

La lumière : onde ou corpuscule ?

En 1905, Einstein introduisit le concept de quantum de lumière, qui lui permit d'expliquer l'effet photoélectrique. Mais il apparut dans les années 1920 que les lois de l'effet photoélectrique pouvaient aussi être obtenues en considérant l'interaction entre un atome et une onde électromagnétique classique. Il faudra attendre les années 1970 pour que des expériences mettent en évidence de manière indiscutable le caractère corpusculaire de la lumière, tandis que d'autres montrent qu'il existe des phénomènes ne correspondant à aucune de ces deux images classiques.

Une longue histoire

Si depuis des siècles deux conceptions sur la nature de la lumière s'opposent, les approches corpusculaire et ondulatoire, c'est que beaucoup de phénomènes lumineux trouvent leur explication dans l'un et l'autre cadre. Par exemple, la réflexion de la lumière sur un miroir peut aussi bien être vue comme analogue à une balle de tennis rebondissant sur un mur ou à une vague réfléchi par une jetée. À la fin du XIX^e siècle, avec l'accumulation de résultats expérimentaux sur les interférences et la diffraction, puis les travaux de Maxwell, le débat semblait être définitivement clos au profit de l'approche ondulatoire. L'article d'Einstein de 1905 introduisant le concept de corpuscule de lumière et l'utilisant pour expliquer l'effet photoélectrique fit l'effet d'un coup de tonnerre: comment concilier ce nouvel avatar de la théorie corpusculaire de la lumière avec l'ensemble des phénomènes lumineux indéniablement ondulatoires? Personne à cette époque ne pouvait répondre à cette question, et les arguments d'Einstein laissaient sceptiques la plupart des physiciens de l'époque.

L'effet photoélectrique sans photon

En utilisant les lois de la mécanique quantique mises au point dans les années 1920, on s'aperçut qu'on retrouvait les lois de l'effet photoélectrique en résolvant le problème d'un atome quantique (avec ses niveaux d'énergie quantifiés) interagissant avec un champ électromagnétique classique. En d'autres termes tous les phénomènes lumineux connus à cette époque pouvaient s'expliquer à l'aide d'une théorie quantique de l'interaction matière-lumière, mais ne nécessitaient pas la quantification du rayonnement

lui-même. Ainsi, la transition brusque de l'atome vers son état ionisé dans l'effet photoélectrique est interprété comme l'effet de l'absorption instantanée d'un photon. Mais le même phénomène peut être vu comme le «saut quantique» instantané de l'atome du niveau fondamental à un état ionisé, induit de manière probabiliste par le champ classique. Parallèlement, se développait la théorie quantique du champ électromagnétique où la notion de photon apparaissait naturellement et qui expliquait aussi les

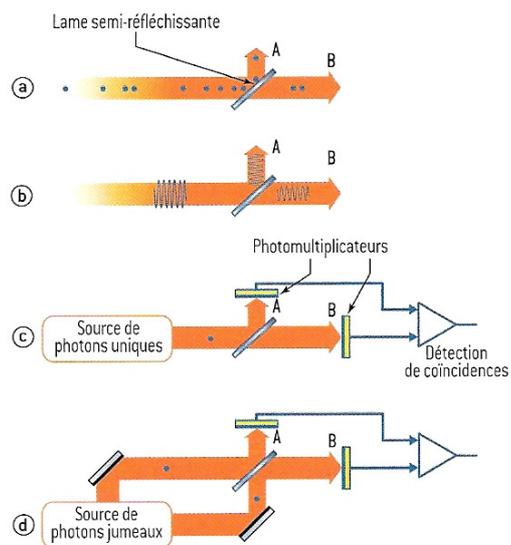


Fig. 1 Effet d'une lame semi-réfléchissante sur la lumière. (a) Les photons sont soit réfléchis soit transmis. (b) Une onde est divisée en deux ondes d'amplitudes plus faibles. (c) Si on envoie un photon unique, on n'observera jamais de photons arrivant simultanément sur les détecteurs A et B. (d) Deux photons «jumeaux» incidents sur la lame partent tous les deux vers le détecteur A ou le détecteur B. Ils ne se séparent jamais.

phénomènes optiques. Encore une fois, les deux approches, corpusculaire et ondulatoire, semblaient également capables de décrire, même au niveau quantique, les phénomènes observés, sans que rien ne puisse faire pencher la balance d'un côté ou de l'autre.

La lame semi-réfléchissante arbitre du débat

Dans les années 1970, ce dilemme fut enfin résolu, à l'aide d'un objet physique des plus anodins: la lame semi-réfléchissante, présente par exemple au cœur des interféromètres de Michelson. Cette lame a en effet un comportement radicalement différent dans les deux conceptions de la lumière (Fig. 1). Un photon incident ne peut pas être coupé en deux par celle-ci: il est ou bien transmis (voie de sortie A) ou bien dévié par elle (voie de sortie B), avec des probabilités de 50 % pour chacun des deux processus (Fig. 1a). Une onde incidente, en revanche, se répartira en deux ondes réfléchies et transmises d'égales amplitudes (Fig. 1b). Dans la première approche, l'énergie part soit d'un côté, soit de l'autre. Dans la deuxième, elle «coule» également des deux côtés. Si on mesure le produit des énergies transportées sur les voies A et B, ou le taux de coïncidence des signaux de photoionisation mesurés sur les deux voies (Fig. 1c), on aura un résultat nul dans un cas, non nul dans l'autre. L'expérience, réalisée en 1977 par H. Kimble, M. Dagenais et L. Mandel, a donné un résultat nul, et donc enfin indiscutablement prouvé l'existence du photon dans sa propagation dans l'espace libre (Fig. 1 c). Ce type d'expérience a été complété en 1986 par A. Aspect et P. Grangier avec une source de photons uniques et un interféromètre de type Michelson: des franges d'interférence apparaissent avec une grande netteté lorsque le nombre moyen de photons détectés augmente (Fig. 2). On a ici une manifestation particulièrement éclatante de la dualité onde-corpuscule.

Les interférences à photons jumeaux

Hong, Ou et Mandel ont fait en 1987 l'expérience suivante: par un phénomène de cascade dans un cristal non linéaire, ils produisent une paire de «photons jumeaux», c'est-à-dire créés exactement au même instant dans le cristal. Ils les envoient sur les deux voies d'entrée de notre déjà célèbre lame semi-réfléchissante (Fig. 1 d), et mesurent le taux de

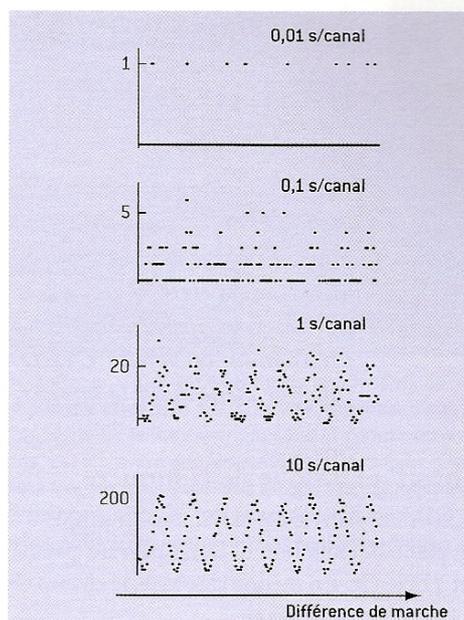


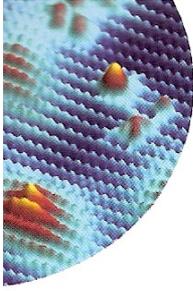
Fig. 2 Franges d'interférences réalisées avec une source émettant les photons un par un, avec des temps de mesure de plus en plus longs : le photon unique est sensible à la différence de longueur des deux chemins qu'il est susceptible d'emprunter.

coïncidence entre les signaux détectés sur les deux voies de sortie A et B. Ils observent que celui-ci est nul si les chemins parcourus par les deux photons jumeaux sont strictement identiques. Le modèle corpusculaire prédit une probabilité non nulle d'avoir un photon dans chacune des voies A et B, et donc un taux de coïncidence mesuré non nul. Un calcul basé sur un modèle purement ondulatoire du phénomène prédit lui aussi une valeur non nulle. En revanche, le calcul quantique exact du phénomène reproduit bien le résultat expérimental. Dans cette expérience, la lumière ne se comporte donc ni comme un corpuscule classique, ni comme une onde classique, mais comme un objet spécifiquement quantique, sans équivalent classique.



Bibliographie

- G. Grynberg, A. Aspect, C. Fabre, *Introduction aux lasers et à l'optique quantique*, Ellipses, 1997.
- E. Brézin [sous la direction de], *Demain, la physique*, Odile Jacob, 2004.



Les fluctuations quantiques : une incertitude que l'on sait parfois maîtriser

Une des caractéristiques du monde quantique est son caractère fondamentalement probabiliste. Les physiciens ont dû, à leur grand regret, abandonner l'espoir de pouvoir déterminer l'instant exact où un noyau instable va se désintégrer, par exemple. Les mesures faites sur des objets quantiques sont ainsi affectées de fluctuations, appelées « bruit quantique ». Faut-il pour autant abandonner l'ambition de réaliser des mesures de grande précision sur ces objets ? C'est ce que nous allons discuter dans cet article dans le cas particulier de mesures sur la lumière.

Le bruit quantique de la lumière

Plaçons-nous dans le cas extrêmement simple d'une onde plane de pulsation ω se propageant parallèlement à l'axe Oz . En théorie classique, le champ électrique de cette onde s'écrit :

$$E(z,t) = E_0 \cos[\omega(t-z/c) - \varphi] \\ = E_1 \cos[\omega(t-z/c)] + E_2 \sin[\omega(t-z/c)].$$

En optique classique, l'état de l'onde est entièrement déterminé par E_1 et E_2 , coordonnées du point M sur la **figure 1**, qui peuvent être, en principe définies avec une précision arbitrairement grande. En optique quantique, les quantités E_1 et E_2 , de même que les quantités x et p pour une particule, obéissent à une inégalité de Heisenberg sur les dispersions des résultats de mesure de ces deux quantités :

$$\Delta E_1 \Delta E_2 \geq E_v^2$$

où E_v est une grandeur homogène à un champ électrique. Cette relation implique en particulier qu'il n'y a pas d'état du champ dans lequel ΔE_1 et ΔE_2 sont simultanément nuls, donc où E_1 et E_2 sont connus tous deux sans incertitude. L'état de l'onde ne peut être parfaitement défini : sa phase φ et son amplitude E_0 , ainsi que l'énergie du champ, seront affectées de fluctuations quantiques.

Un photodétecteur placé sur le trajet de l'onde mesure la valeur instantanée de son énergie. Les fluctuations quantiques de l'onde se manifestent alors comme des *variations temporelles erratiques* du photocourant mesuré, c'est-à-dire comme un *bruit de fond* dans la mesure. Ce bruit est accessible à l'expérience, grâce à la mise au point de photodiodes à semi-conducteur de rendement quantique très

proche de 1. L'optique est ainsi l'un des rares domaines où l'on a un accès expérimental direct aux fluctuations quantiques.

Quelques états quantiques de la lumière

Considérons tout d'abord l'état de plus basse énergie de l'onde, appelé « vide », que l'on pourrait appeler de manière plus appropriée « obscurité », et qui ne contient aucun photon. Le champ électrique dans cet état ne peut être nul avec certitude, car sinon l'inégalité de Heisenberg serait violée. Seule, la valeur moyenne du champ est nulle, mais pas les dispersions ΔE_1 et ΔE_2 , qui sont telles que $\Delta E_1 = \Delta E_2 = E_v$. Le vide est ainsi le siège de fluctuations non nulles autour de 0, appelées *fluctuations du*

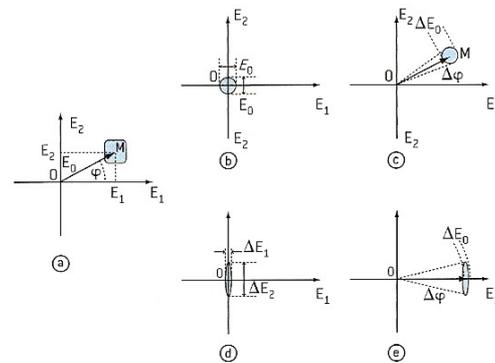


Fig. 1 Représentation de différentes ondes électromagnétiques dans le « plan de Fresnel » : un point M donne l'amplitude E_0 et la phase φ du champ. L'aire en bleu représente l'incertitude quantique sur la détermination de ces grandeurs.

vide (Fig. 1.b), dont l'existence permet de se faire une image simple de phénomènes importants de la physique. Ainsi, la force de Casimir qui attire deux surfaces réfléchissantes placées l'une en face de l'autre dans le vide peut être vue comme un effet différentiel de la pression de radiation induite par les fluctuations du vide sur les deux faces de chacun des miroirs.

Les théoriciens ont montré qu'il existait des états de la lumière, appelés comprimés, pour lesquels la dispersion ΔE_2 par exemple peut être réduite dans des proportions arbitraires. Dans ces états, la dispersion augmente dans les mêmes proportions pour ne pas violer l'inégalité de Heisenberg. Par exemple, un état « comprimé en intensité » (Fig. 1.e) aura des fluctuations ΔE_2 très réduites dans la directions orthogonale au champ moyen: les fluctuations d'énergie, donc de photocourant, liées au carré de la longueur du vecteur, seront alors très réduites. En revanche, les fluctuations de phase, liées à ΔE_1 , seront très augmentées. Ce type d'état sera parfaitement adapté à la réalisation de mesures de grande sensibilité sur l'intensité de l'onde lumineuse. Mais il ne permettra pas de faire des mesures interférométriques, liées à la phase, avec la même sensibilité. Il existe d'autres états, comme le « vide comprimé » (Fig. 1.d), où le champ est en valeur moyenne nulle comme dans le vide, mais qui possèdent des fluctuations sur E_1 très réduites par rapport aux fluctuations du vide E_v . Ces états permettent de réduire le bruit d'origine quantique dans un interféromètre. On envisage d'utiliser ce type de technique pour améliorer la sensibilité des interféromètres de plusieurs kilomètres de longueur destinés à détecter le très faible ébranlement (10^{-18} m !) produit par le passage sur terre des ondes gravitationnelles [p. 32-33].

Les réalisations expérimentales

Certains lasers à semi-conducteur, dans lesquels les fluctuations d'origine thermique du courant d'alimentation sont réduites, peuvent produire des états comprimés en intensité. Par ailleurs, différents dispositifs d'optique non-linéaire [p. 110-111] sont de très efficaces générateurs d'états comprimés, en particulier de « vide comprimé » (Fig. 2). On a aussi expérimentalement démontré que ces états permettaient d'augmenter la sensibilité ultime lors de la

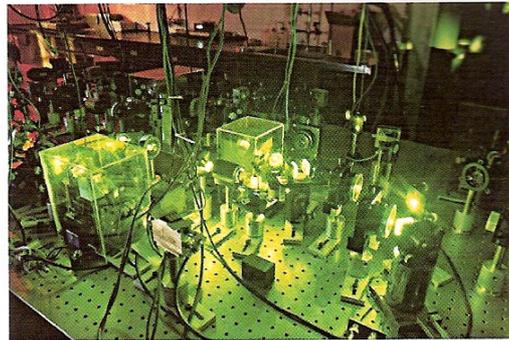


Fig. 2 Photo d'une expérience de production de « vide comprimé » effectuée à l'université nationale d'Australie, à Canberra. De telles expériences sont complexes et délicates, car il s'avère que les états non-classiques sont des objets fragiles, très sensibles aux pertes, même minimes, qui peuvent affecter les faisceaux lumineux (© Hans Bachor, ACQAO/The Australian National University).

mesure de très faibles déphasages entre les deux bras d'un interféromètre, de très faibles absorptions par des composants à l'état de traces, ou de très faibles déplacements transverses de la direction d'un faisceau lumineux.

Par un retournement de situation dont la physique est coutumière, on voit sur l'exemple des états de la lumière que les dispersions quantiques sur les mesures, qui sont considérées en général comme une limitation dans la connaissance du système, contiennent en fait des renseignements supplémentaires sur celui-ci. Leur détermination permet de mieux connaître l'état quantique exact du système. Outre l'objectif pratique de l'amélioration des mesures, les fluctuations quantiques constituent ainsi un nouveau champ d'étude pour la physique qui est certainement amené à se développer à l'avenir.

Bibliographie

- G. Grynberg, A. Aspect, C. Fabre, *Introduction aux lasers et à l'optique quantique*, Ellipses, 1997.
- « Quantique [optique] », *Encyclopædia Universalis*.
- « Fluctuations du vide », *Pour la Science*, n° 278, décembre 2000.