

UNIVERSITÉ DE PARIS

UNE INTERPRÉTATION NOUVELLE DE LA MÉCANIQUE ONDULATOIRE EST-ELLE POSSIBLE?

par

M. Louis de BROGLIE

Prix Nobel,
Secrétaire perpétuel de l'Académie
des Sciences



Conférence faite au Palais de la Découverte
le 16 Octobre 1954

UNE INTERPRÉTATION NOUVELLE DE LA MÉCANIQUE ONDULATOIRE EST-ELLE POSSIBLE ?



AUCUN physicien n'ignore aujourd'hui que la mécanique ondulatoire a reçu depuis ~~vingt-cinq~~ ans une interprétation « purement probabiliste » dans laquelle l'onde associée au corpuscule n'est plus qu'une représentation de probabilité dépendant de l'état de nos informations et susceptible de varier brusquement avec elles, tandis que le corpuscule est conçu comme n'ayant pas de localisation permanente dans l'espace et, par suite, ne décrivant pas une trajectoire bien définie. Cette manière de se représenter le dualisme onde-corpuscule a reçu le nom de « complémentarité », notion assez peu précise et assez élastique que l'on a cherché à extrapoler, d'une façon parfois dangereuse, en dehors des domaines de la physique.

Cette interprétation de la mécanique ondulatoire, bien différente, je le rappellerai, de celle que j'avais envisagée au début de mes recherches, est due principalement à MM. Born, Bohr et Heisenberg dont les brillants travaux sont d'ailleurs dignes de la plus grande admiration. Elle a été assez rapidement adoptée par presque tous les théoriciens malgré les réserves expresses que faisaient à son sujet des esprits aussi éminents que MM. Einstein et Schrödinger et les objections qu'ils lui opposaient. Personnellement, après avoir proposé une interprétation tout à fait différente, je me suis rallié à celle qui devenait « orthodoxe » et je l'ai enseignée pendant de longues années. Mais depuis ~~environ trois ans~~, à la suite notamment de tentatives faites par de jeunes physiciens, MM. Bohm et Vigier, je me suis à nouveau demandé si après tout ma première orientation en face du problème si ardu posé par le dualisme onde-corpuscule n'était pas la bonne. Sans entrer dans des discussions mathématiques que l'on trouvera ailleurs ~~(1)~~, je voudrais résumer quelle avait été

trouvé

quelques années

(1) On pourra lire à ce sujet un opuscule que j'ai publié avec M. Vigier sous le titre : *La physique quantique restera-t-elle indéterministe ?* (Gauthier-Villars, 1953), ainsi que deux notes complémentaires importantes (*Comptes rendus Ac. Sciences*, t. 236, p. 1453 et t. 237, p. 441). Je compte pouvoir publier prochainement un ouvrage d'ensemble sur ce sujet chez l'éditeur Gauthier-Villars.

ma pensée originelle sur ce sujet et de quelle manière j'ai pu, dans ces dernières années, la reprendre et la développer.

Dans mes premiers travaux sur la mécanique ondulatoire, qui remontent à 1923, j'avais clairement aperçu qu'il fallait, d'une façon générale, associer la propagation d'une onde au mouvement de tout corpuscule; mais l'onde continue, du type de celles qui sont classiques en optique, que j'avais été amené à considérer et qui est devenue l'onde Ψ de la mécanique ondulatoire usuelle, ne me paraissait pas décrire exactement la réalité physique : seule, sa *phase*, directement reliée au mouvement du corpuscule, me semblait avoir une signification profonde et c'est pourquoi j'avais d'abord nommé l'onde que j'associais au corpuscule « l'onde de phase », dénomination aujourd'hui bien oubliée, mais qui dans mon esprit avait sa raison d'être. Pourquoi avais-je ainsi attaché beaucoup plus d'importance à la phase de cette onde qu'à son amplitude? Il y avait à cela deux raisons. La première était que ma découverte reposait essentiellement sur une analyse, faite suivant les conceptions relativistes, du rapport qui existe entre la fréquence d'une horloge et la fréquence d'une onde. J'avais remarqué que ces deux sortes de fréquences ne se transformaient pas de même lors d'une transformation de Lorentz et que, pour cette raison, si une horloge se déplace au sein d'une onde en propagation, elle ne peut rester en phase avec cette onde que si elle a un mouvement parfaitement déterminé. Si l'on conçoit le corpuscule comme une sorte d'horloge qui doit rester en phase avec une onde qui l'environne, l'accord des phases implique une relation bien définie entre la propagation de l'onde et le mouvement du corpuscule. Appliquant cette idée au cas le plus simple, j'avais reconnu qu'à la propagation d'une onde plane monochromatique doit être associé le mouvement rectiligne et uniforme du corpuscule et, en m'inspirant, pour introduire la constante h , de la théorie des quanta de lumière (photons) d'Einstein, j'étais parvenu aux relations fondamentales

$$W = h\nu \qquad \lambda = \frac{h}{p}$$

reliant l'énergie W et la quantité de mouvement p du corpuscule à la fréquence ν et à la longueur d'onde λ de l'onde associée. Ces relations que j'avais généralisées de diverses façons et dont j'avais tiré des conséquences intéressantes, sont restées à la base de la mécanique ondulatoire et ont été brillamment vérifiées par la découverte de la diffraction des électrons. Mais comme elles ne faisaient intervenir, pour les relier au mouvement du corpuscule, que des

éléments provenant de la phase de l'onde, j'attribuais à cette phase beaucoup plus d'importance qu'à l'amplitude de l'onde.

C'est qu'en effet, et c'est là la deuxième raison à laquelle je faisais allusion plus haut, l'amplitude continue des ondes que je considérais, en particulier l'amplitude constante des ondes planes monochromatiques, ne me paraissait pas avoir une signification physique aussi nette que la phase. Ne donnant aucune prérogative particulière à aucun point de l'espace, elle n'était pas susceptible de représenter la position du corpuscule : tout au plus, pouvait-on supposer, comme on le fit bientôt, qu'elle donnait par son carré la « probabilité de présence » du corpuscule en chaque point. Mais cette idée ne me donnait pas entière satisfaction et je rêvais d'un phénomène ondulatoire global donnant, dans le cadre de l'espace et du temps, une description unitaire du dualisme onde-corpuscule.

Cependant, les idées que j'avais semées ayant germé, les travaux d'autres savants tels que MM. Schrödinger et Born, influencés aussi par la mécanique quantique de M. Heisenberg, faisaient faire de grands progrès à la mécanique ondulatoire. Et il devenait de jour en jour plus évident que l'onde Ψ avec son amplitude continue ne pouvait servir qu'à des prévisions statistiques : ainsi s'orientait-on peu à peu et presque inévitablement vers cette interprétation « purement probabiliste » dont MM. Born, Bohr et Heisenberg furent les principaux promoteurs et qui a triomphé depuis lors. Étonné de cette évolution qui ne me paraissait conforme ni à la mission « explicative » de la physique théorique, ni à mes intuitions primitives, j'ai été amené à penser, vers 1925-1927, qu'il y avait lieu de considérer dans tout problème de mécanique ondulatoire deux solutions couplées de l'équation des ondes : l'une, l'onde Ψ , dont la phase peut être interprétée physiquement, mais qui, en raison du caractère continu de son amplitude, n'a qu'une signification statistique et subjective; l'autre, que je nommais l'onde u , ayant même phase que l'onde Ψ , mais dont l'amplitude présenterait autour d'un point de l'espace de très hautes valeurs (je disais alors qu'elle présentait une singularité mathématique en un point de l'espace) et qui, précisément en raison de cet accident local, serait susceptible de décrire objectivement le corpuscule. J'obtenais ainsi ce qu'il m'avait toujours semblé nécessaire de chercher : une image du corpuscule où celui-ci apparaît comme le centre d'un phénomène ondulatoire étendu auquel il est intimement incorporé. Et, grâce au parallélisme que postulait ma théorie entre l'onde u réalité objective et l'onde Ψ construction de notre esprit, il me semblait possible de justifier les propriétés de prévision statistique que l'on venait à juste titre d'attribuer à l'onde Ψ .

Telle est l'idée qui avait germé dans mon esprit à cette époque et dont la curieuse subtilité m'étonne encore moi-même aujourd'hui. Je l'avais appelée du nom suggestif de « théorie de la double solution » et je l'avais exposée dans un article paru dans le *Journal de physique*, en mai 1927 (1) : elle représentait dans toute sa complexité ma véritable pensée. Mais, pour la commodité de l'exposé et pour éviter d'avoir à donner des justifications mathématiques difficiles, je lui avais donné (notamment dans mon exposé au Conseil de physique Solvay d'octobre 1927) une forme simplifiée, que je crois aujourd'hui beaucoup moins profonde. Dans cette forme, que j'avais appelée la théorie de l'onde pilote, je considérais le corpuscule comme une réalité physique donnée *a priori*, qui serait guidé, piloté, par la phase de l'onde Ψ . Cette manière de présenter mes conceptions avait l'inconvénient, que ne présentait pas la théorie primitive de la double solution, de faire guider le corpuscule, considéré comme une réalité objective, par une onde Ψ dont je reconnaissais déjà, comme tous les autres théoriciens, le caractère statistique et subjectif. C'était là, je le reconnus vite, un point de vue inacceptable. Découragé par l'accueil peu favorable fait à mes conceptions par la plupart des physiciens théoriciens que séduisaient l'élégance formelle et l'apparente rigueur de l'interprétation probabiliste, je me suis ensuite rallié pendant de longues années à cette interprétation et c'est seulement depuis 1951 que je me suis à nouveau demandé si, au fond, ma première orientation n'était pas la meilleure.

Dans mon mémoire de 1927, j'avais montré que, si la fonction d'onde u présente une région extrêmement petite où elle atteint des valeurs très élevées, ce qui a lieu par exemple autour d'une singularité ponctuelle, le fait même que l'onde u obéit à la même équation d'ondes que l'onde Ψ entraîne que cette région singulière se déplacera au cours du temps en suivant l'une des lignes de courant envisagée par l'image hydrodynamique de l'onde Ψ . La formule qui, dans ma théorie, donnait, la vitesse, en chaque point de sa trajectoire, du corpuscule identifié à cette région singulière prenait, quand on pouvait négliger les corrections de relativité, la forme simple suivante :

$$\vec{v} = - \frac{1}{m} \vec{\text{grad}} \varphi$$

v et m étant la vitesse et la masse du corpuscule, φ la phase de l'onde u définie en posant $u = f e^{\frac{2\pi i}{h} \varphi}$ avec f et φ réels. Comme par hypo-

(1) On trouvera la reproduction de cet article dans le fascicule mentionné plus haut en note.

thèse la phase ϕ devait être la même pour l'onde Ψ et pour l'onde u , la formule précédente que j'ai nommée « formule de guidage » permettait aussi de considérer le corpuscule comme guidé par son onde Ψ . mais, je l'ai dit, ce point de vue n'était pas réellement satisfaisant,

La formule du guidage m'avait permis de montrer que le corpuscule se trouvait ainsi obéir à une dynamique où intervenait, à côté des forces du type classique, une force quantique dérivant d'un « potentiel quantique » et traduisant la réaction sur le corpuscule (au sens étroit du mot) du phénomène ondulatoire étendu auquel il se trouvait *incorporé* en tant que région singulière. Pour cette raison, le corpuscule n'était pas soumis uniquement, comme en mécanique classique, aux seules forces qui s'exercent sur lui le long de sa trajectoire sans subir aucune répercussion de la présence d'obstacles qui pourraient se trouver au loin en dehors de sa trajectoire : dans ma conception, le mouvement du corpuscule incorporé à l'onde u devait subir en outre, par l'intermédiaire du potentiel quantique, l'influence de tous les obstacles susceptibles d'entraver la libre propagation du phénomène ondulatoire étendu dont il était solidaire et j'apercevais dans cette circonstance une explication possible des phénomènes d'interférences et de diffraction.

Le postulat affirmant l'identité des phases des ondes u et Ψ m'avait permis de montrer, sous réserve peut-être d'une justification plus rigoureuse, que l'intensité de l'onde Ψ (exprimée par la quantité $|\Psi|^2$) devait mesurer la probabilité de trouver le corpuscule en un point de l'espace à un instant donné quand on ignore laquelle des trajectoires définies par la formule du guidage est effectivement suivie par le corpuscule (cette ignorance étant d'ailleurs, semble-t-il, imposée, en raison de l'existence du quantum d'action, par la nature même des observations que nous pouvons faire).

J'avais aussi, dans mon mémoire de 1927, tenté de donner une explication du succès incontestable obtenu par la mécanique ondulatoire des systèmes de corpuscules dans l'espace de configuration développé par M. Schrödinger. A mon point de vue, chaque corpuscule du système devait être représenté comme une sorte de singularité incorporée dans un phénomène ondulatoire étendu se propageant dans l'espace physique à trois dimensions : l'espace fictif de configuration étant formé à l'aide des coordonnées, ici bien définies à chaque instant, des diverses singularités, l'onde Ψ de la théorie de M. Schrödinger serait seulement une représentation, dans cet espace fictif, de la probabilité de localisation des corpuscules dans l'espace physique.

Toutes ces questions effleurées dans mon mémoire de 1927, je les ai à nouveau étudiées depuis ~~trois ans~~ en m'inspirant d'ailleurs

guidage et

par moments de certains résultats dus à MM. Bohm et Vigier. Plusieurs de mes résultats de 1927 ont pu ainsi être précisés ou améliorés et l'extension de l'idée de double solution au cas des fonctions d'onde u et Ψ à plusieurs composantes, telles que celles que l'on est amené à considérer dans la mécanique ondulatoire de l'électron à spin de M. Dirac, peut se faire sans grandes difficultés nouvelles.

Malheureusement, il existe d'autres difficultés d'une nature bien plus grave qui avaient beaucoup contribué, il y a vingt-cinq ans, à me décourager de continuer dans cette voie. Avant d'étudier ces difficultés et les raisons qui, aujourd'hui, me font espérer qu'elles ne sont peut-être pas insurmontables, je dois d'abord exposer une idée nouvelle que j'ai introduite depuis trois ans dans la théorie de la double solution et dont l'importance me paraît maintenant capitale : celle que l'équation des ondes u est, en principe, non linéaire et qu'elle est, par suite, différente de l'équation linéaire admise pour l'onde Ψ , bien que ces deux équations puissent être considérées comme étant presque partout dans l'espace pratiquement identiques.

* * *

L'idée d'attribuer à l'onde u une équation non linéaire m'a été suggérée par l'analogie existant entre la conception du guidage d'un corpuscule par l'onde environnante et les résultats de MM. Georges Darmon et Einstein au sujet du mouvement d'une particule en relativité généralisée.

En relativité généralisée, les coefficients $g_{\mu\nu}$ de la métrique d'espace temps obéissent à des équations non linéaires (même dans le cas du vide) et il en est de même des quantités $\gamma_{\mu\nu} = g_{\mu\nu} - g_{\mu\nu}^{(n)}$, différences entre les $g_{\mu\nu}$ et leurs valeurs constantes galiléennes $g_{\mu\nu}^{(n)}$. Néanmoins, mises à part de très petites régions singulières de l'espace-temps où les $\gamma_{\mu\nu}$ prendraient de très grandes valeurs et qui constitueraient dans les vues de M. Einstein les tubes d'univers des corpuscules, les $\gamma_{\mu\nu}$ obéissent approximativement à des équations linéaires. M. Einstein et ses élèves (1), retrouvant un résultat aperçu antérieurement par M. Georges Darmon (2), ont montré que les régions singulières doivent se déplacer dans l'espace au cours du temps de telle façon que le tube d'univers très délié représentant leur mouvement coïncide

(1) EINSTEIN et GROMMER. — *Sitz. Preuss. Akad. Wiss.*, t. 1, 1929; *Infeld Rev. Mod. Phys.*, t. 24, 1949, p. 408.

(2) G. DARMON. — Les équations de la gravitation einsteinienne (*Mémoires des Sciences mathématiques*). Gauthier-Villars, Paris, 1927.

avec une géodésique du champ extérieur. Ce résultat est très remarquable parce qu'il permet de déduire directement des équations du champ elles-mêmes le mouvement des corpuscules sans avoir à introduire comme postulat supplémentaire (comme on le fait dans les exposés usuels de la relativité généralisée) le fait que la ligne d'univers d'une particule est une géodésique de l'espace-temps. Assurément, les raisonnements de MM. Darmais et Einstein portent uniquement sur le champ de gravitation (et même sur le champ de gravitation non quantifié, sans gravitons), mais il est dans la ligne d'idées d'Einstein de penser que les fonctions d'ondes u relatives aux diverses sortes de corpuscules viendront un jour trouver leur place dans le cadre de la structure d'un espace-temps convenablement généralisé. Il apparaît dès lors probable que ces « champs » u , comme le champ des $g_{\mu\nu}$, devraient obéir à des équations non linéaires.

Cherchons donc à introduire de la non-linéarité dans la théorie de la double solution. Bien entendu l'équation des ondes Ψ , simples représentations fictives de probabilité, doit rester linéaire car le principe de superposition, conséquence nécessaire de la signification statistique du Ψ , doit être satisfait et implique la linéarité. L'équation de l'onde Ψ est celle que l'on connaît bien en mécanique ondulatoire usuelle. La théorie de la double solution suppose que, sauf dans une région très petite constituant le « corpuscule » au sens étroit du mot, l'onde u obéit à la même équation linéaire que l'onde Ψ . Mais ceci n'empêche pas d'admettre que la véritable équation d'ondes de u soit une équation non linéaire, les termes non linéaires n'ayant une influence sensible que dans une très petite région de l'espace, en général mobile, où les valeurs de u deviendraient très grandes. En dehors de cette petite région singulière et peut-être aussi du bord des trains d'ondes où les dérivées de u peuvent devenir très grandes, les termes non linéaires seraient assez petits pour que l'onde u puisse obéir très approximativement à la même équation linéaire que l'onde Ψ .

Einstein a beaucoup insisté sur une propriété importante des équations non linéaires. Si les équations d'un certain champ sont linéaires, on peut toujours trouver une solution à singularité de ces équations telle que la singularité ait un mouvement prescrit à l'avance. On pourra d'ailleurs ajouter à la solution à singularité une solution continue et cette adjonction n'aura aucune influence sur le mouvement de la singularité. Il n'en est plus du tout de même si les équations du champ sont non linéaires car on ne peut plus alors obtenir une solution en ajoutant plusieurs solutions : la non-linéarité crée une sorte de solidarité entre des solutions qui auraient

été indépendantes si l'approximation linéaire avait été valable partout (1).

Appliquons cette remarque à la théorie de la double solution. Nous supposons que l'onde u obéit à une équation qui est non linéaire dans la très petite région singulière, mais qui se réduit sensiblement en dehors à l'équation linéaire de la mécanique ondulatoire. A l'extérieur de la région singulière, on peut trouver (2) une solution u_0 qui a une valeur très faible en dehors de la région singulière, mais qui croît très rapidement au voisinage de cette région et qui comporterait une singularité mathématique dans cette région si l'équation linéaire y restait valable. On peut aussi trouver une solution continue v de même phase qui est du type usuel en mécanique ondulatoire. On aura donc à l'extérieur de la région singulière une solution de la forme $u = u_0 + v$. Cette solution se prolongera dans la région singulière non linéaire, mais la décomposition de u en u_0 et v n'aura plus aucun sens et il est vraisemblable, conformément aux vues de M. Einstein, que la fonction u ne devra présenter aucune véritable singularité mathématique dans la région singulière. Seulement, la non-linéarité régnant dans cette région aura pour effet de rendre solidaires à l'extérieur les deux ondes u_0 et v qui seraient indépendantes si la linéarité régnait partout. Ainsi peut s'expliquer comment la région singulière définie par les grandes valeurs de u peut sembler être guidée par l'onde v et suivre ses lignes de courant. Ce guidage, exprimé par la formule du guidage, a pour effet que l'onde u dans la région singulière reste toujours en phase avec l'onde v environnante. Nous retrouvons ici, en assimilant la région singulière au corpuscule, l'image qui m'avait guidé au début de mes recherches : la très petite région singulière, constituant le corpuscule et assimilée à une horloge, se déplacerait au sein de l'onde v dont elle est intimement solidaire, de façon à rester constamment en phase avec elle.

Nous obtenons ainsi une image de l'onde u qui est beaucoup plus précise que celle que j'avais envisagée il y a vingt-cinq ans. Elle

(1) Dans mon mémoire de 1927, j'admettais la linéarité de l'équation des ondes et je considérais deux solutions, l'une régulière, l'autre singulière, ayant la même phase. Ce dernier postulat était purement arbitraire puisqu'en principe deux solutions d'une équation linéaire sont totalement indépendantes. Au contraire, si l'équation des ondes est localement non linéaire, les solutions ne sont plus indépendantes et l'on peut comprendre l'origine de l'égalité des phases. Ainsi, dans mon raisonnement de 1927, l'hypothèse d'une non linéarité était sans doute dissimulée derrière le postulat de l'égalité des phases.

(2) Cette solution existe certainement dans le cas de l'absence de champ et aussi dans d'autres cas récemment étudiés par M. Petiau.

peut être décrite comme comportant une « base » étendue qui est l'onde ν , solution de l'équation linéaire usuelle de la mécanique ondulatoire, au sein de laquelle se trouve greffée une sorte d'aiguille extrêmement fine constituée par les valeurs élevées de u dans la région singulière. Cette aiguille, soudée sur sa base par la non-linéarité, court au sein de l'onde ν de façon à rester toujours en phase avec elle. De plus, comme l'onde Ψ solution de l'équation linéaire est une construction de notre esprit, nous pouvons la définir comme partout proportionnelle à ν et poser $\Psi = C\nu$. Comme l'onde u , et par suite l'onde ν qui coïncide avec u à l'extérieur de la région singulière, est une réalité objective, elle doit avoir une valeur bien déterminée. Au contraire, nous sommes libre de « normer » l'onde Ψ comme nous le voulons de façon que le carré de son module puisse jouer le rôle de probabilité de présence que tout le monde lui reconnaît. Ceci se fera par un choix convenable de la constante C . Ainsi est bien marquée la différence entre l'onde u qui décrit une réalité objective et l'onde Ψ représentation subjective de probabilités. De cette analyse, l'idée primitive de la double solution sort confirmée, mais considérablement précisée et affinée.

Nous allons maintenant montrer qu'avec cet ensemble d'images, on peut lever deux difficultés très importantes qui semblaient barrer la route au développement de mes conceptions de 1927.

La première de ces difficultés provient des succès remportés par la méthode usuellement employée en mécanique ondulatoire pour le calcul des états stationnaires d'un système quantifié (calcul des valeurs propres de l'énergie). Ce calcul s'effectue, depuis les mémorables travaux de M. Schrödinger, en 1926, en déterminant les solutions (fonctions propres) de l'équation linéaire des ondes Ψ qui sont uniformes et continues et satisfont aux conditions aux limites correspondant au problème envisagé. Les résultats ainsi obtenus pour les énergies quantifiées sont certainement exacts. Comment ceci est-il possible si l'onde Ψ n'est qu'une fiction et si la véritable onde est l'onde u qui, précisément, n'obéit jamais aux conditions imposées aux fonctions propres, puisque ou bien elle comporte une singularité (c'était mon ancienne hypothèse de 1927) ou bien elle n'obéit pas partout à l'équation linéaire usuelle (c'est mon hypothèse actuelle)? Mais, ce que nous avons dit sur la structure de l'onde u nous permet maintenant d'apercevoir tout de suite la solution de la difficulté. L'onde ν qui forme la base de l'onde u étant proportionnelle à l'onde Ψ , ses formes stationnaires seront celles que calcule la mécanique ondulatoire usuelle et la région singulière qui est incorporée en un point de l'onde ν sera, pour une forme stationnaire de ν , le siège d'un phénomène ondulatoire dont la fréquence

est égale à la fréquence propre du calcul habituel. Il semble que la difficulté soit ainsi entièrement levée.

Une autre difficulté qui m'avait complètement arrêté, il y a vingt-cinq ans, paraît aussi pouvoir être écartée de la même façon. Elle est relative au mouvement du corpuscule dans les phénomènes d'interférences et peut s'exposer d'une manière particulièrement frappante sur l'exemple de l'expérience bien connue des trous d'Young. Je rappelle d'abord que l'inscription des phénomènes d'interférences ou de diffraction, par exemple sur une plaque photographique, résulte, l'expérience le prouve, de l'arrivée successive sur la plaque photographique des corpuscules incidents (photons dans le cas de la lumière). L'intensité de l'onde (le $|\Psi|^2$ de la mécanique ondulatoire) doit donc être interprétée comme mesurant la probabilité de localisation du corpuscule en chaque point; là où l'intensité est grande, il y a une forte probabilité pour l'arrivée d'un photon; là où elle est faible ou nulle, il y a une probabilité faible ou nulle pour cette arrivée. Ainsi se trouve justifié, mais d'une façon tout à fait différente de la façon ancienne, le procédé employé par l'optique classique pour le calcul des franges brillantes ou obscures. Mais ce qui reste essentiel dans cette interprétation, c'est que l'on puisse raisonner comme en optique classique pour le calcul des intensités, c'est-à-dire que l'on puisse employer des ondes continues du même type que les ondes Ψ .

Voici alors la grosse difficulté que j'apercevais naguère en réfléchissant à l'expérience des trous d'Young. Dans cette expérience, on envoie une onde lumineuse dans la direction normale sur un écran percé de deux petites ouvertures circulaires. Dans le calcul classique en optique, on calcule l'onde à la sortie de l'écran en considérant les deux trous d'Young comme jouant le rôle de deux petites sources cohérentes de même intensité. On démontre alors aisément qu'au voisinage de l'axe de symétrie et loin de l'écran, les surfaces d'égale phase sont des ellipsoïdes et que les surfaces d'égale amplitude sont des hyperboloïdes orthogonaux à ces ellipsoïdes. On en déduit la position des franges approximativement rectilignes qui sont observables sur une plaque placée parallèlement à l'écran dans la région d'interférences. Mais, du point de vue de la théorie de la double solution, nous devons, pour décrire véritablement la réalité objective, remplacer l'onde continue classique par une onde u à région singulière. Alors, pour que la région singulière arrivant sur l'écran pénètre dans l'espace situé au-delà de celui-ci, elle devra avoir passé par l'un des trous d'Young et les deux trous paraissent alors ne plus jouer du tout, comme dans le calcul classique, des rôles symétriques. Je croyais à cette époque que l'onde u , se réduisant au

la même loi d'interférence
que dans l'expérience
des trous d'Young.

terme u_0 , devait diminuer très rapidement d'amplitude quand on s'éloignait de la région singulière et qu'elle devait tomber à de très faibles valeurs dès que l'on était à des distances macroscopiques de celle-ci : il me semblait donc impossible que les deux trous puissent jouer le rôle de deux petites sources symétriques et toute la base du calcul classique me paraissait s'effondrer, ce qui constituait une grave difficulté puisque ce calcul donne des résultats exacts et semble même seul capable de les donner.

Mais la nouvelle conception des ondes u va nous permettre d'écarter cet obstacle, l'un des plus redoutables qui paraissaient barrer la route à la théorie de la double solution. Avec cette nouvelle conception, nous devons nous représenter l'onde u incidente, non pas comme étroitement concentrée autour de la région singulière, mais comme comportant une région singulière implantée sur une onde v plane monochromatique, de même forme mathématique que l'onde lumineuse classique. Dire que le photon traverse l'écran d'Young veut alors dire, conformément au simple bon sens, que la région singulière passe par l'un des trous d'Young; mais cette région singulière a des dimensions si petites (probablement inférieures à 10^{-13} cm.) que, même au moment où elle traverse l'un des trous, elle n'occupe qu'une fraction infime de sa surface dont le diamètre est d'un ordre de grandeur macroscopique. On peut donc considérer que sur toute la surface des deux trous l'onde u coïncide pratiquement avec l'onde v , c'est-à-dire avec l'onde lumineuse classique. L'onde qui interfère est donc exactement proportionnelle à celle considérée dans l'explication classique avec cette seule différence que nous lui adjoignons un accident local de dimensions extraordinairement petites, la région singulière ou corpuscule (ici photon), qui court dans son sein avec la vitesse prescrite par la formule du guidage. Et ce mouvement du corpuscule a pour conséquence que la probabilité de son arrivée en un point de l'écran où s'inscrivent les franges est proportionnelle au carré de l'amplitude de l'onde classique, ce qui nous permet de retrouver le calcul traditionnel des franges malgré le caractère localement singulier de l'onde u (1).

Th. de la physique

(1) On peut même considérer l'expérience des trous d'Young comme apportant une preuve directe de la non linéarité de l'équation de propagation de l'onde u . En effet, v se propage comme l'onde lumineuse classique, mais, si l'équation de u était linéaire, la propagation de u_0 , qui donne le mouvement du corpuscule, serait *indépendante* de la propagation de v et ne pourrait pas être influencée par l'existence du deuxième trou d'Young. Seule la non-linéarité de l'équation de u peut avoir pour conséquence de lier la propagation de u_0 à celle de v . C'est parce qu'en 1927

La théorie de la double solution a encore d'autres difficultés à affronter : elles concernent notamment l'étalement des trains d'ondes et la division des trains d'ondes par un miroir semi-transparent ou par l'effet d'une collision s'accompagnant de ce qu'on nomme dans l'interprétation usuelle « la réduction du paquet de probabilité ».

Disons quelques mots de la première de ces difficultés. Dans la théorie usuelle de la propagation des ondes qui repose sur des équations linéaires, les trains d'ondes, en se propageant, s'étalent dans l'espace et corrélativement leur amplitude va en s'affaiblissant. L'étude mathématique de cet étalement montre qu'il est lié au fait que, dans la théorie *linéaire* des ondes, les trains d'ondes sont représentés par des superpositions d'ondes planes monochromatiques : ces ondes planes se propagent indépendamment les unes des autres en se déphasant entre elles et il en résulte l'étalement et l'affaiblissement progressifs du train d'ondes. On peut dire que l'indépendance des composantes monochromatiques du train d'ondes amène peu à peu sa désorganisation. Au point de vue de la théorie de la double solution, il semble en résulter une conséquence très difficile à admettre physiquement : en effet, à l'extérieur de la région singulière, l'onde u doit se réduire à l'onde v qui obéit sensiblement à l'équation de propagation linéaire de la mécanique ondulatoire; si donc l'on considère une région singulière implantée sur un train d'ondes v , la partie extérieure v de l'onde u devrait s'étaler en s'affaiblissant et l'onde u devrait tendre à se réduire à sa partie en aiguille. En langage imagé, ceci signifierait que le corpuscule devrait perdre progressivement son onde. Peut-être cette idée n'est-elle pas à rejeter : elle me paraît cependant difficilement acceptable dans une théorie qui cherche à donner une image objective du corpuscule et qui doit rendre compte de sa permanence. Ici encore la non-linéarité pourrait peut-être nous tirer d'embarras. L'équation de l'onde u étant supposée non linéaire, cette non-linéarité doit en principe exister partout, même dans le domaine extérieur à la région singulière, domaine où les termes non linéaires sont généralement peu sensibles. Dans la région singulière, la non-linéarité est prépondérante et doit avoir pour effet de souder fortement ensemble les termes u_0 et v , ce qui devrait avoir pour résultat d'empêcher le corpuscule de perdre son onde. De plus, la non-linéarité, peu sensible dans le corps du train d'ondes, peut réapparaître sur leurs bords où les dérivées de u

je n'introduisais pas la non-linéarité que l'expérience des trous d'Young me paraissait être pour la théorie de la double solution un obstacle insurmontable.

peuvent prendre de grandes valeurs : il y a là aussi une circonstance qui peut s'opposer à l'étalement des trains d'ondes. Il apparaît donc qu'une théorie non linéaire des ondes u pourrait permettre d'obtenir des « groupes d'ondes sans étalement » représentant par exemple un corpuscule qui se déplacerait d'un mouvement rectiligne et uniforme sans perdre son onde, c'est-à-dire avec permanence du phénomène ondulatoire environnant. Des considérations que nous ne pouvons reproduire ici permettent de penser que l'existence de tels groupes d'ondes serait compatible avec la validité des relations d'incertitude d'Heisenberg.

Des difficultés plus grandes encore se présentent quand on étudie par exemple la division d'un train d'ondes par un miroir semi-transparent ou par un processus de collision. Le train d'ondes u se divisant en plusieurs tronçons et la région singulière devant finalement se trouver implantée sur l'un de ces tronçons, la répétition consécutive de plusieurs processus de cet ordre semblerait encore avoir pour effet que le corpuscule perdrait peu à peu son onde : le passage à travers des écrans absorbants conduit à la même difficulté. On se trouve là, je le crois, en présence des objections les plus graves que l'on puisse faire à la théorie que j'expose ici. Des considérations de non-linéarité permettraient-elles encore de les surmonter et d'imaginer une sorte de régénération des trains d'ondes affaiblis? J'ai examiné la question, ainsi que d'autres problèmes difficiles relatifs à la conservation de l'énergie et aux états stationnaires des systèmes quantifiés, à la fin de l'ouvrage que j'ai l'intention de publier. J'ai cru apercevoir une possibilité de régénération des trains d'ondes provenant toujours de la non-linéarité, mais mes conclusions reposent, je l'avoue, sur des bases très fragiles et toute démonstration précise est actuellement impossible. Ce qui malheureusement rend présentement impossible une étude précise des conséquences de la non-linéarité de la propagation des ondes u , c'est que nous ne connaissons pas la forme des termes non linéaires à introduire dans les équations de propagation : nous savons seulement que ces équations doivent se réduire presque partout dans l'espace aux équations linéaires de la mécanique ondulatoire usuelle. Les équations non linéaires complètes ne pourraient, semble-t-il, être fournies que par une nouvelle théorie de la relativité « supergénéralisée » qui ferait rentrer toutes les catégories de champs u dans la structure même de l'espace-temps.

* * *

En résumé, la physique atomique contemporaine ne me paraît aucunement être arrivée à comprendre la véritable nature du dua-

lisme onde-corpuscule qui est liée à l'existence du mystérieux quantum d'action : elle s'est bornée à cacher son ignorance sous le mot un peu vague de « complémentarité ».

La théorie de la double solution, si l'on parvenait à la développer entièrement en l'appuyant sur des raisonnements solides, nous donnerait au contraire une image claire et satisfaisante du dualisme onde-corpuscule et, tout en respectant l'ensemble des résultats bien vérifiés de l'interprétation probabiliste actuelle, ferait comprendre les véritables causes de son succès. Elle montrerait, suivant l'affirmation maintes fois répétée par M. Einstein, que la théorie actuelle est une théorie statistique parfaitement exacte, mais qu'elle n'est pas une description *complète* de la réalité physique. Si, au prix d'un effort qui serait certainement long et difficile, on parvenait à étendre la relativité généralisée de façon à faire rentrer les ondes u des diverses sortes de particules dans le cadre de l'espace-temps, on pourrait établir la forme des équations non linéaires satisfaites par les ondes u , étudier ce qui se passe dans les régions singulières et parvenir à comprendre la véritable nature de ces accidents spatio-temporels qui sont les corpuscules et aussi la signification profonde du quantum d'action qui est certainement lié d'une façon essentielle à la structure à la fois granulaire et ondulatoire de la matière et du rayonnement. On obtiendrait ainsi (ce n'est pas encore pour demain!) une magnifique synthèse des conceptions de la relativité généralisée et de la théorie des quanta.

Nous avons vu que dans la théorie des ondes u , comme d'ailleurs dans l'interprétation relativiste de la gravitation, la non-linéarité des équations de base doit jouer un rôle essentiel et seule pouvoir expliquer la solidarité de l'onde et du corpuscule. Nous sommes actuellement arrivé à l'image suivante. Un train d'ondes u , constituant un corpuscule au sens *large* du mot, serait une sorte d'unité étendue et organisée, un peu analogue à une « cellule » dans l'acception biologique du terme. Il comprendrait en effet essentiellement les trois parties suivantes : 1° une sorte de *noyau*, la région singulière, le corpuscule au sens *étroit* du mot, siège de phénomènes essentiellement non linéaires; 2° une région environnante étendue, siège d'un phénomène sensiblement linéaire; 3° une enveloppe constituant les bords du train d'ondes où la non-linéarité jouerait peut-être à nouveau un rôle important. Or, ce me semble être l'intervention des phénomènes non linéaires qui donnerait à cette « cellule » son unité, sa solidarité et sa permanence.

S'il est vrai que la non-linéarité soit la véritable clef de la microphysique corpusculaire, on comprend aisément pourquoi la physique quantique actuelle n'est pas parvenue à décrire le dualisme onde-

corpuscule et a dû se contenter d'une description uniquement statistique et probabiliste des phénomènes de l'échelle atomique. Prenant *a priori* pour bases des équations linéaires et ne sortant pas du domaine de l'analyse linéaire, la théorie actuelle fait disparaître les accidents locaux dus à la non linéarité (tels que les régions singulières et éventuellement les bords abrupts de trains d'ondes), elle efface ainsi les structures corpusculaires et, incapable de saisir la véritable relation entre onde et corpuscule, elle ne peut plus aboutir qu'à des images continues à caractère statistique. Si cependant, par l'emploi de l'onde Ψ , elle parvient à une image statistique adéquate et à des prévisions exactes, ceci est dû, suivant ma manière de voir, au fait que la partie régulière de l'onde u , à l'extérieur des régions singulières, est étroitement apparentée, par sa forme analytique, à la forme usuelle admise pour l'onde Ψ .

L'un des avantages de la théorie de la double solution serait qu'elle pourrait nous permettre de parvenir à une description et à une classification des diverses sortes de particules : la découverte incessante de nouveaux types de mésons et d'hypérons rend une semblable tâche de plus en plus urgente. Or, la théorie actuelle ne paraît pas pouvoir nous fournir une véritable description des particules parce qu'elle n'a à sa disposition pour le faire que l'onde Ψ à caractère statistique et les formalismes abstraits et également statistiques de la seconde quantification et de la théorie quantique des champs. On ne peut pas décrire complètement les individus quand on ne possède sur eux que des renseignements statistiques.

Et maintenant, concluons. Il se peut que j'aie tort de vouloir revenir à des conceptions plus claires que celles qui prévalent actuellement en physique théorique. Mais je voudrais que l'on examine avec soin si ces chemins que l'on a abandonnés depuis vingt-cinq ans, parce qu'on les considérait comme aboutissant à des impasses, ne seraient pas au contraire ceux qui pourraient déboucher vers la véritable microphysique de l'avenir.
