

QUELQUES CONSIDÉRATIONS SUR LES NOTIONS D'ONDE ET DE CORPUSCULE

Quand les physiciens parlent d'une énergie qui se transporte à distance à travers un milieu, deux idées se présentent à leur esprit, l'image des ondes et celle des corpuscules; mais, comme il arrive souvent, le sens des conceptions cachées derrière ces deux mots a beaucoup évolué, si bien qu'aujourd'hui un examen attentif de ce que nous entendons dire, quand nous les employons, n'est pas une chose inutile.

La mécanique cherche à prévoir le mouvement d'un « point matériel » soumis à des forces. Naturellement la conception d'un point matériel n'a pas plus de réalité que celle d'un point géométrique. Dès qu'on envisage des cas concrets, le point matériel devient un corpuscule: atome, électron ou constituant nouveau des noyaux, comme ces neutrons dont l'entrée dans la physique date seulement d'hier.

L'optique d'autre part a successivement adopté les théories de l'émission et des ondulations pour aboutir aujourd'hui, à la suite des phénomènes de quanta et de la localisation de l'effet photoélectrique, à la notion d'une sorte de corpuscule de lumière, le photon, dont la nature reste encore bien mystérieuse.

Enfin la mécanique ondulatoire, en associant au mouvement d'un projectile quelconque la considération d'une onde, sans réalité physique, mais qui permet de prévoir, autant qu'il se peut, les déplacements du mobile est venue montrer qu'il était vain d'opposer l'aspect ondulatoire à l'aspect corpusculaire et que pour tout phénomène il fallait plus ou moins tenir compte de ces deux points de vue.

*
* *

La physique atomique contemporaine a mis en évidence et étudié des corpuscules variés auxquels leurs propriétés font at-

tribuer, dans tous les cas, une masse mécanique et, très souvent aussi, une charge électrique positive ou négative. L'effet de la charge électrique, quand le mobile qui la porte se déplace rapidement dans un gaz, est de jalonner sa trajectoire par un certain nombre d'ions; c'est une propriété qui, jusqu'à présent, ne se présente pas pour le parcours des radiations, bien que le phénomène de Compton ait aussi pour effet de placer de distance en distance des sources d'ionisation sur le trajet du rayon.

Les ondes ressemblent, d'autre part, aux corpuscules neutres en mouvement, parce que, dans les deux cas, les trajectoires sont invisibles. L'énergie se dissipe surtout par des rencontres exceptionnelles, qui donnent lieu, respectivement, à l'effet photo-électrique et à la projection des noyaux de recul.

En prenant pour unité la masse du proton, on sait que la masse au repos de l'électron est un peu plus grande qu'un deux millième et que la masse du neutron est probablement voisine de l'unité. Un projectile dont la masse serait à peu près complètement nulle, ou au moins d'un ordre de grandeur extrêmement inférieur aux valeurs précédentes, constituerait une catégorie de corpuscules douée de propriétés très différentes; il ne pourrait avoir d'énergie, c'est-à-dire ne pourrait se manifester, que si sa vitesse était très voisine de la vitesse de la lumière, limite qui, dans les conceptions régnantes aujourd'hui, ne saurait être dépassée. Nous verrons un peu plus loin que ce sont là précisément les caractéristiques qu'il y aurait lieu d'attribuer aux photons.

* * *

Un des exemples qui peuvent servir à illustrer les considérations que nous développons ici est le suivant. Il arrive souvent dans les recherches actuelles que l'on se demande si tel effet est attribuable à un corpuscule ou à une radiation (c'est-à-dire à un photon). Quel est le sens exact de cette question et les termes en sont-ils bien posés?

La réponse n'est pas toujours aisée, et, pour en approfondir les difficultés, il n'est pas inutile d'envisager d'un peu plus près comment se pose pour le photon le problème du corpuscule et de son onde associée et d'examiner en particulier les rapports de l'onde associée au corpuscule de lumière, et de l'onde classique de l'optique.

Si l'on pouvait dire en toute rigueur: le photon est un pro-

jectile corpusculaire comme les autres, avec une masse extrêmement faible quand il est en repos et par conséquent une vitesse toujours extrêmement voisine de la vitesse de la lumière; si l'on pouvait ajouter l'onde lumineuse classique se confond avec son onde associée dont on sait que la vitesse de propagation, toujours plus grande que celle de la lumière, tend vers celle-ci quand la vitesse du mobile elle-même s'en rapproche: alors le raccordement de l'optique à la mécanique serait une chose acquise et il n'y aurait plus lieu de chercher entre les corpuscules et les photons d'autre différence que celle de l'ordre de grandeur des masses.

Malheureusement on ne peut pas aller tout à fait aussi loin. Pour considérer le photon comme le cas limite d'un corpuscule dont la masse tend vers zéro et où l'onde associée se confond avec l'onde lumineuse définie par les champs classiques de Maxwell-Lorentz, il faudrait que ces deux êtres mathématiques fussent réductibles l'un à l'autre et, en particulier, possédassent les mêmes éléments de symétrie. Or ce n'est pas le cas.

L'onde ψ de la mécanique ondulatoire primitive est une grandeur scalaire. Elle ne peut pas être identifiée avec l'onde électromagnétique représentée par deux vecteurs. La théorie de l'électron magnétique de Dirac a introduit une onde Ψ à quatre composantes, mais ces quatre composantes n'ont pas non plus le caractère de composantes d'un vecteur et ceci ne permet pas de les identifier aux champs, malgré les tentatives infructueuses qui ont été faites dans ce sens.

Peut-être peut-on espérer trouver une liaison entre les champs lumineux classiques et l'onde associée qui fasse dériver les premiers de la seconde, malgré la différence des éléments de symétrie; toutefois ce pont n'est pas encore construit et en tout cas il ne saurait y avoir *identité* entre l'onde lumineuse électromagnétique et l'onde associée aux corpuscules photons.

* * *

La notion de corpuscule demande également quelque attention.

Par corpuscule, on entend une manifestation d'énergie ou de quantité de mouvement, localisée dans un très petit volume et susceptible de se transporter à distance avec une vitesse finie; cette vitesse doit toujours rester inférieure à la vitesse de la lumière si l'on admet les postulats de la relativité.

Il y a lieu d'ajouter, si l'on veut se tenir à la définition habituelle du corpuscule, dérivée de ce que nous connaissons en dynamique classique, que l'on doit pouvoir suivre l'histoire d'un même corpuscule à travers le temps et l'espace et le repérer d'une manière exacte et continue, au moins avec les approximations que permet le principe d'indétermination.

La personnalité pour ainsi dire du corpuscule se conserve alors (bien qu'au moment des interactions avec d'autres particules l'aspect actuel des théories se présente sous une forme « globale » où la distinction des individus n'intervient pas), et on doit pouvoir également compter ces petits éléments de matière.

On a été amené, pour interpréter les anomalies de l'effet Zeeman et la structure fine des spectres optiques et Röntgen des éléments, à douer l'électron d'une propriété nouvelle que l'on a l'habitude de désigner aujourd'hui sous le nom de « Spin ». On peut se faire une image classique du spin de l'électron en se représentant celui-ci comme une petite boule d'électricité en rotation autour d'un de ses diamètres et en admettant que le moment magnétique engendré par cette rotation est égal à un magnéton de Bohr tandis que le moment de quantité de mouvement correspondant est égal à la moitié de l'unité quantique $\frac{h}{2\pi}$.

Néanmoins cette image classique, comme toutes les images de ce genre appliquées aux phénomènes de l'échelle atomique, ne paraît pas traduire exactement l'essence véritable du spin. On doit plutôt considérer le spin comme une propriété intrinsèque (de l'entité « électron ») propriété à laquelle correspond l'existence d'une grandeur ayant la nature physique d'un moment magnétique et d'une autre grandeur intimement liée à la première ayant la nature physique d'un moment de rotation.

En généralisant ce qui a été trouvé pour l'électron, on arrive à l'idée que tous les corpuscules élémentaires pourraient bien être caractérisés en dehors de leur charge et de leur masse, par une troisième propriété, leur spin, qui dans le cas de l'électron est $\frac{1}{2}$ en prenant l'unité quantique $\frac{h}{2\pi}$. Dans tout édifice complexe formé de corpuscules élémentaires les spins s'ajouteront algébriquement de telle sorte que l'édifice possédera un spin total dont dépendront en partie les propriétés qu'il manifeste à l'extérieur. Cette idée s'est montrée fructueuse quand on l'applique aux noyaux des atomes car elle a permis d'interpréter les structures « hyperfines » de certaines raies spectrales.

Si des unités non élémentaires de la matière telles que les noyaux d'atomes ont un spin qui est formé par addition algébrique des spins des corpuscules élémentaires, ce spin doit être égal à un nombre entier n ou à un nombre « demi-entier » $n + \frac{1}{2}$

(en unités $\frac{h}{2\pi}$). Nous pouvons dire brièvement que les unités

complexes seront à spin pair (ou nul) ou à spin impair et ceci conduit à les partager en deux catégories qui paraissent se comporter différemment en ce qui concerne leurs propriétés statistiques. C'est un fait bien connu que la mécanique statistique classique de Boltzmann n'est, du point de vue quantique, qu'une approximation valable seulement aux températures suffisamment élevées, bien que pratiquement applicable à un très grand nombre de cas aux températures usuelles. La théorie quantique contemporaine a conduit à remplacer l'évaluation des états possibles d'un système usitée en mécanique statistique classique par un autre mode d'évaluation où l'on considère comme identiques deux états qui diffèrent seulement par la permutation de deux corpuscules élémentaires de même nature. Mais cette nouvelle méthode a été développée de deux manières différentes en admettant soit que le nombre de corpuscules élémentaires ayant un même état peut être aussi grand que l'on veut, soit qu'au contraire la présence d'un corpuscule dans un état exclut absolument la présence d'un autre corpuscule dans le même état. On obtient ainsi respectivement la statistique dite de « Bose-Einstein » et la statistique dite de « Fermi-Dirac » dont la première est certainement applicable au photon et conduit à la loi de répartition spectrale de Planck, tandis que la seconde s'applique certainement aux électrons et explique les propriétés des électrons de conductibilité dans les métaux. La propriété assez étrange des électrons de ne point se permettre mutuellement d'être plusieurs à posséder le même état constitue le contenu du « principe d'exclusion de Pauli » et, comme nous venons de le dire, elle sert de base à la statistique de Fermi-Dirac.

Des mesures sur les spectres de rotation ont permis de conclure que les noyaux à spin pair suivent la statistique de Bose alors que les noyaux à spin impair, tout comme les électrons, suivent la statistique de Fermi. On a été ainsi conduit à penser que la parité ou l'imparité du spin d'une espèce donnée d'unité matérielle correspond à la validité de l'une ou de l'autre statis-

tique pour les assemblées de ces unités et cette règle a été utilisée comme guide par les physiciens qui ont cherché à établir des formules de structure pour les noyaux d'atomes en y faisant intervenir comme constituants élémentaires les protons et les électrons et plus récemment les neutrons et les électrons positifs. Puisque les photons obéissent, sans aucun doute, à la statistique de Bose, la règle qui vient d'être mentionnée conduit à leur attribuer un spin pair ou nul ce qui pourrait faire penser que le photon n'est pas une unité élémentaire mais est formé par exemple d'un électron positif et d'un électron négatif. Il faut toutefois bien remarquer que l'on n'a aucune idée de l'origine de la propriété d'exclusion énoncée par le principe de Pauli et du mécanisme qui peut lier l'existence ou la non-existence de cette propriété à l'impairité ou à la parité du spin de sorte qu'il peut être téméraire de vouloir généraliser une règle déduite de quelques cas particuliers. Il n'en reste pas moins certain que le « spin » est une caractéristique très importante des corpuscules dont dépendent en grande partie leurs lois d'interaction et leur comportement statistique quand ils sont assemblés. Quand l'expérience révèle l'existence d'un corpuscule nouveau, on doit se demander non seulement quelle est sa masse et quelle est sa charge électrique, mais aussi quel est son spin, la valeur $\frac{1}{2}$ du spin paraissant jusqu'à plus ample informé établir une présomption pour que le corpuscule soit élémentaire.

* * *

Revenons maintenant aux photons et aux radiations; tous les physiciens comprendront qu'il s'agit là des divers rayonnements de la grande famille électromagnétique qui s'étend depuis les ondes de Hertz jusqu'aux rayons gamma et à leurs prolongements vers les très hautes fréquences dont des termes très élevés figurent probablement parmi les rayons cosmiques. Mais comme toujours, on s'aperçoit en approfondissant le sujet qu'il n'est pas aisé de donner une bonne définition de ce que l'on veut envisager.

On ne peut pas, en effet, parler en toute rigueur d'ondes obéissant aux théories classiques, puisque celles-ci ne prévoient pas les quanta et supposent l'énergie uniformément répartie sur une surface d'onde.

En ce qui concerne les radiations, il est assez naturel d'admettre que tous les photons sont de même nature, c'est-à-dire que les grandeurs servant à les caractériser telles que masse propre, spin, etc., sont les mêmes pour tous. Seule, leur énergie et par suite leur fréquence les distinguent. La considération du changement de fréquence par réflexion sur un miroir mobile semble bien prouver qu'un *même* photon peut passer d'une « couleur » à une autre quand son énergie change.

Dans les ondes de T. S. F., on doit imaginer que les quanta d'énergie étant très faibles, il y a un nombre énorme de photons qui contribuent à toute manifestation perceptible d'énergie. De là l'apparence continue et hydrodynamique de ces phénomènes. La façon dont l'existence des photons peut se concilier avec les champs considérés par la théorie élémentaire de l'électricité (champs statiques par exemple) reste absolument mystérieuse.

Peut-être la meilleure manière de définir les radiations serait-elle de les considérer comme des manifestations d'énergie quantifiée telles que la fréquence ν déduite expérimentalement du quantum $h\nu$ soit reliée à la longueur d'onde, révélée par les phénomènes optiques, par l'intermédiaire d'une vitesse qui ne diffère pas de la vitesse c de la lumière par une quantité mesurable. Il s'ensuit que, dans la diffusion considérée comme un choc de photons, on devra écrire, ainsi qu'on le fait dans la théorie de l'effet Compton, que l'impulsion d'un photon est toujours égale à $\frac{h\nu}{c}$.

Toutefois cette définition offre l'inconvénient d'être basée sur une idée mathématique, tandis qu'il serait plus satisfaisant de fonder sur une propriété physique la définition d'une radiation. En outre à mesure que le quantum d'une radiation augmente il apparaît des propriétés nouvelles, fait qui deviendrait très important si l'idée émise que les radiations dont le quantum dépasse deux fois l'énergie absolue correspondant à la masse de l'électron peuvent se transformer en deux corpuscules électrisés de signe contraire, venait à se confirmer.

Il faut aussi insister fortement sur un phénomène qui, jusqu'ici, n'a été trouvé que pour les radiations; nous voulons parler de l'effet photoélectrique, action fondamentale du rayonnement sur la matière et dont le mécanisme nous reste totalement inconnu. On ignore pourquoi l'énergie du photon est toujours entièrement transformée en énergie cinétique d'un

électron, après avoir fourni le travail nécessaire pour arracher celui-ci à l'attraction du noyau. On ne saurait trop répéter qu'un phénomène si important auquel il faut attribuer la plupart des manifestations de l'énergie lumineuse nous est encore totalement mystérieux, en dehors du bilan énergétique que traduit la relation d'Einstein.

La différence des effets expérimentaux des corpuscules et des photons tend à s'effacer quand l'énergie des premiers et le quantum des seconds deviennent très grands; même l'effet de la charge du corpuscule s'atténue bien qu'il paraisse ne pas descendre au-dessous d'une certaine limite.

Le calcul montre que la distinction entre certaines propriétés mécaniques des corpuscules rapides et des photons de fréquence très élevée tend aussi à devenir moins nette lorsque le quantum du photon devient de l'ordre de grandeur de l'énergie d'annihilation de la masse du corpuscule.

* * *

Ce qui se dégage de tout cela c'est qu'aujourd'hui la distinction entre un corpuscule électriquement neutre, doué d'une masse extrêmement faible et un photon est devenue très subtile. Il semble à l'heure actuelle que l'on ait à considérer trois sortes de corpuscules neutres: le neutron de masse à peu près égale à l'unité, le neutrino de Fermi, constitué par deux électrons voisins, dont la masse totale resterait au plus de l'ordre de la masse électronique, et le photon, où la liaison des deux charges de signe contraire serait telle que la masse soit beaucoup plus faible encore.

On envisage maintenant qu'un photon puisse se transformer en corpuscule, par exemple qu'une énergie de radiation soit capable de donner naissance à un couple d'électrons de signe contraire en fournissant d'abord la contribution d'énergie $2mc^2$ nécessaire à l'apparition des masses, puis l'énergie cinétique que les électrons pourront posséder. Le phénomène inverse, la dématérialisation d'un corpuscule, serait possible aussi et, par extension, la création de nouvelles quantités de matière aux dépens de l'énergie cinétique d'un corpuscule très rapide a été également suggérée.

La possibilité d'annihilation de deux corpuscules en quelque sorte symétriques, comme le sont l'électron positif et l'électron négatif, peut conduire à des vues nouvelles sur la structure du

photon.¹ Un photon constitué d'un couple de corpuscules, jouant l'un par rapport à l'autre le même rôle que l'électron positif par rapport à l'électron négatif, serait susceptible de se détruire en présence de la matière en lui cédant tout son contenu énergétique. Cette annihilation du photon constituerait l'effet photoélectrique et expliquerait son caractère si particulier. Du même coup, on comprendrait pourquoi le photon composé de deux corpuscules de spin $\frac{1}{2}$ obéirait à la statistique de Bose-Einstein.

Les notions d'onde, d'énergie et de corpuscule sont devenues pour ainsi dire si fluides que nous ne serions pas étonnés de voir sous nos yeux ce nouveau protégé revêtir successivement chacun de ces aspects. Il faudra cependant, si l'on veut continuer à savoir exactement ce que l'on dit, trouver une définition suffisamment nette des mots que l'on emploie. Ce n'est pas une des moindres difficultés de la Physique moderne que cette subtilité, et quelquefois ce vague, de ses conceptions les plus fondamentales.

Il ne faut pas se dissimuler combien ces notions sont encore hypothétiques: l'investigation expérimentale, très puissamment dirigée aujourd'hui vers ces objets, ne peut manquer d'apporter bientôt des résultats capables d'orienter un peu le désordre présent de nos conceptions.

Paris, Académie des Sciences, Sorbonne.

MAURICE et LOUIS DE BROGLIE

¹ Comptes rendus de l'Acad. des Sciences, 198, (1934), p. 135.