

PHYSIQUE THÉORIQUE. — *Ondes électromagnétiques et photons.*Note (\*) de M. **LOUIS DE BROGLIE**, Membre de l'Académie.

L'auteur partant de l'action d'une onde électromagnétique sur un récepteur expose comment il conçoit la coexistence des ondes électromagnétiques et des photons dans le domaine hertzien et dans le domaine optique.

La théorie des masers et des lasers attire de nouveau très vivement l'attention sur la nature des ondes électromagnétiques. Il est certain que toutes les ondes électromagnétiques transportent des photons. La chose était depuis longtemps bien établie pour la lumière et le fonctionnement des masers ne permet plus d'en douter en ce qui concerne les ondes hertziennes. Un problème difficile et capital se pose alors. Quand une onde hertzienne vient agir sur le système oscillant d'un récepteur (circuit oscillant, antenne, cavité résonnante, etc.) la description de l'interaction de l'onde avec le récepteur peut se faire d'une façon parfaite à l'aide des équations de Maxwell, même pour les ondes millimétriques, et l'on peut dire que jusqu'à ces dernières années, les radioélectriciens pouvaient ignorer complètement la structure « photonique » des rayonnements qu'ils utilisaient. Cependant, il est bien certain que l'énergie recueillie par le récepteur lui est délivrée d'une manière discontinue, ce qui n'est aucunement contenu dans les équations de Maxwell. C'est à mes yeux le devoir des théoriciens de la Physique d'arriver à donner une image claire et précise de la façon dont peuvent se concilier la validité des équations de Maxwell et l'existence des photons.

Je me crois aujourd'hui en mesure d'aborder la solution de ce problème en utilisant la tentative de réinterprétation de la Mécanique ondulatoire que, partant des idées qui m'avait guidé à l'époque de ma thèse de doctorat (1924), j'ai repris depuis une douzaine d'années sous le nom de théorie de la double solution. Je ne ferai ici que rappeler le principe de cette théorie sans entrer dans tous les développements que j'ai pu lui donner (1). L'image que j'adopte, d'une façon générale, pour représenter la liaison d'un corpuscule et de son onde associée est la suivante : l'onde serait un phénomène physique d'une extrêmement petite amplitude qui se propagerait suivant les équations d'ondes de la Mécanique ondulatoire, mais cette onde de base comporterait une très petite région où son amplitude atteindrait une valeur très élevée, région qui constituerait le corpuscule. Le corpuscule se trouvant ainsi incorporé à l'onde serait guidé par la propagation de celle-ci et, point essentiel qui se trouvait déjà dans ma thèse, son mouvement serait tel que sa vibration interne resterait constamment en phase avec l'onde.

Si l'on applique cette conception générale au cas particulier de l'onde électromagnétique, on est amené, je l'ai montré dans un travail récent (2),

à assimiler l'onde de base à une onde électromagnétique de type classique, mais de très faible amplitude, qui obéit aux équations de Maxwell. Les photons étant des bosons qui peuvent se grouper sur une même onde, cette très faible onde électromagnétique de base peut comporter à titre d'accidents locaux de sa structure un grand nombre de photons dont les vibrations internes sont en phase avec elle.

Revenons maintenant au problème de l'action d'une onde hertzienne sur un récepteur. L'onde porteuse de photons a une amplitude si faible qu'elle ne peut mettre en oscillation un récepteur d'une façon sensible. Mais chaque photon qui agit sur le récepteur lui communique une impulsion brusque et, comme la vibration des photons est en phase avec l'onde qui les transporte, les impulsions rythmées qu'ils apportent au récepteur suffisent à le mettre en état d'oscillation régulière. En somme, l'action de photons sur un circuit oscillant serait la même que si celui-ci recevait une onde hertzienne de même phase que la très faible onde de base, mais ayant une amplitude beaucoup plus grande, et l'on voit bien ici la très grande importance de l'hypothèse que la vibration interne des corpuscules est toujours en phase avec l'onde qui les porte. Si cette conception est exacte, l'excitation d'un récepteur par une onde hertzienne présenterait une grande analogie avec la technique des transmissions par impulsions : dans cette technique, en effet, on envoie sur le récepteur non pas la totalité de la sinusoïde correspondant à l'oscillation qu'on veut lui imposer, mais seulement de petits morceaux de cette sinusoïde et, si ces « échantillons » arrivent en nombre suffisant par période, le récepteur se met à osciller régulièrement comme s'il recevait la sinusoïde tout entière. Concevoir de cette façon la mise en oscillation d'un récepteur par une onde hertzienne me paraît la seule manière de résoudre le problème difficile et capital dont j'ai parlé au début de cette Note.

Dans le cas de la lumière, les photons fournis par les sources lumineuses usuelles sont émis indépendamment par les atomes de la source sur des trains d'ondes incohérents. Mais si la source est assez intense et de dimensions très petites, la théorie classique des ondes a conduit les spécialistes de l'optique à définir une quasi-cohérence due à la superposition, pendant un temps très court par rapport à leur durée d'émission, des trains d'ondes émis par les différents points de la source. Comme l'ont fait remarquer MM. Maréchal et Françon dans un livre récent <sup>(3)</sup>, les expériences de Brown et Twiss sur ce qu'on peut appeler les « interférences du second ordre » ont montré que ces raisonnements, bien que purement classiques, sont entièrement valables malgré la structure quantique de la lumière. Ceci se comprend aisément avec notre conception car les ondes de base, ayant un comportement classique, se superposent classiquement et c'est l'onde résultant de leur superposition qui guide les photons qu'elle transporte et qui détermine par son intensité leur localisation statistique dans l'espace.

D'autre part, la réalisation des lasers a eu une grande importance théorique car les lasers fournissent, par émission stimulée, de très nombreux photons qui sont cohérents, ce qui signifie pour nous qu'ils sont en phase avec une même onde électromagnétique de base. L'onde fournie par un laser a donc en principe la même structure qu'une onde hertzienne et peut, par suite, exciter une cavité résonnante. Mais l'étude des lasers a mis en évidence un fait fondamental : tandis que les photons émis dans un laser par l'émission stimulée sont cohérents, les photons qu'il émet par émission spontanée sont incohérents et ont, par suite, le caractère d'un « bruit » parasite. Or, dans le célèbre raisonnement par lequel Albert Einstein, dès 1917, avait introduit les notions capitales d'émission stimulée et d'émission spontanée, rien n'indiquait cette différence de nature des deux sortes d'émissions. La raison me paraît en être qu'Einstein envisageait le cas du rayonnement noir où toutes les ondes sont incohérentes et où l'idée de cohérence ne peut donc pas entrer en jeu. Il est donc certain que le raisonnement d'Einstein, dans son application aux lasers, doit être complété par des considérations de cohérence.

Finalement, les conceptions que nous préconisons nous paraissent apporter les éléments nécessaires à une représentation claire et rationnelle de phénomènes dont la coexistence pose depuis longtemps aux physiciens des problèmes en apparence insolubles.

(\*) Séance du 22 juin 1964.

(<sup>1</sup>) Voir *Étude critique des bases de l'interprétation actuelle de la Mécanique ondulatoire*, Gauthier-Villars, Paris, 1963 où l'on trouvera une bibliographie complète.

(<sup>2</sup>) *Cahiers de Physique*, n° 147, octobre 1962, p. 425-445.

(<sup>3</sup>) A. MARÉCHAL et M. FRANÇON, *Diffraction, structure des images*, éditions de la *Revue d'Optique*, Paris, 1960, p. 63.