



HAL
open science

L'étude de la lumière : une aventure qui a chamboulé notre représentation du monde

Christophe Daussy

► **To cite this version:**

Christophe Daussy. L'étude de la lumière : une aventure qui a chamboulé notre représentation du monde. The Conversation France, 2020, Science. hal-02984390

HAL Id: hal-02984390

<https://hal.science/hal-02984390>

Submitted on 30 Oct 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NoDerivatives 4.0 International License

L'étude de la lumière : une aventure qui a chamboulé notre représentation du monde

*Christophe DAUSSY, Université Sorbonne Paris Nord, Laboratoire de Physique des Lasers, CNRS,
UMR 7538 – 93430 Villetaneuse*

Dans notre société, les technologies reposant sur notre connaissance et notre maîtrise de la lumière sont devenues incontournables : écrans, télécommunications, imagerie ou encore le laser et ses nombreuses applications. Dans le domaine de la recherche, l'optique et la photonique ont fourni ces dernières décennies des instruments de haute sensibilité qui ont permis par exemple la détection d'un trou noir au centre de notre galaxie (grâce à l'optique adaptative) [1], la détection des ondes gravitationnelles (grâce à des interféromètres géants) [2] ou encore la réalisation des horloges les plus stables au monde [3]. Au-delà de ces succès remarquables, les travaux sur la lumière - ou avec la lumière - ont marqué depuis des siècles nos représentations du monde physique. Nous nous intéressons ici à montrer les liens étroits qui existent entre les découvertes dans ce domaine de recherche et l'émergence au XXe siècle de théories qui ont chamboulé notre compréhension de la lumière, mais aussi de l'espace, du temps et de la matière.

L'histoire qui nous intéresse débute au XVIIe siècle. L'étude quantitative de la déviation des rayons de lumière permet alors à Snell et Descartes d'établir les lois de l'optique géométrique [4]. La modélisation de ce phénomène conduit les scientifiques à prendre position sur deux questions fondamentales : Quelle est la nature de la lumière et à quelle vitesse se propage-t-elle ? Ces deux problèmes vont être débattus pendant plus de deux siècles et mèneront les physiciens vers deux révolutions : la théorie de la relativité et la théorie quantique.

Au XVIIe siècle, pour Descartes et Newton la lumière est de nature corpusculaire et elle se propage plus vite dans le verre que dans l'air. De son côté, Huygens développe une théorie ondulatoire qui le conduit à considérer que la lumière se propage plus lentement dans le verre que dans l'air. Alors onde ou corpuscule ? Le succès écrasant de la mécanique Newtonienne va totalement éclipser le modèle ondulatoire pendant plus d'un siècle. Au début du XIXème siècle les expériences d'interférences lumineuses réalisées par Young mettent en défaut la théorie corpusculaire de Newton. Le débat semble alors définitivement tranché lorsque en 1850, Fizeau et Foucault montrent expérimentalement que la vitesse de la lumière est plus faible dans l'eau que dans l'air. Huygens avait donc raison : La lumière est bien une onde !

Notre compréhension de la nature de cette onde doit ensuite beaucoup aux travaux de Maxwell qui associe phénomènes électriques, magnétiques et optiques et montre que la lumière est une onde électromagnétique. Mieux, sa vitesse dans le vide doit être invariante : elle vaut toujours c quelle que soit la vitesse de la source ou de l'observateur. Et là les choses se compliquent ! En effet cette invariance de la vitesse de la lumière est incompatible avec une loi centrale en mécanique Newtonienne, la loi galiléenne de composition des vitesses [5]. Malgré ce point noir ainsi qu'un autre problème non résolu, le calcul de la quantité de lumière émise par rayonnement thermique (le problème du corps noir), beaucoup de scientifiques considèrent à la fin du XIXe siècle notre représentation du monde physique comme pleinement aboutie et la physique pratiquement achevée. Pourtant, les réponses qui vont être apportées à ces deux problèmes seront les bases d'une véritable révolution.

La solution qui permettra de réconcilier électromagnétisme et mécanique est apportée en 1905 par Einstein. L'invariance galiléenne cède la place à l'invariance relativiste pour donner naissance à la relativité restreinte. Cette nouvelle théorie va chambouler notre vision de l'espace, du temps, de la

matière. c n'est plus simplement la vitesse de toutes les ondes électromagnétiques dans le vide, elle devient une vitesse limite infranchissable. Elle acquerra en 1983 le statut de constante fondamentale de référence lorsqu'elle sera fixée pour redéfinir l'unité de longueur du nouveau Système International. L'existence d'une telle limite impose de revoir la notion de simultanéité de deux événements : Elle dépend du mouvement de l'observateur. Conséquence, l'espace et le temps ne sont plus absolus et doivent être repensés en terme d'un nouveau concept, l'espace-temps. Les longueurs et les durées ne sont plus absolues. Les règles se contractent et les horloges ralentissent lorsqu'elles sont en mouvement ! Le concept de masse doit également être redéfini à la lumière de la fameuse relation $E = mc^2$ qui pose l'équivalence entre masse et énergie.

En 1900, la solution au problème du corps noir est apportée par Planck moyennant une hypothèse déconcertante : la lumière est émise de façon discontinue par grains d'énergie, les quanta. Dans la foulée, Einstein s'attaque à l'effet photoélectrique [6]. S'appuyant sur les travaux de Planck, il interprète cet effet en considérant que la lumière est composée de grains d'énergie $h\nu$ (h est la constante de Planck et ν la fréquence). C'est la naissance du concept de photon et avec lui une nouvelle page du débat sur la nature de la lumière.

Comment concilier les ondes électromagnétiques de Maxwell et les photons d'Einstein ? La solution apportée à cette question trouve ses racines dès le XVII^e siècle. Fermat formule le principe « du temps minimum » qui lui permet de retrouver les lois de l'optique géométrique. Ce principe est ensuite étendu à la mécanique par Maupertuis pour donner le principe de « moindre action » : La trajectoire d'un point matériel est toujours celle qui minimise l'action, grandeur obtenue en multipliant la quantité de mouvement et le chemin parcouru [7]. On peut voir dans ces deux principes une forme de similitude entre le traitement de la lumière et celui de la matière, similitude qui sera formalisée par Hamilton dans une nouvelle écriture des lois de la mécanique. Il faudra ensuite attendre les travaux de Planck et l'introduction du quantum d'action h , d'Einstein qui quantifie la lumière, pour qu'en 1924 de Broglie apporte la solution inattendue qui réconciliera définitivement onde et photon : la lumière se comporte tantôt comme une onde, tantôt comme des corpuscules, tout dépend des conditions de l'expérience. On parle de dualité onde-corpuscule. Encore plus déroutant, il généralise cette dualité à la matière : on doit donc pouvoir transposer aux électrons, aux atomes, les expériences de l'optique ondulatoire. C'est sur cette base que sera élaborée une nouvelle mécanique, la mécanique quantique dont Schrödinger établit l'équation centrale, l'équation d'onde pour une particule.

Ce nouveau cadre théorique bouleverse à son tour notre représentation de la matière et des interactions. La notion de trajectoire d'une particule doit être repensée à lumière de l'amplitude de probabilité de la fonction d'onde dont le module au carré représente la probabilité de trouver la particule en un point de l'espace. La prédictibilité déterministe classique laisse alors la place à la prédictibilité probabiliste quantique. Enfin les conditions de la mesure, l'observateur, doivent être intégrées à la description du système quantique. Dans ce cadre, h acquiert le statut de constante fondamentale pour devenir le « quantum d'action » qui traduit la discontinuité des interactions et représente la limite inférieure de toute action. En 2019, h devient même une constante de référence fixée pour définir l'unité de masse [8].

La prise en compte dans un même cadre théorique des constantes h et c conduira ensuite au cours de la seconde moitié du XX^e siècle à l'unification des théories relativiste et quantique pour aboutir aux théories de l'interaction électromagnétique, de l'interaction faible et de l'interaction forte. Le modèle standard rassemble ces trois théories et définit aujourd'hui notre représentation de la physique des particules élémentaires et des interactions. Au niveau ultime de cette démarche unificatrice, la prise en compte de la constante de gravitation G devrait permettre de formuler une

théorie quantique et relativiste de la gravitation [9]. Cette théorie qui reste à ce jour encore à construire ne manquera pas à son tour de bousculer notre représentation du monde.

Références :

[1] <https://www.photoniques.com/articles/photon/pdf/2012/02/photon201258p32.pdf>

[2] <https://lejournal.cnrs.fr/articles/a-detecte-des-ondes-gravitationnelles>

https://www.canal-u.tv/video/iap/la_detection_des_ondes_gravitationnelles.48699

[3] <https://lejournal.cnrs.fr/billets/la-demesure-de-la-precision>

[4] https://fr.wikipedia.org/wiki/Lois_de_Snell-Descartes#:~:text=Les%20lois%20de%20Snell%2DDescartes%20d%C3%A9crivent%20le%20comportement%20de%20la,base%20de%20l'optique%20g%C3%A9om%C3%A9trique.

[5] https://fr.wikipedia.org/wiki/Composition_des_mouvements#:~:text=La%20loi%20de%20composition%20des,observ%C3%A9es%20dans%20deux%20r%C3%A9f%C3%A9rentiels%20distincts.&text=N%C3%A9anmoins%2C%20elle%20permet%20d'introduire,dans%20un%20r%C3%A9f%C3%A9rentiel%20non%20galil%C3%A9en.

[6] https://fr.wikipedia.org/wiki/Effet_photo%C3%A9lectrique

[7] <https://www.photoniques.com/articles/photon/pdf/2016/01/photon201680p34.pdf>

[8] <https://www.larecherche.fr/physique-publications/un-nouveau-syst%C3%A8me-dunit%C3%A9s-de-mesure-pour-le-xxie-si%C3%A8cle>

[9] <https://www.franceculture.fr/emissions/la-methode-scientifique/theorie-du-tout-ou-rien>

<https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/physique-gravitation-quantique-boucles-8832/>