

ANTON ZEILINGER

LE BAL DES PHOTONS

D'Einstein à la téléportation quantique,
les mystères de l'intrication

PRIX NOBEL
DE PHYSIQUE 2022

Flammarion

Le Bal des photons

Anton Zeilinger

Le Bal des photons

D'Einstein à la téléportation quantique

*Traduit de l'anglais (États-Unis)
par Eva Roques et Olivier Courcelle*

Flammarion

Copyright © 2010 par Anton Zeilinger. Tous droits réservés.
L'ouvrage original a été publié en 2010
sous le titre *Dance of the Photons*
aux Éditions Farrar, Straus and Giroux.
© Flammarion, Paris, 2023, pour l'édition française.
ISBN : 978-2-0804-2002-2

Prologue

Sous le Danube

Chaque 1^{er} janvier, le Concert du nouvel an de l'orchestre philharmonique de Vienne marque le début d'une nouvelle année. L'événement a lieu dans la grande Salle dorée du Musikverein, haut lieu de la ville, et est retransmis dans le monde entier à des centaines de millions d'âmes désireuses d'écouter les magnifiques valse, polkas, ouvertures et autres œuvres de la famille Strauss et de leurs contemporains. Une fois le programme officiel terminé, le public applaudit à tout rompre dans l'attente du rappel. Retentissent alors les sons profonds des cordes, et tout le monde applaudit de nouveau en reconnaissant le morceau tant attendu. Puis la musique s'arrête, et le chef souhaite à tous les spectateurs de la salle et du monde entier une bonne année, avant que l'orchestre n'entame ce qu'il faut bien appeler l'hymne autrichien non officiel, soit la célèbre valse du *Beau Danube bleu* de Johann Strauss fils ! Peu de pièces sont capables de transmettre à la fois la joie et la mélancolie intrinsèque à toute existence humaine comme cette musique, composée pour les grands bals de la cour de Vienne et jouée encore aujourd'hui chaque année pendant la saison des bals.

Les spectateurs présents, ainsi que ceux qui sont confortablement installés devant leur téléviseur, ignorent cependant

que, non loin de la Salle dorée, se déroule une expérience à la pointe de la technologie moderne. Le sauraient-ils qu'ils peineraient sans doute à y croire, tant celle-ci défie l'imagination : elle repose sur des conceptions qui relevaient jusqu'ici de la science-fiction et qui pourraient bouleverser la façon dont nous appréhendons le monde.

Le concert se termine sur un dernier rappel, la *Marche de Radetzky* de Johann Strauss père, l'une des pièces les plus vibrantes et les plus entraînantes jamais composées. Nous quittons la salle et nous dirigeons vers le Danube ; c'est une belle journée d'hiver, et les rues sont presque désertes en ce jour férié. Le Danube traverse la ville de Vienne en deux embranchements, dessinant une longue île entre les deux. Depuis l'une des rives, nous rejoignons cette dernière en empruntant un pont que même notre GPS ne connaît pas : il n'est pas ouvert au public. L'île est en effet interdite aux voitures, sauf à celles qui sont en mission officielle.

Une fois à destination, nous nous dirigeons vers un bâtiment dissimulé derrière de grands arbres. Il marque l'emplacement de la station de pompage des eaux usées de Vienne. Reliant les deux rives, un immense égout passe en effet sous le fleuve afin d'acheminer les eaux usées collectées sur la rive orientale du Danube, une partie de la ville que les Viennois appellent affectueusement la Transdanubie (« l'endroit de l'autre côté du Danube »), vers une énorme station d'épuration située de l'autre côté. Ainsi, les Viennois, très soucieux de l'environnement, veillent à ce que les égouts ne soient pas directement rejetés dans le fleuve.

Nous pénétrons dans le bâtiment et empruntons l'ascenseur deux niveaux plus bas, sous le fleuve. Quelques pas encore, et nous atteignons deux grands tunnels débouchant à gauche et à droite et reliant les deux rives, le Transdanubien et Vienne même. L'immense cylindre abrite des tubes parallèles charriant les eaux usées ainsi que de nombreux câbles. Un

peu à l'écart, près de l'entrée de l'un des tunnels, une scène bien différente nous accueille.

Nous nous retrouvons bientôt dans une petite pièce délimitée par des murs en verre. En nous rapprochant, nous découvrons un rayon laser, des équipements de haute technologie, y compris des appareils électroniques de pointe, des ordinateurs et j'en passe. C'est alors que nous faisons la rencontre de Rupert. Il est étudiant à l'université de Vienne, nous apprend-il, et travaille sur sa thèse, « La téléportation quantique longue distance », qu'il espère terminer sous peu afin d'obtenir son doctorat. Pressé de nous expliquer ce que nous voyons ici, il précise que le but de l'expérience est simple : *téléporter* une particule de lumière – un photon – de l'île du Danube vers la rive du côté de Vienne...

Devant notre air perdu, il ajoute que la téléportation quantique ressemble un peu à de la science-fiction, « mais pas tout à fait ». Non sans nous avoir gratifiés d'un grand sourire, le voilà qui commence son exposé. Bien que nous ne comprenions toujours pas grand-chose, nous l'écoutons avec une fascination croissante. Il promet de nous donner une explication plus détaillée plus tard, mais, pour le moment, il s'agit simplement de nous familiariser avec le langage utilisé, nous habituer au dispositif et aux concepts généraux étudiés, et appréhender cet étrange environnement – tout un programme !

Les lasers, apprenons-nous, servent essentiellement à produire un type de lumière très particulier. La lumière est constituée de particules appelées photons, et ce laser produit des paires de photons « intriqués » les uns avec les autres. Cette intrication, comme nous le découvrirons en détail, signifie que les deux photons sont intimement liés l'un à l'autre et que toute mesure de l'état de l'un influence instantanément l'état de l'autre, quelle que soit la distance qui les sépare.

Cette notion d'*intrication* fut identifiée par le physicien autrichien Erwin Schrödinger en 1935. Peu de temps auparavant, dans un article publié avec ses jeunes collègues Boris

Podolsky et Nathan Rosen, Albert Einstein avait fait allusion à l'émergence d'un cas inédit en mécanique quantique, particulièrement intéressant.

Pour avoir une petite idée de ce qu'est l'intrication, il suffit de considérer deux particules qui ont eu une interaction l'une avec l'autre. Elles peuvent s'être percutées à la manière de boules de billard et s'éloigner à présent l'une de l'autre. En physique classique, c'est-à-dire traditionnelle, si une boule de billard se déplace, vers la droite mettons, l'autre se déplace vers la gauche. En outre, si nous connaissons la vitesse de la boule en mouvement et la façon dont elle a percuté celle à l'arrêt, et si nous savons également à quelle vitesse et dans quelle direction s'éloigne la boule qui était immobile, nous pouvons alors déterminer exactement où se dirige l'autre. C'est d'ailleurs ce que fait tout joueur digne de ce nom lorsqu'il cherche à savoir comment frapper une boule avec sa queue de billard !

Les « boules de billard » quantiques sont, elles, beaucoup plus étranges. Elles s'éloigneront également l'une de l'autre après la collision, à quelques différences intéressantes près : aucune des deux boules n'a une vitesse bien définie ni ne se déplace dans une direction spécifique. En réalité, aucune d'elles n'a de vitesse ou de direction après la collision ; elles s'éloignent simplement l'une de l'autre.

Le point essentiel est le suivant : dès que nous observons une des boules de billard quantiques, celle-ci prend instantanément une certaine vitesse et se meut dans une direction donnée loin de la collision. Aussi fou que cela paraisse, à cet instant précis – mais pas avant –, l'autre boule adopte la vitesse et la direction équivalentes, et ce, quelle que soit la distance entre les deux boules.

Ainsi, on dit que les boules de billard quantiques sont intriquées. Bien sûr, ce type de phénomène n'a pas encore été observé sur de vraies boules de billard, mais, pour les particules élémentaires, c'est monnaie courante : deux particules

qui entrent en collision sont toujours intimement liées sur une grande distance. Le simple fait d'*observer* l'une des deux influence l'autre instantanément, indépendamment de la distance qui les sépare.

Einstein n'aimait pas ce phénomène étrange, qu'il qualifia de « fantomatique action à distance », et espérait que les physiciens trouveraient un moyen de s'en débarrasser. Contrairement à lui, Schrödinger accepta cette spécificité comme quelque chose de totalement nouveau et inventa pour la désigner le terme d'« intrication ». C'était pour lui *la* caractéristique du monde quantique qui nous obligeait à renoncer à tous nos chers préjugés sur la façon dont le monde est construit.

Forts de ces explications, nous interrogeons Rupert sur le but qu'il poursuit avec ses photons intriqués. Il sourit et répond : « C'est un tour de magie. » De fait, il conserve l'un des deux photons dans son mini-laboratoire, sous le niveau de l'eau, et envoie l'autre le long d'une fibre optique jusqu'à un récepteur situé de l'autre côté du fleuve.

Rupert parle d'« Alice » et de « Bob » qui s'envoient des photons et communiquent entre eux, comme s'il s'agissait de véritables êtres humains. Mais il s'avère que ce sont des expérimentateurs imaginaires, Alice assise ici dans son laboratoire et Bob là-bas de l'autre côté du fleuve.

Mais pourquoi donc ces noms, Alice et Bob ? Rupert nous répond que ce n'est pas de son invention ; ils proviennent de la communauté de la cryptographie, dans laquelle il est important de s'assurer que les messages envoyés entre deux personnes ne peuvent être lus ou entendus par des tiers non autorisés. Nous imaginons aussitôt des espions au cœur d'une palpitante enquête, jusqu'à ce que Rupert calme nos ardeurs ! La cryptographie, explique-t-il, est courante de nos jours. Lorsque vous vous connectez à Internet et transmettez, par exemple, votre numéro de carte de crédit, celui-ci est généralement crypté, afin que personne d'autre ne puisse le lire. Il

poursuit : « Au début, on appelait “A” l’expéditeur du message et “B” le récepteur, puis quelqu’un a considéré qu’il était plus simple de les appeler “Alice” et “Bob”. »

Il nous montre ensuite la fine fibre optique dans laquelle pénètre le photon de Bob, semblable en apparence à celles largement employées dans les télécommunications de nos jours.

Nous suivons des yeux le câble en fibre optique, depuis le laser qui émerge du mur du petit laboratoire de Rupert jusqu’à un endroit où il rejoint tous les autres câbles qui traversent les grands tunnels sous le Danube. L’étudiant capte notre regard : « Vous voulez voir où il va ? » Nous acquiesçons aussitôt. C’est ainsi que commence notre petite excursion dans les souterrains de Vienne...

Nous pénétrons tout d’abord dans un tube d’environ quatre mètres de diamètre qui descend abruptement. En dessous de nous se trouvent deux tuyaux, d’à peu près un mètre de diamètre chacun, qui transportent les eaux usées. Hermétiquement fermés, ils ne nous incommode pas outre mesure, bien qu’une petite odeur étrange flotte dans l’air. L’espace n’est pas très large, mais nous pouvons nous tenir debout sans peine. À notre droite et notre gauche courent des câbles, et quelque part sur l’un de ces chemins se trouve notre petite fibre optique. « Comme dans *Le Troisième Homme* », fait alors remarquer l’un de nous. Revient alors à notre mémoire l’un des plus grands films de tous les temps, qui se déroule à Vienne après la Seconde Guerre mondiale, et dont certaines des meilleures scènes sont des courses-poursuites effrénées dans les égouts de la ville. Nous nous attendons à voir surgir Orson Welles à tout moment, tandis que le thème de Harry Lime joué par Anton Karas sur sa cithare manque de résonner à nos oreilles !

Bientôt, nous atteignons le point le plus profond de notre voyage, et Rupert nous apprend que le fleuve se trouve juste

au-dessus de nous. Difficile de ne pas imaginer ce qui se passerait si une fissure apparaissait... Dans quelle direction courrions-nous ? Heureusement, rien ne se passe, et nous poursuivons notre progression. L'itinéraire commence à monter légèrement, puis, soudain, nous émergeons dans une petite pièce. En regardant à l'extérieur, nous constatons que nous sommes passés non seulement sous le fleuve mais également sous un petit parc adjacent, une voie ferrée et une route principale.

Dans la pièce, la fibre optique quitte son boîtier en plastique et se retrouve dans une configuration similaire à celle de l'île, mais en modèle réduit. Là encore figurent à proximité un ordinateur, ainsi que quelques éléments d'optique tels des miroirs, des prismes et beaucoup d'appareils électroniques. Rupert nous explique qu'ils servent à mesurer le photon téléporté et à vérifier qu'il a conservé intactes toutes ses propriétés et caractéristiques. Parmi les câbles reliés à la petite table optique, l'un d'eux court vers le haut et prend fin sur le toit du bâtiment dans lequel nous nous trouvons. Rupert nous annonce fièrement qu'il s'agit du canal « classique » qui relie Alice et Bob – une connexion radio standard entre les deux interlocuteurs. À ce stade, impossible de faire semblant, nous sommes un peu perdus. À quoi peut bien servir ce canal classique ? De quoi Rupert parlait-il lorsqu'il a mentionné les photons intriqués ? Et qu'est-ce que la téléportation ?

Avant d'explorer ces questions, Rupert nous conduit sur le toit, d'où nous sommes récompensés par une vue à couper le souffle. De l'autre côté du fleuve se dresse le bâtiment où se trouve Alice. Nous apercevons des bateaux progresser lentement ; quelques canards et autres cygnes profitent de l'eau pure. De notre côté du Danube, nous apercevons à proximité une petite pagode construite par la communauté bouddhiste de Vienne, et notre esprit dérive tout à coup vers des questions philosophiques. Qu'est-ce que tout cela peut bien signifier ? Quel est notre rôle dans l'Univers ? Que faisons-nous

Le Bal des photons

lorsque nous observons le monde ? Et que diable la physique quantique vient-elle faire ici ?

À l'ouest, nous apercevons les collines de la forêt viennoise, la partie la plus orientale des Alpes et, à l'est, la limite des grandes plaines hongroises. C'est l'histoire qui se fraie maintenant un chemin dans nos pensées : les Turcs, venant de l'est, ont tenté par deux fois mais en vain de conquérir Vienne. Il ne nous est pas difficile d'imaginer combien une conquête réussie de la ville aurait changé l'histoire, et il nous vient également à l'esprit que le type de questions que nous posons, les questions très profondes, celles sur le sens de notre existence, dépendent sans doute de notre culture – bouddhiste, islamique, chrétienne. Saisis par le froid, nous nous autorisons à retourner doucement à la vie de la Vienne moderne.

VOYAGE INTERSTELLAIRE

Lorsque nous entendons parler de téléportation, notre premier réflexe est de nous dire que ce serait un moyen idéal de voyager, et surtout le plus rapide ! Nous disparaîtrions purement et simplement de l'endroit où nous nous trouvons pour réapparaître instantanément au lieu de notre destination. Pourtant, attention ! la téléportation comme moyen de transport relève encore de la fiction, et non de la science.

Jusqu'à présent, l'homme n'a pu se rendre que sur la Lune, ce qui, à l'échelle cosmique, est extrêmement proche, l'équivalent de notre jardin. Dans notre Système solaire, les planètes les plus proches, Vénus et Mars, sont déjà mille fois plus éloignées environ, sans parler des planètes plus lointaines.

Il est intéressant de se demander combien de temps il nous faudrait pour atteindre d'autres étoiles. Comme nous nous en souvenons tous grâce au programme Apollo, qui envoya les premiers hommes sur notre satellite, il faut environ quatre jours pour aller de la Terre à la Lune. Voyager en vaisseau spatial de la Terre à la planète Mars prendrait grosso modo 260 jours, aller simple. Pendant ce trajet, il va sans dire que nos voyageurs de l'espace s'ennuieraient à mourir – ils pourraient faire bon usage de leur temps en réalisant des expériences de téléportation quantique !

Le Bal des photons

Pour aller encore plus loin, nous pourrions utiliser la force d'accélération d'autres planètes, voire de la Terre elle-même, comme cela a été fait avec certaines des sondes spatiales sans équipage qui explorent les planètes les plus éloignées. L'idée est simplement de faire passer l'engin à proximité d'une planète afin que, par une sorte d'effet de fronde, il puisse être accéléré au sein d'une nouvelle orbite qui le mènerait beaucoup plus loin. C'est ainsi qu'en exploitant ce procédé, *Pioneer 10* a mis environ onze ans pour dépasser les planètes les plus distantes du Système solaire lors de son voyage probablement sans fin dans l'espace interstellaire. Nous pouvons donc calculer qu'à sa vitesse actuelle, il lui faudrait environ 100 000 ans pour atteindre Proxima du Centaure, l'étoile la plus proche de nous après le Soleil.

Par conséquent, il serait peut-être judicieux de disposer d'un autre moyen de se déplacer, de couvrir de grandes distances. Nous aspirons à voyager n'importe où instantanément, sans aucune limitation de distance. Est-ce possible, du moins en principe ? Voilà pourquoi les auteurs de science-fiction ont inventé la téléportation : comme par magie, vous disparaissiez d'un endroit et hop ! vous réapparaissiez à un autre, en un éclair.

CE MACHIN QU'ON APPELLE LUMIÈRE

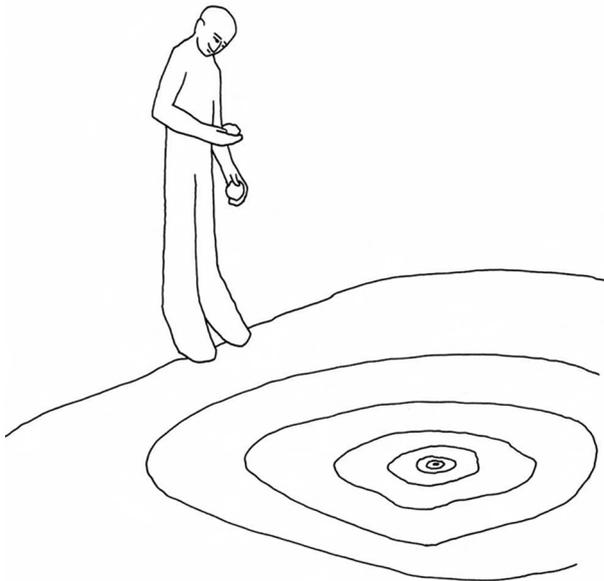
Les premières expériences de téléportation ont été réalisées avec de la lumière. Mais qu'est-ce que la lumière ? L'être humain a toujours été fasciné par elle et, probablement bien avant l'invention de l'écriture, nos ancêtres ont dû se demander comment il était possible que, grâce à la lumière, nous percevions des objets proches ou même très éloignés. Il existe deux théories fondamentales utilisées par les physiciens pour expliquer comment quelque chose issu d'une source de lumière – disons le Soleil, ou même une minuscule bougie – se déplace jusqu'à nos yeux afin que nous puissions reconnaître l'objet qui l'émet. L'une de ces théories suppose que la lumière arrive jusqu'à nous sous forme de *particules* ; l'autre, qu'elle nous parvient sous forme d'ondes.

L'analogie la plus simple pour le concept de particule est que la lumière se déplace à la manière d'une balle ou d'une petite bille. Pour le concept d'onde, le modèle le plus clair auquel nous référer est celui des vagues qui se propagent à la surface de l'eau, par exemple dans un petit étang. Ces deux images commodes traduisent les caractéristiques essentielles des concepts de particule et d'onde.

Dans le cas de la bille, il s'agit de quelque chose de localisé – limité dans l'espace – qui se déplace. De même, la particule

de lumière voyage d'un endroit à l'autre – de la source de lumière à l'objet que nous voyons, puis à notre œil – en suivant une certaine trajectoire. En outre, tout comme les billes ou les balles arrivent une à une, la source de lumière, par exemple le Soleil, émet de nombreuses petites particules de lumière qui voyagent vers nous. C'est ainsi qu'elles frappent l'arbre de l'autre côté de la route, que certaines d'entre elles sont réfléchies et diffusées par cet arbre avant que quelques-unes ne soient recueillies par nos yeux.

À l'inverse, l'onde à la surface d'un étang n'est pas du tout localisée. Si nous jetons une pierre dans un étang étale, nous observons une onde qui finit par se propager sur tout l'étang (Figure 1). En outre, les ondes ne se présentent pas en une succession de paquets, mais, au contraire, adoptent une forme mouvante de n'importe quelle taille. Il existe de très petites ondes provoquées, par exemple, par les pattes d'un infime



① La nature des ondes. Les ondes se propagent sur un étang à partir de l'endroit où une pierre a été jetée dans l'eau.

insecte glissant sur l'étang, ou d'énormes créées par des blocs jetés dans l'eau. Il y a donc une continuité dans l'extension des ondes qui se propagent à la surface de l'eau.

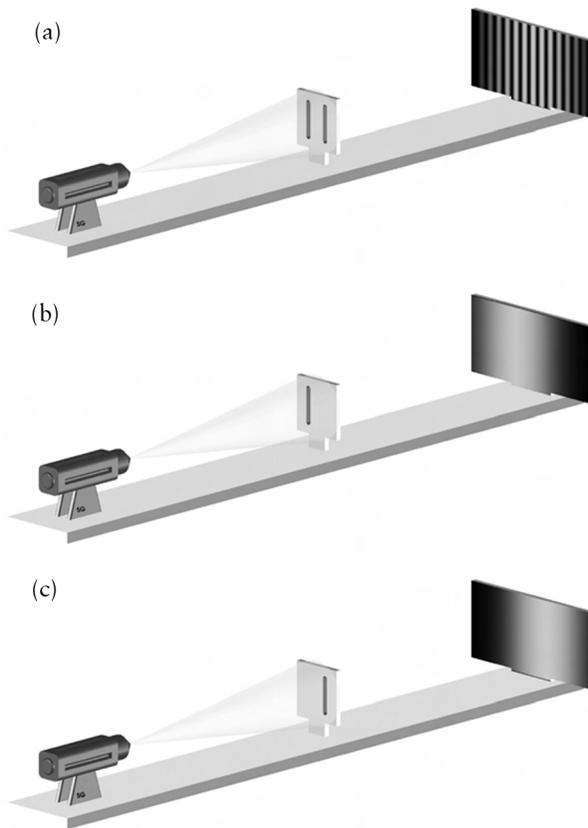
Revenons à la grande question : qu'est-ce que la lumière ? Quel concept décrit ce phénomène, celui d'onde ou de particule ? Quelles caractéristiques, parmi celles que nous venons d'énumérer, s'appliquent bel et bien à la lumière ?

La majeure partie de l'histoire de la physique peut se lire comme une histoire de la nature de la lumière. Très tôt, on commença à étudier minutieusement les critères des particules ou des ondes qui s'y appliquent. Au début du XVIII^e siècle s'engagea un formidable combat entre partisans de la théorie corpusculaire, menés par Isaac Newton, et ceux de la théorie ondulatoire, Robert Hooke en tête. La théorie corpusculaire finit par triompher, et beaucoup affirment que le poids et l'autorité de Newton firent pencher la balance.

La lumière est une onde

En 1802, le physicien anglais Thomas Young effectua une expérience qui s'avéra déterminante pour notre compréhension de la nature de la lumière. L'expérience elle-même – en réalité, l'une des plus grandes de l'histoire des sciences – est extrêmement simple : Thomas Young laissa simplement passer de la lumière à travers un écran percé de deux trous d'épingle. Et derrière ces trous, il observa des bandes claires et sombres (illustration (a) sur la figure 2), appelées aujourd'hui « franges d'interférence ».

Que se passe-t-il si nous recouvrons l'une des deux fentes ? Dans ce cas, nous ne voyons pas de franges, mais plutôt une large tache de lumière (b). Si nous couvrons l'autre fente, nous obtenons une large tache de lumière similaire, légèrement décalée (c). Nous remarquons une grande région où les deux taches se chevauchent.



② L'expérience des fentes de Thomas Young dans une version moderne. La lumière émise par un laser passe par deux fentes percées dans un diaphragme avant de frapper un écran d'observation. Lorsque les deux fentes sont ouvertes (a), nous observons une série de bandes sombres et claires, appelées « franges d'interférence ». Si une seule des deux fentes est ouverte (b et c), on observe une large zone claire sans aucune rayure. Il est évident que le motif rayé dans l'image du haut, lorsque les deux fentes sont ouvertes, n'est pas la somme des deux autres. Au contraire, aux endroits sombres, les deux ondes qui viennent des deux fentes s'annulent, tandis qu'aux endroits clairs, elles se renforcent mutuellement. L'extinction au niveau des bandes sombres et le renforcement dans les bandes claires sont une indication forte de la nature ondulatoire de la lumière.

D'un point de vue corpusculaire, lorsque nous ouvrons les deux fentes, nous nous attendons à ce que la lumière sur l'écran soit la somme des deux. Mais non, pas du tout ! Au lieu de cela, dans la région de chevauchement, Young observa des bandes claires et sombres – les fameuses franges d'interférence. Il existe donc des positions, les franges sombres, qu'aucune lumière n'atteint lorsque les deux fentes sont ouvertes. Mais, lorsque seule l'une des fentes est ouverte, la lumière est bien présente. Des mesures minutieuses montrent qu'au niveau des franges claires, la quantité de lumière est supérieure à la somme des deux intensités que nous obtiendrions si seule l'une des fentes était ouverte. Comment l'expliquer ? Peut-être par la théorie ondulatoire.

Supposons qu'une onde lumineuse vienne d'une certaine direction, disons de la gauche comme le montre l'illustration, et atteigne l'ouverture à deux fentes. De l'autre côté de chaque fente se forme une nouvelle onde, puis les deux ondes atteignent à leur tour l'écran. Au niveau de la ligne centrale de cet écran, les deux chemins partant des fentes seront de longueur égale ; dans ce cas, les deux ondes oscilleront de manière synchronisée et se renforceront mutuellement, ce qui formera une bande claire. Si nous déplaçons notre point d'observation, à droite ou à gauche sur la figure, l'un des chemins se raccourcit légèrement tandis que l'autre s'allonge. Les deux chemins menant des deux fentes à un point donné de l'écran d'observation ne sont plus de même longueur : la longueur des chemins diffère.

Ainsi, en fonction de l'emplacement exact du nouveau point d'observation, les deux ondes vont se décaler de plus en plus, jusqu'à l'être totalement. Là où une onde est à son maximum, l'autre est à son minimum, et lorsque cela se produit, elles s'annulent. Considérons la même situation pour les ondes d'eau : si deux ondes se rencontrent de sorte que la crête de l'une rencontre le creux de l'autre, elles s'annulent.

Si nous nous éloignons encore plus, la différence de longueur de chemin optique continuera de s'accroître. À un moment donné, cette différence sera exactement d'une longueur d'onde. Dans ce cas, la crête rencontre à nouveau la crête : les deux ondes se renforcent mutuellement, et une bande claire apparaît.

Si nous déplaçons encore plus loin notre point d'observation, le procédé se répète. Il y aura à nouveau des positions où la crête rencontre le creux : les ondes s'annulent, il n'y a pas de lumière, il fera complètement noir, et ainsi de suite. Les franges d'interférence apparaissent parce qu'aux endroits où il y a un renforcement mutuel, nous recevons davantage de lumière, ce qui donne des franges claires, tandis qu'aux endroits où les crêtes rencontrent les creux, nous constatons l'extinction complète de la lumière – les franges sombres, l'interférence destructive. Nous observons alors un motif rayé.

Après l'expérience de Thomas Young, pour les physiciens, le doute n'était plus permis ! La lumière était bien constituée d'ondes et non de particules.

La lumière est une particule

En 1905, un illustre inconnu, employé du Bureau des brevets de Berne, publia une série d'articles qui changèrent la nature de la physique. À l'époque, Albert Einstein n'a que vingt-six ans. Dans l'un de ces articles, il exposa sa théorie de la relativité, mais c'est le premier publié cette année-là qui nous intéresse. Il s'agit d'ailleurs du seul de ses travaux qu'Einstein lui-même, dans une lettre à son ami Conrad Habicht, qualifia de « très révolutionnaire ». Dans cet article, il suggéra soudain que la lumière est constituée de particules.

En 1926, ces particules de lumière, également appelées *quanta* de lumière, furent baptisées *photons* par le chimiste

Ce machin qu'on appelle lumière

américain Gilbert Newton Lewis. Devant tous les témoignages en faveur de la nature ondulatoire de la lumière à l'époque d'Einstein, l'expérience des fentes de Young n'étant qu'une preuve parmi tant d'autres, comment ce jeune employé osa-t-il émettre l'idée que la lumière pouvait être composée de particules, soit précisément le concept inverse ? Pour discuter de cette question en détail, nous devons tout d'abord apprendre quelque chose sur la façon dont les physiciens décrivent l'ordre et le désordre.

CHIENS DE BERGER ET PARTICULES DE LUMIÈRE D'EINSTEIN

Chaque année, dans le monde entier, sont organisés de nombreux concours pour élire le meilleur chien de berger. Parmi les épreuves, ces chiens doivent rassembler un troupeau de moutons et le conduire à un endroit précis, par exemple dans le coin d'un champ. Du point de vue d'un physicien, le chien de berger augmente l'ordre du système. Auparavant, les moutons pouvaient être dispersés dans le champ, en particulier s'ils se sentent en sécurité et qu'aucun prédateur ne se trouve aux alentours. Notez que le chien de berger possède dans ses gènes quelque chose qui lui indique comment rassembler les moutons en un seul troupeau. Dans ces compétitions, le gagnant est celui qui rassemble le troupeau le plus rapidement, de manière ordonnée, à l'endroit indiqué par son maître.

En réalité, la situation est très similaire à celle qui consiste à débarrasser un bureau des livres, feuilles de papier et autres prospectus qui l'encombrent.

Tout comme le chien de berger réunit les moutons dans un coin du champ, il existe une façon très simple d'améliorer

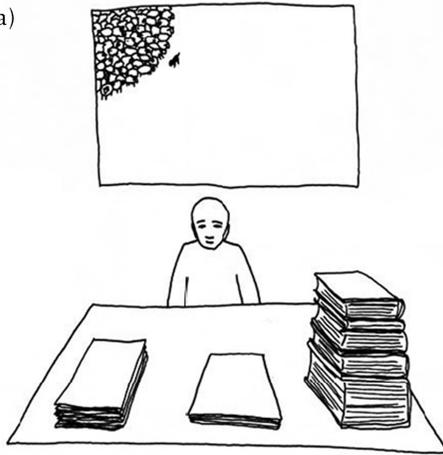
l'ordre sur un bureau : il suffit de faire, disons, trois piles, une pour les notes, une pour les journaux et les revues, et une pour les livres (Figure 3). Soudain, tous ces objets sont à leur place, et le reste du bureau est dégagé. Mais, si l'on n'y prend pas garde, très vite, les objets s'éparpillent de nouveau. De fait, et je ne vous apprends rien, la plupart de nos bureaux voient le capharnaüm revenir en un rien de temps : un bout de papier par-ci, un journal par-là, une tasse à café sur le journal, un autre bout de papier ailleurs, et ainsi de suite. Ainsi, dans le cas des moutons comme dans celui du bureau, nous avons une tendance naturelle à ce que les objets se répartissent uniformément dans l'espace disponible. Et nous constatons que les rassembler de nouveau exige un effort particulier. Bref, la situation dans laquelle les choses sont rassemblées est d'un ordre supérieur à celle dans laquelle elles sont réparties de manière uniforme.

Il est intéressant de noter qu'un gaz dans une enceinte se comporte de la même manière. Imaginez un récipient séparé en deux parties par une paroi munie d'une ouverture, fermée ou non (Figure 4). Au début, la vanne est fermée, et toutes les particules de gaz sont contenues dans une moitié, tandis que l'autre est vide. Puis nous ouvrons la vanne. Ce qui va se passer est évident : le gaz se répartit uniformément dans tout le récipient. La densité sera alors plus faible, car le gaz doit se disperser.

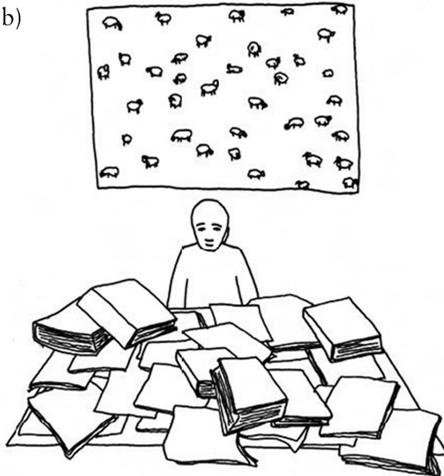


Si l'on se souvient que ce dernier est en réalité composé d'atomes et de molécules, on voit que la situation est comparable à deux champs, dont l'un est rempli de moutons. Si nous ouvrons une porte sur l'autre champ, le vide, les moutons finiront par se disperser dans les deux espaces. Nous partons évidemment du principe que les deux champs offrent la même quantité de nourriture disponible et qu'il n'y a

(a)

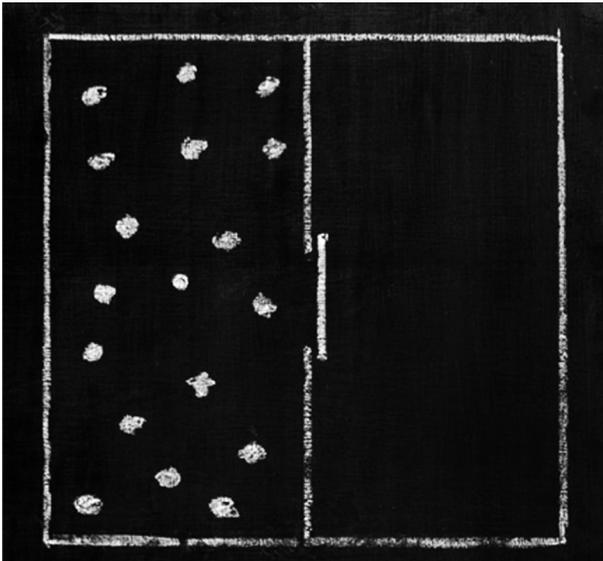


(b)

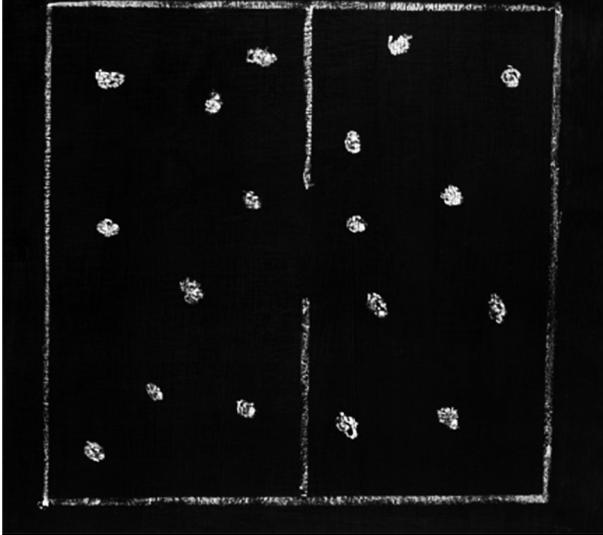


③ Créer de l'ordre (a) à partir du désordre (b) nécessite toujours un effort. Dans le cas des moutons dans le champ, comme le montre l'image au mur, c'est l'effort du chien de berger qui apporte l'ordre. Dans le cas du désordre sur le bureau, c'est l'effort de la personne. Malheureusement, tous les systèmes ont une tendance naturelle à augmenter leur désordre.

(a)



(b)



④ Le gaz, limité initialement à un côté d'un récipient (a), se répand partout aussitôt que la vanne est ouverte (b). L'opération inverse, où toutes les particules d'un gaz uniformément réparties (b) se rassemblent d'un seul côté (a), ne se produit jamais, car cela est, statistiquement, très improbable. Cela signifierait que toutes les molécules se déplacent par hasard de la même façon à travers l'ouverture. Albert Einstein observa que la lumière à l'intérieur d'une cavité se comportait de la même manière et supposa donc que la lumière, comme le gaz, devait être constituée de particules. Le lien entre probabilité et ordre fut découvert par le physicien autrichien Ludwig Boltzmann. Son tableau noir (« Vorlesungstafel ») a été utilisé pour dessiner les illustrations de ce livre.

aucun danger – ni de chien de berger ! – pour pousser le troupeau dans un sens ou dans l'autre.

Imaginons à présent l'inverse. Supposons que nous comencions l'expérience avec le gaz qui remplit les deux côtés. Se peut-il alors que tous les atomes se déplacent de leur propre gré vers une moitié du récipient, laissant l'autre vide ? Probablement pas. Pourquoi ? En principe, un tel comportement n'est pas impossible. Si nous regardons attentivement, nous observerons des atomes passer par l'ouverture dans les deux sens, certains de la droite vers la gauche, d'autres de la gauche vers la droite. Il pourrait certes arriver, par pure coïncidence, qu'à un moment donné, tous les atomes soient assemblés du même côté, mais, apparemment, c'est très, très peu probable.

De même, il est très peu probable qu'à l'intérieur d'une enceinte, tous les atomes migrent dans un coin, laissant le reste du volume vide. En principe, cela n'a rien d'impossible : puisque chaque molécule se déplace en zigzag, le hasard pourrait faire qu'à un moment donné, elles se retrouvent toutes au même endroit. Mais, là encore, c'est extrêmement improbable. Le contraire se produit bien sûr aisément : si nous plaçons tous les atomes dans un coin et les laissons voler librement, ils rempliront immédiatement le volume disponible de manière homogène.

Voilà qui nous conduit à cette observation : l'Univers tend à augmenter son désordre. Tous les atomes réunis dans un même espace représentent une situation très ordonnée ; tous les atomes remplissant le volume disponible correspondent à une situation moins ordonnée. En outre, nous constatons un lien clair entre probabilité et ordre ; plus une situation est ordonnée, moins elle devient probable.

Les physiciens aiment décrire le désordre à l'aide de la notion d'*entropie*. L'entropie n'est qu'une mesure du désordre ; plus précisément, elle reflète le nombre de façons dont une situation donnée peut être réalisée. Plus l'entropie

est haute, plus une situation est désordonnée, et plus la probabilité que cette situation existe est élevée. Dans le cas d'un gaz remplissant un certain volume, il s'avère que l'entropie croît avec l'augmentation du volume. En un sens, mettre tous les atomes dans le plus petit volume revient à les rassembler dans un coin.

En 1905, le jeune Albert Einstein fit une découverte importante : il étudia l'entropie d'un gaz occupant un certain volume et la compara à celle de la lumière remplissant le même type de volume. Il compulsait et opposa des articles scientifiques vieux de plus de cinq ans, de sorte que n'importe qui aurait pu faire la même découverte. Mais lui découvrit que l'entropie – rappelez-vous, il s'agit de la mesure du désordre – du rayonnement en général, ou de la lumière en particulier, remplissant un certain volume est très similaire à celle du gaz occupant ce même volume. Il s'aperçut en effet que l'expression mathématique dérivée par le physicien allemand Wilhelm Wien pour l'entropie du rayonnement remplissant un certain volume était la même que celle dérivée précédemment par le physicien autrichien Ludwig Boltzmann pour un gaz remplissant un récipient. Plus exactement, les deux expressions mathématiques de l'entropie varient de la même manière si l'on modifie le volume disponible.

Devant cette analogie, Einstein fit une conjecture très audacieuse. Il savait que l'expression de l'entropie d'un gaz remplissant un volume pouvait facilement être comprise sur la base de la façon dont les molécules individuelles se déplacent et de l'hypothèse improbable qu'elles ne remplissent qu'une partie de l'espace disponible. En raison de l'analogie entre les deux expressions mathématiques pour la lumière et les particules, Einstein supposa que la lumière était également composée de particules qui, tout comme les molécules, se déplacent et n'aiment pas non plus finir tassées dans un coin dès lors qu'un grand volume se trouve à leur disposition.

Einstein se montra cependant très prudent et intitula son article « Sur un point de vue heuristique concernant la production et la transformation de la lumière ». Les physiciens parlent d'*heuristique* lorsqu'ils évoquent une idée qui les aide à découvrir, formuler des suppositions, à se faire une idée d'une situation donnée. Cela ne signifie cependant pas nécessairement qu'ils sont en mesure de prouver leur point de vue ; peut-être Einstein ne voulait-il pas trop offenser les partisans de la théorie ondulatoire de la lumière. Quoi qu'il en soit, il est lui-même très explicite dans cet article ; il prend les particules de lumière au pied de la lettre, comme des objets ponctuels se déplaçant dans l'espace, à l'instar des atomes.

Non content de faire cette supposition audacieuse, Einstein se demanda également où, ailleurs dans la nature, l'idée que la lumière soit une particule pouvait avoir des conséquences intéressantes. Il suggéra que son explication, si elle était correcte, permettrait également d'expliquer un phénomène que les physiciens de l'époque ne comprenaient pas : l'effet *photo-électrique*.

C'est le physicien allemand Wilhelm Hallwachs qui, en 1888, avait découvert cet effet. Il avait constaté que quelque chose d'intéressant se produisait lorsqu'on éclairait une plaque métallique. La lumière est en effet capable d'arracher des électrons d'un métal, électrons qui peuvent facilement être détectés sous la forme d'un courant électrique. Les chercheurs avaient essayé d'expliquer cet effet en utilisant la théorie ondulatoire de la lumière, qui, à l'époque, était la théorie admise. Mais la notion d'onde se heurta à de sérieux problèmes lorsqu'il s'est agi d'interpréter ce qu'avaient observé les expérimentateurs.

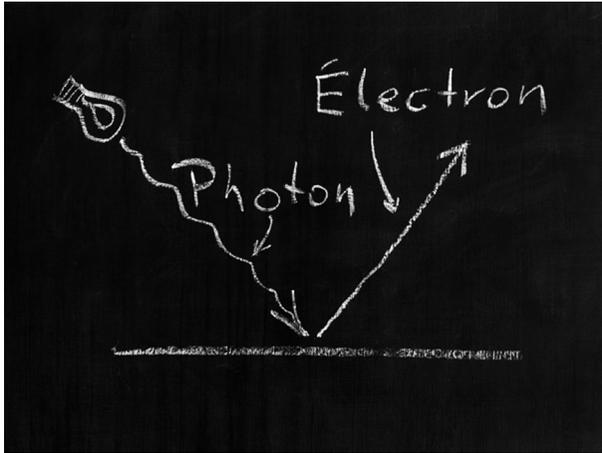
L'une des caractéristiques inexplicables est que les électrons apparaissent instantanément lorsque nous commençons à éclairer la plaque métallique.

En quoi est-ce un problème pour le concept d'onde ? Eh bien, une onde est une oscillation qui va et vient. Dans le cas

de la lumière, il s'agit de l'oscillation d'un champ électrique et d'un champ magnétique. Lorsque la lumière entre en contact avec une plaque métallique, les électrons à l'intérieur de cette dernière commencent à osciller, d'abord lentement, puis de plus en plus vite à mesure qu'ils absorbent davantage de lumière, jusqu'à ce qu'ils se détachent de la surface du métal et deviennent libres.

Pour le comprendre, imaginez une personne sur des patins à roulettes qui oscillerait d'avant en arrière dans un demi-tube. À l'aide de ses pieds, elle pompe de plus en plus d'énergie dans l'oscillation, jusqu'à être capable de sauter par-dessus le tube – et, manifestement, il lui faut un certain temps pour accumuler suffisamment d'énergie pour y parvenir. Ainsi, pour notre effet photoélectrique, il n'y aurait rien de surprenant à ce que les électrons commencent à sortir aussitôt que la surface métallique est éclairée avec un puissant faisceau lumineux, car ils pourraient alors être amenés à de fortes oscillations en un temps très court. Cependant, en menant des expériences avec une très faible lumière, des physiciens ont découvert que les électrons commençaient à sortir immédiatement dans tous les cas. Or, selon la théorie ondulatoire, un certain temps est nécessaire avant que les électrons aient accumulé suffisamment d'énergie. Et ce n'était là qu'un des problèmes posés par la conception ondulatoire de la lumière !

Toutefois, si la lumière est constituée de particules, ce problème est résolu. Comme le nota Einstein, une particule de lumière individuelle, un photon individuel, peut en effet, par le plus grand des hasards, expulser un électron individuel (Figure 5). Cela explique pourquoi les électrons commencent à sortir immédiatement sitôt que nous envoyons un faisceau lumineux, et pourquoi la quantité d'électrons observée est strictement proportionnelle à la quantité de lumière qui éclaire la surface. Doubler l'intensité lumineuse signifie doubler le nombre de photons qui frappent la surface, ce qui double également le nombre d'électrons libérés.



⑤ Une lumière frappant une surface métallique peut expulser des électrons, qui s'éloignent ensuite. Il s'agit de l'effet photoélectrique qu'Einstein expliqua en considérant que la lumière est constituée de particules individuelles, appelées photons.

Einstein émit une autre prédiction audacieuse sur la base de ce modèle, et c'est à ça que l'on mesure la valeur des physiciens. Une théorie ne se doit pas seulement d'expliquer certains phénomènes déjà observés en laboratoire ou dans la nature ; l'argument le plus convaincant en faveur d'une nouvelle théorie, c'est quand elle est capable de prédire quelque chose que personne n'avait été en mesure de calculer jusqu'alors et qui n'avait pas encore été observé. Ainsi, Einstein prédit pour l'effet photoélectrique un lien direct entre la fréquence de la lumière qui éclaire la plaque métallique et l'énergie des électrons qui en sortent.

Supposons qu'un photon doté d'une certaine énergie frappe la plaque métallique. Il peut alors expulser ou non un électron. Disons que ce soit le cas. Alors, à quelle vitesse l'électron se déplacera-t-il après avoir quitté la plaque métallique ? Quelle sera son énergie ? Il y a divers cas de figure : le photon peut heurter l'électron de telle sorte qu'il ne puisse pas lui transmettre toute son énergie, tout comme une boule

Le Bal des photons

de billard peut en percuter une autre et continuer à se déplacer. Mais il se pourrait tout aussi bien que le photon frappe l'électron de façon à lui transmettre toute son énergie ; ce dernier se déplacerait alors assez rapidement, mais pourrait perdre une partie de son énergie à l'intérieur de la plaque métallique avant d'en sortir. Il est également possible que l'électron soit heurté par le photon à la surface du métal, de sorte qu'il ne perdrait aucune énergie avant de devenir libre. Il faudrait néanmoins qu'il sorte. Toute surface exerce une certaine attraction sur les électrons et, cette quantité d'attraction dépend du matériau de la surface, mais, dans tous les cas, l'électron a besoin d'énergie pour surmonter cette attraction.

Ainsi, tout se résume à l'énoncé suivant : si nous avons de la chance et que le photon frappe l'électron de manière adéquate, et si nous avons encore plus de chance et que l'électron ne perd pas toute son énergie à l'intérieur du métal, il en ressortira avec l'énergie initiale du photon, diminuée de l'énergie nécessaire pour sortir du métal. Nous devons à présent nous demander quelle est l'énergie initiale du photon. Et c'est là qu'Einstein reprend une idée suggérée par Max Planck cinq ans auparavant, à savoir que l'énergie est quantifiée. Elle se présente en paquets, en multiples de quanta tels que l'énergie d'un photon E est donnée par sa fréquence ν multipliée par une constante, le quantum d'action de Planck h : $E = h\nu$. Si Einstein a raison, alors l'énergie maximale avec laquelle les électrons sortent d'un métal doit augmenter proportionnellement avec la fréquence de la lumière qui éclaire la plaque. Cette prédiction a été confirmée par une très belle expérience réalisée par le physicien américain R. A. Millikan en 1916. Pour ses travaux sur l'effet photoélectrique, Einstein reçut quant à lui le prix Nobel de physique en 1921.

EINSTEIN ET SON PRIX NOBEL

L'histoire du prix Nobel d'Einstein est en réalité assez intéressante. En général, pour recevoir cette récompense suprême, une personne doit être nommée. L'Académie royale des sciences de Suède, qui choisit chaque année le lauréat du prix, dispose d'un petit comité de sélection ; de nombreux physiciens du monde entier sont invités à proposer des candidatures, puis l'Académie sélectionne parmi les candidats le lauréat, ou jusqu'à trois co-lauréats au maximum. Pour la décision finale, elle fait appel à des experts reconnus dans leurs domaines respectifs et leur demande de donner leur avis sur les nominations. À l'époque d'Einstein, ce travail d'expert était effectué principalement par les membres du comité Nobel eux-mêmes.

Einstein avait été nommé à de nombreuses reprises, la première en 1910, cinq ans seulement après son *annus mirabilis*. Au cours de cette remarquable année 1905, il rédigea en effet cinq articles scientifiques. Dans l'un d'eux, il propose sa théorie de la relativité ; dans un autre apparaît pour la première fois l'équation la plus célèbre de la physique, $E = mc^2$, et dans le troisième, dans le domaine de la physique atomique, il livre une très bonne estimation de la taille des atomes. Mais c'est

Le Bal des photons

dans le premier article, publié en 1905, qu'il exposa le concept de photons.

Presque toutes les nominations d'Einstein se rapportaient à sa théorie de la relativité, seulement voilà : deux membres du comité Nobel n'appréciaient pas cette théorie, voire la pensaient erronée. Le fait qu'Einstein n'ait pas reçu de Nobel finit par devenir une source d'embarras au sein de la communauté scientifique, jusqu'au jour où le physicien théoricien Carl Wilhelm Oseen devint membre de l'Académie et comprit pourquoi. Il suggéra alors de donner le prix à Einstein « pour sa découverte de la loi de l'effet photoélectrique » – en substance, pour son concept de particules de lumière, les photons. Toujours est-il qu'Oseen parvint enfin à convaincre le comité, qui, en 1922, décida de décerner le prix Nobel de l'année 1921, non attribué encore, à Einstein « pour ses services rendus à la physique théorique, en particulier pour sa découverte de la loi de l'effet photoélectrique ». Fait notable, l'Académie publia également une mise en garde, ce qui montre qu'en 1922, certains de ses membres estimaient encore qu'il pouvait y avoir un risque que la théorie de la relativité se révèle fausse.

Aujourd'hui encore, une question reste ouverte : pourquoi Einstein n'a-t-il jamais reçu le prix Nobel pour la théorie de la relativité ? Il vécut jusqu'en 1955, et il arrive que certains reçoivent deux prix Nobel dans diverses disciplines, voire deux prix Nobel de physique. Allez savoir, peut-être Einstein n'a-t-il tout simplement jamais été nommé de nouveau. Aujourd'hui, la théorie de la relativité a même trouvé des applications techniques très répandues. Ainsi, le système mondial de localisation (GPS) ne fonctionnerait pas correctement s'il ne tenait pas compte du fait que les horloges atomiques de précision utilisées sur les satellites fonctionnent à une vitesse différente de celle qu'elles auraient au sol, une des nombreuses conséquences de la théorie de la relativité d'Einstein.

UNE OPPOSITION

Nous venons d'apprendre que la lumière peut s'interpréter de deux manières : soit comme une particule, soit comme une onde. Nous avons vu qu'il existe en réalité des expériences spécifiques qui corroborent les deux points de vue. Si l'expérience de Young nous permet de conclure que la lumière est une onde, l'effet photoélectrique semble, lui, confirmer que la lumière est constituée de particules. Nous pourrions certes considérer ces divergences comme négligeables, mais nous avons également appris que les particules et les ondes sont deux concepts radicalement différents. Il y a donc manifestement une opposition. Quelle idée croire ?

Conscient de cette opposition, Einstein y fait déjà allusion dans son premier article de 1905. Ce pourrait même très bien être la raison pour laquelle il le qualifia de « très révolutionnaire ». Lorsqu'il suggéra que la lumière était une particule, il fut obligé de mettre de côté toutes les expériences qui confirment que la lumière est une onde, de les ignorer. Peut-être aujourd'hui, plus de cent ans plus tard, sommes-nous en mesure de mieux répondre à la question. La lumière est-elle une particule ou une onde ? Existe-t-il un moyen de comprendre, par exemple, l'expérience de Young en partant du principe selon lequel la lumière est constituée de particules ?

Le Bal des photons

Pour Einstein, il était clair que les phénomènes d'interférence, si caractéristiques du concept d'onde et apparents dans l'expérience de Young sur les doubles fentes, étaient incompatibles avec le concept de particules. Considérons cette expérience une fois de plus (Figure 2). Lorsque les deux fentes sont ouvertes, nous voyons sur l'écran d'observation des bandes sombres et claires. Dans le cadre de la théorie ondulatoire, celles-ci s'expliquent facilement : lorsqu'une onde traverse les deux fentes, elle donne naissance à deux ondes distinctes, chacune émergeant de l'une des fentes. Ces ondes partielles se déplacent vers l'écran d'observation. À certains endroits, les deux ondes oscillent de façon synchrone – c'est-à-dire qu'elles oscillent dans le même sens, de haut en bas –, de sorte qu'elles se renforcent mutuellement, ce qui donne lieu aux bandes claires. À d'autres endroits de l'écran d'observation, les deux ondes oscillent de manière radicalement opposée : pendant que l'une monte, l'autre descend. Elles s'annulent donc mutuellement, ce qui donne naissance aux franges sombres, aux bandes sombres. Posons-nous à présent la question suivante : existe-t-il une chance de comprendre ce phénomène si l'on considère que ce ne sont pas des ondes qui traversent les deux fentes, mais des particules ? Car voici le problème : une onde peut remplir un grand espace ; elle est capable, dans notre cas, de traverser les deux fentes. Une particule doit, quant à elle, décider si elle passe par une fente ou par l'autre.

Il fallut attendre le développement de la théorie quantique complète par le physicien allemand Werner Heisenberg et le physicien autrichien Erwin Schrödinger en 1925-1926 pour mieux comprendre comment concilier la théorie corpusculaire et la théorie ondulatoire de la lumière.

COMMENT NOUS SOMMES DEVENUS CERTAINS DE L'INCERTITUDE

Nous sommes en 1925. Werner Heisenberg, un jeune physicien allemand d'à peine vingt-cinq ans, vient de terminer son doctorat et travaille à l'université de Göttingen en Allemagne. Au fil des ans, la ville était devenue l'un des centres scientifiques du monde, où étaient nées bon nombre des grandes idées nouvelles en mathématiques et en physique. De toute évidence, c'est ce qui avait attiré le jeune Heisenberg, qui avait suivi ses études à la Ludwig-Maximilians-Universität, l'université de Munich.

Heisenberg décida de travailler sur le problème le plus important en physique à cette époque : comprendre la physique atomique et son lien avec l'idée du quantum. Un petit rappel de la situation – qui était désespérée et durait depuis un certain temps déjà : en 1900, Max Planck avait introduit le concept de quantum comme une astuce purement mathématique. Il en avait besoin pour expliquer la couleur spécifique d'un corps incandescent à une certaine température, plus précisément la distribution particulière des couleurs observées. Loin d'être accepté, l'acte de désespoir de Planck fut rejeté par de nombreux physiciens, dont lui-même.