

Les idées qui me guident dans mes recherches*

L. DE BROGLIE

Considérations générales

Dans mes recherches, je ne veux pas me soumettre à un système philosophique préconçu, par exemple admettre *a priori* que le déterminisme est universel, car je ne me sens pas qualifié pour émettre une opinion aussi absolue. Je pense d'ailleurs que l'influence de certains systèmes philosophiques, tels que le positivisme ou l'idéalisme, a été assez néfaste dans le développement contemporain de la physique quantique. Cependant, j'ai la conviction profonde qu'il existe une réalité physique extérieure à nous, qui est indépendante de notre pensée et de nos moyens imparfaits de la connaître, sans laquelle l'unité des connaissances humaines, l'accord de tous les hommes sur la constatation des faits seraient incompréhensibles. Je crois aussi à la nécessité de faire reposer nos théories des phénomènes physiques sur des conceptions claires et sur des images précises de leur évolution dans l'espace et dans le temps (ou plus exactement dans l'espace-temps einsteinien, l'exactitude des conceptions relativistes ne me paraissant pas devoir être mise en doute).

Malgré tout, la recherche de la causalité qui lie les phénomènes successifs a toujours été et reste encore le guide le plus sûr de la recherche scientifique. Les étonnants progrès contemporains de la biologie, par exemple, reposent essentiellement sur une meilleure connaissance des phénomènes chimiques, électriques ou mécaniques qui influent sur le déroulement des processus biologiques tandis que les tentatives faites par certains auteurs comme M. Jordan pour introduire un

* Exposé écrit en décembre 1965. Ce texte a été publié dans le recueil *Certitudes et incertitudes de la science*, Albin Michel, Paris, 1966 (reproduit avec l'aimable autorisation des éditions Albin Michel).

indéterminisme quantique dans l'explication des phénomènes de la vie sont restées jusqu'ici sans aucune efficacité.

Il est essentiel de remarquer que, si les formalismes mathématiques permettent seuls dans les sciences où l'on peut les introduire de donner à nos idées une grande précision, ils ne sont pas cependant sans présenter quelques dangers car, entraîné par leur clarté et leur automatisme, on peut facilement oublier qu'ils ne fournissent jamais que les conséquences des hypothèses qui ont été mises à leur base. Seules, l'intuition et l'imagination permettent de briser le cercle dans lequel s'enferme naturellement toute pensée qui veut être purement déductive. Un exemple de ce fait particulièrement important pour nous est l'usage presque exclusif que les théories quantiques actuelles font de l'analyse linéaire. On sait qu'une théorie physique est linéaire quand, ayant trouvé plusieurs solutions des équations sur lesquelles elle repose, l'on peut admettre que la somme de ces solutions est encore une solution, mais *a priori* c'est là une circonstance très particulière dont la réalisation stricte doit être exceptionnelle. Le caractère linéaire que l'on attribue généralement aux équations de la physique quantique actuelle conduit à l'importance que l'on y attache à l'espace fonctionnel que l'on nomme "espace de Hilbert", espace abstrait qui n'a évidemment aucun caractère physique. Dans beaucoup de branches de la physique, de nombreux phénomènes peuvent être considérés comme régis par des équations linéaires ou du moins très approximativement linéaires dont le maniement est relativement facile. Mais il nous paraît très peu probable que la véritable nature du monde microphysique et, en particulier, la structure des unités (photons ou particules matérielles) qui le composent puissent être représentées par des équations linéaires ou même par des équations très faiblement non linéaires. Le développement encore assez embryonnaire de l'analyse non linéaire ne nous permet guère d'espérer accomplir de rapides progrès dans ce domaine, mais ce n'est pas là une raison pour admettre comme hypothèse de base le caractère linéaire ou quasi linéaire des processus microphysiques. Il est, au contraire, permis de penser que les problèmes posés par la physique quantique et la coexistence des ondes et des corpuscules ne trouveront leur véritable interprétation que dans le cadre de théories à caractère non linéaire.

Il ne faut d'ailleurs pas être dupe des représentations mathématiques. Si des concepts abstraits comme ceux de l'espace de Hilbert en physique quantique, de l'espace de configuration en mécanique classique et en mécanique ondulatoire, de l'extension-en-phase en thermodynamique

statistique constituent des auxiliaires très clairs et très utiles pour l'exposé des théories, ce serait une grave erreur de leur attribuer une réalité physique qu'ils ne peuvent avoir et de les considérer comme le cadre véritable du déroulement des phénomènes, déroulement qui s'opère toujours, pensons-nous, dans le cadre de l'espace physique et du temps.

Un autre danger qui menace sans cesse le développement de la physique théorique et qui montre la nécessité dans ce domaine de bien préciser le sens des termes employés est l'utilisation de mots dont la signification peut être interprétée de façons diverses. Je citerai comme exemple le mot "incertitude" si usité en physique quantique depuis le jour où M. Heisenberg énonça ses fameuses "relations d'incertitudes". Que signifie au juste l'affirmation que la position d'une particule dans une onde qui remplit une région étendue de l'espace est incertaine ? Cela signifie-t-il que la particule a à chaque instant une position dans cette région de l'espace, mais que nous ignorons cette position ou peut-être même qu'il nous est impossible de la déterminer ? Ou bien cela signifie-t-il que la position de la particule dans toute l'étendue de cette région est réellement indéterminée, qu'elle y est en quelque sorte "omniprésente" ? Toutes les réflexions que j'ai poursuivies sur ce sujet dans ces dernières années m'ont amené à penser que la première interprétation est très claire et toute naturelle tandis qu'il est bien difficile de donner à la seconde une signification vraiment satisfaisante. Pour ma part, je pense qu'une grandeur physique a toujours dans la réalité une valeur bien déterminée. Le fait que la valeur d'une grandeur soit *inconnue* (ou même que nous soyons dans l'impossibilité pratique de la connaître) n'entraîne aucunement que cette valeur soit *indéterminée*. Ainsi, le fait que la position ou la quantité de mouvement d'un corpuscule dans son onde nous soit inconnue ou échappe à nos mesures ne signifie nullement que cette grandeur n'ait pas à tout instant une valeur déterminée. Je reviendrai d'ailleurs plus loin sur ce point.

Il arrive aussi parfois que, dans l'exposé de développements théoriques, l'on oscille entre deux interprétations contradictoires d'un même mot en passant subrepticement et presque inconsciemment de l'une à l'autre. C'est ainsi que beaucoup d'auteurs (et sans doute même dans certains de ses ouvrages l'auteur de ces lignes) envisagent tour à tour l'onde ψ usuellement utilisée en mécanique ondulatoire soit comme une onde réelle, processus physique capable de déterminer des phénomènes physiques observables tels qu'interférences, diffraction, états stationnaires des atomes, etc., soit comme une simple représentation de probabilités n'ayant pas plus de "force contraignante" sur des phénomènes

physiques qu'une table de mortalité sur le décès des individus. On peut dire qu'à ce point de vue l'enseignement usuel de la mécanique ondulatoire repose sur une perpétuelle équivoque.

Nous terminerons ces considérations générales en affirmant que les progrès de la science considérés indépendamment de leurs applications ont toujours résulté d'efforts pour "mieux comprendre". Le désir de comprendre a été à l'origine de toutes ces réussites. Aussi suis-je aujourd'hui amené à penser qu'il convient d'être très réservé en face de l'affirmation, si souvent répétée par de nombreux physiciens depuis une quarantaine d'années, suivant laquelle les phénomènes de transition quantique transcenderaient, pour employer un mot de Niels Bohr, toute description en termes d'espace et de temps et seraient par suite définitivement incompréhensibles. Il me paraît plus naturel et plus conforme aux idées qui ont toujours heureusement orienté la recherche scientifique de supposer que les transitions quantiques pourront un jour être interprétées, peut-être à l'aide de moyens analytiques dont nous ne disposons pas encore, comme des processus très rapides, mais en principe descriptibles en termes d'espace et de temps, analogues à ces passages brusques d'un cycle limite à un autre que l'on rencontre très fréquemment dans l'étude des phénomènes mécaniques et électromagnétiques non linéaires. Les travaux effectués dans ces dernières années par certains de mes collaborateurs (MM. Francis Fer, João Luis Andrade e Silva et Georges Lochak) me donnent beaucoup d'espoir à ce sujet.

Plus généralement, je dirai que, quand un processus physique nous paraît impossible à comprendre et à représenter, nous devons toujours penser que de nouveaux et vigoureux efforts intellectuels nous permettront un jour de le comprendre et de le représenter.

Par ailleurs, l'histoire des sciences nous apprend que la pensée des savants, comme celle des autres hommes, n'est pas sans présenter une certaine inertie. Quand une théorie, c'est-à-dire une certaine manière d'envisager et de prévoir une classe de phénomènes, a bien réussi, on a tendance à s'y tenir et, en la regardant comme définitive, à ne pas faire l'effort d'en considérer d'autres. Aussi arrive-t-il fréquemment que les novateurs, je veux dire ceux qui proposent des idées nouvelles, se heurtent à de vives résistances et cela même quand il existe de bonnes raisons pour attribuer un grand poids à leurs opinions. Pour se borner au domaine de la physique en ne citant que quelques noms, est-il besoin de rappeler combien Fresnel, Maxwell, Boltzmann, Einstein ont eu de peine à faire admettre leurs idées qui étaient cependant destinées à ouvrir

à la physique d'immenses perspectives nouvelles ? Il y a là de quoi préserver les novateurs du découragement que pourraient leur inspirer les incompréhensions auxquelles ils se heurtent.

La coexistence des ondes et des particules

Depuis plus d'un demi-siècle, les mots d'onde et de particule reviennent constamment en physique quantique. C'est en 1905 que, faisant ainsi une synthèse des anciennes théories corpusculaires de la lumière alors abandonnées et des théories ondulatoires de Fresnel et de Maxwell unanimement adoptées, Albert Einstein a affirmé que dans la lumière il y a à la fois des ondes et des corpuscules, nos photons d'aujourd'hui, et en a tiré l'interprétation jusque-là impossible de l'effet photoélectrique. Près de vingt ans plus tard, en 1923, j'ai eu la hardiesse d'étendre la coexistence des ondes et des particules en supposant que non seulement les photons de la lumière, mais toutes les autres particules matérielles, comme les électrons, sont accompagnées d'une onde. Pour moi, comme cela avait été aussi 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. Mais tandis que la conception que j'avais ainsi mise à la base de la mécanique ondulatoire se trouvait confirmée par les travaux mathématiques d'Erwin Schrödinger et par la découverte expérimentale de la diffraction des électrons, une nouvelle interprétation du double aspect corpusculaire et ondulatoire de la lumière et de la matière se développait grâce aux travaux de Niels Bohr, de Max Born et des jeunes théoriciens de l'école de Copenhague, interprétation qui, pourrait-on dire, dépouillait les notions d'onde et de particule de toute leur substance.

Pour le montrer, commençons par l'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, à chaque instant, une amplitude physiquement 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 plus 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 du résultat des diverses mesures que nous pouvons effectuer

sur le corpuscule et, pour qu'elle puisse jouer ce rôle, on détermine arbitrairement son amplitude par le procédé nommé "normalisation". L'onde ψ de la mécanique ondulatoire n'est donc pas 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 physiques observables comme si une simple table de mortalité pouvait être la cause des morts individuelles ? Par quelle étrange coïncidence une représentation de probabilités pourrait-elle se propager dans l'espace au cours du temps comme une onde physique réelle susceptible de se réfléchir, de se réfracter, de se diffracter ?

Mais passons maintenant au corpuscule. Par définition, le corpuscule est un petit objet constamment localisé dans l'espace et ayant une certaine structure. Or, d'après Max Born, nous devrions admettre que le corpuscule est présent "à l'état potentiel" dans toute l'étendue de son onde et il faut entendre cette affirmation non pas comme exprimant que le corpuscule est à chaque instant présent en un point inconnu, mais qu'il est omniprésent 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 sauraient, semble-t-il, être qu'inférieures à celles d'un atome, pourrait se trouver répandu dans un train d'ondes lumineuses dont la longueur est en général de l'ordre du mètre ? Comment imaginer que l'énergie relativement considérable transportée par un corpuscule puisse se concentrer brusquement dans une région très petite, par exemple quand un photon arrivant sur une très petite cellule photoélectrique y provoque l'éjection d'un électron ? Une conception qui n'emploie que le concept d'onde homogène (d'ailleurs fictive, nous l'avons vu) sans aucune concentration locale de l'énergie ne peut pas rendre réellement compte de tels phénomènes. Vraiment on n'a pas le droit d'employer le mot corpuscule en lui enlevant tout son sens. Il me semble d'ailleurs qu'une telle conception du transport de l'énergie corpusculaire est en complète contradiction avec la théorie des champs et qu'elle est par suite inconciliable avec les idées mêmes qu'Einstein avait mises à la base de la théorie de la relativité¹. Je sais bien que, dans la théorie quantique des champs, on cherche à concilier les deux points de

¹ On pourra comparer les idées que nous développons ici avec la très pénétrante objection faite naguère par Einstein à l'emploi exclusif de l'onde

vue par l'introduction des nombres d'occupation, mais je pense, comme je l'expliquerai plus loin, qu'il s'agit là d'un "placage" par un procédé tout à fait artificiel du concept, en lui-même très clair, de "nombre de corpuscules" sur une image purement ondulatoire. Nous reviendrons plus loin sur ce point.

La théorie de la double solution et son état actuel

La manière d'interpréter la mécanique ondulatoire qui est devenue "orthodoxe" n'était pas du tout celle que j'avais dans l'esprit au moment où j'en avais conçu l'idée de base. Comme je l'ai dit déjà, je pensais alors qu'il y avait une véritable coexistence de l'onde et du corpuscule étroitement liés l'un à l'autre, l'onde et le corpuscule étant des réalités physiques définies à la façon habituelle. Je fus donc amené à faire à cette époque, en 1926- 1927, un effort, qui était certainement bien insuffisant, pour obtenir une représentation de ce genre.

La première chose à faire pour moi était de restituer à l'onde un caractère physique concret que ne possédait plus l'onde ψ , représentation abstraite de probabilité, telle qu'on commençait à l'envisager, mais il fallait aussi expliquer le fait certain que cette onde ψ , malgré son caractère fictif, se propageait comme une véritable onde. J'eus alors l'idée 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'appelais l'onde v serait une onde physique ayant une amplitude bien déterminée et dont l'autre, l'onde ψ usuelle, serait *calquée* sur l'onde v grâce à la relation $\psi = Cv$ où C serait un coefficient de normalisation. La normalisation de l'onde ψ , tout en lui maintenant les propriétés de propagation d'une onde physique, lui enlèverait son caractère de réalité concrète. Ainsi se trouverait écarté le paradoxe d'une représentation de probabilité déterminant des phénomènes physiques observables puisque ceux-ci seraient en réalité déterminés par l'onde physique v et non par l'onde ψ arbitrairement calquée sur l'onde

ψ en mécanique ondulatoire (voir *Rapports et discussions du cinquième Conseil Solvay de physique* d'octobre 1927, Gauthier-Villars, Paris 1928, pp. 253 à 256). Einstein terminait en disant: "A mon avis, on ne peut lever cette objection que de cette façon qu'on ne décrit pas seulement le processus par l'onde, mais qu'en même temps on localise le corpuscule dans l'onde pendant la propagation. Je crois que M. de Broglie a raison de chercher dans cette direction. Si l'on emploie exclusivement l'onde de Schrödinger l'interprétation du $|\psi|^2$ implique à mon sens une contradiction avec le postulat de relativité.

v de façon à représenter des probabilités sans conserver un caractère physique concret. A l'heure actuelle, cette hypothèse me paraît toujours être la seule qui permette de comprendre pourquoi l'onde ψ usuelle a été tour à tour interprétée comme objective ou comme subjective suivant qu'on considère ses propriétés de propagation qui déterminent des phénomènes observables ou son caractère de simple représentation de probabilités.

Mais il me fallait aussi expliquer l'existence du corpuscule à côté de celle de l'onde en compliquant l'image qui me fournissait cette "théorie de la double solution" telle que je viens de l'exposer. Pour cela, j'imaginai alors (1927) que la véritable onde physique tout en coïncidant presque partout avec l'onde v supposée avoir une très faible amplitude, en différerait cependant dans une très petite région de l'espace où elle présenterait une très forte amplitude locale, région qui constituerait précisément le corpuscule lié à son onde. Cette onde, je la nommais l'onde u et je supposais en somme qu'en dehors de la très petite région singulière constituant le corpuscule, elle se réduisait à l'onde v de sorte que l'on avait alors très approximativement $u = v$. Dans le cadre des équations d'ondes linéaires usuellement utilisées, l'onde u apparaîtrait comme possédant une singularité au sens mathématique (avec un point où l'amplitude serait infinie), mais il pourrait en être autrement si l'on admettait que dans la région singulière où l'amplitude de l'onde est très élevée interviennent des termes non linéaires ne figurant pas dans les équations usuelles.

La théorie de la double solution ainsi complétée conduit à attribuer au corpuscule une trajectoire définie mathématiquement comme étant une ligne orthogonale aux surfaces d'égale phase de l'onde v . Ce fait est exprimé par une formule dite "formule du guidage" qui précise de quelle façon le mouvement du corpuscule est guidé par la propagation de l'onde. L'on parvient ainsi à comprendre pourquoi la probabilité de présence du corpuscule 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, les réflexions que j'ai à nouveau consacrées à la théorie de la double solution depuis une quinzaine d'années m'ont amené à me rendre compte que cette théorie sous sa forme ancienne et la formule du guidage qui en découle ne suffisent pas à expliquer complètement le caractère aléatoire des manifestations corpusculaires et l'intervention constante des probabilités dans leur prévision. C'est là ce qui m'a conduit à introduire progressivement dans ma conception de la coexistence

des ondes et des particules l'idée qu'une particule, même quand elle nous paraît isolée, c'est-à-dire soustraite à toute interaction extérieure, est cependant toujours en contact avec un milieu caché jouant le rôle d'une sorte de thermostat qui échange continuellement avec elle d'une manière aléatoire de l'énergie et de la quantité de mouvement. Cette idée avait été aperçue dès 1954 par MM. Bohm et Vigier qui ont alors émis l'hypothèse de l'existence d'un "milieu subquantique" caché et sous-jacent. Si l'on adopte ce point de vue, les trajectoires d'une particule définies par la formule du guidage n'apparaissent plus que comme des trajectoires moyennes par suite des fluctuations qu'impose à leur mouvement leur contact permanent avec le milieu subquantique. Sur cette base nouvelle, j'ai pu développer depuis 1960 une "thermodynamique cachée des particules". Cette thermodynamique constitue aujourd'hui à mes yeux la forme la plus perfectionnée de mon ancienne théorie de la double solution et je suis persuadé que, quand on lui aura accordé l'attention qu'elle mérite, elle pourra fournir un des points de départ pour la construction d'une nouvelle interprétation, vraiment intelligible, de la physique quantique.

Dans ce qui précède, nous avons été naturellement amenés à rétablir l'image classique suivant laquelle la particule est un petit objet localisé dans l'espace ayant une extension très petite, mais finie et, par suite, une structure interne. C'est la raison pour laquelle depuis plusieurs années j'ai suivi avec beaucoup d'intérêt et de sympathie les travaux de M. Jean-Pierre Vigier et de ses collaborateurs qui tendent à obtenir une image spatiotemporelle des particules rendant compte de l'ensemble des caractéristiques (masse, charge, spin, isospin, nombre baryonique, étrangeté) que les découvertes successives faites dans ce domaine nous ont amenés à leur attribuer. Je pense que leurs tentatives aboutiront à une synthèse qui sera tout à fait en accord avec la théorie que j'ai esquissée plus haut ainsi qu'avec les idées que j'avais avancées il y a une trentaine d'années quand, en m'appuyant sur les données encore très incomplètes dont on disposait alors, j'avais tenté d'obtenir une vue unitaire de la constitution de toutes les particules en les considérant comme formées par des combinaisons diverses d'unités de spin (méthode de fusion)².

² Voir mon livre: *Introduction à la nouvelle théorie des particules de M. J.-P. Vigier et de ses collaborateurs*, Gauthier- Villars, Paris, 1961. Mais la question a beaucoup progressé depuis.

Une remarque d'Einstein sur le formalisme usuel de la mécanique ondulatoire

L'interprétation couramment admise de la mécanique ondulatoire abandonnant toute image claire de la particule ne veut plus admettre sa localisation continue dans l'espace. Elle ne peut donc se représenter clairement ni l'arrivée d'un photon sur une cellule photoélectrique ni celle d'un électron sur un dispositif capable de la détecter. Elle ne peut pas davantage se représenter le choc de deux particules venant au contact l'une de l'autre. Pour cette raison, la théorie de l'interaction entre deux particules présente un aspect singulier qui avait fortement retenu l'attention d'Einstein.

Considérons une particule dont l'état initial d'énergie E est, dans le formalisme usuel, représenté par la fonction $\psi = c_j \phi_j$ avec $c_j = 1$ en valeur absolue, ϕ_j étant la "fonction propre" correspondant à l'énergie E_j . Si la particule est soumise pendant un temps limité à un très faible champ perturbateur dû par exemple à la proximité d'une autre particule, à la fin de la perturbation son onde sera devenue $\psi = \sum c_k \phi_k$ et, comme la perturbation est restée très faible, on aura pour c_j une valeur restée très voisine de 1 et pour les c_k avec $k \neq j$ des valeurs extrêmement petites. Or la mécanique ondulatoire nous apprend, d'une façon qui paraît certaine, que, si à la fin de la perturbation un transfert d'énergie et de quantité de mouvement a pu avoir lieu entre la particule perturbatrice et la particule perturbée, celle-ci aura finalement une probabilité $|c_j|^2$ très voisine de l'unité d'être restée dans son état initial d'énergie E_j et de très petites probabilités $|c_k|^2$ de posséder une énergie E_k différente de E_j . Mais les énergies E_k peuvent être très différentes de E_j et il en résulte que de très faibles perturbations peuvent faire apparaître de très petites probabilités pour que l'énergie de la particule considérée ait subi un changement important. Einstein, soulignant le caractère très surprenant de cette conclusion, considérait que l'on obtenait ainsi une description *statistique* certainement exacte de ce qui pouvait se passer, mais il lui semblait nécessaire de substituer à cette description statistique une description causale bien que cela lui parût très difficile.

Dans la très remarquable contribution placée en tête du livre³ consacré à mon soixantième anniversaire (Albin-Michel Paris, 1953), Einstein a repris le même argument sous une forme plus développée, mais il y a ajouté la conclusion suivante qui me paraît permettre d'apercevoir

³ *Louis de Broglie, physicien et penseur.*

le fond de sa pensée: “Mais il me semble qu’en définitive on reconnaîtra que l’on doit mettre à la place de la force agissante, par exemple l’énergie potentielle ou pour l’effet Compton le champ de l’onde, quelque chose qui a une structure atomique au même titre que l’électron lui-même.”

Je pense que l’idée émise par Einstein est extrêmement profonde, mais qu’elle est présentée sous une forme peut-être un peu obscure. Aussi vais-je essayer de dégager plus clairement la signification qu’elle prend dans le cadre de mes conceptions.

Considérons d’abord une seule particule sur son onde v . Pour moi, l’onde v est un processus physique très faible ne propageant qu’une énergie nulle ou négligeable. Cependant, ce phénomène très faible règle, du moins en moyenne, abstraction faite des perturbations provenant du milieu subquantique, le déplacement de la forte concentration d’énergie qui constitue la particule. C’est l’arrivée de cette forte concentration d’énergie guidée par l’onde qui produit des effets observables tels que l’effet photoélectrique ou l’impact d’un électron sur une cible.

Passons maintenant au cas envisagé plus haut de deux particules dont les ondes parviennent dans une même région de l’espace, ce qui va leur permettre d’interagir. A mes yeux, l’emploi, classique en mécanique ondulatoire, de l’espace de configuration, emploi dont nous reparlerons plus loin, nous fournit, du moins à l’approximation newtonienne, une représentation *appauvrie* de la propagation des deux ondes v individuelles dans l’espace physique. Or il paraît bien établi que les deux particules sont capables d’échanger brusquement, par un processus qualifié de “quantique” et déclaré indescriptible par la théorie orthodoxe, des quantités finies d’énergie et de quantité de mouvement d’une façon que la composition spectrale de l’onde ψ dans l’espace de configuration permet de prévoir parce qu’elle prévoit les probabilités des divers processus quantiques possibles qui se trouvent tous assurer la conservation globale de l’énergie et de la quantité de mouvement. Ici encore nous avons donc affaire à un processus *très faible*, la propagation des deux ondes v individuelles dans l’espace physique (représentée d’une façon appauvrie par celle de l’onde dans l’espace de configuration) qui règle, du moins statistiquement, le processus *fort* des échanges d’énergie et de quantité de mouvement entre les deux particules.

Dans le cadre de mes conceptions, l’idée profonde d’Einstein me paraît alors pouvoir s’interpréter de la façon suivante. Les particules étant supposées constamment localisées dans l’espace et animées d’un mouvement aléatoire dû à la superposition au guidage par l’onde v des

perturbations provenant du milieu subquantique, elles peuvent à un certain instant se trouver très près l'une de l'autre et il peut alors se produire entre elles une interaction intense et brusque, probablement à caractère non linéaire, constituant un "choc" à caractère quantique avec transfert notable d'énergie et de quantité de mouvement. Il me semble bien que c'était là la pensée d'Einstein quand il écrivait qu'on devait remplacer, pour rendre compte des processus forts qui transfèrent une énergie importante, la force agissante qui figure dans l'équation d'ondes usuelle par quelque chose ayant une structure atomique.

Je pense qu'envisagé dans l'espace physique, le processus de transfert par choc d'énergie et de quantité de mouvement doit consister en un "accrochage" brusque de chacune des deux particules sur l'une des composantes monochromatiques de son onde v avec conservation globale de l'énergie et de la quantité de mouvement. Les idées que nous venons d'exposer permettraient de comprendre comment les ondes v , bien que ne véhiculant pratiquement aucune énergie décelable, pourraient cependant régler non seulement les localisations possibles des particules, mais aussi les transferts importants d'énergie et de quantité de mouvement qui peuvent résulter de leurs "chocs".

La théorie orthodoxe représente assez exactement, au coefficient de normalisation près, l'onde v associée à la particule. C'est là, à mes yeux, ce qui lui permet de prévoir les phénomènes et leurs probabilités respectives qui sont en quelque sorte "préfigurés" dans la structure même de l'onde. Mais, comme elle se refuse à introduire l'image des particules localisées, elle est totalement incapable de décrire les processus brusques de transfert d'énergie et de quantité de mouvement qui se produisent par exemple lors de l'effet photoélectrique ou du choc de deux particules. Elle est ainsi amenée à déclarer indescriptibles tous ces processus quantiques qui cependant, me semble-t-il, interviennent dans tout ce qui est observable.

Autres remarques critiques

Nous allons encore faire un certain nombre de remarques critiques au sujet des méthodes actuellement employées en microphysique théorique. Nous nous bornerons à les énoncer assez rapidement sans leur consacrer les longs développements dont elles seraient susceptibles.

Depuis les travaux de Schrödinger sur le développement mathématique de la mécanique ondulatoire (1926), l'on a admis que, pour traiter

un problème où interviennent plusieurs particules en interaction, 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 $3N$ coordonnées des N particules). C'est ce que l'on nomme l'espace de configuration. L'emploi de cet espace abstrait ne soulève aucune difficulté en mécanique classique où les points matériels supposés bien localisés dans l'espace physique ont des coordonnées bien définies et où les variations de ces coordonnées en fonction du temps déterminent complètement l'évolution du système. Mais le succès des prévisions obtenues en mécanique ondulatoire par la méthode de l'espace de configuration fait oublier, me semble-t-il, ce qu'elle présente alors de paradoxal. Comment, en effet, admettre que la *seule* représentation possible des interactions entre plusieurs particules doit se faire dans un espace visiblement abstrait comme l'est l'espace de configuration ? Et, si l'on admet avec l'interprétation orthodoxe de la mécanique quantique que les particules ne sont pas constamment localisées dans l'espace, comment peut-on envisager un espace construit, même abstraitement, sur l'ensemble de leurs coordonnées puisque en somme on admet que ces coordonnées n'existent pas ? La seule explication possible du succès de cette méthode en mécanique ondulatoire me paraît être qu'elle fournit une sorte de représentation de ce qui se passe dans l'espace physique où se propagent des ondes transportant des particules localisées. Cette représentation qui se montre très utile pour les prévisions statistiques est cependant nécessairement appauvrie parce qu'elle ne peut pas représenter la propagation des ondes individuelles dans l'espace physique. Les recherches que j'ai poursuivies dans cette direction depuis quelques années, précisées par de très pénétrantes analyses de M. Andrade e Silva, me font penser que c'est bien là la véritable signification du succès de la méthode de l'espace de configuration telle qu'elle a été introduite par Schrödinger en mécanique ondulatoire. C'est là un sujet qui demanderait à être encore approfondi car ce succès de la méthode de l'espace de configuration est l'une des objections les plus fréquemment opposées au retour à la description des phénomènes dans l'espace physique que préconise la théorie de la double solution.

Dans les ouvrages où l'on expose l'interprétation des phénomènes de la physique quantique à l'aide des idées de l'école de Copenhague, on trouve constamment l'affirmation suivante: on ne peut jamais observer à la fois l'aspect corpusculaire et l'aspect ondulatoire des unités physiques, l'un des aspects disparaissant dans la mesure où l'autre apparaît. Et l'on a été jusqu'à dire que les particules sont des entités physiques qui

prennent tour à tour l'aspect corpusculaire et l'aspect ondulatoire. En exposant les idées de l'école de Copenhague, je me suis laissé aller moi-même à reproduire certaines de ces affirmations, mais aujourd'hui mes réflexions prolongées sur ce sujet me conduisent à penser qu'elles sont entièrement inexactes. Considérons, en effet, l'enregistrement sur une plaque photographique des franges d'interférences que l'on sait maintenant obtenir aussi bien avec des électrons qu'avec des photons. On a pu vérifier que l'arrivée d'une particule en un point de la plaque déclenche un petit phénomène local d'ionisation provoquant l'apparition d'une tache noire sur le négatif, mais l'observation des franges d'interférences exige qu'un très grand nombre de particules soient parvenues sur la plaque car l'apparition des franges résulte non pas directement des arrivées individuelles, mais de la *répartition* statistique de ces arrivées sur la plaque. L'on observe donc à la fois pendant l'expérience l'aspect corpusculaire dû au fait que les impressions locales, comme d'ailleurs tout phénomène observable, résultent de l'arrivée d'une particule en un point et l'aspect ondulatoire dû au fait que la répartition statistique des particules dans l'espace est réglée par la propagation de l'onde. Il n'est donc pas exact de dire que l'un des phénomènes ne peut se produire qu'en l'absence de l'autre et il est encore plus faux de dire qu'il existe une même entité physique se présentant tantôt sous l'aspect corpusculaire, tantôt sous l'aspect ondulatoire.

Un autre point sur lequel il est utile d'attirer l'attention est le fait que pour la plupart des théoriciens actuels l'onde (ou du moins ce qu'il en reste dans leurs conceptions) est presque toujours considérée comme une onde plane monochromatique ayant une fréquence bien déterminée, ce qui permet d'attribuer à la particule (ou du moins à ce qu'il en reste dans cette manière de voir) une énergie bien déterminée par la relation du quantum $W = h\nu$. Or il ne me paraît pas douteux que dans une théorie des ondes physiquement exacte l'onde plane monochromatique n'existe jamais 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.

La considération exclusive des ondes monochromatiques conduit à une autre 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 suivant une loi complexe. Rien dans ce mouvement ne permet de distinguer les diverses composantes monochromatiques: ces composantes n'existent que dans l'esprit des théoriciens qui cherchent à faire une analyse abstraite de ce mouvement et elles ne prendraient une existence physique que si l'on parvenait à les isoler par une opération qui évidemment romprait 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 être une idée fautive qui vicie une partie des raisonnements théoriques qui sont actuellement usuels en physique quantique, mais je ne puis exposer ici toutes les conséquences que cette illusion a pu entraîner.

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, qui a connu ensuite une très grande vogue, mais qui paraît être entrée à l'heure actuelle dans une période de stérilité. Dans sa forme la plus naturelle, la théorie quantique des champs fait intervenir les corpuscules (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 corpuscules qu'elle transporte. On remarquera que cette définition est très claire si l'on admet qu'une onde transporte toujours un nombre, naturellement entier, de corpuscules localisés, mais qu'elle devient très obscure si l'on ne veut plus admettre l'image des corpuscules localisés. 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 une grandeur numérique, mais comme un "opérateur" opérant dans l'espace discontinu des nombres d'occupation. Les propriétés de commutation de ces opérateurs constituent l'essentiel du formalisme de cette théorie dont il est vraiment presque impossible de penser qu'elle nous fournisse une véritable représentation de la réalité physique. On en tire néanmoins des

sortes de “recettes” qui permettent dans beaucoup de cas des prévisions statistiques exactes. Malgré la vogue qu’elle possède encore, il me paraît personnellement certain que la théorie quantique des champs sera un jour remplacée par une représentation beaucoup plus profonde et beaucoup plus exacte des processus microphysiques. A la fin d’une des dernières rééditions de son livre *The Meaning of Relativity*, Einstein faisant allusion à la théorie quantique des champs écrivait: “Actuellement, l’opinion prévaut que la théorie des champs doit être d’abord transformée par quantification en une théorie statistique suivant des règles plus ou moins bien établies. *Je ne vois dans cette méthode qu’une tentative pour rendre compte de relations ayant un caractère non linéaire à l’aide d’une théorie linéaire.*” La conclusion d’Einstein me paraît tout à fait en accord avec l’ensemble des idées que j’ai développées dans cet exposé.

Conclusion

Ma conclusion sera donc que les interprétations actuelles de la physique quantique devront dans l’avenir être remplacées par des idées 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 certainement encore imparfaite, nous donnent déjà une idée de ce que pourrait être la physique quantique de demain.

Les étonnantes découvertes qui se sont multipliées d’une manière si prodigieuse depuis un demi-siècle ont poussé les théoriciens de la physique à construire des formalismes relativement simples leur permettant de traduire les faits expérimentaux et de les prévoir avec une certaine sécurité. Cela était légitime et pratiquement fort utile. Mais l’habitude d’utiliser avec précision et ingéniosité des “recettes” à caractère purement formel leur a, je crois, fait un peu trop oublier que le désir de comprendre et de se représenter clairement la réalité physique a toujours été et restera sans doute toujours le but le plus élevé et l’effort finalement le plus fructueux de la recherche scientifique fondamentale.

Depuis quelques années, nos connaissances sur le nombre, les propriétés et les avatars des particules se sont accrues sans cesse d’une façon prodigieuse. Si les idées que nous avons esquissées sont exactes, toute particule et l’onde qui la porte émergeraient, pourrait-on dire, dans le monde microphysique observable à la “surface” du milieu subquantique, énorme réservoir d’énergie cachée. L’évolution et les interactions des particules observables, leurs transformations possibles les unes dans les

autres, l'apparition et la disparition des photons, tout cela nous apparaîtra peut-être un jour comme le résultat au niveau microphysique, que nous pouvons indirectement observer, de toutes les immenses possibilités que recèle le milieu subquantique.

J'avais pensé à mettre en exergue du présent exposé la curieuse phrase suivante: "La source désapprouve presque toujours l'itinéraire du fleuve", dont j'ignore l'auteur exact. En effet, Planck, Einstein, Schrödinger et moi-même n'avons nous pas toujours plus ou moins désapprouvé la façon dont ont été interprétées la physique des quanta, la coexistence des ondes et des particules et la mécanique ondulatoire, ces fleuves immenses qui ont pris leur source dans nos travaux ?