

# La coexistence des photons et des ondes dans les rayonnements électromagnétiques et la théorie de la double solution

par Louis de BROGLIE

En utilisant l'interprétation de la Mécanique ondulatoire par la théorie de la double solution, on tente d'expliquer le fait surprenant que la conception ondulatoire des rayonnements sous sa forme électromagnétique reste très largement utilisable malgré l'existence indéniable des photons.

## LA DÉCOUVERTE DE LA COEXISTENCE DES ONDES ET DES CORPUSCULES

En 1905, l'année même où il posait les bases de la théorie de la relativité, un jeune homme de 25 ans, Albert EINSTEIN, accomplissait une véritable révolution dans la théorie de la lumière. Bien que, depuis les travaux d'Augustin FRESNEL, il paraissait certain que la lumière est constituée par des ondes dont James Clark MAXWELL découvrit plus tard la nature électromagnétique, EINSTEIN admit que la lumière contient aussi sous forme corpusculaire de petites régions de forte concentration d'énergie qu'il appela « quanta de lumière » et que nous nommons aujourd'hui « photons ». A l'aide de cette hypothèse hardie inspirée par la théorie des quanta de PLANCK, vieille alors seulement de cinq ans, il put expliquer, par un raisonnement qui tient en quelques lignes, les caractéristiques restées mystérieuses de l'effet photoélectrique, en admettant que la lumière de fréquence  $\nu$  transporte des quanta de lumière d'énergie  $h\nu$ ,  $h$  étant la fameuse constante de PLANCK.

Malgré le grand succès qu'elle remportait ainsi dès son apparition, la conception d'EINSTEIN soulevait de grandes difficultés car il semblait bien difficile de la concilier avec l'existence si bien prouvée des phénomènes d'interférences et de diffraction. En vue de ce qui suit, il est intéressant de rappeler que, dès cette époque, EINSTEIN a eu l'idée suivante : les ondes lumineuses seraient des ondes extrêmement faibles et énergétiquement indécélables, ondes que pour cette raison il qualifiait d'ondes « fantômes » : leur rôle serait de transporter les photons et de guider leur mouvement de façon à

régler leur répartition dans l'espace d'une façon conforme à ce que révèlent les phénomènes d'interférences et de diffraction.

Près de vingt ans s'étaient écoulés lorsqu'en 1923-24 dans des notes aux *Comptes rendus*, puis dans ma thèse de Doctorat, j'ai émis l'idée que la coexistence des ondes et des corpuscules découverte par EINSTEIN dans le cas de la lumière devait s'étendre à tous les corpuscules de la matière et que le fait, reconnu depuis la théorie de l'atome de Niels Bohr (1913), de l'existence des états quantifiés dans les atomes devait s'expliquer en supposant que le mouvement des électrons est associé à la propagation d'une onde. Précisée par les travaux de SHROEDINGER (1926) qui a écrit explicitement l'équation de propagation de l'onde associée à l'électron et en a déduit d'importantes conséquences, expérimentalement confirmée par la découverte de la diffraction des électrons par les cristaux (DAVISSON et GERMER, G. P. THOMSON, PONTE... 1927), ma conception de la coexistence générale des ondes et des corpuscules m'a conduit dans les années 1926-1927 à une théorie que j'avais appelée « théorie de la double solution » et exposée dans un article du *Journal de Physique* en juin 1927. Généralisant, en somme, la conception de l'onde fantôme suggérée par EINSTEIN dans le cas de la lumière, je supposais que le corpuscule est une très petite région de grande concentration d'énergie, une sorte de singularité, au sein d'une onde étendue qui le guidait dans son mouvement de telle manière que la probabilité de la présence du corpuscule en un point à un instant donné puisse rendre compte des phénomènes d'inter-

férences et de diffraction, et cela aussi bien dans le cas des corpuscules matériels comme l'électron que dans le cas des photons. D'ailleurs, le rapport de filiation qui dans ma pensée avait fait découler la Mécanique ondulatoire de la théorie des quanta de lumière d'EINSTEIN ne m'a jamais permis de douter que, du moins pour l'essentiel (c'est-à-dire abstraction faite des questions de masse, de spin, de forme des équations d'ondes, etc...), la coexistence des ondes et des corpuscules soit de même nature dans le cas des photons que dans celui de toutes les autres particules.

Je ne rappellerai pas ici, l'ayant fait bien des fois dans ces dernières années, comment la conception à peine ébauchée que j'avais proposée a été écartée à la suite des discussions poursuivies au Conseil de Physique Solvay d'octobre 1927 au profit de l'interprétation probabiliste introduite d'abord par M. Max BORN et développée ensuite sous forme d'une théorie de la « complémentarité » par Niels Bohr et ses disciples, et notamment par M. Werner HEISENBERG, dont le nom est resté attaché aux fameuses relations d'incertitude. J'ai expliqué pourquoi, ne parvenant pas à développer ma conception d'une façon vraiment satisfaisante, je m'étais rallié à l'inter-

prétation probabiliste seule alors susceptible d'être développée sous une forme assez rigoureuse pour faire l'objet des enseignements dont je fus dès lors chargé.

J'ai dit aussi pourquoi depuis environ 1951-1952 je suis revenu à mes idées primitives, mes réflexions m'ayant amené à penser qu'elles seules pouvaient donner une représentation exacte de la réalité physique. Certes, je ne nie pas la valeur des prévisions faites à l'aide des formalismes qu'on nomme « Mécanique quantique » ou « théorie quantique des champs », mais je pense, comme EINSTEIN l'a toujours dit, qu'ils ne donnent qu'une vue statistique des phénomènes sans décrire exactement la réalité physique sous-jacente.

Mes idées sur l'interprétation de la coexistence des ondes et des corpuscules par la théorie de la double solution ont beaucoup progressé dans ces dernières années, mais, étant donné l'étendue du sujet, je ne puis que renvoyer le lecteur aux ouvrages indiqués dans la bibliographie à la fin de l'article et je dois ici me borner à donner un résumé très sommaire de la théorie de la double solution, résumé qui est un préambule nécessaire pour le sujet que je veux traiter.

## EXPOSÉ SOMMAIRE DE LA THÉORIE DE LA DOUBLE SOLUTION

L'idée essentielle de la théorie de la double solution, celle qui justifie son nom, est qu'il faut distinguer deux solutions des équations d'ondes employées en Mécanique ondulatoire : l'une est l'onde  $\Psi$  bien connue qui n'est, conformément à l'interprétation de M. Born, qu'une représentation de probabilité ; l'autre, l'onde  $u$  qui est la véritable description de la réalité physique. Tandis que l'onde  $\Psi$  est fictive et que sa structure homogène ne comporte rien qui puisse permettre d'y localiser un corpuscule, l'onde  $u$  doit comporter une très petite région singulière où le champ ondulatoire prend une très grande valeur et c'est cette région qui est le corpuscule.

La structure de l'onde  $u$  peut alors être précisée en disant qu'en dehors de la très petite région constituant le corpuscule, elle se réduit à une onde régulière de très faible amplitude que je nommerai « l'onde de base » et que je désignerai par la lettre  $v$  ; elle est assimilable à l'onde fantôme d'EINSTEIN. Sur cette onde de base est en quelque sorte « greffé » le corpuscule et c'est ce greffage qui oblige le corpuscule à se déplacer d'une manière qui est liée à la propagation de l'onde de base. Ce mouvement s'effectuerait suivant une loi, « la formule du guidage », qui prend diverses formes suivant l'équation d'ondes du corpuscule et dont le sens profond est le suivant : le corpuscule se déplace dans l'onde de telle manière que sa vibration interne reste toujours en phase avec l'onde qui le porte (1). Ce résultat apparaît d'ailleurs comme presque évident si l'on remarque que, dans cette théorie, le corpuscule n'est pas autre chose qu'une petite région de l'onde où le champ ondulatoire est exacerbé. Des considérations sur lesquelles je ne puis m'étendre ici m'ont amené à penser que les véritables

équations de l'onde  $u$  sont non linéaires, mais qu'en dehors de la très petite région de grande amplitude constituée par le corpuscule (et peut-être sur les bords des trains d'ondes s'ils sont abrupts), les termes non linéaires deviennent négligeables de telle sorte que, dans presque toute son extension, l'onde  $u$  se confond avec l'onde de base qui obéit aux équations linéaires usuelles de la Mécanique ondulatoire. Bien qu'au point de vue statistique, dont nous allons maintenant parler, tout soit réglé par les propriétés de l'onde de base, l'intervention de la non linéarité peut devenir importante dans certains cas, comme nous le verrons plus loin.

Le guidage des corpuscules par l'onde de base conduit à penser que la probabilité de la présence du corpuscule en un point de l'espace à un instant donné est fournie par une expression qui, dans le cas simple de l'équation de Schrodinger, est proportionnelle au carré du module de l'amplitude de l'onde de base. Néanmoins, et c'est là un des progrès importants de ma théorie dans ces dernières années, cette conclusion ne peut être rendue plus rigoureuse qu'en admettant l'existence dans ce que nous nommons le vide d'un milieu caché, le milieu subquantique de MM. BOHM et VIGIER, qui serait en interaction constante avec le corpuscule et qui lui infligerait de continues perturbations, sans que son accord de phase avec l'onde de base en soit finalement troublé. Depuis trois ans, j'ai construit, en développant cette idée, une très curieuse « Thermodynamique cachée des particules » sur laquelle je ne puis insister ici, mais qui me paraît devoir contribuer d'une façon importante aux progrès futurs de la Physique quantique.

Avant de terminer cette analyse très sommaire de la théorie de la double solution, je voudrais faire encore des remarques importantes. Pour mettre ma théorie en accord avec le formalisme probabiliste usuel qui utilise uniquement l'onde  $\Psi$ , il faut établir entre cette onde  $\Psi$  et l'onde de base

(1) La phase  $\varphi$  de l'onde  $v$  est définie par la relation  $v = ae^{i\varphi}$  où  $a$  et  $\varphi$  sont des fonctions réelles de  $xyz$  et la phase de la vibration interne du corpuscule qui se trouve au point  $xyz$  au temps  $t$  est égale à  $\varphi(xyz)$ . La phase est ainsi définie d'une façon générale qui n'implique nullement que l'onde  $v$  soit assimilable à une onde plane monochromatique.

physiquement réelle, que je désigne par la lettre  $v$ , la relation  $\Psi = Cv$  où  $C$  est un facteur de normalisation permettant de considérer  $|\Psi|^2$  comme donnant en valeur absolue la probabilité de présence du corpuscule en un point. L'onde ainsi définie est donc une onde fictive obtenue à partir de l'onde de base réelle et à amplitude déterminée par une normalisation à caractère arbitraire. Il en résulte que, si les ondes  $v$  et  $\Psi$  sont bien toutes deux des solutions des mêmes équations linéaires de propagation, l'onde de base jouit de la propriété d'addition qui caractérise les ondes linéaires physiquement réelles, tandis que l'onde  $\Psi$  ne jouit pas de cette propriété, en raison de l'opération arbitraire de normalisation; cette dernière circonstance, signalée depuis bien longtemps par M. DIRAC, est très facile à vérifier. C'est ce fait qui, à mon sens, explique la véritable signification de ce qu'on nomme d'après Heisenberg « la réduction du paquet de probabilité » : il permet en outre de comprendre pourquoi l'onde  $\Psi$ , bien que n'étant qu'une représentation subjective de probabilité, semble déterminer des phénomènes physiques observables tels que diffraction, interférences, niveaux d'énergie des états stationnaires des atomes, etc. A mon avis on ne peut pas admettre qu'une représentation de probabilité détermine un phénomène

physique observable, mais ce paradoxe est évité si l'on suppose, avec la théorie de la double solution, que derrière l'onde fictive  $\Psi$  est dissimulée une onde de base qui est un processus physique réel susceptible de déterminer des phénomènes observables.

J'ajouterai encore une dernière remarque. Les équations d'ondes de la Mécanique ondulatoire contiennent des termes imaginaires et leurs solutions sont des fonctions complexes. L'onde  $v$  de base sera donc représentée par une fonction complexe. Au premier abord, il peut paraître impossible qu'un processus physique réel soit représenté par une telle fonction, mais on voit qu'il n'en est rien car une fonction complexe  $F$  se décompose en deux fonctions réelles  $F_1$  et  $F_2$  par la formule  $F = F_1 + iF_2$  et, en introduisant cette décomposition dans les équations d'ondes et en séparant le réel de l'imaginaire, on obtient un ensemble d'équations toutes réelles qui lient, d'une certaine façon, l'évolution des fonctions réelles  $F_1$  et  $F_2$ . Nous verrons l'utilité de cette remarque quand nous appliquerons, comme nous allons le faire maintenant, la théorie de la double solution au cas des champs électromagnétiques et des photons.

### L'ONDE DE BASE DES PHOTONS SERAIT UNE ONDE ÉLECTROMAGNÉTIQUE DU TYPE CLASSIQUE, MAIS DE TRÈS FAIBLE AMPLITUDE

A priori, en théorie de la double solution, il paraît certain que l'onde de base des photons doit être assimilée à une onde électromagnétique de très faible amplitude, obéissant au moins très sensiblement (1) aux équations de MAXWELL. Des réflexions que j'ai faites assez récemment sur le procédé d'apodisation des images employé dans la technique des instruments d'optique m'ont paru confirmer cette conception et je vais exposer le raisonnement que j'ai fait à ce sujet.

Les physiciens qui cherchent à obtenir de bonnes images à l'aide d'instruments d'optique sont gênés par les effets de diffraction qui interviennent dans ces instruments, ces effets ayant pour conséquence de disperser la lumière autour de l'image prévue par l'optique géométrique. Pour cette raison ils ont cherché à éliminer, par un dispositif approprié, cette sorte de « pied » qui présente la répartition des intensités autour de l'image de façon à obtenir, par un procédé « d'apodisation », une répartition plus concentrée des intensités et par suite une image plus nette.

Sans entrer dans les détails de la théorie, nous voulons rappeler le principe de la méthode d'apodisation. Considérons un instrument d'optique comportant une ouverture, par exemple de forme circulaire. Sans apodisation, la lumière incidente aura une intensité constante sur toute l'ouverture et le principe d'HUYGENS, joint à la formule d'inversion de FOURIER, permet de calculer la forme de l'image avec son pied gênant. Mais plaçons sur l'ouverture une lame absorbante d'épaisseur variable, par exemple plus épaisse sur les bords

qu'au milieu. Alors, sur l'ouverture l'intensité ne sera plus uniforme, elle sera plus grande au centre de l'ouverture que sur les bords. La théorie indique et l'expérience confirme que la figure de diffraction dans le plan image peut se trouver resserrée et qu'on peut ainsi obtenir une image apodisée plus nette.

Or il paraît certain (l'expérience serait sans doute facile à faire) que l'image apodisée serait obtenue sans modification si, au lieu d'utiliser une source de lumière intense, on employait, comme dans les célèbres expériences de TAYLOR, une source très faible, si faible que les photons avec leurs trains d'ondes individuels n'arriveraient que un par un sur l'ouverture de l'appareil. Réfléchissons à ce qui se passerait alors. Tous les photons qui passeraient dans l'ouverture et qui iraient contribuer à former l'image auraient traversé la lame absorbante et cependant ces photons, qui n'auraient pas subi l'absorption quantique discontinue dans la lame, ne se répartiraient plus de la même façon dans le plan image qu'en l'absence de lame. Cela me paraît bien nous imposer d'admettre que « quelque chose » qui accompagne le photon et influe sur son mouvement a été absorbé dans la lame *par un processus non quantique différent de l'absorption par photon*. Or ce « quelque chose » ne me semble pouvoir être que le train d'ondes de base qui porte et qui guide le photon. Ce train d'ondes paraît pouvoir être assimilé à un train d'ondes électromagnétiques qui se propagerait et serait absorbé dans la lame d'une manière quasi-classique. Nous retrouvons donc bien l'idée que le photon est porté par une onde électromagnétique de base du type classique, mais d'une très faible intensité, l'onde fantôme d'EINSTEIN.

On peut appliquer des raisonnements analogues à d'autres phénomènes optiques. Ils suggèrent tous qu'au niveau d'intensité très faible de l'onde de base se déroulent des processus

(1) Je dis très sensiblement parce que j'ai toujours pensé qu'il fallait introduire dans les équations de Maxwell un très petit terme de masse, mais cette masse doit être si petite que les solutions des équations de Maxwell n'en sont pas sensiblement modifiées.

très bien décrits par la théorie électromagnétique classique. Pour préciser cette vue, j'ai été amené à admettre (je ne puis ici qu'indiquer ce point très rapidement) que  $F = F_1 + iF_2$  étant l'une des grandeurs électromagnétiques de l'onde de base, c'est sa partie réelle  $F_1$  qui est la grandeur classique correspondante dans les équations de Maxwell. Quant à la partie imaginaire  $F_2$ , elle paraît être en relation avec la grandeur, si importante en Electrotechnique, qu'on appelle la puissance réactive.

En développant la théorie des ondes électromagnétiques de base, il faudra ne jamais perdre de vue certaines idées essentielles dont les théories actuellement en vogue ne me paraissent pas tenir suffisamment compte. L'onde plane monochromatique indéfinie et éternelle n'est qu'une abstraction qui n'est jamais réalisée. Les ondes stationnaires permettant de définir des modes de vibration sont des cas particuliers se présentant seulement quand l'onde est emprisonnée dans

une région finie de l'espace. Une onde électromagnétique est toujours émise sous la forme d'un train d'ondes ayant un front avant et un front arrière, une longueur  $l$ , une durée d'émission  $\tau$  et une largeur spectrale  $\delta\nu$  toutes trois finies, ces grandeurs étant reliées par les relations  $l = c\tau$  et  $\delta\nu \cdot \tau \sim 1$ . Ces idées, si classiques en Optique ondulatoire, doivent à mon avis être obligatoirement conservées dans les théories nouvelles et pour cette raison l'assimilation du champ électromagnétique à un ensemble d'oscillateurs harmoniques, qui est souvent prise pour base de la théorie quantique des champs, m'a toujours paru douteuse.

Naturellement nous devons admettre le postulat, resté jusqu'ici sans justification précise, qu'une onde de base ne peut porter qu'un seul corpuscule dans le cas des Fermions, mais peut en porter un nombre quelconque dans le cas des Bosons. Ce dernier cas est le seul qui nous intéresse ici puisque les photons sont des bosons.

## LES ONDES HERTZIENNES

Les ondes hertziennes sont formées de trains d'ondes de grande longueur pouvant atteindre des centaines de kilomètres et portant un nombre énorme de photons. La présence des photons dans les trains d'ondes hertziennes n'est pas douteuse puisqu'ils interviennent dans le fonctionnement des masers. C'est un fait qui, au premier abord, peut paraître extraordinaire que tous les problèmes concernant les ondes hertziennes peuvent être très exactement traités en faisant uniquement usage des équations de Maxwell, et cela même dans le domaine des hyperfréquences jusqu'aux ondes millimétriques. Une aussi large validité de la théorie classique des ondes peut paraître difficilement conciliable avec l'existence des photons, mais la théorie de la double solution, en nous disant que les photons hertziens sont portés par une onde électromagnétique de base de très faible amplitude qui impose sa phase à la vibration interne des photons, nous paraît apporter une très intéressante solution à cette difficulté.

Considérons un récepteur de Radio contenant un organe susceptible d'entrer en oscillation sous l'action d'une onde hertzienne incidente, cet organe pouvant être une antenne, un

circuit oscillant, une cavité résonnante etc. L'onde de base transportant les photons que nous supposons de la forme  $a \sin 2\pi\nu \left( t - \frac{r}{c} \right)$ ,  $r$  étant compté dans la direction de propagation, a une amplitude beaucoup trop faible pour mettre le récepteur en oscillation, mais les photons qu'elle porte, étant en phase avec elle, apportent au récepteur des « échantillons »

d'une onde  $Ca \sin 2\pi\nu \left( t - \frac{r}{c} \right)$  avec  $C$  très grand. L'arrivée

de ces échantillons communique au récepteur des impulsions rythmées susceptibles de le faire entrer en oscillation régulière. Cette mise en oscillation d'un récepteur par l'arrivée successive d'échantillons d'une onde sinusoïdale est classique dans la technique radioélectrique et l'on en fait simplement ici une application d'un genre particulier adaptée à la structure photonique des radiations hertziennes. Cette conception de la structure d'une onde hertzienne et de son action sur un récepteur est, je crois, tout à fait caractéristique des horizons nouveaux que nous ouvre l'interprétation de la coexistence des ondes et des corpuscules par la théorie de la double solution.

## LA LUMIÈRE ÉMISE PAR LES SOURCES USUELLES ET PAR LES LASERS

Dans les sources usuelles de lumière, les atomes (ou molécules) émettent indépendamment les uns des autres des trains d'ondes de longueur assez petite (de l'ordre du mètre), longueur que l'on peut mesurer expérimentalement : chacun de ces trains d'ondes transporte au moment de son émission un seul photon produit par la transition quantique qu'a subie l'atome dont il sort. Si la source est de très faible intensité, la lumière envoyée par elle sur un appareil d'interférences arrivera sous

la forme de trains d'ondes isolés portant chacun un seul photon. De célèbres expériences faites d'abord par TAYLOR en 1909, puis par DEMPSTER et BATHO en 1928 ont montré que, dans ce cas, l'on obtenait finalement, après une pose suffisamment longue, les mêmes phénomènes d'interférences qu'avec une lumière intense et une pose courte (1). Cela prouve indiscutablement que chaque photon arrive dans l'appareil d'interférences porté par un train d'ondes qui est susceptible d'interférer avec lui-même.

Quand on emploie une source de lumière intense, ce qui est le cas usuel, les trains d'ondes de même fréquence émis par les divers atomes de la source se superposent et c'est

(1) Un résultat analogue a été obtenu avec des électrons, notamment à Toulouse dans le laboratoire de M. DUPOUY, par M. FAGET dans sa thèse de doctorat.

l'onde résultant de cette superposition qui, dans mes conceptions, guide les photons émis et leur impose sa phase locale. Il y a donc alors une « cohérence » des photons entre eux, mais cette cohérence n'est que partielle et temporaire parce que, les trains d'ondes de base n'étant émis par les atomes que pendant une durée d'un centième de microseconde, les composantes de l'onde résultante changent constamment, apparaissant et disparaissant successivement. Ainsi s'explique le succès de la théorie de la cohérence partielle quand on l'applique à la formation des images fournies par les instruments d'optique. Et la même conception permet aussi d'interpréter très simplement le curieux phénomène de corrélation des intensités provenant de deux sources éloignées et observées en des points différents (interférences du second ordre) mis en évidence dans ces dernières années, notamment par MM. HANDBURY BROWN et TWISS. De nouveau, dans le succès des interprétations par la théorie ondulatoire classique des phénomènes dont nous venons de parler, se manifeste la validité de cette théorie dans des domaines où elle pouvait paraître bien douteuse.

D'une nature très différente est la lumière que, depuis quelques années seulement, l'on peut obtenir à l'aide des lasers. Le fonctionnement des lasers, ainsi que celui des masers d'invention un peu moins récente, repose essentiellement sur la remarquable conception des émissions spontanées et des émissions stimulées des atomes, introduite par EINSTEIN dans un célèbre travail de 1917. C'est par le mécanisme des émissions stimulées que l'on parvient à obtenir avec les lasers un très long train d'ondes lumineuses portant un nombre considérable de photons, c'est-à-dire un train d'ondes dont la structure ressemble beaucoup plus à celle des ondes hertziennes qu'à

celle des ondes émises par les sources usuelles de lumière. L'étude des lasers a bien mis en évidence un point très important : tandis que les émissions spontanées ont lieu sans aucune interaction de l'atome émetteur avec l'extérieur (mais n'oublions pas qu'il est toujours en interaction avec le milieu subquantique !) et sont totalement indépendantes et incohérentes, les émissions stimulées sont dans les lasers provoquées par le passage d'un train d'ondes incident sur un ensemble d'atomes et elles sont cohérentes entre elles, c'est-à-dire dans ma conception que les atomes déposent les photons qu'ils émettent sur l'onde électromagnétique de base qui les traverse. Tous les photons émis par émission stimulée se trouvent ainsi en phase avec l'onde de base qui les transporte (1). Cette différence de nature entre les émissions spontanées et les émissions stimulées n'apparaissait pas dans le raisonnement primitif d'EINSTEIN parce que ce raisonnement portait sur le rayonnement noir qui, par sa définition même, est essentiellement aléatoire et incohérent.

La notion de cohérence des photons émis par un ensemble d'atomes, dont l'importance s'affirme ici, ne peut être définie qu'en faisant intervenir un accord de phase des photons avec une onde (*qui n'est pas nécessairement monochromatique plane*) : elle implique donc qu'il existe un champ ondulatoire physiquement réel et étendu qui couvre l'ensemble des atomes dont elle stimule l'émission et qui transporte des photons en phase avec lui. L'interprétation des phénomènes de cohérence (à l'aide des éléments non diagonaux de la matrice densité) adoptée par la théorie quantique des champs emploie des formules qui sont sans doute exactes, mais qui, à mon avis, ne peuvent faire comprendre la nature physique réelle de la cohérence.

## ÉTATS STATIONNAIRES ET ÉTATS PRÉCURSEURS

Terminons par des questions qui font l'objet de mes préoccupations actuelles, mais que je ne puis qu'effleurer ici.

On sait, depuis la théorie de l'atome de BOHR (1913), que l'émission des raies spectrales par les atomes s'opère quand l'atome subit une « transition quantique » qui le fait passer brusquement d'un état stationnaire d'énergie  $E_1$  à un état stationnaire d'énergie moindre  $E_2$  avec émission d'un photon de fréquence  $\nu = \frac{E_1 - E_2}{h}$ . Depuis cette époque, on a toujours admis avec Bohr que la transition quantique est quelque chose qui échappe à toute description en termes d'espace et de temps.

Dans la théorie de la double solution, l'idée que la véritable équation de l'onde  $u$  représentant les électrons de l'atome avec leur onde de base est non linéaire permet d'envisager l'hypo-

thèse que les états stationnaires seraient des sortes de cycles limites analogues à ceux que l'on rencontre fréquemment dans les théories non linéaires et que les transitions quantiques seraient des passages brusques et très rapides d'un cycle limite à un autre : le fait que les transitions soient des processus non linéaires expliquerait pourquoi elles paraissent impossibles à représenter dans le cadre des théories linéaires usuelles. Cette très intéressante idée avait été envisagée, il y a quelques années, par MM. DESTOUCHES et CAP, elle a été reprise et développée ensuite dans le très petit groupe de chercheurs qui travaillent avec moi, notamment par MM. FER, ANDRADE e SILVA et LOCHAK. Envisagée du point de vue de la Thermodynamique cachée des particules que j'ai récemment développée, cette question présente des aspects très intéressants sur lesquels je ne puis insister ici.

J'ai été assez récemment frappé par le fait suivant. Quand on développe avec les idées actuellement admises la théorie de la largeur des raies spectrales (2), on est conduit à attribuer aux divers niveaux d'énergie d'un atome une certaine largeur et l'on aboutit à une conclusion qui, exprimée avec les idées aujourd'hui considérées comme orthodoxes, peut s'exprimer comme il suit : la largeur spectrale d'une raie émise lors d'une transition quantique dépend non seulement de la transition

(1) On a pu mettre en évidence (MAGYAR et MANDEL, 1963) les interférences de deux faisceaux lumineux émis par deux lasers. Ce fait s'explique très bien avec nos conceptions puisque les ondes de base de même fréquence émises par les deux lasers ont une phase bien déterminée et doivent interférer à la façon classique.

(2) Voir par exemple Heitler Quantum theory of radiation, Oxford Clarendon press, 5<sup>e</sup> édition 1954, p. 181 et ss.

qui a eu lieu, mais de toutes celles qui auraient pu se produire, mais qui ne se sont pas produites. L'expérience confirme cette prévision, mais l'interprétation qu'on vient d'en donner me paraît entièrement paradoxale : en effet, un phénomène physique observable ne peut pas dépendre de phénomènes physiques qui étaient possibles, mais qui ne se sont pas produits. En réfléchissant à cette difficulté, j'ai été amené à penser que le calcul de la largeur des raies spectrales, qui est usuellement interprétée comme donnant seulement une représentation de probabilités, est en réalité la description d'un état physique de l'atome qui précède la transition quantique : cet « état précurseur » peut, dans le cadre des idées indiquées plus haut, être considéré comme une petite variation, calculable linéairement parce que petite, par rapport au cycle limite qui constitue l'état stationnaire initial (1).

Je n'insisterai pas davantage sur cette théorie des états précurseurs qui est, à l'heure actuelle, à peine esquissée : son but est de remplacer les représentations de probabilités, d'ailleurs sans doute exactes, fournies par les théories actuelles, par une image précise de l'évolution réelle des états de l'atome. Elle devrait aussi parvenir à nous fournir une image des phénomènes d'émission qui serait affranchie du paradoxe signalé plus haut. Elle devrait enfin conduire à interpréter, d'une manière très différente de celle qu'envisage l'actuelle théorie quantique des champs et à mon avis beaucoup plus proche de la réalité physique, beaucoup d'autres phénomènes comme, par exemple, le léger déplacement des niveaux d'énergie d'un atome sous l'influence d'une radiation lumineuse incidente mis en évidence expérimentalement dans le beau travail récent de M. COHEN TANNOUJI (2).

## CONCLUSION

Les images de la réalité physique que nous fournit la théorie ondulatoire des radiations sous sa forme électromagnétique dans le domaine des ondes hertziennes et lumineuses possèdent une validité très étendue, beaucoup plus étendue même que celle dont le principe de correspondance de Bohr nous avait depuis 1916 révélé l'existence. Cette validité peut paraître en contradiction avec la présence, cependant certaine, des photons dans la structure de ces ondes. La théorie de la double solution, en nous représentant les photons comme de très petites régions de très haute amplitude ondulatoire greffées sur une onde électromagnétique de base de très faible amplitude, nous

apporte une solution, et peut-être même la seule solution, de ce difficile problème. Mais peut-on comprendre qu'une onde dont l'amplitude est si faible que son existence n'a jamais pu (du moins jusqu'à présent) être décelée par des effets énergétiques observables puisse être un élément indispensable d'une bonne représentation de la réalité physique ? A mes yeux, la raison en est que c'est cette onde si faible qui transporte les photons, qui guide leur mouvement en réglant leur répartition statistique dans l'espace et qui leur impose sa phase, expliquant ainsi leur éventuelle cohérence.

## BIBLIOGRAPHIE

[1] Une tentative d'interprétation causale et non linéaire de la Mécanique ondulatoire : la théorie de la double solution, Gauthier - Villars, Paris 1956.

[2] La théorie de la Mesure en Mécanique ondulatoire, Gauthier - Villars, Paris 1957.

[3] L'interprétation de la Mécanique ondulatoire - *Journal de Physique*, 1959, 20, décembre, 963.

[4] Remarques sur la dualité des ondes et des corpuscules - *Cahiers de Physique*, 1962, n° 147, octobre, 425.

[5] Étude critique de l'interprétation actuelle de la Mécanique ondulatoire, Gauthier-Villars, Paris, 1963.

[6] La Thermodynamique de la particule isolée (Thermodynamique cachée des particules), Gauthier-Villars, Paris, 1964.

[7] Ondes électromagnétiques et photons - *C.R. Acad. Sci. Paris*, 1964 258, 29 juin, 6345, et ouvrage en préparation sur le même sujet.

## SUMMARY

### The coexistence of photons and waves in the electromagnetic radiations and the theory of the double solution

*In using the interpretation of wave mechanics by the double solution theory, an explanation is attempted of the surprising fact that the wave conception of radiation in its electromagnetic state can be very useful in spite of the undeniable existence of photons.*

(1) D'autres arguments peuvent aussi être présentés en faveur de cette conception des états précurseurs.

(2) Et je pense aussi aux si intéressants phénomènes d'optique « non linéaire » que l'emploi des lasers a récemment permis d'obtenir.

## KURZREFERAT

### Die Koexistenz der Photone und der Wellen in den elektromagnetischen Strahlungen und die Theorie der doppelten Lösung

*Mit einer Deutung der Wellenmechanik durch die Theorie der doppelten Lösung wird die überraschende Tatsache zu erklären versucht, dass die wellenmässige Deutung der Strahlungen in elektromagnetischer Form trotz des unbestrittenen Vorhandenseins von Photonen in weiten Grenzen brauchbar bleibt.*