

LA LUMIÈRE : CHAMP ÉLECTROMAGNÉTIQUE OU PLUIE DE PHOTONS ?

Claude FABRE*

Laboratoire Kastler Brossel, CNRS, Sorbonne Université, Campus Jussieu, 75005 Paris, France

*Claude.Fabre@lkb.upmc.fr



Au début du 20^e siècle, la quasi-totalité des phénomènes lumineux s'explique en considérant la lumière comme une onde électromagnétique régie par les équations de Maxwell. Mais les physiciens sont impuissants à expliquer dans ce modèle ondulatoire un phénomène récemment découvert : l'effet photo-électrique. Einstein montre qu'il s'explique simplement si on considère la lumière comme formée de grains insécables. Le physicien américain Millikan, sceptique, décide de faire des expériences extrêmement précises pour départager les deux approches...

R. Millikan

<https://doi.org/10.1051/photon/20412732>

Article publié en accès libre sous les conditions définies par la licence Creative Commons Attribution License CC-BY (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), qui autorise sans restrictions l'utilisation, la diffusion, et la reproduction sur quelque support que ce soit, sous réserve de citation correcte de la publication originale.

LA LUMIÈRE, ONDE OU PARTICULES ?

La simple observation du monde qui nous entoure, puis les expériences réalisées par les physiciens, montrent qu'on peut envisager les phénomènes lumineux selon deux approches. La première, qualifiée de corpusculaire, explique simplement, entre autres, la propagation en ligne droite de la lumière. La deuxième, qualifiée

d'ondulatoire, explique, entre autres, pourquoi deux faisceaux lumineux qui se croisent n'interagissent pas. Les physiciens sont donc partagés. Newton, tenant de l'approche corpusculaire, a aussi découvert les « anneaux de Newton », phénomène ondulatoire. Il suggère une analogie entre la lumière et les ondes à la surface de l'eau provoquées par la chute d'une pierre (la particule).

Vers le début du 19^e siècle, Young puis Fresnel montrent que le modèle ondulatoire permet de faire des prédictions quantitatives précises sur les différents phénomènes lumineux, en particulier sur les interférences et la diffraction. Ils finissent par l'emporter sur l'approche corpusculaire car cette dernière ne permet pas ces prédictions précises.

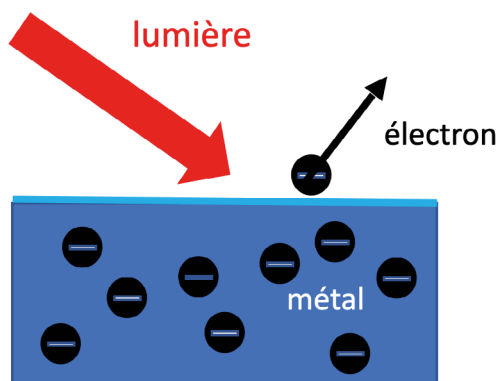
Au 19^e siècle un nouveau concept-clé émerge des recherches sur les phénomènes électriques et magnétiques, celui de champ, entité qui existe en tout point de l'espace, et même en des points où il n'y a aucune matière. En 1865 Maxwell établit les équations qui régissent l'évolution spatio-temporelle des champs électrique et magnétique : il montre que la lumière est une onde de champs électriques et magnétiques couplés. La découverte de l'électron, particule chargée présente dans la matière et qui interagit avec le champ-électromagnétique, parachève le grandiose tableau dans lequel viennent s'insérer progressivement les nouvelles découvertes de l'optique. Il s'agit là d'une des plus éclatantes avancées de la Physique.

L'EFFET PHOTOÉLECTRIQUE

H. Hertz, brillant physicien allemand, met au point en 1888 un appareillage ingénieux qui lui permet de produire et de détecter les ondes électromagnétiques prédites quelques années auparavant par Maxwell.

Au cours de ses expériences, Hertz remarque un phénomène auquel il ne s'attendait pas : lorsque son appareillage est éclairé par de la lumière ultraviolette, il constate l'apparition entre les électrodes de son dispositif d'une étincelle qui témoigne de l'existence d'électrons libres qui ont été arrachés à la surface de l'éclateur par l'onde électromagnétique. Une surface métallique peut donc émettre des électrons sous l'effet de la lumière : il y a transfert d'énergie de la lumière aux électrons, et l'on appellera « *effet photo-électrique* » ce phénomène découvert fortuitement, qui est à l'origine de nos photo-détecteurs.

Des investigations plus détaillées montrent l'existence d'un seuil f_s pour la fréquence f de la lumière incidente : si $f > f_s$, il y a bien apparition d'électrons libres par effet photo-électrique. Par contre le phénomène disparaît totalement si $f < f_s$, quelle que soit l'intensité de la lumière. Ce comportement discontinu, par tout ou rien, est



inhabituel dans le cadre du modèle ondulatoire de Maxwell, où les paramètres caractéristiques varient plutôt continûment en fonction de l'excitation incidente. Malgré les efforts des théoriciens ce comportement ne trouve pas d'explication basée sur les équations de Maxwell.

L'EXPLICATION D'EINSTEIN

Dans son article de 1905 Einstein s'appuie sur la formule de Planck, qui donne le spectre de la lumière émise par un corps chauffé (le « corps noir »). Il en déduit théoriquement l'expression de l'entropie de ce rayonnement et montre qu'elle coïncide avec celle d'un gaz parfait de particules ayant chacune une énergie hf , où h est la constante de Planck : Tout se passe comme si la lumière était formée de particules localisées, appelées « quanta » de lumière par Einstein, qui sont insécables et sans interaction mutuelle.

Einstein fait alors un bilan d'énergie sur ce processus, non pas sur l'ensemble du rayonnement, *mais au niveau des particules individuelles mises en jeu dans le processus*, dans lequel un quantum de lumière unique communique son énergie à un électron unique du métal. L'électron s'extrait du métal avec une énergie cinétique finale $E_c = mv^2 / 2$ donnée par :

$$E_c = hf - W$$

où W est l'énergie d'extraction caractéristique du conducteur. L'énergie cinétique étant positive, ce processus ne se produit que si $f > f_s$, avec $f_s = W/h$. L'existence d'une limite en fréquence, qui intriguait toute la communauté des physiciens, trouve avec Einstein une modélisation on ne peut plus simple. Son raisonnement implique de plus qu'il y a une relation linéaire entre l'énergie de l'électron et la fréquence de la lumière.

L'ennui majeur de l'approche d'Einstein est que, si l'on adopte ce modèle théorique corpusculaire pour la lumière, on doit renoncer aux indéniables succès de l'approche ondulatoire dérivée des équations de Maxwell (interférences, diffraction, diffusion...). Tout l'édifice théorique élaboré patiemment au cours du 19^e siècle, et en accord quantitatif précis avec les observations expérimentales, s'effondre.

Le modèle corpusculaire d'Einstein est accueilli avec grande réticence, ●●●

R. MILLIKAN

Né en 1868 dans l'Illinois, Robert Millikan fait ses études de physique à l'université Columbia à New York, puis à Berlin auprès de Planck. Il obtient son PhD en 1895. Il est nommé professeur à l'Université de Chicago, puis à Caltech dont il devient le directeur jusqu'à sa retraite en 1945. Il décède en 1953. C'est un expérimentateur de génie. Outre ses travaux sur l'effet photo-électrique, il est célèbre aussi pour un tour de force expérimental : il réussit à insérer un électron unique dans une gouttelette d'huile. Il déduit de son mouvement une valeur très précise de la charge électronique.

c'est le moins que l'on puisse dire, par la communauté des physiciens, qui n'a nullement envie de « jeter le bébé avec l'eau du bain ». L'hypothèse des quanta lumineux pose plus de problèmes qu'elle n'en résout. Elle est universellement rejetée.

R.A. MILLIKAN ET SON EXPÉRIENCE

Millikan est lui aussi très réticent sur l'approche d'Einstein. Dans les années 1910 il entame des travaux expérimentaux sur l'effet photo-électrique dans le but de montrer que la formule d'Einstein est erronée. Il utilise une enceinte à vide contenant une électrode métallique, souvent un alcalin. Une des difficultés de l'expérience est que la surface du métal s'oxyde et se salit avant d'être mise sous vide, perturbant par là même le processus d'émission. Millikan met au point un « couteau » manipulable magnétiquement de l'extérieur de l'enceinte à vide, spécialement conçu pour raboter et nettoyer la surface directement sous vide. Il passe plusieurs années à étudier successivement le processus de photo-émission à différentes longueurs d'onde grâce à un spectromètre et pour différentes électrodes. Il vérifie point par point toutes les conséquences expérimentales de l'équation d'Einstein avec une précision remarquable de 0,5% : existence d'un seuil en fréquence pour l'effet observé, variation linéaire de l'énergie de l'électron avec la fréquence, indépendance de l'énergie des électrons émis avec la distance entre la source de lumière et l'électrode. Il en déduit la valeur suivante de la constante de Planck $h=6,624 \cdot 10^{-34}$ J.

Il réalise ces expériences avec un soin extrême, car en bon physicien expérimentateur, Millikan sait que de petits défauts de l'expérience passés inaperçus peuvent induire des conclusions erronées. Mais l'expérience est têtue, et ses résultats implacables : ils prouvent sans doute possible que la lumière se comporte dans l'effet photo-électrique comme

un flux de particules et non comme une onde. Ils permettent de donner une valeur précise à la charge de l'électron et à la constante de Planck compatibles avec d'autres mesures moins précises.

Citons Millikan : *"This work resulted, contrary to my own expectation, in the first direct experimental proof, within the limits of experimental error, of the Einstein equation"*.

Au début des années 1920 de nouveaux phénomènes lumineux « corpusculaires » mettant en jeu des rayons X sont étudiés en détail par les physiciens. Ils confirment en particulier que les rayons X émis en tous sens par une source ponctuelle sont capables d'éjecter les électrons par effet photo-électrique même si la cible est très éloignée de la source: l'étalement dans l'espace de l'énergie électromagnétique prédit par les équations de Maxwell ne se produit pas.

En 1921 Compton montre que le quantum de lumière a non seulement une énergie hf , mais aussi une quantité de mouvement hf/c , comme il se doit pour une particule relativiste. La roue tourne donc et les physiciens « s'habituent » à cette étrange ambivalence de notre monde. La « cote » d'Einstein remonte : il obtient le prix Nobel de physique en 1921, « pour ses contributions à la physique théorique et, spécialement, pour sa découverte de la loi de l'effet photo-électriques ». En 1923 Millikan obtient le prix Nobel, « pour ses travaux sur la charge élémentaire de l'électricité et l'effet photo-électrique ».

ÉPILOGUE

En 1926 se met en place la Mécanique Quantique, avec des règles de quantification rigoureuses, telle qu'elle est enseignée maintenant. En l'appliquant au champ électromagnétique, on trouve que les états propres de l'énergie du rayonnement sont des « états nombre », contenant un nombre entier de particules qui ont toutes les propriétés des quanta de lumière d'Einstein. En 1963 R. Glauber introduit les états quantiques dits « cohérents » ou « quasi-classiques » qui permettent de mettre sur des bases théoriques solides l'approche « semi-classique » où la matière quantifiée interagit avec le champ classique des équations de Maxwell, ainsi que la description de l'interaction matière-lumière en termes de processus élémentaires photon par photon. Elle réconcilie en quelque sorte les tenants de l'approche ondulatoire et corpusculaire.

Outre la mise au point progressive d'une théorie rigoureuse de la dualité onde-corpuscule pour la lumière, connue sous le nom d'« optique quantique », de la dualité onde-particule, il y a une leçon à tirer de ces recherches: on a là un exemple parfait du primat de l'expérience sur la théorie en physique : Millikan, réticent, fait tout ce qu'il peut pour montrer que l'équation d'Einstein n'est pas conforme à l'expérience. Mais ses mesures montrent tout le contraire, et Millikan se rend à l'évidence, malgré son opposition initiale. Mieux, ses observations minutieuses donnent d'autant plus de poids à l'explication d'Einstein ! ●

RÉFÉRENCES

[1] The autobiography of Robert Millikan, Arno Press (New York 1980)

[2] A. Einstein, Ann. der Physik **17**, 132 (1905)

[3] R. Millikan, Phys. Rev. **7**, 355 (1916)

[4] R. Millikan, The electron and the light-quant from the experimental point of view, Nobel lecture May 23 (1924)

[5] G. Grynberg, A. Aspect, C. Fabre, Introduction to Quantum Optics, from the semi-classical approximation to quantized light, Cambridge University Press (2010)