

LA MÉCANIQUE QUANTIQUE ET LA RÉALITÉ

par MM. V. AUGELLI, A. GARUCCIO et F. SELLERI

Istituto di Fisica dell'Università di Bari

I.N.F.N. Sezione di Bari

Via Amendola, 173 - 70126 BARI (Italie)

(manuscrit reçu le 14 Février 1976)

Résumé : La situation actuelle de la mécanique quantique, partagée entre des développements divergents et des points de vue contradictoires semble indiquer que cette théorie est en état de crise, où le mot crise est pris ici dans le sens exact que lui donne Kuhn.

Nous examinons dans la suite le paradoxe de de Broglie, le paradoxe EPR et l'inégalité de Bell, à partir d'un point de vue unique et nous suggérons que la source de la plupart des difficultés qui surgissent en Mécanique Quantique se trouve dans des choix philosophiques étroitement liés à la structure mathématique de la théorie elle-même.

On donne enfin une nouvelle démonstration plus générale de l'inégalité de Bell.

I - INTRODUCTION.

De nombreuses écoles de pensée se disputent le champ d'étude des fondements de la Mécanique Quantique. On peut certainement dire qu'il n'y a pas de secteur de la science moderne dans lequel on soit aussi peu d'accord sur la façon correcte d'interpréter et de développer la théorie actuellement en vigueur. Nous donnons ci-dessous quelques exemples qui n'ont pas la prétention de recouvrir tout l'éventail des voies proposées.

Selon Everett (¹) chaque fois qu'on effectue une mesure, l'univers entier se partage en n univers parallèles et dans chacun d'eux on obtient une valeur parmi les n résultats possibles de la mesure.

Bien sûr, l'expérimentateur lui-même se partage simultanément en n copies presque identiques, une pour chaque branche de l'univers. A ceux qui objectent à cela qu'aucun expérimentateur ne s'est jamais senti coupé durant une observation, Everett réplique qu'il en est ainsi parce que les lois de la physique l'interdisent, de même qu'elles font que nous ne nous sentons pas tourner avec la Terre.

Wigner ⁽²⁾ pense qu'il demeurera remarquable, quelle que soit la façon dont nos conceptions se développeront dans l'avenir que l'étude même du monde extérieur ait mené à la conclusion que le contenu de la conscience est une réalité ultime.

Il obtient cette conclusion à partir du fait que la réduction d'un paquet d'ondes ne peut avoir lieu selon les lois habituelles de la théorie quantique et qu'on doit avoir recours à un mécanisme spécial pour obtenir le résultat désiré chaque fois qu'un résultat expérimental pénètre dans la conscience de l'observateur.

Ceci place la conscience quelque peu en dehors du champ des applications des lois physiques bien qu'elle soit capable pourtant d'agir d'une certaine manière lorsqu'un acte d'observation est accompli. Tout ce courant de pensée se rattache évidemment à l'idéalisme philosophique.

Bohm et Bub ⁽³⁾ décrivent une mesure avec des équations non linéaires, associant des variables cachées aux variables quantiques habituelles et montrent que toutes les prédictions de la Mécanique Quantique peuvent être reproduites à l'aide d'un mécanisme strictement causal de processus de mesure. Pour les mesures effectuées sur des systèmes corrélés, la théorie est non locale, quelle que soit la distance entre les lieux des deux mesures. Selon Bohm et Hiley ⁽⁴⁾, on devrait considérer des systèmes corrélés comme un tout insécable, même lorsqu'il n'y a pas de superposition entre leurs localisations spatiales. L'espace devient alors en grande partie une illusion de nos sens et l'on peut instantanément transmettre des signaux entre les systèmes corrélés observés.

Selon Nelson ⁽⁵⁾, de la Peña ⁽⁶⁾, et plusieurs autres auteurs, les processus de la Mécanique Quantique peuvent être considérés comme des processus stochastiques. Des fluctuations dans le vide produisent un mouvement désordonné des particules. On peut alors démontrer facilement des relations du type de celles d'Heisenberg liant la position et l'impulsion, la constante de diffusion divisée par le double de la masse de la particule, jouant le rôle de la constante de Planck. D'une façon similaire, bien que formellement plus complexe, on peut en déduire l'équation de Schrödinger. Ces succès ont conduit

certain auteurs à penser que l'on peut ramener finalement la mécanique quantique à une théorie objectivement probabiliste. Selon nous, il est difficile d'accepter un tel point de vue parce que les effets d'interférence exigent clairement l'hypothèse de propriétés ondulatoires pour la matière.

Ces courants de recherche révèlent, ainsi que d'autres, un manque remarquable d'accord parmi les spécialistes à propos de la vraie nature des phénomènes quantiques. Un désaccord semblable existe en ce qui concerne la notion de physique classique : chaque école de pensée attribue à la physique classique les caractéristiques opposées à celles contenues dans sa propre approche. Ce n'est pas souvent qu'on considère comme le point essentiel de la différence entre la physique quantique et la physique classique, celle qui est en fait véritablement fondamentale, à savoir le dualisme onde-particule pour la matière et le rayonnement. Ce n'est cependant pas surprenant si l'on songe qu'il y a un large désaccord parmi les spécialistes sur ce point également.

On groupe généralement de la façon suivante les différentes écoles de pensée à ce sujet :

1°) Refus du dualisme.

C'est la position de Schrödinger et de Landé qui pensent qu'on devrait ne tenir compte que d'un des deux aspects. Alors que Schrödinger nie l'existence des particules et assimile chaque entité atomique (champ électromagnétique, électron...) à une simple onde, Landé retourne à la vision classique des particules, considérées comme des entités purement corpusculaires et du champ électromagnétique, considéré comme une simple onde sans aucun corpuscule associé. Sans mésestimer l'autorité des défenseurs de ce courant de pensée, nous croyons qu'il s'agit là d'une possibilité que l'accumulation d'expériences, depuis le début de ce siècle, qui tendent à prouver sa fausseté, permet d'écarter.

2°) Dualisme en dehors de la science.

Selon certains auteurs célèbres (Heisenberg, Jordan, Wigner), on devrait se ranger à l'idée que la science est exclusivement un ensemble de données expérimentales et la création des schémas mathématiques logiquement cohérents, capables d'expliquer les mesures expérimentales et d'en prévoir de nouvelles. On devrait placer en dehors de la science toutes les questions concernant la structure véritable d'entités telles que l'électron, le photon, l'atome etc..., ces questions étant dépourvues de tout intérêt pour le physicien. En particulier, on devrait éviter d'attribuer des propriétés corpusculaires et/ou ondu-

toires aux entités atomiques et on devrait se borner à considérer les schémas mathématiques fournis par la Mécanique Quantique.

3°) Entités spirituelles.

Un troisième courant de pensée, lancé à l'origine par von Neumann et développé par la suite par London, Bauer et Wigner requiert l'introduction d'entités spirituelles en vue d'une interprétation complète de la fonction d'onde ψ . L'idée fondamentale est ici que ψ représente uniquement la connaissance qu'a l'observateur du système atomique. De nouvelles données expérimentales aboutissent à un soudain changement de la connaissance et par conséquent à un saut de la valeur initiale de ψ à une valeur complètement nouvelle. Puisque ce brusque saut prend place dans la conscience de l'observateur et puisque les lois quantiques habituelles prévoient seulement une évolution continue de ψ , il est affirmé que de tels sauts de ψ ("réduction du paquet d'ondes") sont dus à l'activité spirituelle du sujet. L'argument est pensé être renforcé par le paradoxe dit de "l'ami de Wigner" qui montre que la Mécanique Quantique ne peut s'appliquer à l'homme et que donc il est dans les êtres humains quelque chose d'indescriptible par la science.

4°) Le dualisme vu comme un dilemme insurmontable.

De 1927 à 1957, Bohr a avancé son fameux principe de complémentarité dont la signification philosophique était très proche des points de vue des philosophes danois Kierkegaard et Høffding, dont il est connu qu'ils ont influencé Niels Bohr. Selon ce point de vue, l'homme est une créature très limitée : ses catégories (par exemple celles des ondes et des corpuscules) ne sont pas applicables aux domaines physiques dont les dimensions (10^{-8} cm) sont en dehors de l'expérience humaine directe. Nous ne possédons tout simplement pas les concepts adéquats pour décrire ce monde nouveau et sommes obligés d'adopter des idées mutuellement contradictoires (comme celles d'ondes et de corpuscules) quand nous essayons d'interpréter les processus physiques à l'aide de nos concepts macroscopiques préconçus.

5°) Relativité aux moyens d'observation.

En 1957, Fock proposa une nouvelle formulation du principe de complémentarité, qui était plus proche d'une description réaliste des phénomènes et qui fut adoptée par Bohr, Omelianovsky et plusieurs autres auteurs soviétiques.

Selon ce point de vue, la valeur finie de h entraîne que chaque interaction entre un instrument et un système atomique constitue un processus global qui ne peut être subdivisé en une partie instrumentale et une partie atomique. Il est donc possible que le système atomique en interaction avec une certaine classe d'instruments se manifeste à un niveau macroscopique (où se trouve l'observateur) comme une onde, alors que le même système atomique en interaction avec une autre classe d'instruments, se manifeste à un niveau macroscopique, comme une particule. Par conséquent, pour un système atomique, la propriété de se comporter comme une onde (ou comme une particule) dépend de la classe d'appareils de mesure qu'on utilise.

A notre avis personnel, ce point de vue paraît très acceptable en principe, mais ses applications sont très obscures dans les cas concrets, comme celui de l'expérience de Davisson et Germer.

6°) Dualisme dans la réalité objective. La seule formulation du dualisme qui puisse concilier pleinement les phénomènes quantiques et l'interprétation immédiate de l'espace et du temps, qui est utilisée dans d'autres sciences, depuis la cosmologie jusqu'à la biologie moléculaire, et que chaque homme, excepté la plupart des théoriciens quantistes tient comme évident, est la formulation originelle avancée par Einstein et de Broglie. Selon ce point de vue, les particules sont localisées dans l'espace, comme dans le schéma classique, mais elles sont incorporées à un phénomène ondulatoire étendu. Pour cette raison, le mouvement d'une particule ne dépendrait pas seulement des potentiels extérieurs agissant sur elle, mais aussi de la présence d'obstacles que l'onde peut rencontrer dans son mouvement et de la réaction qui en résulte de la part de l'onde déformée sur sa particule qui y est incorporée.

Il est intéressant de remarquer que cette façon d'aborder la théorie quantique est adoptée aussi par quelques physiciens et philosophes soviétiques comme Pachomov et Tyapkine (7).

Les désaccords en science ne sont certainement pas nouveaux (ainsi est fameuse par exemple la lutte de Boltzmann contre les énergétistes) mais la situation présente n'apparaît pas comme une confrontation qui appartiendrait à la physiologie même de la science. A notre avis il existe trop d'écoles de pensée pour que ce soit le cas. L'état présent de la théorie quantique rappelle plutôt la description de la crise d'un paradigme scientifique proposée par Kuhn (8). Cette impression se trouve renforcée si l'on observe qu'il y a des "anomalies" (problèmes irrésolus) auxquelles les théoriciens quantiques continuent d'être confrontés. Tels sont par exemple la théorie de la mesure, le paradoxe de de Broglie, le paradoxe EPR, et l'inégalité de Bell.

Dans le présent article, nous examinerons les trois derniers problèmes (la théorie de la mesure étant trop complexe pour être discutée dans une courte note) et nous montrerons que le fait invariant qui en ressort est une incompatibilité de la Mécanique Quantique avec l'attitude la plus simple qu'un physicien tendrait naturellement à adopter : celle d'un réalisme philosophique (des objets séparés existent presque indépendamment les uns des autres) et d'un rationalisme (l'espace, le temps et la causalité ne sont pas des illusions de nos sens).

Cette conclusion aide à notre avis à comprendre pourquoi la Mécanique Quantique semble traverser une crise: la voie naturelle de développement étant bloquée, on essaye de nombreuses directions différentes de développement sans la possibilité de trouver dans la plupart des cas, la voie qui permettrait de sortir de la situation désagréable actuelle.

II - LE PARADOXE DE DE BROGLIE.

La première question à examiner est celle qu'illustre un paradoxe sur la localisation des particules, proposé par de Broglie (3). Considérons une boîte B à parois parfaitement réfléchissantes que l'on peut diviser en deux compartiments B_1 et B_2 à l'aide d'une cloison amovible. Supposons que B renferme initialement un électron, dont la fonction d'onde $\psi(x, y, z, t)$ est définie dans le volume V de B. La densité de probabilité d'observer l'électron en un point x, y, z au temps t est alors mesurée par $|\psi(xyz, t)|^2$. Puis B est divisée en deux parties B_1 et B_2 , dont l'une, soit B_1 est transportée à Paris, l'autre, B_2 , à Tokyo.

Cette nouvelle situation est décrite en Mécanique quantique à l'aide de deux nouvelles fonctions d'onde ψ_1 et ψ_2 définies respectivement dans les volumes V_1 et V_2 de B_1 et B_2 , et les probabilités P_1 et P_2 de trouver l'électron respectivement dans B_1 et B_2 sont alors données par :

$$P_1 = \int_{V_1} |\psi_1(xyzt)|^2 dV$$

$$P_2 = \int_{V_2} |\psi_2(xyzt)|^2 dV$$

avec $P_1 + P_2 = 1$.

Supposons maintenant que l'on ouvre la boîte B_1 à Paris et que l'on sache alors si l'électron s'y trouve ou ne s'y trouve pas. Dans chacun des deux cas on pourra prévoir avec certi-

tude le résultat d'une observation future effectuée sur B_2 à Tokyo. Si l'électron est présent à Paris, il sera certainement absent à Tokyo, et vice versa.

Si l'observation est effectuée à Paris à l'instant t_0 et si l'électron s'y trouve présent, alors P_1 prendra la valeur 1 pour $t \geq t_0$, ce qui implique que $P_2 = 0$ et $\psi_2(x, y, z, t) \equiv 0$ pour $t \geq t_0$.

L'observation de l'électron à Paris modifie la fonction d'onde à Tokyo, et la réduit à 0. En excluant la possibilité qu'une observation faite à Paris puisse détruire "une moitié d'électron" à Tokyo en la faisant apparaître à Paris, l'attitude naturelle de tout physicien serait d'admettre que l'électron observé au temps t_0 à Paris était déjà là pour $t < t_0$ et que les fonctions d'onde ψ_1 et ψ_2 ne représentent que la connaissance que nous avons de la position de l'électron, antérieurement à toute observation.

Ce raisonnement naturel (qui correspond à la position du réalisme philosophique) si on le mène jusqu'à sa conclusion évidente, conduit à introduire un nouveau paramètre observable λ , qui décrit la localisation de l'électron dans B_1 ou B_2 . Si $\lambda = +1$, on dira que l'électron se trouve dans B_1 et si $\lambda = -1$, qu'il se trouve dans B_2 . Tout ceci implique bien sûr, que la Mécanique Quantique usuelle, qui ne connaît rien au sujet de λ est incomplète.

Il est facile de montrer cependant qu'il ne s'agit pas seulement là du caractère incomplet de la Mécanique Quantique mais encore qu'elle doit être en fait partiellement fautive si on introduit la localisation. Considérons en effet un ensemble statistique de N paires de boîtes B_1 et B_2 ainsi préparées. Suivant les valeurs de λ , on peut diviser cet ensemble en deux sous-ensembles (sans dispersion), le premier composé d'environ $N/2$ systèmes pour lesquels $\lambda = +1$ et le second également d'environ $N/2$ systèmes pour lesquels $\lambda = -1$. Pour les éléments du premier (resp. second) sous-ensemble, on doit trouver avec certitude un électron à Paris (resp. à Tokyo). Si l'on utilise la Mécanique Quantique (supposée applicable) pour décrire cette nouvelle situation, on conclura nécessairement qu'avant même toute observation, on avait :

pour $\frac{N}{2}$ éléments de l'ensemble $\psi = \psi_1; \psi_2 = 0$,

pour $\frac{N}{2}$ éléments de l'ensemble $\psi_1 = 0; \psi = \psi_2$

Mais cette description diffère de la description habituelle, qui affirme que les N éléments de l'ensemble étaient décrits,

avant la mesure, par $\psi = \psi_1 + \psi_2$ (avec ψ_1 défini sur V_1 et ψ_2 sur V_2).

Ces deux descriptions ne sont pas seulement mathématiquement différentes mais sont aussi distinguables par l'observation bien que dans le cas présent, une expérience qui trancherait la question serait extrêmement complexe. Nous laissons momentanément de côté, le problème d'une expérience réelle, qui apparaîtra plus clairement après la discussion du paradoxe EPR et de l'inégalité de Bell.

La conclusion à laquelle nous sommes parvenus plus haut est que le concept d'une existence réelle de l'électron dans l'espace et le temps, même très grossièrement définie (on doit pouvoir seulement distinguer Tokyo de Paris !) mène à des contradictions, dans le cadre de la Mécanique Quantique.

Pour défendre la théorie, on doit alors affirmer qu'il n'y a aucun sens à parler de la localisation d'une particule non encore observée. La Mécanique Quantique ne nie nullement que la particule puisse être observée avec une localisation donnée; elle prévoit même la densité de probabilité de toutes les localisations possibles. Si l'on s'en tient à des observations réellement effectuées, on n'aboutit jamais à des contradictions.

Dans cette optique, le chercheur est forcé d'adopter une philosophie positiviste qui n'autorise que des raisonnements sur les observations et sur les schémas mathématiques, tandis que la réalité objective est bannie du raisonnement scientifique.

Tout ceci conduit à une conclusion assez élémentaire, à savoir que le paradoxe de de Broglie n'existe que pour ceux qui tiennent à une philosophie réaliste (les particules existent objectivement) et rationaliste (l'espace-temps n'est pas qu'une illusion de nos sens et il est possible de parler d'une localisation de l'électron).

Au contraire, si l'on se place à d'autres points de vue philosophiques (comme le positivisme), il ne subsiste ici aucun paradoxe. On verra dans la suite qu'on peut tirer la même conclusion de l'examen du paradoxe EPR et de l'inégalité de Bell.

III - VECTEURS D'ETAT DE PREMIERE ET DE SECONDE ESPECE.

Supposons donnés deux systèmes quantiques isolés S_1 et S_2 , le premier dans un état $|\psi^1\rangle$, le second dans un état $|\psi^2\rangle$.

Alors le système global $S_1 + S_2$, a un vecteur d'état $|\psi^1 \rangle + |\psi^2 \rangle$.

Cette notation symbolique signifie que le vecteur d'état de $S_1 + S_2$ est un vecteur de l'espace de Hilbert, produit des espaces rattachés à S_1 et S_2 . Cette hypothèse mathématique est nécessaire pour assurer l'additivité des grandeurs physiques.

Il est facile de montrer qu'il n'est pas toujours possible d'écrire le vecteur d'état de deux systèmes sous la forme précédente.

Considérons, en effet, un système Σ de spin zéro, se désintégrant spontanément en deux systèmes S_1 et S_2 de spin $\frac{1}{2}$, disons dans l'état $\ell = 0$ de S_1 et S_2 . Alors les spins de S_1 et S_2 doivent être dans un état singlet, ce qui signifie que le vecteur d'état final s'écrira :

$$|\psi \text{ singlet} \rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|u_+^1 \rangle |u_-^2 \rangle - |u_-^1 \rangle |u_+^2 \rangle) \quad (1)$$

où $|u_+^1 \rangle$ est l'état de S_1 avec une composante de spin égale à $+\frac{\hbar}{2}$ sur l'axe des Z etc ...

Or les vecteurs d'état de S_1 et S_2 s'écrivent de façon générale :

$$|\psi^1 \rangle = a |u_+^1 \rangle + b |u_-^1 \rangle \quad (2)$$

et :

$$|\psi^2 \rangle = c |u_+^2 \rangle + d |u_-^2 \rangle$$

où a, b, c et d sont des constantes arbitraires, mais quelles que soient ces constantes, $|\psi^1 \rangle + |\psi^2 \rangle$ ne peut être égal à $|\psi \text{ singlet} \rangle$. (En effet, il nous faudrait avoir $ac = 0$ et $bd = 0$ ce qui implique l'un des quatre choix (i) $a = 0, b = 0$; (ii) $a = 0, d = 0$; (iii) $c = 0, b = 0$; (iv) $c = 0, d = 0$, dont aucune ne fournit $|\psi \text{ singlet} \rangle$).

En conclusion, S_1 et S_2 ne peuvent être décrits séparément par des fonctions d'onde, alors qu'il y en a une qui décrit $S_1 + S_2$ (en l'occurrence $|\psi \text{ singlet} \rangle$).

On pourrait toutefois peut-être objecter que, bien qu'il soit mathématiquement impossible d'écrire $|\psi \text{ singlet} \rangle$ sous la forme $|\psi^1 \rangle + |\psi^2 \rangle$, il est peut-être néanmoins possible de

l'écrire ainsi pour tous les effets observables. Mais il n'en est rien. En effet remarquons que :

$$\begin{aligned} J^2 |\psi \text{ singlet} \rangle &= 0 \\ J_Z |\psi \text{ singlet} \rangle &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

Pour que $J_Z = \sigma_Z^1 + \sigma_Z^2$ (σ^i est le spin de la particule i) appliquée à $|\psi^1 \rangle |\psi^2 \rangle$ calculé à l'aide de (2) fournisse effectivement $J_Z = 0$, il faudrait s'assurer qu'aucun terme du type $|u_+^1 \rangle |u_+^2 \rangle$ (où $J_Z = +1$) ou $|u_-^1 \rangle |u_-^2 \rangle$ (où $J_Z = -1$) n'apparaît dans le produit. C'est pourquoi $|\psi^1 \rangle$ doit se réduire à $|u_+^1 \rangle$ et $|\psi^2 \rangle$ à $|u_-^2 \rangle$ ou au contraire $|\psi^1 \rangle$ à $|u_-^1 \rangle$ et $|\psi^2 \rangle$ à $|u_+^2 \rangle$. Ainsi les seuls états du type $|\psi^1 \rangle |\psi^2 \rangle$ donnant $J_Z = 0$, obtenus comme résultats d'une mesure, sont :

$$|u_+^1 \rangle |u_-^2 \rangle \text{ et } |u_-^1 \rangle |u_+^2 \rangle \quad (4)$$

Mais si l'on introduit l'état triplet $J_Z = 0$, donné par :

$$|\psi \text{ triplet}, 0 \rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|u_+^1 \rangle |u_-^2 \rangle + |u_-^1 \rangle |u_+^2 \rangle) \quad (5)$$

On voit que l'on peut écrire :

$$\begin{aligned} |u_+^1 \rangle |u_-^2 \rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}} (|\psi \text{ triplet}, 0 \rangle + |\psi \text{ singlet} \rangle) \\ |u_-^1 \rangle |u_+^2 \rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}} (|\psi \text{ triplet}, 0 \rangle - |\psi \text{ singlet} \rangle) \end{aligned} \quad (6)$$

On voit donc que les états (4) sont une superposition d'états tels que $J^2 = 0$ et $J^2 = 1$ ($1 + 1$) et qu'une mesure de J^2 effectuée sur eux peut donner un résultat non nul, alors que c'est là l'unique résultat que l'on obtienne avec $|\psi \text{ singlet} \rangle$. On en conclut que les états (4) sont différents de $|\psi \text{ singlet} \rangle$, même du point de vue de l'observation.

En général, si l'on a deux systèmes isolés S_1 et S_2 tels que le vecteur d'état $|\psi \rangle$ de $S_1 + S_2$ puisse s'écrire sous la forme $|\psi \rangle = |\psi_1 \rangle |\psi_2 \rangle$, où $|\psi_1 \rangle$ décrit S_1 et $|\psi_2 \rangle$ décrit S_2 , nous dirons que $|\psi \rangle$ est un vecteur de 1ère espèce. Si $|\psi \rangle$ ne peut être écrit sous cette forme, nous dirons que $|\psi \rangle$ est un vecteur de deuxième espèce.

La différence observable qui existe entre des états du type (1) et des mélanges d'états du type (4), montre clairement que, toute théorie qui prétend que les vecteurs d'états, de deuxième

espèce se décomposent spontanément en mélange de vecteurs d'états de première espèce (¹⁰) est une théorie qui ne conserve pas le moment cinétique de la Mécanique Quantique. Quoique les preuves en faveur de la conservation du moment cinétique ne soient peut-être pas d'une clarté accablante (¹¹), nous supposerons cependant dans la suite que les vecteurs d'état de deuxième espèce sont stables, car leur instabilité constituerait une rupture majeure dans la Mécanique Quantique.

IV - LE PARADOXE EPR.

La présentation donnée ci-dessous du paradoxe formulé par Einstein, Podolsky et Rosen (¹²) est semblable, pour la première partie à celle donnée par d'Espagnat (¹³).

Soit donnée une molécule M de spin 0, capable de se désintégrer en deux atomes U et V de spin $\frac{1}{2}$. Si $|u\pm\rangle$ et $|v\pm\rangle$ sont les vecteurs d'état de spin des atomes respectifs U et V, correspondant à une troisième composante $\pm \frac{1}{2}$, le vecteur d'état de U + V, qui découle de la conservation du moment cinétique dans le processus de désintégration est $|\psi \text{ sing. } \rangle$ donné par (1).

Considérons un très grand nombre (N) de telles désintégrations $M \rightarrow U + V$ et répétons, pour chacune des paires d'atomes résultants d'une désintégration, le raisonnement suivant :

1°) Au temps t_0 , on effectue une mesure de la troisième composante du spin de U. Supposons qu'on obtienne $+\frac{1}{2}$ comme résultat (on peut bien entendu trouver $-\frac{1}{2}$; en fait $+\frac{1}{2}$ et $-\frac{1}{2}$ seront obtenus avec chacun la probabilité 50 %, comme il s'ensuit des lois de la Mécanique Quantique appliquées à l'état (1)).

2°) Nous sommes alors certain qu'une mesure ultérieure (au temps $t > t_0$) de la troisième composante du spin de V donnera $-\frac{1}{2}$ comme résultat parce que ceci est prédit par la Mécanique Quantique que nous supposons être exacte. (Cette prédiction découle de la réduction de l'état $|\psi \text{ sing. } \rangle$ à $|u+\rangle |v-\rangle$ pour $t \geq t_0$).

3°) En fait, nous pourrions vérifier la prévision ci-dessus autant de fois que nous le voudrions, et chaque fois, nous la trouverons exacte (toujours dans l'hypothèse où la Mécanique Quantique s'applique, ce que nous supposerons).

4°) Mais au temps $t = t_0$, alors que U entre en interaction avec un instrument de mesure, il ne peut raisonnablement rien arriver à la particule V qui peut se trouver aussi loin de U que nous le voulons. Tout ce qui est vrai pour V pour $t \geq t_0$ doit donc aussi l'avoir été avant (c'est-à-dire pour $t < t_0$).

5°) La certitude d'obtenir $\sigma_z = -\frac{1}{2}$ permet d'écrire le vecteur d'état de V sous la forme $|v-\rangle$ et d'après ce qui précède, ceci doit être vérifié aussi bien avant qu'après le moment $t = t_0$.

6°) Mais la Mécanique Quantique prévoit que la troisième composante de spin total de U et V doit être nulle avant t et ceci subsiste même après la mesure de σ_z sur U à $t = t_0$. Nous supposons que ceci est vrai.

7°) Le seul vecteur d'état pour U + V qui décrive V à l'aide de $|v-\rangle$ et donne une troisième composante de spin nulle à l'ensemble est $|u+\rangle |v-\rangle$. Ceci est donc leur vecteur d'état avant comme après l'instant $t = t_0$.

8°) Après avoir répété le raisonnement précédent pour chacune des N paires d'atomes U et V, nous concluons que l'ensemble statistique que ces N paires constituent est décrit par un mélange en proportion égale (= 1/2) de fonctions $|u+\rangle |v-\rangle$ et $|u-\rangle |v+\rangle$, et ceci avant même d'effectuer aucune mesure.

9°) La conclusion ci-dessus contredit cependant d'une façon observable la description donnée à l'aide de la fonction $|\psi_{\text{sing.}}\rangle$, donnée au paragraphe précédent. Nous parvenons ainsi à un paradoxe.

Ce fameux paradoxe ne subsiste plus, si tout le raisonnement est fait sans sortir du tout du terrain de la Mécanique Quantique, comme l'a montré Bohr dans sa réponse de 1935 (1⁴). Ceci veut donc dire que les points précédents contiennent certains arguments étrangers et même incompatibles avec la Mécanique Quantique. Un examen, même rapide, convaincra le lecteur que les points 1, 2, 3 et 6 sont des conséquences directes des lois de la Mécanique Quantique et que les points 8 et 9 ne sont que la conclusion logique des sept premiers.

Les éléments étrangers à la Mécanique Quantique ont donc nécessairement été introduits dans les points 4, 5 et 7. Mais 5 et 7 sont des conséquences de 4 et des lois de la Mécanique Quantique. C'est donc le point 4 qui est incompatible avec la Mécanique Quantique.

Le point 4 contient trois parties :

4a) A $t = t_0$, U interagit avec un instrument de mesure.

4b) A $t = t_0$, rien ne peut se produire pour V qui est très éloigné de U.

4c) Ce qui est vrai pour U ultérieurement à t_0 doit donc aussi l'avoir été antérieurement.

4a) ne peut évidemment pas nous embarrasser puisqu'il ne fait qu'affirmer qu'au temps t_0 , on effectue une mesure sur U. En outre 4c) n'est qu'une autre manière de formuler 4b) et ne fait que préciser ce que l'on entend par les mots "rien ne peut se produire".

La conclusion logique de ce qui précède est donc que le point 4b) est incompatible avec la Mécanique Quantique.

Il y a essentiellement deux façons de nier 4b). La première consiste à dire qu'au temps $t = t_0$, le système V n'est pas observé et que 4b), comme toute affirmation sur une "réalité objective" inobservée est une affirmation métaphysique incompatible avec la "vraie" science. C'est bien sûr le point de vue positiviste type. La deuxième manière de nier 4b) est simplement de supposer que U agit à distance sur V et que V peut donc être modifiée par une mesure effectuée sur U. Cette action doit être instantanée et ne peut donc être déclenchée par la propagation d'un signal quelconque. Son effet doit être indépendant de la distance. Ceci revient en fait à affirmer que le concept d'espace est largement une illusion et que des actions physiques peuvent se propager instantanément en dehors de l'espace d'un point à un autre de ce que nous nommons l'Univers Physique. Cette solution est peut-être réaliste, mais certainement pas rationaliste, au sens que nous donnons ici à ce mot. Bohm et Hiley (⁴) acceptent cette solution non locale dans leur théorie du Tout Insécable (unbroken wholeness).

Nous pensons qu'aucune solution du paradoxe EPR ne peut être donnée sans abandonner un point de vue réaliste et rationaliste. C'est essentiellement également le point de vue de Hooker (¹⁵) et aussi certainement celui d'Einstein, de de Broglie et d'autres auteurs.

V - L'INEGALITE DE BELL.

L'inégalité de Bell peut être démontrée sous des hypothèses à la fois extrêmement générales et raisonnables (¹⁶). On peut presque dire que nous sommes confrontés à une philosophie expérimentale, tant est faible l'apport de la physique théorique nécessaire pour passer de l'idée générale (philosophique)

de causalité locale à ses conséquences expérimentalement vérifiables exprimée précisément par l'inégalité de Bell. Nous affirmons que la restriction qu'exprime la condition de localité n'est pas en principe une véritable restriction : on croit au principe de causalité car on n'aime pas introduire de miracle en physique et la causalité non locale représenterait une sorte de causalité agissant à distance, donc pour ainsi dire véhiculée par miracle.

D'un autre côté les violations de l'inégalité de Bell sont très profondément enracinées dans la Mécanique Quantique : pour tout vecteur d'état de deuxième espèce (en l'absence de règles de super-sélection) on peut trouver au moins une inégalité du type de celle de Bell qu'enfreignent les systèmes physiques décrits par ce vecteur d'état. On peut donc affirmer que les vecteurs d'état de deuxième espèce sont toujours incompatibles avec la notion de causalité locale. Ce n'est pas une mince conclusion, si l'on observe par exemple, qu'une somme de moments cinétiques conduit nécessairement à des vecteurs d'état de deuxième espèce dont les éléments ont pour coefficients les coefficients bien connus de Clebsch-Gordan. Ceci signifie qu'une nouvelle théorie formulée conformément à la loi de causalité locale ne pourrait conduire à la loi de conservation du moment cinétique de la Mécanique Quantique.

Nous pouvons préciser encore une fois que cette difficulté n'est pas inhérente à la Mécanique Quantique. Si on ne se soucie pas de la causalité locale et qu'on soit prêt à la sacrifier et à accepter un monde à causalité non locale et/ou acausal, on peut affirmer que la Mécanique Quantique sous sa forme actuelle ne conduit à aucune difficulté majeure.

L'incompatibilité ne se trouve qu'entre la Mécanique Quantique et la notion de causalité locale.

La Mécanique Quantique est donc une théorie incompatible avec toutes les philosophies qui tenaient pour vraie la loi de causalité locale. Le strict positivisme, qui refuse de prendre position sur l'existence et les propriétés premières de la matière est donc certainement tout à fait compatible avec la Mécanique Quantique, de même que tous les points de vue philosophiques qui se rapprochent de celui de l'idéalisme.

Nous obtenons, dans le cas de l'inégalité de Bell, les mêmes conclusions que celles que nous avons déjà déduites de l'examen des paradoxes. Ceci montre à quel point sont étroits les liens qui unissent réalité objective et causalité, ce que Bell (¹⁸) exprimait aussi en écrivant : "en suivant ce qui semblait être un programme minimal pour restaurer l'objectivité, nous avons été obligés de restaurer aussi le déterminisme".

Les résultats expérimentaux au sujet de l'inégalité de Bell sont équivoques puisque certains sont compatibles avec sa validité et que d'autres l'infirmement au contraire (19).

Nous allons maintenant donner, en vue de renforcer le caractère général de cette inégalité, une démonstration qui tient compte des paramètres cachés de l'instrument de mesure.

Deux systèmes corrélés α et β se propagent dans des directions différentes. Sur le chemin du premier (resp. du second) système, un observateur O_α (resp. O_β) effectue une mesure de l'observable à deux valeurs $A(a, \lambda, \lambda_a)$ (resp. $B(b, \lambda, \lambda_b)$) avec un appareil quelconque. Notons ± 1 les valeurs possibles des observables A et B , qui dépendent respectivement des paramètres a et b des appareils, du paramètre caché λ , commun aux deux particules et qui provient de leur corrélation et des paramètres cachés "instrumentaux" c'est-à-dire relatifs aux appareils de mesure, λ_a (dans le cas de A) et λ_b (dans le cas de B). Le principe de causalité locale s'exprime ici par le fait que le résultat de la mesure de A (soit $+1$, soit -1) ne dépend en rien des valeurs de b et de λ_b , et de même la mesure de B est indépendante des valeurs de a et de λ_a .

La fonction de corrélation $P(ab)$ est définie par :

$$P(ab) = \int d\lambda \, d\lambda_a \, d\lambda_b \, \rho_{ab}(\lambda, \lambda_a, \lambda_b) A(a, \lambda, \lambda_a) B(b, \lambda, \lambda_b) \quad (7)$$

où $\rho_{ab}(\lambda, \lambda_a, \lambda_b)$ est la densité de répartition des variables cachées.

Les trois groupes (car chaque lettre peut en fait recouvrir tout un ensemble de paramètres) de paramètres cachés λ , λ_a , λ_b , décrivent les états de trois régions de l'espace différentes.

1°) λ est commun aux deux particules α et β . Ceci recouvre bien entendu, aussi bien le cas simple où les deux particules sont affectées du même paramètre λ , que celui, plus complexe, où les deux paramètres cachés λ_1 et λ_2 associés respectivement à α et β sont liés par l'intermédiaire du paramètre λ , ce que l'on peut exprimer sous la forme $\lambda_1 = \lambda_1(\lambda)$ et $\lambda_2 = \lambda_2(\lambda)$ λ devient alors le paramètre (au sens mathématique) qui décrit le lien entre les variables cachées physiques.

L'origine physique de λ se trouve, dans tous les cas, dans la région R_1 où est apparue la corrélation entre α et β . Si α et β proviennent de la désintégration d'un système physique M , R_1 est la région de la désintégration.

2°) λ_a décrit l'appareil qui mesure l'observable $A(a)$ sur la particule α et ainsi λ_a est localisé dans la région de l'espace R_2 qui contient le premier appareil de mesure.

3°) Enfin λ_b est de même localisé dans la région de l'espace R_3 qui contient le deuxième appareil de mesure.

Dans tous les cas d'intérêt pratique R_1 , R_2 et R_3 sont à des distances macroscopiques les unes des autres.

Du point de vue de la causalité locale, nous remarquons que le paramètre λ est déterminé avant que les interactions de α avec le premier appareil de mesure et de β avec le deuxième appareil de mesure n'aient eu lieu. La densité de probabilité $\rho(\lambda)$ doit donc être donnée à priori, indépendamment des valeurs de λ_a et λ_b . Puisque les régions R_2 et R_3 peuvent être arbitrairement éloignées, il est clair que la densité de probabilité de λ_a est indépendante de λ_b et vice versa.

Il est au contraire logiquement possible que la densité de probabilité de λ_a dépende de λ , puisque les valeurs de λ_a dont on dispose sont mesurées au moment où α interagit avec l'appareil de mesure et que l'état de α dépend de λ . De même, il est possible que la densité de probabilité de λ_b dépende de λ .

Des points précédents, il ressort que l'on a :

$$\rho_{ab}(\lambda, \lambda_a, \lambda_b) = \rho(\lambda) \rho_a(\lambda, \lambda_a) \rho_b(\lambda, \lambda_b) \quad (8)$$

où les densités de probabilité sont normalisées selon :

$$\int d\lambda \rho(\lambda) = \int d\lambda_a \rho_a(\lambda, \lambda_a) = \int d\lambda_b \rho_b(\lambda, \lambda_b) = 1$$

Des équations (7) et (8) on tire :

$$P(ab) - P(ac) = \int d\lambda \rho(\lambda) \bar{A}(a, \lambda) \{ \bar{B}(b, \lambda) - \bar{B}(c, \lambda) \} \quad (9)$$

où :

$$\bar{A}(a, \lambda) = \int d\lambda_a \rho_a(\lambda, \lambda_a) A(a, \lambda, \lambda_a)$$

et de même pour : $\bar{B}(b, \lambda)$, $\bar{B}(c, \lambda)$.

Puisque : $|\bar{A}(a, \lambda)| \leq 1$, l'équation (9) implique :

$$|P(ab) - P(ac)| \leq \int d\lambda \rho(\lambda) |\bar{B}(b, \lambda) - \bar{B}(c, \lambda)| \quad (10)$$

et de même, de façon analogue, nous obtenons :

$$|P(a'b) + P(a'c)| \leq \int d\lambda \rho(\lambda) |\overline{B}(b\lambda) + \overline{B}(c\lambda)| \quad (11)$$

En remarquant que si x et y sont réels avec $|x| \leq 1$ et $|y| \leq 1$, on a :

$$|x + y| + |x - y| \leq 2 ,$$

l'addition de (10) et (11) fournit :

$$|P(ab) - P(ac)| + |P(a'b) + P(a'c)| \leq 2.$$

ce qui est précisément l'inégalité de Bell.

Selon nous, la démonstration ci-dessus apporte la preuve que l'on peut tenir compte des appareils de mesure dans le raisonnement qui mène à l'inégalité de Bell (²⁰).

VI - CONCLUSIONS.

Heisenberg écrivait en 1958 : "... tous les opposants à l'interprétation de l'école de Copenhague s'accordent sur un point. Il serait souhaitable, selon eux, de revenir au concept de Réalité de la physique classique, ou, pour employer un terme philosophique plus général, à l'ontologie du matérialisme. Ils préféreraient retourner à l'idée d'un monde objectif réel dont les plus petites parties existeraient objectivement dans le même sens que les pierres ou les arbres existent indépendamment du fait que nous les observons ou pas" (²¹).

Nous pensons qu'Heisenberg a absolument raison dans son affirmation. La discussion de certaines anomalies de la Mécanique Quantique, que nous avons menée dans les sections précédentes a pour but de montrer que, ceux qui pensent qu'il y a en Mécanique Quantique des problèmes fondamentaux non résolus adhèrent à une philosophie réaliste et rationaliste. Si l'on s'en tient à l'un des points de vue philosophiques qui ont marqué historiquement la naissance de cette théorie, on peut nier avec cohérence qu'il existe aucune difficulté dans la théorie, et croire que des pseudo-problèmes ne surgissent que lorsque quelqu'un ajoute ses propres préjugés à la formulation normale de la théorie.

Etre un défenseur ou un détracteur de la Mécanique Quantique revient donc à un choix entre différents Weltanschauungen. De tels affrontements se sont déjà produits plusieurs fois dans l'histoire des sciences et ont généralement été la marque des périodes de plus intense activité créatrice.

Il est intéressant de noter que l'on compte Einstein, Schrödinger et Planck parmi les opposants à la formulation actuelle de la Mécanique Quantique. Ces physiciens niaient avec force le point de vue positiviste, lorsqu'ils discutaient des bases de la Mécanique Quantique. Ceci indique encore que la vraie nature de la théorie est liée à un choix philosophique précis.

Nous pensons que nos conclusions sur l'interconnection profonde entre physique et philosophie seraient acceptées par les fondateurs de la physique quantique, qu'ils soient défenseurs ou opposants à la théorie niée entre 1924 et 1927 et que l'on nomme habituellement Mécanique Quantique. Ces conclusions montrent de plus la fausseté et le danger du point de vue de celui qui croit que la physique est autonome et n'a normalement rien à voir avec la philosophie.

Au contraire, la création d'une nouvelle théorie physique, comme toute activité humaine créatrice, porte la marque des conceptions générales de ses fondateurs.

BIBLIOGRAPHIE

- (¹) H. Everett, III; Rev. Mod. Phys. 29, 454 (1957).
- (²) E.P. Wigner; Remarks on the mind body question in Scientist Speculates, I.J. Good, London (1962) p. 284.
- (³) D. Bohm and J. Bub; Rev. Mod. Phys., 38, 453 (1966).
- (⁴) D.J. Bohm and B.J. Hiley; Found. of Phys. 5, 93 (1975).
- (⁵) E. Nelson, Phys. Rev., 150, 1079 (1966)
- (⁶) L. De la Pena-Auerbach, A.M. Cetto, Phys. Letters, 47A, 183 (1974).
- (⁷) Omelyanovskij, Fock et al. L'interpretazione materialistica della meccanica quantistica. Fisica e Filosofia in U.R.S.S. Ed. Feltrinilli, Milano (1972).
- (⁸) T.S. Kuhn; The Structure of Scientific Revolutions; International Encyclopedia of Unified Science, Vol. 2, n° 2 (1962).
- (⁹) L. de Broglie; C.R. Acad. Sc. Paris, t. 278 (17 avril 1974).
- (¹⁰) D. Bedford and D. Wang; Nuovo Cimento 26B, 313 (1975).
- (¹¹) F. Selleri; Nuovo Cimento 57A, 678 (1968).
- (¹²) A. Einstein, B. Podolsky, N. Rosen; Phys. Rev. 47, 777 (1935).
- (¹³) B. d'Espagnat; Conceptions de la Physique Contemporaine, Hermann, Paris (1965).
- (¹⁴) N. Bohr, Phys. Rev. 48, 696 (1935).
- (¹⁵) C.A. Hooker; Am. Journal of Phys., 38, 851 (1970).
- (¹⁶) J.S. Bell; Physics, 1, 195 (1965).

- (¹⁷) V. Capasso, D. Fortunato and F. Selleri; Int. Journal of Theor. Phys. 7, 319 (1973).
A. Baracca, S. Bergia and M. Restignoli : en cours de publication dans Int. Journal of Theor. Phys.
- (¹⁸) J.S. Bell; Subject and Object, Contribution to the Symposium in honour of P.A.M. Dirac, Trieste, 18-25 September 1972.
- (¹⁹) Une discussion intéressante de telles expériences a été donnée par: J.P. Vigièr; C.R. Acad. Sc. Paris, t. 279 (1er Juillet 1974).
- (²⁰) G. Lochak; Paramètres cachés et Probabilités cachées; Fundamenta Scientiae, n° 38 (1975); Foundations of Phys. 6, 173, 1976.
- (²¹) W. Heisenberg; Physics and Philosophy, Harper, New York, (1962). La phrase citée est à la page 129.