Annales de la Fondation Louis de Broglie, Vol. 7, n° 3, 1982

A PROPOS DES INÉGALITÉS DE BELL

par Damian CANALS-FRAU

Institut d'Optique, Université de Paris-Sud Centre d'Orsay, Bâtiment 503 Boîte Postale n° 43 91406 ORSAY CEDEX

(manuscrit reçu le 1er Juin 1981)

Résumé: On rappelle que les objections qu'EINSTEIN faisait à la mécanique quantique sont de nature métaphysique, donc non opposables à la physique; l'oubli de ce détail est à l'origine de beaucoup de quiproquos. En particulier, on montre pourquoi les inégalités de BELL sont en désaccord avec les expériences.

- 1. Introduction
- 2. Le paradoxe E.P.R.
- 3. Le travail de BOHM et AHARONOV
- 4. Les inégalités de BELL
- 5. La prédiction de la mécanique quantique
- 6. La "non-localité"
- 7. L'expérience d'A. ASPECT
- 8. Conclusion

1. INTRODUCTION

La publication en 1935 des critiques faites à la mécanique quantique par EINSTEIN, PODOLSKY et ROSEN(¹) (E.P.R.), avait fait beaucoup de bruit, principalement à cause de la renommée d'EINSTEIN. Quelques mois plus tard NIELS BOHR(²) a montré qu'on n'avait pas le droit de conclure comme E.P.R. l'avaient fait dans leur travail. Et, pour beaucoup de physiciens, l'affaire était classée.

Quelques articles et une longue correspondance avec MAX BORN(3) montrent qu'EINSTEIN n'a jamais été satisfait de cet état de choses. Une étude attentive prouve que la cause profonde des objections qu'il faisait à la mécanique quantique est de nature métaphysique : c'est la croyance en un "véritable état réel objectif"(5), c'est-à-dire, indépendant des appareils de mesure. Mais, il est impossible de réfuter des croyances avec des raisonnements physiques, d'où l'interminable discussion avec BORN et BOHR.

Plus tard, BOHM et AHARONOV(5) ont signalé que la désintégration d'un atome en deux particules de spins opposés (état singulet) peut être interprétée comme étant un cas particulier de la situation discutée par E.P.R.

A partir de cette remarque BELL(6) a développé ses inégalités. Malheureusement, les expériences faites pour vérifier ces inégalités ont montré qu'elles sont en contradiction avec la nature.

Les livres qui traitent de mécanique quantique du point de vue physique, ne mentionnent pas la "localité" ou la "non-localité". Nonobstant, dans la littérature on trouve des fois l'expression "la mécanique quantique est non-locale". Dans le cas de deux particules fortement corrélées et séparées l'une de l'autre, cela exprime le fait physique que, d'une part, cette corrélation est indépendante de la distance qui sépare les instruments de mesure et, d'autre part, le résultat de chaque mesure dépend de la

particule et de l'appareil de mesure.

Sortant de ce strict cadre expérimental, des auteurs (7) affirment que la mécanique quantique est non-locale parce qu'une action effectuée ici sur une des particules (d'un état singulet), influe sur l'autre qui en est très éloignée. Cette bizarrerie est la conséquence de l'erreur -toujours la même- qui consiste à croire que la valeur d'une mesure "existe" avant de la faire.

Dans cet article nous essaierons de montrer par des arguments connus de tout le monde, comment, à partir d'une certaine lecture du travail d'E.P.R., on est arrivé à des conclusions fantaisistes qui ne sont pas vérifiées par les expériences de laboratoire.

D'entrée de jeu n'oublions pas qu'une hypothèse de base de la mécanique quantique est : l'état d'un système n'est défini que si on indique quel est le mode d'expérimentation(3). En d'autres mots, l'état d'un système dépend de la façon dont on l'observe.

2. LE PARADOXE E.P.R.

Dans leur article de 1935, EINSTEIN, PODOLSKY et ROSEN(1) ne parlent pas de paradoxe*.

Ils considèrent deux systèmes partiels A et B (disons deux particules), qui forment un système total décrit par une fonction ψ . Par un raisonnement où la "réalité physique" est définie par la phrase

^{*} D'après KASDAY(8), c'est BOHM et AHARONOV(5) qui ont signalé les premiers que la corrélation existante entre deux photons issus d'une cascade atomique peut être interprétée comme un cas spécial de la situation que discutent E.P.R. dans leur article.

"Si, sans perturber aucunement un système on peut prédire avec certitude la valeur d'une quantité physique, alors il existe un élément de réalité physique qui correspond à cette quantité physique"

ils arrivent à la conclusion, que la description de la nature par la mécanique quantique (fonction ψ) n'est pas complète.

Les systèmes partiels, après avoir interagi. sont très éloignés l'un de l'autre. La connaissance de la fonction ψ et une mesure faite sur le système partiel A. permettent à la mécanique quantique de prédire le résultat de la mesure du système partiel B. D'après le type de mesure qu'on fait sur A, les prédictions pour le système B sont différentes. Si, ensuite, on fait des mesures sur B. on trouve que les prédictions étaient correctes. A l'aide de leur définition de "réalité physique", E.P.R. prétendent que le système B est dans l'état dans lequel on le trouve (en le mesurant) même si on ne fait pas la mesure de B. La prédiction étant différente selon la mesure qu'on a faite sur A, l'état du système B dépendrait de la mesure qu'on a faite sur le système A (qui est très éloigné de B). Comme ils ne peuvent pas admettre cela, ni qu'il y ait des interactions entre systèmes très éloignés à des vitesses supérieures à c, ils concluent que la mécanique quantique est incomplète. C'est-à-dire, que la fonction w ne décrit pas complètement la "réalité physique" puisqu'elle permet deux prédictions différentes pour une même "réalité physique".

Niels BOHR(²) a montré que l'erreur du raisonnement d'E.P.R. est due à une ambiguïté dans la phrase citée plus haut. L'influence (ou perturbation) dont il est question, n'est pas une influence mécanique, mais une influence sur "les conditions qui définissent quelles prédictions sont possibles sur le devenir du système". Si on monte une expérience pour mesurer la position d'une des particules, on peut seulement prédire la position de l'autre (et pas son impulsion); de même, si on monte une expérience pour mesurer l'impulsion d'une des particules, on peut seulement prédire l'impulsion de l'autre particule (et pas sa position). Comme on ne peut pas mesurer simultanément la position et l'impulsion de la première particule, on ne peut pas non plus prédire simultanément la position et l'impulsion de la seconde. BOHR conclut que la description de la nature faite par la mécanique quantique est complète et insiste qu'il n'y a d'autre "réalité physique" que celle qu'on peut mesurer.

Depuis lors, ce point de vue est celui d'une grande majorité de physiciens. (Il faut quand même reconnaître que la "phraséologie" de BOHR a permis d'interpréter son texte d'une autre façon).

Mais cet état de choses n'a jamais satisfait EINSTEIN. En 1936(9), à propos de l'argumentation de BOHR, il dit : "Il n'y a pas de contradiction dans cela ; y croire est donc logiquement possible. Mais, c'est tellement contraire à mon instinct scientifique que je ne peux pas renoncer à chercher une conception plus complète"*. Dans la réponse aux critiques contenues dans son livre-anniversaire(10), il revient une fois de plus à la charge et parle alors de "paradoxe E.P.R.".

Si on essaie de comprendre les causes profondes des objections qu'EINSTEIN a faites à la mécanique quantique, on arrive à la conclusion qu'elles sont de nature métaphysique : C'est la croyance dans l'existence d'une "réalité physique" indépendante de l'observateur, c'est-à-dire des appareils de mesure.

^{*} To believe this is logically possible without contradiction; but it is so very contrary to my scientific instinct that I cannot forego the search for a more complete conception.

On le voit clairement déjà dans les quelques lignes que nous avons écrites. On trouve confirmation du caractère métaphysique des objections d'EINSTEIN (sans entrer dans les détails très subtils de l'analyse des Gedankenexperimente qu'il a proposés dans les textes cités) dans sa correspondance avec MAX BORN(3).

D'après EINSTEIN (rapporté par PAULI(11)), les défenseurs de la mécanique quantique devraient dire pour être inattaquables du point de vue logique : "La description des systèmes physiques par la mécanique quantique est, certes, incomplète, mais il serait vain de la compléter, car cette exhaustivité n'intervient pas dans les lois de la nature."

Cela montre clairement que les objections d'EINSTEIN n'ont pas de base physique, mais sont de nature métaphysique.

Citons encore MAX BORN(12), commentant une lettre de PAULI : "L'homme qui avait fondé la théorie de la relativité sur le principe que les idées qui se réfèrent à des faits non-observables n'avaient pas leur place dans la physique, croyait en un "véritable état réel objectif"".

3. Le travail de BOHM et AHARONOV(5)

Dans le § 2, "Summary of essential features of paradox of EINSTEIN, PODOLSKY and ROSEN" après avoir écrit l'équation qui donne l'état de spin de deux particules issues d'une désintégration telle que le spin total est zéro

$$\Psi = \frac{1}{\sqrt{2}} \{ \Psi_{+}(A) \Psi_{-}(B) - \Psi_{-}(A) \Psi_{+}(B) \} ,$$

les auteurs disent : "Cela signifie que les spins des deux particules sont corrélés d'une manière propre à la théorie quantique. Si la composante du spin de la particule A est mesurée dans une direction quelconque (par exemple z) alors on sait que la même composante du spin de la particule B est opposée ; et comme les deux particules sont éloignées l'une de l'autre et n'interagissent pas, cette information a été obtenue sans déranger la particule B."* Ah, non ! là, je proteste. Au moins pour des particules de spin ½ ou 1, je ne vois pas du tout d'où vient leur connaissance.

Nous savons que les deux particules forment un état singulet, c'est-à-dire, on les a préparées de façon telle que leur spin total est zéro. J'en conclus que les spins sont opposées.

Si je mets un appareil de Stern et Gerlach (S-G) sur le chemin de la particule A, le spin de celle-ci va interagir avec le champ magnétique et va décrire un cône dont l'axe est la direction privilégiée du champ. Dû à la quantification spatiale, la composante du spin de A dans la direction de cet axe aura la valeur et le signe qui correspond au type de particule.

Ceci ne me dit nullement quelle direction avait le spin avant l'interaction ; à la limite, c'est une question qui n'a pas de sens. La seule chose que je sais c'est que l'ensemble des particules A + B avait un spi zéro, avant l'intervention du S-G.

Donc, après le passage de A par le S-G, je connais la composante de son spin dans la direction définie par l'appareil, mais je ne peux absolument rien dire du

* This means that the spins of the two particles are correlated in a manner peculiar to the quantum theory. If the component of the spin of particle A is measured in any direction (for exemple z) then the same component of the spin of particle B is known to be opposite; and since the two particles are far from each other and do not interact, this information has been obtained without in any way disturbing particle B.

spin de la particule B. Récapitulons : le spin de A a été modifié par l'appareil et je dois supposer que le spin de B -sur lequel aucune force n'a agi- continue comme avant.

Si maintenant, je mets un deuxième S-G (avec la même direction de champ que le premier) sur le chemin de B, par interaction, son spin décrira un cône analogue au spin de A, mais renversé, et sa composante dans la direction du champ prendra la même valeur que celle de A mais pointant dans la direction contraire, puisqu'au début les spins de A et de B étaient antiparallèles (et de direction inconnue*).

Alors, strictement parlant, la connaissance du spin de A après interaction avec le S-G, ne permet pas de tirer de conclusions sur le spin de B, sauf si je décide de faire une mesure du spin de B, par exemple avec un S-G parallèle à celui qui a mesuré A. D'après la prédiction de la mécanique quantique, je sais que je trouverai qu'il est antiparallèle à celui de A. De façon imagée on peut dire que dans un même champ magnétique, les spins de A et de B définissent les deux aires latérales (opposées par le sommet) d'un même (double) cône.

Alors, si j'ai bien compris, les auteurs pensent que le spin de B -après la mesure du spin de A et avant la mesure du spin de B- a déjà la direction dans laquelle on le trouvera si on le mesure. Il est évident qu'il y a abus : en microphysique, le fait de trouver un certain résultat de mesure ne veut pas dire que ce résultat "existe" avant la mesure. Donc, on voit bien qu'ils commettent la même erreur qu'EINSTEIN, PODOLSKY et ROSEN (1) quand ceux-ci parlent d'une "réalité physique", qu'ils supposent indépendante des mesures.

4. Les inégalités de BELL

Les inégalités de BELL ont fait rebondir une querelle vieille de plus de 40 ans. Ces inégalités prétendent poser en termes accessibles à l'expérimentation* une interprétation particulière de la situation décrite par E.P.R.

Nous avons vu que la cause profonde des critiques qu'EINSTEIN a faites à la mécanique quantique est de nature métaphysique. Comme on ne peut pas réfuter des croyances avec des raisonnements physiques, il est impossible de trancher expérimentalement. Alors, il doit y avoir un vice caché dans la déduction des inégalités de BELL.

Ces inégalités sont effectivement violées par la nature. C'est-à-dire les résultats expérimentaux de KASDAY(8), CLAUSER(13), FREEDMAN et CLAUSER(14), CLAUSER(15), FRY et THOMPSON(16), LAMEHI-RACHTI et MITTIG (17), sont en contradiction avec ces inégalités, nonobstant leur simplicité et leur logique macroscopique.

Autant les inégalités de BELL que la formule tirée de la théorie semiclassique(13), sont en contradiction avec les prédictions de la mécanique quantique qui, elle, prédit correctement les résultats expérimentaux.

BELL(6) reprend l'exemple mis en avant par BOHM et AHARONOV(5). Dans le \S II "Formulation" il dit : "Comme nous pouvons prédire le résultat de la mesure d'une composante quelconque de σ_2 , en mesurant d'abord la même composante de σ_1 , il s'ensuit que le résultat d'une quelconque de ces mesures doit en fait être prédé-

^{*} Par une sorte de principe du moindre effort, la composante d'un spin ½, positif, prend une certaine position dans un champ magnétique. Dans le même champ et par le même principe, la composante d'un spin ½, négatif, prend la position contraire.

^{*} La désintégration du positronium en un électron et un positron ; la désintégration en cascade de certains atomes (Ca, Hg) avec apparition de deux photons fortement corrélés.

terminé".*

Et voilà, le loup est dans la bergerie. La seule prédiction que la mécanique quantique nous permet de faire est : si nous mesurons la même composante de σ_2 (que celle de que nous avons mesurée) nous trouverons la valeur prédite. C'est-à-dire, aucune prédiction de mesure n'est possible si on n'installe pas les appareils nécessaires à la mesure, et c'est seulement après avoir effectué la mesure que σ_2 a la valeur prédite. C'est l'interaction entre l'appareil de mesure et la particule qui donne le résultat prédit et mesuré.

D'ailleurs, la question de la valeur du spin avant la mesure n'a pas de sens physique.

Une autre critique qu'on peut faire est la suivante. BELL considère deux particules de spin $\frac{1}{2}$, σ_1 et σ_2 , formés dans l'état singulet, se déplaçant librement dans des directions opposées. Dans une théorie à variable cachée, le résultat A de la mesure σ_1 . â est déterminé par â (direction de l'appareil de S-G) et λ (variable cachée) ; la même chose pour B et σ_2 . δ . L'espérance mathématique du produit des deux composantes σ_1 . â et σ_2 . δ est

où $\rho(\lambda)$ est la distribution de probabilité de λ et $A(\hat{a},\lambda)$ = ± 1 , $B(\hat{b},\lambda)$ = ± 1 .

Dans la version pour l'état de polarisation des photons issus d'une cascade atomique(18)

$$A(\hat{a},\lambda) = \begin{cases} 1, & \text{si le photon passe} \\ 0, & \text{si le photon ne passe pas**} \end{cases}$$

Quelle signification physique a l'affirmation A=1 (ou B=1)? Expérimentalement, après le polariseur il y a un photodétecteur et ce qu'on enregistre c'est le déclenchement de celui-ci. Le photodétecteur est sensible à l'énergie, donc à quelque chose qui est proportionnel au module carré de l'amplitude Ω (ou $\mathfrak B$) du champ. Donc, d'une certaine façon on peut dire que la quantité A est de la même nature que $|\mathcal Q|^2$. Où on constate, qu'en fait la formule de BELL est de la forme

(1) $P(a,b) = \int \rho(\lambda) |\textbf{Q}(a,\lambda)|^2 |\textbf{R}(a,\lambda)|^2 d\lambda$ qui exclut toute "interférence" ou "corrélation" entre les deux photons. (Les interférences, ou la corrélation, ont quelque chose à voir avec les phases des amplitudes).

Du point de vue de la mécanique quantique, l'équation (1) est foncièrement fausse, appliquée à la situation expérimentale à laquelle on l'applique. Elle correspond au cas expérimental suivant : entre la source et la mesure de A et celle de B on agit sur le système. Cette action a pour conséquence de détruire la corrélation entre les particules, d'où l'équation (1).

Mais dans l'expérience qu'on fait réellement on n'essaye pas d'agir sur le système avant la mesure de A et de B. La corrélation entre les particules reste donc

** Il est curieux de voir que l'affirmation A = 0 est une vue de l'esprit qui n'a aucune signification physique : pour affirmer que le photon n'est pas passé par le polariseur, il faut être sûr qu'il y avait un photon devant le polariseur. Pour le savoir, on pourrait mesurer le recul d'une particule test qui enverrait le photon dans la direction où se trouve le polariseur. Mais cette interaction avec la particule test changerait l'énergie du photon (il y a des filtres de fréquence devant les polariseurs) et détruirait la corrélation qui existe entre les deux photons issus de la cascade.

^{*} Since we can predict in advance (sic) the result of measuring any chosen component of $\dot{\sigma}_2$, by previously measuring the same composant of $\dot{\sigma}_1$, it follows that the result of any such measurement must actually be predetermined.

** Voir ** page suivante.

entière et la formule correspondante doit avoir la forme* (2) $P(a,b) = |\int \rho(\lambda) Q(a,\lambda) B(b,\lambda) d\lambda|^2$.

Nous venons de voir que dans le travail de BELL se sont glissées deux "erreurs" suffisamment subtiles pour échapper à la vigilance de la plupart des lecteurs. La première (supposer l'existence d'une réalité physique indépendante des appareils de mesure) est une sorte de croyance philosophique qui était déjà dans le travail d'E.P.R. La deuxième (utiliser (1) à la place de (2)) est propre à BELL. Comme le montre la violation de ces inégalités par l'expérimentation, la nature, elle, ne se trompe jamais.

5. La prédiction de la mécanique quantique

La mécanique quantique prédit correctement les résultats expérimentaux (références 8, 13 à 17), d'où l'idée de regarder de plus près sa formulation pour obtenir une connaissance plus détaillée de la nature intime du phénomène.

Par exemple, dans la cascade atomique avec conservation du moment angulaire 0 -1- 0, la probabilité de coı̈ncidences est proportionnelle à(13)

$$P_{\text{coin}} \propto |\langle \phi^{A} | \langle \phi^{B} | 2 \text{ photons} \rangle|^{2}$$
,

où le vecteur d'état de la polarisation du système des deux photons A et B est*

2 photons> =
$$\frac{1}{\sqrt{2}}\{|D_A\rangle|D_B\rangle+|G_A\rangle|G_B\rangle\} = \frac{1}{\sqrt{2}}\{|x_A\rangle|x_B\rangle + |y_A\rangle|y_B\rangle\}$$

et les états de polarisation des polariseurs A et B par rapport à l'axe sont

$$|\phi^{A}\rangle = \cos\phi^{A}|x_{A}\rangle + \sin\phi^{A}|y_{A}\rangle ,$$

$$|\phi^{B}\rangle = \cos\phi^{B}|x_{B}\rangle + \sin\phi^{B}|y_{B}\rangle .$$

Calculons l'état de polarisation du système de deux photons après interaction avec le polariseur B $|U_A^{>} = \langle \phi^B | 2 \text{ photons} \rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \{ \cos \phi^B | x_A^{>} + \sin \phi^B | y_A^{>} \}.$

Exprimons l'angle ϕ^B (que forme la direction de passage du polariseur B avec l'axe de référence \hat{x}) en fonction de l'angle ϕ^A :

* $|x_A\rangle$, $|D_A\rangle$ et $|G_A\rangle$ sont respectivement des états de polarisation du photon A d'après l'axe \hat{x} , la circulaire droite et la circulaire gauche.

^{*} Dans une communication privée, COSTA DE BEAUREGARD a attiré mon attention sur le fait que BELL part d'une formule qui (C. de B. dixit) "... appartient manifestement au calcul des probabilités classique et pas au calcul ondulatoire des probabilités de la Mécanique Quantique. La formule analogue écrite avec des amplitudes appartient, elle, au calcul ondulatoire des probabilités".

D'autre part, en comparant deux formules comme (1) et (2) (mais sans variable cachée) Werner HEISENBERG dit(19): "La différence fondamentale entre les cas I et II, suffisamment généralisée, cosntitue cependant le point essentiel de la théorie quantique". (Die prinzipielle Verschiedenheit der Fälle I und II bildet jedoch, genügend verallgemeinert, den Kernpunkt der Quantentheorie). Les cas I et II sont ceux qui mènent aux formules (1) et (2).

$$\phi^{B} = \phi^{A} + \alpha .$$

Après avoir calculé $\cos\phi^B$ et $\sin\phi^B$, les avoir remplacés dans $|U_A^{}\rangle$ et observé que les termes $-\sin\phi^A|_{X_A^{}\rangle}+\cos\phi^A|_{Y_A^{}\rangle}$ expriment l'état de polarisation $|\phi^A^{}+\frac{\pi}{2}\rangle$ d'un polariseur tourné de $\frac{\pi}{2}$ par rapport à $|\phi^A^{}\rangle$, on trouve

$$|U_{A}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\{\cos\alpha|\phi^{A}\rangle + \sin\alpha|\phi^{A} + \frac{\pi}{2}\rangle\}.$$

Le système des deux photons, après interaction avec le polariseur B, se trouve dans l'état de polarisation du polariseur A, tourné de l'angle α par rapport au B (le tout divisé par $\sqrt{2}$).

Nous voyons que nous nous sommes affranchis du système de référence \hat{x},\hat{y} et que pour n'importe quelle polarisation circulaire initiale du système des deux photons, l'état de polarisation, après interaction avec le polariseur B, dépend seulement de la différence de phase α entre les photons. Différence de phase due à la rotation d'un polariseur par rapport à l'autre.

Il est instructif de voir que pour
$$\alpha=0$$
, $<\phi^A|U_A>=\frac{1}{\sqrt{2}}<\phi^A|\phi^A>=\frac{1}{\sqrt{2}}$:

le système des deux photons, après interaction avec le polariseur B, se trouve dans l'état de polarisation du polariseur A et le photon restant passera donc sûrement par le polariseur A. Comme les polariseurs A et B se trouvent sur une même droite mais de l'un et de l'autre côté du point où se trouve la source (l'atome-mère), ce-la montre que le système des deux photons constitue, du point de vue de la polarisation, un seul champ circulairement polarisé.

Il est aussi très intéressant de voir que pour

$$\alpha = \frac{\pi}{2}$$
 $<\phi^{A}|U_{A}> = \frac{1}{\sqrt{2}} <\phi^{A}|\phi^{A} + \frac{\pi}{2}> \equiv 0.$

De façon élémentaire on peut encore dire que ces résultats sont dus au fait bien connu que tout état de polarisation circulaire conserve la trace (ou la "mémoire") de la direction (perpendiculaire à la direction de propagation) qui a servi à sa définition(21). C'est-àdire, les deux photons nés l'un après l'autre d'un même atome-mère, conservent la trace de leur direction de définition commune (malgré leurs différentes fréquences et direction de propagation). Les deux photons forment un champ circulairement polarisé unique.

Il est évident que la distance qui sépare les polariseurs (ou les photodétecteurs) entre eux ne joue aucun rôle.

On peut encore observer, que le résultat théorique de la mécanique quantique et de l'expérience, $P_{\text{coin}} ~~^{\alpha}|^{\langle \varphi^{A}|U_{A}\rangle}|^{2} = \frac{1}{2}\cos^{2}\alpha ~~,$

est analogue à celui qu'on obtient si on considère classiquement (ou quantiquement) un champ circulairement polarisé, d'intensité I_0 , qui tombe sur un polariseur linéaire et ensuit sur un deuxième tourné d'un angle α par rapport au premier. Le premier laissera passer $I_0/2$ et après le deuxième on trouve $(I_0/2)\cos^2\alpha$.

En conclusion, nous insistons sur le fait bien connu que deux photons nés d'une cascade atomique 0-1-0 avec conservation du moment angulaire total et qui se propagent dans des directions opposées avec des énergies différentes, forment un seul état quantique, indépendamment de la distance qui les sépare. (Dans la supraconductivité, l'état quantique formé par des paires d'électrons s'étend

aussi sur des distances macroscopiques).

6. La "non-localité"

Nous avons vu que le résultat des mesures dépend de l'objet à mesurer et de l'appareil de mesure. Nous savons aussi qu'on peut préparer certains systèmes physiques de façon telle que les parties du système total qui le composent restent fortement corrélées une fois l'interaction finie (par exemple, deux particules de spin ½ dans l'état singulet ; deux photons issus d'une cascade atomique). D'après la mécanique quantique ces systèmes partiels forment un seul état quantique, même s'ils sont très éloignés l'un de l'autre et les résultats, de la mesure faite indépendamment sur chacun d'eux, sont corrélés.

Ce comportement peut sembler paradoxal et vaut des fois à la mécanique quantique d'être considérée comme "non-locale". Vu que la mécanique quantique décrit ce que nous savons de la nature, on peut conclure que la nature se comporte dans certaines situations particulières comme étant "non-locale". Entendons-nous bien : après l'in-teraction, les systèmes partiels conservent certaines propriétés communes (par exemple, spin total zéro) et en présence des appareils de mesure ils réagissent donnant des résultats corrélés, mais rien ne nous permet d'affirmer qu'au moment de la mesure il y ait une action (énergétique) d'un système partiel sur l'autre.

Donc, le principe (ou l'hypothèse) auquel EINSTEIN(10) tenait beaucoup et qu'il exprimait de la façon suivante : "Mais d'après moi, nous devrions nous accrocher sans restriction à l'hypothèse suivante : la situation réelle du système S_2 est indépendante de ce que l'on fait avec le système S_1 , qui en est spatialement séparé"* est, en fait, respecté.

* Aber an <u>einer</u> Annahme sollten wir nach meiner Ansicht unbedingt festhalten: Der reale Sachverhalt (Zustand) des Systems S_2 ist unabhängig davon, was mit dem von ihm räumlich getrennten System S_1 vorgenommen wird.

Une interprétation abusive de cette "non-localité" est à l'origine de quelques quiproquos. D'après JAMMER(7) la mécanique quantique orthodoxe est non-locale. Le principe de localité, il le définit ainsi : "Si, au moment de la mesure deux systèmes ne sont plus en interaction, le second système ne peut être l'objet d'aucun véritable changement qui serait conséquence de ce qui advient au premier". Cette définition est un pléonasme : si les systèmes ne sont plus en interaction, il ne peut pas y avoir de changement du deuxième comme conséquence de ce qui advient au premier.

Que veut dire JAMMER au juste avec : la mécanique quantique orthodoxe est non-locale ? Que malgré le fait que les deux systèmes (particules) ont cessé d'interagir, des actions sur l'un influent sur l'autre ? Drôle de non interaction !!! Et en plus, généralement, c'est faux. Si je dévie une des particules, l'autre continue sans se dévier ; si j'absorbe l'une, l'autre ne disparaît pas pour autant. Donc, au moins pour un certain nombre de propriétés, il n'y a pas d'influence de l'un sur l'autre. Alors, l'affirmation de JAMMER(20), que la nature ne vérifie pas le principe de localité parce que deux particules corrélées, même à des années-lumière de distance sont influencées chacune par la mesure que l'on effectue sur l'autre, me semble sujette à caution.

D'où vient cette affirmation ? Dans le cas des deux particules de spin $\frac{1}{2}$ dans l'état singulet, elle vient de la croyance mystique qu'après la mesure du spin de S_1 , le spin de S_2 est dans l'état où on le trouvera en le mesurant, même si on ne le mesure pas.

Il est évident que cette extrapolation abusive du résultat expérimental ouvre la porte à toute sorte de "conséquences" bizarres. Par exemple, la mesure du spin de S_1 ici, obligerait le spin de S_2 , qui se trouve à des années-lumière de distance, à prendre la même valeur*. A * On peut observer que cette phrase n'a absolument aucun sens physique. -233 -

plusieurs reprises nous avons déjà signalé que la mesure du spin d'une particule ne nous permet pas de connaître le spin de l'autre, sauf si nous installons les appareils nécessaires à sa mesure. C'est alors seulement que nous pouvons prédire le résultat de la mesure et c'est après la mesure que le spin de l'autre particule aura la valeur prédite.

Pour des raisons non physiques les épistémologues pensent que ce résultat "existe" même si on ne fait pas de mesure sur S2. Pour le physicien le résultat d'une mesure est la conséquence de l'interaction de l'objet à mesurer avec l'appareil de mesure. Pour lui, la question de la valeur "a priori" d'une mesure n'a pas de sens. Nous sommes donc obligés de conclure que la phrase "deux particules corrélées, même à des années-lumière de distance, sont influencées chacune par la mesure que l'on effectue sur l'autre", est une affirmation purement métaphysique qui n'a pas de sens physique.

La mécanique quantique décrit nos connaissances de la nature. C'est une théorie heuristique, c'est-àdire, "construite" de façon telle qu'elle donne les résultats des mesures. En plus, elle suit le principe einsteinien qui veut que les idées qui se réfèrent à des faits non observables n'ont pas leur place dans la physique. Pour le moment, elle est la description la plus complète possible des phénomènes physiques, par un observateur humain.

7. L'expérience d'A. Aspect

Dans cette expérience(18) chacun des deux photons issus de la cascade est dirigé, aléatoirement, sur un polariseur linéaire ou sur un autre. Les directions de passage de ces polariseurs forment un angle entre eux. Derrière chaque polariseur il y a un photodétecteur et on mesure la corrélation entre paires de photodétecteurs.

Il est évident que le résultat de l'expérience sera celui prédit par la mécanique quantique, si le dispositif d'"aiguïllage", qui adresse les photons aux polariseurs, ne détruit pas leur corrélation.

Ici on peut voir que les équations (1) et (2) (sans variable cachée) s'appliquent à des situations expérimentales différentes. Si le dispositif d'aiguillage détruit la corrélation entre les photons, nous sommes dans le cas où on agit sur le système des deux photons avant la mesure, donc la formule (1) est valable. C'est-à-dire, il faut détruire la corrélation existante entre les particules pour obtenir les inégalités de Bell. Par contre, si le dispositif d'aiguillage ne détruit pas la corrélation entre les photons, nous sommes dans le cas où on n'agit pas sur le système des deux photons avant la mesure, et la formule (2) est la bonne : le résultat coïncidera avec la prédiction de la mécanique quantique.

Donc, le résultat de l'expérience est prévu dans l'application correcte de la mécanique quantique.

Pour mémoire, rappelons une phrase de Niels BOHR(22) commentant un Gedankenexperiment d'EINSTEIN: "En plus on peut ajouter ceci : Les résultats des observations faites avec un dispositif expérimental donné sont évidemment les mêmes, aussi bien si nos projets de construction des instruments ou de leur maniement sont fixés d'avance, que si nous préférons ajourner l'achèvement de nos projets jusqu'à ce que la particule soit déjà en chemin d'un instrument à un autre"*.

^{*} It may also be added that it obviously can make no difference as regards observables effects obtainable by a definite experimental arrangement, whether our plans of constructing or handling the instruments are fixed beforehand or whether we prefer postpone the completion of our planning until a later moment when the particule is already on its way from one instrument to another.

8. Conclusions

Nous avons montré pourquoi les inégalités de BELL enfreignent les lois de la nature microphysique. Nous avons vu comment les préjugés macroscopiques, ou les croyances philosophiques, se glissent facilement dans les discussions d'expériences de microphysique. Cet état de choses peut avoir des graves conséquences pour la physique, si les physiciens ne restent pas extrêmement vigilants.

RÉFÉRENCES

- 1) Can Quantum-Mecanical Description of Physical Reality Be Considered Complete ?, Phys. Rev., 47, 777, (1935).
- ²) Même titre que ¹), Phys. Rev., <u>48</u>, 696 (1935).
- 3) Albert EINSTEIN-Max BORN, Correspondance 1916-1955. Seuil, Paris 1972.
- 4) Max BORN dans 3), p. 239.
- 5) D. BOHM, Y. AHARONOV, Nuovo Cimento, <u>17</u>, 964 (1960).
- 6) J.S. BELL, Physics, 1, 195 (1964).
- 7) Voir par ex., Max JAMMER, La Recherche, <u>11</u>, 510, (1980), p. 515.
- 8) L. KASDAY, "Fondamenti di Mecanica Quantistica", cours 49 de l'Ecole "ENRICO FERMI", Academic Press, 1971.
- 9) A. EINSTEIN, Journ. Frankl. Inst., 221, 349 (1936).
- 10) Albert EINSTEIN, Philosopher-Scientist. Tudor Publ. Comp., New York, 1949.
- 11) Dans 3), lettre de Wolfgang PAULI à Max BORN du 15/04/54.
- ¹²) Dans ³), p. 239.
- 13) J.F. CLAUSER, Phys. Rev., 6, 49 (1972).
- ¹*) S.T. FREEDMAN, J.F. CLAUSER, Phys. Rev. Lett., <u>28</u>, 938 (1972).
- ¹⁵) J.F. CLAUSER, Phys. Rev. Lett., <u>36</u>, 1223 (1976).
- ¹⁶) E.S. FRY, R.C. THOMPSON, Phys. Rev. Lett., <u>37</u>, 465 (1976).
- ¹⁷) M. LAMEHI-RACHTI, W. MITTIG, Phys. Rev., D, <u>14</u>, 2543 (1976).

- 18) A. ASPECT, Phys. Rev., D, 14, 1944 (1976).
- ¹⁹) "Physikalische Prinzipien der Quantentheorie", B.I. Hochschultaschenbücher, Mannheim, 1958, p. 47.
- ²⁰) Max JAMMER, loc. cit., p. 516.
- Voir par ex., "The Feynman lectures on physics", Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 1965. Vol. III, chap. 11, p. 11-12.
- ²²) Dans ¹⁰), p. 230.