

Les ondes de la mécanique ondulatoire

par

Louis de BROGLIE

*Prix Nobel de Physique
Secrétaire perpétuel de l'Académie des Sciences
Membre de l'Académie Française*

Extrait de

**SCIENCE PROGRES
DECOUVERTE**

Revue mensuelle

DUNOD, Éditeur

**92, rue Bonaparte,
PARIS-6^e**

C. C. P. Paris 75-45 - Tél. 326. 99-15

N° 3432

— Avril 1971

LES ONDES DE LA MECANIQUE ONDULATOIRE

Vous savez qu'un de vos amis vient d'arriver dans la ville où vous habitez et vous le rencontrez par hasard au coin d'une rue. Est-ce à dire qu'il était répandu dans toute la cité et qu'il s'est brutalement condensé au carrefour où vous l'avez vu ? Etonnante question ! Mais elle résume le débat dont, près d'un demi-siècle après avoir vu le jour, la Mécanique Ondulatoire est toujours l'objet.

EN 1900, Max Planck introduit les quanta dans la physique pour rendre compte des lois du rayonnement noir. Il admet que les atomes d'un corps incandescent émettent l'énergie radiante de fréquence ν sous la

forme de quanta $h\nu$ où h est la célèbre constante de Planck, mais il recule devant la conséquence que l'énergie du rayonnement émis contient des concentrations d'énergie de valeur $h\nu$. En 1905, Albert Einstein admet cette constitution granulaire de l'énergie radiante et, introduisant ainsi ce que nous nommons aujourd'hui les « photons », il explique l'existence de l'effet photoélectrique jusque-là restée mystérieuse, puis d'autres phénomènes comme les fluctuations d'énergie dans le rayonnement noir. Dans l'effet photoélectrique, on voit en quelque sorte l'énergie lumineuse arriver sur une cellule photoélectrique sous forme de grains où l'énergie incidente est concentrée.

Quelle était alors la conception que se faisait Einstein de cette structure granulaire de l'énergie radiante transportée par une onde électromagnétique ?

Il admettait, semble-t-il, que l'onde électromagnétique des théories classiques de Maxwell et de Lorentz était une sorte d'onde « fantôme » de très faible énergie dont le rôle essentiel était de « guider » le mouvement de grosses concentrations d'énergie constituées par les photons.

En 1913, Niels Bohr développe sa théorie quantique de l'atome qui a permis de comprendre un grand nombre de phénomènes physiques jusque-là inexplicables, comme par exemple la structure complexe des spectres optiques et des spectres de rayons X. Un des points remarquables de cette théorie était que le mouvement des électrons dans l'atome était soumis à des conditions de quantification où interviennent des nombres entiers, et cette circonstance qui se présente constamment en théorie des ondes dans l'étude des interférences

Louis de Broglie est licencié ès lettres (histoire) et docteur ès sciences. De 1928 à 1962, il est professeur à la faculté des sciences de Paris. Prix Nobel de physique en 1929 pour sa découverte de la Mécanique Ondulatoire, il entre à l'Académie des sciences en 1933 et en devient secrétaire perpétuel en 1942. Membre de l'Académie française en 1944, il fait partie de nombreuses académies et sociétés scientifiques étrangères. Il est l'auteur de livres de haute vulgarisation et de nombreuses autres publications.

et des ondes stationnaires m'avait beaucoup frappé parce qu'elle me paraissait indiquer un lien étroit entre le mouvement d'une particule et la propagation d'une onde.

La coexistence de l'onde et de la particule

Attiré dès l'âge de dix-neuf ans par le problème que posait l'intervention inattendue des quanta en physique, je n'ai pu poursuivre mes réflexions sur ce sujet qu'après la fin de la guerre de 1914. Convaincu que l'intervention des nombres entiers dans la théorie de l'atome de Bohr indiquait l'existence d'une onde associée au mouvement des électrons, je suis parvenu dans l'automne de 1923, après quelques travaux préliminaires, à poser les bases d'une nouvelle théorie générale, la mécanique ondulatoire, qui fit ensuite l'objet de ma thèse de Doctorat en 1924 (1). L'idée essentielle en fut d'étendre à toutes les particules, et notamment aux électrons, la coexistence des ondes et des particules découverte par Einstein dans le cas de la lumière. Pour moi, comme cela avait été certainement l'idée d'Einstein, il s'agissait non pas d'une vague et peu compréhensible « dualité », mais d'une véritable *coexistence* de l'onde et de la particule, toutes deux présentes dans l'espace physique et intimement liées l'une à l'autre. Ce qui m'a permis d'aboutir à cette synthèse, c'est la grande connaissance que j'avais acquise de la théorie de la relativité due également à Einstein dont j'avais approfondi les principes, notamment en suivant les beaux cours de Paul Langevin au Collège de France.

Le point de départ de mes réflexions, complètement méconnu à l'heure actuelle, fut de remarquer la différence qui existe entre la transformation relativiste de la fréquence d'une onde et celle de la fréquence d'une horloge. Reprenant l'image d'une onde qui guide le mouvement d'une grosse concentration d'énergie, je supposais que la particule analogue à une horloge possède une vibration périodique interne et qu'incorporée dans l'onde, elle se déplace de façon à rester constamment en phase avec l'onde. Cette idée m'avait amené par un calcul simple à attribuer à la particule un mouvement défini par la

propagation de l'onde et à en conclure qu'une particule transportée par une onde plane monochromatique de longueur d'onde λ possède une quantité de mouvement $p = \frac{h}{\lambda}$. Ces idées m'ont amené alors à interpréter le mouvement des électrons dans l'atome de Bohr d'une façon intéressante, mais qui s'est montrée ensuite n'être qu'approximativement valable. Cela m'indiquait cependant que j'étais sur la bonne voie et m'amenait à trouver un certain nombre d'autres résultats intéressants. C'est ainsi que j'ai pu apercevoir une importante conséquence de la formule $p = \frac{h}{\lambda}$ qui est la suivante : le principe de moindre action de Maupertuis qui est fondamental en mécanique classique n'est, à l'approximation de l'optique géomé-

trique, que la traduction du principe de Fermat, ce qui établit à cette approximation la coïncidence des trajectoires de la particule avec les rayons de l'onde.

Mon travail ne tarda pas à être remarqué. Dès janvier 1925, dans une Note aux Comptes rendus de l'Académie des Sciences de Berlin, Einstein attirait l'attention sur l'importance de ma thèse et, au printemps de 1926, Schrödinger écrivait explicitement l'équation de propagation de l'onde associée à l'électron, rendait ainsi plus rigoureuse l'application de mes idées à l'atome de Bohr et l'étendait à un certain nombre d'autres problèmes. Mais, comme je le préciserai plus loin, les très beaux travaux de Schrödinger ont contribué à faire abandonner les idées qui m'avaient primitivement guidé et, sans doute, à fausser ainsi toute l'interprétation de la mécanique ondulatoire.

Vers le microscope électronique

Dès la soutenance de ma thèse, j'avais signalé, en réponse à une question de Jean Perrin, que, si mes idées étaient exactes, l'on devait pouvoir obtenir avec des électrons des phénomènes analogues à la diffraction et aux interférences de la lumière. Au début de 1927, deux physiciens américains Davisson et Germer qui travaillaient au laboratoire Bell de New York ont découvert le phénomène de la diffraction des électrons par les cristaux et ont pu ainsi vérifier l'exactitude de la formule $p = \frac{h}{\lambda}$. G.P. Thomson en Angleterre obtint bientôt des résultats analogues par une autre méthode et Maurice Ponte en France étendit les résultats obtenus au cas des électrons de très grande vitesse où il faut faire intervenir les corrections relativistes. On a pu ensuite obtenir des phénomènes de diffraction avec d'autres particules (protons, neutrons...) et, plus récemment, d'habiles expérimentateurs tels que Möllenstedt, Fert et Faget ont pu répéter avec des élec-

trons toutes les expériences d'interférences depuis longtemps classiques en optique.

La diffraction des électrons a aujourd'hui d'innombrables applications scientifiques ou techniques dans l'étude des structures de la matière. La microscopie électronique, dont les principes ont découlé des conceptions de la mécanique ondulatoire, permet à l'heure actuelle, grâce aux travaux de M. Dupouy et de ses collaborateurs, d'obtenir d'un objet ayant un millième de millimètre de longueur une image longue de dix centimètres et ces prodigieux grossissements ont, eux aussi, de très nombreuses applications, notamment en biologie et en microbiologie. Or, au moment de ma thèse, uniquement préoccupé de préciser la coexistence des ondes et des particules, je n'avais ni prévu ni recherché de telles applications. Et cela prouve, chose qu'il convient de ne jamais oublier, que les recherches les plus désintéressées de la science pure peuvent avoir très rapidement de très vastes applications dans le domaine pratique.

Débat autour de la fonction d'onde

Pendant les années 1926-27, l'évolution des idées concernant la mécanique ondulatoire a pris une tournure qui m'a très vite inquiété. En effet, dans ses travaux mentionnés plus haut, Schrödinger avait désigné l'onde associée à l'électron, dont il empruntait la concep-

tion à mes travaux par le nom d'onde ψ , mais il considérait cette onde, à laquelle il désirait garder un caractère de réalité physique, comme une solution sans singularité des équations de propagation dont il venait de préciser la forme. Or, une telle onde régulière ne comporte

aucun élément qui puisse représenter une particule localisée et l'on perdait ainsi la notion même d'une particule incorporée à l'onde. De plus, en introduisant pour les ensembles de particules en interaction l'emploi exclusif de la méthode de l'espace de configuration empruntée à la mécanique classique, il perdait en réalité la représentation des phénomènes dans l'espace physique : je reviendrai plus loin sur cette très importante question. Max Born a ensuite interprété la fonction d'onde ψ employée par Schrödinger comme une simple représentation de probabilité dont l'amplitude doit pour cette raison être normée à l'unité. Mais imposer à une onde une amplitude arbitrairement normée, c'est évidemment lui enlever le caractère d'une véritable onde physique. On arrivait ainsi à la conclusion paradoxale que la mécanique ondulatoire, initialement fondée sur l'idée d'une coexistence physique des ondes et des particules par généralisation à toutes les particules de la théorie des photons d'Einstein, aboutissait à une théorie qui avait perdu à la fois la notion de particule, petit objet bien localisé dans l'espace à chaque instant, et la notion d'onde, processus physique se propageant dans l'espace au cours du temps.

En résumé, tandis que mes idées se trouvaient entièrement confirmées par l'expérience, une interprétation entièrement différente du double aspect corpusculaire et ondulatoire de la lumière et de la matière se développait, par une sorte de glissement progressif, grâce aux travaux d'Erwin Schrödinger, de Max Born et surtout de l'illustre Niels Bohr et des jeunes théoriciens de l'École de Copenhague qui l'entouraient. Et cette interprétation dépouillait, pourrait-on dire, les notions d'onde et de particule de toute leur substance. C'est un point sur lequel il nous paraît important d'insister.

Commençons par la notion d'onde. L'idée classique claire et intelligible que nous avons d'une onde, c'est qu'elle est un processus physique qui évolue dans l'espace au cours du temps suivant une certaine équation de propagation. Naturellement, une telle onde a en chaque point et à chaque instant une amplitude bien déterminée et nous n'avons aucunement le droit d'imposer à cette amplitude une valeur arbitrairement choisie. Or, dans l'interprétation actuellement orthodoxe de la mécanique ondulatoire, la fonction d'onde ψ n'est qu'une solution de l'équation des ondes (équation de Schrödinger dans le cas

le plus simple) dont la seule signification est de représenter la probabilité des résultats des diverses mesures que l'on peut effectuer sur la particule et, pour qu'elle puisse jouer ce rôle, on fixe arbitrairement son amplitude par le procédé nommé « normalisation ». L'onde ψ ainsi définie n'a plus rien d'une véritable onde physique et ses propriétés soulèvent d'inquiétants paradoxes. D'abord cette onde apparaît comme déterminant des phénomènes physiques tels qu'interférences, diffraction, énergies des états stationnaires d'un système quantifié, etc. Or, comment une simple représentation de probabilités, qui a forcément un caractère subjectif, pourrait-elle déterminer des phénomènes observables, comme si une table de mortalité pouvait être la cause des décès individuels ? Par quelle étrange coïncidence une simple représentation de probabilités pourrait-elle se propager dans l'espace au cours du temps comme une onde physique susceptible de se réfléchir, de se réfracter, de se diffracter ? A vrai dire, l'onde ψ , comme elle est conçue par la mécanique quantique telle qu'on l'enseigne actuellement, a un caractère hybride, à la fois objectif et subjectif, qui rend la conception qu'on en a très suspecte. Mais passons maintenant à la particule. Par définition, une particule est un petit objet constamment localisé dans l'espace. Or, depuis les travaux anciens de Max

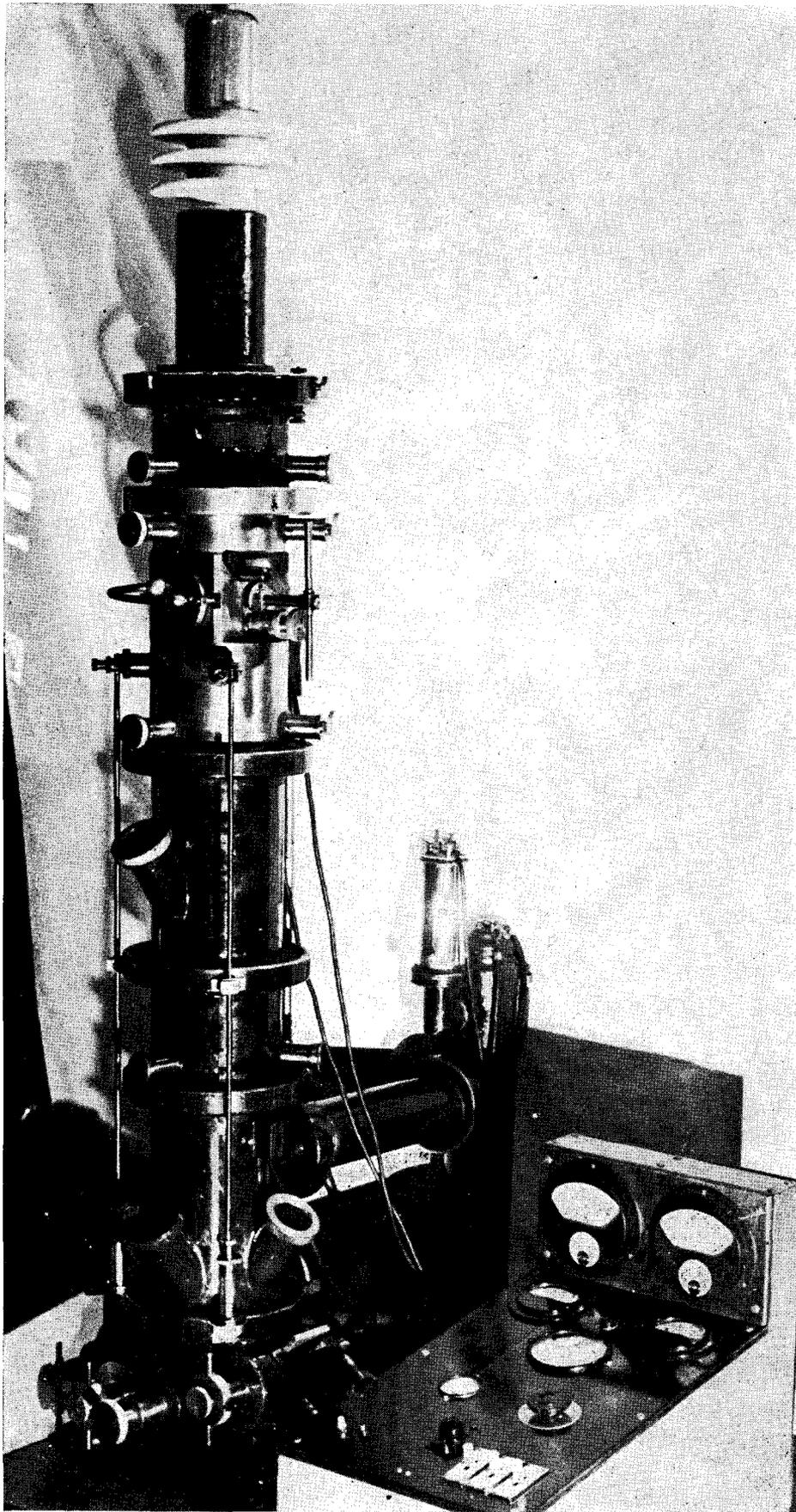
Born, on admet que la particule est présente « à l'état potentiel » dans toute l'étendue de son onde. S'il fallait entendre cette affirmation comme exprimant seulement que la particule est à chaque instant présente en un point de l'espace physique qui nous est inconnu et que, par suite, nous ne pouvons définir qu'une probabilité de sa présence en un point, cela ne soulèverait aucune difficulté. Mais on admet que, tant qu'elle ne nous a pas manifesté sa localisation en un point, elle est en quelque sorte virtuellement présente dans toute l'étendue de l'onde. Une telle conception me paraît bien peu compréhensible. Comment pourrait-on concevoir qu'un photon, dont les dimensions ne peuvent être que très inférieures à celles d'un atome où il peut se localiser, puisse se trouver répandu dans tout un train d'ondes lumineuses dont l'étendue est de l'ordre du mètre ? Comment imaginer que l'énergie relativement considérable transportée par une particule puisse se condenser brusquement dans une région très petite, par exemple quand un photon arrivant sur une petite cellule photoélectrique y provoque l'éjection d'un électron ? Une conception, qui n'admet que le concept de l'onde ψ homogène et d'ailleurs fictive, puisque normée, sans aucune concentration locale d'énergie, ne peut vraiment pas rendre compte d'un tel phénomène.

La théorie de la double solution

Ainsi, en 1926-27, je voyais se développer les formalismes de plus en plus abstraits de la mécanique quantique correspondant à une interprétation de la mécanique ondulatoire tout à fait différente de celle que j'avais dans l'esprit à l'époque où j'en avais eu la première idée. Comme je l'ai déjà dit, je pensais alors qu'il y avait une véritable coexistence dans la réalité physique de l'onde et de la particule étroitement liées l'une à l'autre, l'onde et la particule étant définies de la façon habituelle que j'ai rappelée plus haut. Je fus donc amené à cette époque à faire d'abord dans de courtes notes, puis dans un article du *Journal de Physique* de mai 1927 (2), un effort, qui était certainement encore bien insuffisant, pour obtenir une représentation de ce genre. Je vais maintenant en rappeler les points essentiels.

La première chose que j'avais à faire était de restituer à l'onde son caractère physique concret que ne possédait plus

l'onde ψ telle qu'on commençait à la concevoir. Il me fallait toutefois expliquer le fait étrange que cette onde ψ , visiblement fictive, se propageait comme une onde réelle. J'eus alors l'idée subtile qu'il fallait distinguer deux ondes, toutes deux solutions de l'équation d'ondes de la mécanique ondulatoire et par suite se propageant de la même façon dont l'une, que j'appellerai l'onde ν , serait une onde physique réelle ayant une amplitude bien déterminée et dont l'autre, l'onde ψ usuelle, serait *calquée* sur l'onde ν par la relation $\psi = C\nu$ où C serait le coefficient de normalisation. Cette normalisation de l'onde ψ , tout en lui conservant les propriétés de propagation d'une onde physique, lui enlèverait le caractère de réalité concrète de l'onde ν . Ainsi se trouverait écarté le paradoxe d'une représentation de probabilité qui déterminerait des phénomènes physiques puisque ceux-ci seraient en réalité déterminés par l'onde phy-



Des conceptions de la Mécanique Ondulatoire ont découlé les principes de la microscopie électronique. C'est à Toulouse, en 1942, qu'a été fabriqué par Gaston Dupouy et ses collaborateurs le premier microscope électronique français. (Photo Laboratoire d'optique électronique du CNRS).

sique ν et non par l'onde ψ , arbitrairement calquée sur l'onde ν de façon à représenter des probabilités. A l'heure actuelle, cette hypothèse à laquelle j'avais donné le nom de « théorie de la double solution », me paraît toujours la seule qui puisse permettre de comprendre pourquoi l'onde ψ usuelle a été tour à tour considérée comme objective ou comme subjective suivant qu'on considère ses propriétés de propagation qui semblent déterminer des phénomènes observables ou son caractère de simple représentation de probabilités.

Une particule guidée

Mais il me fallait encore expliquer l'existence de la particule au sein de l'onde en compliquant l'image que fournissait cette théorie de la double solution telle que je viens de l'exposer, car il était à mes yeux indispensable de rétablir la localisation de la particule dans l'onde. Pour cela, j'imaginai que la véritable onde physique, tout en coïncidant presque partout avec l'onde ν supposée avoir une très faible amplitude, en différait cependant dans une très petite région de l'espace où elle aurait une très forte amplitude locale, région qui constituerait précisément la particule ainsi incorporée dans l'onde. Pour retrouver alors l'idée fondamentale que la particule douée d'une vibration interne doit se déplacer dans l'onde de façon à rester constamment en phase avec elle, la théorie de la double solution conduit dans le cas général d'une onde de forme quelconque à attribuer à la particule une trajectoire définie mathématiquement comme étant une ligne orthogonale aux surfaces d'égale phase de l'onde ν . Quand l'approximation de l'optique géométrique est valable, on retrouve la coïncidence de la trajectoire de la particule avec l'un des rayons de l'onde. Le mouvement de la particule dans l'onde est traduit par une formule dite « formule du guidage » qui précise de quelle façon le mouvement de la particule est guidé par la propagation de l'onde. L'analyse de cette dynamique de la particule guidée par l'onde montre que tout se passe comme si la particule était soumise à une force que l'onde exercerait sur elle et qui s'exprimerait à l'aide d'un certain « potentiel quantique » dont la théorie fournit l'expression. L'on parvient ainsi, comme le montre un calcul simple, à apercevoir pourquoi, comme Max Born l'avait jadis découvert, la probabilité de la

présence de la particule au point de coordonnées x, y, z à l'instant t est donnée par le carré du module $|\psi(x, y, z, t)|^2$ de la fonction ψ . Néanmoins, la justification complète de cette affirmation exige l'introduction d'un élément aléatoire qui n'existait pas dans la théorie de la double solution sous sa forme primitive, ainsi que nous l'expliquerons plus loin.

Apparition de la mécanique quantique

C'est après avoir esquissé cette théorie que je fus amené à participer au Conseil Solvay de physique tenu à Bruxelles en octobre 1927, qui devait étudier la nouvelle mécanique. J'y exposai, d'ailleurs assez mal, ma théorie du guidage, mais je me heurtai à une forte opposition. Niels Bohr, Max Born et leurs jeunes collaborateurs de l'École de Copenhague (Pauli, Heisenberg, Dirac) contestèrent mes idées et exposèrent, en adoptant les idées assez floues de la théorie de la complémentarité de Bohr, les calculs très précis de ce que l'on a appelé depuis « la mécanique quantique », théorie où la fonction ψ est seule utilisée et où on la considère comme un simple instrument de calcul mathématique. Cependant, au cours de la discussion, Einstein fit une courte intervention pour m'encourager dans la voie où je voulais m'engager.

Dans les années qui suivirent, la mécanique quantique, sous la forme abstraite qu'on lui avait donnée, a pu, bientôt complétée par l'introduction du spin en théorie de Dirac, obtenir un très grand nombre de prévisions exactes et rendre ainsi à la physique théorique de remarquables et incontestables services. La plupart des théoriciens s'y sont ralliés bien qu'Einstein et même Schrödinger aient continué à signaler les inquiétants paradoxes auxquels selon eux elle conduisait.

En présence des succès remportés par les formalismes de la mécanique quantique, j'ai alors abandonné, à tort sans doute, ma tentative d'interprétation de la mécanique ondulatoire qui n'était encore que très imparfaite et dont les développements précis en termes mathématiques m'apparaissaient comme très difficiles. Appelé à ce moment à assurer des enseignements, j'ai dès lors exposé la mécanique quantique et ses applications à la manière devenue « orthodoxe »

et dans des livres de vulgarisation j'ai exposé les idées de l'École de Copenhague. Cependant, peu disposé à l'abstraction, j'ai toujours présenté les

questions que j'enseignais d'une façon assez concrète, plus proche des conceptions de l'ancienne physique que celles qu'employaient les autres théoriciens.

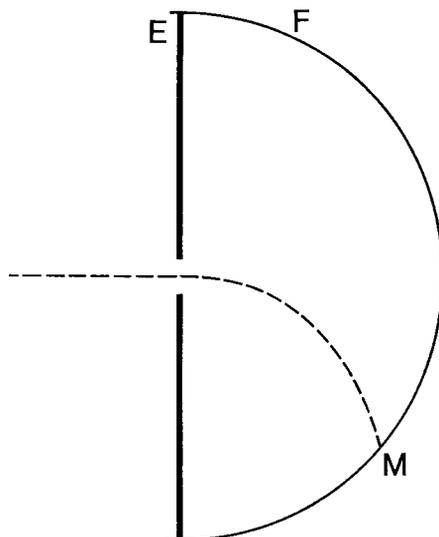
L'objection d'Einstein

A partir de 1931, une réaction s'est produite dans mon esprit. J'étais rebuté par le caractère de plus en plus abstrait des formalismes orthodoxes et, en particulier, de ce que l'on nomme « la théorie quantique des champs ». J'ai repris alors l'examen des critiques faites notamment par Einstein et par Schrödinger montrant certaines conséquences paradoxales des idées généralement admises et j'ai été frappé par la force de leurs objections. Je voudrais en signaler ici quelques-unes.

Voici d'abord l'objection développée par Einstein au Conseil Solvay de 1927 à laquelle j'ai déjà fait allusion plus haut. Il considérait une onde transportant une particule qui tombe sur un écran plan E percé d'un trou assez petit pour que l'onde, après avoir passé par ce trou, s'épanouisse en onde sphérique par un effet de diffraction. Derrière l'écran E se trouve placé un film hémisphérique F où l'arrivée d'une particule peut se manifester par un effet localisé tel qu'impression photographique, scintillation, etc.

Si, à un certain moment, la particule manifeste, par un effet observable, son arrivée au point M du film F, la probabilité de son arrivée en un point du film F autre que M, qui jusque-là était donnée par le carré de l'amplitude de l'onde en ce point, devient instantanément nulle. Einstein considérait cette conclusion comme physiquement inacceptable et d'ailleurs en contradiction avec la théorie de la relativité car elle implique une sorte de transfert instantané d'information à distance. Il terminait son intervention en disant : « A mon avis, on ne peut lever cette objection que de cette façon qu'on ne décrive pas seulement le processus par l'onde de Schrödinger, mais qu'en même temps on localise la particule pendant la propagation » et, faisant allusion à la théorie du guidage que je venais d'exposer devant le Conseil, il terminait en disant : « Je crois que M. de Broglie a raison de chercher dans cette direction ». Personnellement, je pense aujourd'hui que l'objection d'Einstein a gardé toute sa valeur et qu'elle n'a jamais été sérieusement réfutée. Pour mieux en faire saisir la portée, je vais y ajouter un commentaire.

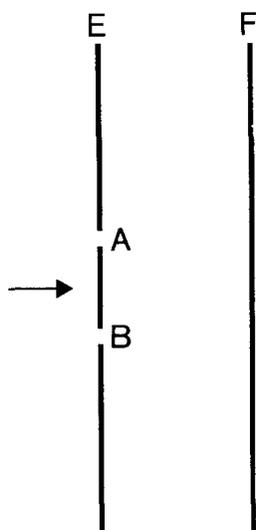
Si l'onde ψ de la mécanique quantique était uniquement une représentation de probabilité, il n'y aurait aucun paradoxe dans le fait que l'onde « s'évanouisse partout sur la surface de l'écran hémisphérique dès l'instant où la particule aurait manifesté sa présence au point M. Mais, comme je l'ai déjà fait remarquer, pour la théorie orthodoxe, l'onde ψ possède aussi un certain caractère objectif et l'on admet que la particule y est partout « potentiellement » présente. De ce point de vue, la manifestation de la présence de la particule en M doit être considérée comme une brusque « condensation » de la particule jusque-là « répandue » dans toute l'onde et c'est cela qui paraît bien être inadmissible comme Einstein avec sa pénétrante intuition l'avait clairement aperçu. Nous pouvons préciser ce point à l'aide d'une comparaison un peu triviale. Supposons que je sais qu'un de mes amis est actuellement à Paris, mais j'ignore l'endroit où il est et, s'il se déplace, je ne connais pas la route qu'il suit. En me promenant j'arrive place de la Concorde et j'y rencontre mon ami. Naturellement, je vais en conclure qu'il se déplaçait dans Paris et que le chemin qu'il a suivi l'a amené place de la Concorde en même temps que moi. Si, au lieu de dire cela, je disais : « Mon ami était répandu dans tout Paris et c'est au moment où j'arrivais place de



la Concorde qu'il s'y est brusquement condensé», on me considérerait avec raison comme fou. C'est cependant ce que disent ceux qui pensent que, dans l'exemple d'Einstein, la particule répandue dans toute l'étendue de l'onde hémisphérique limitée par l'écran F se condense brusquement au point M au moment où elle y manifeste sa présence.

Une particule peut-elle passer à la fois par deux trous ?

Comme autre exemple, considérons maintenant l'interprétation par la théorie actuellement admise de l'expérience des trous d'Young depuis longtemps classique en optique et aujourd'hui réalisable avec des électrons. Une onde transportant une particule tombe normalement sur un écran plane E percé de deux trous voisins A et B suffisamment petits pour qu'à la sortie des trous l'onde s'épanouisse par diffraction sous formes d'ondes sphériques qui viennent de superposer dans une région où l'on place un film F susceptible d'enregistrer l'arrivée d'une particule par un effet observable. La théorie des interférences permet de calculer la position sur le film F des régions où la particule a une plus ou moins grande probabilité de manifester sa présence. Quand un grand nombre de particules seront arrivées sur le film, elles se seront réparties à sa surface suivant les probabilités ainsi calculées, ce qui permettra de prévoir la position et la forme de ce que l'on



nomme en optique franges brillantes et franges noires. Mais si l'on admet que l'onde n'est qu'une représentation de probabilités, le seul fait de supposer que la particule a passé par le trou A nous oblige à considérer l'onde comme nulle sur le trou B et alors il ne pourrait y avoir interférence entre une onde provenant du trou A et une onde provenant du trou B. Comme l'existence réelle des interférences ne fait aucun doute, on a été amené à affirmer que la particule passe à la fois par les trous A et B où elle est, nous dit-on, potentiellement présente. C'est là une conception qui paraît bien étrange, surtout si l'on se souvient que la seule définition claire d'une particule est d'être un petit objet bien localisé dans l'espace à chaque instant et transportant une forte concentration d'énergie.

En adoptant les idées de la théorie de la double solution, on peut éviter une conclusion aussi paradoxale. En effet, on doit alors distinguer l'onde ν ,

phénomène réel dont la propagation guide le mouvement de la particule, et l'onde ψ qui est construite d'après la forme de l'onde ν , mais qui n'est qu'une onde fictive, simple représentation subjective de probabilités. L'onde réelle ν passe par les deux trous d'Young et interfère dans la région où se trouve le film F. La particule, qui passe par un des deux trous A et B sans que nous sachions lequel, est guidée derrière l'écran par la superposition des deux ondes provenant des deux trous et il en résulte que la probabilité qu'elle a d'arriver en un point M du film en y produisant un effet observable est donnée par le carré de l'amplitude de l'onde fictive ψ au point M. Ainsi se trouve écartée l'in vraisemblable affirmation que chaque particule passe à la fois par les deux trous A et B, et c'est la distinction introduite par la théorie de la double solution entre les deux ondes ν et ψ qui permet d'obtenir une image acceptable du phénomène.

Le rôle d'une théorie statistique

Bien d'autres objections, dont on trouvera de nombreux exemples dans les ouvrages cités dans la bibliographie, peuvent être faites aux affirmations de la théorie orthodoxe. C'est ainsi qu'Einstein et ses collaborateurs, et également d'ailleurs Schrödinger, ont montré que l'interprétation actuelle des formalismes quantiques conduit à prévoir certaines corrélations entre des mesures effectuées entre des systèmes entièrement séparés et éloignés dans l'espace qui leur ont paru, à juste titre me semble-t-il, comme tout à fait inadmissibles. Je n'exposerai pas ici cette question qui est assez compliquée, mais il me paraît certain que ces corrélations n'existent pas réellement et il est possible que l'expérience puisse prouver qu'il en est bien ainsi. Je signalerai encore les difficultés soulevées par la théorie des « cas purs » et des « mélanges » qui est classique en mécanique quantique depuis les travaux de von Neumann. Tout récemment, dans un beau travail, M. Andrade e Silva est parvenu à faire disparaître ces difficultés en introduisant des distinctions très fines que seul le rétablissement de la localisation de la particule dans l'onde rendait possibles.

Naturellement, le fait de rejeter certaines conceptions de la mécanique quantique actuelle n'empêche pas que

les formalismes de cette théorie ont souvent conduit à des prévisions très exactes et très utiles. Comment cela est-il possible ? C'est, me semble-t-il, parce qu'une théorie statistique peut être exacte dans ses prévisions, et par suite très utile, sans pour cela fournir une image exacte de la réalité. Par exemple, considérons une table de mortalité qui pour une région à une époque donnée nous indique l'espérance de vie qu'ont, aux différents âges, les habitants de cette région. Cette table pourra fournir des indications très exactes et très utiles aux actuaires qui s'occupent d'assurances sur la vie ou de rentes viagères. Mais le décès des individus est dû à de multiples causes telles que maladies, accidents, vieillesse, etc. et de cela la table de mortalité ne nous fournit aucune représentation. Elle nous fournit des renseignements exacts sur des faits observables, mais ne nous donne aucune description détaillée de la véritable nature de ces faits.

Remarquons encore ceci. En théorie de la double solution, les grandeurs dynamiques relatives à une particule, par exemple son énergie ou sa quantité de mouvement, sont définies à partir de la phase de l'onde ν réelle qui la guide. Mais comme d'après la relation $\psi = C\nu$ qui définit l'onde statistique, celle-ci a

que je m'étais trompé sur la nature de ce que j'avais découvert parce que je voulais considérer des solutions à singularité alors qu'il fallait se borner à considérer les solutions sans singularité de ces équations (ce qui, comme je l'ai dit, ne permet plus de maintenir l'idée de la particule localisée dans l'onde). Et l'on pouvait effectivement se demander si de telles solutions à singularité existaient et se déplaçaient dans l'onde au cours du temps selon la loi du guidage. Or, dans ces dernières années, généralisant des calculs déjà effectués par M. Francis Fer dans sa thèse de Doctorat, M. Mumm Thiounn a montré que toutes les équations d'ondes que l'on admet pour les particules du genre électron ou photon possèdent des singularités ponctuelles mobiles dont le mouvement au cours du temps est précisément celui qu'indique la théorie de la double solution (13). Certes la représentation des particules par des singularités ponctuelles n'est qu'une première approximation, et il est certain que les particules possèdent une structure interne que cette approximation ne décrit pas. Mais les résultats que je viens d'indiquer montrent l'intérêt des solutions à singularité que la théorie de la double solution considère comme fournissant une première image approximative de la coexistence des ondes et des particules dont les solutions sans singularités usuellement employées ne fournissent qu'un aspect statistique.

Une thermodynamique cachée

Je voudrais encore insister sur un autre point. La théorie du guidage de a particule par son onde permet de comprendre, comme je l'ai déjà dit, pourquoi la probabilité de la présence de la particule en un certain point à un certain instant est donnée par le carré de l'amplitude de la fonction normée (soit, si l'on écrit $\psi = a e^{i\phi}$ par $|\psi|^2 = a^2$). Mais, en réalité, la théorie du guidage ne suffit pas pour prouver rigoureusement ce fait bien établi et mes réflexions à ce sujet m'ont conduit à penser qu'il était nécessaire d'introduire l'hypothèse suivante : en plus du mouvement de guidage régulier qui est imposé à la particule par la propagation de l'onde, la particule doit être en plus animée d'un mouvement aléatoire qui a pour effet de superposer au mouvement régulier de guidage une agitation aléatoire analogue à un mouvement

brownien. On est alors amené à penser que toute particule est en contact permanent avec une sorte de thermostat caché qui échange continuellement avec elle de l'énergie sous forme de chaleur. Ce thermostat caché peut être identifié avec le « milieu subquantique » dont MM. Bohm et Vigier avaient suggéré l'existence dans un article de 1954 (14). Développant cette idée qui avait déjà antérieurement traversé mon esprit, j'ai été amené à partir de 1960 à compléter ma théorie de la double solution

en introduisant une « thermodynamique cachée des particules ». Cela m'a conduit à toute une série de résultats qui m'ont paru très intéressants et dont je ne veux indiquer que le suivant : « Le principe de moindre action qui est à la base de la mécanique classique ne serait qu'un aspect du second principe de la thermodynamique ». Je ne puis insister davantage ici sur ces questions dont on peut trouver des exposés plus étendus dans les publications qui sont citées dans la bibliographie (8, 9 et 10).

Un espace construit sur des coordonnées qui n'existent pas

Je vais maintenant faire un certain nombre de remarques critiques au sujet des méthodes actuellement utilisées en microphysique théorique. Je me bornerai à les énoncer assez rapidement sans leur donner tous les développements dont elles seraient susceptibles.

Depuis les travaux de Schrödinger en 1926, l'on admet que pour traiter les problèmes où interviennent plusieurs particules, il faut envisager la propagation d'une onde ψ non pas dans l'espace physique, mais dans un espace abstrait formé à l'aide des coordonnées de l'ensemble des particules (en principe les $3N$ coordonnées des N particules). C'est là ce qu'on nomme l'espace de configuration. L'emploi de cet espace ne soulève aucune difficulté en mécanique classique où les points matériels supposés bien localisés dans l'espace physique ont à chaque instant des coordonnées bien définies et où les variations de ces coordonnées au cours du temps déterminent complètement l'évolution du système. Mais les succès des prévisions obtenues en mécanique ondulatoire par la méthode de l'espace de configuration a fait oublier, me semble-t-il, ce qu'elle présente de paradoxal. En effet, comment peut-on admettre que la seule représentation possible de l'évolution d'un ensemble de particules doit se faire dans un espace visiblement fictif comme l'espace de configuration ? Et, si l'on admet avec

l'interprétation actuellement admise de la mécanique quantique que les particules ne sont pas constamment localisées dans l'espace, comment peut-on envisager, même abstraitement, l'emploi d'un espace construit sur l'ensemble de leurs coordonnées puisqu'en somme l'on admet que ces coordonnées n'existent pas ? Depuis plusieurs années, j'ai poursuivi avec la collaboration très efficace de M. Andrade e Silva l'étude de la véritable signification de la méthode de calcul introduite naguère par Schrödinger pour les systèmes de particules (5 et 11). Nous sommes ainsi arrivés à la conclusion suivante : il existe une certaine correspondance entre, d'une part, la propagation des ondes et le mouvement des particules dans l'espace physique et, d'autre part, l'image abstraite fournie par la méthode de l'espace de configuration. Nous poursuivons l'étude de ce difficile problème et je pense que nous arriverons également bientôt à interpréter la nécessité bien connue de symétriser la fonction d'onde de l'espace de configuration dans le cas des bosons et d'antisymétriser cette fonction d'onde dans le cas des fermions. Il est même possible qu'en tenant compte de la limite de validité des représentations dans l'espace de configuration, on arrive à éviter certaines conclusions paradoxales des théories actuelles. Mais je ne puis insister sur ces questions dont l'étude exige encore beaucoup de réflexion.

Une collision peut-elle avoir ni commencement ni fin ?

Un autre point sur lequel il me paraît utile d'insister est le fait que les théoriciens de la mécanique quantique consi-

dèrent souvent des ondes rigoureusement planes et monochromatiques. Or, il ne me paraît pas douteux que, dans une

théorie des ondes physiquement acceptable, l'onde rigoureusement plane et monochromatique n'a pas d'existence réelle car elle aurait une durée dans le temps et une extension dans l'espace toutes deux infinies, ce qui n'est pas concevable. En réalité, nous avons toujours affaire à des trains d'ondes dont l'émission a un commencement et une fin, et nous savons très bien qu'un tel train d'ondes a toujours une largeur spectrale $\delta\nu$ approximativement égale à l'inverse de sa durée d'émission τ de sorte qu'il n'est jamais strictement monochromatique. Critiquant la manière dont on traite en mécanique quantique la collision de deux particules en représentant leur état initial par des ondes rigoureusement planes et monochromatiques, Schrödinger a depuis longtemps fait très finement observer qu'une telle collision n'aurait ni commencement, ni fin.

La considération exclusive des ondes planes monochromatiques a d'ailleurs conduit à une conception qui me paraît erronée. Si l'on considère une grandeur qui peut être représentée, à la manière de Fourier, par une superposition de composantes monochromatiques, c'est la superposition qui a un sens physique et non pas les composantes de Fourier considérées isolément. Si, par exemple, nous avons affaire à une corde vibrante dont le mouvement peut être représenté par une superposition d'harmoniques, la cinématographie de ce mouvement nous montrera qu'à chaque instant la corde a une forme très compliquée variant sans cesse au cours du temps. Rien dans le mouvement observé ne permet de distinguer les diverses composantes monochromatiques; ces composantes n'existent que dans l'esprit du théoricien qui cherche à faire une analyse abstraite de ce mouvement, et elles ne prennent une existence physique que si l'on parvient à les isoler par une opération qui évidemment détruit la superposition. D'ailleurs toute la théorie des interférences serait inexacte s'il n'en était pas ainsi. L'idée que les composantes monochromatiques ont une existence réelle dans le processus physique qui résulte de leur superposition me paraît une idée fautive qui vicie une partie des raisonnements théoriques que l'on emploie actuellement en physique quantique. En théorie de la double solution, une particule portée par une onde qui résulte de la superposition de plusieurs composantes de Fourier a un mouvement de guidage qui est déterminé par cette superposition et non par

les différentes composantes de Fourier considérées isolément. Il en résulte un nouvel aspect de la mesure des grandeurs liées à la particule qui a fait récemment l'objet des recherches de M. Andrade e Silva, mais sur lequel je ne puis insister ici.

Une abstraction extrême...

Pour terminer, je voudrais encore dire quelques mots au sujet de la « théorie quantique des champs » qui a réussi, il y a une vingtaine d'années, à fournir une explication de quelques remarquables résultats expérimentaux et qui a connu ensuite une grande vogue. Dans sa forme la plus claire, la théorie quantique des champs fait intervenir les particules, les photons dans le cas de la lumière, en introduisant la notion de « nombre d'occupation ». Le nombre d'occupation d'une onde plane monochromatique est en somme le nombre de particules qu'elle transporte. On remarquera que cette définition est très claire si l'on admet qu'une onde transporte un nombre, naturellement entier, de particules localisées, mais qu'elle devient très obscure si l'on ne veut pas admettre l'image des particules localisées. Abandonnant ensuite ce qui restait de physique dans la conception antérieure de l'onde ψ , la théorie quantique des champs pousse l'abstraction jusqu'à considérer l'amplitude d'une onde monochromatique non plus comme un grandeur numérique, mais comme un « opérateur » opérant dans l'espace abstrait et discontinu des nombres d'occupation. Les propriétés de ces opérations permettent de rendre compte de l'apparition et de la disparition des particules au niveau microphysique, phénomène que notre point de vue conduirait plutôt à considérer comme des passages de particules du milieu sub-quantique où elles seraient ensevelies au niveau microphysique ou inversement. L'extrême abstraction des formalismes de la théorie quantique des champs rend vraiment presque impossible de penser qu'elle fournisse une véritable représentation de la réalité physique. Malgré ses succès et la faveur dont elle jouit auprès des théoriciens, il me paraît certain que la théorie quantique des champs sera un jour remplacée par une représentation plus

exacte et moins artificielle des processus microphysiques.

La conclusion générale de cet exposé est donc que les interprétations actuelles de la physique quantique devront à l'avenir être remplacées par des conceptions théoriques qui nous fourniront des images plus complètes et plus claires de la réalité microphysique. Je pense que la théorie de la double solution et la thermodynamique cachée des particules, même sous leur forme actuelle qui est certainement encore imparfaite, nous donnent déjà une idée de ce que pourrait être la physique quantique de demain. ■

QUELQUES RÉFÉRENCES

- (1) DE BROGLIE (L.). — Comptes rendus Ac. des sciences, Paris, 177, 1923, 506, 548, 630. Thèse de Doctorat. Masson, Paris, 1924 (rééditée en 1963).
- (2) L.B. — *Journal de Physique*, 1927, série 6, tome VIII, n° 5, 225.
- (3) L.B. — *Une interprétation causale et non linéaire de la mécanique ondulatoire: la théorie de la double solution*. Gauthier-Villars, 1936, Paris — Traduction anglaise, Elsevier, Amsterdam, 1960.
- (4) L.B. — *La théorie de la mesure en mécanique ondulatoire*. Gauthier-Villars, Paris, 1957.
- (5) L.B. — *Journal de Physique*, 20, 963, 1959.
- (6) L.B. — *Etude critique des bases de la mécanique ondulatoire*. Gauthier-Villars, Paris, 1963. Traduction anglaise, Elsevier, Amsterdam, 1964.
- (7) L.B. — *Ondes électromagnétiques et photons*. Gauthier-Villars, Paris, 1968.
- (8) L.B. — *Thermodynamique de la particule isolée* (ou Thermodynamique cachée des particules). Gauthier-Villars, Paris, 1964.
- (9) L.B. — La Thermodynamique cachée des particules. *Annales de l'Institut Henri Poincaré*, vol. 1, n° 1, p. 1-19, 1964.
- (10) L.B. — Thermodynamique relativiste et mécanique ondulatoire. *Annales de l'Institut Henri Poincaré*, vol. IX, n° 2, p. 89-108, 1968.
- (11) ANDRADE E SILVA (J.L.). — Thèse de Doctorat. Gauthier-Villars, Paris, 1960.
- (12) ANDRADE E SILVA (J.L.) et LOCHAK (G.). — *Quanta, grains et champs*. Coll. « L'univers des connaissances », Hachette, Paris, 1969.
- (13) THIOUNN (Mumm). — Thèse de Doctorat. Editions de la *Revue d'Optique*, 1963. *Cahiers de Physique*, 174, 53, 1965. Comptes Rendus. Académie des sciences, Paris, B, 1966, 261. *Portugaliae Physica*, 4, 1966, 85.
- (14) BOHM (D.) et VIGIER (J.-P.). — *Phys. Rev.*, 96, 203, 1954.