

LE DUALISME DES ONDES ET DES CORPUSCULES

DANS L'OEUVRE D'ALBERT EINSTEIN

par M. Louis de Broglie

Le discours ci-après a été prononcé à la séance publique de l'Académie des Sciences du 5 décembre 1955, l'année de la mort d'Einstein. Ce texte est extrait de l'ouvrage de l'auteur : Nouvelles perspectives en microphysique, Albin Michel, Paris, 1956. Nous le reproduisons avec l'aimable autorisation de M. Louis de Broglie, de MM. les Secrétaires Perpétuels de l'Académie des Sciences, et des Editions Albin Michel.

La mort d'Albert Einstein survenue au printemps dernier, le 18 avril 1955, a causé dans les milieux scientifiques de tous les pays une très vive émotion. Le caractère génial de son œuvre, la noble figure de ce savant illustre à qui rien de ce qui est humain ne restait étranger forcent l'estime et l'admiration. Comme il était depuis 1933 Associé étranger de notre Compagnie, il eût été bien naturel qu'à l'occasion de la disparition d'un confrère aussi célèbre, je vous présente aujourd'hui une notice consacrée à sa vie et à ses œuvres ; mais cette étude, je l'avais déjà faite moi-même, il y a dix ans, pour associer notre Académie à l'hommage International qui avait été rendu au créateur de la théorie de la Relativité au moment où il accomplissait ses soixante-dix ans.

Ce que je voudrais faire aujourd'hui pour évoquer une dernière fois devant vous cette haute figure de la science contemporaine, c'est détacher de l'ensemble de son œuvre une partie qui n'est pas la plus connue du grand public, mais qui porte sur un des problèmes les plus importants de

la Physique du XX<sup>e</sup> siècle, problème qui a été et qui reste encore une des grandes énigmes de la science : le dualisme dans le monde physique des ondes et des corpuscules.

Si je me suis décidé à exposer ici cet aspect particulier de l'œuvre d'Einstein, c'est parce qu'il a toujours attiré particulièrement mon attention et qu'il été naguère à l'origine de mes propres recherches. Il m'arrivera donc au cours de cet exposé d'abandonner le ton impersonnel qui est d'usage dans ces Notices annuelles et de rappeler des travaux ou des souvenirs personnels. J'espère que vous m'en excuserez en remarquant que cela m'a permis de donner à un exposé nécessairement fort abstrait une allure un peu plus vivante et, puisant dans ma mémoire et en rassemblant des textes épars, d'apporter une contribution plus intéressante à l'histoire du problème qui a constitué la plus grande crise de la Physique de notre temps.

\*\*\*

Avant de parler des mémorables travaux d'Einstein sur l'effet photoélectrique et les quanta de lumière, il est nécessaire de rappeler rapidement pour quelles raisons les propriétés de la lumière avaient été interprétées alternativement au cours des siècles précédents par des hypothèses corpusculaires et par des hypothèses ondulatoires.

L'idée que la lumière est constituée de grains en mouvement rapide avait été familière aux penseurs de l'Antiquité pour lesquels les hypothèses du type atomique avaient toujours possédé un grand attrait. N'était-il pas d'ailleurs bien naturel de concevoir une source lumineuse comme projetant autour d'elle en tous sens des corpuscules qui, une fois émis, se déplaceraient en ligne droite dans le vide et les milieux homogènes, leurs trajectoires rectilignes matérialisant alors l'idée de « rayon de lumière » qu'imposait l'observation la

plus superficielle ? Pouvait-on éviter de comparer la réflexion de la lumière sur un miroir au rebondissement élastique de corpuscules sur un obstacle ? Presque instinctivement ces images s'imposèrent à l'esprit de ceux qui, pendant de longs siècles, observèrent constamment autour d'eux les phénomènes de l'optique sans savoir en faire une étude méthodique et véritablement scientifique.

C'est au XVII<sup>e</sup> siècle, au moment où toutes les branches de la science moderne commençaient à se développer, que débuta l'étude scientifique de la Lumière. Entre 1620 et 1670, les découvertes s'accumulèrent : découverte des lois quantitatives de la réflexion et de la réfraction par Snell et par Descartes, observation de la double réfraction du spath d'Islande par Bartholin, première description de certains phénomènes de diffraction par Grimaldi, découverte par Newton de la décomposition spectrale de la lumière blanche par le prisme et des anneaux colorés des lames minces... Tous ces remarquables progrès des connaissances scientifiques sur la lumière ne pouvaient pas ne pas donner naissance à un grand mouvement d'idées. Aussi ne doit-on pas s'étonner qu'aient paru, dans le demi-siècle qui suivit, deux ouvrages fondamentaux qui sont restés classiques dans l'histoire de l'optique : le *Traité de la Lumière* de Christian Huyghens et le *Traité d'Optique* d'Isaac Newton.

Dans ces deux livres que, malgré tous les progrès effectués par la science depuis deux siècles, on ne saurait relire aujourd'hui sans le plus vif intérêt et la plus grande admiration, on voit pour la première fois s'opposer d'une façon nette l'hypothèse des ondes lumineuses et celle des corpuscules de lumière. Huyghens, esprit d'une remarquable clarté, auteur de grandes découvertes théoriques et pratiques dans le domaine de la Mécanique, développe sous une forme géométrique qui est restée classique l'idée que la lumière est formée d'ondes en propagation dans un milieu subtil, l'éther,

qui imprégnerait tous les corps matériels et remplirait ce que nous appelons le vide. Par des raisonnements qui figurent encore aujourd'hui dans nos traités de Physique, il en tire les lois de la réflexion et de la réfraction, la description de la propagation de la lumière dans les milieux anisotropes et l'interprétation de la double réfraction dans les cristaux comme le spath. Cette œuvre admirable, peut-être mal comprise de ses contemporains, restait incomplète sur des points importants puisque, par exemple, elle n'expliquait pas clairement la propagation rectiligne de la lumière dans les milieux isotropes sous forme de rayons, mais elle constituait la pierre d'attente sur laquelle allait s'appuyer, un siècle et demi plus tard, l'œuvre géniale de Fresnel.

Quant au livre de Newton, un peu postérieur en date, il est assez différent. Contenant d'admirables et minutieuses analyses des découvertes expérimentales de son auteur, il ne se prononce pas très nettement sur la nature de la lumière, mais on sent cependant en le lisant que Newton penche vers la conception granulaire de la lumière et que pour lui un rayon lumineux est essentiellement la trajectoire d'un corpuscule. Mais l'esprit puissant de Newton ne pouvait pas ne pas apercevoir que le phénomène de la coloration des lames minces qu'il avait découvert et qui porte son nom (les anneaux de Newton) impliquait l'existence dans la lumière d'un élément de périodicité dont l'image simpliste des corpuscules de lumière indépendants ne pouvait rendre compte. C'est pourquoi, dans son *Traité de la Lumière*, Newton a esquissé cette remarquable « Théorie des Accès » d'après laquelle les corpuscules de lumière seraient accompagnés, au moins dans leur passage à travers la matière, par des ondulations qui réagiraient sur leur mouvement et les feraient passer périodiquement par des accès de facile transmission et des accès de facile réflexion : l'espace parcouru par le corpuscule entre deux accès de même nature permettait à Newton de définir

une « longueur d'accès » qui était étroitement apparentée à ce que Fresnel devait plus tard appeler la « longueur d'onde » d'une lumière monochromatique. Ainsi le savant génial qui avait découvert l'analyse infinitésimale et la gravitation universelle était parvenu à concevoir une théorie mixte de la lumière où, tout en conservant l'idée de grains de lumière décrivant des trajectoires, on lui associait l'idée d'une onde en propagation qui accompagnerait le mouvement des corpuscules et serait susceptible de réagir sur lui. Admirable idée, véritable préfiguration de la future Mécanique ondulatoire, mais qui, venue prématurément dans l'histoire de la science, ne fut pas développée et tomba dans l'oubli.

Le XVIII<sup>e</sup> siècle n'a guère contribué aux progrès de l'optique, ni du côté des connaissances expérimentales, ni du côté des interprétations théoriques. Mais le début du XIX<sup>e</sup> siècle a été marqué par la découverte de nombreux phénomènes nouveaux (les interférences par Young, la polarisation par Malus, etc...) et par le fulgurant succès de la théorie ondulatoire de la lumière. On sait que ce succès reste pour toujours attaché au grand nom de notre compatriote Augustin Fresnel. La carrière scientifique de Fresnel émaillée d'incidents divers, sa grandiose œuvre scientifique ont été trop souvent évoquées pour qu'il soit utile d'y insister ici. Rappelons en deux mots que Fresnel, reprenant les idées de Huyghens avec l'aide de moyens mathématiques beaucoup plus étendus que ceux dont disposait cent cinquante ans auparavant son précurseur hollandais, a montré comment la conception des ondulations lumineuses permet d'expliquer non seulement la propagation rectiligne de la lumière, mais tout l'ensemble des phénomènes d'interférences et de diffraction jusque dans leurs aspects les plus inattendus. Rappelons aussi que dans la deuxième partie de son œuvre, Fresnel introduisant l'hypothèse nouvelle de la transversalité des vibrations lumineuses pour traduire l'existence de la polarisation, a pu développer,

d'une manière beaucoup plus approfondie que n'avait pu le faire Huyghens, la théorie de la propagation de la lumière dans les milieux anisotropes et constituer ainsi cette admirable optique cristalline que l'on trouve exposée presque sans modification dans nos traités les plus modernes. Les succès accumulés de la théorie ondulatoire, la façon dont elle a permis de prévoir dans tous leurs détails les phénomènes les plus fins de l'optique physique, la confirmation apportée vers 1850 à la théorie des ondes par les mesures comparatives des vitesses de propagation de la lumière dans l'air et dans les milieux réfringents assurèrent aux conceptions de Fresnel une victoire qui parut définitive. Un peu plus tard vint Maxwell qui, en considérant les radiations lumineuses comme des perturbations électromagnétiques ondulatoires appartenant à un petit intervalle de longueur d'onde, fit rentrer toute l'optique comme un chapitre particulier dans le vaste ensemble de la théorie électromagnétique.

Sans entrer dans le détail de tous ces beaux développements de la Physique théorique du siècle dernier, cherchons à faire le point de la vision du monde physique qui en résultait. Tout d'abord toute idée de « grain » se trouvait expulsée de la théorie de la Lumière : celle-ci prenait la forme d'une « théorie du champ » où le rayonnement était représenté par une répartition continue dans l'espace de grandeurs évoluant continûment au cours du temps sans qu'il fût possible de distinguer, dans les domaines spatiaux où évoluait le champ lumineux, de très petites régions singulières où le champ serait très fortement concentré et qui fournirait une image du type corpusculaire. Ce caractère à la fois continu et ondulatoire de la lumière se trouvait prendre une forme très précise dans la théorie de Maxwell où le champ lumineux venait se confondre avec un certain type de champ électromagnétique.

L'antagonisme des conceptions de corpuscule et d'onde, de

grain et de champ, entre lesquelles s'étaient partagées les préférences des physiciens antérieurs, était-il résolu au définitif profit des ondes et des champs ? La profonde pensée de Newton envisageant la nécessité de conserver le dualisme des ondes et des corpuscules et d'en opérer une synthèse était-elle donc périmée ? On pouvait le croire si l'on attachait uniquement son attention sur l'Optique et la théorie des rayonnements. Mais déjà les « grains » prenaient leur revanche dans un autre domaine. Car au moment même où la continuité et la notion de champ l'emportaient pour la représentation du rayonnement, le caractère atomique de la matière et de l'électricité s'imposait aux physiciens et l'existence de ces petits grains d'électricité que nous appelons « électrons » leur devenait familière. Il fallait donc reconstruire la théorie électromagnétique en y introduisant la matière sous la forme de petites « sources » du champ ayant un aspect corpusculaire. C'est ce que firent H. A. Lorentz et ses continuateurs : dans leurs théories, on voyait reparaître la dualité des ondes et des corpuscules, des grains et des champs mais pour ainsi dire dans des domaines séparés. La continuité semblait régner dans le domaine du champ électromagnétique et du rayonnement tandis que la discontinuité granulaire s'introduisait, par ailleurs et assez arbitrairement, pour représenter l'existence certaine des sources quasi ponctuelles du champ électromagnétique liées à la matière électrisée. Cette dissymétrie donnait à la doctrine de Lorentz sur les électrons quelque chose qui n'était pas satisfaisant malgré la beauté du formalisme et le succès remarquable de certaines des prévisions obtenues. Si la dualité des ondes et des corpuscules paraissait expulsée depuis Fresnel de la théorie de la lumière par suite du triomphe de la conception exclusivement ondulatoire, on ne pouvait pas dire qu'il en était de même dans l'ensemble de notre représentation du monde physique.

D'ailleurs, pour ceux qui connaissaient bien l'histoire des

sciences, il y avait une autre raison, un peu oubliée sans doute, de penser qu'il existait une liaison cachée entre les concepts d'onde et de corpuscule dont ne rendait pas compte la Physique de 1900. Je fais allusion ici à cette belle théorie de Mécanique analytique qui fut développée, il y a quelque cent vingt ans, par Hamilton et par Jacobi et qui fait correspondre à un ensemble de mouvements de corpuscules dans un champ de force donné la propagation d'une onde dans cette région de l'espace à l'approximation de l'Optique géométrique. Cette saisissante image permettait d'identifier les trajectoires des corpuscules associés à l'onde aux « rayons » de cette onde définis par l'optique géométrique comme les courbes orthogonales aux surfaces d'égale phase. Ainsi était apparue une correspondance, d'une nature très profonde, quoique limitée, il est vrai, au domaine de validité de l'optique géométrique, entre le mouvement d'un corpuscule et la propagation d'une onde et je pense que l'importance du lien ainsi établi ne saurait être surestimée. Mais à l'époque où écrivaient Hamilton et Jacobi et dans la période qui suivit, aucun sens physique précis n'avait été donné à cette représentation et l'onde introduite par leur théorie avait été considérée comme une onde fictive, simple artifice mathématique permettant de se représenter simultanément tout un ensemble de trajectoires possibles. La précieuse indication que le formalisme d'Hamilton-Jacobi pouvait fournir sur la véritable nature du dualisme onde-corpuscule avait été méconnue par les savants du XIX<sup>e</sup> siècle habitués, nous l'avons vu plus haut, à employer dans des domaines séparés les notions d'onde et de corpuscule.

Mais bientôt, dans le domaine même du rayonnement d'où il paraissait exclu à jamais, cet étrange dualisme allait réapparaître sous une forme aussi inattendue qu'inquiétante pour les théoriciens.

\*\*\*

1905 ! Pendant cette année cruciale dans l'histoire de la Physique, par un double coup de maître dont il n'existe sans doute pas d'autre exemple dans l'histoire de la Science, Albert Einstein, alors jeune employé de 26 ans à l'Office des Brevets de Berne, introduit coup sur coup dans la théorie physique deux idées fondamentales qui vont entièrement changer le cours de son évolution : celle de la Relativité de l'espace et du temps et celle des quanta de lumière. Je n'insisterai pas ici sur la théorie de la Relativité et sur ses prodigieuses conséquences car je veux concentrer toute mon attention sur les parties de l'œuvre d'Einstein qui ont trait directement au dualisme des ondes et des corpuscules.

En 1887, Hertz avait découvert l'effet photoélectrique, remarquable phénomène consistant essentiellement dans l'expulsion d'un électron par un métal lorsque celui-ci est frappé par un rayonnement. Les lois empiriques de ce phénomène font intervenir d'une façon déterminante la fréquence du rayonnement incident qui se trouve ainsi jouer dans cette affaire un rôle inattendu que les idées alors régnautes sur la nature de la lumière et les interactions entre la matière et le rayonnement étaient totalement incapables d'expliquer. Pendant plus de quinze ans, les physiciens avaient dû, sans d'ailleurs, semble-t-il, s'en préoccuper beaucoup, se contenter de constater cette difficulté sans la résoudre.

Mais pendant ces quinze années un événement inattendu s'était produit dans l'évolution de la Physique théorique. Le problème du « rayonnement noir » préoccupait alors les physiciens : la loi expérimentale donnant la répartition spectrale de l'énergie dans le rayonnement en équilibre thermique avec la matière avait une forme que les conceptions théoriques de l'époque ne permettaient pas d'interpréter. Pour sortir de

cette situation difficile, Max Planck avait, en 1900, essayé d'un remède héroïque ; il avait introduit dans la théorie du rayonnement noir un élément tout nouveau, tout à fait inconnu de la Physique classique : le « quantum d'Action », c'est-à-dire la constante  $h$  qui porte son nom. En supposant qu'il existe dans la matière des électrons susceptibles d'osciller harmoniquement avec une fréquence  $\nu$  autour d'une position d'équilibre, Planck admet que ces électrons ne peuvent donner ou emprunter de l'énergie aux composantes du rayonnement ambiant, avec lesquelles ils sont en résonance, que sous la forme de quantités finies égales à  $h\nu$  : en d'autres termes, le rayonnement ne peut échanger de l'énergie avec les oscillateurs électroniques de même fréquence que sous la forme de grains de valeur  $h\nu$ . Moyennant cette supposition hardie, Planck parvient à retrouver très exactement la loi empirique du rayonnement noir, pierre d'achoppement des théories antérieures. Mais ce brillant succès avait des aspects inquiétants : admettre que l'énergie radiante ne peut être émise et absorbée que par grains, n'est-ce pas implicitement reconnaître que dans une onde lumineuse l'énergie n'est pas répandue d'une façon continue, mais qu'elle est concentrée sous forme de grains, de corpuscules de lumière ? Planck reculait dans une conséquence aussi révolutionnaire de ces propres idées et, craignant qu'elle ne remette en question la structure ondulatoire de la lumière qui paraissait si parfaitement décrite par les théories de Fresnel et de Maxwell, il cherchait à l'éviter à l'aide de conceptions assez bâtarde.

Albert Einstein avait alors l'ardeur de la jeunesse et ne se laissa pas arrêter par de tels scrupules. Hardiment dans son mémoire de 1905, il postule que dans tout rayonnement de fréquence  $\nu$ , l'énergie est concentrée localement sous forme de grains de contenu énergétique égal à  $h\nu$ . Il leur donne alors le nom de « quanta de lumière » qui fut plus tard remplacé, vous le savez, par celui de « photon ». Ana-

lysant alors de la façon la plus simple, à l'aide de cette audacieuse hypothèse, l'échange d'énergie entre lumière et électron qui se produit dans l'effet photoélectrique, Einstein en déduit par un raisonnement qui peut tenir en deux lignes la loi fondamentale de ce phénomène, cette loi qui, malgré sa simplicité, avait jusque-là défié les efforts de tous les théoriciens. Cette extraordinaire réussite, que seule l'hypothèse des quanta de lumière avait rendue possible, réinstallait les corpuscules dans la structure de la lumière et posait à nouveau sous une forme particulièrement aiguë et peu compréhensible la question du dualisme des ondes et des corpuscules. Comme il ne pouvait être question d'abandonner la théorie ondulatoire de la lumière après le succès des idées de Fresnel et de Maxwell et après les interprétations si minutieusement contrôlées qu'elle seule avait pu fournir de tout l'ensemble des phénomènes de l'Optique physique, il fallait donc en revenir de quelque manière à une théorie synthétique réunissant ondes et corpuscules et sans doute un peu analogue à la théorie des Accès de Newton. Remettant tout en question quant à la nature de la Lumière, le génial petit mémoire d'Einstein était comme un coup de tonnerre dans un ciel presque serein et la crise qu'il a ouverte, un demi-siècle plus tard, n'est pas terminée. L'importance de la révolution qu'Einstein introduisait ainsi en Physique théorique ne le cédait en rien à celle qu'allait accomplir quelques mois plus tard son premier grand mémoire sur la Relativité. Les juges scientifiques de Stockholm ne s'y sont pas trompés, eux qui discernèrent en 1922 le prix Nobel de Physique à Albert Einstein non pas pour avoir découvert la théorie de la Relativité, mais pour avoir su interpréter la loi de l'effet photoélectrique.

Dans les dix années qui suivirent 1905, tout en publiant de nombreuses autres recherches sur la Relativité, les fluctuations et le mouvement brownien, Einstein est revenu plu-

sieurs fois, dans de courts mémoires toujours d'une portée très profonde, sur la question des quanta de lumière. En étudiant l'équilibre thermique des molécules d'un gaz et du rayonnement noir dans une enceinte à température uniforme, il a montré que les photons d'énergie  $h\nu$  doivent posséder une quantité de mouvements  $\frac{h\nu}{c}$  ( $c$  étant la vitesse de la lumière dans le vide) et qu'un atome qui émet un photon subit un effet de recul. Cette analyse et d'autres analogues, sur lesquelles, quelques années plus tard, je devais beaucoup réfléchir, montrent le lien étroit et profond qui existe entre les deux grandes découvertes d'Einstein : la Relativité et les quanta de lumière. Sans les idées de la théorie de la Relativité et en particulier sans la loi relativiste de la composition des vitesses et les formules de la Dynamique correspondante, il serait impossible de comprendre les propriétés des quanta de lumière. Le photon ne pouvait trouver sa place que dans une Physique relativiste.

Un autre résultat, fort curieux, établi par Einstein est relatif aux fluctuations d'énergie dans le rayonnement noir. Admettant conformément à l'expérience que la densité moyenne de l'énergie est donnée par la formule de Planck et appliquant la formule générale qui d'après la thermodynamique statistique doit donner les fluctuations autour de cette densité moyenne, il montre que leur expression se divise en deux termes dont l'un traduit la structure corpusculaire du rayonnement tandis que l'autre reflète sa nature ondulatoire. Résultat remarquable où se manifeste d'une manière frappante le dualisme des ondes et des corpuscules en ce qui concerne le rayonnement et qui devait aussi faire bientôt l'objet de mes méditations.

Mais les idées d'Einstein sur les quanta de lumière, malgré leur succès pour l'interprétation de l'effet photoélectrique et malgré les recoupements qui permettaient de les étayer,

n'avaient pas été sans soulever de vives protestations. Des savants illustres tels que Lorentz et Planck lui-même, l'inventeur des quanta, ne pouvaient se résoudre à modifier les idées fondamentales de la théorie ondulatoire et électromagnétique de la lumière et ils multipliaient les objections. Ils n'avaient point de peine à montrer sur des exemples divers combien il était difficile de concilier la conception des ondulacions lumineuses avec celle des grains de lumière, l'explication ondulatoire si bien vérifiée des phénomènes d'interférences et de diffraction avec l'interprétation einsteinienne de l'effet photoélectrique. Les difficultés qu'ils signalaient étaient très réelles, mais elles ne faisaient que souligner l'importance de la crise qui se manifestait dans la théorie de la lumière sans en apporter la solution. Les interférences et la diffraction existent, mais l'effet photoélectrique, lui aussi, existe : allait-on être obligé, pour la première fois dans l'histoire de la Physique, de renoncer à donner une interprétation rationnelle unique de tous les phénomènes de l'Optique ou parviendrait-on finalement à trouver un point de vue synthétique impérieusement réclamé par notre besoin de comprendre ?

Cependant Einstein répondait aux critiques en défendant avec beaucoup de force et de finesse ses idées sur les quanta de lumière. En préparant cette notice, j'ai relu l'article qu'il publia dans la *Physikalische Zeitschrift* en 1909 sous le titre : « Exposé des idées actuelles sur la théorie de la lumière. » Ce remarquable exposé est encore bien instructif à relire aujourd'hui et je voudrais en citer ici quelques passages. Insistant sur le lien profond que j'ai déjà signalé plus haut existant entre la conception des grains de lumière et les idées de base de la théorie de la Relativité, il rappelle que celle-ci conduit à nier l'existence de l'éther et ajoute : « Cela veut dire que l'on ne peut arriver à quelque chose de satisfaisant que si l'on renonce à l'idée d'éther, le champ électro-

magnétique constituant la lumière n'apparaissant plus comme l'état d'un milieu hypothétique, mais comme une construction sui generis sortant de la source et analogue à une émission<sup>1</sup>. » Introduisant des considérations relativistes, Einstein montre que l'émission doit s'accompagner d'une variation de la masse de la source et il en conclut : « La théorie de la Relativité a donc à ce point changé nos idées sur la lumière qu'elle ne nous apparaît plus comme l'ondulation d'un milieu, mais comme quelque chose qui est empruntée à la matière même du corps émissif, ce qui nous rapproche de la théorie corpusculaire de la lumière. » Puis il développe les raisons qui lui paraissent militer en faveur de l'existence des quanta de lumière : il cite notamment le fait que, lorsqu'un électron en venant frapper une anticathode produit l'émission d'un rayonnement X, ce rayonnement est capable de produire dans la matière à une certaine distance de l'anticathode la mise en mouvement d'un électron secondaire, comme si l'énergie perdue sous forme de radiation par le premier électron s'était transportée en bloc, comme un corpuscule, depuis ce premier électron jusqu'au second. Il fait alors une remarque dont on ne saurait surestimer l'intérêt en écrivant : « (Dans la théorie électromagnétique) le phénomène élémentaire de l'émission lumineuse a un caractère irréversible ce qui est, je crois, faux. A ce point de vue, la théorie (corpusculaire) de Newton doit s'approcher davantage de la vérité parce que l'énergie d'une particule lumineuse ne s'épanouit pas indéfiniment dans l'espace, mais peut se retrouver tout entière disponible là où elle est absorbée. » Après avoir rappelé ses travaux sur les fluctuations dans le rayonnement noir, Einstein termine par la remarquable conclusion suivante : « Il me semble que le champ électromagnétique de la lumière comporte des points singuliers comme le champ électrosta-

1. Emission au sens de la théorie de l'émission de Newton. C'est nous qui avons souligné la fin du texte.



tique des électrons, et il n'est pas défendu de croire que les champs entourant ces points singuliers puissent prendre le caractère d'une onde dont l'amplitude dépendrait de la densité de ces points singuliers. On obtiendrait ainsi cette théorie mixte à la fois ondulatoire et corpusculaire que semble réclamer la nature du problème. »

Ce sont là des textes précieux encore bien utiles à méditer aujourd'hui. Ils indiquaient nettement une voie à suivre pour tenter de résoudre l'angoissant problème des ondes et des corpuscules. Mais ils étaient loin de permettre une interprétation claire des phénomènes d'interférences compatible avec l'existence des grains de lumière. Dans la discussion qui suivit son exposé, Einstein proposa d'interpréter les interférences comme un effet d'interactions entre les différents photons d'une même onde. Malheureusement une semblable hypothèse ne tarda pas à être contredite par l'expérience. Dès 1909, Taylor montrait, résultat qui fut confirmé 18 ans plus tard par Dempster et Batho, que l'on obtient les mêmes franges d'interférences avec une lumière faible et une très longue pose qu'avec une lumière intense et une pose courte : en d'autres termes, les franges d'interférences restent les mêmes quand les photons arrivent un par un sur le dispositif interférentiel, ce qui exclut l'idée d'interpréter les interférences par des interactions entre photons. Cette constatation semblait achever de rendre impossible d'obtenir une image physique, compatible avec l'expérience, du dualisme des ondes et des corpuscules et elle a été l'un des arguments les plus forts que l'on a pu donner plus tard pour ne plus attribuer aux ondes qu'un caractère formel et symbolique et ne plus voir en elles qu'une représentation de probabilité.

Mais tandis qu'aux environs de 1920 le problème des ondes et des corpuscules semblait ainsi s'enfoncer de plus en plus dans d'inextricables difficultés, la Mécanique ondulatoire en montrant la nécessité d'associer la propagation d'une onde

au mouvement de tout corpuscule, prouvait tout à coup que le dualisme des ondes et des corpuscules, découvert par Einstein pour le rayonnement dans sa théorie des quanta de lumière, avait en réalité une importance infiniment plus générale et plus fondamentale qu'on aurait pu le croire.

★  
★

C'est ici que je suis obligé de donner, en m'en excusant, un tour un peu plus personnel à mon exposé. Après la fin de la guerre de 1914, j'avais beaucoup réfléchi sur la théorie des quanta et sur le dualisme des ondes et des corpuscules. Ayant beaucoup étudié la théorie de la Relativité et les travaux d'Einstein, j'apercevais un lien étroit entre le dualisme des ondes et des corpuscules et les idées relativistes. J'avais aussi étudié la théorie d'Hamilton-Jacobi dont j'ai parlé plus haut et, la tendance de mon esprit me portant à envisager les problèmes plutôt sous la forme des images physiques intuitives que sous celle des formalismes mathématiques, cette théorie me paraissait indiquer non pas seulement une simple analogie mathématique entre la Dynamique du point matériel et l'Optique géométrique, mais l'existence d'un lien physique profond entre la propagation d'une onde et le mouvement d'un corpuscule. J'étais aussi frappé par la forme des conditions de quantification que l'on avait été amené à admettre pour déterminer les mouvements possibles des électrons à l'intérieur des systèmes de l'échelle atomique : la présence de nombres entiers dans ces conditions me paraissait indiquer qu'elles traduisent l'existence d'un phénomène ondulatoire du type résonance ou interférences accompagnant le mouvement de l'électron.

Une grande lumière se fit alors soudain dans mon esprit. Je fus convaincu que le dualisme des ondes et des corpuscules découvert par Einstein dans sa théorie des quanta de lumière

était absolument général et s'étendait à toute la nature physique et il me parut dès lors certain qu'au mouvement d'un corpuscule quelconque, qu'il soit photon, électron, proton ou autre, est associée la propagation d'une onde. En me servant de considérations relativistes où intervient notamment d'une façon décisive la différence entre la fréquence d'une horloge et la fréquence d'une onde et en me laissant aussi guider par la théorie d'Hamilton-Jacobi, je parvins à donner à mes idées une expression mathématique précise. J'établissais ainsi entre l'énergie d'un corpuscule et la fréquence de l'onde que je lui associais d'une part, entre la quantité de mouvement de ce corpuscule et la longueur d'onde de l'onde d'autre part, des relations fondamentales  $(W = h\nu, p = \frac{h}{\lambda})$  qui contenaient comme cas particulier, quand on les appliquait au photon, les formules de la théorie des quanta de lumière. Du même coup, cette conception nouvelle donnait un sens physique à l'ancienne théorie mathématique d'Hamilton-Jacobi et, par une conséquence d'une grande beauté intellectuelle, permettait d'identifier le principe de Fermat au principe de moindre action de Maupertuis. Elle permettait aussi d'obtenir une première interprétation ondulatoire des conditions de quantification des mouvements électroniques dans les atomes et d'apercevoir les grands traits d'une nouvelle forme de Mécanique statistique qui allait bientôt devenir la statistique quantique de Bose-Einstein.

Tels sont les résultats nouveaux que je publiai dans trois notes parues dans les *Comptes rendus* de notre Académie en septembre 1923. Dans les mois qui suivirent, je m'efforçai de préciser encore mes idées et de les étendre et je les rassemblai dans une rédaction destinée à constituer ma thèse de doctorat. Pour examiner cette thèse, je m'adressai à Paul Langevin qui avait beaucoup étudié la théorie de la Relativité et connaissait bien aussi la question des quanta. Je ne

sais pas exactement quelle impression lui fit mon audacieuse tentative quand il l'examina, mais il se rendit bien compte qu'elle était de nature à intéresser vivement Albert Einstein et il me demanda de lui fournir un second exemplaire dactylographié de ma thèse pour la transmettre à son illustre ami. Einstein ne s'y trompa pas : à la lecture de mon travail, il reconnut tout de suite que la « Mécanique ondulatoire » dont il posait les bases, en généralisant à la réalité physique tout entière le redoutable dualisme des ondes et des corpuscules, était le prolongement naturel de sa théorie des quanta de lumière et qu'elle allait ouvrir à la Physique atomique des horizons entièrement nouveaux. Il écrivit à Paul Langevin pour lui donner son impression et dans sa lettre, employant un style allégorique qui lui était assez familier, il disait en parlant de l'auteur de la thèse : « Il a soulevé un coin du grand Voile<sup>1</sup>. » Cette phrase me fut communiquée par Langevin : venant d'un savant aussi célèbre pour lequel j'avais la plus grande admiration personnelle, elle constituait pour moi dans ma périlleuse tentative le plus grand des encouragements.

Mais Einstein devait bientôt m'en donner un autre. Il avait entrepris pendant l'été de 1924 la publication dans les *Comptes rendus* de l'Académie des Sciences de Berlin d'une étude sur la statistique des particules indiscernables dont M. Bose venait d'indiquer quelques caractéristiques essentielles et dont j'avais moi-même (Einstein l'ignorait alors) montré les relations avec les conceptions de la Mécanique ondulatoire. C'est au cours de ce beau travail qu'Einstein, considérant le cas d'un gaz parfait formé de molécules indiscernables, avait développé tout le formalisme qui a constitué ce que l'on appela désormais la statistique de Bose-Einstein. Or, vers la fin de cette année 1924, Einstein avait eu connais-

1. « Er hat eine Ecke des grossen Schleiers gelüftet. »

sance de ma thèse (que je soutenais en Sorbonne le 25 novembre) dans les conditions que j'ai rappelées plus haut. Très intéressé par les idées qu'elle contenait, il apercevait tout de suite les relations profondes qui existaient entre le point de vue de la Mécanique ondulatoire et le problème qui le préoccupait alors. Aussi faisait-il peu après, le 8 janvier 1925, une nouvelle communication sur la « théorie quantique du gaz idéal monoatomique » dans laquelle après avoir résumé les résultats de mon travail, il montrait avec une extrême pénétration comment ils pouvaient servir à lever les difficultés qu'il avait précédemment rencontrées et à envisager des phénomènes jusque-là inconnus où la nature ondulatoire des particules se manifesterait.

Le monde scientifique suivait alors avec la plus grande attention les travaux d'Einstein qui était à l'apogée de sa gloire. En signalant l'importance de la Mécanique ondulatoire, l'illustre savant a beaucoup contribué à en hâter le développement : sans son intervention, la tentative hardie esquissée dans ma thèse aurait pu rester longtemps inaperçue.

C'est en effet la note d'Einstein de janvier 1925 qui allait inciter certains théoriciens de la Physique à examiner le contenu de ma thèse et qui allait amener M. Erwin Schrödinger, alors Professeur à l'Université de Zürich, à publier au printemps de 1926, cette magnifique série de mémoires où, laissant de côté les conceptions relativistes qui m'avaient initialement guidé, mais serrant de plus près que je ne l'avais fait l'analogie entre mes résultats et la vieille théorie d'Hamilton-Jacobi, il développait d'une façon complète tout le formalisme analytique de la Mécanique ondulatoire, en faisait de remarquables applications notamment au calcul de l'énergie des états stationnaires des systèmes quantifiés et ouvrait ainsi la porte à d'innombrables autres applications et à de magnifiques interprétations sur lesquelles il serait trop long d'insister ici. Et, couronnant ce foudroyant départ de

la nouvelle Mécanique, la découverte aux Etats-Unis au début de 1927 par Davisson et Germer du phénomène de la diffraction des électrons par les cristaux, bientôt confirmée par d'innombrables autres expériences du même genre, prouvait l'existence de l'onde associée à l'électron et apportait une vérification détaillée des conceptions et des formules dont j'avais été le protagoniste.

J'étais naturellement enthousiasmé par ce développement rapide de la Mécanique ondulatoire, mais je restais néanmoins extrêmement préoccupé par le fait que le dualisme des ondes et des corpuscules, dont l'existence et la généralité devenaient chaque jour plus indiscutables, restait entouré d'un véritable mystère. Toutes les difficultés que l'on avait rencontrées antérieurement à propos des quanta de lumière pour parvenir à interpréter la coexistence dans la réalité expérimentale des localisations corpusculaires (dont l'effet photoélectrique était l'exemple type dans le cas de la lumière) et des phénomènes d'interférences et de diffraction se retrouvaient transposées dans la théorie des électrons et des autres particules matérielles et paraissaient tout aussi insurmontables. Peu à peu germaît dans mon esprit une conception synthétique qui me paraissait susceptible de fournir une image « intelligible » du dualisme des ondes et des corpuscules. Cette conception synthétique que l'on voit s'esquisser dans les notes que j'ai publiées dans les Comptes rendus entre 1924 et 1927, m'était certainement, plus ou moins inconsciemment, inspirée par les idées que, tout le long de sa vie, Einstein a développées sur la signification réelle de la notion de corpuscule et sur ses relations avec le concept de « champ », concept que la théorie de la Relativité a toujours cherché à mettre à la base de notre description du monde physique.

Revenant à Einstein, je dois maintenant consacrer un paragraphe à ce qu'il pensait au sujet des corpuscules.

\*  
\*\*

La théorie de la Relativité, tant sous sa forme générale que sous sa forme primitive dite « restreinte », cherche à représenter tout l'ensemble de la réalité physique à l'aide de « champs » c'est-à-dire de grandeurs satisfaisant à certaines équations aux dérivées partielles et variant continûment dans tout l'espace au cours du temps, donc fonctions continues en tout point de l'espace-temps. Mais une telle entreprise ne va pas sans difficultés quand on veut tenir compte de l'existence d'une structure discontinue de la Matière et de l'Électricité. Nous avons vu déjà que pour introduire cette structure discontinue au sein du champ électromagnétique, Lorentz avait été obligé d'introduire dans ses équations du champ des seconds membres où figuraient des termes représentant les densités de charge et de courant électrique et jouant le rôle de sources du champ, et nous avons insisté sur le caractère un peu dissymétrique et bâtard de la synthèse ainsi obtenue. Sans doute avec un peu de répugnance intérieure, Einstein s'était engagé dans la même voie quand il avait bâti, dans le cadre de la Relativité générale, sa célèbre théorie de la gravitation ; il en avait, en effet, écrit l'équation générale sous la forme bien connue :

$$R_{ik} - \frac{1}{2} g_{ik} R = \kappa T_{ik}$$

où l'on voit, comme dans les équations de Lorentz, le premier membre exprimé à l'aide des grandeurs de champ (qui sont ici les 10 composantes  $g_{ik}$  du tenseur métrique) tandis qu'au second membre apparaissent les composantes du tenseur énergie-quantité de mouvement qui jouent le rôle de sources pour le champ de gravitation.

Mais il n'était aucunement satisfait de cette manière

d'exprimer les relations entre la matière et le champ. Un jour il a même écrit en parlant de l'équation que je viens de rappeler la phrase assez amusante suivante : « Elle (cette équation) ressemble à un édifice dont une aile (le premier membre) serait bâtie en marbre fin tandis que l'autre (le second membre) serait en bois de qualité inférieure. » Et sans aucun doute pensait-il la même chose des équations de Lorentz.

Sous quelle forme concevait-il donc la véritable manière de se représenter la relation existant entre les champs et les corpuscules de matière ou d'électricité ? Il l'a exprimée bien des fois en des termes qui me semblent être allés en se précisant au cours de sa maturité.

Son idée essentielle a été que la totalité de la réalité physique (y compris les corpuscules) devait pouvoir être décrite par des solutions appropriées des équations du champ. Dans la théorie idéale qu'il rêvait, il n'y avait pas place pour des termes représentant des sources ou pour des solutions à singularité correspondant à l'existence de telles sources<sup>1</sup>. La raison en est, disait-il, que si l'on n'exclut pas formellement les sources de champ et les solutions à singularité, les équations différentielles du champ ne suffisent pas à déterminer complètement le champ total. Pour lui, par conséquent, rien dans les équations du champ ne devait directement traduire l'existence des corpuscules ; c'est ce qu'il exprimait catégoriquement en écrivant<sup>2</sup> : « Ce qui me paraît certain, c'est qu'il ne faut pas qu'il y ait dans les fondements d'une théorie cohérente du champ un concept quelconque concernant les corpuscules. Toute la théorie doit être basée uniquement sur

1. Telle paraît du moins avoir été l'opinion arrêtée d'Einstein à la fin de sa vie. Auparavant il avait parfois envisagé la représentation des corpuscules par des singularités du champ.

2. *Conceptions scientifiques morales et sociales* (Flammarion. Traduction Solovine, 1952), p. 86.

des équations aux dérivées partielles libres de singularités. »

Dans un autre article<sup>1</sup>, analysant la théorie de Maxwell-Lorentz, il la critiquait en disant : « La combinaison de l'idée d'un champ continu avec celle de points matériels discontinus dans l'espace apparaît comme contradictoire. Une théorie cohérente du champ exige que tous les éléments qui y figurent soient continus, non seulement dans le temps, mais aussi dans l'espace et en tous les points de l'espace. De là vient que la particule matérielle n'a pas de place comme concept fondamental dans une théorie du champ. Ainsi, même indépendamment du fait que la gravitation n'y est pas incluse, la théorie de Maxwell ne peut être considérée comme une théorie complète. »

Cette attitude d'Einstein ne signifiait nullement qu'il niait l'existence des corpuscules : il avait trop contribué lui-même au développement de la théorie atomique de la matière pour ne pas savoir, mieux que tout autre, que l'existence des corpuscules est un fait incontestable. Mais il pensait que le corpuscule n'est pas un élément qui se surajoute au champ pour ainsi dire de l'extérieur, qu'il doit bien plutôt appartenir à la structure même du champ et en constituer une sorte d'anomalie locale. Pour lui, les champs réalisés dans la nature (qu'ils fussent électromagnétiques, gravifiques ou autres) devaient toujours comporter de très petites régions où les valeurs du champ deviendraient extrêmement grandes et qui répondraient à notre notion usuelle de corpuscules. On a donné à ce type de champ le nom expressif de « champ à bosses » (*bunched field*).

Einstein a exprimé cette manière de concevoir les corpuscules avec une très grande clarté. Laissons-lui encore la parole<sup>2</sup> : « La matière qui produit des impressions sur nos sens n'est réellement qu'une grande concentration d'énergie

1. *Loc. cit.*, p. 133.

2. *Loc. cit.*, p. 139.

dans des espaces très petits. Nous pourrions donc regarder la matière comme constituée par des régions de l'espace où le champ est extrêmement intense... Une pierre lancée est, de ce point de vue, un champ qui varie et où les états de grande intensité du champ se déplacent dans l'espace avec la vitesse de la pierre. Il n'y aurait pas de place dans cette nouvelle physique à la fois pour le champ et pour la matière *car le champ y serait la seule réalité*... Notre problème ultime serait donc de modifier les lois du champ de telle sorte qu'elles restent encore valables dans les régions de l'espace où l'énergie est énormément concentrée. » Notons, en passant, que les équations auxquelles Einstein fait allusion dans cette dernière phrase sont sans doute des équations non linéaires analogues à celles qui s'étaient introduites d'elles-mêmes dans la théorie de la gravitation et dont il jugeait probablement l'intervention indispensable dans toutes les théories du champ.

Einstein connaissait la difficulté de la mise en œuvre de la conception qu'il prônait et reconnaissait n'avoir pu construire un champ à bosses libre de singularité susceptible de représenter un corpuscule (sauf peut-être la solution très curieuse qu'il avait obtenue avec M. Rosen dans la théorie relativiste du champ statique de gravitation à symétrie sphérique), mais il ajoutait : « Cependant une chose est certaine : si une théorie du champ peut aboutir à une représentation de corpuscules libre de singularités, alors le comportement de ces corpuscules sera uniquement déterminé par les équations différentielles du champ. » Et pour lui c'était la raison essentielle qui imposait la représentation des corpuscules par les champs à bosses.

Le désir d'Einstein d'arriver à incorporer le corpuscule dans le champ devait bientôt le conduire à rechercher et à obtenir un très important résultat. Dans la théorie de la Relativité générale, on admet en dehors des équations du champ un

postulat qui en est indépendant : le mouvement d'un point matériel dans l'espace-temps rendu courbe par la présence du reste de la matière doit s'effectuer suivant une géodésique de cet espace-temps. Toujours guidé par l'idée que toute l'évolution du monde matériel doit être entièrement déterminée par les seules équations du champ, Einstein a cherché à démontrer à partir des seules équations  $R_{ik} - \frac{1}{2} g_{ik} R = 0$  dérivées de leur second membre en  $T_{ik}$  que, s'il existe une région extrêmement petite où le champ prend des valeurs extrêmement élevées, le mouvement dans l'espace de cette petite région au cours du temps est nécessairement représentée par une ligne d'Univers qui est une géodésique de l'espace-temps... Il put donner une démonstration de cet important résultat en 1927 dans un mémoire écrit en collaboration avec M. Grommer : une démonstration analogue avait d'ailleurs été donnée dès l'année précédente par M. Georges Darmon. Ce théorème, dont on a pu donner depuis des démonstrations plus complètes et plus élégantes, montre bien, conformément aux idées d'Einstein, que, si l'on considère les éléments de la matière comme étant des régions de forte concentration du champ, le mouvement de ces éléments dans un champ de gravitation est entièrement déterminé par les seules équations du champ et que, d'ailleurs, il s'effectue bien en accord avec le postulat sur les lignes géodésiques usuellement admis en Relativité générale, postulat qui se trouve ainsi devenir inutile en tant qu'hypothèse complémentaire.

\*  
\*\*

J'ai dit plus haut qu'entre 1924 et 1927, j'avais peu à peu aperçu une interprétation des conceptions de la Mécanique ondulatoire, alors en plein développement, qui me paraissait

susceptible de fournir une image claire et intelligible du dualisme des ondes et des corpuscules. Cette interprétation m'avait certainement été plus ou moins consciemment suggérée par les idées d'Einstein sur la relation des corpuscules et des champs : on s'en rendra compte aisément plus loin.

Dans les travaux si remarquables qu'il avait consacrés à développer le formalisme de la Mécanique ondulatoire, M. Schrödinger était parti d'une extrapolation, au delà des limites de validité de l'Optique géométrique, de la théorie optico-mécanique d'Hamilton-Jacobi : il avait ainsi pu déterminer l'équation aux dérivées partielles à laquelle doit satisfaire la fonction représentant l'onde associée à un électron, fonction que depuis lors on a toujours l'habitude de désigner par la lettre grecque  $\Psi$ . Il avait alors admis, et on l'a toujours fait ensuite, que la fonction  $\Psi$  devait être une solution régulière de l'équation des ondes, analogue par conséquent aux ondes continues des théories ondulatoires de la Physique classique, de l'Optique de Fresnel et de Maxwell par exemple. Mais cette hypothèse, qui paraissait si naturelle, entraînait de graves conséquences car, dans une onde continue, tous les points jouent un rôle analogue et, au sein d'une telle onde, il n'y a rien qui permette de définir la position instantanée, ni le mouvement d'un corpuscule et par conséquent de lui attribuer une trajectoire. La considération exclusive des ondes continues paraissait donc exclure, *a priori*, toute possibilité d'obtenir une représentation synthétique claire du dualisme des ondes et des corpuscules.

L'emploi de l'onde continue permettait cependant de construire une sorte d'image hydrodynamique de la propagation de l'onde que M. Madelung fut le premier à signaler. Elle consiste à considérer un fluide fictif dont la densité serait égale en tout point de l'espace et à tout instant à l'intensité de l'onde continue (c'est-à-dire à la grandeur  $|\Psi|^2$ ) et qui s'écoulerait en se conservant, au fur et à mesure que

L'onde se propage, le long de « lignes de courant » qu'il est aisé de définir analytiquement. Cette image hydrodynamique avait l'avantage d'être en accord avec un fait fort important que M. Max Born venait de mettre en évidence dans ses recherches, savoir qu'en Mécanique ondulatoire la grandeur  $|\Psi|^2$  donne en chaque point et à chaque instant la « probabilité de présence » du corpuscule. Néanmoins, comme elle devait être applicable à la description du mouvement d'un *seul* corpuscule, elle présentait ce caractère gênant de mettre toutes les lignes de courant sur un pied d'égalité et de ne point permettre de considérer l'une d'entre elles comme étant la trajectoire du corpuscule. Elle conduisait donc presque inévitablement à considérer le corpuscule, pourtant unique, comme décrivant à la fois toutes les lignes de courant, simultanément, mais avec des probabilités différentes. Peu à peu on était ainsi entraîné vers la conclusion paradoxale que la statistique devait nécessairement s'introduire dans l'étude du mouvement d'un seul corpuscule.

Cette conception, qui gagnait progressivement du terrain parmi les théoriciens de la Physique, ne me semblait pas satisfaisante : elle me paraissait devoir aboutir à des conclusions difficilement acceptables. Cherchant à l'éviter, j'eus alors une idée assez subtile à laquelle je donnai le nom de « théorie de la double solution ». Mon raisonnement était le suivant : Puisque l'onde régulière envisagée par la Mécanique ondulatoire usuelle donne par ses lignes de courant une représentation exacte d'un ensemble de trajectoires que le corpuscule peut parcourir, on peut admettre qu'elle conduit à une représentation statistique tout à fait exacte, ce qui explique les succès que l'on obtient en l'employant ; mais, et c'est là une idée sur laquelle Einstein devait bien souvent insister par la suite, il paraît bien difficile de penser qu'elle fournisse à elle seule une représentation *complète* de la réalité physique puisqu'elle ne contient aucun élément qui

permette d'y retrouver le corpuscule. Convaincu que la véritable solution du problème des ondes et des corpuscules devait permettre de se représenter le corpuscule comme une sorte d'accident local incorporé dans la structure d'une onde, j'en arrivais à me dire que la réalité physique ne pouvait pas être représentée par des solutions régulières de l'équation des ondes, mais qu'elle devait l'être bien plutôt par d'autres solutions de cette même équation des ondes que je désignais par  $u$  (pour les distinguer des solutions régulières  $\Psi$ ) comportant une singularité en général mobile que l'on pourrait assimiler au corpuscule.

J'avais pu assez rapidement apercevoir entre l'onde régulière et l'onde singulière une relation (le théorème de guidage) qui m'était apparue (et qui m'apparaît encore aujourd'hui) comme tout à fait importante. A l'heure actuelle, il m'est possible d'en donner l'énoncé général suivant : « Supposons qu'il soit possible de coupler les solutions de l'équation des ondes de façon qu'à toute solution régulière corresponde une solution à singularité mobile *qui possède les mêmes lignes de courant* : alors la singularité mobile suivra nécessairement l'une des lignes de courant. » Ce résultat me paraissait jeter beaucoup de lumière sur le rôle respectif des ondes régulières et des ondes à singularité : puisque les deux solutions couplées admettaient les mêmes lignes de courant, la solution régulière, bien que fictive, devait donner une représentation statistique exacte des mouvements, mais la solution à singularité pouvait seule donner une description complète du phénomène individuel parce qu'elle comportait le mouvement d'une singularité sur l'une des lignes de courant. Il me semblait en résulter assez aisément que le  $|\Psi|^2$  devait bien donner la probabilité de présence de la singularité en un point quand on ignorait laquelle des lignes de courant elle parcourait.

On pouvait m'objecter que ma théorie faisait intervenir une

solution à singularité des équations du champ  $u$  et qu'elle n'était donc pas en accord avec les conceptions d'Einstein qui, pour de très fortes raisons, ne voulait pas admettre de solution à singularité. En réalité, j'ai reconnu dans ces dernières années que cette difficulté n'était pas réelle : on peut très bien, en effet, substituer sans inconvénient à l'onde  $u$  à singularité ponctuelle, une onde  $u$  présentant une « bosse » au sens d'Einstein, c'est-à-dire comportant une très petite région où le champ  $u$  aurait des valeurs très élevées, mais non infinies : la relation du guidage reste exacte pour le mouvement de la bosse. On peut même supposer si l'on veut, qu'à l'intérieur de la bosse l'équation de l'onde  $u$  ne coïncide plus avec l'équation linéaire des ondes  $\Psi$ , mais qu'elle a une forme plus compliquée, par exemple non linéaire. On se rend compte alors aisément que, l'onde  $u$  pouvant être conçue comme un champ à bosse, la représentation du corpuscule fournie par la théorie de la double solution coïncide exactement avec l'image du corpuscule préconisée par Einstein. Mais comme ici, en dehors de la bosse, le champ  $u$  a un caractère ondulatoire, on obtient aussi une image très claire du dualisme onde-corpuscule dans laquelle le corpuscule apparaît bien comme un accident local incorporé dans une onde.

Il y avait donc dans ces perspectives nouvelles de quoi me réjouir. Malheureusement l'établissement sur des bases véritablement rigoureuses et satisfaisantes de la théorie de la double solution se heurtait à toutes sortes de difficultés les unes mathématiques, les autres physiques. J'étais bien loin de pouvoir les résoudre et j'avais dû me contenter de donner en mai 1927 dans le *Journal de Physique* le résumé des résultats que j'avais pu obtenir. Mais je sentais qu'ils étaient très imparfaits.

Dans ce printemps de 1927, où je m'efforçais de développer une interprétation de la Mécanique ondulatoire et du dua-

lisme des ondes et des corpuscules qui me paraissait claire et conforme aux idées, qui m'avaient si souvent guidé, d'Albert Einstein, une tout autre manière de voir se développait grâce aux travaux de MM. Niels Bohr et Max Born et de leurs brillants élèves MM. Heisenberg et Dirac. Elle était, nous l'avons vu plus haut, la conséquence en quelque sorte inévitable de l'emploi exclusif de l'onde régulière. Elle paraissait aussi être imposée par la découverte des relations d'incertitude dont M. Heisenberg venait de montrer qu'elles résultaient nécessairement du formalisme de la Mécanique ondulatoire. Contrairement à la tendance de M. Schrödinger qui aurait voulu ne conserver en Mécanique ondulatoire que la notion d'onde régulière à l'exclusion de celle de corpuscule, la nouvelle interprétation conservait à la fois les idées d'onde et de corpuscule, mais en ne leur laissant plus qu'une sorte d'existence fantomatique et ne cherchant aucunement à les réunir, comme je le tentais, dans le cadre d'une représentation spatio-temporelle claire. Le corpuscule n'a plus pour elle ni position, ni vitesse, ni trajectoire bien déterminées : il peut seulement se révéler, quand on fait une observation ou une mesure, comme ayant telle position, telle énergie ou telle quantité de mouvement. Il possède pour ainsi dire à chaque instant toute une série de positions et d'états de mouvement possibles qui peuvent s'actualiser au moment de la mesure avec certaines probabilités. A côté de ce corpuscule à l'aspect fuyant qui n'est plus un objet bien défini dans l'espace et dans le temps, l'onde régulière  $\Psi$  n'a plus du tout, elle non plus, le caractère d'une réalité physique que possédaient les ondes de la physique classique : elle n'est plus qu'une fonction mathématique servant à représenter les probabilités respectives des divers résultats des observations ou mesures faites sur le corpuscule.

La nouvelle interprétation était très révolutionnaire : elle renonçait aux descriptions précises dans le cadre de l'espace



et du temps, elle abandonnait la causalité et le déterminisme des phénomènes physiques. Bientôt M. Bohr allait la résumer en introduisant la curieuse, mais un peu trouble, notion de « complémentarité » suivant laquelle le corpuscule et l'onde sont des « aspects complémentaires de la réalité » qui se complètent en s'excluant, chacun de ces deux aspects ne se manifestant dans l'expérience qu'au détriment de l'autre. En s'orientant vers de telles conceptions, on s'éloignait évidemment complètement de la représentation synthétique des corpuscules et des champs dans le cadre de l'espace et du temps qu'avait rêvée Einstein.

★  
★★

A la fin d'octobre 1927, eut lieu à Bruxelles le 5<sup>e</sup> Conseil de Physique Solvay consacré à la Mécanique ondulatoire et à son interprétation. J'y fis un exposé de ma tentative, mais, pour diverses raisons, je le fis sous une forme un peu tronquée en insistant principalement sur l'image hydrodynamique. Mon rapport ne fut guère goûté : groupés autour de MM. Bohr et Born, le groupe très actif des jeunes théoriciens qui comprenait MM. Pauli, Heisenberg et Dirac était entièrement acquis à l'interprétation purement probabiliste dont ils étaient les auteurs. Quelques voix s'élevaient cependant pour combattre ces idées nouvelles. H. A. Lorentz affirmait sa conviction qu'il fallait conserver le déterminisme des phénomènes et leur interprétation par des images précises dans le cadre de l'espace et du temps, mais son intervention très remarquable n'apportait aucun élément constructif. M. Schrödinger préconisait l'abandon complet de la notion du corpuscule pour ne conserver que celle des ondes régulières du type classique, mais j'étais convaincu qu'une telle tentative ne pouvait aboutir.

Qu'allait dire Einstein dans ce débat dont pouvait sortir la solution du redoutable problème qui l'avait tant préoccupé

depuis sa géniale intuition sur les quanta de lumière ? A mon grand désappointement, il ne dit presque rien. Une seule fois il prit la parole pendant quelques minutes : rejetant l'interprétation probabiliste, il lui fit en termes très simples une objection qui, je le crois, a conservé un grand poids. Puis il retomba dans son mutisme. Dans des conversations privées, il m'encourageait dans mes tentatives sans cependant se prononcer sur la théorie de la double solution qu'il ne semblait pas avoir étudiée de près. Il affirmait que la Physique quantique s'engageait dans une mauvaise voie et, en face de cette évolution, il semblait découragé. Un jour, il me dit : « Ces problèmes de Physique quantique deviennent trop complexes. Je ne peux plus me mettre à étudier des questions aussi difficiles : je suis trop vieux ! » Phrase bien étrange dans la bouche de ce savant illustre qui n'avait alors que 48 ans et dont la pensée audacieuse ne passait pas pour se laisser aisément décourager par la difficulté des problèmes !

Je revins du Conseil Solvay très décontenancé par l'accueil qu'avaient reçu mes idées. Je ne voyais pas la manière de surmonter les obstacles qu'elles rencontraient et les objections qui m'avaient été faites. J'avais l'impression que le courant qui portait la presque unanimité des théoriciens qualifiés à adopter l'interprétation probabiliste était irrésistible. Je me ralliai donc à cette interprétation et je la pris comme base de mes enseignements et de mes recherches. La seule tentative qui avait été faite (la seule peut-être qui pouvait être faite) pour résoudre le problème des ondes et des corpuscules dans le sens que souhaitait Einstein semblait avoir définitivement échoué.

Einstein cependant ne se rendait pas. Bientôt émigré aux Etats-Unis, il ne cessait d'adresser dans tous ses écrits de vives critiques à l'interprétation purement probabiliste de la Mécanique ondulatoire. Il y eut des escarmouches assez vives entre M. Bohr et lui, notamment en 1935 où Einstein, avec la colla-

boration de M. Rosen, écrivit dans la *Physical Review* un article développant une nouvelle objection contre l'opinion dominante à laquelle M. Bohr riposta par une réponse dans le même périodique.

Dans cette joute, Einstein se trouvait presque isolé n'ayant guère comme compagnon de lutte que M. Schrödinger auteur, lui aussi, de nombreuses et très fines objections contre l'interprétation probabiliste. Mais l'attitude d'Einstein restait purement négative : il rejetait la solution de l'énigme des ondes et des corpuscules qui avait prévalu, mais il n'en proposait aucune autre, ce qui évidemment affaiblissait sa position. Il se consacrait alors à ses recherches sur les théories unitaires qui, prolongeant l'effort réalisé par le développement de la Relativité générale, cherchent à englober le champ de gravitation, le champ électromagnétique et éventuellement d'autres champs dans une image unique grâce à une complication adéquate de la géométrie de l'espace-temps. Ces théories unitaires, qui avaient pris successivement dans l'esprit d'Einstein des formes assez diverses, présentèrent à la fin de sa vie un aspect très intéressant qui a été très brillamment étudié en France dans ces dernières années par madame Tonnelat et son école.

Mais, même si ces très intéressantes tentatives unitaires devaient continuer à se développer, elles ne sauraient aucunement conduire, du moins sous leur forme actuelle, à une représentation exacte de la réalité physique puisqu'elles ne contiennent pas les quanta. Einstein le savait mieux que tout autre, lui qui avait découvert les quanta de lumière ! Il se rendait très bien compte qu'on pouvait lui reprocher d'avoir abandonné tout travail constructif dans le domaine des quanta et dans la dernière lettre qu'il m'a adressée le 15 février 1954, il me disait assez drôlement : « Je dois ressembler à une antruche qui sans cesse cache sa tête dans le sable relativiste pour n'avoir pas à regarder en face ces vilains quanta. »

Cependant la controverse s'éteignait lentement. La plupart des physiciens admettaient sans discussion l'interprétation probabiliste, les uns parce qu'ils la trouvaient réellement satisfaisante, les autres, plus pragmatistes, parce que le formalisme de la Mécanique quantique leur paraissait fournir tous les instruments qui leur étaient nécessaires pour leurs prévisions et qu'ils ne se souciaient plus guère de savoir quelle réalité pouvait bien se cacher derrière le rideau des équations.

Le temps passait et, en 1949, Albert Einstein atteignait sa soixante-dixième année. A cette occasion, comme il est souvent d'usage en pareil cas, un livre jubilaire fut publié aux Etats-Unis. Il était intitulé *Einstein philosopher and scientist*<sup>1</sup> et contenait des articles dus à un grand nombre de savants émules ou élèves d'Einstein. Quand on feuillette cet ouvrage, on éprouve très vite une grande surprise : on s'attendait à y trouver des hommages unanimes au génial savant qui a découvert la Relativité et les quanta de lumière et l'on a l'étonnement d'y lire, dans un grand nombre d'articles, des critiques très vives et même souvent acerbes adressées au physicien, que volontiers l'on qualifierait d'attardé, qui n'avait jamais voulu admettre l'interprétation probabiliste de la Physique quantique, ni se laisser séduire par les beautés de la complémentarité. Ces attaques attristèrent certainement Einstein : il disait, paraît-il, dans l'intimité : « Cet ouvrage n'est pas pour moi un livre jubilaire, c'est ma mise en accusation. »

Mais quand on est mis en accusation, on a le droit de se défendre et Einstein a usé de ce droit. A la fin du volume, on trouve un article signé de lui où il donne, à nouveau, une série d'arguments pour justifier son point de vue. Plus que jamais, il affirme que, si l'interprétation probabiliste constitue une théorie *statistique* exacte, elle ne donne certainement

1. Paul Arthur Schilpp, éditeur, Evanston, Illinois.

pas une description *complète* de la réalité physique. A l'aide de nombreux exemples, il cherche à montrer à quelles difficultés (il eût dit volontiers à quelles absurdités) on était conduit si l'on veut attribuer au formalisme actuel de la Mécanique quantique le sens d'une telle description complète. L'article très beau est l'un des plus remarquables qui soient sortis de la plume d'Einstein à la fin de sa vie.

\*  
\*\*

Au moment où paraissait le livre jubilaire, dont je viens de parler, je faisais à l'Institut Henri-Poincaré des cours où j'exposais les questions relatives à l'interprétation de la Mécanique ondulatoire que depuis d'assez longues années je n'avais pas reprises dans le détail. A cette occasion, j'avais revu les objections faites par Einstein et par M. Schrödinger et les réponses qui leur avaient été faites notamment par M. Bohr. Je concluais toujours, comme depuis des années, en faveur de l'interprétation probabiliste, mais cependant je ressentais une certaine impression de malaise : les objections me paraissaient fortes et les réponses pas toujours très claires. Peu à peu et presque à mon insu, l'adhésion que, vingt-cinq ans auparavant, je m'étais cru contraint d'apporter à l'interprétation probabiliste et à l'idée de complémentarité se trouvait ébranlée.

C'est alors, que dans l'été de 1951, j'eus connaissance des travaux qu'allait publier aux Etats-Unis M. David Bohm où il reprenait l'image hydrodynamique et, en les commentant et les approfondissant sur plusieurs points, quelques-unes des idées que j'avais émises en 1927. Cette publication ramena mon attention sur l'autre voie d'interprétation où je m'étais alors engagé. Peu après, M. Jean-Pierre Vigié qui travaillait à l'Institut Henri-Poincaré me fit observer l'analogie qui existait entre mon ancien théorème du guidage et le théorème d'Einstein-Darmonis sur le mouvement d'un corpuscule dans

un champ de gravitation : dans un cas comme dans l'autre, le mouvement du corpuscule est entièrement déterminé par les équations différentielles du champ dont il fait partie. En 1927, je n'avais malheureusement pas remarqué cette analogie : si je l'avais fait, elle m'aurait sans doute beaucoup encouragé à persévérer dans la voie de la double solution.

Depuis quatre ans, mon attention a été ainsi très fortement attirée de nouveau vers l'interprétation de la Mécanique ondulatoire par la double solution abandonnée depuis vingt-cinq ans et je me suis remis au travail dans cette direction avec quelques jeunes collaborateurs dont le principal est M. Vigié. Ce n'est pas le lieu ici de rappeler les résultats que nous avons pu obtenir. Je dirai seulement que certaines des difficultés que j'avais rencontrées en 1927 ont pu, à mon avis, être surmontées, mais que beaucoup d'autres ne le sont pas encore.

Einstein, dans sa retraite de Princeton, a suivi avec intérêt les travaux de M. Bohm et ceux de l'Institut Henri-Poincaré qui répondaient si exactement à ses tendances. Il gardait cependant cette attitude réservée, cette sorte de timidité devant la question des quanta, qui depuis 1925, l'avait empêché de faire et même d'encourager explicitement toute tentative de solution du problème des ondes et des corpuscules. Dans le livre jubilaire consacré en 1953 à M. Max Born, il élevait même quelques objections contre la formule du guidage, objections que personnellement je crois possible d'écarter.

Cependant, il était certainement très heureux de voir repaître une certaine résistance à l'interprétation purement probabiliste de la Physique quantique à laquelle il n'avait jamais cru. Il m'envoyait des encouragements et me faisait même parvenir une de ses plus récentes photographies avec une dédicace.

Dans une lettre privée<sup>1</sup> il écrivait : « Il est réel que mes collègues parisiens, dans leurs travaux scientifiques des années récentes, se tiennent beaucoup plus près de moi que les théoriciens américains. » Et, faisant allusion au fait que la presque unanimité des physiciens adhéraient à l'interprétation probabiliste, il ajoutait avec ironie : « Il m'est difficile de comprendre combien, particulièrement dans les périodes de transition et d'incertitude, la mode joue en science un rôle à peine inférieur à celui qu'elle joue dans l'habillement des femmes. L'homme est vraiment un animal très sensible à la suggestion en toutes choses et pas seulement en politique. »

Messieurs,

Albert Einstein a achevé sa vie à Princeton, le 18 avril dernier dans la petite maison où il vivait, très retiré, depuis de longues années. Dans sa jeunesse, à l'époque où il multipliait les preuves de son fulgurant génie, il avait été le premier, dans sa théorie des quanta de lumière, à reconnaître au sein du rayonnement le dualisme des ondes et des corpuscules. Il avait tout de suite aperçu la difficulté de trouver une solution claire du redoutable problème, intimement apparenté à l'existence des quanta, que ce dualisme posait. Toute sa vie, cette question devait le préoccuper. Dans la maturité de son âge, il avait vu triompher dans l'esprit des physiciens une solution de l'énigme qui n'était point celle qu'il souhaitait ; jamais il ne lui avait donné son approbation. A la fin de son existence, cette attitude de protestation avait fait de ce grand savant, à qui les voies les plus importantes de la Physique contemporaine devaient leur origine, un chercheur presque isolé qui paraissait rester à l'écart du mouvement scientifique de son temps.

S'il avait vécu davantage, aurait-il vu triompher, dans

1. Citée par M. André George dans un article paru dans la Revue Synthèses (N° de mai-juin 1953).

la direction indiquée par la théorie de la double solution, une interprétation du dualisme des ondes et des corpuscules plus conforme à ses vues ? Il serait, à l'heure actuelle, imprudent de l'affirmer trop catégoriquement. Une chose cependant me paraît certaine : si une interprétation de ce genre parvenait à surmonter entièrement les obstacles qui s'opposent encore à son adoption, elle fournirait du dualisme des ondes et des corpuscules une image tout à fait en accord avec celle qu'Einstein avait toujours souhaitée et entrevue. Et cette image serait infiniment plus claire et plus intelligible que celle que nous offre aujourd'hui l'assez nébuleuse conception de la complémentarité.

Mais le problème est bien difficile. Que d'efforts il faudrait encore pour en arriver là ! Devant l'esprit humain qui l'interroge, la Nature défend jalousement ses secrets.

Le grand Voile est bien lourd à soulever !