

LA PHYSIQUE QUANTIQUE ET LES IDÉALISATIONS CLASSIQUES

par V. FOCK, Leningrad (URSS)

1. Introduction

Différents domaines de la physique quantique (atomique et subatomique) peuvent être caractérisés par l'ordre de grandeur de l'énergie qui se manifeste dans un acte élémentaire. Pour l'atome, la valeur de l'énergie échangée dans un acte (collision ou émission d'un photon) est de quelques électrons-volts ; pour les réactions nucléaires l'énergie peut atteindre quelques milliards d'électrons-volts. Dans la physique quantique, nous avons deux domaines bien distincts : la physique des faibles énergies et la physique des grandes énergies.

Dans ce qui suit, nous entendons par physique quantique, avant tout, la physique des faibles énergies avec sa base théorique — la mécanique quantique non relativiste. Ce domaine, quoique limité, contient tant de nouveau, non seulement en matière de faits, mais aussi dans la position même du problème de la description des phénomènes physiques, qu'il donne beaucoup à réfléchir. Son étude élargit considérablement nos notions habituelles et demande des généralisations philosophiques correspondantes.

2. Contradictions entre les propriétés des objets atomiques et la physique classique

Le mérite d'une nouvelle position du problème de la description des phénomènes à l'échelle atomique appartient à Niels Bohr ; le point de vue adopté dans le présent article est le résultat de nos recherches et méditations ayant pour but d'approfondir, de préciser — et si nécessaire de critiquer et de corriger — les idées de Bohr.

La nécessité de poser le problème autrement que dans la théorie classique peut être comprise si l'on rapproche le phénomène de la diffraction des électrons, où se manifeste leur nature ondulatoire, à l'atomisme de la charge électrique — fait bien connu depuis longtemps. Un faisceau d'électrons d'énergie donnée qui traverse un cristal et rencontre une plaque photographique donne lieu aux franges de diffraction qui ne peuvent être interprétées que sur la base ondulatoire : l'ensemble de ces franges correspond, en effet, à la superposition des ondes diffractées par chaque atome du cristal.

Le phénomène ne dépend pas de l'intensité du faisceau d'électrons ; dans le cas des faisceaux très faibles, quand les électrons tombent sur le cristal, pour ainsi dire, l'un après l'autre, les franges restent les mêmes. Il s'ensuit que les propriétés ondulatoires doivent être attribuées à chaque électron séparément, et non seulement à un ensemble d'électrons. Cependant, chaque électron, en rencontrant la plaque photographique, ne donne un noircissement qu'en un seul point (il noircit un seul grain sensible de l'émulsion) ; pour obtenir l'électronogramme (c'est-à-dire, la répartition de l'intensité du faisceau qui tombe sur la plaque après avoir traversé le cristal) il faut considérer l'ensemble des grains noircis.

Donc, l'électron se comporte dans certaines conditions (en traversant le cristal) comme une onde répartie dans l'espace et dans d'autres conditions (en se laissant absorber par le grain sensible de l'émulsion) comme une particule strictement localisée. Cette différence dans le comportement de l'électron dans différentes conditions ne saurait être expliquée sur la base des notions classiques.

Prenons un autre exemple. On sait que l'atome d'hydrogène est formé par un noyau relativement lourd (un proton), à charge positive, et un électron. Du point de vue classique, il est impossible d'attribuer à un système formé par deux particules chargées un état possédant une symétrie sphérique. Cependant, dans l'état de moindre énergie (et dans certains autres états dits états *s*) l'atome d'hydrogène possède bien une symétrie sphérique ; cela est confirmé par l'expérience.

Il suffit de citer ces deux exemples pour voir que la description classique n'est pas applicable aux objets atomiques tels que l'électron.

Nous devons maintenant préciser ce que nous entendons par description classique et indiquer les traits particuliers à cette description qui la rendent inapplicable aux objets atomiques.

3. *Abstractions utilisées en physique classique*

La description classique d'un phénomène physique est caractérisée par certaines idéalizations ou abstractions, dont la plus importante est l'indépendance supposée du phénomène des conditions dans lesquelles il est observé. La seule et unique circonstance, liée aux conditions d'observation, dont on tenait compte dans la physique classique, est le choix du système de référence : par rapport à deux systèmes en mouvement réciproque, le même phénomène prend deux aspects différents, ce qui a toujours été reconnu. Mais la nature particulière des moyens d'observation n'intervenait pas dans la description classique du phénomène et l'on n'y attachait pas d'importance de principe. On traitait un phénomène physique comme quelque chose qui se déroule pour soi, et non comme quelque chose qui exige, pour être perçu, certains moyens d'observation bien définis. Autrement dit, on considérait un phénomène non pas relativement à un appareil de mesure de structure donnée, mais, tout au plus, relativement à un appareil de mesure dont le mouvement est donné (c'est-à-dire, relativement à un système de référence donné).

Une telle abstraction, admise en physique classique, peut être nommée « *absolutisation* » de la notion d'un phénomène physique.

Une autre abstraction est la possibilité, admise en physique classique, de préciser indéfiniment l'observation et d'observer les différents aspects d'un phénomène sans en modifier la nature. Cette abstraction est liée à la précédente. En effet, si l'on admet qu'un phénomène physique ne dépend pas des conditions d'observation, mais qu'il est quelque chose d'absolu, on est conduit à penser qu'en modifiant les conditions d'observation on pourrait connaître tous les aspects d'un seul et même phénomène. En combinant les données ainsi obtenues, on pourrait alors former une image plus détaillée, mais pourtant cohérente du phénomène.

Ce procédé est supposé possible en physique classique qui admettait que cette « détaillisation » peut être poussée aussi loin que l'on veut. La même idée de la possibilité d'une « détaillisation » illimitée et d'une description « multilatérale » d'un phénomène physique peut être exprimée en disant qu'il devrait être possible, d'après la physique classique, de conduire l'expérience de façon que tous les aspects du phénomène se manifestent à la fois et cela avec une précision illimitée. Cette idée s'est trouvée illusoire et a été rejetée en mécanique quantique.

En considérant le phénomène qui se passe dans un système physique comme une évolution de son état au cours du temps, la physique classique a été conduite à l'absolutisation de la notion d'« état d'un système ». Cette notion était interprétée comme une caractéristique intégrale et complète, comme quelque chose capable de caractériser le système jusqu'au bout (pour le moment donné). Fixer l'état d'un système physique aux degrés de liberté donnés équivalait à fixer les valeurs instantanées de toutes les quantités qui se rapportent au système. Les conditions réelles devant permettre la mesure de ces quantités et la constatation de l'état du système n'étaient pas prises en considération, en physique classique, pas plus que le temps nécessaire à cette constatation. L'état d'un système physique étant défini par les valeurs de certaines quantités (ou fonctions), correspondant aux degrés de liberté du système, on obtenait une description complète du phénomène physique en trouvant la variation de ces quantités ou fonctions au cours du temps.

On voit que les principales abstractions faites dans la physique classique se réduisent à l'« absolutisation » des phénomènes physiques (dans le sens de leur indépendance des conditions d'observation) et à l'admission d'une description aussi détaillée que l'on veut (et, comme limite, complète sous tous les aspects) de ces phénomènes.

Ces abstractions sont intimement liées au déterminisme mécanique dit laplacien. La mécanique ainsi que l'électrodynamique classiques nous présentent des exemples de théories permettant de déterminer l'état postérieur d'un système (mécanique ou électrodynamique) à partir de son état initial. En généralisant cette

situation, on pourrait atteindre la conclusion que tout ce qui se passe dans la nature est déterminé d'avance. Sous cette forme extrême la conclusion touche au fatalisme, et elle est évidemment inacceptable. Mais dans sa forme modérée, pour les systèmes physiques proprement dits, l'hypothèse du déterminisme complet constitue un des traits caractéristiques de la physique classique. Cette hypothèse exige que le cours d'un phénomène soit déterminé d'une manière unique par l'état initial du système et les lois du mouvement. Il est vrai que la thermodynamique statistique ne pouvait se passer des notions de probabilité et de fluctuation. Mais on motivait l'introduction de ces notions par l'extrême complexité des systèmes considérés en thermodynamique et l'impossibilité pratique de connaître leur état initial exact. D'ailleurs, on éprouvait toujours quelque difficulté à concilier les concepts purement déterministes de la mécanique classique avec les notions probabilistes de la thermodynamique statistique, et la fondation rigoureuse de la thermodynamique sur la base de la mécanique était un problème bien délicat.

4. Origines historiques des principes de la physique classique

Les idéalizations qui caractérisent la physique classique et dont nous avons parlé plus haut ne sont nullement arbitraires. Tout au contraire, elles se sont formées tout naturellement comme résultats du développement des sciences naturelles des siècles passés. En effet, jusqu'à la fin du XIX^e siècle on ne connaissait pas de moyens directs pour étudier le comportement des atomes séparés, et l'existence même des atomes se déduisait d'arguments indirects. L'objet de la physique était l'étude des corps incomparablement plus grands que l'atome ; pour les corps de cette échelle (dite macroscopique) l'influence des opérations de mesure sur leur comportement était soit négligeable soit calculable avec la précision voulue. Dans ces circonstances, l'idée d'attribuer à tous les phénomènes physiques un caractère absolu (et non relatif aux moyens d'observation) se présentait d'elle-même ; elle semblait si naturelle qu'on négligeait de la formuler explicitement. Nous savons maintenant que cette « absolutisation », loin d'être une nécessité logique,

n'est qu'une hypothèse qui peut bien ne pas être vérifiée ; mais ce fait fondamental n'a été reconnu qu'au cours du développement postérieur de la physique.

La possibilité d'une « détaillisation » illimitée d'un phénomène physique, dont nous avons parlé dans le paragraphe précédent, représente une autre hypothèse du même genre. Cette possibilité est acceptée tacitement en physique classique mais elle est niée en physique quantique.

Quant au déterminisme mécanique (dit laplacien), sa naissance et son application à toute la physique peuvent être bien comprises du point de vue historique. Les brillants progrès de la mécanique, surtout de la mécanique céleste, au cours des XVIII^e et XIX^e siècles, en ont beaucoup favorisé le développement. Les concepts mécanicistes ont été prépondérants et ont relégué au second plan les idées et les points de vue acceptés dans d'autres domaines de la science, par exemple, dans les sciences qui s'occupent de l'homme et des organismes vivants en général (histoire, sociologie, biologie), où l'hypothèse d'un déterminisme absolu est inadmissible.

Les progrès de l'électrodynamique à la fin du XIX^e siècle n'ont fait que consolider le point de vue du déterminisme absolu admis en physique. Comme résultat important de ces progrès, on peut signaler la reconnaissance de la nature matérielle du champ électromagnétique : on a reconnu que ce champ est non pas une notion auxiliaire introduite pour exprimer l'interaction entre corps matériels, mais une réalité physique en soi, comme les corps matériels eux-mêmes. En considérant le champ et les corps comme un système unique, on a été conduit à une généralisation de la notion d'« état d'un système », tel que l'état postérieur en soit toujours déterminé d'une manière unique par l'état initial. Donc, le point de vue du déterminisme pouvait être conservé.

Depuis Galilée, il était clair que la description des phénomènes physiques présuppose l'emploi d'un système de référence bien déterminé. Le concept galiléen de relativité par rapport à un système de référence contient déjà les rudiments d'un concept plus général : celui de relativité par rapport aux moyens d'observation. Si l'on ne tient compte que du mouvement global de l'appareil de mesure, on revient à la relativité galiléenne.

Une profonde analyse du phénomène de propagation de la lumière et des signaux lumineux, faite en partant du concept de relativité par rapport à un système de référence, a conduit Einstein en 1905 à la théorie de la relativité, qu'on pourrait aussi appeler « chronogéométrie » ou bien théorie de l'espace-temps. Cependant, cette théorie, quoique riche en concepts nouveaux, ne met pas en doute les principes et les idéalizations de la physique classique discutés plus haut.

Le développement de la physique pendant plusieurs siècles, y compris le XIX^e, a abouti à la conviction que le caractère absolu des phénomènes physiques, la possibilité de les décrire d'une manière aussi détaillée que l'on veut, et le déterminisme complet des lois de naturelles sont les bases mêmes de la science physique. On ne formulait pas ces principes d'une manière explicite, mais effectivement ils occupaient une place dominante dans la conception du monde physique, de sorte qu'on les considérait presque comme donnés a priori.

La découverte de la mécanique quantique a mis fin à cette situation, en forçant les savants à reconsidérer ces principes. Leur analyse critique a montré qu'ils ne sont pas applicables à la description des phénomènes quantiques. Il est devenu clair que les principes classiques ne forment qu'une étape dans le développement de la science ; il fut reconnu qu'ils ne forment nullement une prémisses nécessaire, et donnée une fois pour toutes, pour la description scientifique des phénomènes naturels.

5. Les inégalités de Heisenberg comme limites d'applicabilité de la description classique

Revenons aux raisonnements du paragraphe 2. Nous y avons indiqué des exemples (symétrie sphérique du système de deux charges, interférence des ondes de matière) qui montrent clairement que la description classique (c'est-à-dire absolue, détaillée et déterministe) est inapplicable aux micro-objets tels que l'électron. D'autre part, nous savons que pour les objets d'échelle macroscopique la description classique est bien applicable avec une

grande précision. La question se pose : quelle est la limite d'applicabilité et quelle est la précision de la méthode classique de description ?

Envisageons le phénomène le plus simple — le mouvement d'un point matériel de masse m . D'après la mécanique classique, l'état de mouvement d'un point matériel est caractérisé par les valeurs instantanées des coordonnées x, y, z et des composantes p_x, p_y, p_z de l'impulsion de la particule. Cependant, les possibilités réelles de mesurer la position et l'impulsion de la particule sont limitées par les effets quantiques. Ces effets se manifestent, par exemple, dans l'interaction de la particule avec les photons de la lumière qui l'éclaire. Il est essentiel qu'un photon, qui est caractérisé par des paramètres ondulatoires, soit en même temps porteur d'énergie et d'impulsion qui le caractérisent comme particule. Les paramètres ondulatoires sont : la fréquence ν , la longueur d'onde $\lambda = c/\nu$ et le vecteur d'onde k définissant la direction de propagation et dont la valeur absolue est $|k| = 2\pi/\lambda = 2\pi\nu/c$. En désignant l'énergie et l'impulsion du photon par E et par p , on peut écrire la relation qui relie ces quantités aux paramètres ondulatoires sous la forme

$$E = h\nu; \quad p = \frac{h}{2\pi}k \quad (1)$$

ou h est la constante de Planck dont la valeur numérique est

$$h = 6,6 \cdot 10^{-27} \text{ erg. sec} \quad (2)$$

Si l'on introduit la fréquence angulaire $\omega = 2\pi\nu$ et la nouvelle constante

$$h' = \frac{h}{2\pi} = 1,05 \cdot 10^{-27} \text{ erg. sec} \quad (2^*)$$

la relation (1) prend la forme

$$E = h'\omega; \quad p = h'k \quad (1^*)$$

La relation (1) ou (1*) relie les propriétés ondulatoires et corpusculaires d'un photon : le second membre contient les quantités ω et k mesurables par des procédés interférentiels, tandis que les quantités E et p qui figurent au premier membre caractérisent le photon comme corpuscule.

Reproduisons, tout brièvement, l'analyse, donnée par Heisenberg, des différents moyens pour mesurer la position et l'impulsion d'une particule. La position peut être mesurée, en principe, en éclairant la particule, c'est-à-dire, en la faisant entrer en collision avec des photons. Mais puisque les photons sont porteurs de l'impulsion qui peut être transmise à la particule, l'impulsion de cette dernière (même si elle était connue avant la collision) devient indéfinie à un certain degré. Les conditions favorables pour mesurer la position de la particule (petites longueurs d'ondes) sont défavorables pour en mesurer l'impulsion (grands reculs pendant la collision avec le photon), et inversement, les conditions favorables à la mesure de l'impulsion sont défavorables à celle de la position.

Ce résultat se résume quantitativement au moyen des inégalités de Heisenberg

$$\Delta x \Delta p_x > h'; \quad \Delta y \Delta p_y > h'; \quad \Delta z \Delta p_z > h' \quad (3)$$

($\Delta x, \Delta y, \Delta z$) désignant l'incertitude de la position et ($\Delta p_x, \Delta p_y, \Delta p_z$) celle de l'impulsion de la particule. On peut ajouter à (3) la relation

$$\Delta t \Delta (E' - E) > h' \quad (4)$$

entre l'incertitude de l'échange d'énergie et celle de la durée de cet échange. L'inégalité (4) peut être désignée comme inégalité de Heisenberg-Bohr.

On a d'abord interprété les quantités $\Delta x, \Delta p_x$, etc. comme erreurs ou inexactitudes des résultats de la mesure de x, p_x etc. Cette interprétation n'est correcte que jusqu'à un certain degré. Le terme même d'« inexactitude » présuppose qu'il existe des valeurs exactes de x, p_x , etc. mais que, pour une raison inconnue, elles ne se prêtent pas à la mesure. Cette dernière supposition est tout simplement fausse. En réalité, la vraie cause de l'impossibilité de mesurer exactement réside dans la nature de la particule qui n'admet pas de localisation simultanée dans l'espace ordinaire et dans celui des impulsions, sa nature étant à la fois corpusculaire et ondulatoire. En d'autres termes, si certaines quantités ou groupes de quantités ne sont pas mesurables, c'est que leurs valeurs exactes n'existent pas. Pour cette raison il est préférable d'employer le terme « incertitude », ou quelque autre terme équivalent, mais non pas « erreur » ou « inexactitude ».

La signification de la relation (4) de Heisenberg-Rohr est analogue. Cette relation affirme que l'acte d'échange de l'énergie n'est pas localisable dans le temps avec une exactitude absolue. Les conclusions qui concernent les possibilités de diverses mesures (en premier lieu, celle de mesurer avec une précision donnée l'échange d'énergie qui a lieu pendant le laps de temps donné) en sont des corollaires.

Les inégalités de Heisenberg donnent une réponse à la question posée au commencement de ce paragraphe : elles indiquent les limites d'applicabilité de la méthode classique de la description des objets et des phénomènes. Mais elles n'introduisent aucune restriction quant à l'exactitude d'autres méthodes plus parfaites et elles ne fixent aucunement des limites à notre connaissance de la nature.

*6. Le concept de relativité
par rapport aux moyens d'observation
comme base pour la description des phénomènes physiques*

Dans les paragraphes précédents nous avons déjà énuméré plusieurs fois les abstractions sur lesquelles repose la description classique. Cette description présuppose tacitement : 1° que les phénomènes physiques soient indépendants des moyens de les observer ; 2° qu'il soit possible d'observer à la fois tous les aspects d'un phénomène et 3° qu'il règne un déterminisme complet dans le cours de chaque phénomène. L'analyse des phénomènes typiques de la physique quantique (par exemple, des expériences où se manifeste, pour les électrons ou les photons, le dualisme onde-corpuscule) conduit à conclure que les trois présuppositions précédentes ne sont pas réalisées. Il nous faut donc chercher une autre base pour la description des phénomènes.

La nouvelle méthode de description des phénomènes doit se fonder sur ce qu'il est réellement possible d'obtenir en mesurant les objets atomiques. En étudiant ces possibilités, on doit tenir compte de la structure et du fonctionnement des appareils de mesure, qui déterminent aussi les conditions extérieures pour l'objet atomique envisagé. Pour décrire les appareils de mesure et

les conditions extérieures, il suffit d'appliquer la méthode classique en observant toutefois que, pour ne pas dépasser les limites du possible, les valeurs des paramètres qui caractérisent les moyens d'observation ne peuvent être fixées qu'avec une incertitude satisfaisant aux inégalités de Heisenberg.

La nécessité d'accepter, pour la description des objets atomiques, une méthode plus compliquée qui consiste à introduire explicitement les moyens d'observation provient du fait qu'en étudiant les objets atomiques on ne peut pas se passer d'un intermédiaire. Un tel intermédiaire est précisément l'appareil de mesure ; un objet atomique ne peut se manifester qu'après être entré en réaction avec l'appareil. Par exemple, le parcours d'une particule ne devient visible que si elle a déclenché une « avalanche » dans la chambre Wilson ou dans la couche photographique.

En général, lorsque nous parlons du comportement et des propriétés des objets atomiques, nous devons toujours nous rendre compte du fait que ces propriétés ne sont jamais perçues de façon purement spéculative. Pour les connaître, il faut analyser le résultat de l'interaction entre l'objet atomique et un appareil qui fonctionne dans des conditions physiques bien définies, créées par lui-même. L'acte de la connaissance n'est jamais purement spéculatif, mais repose sur des observations qui ont nécessairement un caractère matériel.

Pour tenir compte de toutes ces circonstances, *il faut prendre comme élément, dont l'étude fait l'objet d'une théorie physique, le résultat de l'interaction d'un objet atomique avec un appareil de mesure dont la description est classique*. L'étude de ces interactions conduit à la connaissance des propriétés de l'objet atomique lui-même, tandis que les prévisions de la théorie prennent la forme de prévision de tels ou tels résultats de ces interactions. Cette façon de poser le problème n'exclut nullement l'introduction des paramètres qui caractérisent l'objet atomique lui-même (par exemple, charge, masse, spin d'une particule), mais elle permet d'étudier celui des aspects offerts par l'objet (par exemple, l'aspect corpusculaire ou ondulatoire) qui se manifeste par rapport à l'appareil de structure donnée.

La nouvelle façon d'envisager le problème comprend le cas où les différents aspects et propriétés d'un objet ne se manifestent pas ensemble, c'est-à-dire, le cas où la description multilatérale et détaillée du phénomène et de l'objet devient impossible. Ce cas se présente lorsqu'il y a incompatibilité entre les conditions extérieures, indispensables pour que l'objet se révèle sous l'un ou l'autre de ses aspects. Les propriétés d'un objet qui se manifestent dans des conditions non seulement différentes, mais incompatibles, peuvent être désignées, d'après Bohr, comme complémentaires. Telles sont, par exemple, pour l'électron sa capacité de localisation et son pouvoir d'interférence. Il n'y a pas de sens à envisager comme simultanées des propriétés complémentaires. C'est pourquoi le concept du « dualisme ondulatoire — corpusculaire » est bien fondé et ne contient aucune contradiction logique interne.

En acceptant, comme élément primaire de la description du comportement d'un objet atomique, le résultat de son interaction avec un appareil classique, nous sommes loin de considérer l'objet comme « moins réel » que l'appareil, ou de réduire les propriétés de l'objet aux propriétés de l'appareil. Nous ne faisons qu'introduire le concept de *relativité par rapport aux moyens d'observations*, qui généralise le concept bien connu de relativité par rapport à un système de référence.

7. *Probabilité et possibilité potentielle*

Même si l'objet atomique est placé dans des conditions bien définies, son interaction avec l'appareil de mesure n'aboutit pas nécessairement à un résultat calculable d'avance ; le résultat d'une telle interaction n'a qu'une certaine probabilité. Une série d'interactions, obtenues en répétant l'expérience dans les mêmes conditions, conduit à une statistique qui correspond à une distribution bien définie des probabilités. Il s'ensuit que pour décrire l'objet atomique, son état et son comportement, il devient nécessaire d'introduire un élément essentiellement nouveau — la notion de *probabilité* et, avec celle-ci, la notion de *possibilité potentielle* (ou virtuelle).

En assimilant ces notions, la physique dépasse les cadres trop étroits du déterminisme laplacien, tout en conservant l'idée de causalité.

On s'est servi de la notion de probabilité aussi dans la physique classique, mais on y attachait un sens tout différent. Dans la physique classique, on introduisait les probabilités faute de connaître complètement les conditions du problème, lorsqu'on voulait se débarrasser des paramètres inconnus en en prenant la moyenne. On ne faisait cependant pas de ce procédé une question de principe, gardant l'idée qu'on pourrait toujours compléter suffisamment les conditions pour que l'un des résultats possible se réalise avec certitude, les autres n'ayant pas lieu. On voit que dans la physique classique l'introduction des probabilités avait pour but de parer à l'insuffisance de la conception du problème, insuffisance qui était peut-être inévitable, mais ne préjugait pas de principes.

Dans la physique quantique, l'emploi des probabilités a une signification toute différente. Elles y constituent un élément primordial, et elles sont introduites dans la théorie pour tenir compte des possibilités potentielles existant, dans les conditions données, indépendamment de nos connaissances (objectivement) et non faites pour combler les lacunes de nos connaissances.

8. Généralisation du concept « état d'un système »

Dans la méthode quantique, on prend comme élément primaire de la description d'un objet l'acte de l'interaction de l'objet avec l'appareil. Cela enrichit considérablement nos moyens de description et permet d'étendre le cercle des notions avec lesquelles on opère. Quelques-unes des notions nouvelles ont été déjà énumérées. Nous allons maintenant envisager la généralisation du concept de l'état d'un système physique et de son évolution avec le temps.

Considérons une expérience qui permet de tirer des conclusions concernant le comportement futur d'un système physique ; ces conclusions se rapportent aux résultats des interactions futures du système avec différents appareils de mesure.

Cette expérience initiale prépare, pour ainsi dire, le système (comme on prépare un faisceau d'électrons d'énergie donnée) et le

met dans des conditions extérieures bien déterminées (par exemple, introduit le faisceau dans un cristal). La préparation du système et l'influence des conditions extérieures peuvent être considérées séparément comme deux étapes de l'expérience, mais on peut aussi les considérer ensemble comme une seule *expérience initiale*, effectuée avec le but de faire des pronostics. Donc, l'expérience initiale se rapporte à l'avenir. Il va sans dire que la préparation du système et les conditions extérieures auxquelles il est soumis doivent être spécifiées par la méthode classique.

L'expérience initiale ne donne que des pronostics. Pour vérifier ces pronostics, on doit faire réagir le système étudié avec un appareil du type donné et l'on doit enregistrer les résultats de l'interaction. C'est là l'étape finale de l'expérience. Le procédé de vérification peut être considéré comme une expérience séparée (*expérience finale*) qui se rapporte au passé et non à l'avenir comme l'expérience initiale. Puisque le type de l'appareil enregistreur peut varier (et que les expériences faites avec des appareils de type différent sont en général incompatibles) différentes formes de l'expérience finale restent possibles ; chacune de ces formes est adaptée à la mesure d'une quantité du type donné (coordonnées, composantes de l'impulsion, etc.).

L'expérience initiale et l'expérience finale constituent ensemble l'*expérience totale* ou complète. Pour apprendre quelque chose sur les propriétés des objets étudiés il faut que l'expérience soit totale.

Imaginons l'expérience initiale répétée un grand nombre de fois, chaque fois dans les mêmes conditions. On peut alors répéter beaucoup de fois l'expérience finale qui consiste à mesurer une quantité physique déterminée. Pour les valeurs ainsi trouvées de cette quantité, on obtient une répartition statistique qui correspond à la répartition des probabilités de cette quantité dans les conditions de l'expérience initiale. En conservant ces conditions initiales et en variant l'étape finale, on peut obtenir de la même manière des statistiques pour d'autres quantités. On voit quelle forme doit prendre le pronostic qui découle de l'expérience initiale : il doit donner la répartition des probabilités pour chaque quantité mesurable dans l'expérience finale.

Notons que l'expérience initiale doit donner les répartitions des probabilités même pour des quantités qui ne sont pas mesurables ensemble (même pour des quantités complémentaires dans le sens de Bohr). Cette circonstance très importante montre une fois de plus qu'il s'agit ici des possibilités potentielles et non des valeurs des quantités physiques prises dans le sens classique absolu (en négligeant les conditions nécessaires pour les mesurer).

L'ensemble des possibilités potentielles pour l'expérience finale, qui découle de l'expérience initiale donnée, caractérise l'état d'un système. Si cette caractéristique est maximale (aussi complète que possible) on peut la nommer état du système tout court. L'expérience initiale peut être nommée maximale si elle conduit à la connaissance de l'état du système.

La définition de l'état du système que nous venons de proposer est une généralisation toute naturelle de la définition classique. En effet, la vérification de l'état par l'expérience est admise dans la physique classique aussi bien que dans la physique quantique. Mais comme dans la physique classique les résultats d'une telle expérience sont supposés connus d'avance, on pouvait s'y passer de la notion de possibilité potentielle.

Si l'expérience finale est accomplie un certain temps après l'expérience initiale, les probabilités doivent être recalculées. D'après notre définition de l'état du système, cette variation des probabilités signifie la variation de l'état avec le temps. En supposant connues les conditions extérieures dans lesquelles se trouve l'objet atomique, la théorie doit donner la loi de variation des probabilités avec le temps, c'est-à-dire, la loi de l'évolution temporelle de l'état du système. Nous reviendrons à cette question au paragraphe 11.

9. Destination du formalisme mathématique de la mécanique quantique

La nouvelle position du problème de la description des phénomènes physiques, dont le point de départ est l'idée de relativité par rapport aux moyens d'observation, exige un formalisme mathématique plus développé et plus compliqué que celui de la physique

classique qui ne posait pas la question des moyens d'observations et « absolutisait » les phénomènes. Le nouveau formalisme doit permettre de calculer les répartitions de probabilités pour différentes quantités physiques, et non seulement les valeurs numériques de ces quantités. Il n'est que naturel que le formalisme devienne plus compliqué : au lieu des nombres (valeurs numériques des quantités physiques) qui figuraient dans la théorie classique, le formalisme quantique introduit des opérateurs et d'autres notions mathématiques nécessaires pour calculer les répartitions de probabilités. L'appareil de mesure est caractérisé dans ce formalisme par sa destination — l'ensemble des quantités physiques qu'il permet de mesurer. Les valeurs possibles (continues ou discrètes) des quantités physiques s'obtiennent dans le formalisme quantique comme valeurs propres des opérateurs correspondants. La question des valeurs possibles se réduit d'ailleurs à celle des probabilités : les valeurs possibles sont celles pour lesquelles les probabilités peuvent être différentes de zéro.

Il ne serait pas correct d'affirmer que le formalisme de la physique quantique est plus symbolique que celui de la physique classique. Chaque formalisme est nécessairement symbolique, et la différence entre les deux formalismes réside non pas dans le degré du symbolisme, mais dans l'objet même du calcul : dans le cas quantique ce ne sont pas les nombres mais les fonctions, puisqu'on s'intéresse non pas aux valeurs elles-mêmes des quantités physiques, mais à leurs répartitions des probabilités. D'ailleurs, l'expérience pour laquelle ces probabilités sont calculées doit être caractérisée dans la théorie quantique d'une manière plus détaillée que dans la théorie classique : on doit indiquer non seulement le système de référence, mais aussi le type (la structure) de l'appareil de mesure.

10. La fonction d'onde décrivant le virtuellement possible

En mécanique quantique, les probabilités pour l'expérience finale qui découlent de l'expérience initiale donnée (supposée maximale) s'expriment au moyen d'une fonction auxiliaire qui satisfait à certaines équations linéaires et qu'on nomme « fonction

d'onde ». Nous avons vu que l'expérience initiale étant donnée, le choix de l'expérience finale reste encore libre : on peut s'arranger, par exemple, pour qu'elle permette de mesurer la position d'une particule ou bien son impulsion. Mais pour toutes les formes de l'expérience finale (dont chacune correspond à la mesure d'une quantité physique déterminée), les probabilités correspondantes s'expriment par une seule et même fonction d'onde. Cela suffit pour voir que la fonction d'onde n'est pas un champ réel du type classique, mais qu'elle représente le virtuellement possible. Cette dernière expression peut être comprise dans deux sens différents : elle peut s'appliquer au choix de l'expérience finale (que l'observateur reste libre de fixer) et elle s'applique aussi aux différents résultats possibles pour un type donné de l'expérience finale (les probabilités de ces résultats étant déterminées par l'expérience initiale).

Comme la fonction d'onde donne la description la plus complète de l'état d'un système physique, on peut dire que dans la mécanique quantique l'état d'un système est caractérisé par les réactions virtuellement possibles du système avec les appareils de mesure.

La distinction qu'on doit faire entre les faits accomplis (constatés aux moyens des appareils de mesure) et les faits qui ne sont que virtuellement possibles (auxquels se rapportent les probabilités) est d'une importance primordiale pour l'interprétation correcte de la mécanique quantique. Le rapport de la fonction d'onde au virtuellement possible lève toutes les difficultés de son interprétation, en particulier celles qui sont liées à son changement discontinu après une nouvelle expérience initiale (voir la fin du paragraphe 11).

Le formalisme de la mécanique quantique permet de trouver, pour un système physique donné, la fonction d'onde qui correspond à un résultat donné de l'expérience initiale. Nous n'avons pas l'intention d'expliquer ici les notions mathématiques de ce formalisme, mais nous allons considérer quelques exemples de fonction d'onde qui peuvent donner une idée un peu plus précise de son interprétation.

Les relations de de Broglie

$$p = \hbar k; \quad E = \hbar \omega \quad (5)$$

permettent de rapporter l'état d'une particule d'impulsion et d'énergie données par (5), à une onde ψ de la forme

$$\psi = e^{\frac{i}{\hbar}(xp_x + yp_y + zp_z - Et)} \quad (6)$$

Ce rapport a été établi par de Broglie en 1924. A cette époque, l'interprétation de la fonction d'onde ψ n'était pas claire. Maintenant nous savons que cette fonction se rapporte aux réactions virtuellement possibles de la particule avec différents appareils de mesure. Pour la fonction de la forme (6), ces possibilités sont telles que la mesure de l'impulsion doit nécessairement donner la valeur (5), tandis que celle des coordonnées peut donner toutes les valeurs avec la même probabilité.

Pour la fonction d'onde plus générale

$$\psi = \psi(x, y, z, t) \quad (7)$$

correspondant à une particule, la probabilité de localiser la particule dans un volume donné, ou plutôt la densité spatiale de cette probabilité, est proportionnelle au carré du module de la fonction ψ . La probabilité (ou sa densité) dans l'espace de l'impulsion est proportionnelle au carré de l'amplitude de la fonction ψ écrite sous la forme d'une somme des ondes planes du type (6) ou sous la forme d'une intégrale de Fourier. Pour la fonction (6) cette règle générale se réduit à l'interprétation donnée plus haut.

Remarquons que la répartition des probabilités pour les coordonnées et les composantes de l'impulsion, calculée d'après cette règle, satisfait toujours aux inégalités de Heisenberg (3) quelle que soit la fonction d'onde ψ . Quant à l'inégalité (4) de Heisenberg — Bohr, elle ne découle pas immédiatement du formalisme, et pour l'obtenir il faut considérer le procédé de mesure de l'énergie en faisant usage des inégalités (3).

11. La variation de la fonction d'onde avec le temps

Nous avons vu que la fonction d'onde permet de calculer les probabilités de l'expérience finale. Ces probabilités peuvent dépendre du moment où l'expérience finale est faite. Il en résulte que la fonction d'onde elle-même doit dépendre du temps.

La fonction d'onde de de Broglie (6) dépend du temps par l'intermédiaire de l'exponentielle $\exp\left(-\frac{i}{h'} Et\right)$ où E est l'énergie de la particule. Dans la théorie non relativiste et pour une particule libre on peut prendre pour E l'expression suivante

$$E = \frac{p^2}{2m} = \frac{1}{2m} (p_x^2 + p_y^2 + p_z^2) \quad (7)$$

étant la masse de la particule. La fonction (6) satisfait alors à l'équation d'onde

$$-\frac{h'^2}{2m} \Delta \psi = ih' \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad (8)$$

ou nous avons posé

$$\Delta \psi = \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} \quad (9)$$

L'équation (8) ne contient plus les paramètres p_x, p_y, p_z qui figuraient dans la fonction d'onde (6). Cette équation peut être considérée comme la loi générale (non relativiste) de variation de la fonction d'onde pour une particule libre. Pour une particule soumise aux forces extérieures, cette loi doit être modifiée. Si ces forces découlent d'une fonction des forces ($-U$), U étant l'énergie potentielle, on doit remplacer l'équation (8) par la suivante

$$-\frac{h'^2}{2m} \Delta \psi + U\psi = ih' \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad (10)$$

qu'on nomme équation de Schrödinger. L'équation (10) admet des solutions de la forme

$$\psi(x, y, z, t) = \psi_E(x, y, z) e^{-\frac{i}{h'} Et} \quad (11)$$

qui correspondent aux états stationnaires du système. En effet, pour les fonctions d'onde de la forme (11), les répartitions de probabilités pour les coordonnées et les composantes de l'impulsion ne dépendent pas du temps, ce qui est en accord avec le

concept de stationnarité. Pour les états stationnaires, l'énergie du système a une valeur bien déterminée [celle qui figure dans (11)]. Mais il existe des états non stationnaires pour lesquels l'énergie n'est plus déterminée. Ces états existent même pour une particule libre.

Envisageons le cas le plus simple d'une particule dans l'espace à une dimension (coordonnée x , impulsion $p_x = p$). Supposons qu'au moment initial les distributions des probabilités pour x et pour p soient telles que les écarts quadratiques moyens $(\Delta x)_0$ et $(\Delta p)_0$ définis par

$$(\Delta x)_0^2 = \text{moyenne } (x - x_0)^2; \quad (\Delta p)_0^2 = \text{moyenne } (p - p_0)^2 \quad (12)$$

sont minimales (aussi petits que le permettent les inégalités de Heisenberg). On peut démontrer que les distributions des probabilités suivent la loi de Gauss, les densités correspondantes pour la coordonnée et l'impulsion étant égales à

$$w(x, 0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot (\Delta x)_0} e^{-\frac{(x - x_0)^2}{2(\Delta x)_0^2}} \quad (13)$$

$$w^*(p, 0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot (\Delta p)_0} e^{-\frac{(p - p_0)^2}{2(\Delta p)_0^2}} \quad (14)$$

avec ¹

$$(\Delta x)_0 \cdot (\Delta p)_0 = \frac{h'}{2} \quad (15)$$

Ces probabilités correspondent à la fonction d'onde initiale

$$\psi(x, 0) = \sqrt{w(x, 0)} \cdot e^{\frac{i}{h'} x p_0} \quad (16)$$

On peut trouver la fonction d'onde $\psi(x, t)$ qui satisfait à l'équation d'onde (8) et se réduit à (16) pour $t = 0$. Cette fonction d'onde

¹ Le facteur de h' dans les inégalités de Heisenberg dépend de la définition des écarts ; pour les écarts *quadratiques* le facteur est égal à $\frac{1}{2}$.

donne les distributions des probabilités pour l'impulsion p et la coordonnée x au temps t . Pour l'impulsion on a

$$w^*(p, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \Delta p} e^{-\frac{(p - p_0)^2}{2(\Delta p)^2}} \quad (17)$$

avec

$$\Delta p = (\Delta p)_0 \quad (18)$$

c'est-à-dire les probabilités restent les mêmes, ce qui est facile à comprendre, puisque pour une particule libre l'impulsion se conserve.

Pour la coordonnée, la distribution est de la forme

$$w(x, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \Delta x} e^{-\frac{(x - x_t)^2}{2(\Delta x)^2}} \quad (19)$$

avec

$$x_t = x_0 + \frac{p_0}{m} t \quad (20)$$

et

$$\Delta x = \sqrt{(\Delta x)_0^2 + \left(\frac{\Delta p}{m} t\right)^2} \quad (21)$$

Cette distribution dépend du temps d'une manière assez compliquée, mais tout de même facile à comprendre. En effet, puisque la valeur moyenne de la vitesse est $\frac{p_0}{m}$, la coordonnée moyenne de la particule au moment t sera évidemment x_t (équ. 20). Quant à l'écart moyen pour la coordonnée au temps t , il se compose, d'après (21), suivant la « loi des erreurs indépendantes » de l'écart initial $(\Delta x)_0$ et de l'incertitude $\frac{\Delta p}{m} t$ dans le trajet parcouru pendant le temps t , l'incertitude dans la vitesse étant égale à $\frac{\Delta p}{m}$.

On voit que l'interprétation correcte de la fonction d'onde comme pronostic des résultats virtuellement possibles de la mesure est en parfait accord avec les formules obtenues par un raisonnement élémentaire. D'autre part, ces formules excluent toutes les

tentatives d'une interprétation de la fonction d'onde dans le genre classique (comme quelque chose qui appartient à la particule et à elle seule). En effet, la particule étant supposée stable et libre, il est impossible d'interpréter « l'élargissement du paquet d'ondes » [donné par (21)] comme une espèce de déformation de la particule elle-même. Au contraire, ce même élargissement n'est que naturel s'il s'agit des pronostics.

Il importe d'ajouter que la fonction d'onde satisfaisant à l'équation d'onde n'existe que jusqu'au moment de l'expérience finale. Dans cette expérience le virtuellement possible se change en fait accompli, et des nouvelles possibilités virtuelles ne s'ouvrent que dans le cas où cette même expérience peut servir d'expérience initiale (ce qui n'a pas lieu en général ; l'objet de l'expérience peut même cesser d'exister, comme un photon absorbé par un atome). Si cette expérience, ou une nouvelle expérience initiale, fournit des données nouvelles, on en peut déduire une nouvelle fonction d'onde. Mais cette nouvelle fonction n'a aucune relation avec l'ancienne. La transition à la nouvelle fonction est discontinue et elle ne se fait pas au moyen de l'équation d'onde ; cette transition représente non pas le procédé physique de la mesure, mais plutôt le changement des pronostics qui en découlent.

12. Conclusion

Dans le présent article, nous avons essayé d'attirer l'attention sur ce qui distingue la conception de la théorie quantique de la théorie classique. La description absolue, détaillée et déterministe de la physique classique s'est trouvée inapplicable aux phénomènes atomiques. Elle a été remplacée par une description relative aux moyens d'observations qui est complémentaire et probabiliste. Cette nouvelle méthode de description, loin d'imposer des bornes à notre connaissance de la nature, en a considérablement élargi le domaine. Dans la physique, il y a des problèmes qu'on ne peut même pas aborder par des moyens classiques. Tel est, par exemple, le problème de l'interaction des particules identiques. Pour les électrons, on a été conduit à introduire un nouveau degré de liberté (le spin) et une nouvelle forme d'interaction qui se formule

au moyen de certaines conditions de symétrie pour la fonction d'onde d'un système d'électrons. Cette nouvelle forme d'interaction, inconcevable en théorie classique, joue un rôle décisif dans la constitution des atomes et des molécules, et aussi dans celle des corps solides et liquides (en particulier, des conducteurs d'électricité).

Le nombre des applications de la physique quantique aux problèmes de la constitution de la matière est si grand qu'on ne peut même pas les énumérer ici. Le seul point sur lequel nous voulons insister, c'est que, dans toutes ces applications, il s'agit non pas des faibles corrections apportées à la théorie classique, mais de la découverte des nouvelles qualités de la matière, pour la description desquelles la théorie classique s'est trouvée impuissante.