

ONDES HERTZIENNES ET PHOTONS (1)

PAR

LOUIS DE BROGLIE

Le développement des nouvelles théories de la Physique a obligé les physiciens à adopter des conceptions profondément différentes de celles de la Physique ancienne. L'originalité et la difficulté de ces conceptions ont pour conséquence que, ni les philosophes, ni les physiciens eux-mêmes n'arrivent encore à en saisir toute la portée et la signification réelle. La nécessité de faire rentrer des faits physiques bien constatés, mais paraissant contradictoires, dans le cadre d'une même théorie cohérente oblige aujourd'hui l'esprit humain à l'un des efforts les plus pénibles qu'il ait eu à accomplir depuis qu'il cherche à comprendre les lois des phénomènes naturels et à deviner sous la complexité des apparences les corrélations profondes qui les unissent. Aussi n'est-il pas inutile en présence de problèmes si difficiles de les envisager toujours sous des aspects nouveaux en variant les points de vue et les perspectives.

C'est ce que nous voudrions faire dans cet article en insistant principalement sur une relation d'incertitude dont on a beaucoup moins parlé que de celles d'Heisenberg, peut-être parce qu'elle est beaucoup plus difficile encore à comprendre, mais dont l'importance physique et la portée conceptuelle sont certainement considérables. Je fais allusion à la relation d'incertitude qui lie le « nombre » de particules du type Bose-Einstein attachées à une même onde à la « phase » de cette onde.

Pour entreprendre cet exposé, je dois d'abord rappeler que les particules de l'échelle atomique se divisent en deux catégories. Les unes obéissent au principe d'exclusion de Pauli et, quand elles sont en assemblée nombreuse, elles sont régies par la statistique de Fermi-Dirac ; les autres n'obéissent pas au principe d'exclusion et, quand elles sont en assemblée nombreuse, elles sont régies par la statistique de Bose-Einstein. Les électrons, les protons, les neutrons, certains noyaux d'atomes appartiennent au premier type : M. Dirac a proposé de les nommer « Fermions ». Les particules α , les photons, certains noyaux d'atomes appartiennent à la seconde catégorie : M. Dirac leur réserve le nom de « Bosons ». Il y a des raisons de penser que les corpuscules élémentaires indécomposables (comme le sont sans doute les électrons) ainsi que toutes les particules complexes formées d'un nombre impair de constituants élémentaires sont du type Fermions, tandis que les particules formées d'un nombre pair de constituants

élémentaires sont des Bosons. Nous n'insisterons pas ici sur ce point bien qu'il ait probablement une grande importance.

Nous allons d'abord considérer les Fermions dont l'exemple le plus familier aux physiciens est l'électron. Les Fermions obéissent au principe d'exclusion de Pauli, ce qui veut dire que dans l'association onde-corpuscule pour les Fermions il n'y a jamais plus d'un corpuscule par onde, chaque onde étant définie par sa fréquence, sa direction de propagation et les propriétés de spin qui lui sont associées. Le Fermion est un sauvage : il reste isolé sur son onde et se refuse à tout travail collectif. De là, résulte qu'en assemblée nombreuse, les Fermions, parce qu'ils restent isolés, suivent la statistique de Fermi-Dirac, ce qui, appliqué aux électrons, permet notamment aujourd'hui d'expliquer correctement les propriétés de conductibilité électrique des métaux. De là résulte aussi, ce qui est plus important encore, que chaque électron périphérique joue un rôle particulier : d'où découle, quand on passe d'un élément à l'élément suivant dans la classification de Mendeléeef, une variation des propriétés chimiques, spectroscopiques et parfois magnétiques due au rôle personnel joué par le nouvel électron qui s'est ajouté à la structure périphérique de l'atome.

Voici maintenant un point essentiel. Les ondes associées aux différents Fermions sont totalement indépendantes, puisque chaque Fermion fait bande à part : on ne peut donc les comparer entre elles, ce qui fait que leurs phases relatives sont complètement indéterminées. Qu'on m'entende bien : les diverses parties de l'onde d'un même Fermion ont des différences de phase parfaitement définies ; c'est ce qui permet à l'onde d'un électron par exemple, lorsque des incidents de route l'obligent à se superposer à elle-même, de donner lieu à des phénomènes de diffraction comme ceux observés lors de la diffraction des électrons par les cristaux (phénomène de Davisson et Germer) ou par le bord d'un écran (phénomène de Bôrsch). Mais on ne peut pas, en raison de l'isolement des Fermions, préciser quelle est la différence de phase entre l'onde d'un Fermion et celle d'un autre Fermion. En termes mathématiques, ceci s'exprime en Mécanique ondulatoire de l'électron en disant que la phase de la fonction ψ contient toujours une constante additive indéterminée.

Il en résulte notamment que l'onde des Fermions n'a pas du tout le caractère des ondes de la Physique classique. Sans doute le carré du module de son amplitude, son intensité, donne-t-elle en chaque point la probabilité que le Fermion associé révèle sa présen-

(1) Article paru dans la « *Revue Internationale de Philosophie* » d'avril 1949, sous le titre : « Sur la relation d'incertitude de la seconde quantification ».

ce en ce point, ce qui correspond à la répartition de l'énergie imaginée par la théorie classique des ondes ; sans doute la décomposition spectrale de l'onde ψ associée au Fermion fournit-elle les probabilités respectives des diverses valeurs possibles de l'énergie et de la quantité de mouvement associée au Fermion, ce qui correspond aux décompositions envisagées en théorie classique de la Lumière. Mais ces correspondances entre les propriétés de l'onde ψ des Fermions et celles des ondes de la Physique classique s'opèrent en introduisant au sujet de la position et du mouvement des Fermions des conceptions aléatoires tout à fait étrangères aux conceptions classiques. De plus ces analogies, qui sont loin d'être des équivalences, s'arrêtent là. Il est impossible d'assimiler les ondes ψ des Fermions à de véritables « vibrations » se propageant dans l'espace au cours du temps, comme le sont les ondes élastiques ou électromagnétiques de la Physique macroscopique, vibrations qui seraient susceptibles de faire entrer en mouvement vibratoire des corps récepteurs qui leur seraient sensibles. Il est également impossible d'ajouter les amplitudes de deux ondes fermioniques comme en Physique classique on peut additionner (vectoriellement) les amplitudes des ondes élastiques ou électromagnétiques macroscopiques. Cela est impossible parce que chaque Fermion et son onde sont essentiellement isolés : l'onde ψ n'est alors qu'un élément de prévision (au sens de M. Destouches), c'est-à-dire la représentation mathématique de la probabilité des événements observables et des résultats de mesure, son amplitude déterminée par normalisation à l'aide du principe des probabilités totales n'ayant aucune signification mécanique ou physique directe.

Ainsi l'onde ψ du Fermion nous apparaît comme une onde fictive à caractère symbolique et mathématique permettant seulement de prévoir les résultats possibles de la succession discontinue du résultat des mesures faites sur le corpuscule associé. Et cependant il existe des ondes, par exemple électromagnétiques, qui ont le caractère de véritables vibrations, dont on peut ajouter les amplitudes et qui sont susceptibles de communiquer une vibration mécanique à un corps récepteur. Si l'on considère, comme cela paraît naturel, l'onde électromagnétique comme étant l'onde ψ des photons, il y a donc une différence notable entre l'onde ψ des photons et celles des électrons. Pour comprendre cette différence, il faut partir du fait que les photons sont des Bosons et non des Fermions. Nous devons donc maintenant étudier le cas des Bosons.

Contrairement aux Fermions, les Bosons ne sont pas soumis au principe d'exclusion de Pauli ; ils peuvent donc se grouper en nombre plus ou moins grand sur une même onde. Cette faculté de groupement se traduit par le fait que, quand les Bosons sont en assemblée nombreuse, ils obéissent à une statistique distincte de celle de Fermi-Dirac, la statistique de Bose-Einstein, qui exprime l'existence possible de grappes de particules associées à une même onde. La validité de la statistique de Bose-Einstein pour les photons, qui sont les particules du type Bosons, entraîne la forme bien connue de la loi de répartition

spectrale de Planck pour le rayonnement noir parce que ce rayonnement peut être assimilé à un « gaz de photons ».

L'étude du groupement des Bosons sur une même onde a conduit au développement de la théorie de la seconde quantification dont M. Dirac a clairement développé les principes, il y a vingt ans. Appliqué au cas particulièrement important des photons, la seconde quantification conduit à la « théorie quantique des champs électromagnétiques » due à MM. Jordan, Heisenberg et Pauli ; c'est ce que l'on voit notamment très bien quand on donne à cette dernière théorie la forme développée par l'auteur du présent article sous le nom de « Mécanique ondulatoire du photon » (1). L'examen de ces problèmes de groupement amène à des idées nouvelles d'un haut intérêt et l'on retrouve, mais sous une forme très différente, les concepts d'incertitude et de complémentarité qui sont classiques depuis les travaux de Bohr et de Heisenberg pour le cas d'un corpuscule unique et de son onde associée.

Pour plus de clarté, nous allons raisonner sur les photons de la lumière, bien que nos considérations soient en principe applicables aux autres sortes de Bosons. Nous pouvons envisager le cas d'un seul photon et de son onde associée ; c'est le cas qui se présente naturellement quand on envisage l'émission d'un photon par un atome dans une transition quantique de Bohr. Alors, comme dans le cas du Fermion, l'onde associée n'a que le sens mathématique d'un moyen de prévision définissant par son intensité locale la probabilité des localisations possibles du photon et par sa composition spectrale la probabilité de ses états de mouvement possible. L'onde attachée à un seul photon n'a toujours pas le caractère d'un véritable phénomène vibratoire observable. Mais il est certain qu'il n'en est plus de même si nous envisageons l'émission d'une onde hertzienne par une antenne de T.S.F. Dans une telle onde, il y a sans aucun doute des champs électriques et magnétiques vibrants, de phases parfaitement définies, susceptibles de communiquer un état vibratoire synchrone à un récepteur approprié. On peut même préciser cette affirmation en considérant un dispositif d'émission hertzienne, un peu abandonné aujourd'hui, mais qui a été utilisé, l'émission par alternateur à haute fréquence ; avec ce dispositif, on produit directement dans un alternateur un courant « sinusoïdal » de fréquence élevée et, en envoyant ce courant dans une antenne, on provoque l'émission d'une onde hertzienne de même fréquence dont la phase est directement reliée au mouvement de l'alternateur et à la disposition de ses circuits. Ici pas d'échappatoire : on voit bien que le champ électromagnétique est une véritable vibration produite avec des relations de phase déterminées par la rotation mécanique de l'alternateur. Mais, comme nous savons depuis Maxwell qu'une onde électromagnétique ne diffère aucunement en nature d'une onde lumineuse, nous devons supposer qu'elle transporte des photons et nous

(1) Consulter à ce sujet le récent livre de l'auteur : *Mécanique ondulatoire du photon et théorie quantique des champs électromagnétiques*, Gauthier-Villars, Paris, 1949.

sommes amenés à nous demander pourquoi ce cas diffère de celui de l'émission d'un photon isolé.

Dans le cas que nous venons d'envisager, l'onde hertzienne doit être considérée comme l'onde ψ des photons qui lui sont associés et cependant elle a ici les caractères physiques d'une vibration au sens classique, c'est-à-dire qu'elle possède une phase bien définie, qu'on peut ajouter (vectoriellement) les amplitudes de deux ondes hertziennes qui se superposent, que l'on peut communiquer cette vibration à un récepteur approprié, etc. Pourquoi cette onde a-t-elle ainsi un caractère tout à fait différent de celui de l'onde des Fermions ou des photons isolés ? La réponse à cette question est la suivante : les photons étant des Bosons peuvent se grouper sur une même onde et l'onde hertzienne usuelle est précisément une onde à laquelle sont associés un très grand nombre de photons. Il est facile de se rendre compte qu'en raison de la petitesse du quantum $h\nu$, chaque train d'ondes hertzien transporte un très grand nombre de photons et ce groupement de photons sur une seule onde lui donne un caractère tout à fait différent de celui d'une onde ψ associée à un corpuscule isolé. L'émission d'une onde hertzienne est due au mouvement d'ensemble de l'électricité dans l'antenne émettrice (et éventuellement dans l'alternateur à haute fréquence) : envisagé du point de vue quantique, ce mouvement d'ensemble se ramène à une infinité de petites émissions quantiques et *cohérentes*. Ce processus est donc tout à fait différent du processus d'émission d'un photon isolé dans une transition quantique individuelle : il n'est rendu possible que parce que les photons, étant des Bosons, peuvent se grouper en grand nombre sur une même onde et un tel processus ne pourrait exister pour l'émission de Fermions.

Une onde électromagnétique décelable macroscopiquement, comme l'est une onde hertzienne, est donc caractérisée par deux facteurs : le nombre, toujours grand, des photons qu'elle porte et la phase, toujours bien définie, de la vibration qu'elle représente. Or, et voici le point essentiel, entre ces deux grandeurs « nombre de photons » et « phase de l'onde », la théorie de la seconde quantification et la théorie quantique des champs qui en dérive ont établi l'existence d'une relation de complémentarité existant des incertitudes tout à fait analogues à celles aujourd'hui bien connues qui existent entre la position d'un corpuscule quelconque et son état de mouvement.

Rappelons d'abord en quoi consistent les relations d'incertitude d'Heisenberg et la complémentarité qu'elles expriment. On peut mesurer par une expérience faite à un instant donné la position du corpuscule à cet instant : on peut aussi par d'autres sortes d'expériences mesurer son énergie et sa quantité de mouvement. Mais on ne peut pas simultanément mesurer une coordonnée q_i du corpuscule et la composante correspondante p_i de sa quantité de mouvement. Toute mesure conduisant à une évaluation simultanée de l'une et de l'autre de ces grandeurs « conjuguées » laisse subsister sur leur valeur exacte des incertitudes δq_i et δp_i telles que l'inégalité.

$$\delta q_i \cdot \delta p_i \geq h \quad (i = 1, 2, 3)$$

(où h est la constante de Planck) soit satisfaite. Ce sont les inégalités d'incertitude de Heisenberg auxquelles il faut joindre la 4^e inégalité

$$\delta E \cdot \delta t \geq h \quad (E \text{ énergie})$$

dont la signification est d'ailleurs un peu différente. La valeur des coordonnées q_i et du temps t précise la « localisation spatio-temporelle » du corpuscule correspondant à son aspect granulaire ; la valeur des p_i et de E précise « l'état dynamique » du corpuscule correspondant, d'après les principes de la Mécanique ondulatoire, à son aspect ondulatoire. Les relations d'incertitude de Heisenberg expriment donc, ainsi que M. Bohr l'a fortement souligné, le caractère « complémentaire » de l'aspect granulaire et de l'aspect ondulatoire des entités physiques élémentaires que nous nommons corpuscules. Plus nous arrivons à préciser l'un de ces aspects, plus l'autre devient flou. Ainsi l'existence de ces deux aspects qui nous paraissent inconciliables n'entraînent cependant jamais de contradiction. Cette idée de complémentarité est assurément l'une des plus originales et des plus profondes qu'ait introduites la Physique contemporaine.

Revenons maintenant aux ondes électromagnétiques porteuses de nombreux photons. La théorie de la seconde quantification nous a appris qu'il existe entre le nombre des photons et la valeur de la phase de l'onde un rapport de complémentarité. On peut, en comptant par exemple les effets photo-électriques produits par les photons incidents, déterminer le nombre de photons portés par une onde électromagnétique, mais une telle détermination ne donne aucun renseignement sur la valeur de la phase de l'onde. On peut aussi, en observant les vibrations électriques ou mécaniques produites sur un récepteur par l'action de l'onde électromagnétique, déterminer exactement sa phase, mais une telle détermination ne nous apprend rien sur le nombre des photons associés à l'onde. Plus généralement, toute observation permettant une évaluation simultanée du nombre des photons et de la phase de l'onde associée laisse subsister sur ces grandeurs des incertitudes δN et $\delta \Phi$ telles que la relation d'incertitude

$$\delta N \cdot \delta \Phi \geq 1$$

soit vérifiée. Le « nombre de photons » et la « valeur de la phase » nous apparaissent donc comme des aspects observables, mais complémentaires au sens de Bohr, d'une onde électromagnétique macroscopique. Plus l'on précise l'un de ces aspects, plus l'autre devient flou.

On peut dire qu'ici encore il y a rapport de complémentarité entre l'aspect granulaire et l'aspect ondulatoire des photons. En effet, la possibilité de « dénombrer » des photons est liée essentiellement à leur caractère granulaire d'unités discontinues, tandis que l'existence d'une phase bien définie ne se concevrait pas sans la possibilité d'associer une onde au déplacement des photons. Cependant la complémentarité grain-onde apparaît ici sous un jour tout à fait différent. Dans les relations de Heisenberg, l'aspect grain est défini par la localisation du corpuscule et ne saurait l'être par le dénombrement des corpuscules puisqu'on n'envisage qu'un seul corpuscule ;

quant à l'aspect onde, il est défini par la quantité de mouvement et l'énergie, c'est-à-dire par la longueur d'onde et la fréquence, mais aucunement par la valeur absolue de la phase puisque celle-ci, dans le cas des ondes ψ individuelles comporte toujours, nous l'avons vu, une constante additive arbitraire (1).

La coopération d'un grand nombre de photons (ou plus généralement de Bosons) à une même onde a pour résultat de donner à cette onde le caractère d'une onde du type classique, véritable vibration physique en propagation avec phase bien déterminée amplitude additionable et possibilité de transmission de mouvements électriques ou mécaniques en phase à des récepteurs appropriés. Mais la mise en évidence des propriétés « classiques » de l'onde n'est possible que si l'on renonce à la décomposer en corpuscules et à dénombrer ceux-ci. Tout dénombrement de ce genre a pour conséquence inéluctable de faire disparaître les propriétés classiques de l'onde.

Ainsi l'onde électromagnétique macroscopique nous apparaît comme résultant de la coopération d'un nombre très grand et indéterminé de photons. Plus généralement, les champs ondulatoires macroscopiques à phase bien déterminée nous apparaissent comme associés à des particules du type Bosons qui seules, par leur faculté d'agrégation à une même onde, rendent possibles l'apparition de ces champs ondulatoires macroscopiques.

Grâce à la théorie de la seconde quantification appliquée à la représentation quantique des champs électromagnétiques, on est donc parvenu à rendre compte à la fois de deux faits physiquement certains et au premier abord contradictoires : l'émission du rayonnement par photons lors des transitions quantiques de Bohr et l'existence macroscopique d'ondes électromagnétiques à phases bien définies et à propriétés classiques du type de Maxwell. Mais, de même qu'il n'a été possible de rendre compte du double aspect granulaire et ondulatoire des particules de l'échelle atomique qu'en introduisant les incertitudes de Heisenberg et la « complémentarité » dont elles sont l'expression, de même on n'a pu

concilier les deux aspects, quantique et ondulatoire classique, du rayonnement électromagnétique qu'en introduisant la relation d'incertitude

$$\delta N \cdot \delta \Phi \geq 1,$$

c'est-à-dire une nouvelle sorte de complémentarité entre le nombre des photons associés à une onde et la phase de cette onde.

On a en général moins insisté, dans les exposés à caractère philosophique de la nouvelle Physique, sur cette sorte d'incertitude et de complémentarité que sur celles relatives à la dualité onde-corpuscule auxquelles restent attachés les noms de Heisenberg et de Bohr. Cependant elle a une très grande importance car, sans elle, il est impossible de comprendre comment s'opère le passage des processus quantiques de l'échelle microscopique à certains phénomènes essentiels de l'échelle macroscopique. Elles montrent aussi l'importance de la distinction entre les Fermions toujours isolés et associés à des ondes individuelles sans caractère physique et les Bosons susceptibles de se grouper sur une même onde qui prend alors les propriétés des ondes classiques.

On ne saurait exagérer l'importance de la théorie quantique des champs électromagnétiques dans le développement actuel de la Physique théorique. Elle est aujourd'hui à la base de tous les raisonnements grâce auxquels les physiciens cherchent, avec des succès variables, à rendre compte des détails les plus fins de phénomènes atomiques ou nucléaires (tels par exemple que le déplacement spectral de Lamb-Retherford qui fait couler tant d'encre en ce moment). Mais absorbés par l'exécution de leurs calculs, les théoriciens semblent souvent peu préoccupés de méditer sur les bases mêmes de la théorie, bases qui ont cependant une importance essentielle et ne sont pas sans soulever par-ci par-là, quelques difficultés. Quand, avec le recul du temps, on pourra mieux juger de l'ensemble des conceptions nouvelles introduites par la Physique contemporaine, on s'apercevra sans aucun doute que la complémentarité entre le nombre de Bosons associés à une même onde et la phase de cette onde a une portée et une signification tout à fait fondamentales.

(1) Ceci résulte d'ailleurs du fait que pour $N = 1$ et $\delta N = 0$, la relation $\delta N \cdot \delta \Phi \geq 1$ donne $\delta \Phi = \infty$.