.thevintagenews.com/2017/04/08/the-nazis-wereharassing-heisenberg-so-his-mother-called-himmlers-mom-askedher-if-she-would-please-tell-the-ss-to-give-her-son-a-break/>(accédé le 15 décembre 2018)
8. M. Gladwell, "No Mercy", *New Yorker* (4 septembre 2006).
9. A. Trabesinger, "The Path to Agreement", *Nature Physics*, vol. 4, no. 349 (2008).
10. D. Kevles, *The Physicists : The History of a Scientific Community in Modern America* (Cambridge, MA : Harvard University Press, 1995).
11. W. Heisenberg, *Physics and Beyond : Encounters and Conversations* (Londres, G. Allen & Unwin, 1971).

Chapitre 4 : Apprivoiser la bête

1. W. Moore, *Schrödinger : Life and Thought* (Cambridge, Cambridge University Press, 1989).
2. Moore, *Schrödinger*.
3. E. Schrödinger, "An Undulating Theory of the Mechanics of Atoms and Molecules", *Physical Review*, vol. 28, no. 6 (1926).
4. Moore, *Schrödinger*.
5. M. Brooks, *The Quantum Astrologer's Handbook* (Brunswick, Scribe, 2017).
6. Narcotics Anonymous, *World Service Conference of Narcotics Anonymous* (novembre 1981) : https://web.archive.org/web/20121202030403/http://www.amonymifoundation.org/uploads/NA_Approval_Form_Scan.pdf (accédé le 15 décembre 2018).
7. N. Camus *et al.*, "Experimental Evidence for Quantum Tunnelling Time", *Phys. Rev. Lett.*, vol. 119 (2017), pp. 23201.

Chapitre 5 : De plus en plus bizarre

- [1.](#) W. Gerlach et O. Stern, “Der Experimentelle Nachweis der Richtungsquantelung im Magnetfeld”, *Z. für Physik*, vol. 9 (1922), p. 349–52.

Chapitre 6 : La boîte et le chat

1. R. Kastern, *The Transactional Interpretation of Quantum Mechanics* (Cambridge, Cambridge University Press, 2012).
2. N. D. Mermin, “What’s Wrong with this Pillow ?”, *Physics Today*, vol. 42, no. 4 (1989).
3. I. Born, *The Born – Einstein Letters* (New York : Walker and Company, 1971).
4. W. Heisenberg, *Physics and Beyond*, trans. A. Pomerans (New York, Harper and Row, 1971).
5. D. Lindley, *Where Does the Weirdness Go ?* (New York, Vintage, 1997).
6. Dans un article de Ruth Braunizer, la fille d’Erwin Schrödinger, intitulé “Memories of Dublin”, reproduit dans G. Holfter (ed.), *German Speaking Exiles in Ireland 1933 – 1945* (Amsterdam : Rodopi, 2006).
7. C. McDonnell, “Schrödinger’s Cat”, *GITC Review*, vol. 13, no. 1 (2014).

Chapitre 7 : Le monde est une illusion

- [1.](#) J. von Neumann, *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*, traduction R. Bayer (Princeton, Princeton University Press, 1955).
- [2.](#) E. Wigner, "Remarks on the Mind-Body Question", dans I. J. Good (ed.), *The Scientist Speculates* (Londres, Heinemann, 1961).
- [3.](#) *There was a young man who said 'God/Must find it exceedingly odd/To think that a tree/Should continue to be/When there's no one about in the quad.'*
Reply : 'Dear Sir : Your astonishment's odd ;/I am always about in the quad./And that's why the tree/Will continue to be/Since observed by, Yours faithfully, God.'

Chapitre 8 : Quantum de la mort

- [1.](#) A. Einstein, B. Podolsky et N. Rosen, “Can Quantum Mechanical Description of Reality be Considered Complete ?”, *Phys. Rev.*, vol. 47 (1935).
- [2.](#) E. Schrödinger, “Discussion of Probability Relations Between Separated Systems”, *Math. Proc. of the Cam. Phil. Soc.*, vol. 31, no. 4 (1935), pp. 555 – 63.
- [3.](#) J. E. Haynes, H. Klehr et A. Vassiliev, *Spies : The Rise and Fall of the KGB in America* (New Haven et Londres, Yale University Press, 2009).
- [4.](#) A. Whitaker, *John Stewart Bell and Twentieth-Century Physics* (Oxford, Oxford University Press, 2016).
- [5.](#) A. Aspect, P. Grainger et G. Roger, “Experimental Realization of Einstein–Podolsky–Rosen–Bohm Gedanken experiment : A New Violation of Bell’s Inequalities”, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 49, no. 2 (1982), pp. 91 – 4.

Chapitre 9 : Téléportation, machines à remonter le temps et gros quanta

- [1.](#) R. Ji-Gang *et al.*, “Ground to Satellite Quantum Teleportation”, *Nature*, vol. 549, no. 7670 (2017), pp. 70–3.
- [2.](#) X. S. Ma *et al.*, “Quantum Teleportation Over 143 Kilometers Using Active Feed-forward”, *Nature*, vol. 489, no. 7415 (2012), pp. 269–73.
- [3.](#) C. Bennett *et al.*, “Teleporting an Unknown Quantum State via Dual Classical and Einstein – Podolsky – Rosen Channels”, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 70, no. 13 (1993), pp. 1895–9.
- [4.](#) P. Ball, “Quantum Teleportation is Even Weirder Than You Think”, *Nature Column : Muse* (20 juillet 2017).
- [5.](#) Y. H. Kim *et al.*, “A Delayed Choice Quantum Eraser”, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 84 (2000), pp. 1–5.
- [6.](#) C. Marletto *et al.*, “Entanglement Between Living Bacteria and Quantized Light Witnessed by Rabi Splitting”, *Journal of Phys. Comm.*, vol. 2, no. 40 (2018).

Chapitre 10 : La mécanique quantique prouve que je suis Batman

1. W. Keepin, “Lifework of David Bohm” (11 mars 2008) : http://www.vision.net.au/~apaterson/science/david_bohm.htm (accédé le 15 décembre 2018).
2. Y. Couder *et al.*, “Walking Droplets : a Form of Wave-particle Duality at Macroscopic Level ?”, *Europhys. News*, vol. 41, no. 1 (2010), pp. 14–18.
3. J. Bush *et al.*, “Walking Droplets Interacting with Single and Double Slits”, *J. Fluid Mech.*, vol. 835 (2018), pp 1136–56 ; T. Bohr *et al.*, “Double Slit Experiment with Single Wave-driven Particles and Its Relation to Quantum Mechanics”, *Phys. Rev. E.*, vol. 92 (2015).
4. J. Cramer, “The Transactional Interpretation of Quantum Mechanics and Quantum Nonlocality” (2015) : <https://arxiv.org/pdf/1503.00039.pdf> (accédé le 15 décembre 2018).
5. D. Deutsch, *The Beginning of Infinity* (Londres, Penguin, 2012).
6. F. Tipler, *The Physics of Immortality* (New York, Bantam Doubleday Dell Publishing Group, 2000).
7. P. Byrne, *The Many Worlds of Hugh Everett III : Multiple Universes, Mutual Assured Destruction and the Meltdown of a Nuclear Family* (Oxford, Oxford University Press, 2010).
8. P. Ball, “Experts Still Split about What Quantum Theory Means”, *Nature News* (11 janvier 2013). Le sondage d’origine peut encore être consulté ici : <https://arxiv.org/pdf/1301.1069.pdf> (accédé le 15 décembre 2018).
9. I. Asimov, “Science and the Bible”, entretien avec le Prof. Asimov par P. Kurtz dans *Free Enquiry*, printemps 1982.

Chapitre 11 : Au bout du champ

- [1.](#) I. Asimov, *New Guide to Science* (Harmondsworth, Penguin Press Science, 1993).
- [2.](#) G. Farmelo, *The Strangest Man : The Hidden Life of Paul Dirac, Quantum Genius* (Londres, Faber and Faber, 2009).
- [3.](#) P. Dirac, *Lectures on Quantum Mechanics* (New York, Dover Publications, 2001).

Chapitre 12 : Lignes et rides

1. C. Sykes, *No Ordinary Genius* (Londres, W. Norton & Company, 1994).
2. J. Gleick, *Genius* (Londres, Little, Brown, 1992).
3. Lettre de Robert Oppenheimer à Robert Birge, datée du 4 novembre 1943.
4. R. Leighton, *Vous voulez rire, M. Feynman ?* traduction de F. Balibar (Paris, Odile Jacob, 2007).
5. A. Zee, *Quantum Field Theory in a Nutshell* (Princeton, Princeton University Press, 2010).
6. Sykes, *No Ordinary Genius*.
7. M. Nio *et al.*, “Complete Tenth-order QED Contribution to the Muong-2” (2012) : <https://arxiv.org/abs/1205.5370> (accédé le 15 décembre 2018).
8. T. Lancaster et S. Blundell, *Quantum Field Theory for the Gifted Amateur* (Oxford, Oxford University Press, 2015).
9. R. P. Feynman, “The Theory of Positrons”, *Phys. Rev.*, vol. 76 (1949).
10. C. D. Anderson, “The Positive Electron”, *Phys. Rev.*, vol. 43 (1933).
11. D. Dooling, “Reaching for the Stars”, *Science at NASA* (12 avril 1999) : https://science.nasa.gov/science-news/science-atnasa/1999/prop12apr99_1 (accédé le 15 décembre 2018).
12. W. Bertsche *et al.*, “Confinement of Antihydrogen for 1,000 seconds”, *Nature Phys.*, vol. 7, no. 7 (2011), pp. 558–64.

Chapitre 13 : Les particules font de la gonflette

1. Auteur inconnu, “Who Ordered That ?”, *Nature Editorial*, vol. 531 (2016), pp. 139–40.
 2. M. L. Perl *et al.*, “Evidence for Anomalous Lepton Production in $e + e^-$ Annihilation”, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 35, no. 22 (1975).
 3. R. P. Feynman, *QED : The Strange Theory of Light and Matter* (Londres, Penguin, 1985).
 4. M. Kaku, “Beauty Is Truth”, *Forbes Magazine* (7 octobre 2008).
 5. L. Lederman, “Neutrino Physics”, conférence du 9 janvier 1963, *Brookhaven Lecture Series on Unity of Science*, BNL 787, no. 23.
 6. Entretien avec Gell-Mann : <https://www.youtube.com/watch?v=po-SQ33Kn6U> (accédé le 15 décembre 2018).
- [« Trois quarks pour Monsieur Mark », ou « trois railleries », selon les notes de Joyce, NdT].
7. F. Wilczek, « Time’s (Almost) Reversible Arrow », *Quanta Magazine* (7 janvier 2016).
 8. M. E. Peskin et D. V. Schoeder, *An Introduction to Quantum Field Theory* (Boston, Addison-Wesley, 1995).
 9. NdT : force nucléaire forte, en français.

Chapitre 14 : Chéri, où est passé mon Higgs ?

1. K. Jepsen, “Famous Higgs Analogy, Illustrated”, *Symmetry Magazine* (9 juin 2013).
2. J. W. Brewer et M. K. Smith, *Emmy Noether : A Tribute to Her Life and Work* (New York, Marcel Dekker Inc., 1981).
3. . A. Einstein, “Obituary of Amalie “Emmy” Noether”, *New York Times* (5 mai 1935).
4. Auteur inconnu, “Why Is the Higgs Discovery so Significant ?” *Science and Technology Facilities Council* (22 septembre 2017) : <https://stfc.ukri.org/research/particle-physics-and-particle-astronautics/peter-higgs-a-truly-british-scientist/why-is-the-higgs-discovery-so-significant> (accédé le 15 décembre 2018).
5. P. Rogers, “The Heart of the Matter”, *Independent* (1^{er} septembre 2004).
6. L. Lederman, *The God Particle* (New York, Dell, 1993).

Chapitre 15 : Le problème avec G

- [1.](#) W. Stukeley, *Memoirs of Sir Isaac Newton's Life* (1752, nouvelle édition à Londres, The Royal Society, 2010).
- [2.](#) NdT : Bien plus que ça en réalité.
- [3.](#) A. D. Aczel, *God's Equation* (New York, Delta, 2000).