L'interprétation statistique de la mécanique quantique - (Conférence Nobel, 1954.)

Max Born, E. Bauer

Tome 16. N° 10. Octobre 1955.

LE JOURNAL DE PHYSIQUE

ET

LE RADIUM

L'INTERPRÉTATION STATISTIQUE DE LA MÉCANIQUE QUANTIQUE

(Conférence Nobel, 1954.)

Par Max BORN
(traduit par E. Bauer).

Sommaire. — Histoire de la Mécanique Quantique des années 1920 à 1928. Discussion de quelques problèmes philosophiques posés par la théorie des quanta.

Les travaux pour lesquels j'ai eu l'honneur de recevoir le prix Nobel de l'année 1954 ne contiennent nulle découverte de nouveaux phénomènes naturels, mais le fondement d'une manière nouvelle de penser sur les phénomènes naturels. Ce mode de pensée s'est fait accepter si bien en Physique expérimentale et théorique qu'il ne semble guère possible d'en dire encore quelque chose qui n'ait été maintes fois déjà dite. Et pourtant il y a certains points de vue que je voudrais développer ici en cette occasion pour moi si solennelle.

Le premier point est le suivant : les travaux de l'école de Göttingen, que je dirigeais alors (1926-1927), contribuèrent à dénouer une crise intellectuelle, suscitée dans notre science par la découverte, en 1900, du quantum d'action de Planck. Aujourd'hui la Physique passe par une crise analogue, je ne pense pas ici à ses implications politiques et économiques résultant de la maîtrise d'une puissance naturelle formidable, mais aux problèmes de logique et de théorie de la connaissance que pose la Physique nucléaire. Il est peut-être bon en une telle époque de se rappeler ce qui s'est passé autrefois dans un cas analogue, d'autant plus qu'une pareille crise ne manque pas d'un certain caractère dramatique.

En second lieu, quand j'ai affirmé que les physiciens avaient accepté le mode de pensée que nous avions développé à cette époque, ce n'était pas tout à fait exact : il y a quelques exceptions très remarquables et justement parmi les hommes qui ont contribué le plus à l'édification de la théorie quantique. Planck lui-même est resté jusqu'à sa mort parmi les sceptiques.

Einstein, de Broglie et Schrödinger n'ont pas pas cessé d'insister sur ce que l'interprétation statistique de la Mécanique quantique avait de peu satisfaisant, de réclamer un retour aux conceptions de la Physique classique newtonienne et de proposer des moyens d'y arriver sans contredire aux faits expérimentaux. Il est impossible de ne pas écouter des voix d'un tel poids. Niels Bohr s'est donné beaucoup de mal pour réfuter leurs objections. Moi-même, j'y ai réfléchi et je crois pouvoir contribuer un peu à éclaircir la situation. Il s'agit là d'un domaine frontière entre Physique et Philosophie, si bien que ma conférence de Physique sera teintée en partie d'Histoire, en partie de Philosophie, ce pour quoi je sollicite votre indulgence.

Tout d'abord je veux raconter comment sont nées la Mécanique quantique et son interprétation statistique. Au début des années 20 tous les physiciens étaient convaincus de la validité de l'hypothèse de Planck d'après laquelle, dans les phénomènes oscillatoires de fréquence déterminée ν (par exemple dans les ondes lumineuses), l'énergie apparaît en quanta finis de grandeur $h\nu$. Elle rendait compte d'innombrables faits d'expérience qui tous conduisaient à la même valeur de la constante de Planck h. En outre l'affirmation d'Einstein, que les quanta de lumière possèdent une impulsion $\frac{h\nu}{c}$ (c étant la vitesse de la lumière), était bien vérifiée par l'expérience (par exemple par l'effet Compton). Tout cela signifiait une renaissance de la théorie corpusculaire de la lumière valable pour un certain complexe de phénomènes. D'autres processus s'expliquaient par la théorie ondulatoire. Les physiciens s'habituèrent à ce dualisme et apprirent à en tirer un certain parti.

En 1913 Niels Bohr avait résolu à l'aide de la théorie des quanta l'énigme des spectres de raies : du même coup il avait expliqué l'étonnante stabilité des atomes, la structure de leurs couches électroniques et, dans ses grands traits, le système périodique des éléments. Parmi ses hypothèses voici la plus importante pour ce qui va suivre : Un système atomique ne peut exister dans tous les états possibles que prévoit la Mécanique et qui forment un continu, mais seulement dans une série d'états « stationnaires » discrets. Lors d'une transition de l'un à l'autre la différence $E_m - E_n$ des énergies est émise ou absorbée sous forme d'un quantum de lumière $h\nu_{mn}$ (suivant que E_m est plus grand ou plus petit que E_n).

On obtient ainsi une interprétation énergétique de la loi fondamentale de la spectroscopie que W. Ritz avait découverte quelques années plus tôt. On peut en donner une représentation concrète en inscrivant deux fois dans un tableau les niveaux d'énergie des états stationnaires, verticalement et horizontalement : il en résulte un schéma quadratique :

	E_1	E_2	E_3	...
E_1	11	12	13	...
E_2	21	22	23	...
E_3	31	32	33	...
..	..	..	..	...
..	..	..	..	...

où les cases diagonales correspondent aux états stationnaires, les non-diagonales aux transitions.

Bohr avait vu clairement que les lois ainsi formulées étaient en contradiction avec les principes de la Mécanique et que, par suite, l'application même du concept d'énergie à ce domaine était problématique. Il établit un pont hardi entre les idées anciennes et nouvelles par son principe de correspondance qui exprime une condition presque évidente : à la limite, lorsque les numéros des états stationnaires, les « nombres quantiques » sont très grands (c'est-à-dire très loin en bas et à droite dans notre schéma) et que l'énergie varie relativement peu d'une case à l'autre, de manière pratiquement continue, la Mécanique classique ordinaire doit être valable avec une très bonne approximation.

C'est de cette idée que la Physique théorique a vécu pendant les dix années qui suivirent. Voici quel était le problème : une vibration harmonique n'a pas seulement une fréquence, mais aussi une intensité. Il faut attribuer une telle intensité à chaque transition de notre schéma : comment peut-on le faire par des considérations de correspondance ? Il s'agissait de deviner une loi inconnue, connaissant un cas limite.

Bohr lui-même, Kramers, Sommerfeld, Epstein et beaucoup d'autres obtinrent des résultats importants. Mais le pas décisif fut encore fait par Einstein. Dans une démonstration nouvelle de la loi du rayonnement de Planck il fit voir clairement qu'il fallait remplacer le concept classique d'intensité du rayonnement par le concept statistique de probabilité de transition : à chaque case de notre schéma appartient $\left(\text{outre la fréquence } \nu_{mn} = \frac{E_m - E_n}{h}\right)$ une probabilité déterminée d'émission ou d'absorption du rayonnement.

Nous aussi, à Göttingen, nous prenions part à ces efforts pour extraire des faits expérimentaux la Mécanique quantique inconnue. Les difficultés logiques devenaient de plus en plus aiguës. Des recherches sur la diffusion et la dispersion de la lumière montrèrent que le concept einsteinien de probabilité de transition ne suffisait pas pour définir la force d'une vibration et que l'on ne pouvait se passer de l'idée d'une amplitude de vibration liée à chaque transition. Il faut citer ici des travaux de Ladenburg [1], Kramers [2], Heisenberg [3], Jordan et moi-même [4]. L'art de deviner des formules correctes, différentes des classiques, mais y tendant par correspondance, fut poussé à une assez grande perfection. Dans un de mes travaux dont le titre contient probablement pour la première fois les termes de Mécanique Quantique, se trouve, pour la perturbation mutuelle de deux systèmes atomiques, une formule assez compliquée qui est encore valable aujourd'hui.

Heisenberg [5], qui était alors mon assistant, mit brusquement fin à cette période. Il trancha le nœud gordien à l'aide d'un principe philosophique et remplaça l'art de deviner par une règle mathématique.

Le principe affirme que l'on n'a le droit d'employer dans la description théorique des phénomènes aucun concept, aucune représentation qui ne corresponde à un état de fait observable physiquement. Lorsque Einstein, en fondant la théorie de la Relativité, élimina les concepts de vitesse absolue et de simultanéité absolue entre deux événements se passant en deux lieux différents, il appliqua le même principe. Heisenberg bannit de la Physique l'image d'orbites électroniques possédant des rayons et des périodes définis, parce que ces grandeurs ne sont pas observables. Il exigea de la théorie qu'elle soit construite à l'aide de schémas quadratiques semblables à celui qui nous a servi plus haut.

Au lieu de décrire le mouvement, pour chaque coordonnée, par une fonction du temps $x(t)$, il faut déterminer un schéma des amplitudes de transition x_{mn}. Il me semble que le point capital de son travail est la recherche (p. 881) d'une règle permettant de trouver à partir d'un schéma

$$\begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots \\ x_{21} & x_{22} & \dots \\ \dots & \dots & \dots \end{pmatrix}$$

le schéma des carrés

$$\begin{pmatrix} (x^2)_{11} & (x^2)_{12} & \dots \\ (x^2)_{21} & (x^2)_{22} & \dots \\ \dots\dots & \dots\dots & \dots \end{pmatrix}$$

ou, plus généralement, de déterminer la règle de multiplication de ces schémas.

En considérant les problèmes connus, dont on avait deviné la solution, il découvrit cette règle et l'appliqua avec succès à des exemples simples tels que l'oscillateur harmonique et anharmonique. Cela se passait pendant l'été 1925. Heisenberg, qui souffrait beaucoup du rhume des foins, prit un congé pour se soigner au bord de la mer et me donna son travail pour que je le fasse publier si je pensais qu'on pouvait en faire quelque chose.

Je compris aussitôt l'importance de son idée de base et j'envoyai le manuscrit à la *Zeitschift für Physik*. Mais la règle de multiplication de Heisenberg me tourmentait. Après huit jours de réflexion intense et de tâtonnements, je me souvins soudain d'une théorie algébrique que m'avait enseigné mon maître le Professeur Rosanes de Breslau. Les mathématiciens connaissent bien ces schémas quadratiques et les appellent des matrices, en connexion avec une règle de multiplication déterminée. J'appliquai cette règle à la condition quantique de Heisenberg et constatai que cette condition revenait à donner aux grandeurs situées sur la diagonale des valeurs constantes proportionnelles à h. Il était facile de deviner la valeur des autres grandeurs. Elles devaient être nulles. Et aussitôt, je me trouvai devant la formule étrange

$$pq - qp = \frac{h}{2\pi i} = -\hbar i,$$

ce qui signifie : coordonnées q et impulsions p ne sont pas représentables par des nombres, mais par des symboles dont le produit dépend de leur ordre : symboles non commutables, selon l'expression consacrée. Ce résultat m'émut comme un navigateur qui apercevrait de loin la terre désirée après avoir longtemps erré; mon seul regret fut l'absence de Heisenberg. Dès le premier instant je fus convaincu que nous avions frappé juste.

Et pourtant une partie de nos résultats n'était encore que conjecture, à savoir que les termes non diagonaux de l'expression précédente s'évanouissent. Sur ce point j'obtins l'aide de mon élève Pascual Jordan et en peu de jours nous parvînmes à démontrer que j'avais deviné juste. Le travail publié en collaboration par Jordan et moi-même [6] contient les principes essentiels de la Mécanique Quantique, y compris leur extension à l'Électrodynamique.

Suivit une période fiévreuse de travail à trois, rendu difficile par l'absence de Heisenberg. Il y eut un vif échange de lettres. Celles que je possédais ont malheureusement disparu par suite des troubles politiques. Il en résulta un Mémoire publié par nous trois [7] où le côté formel de ces recherches aboutit à des conclusions à peu près définitives.

Avant qu'il ne parût, nous eûmes une première surprise dramatique : le travail de Paul Dirac [8] sur le même sujet. Une conférence de Heisenberg à Cambridge lui avait suggéré des réflexions qui le conduisirent à des résultats analogues à ceux que nous avions obtenus à Göttingen, avec une différence : au lieu de prendre pour base le calcul des matrices bien connu des mathématiciens, il avait imaginé et développé lui-même une théorie générale de symboles non commutables.

Bientôt après, la première application non triviale et physiquement importante de la Mécanique quantique fut faite par W. Pauli [9] : il calcula par la méthode des matrices les niveaux stationnaires d'énergie de l'atome d'hydrogène, en accord parfait avec les formules de Bohr. Dès lors on ne pouvait plus douter de la validité de la théorie.

Mais la signification exacte de ce formalisme n'était rien moins que claire. Comme il arrive souvent, la mathématique était plus intelligente que la pensée qui interprète. Tandis que nous discutions encore de ce sujet arriva la seconde surprise dramatique : la publication des célèbres Mémoires de Schrödinger [10]. Il partait d'idées toutes différentes qui remontaient à Louis de Broglie [11]. Ce dernier avait émis peu d'années auparavant une hypothèse hardie qu'il avait appuyée de raisonnements théoriques admirables : la dualité ondes-corpuscules qui était familière aux physiciens dans le cas de la lumière devait valoir aussi pour les électrons; à tout électron en mouvement libre devait appartenir une onde plane de longueur d'onde bien définie, fonction de la constante de Planck et de la masse.

Nous autres, à Göttingen, nous connaissions bien ce travail passionnant de Louis de Broglie. Un jour, en 1925, je reçus de Davisson une lettre contenant des résultats étranges sur la réflexion des électrons à la surface des métaux. Mon collègue de Physique expérimentale James Franck et moi-même soupçonnâmes aussitôt que les courbes obtenues par Davisson devaient être les figures d'interférences cristallines des ondes électroniques de L. de Broglie; nous conseillâmes à un de nos élèves, Elsasser [12] d'examiner la question. Le résultat de son travail fut la première confirmation expérimentale de l'idée de L. de Broglie, confirmation qui fut donnée plus tard indépendamment par les expériences systématiques de Davisson et Germer [13] et G. P. Thomson [14]. Mais cette connaissance des idées de L. de Broglie ne nous conduisit à aucune application à la structure électronique des atomes.

Cela était réservé à Schrödinger. Il étendit au cas où des forces agissent sur le mobile l'équation de L. de Broglie qui se rapportait au mouvement libre; il formula exactement les conditions complémentaires auxquelles il faut soumettre la fonction d'ondes ψ et que de Broglie avait déjà indiquées : elles doivent être uniformes et finies dans l'espace et le temps. Il parvint ainsi à calculer les états stationnaires de l'atome d'hydrogène comme solutions monochromatiques, s'annulant à l'infini, de son équation d'ondes.

Pendant une courte période, au début de 1926, il sembla que l'on était tout à coup en présence de deux systèmes d'explication cohérents en eux-mêmes, mais entièrement différents : la Mécanique des matrices et la Mécanique ondulatoire. Mais Schrödinger lui-même demontra bientôt leur parfaite équivalence.

La Mécanique ondulatoire a été bien plus favorablement accueillie que la Mécanique quantique sous sa forme de Göttingen et de Cambridge. Elle opère avec une fonction d'ondes ψ qui, du moins dans le cas d'une particule, peut être représentée concrètement dans l'espace. Elle se sert des méthodes mathématiques des équations aux dérivées partielles, dont tout physicien a l'habitude. En outre Schrödinger croyait que sa théorie ondulatoire rendait possible un retour au déterminisme de la Physique classique : il proposa (et il a renouvelé récemment [15] avec insistance cette proposition) d'abandonner complètement l'image des particules et, au lieu de considérer les électrons comme de petits éléments discrets, de parler d'une distribution continue de densité $|\psi|^2$, ou de densité électrique $e|\psi|^2$.

A Göttingen cette interprétation nous parut inacceptable étant donnés les faits d'expérience. A cette époque on savait déjà compter les particules par scintillations, ou avec le tube de Geiger, et photographier leurs traces à l'aide de la chambre à brouillard de Wilson.

Il me sembla qu'il était impossible d'arriver à une interprétation claire de la fonction ψ par la considération d'électrons soumis à des forces extérieures. C'est pourquoi je m'étais déjà efforcé à la fin de 1925 de généraliser la méthode des matrices qui, évidemment, ne s'appliquait qu'aux processus oscillatoires. Étant alors aux États-Unis, l'hôte du Massachussets Institute of Technology, j'y trouvai en Norbert Wiener un excellent collaborateur. Dans notre travail commun [16] nous avons remplacé la matrice par le concept général d'opérateur, ce qui nous permit de traiter des processus apériodiques. Mais nous n'avons pas trouvé la bonne voie dont la découverte était réservée à Schrödinger. Je pris aussitôt en main sa méthode, car elle promettait de conduire à une interprétation de la fonction ψ.

Ce fut de nouveau une idée d'Einstein qui me guida. Il avait essayé de faire comprendre la dualité des ondes et des particules — des quanta de lumière ou photons — en considérant le carré de l'amplitude des ondes lumineuses comme densité de la probabilité de présence des photons. Cette idée pouvait s'étendre immédiatement à la fonction ψ : $|\psi|^2$ devait être la densité de la probabilité de présence des électrons (ou autres particules). Il était facile de l'affirmer. Mais comment le démontrer ?

Les processus de chocs atomiques permirent de le faire : Une pluie d'électrons venant de l'infini, représentée par une onde incidente d'intensité connue $|\psi|^2$ rencontre un obstacle, un atome lourd par exemple. De même que l'onde de sillage d'un vapeur, lorsqu'elle frappe un pilotis, produit des trains d'ondes secondaires formées de cercles, de même l'onde électronique incidente est transformée partiellement par l'atome en ondes secondaires sphériques, avec une amplitude de vibration dépendant de la direction. Le carré de l'amplitude de cette onde sphérique, à grande distance du centre diffusant, détermine alors la probabilité relative de diffusion des électrons vers les différentes directions de l'espace. Si en outre l'atome diffusant peut occuper divers états stationnaires, on obtient encore automatiquement à partir de l'équation d'ondes de Schrödinger la probabilité d'excitation de ces états, accompagnée d'une diffusion inélastique de l'électron, qui perd de l'énergie. C'est ainsi que purent être fondées en théorie les hypothèses de Bohr, que Franck et Hertz avaient d'abord vérifiées par l'expérience [17]. Bientôt Wentzel [18] parvint à démontrer par ma théorie la célèbre formule de Rutherford sur la diffusion des particules α.

Ce qui contribua plus que ces succès à l'acceptation rapide de l'interprétation statistique de la fonction ψ, ce fut un travail de Heisenberg [19] où se trouvent ses célèbres relations d'incertitude. C'est lui qui mit en évidence le caractère révolutionnaire des nouvelles conceptions. Il devint évident qu'il ne fallait pas abandonner seulement le déterminisme de la Physique classique, mais aussi le concept naïf de réalité, qui considère les particules de la Physique atomique comme des grains de sable extrêmement petits. Un grain de sable possède à chaque instant une position et une vitesse déterminées. Cela n'est plus vrai pour un électron : si l'on mesure de plus en plus exactement sa position, sa vitesse devient de plus en plus difficile à déterminer, et réciproquement. Je reviendrai brièvement sur cette question dans une discussion plus générale, mais je voudrais auparavant dire encore quelques mots de la théorie des chocs.

Les méthodes d'approximation mathématique qui m'avaient servi étaient assez primitives et furent bientôt perfectionnées. Un nombre immense de mémoires a été publié sur ce sujet. Je voudrais citer seulement quelques-uns des premiers auteurs auxquels la théorie doit de grands progrès: Holtsmark en Norvège, Faxén en Suède, Bethe en Allemagne, Mott et Massey en Angleterre.

Aujourd'hui la théorie des chocs est une science particulière, avec ses propres gros traités, et que je ne puis plus suivre de près. En dernière analyse, toutes les branches modernes de la Physique, l'Électrodynamique quantique, la théorie des mésons, des noyaux, des rayons cosmiques, des particules élémentaires et de leurs transformations, appartiennent au même domaine d'idées et en parler nous conduirait à l'infini.

Je voudrais encore indiquer un autre chemin que je parcourus pendant les années 1926-1927, en partie avec le physicien russe Fock [20], dans le but de confirmer l'interprétation statistique de la Mécanique quantique. Il y a dans le travail à trois, dont j'ai parlé plus haut, un chapitre où se trouve une anticipation de la fonction ψ; mais elle n'y est pas considérée comme fonction $\psi(x)$, mais comme fonction ψ_n de l'indice discontinu $n = 1, 2, \ldots$, qui numérote les états stationnaires. Quand le système considéré est soumis à une force dépendant du temps ψ_n se met aussi à dépendre du temps et $|\psi_n(t)|^2$ mesure la probabilité de trouver le système à l'état n au temps t. Si l'on part d'une distribution initiale ne comportant qu'un seul état, on obtient ainsi des probabilités de transition et l'on peut étudier leurs propriétés. Je me suis intéressé alors tout particulièrement au cas « adiabatique » où les actions changent extrêmement lentement. Le calcul montra, comme on pouvait s'y attendre, que les probabilités de transition deviennent de plus en plus petites.

La théorie des probabilités de transition a été développée indépendamment et rendue féconde par Dirac. On peut dire que toute la Physique atomique et nucléaire travaille avec ce système de concepts, surtout dans la forme extrêmement élégante que lui a donnée Dirac [21] : presque toutes les expériences fournissent des données sur des fréquences relatives d'événements, même quand on les exprime sous le nom de sections de choc ou d'autres noms analogues.

Comment se fait-il maintenant que, malgré ces succès, de grands savants comme Einstein, Schrödinger, de Broglie ne soient pas satisfaits de la théorie ? En fait, leurs objections ne contestent nullement l'exactitude des formules, mais leur interprétation. Dans la discussion il faut distinguer deux questions étroitement entremêlées : celle du détermisme et celle de la réalité.

Voici dans quel sens la Physique de Newton est déterministe : quand l'état initial d'un système — les positions et les vitesse de toutes les particules — sont rigoureusement donnés, les lois de la Mécanique permettent de calculer l'état de ce système en un instant quelconque (antérieur ou postérieur). C'est d'après ce modèle que furent construites toutes les autres branches de la Physique. Peu à peu le déterminisme mécanique devint une sorte d'article de foi : l'Univers machine, ou automate. Il n'existe à ma connaissance aucun précurseur de cette doctrine, ni chez les philosophes antiques ni chez ceux du Moyen-Age : elle est un produit du succès extraordinaire de la Mécanique newtonienne, notamment en Astronomie.

Pendant le XIX^e siècle elle devint un des principes philosophiques fondamentaux de l'ensemble des sciences de la nature.

Je me suis demandé si cela est justifié en fait. Peut-on réellement faire des prévisions rigoureuses pour tous les temps en se fondant sur les équations classiques du mouvement ?

Il est facile de voir sur des exemples simples que cela n'est vrai que si l'on admet la possibilité de mesures absolument exactes (de lieu, de vitesse, etc.). Considérons une particule mobile sans frottement sur une ligne droite entre deux points — deux murs — où elle rebondit de manière parfaitement élastique. Elle va et vient avec sa vitesse initiale invariable v_0; on peut dire exactement où elle se trouve à un instant donné, à condition de connaître exactement v_0. Si nous admettons une petite incertitude Δv_0, l'incertitude sur la prévision de sa position au temps t, $t\Delta v_0$ est proportionnelle à t. Si l'on attend assez longtemps, jusqu'à l'instant $t_c = \frac{l}{\Delta v_0}$, l étant la distance des murs élastiques, l'incertitude Δx devient égale à tout l'intervalle l. On ne peut donc absolument plus rien prévoir sur la position du mobile en un instant postérieur à t_c. Le déterminisme se change donc en indéterminisme total si l'on admet sur la vitesse une incertitude aussi petite que l'on veut [1].

Mais cela a-t-il un sens, un sens physique et non métaphysique, de parler de données absolues ? A-t-on le droit de poser $x = \pi$ cm, où $\pi = 3{,}1415\ldots$ est le nombre transcendant bien connu qui mesure le rapport de la circonférence au diamètre du cercle ? En tant qu'instrument mathématique, le concept de nombre réel, représenté par une fraction décimale infinie, est extrêmement important et fécond. En tant que mesure d'une grandeur physique, c'est un non-sens. Si l'on arrête la fraction décimale représentant π au 20^e, ou au 25^e chiffre, on obtient des nombres qui ne peuvent être distingués entre eux, ni du nombre exact, par aucune mesure physique. D'après le principe heuristique dont se sont servis Einstein en Relativité, Heisenberg en théorie quantique, tout concept qui ne correspond à aucune observation possible doit être éliminé de la Physique. Ici encore c'est très facile. Il suffit de remplacer l'affirmation $x = \pi$ cm par l'énoncé : la probabilité de la distribution des valeurs de x possède au point $x = \pi$ cm un maximum aigu et (si l'on veut être plus exact) ce pic à telle ou telle largeur. En bref,

[1] M. E. Bauer, qui a traduit cette conférence, a attiré mon attention sur le fait qu'Henri Poincaré a publié autrefois à propos des fondements de la Mécanique statistique un calcul analogue, relatif au « problème des petites planètes ».

il faut formuler statistiquement la Mécanique habituelle elle-même. Je me suis un peu occupé de cette question ces derniers temps et j'ai vu qu'on peut le faire sans difficulté. Mais ce n'est pas ici le lieu de développer ces idées. Je voudrais insister seulement sur un point : le déterminisme de la Physique classique est une illusion qui vient de ce que l'on surestime la création de concepts mathématicologiques. C'est une idole et non un idéal des sciences de la nature. On ne peut donc en faire une objection contre l'interprétation statistique, indéterministe par nature, de la Mécanique quantique.

La situation est bien plus délicate en ce qui concerne l'objection de réalité. Le concept de particule, par exemple d'un grain de sable, contient implicitement la représentation d'une position définie et d'un état de mouvement défini. D'après la Mécanique quantique, il doit être impossible de déterminer simultanément et avec une précision indéfinie la position et l'état de mouvement d'un électron (plus précisément, son impulsion, produit de la masse par la vitesse). Deux questions se posent alors : d'abord quelle est la raison qui nous empêche de mesurer simultanément ces deux grandeurs par des expériences raffinées avec autant de précision que nous voudrons ? Ensuite, s'il est démontré réellement que cela n'est pas possible, avons-nous encore le droit d'appliquer à l'électron le concept de particule et les images qui lui sont associées ?

Pour la première question, il est clair que, si la théorie est correcte — et nous avons des raisons suffisantes de le croire — l'obstacle à la mesure simultanée de la position et de l'état de mouvement (ou de toute autre paire de grandeurs dites conjuguées) doit se trouver dans les lois mêmes de la Mécanique quantique. C'est ce qui a lieu en effet. Mais cela n'est pas si simple. Niels Bohr [22] luimême a déployé beaucoup de peine et de sagacité pour développer une théorie de la mesure qui élucide complètement la question et résiste aux attaques les plus astucieuses d'Einstein. Car celui-ci, sans cesse, essayait d'imaginer des dispositifs permettant la mesure exacte simultanée de la position et de l'état de mouvement. Voici essentiellement ce qui en est : pour mesurer des coordonnées d'espace et des temps on a besoin de mètres et d'horloges fixes; au contraire les dispositifs de mesure des impulsions et des énergies doivent comporter des parties mobiles qui reçoivent et indiquent le choc de l'objet à mesurer. Si l'on tient compte du fait que c'est la Mécanique Quantique qui régit l'interaction entre l'objet et l'appareil de mesure, on voit qu'il ne peut exister de dispositif satisfaisant à la fois aux deux conditions. Nous avons donc deux expériences qui s'excluent mutuellement, mais sont complémentaires l'une de l'autre et dont l'ensemble seul dévoile tout ce que nous pouvons apprendre d'un objet.

Cette idée de complémentarité est considérée généralement par les physiciens comme la clef qui permet de comprendre intuitivement les processus quantiques. Bohr l'a appliquée avec beaucoup de pénétration à de tout autres domaines, par exemple aux rapports entre conscience et cerveau, au problème du libre arbitre et à d'autres questions philosophiques fondamentales.

Nous en arrivons maintenant au dernier point : étant donné ce quelque chose à quoi l'on ne peut relier à la manière habituelle les concepts de lieu et de mouvement, peut-on encore l'appeler objet, particule ? Et, si cela n'est pas possible, quelle est la réalité que nos théories ont pour but de décrire ?

La réponse à cette question n'est plus d'ordre physique, mais philosophique. La donner en détail sortirait tout à fait du cadre de cette conférence. J'ai développé ailleurs [23] mes idées sur ce point. Je dirai seulement que je suis partisan résolu de la conservation de la notion de particule. Bien entendu, il faut définir à nouveau ce que l'on entend par là. Nous avons pour cela des concepts bien précisés que les mathématiciens connaissent sous le nom d'invariants par rapport à des transformations.

Chaque objet que nous percevons nous apparaît sous des aspects infiniment multiples : le concept d'objet est l'invariant de tous ces aspects. De ce point de vue l'on peut justifier entièrement le système de concepts qui est maintenant d'usage courant et dans lequel apparaissent ensemble ondes et particules.

Mais les recherches récentes sur les noyaux et les particules élémentaires nous ont conduits à des limites au-delà desquelles ce système de concepts lui-même semble ne plus suffire. Ce que peut nous apprendre l'histoire des origines de la Mécanique quantique, telle que je viens de la raconter, c'est que, probablement, le raffinement des méthodes mathématiques ne suffira pas pour découvrir une théorie satisfaisante, mais qu'il reste quelque part, dans notre doctrine, un concept qui n'est justifié par aucune expérience et qu'il nous faudra éliminer pour dégager la voie.

Manuscrit reçu le 16 mai 1955.

BIBLIOGRAPHIE.

[1] Ladenburg R. — *Z. Physik*, 1921, **4**, 451.
Ladenburg R. et Reiche F. — *Naturwiss*, 1923, **11**, 584.
[2] Kramers H. A. — *Nature*, 1924, **113**, 673.
[3] Kramers H. A. et Heisenberg W. — *Z. Physik*, 1925, **31**, 681.
[4] Born M. — *Z. Physik*, 1924, **26**, 379.

Born M. et Jordan P. — *Z. Physik*, 1925, **33**, 479.

[5] Heisenberg W. — *Z. Physik*, 1925, **33**, 879.

[6] Born M. et Jordan P. — *Z. Physik*, 1925, **34**, 858.

[7] Born M., Heisenberg W. et Jordan P. — *Z. Physik*, 1926, **35**, 557.

[8] Dirac P. A. M. — *Proc. Roy. Soc.*, 1925, A **109**, 642.

[9] Pauli W. — *Z. Physik*, 1926, **36**, 336.

[10] Schrödinger E. — *Ann. Physik*, (4), 1926, **79**, 361, 489 et 734; 1926, **80**, 437; 1926, **81**, 109.

[11] de Broglie L. — *Thèses*, Paris, 1924; *Ann. Physik*, (10), 1925, **3**, 22.

[12] Elsasser W. — *Naturwiss*, 1925, **13**, 711.

[13] Davisson C. J. et Germer L. H. — *Phys. Rev.*, 1927, **30**, 707.

[14] Thomson G. P. et Reid A. — *Nature*, 1927, **119**, 890. Thomson G. P. — *Proc .Roy. Soc.*, 1928, A **117**, 600.

[15] Schrödinger E. — *Brit. J. Phil. Sc.*, 1952, **3**, 109 et 233.

[16] Born M. et Wiener N. — *Z. Physik*, 1926, **36**, 174.

[17] Born M. — *Z. Physik*, 1926, **37**, 863; 1926, **38**, 803; *Gött. Nachr. Math. Phys. Kl.*, 1926, 146.

[18] Wentzel G. — *Z. Physik*, 1926, **40**, 590.

[19] Heisenberg W. — *Z. Physik*, 1927, **43**, 172.

[20] Born M. — *Z. Physik*, 1926, **40**, 167. Born M. et Fock V. — *Z. Physik*, 1928, **51**, 165.

[21] Dirac P. A. M. — *Proc. Roy. Soc.*, A, 1925, **109**, 642; 1926, **110**, 561; 1926, **111**, 281; 1926, **112**, 674.

[22] Bohr Niels. — *Naturwiss*, 1928, **16**, 245; 1929, **17**, 483; 1933, **21**, 13. — Kausalität und Komplementarität *Die Erkenntnis*, 1926, **6**, 293.

[23] Born M. — *Phil. Quart.*, 1953, **3**, 134; *Phys. Blätter*, 1954, **10**, 49.