

## **Dompter le photon : la lumière pour physicien au XXIème siècle**

Monsieur le conseiller d'état,  
Messieurs les représentants du monde politique,  
Monsieur le recteur,  
Mesdames, Messieurs, Chers collègues,

Il m'a été donné la tâche de parler de la lumière en relation avec la physique. C'est avec plaisir mais non sans angoisse que j'ai accepté, car je sais que ce discours est d'un type plutôt inhabituel pour moi. J'ai quinze minutes, et ai décidé de les utiliser pour essayer de convoier une idée de ce que représente la recherche actuelle des physiciens s'occupant de lumière, et vous montrer à quel point ces sujets sont encore des enfants des grandes préoccupations théoriques de la fin du 19 et début du 20ème siècle.

L'obsession du physicien et, en fait, un peu la raison d'être du scientifique, est la volonté d'unification des lois de la nature. La lumière est le sujet de la deuxième grande unification en physique. La première fut la révolution de Newton, qui a eu l'intuition qu'une même force régissait la chute des corps sur la terre et la révolution des astres du ciel.

Au début du 19ème siècle, les phénomènes électriques étaient connus par l'expression de deux forces différentes: la force électrostatique, qui est celle qui permet à un morceau d'ambre frotté d'attirer des petits objets isolants, et la force magnétique, par laquelle des morceaux d'un minerais appelé magnétite s'attirent et s'alignent sur le champ magnétique terrestre, permettant la construction des boussoles. Ces phénomènes semblaient irréductiblement séparés et différents, plutôt anecdotiques et complètement distincts des phénomènes lumineux. Puis on découvre les courants électriques et le fait qu'ils puissent avoir eux aussi une action magnétique.

C'est là qu'entre en jeu le génie de Maxwell. James Clerk Maxwell, en 1864, réécrit les lois de l'électricité et du magnétisme sous une forme compacte en utilisant une notion moderne, les champs électriques et magnétiques. Faraday avait montré qu'un champ magnétique fluctuant induisait une tension, c'est à dire un champ électrique. Maxwell utilise un argument de consistance mathématique pour prouver que l'inverse doit forcément être vrai: un champ électrique fluctuant doit, lui aussi créer un champ magnétique. De plus, il montre mathématiquement que cette alternance entre champs électriques et magnétiques se comporte comme une onde, dont on peut calculer la vitesse. Or celle-ci correspond très bien avec la vitesse que les expérimentateurs d'alors avaient mesuré pour la propagation des ondes lumineuses!

En un seul coup de baguette magique théorique, on relie entre eux des forces d'apparence différentes avec une série de phénomènes ondulatoires dont on était pas vraiment sûr de l'origine.

En effet, en changeant sa fréquence et donc sa longueur d'onde, une onde lumineuse change d'abord de couleur: si on réduit cette fréquence, on passe du bleu au rouge, puis à l'infrarouge, d'abord proche, puis lointain, puis on arrive aux ondes radars, puis les ondes radios. Comme ces ondes sont toujours des oscillations d'un champ électrique et magnétiques, on les appelle ondes électromagnétiques. En variant la fréquence de ces ondes, on ne change pas leur essence mais simplement leur interaction avec la matière. D'un côté de ce spectre électromagnétique, les ondes radio, d'un autre, des rayons mystérieux qui traversent la matière et que l'on nomme d'abord, pour cette raison, rayons X.

Non seulement ces équations contenaient en elle ce spectre électromagnétique, elle possédaient aussi une nouvelle révolution: la relativité. En effet, le génie d'Einstein, en 1905, a été de donner l'interprétation correcte du comportement bizarre des équations de Maxwell vis-à-vis des transformations de vitesse: il interprète ces propriétés comme venant de la structure même de l'espace-temps, et écrit les premières équations de la relativité, la relativité dite restreinte. Dans ce modèle, la force exercée par un aimant est la conséquence d'un effet du rétrécissement des distances dû à la relativité. Pas besoin de monter dans une fusée pour en subir les effets.

Mais la compréhension des phénomènes lumineux allait engendrer la révolution suivante de la physique, celle qui allait générer des controverses dont les nous entendons encore les échos aujourd'hui. En effet, pour expliquer le spectre dit du corps noir, autrement dit expliquer la couleur des rayons lumineux sortant d'un four chauffé, Plank est obligé de postuler que la lumière échangeait son énergie non de manière continue, mais par petits grains appelés des quantas. Un quanta de lumière, la plus petite unité de celle-ci, l'indivisible de Démocrite pour les ondes lumineuses, est le photon. En effet, on ne peut pas détecter moins de lumière que un photon. Avec ce postulat, la physique entre dans l'ère de la mécanique des quantas, ou mécanique quantique. Cette théorie allait poser beaucoup de problèmes aux physiciens et aux philosophes à cause de certaines propriétés non-intuitives des objets manipulés. Einstein deviendra le plus célèbre critique de cette théorie, imparfaitement résumé par cette citation "dieux ne joue pas aux dés". Non seulement il n'existe pas pour le moment d'alternative satisfaisante à la théorie quantique, mais ces propriétés contre-intuitives ont été maintenant directement vérifiées dans de nombreuses expériences.

Avançons de presque un siècle. Celui-ci a vu des avancées spectaculaires dans la technologie et la compréhension des phénomènes naturels. En 1999, suite à un concours d'idées du Fonds National, un pôle d'excellence en recherche est proposé sur la thématique de la "photonique quantique".

En parcourant les domaines couverts, il est amusant de noter à quel points ceux-ci sont encore fortement affiliés aux découvertes de ce tout début du XX<sup>ème</sup> siècle.

La relativité a scellé le lien entre l'espace et le temps. La lumière avance de 30 cm pour chaque nanoseconde. Une impulsion lumineuse de quelque longueurs d'ondes durera une femto seconde, et correspondra à une distance parcourue de 300nm. Pour fabriquer des impulsions encore plus courtes, il faut utiliser des impulsions d'une longueur d'onde encore plus courte, correspondant à des rayons X. Un thème de ce pôle de recherche, porté par le Prof. U. Keller de l'ETHZ, est justement la génération d'impulsion de centaines d'attosecondes de long, obtenue en convertissant la lumière de lasers du visible dans les rayons X par des phénomènes non-linéaires. Une centaines d'attosecondes, c'est  $10^{-16}$  secondes: 15 zéro après la virgule. Notre coeur bat environs une fois par seconde, et ces battements se situent en fait à mi-chemin entre les durées extrêmes que nous pouvons concevoir en science expérimentales: il y a environs autant d'attosecondes dans un battement de coeur que ceux-ci dans l'âge de l'univers. Quelles applications possibles pour ce que les anglophones appellent déjà « attoscience »? Une de celle-ci est en relation avec un des saint Graal du chimiste: voir une réaction chimique en temps réel. Mais ceci n'est qu'une des applications possible de cette nouvelle science.

Imaginez correspondre avec un interlocuteur en utilisant du Morse. Vous tenez une source lumineuse, il a un détecteur très sensible. Que se passe-t-il si vous diminuez progressivement l'intensité de cette source? Comme nous l'enseigne la mécanique quantique, il arrivera un moment ou chaque impulsion de Morse ne pourra contenir qu'un photon. En effet, vous ne pouvez pas émettre un demi-photon par impulsion: soit celui-ci est émis, soit il ne l'est pas. Ces photons uniques ont encore d'autre propriétés qui irritaient Einstein. On ne peut par exemple pas les détecter sans les détruire, et une fois détectés, il est impossible d'exactement les dupliquer. C'est même l'objet d'un théorème de la mécanique quantique: le clone quantique n'existe pas. (Au fond, c'est une pensée philosophiquement plutôt rassurante: quelque soit les progrès de la génétique, un vrai clone est mathématiquement impossible, n'en déplaisent aux narcisses!). Donc, en codant notre message avec des photons uniques, on peut transmettre celui-ci en étant sûr qu'il n'a pas été intercepté. Le groupe du professeur Nicolas Gisin, de l'université de Genève, utilise des techniques basées sur les propriétés étranges de la mécanique quantique pour transmettre des clés de codage dans lesquelles la physique est garante de l'inviolabilité de la transmission. Ces travaux ont déjà dépassé le stade de la recherche pure, un premier client a utilisé cette cryptographie quantique pour sécuriser sa base de donnée.

Pour émettre des ondes radios, à l'extrémité basse fréquence du spectre électromagnétique, on utilise habituellement des courants alternatifs générés par un oscillateur électrique. Pour générer de la lumière visible, on a recours à une autre technique, dans laquelle des électrons font des transitions entre des niveaux quantiques d'un atome ou d'une molécule, ou alors encore plus simplement en chauffant un solide à une température élevée, comme cela est fait dans une lampe à incandescence. Entre ces deux extrêmes, il existe un portion du spectre électromagnétique dans laquelle il était difficile de fabriquer des sources optiques. Cette région correspond à des fréquences de l'ordre du Terahertz, ou  $10^{12}$  Hertz. Pour cette raison, on a appelé cette gamme de fréquence "Terahertz gap", le trou du terahertz. La raison du manque de source dans cette région du spectre est que d'un côté les oscillateurs électroniques n'arrivent pas à fonctionner aussi rapidement (un terahertz, c'est quand même une fréquence 1000x plus haute que celle utilisée dans votre ordinateur ou dans un téléphone cellulaire) et d'autre part la différence d'énergie correspondante à cette fréquence reste très faible. Il est donc difficile de trouver des systèmes quantiques naturels comme des molécules ou des atomes qui ont un spectre avec des transitions dans le Terahertz qui permettent l'émission spontanée ou stimulée. Ici, à Neuchâtel, nous travaillons à la fabrication de nouvelles sources terahertz basées sur des transitions dans des structures artificielles. L'idée est de fabriquer des sandwich de semiconducteurs dans lesquels les électrons sont confinés, et à cause de la mécanique quantique, obligés de vibrer à certaines énergies bien définies. Tout comme la longueur d'une corde de guitare conditionne la hauteur du son émis par celle-ci, l'épaisseur des puits d'un laser à cascade quantique conditionne la fréquence de l'onde électromagnétique émise par celui-ci. On peut ainsi créer des structures quantiques artificielles dans lesquelles l'électron va être forcé d'émettre de la lumière Terahertz. Ces recherches correspondent à des développements très récents, et il est encore trop tôt pour pouvoir avoir une idée claire sur leurs applications possibles. Une chose est sûre, les radios-astronomes vont utiliser des lasers à cascade pour explorer les éléments fondamentaux du cosmos. Mais plus près de nous, il y a aussi des applications dans des domaines médicaux qui sont envisagées. En particulier, ces sources pourraient être utilisées pour le remplacement des mammographies ou une détection de cancers cutanés.

Pour un physicien, la lumière, et son interaction avec la matière, est à la fois à l'origine des grandes idées théoriques de la physique moderne (l'unification des phénomènes, l'espace-temps, la dualité onde-particule, les champs) et probablement la théorie vérifiée expérimentalement avec la plus grande précision. Ce même spectre du corps noir qui a été à l'origine de la théorie quantique est aussi une des observations cosmologiques fondamentales soutenant la théorie du Big Bang. Malgré cela, lorsque que l'on me demande: Monsieur, je suis d'accord que la lumière soit une oscillation entre un champ électrique et magnétique, mais qu'est-ce qu'un champ? Ou qu'est-ce qu'un photon? Je suis très emprunté, mais en bonne compagnie.

Descartes, en 1626, dans le discours de la méthode, disait de la lumière:

« Or, n'ayant ici autre occasion de parler de la lumière, que pour expliquer comment ses rayons entrent dans l'oeil, et comment ils peuvent être détournés par les divers corps qu'ils rencontrent, il n'est pas besoin que j'entreprenne de dire au vrai quelle est sa nature, et je crois qu'il suffira que je me serve de deux ou trois comparaisons, qui aident à la concevoir en la façon qui me semble la plus commode, pour expliquer toutes celles de ses propriétés que l'expérience nous a fait connaître, et pour déduire en suite toutes les autres qui ne peuvent pas si aisément être remarquées; imitant en ceci les astronomes, qui, bien que leurs suppositions soient presque toute fausses ou incertaines, toutefois, à cause qu'elles se rapportent à diverses observations qu'ils ont faites, n'en laissent pas d'en tirer plusieurs conséquences très vraies et très assurées »

En langage moderne, Descartes veut décrire la nature par un modèle, dont la seule pertinence n'est que sa valeur prédictive; et, dans cette optique là, notre description en termes de champs est simplement dans la tradition Cartésienne.

On pourrait penser avoir tout résolu avec cet aphorisme, que finalement la physique ne fait que générer de modèles abstraits dont la seule qualité est de prédire avec précision le réel. Non, l'exactitude de la prédiction n'est pas la seule qualité d'une description mathématique de notre univers. Les théories physiques ne naissent pas au hasard, elles découlent souvent d'une intuition philosophique et leur appel est non seulement pratique mais aussi esthétique. Comme le disait Hardy dans son « apologie du mathématicien », une théorie doit être « *belle et sérieuse* » (*beautiful and have seriousness*). Dans le cas de la lumière, la beauté et le sérieux est contenu dans cette simplicité mathématique connectant des phénomènes tellement variés, liant le fonctionnement d'un téléphone cellulaire avec les théories cosmologiques les plus récentes.

C'est cette beauté, qui est, à mon goût, qui fait de la physique une des conquêtes les plus achevées de l'esprit humain et c'est dans cet esprit que je voudrais continuer à enseigner cette matière - et à « *dompter les photons* ».