

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, 1^{re} 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 xx^e 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 ignore 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

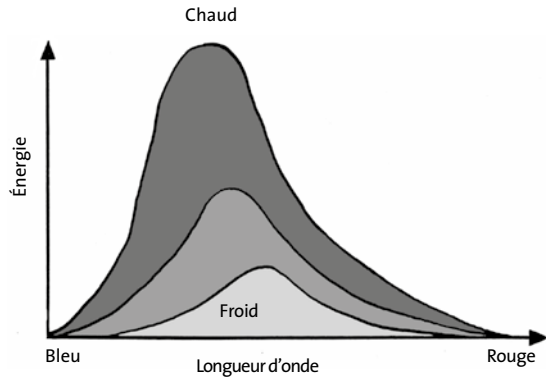
un grand nombre d'atomes ou de molécules. Planck décida d'aborder l'électromagnétisme de la même façon que la thermodynamique. En lieu et place d'atomes, il imagina que de minuscules oscillateurs portaient l'énergie électromagnétique, celle-ci se trouvant ainsi répartie entre de multiples entités.

Planck fixa l'énergie de chaque oscillateur en fonction de la fréquence, de sorte que $E = h\nu$, où E est l'énergie, ν 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 ».

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.



Courbes du corps noir

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 XVII^e 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

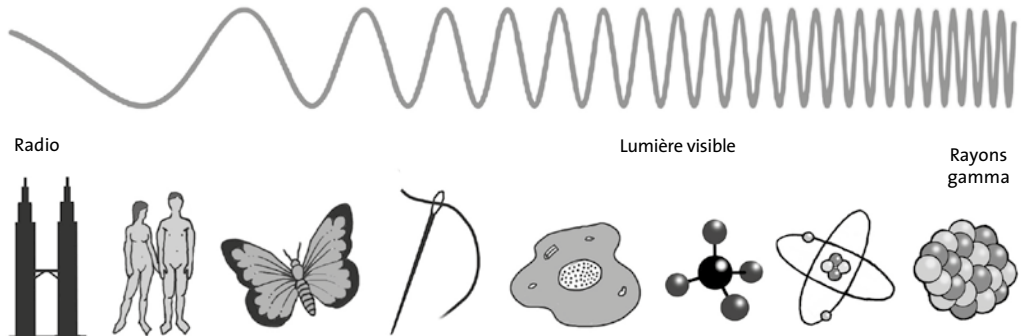
1752

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 de l'ordre de quelques mètres. 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 milliardième de mètre. À l'échelle du millimètre ou du centimètre se situent les micro-ondes, et à des échelles plus courtes l'ultra-violet, 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 l'électricité et le 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 l'électricité et le 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 disparaît. 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