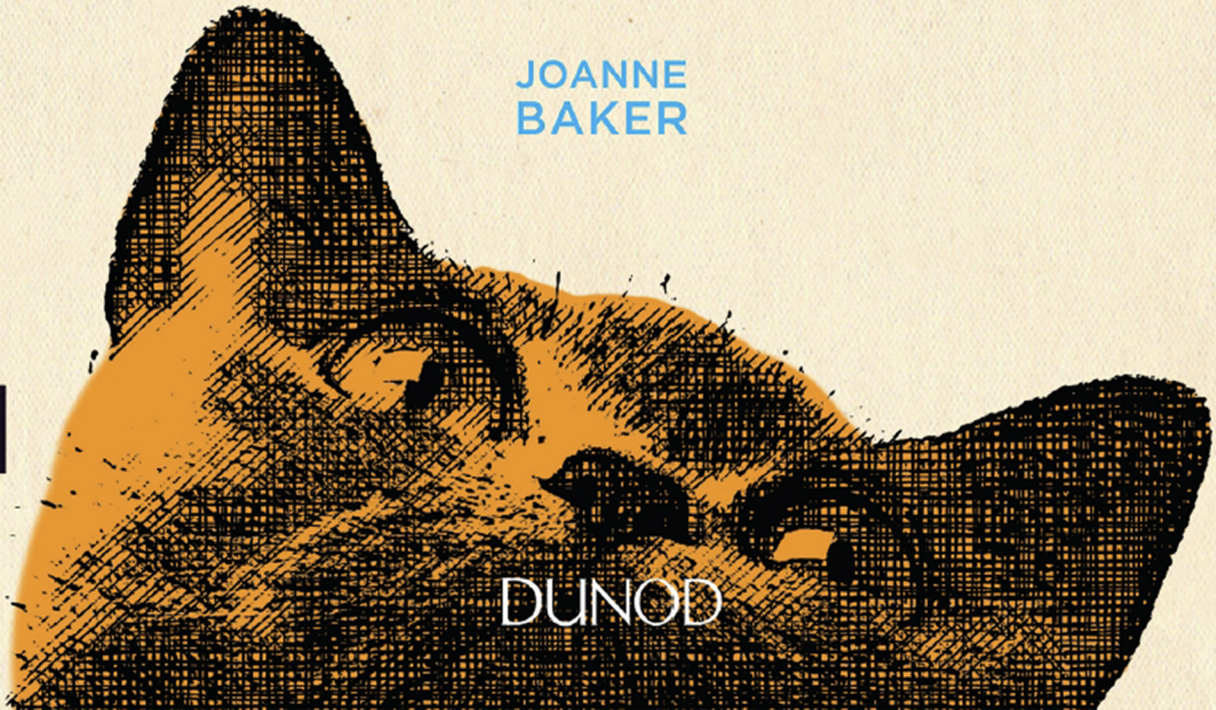
# 50

## CLÉS POUR COMPRENDRE LA

# PHYSIQUE QUANTIQUE

JOANNE
BAKER



DUNOD

# 50 CLÉS POUR COMPRENDRE LA PHYSIQUE QUANTIQUE

JOANNE
BAKER

Traduit de l'anglais par Françoise Pétry et Julien Randon-Furling

DUNOD

# Table des matières

**Introduction 3**

LES LEÇONS DE LA LUMIÈRE

**01** La conservation de l'énergie **4**
**02** La loi de Planck **8**
**03** L'électromagnétisme **12**
**04** Les franges de Young **16**
**05** La vitesse de la lumière **20**
**06** L'effet photoélectrique **24**

COMPRENDRE LES ÉLECTRONS

**07** La dualité onde-corpuscule **28**
**08** L'atome de Rutherford **32**
**09** Les sauts quantiques **36**
**10** Les raies de Fraunhofer **40**
**11** L'effet Zeeman **44**
**12** Le principe d'exclusion de Pauli **48**

LA MÉCANIQUE QUANTIQUE

**13** La mécanique des matrices **52**
**14** L'équation de Schrödinger **56**
**15** Le principe d'incertitude d'Heisenberg **60**
**16** L'interprétation de Copenhague **64**
**17** Le chat de Schrödinger **68**
**18** Le paradoxe EPR **72**
**19** L'effet tunnel **76**
**20** La fission nucléaire **80**
**21** L'antimatière **84**

LES CHAMPS QUANTIQUES

**22** La théorie quantique des champs **88**
**23** Le décalage de Lamb **92**
**24** L'électrodynamique quantique **96**
**25** La désintégration bêta **100**
**26** L'interaction faible **104**
**27** Les quarks **108**
**28** La diffusion inélastique profonde **112**
**29** Chromodynamique quantique **116**
**30** Le modèle standard **120**

LE COSMOS QUANTIQUE

**31** Les symétries brisées **124**
**32** Le boson de Higgs **128**
**33** La supersymétrie **132**
**34** La gravitation quantique **136**
**35** Le rayonnement de Hawking **140**
**36** La cosmologie quantique **144**
**37** La théorie des cordes **148**

AUX FRONTIÈRES DE LA RÉALITÉ QUANTIQUE

**38** Des mondes multiples **152**
**39** Les variables cachées **156**
**40** Les inégalités de Bell **160**
**41** Les expériences d'Aspect **164**
**42** Une gomme quantique **168**

LES APPLICATIONS QUANTIQUES

**43** La décohérence quantique **172**
**44** Les qubits **176**
**45** La cryptographie quantique **180**
**46** Les boîtes quantiques **184**
**47** La supraconduction **188**
**48** Les condensats de Bose-Einstein **192**
**49** La biologie quantique **196**
**50** La conscience quantique **200**

**Glossaire 204**
**Index 206**

# Introduction

L'histoire de la physique quantique est aussi riche que les phénomènes qu'elle décrit sont étranges. Depuis une centaine d'années, de nombreux personnages tous plus imaginatifs les uns que les autres – d'Albert Einstein à Richard Feynman – se sont penchés sur le cœur des atomes et la nature des forces qui y opèrent. Mais la physique a surpassé leurs imaginations pourtant fécondes.

Le monde quantique est contrôlé par la physique de l'infiniment petit. Mais les événements subatomiques ne sont pas prévisibles et sont souvent déroutants. Des particules élémentaires apparaissent et disparaissent, et ce qui semblait familier, comme la lumière, se comporte un jour comme une onde et le lendemain comme un flux de billes.

Plus nous en avons appris, plus l'univers quantique est devenu étrange. L'information peut être « intriquée » entre des particules, ce qui augmente l'éventualité que tout soit connecté par des fils invisibles. Les messages quantiques sont transmis et reçus simultanément, ce qui semble en contradiction avec le principe selon lequel aucun signal ne peut être transmis plus vite que la lumière.

La physique quantique n'est pas intuitive – le monde subatomique se comporte différemment du monde classique qui nous est familier. Pour la comprendre, nous allons suivre la façon dont cette discipline s'est construite et découvrir les questions auxquelles les pionniers de la théorie se sont trouvés confrontés.

Les premiers chapitres résument comment elle est apparue à l'aube du XX$^{e}$ siècle, quand les physiciens commencèrent à disséquer l'atome et à comprendre la nature de la lumière. Max Planck introduisit le terme de « quanta » , persuadé que l'énergie n'était pas continue, mais se présentait sous forme de paquets. L'idée fut appliquée à la structure de l'atome, où les électrons tournent autour d'un noyau compact.

La mécanique quantique émergea de ces travaux, avec tous ses paradoxes. En même temps que la physique des particules progressait, les théories quantiques des champs et le modèle standard apparurent pour tenter d'apporter des explications. Nous explorerons aussi quelques conséquences de ces théories, par exemple sur la cosmologie quantique et les concepts de réalité, et nous évoquerons des développements techniques récents, tels les boîtes quantiques et les ordinateurs quantiques.

# 01 La conservation de l'énergie

**L'énergie alimente le mouvement et le changement. Elle se métamorphose, devenant la chaleur dégagée par un feu de bois ou la vitesse acquise par un torrent dévalant une montagne. Elle peut changer, mais ne se perd ni ne se crée : elle se conserve.**

L'idée selon laquelle l'énergie transforme le monde remonte à l'Antiquité grecque – *energeia* signifie « activité » en grec. Nous savons que son intensité croît avec la force appliquée et la distance parcourue par l'objet qui la subit. Mais l'énergie reste un concept délicat pour les scientifiques. C'est d'ailleurs en cherchant à en percer la nature qu'ils aboutirent aux idées fondamentales de la physique quantique.

Lorsque nous poussons un chariot de supermarché, il roule grâce à l'énergie que nous lui communiquons. Son mouvement est alimenté par la combustion de nutriments dans notre corps, source de la force déployée par nos muscles. De même, lorsque nous lançons une balle, de l'énergie chimique est transformée en mouvement. La chaleur du Soleil, quant à elle, provient d'une réaction nucléaire au cours de laquelle des noyaux atomiques fusionnent tout en libérant de l'énergie.

Des balles de pistolet aux éclairs, l'énergie prend des formes variées. Mais nous pouvons toujours en retrouver l'origine. Ainsi, la poudre à canon est à l'œuvre dans le pistolet, et les mouvements des molécules produisent l'électricité statique accumulée dans les nuages, puis libérée dans les éclairs. Lorsque l'énergie change de forme, de la matière se met en mouvement ou se transforme.

## chronologie

**Vers 600 av. J.-C.**
Thalès de Milet reconnaît les métamorphoses de la matière

**1638**
Galilée constate que l'énergie change de forme dans le mouvement d'un pendule

**1676**
Leibniz nomme l'énergie *vis viva,* force vitale

Parce qu'elle change seulement de forme, l'énergie n'est jamais détruite ni créée. Elle se conserve : la quantité totale d'énergie dans l'Univers ou dans un système parfaitement isolé est constante.

**Conservation** Dans l'Antiquité grecque, Aristote fut le premier à réaliser que l'énergie semblait se conserver, même s'il ne disposait pas de moyens pour l'établir. Il fallut des siècles aux premiers scientifiques (nommés alors philosophes de la nature) pour comprendre les différentes formes d'énergie et pour les relier.

Au début du XVII^e siècle, Galilée fit une série d'expériences avec un pendule et observa qu'il y avait un lien entre la vitesse du pendule au plus bas de sa trajectoire et la hauteur maximale atteinte. Plus le balancier s'écartait de sa position d'équilibre, plus la vitesse selon l'axe était élevée ; ensuite, il remontait à la même hauteur de l'autre côté. Sur l'ensemble du cycle, on assistait ainsi à des allers-retours entre énergie « potentielle » (liée à la hauteur au-dessus du sol) et énergie « cinétique » (liée à la vitesse).

À la même époque, le mathématicien Gottfried Leibniz désignait l'énergie sous le terme de *vis viva*, la force vitale. Ce n'est qu'au XIX^e siècle que le physicien Thomas Young introduisit le terme d'énergie dans le sens que nous lui connaissons aujourd'hui. Mais personne ne comprenait la nature exacte de l'énergie.

Bien qu'elle agisse sur des corps immenses, sur les étoiles ou même l'Univers tout entier, l'énergie est par essence un phénomène qui agit à petite échelle. L'énergie chimique provient ainsi du réarrangement d'atomes et de molécules au cours de réactions. La lumière et les autres formes d'énergie électromagnétique se transmettent sous forme d'ondes qui interagissent avec les atomes. La chaleur reflète l'agitation moléculaire, et un ressort métallique comprimé stocke de l'énergie élastique.

L'énergie est intimement liée à la nature de la matière. En 1905, Albert Einstein établit que matière et énergie sont équivalentes. D'après sa célèbre équation $E = mc^2$, l'énergie ($E$) libérée par la destruction d'une masse ($m$) est égale à $m$ fois le carré de la vitesse de la lumière ($c$). La lumière parcourant 300 000 kilomètres par seconde (dans le vide), seuls quelques atomes qui se brisent suffisent à libérer une quantité colossale d'énergie. Les centrales nucléaires et le Soleil libèrent leur énergie de cette façon.

**1807** Young emploie le terme « énergie »

**1850** Rudolf Clausius définit l'entropie et énonce le second principe de la thermodynamique

**1860** Maxwell imagine le « démon » qui porte son nom

**1900** Max Planck décrit les « quanta » d'énergie

**1905** Einstein établit que masse et énergie sont équivalentes

**D'autres lois** D'autres grandeurs liées à l'énergie sont également conservées, par exemple la quantité de mouvement. Égale au produit de la masse par la vitesse, la quantité de mouvement indique la difficulté à freiner un corps en mouvement. Ainsi, un chariot de supermarché plein a une quantité de mouvement supérieure à celle d'un chariot vide et est plus difficile à arrêter. La quantité de mouvement a une direction et une valeur, les deux étant conservées. Cela s'applique au billard : quand une boule en mouvement frappe une boule au repos, la somme des vitesses et la combinaison des trajectoires des deux boules après le choc sont équivalentes à la vitesse et à la direction de la première boule avant le choc.

Pour les objets en rotation, l'équivalent de la quantité de mouvement est le moment angulaire et, lui aussi, se conserve. Pour un objet en rotation autour d'un point, le moment angulaire est défini par le produit de la quantité de mouvement de l'objet par sa distance à ce point. Les patineurs savent bien que le mouvement angulaire se conserve : ils tournent lentement lorsque leurs bras et jambes sont étirés, et de plus en plus vite quand ils les ramènent le long du corps.

Selon une autre loi, la chaleur diffuse d'un corps chaud vers un corps froid : c'est le second principe de la thermodynamique. La chaleur correspond à l'agitation des molécules : dans les corps chauds, l'agitation et le désordre sont plus grands que dans les corps froids. Les physiciens nomment « entropie » cette quantité de désordre ou d'aléatoire. D'après ce principe, l'entropie augmente sans cesse pour tout système fermé, isolé de toute influence extérieure.

Mais alors comment les réfrigérateurs fonctionnent-ils ? Ils dégagent de la chaleur. Pour s'en rendre compte, il suffit de passer la main derrière l'appareil. Les réfrigérateurs respectent le second principe de la thermodynamique : ils produisent plus d'entropie en réchauffant l'air extérieur qu'ils n'en extraient pour refroidir l'intérieur. L'entropie du système réfrigérateur-air extérieur augmente.

Beaucoup d'inventeurs et de physiciens se sont efforcés de mettre en défaut le second principe. Aucun n'y est parvenu. Ils ont rêvé de mouvement perpétuel : une tasse se vidant et se remplissant toute seule, une roue se propulsant d'elle-même grâce à un système de poids glissant le long de ses rayons, etc. Mais, en fait, tous les dispositifs perdent toujours de l'énergie, que ce soit, par exemple, de la chaleur ou du bruit.

Dans les années 1860, le physicien écossais James Clerk Maxwell conçut une expérience de pensée où de la chaleur serait produite sans augmentation de l'entropie – mais cette expérience n'a jamais pu être réalisée sans une

**« C'est simplement un fait étrange que nous puissions calculer un certain nombre et que, lorsque nous avons terminé d'observer l'évolution de la nature et que nous recalculons ce nombre, il soit le même. »**

**Richard Feynman, *Le Cours de physique de Feynman* (1979, 1re édition)**

source extérieure d'énergie. Maxwell avait imaginé de juxtaposer deux compartiments contenant du gaz, tous deux à la même température, et de les relier au moyen d'un petit trou dans la paroi qui les séparait. Si l'on chauffe un des compartiments, les molécules qu'il contient se déplacent plus vite. Normalement, quelques-unes vont se glisser de l'autre côté par le trou et, progressivement, la température finira par être la même de part et d'autre de la paroi.

Pourtant Maxwell envisagea une façon d'obtenir un résultat différent : il imagina un minuscule démon (le « démon de Maxwell »), qui trierait les molécules en fonction de leur vitesse. Il prendrait les molécules les plus rapides du compartiment froid et les introduirait dans le compartiment chaud, violant ainsi le second principe de la thermodynamique. Mais personne n'y est jamais parvenu, et le second principe est toujours appliqué.

Combinées à une connaissance sans cesse améliorée de la structure de l'atome, les idées et les lois concernant la façon de transférer l'énergie ont abouti à la naissance de la physique quantique au début du XXe siècle.

## l'idée clé

# Énergie polymorphe

# 02 La loi de Planck

**En expliquant pourquoi les braises sont rouges plutôt que bleues, le physicien allemand Max Planck fut à l'origine d'une révolution qui donna naissance à la physique quantique. Cherchant à mettre en équations la lumière et la chaleur, il imagina que l'énergie formait de petits paquets, des « quanta », et, ce faisant, il parvint à expliquer pourquoi les corps chauds émettent si peu d'ultraviolets.**

C'est l'hiver, vous avez froid et vous imaginez la douce chaleur d'un feu de cheminée, avec ses braises rougeoyantes et ses flammes jaunes. Pourquoi les braises sont-elles rouges ? Pourquoi la pointe d'un tisonnier placée dans le feu devient-elle rouge elle aussi ?

Les braises atteignent des températures de plusieurs centaines de degrés. La lave volcanique, plus chaude encore, approche 1 000 °C. La lave en fusion brille encore plus intensément, virant à l'orange ou au jaune, comme l'acier fondu à la même température. Les filaments des ampoules au tungstène sont encore plus chauds. Quand la température atteint des milliers de degrés, comme à la surface d'une étoile, la lumière devient blanche.

**Le rayonnement du corps noir** Portés à des températures de plus en plus élevées, les corps émettent de la lumière dont les longueurs d'onde sont de plus en plus courtes. Les matériaux foncés, tels le charbon ou la fonte, qui absorbent et émettent bien la chaleur, présentent le même spectre de longueurs d'onde émises à une température donnée : c'est le « rayonnement du corps noir ».

La longueur d'onde de l'énergie lumineuse présente un « pic », dont la position dépend de la température du corps noir. L'énergie croît rapidement avant le pic aux faibles longueurs d'onde et diminue plus lentement après. Par conséquent, la « courbe de rayonnement du corps noir » est asymétrique.

## chronologie

**1860** Le terme de « corps noir » est utilisé par Kirchhoff

**1896** Wien publie sa loi du rayonnement dans les hautes fréquences

**1900** Rayleigh publie sa loi, qui conduit à la « catastrophe de l'ultraviolet »

**1901** Planck publie la loi sur le rayonnement du corps noir

## Couleur et température

La couleur d'une étoile donne sa température. Le Soleil, dont la température de surface est de l'ordre de 6 000 kelvins, est jaune, tandis que la géante rouge Bételgeuse (dans la constellation d'Orion), plus froide en surface, est de l'ordre de 3 000 kelvins. Sirius, l'étoile la plus brillante, scintille en bleu-blanc et atteint 30 000 kelvins.

Une braise ardente émet essentiellement de la lumière orange, mais aussi des longueurs d'onde un peu inférieures, dans le jaune, et un peu supérieures, dans le rouge. Elle n'émet quasiment pas dans le bleu. La courbe de rayonnement de l'acier en fusion, dont la température est plus élevée, se décale vers des longueurs d'onde inférieures, avec des émissions dans le jaune, avec un peu d'orange et une touche de vert.

**La catastrophe de l'ultraviolet** À la fin du XIX^e^ siècle, les physiciens connaissaient le rayonnement du corps noir et avaient établi son spectre de longueurs d'onde. Mais ils n'en comprenaient pas la forme : différentes théories en expliquaient certaines caractéristiques, mais jamais l'ensemble. Wilhelm Wien avait établi une équation qui décrivait bien la rapide décroissance du spectre vers le bleu, tandis que lord Rayleigh et James Jeans en expliquaient l'extrémité rouge. Mais aucune des deux formules ne décrivait l'ensemble du spectre.

La solution de Rayleigh et Jeans soulevait un problème : leur théorie prédisait que l'énergie libérée était infinie dans l'ultraviolet et aux longueurs encore plus courtes. On parla de « catastrophe de l'ultraviolet ».

**« Les découvertes et les connaissances scientifiques sont dues à ceux qui s'y sont consacrés sans la moindre application pratique à l'esprit. »**

**Max Planck, *The New Science* (1959)**

**1905**
Einstein identifie le photon et remédie à la « catastrophe de l'ultraviolet »

**1918**
Planck reçoit le prix Nobel

**1994**
L'équipe COBE obtient le spectre du corps noir du fond diffus cosmologique

**2009**
La sonde spatiale *Planck* est lancée

### Max Planck (1858-1947)

La première passion du jeune Max Planck, à Munich, en Allemagne, fut la musique. Un jour, il demanda à un musicien où il fallait étudier la musique, et il se vit répondre que s'il n'était pas capable de trouver la réponse tout seul, il devait faire autre chose. Il se tourna donc vers la physique, mais son professeur le prévint qu'il s'agissait d'une science complète et terminée : il n'y avait plus rien à découvrir. Heureusement, Planck ignora cette mise en garde et proposa le concept de quanta. Il dut surmonter plusieurs épreuves : la mort de sa femme et la perte de deux de ses fils durant les deux conflits mondiaux. Resté en Allemagne, il contribua à reconstruire la communauté scientifique après la guerre. Aujourd'hui, les instituts de recherche allemands les plus prestigieux portent son nom.

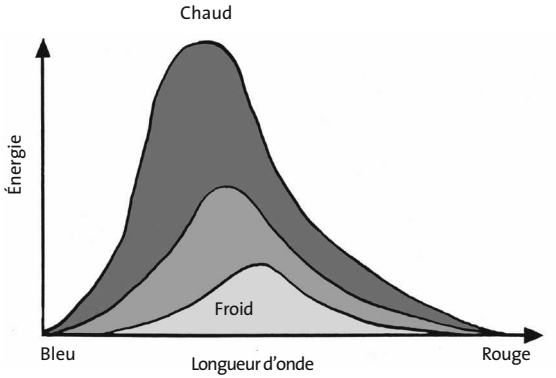
Le physicien allemand Max Planck, qui tentait d'unifier les théories physiques de la lumière et de la chaleur, proposa une solution. Planck aimait les raisonnements mathématiques et attaquait les problèmes physiques en partant des données les plus élémentaires. Fasciné par les lois fondamentales de la physique, en particulier le second principe de la thermodynamique et les équations de Maxwell sur l'électromagnétisme, il essaya de montrer qu'elles étaient liées.

**Les quanta** Planck travaillait en toute confiance avec ses équations, sans se soucier de ce que les différentes étapes de ses calculs signifiaient dans la réalité. Pour simplifier les calculs, il eut l'idée d'une transformation astucieuse. En effet, les difficultés provenaient en partie de ce que l'électromagnétisme est décrit en termes d'ondes alors que la température l'est en termes statistiques, l'énergie se répartissant entre un grand nombre d'atomes ou de molécules. Planck décida d'aborder l'électromagnétisme de la même façon que la thermodynamique. En lieu et place d'atomes, il imagina que de minuscules oscillateurs portaient l'énergie électromagnétique, celle-ci se trouvant ainsi répartie entre de multiples entités.

Planck fixa l'énergie de chaque oscillateur en fonction de la fréquence, de sorte que $E = h\nu$, où $E$ est l'énergie, $\nu$ la fréquence de l'onde et $h$ la constante dite de Planck. Ces unités d'énergie furent nommées quanta, du terme latin signifiant « combien ».

Dans les équations de Planck, les quanta correspondant aux hautes fréquences ont une énergie élevée. La quantité totale d'énergie disponible étant finie, on ne peut avoir un trop grand nombre de quanta d'énergie élevée dans le système. C'est un peu comme en économie. Si vous avez 99 euros dans votre portefeuille, vous avez sans doute plus de petites coupures que de grosses, par exemple quelques billets de 5 euros, quelques billets de 10 ou 20 euros et au plus un seul billet de 50 euros. De même, les quanta d'énergie élevée sont rares.

Planck calcula la répartition la plus probable des quanta d'énergie pour une onde électromagnétique. La majeure partie est concentrée au milieu de la gamme d'énergie – d'où la forme du spectre du corps noir. Il publia sa théorie en 1901, et elle fut tout de suite acceptée car elle résolvait le problème de la « catastrophe de l'ultraviolet ».



**Courbes du corps noir**

Les quanta imaginés par Planck étaient entièrement conceptuels – les oscillateurs n'avaient pas besoin d'être réels pour représenter une construction mathématique utile pour la physique des ondes et celle de la chaleur. Arrivant au début du XX^e^ siècle, à un moment où notre compréhension de la lumière et du monde atomique progressait à grands pas, l'idée de Planck eut des conséquences qui dépassèrent de loin ce qu'il avait imaginé : elle fut à la source de la théorie quantique.

**L'héritage de Planck dans l'espace** Le spectre de corps noir le mieux connu nous vient de l'espace. Il s'agit d'une faible lueur micro-ondes émise dans toutes les directions de l'espace à 2,73 kelvins. Ce rayonnement provient de l'Univers primordial et fut émis à peine 100 000 ans après le Big Bang, au moment de la formation des premiers atomes d'hydrogène. L'Univers étant en expansion, la température de ce rayonnement a progressivement diminué et aujourd'hui, le pic de son spectre, similaire à celui d'un corps noir, se situe dans le domaine des micro-ondes. Ce rayonnement micro-ondes du fond diffus cosmologique (ou fond cosmique) fut détecté dans les années 1960 et cartographié dans les années 1990 par le satellite COBE (*COsmic Background Explorer*) de la NASA. La mission européenne qui poursuit l'étude du fond diffus cosmologique porte le nom de Planck.

# l'idée clé
## Économie d'énergie

# 03 L'électromagnétisme

**La lumière est une onde électromagnétique. Au-delà du spectre de la lumière visible, les ondes électromagnétiques vont des ondes radio au rayonnement gamma. Unifiant l'électricité et le magnétisme, l'électromagnétisme est l'une des quatre forces fondamentales. Ce concept a stimulé l'émergence de la relativité et de la physique quantique.**

La lumière est une évidence, bien que nous n'en comprenions pas tout. Nous voyons des ombres et des reflets, nous savons que la lumière ne traverse pas les matériaux opaques et ne s'y reflète pas. Elle se décompose pour révéler les couleurs de l'arc-en-ciel lorsqu'elle traverse du verre ou des gouttes de pluie. Mais comment peut-on la définir ?

Beaucoup de scientifiques se sont penchés sur cette question. Au XVIIe siècle, Isaac Newton montra que chaque couleur de l'arc-en-ciel – rouge, orange, jaune, vert, bleu, indigo, violet – correspond à une « note » fondamentale de la lumière. Il les mélangea pour former des teintes intermédiaires, tel le cyan, et montra que l'on pouvait les combiner pour former de la lumière blanche. Il ne put poursuivre plus avant l'étude de son spectre à cause des limites de ses instruments. À l'aide de ses lentilles et de ses prismes, Newton observa que la lumière se comportait comme la houle – s'incurvant autour des obstacles et se renforçant ou s'annulant là où les vagues se superposent. Il en déduisit que la lumière, comme l'eau, était constituée de particules minuscules, les « corpuscules ».

Nous savons aujourd'hui que ce n'est pas exactement le cas. La lumière est une onde électromagnétique, c'est-à-dire qu'elle est constituée de champs électriques et magnétiques couplés. Qui plus est, au début des années 1900, Albert Einstein montra qu'il existait des situations où la lumière se comporte comme un flux de particules, nommées aujourd'hui photons et qui portent de l'énergie mais n'ont pas de masse. La nature de la lumière reste énigmatique.

## chronologie

**1600**
William Gilbert étudie l'électricité et le magnétisme

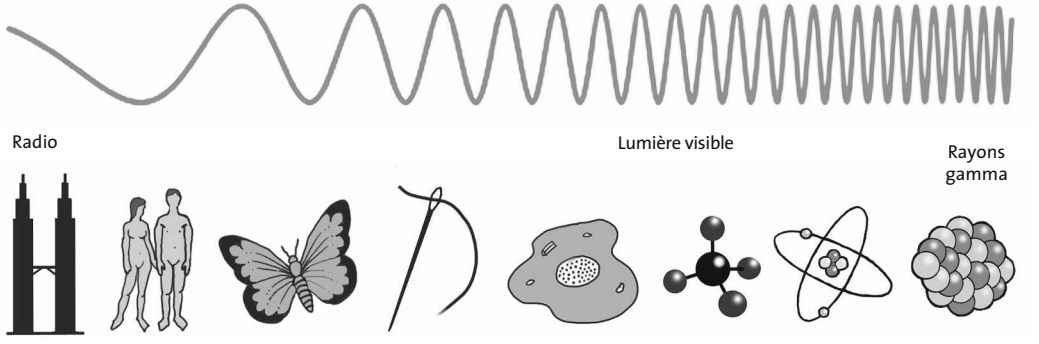
**1672**
Newton explique l'arc-en-ciel

**1752**
Benjamin Franklin réalise ses expériences sur la foudre

**Le spectre** À chacune des couleurs de la lumière correspond une longueur d'onde, c'est-à-dire une distance donnée entre deux crêtes successives de l'onde. La lumière bleue a une longueur d'onde plus courte que la lumière rouge ; la lumière verte est entre les deux. La fréquence correspond au nombre de cycles ondulatoires (creux ou pics) par seconde. Quand un rayon de lumière blanche traverse un prisme, le verre dévie (réfracte) chaque couleur d'un angle spécifique : entre le rouge, le moins dévié, et le bleu, le plus dévié, toutes les couleurs de l'arc-en-ciel apparaissent.

Mais ce n'est pas tout ! La lumière visible ne constitue qu'une partie du spectre électromagnétique. Celui-ci s'étend des ondes radio, dont les longueurs d'onde se mesurent en kilomètres, aux rayons gamma dont les longueurs d'onde sont beaucoup plus petites qu'un atome. Les longueurs d'onde de la lumière visible sont de l'ordre du milliardième de mètre, une échelle proche de la taille de nombreuses molécules. Au-delà du rouge, on trouve l'infrarouge avec des longueurs d'onde de l'ordre du millionième de mètre. À l'échelle du millimètre ou du centimètre se situent les micro-ondes, et à des échelles plus courtes l'ultraviolet, les rayons X et les rayons gamma.

**Les équations de Maxwell** Les ondes électromagnétiques combinent donc électricité et magnétisme. C'est au début du XIX^e^ siècle que des expérimentateurs, tel Michael Faraday, comprirent que ces champs peuvent passer de l'un à l'autre. Ainsi, en déplaçant un aimant à proximité d'un fil, on induit un déplacement des charges et donc un courant électrique. De même, si l'on change le sens du courant dans une bobine, on fait apparaître un champ




**Les longueurs des ondes électromagnétiques s'étendent du milliardième de mètre à des milliers de mètres.**

**1820**
Hans Oersted fait le lien entre électricité et magnétisme

**1831**
Faraday découvre l'induction électromagnétique

**1873**
Maxwell publie ses quatre équations

**1905**
Einstein publie sa théorie de la relativité restreinte

magnétique qui peut induire un courant dans une autre bobine : le transformateur, qui permet de réguler l'intensité et la tension des courants domestiques, repose sur ce principe.

Le principal progrès a été réalisé par le physicien écossais James Clerk Maxwell qui a rassemblé tous les aspects des phénomènes électriques et magnétiques dans quatre équations – les équations de Maxwell. Elles décrivent comment électricité et magnétisme résultent d'un même phénomène : les ondes électromagnétiques, constituées d'un champ électrique – une onde sinusoïdale oscillant selon une direction – et d'un champ magnétique – une onde sinusoïdale oscillant selon une direction perpendiculaire.

La première équation de Maxwell est également connue sous le nom de loi de Gauss en mémoire du physicien et mathématicien allemand Carl Friedrich Gauss. Elle décrit le champ électrique créé par un objet chargé et comment ce champ – comme la gravitation – décroît comme l'inverse du carré de la distance. Ainsi, si la distance double, le champ électrique diminue d'un facteur quatre.

La deuxième équation de Maxwell décrit le champ magnétique. On visualise souvent les champs magnétiques (et électriques) en dessinant les contours de leur intensité, les lignes de champ tangentes à leur direction. La deuxième équation implique que les lignes de champ d'un aimant forment des boucles fermées, orientées du pôle nord au pôle sud. Autrement dit, toutes les lignes de champ doivent commencer et se terminer quelque part, et tout aimant doit avoir un pôle nord et un pôle sud – il n'existe donc pas de « monopôle » magnétique. Si l'on coupe en deux un aimant, deux pôles se recréent, et ce autant de fois que l'on réitère l'opération.

Les troisième et quatrième équations de Maxwell décrivent le phénomène d'induction électromagnétique : la création de forces électriques et magnétiques, ainsi que leur échange, quand on déplace des aimants ou que l'on fait circuler des courants dans des bobines. La troisième équation décrit comment des courants variables créent des champs magnétiques, et la

**« Pour comprendre la nature des choses, les hommes doivent commencer par se demander non pas si une chose est bonne ou mauvaise, mais de quoi elle est constituée. »**

**James Clerk Maxwell, 1870**

quatrième comment les variations du champ magnétique induisent des courants électriques. Maxwell établit également que la lumière et toutes les ondes électromagnétiques se déplacent dans le vide à une vitesse constante de 300 000 kilomètres par seconde environ.

Les équations de Maxwell représentèrent un exploit. Einstein les plaçait sur un pied d'égalité avec la description de la gravitation établie par Newton. Einstein s'appuya sur les idées de Maxwell pour construire ses théories de la relativité. Il franchit un pas supplémentaire en expliquant comment électricité et magnétisme sont deux manifestations d'une seule et même force dans des contextes différents. Un observateur qui verrait un champ électrique dans un référentiel donné le verrait comme un champ magnétique dans un autre référentiel, en mouvement par rapport au premier. Einstein montra aussi que la lumière n'est pas toujours une onde – elle peut parfois se comporter comme un flux de particules.

### James Clerk Maxwell (1831-1879)

Né à Édimbourg en Écosse, James Clerk Maxwell passa beaucoup de temps dans la campagne écossaise et se passionna pour la nature. À l'école, on le qualifiait de « ridicule », tant il était absorbé par ses études. À l'université d'Édimbourg puis de Cambridge, il fut considéré comme un étudiant brillant, mais brouillon.
Au cours de ses recherches, Maxwell reprit les premiers résultats de Michael Faraday et les combina en quatre équations. En 1862, il montra que la lumière et les ondes électromagnétiques se propagent à la même vitesse. Il publia onze ans plus tard les quatre équations de l'électromagnétisme.

## l'idée clé
## Les couleurs de l'arc-en-ciel

# 04 Les franges de Young

**Lorsqu'un rayon de lumière est partagé en deux, les faisceaux ainsi créés peuvent interférer, et le signal se renforce ou disparaît. Comme sur la mer, là où les crêtes des ondes se rencontrent, des bandes brillantes apparaissent ; et là où crêtes et creux se rencontrent, le signal lumineux disparait. Ces interférences prouvent que la lumière se comporte comme une onde.**

En 1801, le physicien Thomas Young eut l'idée de faire passer un faisceau lumineux à travers deux fentes très étroites percées dans un morceau de carton. La lumière se décomposa selon les couleurs de l'arc-en-ciel mais, à sa grande surprise, toute une série de bandes irisées apparurent : ce sont les franges dites de Young.

Que se passait-il donc ? Young ferma une des fentes. Un seul et unique arc-en-ciel apparut, ce que l'on observe quand de la lumière blanche traverse un prisme. De chaque côté apparaissaient aussi quelques taches peu intenses. Quand il ouvrait à nouveau la seconde fente, la série de bandes sombres et lumineuses réapparaissait.

Young comprit que la lumière se comportait comme des vagues. Utilisant de grands récipients en verre remplis d'eau, Young avait étudié comment les vagues contournent les obstacles ou passent dans des trous. Par exemple, quand des vagues entrent dans un port, certaines se propagent en ligne droite alors que celles qui heurtent les digues de l'entrée du port sont déviées – ou diffractées – en arcs de cercle, ce qui entraîne une déperdition d'énergie de part et d'autre de l'ouverture. Ce comportement pouvait expliquer le motif produit par une seule fente. Mais d'où venaient les franges observées avec deux fentes ?

## chronologie

**1672**
Newton suggère que la lumière est de nature corpusculaire

**1678**
Huygens invente un principe permettant de prévoir l'évolution d'une onde

**1801**
Young réalise son expérience d'interférences avec une fente double

Un galet jeté dans un lac fait apparaître des vagues en cercles concentriques. Si l'on jette un second galet à proximité du premier, les deux ensembles de vagues se superposent. Là où deux crêtes ou deux creux se rencontrent, les vagues se renforcent. Au contraire, là où une crête et un creux se rencontrent, les vagues disparaissent. Il en résulte un motif complexe de pics et de creux séparés par des zones d'eau lisse.

Ce sont des interférences. Elles sont soit « constructives » quand les vagues se renforcent, soit « destructives » quand elles s'annulent. La hauteur de la vague, en chaque point, dépend de la « différence de phase » entre les deux ondes qui interfèrent, ou encore de la distance entre les crêtes de l'une et celles de l'autre. Le même comportement s'observe pour tous les phénomènes ondulatoires, y compris la lumière.

### Thomas Young (1773-1829)

Né en 1733 dans une famille quaker du Somerset, en Angleterre, Thomas Young était l'aîné de dix enfants. À l'école, il excellait dans les langues étrangères : il se familiarisa avec une dizaine de langues, du persan au turc en passant par le grec et le latin. Young étudia d'abord la médecine à Londres et à Édimbourg avant d'obtenir en 1796 un doctorat de physique à l'université de Göttingen, en Allemagne. De retour en Angleterre, un bel héritage assura sa fortune et son indépendance. Il pratiqua la médecine tout en menant des expériences scientifiques et il s'adonna à l'égyptologie. Il contribua à la découverte du sens des hiéroglyphes en traduisant certains passages de la pierre de Rosette, forgea le terme « énergie » et établit la théorie ondulatoire de la lumière.

Avec deux fentes, Young avaient créé deux ondes lumineuses qui pouvaient interférer. Leur différence de phase dépendait des chemins suivis dans le carton et au-delà. Là où les ondes se renforçaient, on voyait une frange brillante ; là où les ondes s'annulaient, une frange sombre apparaissait.

**Le principe de Huygens** Au XVII^e^ siècle, le physicien néerlandais Christiaan Huygens avait conçu une règle pratique – connue sous le nom de principe de Huygens – permettant de déterminer la propagation des ondes. Pour ce faire, il suffit d'imaginer qu'on puisse figer un front d'onde, et considérer chaque point de ce front comme une nouvelle source d'ondelettes circulaires. Chaque ondelette devient à son tour un ensemble de nouvelles sources. En procédant ainsi, on peut suivre la propagation de l'onde.

**1818**
Fresnel adapte le principe de Huygens en présence d'ouvertures et d'obstacles

**1873**
Les équations de Maxwell décrivent la lumière comme une onde électromagnétique

**1905**
Einstein montre que la lumière a aussi une nature corpusculaire

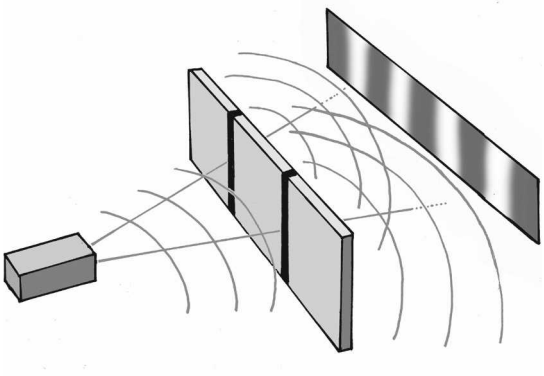
**« Tous les compliments que j'ai pu recevoir d'Arago, de Laplace ou de Biot ne m'ont jamais fait autant plaisir que la découverte d'une vérité théorique, ou la confirmation d'un calcul par une expérience. »**

**Fresnel, dans une lettre à Young, 1824**

Tout ce qu'il vous faut pour suivre une onde, c'est un crayon, du papier et un compas. Commencez par dessiner le premier front d'onde, puis utilisez votre compas pour tracer d'autres arcs de cercles le long de ce front. L'enveloppe de ces arcs de cercle donne le front d'onde suivant. Et ainsi de suite.

Cette technique élémentaire peut également être utilisée pour déterminer la trajectoire d'ondes qui passent par des ouvertures ou contournent des objets placés sur leur chemin. Au début du XIX^e^ siècle, le physicien français Augustin-Jean Fresnel put étendre le principe de Huygens à des situations plus complexes, par exemple celle d'ondes rencontrant des obstacles ou d'autres ondes.

Quand des ondes traversent de petites ouvertures, leur énergie se disperse par un phénomène de diffraction. Les points sources situés sur le bord de l'ouverture engendrent des ondelettes circulaires, donnant une allure semi-circulaire au front d'onde après l'obstacle. De même, de l'énergie est diffractée par les bords.



**Les ondes lumineuses se renforcent ou s'annulent après leur passage par deux fentes.**

**L'expérience de Young** En faisant passer un faisceau de lumière blanche à travers une fente unique, Young observa que si l'essentiel de l'onde passait tout droit, sur les bords, un phénomène de diffraction produisait deux jeux d'ondes circulaires proches dont les interférences étaient à l'origine des franges qui apparaissaient de part et d'autre de la bande lumineuse principale.

L'ampleur du phénomène de diffraction dépend du rapport entre la largeur de la fente et la longueur d'onde de la lumière. En effet, l'espacement des franges est proportionnel à la longueur d'onde et inversement proportionnel à la largeur de la fente. Ainsi, une ouverture plus étroite produit

des franges plus espacées, et une lumière rouge s'étale plus qu'une lumière bleue.

L'introduction d'une seconde fente entraîne la superposition de la structure décrite et d'un second motif d'interférences des ondes provenant de chacune des fentes. La distance entre les fentes étant bien supérieure à leur largeur, les franges d'interférences sont bien plus resserrées.

**« Chaque fois qu'un homme se lève pour défendre une idée, il envoie une vaguelette d'espoir qui en croise d'autres, issues de millions de sources d'énergie et d'audace. Toutes ces vagues finissent par former un courant qui peut renverser les murs les plus solides de l'oppression. »**

**Robert Kennedy, 1966**

C'est effectivement ce que Young observa – un grand nombre de franges minces, dues à l'interférence des trains d'onde passant par les deux fentes, superposées à un motif de franges plus larges, dues à la diffraction par une seule fente.

L'importance de la découverte de Young tient au fait qu'elle contredisait le point de vue de Newton pour qui la lumière se composait de particules ou « corpuscules ». En mettant en évidence le fait que des faisceaux lumineux forment des figures d'interférences, l'expérience de Young montrait que la lumière est une onde. Des particules, en revanche, auraient traversé le carton en ligne droite et dessiné deux bandes sur l'écran.

Mais les choses ne sont pas si simples. Depuis Young, les physiciens ont montré que, dans certaines circonstances, la lumière se comporte comme un flux de particules et dans d'autres comme une onde. Des variantes de l'expérience de Young – qui utilisent des faisceaux peu intenses ou qui ouvrent et ferment très vite les fentes au moment où la lumière les traverse – sont encore réalisées aujourd'hui pour étudier la nature de la lumière. Certains résultats étranges ont servi à tester les principes de la physique quantique.

## l'idée clé

## Entrelacs d'ondes

# 05 La vitesse de la lumière

**La lumière se propage à la même vitesse quelle que soit sa source. En 1905, Albert Einstein montra que rien ne peut se déplacer plus vite que la lumière. L'espace et le temps se distordent quand on s'approche de cette limite universelle. À des vitesses proches de celle de la lumière, les objets deviennent plus lourds et se contractent ; le temps ralentit.**

Pendant un orage, les éclairs lumineux précèdent le vacarme du tonnerre. Et plus l'orage est loin, plus le délai entre l'éclair et le coup de tonnerre est long. Cela tient au fait que le son se propage dans l'air plus lentement que la lumière. Le son est une onde de pression, il lui faut plusieurs secondes pour parcourir un kilomètre. La lumière est un phénomène électromagnétique beaucoup plus rapide. Mais dans quel type de milieu se propage-t-elle ?

Vers la fin du XIX$^{e}$ siècle, les physiciens émirent l'hypothèse que l'espace était empli d'une sorte de gaz électrique, un « éther » à travers lequel la lumière se propageait. Mais, en 1887, une expérience restée célèbre prouva qu'un tel milieu n'existait pas. Albert Michelson et Edward Morley avaient conçu un dispositif ingénieux pour détecter le mouvement potentiel de la Terre – au cours de sa course autour du Soleil – par rapport à cet éther.

Ils utilisèrent deux faisceaux lumineux se propageant à angle droit et se réfléchissant sur des miroirs identiques éloignés de la même distance. Quand les faisceaux se croisaient, des franges d'interférences apparaissaient. Si la Terre se déplaçait selon la direction de l'un des bras de l'interféromètre, sa vitesse de déplacement viendrait augmenter ou diminuer celle de la lumière par rapport à l'éther. Cela entraînerait une différence dans la durée nécessaire à la lumière pour parcourir chacun des bras du dispositif. De même, il faut plus ou moins de temps à un nageur pour parcourir une distance selon qu'il remonte ou des-

## chronologie

**1881**
Michelson et Morley montrent que l'éther n'existe pas

**1901**
Max Planck avance l'idée de quanta d'énergie

**1905**
Einstein publie sa théorie de la relativité restreinte

## Le paradoxe des jumeaux

Puisque les horloges en mouvement ralentissent, des astronautes qui voyageraient à bord d'un vaisseau spatial à une vitesse proche de celle de la lumière vieilliraient moins vite que leurs congénères restés sur Terre. Ainsi, si votre jumeau partait dans un vaisseau spatial rapide pour l'étoile la plus proche, son expérience du temps serait ralentie. À son retour, il serait encore jeune, alors que vous, resté sur Terre, seriez déjà vieux. Cela a l'air impossible, mais en fait, il n'y aurait pas vraiment de paradoxe, car au cours de son voyage, l'astronaute aurait été soumis à des forces intenses durant les phases d'accélération et de freinage. De surcroît, se pose la question des référentiels, car des événements simultanés dans un référentiel ne le sont pas forcément dans un autre.

cend un courant. Les franges d'interférences devraient donc bouger au cours de l'année, pendant la révolution de la Terre autour du Soleil.

Mais rien de tel ne fut observé. Les faisceaux revenaient toujours exactement en même temps à leur point de départ. Quelle que soit la position de la Terre dans l'espace, la vitesse de la lumière ne changeait pas. L'éther n'existait pas.

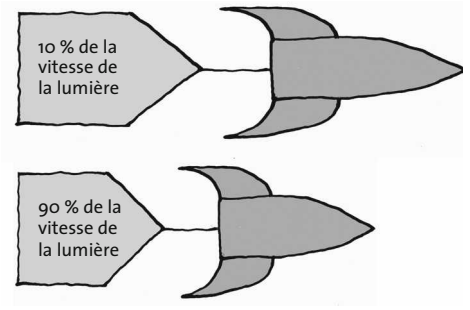
La lumière se propage toujours à la même vitesse : 300 000 kilomètres par seconde. Ce n'est pas le cas pour les vagues ou les ondes sonores dont la vitesse dépend du milieu de propagation. En outre, les vitesses s'ajoutent ou se soustraient – une voiture qui dépasse la nôtre a l'air de rouler lentement. Mais si l'on pointait une lampe torche sur le conducteur de l'autre voiture, le faisceau lumineux voyagerait toujours à la même vitesse, quelles que soient les vitesses des deux véhicules. C'est également vrai pour un train à grande vitesse ou un avion à réaction.

**Einstein et la relativité** Pourquoi la vitesse de la lumière est-elle constante ? Cette question mit Einstein sur le chemin de la relativité restreinte. En 1905, alors qu'il travaillait à l'office des brevets de Berne, en

> **« L'espace n'est pas un ensemble de points rapprochés ; c'est un ensemble de distances imbriquées. »**
>
> **Sir Arthur Stanley Eddington, 1923**

**1915**
Einstein publie sa théorie de la relativité générale

**1971**
Première tentative de mise en évidence de la dilatation du temps par des horloges embarquées à bord d'avions




**Les longueurs se contractent lorsqu'on s'approche de la vitesse de la lumière.**

Suisse, il faisait de la physique à ses heures perdues. Il essaya d'imaginer ce que verraient deux individus voyageant à des vitesses différentes s'ils pointaient l'un sur l'autre des lampes torches. Si la vitesse de la lumière ne change pas, alors quelque chose d'autre doit changer, se dit Einstein.

Ce sont en fait l'espace et le temps qui changent. Reprenant des idées développées par Hendrik Lorentz, George Fitzgerald et Henri Poincaré, Einstein imagina que la structure de l'espace-temps pouvait s'étirer de sorte que des observateurs se déplaçant à grande vitesse percevraient toujours la vitesse de la lumière comme constante. Il traita les trois dimensions d'espace et celle de temps comme appartenant au même « espace-temps » à quatre dimensions. La vitesse étant une distance divisée par un temps, pour que rien ne puisse jamais dépasser la vitesse de la lumière, il faut que les distances se contractent quand le temps se dilate. Une fusée qui s'éloignerait à une vitesse proche de celle de la lumière semblerait plus courte à un observateur terrestre.

> **« La vitesse de la lumière est à la théorie de la relativité ce que le quantum d'action est à la physique quantique : la pierre angulaire. »**
>
> **Max Planck, 1948**

D'après la théorie d'Einstein, tout mouvement est relatif : il n'y a pas de point de vue privilégié. Quand vous êtes assis dans un train et que vous voyez le train d'à côté bouger, vous ne savez pas toujours lequel est immobile et lequel quitte la gare. De même, bien que la Terre tourne autour du Soleil et se déplace dans la Voie lactée, nous ne notons pas ce mouvement. Nous ne percevons que les mouvements relatifs.

**Des horloges volantes** Einstein avait prévu que le temps devait ralentir quand la vitesse se rapproche de celle de la lumière. Une première expérience visant à tester cette prédiction a eu lieu en 1971. Quatre horloges atomiques identiques furent embarquées pour faire deux fois le tour de la Terre ; deux des horloges furent envoyées vers l'est, deux vers l'ouest. À leur retour, on compara l'heure qu'elles indiquaient avec celle d'une autre horloge identique restée au sol : chacune des horloges voyageuses semblait avoir perdu une fraction de seconde par rapport à l'horloge restée au sol. Une expérience réalisée quelques années plus tard confirma la prédiction d'Einstein.

La masse des objets augmente également à mesure que leur vitesse se rapproche de celle de la lumière ($E = mc^2$, où $E$ est l'énergie, $m$ la masse et $c$ la vitesse de la lumière). Le gain de masse est minuscule à des vitesses faibles, mais il devient infini à la vitesse de la lumière, de sorte que toute accélération supplémentaire devient impossible. Rien ne peut donc dépasser la vitesse de la lumière. Un objet massif ne peut atteindre cette vitesse, il peut seulement s'en approcher, devenant de plus en plus pesant et difficile à accélérer à mesure qu'il s'approche de la vitesse de la lumière. La lumière, quant à elle, est constituée de photons, des particules dépourvues de masse qui ne sont pas concernées par ce phénomène.

Il fallut plusieurs dizaines d'années pour que la théorie de la relativité restreinte d'Einstein soit acceptée. Ses conséquences, notamment l'équivalence entre masse et énergie, la dilatation du temps et la contraction des longueurs, étaient d'une nature profondément différente de tout ce qui était connu auparavant. La théorie de la relativité semble ne pas avoir sombré dans l'oubli uniquement parce que Max Planck, qui en avait entendu parler, la trouva fascinante. Il fit beaucoup pour la faire connaître et propulser Einstein sur le devant de la scène académique, puis publique.

### Albert Abraham Michelson (1852-1931)

Né dans le royaume de Prusse (aujourd'hui en partie en Pologne), Michelson déménagea aux États-Unis avec ses parents en 1855. Formé à l'Académie navale des États-Unis, il y apprit l'optique, la thermodynamique et la climatologie, avant de devenir lui-même enseignant dans cette institution. Après avoir passé plusieurs années à étudier la physique de la lumière en Allemagne et en France, il retourna aux États-Unis pour devenir professeur à l'université Case Western de Cleveland, dans l'Ohio. C'est là qu'il réalisa avec Morley les travaux d'interférométrie qui démontrèrent que l'éther n'existait pas. Plus tard, Michelson obtint un poste à l'université de Chicago où il développa l'utilisation de l'interférométrie en astronomie pour mesurer la taille des étoiles et les distances interstellaires. En 1907, il devint le premier Américain à remporter le prix Nobel de physique.

## l'idée clé
## Tout est relatif

# 06 L'effet photoélectrique

**Au XIXe siècle, diverses expériences montrèrent que la théorie ondulatoire de la lumière était fausse, ou du moins incomplète. Ainsi, un faisceau lumineux dirigé sur une surface métallique délogeait des électrons, dont les énergies indiquaient que la lumière est constituée de « billes photoniques » mais qu'elle n'est pas une onde.**

En 1887, le physicien allemand Heinrich Hertz s'amusait à faire des étincelles tout en essayant de construire un récepteur radio. En faisant crépiter de l'électricité entre deux sphères métalliques dans un émetteur, il produisait une étincelle entre une deuxième paire de sphères situées dans le récepteur – formant ainsi un dispositif nommé générateur à éclateur.

Le physicien constata que la seconde étincelle apparaissait d'autant plus facilement que les sphères du récepteur étaient plus proches l'une de l'autre – en général de l'ordre du millimètre. De surcroît, il produisait davantage d'étincelles quand le dispositif baignait dans une lumière ultraviolette.

Comment expliquer ce phénomène ? On supposa que la lumière étant une onde électromagnétique, de l'énergie serait transmise aux électrons de surface du métal, qui, libérés, donneraient naissance à un courant électrique. Mais d'autres expériences montrèrent que ce n'était pas le cas.

Philipp Lenard, l'assistant de Hertz, reprit les expériences. Il réduisit le générateur à sa plus simple expression : deux plaques métalliques placées dans un tube à vide. Les plaques, légèrement espacées à l'intérieur du tube, étaient connectées à l'extérieur par un fil relié à un ampèremètre. La première plaque était éclairée de lumières d'intensités et de longueurs d'onde différentes, la seconde restant dans le noir. Tout électron éjecté de la première plaque atteindrait la

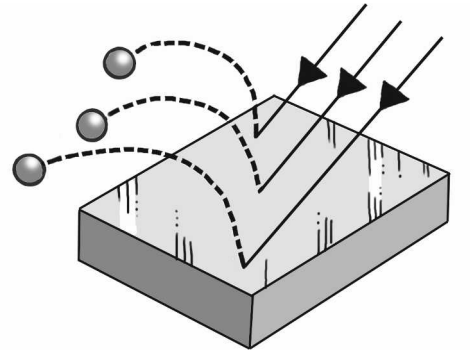
## chronologie

**1839**
Alexandre Becquerel observe l'effet photoélectrique pour la première fois

**1887**
Hertz observe des étincelles entre des plaques métalliques baignées d'une lumière ultraviolette

seconde, déclenchant un petit courant électrique dans le circuit.

Lenard observa, comme prévu, qu'une lumière intense libérait plus d'électrons, parce qu'elle transmettait plus d'énergie à la plaque. Toutefois, l'intensité lumineuse avait peu d'effet sur la vitesse des électrons éjectés. Qu'ils soient intenses ou non, les faisceaux produisaient des électrons de même énergie, ce qu'il mesurait en appliquant une faible différence de potentiel pour les bloquer. Lenard avait imaginé que les électrons seraient plus rapides avec une lumière intense, d'énergie supérieure.



**La lumière bleue fait jaillir des électrons d'une surface métallique.**

**Les couleurs de la lumière** D'autres physiciens s'intéressèrent au problème, notamment l'Américain Robert Millikan. En testant des faisceaux lumineux de différentes couleurs, il constata que la lumière rouge ne déloge pas le moindre électron, quelle que soit l'intensité du faisceau. Au contraire, l'ultraviolet et le bleu fonctionnaient très bien. Il observa également que les métaux avaient des « fréquences de rupture » différentes au-dessous desquelles la lumière n'arrachait jamais aucun électron. Au-dessus de cette fréquence seuil, l'énergie (la vitesse) des électrons émis était proportionnelle à la fréquence de la lumière. La constante de proportionnalité est aujourd'hui nommée constante de Planck.

Ce comportement était surprenant, car, d'après les théories de l'époque, les ondes lumineuses auraient dû produire l'effet inverse : en inondant la surface du métal, les ondes électromagnétiques auraient dû peu à peu en faire jaillir les électrons. De même que les grosses vagues ont plus d'énergie que les petites, plus la lumière était intense, plus le nombre et l'énergie des électrons délogés auraient dû être élevés.

**« Malgré toutes les réflexions antérieures, je ne sais pas répondre à la question : "Que sont les quanta de lumière ?" Aujourd'hui, le premier venu pense connaître la réponse, mais ce n'est qu'une illusion. »**

**Albert Einstein, 1905**

**1899**
Thomson confirme la production d'électrons libres par de la lumière

**1901**
Planck introduit le concept de quanta d'énergie

**1905**
Einstein propose le concept de quanta de lumière : les photons

**« Il me semble que les observations du rayonnement du corps noirs, de la fluorescence, de l'effet photoélectrique et d'autres phénomènes similaires sont plus faciles à comprendre si l'on admet que l'énergie lumineuse n'est pas répartie de façon continue dans l'espace. »**

**Albert Einstein, 1905**

En outre, la fréquence n'aurait pas dû avoir un tel effet – en termes d'énergie transférée à un électron, il n'aurait pas dû y avoir de différence entre plusieurs petites vagues et quelques grosses vagues. Or, de petites vagues rapides parvenaient à faire jaillir des électrons, tandis qu'une houle imposante mais lente n'en délogeait aucun.

On constata également avec étonnement que les électrons étaient délogés trop rapidement. Les électrons n'attendaient pas d'avoir absorbé suffisamment d'énergie lumineuse, mais jaillissaient instantanément, même avec de faibles intensités. Une vaguelette minuscule suffisait à éjecter un électron. La lumière était-elle vraiment une simple onde électromagnétique ?

**Les billes photoniques d'Einstein** En 1905, Albert Einstein parvint à expliquer les aspects étranges de l'effet photoélectrique grâce à une idée radicalement nouvelle. Le prix Nobel qu'il reçut en 1921 récompensa ce travail et non sa théorie de la relativité. Se fondant sur le concept de quanta d'énergie de Max Planck, Einstein suggéra que la lumière se composait de minuscules paquets d'énergie. Ces quanta de lumière furent par la suite nommés photons.

## L'expérience de la goutte d'huile de Millikan

En 1909, Robert Millikan et Harvey Fletcher utilisèrent une goutte d'huile pour mesurer la charge d'un électron. En plaçant la goutte entre deux plaques métalliques chargées, ils montrèrent que la force nécessaire pour la maintenir en suspension était un multiple d'une charge élémentaire égale à $1{,}6 \times 10^{-19}$ coulomb. Ils en conclurent que cette valeur correspondait à la charge de l'électron.

Einstein avança l'idée que c'étaient ces billes photoniques qui éjectaient les électrons de la surface du métal. Bien que dépourvu de masse, chaque photon porte une certaine quantité d'énergie, proportionnelle à sa fréquence. Les photons de lumière bleue ou ultraviolette ont donc plus de force que les photons de lumière rouge. Cela expliquait aussi pourquoi l'énergie des électrons éjectés dépendait de la fréquence de la lumière et non pas de son intensité.

Un photon rouge ne déloge aucun électron de surface, car son énergie n'est pas suffisante. Au contraire, un photon bleu éjecte un électron, et, avec un photon ultraviolet, l'électron émis sera encore plus rapide. L'intensité ne joue donc aucun rôle. Jamais une grappe de raisin ne déviera un boulet de canon ; de même, ce n'est pas en multipliant le nombre de photons rouges impuissants qu'on éjectera des électrons. L'instantanéité de l'effet s'explique ainsi : il suffit d'un photon, qui voyage à la vitesse de la lumière, pour éjecter un électron.

### Albert Einstein (1879-1955)

En 1905, Albert Einstein publia trois articles, tous révolutionnaires. Une réussite pour ce physicien allemand travaillant à temps partiel à l'office helvétique des brevets, à Berne. Ces articles expliquaient le mouvement brownien, l'effet photoélectrique et la relativité restreinte. En 1915, ils furent suivis par un autre événement fondateur, la publication de la théorie de la relativité générale. Cette théorie fut vérifiée de façon spectaculaire quatre ans plus tard grâce à des observations réalisées pendant une éclipse du Soleil. Einstein devint une célébrité. Il reçut le prix Nobel pour ses travaux sur l'effet photoélectrique. En 1933, il émigra aux États-Unis. Il signa une lettre restée célèbre, adressée au président Roosevelt pour le prévenir du risque de voir l'Allemagne se doter de l'arme nucléaire. Cette lettre déclencha le projet Manhattan.

Le concept de quanta de lumière proposé par Einstein fut d'abord rejeté par les physiciens, trop attachés à la description ondulatoire de la lumière et aux équations de Maxwell. Mais d'innombrables expériences vinrent confirmer la relation de proportionnalité entre l'énergie des électrons émis et la fréquence de la lumière utilisée. Cette idée un peu folle fut rapidement confirmée par l'expérience.

## l'idée clé
## Des billes photoniques

# 07 La dualité onde-corpuscule

**À l'orée du XXe siècle, l'idée selon laquelle la lumière et l'électricité étaient des ondes tandis que la matière était constituée de particules fut battue en brèche. Des expériences mirent en évidence que les électrons comme les photons subissent des phénomènes de diffraction et d'interférences – comme les ondes. Ondes et corpuscules sont les deux faces d'une même médaille.**

En 1905, Einstein émit l'idée que l'énergie lumineuse se transmet par paquets – les photons – et non continûment comme des ondes. Mais l'idée était si révolutionnaire qu'il fallut près de vingt ans et de nombreux tests pour qu'elle soit acceptée. Assistait-on, comme au XVIIe siècle, à un nouveau débat sur la nature de la lumière ? En fait, il s'agissait plutôt de l'émergence d'une approche novatrice de la relation entre matière et énergie.

**« Toutes les questions présentent toujours deux faces. »**

**Protagoras, – 485 à – 421**

Au XVIIe siècle, Isaac Newton avait défendu l'idée selon laquelle la lumière était constituée de particules, puisqu'elle se propageait en ligne droite, se réfléchissait parfaitement et ralentissait dans les milieux réfringents, tel le verre. Christiaan Huygens et plus tard Augustin-Jean Fresnel montrèrent que la lumière devait être une onde, puisqu'elle contournait les obstacles en étant diffractée, réfléchie ou en formant des interférences. James Clerk Maxwell paracheva la théorie ondulatoire dans les années 1860 à travers ses quatre équations décrivant l'électromagnétisme.

## chronologie

**1670** Newton élabore sa description corpusculaire de la lumière

**1801** Young réalise son expérience des deux fentes

**1873** Maxwell publie ses équations de l'électromagnétisme

**1895** Découverte des rayons X

**1897** Thomson suggère que les électrons sont des particules de champs électriques

Quand Einstein suggéra que la lumière était faite de particules, le vaisseau tangua. L'idée introduisit une tension désagréable qui persiste aujourd'hui. Car la lumière n'est ni une onde, ni un flux de corpuscules – elle est les deux à la fois. Et il en va de même pour les autres phénomènes électromagnétiques.

## La quête de la lumière

La lumière a un comportement ambivalent dans beaucoup d'expériences. Elle se comporte tantôt comme un courant de torpilles, par exemple dans le dispositif mettant en évidence l'effet photoélectrique, tantôt comme une onde, par exemple dans l'expérience des fentes de Young. Quel que soit le paramètre étudié, la lumière semble s'adapter à l'expérience à laquelle nous la soumettons.

### Louis de Broglie (1892-1987)

Se destinant à une carrière de diplomate, Louis de Broglie entra à la Sorbonne, à Paris, en 1909 pour étudier l'histoire, mais il se dirigea finalement vers la physique. Après avoir servi durant la Première Guerre mondiale dans le service de télégraphie de l'armée basé à la tour Eiffel, il revint à la Sorbonne pour y étudier la physique mathématique. Inspiré par les travaux de Max Planck sur le rayonnement du corps noir, de Broglie élabora en 1924, dans sa thèse de doctorat, sa théorie de la dualité onde-corpuscule. Il recevra le prix Nobel en 1929 pour ce travail. Il expliqua que l'idée lui était venue au cours d'une discussion sur les travaux de son frère Maurice qui montraient que les rayons X se comportaient comme des ondes et des corpuscules.

Les physiciens ont imaginé diverses expériences astucieuses pour piéger la lumière afin qu'elle révèle sa « vraie » nature. Cependant aucune n'en a saisi l'essence. Diverses variantes de l'expérience des fentes de Young ont même poussé la dualité onde-corpuscule dans ses derniers retranchements, mais l'idée a fait son chemin.

Un faisceau lumineux dont l'intensité est si faible que l'on peut observer chaque photon traverser les fentes de Young produit des franges d'interférences, à condition d'attendre assez longtemps – les photons s'accumulent pour former collectivement les franges classiques. Si l'on ferme une des fentes, les photons dessinent une figure de diffraction. Si on l'ouvre à nouveau, les franges réapparaissent.

Tout se passe comme si le photon était à deux endroits à la fois, et « connaissait » le statut de la seconde fente. Quelle que soit la rapidité de l'expérimentateur,

## Structure profonde

La cristallographie aux rayons X est aujourd'hui largement utilisée pour déterminer la structure de nouveaux matériaux ainsi que par les chimistes et les biologistes qui étudient l'architecture des molécules. En 1953, elle permit de découvrir la structure en double hélice de l'ADN. En observant la figure de diffraction des rayons X que Rosalind Franklin avait obtenue avec de l'ADN, Francis Crick et Jim Watson ont compris que les molécules qui l'avaient produite présentaient une structure en double hélice.

il est impossible de tromper un photon. Si l'on ferme une des fentes pendant que le photon est en vol, même s'il a déjà traversé la fente (mais avant qu'il n'atteigne l'écran), il se comporte correctement.

Le photon se comporte donc comme s'il passait par les deux fentes en même temps. Si vous essayez de le repérer, par exemple en plaçant un détecteur au niveau d'une des fentes, alors, bizarrement, les franges d'interférences disparaissent. Le photon devient une particule quand vous le considérez comme tel. Dans tous les cas étudiés, les franges d'interférences apparaissent et disparaissent selon la façon dont les physiciens traitent les photons.

**Ondes de matière** La dualité onde-corpuscule ne s'applique pas seulement à la lumière. En 1924, Louis de Broglie suggéra que les particules de matière – et même n'importe quel objet – pouvaient aussi se comporter comme des ondes. Il associa une longueur d'onde caractéristique à tous les corps quelle que soit leur taille. Plus l'objet est grand, plus sa longueur d'onde est petite. Une balle de tennis lancée sur un court a une longueur d'onde caractéristique de $10^{-34}$ mètre, bien plus petite que la taille d'un proton. Mais, du fait que leurs longueurs d'onde sont minuscules, bien trop courtes pour être détectables, nous ne pouvons voir les comportements ondulatoires des objets macroscopiques.

Trois ans plus tard, l'hypothèse de de Broglie fut confirmée : les électrons produisent des figures de diffraction et d'interférences, comme la lumière. On sait depuis la fin du XIX$^{e}$ siècle que l'électricité est transportée par des particules – les électrons. Or, les électrons, comme la lumière, se propagent dans le vide, comme l'établit J. J. Thomson en 1897. Il existait donc une particule qui portait cette charge. Comment concilier cela avec l'idée que les champs électromagnétiques sont des ondes ?

En 1927, aux laboratoires Bell dans le New Jersey, Clinton Davisson et Lester Germer bombardèrent un cristal de nickel avec des électrons. Les électrons éjectés furent déviés par les atomes du réseau cristallin et formèrent une figure de diffraction. À nouveau, comme la lumière, les électrons pouvaient interférer : les électrons présentaient un comportement ondulatoire.

Une technique similaire fut utilisée pour déterminer la structure des cristaux : la cristallographie aux rayons X. Quand les rayons X furent découverts en 1895 par Wilhelm Conrad Röntgen, les physiciens en ignoraient l'origine, mais ils comprirent très vite que ces rayons étaient une forme hautement énergétique de rayonnement électromagnétique.

En 1912, Max von Laue avait compris que les très courtes longueurs d'onde des rayons X étaient de l'ordre de la distance interatomique dans les cristaux, de sorte que ces rayons devraient être diffractés par les atomes des réseaux cristallins. On pourrait ainsi déterminer la géométrie d'un cristal à partir de sa figure de diffraction. Dans les années 1950, cette méthode révéla la structure en double hélice de l'ADN.

En 1922, une autre expérience avait confirmé le concept de quanta de lumière proposée par Einstein. Arthur Compton découvrit l'effet qui porte son nom en réalisant une expérience de diffusion d'électrons par des rayons X. Lors de la collision d'un photon X et d'un électron, le premier perd de l'énergie et est dévié, le second est mis en mouvement : l'un et l'autre se comportent comme des boules de billard. Einstein avait raison : on peut interpréter à peu près tous les phénomènes électromagnétiques en termes de particules.

Depuis, les physiciens ont révélé le comportement onde-corpuscule pour les neutrons, les protons et diverses molécules, même de grande taille, tels les fullerènes, qui sont de microscopiques ballons de football en carbone.

**« Pour la matière comme pour les rayonnements, notamment la lumière, nous devons introduire en même temps le concept de corpuscule et celui d'onde. »**

**Louis de Broglie, 1929**

## l'idée clé

# Deux faces d'une même médaille

# 08 L'atome de Rutherford

**À la fin du XIXe siècle, les physiciens commencèrent à explorer l'atome. Ils découvrirent d'abord les électrons, puis un noyau dur composé de protons et de neutrons. Pour comprendre ce qui pouvait assurer la cohésion de ce noyau, une nouvelle force fondamentale fut avancée – l'interaction nucléaire forte.**

Les atomes furent longtemps considérés comme les briques élémentaires de la matière, mais tout changea il y a un peu plus d'un siècle. Les physiciens se mirent à « disséquer » l'atome et montrèrent qu'il est constitué de plusieurs couches successives, comme des poupées russes. La première couche est celle de l'électron. En envoyant un courant électrique à travers du gaz contenu dans un tube en verre, le physicien anglais Joseph John Thomson parvint en 1887 à arracher des électrons à des atomes.

On en savait alors peu sur la façon dont les électrons étaient répartis dans la matière. Thomson proposa un modèle simple en « pudding », dans lequel les électrons, chargés négativement, étaient dispersés comme des raisins dans la pâte chargée positivement. L'attraction entre les électrons et les charges positives assuraient la cohésion de l'atome.

En 1909, Ernest Rutherford et ses collègues Hans Geiger et Ernest Marsden voulurent explorer les couches plus profondes de l'atome. Afin de tester le modèle de J. J. Thomson, ils bombardèrent une feuille d'or, de quelques atomes d'épaisseur, avec des particules alpha – un type de rayonnement émis par le radium ou l'uranium.

Ils s'attendaient à ce que la plupart des particules alpha traversent la feuille d'or. En fait, quelques-unes (une sur plusieurs milliers) rebondissaient sur

## chronologie

**1887**
Thomson découvre l'électron

**1904**
Thomson propose le modèle du « pudding »

**1909**
Rutherford bombarde une feuille d'or avec des particules alpha

la feuille et changeaient de direction (avec des angles de déviation compris entre 90 et 180 degrés), comme si elles avaient heurté un obstacle très dur. Rutherford comprit qu'au cœur des atomes d'or de la feuille se trouvait quelque chose de compact, dur et massif.

### Ernest Rutherford (1871-1937)

Originaire de Nouvelle-Zélande, Rutherford fut une sorte d'alchimiste des temps modernes, réalisant la transmutation de l'azote en oxygène grâce à la radioactivité. Directeur du laboratoire Cavendish de Cambridge, en Angleterre, il fut le mentor de nombreux lauréats du prix Nobel. On le surnommait « le crocodile », et cet animal est resté l'emblème du laboratoire. En 1910, ses expériences sur la déviation de particules alpha par des atomes d'or et sur la structure interne de l'atome le conduisirent à découvrir le noyau atomique.

## La naissance du noyau

Toutefois, le modèle de Thomson n'expliquait pas ce résultat : l'atome y était présenté comme un mélange de charges positives et négatives, aucune n'étant suffisamment dure ni massive pour bloquer une particule alpha. Rutherford en déduisit que les atomes d'or devaient avoir un cœur très dense, qu'il nomma « noyau ». La physique nucléaire, la physique du noyau atomique, était née.

Physiciens et chimistes connaissaient les masses des différents éléments d'après la classification périodique des éléments. En 1815, William Prout avait suggéré que tous les atomes étaient constitués des plusieurs atomes d'hydrogène, l'entité atomique la plus simple. Mais cela n'expliquait pas la masse des éléments. L'hélium, par exemple, le deuxième élément, n'est pas deux fois plus lourd que l'hydrogène, mais quatre fois.

Cent ans plus tard, en 1917, Rutherford montra que certains éléments contiennent bien des noyaux d'hydrogène. Ces particules chargées positivement étaient émises quand des particules alpha (des noyaux d'hélium) étaient envoyées à travers de l'azote gazeux qui se transformait alors en oxygène. C'était la première fois que l'on réussissait la transmutation délibérée d'un élément en un autre. En 1920, pour éviter toute confusion avec l'hydrogène gazeux, Rutherford nomma, « proton »

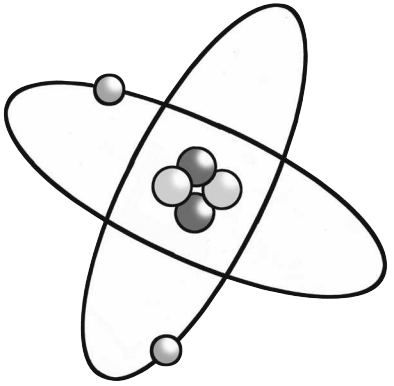
> **« C'était à peu près aussi incroyable que d'envoyer un obus sur un mouchoir en papier et de le voir vous revenir à la figure. »**
>
> **Ernest Rutherford, 1936**

**1911** Rutherford propose le modèle nucléaire

**1918** Rutherford isole le proton

**1932** Chadwick découvre le neutron

**1934** Yukawa propose la force nucléaire forte



La majeure partie de la masse d'un atome se trouve dans son noyau comme le montre cette représentation d'un atome d'hélium selon le modèle (obsolète) de Rutherford.

le noyau d'hydrogène, d'après le mot grec signifiant « premier ».

**Les constituants du noyau** Pour expliquer les masses atomiques, Rutherford imagina que le noyau était constitué d'un certain nombre de protons, accompagnés de quelques électrons pour équilibrer partiellement la charge électrique. Le reste des électrons devait occuper des couches à l'extérieur du noyau. L'hydrogène, l'élément le plus léger, a un noyau constitué d'un seul proton ainsi qu'un électron en orbite autour du noyau. Selon Rutherford, l'hélium devait avoir quatre protons et deux électrons dans son noyau – ce qui correspondait à la double charge positive d'une particule alpha – plus deux électrons en orbite à l'extérieur.

Mais l'idée d'électrons nucléaires ne tarda pas à se révéler fausse. En 1932, une nouvelle particule fut découverte par l'associé de Rutherford, James Chadwick. Il s'agissait d'une particule neutre ayant la même masse que le proton. Elle était suffisamment lourde pour arracher des protons à de la paraffine, mais n'était pas chargée. Elle fut nommée neutron, et le modèle de l'atome fut réorganisé.

À l'aide d'une combinaison de protons et de neutrons dans le noyau, on pouvait expliquer les masses atomiques. Le noyau d'un atome de carbone-12, par exemple, contient six protons et six neutrons (ce qui lui donne une masse atomique égale à 12 unités atomiques), plus six électrons en orbite. Les formes

## Datation au carbone

Un isotope lourd du carbone est utilisé pour dater certains vestiges archéologiques vieux de plusieurs milliers d'années, par exemple des objets en bois ou des cendres. La masse habituelle du carbone est égale à 12 unités atomiques, mais il existe aussi une forme ayant une masse de 14 unités. Le carbone-14 est instable et se désintègre au fil du temps. La durée qu'il faut pour que la moitié des atomes de carbone-14 présents initialement aient émis une particule bêta et se soient transformés en azote-14 est égale à 5 730 ans. Cette réaction lente peut être employée pour la datation des objets anciens.

d'un même élément, ayant des masses atomiques différentes, furent nommées isotopes.

Le noyau d'un atome est minuscule. Il mesure à peine quelques femtomètres ($10^{-15}$ mètre, soit un millionième de milliardième de mètre) de diamètre. Le noyau de l'atome est cent mille fois plus compact que les orbites électroniques qui l'entourent. Ce rapport équivaut à une longueur d'environ dix kilomètres sur le diamètre de la Terre.

Le noyau est lourd et dense, car presque toute la masse de l'atome, qui peut contenir des dizaines de protons et de neutrons, est concentrée dans cet espace minuscule. Mais comment tous ces protons chargés positivement tiennent-ils ensemble ? Pourquoi ne font-ils pas exploser le noyau en se repoussant ? Il fallait qu'une force encore inconnue assure la cohésion des nucléons ; ils la nommèrent force nucléaire forte, ou interaction nucléaire forte.

L'interaction nucléaire forte agit à des échelles si petites qu'elle n'est sensible qu'à l'intérieur du noyau. À l'extérieur, elle est bien plus faible que la force électrostatique. Ainsi, si vous pouviez attraper deux protons et les rapprocher, vous les sentiriez d'abord se repousser. Puis, en les forçant à se rapprocher, vous finiriez par les voir se coller comme des briques. Mais si vous continuiez à les comprimer, vous ne pourriez plus les faire bouger. Protons et neutrons sont étroitement liés à l'intérieur du noyau, qui est compact et dur.

Avec la gravitation, l'électromagnétisme et la force nucléaire faible, l'interaction nucléaire forte est l'une des quatre interactions fondamentales.

**« Je crois beaucoup en la simplicité des choses et comme vous le savez probablement, j'ai tendance à m'accrocher à des idées aussi générales et simples que la mort jusqu'à ce que l'évidence vienne à bout de ma ténacité. »**

**Ernest Rutherford, 1936**

## l'idée clé

## Un noyau compact

# 09 Les sauts quantiques

**Les électrons sont disposés autour du noyau sur des couches d'énergies différentes qui rappellent les orbites des planètes. Niels Bohr décrivit comment les électrons peuvent sauter d'une couche à une autre et, ce faisant, émettre ou absorber un rayonnement correspondant à la différence d'énergie entre les couches. Ce sont des sauts quantiques.**

En 1913, le physicien danois Niels Bohr améliora le modèle de l'atome de Rutherford en décrivant comment les électrons s'organisent autour du noyau. Bohr imagina que les électrons chargés négativement étaient en orbite autour du noyau, chargé positivement, comme les planètes autour du Soleil. Il parvint aussi à expliquer pourquoi les orbites sont situées à certaines distances du noyau en faisant le lien entre la structure atomique et la physique quantique.

> « Tout ce que nous nommons réel est fait de choses qui ne peuvent être considérées comme réelles. »
>
> Niels Bohr

Ce sont les forces électrostatiques qui maintiennent les électrons autour du noyau – l'attraction mutuelle entre charges positives et négatives. Mais Bohr savait que des charges en mouvement devraient perdre de l'énergie. De même qu'un courant électrique engendre un champ autour d'un fil ou d'un émetteur radio, des électrons en mouvement devraient émettre un rayonnement électromagnétique.

C'est pourquoi les premières théories de l'atome prédisaient que les électrons en orbite devaient perdre de l'énergie et tomber petit à petit en spirale vers le noyau, en émettant des ondes électromagnétiques d'une fréquence toujours

## chronologie

**1887**
Thomson découvre l'électron

**1901**
Planck introduit le concept de quanta d'énergie

**1904**
Thomson propose le modèle du « pudding »

plus élevée – comme un crissement de plus en plus aigu. Or, ce n'était pas le cas : les atomes ne s'effondrent pas spontanément et il n'y a aucune trace de crissement.

**Les raies spectrales** En revanche, les atomes émettent de la lumière à des longueurs d'onde bien spécifiques. Chaque élément produit un ensemble caractéristique de « raies spectrales », une sorte de gamme de lumière. Bohr soupçonna que ces « notes » étaient liées aux niveaux d'énergie des orbites électroniques. L'électron était stable sur son orbite et ne perdait pas d'énergie.

Bohr postula que les électrons peuvent se déplacer d'une orbite à une autre, monter ou descendre comme sur une échelle. Ces déplacements sont nommés sauts ou bonds quantiques. La différence d'énergie entre les barreaux de l'échelle est gagnée ou perdue par l'électron qui absorbe ou émet de la lumière à la fréquence correspondante. C'est ce qui produit les raies spectrales.

Ainsi, les électrons absorbent l'énergie par paquets ; l'énergie est quantifiée, comme Max Planck l'avait indiqué dans son modèle du rayonnement de corps noir. Les différences d'énergie entre les orbites s'expriment comme des multiples entiers de la fréquence de la lumière et d'une constante – aujourd'hui nommée constante de Planck (h).

## Différents types de liaisons chimiques

**Liaison covalente :** des paires d'électrons sont partagées par deux atomes
**Liaison ionique :** des électrons sont arrachés d'un atome et rattachés à un autre, ce qui crée des ions positifs et des ions négatifs s'attirant mutuellement
**Liaison de Van der Waals :** des forces électrostatiques s'exercent entre molécules
**Liaison métallique :** des ions positifs constituent des îlots dans une mer d'électrons

Le moment angulaire de chaque couche électronique est un multiple entier (1, 2, 3, 4, etc.) de celui de la première. Ces nombres caractérisant les états d'énergie des électrons forment les « nombres quantiques » principaux : n = 1 correspond à l'orbitale la plus basse, n = 2 à la suivante et ainsi de suite.

Bohr décrivit ainsi l'ensemble des énergies de l'atome le plus simple, l'atome d'hydrogène, qui a un électron en orbite autour d'un proton. Et ces énergies correspondaient bien aux raies spectrales de l'hydrogène. Un problème resté longtemps sans solution en trouvait une.

**« Il est erroné de penser que la tâche de la physique serait de découvrir ce qu'est la nature. La physique s'intéresse à ce que nous disons de la nature. »**

**Niels Bohr**

Bohr appliqua son modèle à des atomes plus lourds, dont le noyau contient plus de protons et de neutrons, et qui ont plus d'électrons en orbite. Chaque orbitale ne pouvait contenir qu'un certain nombre d'électrons, et quand un niveau était rempli, les électrons commençaient à occuper le niveau d'énergie tout juste supérieur.

Les électrons situés sur les couches externes ne subissent pas autant l'attraction du noyau que ceux des couches plus basses. En outre, les électrons se repoussent les uns les autres, de sorte que les niveaux d'énergie des gros atomes diffèrent de ceux de l'hydrogène. Des modèles plus élaborés que le modèle original de Bohr expliquent mieux les différences.

**L'exploration des couches électroniques** Le modèle de Bohr explique les différentes tailles des atomes et leur position dans le tableau périodique des éléments. Les atomes qui ne contiennent que quelques électrons peu liés sur leur couche externe sont plus susceptibles de réagir que ceux dont les couches externes sont pleines. Ainsi, des éléments tels le fluor ou le chlore, situés dans la partie droite du tableau périodique, sont généralement plus compacts que ceux de la partie gauche, tels le lithium ou le sodium.

Ce modèle explique aussi pourquoi les gaz rares sont inertes : leur couche externe est complète et ne peut acquérir ni céder d'électrons au cours d'une réaction avec un autre atome. La première orbitale est remplie avec deux électrons. Ainsi l'hélium, avec deux protons dans son noyau qui retiennent fermement deux électrons, ne réagit pas facilement. La deuxième couche peut contenir huit électrons, et c'est le nombre d'électrons sur la couche externe du gaz rare suivant, le néon.

Les choses se compliquent à partir de la troisième couche, parce que les orbitales ne sont plus sphériques. La troisième couche admet huit électrons, mais

## Des électrons sauteurs

Les électrons peuvent passer d'une orbite à une autre, en gagnant ou perdant de l'énergie sous forme d'un rayonnement électromagnétique, dont la fréquence ($\nu$) est proportionnelle à la différence d'énergie ($\Delta E$) selon la relation de Planck, où $h$ est la constante de Planck :

$$\Delta E = E_2 - E_1 = h\nu$$

il y a ensuite une configuration en forme d'haltère qui en accepte dix de plus – c'est la configuration des éléments de transition, tels le fer ou le cuivre.

Les formes des orbitales les plus grandes sont difficiles à calculer à partir du modèle de Bohr, même aujourd'hui. Mais elles jouent un rôle clé dans la géométrie des molécules puisque la liaison covalente naît de l'échange d'électrons. Le modèle de Bohr ne s'applique pas bien aux atomes de grande taille, comme le fer. Il ne permet pas non plus de comprendre l'intensité ou la structure précise des raies spectrales. Bohr ne croyait pas aux photons quand il élabora son modèle, fondé sur la théorie classique de l'électromagnétisme.

Le modèle de Bohr fut supplanté, vers la fin des années 1920, par des versions quantiques. Celles-ci tiennent compte des propriétés ondulatoires des électrons, et les orbites y sont considérées comme des nuages de probabilité – régions de l'espace où il est probable que l'électron se trouve. Il est en effet impossible de savoir exactement où se trouve un électron à un instant donné.

Pourtant, l'idée de Bohr reste utile pour les chimistes, car elle explique de nombreux résultats, du tableau périodique des éléments au spectre de l'hydrogène.

# l'idée clé
# L'échelle d'énergie de l'électron

# 10 Les raies de Fraunhofer

**De la lumière peut être absorbée ou émise lorsque, dans un atome, un électron passe d'un niveau à un autre. Comme chaque couche électronique a une énergie spécifique, cette lumière présente des longueurs d'onde bien définie et fait apparaître une série de raies – dites de Fraunhofer – quand elle traverse un prisme ou un réseau de fentes.**

Depuis qu'Isaac Newton dirigea la lumière du Soleil sur un prisme de verre au XVII^e^ siècle, nous savons que la lumière blanche est constituée du mélange des couleurs de l'arc-en-ciel. Mais si l'on y regarde de plus près, le spectre de la lumière solaire comporte plusieurs fines raies noires – telle l'empreinte d'un code-barres. Certaines longueurs d'onde sont éliminées quand la lumière solaire traverse les couches gazeuses externes de l'étoile.

Chaque « raie d'absorption » correspond à un élément chimique particulier présentant des énergies et des états différents. Les plus communs sont l'hydrogène et l'hélium, les principaux constituants du Soleil, ainsi que des produits de combustion, notamment le carbone, l'oxygène et l'azote. En étudiant le motif de ses raies d'absorption, on précise la composition chimique du Soleil.

L'astronome anglais William Hyde Wollaston remarqua en 1802 la présence de raies sombres dans le spectre solaire, mais le premier examen rigoureux ne fut réalisé qu'en 1814 par le fabricant allemand de lentilles optiques Joseph von Fraunhofer ; elles portent aujourd'hui son nom. Fraunhofer répertoria plus de 500 raies ; grâce aux équipements modernes, on en identifie aujourd'hui des milliers.

## chronologie

**1672**
Newton observe le spectre de la lumière blanche

**1801**
Young réalise son expérience d'interférences avec une fente double

**1802**
Wollaston observe des raies noires dans le spectre solaire

Dans les années 1850, les chimistes allemands Gustav Kirchhoff et Robert Bunsen montrèrent que chaque élément produit un ensemble de raies d'absorption caractéristique – chacun a son propre code-barres. Les éléments émettent aussi de la lumière à certaines fréquences de ces raies spectrales. Les tubes au néon, par exemple, émettent une série de raies brillantes qui correspondent aux niveaux d'énergie des atomes de néon présents à l'état gazeux dans le tube.

La fréquence précise de chaque raie spectrale correspond à l'énergie d'un saut quantique entre deux niveaux d'énergie d'un atome donné. Si l'atome est dans un gaz très chaud – dans un tube au néon, par exemple – les électrons tendent à perdre de l'énergie. En redescendant sur des couches de plus basse énergie, ils émettent une lumière vive, dont la fréquence correspond à la différence d'énergie.

Au contraire, les gaz froids absorbent l'énergie des sources lumineuses présentes dans l'environnement, et leurs électrons sont éjectés vers des couches supérieures. Cela se traduit par une raie d'absorption qui est sombre – un trou – dans le spectre de la source située à l'arrière-plan. L'étude de la chimie spectrale, la spectroscopie, est une méthode puissante pour découvrir la composition chimique des matériaux.

**Réseaux** Plutôt que d'utiliser des prismes en verre, d'une puissance limitée et encombrants, on peut placer sur le trajet de la lumière un dispositif constitué d'une série de fentes parallèles. Fraunhofer fut le premier à fabriquer un tel réseau à l'aide de fils alignés.

Les réseaux sont des outils plus puissants que les prismes et offrent des angles de diffraction plus grands. Ils utilisent également les propriétés ondulatoires de la lumière. Quand un faisceau lumineux traverse une fente, son énergie se disperse à cause de la diffraction. L'ouverture angulaire de cet étalement varie avec la longueur d'onde de la lumière et la largeur de la fente.

### Joseph von Fraunhofer (1787-1826)

Né en Bavière, en Allemagne, Fraunhofer fut orphelin à l'âge de 11 ans. Il devint apprenti chez un maître verrier. En 1801, l'atelier dans lequel il travaillait s'effondra, l'emprisonnant sous les décombres. Il échappa de peu à la mort grâce à Maximilien I$^{er}$ de Bavière qui le sauva, puis assura son éducation et l'aida à entrer dans un monastère spécialisé dans la verrerie d'art. Il y apprit à réaliser certains des meilleurs verres optiques du monde et finit par devenir le directeur de cet institut. Comme beaucoup de maîtres verriers de l'époque, il mourut jeune – à l'âge de 39 ans – à cause des vapeurs toxiques émanant des métaux lourds utilisés dans le travail du verre.

**1814**
Fraunhofer met en évidence des centaines de raies d'absorption

**Années 1850**
Kirchhoff et Bunsen comprennent que les raies sont émises par des éléments

**« Toutes les lois de la spectrographie et de la théorie atomique sont issues de la théorie quantique. La nature joue sa musique des spectres sur ce mystérieux instrument, lequel impose le rythme qui règle la structure des atomes et des noyaux. »**

**Arnold Sommerfeld, 1919**

Des fentes très étroites produisent une diffraction importante, et la lumière rouge est plus déviée que la lumière bleue.

Quand deux fentes (ou plus) sont en jeu, les différents trains d'onde interfèrent – creux et crêtes des ondes se renforcent ou s'annulent, faisant apparaître un motif de bandes alternativement sombres et brillantes, nommées franges. Ce motif est constitué de deux effets qui se superposent : le motif correspondant à une fente unique est présent, mais dans chacune des raies se trouve une série de raies plus fines, dont l'écartement dépend de la distance qui sépare les fentes.

Les réseaux ressemblent à une version à plus grande échelle de l'expérience des fentes de Young. Comme il y a un grand nombre de fentes au lieu de deux, les franges lumineuses sont plus nettes. Plus il y a de fentes, plus elles sont nettes. Chaque frange est un minispectre. Les physiciens construisent des réseaux impressionnants pour disséquer le spectre d'un faisceau lumineux avec une résolution toujours meilleure, en modifiant la densité et la taille des fentes. Les réseaux sont très utilisés en astronomie pour analyser la lumière des étoiles et des galaxies et pour savoir de quoi elles se composent.

**Diagnostics** Bien que la lumière blanche se décompose en un spectre rouge-bleu-vert continu, les atomes n'émettent de la lumière qu'à certaines fréquences. Ce code-barres des « raies spectrales » correspond aux niveaux d'énergie de leurs électrons. Les longueurs d'onde d'éléments, tels l'hydrogène, l'hélium ou l'oxygène, sont bien connues grâce à diverses expériences réalisées en laboratoire.

Les raies d'émission correspondent à des photons libérés par des électrons trop « chauds » qui perdent de l'énergie en libérant un photon quand ils redescendent vers un niveau d'énergie inférieur. Quant aux raies d'absorption, elles apparaissent quand certains atomes sont baignés par une lumière dont la longueur d'onde est égale à celle qui permet d'éjecter un électron vers une orbite plus élevée. Le code-barres se présente alors comme une série de raies noires.

La fréquence des raies dépend du niveau d'énergie des atomes et du fait qu'ils sont ou non ionisés – dans des gaz très chauds, les électrons externes sont parfois arrachés. Les raies spectrales étant d'une grande précision, elles sont utilisées pour étudier divers aspects fondamentaux de la physique des gaz. Les raies sont élargies dans les gaz chauds, car les atomes bougent davantage, ce qui permet de mesurer la température. Les intensités relatives des différentes raies reflètent l'état d'ionisation du gaz.

Une analyse plus précise, également beaucoup plus compliquée, révèle des structures plus fines dans les raies spectrales, qui renseignent sur la nature des électrons et permet d'explorer les propriétés des atomes à l'échelle quantique.

### Décalage vers le rouge

Comme les longueurs d'onde des raies spectrales sont connues avec précision, les astronomes les utilisent pour mesurer des vitesses et des distances. Tout comme la sirène d'une ambulance est aiguë quand elle se rapproche, puis grave au moment où on la croise – c'est l'effet Doppler –, la lumière d'une étoile ou d'une galaxie qui s'éloigne de nous s'étire, c'est-à-dire que les longueurs d'onde des raies spectrales correspondantes sont un peu plus grandes ; cette différence est nommée « décalage vers le rouge ». Au contraire, quand un objet s'approche de nous, les longueurs d'onde des raies sont légèrement plus courtes : c'est le décalage vers le bleu. À grande échelle, les galaxies subissent un décalage vers le rouge et non vers le bleu, ce qui prouve qu'elles s'éloignent : l'Univers est en expansion.

## l'idée clé

# Un code-barres de lumière

# 11 L'effet Zeeman

**Quand on examine de près des raies spectrales, on découvre une structure plus fine. Dans les années 1920, des expériences ont révélé que cela est dû à une propriété intrinsèque de l'électron, le spin quantique. Les électrons se comportent comme des billes chargées en rotation, et leurs interactions avec des champs électriques et magnétiques modifient légèrement leurs niveaux d'énergie.**

De l'hydrogène très chaud émet une série de raies spectrales qui résultent des sauts quantiques des électrons redescendant d'un niveau d'énergie élevé à un niveau inférieur, ce qui les refroidit. Chaque raie du spectre de l'hydrogène représente un saut particulier, la différence d'énergie entre les deux niveaux étant convertie en un rayonnement qui a la fréquence correspondante.

Lorsqu'un électron redescend du deuxième niveau de l'atome d'hydrogène au premier, il émet de la lumière dont la longueur d'onde est égale à 121 nanomètres (un nanomètre – nm – est égal à un milliardième de mètre), c'est-à-dire située dans la partie ultraviolette du spectre. Un électron passant du troisième niveau au premier émet une lumière de plus haute énergie et sa longueur d'onde, plus courte, est égale à 103 nm. Pour un saut du quatrième niveau au premier, la longueur d'onde est de 97 nm. Comme les orbitales se rapprochent à mesure qu'elles s'écartent du noyau, les différences d'énergie sont de plus en plus petites, et les raies sont très serrées dans l'extrémité bleue du spectre.

L'ensemble des raies spectrales résultant des transitions des électrons vers un niveau donné est une « série ». Pour l'hydrogène, l'atome le plus simple et le plus abondant dans l'Univers, les premières séries portent des noms de scientifiques. Ainsi, la série de transition vers le premier niveau est la série de Lyman, d'après Theodore Lyman, qui la découvrit entre 1906 et 1914. La première raie spectrale (transition du niveau 2 vers le niveau 1) est dite Lyman-alpha, la deuxième (du 3 vers le 1) Lyman-bêta, etc.

## chronologie

**1896**
Zeeman observe l'effet qui porte son nom

**1908**
Hale observe l'« effet Zeeman » dans les taches solaires

**1913**
Johannes Stark découvre l'effet qui porte son nom

La série de transition vers le deuxième niveau est la série de Balmer, d'après Johannes Balmer qui en prédit l'existence en 1885. La plupart de ces raies sont dans la partie visible du spectre. La série de transition vers le troisième niveau est celle de Paschen, d'après Friedrich Paschen, qui les observa en 1908. Elles sont situées dans l'infrarouge.

Un examen plus approfondi a montré que ces raies spectrales ne sont pas pures mais présentent une structure plus fine : à très haute résolution, on constate qu'une raie de l'atome d'hydrogène apparemment unique est double, les deux raies étant très proches l'une de l'autre. Les niveaux d'énergie des électrons à l'origine de ces raies se décomposent donc en plusieurs sous-multiples.

## Le champ magnétique des taches solaires

En 1908, l'astronome George Ellery Hale observa l'effet Zeeman dans la lumière émise par les taches solaires, ces régions plus sombres à la surface du Soleil. Cet effet n'apparaissait pas dans la lumière émise par les zones brillantes, ce qui laissait penser que les taches avaient un champ magnétique intense. En mesurant les écarts entre les raies spectrales, Hale calcula l'intensité de ces champs magnétiques. Il montra qu'il existe des symétries dans la polarité magnétique des taches solaires, notamment dans les boucles situées de part et d'autre de l'équateur solaire qui ont des polarités opposées.

**Boulets d'argent** En 1922, dans une expérience restée célèbre, Otto Stern et Walther Gerlach dirigèrent un faisceau d'atomes d'argent à travers un champ magnétique. Le faisceau se sépara en deux, laissant deux traces sur une plaque photographique. Stern et Gerlach avait choisi l'argent parce qu'il porte un unique électron sur sa couche externe et qu'il est détecté par une émulsion photographique. Ils cherchaient à étudier les propriétés magnétiques des électrons.

**« Un électron n'est ni plus ni moins hypothétique qu'une étoile. »**

**Arthur Stanley Eddington, 1932**

**1922**

L'expérience de Stern et Gerlach montre que le moment magnétique de l'électron est quantifié

**1925**

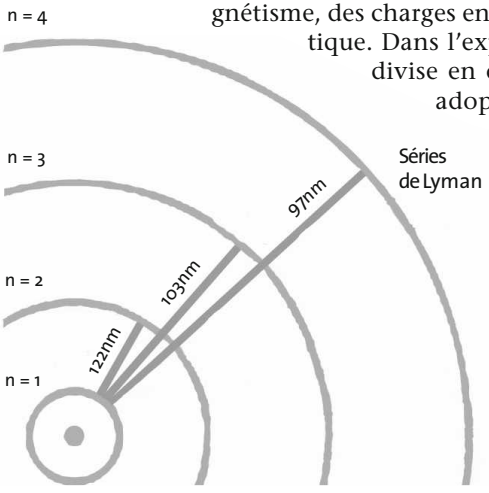
Goudsmit et Uhlenbeck émettent l'idée que les électrons sont des billes chargées en rotation

**« À un moment donné, nous avons voulu savoir ce qu'était un électron. Mais cette question ne trouva jamais de réponse. Aucune de nos représentations habituelles ne peut être appliquée à l'électron ; on attend toujours. »**

**Arthur Stanley Eddington, 1928**

En traversant le champ magnétique, les électrons se comportent comme de petits « aimants » et sont soumis à une force proportionnelle au gradient du champ magnétique appliqué. Stern et Gerlach s'attendaient à ce que ces forces soient orientées au hasard, et qu'il en résulte une tache floue sur leur détecteur. Au contraire, le faisceau se divisait en deux, laissant deux marques distinctes. Ceci signifiait que ces petits aimants n'admettaient que deux orientations. Cela était très étrange.

**Le spin de l'électron** Mais pourquoi un électron porte-t-il un champ magnétique ? En 1925, Samuel Goudsmit et George Uhlenbeck avancèrent l'idée que l'électron se comporte comme une bille chargée en rotation – une propriété nommée « spin électronique ». D'après les règles de l'électromagnétisme, des charges en mouvement produisent un champ magnétique. Dans l'expérience de Stern et Gerlach, le faisceau se divise en deux parce que le spin des électrons peut adopter deux orientations, *up* et *down* (haut et bas).




**Les électrons passant d'un niveau d'énergie à un autre dans un atome d'hydrogène émettent de la lumière à des longueurs d'onde spécifiques. Il en résulte une série de raies spectrales, les lignes représentant les sauts vers un niveau particulier d'énergie.**

Ces deux orientations expliquent aussi la structure fine des raies spectrales – il y a en effet une légère différence d'énergie entre les électrons tournant dans le même sens que leur orbite et ceux tournant en sens opposé.

Le spin quantique ne correspond pas réellement à un mouvement de rotation mais est une propriété intrinsèque des particules. Pour décrire son orientation, *up* ou *down*, les physiciens attribuent aux électrons et aux autres particules un nombre quantique de spin qui, pour les électrons, prend une valeur de plus ou moins 1/2.

De nombreuses interactions peuvent se produire entre les électrons et d'autres particules chargées ou des phénomènes électromagnétiques – dus à la propre charge de l'électron, à celle du noyau ou à des champs extérieurs. Les raies spectrales se divisent alors de diverses façons.

La division des raies spectrales des électrons en présence de champs magnétiques est nommée « effet Zeeman », d'après le physicien néerlandais Pieter Zeeman. On l'observe par exemple dans la lumière des taches solaires. Quant à la division des raies spectrales due à un champ électrique, elle se nomme « effet Stark », d'après Johannes Stark.

L'impact de l'expérience de Stern et Gerlach fut considérable – c'était la première fois que les propriétés quantiques d'une particule se trouvaient ainsi mises à nu en laboratoire. D'autres expériences suivirent rapidement, montrant notamment que le moment angulaire des noyaux de certains atomes est lui aussi quantifié ; ce moment angulaire interagit avec le spin de l'électron, ce qui fait apparaître une structure hyperfine dans les raies spectrales. Les scientifiques montrèrent aussi que l'on peut faire basculer le spin de l'électron de l'un de ses états à l'autre à l'aide de champs variables. Cette découverte est à la base de l'imagerie par résonance magnétique (IRM), utilisée dans les hôpitaux.

### Pieter Zeeman (1865-1943)

Né dans une petite ville des Pays-Bas, Pieter Zeeman commença à s'intéresser à la physique quand, en 1883, il assista à une aurore boréale alors qu'il était encore au lycée. La description du phénomène et le dessin qu'il en fit furent publiés dans la revue scientifique internationale *Nature*. Zeeman étudia la physique à l'université de Leyde sous la direction de Kamerlingh Onnes qui découvrit la supraconduction, et de Hendrik Lorentz qui travailla notamment sur l'électromagnétisme. Durant sa thèse de doctorat, Zeeman étudia le champ magnétique des trous noirs. En 1896, il fut renvoyé pour avoir réalisé une expérience non validée par ses directeurs : la découverte du dédoublement des raies spectrales par un champ magnétique intense, un effet aujourd'hui connu sous le nom d'« effet Zeeman ». Mais il eut le dernier mot : il obtint le prix Nobel en 1902.

## l'idée clé

## Les électrons ont du spin

# 12 Le principe d'exclusion de Pauli

**Deux électrons ne sont jamais identiques. Selon le principe d'exlusion de Pauli, chaque électron a un ensemble unique de propriétés quantiques qui le distingue de tous les autres. Cela explique le nombre d'électrons présents sur les couches des atomes, la structure du tableau périodique des éléments et pourquoi la matière est solide alors qu'elle est essentiellement constituée de vide.**

Dans le modèle de l'atome de Niels Bohr de 1913, l'orbitale la plus basse de l'atome d'hydrogène accepte seulement deux électrons, la suivante huit et ainsi de suite. Cette géométrie transparaît dans la structure de la classification périodique des éléments. Mais pourquoi le nombre d'électrons par couche est-il limité, et comment les électrons savent-ils sur quel niveau se placer ?

L'Autrichien Wolfgang Pauli chercha des réponses à ces questions. Il avait travaillé sur l'effet Zeeman – le phénomène de subdivision des raies spectrales qui résulte de la modification par un champ magnétique des niveaux d'énergie des électrons d'un atome – et avait remarqué des similitudes entre les spectres des métaux alcalins, qui ont un seul électron sur leur couche externe, et ceux des gaz rares, dont la couche externe est complète. Les électrons semblaient ne disposer que d'un nombre limité d'états.

Chaque électron ne pouvait-il présenter qu'un état unique caractérisé par quatre nombres quantiques – énergie, moment angulaire, moment magnétique intrinsèque et spin ?

## chronologie

**1913**
Bohr avance son modèle de l'atome

**1925**
Pauli énonce son principe d'exclusion

Selon la règle énoncée par Pauli en 1925 – le principe d'exclusion de Pauli – deux électrons d'un même atome ne peuvent avoir leur quatre nombres quantiques identiques. Autrement dit, deux électrons ne peuvent être au même endroit au même moment avec les mêmes propriétés.

**Organisation électronique** Quand on se déplace dans le tableau de Mendeleïev vers des éléments de plus en plus lourds, on constate que les atomes contiennent de plus en plus d'électrons. Ces électrons ne peuvent occuper la même place, et ils remplissent peu à peu des couches de plus en plus élevées. C'est comme dans un théâtre où les sièges se remplissent peu à peu, de la scène jusqu'au fond.

Deux électrons peuvent occuper le niveau d'énergie le plus bas d'un atome, à condition que leurs spins ne soient pas identiques. Ainsi, dans l'atome d'hélium, deux électrons occupent le niveau fondamental avec des spins opposés. Dans l'atome de lithium, le troisième électron doit occuper l'orbite suivante.

### Wolfgang Pauli (1900-1958)

Élève précoce, le Viennois Wolfgang Pauli cachait dans son casier des articles d'Albert Einstein sur la relativité restreinte et les lisait en cachette. Quelques mois à peine après son arrivée à l'université de Munich, Pauli publia son premier article, consacré à la relativité. Puis il s'intéressa à la mécanique quantique.

Werner Heisenberg décrivait Pauli comme un « oiseau de nuit », qui passait ses soirées au café et se levait rarement pour aller en cours le matin. Après le suicide de sa mère et l'échec de son premier mariage, Pauli s'adonna à la boisson. S'étant tourné vers le psychiatre suisse Carl Jung, Pauli lui adressa des milliers de descriptions de ses rêves, dont certaines furent publiées plus tard par Jung. Quelques années avant la Seconde Guerre mondiale, Pauli s'exila aux États-Unis, où il s'efforça de maintenir à flots la science européenne. Puis il rentra à Zurich et reçut le prix Nobel en 1945.

**1933**
Découverte du neutron et prédiction de l'existence des étoiles à neutrons

**1967**
Découverte du premier pulsar, un type d'étoile à neutrons

**1995**
Découverte que les bosons semblent participer à un même concert quantique

## Les bosons

Toutes les particules ne sont pas des fermions – et certaines ont des spins entiers. On les nomme bosons, d'après le physicien indien Satyendranath Bose qui s'y intéressa. Les photons sont des bosons, tout comme les particules qui portent les autres interactions fondamentales. Certains noyaux symétriques peuvent se comporter comme des bosons, celui de l'hélium par exemple, composé de deux protons et deux neutrons. N'étant pas soumis au principe d'exclusion de Pauli, les bosons peuvent avoir les mêmes propriétés quantiques quel que soit leur nombre. Ainsi, des milliers de bosons peuvent participer au même concert quantique, un phénomène qui explique les comportements quantiques étranges tels que la superfluidité et la supraconduction.

Le principe d'exclusion de Pauli s'applique à tous les électrons et à quelques particules dont le spin est un multiple demi-entier de l'unité, tels le proton et le neutron. Ces particules sont nommées « fermions », en hommage au physicien italien Enrico Fermi.

Les électrons, les protons et les neutrons sont des fermions, si bien que le principe d'exclusion de Pauli s'applique aux briques atomiques qui constituent la matière. Le fait que deux fermions ne puissent occuper la même place confère sa rigidité à la matière. Les atomes sont essentiellement constitués de vide, et pourtant on ne peut les écraser comme des éponges ni les faire se traverser comme du fromage à travers une râpe. Pauli a apporté une réponse à l'une des questions les plus fondamentales de la physique.

**La vie des étoiles** Le principe d'exclusion de Pauli a des conséquences en astrophysique. Ainsi, les étoiles à neutrons et les naines blanches lui doivent leur existence. Lorsque des étoiles plus grosses que le Soleil vieillissent, leur réacteur à fusion nucléaire perd son efficacité et devient incapable de transformer les éléments, de l'hydrogène jusqu'au fer. Elles deviennent instables puis implosent quand leur cœur s'effondre. Leurs couches en pelures d'oignon tombent vers l'intérieur et une partie du gaz est expulsée dans une déflagration de supernova.

À mesure que le gaz s'effondre, la gravitation continue à attirer les couches externes de l'étoile vers l'intérieur, écrasant les atomes les uns contre les autres. Mais les électrons autour de chaque atome résistent – et l'étoile mourante est maintenue par cette seule « pression de dégénérescence ». Un tel astre, nommé



Terre



Naine blanche

Étoile à neutrons

« naine blanche », a à peu près la même masse que le Soleil mais comprimée dans un volume identique à celui de la Terre. Un morceau de naine blanche de la taille d'un morceau de sucre pèserait une tonne.

Dans les étoiles bien plus grosses que le Soleil – au-dessus de 1,4 fois la masse solaire, la limite de Chandrasekhar – la pression devient si grande que les électrons eux-mêmes n'y résistent plus. Ils fusionnent avec les protons pour donner des neutrons. Il en résulte une étoile à neutrons.

Les neutrons sont eux aussi des fermions. Et donc, ils se repoussent les uns les autres et ne peuvent tous adopter le même état quantique. L'étoile survit, mais sa taille diminue de façon drastique : cela reviendrait à concentrer la masse du Soleil dans une zone d'une dizaine de kilomètres. Un morceau d'étoile à neutrons de la taille d'un sucre pèserait plus de cent millions de tonnes. Et les étoiles les plus massives, qui deviennent encore plus compactes, finissent en trous noirs.

Le principe d'exclusion de Pauli s'applique à l'Univers tout entier : des particules élémentaires aux étoiles éloignées.

## l'idée clé

## Deux fermions ne sont jamais identiques

# 13 La mécanique des matrices

**Les innombrables découvertes relatives à la dualité onde-corpuscule et aux propriétés quantiques des atomes faites dans les années 1920 mettaient les physiciens dans l'embarras : leurs théories n'expliquaient pas ces résultats. Il fallait en élaborer de nouvelles. Le physicien allemand Werner Heisenberg ouvrit le feu en se débarrassant des orbites des électrons et en réunissant toutes les variables observées dans un ensemble d'équations fondées sur des matrices.**

En 1920, le physicien danois Niels Bohr ouvrit un nouvel institut à l'université de Copenhague. Des scientifiques du monde entier vinrent travailler avec lui sur les théories atomiques dont il était un des pionniers. Le modèle de Bohr des orbites électroniques permettait d'expliquer le spectre de l'hydrogène et certaines propriétés du tableau périodique des éléments. Mais la théorie n'expliquait pas les propriétés précises des raies spectrales d'atomes plus lourds, même pas celles de l'hélium.

De surcroît, un ensemble de nouveaux résultats remettaient aussi en cause certains aspects du modèle de Bohr. Les preuves de la réalité d'une dualité onde-corpuscule se multipliaient. On observait les rayons X et les électrons rebondir les uns sur les autres et diffracter, confirmant ainsi l'hypothèse de Louis de Broglie selon laquelle la matière peut se comporter comme des ondes et les ondes comme des particules. Pourtant, l'idée d'Einstein sur la nature photonique de la lumière n'était pas encore acceptée par tous.

La plupart des physiciens, dont Bohr et Max Planck, pensaient toujours que les nombres et les règles quantiques résultaient de la structure fondamentale des atomes. Alors, à peine sortis de la guerre, il fallut imaginer une nouvelle façon d'expliquer la quantification de l'énergie.

## chronologie

**1897**
Thomson découvre l'électron

**1905**
Einstein propose le concept de photon

**1913**
Bohr décrit les orbites électroniques autour du noyau

**1924**
De Broglie avance l'idée que les particules peuvent se comporter comme des ondes

À partir de 1924, le physicien allemand Werner Heisenberg fit régulièrement de courts séjours à Copenhague pour y travailler avec Bohr. Il lui vint une idée, alors qu'il travaillait sur les raies spectrales de l'hydrogène. Les physiciens en savaient si peu sur ce qui se passait réellement à l'intérieur des atomes, qu'ils se contentaient d'étudier ce que l'on pouvait observer. Heisenberg tenta alors de concevoir un cadre où toutes les variables quantiques seraient intégrées.

Heisenberg souffrait du rhume des foins et, en juin 1925, il décida de quitter Göttingen pour le bord de mer, où il y avait moins de pollen. Il se rendit sur l'île de Helgoland, au large des côtes allemandes de la mer du Nord. Ce fut durant ce séjour qu'il eut une illumination.

Il était presque trois heures du matin, écrivit Heisenberg plus tard, lorsque le résultat de ses calculs lui apparut. D'abord inquiet des conséquences de sa découverte, il fut ensuite si enthousiaste qu'il ne put dormir. Il sortit et attendit le lever du soleil au sommet d'un rocher.

### Max Born (1882-1970)

Max Born passa son enfance en Pologne, à Wrocław, alors située dans la province prussienne de Silésie. Il étudia les mathématiques à Breslau, Heidelberg et Zurich avant d'arriver à l'université de Göttingen en 1904. Reconnu comme un étudiant exceptionnel, il fut encadré par plusieurs grands mathématiciens et se lia d'amitié avec Albert Einstein. En 1925, Born, son assistant Pascual Jordan, et Werner Heisenberg proposèrent une représentation de la mécanique quantique au moyen de la mécanique des matrices. Ce fut une des grandes réalisations de la physique. Mais le trio ne reçut pas le prix Nobel. Seul Heisenberg l'obtint en 1932. Born le reçut finalement en 1954. Il se peut que les liens de Jordan avec le parti nazi aient pénalisé Born, bien que celui-ci, qui était juif, ait fui l'Allemagne pour se réfugier en Angleterre dès 1933. Comme Einstein, Born était un pacifiste et il participa à des campagnes contre l'arme nucléaire.

**Entrer dans la matrice** Quelle fut la révélation d'Heisenberg ? Pour calculer l'intensité des différentes raies spectrales d'un atome, il avait remplacé les orbites électroniques fixes de Bohr par une description mathématique en termes d'harmoniques d'ondes stationnaires. Ainsi, il pouvait relier leurs propriétés aux sauts quantiques d'énergie en utilisant un ensemble d'équations équivalentes à une série de multiplications.

**« Soyons clairs : quand il est question d'atomes, le langage n'est autre que de la poésie. »**

**Niels Bohr, cité par Heisenberg, 1920**

Heisenberg regagna son université à Göttingen et montra ses calculs à un collègue, Max Born. Celui-ci rapporta plus tard qu'Heisenberg n'était alors pas très sûr de lui et parlait de son idée comme de quelque chose de fou, de vague et d'impubliable. Mais Born en saisit immédiatement la puissance.

Born, qui avait une excellente formation en mathématiques, comprit que l'idée d'Heisenberg serait mieux formulée sous forme de matrices. Les matrices étaient courantes en mathématiques mais peu utilisées en physique. Une matrice est un tableau de valeurs sur lequel on peut appliquer une fonction mathématique de façon séquentielle sur toutes les entrées. La notation matricielle permettait d'exprimer toutes les règles de multiplication d'Heisenberg en une seule équation. Avec son ancien étudiant Pascual Jordan, Born condensa les équations d'Heisenberg sous forme matricielle. Les coefficients des matrices reliaient les énergies des électrons aux raies spectrales. Born et Jordan publièrent rapidement leur travail ; un article signé par les trois physiciens suivit peu après.

L'idée d'Heisenberg était nouvelle parce qu'elle ne se fondait pas de façon évidente sur la représentation des orbites électroniques. Et le formalisme concis de Born et de Jordan permettait aux calculs mathématiques de développer la théorie au-delà des idées préconçues et de faire de nouvelles prédictions.

Mais la « mécanique des matrices » mit longtemps à être adoptée et fut controversée. Non seulement, elle était exprimée dans un étrange langage mathématique qui déroutait les physiciens, mais certaines rivalités entre scientifiques durent aussi être aplanies. Bohr aimait cette théorie – elle fonctionnait bien avec ses idées sur les sauts quantiques. Einstein, lui, ne l'aimait pas.

Einstein essayait d'expliquer la dualité onde-corpuscule. En acceptant l'idée – initialement celle de de Broglie – que les orbites électroniques pouvaient être décrites par des ondes stationnaires, Einstein et ses disciples espéraient encore que les propriétés quantiques pourraient être *in fine* expliquées par une théorie ondulatoire élargie. Cependant, les disciples de Bohr avaient pris une autre direction. La discipline était coupée en deux.

Ceux qui adoptèrent la mécanique des matrices la développèrent pour rendre compte de certains phénomènes quantiques. Wolfgang Pauli parvint à expli-

**« L'atome de la physique moderne n'a aucune propriété immédiate et directe ; ses caractéristiques sont toutes dérivées de quelque chose. »**

**Werner Heisenberg, 1952**

quer l'effet Stark – subdivision des raies spectrales sous l'influence d'un champ électrique – mais pas son principe d'exclusion. Mais la théorie ne s'appliquait pas à l'effet Zeeman ou au spin de l'électron, et elle n'était pas compatible avec la théorie de la relativité.

**Le principe d'incertitude** Les implications de la vision matricielle étaient profondes. Puisqu'elle se concentrait sur les niveaux d'énergie et l'intensité des raies spectrales, la théorie ne disait rien, par définition, sur la localisation ou le mouvement d'un électron. Par ailleurs, que signifiaient les coefficients des matrices et quel était leur sens ? La mécanique des matrices paraissait très abstraite.

Les résultats d'une observation – énergies des électrons ou des raies spectrales – étant des nombres réels, tous les nombres non réels devaient *in fine* disparaître des calculs, quels que soient les artifices mathématiques utilisés. Heisenberg en conclut que la mécanique des matrices ne pouvait expliquer simultanément certaines propriétés des atomes, ce qui aboutit à l'énoncé de son principe d'incertitude.

Néanmoins, avant cela, la mécanique des matrices fut supplantée par une nouvelle théorie. Le physicien autrichien Erwin Schrödinger proposa une autre explication des niveaux d'énergie des électrons, fondée sur les fonctions d'onde.

## l'idée clé

## Tables de multiplication quantiques

# 14 L'équation de Schrödinger

**En 1926, Erwin Schrödinger réussit à décrire les niveaux d'énergie des électrons dans les atomes en les traitant non pas comme des particules mais comme des ondes. Son équation permet de calculer une « fonction d'onde » qui décrit la probabilité qu'un électron soit à tel endroit à un instant donné. Il s'agit d'un des piliers de la mécanique quantique.**

Au début du XX^e siècle, il devint évident que les concepts de particules et d'ondes étaient étroitement liés. Albert Einstein montra en 1905 que les ondes lumineuses pouvaient aussi être considérées comme des flux de photons assimilables à des billes, dont l'énergie est proportionnelle à la fréquence de la lumière. Louis de Broglie suggéra en 1924 que toute la matière se comportait de la même façon : les électrons, les atomes et tous les objets peuvent être diffractés et interférer comme des ondes.

Dans la théorie publiée par Niels Bohr en 1913, les électrons se trouvaient sur des orbites fixes autour du noyau. Les électrons deviennent des ondes stationnaires – comme une corde de guitare qui résonne. Dans un atome, les énergies des électrons se limitent à certaines harmoniques. Un nombre entier de longueurs d'onde doivent tenir sur la circonférence de l'orbitale électronique.

Mais comment les électrons se déplacent-ils ? Si ce sont des ondes, alors ils doivent occuper l'orbite tout entière. Si ce sont des corpuscules, se déplacent-ils sur des orbites circulaires comme les planètes autour du Soleil ? Comment ces orbites se positionnent-elles ? Les orbites des planètes sont presque toutes dans le même plan. Les atomes ont trois dimensions.

## chronologie

**1901**
Planck propose le concept de quanta

**1905**
Einstein propose le concept de photon

**1913**
Bohr décrit les orbitales électroniques

## Les orbitales électroniques

L'équation de Schrödinger conduisit à des modèles tridimensionnels de l'atome plus élaborés. Les orbitales représentent des « régions de probabilité », où les électrons ont 80 à 90 % de chances de se trouver – ce qui n'exclut donc pas qu'ils se trouvent ailleurs. Ces régions n'étaient pas toutes sphériques, en accord avec ce que Bohr avait envisagé. Certaines avaient des formes plus allongées, en forme d'haltères. Aujourd'hui, les chimistes utilisent ces représentations en ingénierie moléculaire.

Le physicien autrichien Erwin Schrödinger se donna comme objectif de décrire mathématiquement l'électron comme une onde tridimensionnelle. En décembre 1925, comme il ne parvenait pas à progresser, il se retira dans un petit chalet isolé à la montagne, avec une maîtresse. Il était de notoriété publique que son mariage battait de l'aile ; il eut de nombreuses liaisons, et son épouse le savait.

**Un progrès notable** Schrödinger était un original – souvent débraillé, toujours avec ses chaussures de marche et son sac à dos. Un collègue se souvient qu'on le prenait parfois pour un clochard quand il assistait à des conférences.

Alors qu'il était à la montagne, Schrödinger réalisa qu'il avait déjà bien progressé dans ses calculs : il pouvait publier ce qu'il avait fait et continuer à travailler sur les aspects plus difficiles, par exemple intégrer la relativité et la dépendance au temps.

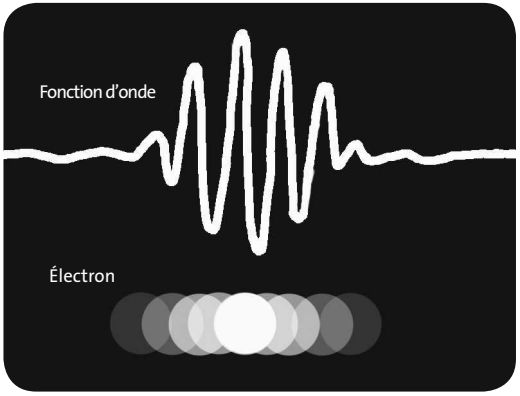
L'article, publié en 1926, présente une équation décrivant la probabilité qu'une particule se comportant comme une onde se trouve en un endroit donné. Pour ce faire, il utilisa la physique des ondes et la théorie des probabilités. Cette équation est aujourd'hui une des pierres angulaires de la mécanique quantique.

**Les mathématiques de l'incertitude** L'équation de Schrödinger prédisait correctement les longueurs d'onde des raies spectrales de l'hydrogène. Un mois plus tard, il soumettait un deuxième article, dans lequel il appliquait sa théorie à des systèmes atomiques élémentaires, telles les molécules diatomiques.

**1924**
De Broglie suggère que la matière peut se comporter comme les ondes

**1925**
Heisenberg publie sa mécanique des matrices

**1926**
Schrödinger publie son équation d'onde




**Les fonctions d'onde décrivent la probabilité de trouver un électron à tel endroit. Plus grande est l'amplitude de la fonction d'onde, plus importante est la probabilité de trouver l'électron à cet endroit.**

Dans un troisième article, il indiquait que son équation d'onde était exactement équivalente à la mécanique des matrices de Werner Heisenberg et qu'elle pouvait expliquer les mêmes phénomènes. Enfin, dans un quatrième article, il intégrait la dépendance au temps, montrant comment une fonction d'onde évoluait.

Comme l'explication de Schrödinger était simple et accessible aux physiciens habitués à la théorie ondulatoire classique, son équation fut rapidement saluée comme révolutionnaire et supplanta immédiatement la mécanique des matrices d'Heisenberg. Cette dernière eut moins de partisans, car elle était exprimée dans un langage mathématique abstrait et peu familier.

Einstein, qui préférait l'approche ondulatoire, fut ravi de l'avancée accomplie par Schrödinger. Bohr s'y intéressa, mais il continuait à préférer la mécanique des matrices qui décrivait mieux les sauts quantiques. La théorie quantique se développait à grands pas mais semblait fracturée. Y apprenait-on réellement quoi que ce soit sur le monde réel ?

**« Dieu pilote l'électromagnétisme en mode ondulatoire les lundi, mercredi et vendredi, et le diable est aux commandes en mode quantique les mardi, jeudi et samedi. »**

**Lawrence Bragg, cité en 1978**

**Fonctions d'onde** Schrödinger exprima la probabilité de trouver une particule en un point donné à un instant particulier au moyen d'une « fonction d'onde » qui contient toutes les informations connues sur la particule.

Les fonctions d'onde sont difficiles à concevoir parce que nous n'en faisons pas l'expérience directe ; nous avons des difficultés à les visualiser et à les interpréter. Tout comme avec la mécanique des matrices d'Heisenberg, il restait un abîme entre la description mathématique d'une onde-corpuscule et l'entité réelle, par exemple l'électron ou le photon.

En physique classique, on pourrait utiliser les lois de Newton pour décrire le mouvement d'une particule. À chaque instant, on saurait exactement où elle est localisée et vers où elle se dirige. En mécanique quantique, cependant, on ne parle que de la probabilité qu'une particule se trouve à tel endroit à tel instant.

À quoi ressemble une fonction d'onde ? Dans l'équation de Schrödinger, une particule isolée flottant dans un espace ouvert a une fonction d'onde qui ressemble à une sinusoïde. La fonction d'onde s'annule là où la particule ne peut se trouver, par exemple au-delà des limites d'un atome.

L'amplitude de la fonction d'onde peut être déterminée en considérant les niveaux d'énergie permis, les quanta d'énergie, qui doivent toujours être positifs. De même, seules certaines harmoniques sont autorisées pour une onde sur une corde de longueur donnée. Comme seuls certains niveaux d'énergie sont permis par la théorie quantique, la particule a plus de chances de se trouver en certains points qu'en d'autres.

Des systèmes plus complexes ont des fonctions d'onde qui sont une combinaison de plusieurs ondes sinusoïdales et d'autres fonctions mathématiques, de la même façon qu'une note de musique se compose de plusieurs harmoniques.

Parce qu'il a appliqué la dualité onde-corpuscule à la description des atomes et de toute forme de matière, Schrödinger est considéré comme l'un des pères fondateurs de la mécanique quantique.

**« La mécanique quantique est certes impressionnante, mais une petite voix me dit que nous n'avons pas encore touché au but. La théorie nous apprend beaucoup de choses, mais ne nous rapproche pas des secrets du « Vieux ». Pour ma part, je suis convaincu qu'Il ne joue pas aux dés. »**

**Albert Einstein,** lettre à Max Born, 4 décembre 1926

## l'idée clé
# Les harmonies de l'atome

# 15 Le principe d'incertitude d'Heisenberg

**En 1927, Werner Heisenberg comprit que certaines propriétés du monde atomique sont incertaines par nature. Si l'on connaît précisément la position d'une particule, alors on ne peut connaître simultanément sa quantité de mouvement. Si l'on connaît l'instant où elle a fait ceci ou cela, alors on ne peut connaître son énergie au même moment.**

En 1926, un intense débat commença entre Werner Heisenberg et Erwin Schrödinger. À moins d'un an d'écart, ils avaient présenté deux façons radicalement différentes de calculer les états d'énergie quantifiés des électrons dans les atomes, chacune ayant des implications très différentes.

Heisenberg avait proposé sa mécanique des matrices, description mathématique des liens entre les états d'énergie des électrons et les raies spectrales produites par ces électrons quand ils faisaient des sauts quantiques entre les niveaux d'énergie. Il s'agissait d'une réussite technique, mais les physiciens hésitaient à les utiliser car ils ne comprenaient pas le sens des équations – formulées dans le langage des matrices qui leur était peu familier.

Fort du soutien d'Einstein, le formalisme proposé par Schrödinger semblait plus accessible. La mécanique ondulatoire, qui décrivait les énergies des électrons en termes d'harmoniques et d'ondes stationnaires, faisait appel à des concepts plus familiers. Et elle s'accordait avec l'idée de de Broglie selon laquelle la matière pouvait se comporter comme une onde, idée confirmée par des expériences qui montraient que les électrons sont diffractés et interfèrent.

## chronologie

**1901**
Planck propose le concept de quanta d'énergie

**1905**
Einstein propose le concept de photon

**1913**
Bohr décrit les orbitales électroniques autour du noyau

**1924**
De Broglie avance l'idée que les particules peuvent se comporter comme des ondes

> **« Plus on détermine la position d'une particule avec précision, moins on pourra déterminer avec précision sa quantité de mouvement au même instant ; et *vice versa*. »**
>
> **Werner Heisenberg, 1927**

En mai 1926, Schrödinger publia un article où il établissait que la mécanique des matrices et la mécanique ondulatoire donnaient des résultats similaires – elles étaient mathématiquement équivalentes. Il soutenait néanmoins que sa théorie ondulatoire était meilleure, ce qui contraria Heisenberg. Une des raisons pour lesquelles Schrödinger préférait sa théorie était que les discontinuités et les sauts quantiques intrinsèques au formalisme matriciel paraissaient peu naturels alors que le caractère continu des ondes était plus esthétique. En revanche, Heisenberg et Bohr pensaient que ces sauts quantiques faisaient la puissance de leur modèle.

Heisenberg était susceptible. Il était jeune, à un moment critique de sa carrière, s'efforçant d'obtenir une chaire dans une université allemande. Il fut froissé que l'on fasse de l'ombre à sa découverte.

**Duel quantique** En octobre 1926, Schrödinger rendit visite à Niels Bohr, à Copenhague. Heisenberg, qui travaillait avec Bohr, y était également. Les physiciens discutèrent de leurs idées mais ne parvinrent pas à s'accorder. Ils repartirent méditer l'interprétation physique de leurs équations. Peu après, Pascual Jordan, un collègue d'Heisenberg à Göttingen, et Paul Dirac, de Cambridge, combinèrent les équations des deux représentations en un seul ensemble – ce qui forme la base de ce que nous appelons aujourd'hui la mécanique quantique.

Les physiciens essayèrent d'expliquer ce que signifiaient vraiment ces équations. Comment des mesures « classiques » réalisées en laboratoire pouvaient-elles être reliées à ce qui se passait à l'échelle d'un atome ?

**L'incertitude comme seule certitude** Alors qu'il étudiait ses équations, Heisenberg se heurta à un problème fondamental. Il réalisa que certaines propriétés ne pourraient être mesurées avec précision car les appareils de mesure eux-mêmes devraient interférer avec les atomes mesurés.

**1925**
Heisenberg propose sa mécanique des matrices

**1926**
Schrödinger publie son équation d'onde

**1927**
Heisenberg publie son principe d'incertitude

La position d'une particule et sa quantité de mouvement ne pourraient être connues précisément en même temps ; pas plus que son énergie ne pourrait être connue à un instant précis. Et cela n'était pas le fait du manque de talent des expérimentateurs. Ces incertitudes trouvaient leur source au cœur même de la mécanique quantique. Heisenberg présenta son « principe d'incertitude » d'abord dans une lettre à Wolfgang Pauli en février 1927, puis plus tard dans un article.

Toute mesure présente un certain degré d'incertitude. Quand on mesure la taille d'un enfant, la précision ne dépasse pas celle de la toise, disons un millimètre. Sans compter que sans toise, on peut facilement se tromper d'un centimètre si le mètre est mal tendu ou si l'œil de l'observateur est mal placé par rapport à la tête de l'enfant.

Mais l'incertitude du principe d'Heisenberg n'a rien à voir avec ce type de manque de précision. Elle est d'une nature profondément différente : quelle que soit la précision de vos instruments, vous ne pouvez pas connaître simultanément les valeurs exactes de la position et de la quantité de mouvement. Si vous en identifiez une, l'autre devient imprécise.

**Une expérience de pensée** Heisenberg imagina une expérience pour mesurer le mouvement d'une particule subatomique, tel un neutron. Un radar pourrait suivre la particule par l'intermédiaire d'ondes électromagnétiques se réfléchissant sur elle. Pour améliorer la précision, on utiliserait des rayons gamma, dont les longueurs d'onde sont très courtes. Néanmoins, du fait de la dualité onde-corpuscule, le faisceau de rayons gamma qui heurterait le neutron agirait comme une série de billes. Les fréquences des rayons gamma étant très élevées, chaque photon transporterait une grande quantité d'énergie et chaque choc entre un photon et le neutron modifierait la vitesse du neutron. Ainsi, même si vous réussissiez à connaître exactement la position du neutron à un instant donné, sa vitesse changerait d'une façon imprévisible.

Si vous utilisiez des photons moins énergétiques pour minimiser le changement de vitesse, les longueurs d'onde correspondantes seraient plus longues et la mesure de la position du neutron serait moins précise. Quelle que soit votre façon d'optimiser le procédé de mesure, vous ne pourrez jamais connaître en même temps la position d'une particule et sa vitesse. Il existe une limite fondamentale à ce que vous pouvez connaître d'un système atomique.

Heisenberg ne tarda pas à mesurer les conséquences importantes de son principe d'incertitude. Imaginez une particule en mouvement. Ce que l'on peut savoir étant limité, on ne peut décrire le comportement passé de la particule avant qu'il ne soit fixé par une mesure. Pour citer Heisenberg, « une trajec-

toire ne commence à exister qu'au moment où nous l'observons. » La trajectoire future de la particule ne peut pas davantage être prédite puisqu'on ne connaît ni sa vitesse ni sa position. Le passé et le futur deviennent flous.

**Newton dépassé** Un monde aussi imprévisible venait contredire l'interprétation de la réalité que les physiciens proposaient alors. Au lieu d'un univers empli d'entités concrètes – existant indépendamment et dont les mouvements et propriétés pouvaient être mesurés expérimentalement – la mécanique quantique révélait d'innombrables probabilités qui dépendaient de l'action d'un observateur.

Il n'y a ni cause, ni effet, seulement du hasard. Nombre de physiciens trouvèrent cette maxime difficile à accepter. Einstein ne l'accepta jamais. Pourtant, c'est bien ce que nous disent les expériences et les mathématiques. Dès lors, la physique s'aventurait en dehors du laboratoire, dans le royaume de l'abstraction.

### Werner Heisenberg (1901-1976)

Werner Heisenberg grandit à Munich, en Allemagne, et aimait beaucoup la montagne. Pendant la Première Guerre mondiale, alors qu'il était adolescent, il travailla dans une ferme et profita de son temps libre pour jouer aux échecs et apprendre les mathématiques. Il étudia la physique théorique à l'université de Munich puis obtint son doctorat alors qu'il était encore très jeune. Il fut nommé professeur à Leipzig à l'âge de 25 ans et travailla à Munich, Göttingen et Copenhague, où il rencontra Niels Bohr et Albert Einstein. En 1925, il inventa la mécanique des matrices pour laquelle il reçut le prix Nobel en 1932. Il formula son principe d'incertitude en 1927.

Durant la Seconde Guerre mondiale, Heisenberg dirigea le projet d'armes nucléaires des Allemands qui ne parvinrent pas à produire la bombe atomique. Aujourd'hui, on ignore encore s'il a volontairement fait prendre du retard au projet ou s'il manquait des ressources nécessaires.

## l'idée clé

## Incertitude, seule certitude

# 16 L'interprétation de Copenhague

**En 1927, le physicien danois Niels Bohr tenta d'expliciter le sens physique de la mécanique quantique. Dans l'interprétation dite aujourd'hui de Copenhague, Bohr combina le principe d'incertitude d'Heisenberg et l'équation d'onde de Schrödinger pour expliquer comment l'intervention d'un observateur nous interdit de connaître certaines choses.**

La quête pour comprendre le sens de la mécanique quantique commença réellement en 1927. Les physiciens se divisèrent en deux camps. Werner Heisenberg et ses collègues pensaient que la nature corpusculaire des ondes électromagnétiques et de la matière, décrite dans sa représentation matricielle, prévalait. Les partisans d'Erwin Schrödinger soutenaient que la physique des ondes représente le socle du comportement quantique.

> « Quiconque n'est pas choqué par la théorie quantique ne l'a pas comprise. »
>
> Niels Bohr, 1958

Heisenberg avait également montré que notre compréhension était fondamentalement limitée par son principe d'incertitude. Il pensait qu'on ne peut connaître ni le passé ni l'avenir tant qu'ils ne sont pas fixés par l'observation, et ce en raison de l'incertitude intrinsèque entourant tous les paramètres décrivant le mouvement d'une particule subatomique.

Un autre homme essayait de concilier ces approches. Bohr, directeur du département de physique théorique de l'université de Copenhague où travaillait Heisenberg, avait, dix ans plus tôt, expliqué les niveaux d'énergie des électrons dans l'atome d'hydrogène. Lorsqu'Heisenberg imagina son principe d'incertitude en 1927, il travaillait à Copenhague à l'institut dirigé par Bohr. On dit que Bohr rentrait d'un séjour à la montagne quand il trouva le manuscrit

## chronologie

**1901**
Planck propose le concept de quanta d'énergie

**1905**
Einstein propose le concept de photon

**1913**
Bohr décrit les orbitales électroniques autour du noyau

**1924**
De Broglie émet l'idée que la matière peut se comporter comme des ondes

d'Heisenberg sur son bureau, accompagné d'une demande de le transmettre à Einstein.

Bohr fut intrigué par l'idée mais dit à Einstein que l'expérience imaginée par Heisenberg qui faisait intervenir un microscope à rayons gamma était biaisée, car elle ne prenait pas en considération les propriétés ondulatoires de la matière. Heisenberg corrigea alors son manuscrit en tenant compte des phénomènes de diffraction, mais cela ne modifiait pas les conclusions. L'incertitude était inhérente à la mécanique quantique. Mais que se passait-il vraiment ?

**Une pièce qui ne cesse de tourner** Pour Bohr, les aspects ondulatoire et corpusculaire d'une entité réelle étaient des caractéristiques « complémentaires ». Ce sont les deux faces d'une même médaille, tout comme certaines illusions nous font voir deux motifs différents sur un même dessin – par exemple le contour d'un vase ou deux profils qui se font face.

En réalité, l'électron, le proton ou le neutron ne sont ni des ondes, ni des corpuscules ; ce sont les deux à la fois. Telle ou telle caractéristique apparaît quand l'expérimentateur intervient et sélectionne l'aspect à mesurer. La lumière semble se comporter tantôt comme un ensemble de photons, tantôt comme une onde selon le type de signal que nous recherchons. Selon Bohr, puisque l'expérimentateur perturbe le système, il y a des limites à ce que nous pouvons connaître de la nature. C'est le fait même d'observer qui produit les incertitudes établies par Heisenberg. Cette

### Niels Bohr (1885-1962)

L'institut de Niels Bohr à Copenhague fut au cœur du développement de la théorie quantique. Les meilleurs physiciens, de Heisenberg à Einstein, y séjournaient régulièrement. Bohr l'avait mis sur pied à son retour d'Angleterre où il avait passé quelque temps après avoir terminé son doctorat de physique théorique à l'université de Copenhague.

Après s'être fâché avec J. J. Thomson, qui avait découvert l'électron à Cambridge, et après avoir travaillé avec le pionnier de la physique nucléaire, Ernest Rutherford, à Manchester, Bohr était rentré au Danemark en 1916 pour y développer sa propre conception de l'atome. Son travail lui valut le prix Nobel en 1922.

Après l'accession d'Hitler au pouvoir en 1934, les scientifiques se rendaient souvent à l'institut de Bohr pour débattre des subtilités de la théorie quantique. En 1943, lorsque le Danemark fut occupé, Bohr s'enfuit en Suède sur un bateau de pêche, puis gagna l'Angleterre où il participa à l'effort de guerre. Il rejoignit ensuite Los Alamos et fut conseiller du projet Manhattan ; mais il fit ensuite campagne contre les armes nucléaires.

> « Quand Bohr est dans les parages, tout est un peu différent. Même le plus terne acquiert de l'éclat. »
>
> Isidor Rabi, cité par Daniel Kevles, *Les physiciens* (1988)

approche est aujourd'hui connue sous le nom d'« interprétation de Copenhague » de la mécanique quantique.

Bohr comprit que le principe d'incertitude, selon lequel on ne peut mesurer simultanément la position et la quantité de mouvement d'une particule subatomique, était fondamental. Dès que l'une de ces deux caractéristiques est mesurée rigoureusement, l'autre perd de sa précision. Heisenberg pensait que l'incertitude provenait du processus de mesure lui-même. Pour mesurer une grandeur, il faut interagir avec elle, par exemple envoyer des photons sur une particule pour suivre son mouvement. Heisenberg comprit que cette interaction modifie le système et rend incertain l'état ultérieur.

**Le rôle de l'observateur** Mais la conception de Bohr était quelque peu différente : pour lui, l'observateur fait partie du système qu'il mesure. Cela n'a pas de sens de décrire le système sans y inclure l'appareil de mesure. Comment pouvons-nous décrire le mouvement d'une particule en la considérant comme isolée, alors même qu'elle est bombardée par les photons qui la suivent ? Même le terme d'observateur est mal choisi, car il suggère une entité extérieure. Or, observer, c'est comme actionner un interrupteur qui détermine l'état final du système. Avant cet instant, nous pouvons seulement affirmer que le système présente une certaine probabilité de se trouver dans tel ou tel état possible.

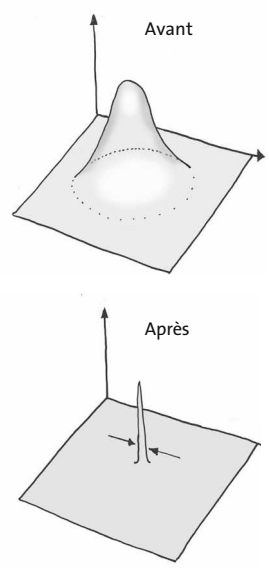
## Le principe de correspondance

Pour combler le vide entre les systèmes quantique et classique, y compris à notre échelle, Bohr introduisit un principe de correspondance, selon lequel le comportement quantique disparaît dans les systèmes de grande taille, ceux qui nous sont familiers et pour lesquels la physique newtonienne s'applique.

Que se passe-t-il quand nous réalisons une mesure ? Pourquoi de la lumière passant à travers deux fentes interfère-t-elle comme une onde un jour, pour se comporter le lendemain comme un flux de particules si nous essayons d'attraper un photon lorsqu'il passe par une des fentes ? Selon Bohr, c'est nous qui choisissons à l'avance ce qui va se produire en décidant la façon de le mesurer.

**Ce que nous pouvons savoir** Bohr se tourna vers l'équation de Schrödinger et son concept de « fonction d'onde » qui contient toute l'information dont nous pouvons

disposer au sujet d'une particule. Quand le caractère d'un objet est fixé (particule ou onde) par l'observation, on dit que la fonction d'onde « s'effondre ». Toutes les possibilités, sauf une – le résultat – ont disparu. Ainsi, un faisceau lumineux est un mélange de deux possibilités : celle d'être une onde et celle d'être une particule. Lorsque nous détectons de la lumière, sa fonction d'onde s'effondre pour ne laisser qu'une seule forme, non parce que la lumière change de comportement mais parce qu'elle est véritablement onde et particules.




**Une observation entraîne l'« effondrement » de la fonction d'onde.**

Heisenberg commença par rejeter l'interprétation de Bohr, s'en tenant à sa représentation initiale de particules et de sauts d'énergie. Le débat fut animé. On dit qu'Heisenberg éclata en sanglots au cours d'une discussion avec Bohr. Les enjeux pour la carrière du jeune physicien étaient si importants !

La situation s'aplanit vers la fin de l'année 1927 quand Heisenberg obtint un poste à l'université de Leipzig. Bohr présenta son interprétation lors d'une conférence en Italie, et nombre de physiciens l'accueillirent favorablement. En octobre, Heisenberg et Max Born parlaient de la mécanique quantique comme d'un problème résolu.

Tout le monde n'était pas convaincu par l'interprétation de Bohr, notamment Einstein et Schrödinger qui restèrent sceptiques jusqu'à la fin de leur vie. Einstein pensait que les particules pouvaient être mesurées avec précision et il n'admettait pas l'idée qu'elles soient régies par des probabilités. Il restait persuadé qu'une théorie plus élaborée permettrait de se débarrasser des probabilités. La mécanique quantique était à ses yeux une théorie incomplète.

Aujourd'hui encore, les physiciens tentent de comprendre le sens profond de la mécanique quantique. Certains ont tenté de proposer de nouvelles interprétations, mais aucune n'a pris le dessus sur celle de Bohr. L'interprétation de Copenhague de la mécanique quantique a résisté au temps grâce à sa puissance explicative.

## l'idée clé

## On ne peut pas tout connaître

# 17 Le chat de Schrödinger

**Pour mettre en évidence à quel point l'interprétation de Copenhague était ridicule, Erwin Schrödinger envisagea une expérience de pensée portant sur un chat. Il imagina qu'il était enfermé dans une boîte avec une fiole de poison et affirma qu'il serait absurde de penser que le chat était un nuage de probabilité, simplement parce que l'on ignorait s'il avait bu ou non le poison.**

L'interprétation de Copenhague de la mécanique quantique proposée par Niels Bohr parvint à emporter la conviction de nombreux physiciens, mais pas celle des adeptes endurcis de la théorie ondulatoire. Erwin Schrödinger et Albert Einstein restèrent sur le bord du chemin.

En 1935, Schrödinger tenta de ridiculiser l'idée soutenue par Bohr d'un monde quantique probabiliste flou en publiant un article décrivant une situation hypothétique illustrant la nature contre-intuitive de phénomènes tels que l'effondrement d'une fonction d'onde ou l'influence de l'observateur. Albert Einstein en fit autant avec son article sur le paradoxe dit d'Einstein-Podolsky-Rosen, laissant supposer qu'il existait des corrélations à longue distance.

Dans l'interprétation de Copenhague, les systèmes quantiques demeurent obscurs et indéterminés tant qu'aucun observateur n'intervient, tant que personne ne touche l'interrupteur, ce qui détermine alors la propriété qui sera mesurée. La lumière est à la fois onde et particule jusqu'à ce que nous décidions quelle forme nous souhaitons tester – la lumière alors adopte cette forme.

Schrödinger, qui voulait absolument développer une théorie ondulatoire des atomes, n'aimait pas l'idée que quelque chose de caché existât sous toutes les

## chronologie

**1905** Einstein propose le concept de photon

**1924** De Broglie suggère que les particules peuvent se comporter comme des ondes

**1925** Heisenberg propose sa mécanique des matrices

**1926** Schrödinger publie son équation d'onde

formes possibles. Quand on ouvre un réfrigérateur et qu'on y trouve du fromage et du lait, on imagine mal qu'il ait été confronté, juste avant, à une sorte de dilemme mathématique, hésitant entre le fromage et le lait ou du chocolat et des œufs !

Les probabilités quantiques avaient donc peu de sens à notre échelle. Aussi l'article de Schrödinger présentait-il une expérience de pensée tentant d'illustrer cela à l'aide d'un exemple plus facile à percevoir, un chat.

**Flou quantique** Schrödinger imagina le scénario suivant. Un chat est enfermé dans une boîte, avec un « dispositif diabolique » : une fiole contenant un poison à base de cyanure, qui ne se brisera que si un atome radioactif se désintègre. Le destin du chat dépend donc de la probabilité de désintégration de l'atome.

« Si l'on abandonne ce système à lui-même pendant une heure, le chat sera encore vivant si l'atome ne s'est pas désintégré » écrivait Schrödinger. « La première désintégration l'empoisonnerait. » Il y avait une chance sur deux pour que le chat soit en vie ou soit mort au moment de l'ouverture de la boîte.

**« Je suis convaincu que la physique théorique est de la philosophie. »**

**Max Born, *Ma vie et mes idées* (1968)**

D'après l'interprétation de Copenhague, tant que la boîte est fermée le chat existe dans une superposition d'états – vivant et mort à la fois. Ce n'est qu'au moment où on ouvre la boîte que son destin est scellé, tout comme un photon est à la fois une onde et une particule jusqu'à ce que l'on choisisse de le détecter et que sa fonction d'onde s'« effondre », favorisant l'une ou l'autre des deux formes.

Schrödinger soutenait qu'une telle abstraction n'avait pas de sens pour un animal réel. Certes, il pouvait être vivant ou mort, mais pas dans une superposition de ces deux états. Selon lui, l'interprétation de Bohr était un raccourci de ce qui se passait à un niveau plus profond. L'Univers fonctionne de diverses façons cachées et nous ne voyons qu'une partie de l'image à chaque instant.

Einstein aussi pensait que l'interprétation de Copenhague était absurde et soulevait bien des questions. Comment l'observation pouvait-elle entraîner l'effondrement de la fonction d'onde ? Qui (ou quoi) peut réaliser l'observation ?

Faut-il que l'observateur soit un être humain ? Le chat peut-il s'observer lui-même ? La conscience est-elle nécessaire ?

Le chat peut-il provoquer l'effondrement de la fonction d'onde de l'atome radioactif pour choisir son destin ? D'ailleurs, comment se fait-il que quelque chose existe dans l'Univers ? Qui observa la première étoile ou la première galaxie ? Étaient-elles dans une incertitude quantique jusqu'à ce que la vie apparaisse ? Les énigmes sont sans fin.

En suivant jusqu'au bout la logique de l'interprétation de Copenhague, il se peut que rien de tel n'existe dans l'Univers. Cela rappelle la philosophie de George Berkeley, un philosophe du XVII^e siècle, contemporain d'Isaac Newton. Berkeley émit l'hypohèse que le monde entier n'était que le fruit de notre imagination. Nous ne pouvons apporter aucune preuve de l'existence de quoi que ce soit d'extérieur à nous, et tout ce que nous pouvons sentir ou savoir est enfermé dans notre esprit.

**Des mondes multiples** Une nouvelle approche à la question de savoir comment les mesures imposaient les résultats fut proposée en 1957 par Hugh Everett. Il suggéra que les observations ne détruisaient pas les autres options, mais les envoyaient dans une série d'univers parallèles.

D'après son hypothèse des « mondes multiples », à chaque fois que nous fixons une des caractéristiques d'un photon, l'Univers se sépare en deux. Dans un monde, la lumière est une onde ; dans l'autre, elle est une particule. Dans un

### Erwin Schrödinger (1887-1961)

Fils d'un botaniste, Erwin Schrödinger naquit à Vienne. À l'université, il choisit d'étudier la physique théorique bien qu'il ait également été intéressé par la poésie et la philosophie. Durant la Première Guerre mondiale, il servit dans l'artillerie autrichienne en Italie, poursuivant ses recherches jusque sur le front.
Schrödinger revint ensuite à la vie universitaire, notamment à Zurich et à Berlin. Lorsque les Nazis accédèrent au pouvoir, il décida de quitter l'Allemagne pour Oxford. Peu après son arrivée, en 1933, il apprit qu'il avait reçu le prix Nobel, avec Paul Dirac, pour leurs travaux sur la mécanique quantique. En 1936, il revint à Graz, en Autriche, mais fut à nouveau dépassé par les événements politiques. Il perdit son poste après avoir critiqué les Nazis, et finit par aller travailler à l'Institut des études avancées de Dublin, où il resta jusqu'au moment où il prit sa retraite et rentra à Vienne. Sa vie privée fut compliquée : il eut de nombreuses liaisons, dont sa femme avait généralement connaissance, et eut plusieurs enfants hors mariage.

**« D'après Einstein, il devait exister quelque chose comme un monde réel, pas nécessairement représenté par une fonction d'onde ; tandis que pour Bohr, la fonction d'onde ne décrivait pas un microcosme 'réel', mais seulement un 'savoir' utile pour faire des prédictions. »**

**D'après Sir Roger Penrose, 1994**

certain univers, le chat est vivant quand nous ouvrons la boîte ; dans la dimension complémentaire, il a été empoisonné.

Sur tous les autres plans, les deux branches de l'Univers sont les mêmes. Chaque observation produit donc un nouveau monde, et les branches se multiplient. À l'échelle de l'histoire de l'Univers, cela ferait une grande quantité de mondes parallèles – un nombre indéfini, peut-être même infini.

L'idée d'Everett fut d'abord ignorée, mais un article de vulgarisation scientifique finit par séduire les amateurs de science-fiction, la faisant ainsi connaître. Elle s'accorde aujourd'hui avec une variante moderne, la théorie des « multivers », que certains physiciens utilisent pour expliquer pourquoi l'Univers est si hospitalier : ce serait parce que tous les univers hostiles sont ailleurs.

## l'idée clé
## Mort et vif

# 18 Le paradoxe EPR

**En 1935, trois physiciens – Albert Einstein, Boris Podolsky et Nathan Rosen – conçurent un paradoxe qui défiait les interprétations de la mécanique quantique. Le fait que de l'information quantique puisse apparemment se propager plus vite que la lumière semblait ouvrir une brèche dans l'idée de fonctions d'onde s'effondrant au moment de l'observation.**

L'interprétation de Copenhague de la mécanique quantique proposée par Niels Bohr en 1927 implique que la mesure elle-même influence un système quantique qui adopte les propriétés observées ensuite. Les propriétés ondulatoires ou corpusculaires de la lumière savent ainsi quand apparaître, parce que l'expérimentateur leur dit quoi faire.

Einstein trouvait cela absurde. L'idée de Bohr impliquait que les systèmes quantiques demeurent dans le flou jusqu'à ce qu'ils soient observés : avant qu'une observation vienne dire dans quel état il est, le système se trouve dans une superposition d'états possibles. Selon Einstein, cela n'était pas réaliste. Une particule existe, que nous soyons ou non là pour l'observer.

Einstein pensait que toute chose dans l'Univers existait à part entière, et que les incertitudes en mécanique quantique reflétaient un problème dans la théorie ou dans notre interprétation. Pour mettre en lumière les lacunes de l'interprétation de Copenhague, Einstein et ses collègues Boris Podolsky et Nathan Rosen conçurent une expérience de pensée qu'ils publièrent en 1935 et qui est aujourd'hui connue sous le nom de « paradoxe Einstein-Podolsky-Rosen », ou paradoxe EPR.

Imaginez une particule, par exemple un noyau atomique, se désintégrant en deux entités plus petites. D'après les règles de conservation de l'énergie, si la particule mère était initialement immobile, les particules-filles auront des quantités de mouvement et des moments angulaires de même amplitude et de signes opposés. Elles se sépareront en tournant dans des directions opposées.

## chronologie

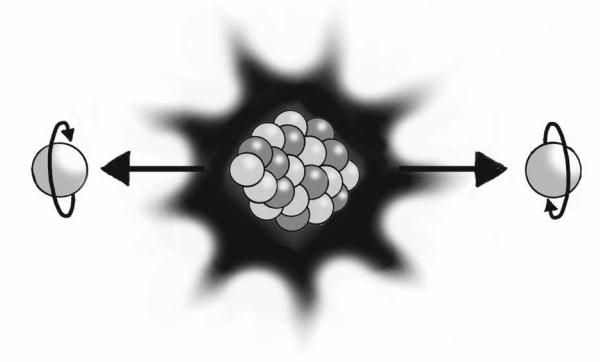
**1905**
Einstein propose le concept de photon

**1924**
De Broglie suggère que les particules peuvent se comporter comme des ondes

**1925**
Heisenberg propose sa mécanique des matrices

**1926**
Schrödinger publie son équation d'onde

D'autres propriétés de la paire ainsi créée restent liées. Si nous mesurons la direction du spin d'une particule, nous connaissons instantanément la direction de l'autre : le spin doit être opposé pour respecter les règles quantiques. Sous réserve qu'aucune des particules n'interfère avec d'autres – ce qui brouillerait le signal –, cela reste vrai quelle que soit la distance qui sépare les particules et indépendamment du temps.



**Un noyau atomique se désintègre en deux particules de spins opposés.**

Dans le cadre de l'interprétation de Copenhague, les deux particules-filles existent d'abord comme une superposition de tous les résultats possibles – un mélange de toutes les vitesses et de toutes les valeurs de spin qu'elles peuvent prendre. Au moment où nous réalisons une observation sur l'une d'elles, la fonction d'onde des deux particules s'effondre pour conforter le résultat.

Einstein, Podolsky et Rosen soutinrent que cela n'avait aucun sens. Einstein savait que rien ne pouvait se propager plus vite que la lumière. Alors comment pouvait-on faire passer un signal instantané à une particule très éloignée, potentiellement même de l'autre côté de l'Univers ? L'interprétation de Copenhague devait être erronée. Schrödinger utilisa plus tard le terme d'intrication pour désigner cette étrange action à distance.

**« La théorie quantique révèle ainsi la profonde unité de l'Univers. »**

**Fritjof Capra, *Le Tao de la physique* (1975)**

**1927**
Heisenberg publie son principe d'incertitude

**1927**
Bohr propose l'interprétation de Copenhague

**1935**
Einstein, Podolsky et Rosen publient leur paradoxe

**1935**
Schrödinger publie son scénario du chat

**L'intrication** Einstein croyait à une « réalité locale », c'est-à-dire que toute chose existe indépendamment de nous et qu'aucun signal ne peut transporter de l'information plus vite que la lumière. Dans l'expérience de pensée du paradoxe EPR, il pensait que chacune des deux particules devait savoir dans quel état se trouvait l'autre au moment où elles se séparaient. Elles emportaient ce savoir avec elles, plutôt que de changer simultanément d'état à distance.

> **« Les lois mathématiques qui reflètent la réalité ne sont pas certaines ; et celles qui le sont ne reflètent pas la réalité. »**
>
> Albert Einstein, *Sidelights on Relativity* (1920)

Mais Einstein se trompait. Son idée paraît raisonnable et correspond à notre perception du monde. Mais elle a été infirmée par de nombreuses expériences quantiques. La « drôle d'action à distance » a bel et bien lieu, et des particules appariées semblent « se parler » à travers l'espace plus vite que la lumière. Les physiciens ont réalisé à plusieurs reprises l'intrication de plus de deux particules et les ont observées changer d'état simultanément à des dizaines de kilomètres de distance.

La communication quantique à distance ouvre un vaste champ d'applications pour les télécommunications, par exemple l'envoi instantané de messages à très longue distance. Elle rend aussi possible de construire des ordinateurs quantiques capables de réaliser de nombreux calculs simultanément en utilisant la totalité de la mémoire de la machine.

Les unités d'information quantique sont nommées « bits quantiques » ou « qubits ». Tout comme les ordinateurs standards utilisent un code binaire pour transcrire l'information en séquences de 0 et de 1, les ordinateurs quantiques travailleraient avec des qubits à deux états quantiques. Les qubits pourraient exister dans une superposition d'états, permettant ainsi de réaliser des calculs dont on ne peut que rêver pour l'instant.

Et pourtant, l'indétermination qui donne à l'information quantique sa puissance signifie aussi que nous ne pouvons transmettre un ensemble complet d'informations d'un point à un autre. Le principe d'incertitude d'Heisenberg implique qu'il y aura toujours une lacune dans ce que nous pouvons savoir. Ainsi, la téléportation humaine – celle de la science-fiction – est impossible.

**Action à distance** Bien que la transmission d'atomes soit impossible, on peut transférer de l'information d'un point à un autre à l'aide de la téléportation quantique. Si deux personnes – souvent appelées Alice et Bob par

les physiciens – disposent chacune d'une particule appartenant à une paire intriquée, ils peuvent, en faisant certaines mesures, s'en servir pour transférer des qubits.

D'abord, Alice et Bob doivent se partager une paire intriquée, par exemple des photons. Le qubit d'Alice peut se trouver dans un état qu'elle veut communiquer à Bob. Même sans connaître cet état, elle peut influer sur le photon de Bob pour transférer ce message. En réalisant une mesure sur son photon, Alice le détruit, mais le photon de Bob s'adapte en conséquence. Bob réalise alors une mesure pour en extraire l'information.

Dans une telle expérience, il n'y a pas de téléportation de matière. À part le premier échange de particule, il n'y a aucune communication directe entre les deux messagers. D'ailleurs, le message original d'Alice est détruit au moment de l'envoi, et son contenu est recréé ailleurs.

Des particules intriquées peuvent aussi être utilisées pour transmettre des messages codés, de sorte que seul le destinataire choisi peut les lire. Tout espion tentant d'écouter le message au passage perturberait l'intrication et personne ne pourrait plus lire le message.

Le malaise d'Einstein vis-à-vis de l'intrication était bien compréhensible – il est difficile d'imaginer l'Univers comme un réseau de connexions quantiques, empli de particules connectées à leurs lointaines jumelles. Mais il en est ainsi. L'Univers est un immense système quantique.

## l'idée clé

## Messagerie instantanée

# 19 L'effet tunnel

**La radioactivité ne peut être expliquée qu'avec la mécanique quantique. Une particule alpha a besoin d'une très grande énergie pour échapper à l'emprise du noyau, mais comme il y a une probabilité non nulle qu'elle y parvienne, il arrive qu'elle franchisse la barrière d'énergie. C'est l'effet tunnel.**

Lorsque vous lancez une balle de tennis contre un mur, vous vous attendez à ce qu'elle rebondisse et revienne vers vous. Imaginez qu'au lieu de cela, elle traverse le mur. C'est ce qui peut se produire à l'échelle atomique, d'après les principes de la mécanique quantique.

Une particule, une molécule ou même un chat peuvent être décrits par une onde – représentée par la fonction d'onde de l'équation de Schrödinger. Ainsi, les électrons ne tournent pas autour des noyaux comme des planètes mais se répartissent sur leurs orbitales. Si nous considérons l'électron comme une particule, il peut être n'importe où dans cette zone, avec une certaine probabilité. Et même si cela est peu probable, il n'est pas exclu qu'un électron puisse même s'échapper de son atome.

L'effet tunnel est la capacité qu'a une particule, dans le monde quantique, d'accéder à un niveau d'énergie qu'elle ne pourrait pas atteindre dans la représentation classique. Un peu comme si un cheval pouvait franchir une haie trop haute pour lui parce que sa fonction d'onde traverserait la haie. Le fait de franchir des barrières d'énergie par effet tunnel joue un rôle dans les processus de fusion nucléaire à l'œuvre dans le Soleil et les autres étoiles ; il trouve aussi des applications en électronique et en optique.

**Dégénérescence radioactive** Les physiciens ont eu l'idée de l'effet tunnel en essayant de comprendre comment les atomes radioactifs se désintègrent. Il est impossible de prédire le moment exact où un noyau instable va se désintégrer et émettre un rayonnement, mais sur un grand nombre de noyaux

## chronologie

**1896**
Henri Becquerel découvre la radioactivité

**1926**
Schrödinger publie son équation d'onde

**1926**
Hund propose le concept d'effet tunnel

nous savons en évaluer la probabilité. Cette information est généralement exprimée par la « demi-vie » qui désigne la durée qu'il faut pour que la moitié environ des atomes se soient désintégrés. Avec un seul atome, c'est le laps de temps qu'il faut pour avoir une chance sur deux d'assister à une désintégration.

En 1926, Friedrich Hund imagina le concept d'effet tunnel qui fut bientôt utilisé pour expliquer le rayonnement alpha. Un morceau de polonium-212, par exemple, émet spontanément des particules alpha (deux protons et deux neutrons) avec une demi-vie de 0,3 microseconde. Ces particules ont des énergies d'environ 9 MeV (millions d'électronvolts), alors qu'il faudrait 26 MeV d'après la physique classique pour s'échapper du noyau. Elles ne devraient donc pas pouvoir s'en extraire. Que se passe-t-il alors ?

Grâce aux incertitudes il existe, en mécanique quantique, une petite probabilité qu'une particule alpha parvienne à s'échapper de l'atome de polonium. Elle peut ainsi traverser – par effet tunnel – la barrière d'énergie. On peut calculer, à partir de l'équation de Schrödinger, la probabilité d'un tel événement. Max Born comprit que l'effet tunnel est une propriété générale de la mécanique quantique, et qu'elle ne s'applique pas seulement à la physique nucléaire.

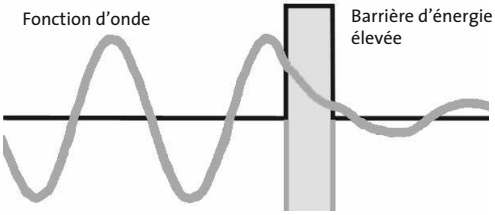
Comment expliquer l'effet tunnel ? Une particule alpha soumise à l'attraction de la force nucléaire ressemble à une balle dévalant la pente d'une vallée. Si son énergie est faible, elle descend dans la vallée, remonte un peu, puis redescend : elle est piégée au fond. Si elle a assez d'énergie, elle peut atteindre le haut de la colline voisine et s'échapper de la vallée. C'est l'approche classique de la question.

### Friedrich Hund (1896-1997)

Hund grandit en Allemagne, à Karlsruhe. Il étudia les mathématiques, la physique et la géographie à Marburg et à Göttingen, puis il devint professeur à Göttingen en 1957. Hund était un collègue de Werner Heisenberg et de Erwin Schrödinger quand il rendit visite à Niels Bohr à Copenhague. Il travailla avec Max Born sur l'interprétation quantique du spectre de molécules diatomiques, celles du dihydrogène par exemple. Il découvrit l'effet tunnel en 1926. Les règles qu'il énonça pour le remplissage des couches électroniques sont toujours très utilisées en physique et en chimie.

**1928**
George Gamow et d'autres appliquent le concept d'effet tunnel au rayonnement alpha

**1957**
L'idée d'un effet tunnel pour les électrons dans les solides est acceptée




**Il peut arriver que la fonction d'onde d'une particule puisse traverser une barrière d'énergie, même si, selon la physique classique, la particule n'a pas assez d'énergie pour la franchir.**

Mais dans le monde quantique, une particule alpha peut aussi ressembler à une onde. D'après l'équation de Schrödinger, les propriétés de la particule peuvent être décrites par une fonction d'onde qui ressemble plus ou moins à une sinusoïde. La fonction d'onde doit être continue et refléter le fait que la particule a plus de chances de se trouver à l'intérieur de l'atome. Mais il existe une petite chance pour que la particule s'échappe de la vallée nucléaire : elle peut fuir à l'extérieur.

> « Les particules élémentaires et les atomes qui les contiennent font un million de choses apparemment impossibles à la fois. »
>
> Lawrence Krauss, 2012

En termes mathématiques, la fonction d'onde est une sinusoïde à l'intérieur de la vallée, mais quand elle atteint les flancs de la colline, elle s'étend à travers la barrière d'énergie. Son amplitude diminue quand elle traverse la colline, de sorte qu'une barrière large est plus difficile à traverser – mais ce n'est pas impossible. Elle poursuit ensuite ses oscillations de l'autre côté de la barrière. En comparant l'amplitude de la fonction d'onde en deçà et au-delà de la barrière, on évalue la probabilité qu'une particule alpha subisse un effet tunnel.

**Ondes évanescentes** La lumière peut faire passer de l'énergie à travers un miroir grâce à un phénomène similaire. On ne peut expliquer la réflexion d'un faisceau lumineux sur un miroir uniquement avec les équations de Maxwell des ondes électromagnétiques. Pour conserver les propriétés de l'onde et équilibrer les équations, il faut qu'un peu d'énergie passe à travers le miroir. C'est ce qu'on nomme une onde évanescente.

L'intensité des ondes évanescentes décroît exponentiellement et devient rapidement si faible qu'on ne les voit pas. Mais si un matériau équivalent est placé immédiatement derrière le premier miroir, l'énergie peut être récupérée et transmise. Cette technique de couplage est utilisée dans certains dispositifs optiques et est analogue au transfert d'énergie magnétique entre les bobines d'induction d'un transformateur.

L'effet tunnel est également utile en électronique. Il permet aux électrons de franchir des barrières de façon contrôlée dans des réseaux de semi- ou supraconducteurs. Les jonctions tunnel sont constituées de deux matériaux conducteurs séparés par une couche isolante – quelques électrons peuvent passer d'un côté à l'autre de l'isolant. L'effet tunnel est aussi employé dans certains types de diodes ou de transistors, ce qui permet de contrôler les différences de potentiel, un peu comme un bouton de réglage du volume.

Les microscopes à effet tunnel utilisent ce principe pour révéler des détails de la surface des matériaux à l'échelle de l'atome. Une pointe métallique chargée est placée à proximité de la surface et un petit nombre d'électrons passent, par effet tunnel, de la pointe à la surface. L'intensité du courant indique la distance entre les deux. Ces microscopes sont si puissants que leur précision atteint 1 % du diamètre d'un atome.

**« Avec l'avènement de la mécanique quantique, le monde est devenu une loterie. Des événements fondamentaux, telle la désintégration d'un atome radioactif, obéissent au hasard et non à des lois. »**

**Ian Stewart, *Dieu joue-t-il aux dés ?* (2002)**

## l'idée clé

# Un raccourci à travers la colline

# 20 La fission nucléaire

**Après la découverte du neutron, les physiciens utilisèrent cette particule pour bombarder des atomes, espérant fabriquer de nouveaux isotopes des éléments. Au lieu de cela, les noyaux se fracturaient, subissant une fission. On envisagea de domestiquer l'énergie ainsi libérée, mais aussi de l'utiliser dans la bombe atomique.**

Durant les années 1920 et 1930, les physiciens s'efforcèrent de regarder au-delà des électrons et de sonder le noyau atomique. Si la radioactivité – au cours de laquelle un gros noyau, tel celui de l'uranium ou du polonium, se sépare en constituants plus petits – était connue, les mécanismes en jeu, eux, ne l'étaient pas.

Après avoir découvert le noyau en 1911, Ernest Rutherford réussit, en 1917, à transmuter de l'azote en oxygène en le bombardant avec des particules alpha. Des physiciens réussirent à arracher des fragments à d'autres noyaux. Mais ce n'est qu'en 1932, à Cambridge, que John Cockcroft et Ernest Walton parvinrent à couper un atome en deux en bombardant une cible de lithium avec des protons accélérés. La même année, Max Oliphant réussit l'expérience inverse – coller deux noyaux en utilisant la fusion nucléaire : il réalisa la fusion de deux noyaux de deutérium (une forme lourde d'hydrogène) en un noyau d'hélium.

La découverte du neutron par James Chadwick, également en 1932, ouvrit de nouvelles perspectives. Enrico Fermi en Italie, ainsi qu'Otto Hahn et Fritz Strassmann en Allemagne, bombardèrent un élément lourd, l'uranium, avec des neutrons, dans l'espoir de créer des atomes encore plus lourds. Au lieu de cela, en 1938, les deux Allemands parvinrent à couper un noyau d'uranium en deux, obtenant du baryum dont la masse est égale à 40 % de celle de l'uranium.

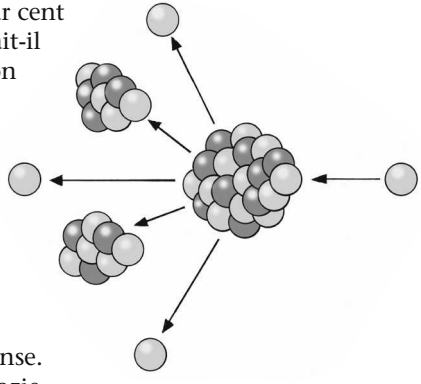
## chronologie

**1896**
Henri Becquerel découvre la radioactivité

**1932**
James Chadwick découvre le neutron

**1938**
La fission atomique est observée

La masse du neutron représentant moins de un pour cent de celle de l'uranium, comment le projectile pouvait-il avoir un tel effet ? C'était un peu comme si un melon se fissurait en deux sous l'impact d'un petit pois. De surcroît, cette découverte était surprenante car, selon les physiciens de l'époque, y compris George Gamow et Niels Bohr, le noyau était une sorte de goutte liquide. La tension de surface devrait s'opposer à sa division et, si cette dernière survenait, les deux gouttelettes positives qui en résulteraient devraient se repousser. Or, ce n'était pas le cas.



**Des neutrons projetés sur un noyau lourd le coupent parfois en deux.**

Lise Meitner, une collègue de Hahn, apporta la réponse. Réfugiés en Suède après avoir fui l'Allemagne nazie, Meitner et son neveu Otto Frisch, physicien, comprirent rapidement qu'il n'était pas si étonnant de voir un gros noyau se briser en deux – chacune des deux moitiés serait plus stable que l'original et ainsi l'énergie totale serait un peu inférieure. La différence d'énergie serait libérée dans la réaction. Meitner et Frisch nommèrent « fission » ce mécanisme.

**Une arme potentielle** De retour au Danemark, Frisch rapporta l'idée à Niels Bohr qui la fit connaître de l'autre côté de l'Atlantique au cours de conférences. À l'université Columbia, à New York, l'Italien Enrico Fermi, qui avait émigré aux États-Unis, entreprit des expériences de fission dans un sous-sol. Le réfugié hongrois Léo Szilárd, également aux États-Unis, comprit que cette réaction de l'uranium produisait des neutrons qui pourraient eux-mêmes déclencher d'autres fissions – causant ainsi une réaction nucléaire en chaîne (une réaction auto-entretenue) susceptible de libérer une immense quantité d'énergie.

La Seconde Guerre mondiale avait éclaté, et Szilárd s'inquiétait du fait que des scientifiques allemands puissent parvenir aux mêmes conclusions. Fermi et lui décidèrent de ne pas publier leur découverte. En 1939, Szilárd et deux autres réfugiés hongrois, Edward Teller et Eugene Wigner, persuadèrent Einstein de cosigner avec eux une lettre adressée au président Franklin Roosevelt pour le prévenir qu'une telle réaction risquait d'être utilisée pour fabriquer une bombe atomique.

**1942**
Première réaction en chaîne

**1945**
Des bombes atomiques sont larguées sur le Japon

**1951**
Production d'électricité à partir de l'énergie nucléaire

Mais Frisch, alors exilé en Angleterre, se mit au travail avec Rudolph Peierls pour déterminer quelle quantité et quel type d'uranium devaient être utilisés. La réponse fut stupéfiante : quelques kilogrammes de l'isotope d'uranium dont la masse atomique était égale à 235 ($^{235}U$) suffiraient pour déclencher une réaction en chaîne – et non des tonnes, comme on l'avait d'abord supposé.

Toutefois, il demeurait difficile de déclencher une réaction en chaîne en laboratoire. En outre, purifier l'uranium n'était pas aisé et les neutrons étaient rapidement absorbés avant de pouvoir déclencher la fission. Fermi réussit enfin la première réaction en chaîne en 1942, à l'université de Chicago, sous un stade de football.

Pendant ce temps, en Allemagne, Werner Heisenberg avait aussi présenté au gouvernement la possibilité de réaliser une bombe à partir d'uranium. Heureusement, les Allemands étaient en retard sur les Alliés. Heisenberg a-t-il fait son possible pour ralentir les recherches ou, au contraire, a-t-il joué un rôle primordial dans ce programme ? Les avis divergent. Le fait est que la fission nucléaire fut découverte par des scientifiques allemands, mais que l'Allemagne ne parvint pas à réaliser une réaction en chaîne avant la fin de la guerre.

En septembre 1941, Heisenberg se rendit à Copenhague, alors occupée par les Allemands, et rencontra son collègue Niels Bohr. Le sujet de leur conversation n'est pas connu avec précision – c'est le thème de la pièce de Michael Frayn, *Copenhague* –, bien que tous deux en aient rendu compte ultérieurement dans des lettres dont certaines n'ont jamais été envoyées. Les lettres de Bohr ont été récemment rendues publiques par sa famille. L'une d'elles indique

### Robert Oppenheimer (1904-1967)

Robert Oppenheimer naquit à New York dans une famille aisée. Il étudia la chimie et la physique à Harvard, avant d'aller à Cambridge en 1924. Il ne s'entendait pas bien avec son directeur d'étude et se vantait même d'avoir laissé une pomme empoisonnée sur son bureau.

En 1926, il se rendit à Göttingen pour travailler avec Max Born, et il y rencontra des géants, tels Heisenberg, Pauli et Fermi. Oppenheimer rentra aux États-Unis dans les années 1930 et travailla au Caltech (Institut de technologie de Californie) et à Berkeley. Décrit comme étant à la fois fascinant et froid, il avait une forte personnalité. Ses penchants communistes lui valurent la méfiance des autorités. C'est pourtant à lui qu'elles confièrent, en 1942, la direction du projet Manhattan. Oppenheimer fut bouleversé par l'utilisation de la bombe atomique et déclara, citant la Bhagavad Gita – l'un des textes fondateurs de l'hindouisme : « Maintenant, je suis devenu la Mort, le destructeur des mondes ». Plus tard, il fit campagne avec d'autres physiciens pour la paix et contre l'arme atomique.

qu'Heisenberg lui avait fait part en secret de l'effort allemand. Bohr en fut très inquiet et essaya d'envoyer un message à Londres *via* la Suède. Mais le message fut brouillé et ne fut pas compris par ceux qui le reçurent.

**Le projet Manhattan** Aux États-Unis, quand Frisch annonça qu'il suffisait d'un peu d'uranium pour construire une bombe, les Japonais venaient d'attaquer Pearl Harbor. Roosevelt lança alors le projet américain de bombe atomique, le projet Manhattan, dirigé, depuis la base secrète de Los Alamos au Nouveau-Mexique, par le physicien Robert Oppenheimer.

L'équipe d'Oppenheimer commença à concevoir la bombe durant l'été 1942. Il fallait réussir à maintenir la quantité d'uranium sous le seuil critique jusqu'à ce que la détonation lance la fission. Deux méthodes furent essayées puis mises en œuvre dans des bombes baptisées *Little Boy* et *Fat Man*. Le 6 août 1945, *Little Boy* fut lancée sur la ville japonaise d'Hiroshima, libérant l'équivalent de 20 000 tonnes de dynamite. Trois jours plus tard, *Fat Man* frappait Nagasaki. Chacune de ces bombes tua environ 100 000 personnes sur le coup.

**« Personne n'avait vraiment pensé à la fission avant sa découverte. »**

**Lise Meitner, 1963**

## l'idée clé

## Rupture nucléaire

# 21 L'antimatière

**La plupart des particules élémentaires ont un double. Les particules d'antimatière ont une charge opposée à celle de leur compagnon, mais la même masse. Ainsi, le positron est une version positive de l'électron. L'Univers est essentiellement composé de matière. Quand matière et antimatière se rencontrent, elles s'annihilent en libérant des bouffées d'énergie.**

En 1928, le physicien Paul Dirac a tenté d'actualiser l'équation de Schrödinger en y introduisant les effets de la relativité restreinte. Cette équation décrivait les particules, tels les électrons, en termes d'ondes stationnaires, mais, à cette époque, elle était incomplète. La théorie s'appliquait à des particules de faible énergie ou se déplaçant lentement mais n'expliquait pas les effets relativistes des particules de haute énergie, comme les électrons périphériques des atomes plus gros que l'hydrogène. Pour mieux rendre compte des spectres des gros atomes ou des états excités, Dirac travailla sur les effets relativistes – contraction des longueurs et dilatation du temps – pour montrer comment ils agissent sur la forme des trajectoires des électrons.

L'équation de Dirac prédisait bien l'énergie des électrons, cependant elle semblait trop générale. Les calculs montraient la possibilité que les électrons puissent avoir une énergie négative comme positive, au même titre que l'équation $x^2 = 4$ a deux solutions : $x = 2$ et $x = -2$. Que les électrons aient une énergie positive, bien sûr on s'y attendait, mais qu'ils aient une énergie négative n'avait pas de sens.

**Égal, opposé, mais rare** Plutôt que d'ignorer cette « énergie négative », Dirac émit l'hypothèse que de telles particules existaient bien. Peut-être y avait-il des sortes d'électrons ayant une charge positive plutôt que négative

## chronologie

**1928** Dirac émet l'hypothèse de l'antimatière

**1932** Anderson détecte le positron

**1955** Détection des antiprotons

mais avec la même masse ? S'agissait-il de « trous » dans une mer d'électrons « normaux » ? Cet état complémentaire de la matière fut nommé antimatière.

La chasse à l'antimatière était ouverte et, en 1932, Carl Anderson, de l'Institut de recherche Caltech, confirma l'existence des positrons. Il étudiait les cascades de particules de très haute énergie produites par l'interaction des rayons cosmiques venant de l'espace avec l'atmosphère. Ces gerbes avaient été observées par l'Allemand Victor Hess une vingtaine d'années auparavant. Anderson identifia la trajectoire d'une particule chargée positivement qui avait la même masse que l'électron : le positron. L'antimatière était devenue réalité.

### Paul Dirac (1902-1984)

Paul Dirac était surnommé « le plus étrange des hommes ». Il reconnaissait qu'il ne commençait jamais une phrase en sachant comment il la terminerait ; pour plaisanter, on prétendait qu'il ne savait dire que « oui », « non » et « je ne sais pas. ». Mais il était aussi intelligent qu'il était timide. La thèse qu'il prépara à l'université de Cambridge en un temps record et avec la concision qui le caractérisait était une approche totalement nouvelle de la mécanique quantique.

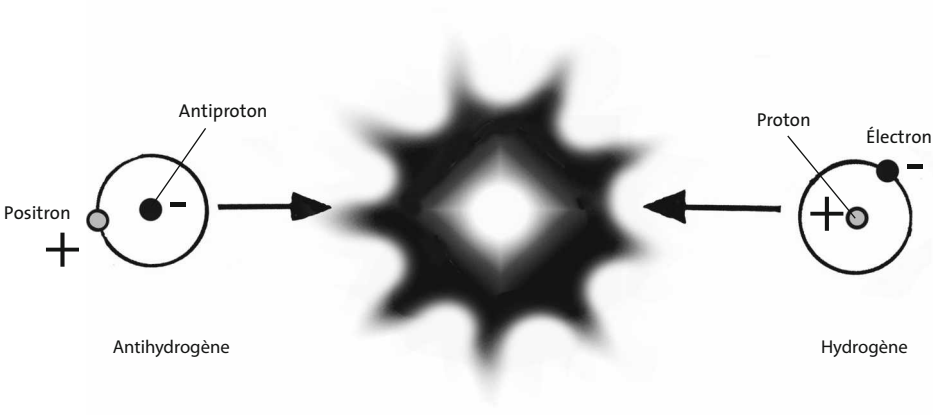
Dirac tenta de concilier la mécanique de la relativité et la mécanique quantique ; il prédit l'existence de l'antimatière et fut l'un des premiers à travailler sur la théorie quantique des champs. En 1933, il reçut le prix Nobel avec Schrödinger. Craignant le public et les discours, il hésita à se rendre en Suède et fut tenté de le refuser. Il ne s'y résolut qu'après avoir compris que s'il refusait il serait encore bien plus sous le feu des projecteurs.

Une autre antiparticule, l'antiproton, fut détectée plus de vingt ans plus tard, en 1955. Emilio Segrè et son équipe de l'université de Californie, à Berkeley, utilisèrent un accélérateur de particules – une machine nommée bévatron – pour lancer un faisceau de protons rapides sur des noyaux présents dans une cible fixe. L'énergie des protons était suffisamment élevée pour que des antiparticules soient produites durant les collisions. Un an plus tard, l'antineutron fut également détecté.

Si l'on disposait de briques d'antimatière, pourrait-on construire des antiatomes, voire des antinoyaux ? La réponse, obtenue en 1965, fut affirmative.

**1965**
Production du premier antinoyau

**1995**
Production d'atomes d'antihydrogène




**La matière et l'antimatière s'annihilent pour produire de l'énergie.**

Un antinoyau d'hydrogène lourd (deutérium), contenant un antiproton et un antineutron, fut créé par des scientifiques du CERN, près de Genève, et du laboratoire de Brookhaven, près de New York. Associer un positron et un antiproton pour fabriquer un antiatome d'hydrogène (un antihydrogène) prit plus de temps, mais l'objectif fut atteint au CERN en 1995. Aujourd'hui, les physiciens réalisent des expériences pour tester si l'antihydrogène se comporte comme l'hydrogène.

Pour créer de l'antimatière sur la Terre – et non plus la rechercher dans les rayons cosmiques venus de l'espace – les physiciens doivent disposer de machines équipées d'aimants gigantesques qui accélèrent les particules et forment des faisceaux. Dans d'immenses accélérateurs de particules, tel le CERN, à Genève, ou le Fermilab, près de Chicago, des faisceaux de particules sont projetés sur des cibles ou contre d'autres faisceaux, ce qui libère de l'énergie d'après l'équation d'Einstein $E = mc^2$, laquelle énergie crée des cascades de nouvelles particules. La matière et l'antimatière s'annihilent en libérant des bouffées d'énergie.

**« J'aime jouer avec les équations, rien que pour rechercher de belles relations mathématiques qui n'ont peut-être aucun sens en physique. Mais parfois, elles en ont. »**

**Paul Dirac, 1963**

« Je pense que la découverte de l'antimatière fut le plus grand bond en avant de toutes les découvertes faites en physique au XX^e siècle. »

**Werner Heisenberg,** cité en 1973

**Un déséquilibre dû au Big Bang** Quand les astrophysiciens observent l'Univers, ils ne voient pas beaucoup de traces d'annihilation de particules. La raison en est que l'Univers est essentiellement fait de matière – l'antimatière représente moins de 0,01 %. D'où vient un tel déséquilibre ?

Il est possible que des quantités légèrement différentes de matière et d'antimatière aient été créées lors du Big Bang. Au fil du temps, particules et antiparticules se seraient rencontrées et annihilées, à l'exception de quelques-unes. Il aurait suffi qu'une particule sur 10 000 000 000 ($10^{10}$) échappe à l'annihilation pour expliquer les proportions observées aujourd'hui. Cela expliquerait aussi le grand nombre de photons ainsi que les formes d'énergie qui emplissent l'Univers.

Selon une autre hypothèse, dans l'Univers primordial, quelque mécanisme quantique aurait favorisé la matière par rapport à l'antimatière. Par exemple, certaines particules étranges, créées dans la boule de feu primordiale, auraient pu donner naissance surtout à de la matière. Quelle qu'en soit la cause, des milliers de physiciens travaillant sur les plus grands accélérateurs de particules du monde cherchent à découvrir l'origine de l'asymétrie matière-antimatière.

## l'idée clé

# Égal et opposé

# 22 La théorie quantique des champs

**La lumière et les ondes électromagnétiques étant transmises par des photons, la théorie quantique des champs postule que tous les champs sont transmis par des particules élémentaires, que ces particules sont indiscernables, qu'elles sont émises ou absorbées durant les interactions ou que l'antimatière existe.**

Si vous rapprochez deux aimants, vous sentirez qu'ils se repoussent. Mais comment cette force est-elle transmise ? De même, comment la lumière du Soleil et son attraction gravitationnelle se déploient-elles à très longue distance, influençant aussi bien la Terre que la toute petite Pluton ?

L'idée selon laquelle les forces agissent à distance par l'intermédiaire d'un « champ » étendu a été déduite au milieu du XIX^e^ siècle des travaux de Michael Faraday sur l'électricité et le magnétisme. Ses recherches sur les lois fondamentales de l'électromagnétisme – reliant tous les phénomènes électriques et magnétiques – furent achevées des dizaines d'années plus tard par James Clerk Maxwell. En quatre équations seulement, Maxwell décrivit les différents aspects des champs électromagnétiques, notamment la façon dont leur intensité diminue avec la distance.

Mais comment les forces sont-elles transmises ? Dans le monde classique de la physique, nous pensons généralement que ce sont des objets qui transportent l'énergie d'un endroit à l'autre. Dans un pistolet, les atomes de l'onde de pression transfèrent l'énergie libérée par l'explosion à la balle qui va frapper la

## chronologie

**1831** Faraday découvre l'induction électromagnétique

**1873** Maxwell propose les équations de l'électromagnétisme

**1905** Einstein propose le concept de photon

**1925-1927** Dirac décrit l'électron et l'antimatière

cible. Au début du XXe siècle, Albert Einstein décrivit la lumière de la même façon, c'est-à-dire comme un flux de photons déposant des paquets d'énergie au moment où ils frappent une plaque métallique. Mais qu'en est-il des autres forces : la force de gravitation, ou les forces faible et forte qui assurent la cohésion des noyaux ?

**Les vecteurs de forces** Selon la théorie quantique des champs, proposée dans les années 1920, tous les champs transmettent leur énergie par le biais de flux de particules quantiques, connues sous le nom de « bosons de jauge ». Comme les photons, elles traversent l'espace pour libérer leur énergie, laquelle se présente sous forme de quanta. En revanche, contrairement aux photons, certains porteurs de champs de forces ont une masse. Il en existe même tout un bestiaire.

Les particules qui véhiculent les interactions ne sont pas comparables à des boules de billard, mais ce sont des ondes dans le champ d'énergie sous-jacent. Ce ne sont ni des ondes, ni des particules, mais « quelque chose » d'intermédiaire, comme l'ont expliqué les pionniers de la physique quantique Niels Bohr et Louis de Broglie en se plaçant à l'échelle atomique. Les vecteurs d'interactions – similaires aux photons et les photons eux-mêmes – se comportent comme des particules dans certaines conditions, transportant l'énergie selon les règles quantiques. Les fermions, tel l'électron, sont aussi des porteurs de leurs champs associés.

**Dirac et la théorie quantique** Le champ électromagnétique a été le premier dont on a étudié le comportement quantique. Dans les années 1920, le physicien britannique Paul Dirac a commencé à formuler une théorie quantique de l'électromagnétisme qu'il a publiée en 1927. Il s'est surtout intéressé à l'électron. Il s'est d'abord demandé comment un photon pouvait être émis quand un électron passe d'une orbitale de haute énergie à une orbitale d'énergie inférieure dans un atome, et quelle était la particule ainsi créée.

Il supposa que les particules interagissent au même titre que des composés chimiques tout en respectant les lois quantiques. Certaines propriétés, telles la charge et l'énergie, doivent être conservées pour l'ensemble des particules avant et après l'interaction. Ainsi, un électron subit une interaction quand il perd de l'énergie et émet l'énergie perdue sous forme d'un photon.

**1927-1928**
Jordan et Wigner conçoivent la théorie quantique des champs

**1946-1950**
Tomonaga, Schwinger et Feynman conçoivent l'électrodynamique quantique

**1954**
Les quarks sont mis en évidence au Centre de l'accélérateur linéaire de Stanford

**1968**
Gross, Wilczek et Politzer publient leur théorie de la chromodynamique quantique

À force de lutter avec ses équations, Dirac finit par prédire l'existence de l'antimatière et du positron qu'il imaginait être un « trou » dans une mer d'électrons. Toutes les particules ont une antiparticule, une jumelle qui a une charge opposée et une énergie négative. Le positron est l'antiélectron.

Selon l'une des hypothèses de la théorie quantique des champs, toutes les particules élémentaires sont indiscernables. Un photon ayant une énergie donnée ressemble à n'importe quelle autre particule et se comporte comme elle n'importe où dans l'Univers. Tous les électrons sont les mêmes, qu'ils soient dans un morceau de soufre, une feuille de cuivre ou qu'ils filent à toute vitesse dans un tube au néon.

### Pascual Jordan (1902-1980)

Pascual Jordan est né à Hanovre, en Allemagne. Son père était un artiste et espérait que son fils suivrait ses traces, mais Jordan choisit la science. Après avoir fait des études à l'université technique de Hanovre, il soutint une thèse à l'université de Göttingen où il travaillait avec Max Born. En 1925, Born, Heisenberg et Jordan publièrent la première théorie de mécanique quantique. Un an plus tard, Jordan appliqua le concept de quanta d'énergie à tous les champs, ce qui constitua le premier pas vers la théorie quantique des champs. Il ne reçut jamais le prix Nobel, peut-être parce qu'il avait adhéré au parti nazi durant la Seconde Guerre mondiale.

## Vie et mort de l'énergie

Les particules apparaissent ou disparaissent. Selon le principe d'incertitude d'Heisenberg, la probabilité qu'un paquet d'énergie apparaisse spontanément et perdure un moment, même dans le vide spatial, n'est pas nulle. Cela dépend de l'énergie de la particule et de sa durée de vie – une particule de haute énergie disparaîtrait rapidement.

Pour être compatible avec ces contraintes, la théorie quantique des champs devait introduire des statistiques sur de nombreuses particules et respecter le principe d'exclusion de Pauli, selon lequel deux fermions ne peuvent avoir les mêmes propriétés. Ainsi, en 1927 et 1928, Pascual Jordan et Eugene Wigner cherchèrent à représenter les champs par une combinaison statistique de nombreuses fonctions d'onde.

Mais les premières théories quantiques des champs expliquaient mal certains phénomènes, notamment pourquoi les champs produits par les vecteurs de forces modifient les particules elles-mêmes. Ainsi, un électron porte une charge électrique, de sorte qu'il produit son propre champ et qu'il y est immergé. Dans l'atome, cela modifie un peu les niveaux d'énergie de cet électron.

Or, il était difficile d'imaginer de quoi sont constitués un électron et un photon. Si l'électron, chargé négativement, n'était pas ponctuel, certains constituants se repousseraient les uns les autres. Les contraintes électromagnétiques risqueraient d'entraîner la dislocation de l'électron. Mais si les électrons sont ponctuels, comment imaginer conférer des propriétés telles qu'une charge ou une masse à une particule infiniment petite ? Les équations se sont rapidement garnies de quantités infinies.

**« Il arrive souvent que les exigences requises pour la simplicité et la beauté soient les mêmes, mais quand elles sont en désaccord, la beauté doit passer avant. »**

**Paul Dirac, 1939**

En 1947, les physiciens ont trouvé comment supprimer ces infinis – par la « renormalisation » –, et les pionniers, tels Julian Schwinger et Richard Feynman, ont perfectionné la théorie. Le résultat – l'électrodynamique quantique – décrivait comment la lumière et la matière interagissent, et il était compatible avec la relativité. Les effets électromagnétiques étaient transmis à longue distance par les photons sans masse.

Expliquer les autres forces fut une tâche encore plus ardue qui exigea des dizaines d'années. L'unification de la force électromagnétique et de la force nucléaire faible – impliquée dans la fusion et la radioactivité bêta – nécessitait une meilleure compréhension des protons et des neutrons constitués de minuscules quarks. La force nucléaire forte posait encore plus de difficulté conceptuelle étant donné son tout petit rayon d'action. C'est pourquoi la théorie électrofaible et la chromodynamique quantique ne furent pas développées avant les années 1970.

Aujourd'hui, des progrès ont été réalisés vers l'unification des forces faible et forte avec l'électromagnétisme. Mais les physiciens continuent à se heurter à un problème de taille : y inclure la gravitation.

## l'idée clé
## Vecteurs de forces

# 23 Le décalage de Lamb

**À quoi ressemble un électron ? Une réponse à cette question, proposée à la fin des années 1940, a permis aux physiciens d'élaborer une approche quantique de l'électromagnétisme et de montrer que l'électron a une taille finie.**

Dans les années 1930, les physiciens avaient déjà partiellement caractérisé l'électron. Le modèle proposé par Niels Bohr en 1913 assimilait les électrons à des planètes chargées négativement en orbite autour d'un noyau chargé positivement. Il avait été modifié pour tenir compte des effets du moment angulaire et du fait que les électrons internes exercent un effet de bouclier sur les électrons externes. Le décalage d'énergie dû au spin de l'électron dans le spectre de l'hydrogène indiquait que les électrons agissent comme des charges sphériques en rotation.

L'effet Zeeman et l'effet Stark – subdivision des raies spectrales de l'hydrogène due à un champ magnétique et à un champ électrique – avaient révélé le magnétisme associé aux électrons tournant sur eux-mêmes. Et le principe d'exclusion de Pauli expliquait pourquoi les électrons, qui sont des fermions, n'ont que certaines propriétés quantiques et comment ils remplissent des niveaux successifs autour des atomes. Ensuite, Paul Dirac et d'autres ont introduit des corrections relativistes.

Toutefois, certaines questions restaient ouvertes. Ainsi, on ne savait pas bien à quoi ressemble un électron. L'équation de Schrödinger décrit la probabilité – sous forme d'une fonction d'onde – qu'un électron occupe certaines positions. Pourtant, les électrons sont localisés, dans la mesure où leur charge peut être isolée et où ils peuvent être projetés sur une cible métallique. Mais dans

## chronologie

**1896**
Zeeman observe l'effet qui porte son nom

**1922**
L'expérience de Stern-Gerlach révèle la quantification du moment magnétique de l'électron

**1925**
Goudsmit et Uhlenbeck font l'hypothèse que les électrons sont des sphères chargées dotées d'un spin

### Hans Bethe (1906-2005)

Né à Strasbourg, alors sous domination allemande, Hans Bethe fut très vite attiré par les mathématiques. Il aimait aussi écrire et avait la curieuse habitude d'écrire alternativement vers la droite puis vers la gauche. Il étudia la physique à l'université de Francfort car « les mathématiques semblent prouver ce qui est évident ». Puis il alla à Munich et, en 1928, il présenta une thèse sur la diffraction des électrons par les cristaux. Il se rendit ensuite à Cambridge et publia un article canular (qu'il retira ensuite) sur le zéro absolu pour se moquer de son collègue Arthur Eddington. Durant la guerre, Bethe (qui avait des ascendants juifs) émigra aux États-Unis. Il restera à l'université Cornell jusqu'à la fin de sa carrière. Il fit des recherches en physique nucléaire et travailla sur le projet Manhattan. Il émit l'hypothèse que les étoiles brillent parce qu'elles sont le siège de réactions de fusion, ce qui lui valut de recevoir le prix Nobel. Il avait le sens de l'humour. Par exemple, il prêta son nom à un article signé par R. Alpher, H. Bethe et G. Gamov et connu aujourd'hui sous le titre : « alpha, bêta, gamma ».

les équations de la théorie quantique des champs, il était impossible d'attribuer une charge ou une masse à une entité infiniment petite. Or, si une particule chargée, tel un électron, avait une taille non nulle, comment les forces autorépulsives ne la déchiquetteraient-elles pas instantanément ? Les équations contenaient de nombreuses grandeurs infinies – des singularités mathématiques –, ce qui les rendait inutilisables.

**Percée quantique** En 1947, une expérience a fait notablement progresser la physique quantique. À l'université de Columbia, à New York, Willis Lamb et son étudiant Robert Rutherford décelèrent un nouvel effet dans le spectre de l'hydrogène. Ayant travaillé sur les micro-ondes pendant la Seconde Guerre mondiale, Lamb voulut les utiliser pour étudier l'hydrogène à des longueurs d'onde bien plus longues que celles de la lumière visible.

Aux fréquences utilisées, le spectre d'émission de l'hydrogène présentait deux orbitales particulières : une sphérique (état S), et une plus allongée (état P). Toutes deux avaient des énergies supérieures à celle de l'état fondamental, qui a l'énergie la plus basse. Or, la théorie atomique prévoyait alors que les deux orbitales devaient avoir la même énergie. Mais comme elles avaient des formes différentes, elles devaient se comporter différemment dans un champ magnétique. Il devait en résulter une différence d'énergie, se manifestant par

un nouveau type de dédoublement des raies spectrales de l'hydrogène. L'effet pouvant toucher toutes les orbitales de formes différentes, il serait plus facile à observer en utilisant les micro-ondes que la lumière visible ou ultraviolette.

C'est précisément cette différence d'énergie qu'ont mise en évidence Lamb et Rutherford. Ils ont bombardé un faisceau d'atomes d'hydrogène avec un faisceau d'électrons orienté perpendiculairement. Certains électrons des atomes d'hydrogène acquerraient de l'énergie et se déplaçaient sur une orbitale S. Les lois quantiques leur interdisant de restituer cette énergie pour revenir à l'état d'énergie minimale, ils restaient dans l'état excité. Ces atomes étaient placés dans un champ magnétique, faisant apparaître un effet Zeeman, et atteignaient une plaque métallique où les électrons étaient libérés, produisant ainsi un faible courant.

Les micro-ondes (à des fréquences proches de celles des fours à micro-ondes) étaient également dirigées vers la zone où régnait le champ magnétique. En faisant varier l'intensité du champ magnétique, Lamb parvenait à propulser des électrons dans un état P asymétrique. Les lois quantiques permettaient qu'ils redescendent dans l'état fondamental avant de heurter la plaque de détection, de sorte que l'on n'enregistrait aucun courant.

**« Il nous faut un enseignement des sciences pour produire des scientifiques, mais aussi pour éduquer le public. »**

**Hans Bethe, *Popular Mechanics* (1961)**

En notant à quel moment cela se produisait pour diverses fréquences, Lamb établit une courbe dont il put déduire le décalage énergétique entre les états S et P en l'absence de champ magnétique. C'est le décalage (non nul) de Lamb. La théorie de l'électron restait donc incomplète.

Cette découverte publiée en 1947 fut un choc pour la communauté de la physique quantique. Ce fut le principal sujet de conversation lors d'une conférence à Shelter Island, près de New York. Quel impact ce décalage énergétique avait-il sur la forme de l'électron ? Et comment le faire apparaître dans les équations ?

De nombreux physiciens ont supposé que ce décalage résultait d'un problème d'« autoénergie » dû au fait que la propre charge de l'électron produit un champ électrique dans lequel il est immergé. Mais les équations ne rendaient pas compte de cet effet, prédisant qu'un électron libre a une masse infinie et que les raies spectrales qui en résultaient étaient toutes décalées d'une fréquence infinie. La physique quantique était hantée par tous ces infinis.

> **« Nous n'observons pas la nature elle-même, mais la nature soumise à nos méthodes d'investigation. »**
>
> **Werner Heisenberg,**
> ***Physics and Philosophy* (1958)**

Il fallait trouver comment expliquer le fait que la masse d'un électron a une valeur donnée et n'est pas infinie. Hans Bethe, alors qu'il rentrait chez lui après une conférence, trouva un moyen de contourner ce problème. Il retravailla les équations de façon à ce que les propriétés de l'électron ne soient plus exprimées en termes de charge ou de masse, mais sous forme de versions redimensionnées de charge et de masse. En choisissant des paramètres appropriés, il réussit à supprimer les infinis ; cette approche fut nommée « renormalisation ».

Les difficultés liées à l'infini résultent de la nature quantique du champ électromagnétique. L'électron est perturbé par les constituants du champ, tout comme les molécules de l'air sont dispersées par le mouvement brownien. Ils cessent d'être ponctuels et sont délocalisés dans une sphère. Quand des électrons délocalisés s'approchent d'un noyau, ils sont moins sensibles à son attraction que s'ils étaient ponctuels, de sorte que, dans l'expérience de Lamb, l'énergie de l'orbitale S augmente un peu. L'orbitale P, plus grande, est moins concernée, puisque l'électron est plus éloigné du noyau et que son énergie est moins importante.

Les explications de Bethe rendaient très bien compte des résultats de l'expérience de Lamb et vinrent à point nommé pour faire progresser la physique quantique. La méthode de la « renormalisation » est toujours en usage, bien que certains physiciens se demandent si elle est vraiment pertinente.

## l'idée clé

## Le mouvement brownien de l'électron

# 24 L'électrodynamique quantique

**L'électrodynamique quantique (QED) est le « joyau de la physique », selon l'un de ses pères fondateurs, Richard Feynman. C'est sans doute la théorie la plus précise. Elle a permis aux physiciens de comprendre beaucoup mieux le comportement des électrons et des photons ainsi que l'électromagnétisme.**

L'électrodynamique quantique est la théorie quantique des champs de la force électromagnétique. Elle explique les interactions de la lumière avec la matière et est compatible avec la relativité restreinte. La version actuelle décrit comment des particules chargées interagissent en échangeant des photons et permet d'expliquer la structure fine du spectre de l'hydrogène, y compris les raies dues au spin de l'électron, l'effet Zeeman et le décalage de Lamb.

Les premières tentatives vinrent de Paul Dirac qui, à la fin des années 1920, essaya d'expliquer comment un électron émet ou absorbe un photon quand il perd ou gagne de l'énergie dans un atome d'hydrogène, produisant ainsi les raies spectrales observées. Dirac appliqua au champ électromagnétique l'idée des quanta d'énergie proposée par Max Planck. Il assimilait les quanta à de petits oscillateurs (des cordes en vibration ou des ondes stationnaires) et introduisit la notion d'interaction de particules au cours de laquelle des particules sont spontanément créées ou détruites.

**Progrès notable** Pendant une dizaine d'années, les physiciens peaufinèrent cette théorie jusqu'à ce qu'ils ne puissent plus rien faire. Alors, ils durent se rendre à l'évidence : la théorie ne s'appliquait qu'au cas simple de l'atome d'hydrogène. Au-delà – pour les électrons de plus hautes énergies ou pour des atomes plus gros –, elle n'était plus applicable, la masse de l'électron se mettant

## chronologie

**1873**
Maxwell publie les équations de l'électromagnétisme

**1927**
Dirac publie une approche quantique de l'électromagnétisme

**1927-1928**
Jordan et Wigner développent la théorie quantique des champs

à tendre vers l'infini. La validité de la théorie était remise en cause : la mécanique quantique et la relativité restreinte étaient-elles donc incompatibles ? Des découvertes faites dans les années 1940, tels le décalage de Lamb et le spin de l'électron, ne firent qu'ajouter à la confusion.

En 1947, le travail d'Hans Bethe sur les équations, utilisant la « renormalisation » pour contrer les infinis, ainsi que son explication du décalage de Lamb sauvèrent la situation. Toutefois, il ne disposait pas encore d'une théorie relativiste. Au cours des années suivantes, l'idée de Bethe fut développée par des physiciens, tels que Sin-Itiro Tomonaga, Julian Schwinger et Richard Feynman. En continuant à polir les équations, ils réussirent à éliminer totalement les infinis, ce qui leur valut le prix Nobel en 1965.

La renormalisation reste la méthode de choix en physique quantique, mais on ne comprend pas sa signification physique. Feynman n'aimait pas cette méthode, la qualifiant de supercherie.

### Richard Feynman (1918-1988)

Né à New York, où il passa sa jeunesse, Richard Feynman aurait commencé à parler très tard. Bien qu'il n'ait pas dit un mot avant l'âge de 3 ans, il devint un conférencier renommé et un brillant physicien. Il étudia la physique à l'université de Columbia, puis à Princeton, et fut invité à travailler sur le projet Manhattan dont le centre était installé à Los Alamos, au Nouveau-Mexique. Feynman aimait y jouer des tours à ses collègues : il ouvrait leurs placards en devinant les combinaisons évidentes des cadenas et y glissait des petits mots. Il faisait du tambour et dansait dans le désert – on le surnommait Joe le Peau-Rouge. Après la guerre, il partit travailler au Caltech (Institut de technologie de Californie), en partie à cause du climat agréable de la région. Il acquit la réputation d'un remarquable pédagogue et d'un extraordinaire professeur. Il écrivit de nombreux ouvrages dans lesquels il reprenait ses cours. Feynman travaillait sur l'électrodynamique quantique, ce qui lui valut le prix Nobel, mais aussi sur la force nucléaire faible et la superfluidité. Dans une conférence intitulée « Il y a plein de place en bas », il posa les bases des nanotechnologies. Qualifié par son collègue Freeman Dyson de « mi-génie, mi-bouffon », Feynman fut en fait « tout entier génie et bouffon ».

**1946-1950**
Tomonaga, Schwinger et Feynman élaborent l'électrodynamique quantique

**1947**
Bethe propose la « renormalisation »

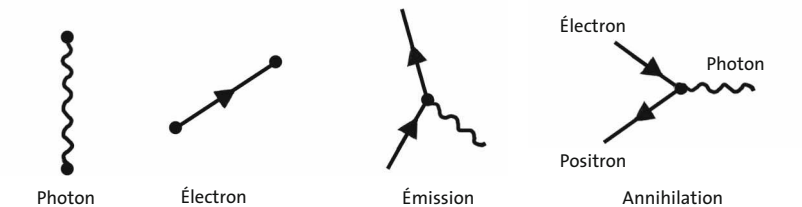
**Les diagrammes de Feynman** Les équations de l'électrodynamique quantique sont complexes. Alors Feynman, un personnage hors du commun qui avait une imagination débordante et un don particulier pour l'enseignement, proposa une nouvelle façon de représenter les interactions des particules. Plutôt que d'utiliser l'algèbre, il se servit de simples flèches respectant certaines règles.

Une flèche en trait plein représente une particule se déplaçant d'un point à un autre ; une flèche qui ondule symbolise un photon, et chaque vecteur de force a sa propre variante. Chaque interaction est indiquée par un point – ou vertex – où se rejoignent trois flèches. Des séquences d'interactions sont construites en ajoutant de nouvelles unités.

Ainsi, la collision d'un électron et d'un positron, qui s'annihilent pour produire de l'énergie sous forme d'un photon, est symbolisée par deux flèches aboutissant au même point d'où émerge une flèche qui ondule. Le temps s'écoule de la gauche vers la droite. Comme les antiparticules sont équivalentes à des particules réelles remontant le temps, la flèche correspondant au positron pointe vers l'arrière, de la droite vers la gauche.

De tels vertex peuvent être combinés pour représenter une série d'événements. Le photon créé par une interaction électron-positron peut se désintégrer spontanément pour former une paire particule-antiparticule : deux nouvelles flèches apparaissent alors sur le diagramme.

Toutes les interactions peuvent être décrites par ces diagrammes qui s'appliquent à toutes les forces fondamentales des théories des champs, notamment la force électromagnétique et les forces nucléaires faible et forte. Quelques règles doivent être respectées, par exemple la conservation de l'énergie. Et les particules, tels les quarks, qui ne peuvent exister de façon isolée doivent être combinées de façon à ce que les particules qui arrivent et celles qui repartent soient des entités réelles, par exemple des protons et des neutrons.




**Diagrammes de Feynman**

**« L'électrodynamique quantique a atteint un stade de coexistence pacifique avec ses propres divergences… »**
**Sidney Drell, 1958**

**Probabilité d'interaction**
Ces diagrammes sont bien davantage que des schémas : ils ont un sens mathématique profond et nous indiquent aussi quelle est la probabilité de ces interactions. Mais il faut d'abord connaître le nombre de chemins possibles. Pour chaque point initial et final, on peut établir le nombre de trajets d'interaction possibles en traçant toutes les variantes possibles. On les dénombre et on en déduit ce qui a le plus de chances de se produire.

Cela a influencé la façon dont Feynman pensait l'électrodynamique quantique. Il reprit une ancienne théorie, à savoir le principe de Fermat concernant la propagation de la lumière. Cette théorie s'intéresse à la façon dont un faisceau de lumière est dévié par une lentille ou un prisme. Elle postule que même si les rayons lumineux peuvent suivre tous les chemins possibles, le chemin le plus probable est le plus rapide, celui où la lumière est en phase. En dénombrant ses diagrammes, Feynman recherchait le plus probable dans une interaction quantique.

L'électrodynamique quantique a permis à la théorie quantique des champs de progresser. Les physiciens ont appliqué la méthode aux « couleurs » des quarks, élaborant ainsi une théorie nommée « chromodynamique quantique ». Puis l'électrodynamique quantique fut combinée avec la force nucléaire faible dans la théorie électrofaible.

## l'idée clé
# L'électromagnétisme dans sa plénitude

# 25 La désintégration bêta

**Les noyaux instables se brisent parfois en libérant de l'énergie sous forme de particules. La désintégration bêta se produit quand un neutron devient un proton en libérant un électron et un antineutrino. La théorie de la désintégration bêta proposée par Enrico Fermi en 1934 continue à offrir un cadre favorable à l'étude de la force nucléaire faible, qui assure la cohésion des protons et des neutrons dans le noyau.**

La radioactivité prend naissance dans le noyau de l'atome, par l'intermédiaire de la force nucléaire faible. Elle peut être de trois types : alpha, bêta ou gamma. Les particules alpha sont des noyaux d'hélium constitués de deux protons et de deux neutrons. Elles sont émises quand le noyau instable d'éléments radioactifs lourds, tels le radium ou l'uranium, se brise. Les particules bêta sont des électrons libérés par un noyau quand un neutron devient un proton. Quant au rayonnement gamma, il correspond à de l'énergie libérée sous forme de photons.

**« La désintégration bêta est... comme un vieil ami. Elle aura toujours sa place dans mon cœur. »**

**Chieng-Shiung Wu**

Les particules alpha étant relativement lourdes, elles sont rapidement arrêtées par la matière, par exemple du papier ou la peau. Les particules bêta sont légères et parcourent des distances plus longues ; il faut du plomb ou un épais morceau de métal pour les arrêter. Le rayonnement gamma est encore plus pénétrant.

En 1900, en réalisant des expériences inspirées de celles utilisées auparavant pour identifier l'électron, Henri Becquerel mesura le rapport de la

## chronologie

**1900**
Becquerel montre que la particule bêta a les propriétés d'un électron

**1901**
Rutherford et Soddy établissent que les particules bêta sont émises par le noyau

**1911**
Meitner et Hahn montrent que de l'énergie est perdue durant la désintégration bêta

**1930**
Pauli propose l'existence du neutrino

masse d'une particule bêta et de sa charge, et montra qu'il correspondait à celui de l'électron. En 1901, Ernest Rutherford et Frederick Soddy constatèrent qu'une désintégration bêta changeait la nature de l'élément chimique qui en avait été le siège, le déplaçant d'une case vers la droite dans le tableau périodique des éléments. Ainsi, le cesium devient du baryum. Ils en déduisirent que les particules bêta sont des électrons issus du noyau.

## Les leptons

Les leptons constituent la moitié des briques élémentaires de la matière. Il en existe six « saveurs » : l'électron, le muon, la particule tau, ainsi que les neutrinos associés. Chacun a sa propre antiparticule.

| Particule | Symbole | Énergie |
|---|---|---|
| Électron | e | 0,000511 GeV |
| Muon | $\mu$ | 0,1066 GeV |
| Particule tau | $\tau$ | 1,777 GeV |

En 1911, les Allemands Lise Meitner et Otto Hahn ont obtenu un résultat étonnant. Tandis que les particules alpha ne sont émises qu'à des énergies particulières, les particules bêta peuvent avoir n'importe quelle énergie, en deçà d'un certain maximum. Il semblait qu'une partie de l'énergie, qui aurait dû être conservée, disparaissait quelque part.

**La quête de la particule manquante** La quantité de mouvement n'était pas non plus conservée : la direction et la vitesse du noyau qui recule au moment de l'émission et celles de la particule bêta émise ne se compensaient pas. La meilleure explication possible était que d'autres particules étaient émises qui emportaient l'énergie et la quantité de mouvement manquantes. Mais personne ne parvenait à les détecter.

En 1930, dans une lettre fameuse commençant par « Mesdames et Messieurs, vous qui êtes radioactifs », Wolfgang Pauli proposa l'existence d'une particule neutre extrêmement légère, compagnon du proton dans le noyau. Il la nomma neutron. Enrico Fermi préférera le nom de neutrino (« le petit neutre ») afin d'éviter la confusion avec le neutron plus lourd découvert par James Chadwick en 1932.

Selon Pauli, cette particule légère pouvait expliquer les écarts observés mais, n'ayant pas de charge ni de masse, il serait difficile de la détecter. En 1934, Fermi publia une théorie complète de la désintégration bêta ainsi que les pro-

### Enrico Fermi (1901-1954)

Dès son enfance, Enrico Fermi, qui vivait à Rome, fut attiré par la science et la technique, démontant des moteurs et jouant avec des gyroscopes. Il était âgé de 14 ans lorsque son jeune frère mourut lors d'une intervention chirurgicale. Pour surmonter sa douleur, Fermi se jeta dans l'étude de la physique. Étudiant à l'université de Pise, il était si remarquable en physique quantique qu'on lui demanda d'organiser des séminaires. En 1921, il publia son premier article sur l'électrodynamique et la relativité. Il obtint son doctorat à l'âge de 21 ans et devint professeur à Rome quelques années plus tard. Il publia sa théorie sur la désintégration bêta en 1934 mais, déçu par le peu d'intérêt qu'elle suscita, il se tourna vers la physique expérimentale, travaillant sur le bombardement de neutrons et la fission. Après avoir reçu le prix Nobel en 1938 pour son travail sur le noyau, il émigra aux États-Unis afin de fuir le régime fasciste de Mussolini. Le groupe de Fermi obtint la première réaction en chaîne à Chicago en 1942 et rejoignit le projet Manhattan. Réputé pour sa pensée claire et simple ainsi que pour ses talents tant en physique expérimentale qu'en physique théorique, Fermi fut l'un des scientifiques les plus talentueux du XX$^{e}$ siècle.

priétés du neutrino invisible. C'était une prouesse, et Fermi fut anéanti quand le magazine scientifique *Nature* rejeta l'article, le considérant comme trop spéculatif. Il changea alors pour quelque temps de sujet de recherche.

**Neutrinos** En fait, les neutrinos n'interagissent quasiment pas avec la matière et il fallut attendre 1956 pour les repérer. Clyde Cowan et ses collègues mirent en évidence leur existence (pour des raisons de symétrie quantique, la particule émise durant une désintégration bêta est en fait un antineutrino).

Les neutrinos sont toujours difficiles à détecter. Comme ils ne sont pas chargés, ils n'ionisent rien sur leur passage. Ils sont ultralégers, de sorte qu'ils ne laissent quasiment aucune trace quand ils frappent une cible. La plupart traversent la Terre de part en part.

Les physiciens réussissent pourtant à en détecter en observant des flashs lumineux quand ils traversent de grands réservoirs d'eau, qu'il s'agisse d'immenses piscines, de la Méditerranée ou de la calotte glaciaire de l'Antarctique. Quand un neutrino heurte une molécule d'eau et expulse un électron, on repère une traînée de lumière bleue (qui est un rayonnement Tcherenkov).

En 1962, Leon Lederman, Melvin Schwartz et Jack Steinberg ont montré qu'il existe plusieurs types de neutrinos (trois « saveurs ») en détectant les interactions du neutrino muonique, un membre de la famille plus lourd que le neu-

« Quand les connaissances de bases sont acquises, vouloir les empêcher d'être fécondes serait tout aussi vain que de chercher à interdire à la Terre de tourner autour du Soleil. »

**Enrico Fermi, « Atomic Energy for power », *Recueil d'articles* (1962)**

trino électronique. Le troisième type, le neutrino tauique, a été prévu en 1975 mais n'a été observé au Fermilab qu'en 2000.

Les neutrinos sont produits par certaines réactions de fusion, celles qui fournissent leur énergie au Soleil et aux autres étoiles. À la fin des années 1960, les physiciens qui cherchaient à détecter les neutrinos libérés par le Soleil comprirent qu'ils en voyaient trop peu : seulement 30 à 50 % de ce qu'ils attendaient.

L'énigme du déficit des neutrinos solaires ne fut résolue qu'en 1998, quand des expériences, telles celles menées à l'observatoire de neutrinos japonais Super-Kamiokande, ou à celui de Sudbury, au Canada, révélèrent que les neutrinos échangent leurs saveurs : ils oscillent. Les nombres relatifs de neutrinos électroniques, muoniques et tauiques n'avaient pas été correctement évalués et les différents détecteurs n'enregistraient pas certains types. Leurs oscillations indiquent que les neutrinos ont une petite masse.

Ainsi, en résolvant la question de la désintégration bêta, Pauli et Fermi ont ouvert la porte à un nouveau monde de particules ressemblant à des électrons, nommées leptons, et ont prédit l'existence du neutrino, une particule dont les propriétés ne sont cependant pas encore totalement établies aujourd'hui. Mais les recherches sur les forces nucléaires pouvaient commencer.

## l'idée clé

# La mystérieuse particule manquante

# 26 L'interaction faible

**La force faible est la plus faible des forces fondamentales. Elle est responsable de la désintégration des neutrons en protons et agit sur tous les fermions. Elle a une propriété bizarre : elle ne conserve pas la symétrie dans un miroir, ce qui explique que l'Univers soit « gauche ».**

La force nucléaire faible est responsable de la désintégration bêta. La plupart des particules, y compris le neutron, se décomposent un jour ou l'autre en leurs constituants fondamentaux. Alors qu'ils sont stables dans un noyau atomique, les neutrons sont instables et, dès qu'ils quittent le noyau, ils se transforment en 15 minutes environ en un proton, un électron et un antineutrino.

La désintégration des neutrons explique le rayonnement bêta. Elle rend possible la datation par le carbone-14, car cet isotope se désintègre sous l'effet de l'interaction faible pour donner de l'azote-14, dont la demi-vie est de l'ordre de 5 700 ans. Inversement, la force nucléaire faible permet la fusion, assurant la construction des atomes de deutérium, puis d'hélium à partir de l'hydrogène, dans le Soleil et les autres étoiles. Les éléments lourds sont produits grâce à l'interaction faible.

La force faible est ainsi nommée parce que l'intensité de son champ est des millions de fois plus faible que la force nucléaire forte, laquelle assure la cohésion des protons et des neutrons dans le noyau, et des milliers de fois plus faible que la force électromagnétique. Alors que la force électromagnétique s'exerce sur de grandes distances, la force faible n'agit que sur de très courtes distances, environ 0,1 % du diamètre du proton.

## chronologie

**1927**
Wigner propose le concept de parité des fonctions d'onde

**1934**
Fermi élabore la théorie de la désintégration bêta

**1954**
Yang et Mills publient une théorie de la force nucléaire forte

**1956**
Yang et Lee émettent l'hypothèse que la parité n'est pas conservée dans les interactions faibles

**La désintégration bêta** Dans les années 1930, Enrico Fermi proposa sa théorie de la désintégration bêta pour tenter de clarifier les propriétés de la force faible. Il établit des parallèles entre la force faible et l'électromagnétisme. Tout comme les particules chargées interagissent en échangeant un photon, la force faible devait être transmise par des particules.

Les physiciens se sont posé diverses questions, notamment qu'est-ce qu'un neutron ? Werner Heisenberg imagina que le neutron était l'association étroite d'un proton et d'un électron. Il supposa que les gros noyaux étaient assemblés par une sorte de liaison chimique, les protons et les neutrons étant liés par échange d'électrons. Dans une série d'articles datant de 1932, il tenta d'expliquer la stabilité du noyau d'hélium (association de deux protons et de deux neutrons) ainsi que d'autres isotopes. Mais cette théorie se révéla incorrecte : diverses expériences montrèrent qu'elle ne pouvait expliquer comment deux protons restent unis ou interagissent.

Les physiciens se tournèrent vers la symétrie. En électromagnétisme, la charge est conservée. Quand deux particules se désintègrent ou se combinent, des charges peuvent s'ajouter ou s'annuler, mais elles se conservent. La « parité » – symétrie lors de la réflexion d'une fonction d'onde – est, en mécanique quantique, une autre propriété conservée. Une particule est paire si elle ne change pas lors d'une réflexion, sinon elle est impaire.

Mais tout n'était pas élucidé pour autant. En fait, en 1956, Chen Ning Yang et Tsung-Dao Lee ont émis l'hypothèse révolutionnaire selon laquelle la parité pouvait ne pas être conservée dans les interactions faibles. En 1957, Chieng-Shiung Wu, Eric Ambler et leurs collègues du Bureau américain des standards, à Washington, ont conçu une expérience pour mesurer la parité des électrons libérés lors d'une désintégration bêta. En utilisant des atomes froids de cobalt-60, ils ont réussi à faire passer les particules bêta qui en étaient expulsées dans un champ magnétique. Si la parité était conservée et si les électrons expulsés avaient des orientations aléatoires, on observerait un motif symétrique. S'il existait une direction privilégiée, on verrait apparaître un motif asymétrique.

**Violation de parité** Les physiciens attendaient les résultats avec impatience. Wolfgang Pauli était tellement convaincu que la symétrie était conservée qu'il paria une grosse somme d'argent et déclara : « Je ne crois pas

**1957**
Wu et Ambler montrent que la parité n'est pas conservée dans la désintégration bêta

**1957**
Schwinger propose trois porteurs de la force faible : $W^+$, $W^-$ et $Z^0$

**1964**
L'existence du champ de Higgs est postulée

**1983**
Mise en évidence des particules W et Z au CERN

que Dieu soit un faible gaucher. » Quinze jours plus tard, il regrettait amèrement ces mots : la parité n'était pas conservée.

Quelques mois après, Maurice Goldhaber et ses collègues du laboratoire de Brookhaven établissaient que le neutrino et l'antineutrino ont des parités opposées, le neutrino étant gauche, et l'antineutrino droit (telles nos mains, ils ne sont pas superposables). On admit alors que la force faible agissait seulement sur les particules gauches (et sur les antiparticules droites). Aujourd'hui, on connaît d'autres particules et la situation est plus complexe. Toutefois, on considère comme acquis que la parité est brisée dans les interactions faibles.

**« Il n'y a qu'une chose pire que de rentrer chez soi après une journée au labo et de trouver un évier plein de vaisselle sale, c'est de ne pas aller au labo ! »**

**Chieng-Shiung Wu, cité en 2001**

Une multitude de théoriciens se sont intéressés au problème. En novembre 1957, Julian Schwinger émit l'hypothèse que trois bosons étaient nécessaires pour transmettre la force faible. Pour transférer une charge, il leur fallait une paire de charges opposées, qu'ils nommèrent $W^+$ et $W^-$. La troisième particule devant être neutre, ils optèrent pour le photon. Dans la désintégration bêta, le neutron donnait un proton et $W^-$, lequel se désintégrait en un électron et un antineutrino.

Dix ans plus tôt, Schwinger s'était demandé si le rayon d'action limité de la force faible indiquait que son porteur était massif. Le photon, dépourvu de masse, se déplace très loin. L'équivalent pour la force faible était-il lourd au point que la force n'agisse pas en dehors du noyau ? Les bosons W devaient être lourds et avoir une courte durée de vie, se désintégrant quasi immédiatement, ce qui expliquait qu'on ne les avait pas encore observés.

Schwinger mit sont étudiant Sheldon Glashow au travail. Ce dernier finit par comprendre que si les particules portaient des charges, cela signifiait que la force faible et l'électromagnétisme étaient liés. Il élabora alors une nouvelle théorie qui les liaient mais nécessitait une troisième particule neutre massive, laquelle fut nommée Z°. Ainsi, la force faible était portée par trois bosons lourds : $W^+$, $W^-$ et Z°.

Vers 1960, la théorie de Glashow piétinait. Tout comme cela avait été le cas pour l'électrodynamique quantique, elle était truffée d'infinis et personne ne parvenait à s'en défaire. Une autre difficulté apparut : comment expliquer que les porteurs de la force faible aient une masse importante alors que le photon est sans masse ?

« Depuis le début de la physique, les considérations sur la symétrie ont été un outil puissant et fort utile dans notre effort pour comprendre la nature. »

Tsung-Dao Lee, 1981

**La théorie électrofaible** Pour qu'une théorie électrofaible combinant la force faible et l'électromagnétisme soit proposée, il fallut attendre que l'on comprenne mieux la nature des protons et des neutrons, et notamment le fait qu'ils sont constitués de particules plus petites, les quarks. La force faible modifie le type – ou la saveur – des quarks. Ainsi, changer un neutron en un proton nécessite qu'un quark change de saveur.

Le problème de la masse fut résolu au plan théorique en 1964 avec la proposition d'une nouvelle particule, le boson de Higgs. Son existence fut confirmée en 2012. Il attire les bosons W et Z, leur conférant leur inertie. Les bosons W et Z sont si massifs que la désintégration bêta est assez lente : il faut plusieurs minutes à un neutron pour se décomposer, alors qu'un photon est émis en une fraction de seconde.

Vers 1968, Glashow, Abdus Salam et Steven Weinberg présentèrent une théorie unifiée de la force électrofaible, ce qui leur valut le prix Nobel. Martinus Veltman et Gerard 't Hooft ont réussi à renormaliser la théorie, évitant ainsi les infinis. L'existence des particules W et Z fut confirmée dans les années 1970 et ces particules furent directement détectées au CERN en 1983.

Alors que les lois de la nature furent longtemps considérées comme symétriques dans un miroir, on découvrit que la force faible ne l'était pas. Elle a une chiralité.

## l'idée clé

## Une force gauche

# 27 Les quarks

**En tentant de comprendre la variété des particules élémentaires, Murray Gell-Mann découvrit des structures pouvant être expliquées si chaque particule était constituée d'un trio de composants encore plus élémentaires. Il les nomma « quarks ». Dix ans plus tard, leur existence fut confirmée.**

Dans les années 1960, les physiciens avaient découvert trente particules élémentaires. À côté des électrons, protons, neutrons et photons, il y avait des dizaines de particules plus exotiques, telles que les pions, muons, kaons et les particules sigma, toutes ayant des antiparticules.

Enrico Fermi aurait dit : « Si je pouvais retenir le nom de toutes ces particules, j'aurais été botaniste. » On commença à vouloir établir une sorte de tableau périodique des particules pour tenter de les relier les unes aux autres.

Les particules sont de deux types fondamentaux : les fermions et les bosons. La matière est formée de fermions, dont il existe également deux sortes : les leptons, comprenant les électrons, les muons et les neutrinos ; et les baryons (les protons et les neutrons). Les forces sont portées par des bosons, comprenant les photons et divers « mésons », tels que les pions et les kaons, tous deux responsables de l'interaction nucléaire forte.

**La voie octuple** Alors qu'il était en visite au Collège de France, à Paris, Murray Gell-Mann – amateur de bons vins – essaya de récapituler les propriétés quantiques de toutes ces particules. C'était comme s'il était face à un sudoku géant. Quand il les regroupa en fonction de leurs propriétés quantiques, par exemple leur charge ou leur spin, une structure émergea. Il isola ainsi deux groupes de huit particules : les baryons de spin ½ et les mésons de spin nul. En 1961, il publia cette approche sous le nom de « voie octuple », d'après le chemin en huit étapes qui a conduit Bouddha au Nirvana.

## chronologie

**1954**
Yang et Mills publient une théorie de la force nucléaire forte fondée sur la symétrie

**1961**
Gell-Mann publie la théorie de la « voie octuple »

**1964**
Gell-Mann publie la théorie des quarks

**1968**
Les quarks sont découverts à l'accélérateur linéaire de Stanford

### Murray Gell-Mann (1929-)

Né dans une famille d'immigrants juifs venus de l'Empire austro-hongrois, Murray Gell-Mann fut un enfant prodige. Il entra à l'université Yale à l'âge de 15 ans. En 1948, il obtint une licence de physique et entra au MIT, où il soutint une thèse de physique en 1951. En classant des particules issues des rayons cosmiques (kaons et hyperons), il émit l'hypothèse qu'une saveur quantique nommée « étrangeté » était conservée par l'interaction forte mais pas par l'interaction faible. En 1961, il entreprit de classer les hadrons (du grec *hadros*, grand) sous forme d'octets, qu'il nomma la « voie octuple ». En 1964, il annonça que, selon lui, les hadrons sont formés de trios de quarks. Il proposa la conservation de la « charge de couleur » et travailla sur la chromodynamique quantique. Gell-Mann reçut le prix Nobel de physique en 1969. Dans les années 1990, il commença à s'intéresser à la science de la complexité et aida à la construction de l'Institut de Santa Fe, au Nouveau-Mexique. Il est aujourd'hui professeur associé au Caltech (Institut de technologie de Californie), qu'il n'a pas quitté depuis 1955 !

Un des bosons n'avait pas encore été découvert : on n'en connaissait que sept. Alors il prédit l'existence d'un huitième méson. Celui-ci fut découvert tout juste quelques mois plus tard par Luis Alvarez et son équipe de l'université de Californie, à Berkeley. Quand un nouveau trio de spin –3/2 fut ensuite découvert, Gell-Mann trouva qu'il pouvait les intégrer dans un autre ensemble contenant dix entités. La classification prenait forme.

Chaque agencement avait un sens au plan mathématique à condition qu'il y ait trois particules fondamentales à l'origine de chaque motif. Si les protons et les neutrons étaient tous faits de trois particules plus petites, on pouvait agencer les constituants de diverses façons afin de construire les arbres généalogiques de ces particules.

Les constituants élémentaires devraient avoir une charge inhabituelle égale à plus ou moins 1/3 ou 2/3 de celle d'un électron pour que leur combinaison puisse donner la charge entière positive d'un proton ou la charge nulle d'un neutron. De telles charges fractionnaires semblaient si ridicules – rien de tel n'avait jamais été observé – que Gell-Mann donna à ces particules imaginaires un nom dénué de sens – « quork » ou « kwork ».

**1973**
Gross, Wilczek et Politzer publient la théorie de la chromodynamique quantique

**1974**
Le quark *charme* est découvert

**1977**
Le quark *bottom* est découvert

**1994**
Le quark *top* est découvert

**« Trois “quarks” pour Maître Marc ! Sûr que sa barque ne vaut pas grand-chose et que tout ce qu’il a se trouve être hors de saison. »**

**James Joyce, *Finnegans Wake* (Traduction de Philippe Lavergne, 1982)**

**Les quarks et leurs saveurs** Alors qu’il lisait *Finnegans Wake,* de James Joyce, Gell-Mann trouva un nom qui lui plaisait mieux dans un passage de ce roman : « Trois quarks pour Maître Marc ! » Joyce faisait allusion aux cris des oiseaux, mais Gell-Mann fut séduit par la similarité de ce mot avec celui qu’il avait lui-même imaginé et par le lien avec le nombre 3. En 1964, il publia sa théorie des quarks, suggérant que le neutron était le mélange d’un quark *up* et de deux quarks *down,* et que le proton était constitué de deux quarks *up* et d’un quark *down*. Ainsi, le rayonnement bêta impliquait, selon lui, la transformation d’un quark *down* dans un neutron en un quark *up* dans un proton, avec émission simultanée d’une particule $W^-$.

La voie octuple magique de Gell-Mann semblait efficace, même si son auteur lui-même ne comprenait pas pourquoi. Il admettait que c’était simplement un outil mathématique. Certains physiciens considéraient sa théorie des quarks avec dérision. On n’avait alors pas de preuves de l’existence des quarks. Il fallut attendre 1968 et les expériences réalisées dans l’accélérateur linéaire de Stanford pour obtenir confirmation du fait que le proton était bien constitué de composants plus petits.

À mesure que l’on a découvert de nouvelles particules, le tableau de Gell-Mann a été complété. Nous savons qu’il existe six types (ou saveurs) de quarks : *up, down, étrange, charme, bottom* et *top*. Ils sont appariés : les quarks *up* et *down* sont les plus légers et les plus fréquents. Les quarks les plus lourds ne sont repérables que lors des collisions de haute énergie – le quark *top* n’a été identifié qu’en 1995 au Fermilab.

Les noms bizarres des quarks sont souvent liés à leurs caractéristiques. Les quarks *up* et *down* sont les plus simples et tirent leurs noms de la direction de leur isospin (propriété quantique dans les interactions nucléaires forte et faible, analogue à la charge dans l’électromagnétisme).

Les quarks *étranges* sont ainsi nommés parce qu’ils sont des composants de particules « étranges » découvertes il y a des décennies dans les rayons cosmiques. Le quark *charme* doit son nom au plaisir qu’a suscité sa découverte. Les quarks *bottom* et *top* sont complémentaires des quarks *up* et *down*. Certains physiciens

préfèrent utiliser pour les quarks *top* et *bottom* les qualificatifs plus romantiques de « vérité » et « beauté ».

Les quarks peuvent changer de saveur par le biais de l'interaction faible et sont soumis aux quatre forces fondamentales. Il existe un antiquark pour chaque quark. Les particules constituées de quarks sont des hadrons (du grec *hadros*, grand). Les quarks ne peuvent exister isolés des autres – ils peuvent seulement être par trois et sont confinés dans les hadrons.

**« Comment se fait-il que quelques formules simples et élégantes, qui ressemblent à de courts poèmes dictés par des règles strictes, telles celles du sonnet, puissent prédire les régularités de la nature ? »**

**Murray Gell-Mann, discours au banquet du Nobel (10 décembre 1969)**

**Les « couleurs » des quarks** Les quarks ont leurs propriétés spécifiques, par exemple la charge électrique, la masse, le spin et d'autres caractéristiques quantiques, telles que la charge de « couleur », liée à la force nucléaire forte. Ils peuvent être rouges, verts ou bleus. Les antiquarks ont des anticouleurs, par exemple l'antirouge. En optique, les trois couleurs primaires se combinent pour donner le blanc. De même, les baryons doivent être constitués d'une combinaison qui aboutisse à du blanc.

L'attraction et la répulsion de quarks de diverses couleurs sont sous le contrôle de l'interaction forte, et des particules nommées gluons sont impliquées. La théorie qui décrit les interactions fortes est nommée « chromodynamique quantique » (QCD).

## l'idée clé
## La puissance du trois

# 28 La diffusion inélastique profonde

**Une série d'expériences réalisées en Californie à la fin des années 1960 a validé le modèle des quarks du proton et autres hadrons. En projetant des électrons à très haute énergie sur des protons, les physiciens ont montré qu'ils rebondissaient violemment quand ils frappaient trois points dans le nucléon ; ils ont aussi montré que les quarks ont des charges fractionnaires.**

En 1968, des physiciens de l'université Stanford s'interrogeaient sur les résultats livrés par leur nouvel accélérateur de particules. Le Centre de l'accélérateur linéaire de Stanford (SLAC), au sud de San Francisco, n'était pas le plus puissant des États-Unis – le record était détenu par celui de Brookhaven, sur la côte est. Mais le SLAC avait été construit pour accomplir un exploit : casser le proton.

Les accélérateurs les plus puissants d'alors, tel celui de Brookhaven, permettaient de réaliser des collisions de faisceaux de protons et de rechercher de nouveaux types de particules parmi les débris. Selon Richard Feynman, c'était un peu comme si l'on prenait une montre suisse et qu'on la mettait en pièces pour comprendre comment elle fonctionnait. L'équipe du SLAC utilisait des faisceaux d'électrons rapides pour bombarder des protons.

Les électrons étant beaucoup plus légers que les protons, ils devaient avoir un impact plus limité, ce qui, selon le théoricien américain James Bjorken, devait permettre de mieux cibler leur action. Les électrons de très haute énergie

## chronologie

**1909** Rutherford réalise son expérience avec des feuilles d'or

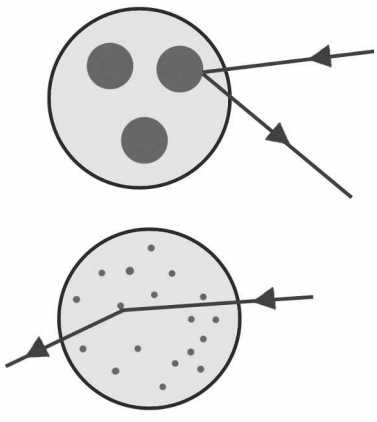
**1918** Rutherford isole le proton

**1932** Chadwick découvre le neutron

**1964** Gell-Mann propose le modèle des quarks

devaient avoir des fonctions d'onde très compactes, et cibler des régions suffisamment petites pour transpercer les protons. Les physiciens du SLAC faisaient ainsi un pas de plus qu'Ernest Rutherford qui, cinquante ans plus tôt, avait découvert le noyau de l'atome en bombardant une feuille d'or avec des particules alpha.

Dans les années 1960, les physiciens ignoraient de quoi était constitué le proton. Murray Gell-Mann avait émis l'hypothèse qu'il contenait trois quarks, mais ce n'était qu'un concept. De même que Rutherford avait d'abord imaginé qu'un atome devait ressembler à un « pudding », un proton ne serait qu'une balle ou, comme dans l'atome de Bohr, un espace quasi vide où seuls quelques minuscules constituants seraient présents.



**Dans un proton, les quarks diffractent les électrons incidents qui, sinon, pourraient traverser.**

**Deux sortes de collisions** Dans l'accélérateur du SLAC, un électron peut entrer en collision avec un proton de deux façons différentes. Dans le cas le plus simple, il rebondit sur le noyau, les deux particules restent intactes et respectent la conservation de la quantité de mouvement. L'énergie cinétique étant également conservée, la collision est élastique. Mais les électrons peuvent aussi subir des collisions inélastiques, une partie de l'énergie cinétique étant transférée à de nouvelles particules.

Les collisions inélastiques sont parfois peu visibles : le proton ne bouge quasiment pas, absorbe un peu de l'énergie de l'électron et libère des particules. Mais il arrive aussi que l'électron transperce le proton et le fasse exploser ; il s'ensuit une pluie de débris de particules. Le processus le plus destructeur est la diffusion inélastique profonde, et Bjorken comprit qu'elle pouvait révéler les entrailles du proton.

Si le proton était une masse homogène, les électrons devraient être peu déviés de leur trajectoire incidente par la collision. Si, au contraire, le proton était constitué de minuscules noyaux durs, les électrons, qui sont légers, devraient rebondir en étant notablement déviés. C'est ainsi que Rutherford mit en évidence les particules alpha qui étaient déviées par des noyaux d'or.

« Je pense qu'il y a 15 747 724 136 275 002 577 605 653 961 181 555 468 044 717 914 527 116 709 366 231 425 076 185 631 031 296 protons dans l'Univers et le même nombre d'électrons. »

Sir Arthur Stanley Eddington, 1938

L'équipe de Bjorken constata rapidement que de nombreux électrons étaient notablement déviés, et il repéra des pics dans l'énergie relative des électrons diffusés, ce qui pouvait refléter la structure sous-jacente du proton : les protons devaient être constitués de grains minuscules.

**Les physiciens aussi entrent en collision** Il fallut attendre un moment avant que les grains ne soient qualifiés de quarks. Car il existait d'autres possibilités. Richard Feynman, qui venait tout juste de recevoir le prix Nobel pour ses travaux sur l'électrodynamique quantique, proposait un autre modèle. Il n'était pas persuadé que les protons et autres hadrons contenaient des constituants plus petits ; il les nomma pourtant « partons » (parties de hadrons).

Feynman n'avait pas encore terminé son modèle. Il ignorait ce qu'étaient les partons mais cherchait à imaginer comment ils se comporteraient au cours de collisions si le proton et l'électron étaient aplatis par des effets relativistes. Feynman était convaincu que les résultats fournis par le SLAC étaient cohérents avec son modèle de partons et, étant donné sa popularité et la récompense qu'il venait d'obtenir, de nombreux physiciens voulurent croire qu'il avait raison.

« On pourrait croire que les physiciens ne pensent qu'à faire des expériences de diffusion ou à les interpréter. »

Clifford Shull, 1994

Or, de nouvelles expériences commencèrent à valider le modèle des quarks. Les neutrons devinrent les nouvelles cibles à étudier. Les motifs qu'ils produisaient avec des électrons diffusés étaient un peu différents, et il fallut plusieurs années et de multiples querelles pour sélectionner les tests pertinents et interpréter les données. Finalement, le modèle des quarks l'emporta.

Les protons, les neutrons et autres baryons contiennent trois sous-particules diffusantes, qui sont les trois quarks *up* et *down*. Les mésons en contiennent deux, un quark et un antiquark. Les grains sont quasi ponctuels, comme l'électron. Leurs charges sont des multiples de 1/3, ce qui est cohérent avec le concept de quark.

En 1970, Sheldon Glashow apporta une confirmation au modèle en déduisant l'existence du quark *charme* de la décroissance de particules « étranges » plus lourdes, tel le kaon. Il fallut attendre 1973 pour que la plupart des physiciens acceptent la théorie des quarks.

Restaient pourtant quelques questions : au cours des collisions, les quarks semblaient se comporter comme des particules indépendantes dans le noyau, mais elles ne pouvaient pas se libérer. Pourquoi ? Quelle était cette colle quantique qui les maintenait ? Et si les quarks étaient des fermions, comment deux quarks identiques pouvaient-ils rester côte à côte dans un proton ou un neutron ? Le principe d'exclusion de Pauli aurait dû l'interdire.

Les réponses allaient venir des futurs perfectionnements de la théorie quantique des champs, la chromodynamique quantique, c'est-à-dire de l'étude des propriétés des quarks et de l'interaction forte qui les contrôle.

### Sheldon Glashow (1932-)

Sheldon Glashow, dont les parents avaient fui l'Union soviétique, est né à New York. Au lycée, il était dans la même classe que le futur physicien Steven Weinberg. En 1979, il partagera le prix Nobel avec lui et Abdus Salam. Il poursuivit ses études à l'université Cornell et prépara une thèse à Harvard, où il fut le condisciple d'un autre prix Nobel, Julian Schwinger. Glashow conçut la théorie électrofaible et, en 1964, avec James Bjorken, il fut le premier à prédire l'existence du quark *charme*. En 1973, Glashow et Howard Georgi proposèrent la première théorie de la grande unification. Refusant la théorie des cordes, qu'il qualifiait de « tumeur », il tenta (sans succès) d'empêcher que des théoriciens des cordes rejoignent le département de physique de Harvard.

## l'idée clé
## Le cœur des choses

# 29 Chromodynamique quantique

**La théorie des quarks ayant été confirmée, on chercha une meilleure explication de l'interaction forte qui contrôle le comportement des protons et des neutrons dans le noyau. La chromodynamique quantique (QCD) décrit comment les quarks sont soumis à une force de couleur, dont les porteurs sont les gluons.**

Dans les années 1970, les physiciens commencèrent à admettre que les protons et les neutrons sont constitués d'un trio de composants plus petits, les quarks. Prévus par Murray Gell-Mann pour expliquer les caractéristiques des particules élémentaires qu'il observait, les quarks présentaient quelques propriétés étranges.

Les expériences menées au Centre de l'accélérateur linéaire de Stanford révélèrent en 1968 l'aspect granulaire des protons, puis, plus tard, celui des neutrons quand on les bombardait avec des électrons. Les quarks portent des charges égales à plus ou moins 1/3 ou 2/3, de sorte que la somme des charges de trois particules donne une charge égale à +1 pour le proton et 0 pour le neutron.

Dans les expériences du SLAC, les quarks se comportaient de façon indépendante. Mais on ne pouvait les extraire du noyau, où ils restaient confinés. Jamais on n'avait observé de particules portant une charge fractionnaire libre. Pourquoi restaient-ils ainsi piégés ?

Les physiciens se heurtaient à une autre difficulté : les quarks sont des fermions, avec un spin 1/2. Selon le principe d'exclusion de Pauli, deux fermions ne peuvent avoir les mêmes propriétés. Pourtant, les protons et les neutrons hébergent deux quarks *up* ou deux quarks *down*. Comment était-ce possible ?

## chronologie

**1961**
Gell-Mann publie la théorie de la « voie octuple »

**1964**
Gell-Mann propose le modèle des quarks de hadrons

**1968**
Première révélation de la structure du proton au SLAC

**La charge de couleur** En 1970, Gell-Mann s'attaqua à ce problème alors qu'il passait l'été dans les monts Aspen, dans le Colorado, avec d'autres physiciens. Il comprit que la difficulté posée par le principe d'exclusion de Pauli pouvait être résolue si les quarks étaient dotés d'un autre nombre quantique, tels que charge, spin ou autres. Il nomma cette propriété « couleur ». Deux quarks *up*, par exemple, pouvaient cohabiter dans un proton s'ils avaient des couleurs différentes.

Il postula que les quarks peuvent avoir trois couleurs : rouge, vert et bleu. Ainsi, les deux quarks semblables *up* et *down* dans les protons et les neutrons ont des couleurs différentes, de sorte que le principe d'exclusion de Pauli est respecté. Ainsi, un proton contient un quark *up* rouge, un quark *up* bleu et un quark *down* vert.

**« Pour moi, un savoir unifié est un idéal, un objectif impérieux. »**
**Frank Wilczek, 2004**

Comme la couleur ne s'applique qu'aux quarks – pas aux particules réelles, tels les protons –, la couleur d'une particule réelle doit être le blanc, par analogie avec les couleurs de la lumière. Dès lors, la combinaison de trois quarks doit toujours inclure le rouge, le vert et le bleu. Les antiparticules ont-elles des « anticouleurs » équivalentes ?

En 1972, Murray Gell-Mann et Harald Fritzsch ont introduit les trois couleurs des quarks dans le modèle de la « voie octuple ». Comme pour les trois « saveurs », il fallait introduire huit nouveaux vecteurs d'interactions pour transmettre la force de couleur. Ces vecteurs furent nommés gluons. Gell-Mann présenta son modèle incidemment lors d'une conférence à Rochester, dans l'État de New York. Pourtant, il n'était pas encore convaincu de l'existence des quarks, sans parler de la couleur et des gluons !

**La liberté asymptotique** Mais comment étudier les quarks, alors qu'ils sont confinés dans le noyau ? Les expériences réalisées au SLAC montrèrent que les quarks se comportent de façon d'autant plus indépendante les uns des autres qu'ils sont proches. Inversement, quand ils sont éloignés, ils s'attirent davantage.

Ce comportement a été nommé « liberté asymptotique » : s'ils parvenaient à se toucher, ils seraient théoriquement libres et n'interagiraient plus. Comme

**1973** Gross, Wilczek et Politzer publient la théorie de la chromodynamique quantique

**1974** Découverte du quark *charme*

**1977** Découverte du quark *bottom*

**1979** Découverte des jets de gluons

**1995** Découverte du quark *top*

### Frank Wilczek (1951-)

Frank Wilczek passa son enfance dans le Queens, à New York. Il aimait résoudre les énigmes et les jeux mathématiques. C'était l'époque de la Guerre froide et les débuts de l'exploration spatiale. Il se souvient de toutes les pièces de téléviseurs et de radios entassées chez lui, et de son père qui suivait des cours du soir en électronique. Élevé dans la foi catholique, il aimait l'idée qu'« il y a un grand dessein derrière l'existence ». Mais il se détourna de la foi, préférant chercher le sens de l'existence dans la science.
Également attiré par les sciences cognitives, il étudia les mathématiques à l'université de Chicago, car cela lui laissait « le maximum de liberté ». À Princeton, sa thèse fut consacrée à l'étude de la symétrie. Il y rencontra David Gross et travailla sur les théories de l'interaction électrofaible. Avec Gross, il contribua à poser les bases de la théorie de l'interaction forte – la chromodynamique quantique. Il reçut le prix Nobel avec David Politzer en 2004.

l'intensité des forces telles que l'électromagnétisme et la gravitation diminue avec la distance, cet aspect de l'interaction forte était, pour le moins, contre-intuitif.

En 1973, David Gross et Frank Wilczek et, indépendamment, David Politzer élargirent le cadre de la théorie quantique pour y introduire la liberté asymptotique. Avec ses collègues, Gell-Mann poursuivit leurs travaux et émit des hypothèses à propos des petits écarts observés dans les expériences de diffusion faites au SLAC. Tout confortait la théorie des quarks.

Il restait à trouver un nom pour cette nouvelle théorie, et l'été suivant Gell-Mann proposa la chromodynamique quantique (QCD). Selon lui, elle présentait de « nombreuses vertus et aucun vice connu ».

**Pas de quarks isolés** Toutefois, la théorie n'était pas encore achevée. Elle n'expliquait pas pourquoi on ne pouvait isoler les quarks, ni pourquoi ils restaient confinés dans le noyau des hadrons. Les physiciens finirent par proposer une solution. Quand les quarks sont extraits du noyau d'un proton, les forces de couleur augmentent et les gluons qui les retiennent sont étirés en cordes, un peu comme les fils d'un chewing-gum.

Si un quark continue à tenter de s'échapper, la corde finit par se casser et l'énergie du gluon est convertie en paires de quarks et d'antiquarks. Le quark qui s'échappe peut être anéanti par un antiquark puis absorbé par une particule réelle, tel un méson. Les autres quarks libérés restent à l'intérieur du noyau. Les quarks ne peuvent pas se libérer de la force de couleur.

Contrairement aux photons, qui ne sont pas chargés, les gluons portent une « charge de couleur » et interagissent les uns avec les autres. Lors des interac-

**« Nous avons nommé “charme” le nouveau (quatrième) quark, car nous étions ravis et fascinés par la symétrie qu’il apportait dans le monde du noyau. »**

**Sheldon Glashow, 1977**

tions de couleur, de nombreuses particules peuvent être créées à partir d’une paire quark-antiquark, et elles ont tendance à s’échapper à peu près dans la même direction. L’observation de ces jets de particules a confirmé l’existence des gluons en 1979.

Au cours des années qui ont suivi, d’autres quarks ont été découverts : le quark *charme* en 1974, le quark *bottom* en 1977 et le quark *top* en 1995. La chromodynamique quantique rejoignait le cercle fermé des théories quantiques des champs. Il restait à découvrir une façon d’unifier les trois principales forces – l’électromagnétisme, l’interaction faible et l’interaction forte – pour expliquer le modèle standard de la physique des particules.

## l’idée clé

# Trois couleurs : rouge, vert, bleu

# 30 Le modèle standard

**Comment reconstituer l'arbre généalogique complexe de plus de 60 particules fondamentales et des 20 paramètres quantiques associés ? Leur disposition laisse entrevoir les lois sous-jacentes de la nature. Et pourtant, il faudra peut-être en ajouter d'autres au modèle standard de la physique des particules.**

Au milieu des années 1980, les physiciens apportaient la dernière touche à la panoplie de particules élémentaires qu'ils avaient découvertes depuis une centaine d'années. Alors que dans les années 1950 et 1960, les théoriciens avaient été décontenancés par tout ce que révélaient les expériences, dans les années 1970, ils peaufinèrent, grâce aux accélérateurs, ce qui allait devenir le modèle standard de la physique des particules.

De l'eau avait coulé sous les ponts depuis les premiers travaux de Niels Bohr sur la structure atomique. Les électrons s'étaient révélés être d'étranges créatures probabilistes, décrites en termes de fonctions d'onde dans le seul cadre de la mécanique quantique. Le noyau était encore plus bizarre où se combinaient de multiples entités, des quarks maintenus en place par des gluons élastiques aux bosons massifs W et Z et aux neutrons éphémères.

À mesure que l'on découvrait de nouvelles particules – d'abord en étudiant les rayons cosmiques, puis dans les accélérateurs et les collisionneurs –, l'intuition mathématique de Murray Gell-Mann avait toujours un temps d'avance. Son modèle de la « voie octuple » tenait compte des symétries sous-jacentes des familles de particules imposées par les nombres quantiques. Puis suivirent la théorie des quarks et la chromodynamique quantique.

## chronologie

**1946-50**
Tomonaga, Schwinger et Feynman élaborent l'électrodynamique quantique

**1964**
Gell-Mann propose le modèle des quarks de hadrons

**1964**
Le champ de Higgs est envisagé

**1968**
Des expériences au SLAC révèlent la structure interne du proton

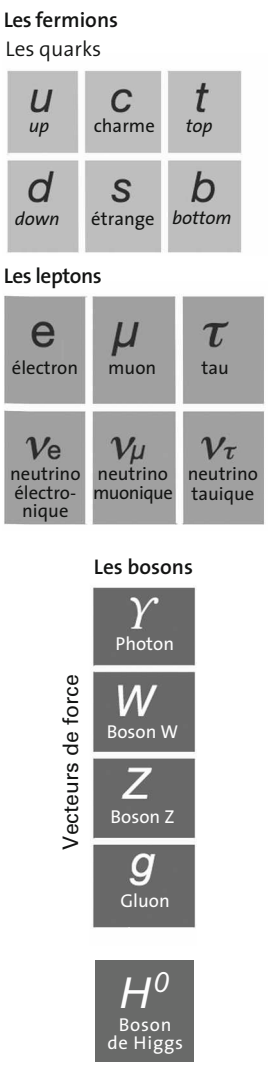
Dans les années 1990, les cases encore vides du modèle standard furent comblées par la découverte du quark *top* en 1995 et celle du neutrino tauique en 2000. Et, cerise sur le gâteau, le boson de Higgs fut découvert en 2012.

**Trois générations** Le modèle standard décrit comment trois générations de particules interagissent par le biais de trois forces fondamentales, chacune étant transmise par ses propres porteurs. Il existe trois types fondamentaux de particules : les hadrons, tels le proton et le neutron constitués de quarks, les leptons, dont fait partie l'électron, et les bosons vecteurs, tel le photon, associés à la transmission des forces. À chaque hadron et à chaque lepton, correspond une antiparticule.

Les quarks aussi se présentent en trios. Ils ont trois « couleurs » : rouge, bleu et vert. Tout comme les électrons et les protons portent des charges électriques, les quarks portent des « charges de couleur ». La force de couleur est transmise par une particule de force nommée gluon.

Au lieu de diminuer avec la distance, l'intensité de la force de couleur augmente quand les quarks s'écartent les uns des autres, à la façon d'un élastique. Elle les maintient si étroitement ensemble que les quarks ne peuvent jamais se libérer de leurs voisins ni exister indépendamment des autres. Toutes les particules constituées de quarks doivent être neutres en termes de couleur, c'est-à-dire que la somme de leurs couleurs doit donner du blanc. Les particules telles que les protons et les neutrons contenant trois quarks sont des baryons (du grec *barus*, lourd), tandis que celles qui contiennent des paires quark-antiquark sont des mésons.

Les quarks ont une masse et présentent six types de « saveurs ». Ils sont groupés en trois générations et se présentent sous forme de trois paires complémentaires. Leurs qualificatifs sont poétiques : quarks *up* et *down, étrange, charme, top* et *bottom*. Les quarks *up, charme* et *top* portent une charge égale à +2/3




**1968** Glashow, Salam et Weinberg proposent la théorie électrofaible

**1973** Gross, Wilczek et Politzer publient la théorie de la chromodynamique quantique

**1995** Découverte du quark *top*

**2000** Découverte du neutrino tauique

et les quarks *down, étrange* et *bottom* une charge égale à – 1/3. Un proton est constitué de deux quarks *up* et d'un quark *down* ; un neutron, de deux quarks *down* et d'un quark *up*.

Les électrons et les neutrinos sont des leptons et ne sont pas soumis à la force nucléaire forte. Comme pour les quarks, il existe six saveurs pour les leptons et trois générations dont la masse va croissant : électrons, muons et leptons tau, ainsi que les neutrinos correspondants (neutrinos électroniques, muoniques et tauiques). Un muon est 200 fois plus lourd qu'un électron, et un lepton tau 3 700 fois. La masse des neutrinos est quasi nulle. Les leptons, tel l'électron, portent une charge unique négative, et les neutrinos ne sont pas chargés.

**« Les tapisseries sont fabriquées par de nombreux artisans travaillant ensemble… C'est la même chose en physique des particules. »**

**Sheldon Glashow, 1979**

Les particules portant les forces comprennent le photon, qui transmet la force électromagnétique, les particules W et Z, qui transmettent la force nucléaire faible, les gluons, associés à l'interaction forte. Ce sont tous des bosons, qui ne sont pas soumis au principe d'exclusion de Pauli, de sorte qu'ils peuvent adopter n'importe quel état quantique. Les quarks et les leptons sont des fermions soumis au principe d'exclusion de Pauli. Les photons sont sans masse, les gluons sont légers, mais les particules W et Z sont relativement lourdes. Les bosons W et Z acquièrent leur masse par l'intermédiaire d'un autre champ, celui de Higgs, transmis par le boson de Higgs.

La découverte de toutes les particules a été rendue possible grâce à des techniques de pointe. Les premières particules exotiques ont été repérées dans les rayons cosmiques : il s'agit de particules de très haute énergie venues de l'espace et qui heurtent l'atmosphère supérieure de la Terre en émettant des cascades de particules que les physiciens peuvent piéger.

Dans les années 1960, les accélérateurs de particules atteignirent des énergies de plus en plus hautes, ce qui permit aux expérimentateurs de créer des particules *ex nihilo*. De nouveaux types de particules apparaissaient lors des collisions de faisceaux accélérés de protons sur des cibles, ou de deux faisceaux se déplaçant dans des directions opposées. Pour obtenir des particules massives, il fallait atteindre de très hautes énergies, de sorte que ce sont les particules les plus lourdes qui furent découvertes les dernières. Des énergies gigantesques sont également nécessaires pour vaincre la force nucléaire forte et libérer temporairement des quarks.

Pour identifier les particules ainsi créées ou libérées, les physiciens les font passer dans un champ magnétique. Les particules chargées positivement et celles chargées négativement se dirigent dans des directions opposées. De surcroît, les particules massives ou légères, rapides ou lentes sont déviées de façon différente, certaines dessinant des spirales.

**Questions ouvertes** Le modèle standard a été régulièrement conforté par les découvertes. Toutefois, les physiciens ne crient pas encore victoire. Avec 61 particules et 20 nombres quantiques, le modèle n'est pas élégant. Les valeurs des paramètres ont toutes été évaluées expérimentalement et non déduites de la théorie.

Pourquoi les différentes particules ont-elles de telles masses relatives ? Pourquoi le quark *top* est-il si lourd par rapport au quark *bottom* ? Et le lepton tau si lourd par rapport à l'électron ? Les masses semblent aléatoires.

L'intensité des différentes interactions – par exemple celle de la force faible par rapport à la force électromagnétique – reste également une énigme. On sait les mesurer, mais sans comprendre les résultats observés.

Et il reste encore des lacunes à combler. Le modèle n'intègre pas la gravitation. On a postulé l'existence du « graviton », une particule transmettant la force de gravitation, cependant cela n'est aujourd'hui qu'une idée abstraite. Un jour peut-être les physiciens parviendront-ils à introduire la gravitation dans le modèle standard : la théorie de la grande unification est un enjeu immense… mais sans doute encore lointain.

Il reste encore d'autres questions ouvertes que le modèle standard n'explique pas, notamment l'asymétrie matière-antimatière, ou la nature de la matière sombre et de l'énergie noire. Beaucoup de choses restent encore à découvrir !

## l'idée clé

## L'arbre généalogique des particules

# 31 Les symétries brisées

**Les symétries sont nombreuses en physique. Les lois de la nature restent les mêmes quels que soient le lieu ou le moment où les mesures sont réalisées. Les symétries présentes dans la plupart des théories s'appliquent à toutes les particules de l'Univers. Mais parfois, ces symétries sont brisées, si bien que la masse des particules ou leur chiralité changent.**

La notion de symétrie nous est familière. Les motifs présents sur les ailes d'un papillon sont des images dans un miroir ; un visage est souvent jugé plus beau quand il est symétrique. De telles symétries – qui laissent les systèmes inchangés – sont fréquentes en physique. Au XVII^e siècle, Galilée et Newton affirmèrent que l'Univers se comporte partout de la même façon, c'est-à-dire que les lois qui s'appliquent sur Terre restent valables sur toutes les autres planètes. Les lois de la nature ne changent pas, que nous nous déplacions de quelques mètres ou de millions d'années-lumière, que nous tournions sur nous-mêmes ou que nous regardions le monde la tête en bas.

Albert Einstein a conçu la théorie de la relativité restreinte et celle de la relativité générale pour rendre compte du fait que l'Univers reste le même pour tous les observateurs, quels que soient l'endroit où ils se situent, leur vitesse ou l'accélération subie. Quant aux équations de James Clerk Maxwell de l'électromagnétisme, elles reposent sur les symétries qui existent entre le champ électrique et le champ magnétique, si bien que leurs propriétés sont interchangeables dans certaines conditions.

Le modèle standard des particules repose également sur certaines considérations liées à la symétrie. Murray Gell-Mann a tenté de mettre de l'ordre dans la jungle des particules élémentaires en cherchant des régularités dans leurs nombres quantiques. Ce faisant, il a prédit l'existence de triplets de quarks.

## chronologie

**1873** Maxwell publie les équations de l'électromagnétisme

**1905** Einstein publie la théorie de la relativité restreinte

**1915** Einstein publie la théorie de la relativité générale

**1954** Yang et Mills publient la théorie de jauge de l'interaction forte

Ces trois physiciens – Einstein, Maxwell et Gell-Mann – ont élaboré leurs théories en se fondant sur la puissance des mathématiques de la symétrie. Convaincus que la nature suit de telles lois, ils ont réussi à se libérer des idées préconçues issues des observations, et à concevoir des théories totalement nouvelles, dont les prédictions souvent surprenantes ont été confirmées par la suite.

**« La symétrie, quelle qu'en soit la définition, est une idée que l'homme utilise depuis la nuit des temps pour révéler l'ordre, la beauté et la perfection. »**

**Hermann Weyl, 1980**

**Invariance de jauge** Le monde quantique regorge de symétries. Comme ce qui est observé dans le monde réel est déconnecté de ce qui se joue réellement dans le monde de l'infiniment petit, il faut pouvoir adapter les équations de la mécanique quantique et celles de la théorie quantique des champs. Que l'on utilise la mécanique ondulatoire ou la mécanique des matrices, par exemple, on doit obtenir les mêmes résultats pour une même expérience. Les observables physiques – telles la charge, l'énergie ou les vitesses – ne doivent pas dépendre de l'échelle utilisée pour décrire le champ sous-jacent.

Les lois de la physique doivent être formulées de façon telle que les grandeurs observées ne sont pas modifiées par des changements de coordonnées ou d'échelle (la jauge). C'est l'« invariance de jauge » ou « symétrie de jauge », et les théories de jauge respectent ces principes. Tant que cette symétrie reste vraie, les physiciens peuvent modifier les équations à leur guise pour expliquer le comportement de la matière.

Les équations de Maxwell restent symétriques quand on change d'échelle. C'est également le cas en relativité générale. Et cette approche a été généralisée en 1954 par Chen Ning Yang et Robert Mills qui l'ont appliquée à l'interaction nucléaire forte. Leur méthode inspira Gell-Mann dans sa recherche des groupes de symétrie des particules et fut appliquée dans la théorie quantique des champs de la force faible et dans son unification avec l'électromagnétisme dans la théorie électrofaible.

**Les lois de la conservation** Les symétries sont étroitement reliées aux lois de la conservation. Si l'énergie est conservée, la charge doit l'être également pour respecter l'invariance de jauge, et quand nous décrivons des champs, tout ce qui importe ce sont les effets relatifs.

**1961** Gell-Mann publie sa théorie de la « voie octuple »

**1961** Le mécanisme de Higgs est proposé

**1968** Glashow, Salam et Weinberg proposent la théorie électrofaible

**1973** La théorie de la chromodynamique quantique est publiée par Gross, Wilczek et Politzer

**2012** Détection du boson de Higgs

La symétrie de jauge explique pourquoi les particules d'un type donné sont indiscernables. Deux d'entre elles pourraient se substituer l'une à l'autre sans que nous ne nous en apercevions. De même, les photons sont liés de façon inextricable, même s'ils semblent distincts.

D'autres symétries importantes en physique font intervenir le temps : les lois de la nature seront identiques demain à celles d'aujourd'hui, et les antiparticules sont équivalentes à des particules réelles remontant le temps. La parité est un autre exemple : c'est une mesure de la symétrie d'une fonction d'onde, telle qu'une fonction paire est symétrique par réflexion, mais une fonction impaire ne l'est pas.

**Symétries brisées** Les symétries sont parfois violées. Ainsi, l'interaction nucléaire faible ne conserve pas la parité et n'agit que sur les particules de chiralité gauche (les électrons et les neutrinos). Dans la chromodynamique quantique, les quarks sont également chiraux. Dans l'Univers, matière et antimatière ne sont pas en équilibre. Et le fait que différentes particules aient des masses différentes implique que la symétrie soit brisée – sinon ces particules auraient une masse nulle.

Tout comme l'eau prend rapidement en masse pour devenir de la glace, une brisure spontanée de symétrie est rapide. Dès que le point critique est atteint, le système bascule vers un nouvel état qui, de prime abord, peut paraître arbitraire. Prenons l'exemple d'un crayon en équilibre sur sa pointe. Tant qu'il reste dans cette position, il est symétrique – il a autant de chances de tomber dans n'importe quelle direction – mais dès qu'il tombe, il pointe dans une direction spécifique. La symétrie est brisée.

L'aspect d'un champ magnétique dans un aimant est un autre exemple. Dans un morceau de fer chauffé, tous les petits champs magnétiques bougent et sont orientés au hasard – de sorte que le morceau n'a pas de champ magnétique global. Mais quand il refroidit sous un certain seuil, connu sous le nom de température du Curie (environ 700 °C), les atomes subissent une « transition de phase » et la plupart s'alignent dans la même direction. C'est pourquoi le fer présente un pôle magnétique nord et un pôle magnétique sud.

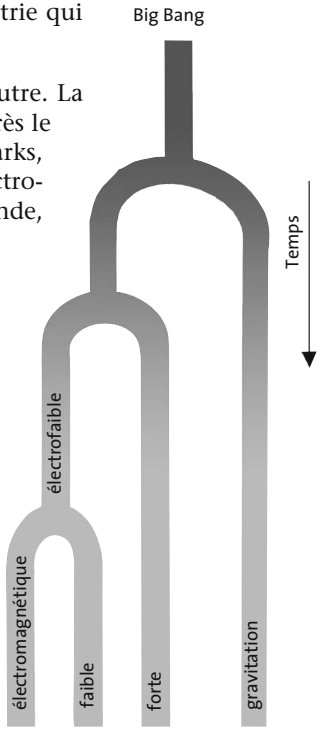
La série de transitions de phase du même type qui a eu lieu dans l'Univers jeune permettrait d'expliquer pourquoi il existe aujourd'hui quatre interactions fondamentales et non une force unique. Dans la chaleur extrême qui régnait dans l'Univers primordial, juste après le Big Bang, les quatre forces étaient unifiées. À mesure que l'Univers s'est refroidi – tout comme dans l'aimant – il

s'est produit des transitions de phase qui ont brisé la symétrie qui régnait jusqu'alors.

Les quatre forces se seraient individualisées l'une après l'autre. La force de gravitation aurait été la première, $10^{-43}$ seconde après le Big Bang. L'interaction forte, qui assure la cohésion des quarks, apparut à $10^{-36}$ seconde. L'interaction faible et la force électromagnétique restèrent combinées pendant quelque $10^{-12}$ seconde, instant où elles se seraient séparées.

Au moment de cette transition de phase électrofaible, l'énergie de l'Univers était de l'ordre de 100 GeV. Au-dessus de cette énergie, les bosons W et Z responsables de l'interaction faible et les photons qui transmettent la force électromagnétique sont indiscernables – ils ont pour équivalents les porteurs de l'interaction électrofaible. Au-dessous de cette énergie, les bosons W et Z ont une masse, contrairement aux photons. Ils auraient acquis leur masse lorsque la symétrie a été brisée.

Ce processus expliquerait pourquoi les bosons de jauge ont des masses différentes – certains sont lourds, d'autres légers, d'autres encore ont une masse nulle. Sans cette brisure spontanée de symétrie, aucun n'aurait de masse. Le responsable de cette masse est le champ de Higgs, d'après le nom du physicien Peter Higgs qui a travaillé sur ce sujet dans les années 1960.




**Les quatre interactions fondamentales se seraient dissociées en raison de la brisure spontanée de symétrie survenue dans l'Univers primordial.**

# l'idée clé
## La fin de l'ordre

# 32 Le boson de Higgs

**Pourquoi certaines particules sont-elles plus massives que d'autres ? Peter Higgs postula l'existence du boson qui porte son nom en 1964 pour conférer leur inertie aux particules. Il attire les porteurs de force, tels les bosons W et Z, et rompt la symétrie entre les forces faible et électromagnétique.**

Dans les années 1960, on savait que les quatre forces fondamentales sont portées par des particules différentes. Le photon est le médiateur des interactions électromagnétiques, les gluons lient les quarks par le biais de l'interaction nucléaire forte, et les bosons W et Z portent les forces nucléaires faibles. Mais contrairement au photon dépourvu de masse, les bosons W et Z sont massifs, pesant une centaine de fois plus qu'un proton. Pourquoi toutes les particules n'ont-elles pas la même masse ?

Les physiciens se sont penchés sur leur symétrie. Le théoricien américain né au Japon Yoichiro Nambu et le physicien britannique Jeffrey Goldstone ont supposé que la symétrie était spontanément brisée par quelque mécanisme, ce qui libérait des bosons au cours de la séparation des forces. Dans leurs modèles, ces bosons étaient dépourvus de masse, ce qui impliquait que tous les porteurs de forces devaient ressembler à des photons.

Mais cela n'avait pas de sens ! Les physiciens rassemblèrent tous les éléments : des porteurs de force massifs sont nécessaires aux forces s'exerçant à courte portée ; des bosons sans masse, tels les photons, se déplacent sur de longues distances ; et les forces nucléaires sont localisées. On pourrait expliquer la faible portée des forces faible et forte si leurs porteurs étaient massifs.

## chronologie

**1687**
Newton publie les lois du mouvement

**1961**
Goldstone suggère que les bosons ont été produits par une brisure de symétrie

**1964**
Higgs et deux autres équipes proposent un mécanisme qui confère une masse

Persuadés qu'il était vain de créer des porteurs de force à partir de rien, comme Nambu et Goldstone l'avaient fait, le physicien Steven Weinberg s'inspira d'une phrase du *Roi Lear* de Shakespeare : « De rien ne te viendra rien ».

### « La particule-dieu »

Le physicien lauréat du prix Nobel Leon Lederman nomma le boson de Higgs « la particule-dieu » dans son livre éponyme, appellation réprouvée par les physiciens.

S'inspirant du comportement des électrons appariés dans les supraconducteurs, le physicien de la matière condensée, Phil Anderson, émit l'hypothèse que les bosons sans masse de Nambu et Goldstone devaient effectivement se neutraliser, de sorte qu'il ne devait rester que ceux qui avaient une masse.

En 1964, trois équipes publièrent plusieurs articles développant cette idée : les physiciens belges Robert Brout et François Englert, travaillant à l'université Cornell, le physicien britannique Peter Higgs, de l'université d'Édimbourg, ainsi que Gerald Guralnik, Carl Hagen et Tom Kibble, de l'Imperial College de Londres. Ils proposèrent le mécanisme de Higgs.

Les trois groupes poursuivaient les mêmes calculs quand Higgs eut l'idée de décrire le mécanisme à l'aide d'un boson – le boson de Higgs.

**Le boson de Higgs** Higgs imagina que les porteurs de forces W et Z étaient ralentis quand ils traversaient un champ de force. Ce champ, aujourd'hui dit de Higgs, est dû aux bosons de Higgs. Par analogie, une perle qui tombe dans un verre d'eau s'y enfonce plus lentement qu'elle ne tombe dans l'air. C'est comme si elle était freinée par l'eau. La perle est même encore plus lente dans un verre plein de sirop. Le champ de Higgs agit un peu de la même façon, comme de la mélasse.

On peut donner une autre image : imaginez une personne célèbre dans une soirée. Dès qu'elle franchit la porte d'entrée, elle est assaillie, ce qui freine sa progression dans la salle. De même, les forces de Higgs agissent davantage sur les bosons W et Z que sur les photons, de sorte que ces particules paraissent plus lourdes.

**2009**
Inauguration du LHC, le grand collisionneur de hadrons

**2012**
Découverte de ce qui semble être le boson de Higgs

### Peter Higgs (1929-)

Né à Newcastle, en Angleterre, Peter Higgs eut une enfance mouvementée. Il déménagea plusieurs fois, car son père était ingénieur du son à la BBC et aussi à cause de la guerre. Il n'alla pas à l'école et reçut un enseignement à domicile. Ultérieurement, il entra au lycée de Bristol, où Dirac avait lui-même été élève. Higgs étudia la physique au King's College de Londres et devint maître de conférences à l'université d'Édimbourg en 1960. Il eut l'idée d'un boson conférant leur masse aux particules alors qu'il se promenait en 1964 dans les montagnes écossaises.

**Preuve irréfutable** Des indices du boson de Higgs furent détectés en 2011 mais ne furent confirmés – avec tambour et trompettes – qu'en 2012. Il fallut des dizaines d'années pour construire une machine capable de détecter ce boson en raison du niveau d'énergies auxquelles il était supposé exister (plus de 100 GeV). En 2009, le LHC, grand collisionneur de hadrons du CERN qui coûta plusieurs milliards d'euros, devenait opérationnel.

Le CERN, Conseil européen pour la recherche nucléaire, est un immense accélérateur de particules situé près de Genève. Enterré à quelque 100 mètres sous la frontière franco-suisse, ce tunnel en forme d'anneau mesure 27 kilomètres de longueur. Les faisceaux de particules y sont accélérés par des aimants supraconducteurs gigantesques.

**« Le grand collisionneur de hadrons replonge les physiciens des particules dans le Jurassique… Certaines des particules qu'ils fabriquent ou sont sur le point de fabriquer ont disparu il y a environ 14 milliards d'années. »**

**Phillip Schewe, 2010**

Deux faisceaux de protons se dirigeant en sens opposés se heurtent de front. Les énergies colossales produites lors des chocs permettent la libération de multiples particules massives éphémères, qui sont enregistrées par des détecteurs. Le boson de Higgs étant massif, il ne peut apparaître que pour des énergies extrêmes et, selon le principe d'incertitude d'Heisenberg, que durant de brefs instants. De surcroît, on doit repérer cette particule au milieu de millions d'autres.

Le 4 juillet 2012, deux équipes du CERN ont dit avoir détecté une nouvelle particule dont l'énergie correspondait à celle que l'on attendait pour le boson de Higgs, d'après le modèle standard (126 GeV). Son identité fut confirmée en mars 2013. Non seulement cette découverte est une nouvelle confirmation du modèle standard, mais elle ouvre des pistes pour continuer à explorer la physique des particules.

D'abord, comment le boson de Higgs confère-t-il leur masse aux particules ? De la masse du neutrino à celle du quark *top*, il existe quatorze ordres de grandeur que le modèle standard devra expliquer. Et comment le boson de Higgs acquiert-il sa propre masse ? À suivre !

## l'idée clé

## Patauger dans la mélasse

# 33 La supersymétrie

**Le modèle standard n'est pas élégant. Face à cette constatation, les physiciens cherchent une théorie des particules et des forces plus fondamentale. La supersymétrie postule que chaque particule a un partenaire supersymétrique, une copie parfaite, à l'exception du spin. Comme pour l'antimatière, l'introduction de ces nouvelles particules facilite la résolution des équations quantiques des champs et les rend plus flexibles.**

Les physiciens du modèle standard ont fait un travail remarquable en comparant les propriétés de la soixantaine de particules élémentaires connues. Comme dans une grande boîte de chocolat, les particules peuvent être regroupées en couches selon leurs propriétés. Pourtant, ce modèle reste très compliqué et les physiciens voudraient le simplifier.

De nombreuses questions restent ouvertes. Par exemple, pourquoi les particules présentent-elles des propriétés souvent regroupées par trois ? Pourquoi existe-t-il trois générations de leptons – électrons, muons et leptons tau, et les neutrinos correspondants ? Deux générations, c'était déjà trop pour le lauréat du prix Nobel Isaac Rabi, qui s'exclama à propos de sa découverte : « Qui a commandé le muon ? » On devra également expliquer pourquoi il y a trois générations de quarks.

Ou encore, pourquoi les particules ont-elles des masses si différentes ? De l'électron au quark *top,* la masse des fermions varie de six ordres de grandeur ($10^6$). La récente découverte des oscillations des neutrinos – montrant qu'ils ont une masse minuscule – a même repoussé cette valeur à 13, voire 14 ordres de grandeur. Parmi toutes ces possibilités, comment se fait le « choix » de la masse ?

Par ailleurs, il est impossible de prévoir par le modèle standard l'intensité des quatre forces fondamentales, liée à la masse des porteurs de particules.

## chronologie

**1927**
Dirac prédit l'existence de l'antimatière

**1961**
Murray Gell-Mann publie la théorie de la « voie octuple »

Pourquoi l'interaction nucléaire forte est-elle forte, et pourquoi la force faible est-elle faible ? Il y a aussi les questions liées au boson de Higgs. Son existence a été envisagée pour que la symétrie dans les interactions électrofaibles puisse être brisée. Pour l'instant, nous ne connaissons qu'un seul boson de Higgs, mais d'autres particules du même type seront-elles un jour découvertes ? Même si l'ensemble présente des régularités, le cadre global semble artificiel.

**Au-delà du modèle standard** Le modèle standard présentant de nombreuses imperfections, les physiciens pensent découvrir un jour qu'il n'est qu'une petite partie d'une théorie globale plus élégante. Ils retournent aux définitions et concepts fondamentaux, tels que la symétrie, pour imaginer quelles seraient les propriétés d'une telle théorie.

Quand ils recherchent ces bases, les physiciens regardent souvent à des échelles encore plus petites. La physique des gaz parfaits – la pression et la thermodynamique – nécessite de comprendre les mécanismes moléculaires, et les théories des atomes imposent de comprendre les électrons et les noyaux.

Prenons l'électron. Les physiciens utilisent les équations de l'électromagnétisme pour expliquer ses propriétés à une certaine distance, mais plus on s'en approche, plus l'influence de l'électron sur lui-même augmente. Comme le montre la structure fine du spectre de l'hydrogène, la charge, la taille et la forme de l'électron sont des paramètres importants.

Comme l'a montré le processus d'élaboration de l'électrodynamique quantique (QED), il fallut utiliser une approche quantique et considérer la fonction d'onde de l'électron, y compris les effets de la relativité restreinte, pour que l'on puisse décrire toutes ses propriétés. Paul Dirac consigna tout cela en 1927, mais cette nouvelle approche eut une conséquence notable : l'existence de l'antimatière. Le nombre de particules dans l'Univers doubla et il fallut envisager beaucoup de nouvelles interactions.

La fonction d'onde de l'électron n'a de sens que s'il existe aussi des positrons, dont les propriétés quantiques sont l'autre face de celles des électrons. Pendant une durée fixée par le principe d'incertitude d'Heisenberg, les électrons et les positrons peuvent coexister dans le vide spatial, puis ils s'annihilent. Ces interactions virtuelles apportent une réponse à certaines questions, par exemple

**1981**
La version supersymétrique du modèle standard est proposée

**2009**
Inauguration du LHC, le grand collisionneur de hadrons

**2012**
Détection du boson de Higgs

celle de la taille de l'électron, qui autrement font apparaître des incohérences dans la théorie.

Pour aller au-delà du modèle standard, nous devons considérer les mécanismes à des échelles plus petites et à des énergies plus élevées que les plus extrêmes connues aujourd'hui, celle du boson de Higgs (plus de 100 GeV). Comme pour l'électron, les physiciens se demandent à quoi ressemble vraiment un boson de Higgs et comment sa propre forme et son propre champ agissent sur son comportement.

> **« Bien que les symétries nous soient cachées, nous savons qu'elles sont présentes dans la nature, gouvernant tout. C'est l'idée la plus stimulante que je connaisse : la nature est bien plus simple qu'il n'y paraît. »**
>
> **Steven Weinberg**

**Les particules jumelles** À nouveau, comme pour l'électron et le positron, il fallut, pour résoudre ce problème, doubler le nombre de particules possibles – pour que chaque particule ait un partenaire « supersymétrique » (portant le même nom, mais précédé du préfixe « s »). Le partenaire supersymétrique d'un électron est nommé selectron, ceux des quarks sont des squarks. Le photon et les bosons X et Z ont des équivalents nommés photino, wino et zino.

La supersymétrie implique une relation de symétrie entre les bosons et les fermions. Ainsi, chaque boson – une particule ayant un spin entier – a un partenaire fermion ou « superpartenaire » dont le spin diffère d'une demi-unité. À l'exception du spin, tous les nombres quantiques et la masse de deux superpartenaires sont identiques.

Les premières tentatives datent des années 1970, mais la première version supersymétrique du modèle standard a été proposée en 1981 par Howard Georgi et Savas Dimopoulos. Il prévoit que l'énergie des bosons est comprise entre 100 et 1 000 GeV, soit juste supérieure ou similaire à celle du boson de Higgs. Comme le positron, l'existence de particules supersymétriques fait disparaître certaines irrégularités concernant les particules à faible rayon d'action.

Aujourd'hui, le LHC du CERN permet d'atteindre des énergies correspondant à la partie inférieure de ce spectre, mais aucune particule supersymétrique n'a encore été mise en évidence. Il faudra sans doute attendre que l'énergie du collisionneur soit augmentée, comme cela est prévu dans quelques années.

## Superpartenaires noirs

La supersymétrie reste spéculative, mais elle présente malgré tout certains aspects intéressants. Et si les superpartenaires qui n'ont pas encore été détectés constituaient la matière noire fantomatique qui hante l'Univers ? La matière noire représente la plupart de la masse de l'Univers, mais elle est invisible et n'est trahie que par ses effets gravitationnels.

Si les superpartenaires restent hors de portée, les physiciens pourraient supposer qu'ils ont des masses supérieures à celles de leurs partenaires du modèle standard. Dans ce cas, la supersymétrie serait brisée, ce qui impliquerait un nouveau niveau de particules qui resteraient à explorer.

La supersymétrie pourrait aider les physiciens à unifier les interactions faible et forte et l'électromagnétisme, et – pourquoi pas ? – la gravitation. Les approches complémentaires de la théorie des cordes et de la gravitation quantique devraient être intégrées au modèle, surtout si l'on trouve des indices de particules supersymétriques.

# l'idée clé
# Superpartenaires

# 34 La gravitation quantique

**La théorie unifiant les quatre forces fondamentales continue à échapper aux physiciens qui cherchent à rendre compatibles la physique quantique et la relativité générale. La théorie de la gravitation quantique est encore hors de portée, mais indique que l'espace serait constitué de minuscules boucles imbriquées.**

Quand Einstein a présenté sa théorie de la relativité générale en 1915, il reconnut qu'il faudrait la rendre compatible avec la théorie quantique de l'atome qui venait d'être proposée. Tout comme les planètes sont maintenues à leur place autour du Soleil par la gravitation, les électrons doivent subir des forces gravitationnelles et électromagnétiques qui les confinent dans leurs « coquilles ». Einstein a travaillé presque toute sa vie pour développer une théorie quantique de la gravitation. Il n'y est pas parvenu, pas plus qu'aucun physicien depuis.

Après Einstein, Leon Rosenfeld, disciple et ami de Niels Bohr, s'attaqua au problème dans les années 1930. Il se trouva très vite confronté à des obstacles fondamentaux. Le premier est que, contrairement à la physique quantique, la relativité générale n'est pas liée à un référentiel absolu.

La relativité s'applique à tous les objets massifs, tels que les planètes, les étoiles, les galaxies, en un mot à toute la matière dans l'Univers. Les équations qui la décrivent ne distinguent pas l'espace et le temps, mais les considèrent comme les quatre dimensions d'un même espace-temps continu. Les masses s'y déplacent en le déformant en fonction de leur masse, cependant il n'y existe aucun système absolu de coordonnées. La théorie de la relativité générale

## chronologie

**1915**
Einstein publie la théorie de la relativité générale

**1957**
Misner propose deux façons de procéder pour progresser vers la gravitation quantique

**1966**
DeWitt publie la fonction d'onde de l'Univers

explique les mouvements relatifs, ceux d'un objet qui se déplace par rapport à un autre dans un espace-temps courbe.

Au contraire, la mécanique quantique s'intéresse à l'endroit où se trouve une particule à un moment donné. Les fonctions d'onde dépendent de l'environnement proche et évoluent avec lui ; ainsi, la fonction d'onde de chaque électron dans un atome est spécifique. Dans l'approche quantique, l'espace n'est ni vide ni uniforme ; c'est une mer de particules quantiques virtuelles, qui apparaissent et disparaissent.

Essayer de concilier la mécanique des matrices d'Heisenberg et l'équation d'onde de Schrödinger représente une difficulté de principe, puisque l'une est discrète, tandis que l'autre est continue. Mais réconcilier la mécanique quantique et la relativité générale reste une tâche autrement plus ardue !

La rupture est particulièrement flagrante sur trois points. La relativité générale et la mécanique quantique deviennent inapplicables à proximité des singularités, tels les trous noirs. Ensuite, en raison du principe d'incertitude d'Heisenberg, on ne peut pas connaître avec précision la position d'une particule et sa vitesse ; par conséquent, il est impossible de savoir à quelle force de gravitation elle est soumise. Enfin, le temps n'a pas le même sens en mécanique quantique et en relativité générale.

**Mousse quantique** Les travaux sur les théories quantiques de la gravitation ont redémarré dans les années 1950. Le physicien de l'université de Princeton John Wheeler, et son étudiant Charles Misner, ont appliqué le principe d'incertitude d'Heisenberg pour décrire l'espace-temps comme une « mousse » quantique. Ils envisagèrent qu'aux échelles les plus petites, l'espace-temps subit des distorsions et se transforme en un enchevêtrement de tunnels, de cordes et de protubérances. En 1957, Misner comprit qu'il existait deux façons pour progresser. Ou bien la relativité générale pourrait être réécrite sous forme de calculs plus proches de ceux de la mécanique quantique, et la théorie pourrait alors être quantifiée. Ou bien les théories quantiques des champs devraient être élargies pour inclure la gravitation ; un nouveau porteur de force, le graviton, deviendrait nécessaire pour la gravitation.

En 1966, Bryce DeWitt, qui avait été un étudiant de Julian Schwinger, choisit une nouvelle approche après une discussion avec John Wheeler. Connaissant

### Bryce DeWitt (1923-2004)

Né en Californie, Bryce DeWitt étudia la physique avec Julian Schwinger à l'université d'Harvard. Durant la Seconde Guerre mondiale, il fut aviateur dans la Marine et après avoir occupé plusieurs postes, il entra à l'université du Texas, à Austin, où il dirigea un centre d'étude de la relativité générale. Avec John Wheeler, DeWitt formula l'équation de Wheeler-DeWitt pour la fonction d'onde de l'Univers et travailla sur l'interprétation de la physique quantique proposée par Hugh Everett dans sa théorie des mondes multiples. Passionné de montagne, DeWitt inaugura une école d'été renommée aux Houches, en Haute-Savoie. Toute sa vie, il travailla étroitement avec sa femme, la mathématicienne Cécile DeWitt-Morette.

bien la cosmologie et informé de la découverte du rayonnement cosmique de micro-ondes emplissant le cosmos, DeWitt publia une fonction d'onde s'appliquant à l'Univers ; elle est aujourd'hui connue sous le nom d'équation de Wheeler-DeWitt. Il prit les équations utilisées pour l'expansion de l'Univers après le Big Bang et considéra le cosmos comme une mer de particules.

Un résultat surprenant dans la formulation de DeWitt était que le temps n'y était pas nécessaire. Les trois coordonnées d'espace suffisaient, le temps n'étant qu'une manifestation des états de l'Univers qui se succèdent. Aussi bien que Schrödinger avait eu des difficultés à comprendre la signification de sa fonction d'onde, DeWitt ne parvint pas à expliquer à quoi correspondait sa fonction d'onde universelle dans la vraie vie. L'interprétation de Copenhague avait relié le monde quantique et le monde réel, mais quand il s'est agi de l'Univers dans son ensemble, on ne trouva rien à quoi le comparer. Tout « observateur » externe aurait immédiatement perturbé la fonction d'onde cosmique.

D'autres physiciens s'attaquèrent au problème, notamment Stephen Hawking, qui proposa une description de l'Univers non borné et sans point de départ. Alors qu'il assistait à une conférence au Vatican en 1981, où le pape demanda aux cosmologistes de se contenter d'étudier l'Univers après sa création, Hawking ne voulut apparemment pas contrarier le Saint-père, puisqu'il n'avait pas besoin de créateur dans sa théorie !

Une nouvelle façon de formuler les équations de la relativité vit le jour en 1986, lors d'un séminaire sur la gravitation quantique à Santa Barbara, en Californie. Lee Smolin, Theodore Jacobson, et plus tard Carlo Rovelli trouvèrent des solutions à des équations fondées sur des « boucles quantiques » dans le champ de gravitation.

**Les boucles quantiques** Les boucles étaient des quanta d'espace. Elles permettaient de se débarrasser des localisations précises, car rien ne changeait quand les boucles étaient déplacées. L'espace est un enchevêtrement de boucles reliées les unes aux autres.

Le concept de boucles fut proposé sous d'autres formes au cours du développement de la chromodynamique quantique et dans les travaux du mathématicien et cosmologiste Roger Penrose sur les réseaux d'interactions des particules. Dans la gravitation quantique à boucles, l'espace est constitué de quanta, matérialisés aux intersections (ou nœuds) des boucles. Ce sont les composants les plus petits de l'Univers, dont la taille ou l'énergie correspondent aux dimensions de Planck.

La gravitation quantique à boucles est un nouveau pas vers une théorie globale. Mais le chemin à parcourir sera long, le graviton, par exemple, n'y étant pas mentionné. D'autres voies de recherche sont explorées, par exemple la théorie des cordes.

En raison des énergies gigantesques nécessaires pour découvrir le graviton, ou toute particule qui aurait existé au moment où la gravitation s'est séparée des autres forces, les physiciens ne peuvent que rêver qu'un jour ils étudieront la gravitation quantique dans des collisionneurs. Aujourd'hui, aucun indice expérimental ne vient conforter l'un ou l'autre de ces modèles.

En attendant, les objets astronomiques, notamment les trous noirs, représentent la meilleure façon de l'étudier. Certains trous noirs émettent des jets de particules – qui seraient des paires électrons-positrons expulsées quand de la matière est absorbée. Autour d'eux, la gravitation est très intense, et l'on pourrait y rechercher des effets étranges qui violent la théorie de la relativité.

Enfin, l'étude du rayonnement du fond cosmique de micro-ondes reste un enjeu majeur : ses taches chaudes et froides ont été produites par des variations quantiques dans l'Univers primordial.

## l'idée clé

## Quanta d'espace

# 35 Le rayonnement de Hawking

**Les trous noirs sont des puits dans l'espace-temps si profonds que même la lumière ne peut s'en échapper. Sauf quand l'incertitude quantique le permet. Stephen Hawking a émis l'hypothèse que les trous noirs peuvent émettre des particules – et de l'information –, ce qui aboutit parfois à leur effondrement.**

Dans les années 1970, les théories de la gravitation quantique fleurissaient. Bryce DeWitt parlait de sa fonction d'onde de l'Univers comme de « l'équation damnée », car personne n'en comprenait le sens. Les spécialistes de la relativité générale se tournèrent alors vers les trous noirs. L'existence des trous noirs fut postulée au milieu des années 1960. Ils devaient être la source d'énergie des quasars qui venaient tout juste d'être découverts, des galaxies dont le cœur était si brillant qu'elles éclipsaient toutes leurs étoiles.

**« Non seulement Dieu joue aux dés, mais en plus il les lance parfois là où l'on ne peut les voir. »**

**Stephen Hawking, 1977**

L'idée de trou noir date du XVIII^e^ siècle et on la doit au géologue John Mitchell et au mathématicien Pierre-Simon de Laplace. Plus tard, Einstein proposa ses théories de la relativité et Karl Schwarzschild chercha à quoi pouvait ressembler un trou noir : un puits dans l'espace-temps. Dans la théorie de la relativité générale, l'espace et le temps sont liés et se comportent comme un immense film de plastique. La gravitation déforme le film d'autant plus que l'objet est massif. Une planète massive reste confinée dans un creux de l'espace-temps et elle attire les corps qui tombent dans le puits, déforme leur trajectoire ou les met en orbite.

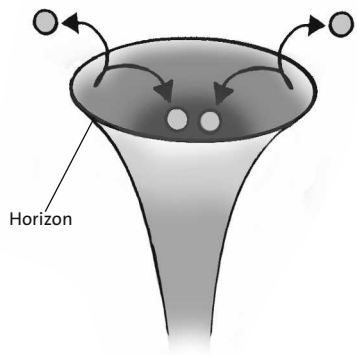
## chronologie

**1784**
John Michell envisage l'existence d'étoiles noires

**Années 1930**
L'existence d'étoiles gelées est prédite

**1965**
Découverte des quasars

**L'horizon du trou noir** Les trous noirs sont ainsi nommés, car la lumière elle-même ne peut échapper à leur attraction. Quand vous lancez une balle en l'air, elle s'élève à une certaine hauteur, puis retombe par terre. Plus vous la lancez fort, plus elle monte. Si vous la lanciez suffisamment fort, elle pourrait échapper au champ de gravitation de la Terre et filer dans l'espace. Pour ce faire, la vitesse nécessaire, ou vitesse de libération, est égale à 11 kilomètres par seconde.




**Un des deux membres d'une paire particule-antiparticule se formant près de l'horizon d'un trou noir peut échapper à son attraction.**

Une fusée doit atteindre cette vitesse pour échapper à l'attraction de la Terre. La vitesse de libération est inférieure sur la Lune qui est moins volumineuse : 2,4 kilomètres par seconde suffisent. Au contraire, sur une planète plus massive, la vitesse de libération serait supérieure. Si elle était suffisamment massive, la vitesse de libération pourrait atteindre, voire dépasser la vitesse de la lumière.

Quand un objet passe à distance d'un trou noir, sa trajectoire peut être déviée, sans qu'il soit nécessairement happé. Mais s'il passe à proximité, il sera aspiré. Ce sera aussi le cas pour un photon. Ces événements se produisent dans une zone nommée « horizon » : tout ce qui tombe dans cette zone est précipité dans le trou noir.

**Des étoiles gelées** Si vous regardiez de la matière tomber dans un trou noir, vous auriez l'impression que le processus s'arrête, car, à proximité, le temps ralentit. Les faisceaux de lumière qui passent près d'un trou noir mettent plus de temps à parcourir l'espace-temps courbé et à nous atteindre.

**« Les trous noirs sont les objets macroscopiques les plus parfaits de l'Univers : les seuls éléments ayant servi à leur construction sont nos concepts d'espace et de temps. »**

**Subrahmanyan Chandrasekhar, 1983**

Quand la matière atteint l'horizon d'un trou noir, le temps semble s'arrêter pour un observateur éloigné. La matière se fige à l'endroit même où elle va être

**1967**
Wheeler nomme « trous noirs » les étoiles gelées

**1974**
Hawking émet l'hypothèse que les trous noirs émettent un rayonnement

**1997**
Preskill parie que l'information n'est pas perdue dans les trous noirs

**2004**
Hawking admet que Preskill a raison

engloutie. Dans les années 1930, Einstein et Schwarzschild ont prévu qu'il existait des « étoiles gelées », sur le point de s'effondrer. Le physicien John Wheeler les a nommées « trous noirs » en 1967.

L'effondrement d'étoiles en trous noirs a été décrit par l'astrophysicien américain Subrahmanyan Chandrasekhar. Il montra que les étoiles, tel le Soleil, ne sont pas assez massives pour s'effondrer sous leur propre poids quand les mécanismes de fusion de leur cœur s'arrêtent. En revanche, celles dont la masse dépasse 1,4 fois celle du Soleil peuvent s'effondrer. Mais alors, une pression dite de dégénérescence, résultant du principe d'exclusion de Pauli, s'oppose à l'effondrement, et ces étoiles deviennent des naines blanches et des étoiles à neutrons. Seules les étoiles de plus de trois masses solaires sont susceptibles de produire des trous noirs.

### Stephen Hawking (1942-)

Né durant la Seconde Guerre mondiale, Stephen Hawking a vécu à Oxford et à St Albans, en Angleterre. Il a fait des études de physique à l'université d'Oxford, puis est allé faire de la cosmologie à Cambridge avec Dennis Sciama. Il y fut professeur de mathématiques de 1979 à 2009. À l'âge de 21 ans, il apprit qu'il était atteint de sclérose amyotrophique latérale, une maladie neurodégénérative des neurones moteurs. Il déjoua les pronostics de ses médecins et on connaît bien aujourd'hui cet homme en fauteuil roulant et à la voix de synthèse, dont les travaux scientifiques sont renommés. Il a notamment émis l'idée que les trous noirs émettent un rayonnement et a proposé sa théorie d'un Univers non borné.

Il fallut attendre les années 1960 pour que l'existence des trous noirs soit confirmée. Bien qu'ils soient… noirs, on sait les détecter. Les champs de gravitation intenses des trous noirs attirent, par exemple, les étoiles. Du gaz peut également être attiré, chauffé et émettre une lueur quand il est grignoté.

Un trou noir géant existe au centre de la Voie lactée. Sa masse qui équivaut à un million de soleils est contenue dans une région d'environ 10 millions de kilomètres (30 secondes-lumière) de rayon. Les astronomes ont suivi les étoiles proches de ce trou noir et les ont vues changer brusquement de trajectoire quand elles s'en approchaient. Tout comme les comètes ont des orbites allongées et sont déviées quand elles passent à proximité du Soleil, les étoiles présentes au cœur de la Voie lactée se déplacent de façon étrange autour du trou noir.

Les trous noirs sont les moteurs des quasars. Le gaz tombant dans le trou noir est surchauffé et brille intensément. Les trous noirs peuvent aussi être identifiés par les rayons X émis par le gaz chaud qui tourbillonne autour d'eux.

### Évaporation de trous noirs

Même quand ils ne sont pas enveloppés de gaz, les trous noirs ne sont pas totalement noirs. En raison des effets quantiques qui s'y produisent, il n'est pas exclu que du rayonnement s'en échappe, comme Stephen Hawking l'a prévu dans les années 1970.

Des particules et des antiparticules sont sans cesse créées et détruites dans le vide spatial. Quand elles apparaissent près de l'horizon d'un trou noir, il arrive que seul l'un des éléments d'une paire particule-antiparticule tombe dans le trou noir. Les particules qui s'échappent constituent le rayonnement d'Hawking. Ainsi, les trous noirs perdent de l'énergie avec ce rayonnement, et « maigrissent » lentement. Ils pourraient disparaître dans quelques milliards d'années.

#### Spaghettification

Un corps tombant dans un trou noir subirait un étirement qualifié de « spaghettification ». Les bords d'un trou noir sont si escarpés que les gradients de gravitation y sont énormes. Si vous y mettiez les pieds, ils seraient attirés plus que votre tête, et votre corps serait étiré. À cela s'ajoutent des mouvements de rotation, de sorte que vous ressembleriez à du chewing-gum étiré comme des spaghettis.

Et ce n'est pas tout. Quand un objet est englouti par un trou noir, que devient toute l'information qu'il contenait ? Est-elle perdue à jamais ou certaines de ses propriétés quantiques sont-elles sauvegardées et véhiculées par le rayonnement d'Hawking ? Si l'une des particules d'une paire tombe dans le trou noir, la « survivante » le « sait-elle » ?

Hawking a d'abord cru que toute l'information était perdue. Mais d'autres physiciens soutenaient le contraire. Un célèbre pari fut proposé. En 1997, John Preskill paria avec Hawking et Kip Thorne que l'information n'était pas perdue dans les trous noirs.

En 2004, Hawking publia un article où il prétendait avoir résolu le paradoxe. Il montrait que des effets quantiques à l'horizon du trou noir permettaient à de l'information de s'échapper. Il envoya à Preskill une encyclopédie « d'où l'information peut être récupérée à volonté ». Mais Thorne ne fut pas convaincu et, pour lui, le pari est toujours ouvert.

## l'idée clé

## Des trous pas si noirs

# 36 La cosmologie quantique

**À l'origine, l'Univers était si compact et son énergie si importante que des effets quantiques ont laissé leur marque sur ses propriétés à grande échelle. La matière noire et l'énergie sombre, aussi mystérieuses l'une que l'autre, sont peut-être dues à des particules exotiques et à des fluctuations quantiques dans le vide spatial. L'inflation cosmique aurait aussi une origine quantique.**

Il y a quelque 14 milliards d'années, l'Univers aurait été si petit et si dense qu'il aurait tenu en un point. Le moment de son explosion fut nommé Big Bang – initialement par dérision – par l'astronome britannique Fred Hoyle en 1949.

La température de l'Univers au moment du Big Bang était si élevée que les atomes étaient instables et que seules les particules les composant existaient dans une « soupe » quantique. Une minute plus tard, les quarks se sont assemblés pour former les protons et les neutrons. En trois minutes, les protons et les neutrons se sont combinés pour produire des noyaux d'hydrogène et d'hélium, ainsi que de deutérium (l'hydrogène lourd), de lithium et de béryllium à l'état de traces. Les étoiles ont fourni ultérieurement les éléments plus lourds.

**Un fond de micro-ondes** Un autre élément est venu étayer l'idée du Big Bang. Il s'agit d'un faible écho de cette boule de feu, le fond diffus cosmologique ou fond cosmique de micro-ondes, découvert en 1965 par Arno Penzias et Robert Wilson. Ils travaillaient sur un récepteur radio dans les laboratoires Bell, dans le New Jersey, quand ils ont détecté une faible source de micro-ondes venant de l'ensemble du ciel et dont ils ne comprenaient pas l'origine. Ces photons provenaient de l'Univers primordial.

## chronologie

**1915**
Einstein publie la théorie de la relativité générale

**1929**
Edwin Hubble montre que l'Univers est en expansion

**1949**
Hoyle propose le terme de Big Bang

Ce faible reflet micro-ondes du Big Bang, prédit en 1948 par Gamov, Alpher et Robert Hermann, provenait de l'époque où se formèrent les premiers atomes, quelque 400 000 ans après la boule de feu. Au début, l'Univers était empli de particules chargées, les protons et les électrons se déplaçaient librement. En diffusant les photons, ce plasma créa un brouillard impénétrable. Quand les atomes se formèrent, le brouillard se dissipa et l'Univers devint transparent. Depuis lors, la lumière peut traverser librement l'Univers. Bien que le brouillard emplissant l'Univers jeune ait été très chaud (environ 3 000 kelvins), l'expansion de l'Univers a décalé vers le rouge la lueur émise, de sorte que nous la voyons aujourd'hui à moins de 3 kelvins (trois degrés au-dessus du zéro absolu).

Dans les années 1990, le satellite COBE (*COsmic Background Explorer*) de la NASA a cartographié les taches chaudes et froides dans le fond de micro-ondes, dont la température diffère d'une partie sur 100 000 par rapport à la température moyenne (3 kelvins). Cette uniformité est surprenante, car, dans l'Univers très jeune, les régions distantes ne pouvaient pas communiquer même à la vitesse de la lumière. Il est donc étonnant qu'elles aient pourtant quasiment la même température. Ces petites variations de température sont les empreintes fossiles des fluctuations quantiques dans l'Univers primordial.

**« Rien n'est jamais gratuit, pas même un repas. Pourtant, l'Univers est le repas gratuit par excellence. »**
**Alan Guth**

**Connexions profondes** Trois autres propriétés de l'Univers soulignent les connexions qui se sont forgées tout au début. D'abord, la lumière se déplace en ligne droite à travers l'espace – sinon les étoiles éloignées et les galaxies seraient déformées.

Par ailleurs, l'Univers est à peu près le même dans toutes les directions, ce qui est surprenant. L'Univers n'existe que depuis 14 milliards d'années, et pourtant, ses dimensions – son « horizon » – sont supérieures à 14 milliards d'années-lumière. Cela signifie que la lumière n'a pas eu le temps de le traverser de part en part. Comment l'un des côtés de l'Univers « sait »-il à quoi ressemble l'autre côté ?

**1965**
Penzias et Wilson détectent le fond cosmique de micro-ondes

**1981**
Guth propose l'idée d'inflation cosmique

**1992**
COBE cartographie les anisotropies micro-ondes

**1998**
Les supernovæ révèlent l'énergie sombre

Enfin, les galaxies sont réparties de façon uniforme dans le ciel. Cela aurait pu ne pas se produire. Les galaxies se sont formées parce qu'à certains endroits le gaz laissé par le Big Bang était juste un peu plus dense qu'ailleurs. Ces taches ont commencé à s'effondrer en raison de la gravitation, donnant naissance à des étoiles. Les germes denses des galaxies résultaient d'effets quantiques, de minuscules variations de l'énergie des particules emplissant l'Univers primordial bouillant. Mais ils auraient pu « pousser » pour donner des amas de grandes galaxies, et non des galaxies dispersées comme nous les observons aujourd'hui.

On peut résoudre ces trois problèmes – la propagation en ligne droite, l'horizon et la répartition quasi uniforme – si l'Univers primordial est resté confiné à l'intérieur de son horizon. Alors tous ses points ont été en contact à un moment donné, ce qui a imposé ses propriétés ultérieures. Si cette hypothèse est correcte, l'Univers a dû, quelque temps après, enfler et croître rapidement à l'intérieur de son horizon, donnant le cosmos étendu que nous voyons aujourd'hui. Cette expansion rapide, « l'inflation », a été envisagée dès 1981 par le physicien américain Alan Guth. Les petites fluctuations de densité, imprimées très tôt par les fluctuations quantiques, ont été étirées et se sont étalées, donnant un Univers lisse à grande échelle.

**La face sombre** Les effets quantiques auraient d'autres conséquences sur l'Univers. Ainsi, 90 % de la matière de l'Univers est sombre. On ne détecte cette matière noire que par ses effets gravitationnels, car elle interagit peu avec les ondes lumineuses ou la matière. Elle serait présente sous forme de halos d'objets massifs compacts (MACHO), c'est-à-dire des étoiles avortées et des planètes gazeuses, ou de particules massives interagissant peu, les WIMP (des particules subatomiques telles que les neutrinos et les particules supersymétriques).

Aujourd'hui, nous savons que seulement 4 % de la matière de l'Univers est constituée de baryons (la matière usuelle constituée de protons et de neutrons). La matière noire exotique, qui n'est pas faite de baryons, représente 23 % de la matière de l'Univers. On ignore de quoi elle est constituée, peut-être de particules telles que les WIMP. Tout le reste est de l'énergie sombre.

Albert Einstein a proposé le concept d'énergie sombre pour compenser la force d'attraction gravitationnelle. Avec la gravitation seulement, tous les objets de l'Univers s'effondreraient en un point. Il faut donc une force qui maintient l'ensemble en équilibre. À l'époque, il ignorait que l'Univers est en expansion, il le croyait statique. Il fut ainsi contraint d'ajouter un terme « d'antigravitation » à ses équations de la relativité générale. Mais il le regretta bien vite. Tout comme la gravitation pouvait faire que tout s'effondre, l'antigravitation pouvait le faire éclater. Einstein imagina que ce terme était inutile,

personne n'ayant mis en évidence une force de répulsion. Il conserva le terme dans ses équations, mais lui attribua une valeur nulle.

> **« Pendant 70 ans, nous avons essayé d'évaluer à quelle vitesse l'Univers ralentissait. Et c'est pour découvrir que l'expansion s'accélère. »**
>
> **Michael Turner, 2001**

Un résultat important fut obtenu dans les années 1990, quand deux groupes montrèrent que des supernovæ lointaines étaient plus pâles qu'elles n'auraient dû l'être. Elles devaient donc être plus éloignées qu'on ne le pensait. L'espace devait s'être étiré. Le terme d'Einstein fut remis en avant et cette énergie négative fut nommée énergie sombre.

**Antigravitation** Nous ne savons pas grand-chose sur l'énergie sombre. C'est une forme d'énergie stockée dans le vide spatial et qui y crée des pressions négatives. Là où la matière abonde – par exemple près des amas de galaxies –, la gravitation la compense ou la surpasse.

Elle est tellement insaisissable qu'il est bien difficile de prévoir comment sa présence influera sur l'évolution de l'Univers à long terme. Progressivement, les galaxies perdront leur cohésion et se disloqueront. L'énergie sombre s'attaquera alors aux étoiles qu'elles contiennent. Quand ces étoiles mourront, l'Univers deviendra noir. Alors une mer d'atomes et de particules subatomiques remplira l'espace. La physique quantique imprimera à nouveau son empreinte.

# l'idée clé
## Connexions primordiales

# 37 La théorie des cordes

**Telle une version moderne de la dualité onde-corpuscule, la théorie des cordes tente de décrire les particules élémentaires comme les harmoniques d'une corde en vibration. L'objectif est de combiner la physique quantique et la relativité, et d'expliquer les quatre forces fondamentales dans un même cadre conceptuel.**

La théorie des cordes est une branche de la physique qui propose une méthode mathématique ambitieuse et originale pour décrire les mécanismes quantiques et gravitationnels en utilisant des ondes sur des cordes multidimensionnelles. Elle apparut dans les années 1920, quand Theodor Kaluza et Oskar Klein utilisèrent des harmoniques, comme en musique, pour décrire certaines propriétés quantiques des particules.

Dans les années 1940, il devint évident que les particules, tels l'électron ou le proton, ne sont pas infiniment petites. Pour expliquer pourquoi un électron a son propre champ magnétique, il faut le considérer comme une boule recouverte de charges qui tourne. Werner Heisenberg se demandait si cela tenait au fait que l'espace et le temps s'effondrent aux échelles microscopiques. Que les particules aient des comportements reproductibles au cours des expériences montre que leur état quantique se maintient, indépendamment de ce qui se passe au cœur de la matière. En décrivant l'atome d'hydrogène au moyen de la mécanique des matrices, Heisenberg relia le comportement d'une particule avant et après une interaction par le biais d'une matrice de coefficients.

Or, la théorie quantique des champs commençait à révéler que les mécanismes ne se produisaient pas en une seule grande étape, mais que plusieurs petites modifications se succédaient. Sauf pour décrire le cas le plus simple, Heisenberg

## chronologie

**Années 1920**
Kaluza et Klein décrivent la gravitation et l'électromagnétisme en utilisant des harmoniques

**Années 1940**
Heisenberg élabore la théorie des matrices

**1964**
Gell-Mann suggère l'existence des quarks

aurait dû produire d'innombrables matrices. Il essaya de restructurer la notation de ses matrices. En vain.

Dans les années 1960, les physiciens s'attaquèrent à la description de l'interaction forte. Murray Gell-Mann travaillait à sa théorie des quarks. D'autres théoriciens s'intéressaient à de nouvelles approches mathématiques.

**« La liberté d'enquêter ne doit jamais être entravée. le dogme n'a pas sa place en science. Le scientifique est libre et doit pouvoir poser toutes les questions possibles, douter de toutes les affirmations, chercher des preuves et corriger les erreurs. »**

**Robert Oppenheimer, 1949**

En 1970, Yoichiro Nambu, Holger Bech Nielsen et Leonard Susskind représentèrent les forces nucléaires comme des cordes en vibration. Toutefois, leur modèle échoua et fut remplacé par la chromodynamique quantique. En 1974, John Schwarz, Joel Scherk et Tamiaki Yoneya appliquèrent la notion de corde à la description des bosons. Ils réussirent à introduire le graviton, ce qui laissa supposer que la théorie des cordes pouvait être utile pour unifier les quatre forces.

**Cordes vibrantes** Les cordes, comme les élastiques, se contractent pour minimiser leur énergie. Elles oscillent sous l'effet de cette tension. La mécanique quantique dicte les « notes » qu'elles émettent, chaque particule ayant ses propres vibrations. Les cordes peuvent être ouvertes (les deux extrémités sont libres) ou fermées (elles forment une boucle).

Les premiers modèles de cordes n'étaient pas convaincants, car ils ne s'appliquaient qu'aux bosons. Puis les théories utilisant le concept de supersymétrie ont vu le jour. Ces théories dites des supercordes s'appliquaient aussi aux fermions. Plusieurs difficultés furent levées entre 1984 et 1986, au cours de ce que l'on nomme la première révolution des supercordes. Comprenant que la théorie des cordes pouvait s'appliquer à toutes les particules connues et aux forces, des centaines de théoriciens prirent le train en marche.

La seconde révolution des supercordes eut lieu dans les années 1990. Edward Witten rassembla toutes les théories des supercordes en une vaste théorie à onze dimensions, nommée théorie-M (le « M » a plusieurs sens selon les théoriciens,

**1970**
Nambu, Nielsen et Susskind présentent les interactions nucléaires comme des cordes

**1974**
Schwarz, Scherk et Yoneya décrivent les bosons en utilisant les cordes

**1984-1986**
Première révolution des supercordes

**1994-1997**
Seconde révolution des supercordes et naissance de la théorie-M

## La théorie-M

La théorie-M est un terme vague qui s'applique à presque toutes les théories des cordes. Une corde décrivant une particule peut être une ligne ou une boucle. Mais si l'on introduit l'axe du temps, alors on obtient un plan ou un cylindre. Ses autres attributs sont développés dans les autres dimensions : la théorie-M repose généralement sur onze dimensions. Quand les particules interagissent, ces plans se rencontrent et créent de nouvelles formes. La théorie-M est l'étude mathématique de ces différentes topologies.

du « m » de membrane à celui de mystère !). D'innombrables articles furent publiés entre 1994 et 1997.

Depuis lors, la théorie des cordes progresse régulièrement à mesure que s'accumulent de nouveaux résultats expérimentaux. Mais la théorie n'est pas encore achevée, certains prétendant même qu'il y a autant de théories de cordes qu'il y a de théoriciens des cordes ! Et aujourd'hui, la théorie des cordes n'est pas testable expérimentalement.

Comme le soutenait le philosophe Karl Popper, la seule façon de tester une théorie est de la réfuter, c'est-à-dire de montrer qu'une des affirmations est fausse. En l'absence de nouvelles prédictions qui prouveraient que la théorie des cordes est meilleure que les idées standards de la physique, elle semble être séduisante mais n'est pas applicable. Les théoriciens des cordes espèrent que cela changera. La prochaine génération d'accélérateurs de particules testera sans doute de nouveaux mécanismes. Ou les recherches sur des effets tels que l'intrication quantique progresseront-elles suffisamment pour que l'on puisse les expliquer en utilisant les dimensions cachées.

**La théorie du tout** L'objectif de la théorie des cordes consiste à proposer une « théorie du tout » unifiant les quatre forces fondamentales (électromagnétisme, interactions forte et faible, gravitation) en une explication cohérente. Cet objectif ambitieux est loin d'être atteint.

C'est un fait que la physique est fragmentée. Le modèle standard de la physique des particules est puissant, mais sa formulation est fondée sur l'existence de symétries mathématiques sous-jacentes. Les théories quantiques des champs sont impressionnantes, cependant elles n'incluent pas pour l'instant la gravitation. Les infinis – éliminés par l'astuce mathématique de la « renormalisation » – continuent à hanter la mécanique quantique et la physique des particules.

Dans les années 1940, Einstein n'a pas réussi à unifier la mécanique quantique et la relativité, ce qui le préoccupa jusqu'à sa mort. Ses pairs l'ont d'ailleurs considéré comme fou de vouloir tenter cette unification. Pourtant, cela n'a pas

**« Je n'aime pas qu'ils ne calculent pas tout.
Je n'aime pas qu'ils ne vérifient pas leurs idées.
Je n'aime pas que pour tout écart
avec l'expérience, ils concoctent une explication
– un truc qui leur permet de dire
"cette approche n'est pas exclue." »**

**Richard Feynman**

empêché les théoriciens des cordes de relever le défi. Est-ce perdu d'avance ? En tirera-t-on au moins quelques enseignements ? Certains physiciens considèrent que la théorie des cordes n'est pas de la science. Mais les mathématiques pures ont bien aidé Werner Heisenberg à développer sa mécanique des matrices et permis à Murray Gell-Mann d'envisager les quarks !

Quels sont les objectifs d'une théorie du tout ? Cela suffit-il de vouloir seulement décrire les forces ? Cette théorie devra-t-elle aller plus loin et inclure d'autres aspects du monde, par exemple la vie ou la conscience ? Même si l'on décrit l'électron comme une corde en vibration, cela n'apprend pas grand-chose sur la chimie des liaisons moléculaires ou sur l'assemblage des cellules vivantes.

Les scientifiques se divisent en deux camps face à un tel « réductionnisme ». D'aucuns pensent que l'on peut créer une image *bottom-up* (de bas en haut) du monde à partir de la matière et des forces. D'autres qualifient de ridicule cette approche, prétendant que le monde est si complexe que des mécanismes peuvent émerger d'interactions auxquelles personne n'a jamais pensé. Certains aspects contre-intuitifs, par exemple l'intrication quantique ou le chaos, rendent le monde encore plus difficile à prédire. Le physicien Steven Weinberg pense que l'approche constructiviste est « froide et impersonnelle » ; pour lui, nous devons simplement accepter le monde tel qu'il est.

# l'idée clé
## Musique cosmique

# 38 Des mondes multiples

**D'après l'interprétation de Copenhague, toute mesure entraîne l'effondrement des fonctions d'onde, ce que les physiciens jugeaient peu réaliste. Dans les années 1950, Hugh Everett trouva comment éviter cette difficulté ; selon lui, des univers parallèles apparaissent quand des événements quantiques surviennent.**

Dans les années 1950 et 1960, à mesure que les scientifiques perçaient les secrets des particules et de leurs interactions, il leur fut de plus en plus nécessaire de mieux comprendre ce qui se passait à l'échelle subatomique. Plusieurs dizaines d'années après avoir été proposée, l'interprétation de Copenhague continuait à prédominer. Elle stipulait que les particules et les ondes sont les deux faces d'une même pièce, décrites par des fonctions d'onde qui s'effondrent dès que l'on tente de faire des mesures.

Le concept du physicien danois Niels Bohr expliquait bien les expériences quantiques, notamment les interférences et le comportement particulaire de la lumière. Pourtant, les fonctions d'onde restaient difficiles à comprendre. Bohr leur conférait un statut réel. D'autres les abordaient comme des raccourcis mathématiques de la réalité. Une fonction d'onde indique la probabilité que présente un électron d'être à tel endroit ou d'avoir telle énergie.

Pire, l'interprétation de Copenhague donne les pleins pouvoirs à un « observateur ». Quand le chat de Schrödinger est assis dans sa boîte, Bohr imaginait qu'il était dans une superposition d'états, vivant et mort à la fois. C'est seulement quand la boîte est ouverte que son destin est scellé. Mais quelle importance cela a-t-il pour le chat que quelqu'un l'ait ou non regardé ? Qui observe l'Univers pour s'assurer de notre existence ?

## chronologie

**1927**
Interprétation de Copenhague de la mécanique quantique

**1935**
Schrödinger publie son scénario du chat

**1957**
Everett répond à l'interprétation de Copenhague

**Multivers** En 1957, Hugh Everett proposa une nouvelle approche. Il n'appréciait pas l'idée que les fonctions d'onde s'effondrent quand un observateur fait une mesure. Comment une étoile lointaine saurait-elle avant d'exister si quelqu'un l'a regardée ?

Il postula que toute chose existe dans l'Univers à chaque instant et dans un état donné – le chat est vivant ou il est mort. Mais pour faire face à toute éventualité, il doit exister des univers parallèles où les autres possibilités existent. Cette approche est connue aujourd'hui sous le nom de « théorie des mondes multiples ».

Bien que tous les physiciens ne croient pas en cette théorie – créer des univers multiples semble encore plus difficile que de contrôler quelques photons –, la théorie des mondes multiples a trouvé quelques défenseurs. L'Américain Bryce DeWitt, qui a proposé ce terme de « mondes multiples », a soutenu cette idée dans les années 1960-1970. Aujourd'hui, de nombreux physiciens utilisent le concept de « multivers » pour expliquer des coïncidences en cosmologie que l'on ne peut expliquer autrement, par exemple pourquoi les forces ont des intensités telles que les atomes se sont formés et que la vie est apparue.

### Hugh Everett (1930-1982)

Hugh Everett est né à Washington et y a passé son enfance. Il fit des études d'ingénieur chimiste, au cours desquelles il prit une année pour rendre visite à son père resté en Allemagne après la Seconde Guerre mondiale. Il prépara sa thèse à l'université de Princeton, passant de la théorie des jeux à la mécanique quantique. On le disait intelligent, mais trop absorbé par la littérature de science-fiction. En 1956, il alla travailler au Pentagone sur la modélisation des armes nucléaires. À la demande de John Wheeler, Everett rendit visite à Niels Bohr à Copenhague en 1959, mais son travail fut mal reçu. Il trouva que sa visite avait été un « enfer », et retourna à son métier d'informaticien. Pourtant, ses idées commencèrent à recevoir un écho favorable en 1970, grâce à un article de Bryce DeWitt. Un livre, publié peu après, fut rapidement épuisé. Les écrivains de science-fiction ont beaucoup apprécié le concept de mondes multiples. Everett mourut à l'âge de 51 ans.

Avant Everett, on pensait que l'Univers avait une histoire unique. Des événements se sont produits au fil du temps, et les changements qui ont eu lieu suivaient des lois, par exemple le second principe de la thermodynamique. Dans le scénario des mondes multiples, chaque fois que survient un événement

**1970**
DeWitt propose le terme de « mondes multiples »

**1994-1997**
La théorie-M est proposée

quantique, un nouvel univers se crée. Tous les univers – peut-être en nombre infini – dessinent une structure ramifiée, comme un arbre.

Bien que les différents univers ne communiquent quasiment pas – ils sont séparés et suivent chacun leur chemin –, certains physiciens ont suggéré qu'il pourrait y avoir quelques « indiscrétions » entre les mondes qui se sont séparés. Peut-être ces interactions expliquent-elles les expériences d'interférences, et permettraient peut-être les voyages dans le temps de l'un à l'autre ?

**Avantages** La théorie des mondes multiples présente l'avantage d'éviter l'effondrement de la fonction d'onde et la présence d'un observateur. Si le chat de Schrödinger, enfermé dans sa boîte, est dans une superposition d'états, alors il doit en être de même pour l'expérimentateur. Le scientifique qui voit le chat vivant est superposé au scientifique qui le trouve mort. Le concept d'Everett lève de nombreux paradoxes posés par la physique quantique. Tout ce qui a pu arriver s'est déjà passé dans un des univers ou pourrait avoir lieu dans un autre.

**« Je ne demande pas qu'une théorie décrive la réalité, car j'ignore ce que c'est. On ne teste pas la réalité avec du papier tournesol. »**

**Stephen Hawking**

Que l'Univers existe ou non, nous n'y pouvons rien. Le chat de Schrödinger est vivant ici, mort là-bas, mais pas dans un mélange des deux états. La dualité onde-corpuscule est également compatible avec ce modèle.

Everett publia son modèle dans sa thèse. L'idée de mondes multiples ne fut pas acceptée tout de suite et fut même rejetée par certains de ses collègues. Everett quitta la recherche pour travailler dans le domaine de la défense et de la modélisation. Il fallut attendre 1970 pour que certains commencent à s'intéresser à sa théorie après la publication d'un article de Bryce DeWitt dans la revue *Physics Today*.

**Questions ouvertes** Aujourd'hui, le concept des mondes multiples a des partisans et des adversaires. Les premiers considèrent qu'il satisfait le principe de parcimonie (le plus simple est le plus vraisemblable), et évite de nombreux comportements quantiques non-intuitifs. En revanche, il est sujet à caution car on ignore si cette théorie est testable. Cela dépend en effet du degré d'interaction des différents univers et des expériences qui pourraient montrer que d'autres Univers existent. La question reste ouverte.

Selon les adversaires, la multiplication des univers est arbitraire – on ignore ce que cela signifie et comment cela se produit. Dans la représentation d'Everett, que l'on ne peut observer, la mesure n'a pas de sens et on ne sait pas bien quand et comment se forment les différents univers.

**« On peut faire confiance à une approche mathématique, même si elle ne semble pas, à première vue, connectée à la physique. »**

**Paul Dirac, 1977**

D'autres grandes questions de la physique fondamentale restent sans réponse, par exemple la direction du temps et l'entropie qui augmente d'après le second principe de la thermodynamique. On ignore si l'information quantique peut traverser l'Univers plus vite que la lumière – par exemple si l'Univers tout entier se divise chaque fois qu'une particule naît autour d'un trou noir aux confins de l'Univers. Certains des univers parallèles pourraient ne pas exister si leurs propriétés physiques sont incompatibles.

Stephen Hawking voit la théorie des mondes multiples comme « trivialement vraie ». Selon lui, c'est plus une approximation utile pour calculer des probabilités qu'une conception profonde de l'Univers réel. Méprisant les tentatives faites pour comprendre le sens du monde quantique, il aurait dit : « Quand j'entends parler du chat de Schrödinger, je sors mon revolver. »

## l'idée clé
## Univers parallèles

# 39 Les variables cachées

**Le fait que le monde quantique ne puisse être décrit qu'en termes de probabilités inquiétait certains physiciens, notamment Albert Einstein. Comment expliquer les liens de causes à effets si tout est régi par le hasard ? Une façon de tourner la difficulté serait de supposer que les systèmes quantiques sont entièrement définis, mais que certaines variables cachées restent à découvrir.**

Albert Einstein n'appréciait pas l'interprétation de Copenhague de la mécanique quantique et déclara que « Dieu ne joue pas aux dés ». Il était préoccupé par le fait que les traitements probabilistes de la mécanique quantique n'étaient pas déterministes, c'est-à-dire qu'ils ne prévoyaient pas comment un système évoluerait à partir d'un état particulier.

Si vous connaissez les propriétés d'une particule à un instant donné, alors, en raison du principe d'incertitude d'Heisenberg, vous ne pouvez pas les connaître un moment après. Mais si le futur dépend du hasard, pourquoi l'Univers est-il ordonné et pourquoi suit-il des lois physiques ?

Comme Einstein, Boris Podolsky et Nathan Rosen l'ont indiqué en 1935 dans le paradoxe EPR (d'après leurs initiales), la mécanique quantique est certainement incomplète. Puisque les messages ne peuvent se propager plus vite que la vitesse de la lumière, deux particules jumelles dont les nombres quantiques sont intriqués et qui se séparent doivent toujours « savoir » dans quel état elles sont.

L'observation de l'état d'une particule nous renseigne également sur l'autre, mais pas parce que les fonctions d'onde s'effondrent. Selon Einstein, l'information associée à chaque particule doit être contenue dans des variables cachées.

## chronologie

**1926**
Schrödinger propose son équation d'onde

**1927**
Interprétation de Copenhague

**1927**
De Broglie propose sa théorie de « l'onde pilote »

Il doit exister un niveau plus profond de compréhension, qui nous est caché.

**Le déterminisme** Dans les années 1920 et 1930, les physiciens se sont interrogés sur le sens de la mécanique quantique. Erwin Schrödinger, qui avait proposé son équation d'onde en 1926, pensait que les fonctions d'onde qui décrivent un système quantique sont des entités physiques réelles. Son collègue Max Born a essayé de mieux comprendre cette notion. Dans un article, Born nota que l'interprétation probabiliste de l'équation d'onde a des conséquences en termes de déterminisme, de causalité.

**« Ce qui est ambigu est la réalité, et ce qui ne l'est pas n'est qu'un cas particulier de cette réalité, où nous ne repérons que quelques aspects spécifiques. »**

**David Bohm**

Born considérait que d'autres propriétés atomiques pourraient un jour être découvertes et expliquer les conséquences d'un événement quantique tel que la collision de deux particules. Mais il finit par se rallier à la notion de fonction d'onde et accepta qu'on ne pouvait pas tout savoir : « Je m'incline et abandonne l'idée de déterminisme dans le monde des atomes. Mais c'est une question philosophique, et les arguments physiques seuls ne sont pas décisifs. »

Einstein lui-même se méfiait des fonctions d'onde. Pour lui, l'équation de Schrödinger décrivait les atomes de façon statistique, mais pas complètement, bien qu'il ne pût le démontrer. « La mécanique quantique est digne d'intérêt. Mais une petite voix intérieure me dit que ce n'est pas la bonne piste » remarqua-t-il.

Au cours d'une conférence en Belgique, en 1927, le physicien français Louis de Broglie présenta une théorie à variables cachées qui préservait le déterminisme. Il pensait qu'une « onde pilote » guidait chaque particule à travers l'espace. Einstein avait également envisagé cette possibilité, mais il l'avait rejetée et gardait le silence. D'autres physiciens restèrent aussi à l'écart. Beaucoup étaient impressionnés par l'assurance de Max Born et de Werner Heisenberg, qui annoncèrent bravement que la mécanique quantique était désormais une théorie achevée. Ils pensaient que l'indéterminisme était bien réel dans le domaine des expériences sur lesquelles il s'appliquait.

**1935** Suggestion du paradoxe EPR

**1952** Bohm publie sa théorie à variables cachées

**1964** Bell propose de tester les variables cachées

**1981** Alain Aspect réfute la théorie à variables cachées locales

**« En un sens, l'homme est un microcosme de l'Univers : dès lors, ce qu'est l'homme, donne des informations sur l'Univers. Nous faisons partie intégrante de l'Univers. »**

**David Bohm**

En 1927, après avoir proposé l'interprétation de Copenhague de la mécanique quantique, qui requiert un observateur pour que la fonction d'onde s'effondre au moment de la mesure, Niels Bohr et Einstein ont eu des débats acharnés pour savoir si cela avait un sens. Le principal défi auquel Einstein fut confronté fut le paradoxe EPR, qui donne la possibilité qu'un observateur situé d'un côté de l'Univers soit responsable de l'effondrement d'une fonction d'onde instantanément de l'autre côté, ce qui viole la relativité restreinte.

**Les ondes guides** En 1952, David Bohm remit la théorie à variables cachées au goût du jour en redécouvrant par hasard l'idée d'ondes guides que de Broglie n'avait pas publiée. Bohm pensait que les particules telles que les électrons, les protons et les photons sont réelles. Nous pouvons, par exemple, voir des photons s'accumuler dans un détecteur, ou des électrons produire des décharges quand ils heurtent une plaque métallique. Il en conclut que la fonction d'onde de Schrödinger décrivait une probabilité de présence dans un endroit de l'espace.

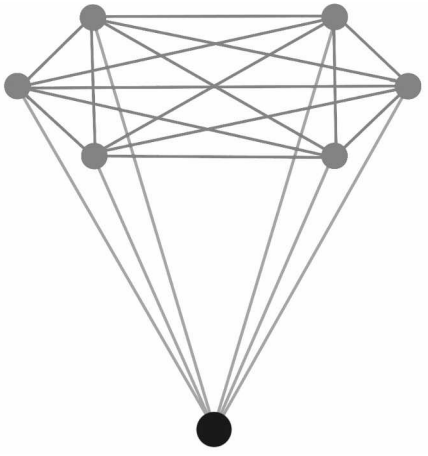
Pour guider une particule là où elle doit se trouver, Bohm définit un « potentiel quantique ». Celui-ci reçoit toutes les variables quantiques et réagit à

### David Bohm (1917-1992)

Né et élevé en Pennsylvanie, aux États-Unis, Bohm obtint un doctorat de physique théorique à l'université de Californie, à Berkeley, dans le groupe dirigé par le « père de la bombe atomique », Robert Oppenheimer. Bohm entra en politique, rejoignant les communistes de sa région et des groupes pacifistes. Pour cette raison, il ne put rejoindre l'équipe du projet Manhattan durant la Seconde Guerre mondiale ; une partie de son travail fut classée secret défense, et lui-même ne pouvait plus y avoir accès. Après la guerre, Bohm alla à l'université de Princeton, où il travailla avec Einstein. Durant la période du maccarthisme au cours de laquelle les communistes furent pourchassés, Bohm refusa de témoigner devant une commission. Il fut arrêté. Acquitté en 1951, il dut quitter son pays parce que Princeton l'avait renvoyé. Il passa quelques années à São Paulo, au Brésil, et à Haïfa, en Israël, avant d'aller en Grande-Bretagne en 1957, où il travailla à l'université de Bristol ainsi qu'à Londres, au Birkbeck College. À la fin de sa vie, tout en continuant à explorer la physique quantique, Bohm s'intéressa à la cognition et à diverses questions de société.

d'autres systèmes ou effets quantiques ; il est lié à la fonction d'onde. Ainsi, la position et la trajectoire d'une particule sont toujours définies, mais, parce que nous ne connaissons pas toutes les propriétés de la particule dès le début, nous utilisons la fonction d'onde pour décrire la probabilité que la particule soit à tel endroit ou dans tel état. Les positions de la particule sont des variables cachées, mais pas le potentiel quantique ni la fonction d'onde.

La théorie de Bohm conserve les relations de causalité, et les particules se déplacent le long de trajectoires comme en physique classique. Elle évite l'effondrement de la fonction d'onde. En revanche, elle n'évite pas le paradoxe EPR, une « troublante » action à distance. Si l'on change un détecteur, alors le champ d'onde de la particule change aussi instantanément. Comme elle s'applique quelle que soit la distance, la théorie est dite « non locale ». Mais elle viole la relativité restreinte, ce qui a conduit Einstein à la qualifier de « bas de gamme ».



**Bohm imagina qu'une particule est dotée d'un réseau de « connaissances cachées » de toutes les propriétés physiques qu'elle pourrait avoir, mais la mécanique quantique limite ce que l'on peut en connaître.**

Bohm montra qu'il était possible de proposer une version à variables cachées de la mécanique quantique. L'étape suivante a consisté à tester cette théorie. En 1964, John Bell a imaginé une série d'expériences qui pourraient s'appliquer aux théories à variables cachées. Si les résultats étaient différents de ces prédictions, l'intrication quantique serait vraie. Dans les années 1980, des physiciens ont réussi à réaliser ces tests. Ils ont exclu le cas le plus simple des variables cachées « locales », où l'information est contrainte par la vitesse de la lumière. Les corrélations instantanées à longue distance ou l'intrication quantique sont effectivement nécessaires.

## l'idée clé

## Des inconnues connues

# 40 Les inégalités de Bell

**En 1964, John Bell mit en équations la différence entre la mécanique quantique et les théories à variables cachées. Il montra que les corrélations entre les particules diffèrent selon qu'elles sont imposées dès le début ou par la mesure.**

La mécanique quantique est déconcertante. Ses résultats sont issus de calculs de probabilité et d'incertitudes, même sur des propriétés fondamentales telles que l'énergie et le temps, la position et la quantité de mouvement, et semblent résister à toute explication.

Tous ceux qui ont participé à l'interprétation de Copenhague, y compris Niels Bohr et Erwin Schrödinger, acceptèrent le fait que notre connaissance du monde subatomique est nécessairement limitée. Les particules, tels les électrons, se comportent comme des ondes, et la seule façon de décrire ce que nous savons sur elles est un formalisme mathématique – la fonction d'onde.

**« Il semble bien que la non-localité soit si profondément ancrée en mécanique quantique qu'elle persistera dans toute théorie achevée. »**

**John Bell, 1966**

Albert Einstein et Louis de Broglie, dans les années 1930, et David Bohm, dans les années 1950, étaient persuadés que les électrons, les photons et autres particules étaient des entités réelles. Ils existent, mais on ne peut pas tout savoir sur eux. La mécanique quantique est incomplète, et des « variables cachées » expliqueraient certains de ses aspects les plus contre-intuitifs.

Le paradoxe EPR a résisté à toute explication. Les propriétés de deux particules corrélées propulsées dans l'Univers selon des directions opposées doivent rester

## chronologie

**1927**
Niels Bohr propose l'interprétation de Copenhague de la mécanique quantique

**1935**
Le paradoxe EPR est énoncé

**1952**
David Bohm propose les variables cachées

liées, même si elles sont si éloignées qu'un signal lumineux émis par l'une ne peut atteindre l'autre. Ce raisonnement implique de « troublantes » actions à distance.

Tout comme les électrons suivent certaines règles pour remplir leurs orbitales, des règles quantiques lient les particules les unes aux autres. Si une particule, par exemple une molécule d'hydrogène, se coupe en deux, les principes de conservation veulent que les deux particules résultantes aient des spins opposés. Si le spin d'une des particules est *up*, celui de l'autre est nécessairement *down*. En termes quantiques, la fonction d'onde de la seconde particule s'effondre exactement au même instant que celle de la première, quelle que soit la distance qui les sépare.

Einstein et ses collègues ne trouvaient pas cela raisonnable. Aucun signal ne pouvant se déplacer plus vite que la lumière, comment les informations concernant la première particule seraient-elles transmises à la seconde ? Einstein se fondait sur deux hypothèses : la localité – rien ne peut se déplacer plus vite que la lumière – et le réalisme – les particules existent, qu'elles soient observées ou non. Einstein raisonnait en termes de « réalisme local ».

**Le théorème de Bell** En 1964, John Bell poursuivit le raisonnement. Si les variables cachées et le réalisme local sont vrais tous les deux, alors les

### John Stewart Bell (1928-1990)

John Stewart Bell est né à Belfast, en Irlande du Nord. Il a étudié la physique à l'université de cette ville. En 1956, il présenta une thèse de physique nucléaire et quantique à l'université de Birmingham.
Bell rejoignit le Centre de recherche sur l'énergie atomique de Grande-Bretagne, dans le Oxfordshire, puis le CERN – Conseil européen pour la recherche nucléaire, à Genève. Il y travailla sur la théorie de la physique des particules et la conception de l'accélérateur, mais trouva également le temps de faire des recherches sur les fondements de la mécanique quantique.
En 1964, après avoir passé une année à travailler aux États-Unis, il publia un article intitulé : « Sur le paradoxe de Einstein-Podolsky-Rosen », dans lequel il introduisait son théorème sous forme d'inégalités qui sont violées par la théorie quantique.

**1964**
John Bell formule ses inégalités

**1972**
Première expérience violant l'inégalité de Bell

**1981**
Alain Aspect réalise une expérience qui confirme la théorie quantique

mesures faites sur une particule proche n'auront aucune répercussion sur les propriétés d'une particule éloignée. Si une particule lointaine « savait » déjà dans quel état elle était, cela lui serait indifférent de savoir si vous avez décidé de mesurer la particule proche de vous en utilisant des interférences ou la diffusion.

Bell définit des cas particuliers où ce comportement est incompatible avec les prédictions de la mécanique quantique. Il choisit des grandeurs pouvant être mesurées et servir de test, de sorte que si l'on obtenait une valeur inférieure ou supérieure à une limite donnée, ce serait un élément en faveur de la mécanique quantique ou des variables cachées. Ces travaux mathématiques sont connus sous le nom « d'inégalités de Bell ».

Modifiant l'exemple pris dans le paradoxe EPR, Bell imagina deux fermions dont les spins étaient complémentaires, par exemple deux électrons, un de spin *up* et l'autre de spin *down*. Leurs propriétés étaient corrélées, peut-être parce qu'ils étaient tous deux issus d'une même particule qui s'était décomposée. Les deux particules s'éloignaient l'une de l'autre dans des directions opposées.

**« On ignore où se situe la frontière entre le monde classique et le monde quantique… Je pense qu'en fait, on montrera qu'il n'y a pas de frontière. »**

**John Bell, 1984**

On ignore la valeur de spin portée par telle ou telle particule. Des mesures sont réalisées sur les deux particules, là où elles sont. Chaque observation indique un spin *up* et un spin *down,* et chaque mesure est réalisée indépendamment, sans que l'on ne sache rien de l'autre particule.

La probabilité de mesurer une direction particulière de spin dépend de l'angle, compris entre 0 et 180 degrés, sous lequel elle est mesurée. Elle est égale à +1 quand la mesure est réalisée strictement dans la direction du spin, et à – 1 dans la direction opposée. Elle est égale à la moitié quand elle est mesurée dans une direction perpendiculaire. Pour des angles intermédiaires, les différentes théories prévoient différentes mesures.

Le théorème de Bell donne les statistiques de ce qui serait obtenu lors de nombreuses expériences réalisées avec des angles variés. Selon la théorie à variables cachées, les résultats sont alignés. Selon la mécanique quantique, la corrélation varie comme le cosinus de l'angle. Ainsi, en faisant des mesures dans différentes directions, il est possible de dire ce qui se passe.

Bell conclut qu'il « doit y avoir un mécanisme par lequel la position d'un des dispositifs de mesure influe sur le résultat affiché par un autre instrument,

même éloigné. De surcroît, le signal impliqué doit se propager instantanément. »

**Prédictions testées** Il fallut plus d'une dizaine d'années pour que les expériences soient suffisamment fiables pour tester réellement les prédictions de Bell. Dans les années 1970-1980, plusieurs d'entre elles prouvèrent que la mécanique quantique dit vrai. Elles invalidèrent les théories à variables cachées locales postulant notamment que les messages quantiques sont limités par la vitesse de la lumière. Ce faisant, elles montrèrent qu'une signalisation plus rapide que la lumière existe bien à l'échelle quantique. Certaines variantes des théories à variables cachées restent possibles, à condition qu'elles soient non locales ou ouvertes aux signaux supraluminiques.

## Les chaussettes de Bertlmann

Bell illustra son théorème en utilisant un personnage avec une habitude vestimentaire particulière. Monsieur Bertlmann aimait porter des chaussettes criardes et dépareillées. Personne ne savait à l'avance quelle couleur il porterait tel jour à tel pied. Pourtant, nous pouvons en savoir un peu plus qu'il n'y paraît : si nous voyons qu'une des chaussettes est rose, nous savons que l'autre ne sera pas rose. Bell soutenait que c'est tout ce que dit le paradoxe EPR.

Bell accueillit favorablement la découverte, mais fut également déçu : « Pour moi, il ne fait pas de doute que les photons de ces expériences portent des programmes, corrélés à l'avance et qui leur disent comment se comporter. » Il regrettait que l'idée d'Einstein ne s'applique pas.

La théorie de Bell est l'une des plus importantes de la physique fondamentale. Elle ne prouve pas vraiment la mécanique quantique, quelques failles de raisonnement ayant été identifiées. Mais elle a résisté à de nombreuses tentatives visant à la mettre en défaut.

# l'idée clé
## Limites quantiques

# 41 Les expériences d'Aspect

**Les expériences visant à tester les inégalités de Bell dans les années 1970-1980 montrèrent que l'intrication quantique existe. Des particules jumelles semblent « savoir » quand l'une des deux est observée, même si l'autre est très éloignée. Il en résulte que l'information quantique n'est pas stockée une seule fois pour toute, mais qu'elle est interconnectée.**

En 1964, John Bell écrivit une série de formulations mathématiques visant à établir si la description de la physique quantique au moyen de variables cachées était correcte, et si les particules étaient bien affublées d'un grand nombre de paramètres. Si ces règles étaient violées, alors les aspects étranges de la mécanique quantique seraient vrais. La troublante action à distance, les messages plus rapides que la lumière, et l'intrication quantique seraient confirmés.

Il fallut attendre plus de dix ans pour pouvoir tester définitivement par l'expérience les inégalités de Bell. Car ces expériences sont très difficiles à réaliser. On doit d'abord identifier une transition atomique qui libère des paires de particules associées, puis une propriété des particules qui dépende de l'orientation et puisse être mesurée de façon fiable et précise ; il faut aussi concevoir un dispositif expérimental qui permette de réaliser l'expérience.

En 1969, John Clauser, Michael Horne, Abner Shimony et Richard Holt ont proposé d'utiliser comme particules intriquées des paires de photons produites par des atomes de calcium excités. Si l'énergie des deux électrons externes du calcium augmente assez pour qu'ils atteignent des orbitales supérieures, et qu'il reviennent ensuite à leur état initial, deux photons devraient être émis. Comme ils sont liés par des règles quantiques, les électrons de la paire devraient avoir des polarisations corrélées, une caractéristique connue depuis la fin des années 1940.

## chronologie

**1935** Le paradoxe EPR est envisagé

**1964** Bell propose ses inégalités

**1974** Clauser et Freedman testent les inégalités de Bell

**1982** Aspect prouve que les inégalités de Bell sont violées

En 1972, Clauser et Stuart Freedman firent la première expérience réussie pour tester l'inégalité de Bell. Il était difficile d'exciter les atomes et de capturer les paires de photons : il fallut 200 heures pour y parvenir. Les polarisations des photons devaient être détectées dans les zones bleues et vertes du spectre, mais les détecteurs n'étaient pas très sensibles à cette époque. Finalement, le résultat fut compatible avec les prédictions de la mécanique quantique. Mais Clauser et ses collègues devaient encore appliquer un traitement statistique pour tenir compte des photons manquants et… ce n'était pas la fin de l'histoire.

### Alain Aspect (1947-)

Alain Aspect est né en 1947 à Agen. Il a étudié la physique à l'École normale supérieure de Cachan et à l'université d'Orsay. Il soutint sa thèse en 1971 et partit enseigner au titre de la coopération pendant trois ans au Cameroun. Pendant ce temps, il commença à s'intéresser aux inégalités de Bell. À son retour, il fit des expériences sur des photons intriqués à Orsay avant de préparer un doctorat d'État. Au Collège de France, il travailla sur des atomes superfroids ralentis par des lasers, une technique utilisée dans les horloges atomiques. Le CNRS lui a décerné une médaille d'or en 2005. Alain Aspect est directeur de recherche à l'Institut d'optique d'Orsay et travaille avec de nombreux industriels.

Suivirent d'autres expériences réalisées sur le calcium ou des atomes de mercure excités, et utilisant des paires de photons produites lors d'annihilations de positrons. La plupart étaient en accord avec la mécanique quantique, même si certaines n'étaient pas concluantes. La précision des expériences s'améliora avec la qualité des détecteurs et avec l'introduction des lasers, qui facilitaient l'excitation des atomes et, par conséquent, la production de photons.

**Les tests d'Alain Aspect** À la fin des années 1970, le physicien Alain Aspect perfectionna l'expérience. Utilisant à nouveau de la vapeur de calcium, il régla deux lasers à des fréquences permettant aux deux électrons externes de bondir vers des niveaux supérieurs, avant d'être libérés en cascade.

Comme la durée séparant l'émission de chaque paire de photons était supérieure à l'intervalle de temps séparant la libération de chaque photon dans cette paire, les faisceaux mesuraient bien simultanément les paires corrélées. Qui plus est, l'information entre les photons séparés devait voyager deux fois plus vite que la lumière pour qu'ils soient connectés.

**1998**
Zeilinger élimine la faille de communication

**1998**
Des photons intriqués sont transportés sur 10 kilomètres à Genève

**2007**
Des photons intriqués sont transportés sur 144 kilomètres aux îles Canaries

On sait que des verres polarisés réduisent la luminosité en bloquant la lumière réfléchie. De même, la polarisation des photons de chaque faisceau était mesurée au moyen de prismes spéciaux. Les prismes transmettaient bien la lumière polarisée verticalement (environ 95 %), mais la quasi-totalité (à nouveau 95 % environ) de la lumière polarisée horizontalement était bloquée ou réfléchie. En faisant tourner ces prismes, Aspect et ses collègues évaluaient la proportion de la lumière de polarisation intermédiaire qui était transmise.

**« L'exclamation la plus passionnante pour un scientifique, celle qui annonce une découverte, n'est pas "Eurêka !", mais "Tiens, c'est amusant..." »**

**Isaac Asimov**

Alain Aspect, Philippe Grangier et Gérard Roger ont publié leurs résultats en 1982. La loi de variation de la polarisation qu'ils ont obtenue (avec le cosinus de l'angle) était en accord avec celle de la mécanique quantique, et en contradiction avec celle prévue par les théories à variables cachées locales (variation linéaire). Leur résultat avait une précision statistique bien supérieure à toutes les tentatives passées et marqua une étape importante.

Était-ce la fin des théories à variables cachées locales ? Certains proposaient encore des variables cachées exotiques qui pourraient changer plus vite que la vitesse de la lumière, mais les modèles simples reposant sur une communication directe à une vitesse inférieure ou égale à celle de la lumière furent éliminés. Ainsi, la mesure d'une particule modifie bien l'autre, quelle que soit la distance qui les sépare. Les états quantiques sont bel et bien intriqués.

**Éliminer les failles** Certains insistaient sur le fait que les tests expérimentaux n'étaient pas parfaits et présentaient des failles. La détection, mise en avant par Clauser, en était une. Il soutenait que tous les photons n'étaient pas détectés, et qu'il fallait trouver un moyen statistique d'en tenir compte. Une seconde faille était le risque de communication : à cause de la taille limitée du dispositif expérimental, un détecteur pouvait transmettre des informations à l'autre. Cette difficulté pourrait être levée si l'on parvenait à commuter le dispositif si vite qu'aucun message n'aurait le temps d'être transmis.

Aspect parvint à éviter cette difficulté en installant un faisceau double dans sa première expérience. En outre, il modifiait les polariseurs pendant le cheminement des photons. Ses expériences ultérieures confirmèrent à nouveau la théorie quantique. En 1998, Anton Zeilinger et ses collègues autrichiens franchirent une nouvelle étape. Ils choisirent un détecteur extrêmement rapide

et aléatoire, et, pour eux, il était impossible qu'une partie du dispositif, quelle qu'elle soit, puisse « savoir » ce qui se passait ailleurs. Puis, en 2001, des équipes de physiciens américains comblèrent la faille de la détection en capturant tous les photons corrélés au moyen d'un dispositif expérimental au béryllium. Ces résultats étaient inattaquables. Conclusion : l'information quantique est bien intriquée.

**Intrication à distance** Aujourd'hui, les physiciens ont établi que l'intrication persiste sur de longues distances. En 1998, Wolfgang Tiffel, Jürgen Brendel, Hugo Zbinden et Nicolas Gisin, de l'université de Genève, ont réussi à mesurer l'intrication de paires de photons sur une distance de 10 kilomètres. Les photons ont été émis dans des fibres optiques placées dans des tunnels.

En 2007, le groupe de Zeillinger est parvenu à communiquer au moyen de photons intriqués sur 144 kilomètres entre les îles de La Palma et de Tenerife, qui font partie de l'archipel des Canaries. L'intrication quantique et la communication plus rapide que la lumière sont des réalités.

## l'idée clé

## Communiquer plus vite que la lumière

# 42 Une gomme quantique

**Des variantes de l'expérience des fentes de Young nous offrent quelques indices sur la dualité onde-corpuscule. Les interférences ont lieu seulement quand les photons sont corrélés et que l'on ignore leurs trajectoires précises. Quand leurs trajectoires sont connues, alors ils se comportent comme des particules et les franges d'interférences disparaissent. Ce comportement est contrôlable en intriquant l'information quantique ou en l'effaçant.**

La dualité onde-corpuscule est au cœur de la physique quantique. Comme Louis de Broglie l'a suggéré, tout objet a des caractéristiques ondulatoire et particulaire. Mais ces deux facettes de la nature ne peuvent se manifester en même temps. Elles n'apparaissent pas dans les mêmes circonstances.

Au XIX$^{e}$ siècle, Thomas Young mit au point un dispositif expérimental à deux fentes qui lui permit de montrer que la lumière se comporte comme une onde quand un faisceau lumineux issu d'une source unique passe par deux trous et produit des franges d'interférences. En 1905, Albert Einstein montra que la lumière se comporte aussi comme un flux de photons. Les électrons et autres particules élémentaires peuvent également interférer dans des conditions favorables. Le physicien danois Niels Bohr imagina que les ondes et les particules étaient les deux faces d'une même pièce. Werner Heisenberg expliqua qu'on ne pouvait connaître simultanément certaines propriétés complémentaires, telles que la position et la quantité de mouvement. Cette incertitude s'applique-t-elle aussi à la dualité onde-corpuscule ?

En 1965, Richard Feynman se demanda ce qui se passerait si nous pouvions mesurer par quelle fente était passée une particule dans l'expérience de Young.

## chronologie

**1801**
Young réalise son expérience avec une double fente

**1905**
Einstein montre que la lumière se comporte comme des particules

**1927**
Bohr propose l'interprétation de Copenhague et le principe de complémentarité

Au moment où des électrons sont envoyés vers les deux fentes, il imagina que l'on pourrait illuminer le dispositif et, en détectant la lumière diffusée, connaître le chemin de chaque électron. La position d'un électron, traité alors comme une particule, serait ainsi connue, et les franges d'interférences devraient disparaître.

> **« Je n'ai pas peur de ne pas tout savoir, d'être perdu sans but dans un univers mystérieux, c'est la réalité, autant que je puisse le savoir, mais cela ne m'effraie pas. »**
>
> **Richard Feynman, 1981**

En 1982, les physiciens théoriciens Marlan Scully et Kai Drühl ont imaginé une autre expérience où deux atomes jouaient le rôle de sources de lumière. Si nous utilisons un laser pour placer un électron de chaque atome dans le même état d'énergie, les deux atomes se désexciteraient en émettant deux photons similaires. Les deux auraient la même fréquence, de sorte qu'il serait impossible de dire de quel atome ils proviennent. Ces deux photons devraient interférer, donnant des franges. Mais nous pouvons aussi trouver par quel atome un photon donné a été émis. Nous pourrions mesurer l'énergie des atomes, celui qui a perdu de l'énergie étant celui qui a émis le photon. Nous pourrions analyser les atomes après l'émission du photon. Nous serions ainsi capables de voir en même temps la face ondulatoire et la face particulaire de la lumière.

Pourtant, l'interprétation de Copenhague stipule que c'est impossible. Selon la mécanique quantique, nous devons penser le système comme un tout. En observant l'état des atomes, même après le départ du photon, nous perturbons toute l'expérience. Et alors, le photon agit comme une particule et les interférences disparaissent.

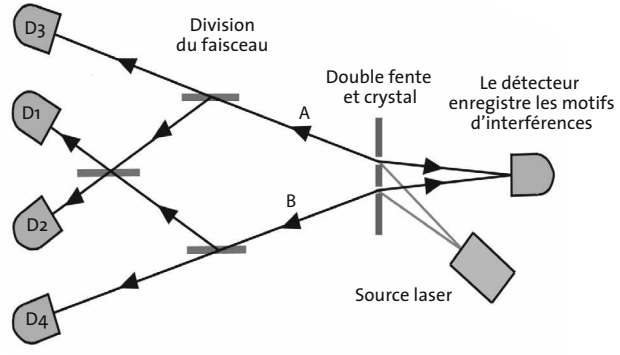
**Effacement** Que se passe-t-il si nous analysons les atomes sans regarder le résultat ? En théorie, les franges d'interférences devraient persister si nous ne savons rien de la trajectoire des photons. En réalité, si nous mesurons les énergies des photons restants et que nous tenons secrète cette information, les franges ne réapparaissent pas.

Une façon de mesurer les énergies tout en dissimulant l'information consiste à projeter un autre photon laser sur les deux atomes. L'atome qui libère le premier

**1965**
Feynman se demande si l'on peut observer les deux aspects des photons en même temps

**1982**
Scully et Drühl imaginent un dispositif expérimental pour passer des ondes aux particules

**1995**
Zeilinger observe le passage onde-particule




**La lumière issue de chaque fente suit des trajectoires différentes, A et B, puis se divise à nouveau. L'information concernant le chemin suivi est effacée pour les photons frappant D1 ou D2, mais pas pour D3 ou D4.**

photon est à nouveau excité et un troisième photon est émis. Mais nous ne pouvons plus dire de quel atome il provient – l'un ou l'autre pouvant en être la source.

Pourtant, cela ne suffit pas pour que des franges d'interférences réapparaissent. Les photons qui interfèrent ignorent tout du troisième photon. Il faut corréler les deux groupes pour que des franges puissent apparaître. Dans le cas précédent, nous pourrions effacer l'information contenue dans le troisième photon, tout en le conservant comme partie intégrante du système entier. En détectant le troisième photon d'une façon telle que nous ne pouvons préciser de quel atome il est issu, l'incertitude quantique réapparaît. Par exemple, le troisième photon pourrait être enregistré par un détecteur placé entre les deux atomes. La probabilité que cela survienne ne serait égale qu'à 50 %, ce qui conserverait l'incertitude. Mais sa détection (ou l'absence de détection) réinitialiserait le système, si bien que nous ne saurions rien sur les trajets des photons qui interfèrent. Ce type d'expérience est nommé « gomme quantique », car il détruit les connaissances quantiques que nous avions du système.

À un niveau plus profond, un des photons initiaux devient corrélé au troisième. Selon que le troisième photon est détecté ou non, la figure d'interférences diffère. Mais les deux photons étant déphasés, quand ils se combinent, les figures d'interférences disparaissent. Ainsi, le troisième photon – dont l'incertitude persiste – ajoute une figure d'interférences qui gomme la première. Quand son destin est scellé et qu'il est détecté, le dispositif enregistre une figure de franges.

**« Rarement, si ce n'est jamais, aucune connaissance n'a été donnée pour être conservée, mais pour être révélée ; ce précieux joyau se ternit dès qu'il est dissimulé. »**

**Joseph Hall**

## Interférences intriquées

En 1995, Anton Zeilinger et ses collègues d'Innsbruck, en Autriche, ont fait une observation similaire, en utilisant une paire de photons intriqués produits par un cristal excité par un laser. Avec une lumière rouge et infrarouge, ils ont pu

suivre les photons un par un au cours de leur expérience. Ils produisaient d'abord un faisceau de photons excités et déviaient certains photons pour qu'ils traversent à nouveau le cristal et forment un second faisceau. Les deux faisceaux produisaient une figure d'interférences quand ils se croisaient. Mais lorsqu'on parvenait à distinguer chaque faisceau – ce qui permettait de suivre un photon donné – en changeant sa polarisation, les franges disparaissaient. La figure d'interférences ne réapparaissait qu'au moment où les deux trajets étaient brouillés, de sorte que toutes les informations sur la position étaient perdues.

### Anton Zeilinger (1945-)

Anton Zeilinger est né en 1945 en Autriche. Pionnier des expériences d'intrication quantique, il est aujourd'hui professeur à l'université de Vienne et fait partie de l'Académie des sciences d'Autriche. Il a décrit les polarisations corrélées de paires de photons utilisées dans les expériences comme des paires de dés qui donnent toujours des doubles, toujours les mêmes paires de chiffres. Le groupe de Zeilinger a établi de nombreux records, par exemple le plus grand nombre de photons intriqués ou la plus longue distance parcourue par des photons intriqués. En 1997, Zeilinger démontra la faisabilité de la téléportation quantique en imprimant l'état quantique d'une particule intriquée à une autre. « Tout ce que je fais, c'est pour m'amuser », aime-t-il dire.

Encore plus surprenant : le moment où l'on décide d'appliquer la gomme quantique n'a aucune importance. On peut même l'appliquer après la détection des photons qui interférent. En 2000, Yoon-Ho Kim et ses collègues ont réalisé une telle expérience de gomme quantique à « choix retardé ». La figure d'interférences est contrôlée par le choix que l'on fait de connaître ou non la trajectoire d'un photon alors qu'il a déjà atteint le détecteur. Les franges d'interférences n'apparaissent qu'au moment où la seconde incertitude est levée.

Ainsi, la complémentarité et les effets de non-localité sont liés en mécanique quantique. L'interférence est à l'œuvre uniquement à cause de ces corrélations intriquées à longue distance. Et il est impossible de mesurer les propriétés ondulatoires et corpusculaires en même temps.

## l'idée clé
## Oubli à volonté

# 43 La décohérence quantique

**Les systèmes quantiques s'intriquent facilement, de sorte que leurs fonctions d'onde se combinent. Le fait qu'ils soient ou non en phase impose le résultat. L'information quantique fuit facilement, ce qui aboutit à la perte de cohérence de l'état quantique. Les objets perdent leur cohérence d'autant plus vite qu'ils sont gros.**

Dans le monde quantique, tout reste incertain. Les particules et les ondes ne se distinguent pas. Les fonctions d'onde s'effondrent quand nous mesurons quelque chose. Dans le monde classique, tout semble plus robuste. Un grain de poussière reste un grain de poussière d'un jour à l'autre.

Où se situe la frontière entre le monde quantique et le monde classique ? Louis de Broglie a associé une longueur d'onde caractéristique à chaque objet de l'Univers. Les gros objets, par exemple un ballon de football, ont de petites longueurs d'onde par rapport à leur taille, et ils se comportent comme des particules. Les objets minuscules, tels les électrons, ont des longueurs d'onde proches de leur taille, et leurs propriétés ondulatoires apparaissent.

Dans l'interprétation de Copenhague de la mécanique quantique, Niels Bohr a imaginé que les fonctions d'onde s'effondrent dès que l'on fait une mesure. Certaines probabilités inhérentes sont perdues quand nous reconnaissons une caractéristique avec certitude. Et c'est irréversible. Mais que se passe-t-il quand une fonction d'onde s'effondre ou quand nous faisons une mesure ? Comment des incertitudes deviennent-elles des résultats avérés ?

Hugh Everett leva la difficulté en proposant le concept de mondes multiples en 1957. Il postula que l'Univers tout entier a une fonction d'onde, qui évolue

## chronologie

**1927**
L'interprétation de Copenhague est proposée

**1952**
Bohm propose une théorie à variables cachées

**1957**
Everett énonce le concept de mondes multiples

mais ne s'effondre jamais. Une mesure est une interaction ou intrication entre des systèmes quantiques, ce qui fait apparaître un nouvel Univers. Mais Everett ne pouvait expliquer à quel moment précis cela se passait.

## Discorde quantique

Empêcher la décohérence est un énorme enjeu pour les ordinateurs quantiques, dont le principe repose sur le stockage à long terme d'états quantiques. Une mesure nommée « discorde quantique » a été proposée pour décrire le degré de corrélation entre des états quantiques.

Dans les théories quantiques de « guides d'ondes » ultérieures, telle celle de Louis de Broglie et de David Bohm supposée décrire la dualité onde-corpuscule au moyen d'une particule dans un potentiel quantique, les mesures déforment le mouvement de la particule dans son champ quantique. C'est un peu comme rapprocher une masse d'une autre dans le cadre de la relativité générale – l'espace-temps se déforme sous l'effet des influences gravitationnelles. La fonction d'onde de la particule ne s'effondre pas vraiment, elle ne fait que changer de forme.

**La décohérence** Aujourd'hui, on explique bien le remplacement d'une éventualité par une certitude grâce au concept de décohérence, proposé en 1970 par le physicien Dieter Zeh. Quand deux fonctions d'onde (ou davantage) se rapprochent, par exemple quand un appareil de mesure est placé à proximité d'une entité quantique, leur interaction dépend de leurs phases relatives. Tout comme les faisceaux de lumière ou des ondes à la surface de l'eau s'amplifient ou s'annulent en cas d'interférences, les fonctions d'onde peuvent être renforcées ou effacées quand elles se mélangent.

Plus les interactions auxquelles une fonction d'onde est exposée sont nombreuses, plus la fonction est brouillée. Elle finit par subir une décohérence et par perdre ses aspects ondulatoires. La décohérence est particulièrement menaçante pour les gros objets : ils perdent rapidement leur cohérence quantique. Le chat de Schrödinger, par exemple, récupérerait vite sa forme féline même s'il n'était pas observé, car sa fonction d'onde s'évanouirait quasi instantanément.

Cette approche est rassurante. Elle place notre monde macroscopique dans une position plus sûre. Pourtant, cette approche ne supprime pas toutes les

**1970**
Zeh avance le concept de décohérence

**1996**
La décohérence quantique est observée avec des atomes de rubidium

**1999**
Détection de la diffraction de molécules de fullerène

difficultés. Par exemple, pourquoi la décohérence agit-elle si uniformément sur un géant quantique tel qu'un chat ? La moitié de l'animal pourrait-il rester dans un état quantique, tandis que l'autre deviendrait réelle ? Le chat pourrait-il vraiment être à moitié vivant et à moitié mort ?

Par ailleurs, pourquoi l'effondrement de la fonction d'onde aboutit-il à des grandeurs observables correctes ? Pourquoi un photon apparaît-il quand il faut ? Pourquoi une onde lumineuse est-elle là quand une fente est placée sur son chemin ? La décohérence nous renseigne peu sur la dualité onde-corpuscule.

**Les systèmes à grande échelle** Pour en savoir plus, il nous faut étudier des phénomènes macroscopiques ou des objets qui présentent des comportements quantiques. En 1996 et en 1998, les physiciens français Michel Brune, Serge Haroche et Jean-Michel Raymond, ainsi que leurs collègues, ont manipulé des champs électromagnétiques pour en superposer plusieurs états en utilisant des atomes de rubidium : ils ont observé la décroissance de leur intégrité quantique. D'autres groupes ont essayé de construire des scénarios ressemblant à celui du chat de Schrödinger, mais en plus grand.

Le comportement quantique de grosses molécules est une autre voie de recherche. En 1999, Anton Zeilinger et ses collègues autrichiens ont observé la diffraction de molécules de fullerène – des molécules contenant 60 atomes de carbone et formant des cages sont nommées buckminsterfullerènes, du nom de l'architecte américain Richard Buckminster Fuller. À notre échelle, c'est un peu comme si l'on avait envoyé un ballon de football dans un trou de la taille d'un but et que l'on avait vu ce ballon interférer et se comporter comme une onde. La longueur d'onde du fullerène est égale à la taille de la molécule divisée par 400.

On peut aussi étudier les effets de la décohérence sur un autre système de grande taille, les aimants supraconducteurs, qui se présentent souvent comme des anneaux métalliques de quelques centimètres de diamètre refroidis à des températures extrêmement basses. Dans les supraconducteurs, la conductivité est infinie, c'est-à-dire que les électrons y circulent librement.

Un anneau supraconducteur présente des niveaux d'énergie – ou états quantiques – particuliers. Il est donc possible de voir comment ils interfèrent quand on les rapproche, par exemple au moyen de courants circulant en sens opposés. D'innombrables études ont montré que plus les systèmes sont gros plus vite ils subissent une décohérence.

**« Une hypothèse correcte soulève une difficulté : quand elle est avérée, que les difficultés sont aplanies, que le contenu est cohérent, elle tend à devenir un objet en elle-même, une œuvre d'art. »**

**John Steinbeck, 1941**

**Fuite quantique** La décohérence serait une fuite de l'information quantique dans l'environnement, due à de multiples petites interactions. Elle n'entraîne pas l'effondrement de la fonction d'onde, mais cela y ressemble puisque les constituants quantiques d'un système sont progressivement découplés.

Ainsi, la décohérence ne résout pas toutes les difficultés liées aux mesures. Comme les dispositifs de mesure doivent être assez grands pour que nous puissions les lire, ce sont des systèmes quantiques complexes placés sur le chemin du système pur que nous cherchons à observer. Dès lors, les nombreuses particules qui constituent le détecteur interagissent de façon complexe avec leur objet. Les nombreux états intriqués subissent une décohérence progressive, jusqu'au moment où il n'y a plus qu'un mélange d'états séparés. Ce « tas de sable » quantique contient le résultat de la mesure finale où l'information quantique a été arrachée au système originel.

En résumé, le réseau enchevêtré des interactions quantiques montre que le « réalisme » est mort. Tout comme le « localisme » – la transmission de signaux par le biais de moyens de communication directs limités par la vitesse de la lumière –, le « réalisme », l'idée qu'une particule existe en tant qu'entité autonome, est une illusion. La réalité apparente du monde est un masque qui cache le fait qu'il est constitué de cendres quantiques.

# l'idée clé
## Fuites d'information

# 44 Les qubits

**Les ordinateurs quantiques pourraient un jour remplacer les techniques utilisant le silicium. Ils seraient assez puissants pour casser à peu près tous les codes. Seuls quelques prototypes sont capables de traiter des données binaires sous forme de « bits quantiques » – qubits –, ou états des atomes. Fondés sur la mécanique quantique, ils pourraient utiliser l'intrication pour faire des millions de calculs en même temps.**

Les systèmes quantiques sont minuscules et peuvent exister dans plusieurs états, ce qui offre la possibilité de construire des ordinateurs d'un type nouveau. Au lieu d'utiliser des dispositifs électroniques pour stocker et traiter l'information numérique, les atomes deviennent le cœur de l'ordinateur quantique.

L'ordinateur quantique a été proposé dans les années 1980 et se développe rapidement depuis quelques années, mais il est encore loin d'être opérationnel. Les physiciens ne réussissent qu'à lier une dizaine d'atomes d'une façon qui leur permette de faire des calculs. Il est en effet difficile d'isoler des atomes – ou d'autres briques élémentaires – pour que leurs états quantiques soient lus sans qu'ils soient perturbés.

Les ordinateurs classiques opèrent en décomposant les nombres et les instructions sous forme de codes binaires, une série de 0 et de 1. Nous comptons généralement en système décimal (base 10), mais les ordinateurs fonctionnent en base 2 : les nombres 2 et 6 seraient écrits respectivement en notation binaire « 10 » (1 fois 2 ($2^1$) + 0 fois 1 ($2^0$)) et « 110 » (1 fois 4 ($2^2$) + 1 fois 2 ($2^1$) + 0 fois 1 ($2^0$)). Chaque unité binaire 0 ou 1 est un « bit ». Un ordinateur électronique traduit le code binaire en états physiques, par exemple « ouvert » ou « fermé ». Chaque fois que deux choix se présentent, on peut utiliser des données binaires. Les chaînes de 0 et de 1 sont traitées au moyen de banques de portes logiques, câblées dans des puces en silicium.

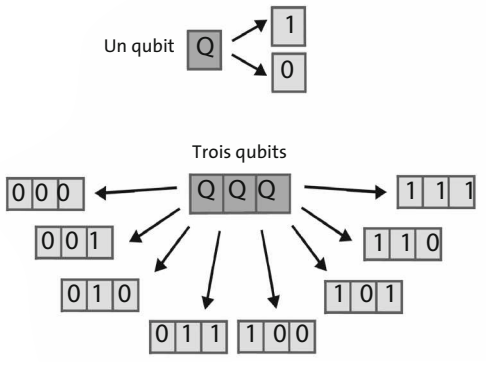
## chronologie

**1981**
Paul Benioff applique la théorie quantique aux ordinateurs

**1982**
Richard Feynman propose l'idée d'« ordinateur quantique »

**1989**
David Deutsch prouve qu'il est possible de construire un ordinateur quantique

**Bits quantiques** Les ordinateurs quantiques sont différents. Ils reposent aussi sur des états ouvert-fermé – nommés bits quantiques ou qubits – mais présentent une astuce. Comme les signaux binaires, les qubits adoptent deux états différents. En revanche, ils peuvent aussi exister dans un mélange de ces états.




**Trois qubits peuvent représenter huit états simultanément.**

Un unique qubit peut représenter une superposition de deux états, 0 et 1. Une paire de qubits peut impliquer quatre états et trois qubits couvrent huit états. Chaque fois que l'on ajoute un qubit, le nombre d'états mélangés double. Au contraire, un ordinateur classique ne serait que dans un de ces états à un instant donné. Ce doublement rapide des liens entre les qubits confère sa puissance à l'ordinateur quantique.

L'intrication est un autre avantage du monde quantique exploité dans les ordinateurs. Le comportement des qubits éloignés les uns des autres peut être contrôlé par les règles quantiques. Placer un des qubit dans un état particulier peut changer instantanément l'état de l'autre, ce qui apporte vitesse et adaptabilité aux mécanismes qui résolvent des problèmes mathématiques.

Pour ces raisons les ordinateurs quantiques pourraient être beaucoup plus rapides que les ordinateurs classiques pour réaliser certains types de calculs. Les réseaux quantiques sont particulièrement efficaces et adaptés à la résolution de problèmes qui nécessitent des réseaux complexes de communication.

En 1994, le domaine des ordinateurs quantiques fait un bon en avant quand le mathématicien Peter Shor élabore un algorithme de factorisation des grands nombres entiers – les nombres sont décomposés en produits de facteurs premiers – pour l'ordinateur quantique. L'algorithme de Shor est aujourd'hui appliqué par plusieurs équipes utilisant plusieurs qubits. Cette méthode a représenté un progrès technique important, mais les résultats obtenus à ce jour sont décevants : le nombre 15 a été décomposé en 3 fois 5, et le nombre 21 en 3 fois 7 ! Mais ce n'est que le tout début. Quand des ordinateurs quantiques assez grands seront disponibles, l'algorithme de Shor devrait révéler sa puissance.

**1995**
Shor propose son algorithme de factorisation

**2001**
L'algorithme de Shor est introduit dans un ordinateur quantique

**2007**
Une société canadienne construit un ordinateur à piège ionique de 16 bits

## Les dispositifs à qubits

- **Pièges ioniques :** ils utilisent la lumière et les champs magnétiques pour piéger des ions ou des atomes.
- **Pièges optiques :** ils utilisent des ondes lumineuses pour contrôler les particules.
- **Boîtes quantiques :** constituées de matériaux semi-conducteurs, elles permettent de manipuler les électrons.
- **Circuits supraconducteurs :** ils permettent aux électrons de se déplacer quasiment sans résistance à très basse température.

Il pourrait casser tous les codes cryptographiques utilisés sur Internet, ce qui nécessitera de nouvelles façons de sécuriser l'information en ligne.

**Rester cohérent** Comment construire un ordinateur quantique ? D'abord, il faut des qubits. Ces derniers peuvent être assemblés à peu près sur n'importe quel système quantique qui peut adopter deux états. Les photons sont les plus simples – on peut utiliser deux directions de polarisation, verticale et horizontale. Les atomes ou les ions présentant des arrangements différents d'électrons ont été testés, les supraconducteurs également, avec des courants d'électrons dirigés dans le sens des aiguilles d'une montre ou dans le sens inverse.

Tout comme le chat de Schrödinger peut être mort ou vivant tant qu'il reste dissimulé dans sa boîte, les qubits se superposent jusqu'à ce que leur état final soit scellé par la mesure. Comme pour le chat mythique, les fonctions d'onde des qubits peuvent s'effondrer partiellement en raison de leurs minuscules interactions avec les objets de leur environnement. Limiter la décohérence reste un enjeu essentiel pour les ordinateurs quantiques. Dans le dispositif, il est important de garder les qubits isolés, de façon à ce que leurs fonctions d'onde ne soient pas perturbées. Mais il faut aussi que les qubits restent manipulables.

Les qubits, par exemple des atomes ou des ions, peuvent être insérés dans de minuscules cellules. Une enveloppe en cuivre ou en verre peut les protéger des champs électromagnétiques environnants et on peut y connecter des électrodes. Les atomes doivent être maintenus dans le vide, pour éviter les interactions avec d'autres atomes. Les lasers et divers dispositifs optiques peuvent servir à perturber les énergies et les états quantiques des qubits, par exemple les niveaux électroniques ou les spins.

Jusqu'à présent, seuls des petits prototypes quantiques « enregistreurs » d'une dizaine de qubits connectés ont été fabriqués. Les obstacles restent nombreux. La construction même d'un qubit qui doit rester isolé est déjà difficile. Le conserver stable pendant longtemps sans qu'il ne perde sa cohérence est une autre difficulté, de même que garantir qu'il donne des résultats précis

et reproductibles – chaque fois que vous multipliez 3 par 5, vous voulez obtenir la bonne réponse ! La complexité croît encore quand on rassemble plusieurs qubits. Et à mesure que le nombre de qubits augmente, la difficulté de contrôler toute l'assemblée croît notablement. Les risques d'interaction se multiplient et la précision en pâtit.

**« Si les ordinateurs que vous construisez sont quantiques, alors les espions de tout bord voudront en acquérir. Ils casseront tous nos codes et liront nos messages jusqu'à ce que nous utilisions la cryptographie quantique. Alors seulement nous les intimiderons. »**

**Jennifer et Peter Shor**

### Les ordinateurs du futur

Alors que la technique des puces en silicium des ordinateurs classiques atteint ses limites, nous attendons les techniques quantiques qui seront beaucoup plus puissantes. Un ordinateur quantique pourrait faire des simulations de tout ce que l'on voudrait, et il pourrait même être la solution pour créer une machine « intelligente ».

En faisant de multiples calculs simultanément, les ordinateurs quantiques font des mathématiques dans plusieurs univers parallèles, plutôt que sur des machines parallèles. Comme la fonction de Shor, de nouveaux types d'algorithmes seront nécessaires pour exploiter cette puissance. Mais la source de la force des ordinateurs quantiques est aussi sa faiblesse. Ils sont si sensibles à leur environnement qu'ils sont intrinsèquement fragiles.

## l'idée clé

## Des calculs vraiment parallèles

# 45 La cryptographie quantique

**Notre capacité à envoyer des messages secrets codés est menacée par le fait que les ordinateurs deviennent si puissants qu'ils peuvent casser la plupart des codes. Une méthode infaillible consiste à utiliser l'incertitude quantique et l'intrication pour brouiller les messages. Tout indiscret perturberait l'état quantique du système, révélant qu'il y a eu une intrusion et entraînant l'autodestruction du message.**

Chaque fois que vous consultez votre compte bancaire en ligne ou que vous envoyez un message par Internet, votre ordinateur envoie des messages brouillés, de sorte que personne, hormis le destinataire, ne peut les lire. Les lettres et les nombres sont transformés en messages codés qui sont réassemblés à l'autre bout de la chaîne, et une clé sert à les transcrire.

Les codes secrets existent depuis longtemps. Jules César en utilisait un pour transmettre ses messages : il décalait les lettres utilisées de deux places vers la droite dans l'alphabet. Ainsi, « HELLO » devenait le mot incompréhensible « JGNNQ ».

Durant la Seconde Guerre mondiale, les nazis ont construit des automates codant leurs communications secrètes. Le dispositif le plus élaboré, qui ressemblait un peu à une machine à écrire, se nommait Enigma. La correspondance entre les lettres de l'original et la version codée dépendait de la façon dont la machine avait été construite. Il n'y avait pas de règle simple permettant à celui qui interceptait le message de le comprendre : il fallait une autre machine pour casser le code.

## chronologie

**1935**
Formulation du paradoxe EPR

**1938**
Turing commence à travailler sur les codes à Bletchley Park

**1982**
Alain Aspect confirme l'intrication quantique

Les mathématiciens britanniques travaillant à Bletchley Park, le site de décryptage du Royaume-Uni, notamment Alan Turing, ont réussi à casser le code Enigma en travaillant sur les probabilités d'occurrence de certaines combinaisons de lettres. Par exemple, pour « HELLO », Turing aurait supposé que le double N du mot codé était sans doute LL, mais peut-être EE ou OO (fréquents en anglais). En étudiant suffisamment de mots, il réussit à casser le code. Le déchiffrage des messages allemands à Bletchley a représenté un avantage notable pour les Alliés.

**« Je savais que le jour où je pourrais envoyer des messages sans fils et sans câbles à travers l'Atlantique n'était plus si lointain. »**

**Guglielmo Marconi**

**Clés secrètes** À mesure que les techniques de communication progressaient, il fallut trouver des codes de plus en plus complexes. Même les codes élaborés par des machines ne sont pas totalement sûrs. Pour qu'un code soit inviolable, il faut une association unique et aléatoire entre une lettre et la lettre codée qui lui correspond. Seul le destinataire qui dispose de la clé peut lire le message.

Les clés sont souvent de deux types : la cryptographie à clé publique et la cryptographie à clé secrète. Dans le premier cas, l'expéditeur choisit deux clés, une publique et une privée. Chacun peut envoyer un message en utilisant la clé publique, mais seul celui qui détient la clé privée pourra le lire. La seconde méthode utilise une clé unique que seules partagent les deux personnes qui veulent communiquer. Dans ce cas, le code est sûr à condition de rester secret.

Aucune méthode n'est infaillible. Mais quelques astuces quantiques les améliorent. Les clés publiques partagées nécessitent de repousser systématiquement les tentatives faites pour les casser, ce qui ralentit beaucoup les processus d'encodage et de déchiffrement. Plus les ordinateurs sont rapides, plus les clés doivent être longues. Quand les ordinateurs quantiques seront disponibles, la plupart des codes à clé publique seront cassés rapidement.

La cryptographie à clé secrète présente une difficulté : les deux personnes qui communiquent doivent se rencontrer pour échanger la clé. Si vous envoyez un message donnant des informations sur la clé, il peut lui-même être intercepté ou espionné. La physique quantique offre une autre solution.

**1998**
Des photons intriqués sont transportés sur 10 kilomètres à Genève

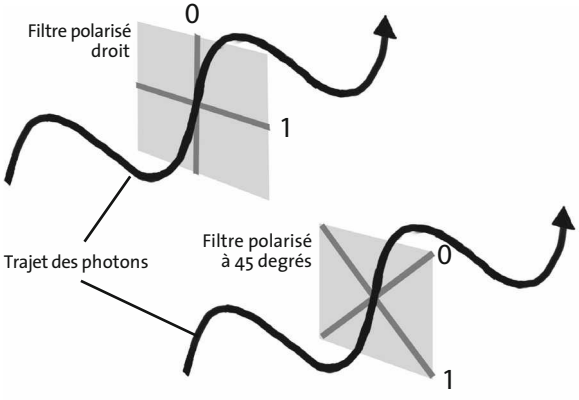
**2007**
Des photons intriqués sont transportés sur 144 kilomètres aux îles Canaries

**Les clés quantiques** On peut envoyer la clé en utilisant des photons. Un message en format binaire – une suite de 0 et de 1 – peut être transmis avec des photons polarisés différemment, verticalement et horizontalement. L'incertitude quantique peut servir à encoder l'information.

Supposons que deux personnes souhaitent envoyer un message. Alice « grave » son message binaire dans un groupe de photons en fixant leur polarisation. Au moment d'envoyer son message secret, elle le brouille. Elle peut le faire en faisant passer les photons à travers des filtres orthogonaux choisis au hasard. Les filtres peuvent mesurer deux polarisations orthogonales, à condition qu'elles soient orientées à 45 degrés l'une par rapport à l'autre (+ ou ×). Chaque photon présente alors quatre états de polarisation possibles : vertical, horizontal, diagonale à 45 degrés vers la gauche, diagonale à 45 degrés vers la droite.

Bob, le correspondant d'Alice, reçoit les photons polarisés. Il choisit un filtre pour chaque photon et enregistre ce qu'il mesure. Bob dispose donc d'observations apparemment aléatoires. La magie quantique opère quand Alice et Bob comparent leurs notes. Bob dit à Alice le filtre qu'il a utilisé pour chaque photon et Alice lui dit si c'est correct ou non. Cette information permet ensuite à Bob de traduire le message binaire.

Si seul Bob connaît le résultat, personne d'autre ne peut savoir ce que les deux amis se racontent. Mieux encore, si un espion tente d'intercepter les photons, la mécanique quantique nous dit que cela modifiera les propriétés des parti-




**Des filtres croisés sont utilisés pour encoder l'information dans des photons.**

cules. En comparant leurs données, Alice et Bob constateraient des anomalies et sauraient que quelqu'un les écoute.

**Messages intriqués** La cryptographie quantique est très prometteuse, même si elle n'en est qu'à ses débuts. Des messages ont été transmis, mais sur de courtes distances. La principale difficulté tient à ce que chaque photon interagit avec de nombreuses particules le long de son trajet, risquant de perdre l'information qu'il véhicule.

Une façon de lutter contre cette dégradation de l'information consiste à utiliser l'intrication quantique. Un photon n'aurait pas besoin de voyager sur des kilomètres jusqu'à sa destination ; il suffirait que le destinataire dispose d'un photon qui serait intriqué avec le photon de l'expéditeur. Quand l'expéditeur change l'état de son photon, le partenaire intriqué adopterait instantanément un état complémentaire. Ainsi, Bob pourrait déchiffrer le message d'Alice en ajoutant une étape qui tient compte des règles quantiques.

En 2007, Anton Zeilinger et ses collègues autrichiens ont réussi à envoyer des messages sur 144 kilomètres entre deux îles de l'archipel des Canaries en utilisant des paires de photons intriqués, un exploit connu sous le nom de téléportation quantique. Les photons ont des polarisations opposées et sont couplés. Le groupe de Zeilinger a transmis l'information par une fibre optique en manipulant un photon et en observant le partenaire intriqué à l'autre extrémité.

## l'idée clé

## Messages brouillés

# 46 Les boîtes quantiques

**De minuscules morceaux de silicium ou d'autres semi-conducteurs de quelques dizaines d'atomes se comportent comme une unique molécule. Des effets quantiques entrent en jeu et tous les électrons d'une « boîte quantique » ont une énergie qui suit les règles quantiques. Tout comme un atome d'hydrogène luit quand ses électrons perdent de l'énergie, les boîtes quantiques peuvent émettre de la lumière.**

Des puces à silicium aux diodes au germanium, les composants électroniques actuels sont liés à l'industrie des semi-conducteurs. Normalement, ces matériaux ne conduisent pas l'électricité – leurs électrons sont piégés dans le réseau cristallin. Mais si on leur confère une certaine énergie, les électrons se libèrent et se déplacent librement dans le cristal en portant un courant.

Les électrons doivent acquérir de l'énergie pour franchir la « bande interdite » et atteindre le seuil de mobilité. Si l'énergie acquise est supérieure à la bande interdite, ils sont libres de se mouvoir et la résistance électrique du matériau diminue rapidement. La flexibilité des semi-conducteurs, intermédiaires entre des isolants et des conducteurs, est intéressante pour les dispositifs électroniques contrôlables.

Les composants électroniques classiques utilisent généralement des matériaux semi-conducteurs assez massifs : une puce de silicium tient dans la main. Mais dans les années 1980, les physiciens ont montré que les petits constituants de ces éléments se comportent de façon spécifique. Les effets quantiques sont à l'œuvre.

Les petits fragments d'éléments semi-conducteurs, tel le silicium, comprenant seulement quelques dizaines ou centaines d'atomes sont connus sous le nom

## chronologie

**1925**
Pauli énonce son principe d'exclusion

**1981**
Alexei Ekimov publie un article sur les effets du confinement quantique

**1983**
Louis Brus publie un article sur les effets du confinement quantique dans les semi-conducteurs

de « boîtes quantiques ». Elles sont de l'ordre du nanomètre (un milliardième de mètre), approximativement la taille d'une grosse molécule.

**« Tout ce monde visible n'est qu'un trait imperceptible dans l'ample sein de la nature. »**

**Blaise Pascal, 1670**

Parce qu'ils sont si petits, les électrons dans une boîte quantique sont corrélés *via* des connexions quantiques. Par essence, l'ensemble commence par se comporter comme une entité unique. On les qualifie parfois d'« atomes artificiels ».

Comme ce sont des fermions qui respectent le principe d'exclusion de Pauli, chaque électron doit occuper un état quantique différent. Il en résulte une hiérarchie des électrons qui confère à une boîte quantique de nouveaux niveaux d'énergie, évoquant les orbitales dans un atome.

Quand l'énergie d'un électron augmente, il laisse un « trou » dans le réseau, qui est positivement chargé. La paire électron-trou est analogue à un atome d'hydrogène (un proton et un électron). Et comme un atome d'hydrogène, une boîte quantique peut absorber ou émettre des photons, aussi bien que les électrons gagnent ou perdent de l'énergie. La boîte quantique émet une lueur.

## Biocapteurs

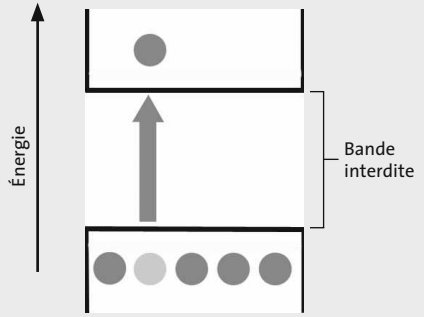
Beaucoup de biologistes utilisent des colorants, dont certains sont fluorescents, pour suivre les modifications subies par les organismes au cours d'expériences en laboratoire ou dans la nature. Certains de ces colorants présentent des inconvénients, ils peuvent par exemple se dégrader rapidement, disparaître ou pâlir. Inversement, les boîtes quantiques offrent quelques avantages. Comme ce ne sont pas des réactifs chimiques, ils durent plus longtemps. De surcroît, la lumière que les boîtes quantiques émettent se limitant à un domaine étroit de longueurs d'onde, on peut la recueillir facilement au moyen de filtres bien choisis. Les boîtes quantiques sont des dizaines de fois plus brillantes que les colorants usuels et des centaines de fois plus stables.

**1988**
Mark Reed propose le nom de « boîtes quantiques »

**1990**
Des chercheurs parviennent à faire rougeoyer du silicium

## Le confinement quantique

Quand la taille d'un minuscule semi-conducteur est de l'ordre de la largeur de la fonction d'onde d'un électron, des effets quantiques se manifestent. Les boîtes quantiques se comportent alors comme des molécules isolées et leurs bandes d'énergie se décalent. C'est le confinement quantique.




**Des électrons peuvent atteindre des niveaux d'énergie supérieurs quand ils sont libres de leurs mouvements. C'est le mécanisme qui permet aux boîtes quantiques d'émettre de la lumière.**

L'énergie moyenne entre deux barreaux de l'échelle des états quantiques dépend de la taille de la boîte quantique. Il en est de même pour la longueur d'onde de la lumière émise. Les boîtes les plus grandes ont des barreaux plus rapprochés et émettent dans le rouge. Les petites boîtes émettent dans le bleu. Cela offre un éventail d'usages possibles des boîtes quantiques utilisés en tant que sources lumineuses, marqueurs ou capteurs.

**Les boîtes à l'œuvre** Les physiciens pensent depuis longtemps que le silicium pourrait émettre de la lumière. Le silicium est, par exemple, utilisé dans les panneaux solaires parce qu'il devient conducteur dès qu'il absorbe une lumière ultraviolette. Mais l'inverse semblait impossible, jusqu'à ce qu'en 1990 des chercheurs européens aient réussi à faire rougeoyer un petit morceau de silicium grâce à son comportement quantique.

Depuis, les chercheurs ont obtenu une émission de lumière verte et bleue. La lumière bleue est particulièrement intéressante car il est difficile de l'obtenir, sauf à se placer dans des conditions expérimentales extrêmes. De nouveaux types de lasers bleus seront peut-être construits avec des boîtes quantiques.

Des boîtes construites avec du silicium et du germanium permettent d'obtenir un spectre de longueurs d'onde, de l'infrarouge à l'ultraviolet. Leur luminosité peut être réglée précisément et facilement, simplement en faisant varier leur taille. La technique des boîtes quantiques peut servir à fabriquer des diodes lumineuses, aussi bien pour des lampes consommant peu d'énergie que pour des écrans de télévision ou d'ordinateur. Les boîtes quantiques seront peut-être un jour utilisées comme des qubits pour les ordinateurs quantiques et la

**« L'histoire des semi-conduteurs n'est pas celle d'une grande théorie héroïque, mais celle d'un travail intelligent et minutieux. »**

**Ernest Braun, 1992**

cryptographie. Et comme elles se comportent comme des atomes, elles peuvent aussi être intriquées.

Les boîtes quantiques sont utilisables comme biocapteurs – détectant, par exemple, des composés chimiques nuisibles dans l'environnement. Leur durée de vie est supérieure à celle des colorants chimiques fluorescents et elles émettent une lumière d'une longueur d'onde précise, ce qui en facilite la détection. Les boîtes quantiques interviennent aussi dans les techniques optiques telles que les interrupteurs rapides ou les portes logiques pour les ordinateurs optiques, ou la signalisation dans les fibres optiques.

Comment les boîtes quantiques sont-elles fabriquées ? La plupart des dispositifs semi-conducteurs sont obtenus en gravant par exemple des feuilles de silicium. Au contraire, les boîtes quantiques sont assemblées atome par atome. Ainsi, leur taille et leur structure sont contrôlées précisément. Elles peuvent aussi être fabriquées comme les cristaux, dans des solutions. Elles sont souvent constituées de silicium et de germanium, mais aussi d'alliages de cadmium et d'indium.

Certains chercheurs parviennent à connecter plusieurs boîtes quantiques pour fabriquer des structures microscopiques ou des circuits. Les réseaux sont reliés par de minuscules fils quantiques. Mais les fils doivent être fabriqués en prenant beaucoup de précautions et attachés de façon à ce que l'état quantique de la boîte soit préservé. Les boîtes peuvent aussi être constituées de molécules organiques longues et fines reliées chimiquement à leur surface. De cette façon, on peut construire des treillis, des feuilles ou autres réseaux de boîtes quantiques.

## l'idée clé
## L'union fait la force

# 47 La supraconduction

**À des températures extrêmement basses, la résistance électrique de certains métaux, alliages et céramiques disparaît. Les courants circulent librement sans jamais perdre d'énergie. La mécanique quantique en est responsable. Les électrons peuvent se lier, à condition que le réseau des ions positifs se torde légèrement.**

En 1911, le physicien néerlandais Heike Kamerlingh Onnes étudiait les propriétés des métaux refroidis à très basse température. Il avait mis au point une méthode pour refroidir l'hélium jusqu'à ce qu'il devienne liquide, à 4,2 kelvins (4,2 degrés au-dessus de la température la plus basse possible, le zéro absolu, soit –273 °C). En plaçant des métaux dans de l'hélium liquide, il pouvait étudier les modifications de leur comportement électrique.

Il plaça un tube à essai contenant du mercure dans de l'hélium liquide et eut la surprise de constater que la résistance électrique du mercure s'effondrait. Ce métal est liquide à la température ambiante et devient solide à 4 kelvins. À cette température, le mercure se comporte comme un conducteur parfait, c'est-à-dire que sa résistance s'annule. Le mercure solide est « supraconducteur ».

D'autres métaux, tels le plomb, le niobium et le rhodium sont également supraconducteurs, alors que les métaux usuels, tels le cuivre, l'argent ou l'or ne le sont pas. Le plomb devient supraconducteur à 7,2 kelvins, et tous les éléments qui ont cette propriété ont également une « température critique » caractéristique, au-dessous de laquelle la résistance disparaît. Les courants électriques qui circulent dans les supraconducteurs ne ralentissent jamais. De tels courants peuvent circuler dans des anneaux en plomb super-refroidis pendant des années sans perdre d'énergie. Au contraire, à température ambiante, ces courants diminuent rapidement. Dans les supraconducteurs, la résistance est si faible que des courants pourraient circuler pendant des millions d'années sans faiblir. Les règles quantiques assurent la conservation de l'énergie.

## chronologie

**1911**
Onnes découvre la supraconduction

**1933**
Découverte de l'effet Meissner

**1957**
Publication de la théorie BCS

## L'origine de la supraconduction

Il fallut de nombreuses années pour comprendre l'origine de la supraconduction. En 1957, trois physiciens américains, John Bardeen, Leon Copper et John Schrieffer, publièrent leur « théorie BCS » de la supraconduction. Ils y décrivaient comment les mouvements des électrons se coordonnent dans un matériau supraconducteur, de sorte qu'ils se comportent comme un système unique qui peut être décrit par des équations d'ondes.

**« À 4,2 kelvins, le mercure a adopté un nouvel état qui, compte tenu de ses propriétés électriques particulières, peut être nommé état supraconducteur. »**

**Heike Kamerlingh Onnes, 1913**

Les métaux sont constitués d'un réseau d'ions chargés positivement entourés d'une mer d'électrons. Les électrons se déplacent librement dans le réseau, produisant un courant électrique. Mais ils doivent vaincre les forces qui freinent leur mouvement. À température ambiante, les atomes ne sont pas immobiles, mais ils vibrent. Par conséquent, les électrons doivent esquiver les ions qui bougent et sont diffusés quand ils en heurtent un. Ces collisions sont responsables de la résistance électrique, freinant le courant et dissipant de l'énergie. Aux températures extrêmement basses, les ions ne bougent presque plus, si bien que les électrons ne se cognent plus et avancent sans être déviés. Toutefois, ce scénario n'explique pas à lui seul pourquoi la résistance s'effondre à la température critique (elle pourrait diminuer progressivement).

Cela tiendrait en partie à ce que la température critique dépend de la masse atomique du matériau supraconducteur. Si cela ne tenait qu'aux propriétés des électrons, ce ne serait pas le cas puisque tous les électrons sont les mêmes. Ainsi, les isotopes lourds du mercure, par exemple, ont une température critique un peu plus basse. On en déduit que tout le réseau cristallin est impliqué : les ions lourds bougent, au même titre que les électrons.

D'après la théorie BCS, les électrons se « tiennent par la main » et commencent une sorte de danse. Les vibrations propres du réseau donnent le tempo à la valse des électrons. Les électrons forment des couples – les paires de Cooper – qui sont pieds et poings liés.

**1986**
Une température critique de 30 kelvins est atteinte

**1987**
La limite de l'azote liquide est dépassée

## Lévitation magnétique

Si un petit aimant est placé au-dessus d'un supraconducteur, il est repoussé à cause de l'effet Meissner. Le supraconducteur se comporte comme un miroir magnétique, faisant apparaître à sa surface des champs opposés, ce qui repousse l'aimant. Il peut même arriver que l'aimant flotte dans les airs au-dessus de la surface du supraconducteur : c'est la lévitation magnétique. Ces phénomènes pourraient servir à la lévitation magnétique, ou « maglev », de systèmes de transport. Des trains construits sur ce principe pourraient planer ou voler au-dessus de rails supraconducteurs, sans frottements.

Les électrons sont des fermions, ce qui devrait leur interdire de se trouver dans le même état quantique en raison du principe d'exclusion de Pauli. Mais quand ils sont appariés, les électrons supraconducteurs se comportent comme des bosons et peuvent être dans le même état. Il en résulte que l'énergie de l'ensemble baisse. Une bande d'énergie interdite au-dessus d'eux sert de tampon. Aux températures très basses, les électrons n'ont pas assez d'énergie pour se libérer ou traverser le réseau. Ils évitent les collisions qui sont à l'origine de la résistance.

La théorie BCS prévoit que la supraconduction disparaît si les électrons acquièrent assez d'énergie pour franchir la bande interdite. Et la largeur de la bande interdite dépend de la température critique.

Les supraconducteurs ont une résistance nulle, mais ils ont une autre propriété étonnante : aucun champ magnétique ne peut y apparaître. Walther Meissner et Robert Ochsenfeld ont fait cette découverte en 1933. C'est l'effet Meissner. Un supraconducteur repousse les champs magnétiques en créant des courants de surface qui annulent exactement le champ magnétique qui serait engendré en son sein s'il s'agissait d'un conducteur normal.

**Température en hausse** Dans les années 1960, plusieurs équipes tentèrent de trouver des supraconducteurs ayant des températures critiques supérieures, ce qui en faciliterait l'utilisation. L'hélium liquide est difficile à produire et à conserver. Au contraire, l'azote liquide, à 77 kelvins, est plus facile à obtenir et à manipuler. Les physiciens ont donc cherché des matériaux qui seraient supraconducteurs à des températures permises par l'azote liquide. Le Graal serait d'obtenir des matériaux supraconducteurs à température ambiante, mais on en est encore loin !

Certains alliages, par exemple ceux du niobium et du titane, ou du niobium et de l'étain, sont supraconducteurs à des températures un peu supérieures (10 et 18 kelvins respectivement) à celles des éléments purs. Ils ont été utilisés pour fabriquer des fils supraconducteurs utilisés dans les puissants aimants des accélérateurs de particules.

**« Un chercheur doit être entraîné et perspicace pour ne pas perdre de vue son objectif, et pour repérer un indice sur le long chemin qui y conduit. »**

**John Polanyi, 1986**

Le physicien britannique Brian Josephson a fait ensuite une prédiction qui a abouti à la mise au point de nouveaux dispositifs. Il montra qu'on pouvait obtenir un courant en utilisant un sandwich de deux supraconducteurs séparés d'une mince couche d'isolant. L'énergie électrique pouvait circuler dans l'isolant par effet tunnel, formant une jonction Josephson. Ces dispositifs sont très sensibles et peuvent détecter de minuscules champs magnétiques, des milliards de fois plus faibles que celui de la Terre.

En 1986, Georg Bednorz et Alex Müller découvraient des céramiques qui devenaient supraconductrices à 30 kelvins, franchissant ainsi une étape importante. Ces matériaux étaient faits de mélanges de baryum, de lanthane, de cuivre et d'oxygène (des cuprates). Ce résultat était inattendu, parce que les céramiques sont utilisées comme isolants à température ambiante ; ils protègent par exemple les circuits électriques à haute tension.

Une céramique contenant de l'yttrium à la place du lanthane a été élaborée l'année suivante. Elle devenait supraconductrice à 90 kelvins, au-dessus de la température de l'azote liquide, ce qui commençait à être économiquement intéressant. On chercha d'autres mélanges qui pourraient devenir supraconducteurs à des températures encore plus hautes. Aujourd'hui, on dépasse 200 kelvins (sous forte pression), ce qui reste malgré tout encore loin de la température ambiante !

## l'idée clé

### Dans le mouvement

# 48 Les condensats de Bose-Einstein

**Quand des groupes de bosons sont refroidis à des températures extrêmement basses, ils peuvent atteindre leur niveau d'énergie le plus bas. Le nombre de bosons confinés dans le même état n'est pas limité. D'étranges comportements quantiques se manifestent, tels que la superfluidité ou des interférences.**

Selon que leur spin est un entier ou un demi-entier, les particules sont soit des bosons, soit des fermions. Les photons, d'autres porteurs de forces et des atomes symétriques tel l'hélium (dont le noyau contient deux protons et deux neutrons) sont des bosons. Les électrons, protons et neutrons sont des fermions.

D'après le principe d'exclusion de Pauli, deux fermions ne peuvent exister dans le même état quantique. Au contraire, les bosons ne sont pas soumis à cette contrainte. En 1924, Einstein s'est demandé ce qui se passerait si de nombreux bosons adoptaient le même état fondamental, comme s'ils étaient entassés dans un trou noir quantique. Comment se comporterait une telle communauté de clones ?

Le physicien indien Satyendra Nath Bose avait envoyé à Einstein un article sur les statistiques quantiques des photons. Einstein trouva ce travail si intéressant qu'il traduisit l'article de Bose en allemand et le fit publier. Il voulut appliquer l'idée à d'autres particules. Il en résulta une description statistique des propriétés quantiques des bosons, particules aujourd'hui nommées d'après Bose.

Bose et Einstein imaginèrent un gaz constitué de bosons. Dans un gaz, les atomes ont des énergies proches d'une valeur moyenne qui dépend de la tem-

## chronologie

**1924**
Einstein propose le concept des condensats de Bose-Einstein

**1925**
Principe d'exclusion de Pauli

**1938**
London constate la nature superfluide de l'hélium liquide

pérature du gaz ; de même, des bosons devraient adopter des états quantiques différents. Les physiciens établirent l'expression mathématique de cette distribution d'états, aujourd'hui nommée statistique de Bose-Einstein, qui s'applique à tous les groupes de bosons.

> **« À partir d'une certaine température, les molécules se "condensent" sans forces d'attraction, c'est-à-dire qu'elles s'accumulent à vitesse nulle. La théorie est belle, mais est-elle vraie ? »**
>
> **Albert Einstein, 1924**

Puis Einstein se demanda ce qui se passerait si la température baissait notablement. L'énergie des bosons devrait décroître, jusqu'à ce qu'ils se « condensent » dans l'état d'énergie le plus bas. En théorie, on pourrait mettre autant de bosons que l'on voudrait, et ils formeraient un nouveau type de matière, ce que l'on nomme aujourd'hui un condensat de Bose-Einstein. Si un condensat contenait beaucoup de particules, il pourrait présenter un comportement quantique à grande échelle.

**Les superfluides** Il fallut attendre les années 1990 pour que l'on parvienne à créer un condensat de Bose-Einstein en laboratoire. Entre-temps, l'étude de l'hélium avait apporté quelques informations. L'hélium liquide se condense à environ 4 kelvins. Comme Pyotr Kapitsa, John Allen et Don Misener l'avaient montré en 1938, si l'hélium est refroidi encore davantage, jusque vers 2 kelvins, il commence à se comporter de façon étonnante. Comme le mercure, qui devient supraconducteur quand il est refroidi à très basse température, l'hélium liquide perd alors toute résistance à l'écoulement.

L'hélium liquide, qui perd toute viscosité, devient « superfluide ». Fritz London émit l'hypothèse que l'hélium subissait une condensation de Bose-Einstein : il supposait que des atomes d'hélium tombaient tous ensemble dans leur état d'énergie le plus bas, où ils ne subissaient plus aucune collision. Mais, comme l'hélium superfluide est un liquide et non un gaz, les équations d'Einstein ne s'appliquent pas suffisamment bien pour que l'on puisse tester l'hypothèse de London.

Les méthodes nécessaires à l'obtention d'un condensat gazeux en laboratoire furent longues à mettre au point. Il n'est pas aisé de rassembler tant de particules dans le même état quantique. Les particules doivent être identiques en

**1995**
Fabrication du premier condensat de Bose-Einstein gazeux en laboratoire

**1999**
Lene Hau réussit à arrêter un faisceau de lumière

### Satyendra Nath Bose (1894-1974)

Satyendra Nath Bose est né à Calcutta, en Inde. Il étudia les mathématiques et obtint une maîtrise en 1913, avec la meilleure note jamais attribuée par l'université de Calcutta. En 1924, Bose publia un article important dans lequel il présentait une nouvelle façon de dériver les lois de Max Planck sur le rayonnement du corps noir. Cela marqua les débuts du champ des statistiques quantiques et attira l'attention d'Einstein qui traduisit l'article en allemand et le fit republier. Bose travailla en Europe pendant plusieurs années avec Louis de Broglie, Marie Curie et Einstein, avant de partir en 1926 à l'université de Dacca, au Bengale, où il installa des laboratoires pour y faire de la cristallographie aux rayons X. Après la partition des Indes, il retourna à Calcutta. Il passa beaucoup de temps à faire la promotion du bengali. Bose ne reçut pas le prix Nobel. Quand on l'interrogeait à ce propos, il répondait : « J'ai reçu toute la reconnaissance que je méritais. »

termes de mécanique quantique, ce qui est difficile à obtenir avec des atomes. La meilleure façon d'y parvenir consiste à préparer un gaz dilué, à refroidir les atomes constitutifs à des températures extrêmement basses, et à les rapprocher suffisamment pour que leurs fonctions d'onde se recouvrent.

On refroidit aujourd'hui des atomes à quelques nanokelvins (milliardièmes de kelvin) en les maintenant dans des pièges magnétiques et en les exposant à des lasers. En 1995, Eric Cornell et Carl Wieman, de l'université du Colorado, à Boulder, ont créé le premier condensat de Bose-Einstein en utilisant 2000 atomes de rubidium à 170 nanokelvins.

Quelques mois plus tard, Wolfgang Ketterle de l'Institut de technologie du Massachusetts, qui partagea ultérieurement le prix Nobel avec Cornell et Wieman, continua avec des atomes de sodium. En utilisant cent fois plus d'atomes, Ketterle révéla de nouveaux comportements, notamment des interférences entre deux condensats.

**Étrangeté superfroide** Les condensats de Bose-Einstein et les superfluides font aujourd'hui l'objet de nombreuses recherches qui en révèlent les propriétés étranges. Quand des condensats ou des superfluides sont agités ou mis en rotation, des vortex peuvent apparaître. Le moment angulaire de ces tourbillons est quantifié et est égal à un multiple d'un moment unitaire.

Les condensats trop gros deviennent instables et explosent : les condensats de Bose-Einstein sont fragiles. La plus petite interaction avec le monde extérieur, ou toute augmentation de la température, risque de les détruire. Les expérimentateurs cherchent à stabiliser les atomes pour assembler des condensats plus volumineux.

Un facteur important de stabilité des condensats est l'attraction ou la répulsion naturelle des atomes. Les atomes de lithium, par exemple, ont tendance à s'attirer. Ainsi, des condensats implosent spontanément quand ils atteignent une taille critique, expulsant le matériau présent, comme le font les supernovæ. Les isotopes qui se repoussent naturellement, tel le rubidium-87, construisent des condensats plus stables.

Les condensats et les superfluides peuvent servir à arrêter la lumière. En 1999, le physicien Lene Hau, de l'université d'Harvard, a réussi à ralentir, puis à stopper un faisceau laser, en le faisant passer par une cellule en verre remplie de vapeur ultrafroide de sodium. Le condensat attire les photons entrant pour qu'ils adoptent son état jusqu'à ce qu'ils s'arrêtent.

Lene Hau diminua l'intensité du laser jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de photons dans le condensat. Mais les spins des photons sont restés imprimés dans les atomes de sodium. L'information quantique peut être libérée quand on envoie un autre faisceau laser sur la cellule. Ainsi, de l'information peut être transmise par la lumière, puis stockée ou gommée par des atomes ultrafroids. Des condensats de Bose-Einstein seront peut-être utilisés un jour dans la communication quantique.

## l'idée clé

## Étranges et quantiques

# 49 La biologie quantique

**Des effets quantiques, tels la dualité onde-corpuscule, l'effet tunnel et l'intrication joueraient des rôles importants dans les organismes vivants. Ils participeraient aux réactions chimiques, canaliseraient l'énergie autour des cellules et aideraient les oiseaux à s'orienter par rapport au champ magnétique terrestre.**

Les mécanismes quantiques commandent le monde froid et probabiliste de l'atome. Mais quelle est leur importance dans le monde naturel ? La mécanique quantique doit opérer sur les molécules dans les plantes, les animaux ou le corps humain. Mais il est difficile d'imaginer comment les fonctions d'onde pourraient rester cohérentes avec tout ce qui se passe dans une cellule ou une bactérie.

Le physicien autrichien Erwin Schrödinger a été le premier à parler de biologie quantique dans un livre, *Qu'est-ce que la vie ?,* publié en 1944. Les scientifiques font aujourd'hui des découvertes qui suggèrent que la mécanique quantique participerait à certains phénomènes naturels. Les oiseaux auraient des compétences « quantiques » qui leur permettraient de détecter le champ magnétique terrestre et de l'utiliser pour se diriger. La photosynthèse – le mécanisme de conversion de l'eau, du dioxyde de carbone et de la lumière solaire en énergie – reposerait aussi sur des mécanismes subatomiques.

**« Les chromosomes […] représentent la loi et le pouvoir exécutif – ou, pour utiliser une autre image, le plan de construction et l'art du bâtisseur, tout en un. »**

**Erwin Schrödinger, 1944**

## chronologie

**1944**
Schrödinger publie *Qu'est-ce que la vie ?*

**2004**
Un modèle de radicaux libres est proposé pour expliquer le sens de l'orientation des oiseaux

**2007**
Des ondes quantiques ont été observées dans des bactéries photosynthétiques

Quand la lumière solaire atteint une feuille, des photons percutent des molécules de chlorophylle qui absorbent leur énergie. Cette dernière est dirigée vers la région de la cellule qui fabrique des sucres. Comment la cellule procède-t-elle ?

L'énergie des photons se répand dans la cellule de la plante par vagues. Tout comme la théorie de l'électrodynamique quantique décrit les interactions des photons et de la matière en termes de combinaison des chemins possibles, le chemin suivi étant le plus probable, on peut décrire la transmission de l'énergie dans la feuille comme une superposition d'ondes. En d'autres termes, le chemin optimal conduit l'énergie des photons vers le centre des réactions chimiques de la cellule.

Plusieurs équipes de chimistes, notamment à l'université de Californie, à Berkeley, ont trouvé des preuves de cette idée. En envoyant des impulsions laser sur des cellules réalisant la photosynthèse dans des bactéries, ils ont montré l'existence d'ondes d'énergie se déplaçant dans la cellule. Ces ondes agissent ensemble et subissent des phénomènes d'interférences, ce qui montre qu'elles sont cohérentes. Tout cela a lieu à température ambiante.

## Qu'est-ce que la vie ?

En 1944, Erwin Schrödinger publia *Qu'est-ce que la vie ?,* un ouvrage de vulgarisation scientifique. Il y résumait les conférences qu'il avait données à Dublin sur la façon dont la physique et la chimie pouvaient rendre compte de ce qui se passe dans un organisme vivant. Schrödinger croyait que les informations concernant l'hérédité étaient stockées dans les liaisons chimiques des molécules. À cette époque, on ignorait encore le rôle des gènes et de l'ADN dans la reproduction. Le livre commençait par expliquer comment l'ordre naît du désordre. Selon l'auteur, comme la vie requiert de l'ordre, le code d'un organisme vivant devrait être très long, fait de multiples atomes capables de s'organiser. Les mutations résulteraient de sauts quantiques. Le livre se terminait avec des réflexions sur la conscience et le libre arbitre. Schrödinger pensait que la conscience était un état séparé du corps, bien que dépendant de lui.

**2010**

La cohérence quantique est mesurée à température ambiante dans des bactéries

**2011**

L'intrication interviendrait dans la boussole interne des oiseaux

On ignore encore pourquoi ces effets quantiques coordonnés ne sont pas perturbés par tous les événements chimiques qui se déroulent dans les cellules. Selon le chimiste Seth Lloyd, le bruit aléatoire dans l'environnement cellulaire aiderait la photosynthèse à se dérouler. Les mouvements internes empêcheraient l'onde d'énergie d'être piégée en des sites particuliers et la libéreraient en la bousculant légèrement.

**Détection quantique** Les effets quantiques sont également importants dans d'autres réactions cellulaires. Des protons passeraient d'une molécule à une autre par effet tunnel dans certaines réactions catalysées par des enzymes. Sans cette aide quantique, le proton ne pourrait pas franchir la barrière d'énergie. L'effet tunnel serait aussi à l'œuvre pour les électrons dans l'odorat, expliquant comment les récepteurs localisés dans le nez seraient activés.

Les oiseaux migrateurs tirent des informations du champ magnétique terrestre. Des photons atteignant la rétine d'un oiseau activent un capteur magnétique. On ne connaît pas bien le mécanisme sous-jacent, mais il n'est pas exclu que les photons incidents créent des paires de radicaux libres, des molécules portant un électron non apparié, ce qui les rend très réactives. Le spin quantique de cet électron excédentaire s'alignerait avec le champ magnétique.

Les molécules réagissent les unes avec les autres de différentes façons qui dépendent du spin de l'électron, ce qui permet de transmettre la direction du champ magnétique terrestre. Certaines molécules seraient synthétisées uniquement quand le système est dans un état particulier. Et la concentration de ces molécules indiquerait à l'oiseau la direction du magnétisme terrestre.

Simon Benjamin, physicien à l'université d'Oxford, a émis l'hypothèse que les électrons non appariés de deux radicaux libres pourraient être intriqués, de sorte que même si les molécules se séparent, leurs spins quantiques restent liés. Cette intrication persisterait quelques dizaines de microsecondes dans la boussole interne d'un oiseau, beaucoup plus que dans de nombreux systèmes chimiques classiques.

La mécanique quantique interviendrait dans la perception de l'orientation chez les animaux et les plantes. Certains insectes et plantes sont sensibles aux champs magnétiques. Ainsi, la croissance de la plante *Arabidopsis thaliana* est inhibée par la lumière bleue, mais un champ magnétique peut modifier cet effet qui implique peut-être le mécanisme des radicaux libres.

La dextérité quantique offre de nombreux avantages aux organismes. Elle semble surmonter la tendance naturelle au désordre et opère à température

**« D'après tout ce que nous savons aujourd'hui de la structure du vivant, nous devons nous attendre à découvrir que son fonctionnement ne peut être réduit aux lois ordinaires de la physique. »**

**Erwin Schrödinger, 1956**

ambiante, contrairement aux phénomènes physiques, qui exigent des environnements refroidis à des températures extrêmement basses.

Les scientifiques ignorent si les effets quantiques ont été sélectionnés au cours de l'évolution ou s'ils se manifestent parce que les organismes vivants se forment dans des environnements confinés. Peut-être sera-t-il possible un jour de comparer, par exemple, des molécules d'espèces d'algues apparues à différentes époques, et d'étudier les modifications évolutives au fil du temps ?

Si les scientifiques en apprennent plus sur les effets quantiques dans le vivant, de nouvelles techniques pourraient voir le jour. La photosynthèse artificielle pourrait être une toute nouvelle source d'énergie, utilisable dans des panneaux solaires d'un type nouveau. L'ordinateur quantique en bénéficierait peut-être aussi si l'on découvre comment les systèmes biologiques évitent la décohérence.

## l'idée clé

# Une petite main quantique

# 50 La conscience quantique

**Du libre arbitre au sens du temps, certains ont pensé qu'il existait des parallèles entre la façon dont notre esprit travaille et la théorie quantique. Les physiciens se sont demandé si la conscience pourrait résulter d'effets quantiques sur les structures microscopiques du cerveau, de l'effondrement de fonctions d'onde ou de l'intrication. Mais tout cela reste du domaine de la spéculation.**

Avec son réseau intriqué de neurones et de synapses, le cerveau est l'un des systèmes les plus complexes. Aucun ordinateur n'a une puissance de traitement comparable. La théorie quantique explique-t-elle certaines propriétés si spécifiques du cerveau ?

Il existe deux différences fondamentales entre le cerveau et un ordinateur : la mémoire et la vitesse de traitement. Un ordinateur a une capacité de mémoire bien supérieure à celle du cerveau, un disque dur n'ayant quasiment pas de limite. Mais le cerveau est plus efficace en termes de rapidité d'apprentissage. Et l'on reconnaît une personne dans une foule bien plus vite qu'aucun automate.

La puissance de traitement du cerveau est des centaines de milliers de fois supérieure à celle des puces informatiques les plus perfectionnées. Pourtant, les signaux sont transmis assez lentement dans le cerveau, un million de fois moins vite que les signaux numériques. Le cerveau a une structure hiérarchisée : il est constitué de couches qui dialoguent. Les ordinateurs ont en principe une couche unique, capable de faire des millions de calculs leur permettant, par exemple, de battre aux échecs les grands maîtres.

**La conscience** Comment les traitements effectués dans le cerveau font-ils naître la conscience ? Il est difficile de définir précisément ce qu'est la

## chronologie

**1936**
Turing publie un article sur les principes de l'ordinateur

**1989**
Penrose propose un lien entre la gravitation quantique et la conscience

conscience, mais on admet que c'est la façon dont nous ressentons ce que nous vivons. Nous avons le sens du présent, de ce que nous vivons ici et maintenant. Nous avons le sens du temps qui passe et du passé. Notre cerveau stocke des souvenirs, et nous leur donnons un sens. Nous faisons des prédictions simples à propos du futur, ce qui nous permet de prendre des décisions.

De nombreux physiciens, notamment des pionniers de la physique quantique, tels Niels Bohr et Erwin Schrödinger, ont pensé que les systèmes biologiques, notamment le cerveau, se comportaient d'une façon que ne peut décrire la physique classique. À mesure que la théorie quantique se précisait, divers mécanismes d'émergence de la conscience ont été proposés, de l'effondrement de fonctions d'onde à l'intrication. Mais nous ignorons toujours comment naît la conscience.

David Bohm s'est demandé ce qui se passe quand nous écoutons de la musique. Lorsque nous écoutons une mélodie, nous mémorisons la modulation et associons ce souvenir aux sensations que nous éprouvons, aux sons, aux accords

## L'intelligence artificielle

Le mathématicien britannique Alan Turing, reconnu aujourd'hui comme le père de l'informatique, fut l'un des premiers à essayer de quantifier la façon dont le cerveau traite l'information. En 1936, il publia un article montrant qu'il était possible de construire une machine capable de faire n'importe quel calcul exprimé sous forme d'une série d'opérations ou d'instructions, c'est-à-dire sous forme d'un algorithme. Il tenta d'imaginer le cerveau comme une sorte d'ordinateur et chercha les règles de son fonctionnement. Turing proposa un test d'intelligence artificielle, qui porte aujourd'hui son nom : un ordinateur ne pourra être considéré comme intelligent que le jour où il parviendra à répondre à n'importe quelle question d'une façon telle qu'on ne pourra distinguer la réponse de l'ordinateur de celle d'un homme.

En 2011, un ordinateur nommé Watson y est presque parvenu. Lors d'une émission télévisée diffusée aux États-Unis, la machine l'a emporté sur deux candidats, réussissant à utiliser des expressions familières et des métaphores, à faire des jeux de mots et à plaisanter. Watson illustre les prouesses que peut accomplir l'intelligence artificielle, mais ce système ne fonctionne pas du tout comme le cerveau humain.

**1999**

Selon Max Tegmark, la décohérence empêche l'apparition d'états quantiques dans le cerveau

**« Selon moi, la conscience est fondamentale. Nous ne pouvons aller au-delà de la conscience. Tout ce dont nous parlons, tout ce que nous croyons exister, a un prérequis : la conscience. »**

**Max Planck, 1931**

et à diverses émotions. La conscience émerge de cette confrontation de l'expérience en cours avec nos souvenirs.

Bohm pensait que tout cela découlait de l'ordre sous-jacent de l'Univers. Tout comme les photons sont à la fois ondes et particules et de même que nous observons l'une ou l'autre forme selon les circonstances, l'esprit et la matière sont les projections sur le monde d'un ordre plus profond. Ce sont deux aspects différents de la vie, et observer la matière ne nous renseigne pas plus sur la conscience qu'étudier la conscience ne nous informe sur la matière.

**États cérébraux quantiques** En 1989, le mathématicien et cosmologiste Roger Penrose proposa l'une des idées les plus controversées sur l'émergence de la conscience dans un ouvrage qui fut publié en français en 1998, *L'esprit, l'ordinateur et les lois de la physique*. Penrose y reprenait les idées de Turing mais lui opposait que le cerveau n'est pas un ordinateur. Il fonctionne même de façon tout à fait différente et aucun ordinateur ne pourrait reproduire son mode opératoire en utilisant seulement la logique.

Penrose allait encore plus loin en supposant que la conscience est liée à des fluctuations de l'espace-temps dues à la gravitation quantique. La plupart des physiciens refusèrent l'idée : pourquoi la gravitation quantique s'appliquerait-elle à une substance gélatineuse, molle et humide ? Les chercheurs en intelligence artificielle rejetèrent aussi cette idée, car ils pensaient réussir un jour à construire un puissant simulateur du cerveau.

Penrose ne savait pas exactement comment ni où le cerveau traitait ces effets de gravitation quantique. Il s'associa à l'anesthésiste Stuart Hameroff pour améliorer le modèle publié en 1995 dans son ouvrage *Les ombres de l'esprit, À la recherche d'une science de la conscience*. Selon lui, l'esprit conscient était fait d'états quantiques superposés, chacun doté d'une géométrie particulière de l'espace-temps. Ces états disparaîtraient au fil des événements, mais pas tous en même temps. La perception de l'instant serait notre sensation de la conscience.

La gravitation quantique agit à très courte échelle, plus petite que celle d'un neurone. Selon Hameroff, elle pourrait se manifester dans les longs polymères, nommés microtubules, présents dans diverses cellules, dont les neurones. Ces microtubules servent d'échafaudages et canalisent les neurotransmetteurs.

On a cherché à savoir si les condensats de Bose-Einstein, l'effondrement des fonctions d'onde et les interactions de l'observateur avec l'objet observé étaient impliqués dans l'émergence de la conscience. On s'est également demandé si la théorie quantique des champs pouvait retracer les états du cerveau. Les états de la mémoire pourraient être décrits comme des systèmes à particules multiples, comme une mer virtuelle de particules associées aux champs quantiques et au vide spatial. Enfin, l'effet tunnel faciliterait les réactions chimiques impliquées dans la signalisation neuronale.

D'autres physiciens pensent que le hasard quantique sous-tendrait la conscience, nous faisant passer d'un état de conscience à un autre. Soulignons que de nombreux physiciens restent sceptiques, doutant que des états quantiques puissent se manifester dans le cerveau. Dans un article publié en 1999, le cosmologiste d'origine suédoise Max Tegmark suggérait que la décohérence masquerait tout état quantique à une échelle de temps bien inférieure à celle qui caractérise la signalisation dans le cerveau. Le cerveau est bien trop gros et bien trop chaud pour être soumis à des phénomènes quantiques. La mécanique quantique ne semble décidément pas expliquer l'émergence de la conscience.

## l'idée clé
## Effondrement mental

# Glossaire

**Aléatoire** Totalement lié au hasard, par exemple un lancer de dés.

**Antimatière** État complémentaire de la matière dont les paramètres quantiques sont opposés.

**Atome** Le plus petit fragment de matière pouvant exister indépendamment. Les atomes contiennent un noyau (des protons et des neutrons) entouré d'électrons.

**Baryon** Particule élémentaire (par exemple le proton) constituée de trois quarks.

**Boson** Particule dont le spin est entier, par exemple le photon.

**Champ** Permet à une force d'être transmise à distance.

**Complémentarité** La nature d'un phénomène quantique dépend de la façon dont il est mesuré.

**Cosmologie** Étude de l'histoire de l'Univers.

**Couches électroniques** Régions où les électrons circulent autour du noyau de l'atome.

**Déphasage** Décalage de deux ondes (des sinusoïdes représentant leur longueur d'onde).

**Dualité onde-corpuscule** Idée selon laquelle les entités quantiques, par exemple la lumière, se comportent soit comme des ondes, soit comme des particules (voir 'complémentarité').

**Électromagnétisme** Théorie unifiant l'électricité et le magnétisme.

**Énergie** Confère à une chose la possibilité de changer ; elle est toujours conservée.

**Espace-temps** Combinaison des trois dimensions de l'espace et de la dimension de temps de la théorie de la relativité.

**Fermion** Particule dont le spin est un demi-entier ; deux fermions ne peuvent avoir le même état quantique.

**Fission** Un gros noyau se scinde en plusieurs morceaux.

**Fonction d'onde** Dans la théorie quantique, une fonction de probabilité qui ressemble à une onde et décrit une propriété des particules étudiées.

**Fond cosmique de micro-ondes** Faible rayonnement micro-ondes émis par tout l'espace, témoin de l'Univers primordial.

**Force** Toute impulsion qui impose un changement de position.

**Fréquence** Nombre de fois que le pic d'une onde passe en un point par unité de temps.

**Fusion** Assemblage de plusieurs petits noyaux.

**Gravitation** La force responsable de l'attraction des masses entre elles.

**Hadron** Particule élémentaire faite de quarks (les baryons et les mésons sont des sous-classes).

**Hypothèse des mondes multiples** Idée selon laquelle des mondes parallèles apparaissent quand surviennent des événements quantiques.

**Incertitude** En mécanique quantique, idée selon laquelle certaines grandeurs ne peuvent être connues simultanément.

**Interférences** Renforcement ou annulation d'ondes qui se combinent.

**Intrication** Signaux corrélés entre des particules.

**Isotope** Versions d'un même élément chimique dont le nombre de neutrons diffère.

**Localité** Principe selon lequel un objet n'est influencé que par son environnement proche.

**Longueur d'onde** Distance entre deux crêtes ou deux creux d'une onde.

**Masse** Propriété d'un objet massif qui dépend du nombre d'atomes et de l'énergie qu'il contient.

**Matrice** Construction mathématique similaire à une table de nombres.

**Molécule** Deux atomes, ou davantage, associés par des liaisons.

**Noyau** Le cœur compact de l'atome, contenant des protons et des neutrons.

**Observateur** En mécanique quantique, le témoin d'une mesure.

**Photon** Particule de lumière.

**Quanta** Paquets d'énergie.

**Quantité de mouvement** Produit de la masse par la vitesse.

**Quark** Le plus petit constituant d'un hadron, par exemple un proton ou un neutron.

**Qubits** Bit quantique, ou élément d'information quantique.

**Radioactivité** Émission de particules par des noyaux instables.

**Rayonnement du corps noir** Émission lumineuse caractéristique d'une substance parfaitement noire.

**Semi-conducteur** Matériau qui conduit l'électricité mieux qu'un isolant, mais moins bien qu'un conducteur.

**Spectre** Intensité de la lumière dans une gamme de fréquences.

**Superfluidité** Propriété d'un liquide ayant perdu toute viscosité.

**Supraconduction** Conduction de l'électricité sans aucune résistance.

**Symétrie** Similarité par réflexion, rotation ou changement d'échelle.

**Univers** Tout l'espace-temps ; les descriptions des physiciens vont parfois au-delà avec les univers parallèles ou la théorie des cordes.

# Index

**A**ccélérateur 112
linéaire de Stanford 110
agitation moléculaire 5
aimant supraconducteur 174
algorithme
de factorisation 177
de Shor 177
Allen, John 193
Alvarez, Luis 109
Ambler, Eric 105
Anderson, Carl 85
Anderson, Phil 129
annihilation 87
antiatome 85-86
anticouleurs 111
antigravitation 147
antihydrogène 86
antimatière 84-87, 133
antineutrino 100, 102
antineutron 85-86
antinoyaux 85
antiparticule 87, 98, 121, 126, 143
antiproton 84-85
antiquark 111, 114
Aspect, Alain 165
asymétrie matière-antimatière 123
atome de Rutherford 32
autoénergie 94

**B**almer, Johannes 45
bande interdite 184
Bardeen, John 189
barrière d'énergie 77
baryons 108, 114, 121, 146
Becquerel, Alexandre 24
Becquerel, Henri 76, 100
Bednorz, Georg 191
Benjamin, Simon 198
Berkeley, George 70
Bethe, Hans 97
bévatron 85
Big Bang 11, 87, 126, 138, 146
biocapteur 185, 187
bits quantiques 74, 176
Bjorken, James 115
Bohm, David 158, 173, 201
Bohr, Niels 37, 48, 52, 56, 61, 63-64, 66, 68, 72, 81-82, 89, 92, 120, 136, 152-153, 158, 160, 168, 172, 201
boîte quantique 178, 184-186
Born, Max 54, 82, 157
Bose, Satyendra Nath 192, 194
boson 50, 106-108, 122, 128, 134, 190, 192
de Higgs 107, 121-122, 134
bottom 110
boucle quantique 138
Brendel, Jürgen 167
Broglie, Louis de 29, 57, 89, 157, 173
Brookhaven 112
Brout, Robert 129
Brune, Michel 174

**C**atastrophe de l'ultraviolet 8-9
CERN 86, 107, 130, 134
Chadwick, James 80
champ magnétique 45, 198
terrestre 198
Chandrasekhar, Subrahmanyan 142
chaos 151
charge 36
de couleur 117
fractionnaire 116
charme 110
chat de Schrödinger 68, 152, 154, 178
chromodynamique quantique 91, 99, 111, 115-116, 118, 120, 126, 139, 149
circuits supraconducteurs 178
clé 180
publique 181
quantique 182
secrète 181
COBE 9, 145
Cockcroft, John 80
code 180
barre 40
cryptographique 178
colle 115
collision inélastique 113
Compton, Arthur 31
condensat 195
de Bose-Einstein 193-194, 203
confinement quantique 184, 186
conscience quantique 200
conservation de l'énergie 4
constante de Planck 25, 37
Copper, Leon 189
Cornell, Eric 194
corps noir 8
corpuscule 19
corrélation 173
couleurs 99, 111
couplage 78
Cowan, Clyde 102
Crick, Francis 30
cristallographie aux rayons X 31, 194
cryptographie 187
quantique 183
cuprates 191

**D**atation 34
Davisson, Clinton 29, 31
décalage
de Lamb 92, 96-97
vers le bleu 43
vers le rouge 43
déchiffrement 181
décohérence 173, 178, 203
déficit des neutrinos solaires 103
démon de Maxwell 7
désintégration bêta 100, 104-105
deutérium 86
DeWitt, Bryce 137, 140, 153-154
diagrammes de Feynman 98
diffraction 19, 41
diffusion inélastique profonde 113
Dimopoulos, Savas 134
diodes 186
Dirac, Paul 84-85, 89, 92, 96, 133
discorde quantique 173
Doppler, effet 43
double hélice 30
*down* 110
Drühl, Kai 169
dualité onde-corpuscule 28-29, 52, 54, 59, 62, 148, 168, 173

**E**ffet
de non-localité 171
gravitationnel 135, 146
photoélectrique 24, 27
Stark 47, 55, 92
tunnel 76-77, 191, 196, 198
Zeeman 44-45, 47-48, 55, 92, 94, 96
effondrement des fonctions d'onde 67-68, 203
Einstein, Albert 5, 13, 22, 28, 52, 54, 63, 68, 72, 81, 124, 136, 156, 168
électrodynamique quantique 91, 96, 114, 133
électromagnétisme 12-13, 89, 92, 107, 124, 135
électron 122, 132, 134
encodage 181
énergie
cinétique 5
électromagnétique 10
négative 84
noire 123
potentielle 5
sombre 144, 146-147
Englert, François 129
entropie 6
équation
de Maxwell 10, 14, 17, 27
de Schrödinger 56, 64, 66, 76
de Wheeler-DeWitt 138
espace-temps 22, 137, 202
état P 93-94
état S 93
éther 20
étoile à neutrons 51, 142
étrange 110
Everett, Hugh 153, 172
expansion 43
expérience de Stern et Gerlach 46

**F**araday, Michael 13, 88
fente 19
de Young 16, 19, 29-30, 42, 169
Fermi, Enrico 50, 81-82, 101, 105
Fermilab 86, 103, 110
fermions 51, 89, 108, 115, 122, 132, 134, 190, 192
Feynman, Richard 96-97, 112, 114, 168
fission 81
nucléaire 80
Fitzgerald, George 22
Fletcher, Harvey 26
fluctuation 146
quantique 144
fonction
d'onde 56, 58, 66, 76, 120, 138, 152, 172, 178
fond
cosmique 11
diffus cosmologique 9, 11
force
de gravitation 127
électromagnétique 127
électrostatique 36
nucléaire faible 97, 104, 107, 128
nucléaire forte 91, 122
vitale 5
Franklin, Rosalind 30
Fraunhofer, Joseph von 40
Freedman, Stuart 165
Fresnel, Augustin-Jean 17, 28
Frisch, Otto 81
fullerène 31, 174
fusion 80, 91, 93, 103, 142
nucléaire 76

**G**alaxies 146
Galilée 5
Gamow, George 77, 81
Gell-Mann, Murray 108-109, 113, 116, 120, 124, 151
Georgi, Howard 115, 134
germanium 186
Germer, Lester 29, 31
Gisin, Nicolas 167
Glashow, Sheldon 106, 115
gluons 111, 122, 128
Goldhaber, Maurice 106
Goldstone, Jeffrey 128
gomme quantique 170-171
Goudsmit, Samuel 45-46
Grangier, Philippe 166
gravitation 135, 146
  quantique 135-136, 140, 202-203
  quantique à boucles 139
graviton 123, 139, 149
Gross, David 118
Guralnik, Gerald 129
Guth, Alan 146

**H**adrons 111-112, 114
Hagen, Carl 129
Hahn, Otto 101
Hale, George Ellery 44-45
Haroche, Serge 174
Hau, Lene 195
Hawking, Stephen 138, 142, 155
Heisenberg, Werner 49, 52-53, 57, 60, 63-64, 66, 82, 105, 148, 151, 157, 168
hélium 33
  superfluide 193
Hertz, Heinrich 24
Hess, Victor 85
Higgs, boson de 107,121-122, 129, 134
Higgs, Peter 129
Hooft, Gerard 't 107
horizon 141
horloge atomique 22
Hoyle, Fred 144
Hubble, Edwin 144
Hund, Friedrich 77
Huygens, Christiaan 16-17, 28
hydrogène 33, 44, 53

**I**magerie par résonance magnétique 47
incertitude quantique 170, 180
induction 13
  électromagnétique 14, 88
inégalités de Bell 160, 162
inflation 146
  cosmique 144
intelligence artificielle 201
interaction
  faible 104, 127
  forte 32, 108, 111, 122, 127-128
interférences 28, 192
interféromètre 20
interprétation de Copenhague 64, 66, 68, 72, 138, 152, 156, 158, 168-169
intrication 73-75, 180, 196, 198, 200
  quantique 150-151, 167, 183
invariance de jauge 125
isospin 110

**J**acobson, Theodore 138
Jeans, James 9
jonction
  Josephson 191
  tunnel 79
Jordan, Pascual 53-54, 61, 90
Josephson, Brian 191
Jung, Carl 49

**K**aon 108, 115
Kapitsa, Pyotr 193
Ketterle, Wolfgang 194
Kibble, Tom 129
Kim, Yoon-Ho 171

**L**aboratoires Bell 31
Lamb, Willis 93
Laplace, Pierre-Simon de 140
Laue, Max von 31
Lederman, Leon 102
Lee, Tsung-Dao 105
Leibniz, Gottfried 5
Lenard, Philipp 24-25
lepton 103, 108, 121-122
  tau 132
lévitation magnétique 190
LHC 130, 134
liaison
  covalente 37
  de Van der Waals 37
  ionique 37
  métallique 37
liberté asymptotique 117
limite de Chandrasekhar 51
Lloyd, Seth 198
localisme 175
loi
  de Planck 8
  de la conservation 125
London, Fritz 193
Lorentz, Hendrik 22
Los Alamos 83, 97
Lyman, Theodore 44

**M**ACHO 146
magnétisme 12
matière 84
  noire 135, 144, 146
  sombre 123
Maxwell, James Clerk 6, 13-14, 28, 88, 124
mécanique
  des matrices 53-54, 60-61, 151
  ondulatoire 61
Meissner, Walther 190
Meitner, Lise 81, 101
mémoire 200
mésons 108, 114, 121
messages intriqués 183
métaux alcalins 48
Michelson, Albert Abraham 20, 23
micro-ondes 11, 93-94
microscope à effet tunnel 79
microtubule 203
Millikan, Robert 25-26
Mills, Robert 125
miroir magnétique 190
Misener, Don 193
Misner, Charles 137
Mitchell, John 140
modèle
  de Bohr 39, 52
  standard 150
moment angulaire 38, 47
mondes multiples 70, 153, 172
Morley, Edward 20
mousse quantique 137
mouvement brownien 27
Müller, Alex 191
multivers 153
muons 108, 132

**N**aine blanche 51, 142
Nambu, Yoichiro 128, 149
neurotransmetteurs 203
neutrino 101, 108, 122
  électronique 102
  muonique 102
  tauique 103
neutron 62
Newton, Isaac 16, 28, 40
Nielsen, Holger Bech 149
niveaux d'énergie 56
nombre quantique 38
non-localité 160
nucléons 35

**O**bjets macroscopiques 30
Ochsenfeld, Robert 190
Oersted, Hans 13
onde
  évanescente 78
  guide 158
  pilote 157
Onnes, Heike Kamerlingh 188
Oppenheimer, Robert 82
orbitale S 38, 94
orbite électronique 35
ordinateur quantique 176, 186
oscillateur 10, 96
oscillation 103
  des neutrinos 132
oxygène 33

**P**aire
  de Cooper 189
  intriquée 75
paquets 37
paradoxe
  des jumeaux 21
  Einstein-Podolsky-Rosen (EPR) 68, 72, 156, 158, 160
parité 105, 126
Park, Bletchley 181
particule 87
  alpha 32, 76, 78, 113
  élémentaire 108
  supersymétrique 134
Paschen, Friedrich 45
Pauli, Wolfgang 48-49, 82, 101, 105
Pearl Harbor 83
Peierls, Rudolph 82
Penrose, Roger 139, 202
photino 134
photon 25, 50, 62, 121
  intriqué 183
photosynthèse artificielle 199
physique
  nucléaire 33
  quantique 136
pièges
  ioniques 178
  optiques 178
pions 108
Planck, Max 8, 10, 23, 26, 52, 96
Podolsky, Boris 72, 156
Poincaré, Henri 22
polarisation 166
Politzer, David 118
polonium 77
Popper, Karl 150
portes logiques 187
positron 84-85, 133-134
potentiel quantique 158
Preskill, John 143
pression de dégénérescence 50, 142
principe
  de complémentarité 168
  de correspondance 66
  d'exclusion de Pauli 48, 92, 115-116, 142, 185, 190, 192
  d'incertitude 62-63
  d'incertitude d'Heisenberg 64, 133, 137, 156
projet Manhattan 27, 65, 82-83, 93, 97, 158

protons 85
prototype quantique 178
puce à silicium 184

**Q**uanta 8
quark 107, 110, 112-114, 121-122, 124, 128, 132, 134, 151
  *down* 110
  *up* 110
quasars 142
qubits 74, 176
quork 109

**R**adar 62
radicaux libres 198
radioactivité 76
  bêta 91
raie
  d'absorption 40
  de Fraunhofer 40
  spectrale 37, 41-42, 44-45, 47-48, 53-54, 96
rapidité d'apprentissage 200
Rayleigh (lord) 9
Raymond, Jean-Michel 174
rayonnement
  alpha 77
  d'Hawking 143
  du corps noir 8
  micro-ondes 11
  Tcherenkov 102
rayons
  cosmiques 85
  gamma 62
réaction en chaîne 81-82
réalisme 175
  local 161
relativité
  générale 124, 136
  restreinte 13, 23, 124
renormalisation 91, 95, 97, 150
résistance 190
  électrique 184
Roger, Gérard 166
Rosen, Nathan 72, 156
Rosenfeld, Leon 136
Rovelli, Carlo 138
Rutherford, Ernest 65, 80, 101, 113
Rutherford, Robert 93

**S**alam, Abdus 107, 115
saut quantique 36, 53-54, 61
saveur 102, 107, 110, 122
Scherk, Joel 149
Schrieffer, John 189
Schrödinger, Erwin 55-57, 60, 64, 68, 70, 92, 160, 196-197, 201
Schwartz, Melvin 102
Schwarz, John 149
Schwarzschild, Karl 140
Schwinger, Julian 97, 106, 115, 137
Sciama, Dennis 142
Scully, Marlan 169
second principe de la thermodynamique 6
Segrè, Emilio 85
selectron 134
semi-conducteurs 184
série
  de Balmer 45
  de Lyman 44
Shor, Peter 177
silicium 186
SLAC 112-113, 117-118
Smolin, Lee 138
Soddy, Frederick 101
spectre 8
  de corps noir 9, 11
  de l'hydrogène 96
spectroscopie 41
spin 47, 92, 108, 192
  quantique 44, 198
squarks 134
Stark, Johannes 44, 47
statistique
  de Bose-Einstein 193
  quantique 194
Steinberg, Jack 102
structure hyperfine 47
Sudbury 103
supercordes 149
superfluidité 50, 97, 192-195
Super-Kamiokande 103
supernovae 50, 147
superpartenaire 134
supersymétrie 132, 149
supraconducteur 129, 178, 188, 190
supraconduction 50, 190
Susskind, Leonard 149
Symétries brisées 126
Szilárd, Léo 81

**T**ableau périodique 38
taches solaires 45
téléportation 74
  quantique 183
Teller, Edward 81
température critique 188
théorie
  à variables cachées 157, 163, 166
  BCS 189-190
  de l'interaction forte 118
  de la grande unification 113, 115, 123
  des cordes 115, 135, 148-149
  des mondes multiples 153
  des quarks 120
  du tout 150
  électrofaible 91, 99, 107, 115
  ondulatoire 68
  quantique 11, 85, 88, 90
Thomson, J. J. 30, 65
Thorne, Kip 143
Tiffel, Wolfgang 167
Tomonaga, Sin-Itiro 97
*top* 110
train d'onde 42
transition de phase 127
trou 185
  noir 47, 137, 139-140, 192
Turing, Alan 181, 201

**U**hlenbeck, George 45-46
Univers 43
  non borné 142
  primordial 11, 87, 144
*up* 110

**V**ariables cachées 162
vecteur 121
  de forces 89
Veltman, Martinus 107
vertex 98
*vis viva* 5
vitesse
  de libération 141
  de traitement 200
voie octuple 108, 110, 120

**W**alton, Ernest 80
Watson, Jim 30
Weinberg, Steven 107, 115, 129, 151
Wheeler, John 137, 153
Wieman, Carl 194
Wien, Wilhelm 9
Wigner, Eugene 81, 90
Wilczek, Frank 118
WIMP 146
wino 134
Witten, Edward 149
Wollaston, William Hyde 40
Wu, Chieng-Shiung 105

**Y**ang, Chen Ning 105, 125
Yoneya, Tamiaki 149
Young, Thomas 5, 16

**Z**binden, Hugo 167
Zeeman, Pieter 44, 47
Zeh, Dieter 173
Zeilinger, Anton 166, 171, 174, 183
zino 134

L'édition originale de cet ouvrage a été publiée en 2013 au Royaume-Uni par Quercus Publishing Plc sous le titre *50 Quantum physics ideas you really need to know*.

© Joanne Baker 2013

Relecture scientifique de la traduction : Charles Antoine

© Dunod, 2017 pour la traduction française
11, rue Paul Bert, 92240 Malakoff

www.dunod.com

ISBN 978-2-10-075696-4