Séminaire L. de Broglie.
Théories physiques

O. Costa de Beauregard

Complémentarité et relativité

Séminaire L. de Broglie. Théories physiques, tome 24 (1954-1955), exp. nº 2, p. 1-12
<http://www.numdam.org/item?id=SLDB_1954-1955__24__A2_0>

Faculté des Sciences de Paris
-:-:-:-
Séminaire de Théories Physiques
(Séminaire Louis de BROGLIE)
Année 1954/55
-:-:-:-

Exposé n° 2

COMPLÉMENTARITÉ ET RELATIVITÉ

(par O. COSTA DE BEAUREGARD)

-:-:-:-:-

1.- Introduction .

1,1.- La doctrine de la complémentarité de Bohr [1], dont le dualisme onde-corpuscule de Louis de Broglie et les formules d'incertitude de Heisenberg sont des aspects corollaires fondamentaux, a beaucoup souffert de n'être pas exposée en tenant compte du cadre de la théorie de la Relativité restreinte - l'Univers de Minkowski - et des conceptions liées à la théorie de la Superquantification - nombres d'occupation des états orthogonaux, fonction de distribution de ces nombres.

Nous nous proposons ici de remédier à ces deux lacunes, et, chemin faisant, de préciser quelques uns des traits de la figure parfois indécise de la Complémentarité, tout en la démasquant de quelques accessoires postiches dont le maintien serait logiquement irrecevable.

Nous avons confié à la Revue Philosophique une étude épistémologique sur le même sujet. Elle ne fait pas double emploi avec celle-ci car, depuis sa rédaction, nous avons pu donner un tour beaucoup plus net à notre argumentation.

Le fondement technique de cette argumentation consiste en la formulation covariante relativiste de la théorie quantique de base, récemment proposée par nous [4], et, naturellement, en la formulation covariante relativiste de la théorie quantique des champs selon Tomonaga, Schwinger, Dyson, Feynman.

2.- Objectivité n'est pas déterminisme.

2,1.- Le critère de l'objectivité, c'est l'unanimité des observateurs enregistrant les résultats d'épreuves mutuellement réductibles.

Un objet de l'espace euclidien, restituable à partir de toutes les paires de clichés stéréoscopiques prises de points de vue différents, assimilées à des épreuves ; un groupe d'événements de l'Univers de Minkowski, définissable à partir de toutes ses projections spatiales et temporelles assimilées à des épreuves; un tenseur d'un espace métrique, sous-tendu équivalemment par n'importe lequel de ses systèmes complets de composantes ; voilà quelques exemples de la manière dont un objet réunit sur sa définition l'unanimité des observateurs divers qui le perçoivent, chacun à sa manière, dans une épreuve supposée <u>complète</u>. Remarquons bien que, semblablement au <u>fait scientifique</u> selon Duhem [5], l'<u>objet</u> dont nous venons de parler ne s'identifie nullement à un <u>résultat brut</u> d'épreuve ; il est restituable à partir de n'importe quel système complet d'épreuves, au moyen d'une <u>théorie</u> (le "chosisme" du sens commun, pour parler comme Meyerson [6] ; la géométrie euclidienne ; la géométrie quadridimensionnelle de Minkowski ; etc).

Voici un autre exemple, important pour nous. En théorie quantique, une épreuve complète faite à l'instant t_0 est caractérisée par un système complet de fonctions orthogonales $\varphi_p(x ; t_0)$; si, alors, $U(t , t_0)$ désigne l'opérateur unitaire d'évolution spontanée du système, les fonctions

$$\varphi_p(x ; t_1) = U(t_1 , t_0)\varphi_p(x ; t_0)$$

forment encore un système orthogonal complet, caractérisant une épreuve réductible à la précédente, mais faite à l'instant t_1 . <u>D'après nos définitions</u>, l'<u>objet</u> qui réunit ici l'<u>unanimité</u> des observateurs ayant procédé l'un à l'<u>épreuve</u> $\{ \varphi_p(x , t_0) \}$, l'autre à l'épreuve $\{ \varphi_p(x , t_1) \}$, etc... n'est autre que le système des ondes d'espace-temps $\varphi_p(x , t)$. Il faut donc bien qu'on puisse donner une <u>définition intemporelle</u> du caractère orthogonal et complet de ces ondes, et c'est ce que nous avons fait récemment [4] .

Chacune des ondes en évolution $\varphi_p(x , t)$, incluant dans sa définition son module $\rho = \sqrt{\varphi^* \varphi}$ (1) (mais non son facteur de phase Exp. $i\theta$), représente un <u>objet</u> spatio-temporel, s'inscrivant spontanément dans l'Univers de Minkowski, mais aussi, en vertu de la résolution de l'équation des ondes à la Cauchy, se projetant tout entier dans n'importe laquelle de ses coupes faites à temps constant.

2,2.- Arrêtons les exemples, et complétons nos définitions.

Ce qui caractérise le déterminisme, c'est qu'il n'existe aucun couple d'épreuves qui ne soient mutuellement réductibles.

Ce qui achève de caractériser une théorie à la fois <u>essentiellement aléatoire</u> et <u>objective</u> c'est, outre ce que nous avons déjà dit, <u>l'unanimité des observateurs dans l'estimation des probabilités de prédiction ou de rétrodiction</u> entre classes d'épreuves non mutuellement réductibles.

Soit par exemple un joueur qui bat un jeu de cartes. Chaque battage du jeu le fait passer d'un <u>état</u>, caractérisé par l'ordre des cartes et formant un <u>objet</u>

---

(1) expression simple valable en théorie non relativiste. Pour les expressions relativistes, on consultera notre étude citée [4].

bien défini, à un autre état. Entre deux de ses états, le jeu de cartes n'existe pas en tant que tel. Peu importe que la théorie universellement admise imagine un cheminement déterminé des cartes du jeu dans l'espace-temps : le fait est que cette théorie serait bien en peine de se formuler mathématiquement, et que l'on n'a aucun besoin d'elle pour obtenir une description quantitative et phénoménologique. Les caractéristiques du batteur de cartes seront adéquatement décrites par une matrice carrée de même rang que le nombre des cartes, dont chaque élément sera la probabilité de changement de rang d'une carte. Nous dirons que la théorie est objective si tous les observateurs adoptent la même matrice de probabilités.

Il peut arriver que la matrice en question soit symétrique. Ce sera en particulier le cas si le geste du batteur de cartes est temporellement réversible, en sorte que rien ne distingue la scène réelle de son image dans un film projeté à rebours. Dans ce cas, le calcul d'une probabilité de prédiction d'un état à l'état ultérieur, et celui d'une probabilité de rétrodiction d'un état à un état antérieur, sont formellement identiques. Ceci est aussi le cas de la Mécanique quantique.

Ainsi, ce qui caractérise une théorie aléatoire et objective, c'est que le calcul des probabilités de transition ne dépend que des deux classes d'épreuves mutuellement irréductibles considérées, et que des résultats obtenus dans l'une d'entre elles (l'initiale dans un problème de prédiction, la finale dans un problème de rétrodiction).

Si deux observateurs différents disposent d'informations différentes sur un même système, c'est qu'ils partent de deux classes d'épreuves différentes, et certainement irréductibles si elles sont l'une et l'autre complètes. Ce point, sur lequel a insisté M. Fréchet [7] en théorie classique des probabilités, reste valable en théorie quantique.

Dans ce dernier cas, l'une des épreuves irréductibles est certainement postérieure à l'autre. Celui des deux observateurs qui, dans un problème de prédiction, ne tient pas compte des résultats de la plus récente épreuve, mais de ceux d'une épreuve antérieure, est amené à faire un calcul des probabilités de forme typiquement quantique, exhibant la "complémentarité entre amplitudes et phases" et "l'interférence des probabilités" - un calcul où, somme toute, ce sont les amplitudes (au sens quantique) qui s'ajoutent dans le plan complexe, et non les probabilités qui s'ajoutent sur l'axe réel [3].

Cette circonstance, pour ne parler que d'elle, est de celles qui rendent *a priori* très difficile toute recherche d'une théorie quantique à paramètres cachés.

3.- *L'épreuve est une question posée par l'expérimentateur au système étudié. Son résultat est la réponse donnée par le système à l'observateur.*

En mécanique ondulatoire, la question élémentaire [9] posée à un corpuscule, c'est une onde préparée macroscopiquement (à la phase près), c'est-à-dire une onde sous-tendue par un appareillage macroscopique. Celui-ci peut fonctionner en régime permanent (ex : fentes d'Young, microscope de Heisenberg, polariseur, etc...), ou bien en régime variable : par exemple, un écran à diaphragme qui s'ouvre et se ferme sous-tend une onde d'Univers bien définie, exactement comme un écran percé d'un trou sous-tend une onde bien définie de l'espace ordinaire.

Ainsi, *selon nos définitions*, *l'onde est un objet*. Non pas du tout un objet microscopique, mais *un objet macroscopique*, *sous-tendu par un appareillage réel*. Là où l'on disait que l'onde quantique exprime l'information dont on dispose sur le système, et qu'elle est donc subjective, nous insistons, quant à nous, sur le fait qu'elle est liée à une *épreuve* définie par un *appareillage tangible*, et qu'elle s'insère donc avec lui dans le cadre phénoménal macroscopique de l'Univers de Minkowski.

Voici un exemple analogique. Un astronome braque son télescope dans la direction présumée d'un astre invisible à l'oeil nu, et, de deux choses l'une : l'astre est est dans le champ, ou il n'y est pas. Dans ce dernier cas, nous ne dirons pas que l'onde sous-tendue par le télescope est supprimée, ou effacée, par l'épreuve au résultat négatif,(ainsi qu'on le faisait d'habitude en exposant la thèse de la Complémentarité). Nous dirons que l'onde sous-tendue par le télescope est *inoccupée* ou *vide*, exactement dans le sens où une urne est inoccupée ou vide.

C'est le moment d'indiquer au passage une différence considérable entre le problème du télescope et de l'astre invisible, et celui de la théorie des Quanta. Même s'il y a du "jeu" dans la définition de l'axe du télescope, en répétant les pointés, les "vraies valeurs" des coordonnées cachées de l'astre finiront par apparaître comme des moyennes, car les lectures se grouperont comme les balles sur une cible. En théorie quantique, tout se passe comme si chaque pointé dérangeait le résultat du précédent, en sorte que, toute cumulation de mesures interdite, le résultat antérieur le plus instructif soit celui du dernier pointé, alors exclusif des précédents. Ceci est une autre difficulté à surmonter par la théorie à paramètres cachés.

Mais revenons à notre problème. Notre onde-question, objet macroscopique de l'espace-temps, est en somme une "urne" du Calcul des Probabilités. Demander combien de corpuscules sont portés par l'onde, c'est demander combien de boules on va trouver dans l'urne. Voici une autre comparaison, corollaire de la précédente analogie : l'onde, macroscopiquement préparée, est un quantiscope braqué sur cet au-delà à notre monde macroscopique qu'est le monde microscopique : combien de corpuscules, étrangers au cadre descriptif du monde macroscopique, vont-ils être trouvés dans le champ du quantiscope ?

Avant de poursuivre, voici en deux mots la relation de tout ceci avec la théorie des propositions de Von Neumann [9]. Les classes d'épreuves complètes sont les systèmes orthogonaux complets de solutions de l'équation des ondes, dont la théorie peut être donnée en forme complètement covariante relativiste [4].

Si l'on opère avec un seul corpuscule (comme il suffit à la présente discussion épistémologique) la réponse oui à une question élémentaire de la classe est traduite par le nombre d'occupation 1 de l'onde, la réponse non par le nombre d'occupation zéro.

Le point important est que ce nombre d'occupation - réponse du phénomène microscopique à la question macroscopique - est un objet, mais un objet aléatoire, comme l'était l'ordre des cartes du jeu précédemment considéré. C'est ce que la suite va mieux préciser.

4.- Covariance relativiste de l'onde et de son nombre d'occupation.

La covariance relativiste d'une onde est presque un truisme. Relativité est presque synonyme de covariance de l'équation des ondes. Remarquons que l'équation de Gordon rendrait les mêmes services que l'équation de d'Alembert utilisée par Einstein : il suffirait de remplacer partout les mots vitesse isotrope de la lumière par vitesse de groupe limite isotrope des ondes matérielles.

Pour comprendre la covariance relativiste du nombre d'occupation d'une onde, il faut établir une correspondance au sens de Bohr [1] entre la notion d'onde et celle de tube d'Univers du genre temps.

Les ondes d'Univers de Stueckelberg-Schwinger $D(x - x_0)$, intervenant dans la résolution formelle du problème de Cauchy et associées à l'idée de localisation spatio-temporelle du corpuscule [4] , règnent de manière homogène dans l'intérieur du cône isotrope de sommet x_0 , et sont nulles à son extérieur. Semblablement, une onde plane monochromatique, aux "rayons" obligatoirement du "genre temps", est aussi une sorte de tube d'Univers du genre temps : dans l'espace ordinaire, elle est engendrée par exemple par un collimateur, donc physiquement estompée aux grandes distances transversales ; dans l'Univers, il faut en outre tenir compte de ce que le collimateur a commencé et finira de fonctionner, en sorte qu'une limitation temporelle s'adjoint aux limitations spatiales, pour définir un faisceau d'Univers, strictement homologue aux classiques faisceaux monochromatiques de l'espace.

Alors il faut faire correspondre l'intensité conservative de l'onde, ou, comme nous le disons à présent, son nombre d'occupation conservatif, à la notion classique du nombre de trajectoires d'Univers contenues dans un même tube (par exemple, celles des molécules d'un gaz enfermé dans un récipient).

Insistons sur le fait que cette correspondance n'implique par elle-même aucune idée de trajectoires cachées. Reprenons l'exemple de l'astronome et du télescope. Si l'astre est trouvé dans le champ, nous disons que le nombre d'occupation de l'onde sous-tendue par le télescope est 1 . Mais ce n'est aucunement parce que l'image de l'astre est (presque) ponctuelle dans le plan image, ni que l'astronome pique l'astre en un point de la voûte céleste, que nous devons dire que cette image chemine sur un rayon caché ! Le nombre d'occupation 1 est un flux conservatif, intéressant de manière indivisible l'onde tout entière.

Notre exposé de la Complémentarité est phénoménologique, calqué sur le dualisme onde-corpuscule, la théorie de la diffraction de Fresnel associée à la valeur finie du quantum d'action, les incertitudes de Heisenberg. Seulement, nous avons volontairement déplacé le champ clos où se tient d'ordinaire le débat - pour mieux l'arbitrer ensuite à la place classique.

5.- Covariance quantique de l'onde et de son nombre d'occupation.

Montrons sur un exemple comment se présente la théorie covariante relativiste de la mesure quantique.

A un pseudo-instant σ_1 représenté par une hypersurface d'Univers du genre espace, nous voulons savoir si une particule libre passe au voisinage d'un instant-point x_1 de σ_1 . Pour cela, nous définissons un petit voisinage de x_1 sur σ_1 ; si l'on veut, σ_1 sera un hyperécran d'Univers du genre espace, parfaitement absorbant, avec un petit trou centré sur x_1 : nous voulons savoir si le corpuscule franchit ou non le trou.

Si cette question posée au pseudo-instant σ_1 reçoit la réponse oui, exprimée par le nombre d'occupation 1 de l'onde $D(x - x_1)$, nous pouvons nous livrer, à partir de là, soit à la prédiction, soit à la rétrodiction, qui sont deux problèmes distincts, mais complètement symétriques l'un de l'autre.

Considérons par exemple la prédiction.

Soit un pseudo-instant σ_2 postérieur à σ_1, représenté par une hypersurface du genre espace ne coupant pas σ_1. σ_2 coupe le cône isotrope de sommet x_1 suivant un contour γ_2, et nous retranchons de l'hyperécran σ_2 tout l'intérieur de γ_2. Les deux questions sous-tendues par σ_1 et σ_2 sont ainsi complètement équivalentes en ce qui concerne la prédiction (mais non en ce qui concerne la rétrodiction). Si la première question a reçu la réponse 1, ou 0, la seconde question est obligée de recevoir la même réponse, 1 ou 0. Et l'on peut continuer.

Résumons-nous. La nappe supérieure du cône isotrope de sommet x_0, ou plutôt la partie correspondante de la fonction $D(x - x_0)$, représente <u>intrinsèquement</u> une mesure de localisation considérée par rapport à la prédiction ; de même, la nappe inférieure du cône isotrope, ou plutôt la partie correspondante de la fonction $D(x - x_0)$, représente <u>intrinsèquement</u> une mesure de localisation considérée par rapport à la rétrodiction.

Cette <u>question intrinsèque</u> est, aux diverses questions posées aux pseudo-instants σ_1, σ_2, etc... qui la sous-tendent (au sens du problème de Cauchy) exactement dans le même rapport qu'un tenseur est à ses systèmes complets de composantes.

Quant à la <u>réponse intrinsèque</u> à la précédente question, c'est le <u>flux conservatif</u> circulant dans le tube, le même quelle que soit la section suivant laquelle on le calcule.

6.- <u>Complémentarité</u>.

Voici un exemple, moins frivole qu'il n'en a l'air à première vue.

Supposons qu'une maison de couture emploie n mannequins, et possède une collection de robes du jour et une collection de robes du soir qu'il s'agit de présenter. Dans chaque classe (jour ou soir) les robes sont caractérisées par leur couleur.

Un mannequin quelconque sera soit dans une robe du jour, soit dans une robe du soir, mais certainement pas dans les deux à la fois. De plus, les robes n'appartiennent pas aux mannequins mais à la maison de couture, et elles vont équivalemment bien à n'importe quel mannequin de la maison.

Semblablement en est-il des corpuscules de masse propre et de spin donnés. Aucun de ces corpuscules ne peut revêtir à la fois une onde plane monochromatique et une onde $D(x - x_0)$ appartenant à la collection, c'est-à-dire revêtir à la fois une impulsion-énergie et une localisation spatio-temporelle bien définies.

Conformément à la précédente image, l'impulsion-énergie ou la position d'espace-temps ne sauraient aucunement appartenir à un corpuscule individuel, mais seulement être prêtées à la collectivité des corpuscules de masse propre et de spin donnés. L'idée de l'appartenance d'une robe donnée à un mannequin donné serait une hypothèse de paramètre caché, logiquement soutenable, mais entièrement dépourvue de support phénoménologique.

Supposons, pour compléter la comparaison, que les n mannequins soient en scène, portant chacun une robe de l'une des deux classes, jour ou soir, et que nous sachions que, dans les p minutes à venir, un et un seul d'entre eux s'en ira, et reviendra dans une robe de l'autre classe. La correspondante probabilité de transition non superquantifiée d'un mannequin par minute est $1/pn$.

Mais, ce qui nous intéresse est la probabilité de disparition d'une robe de couleur donnée dans une classe donnée associée à la réapparition d'une robe de couleur donnée dans l'autre classe. Alors, la statistique de Fermi-Dirac s'obtiendra en supposant qu'il n'existe, dans chaque couleur de chaque classe, qu'une seule robe ; la statistique de Bose-Einstein s'obtiendra en supposant qu'il y a dans les coulisses, dans chaque couleur de chaque classe, autant de robes qu'en scène plus une.

7.- Changement de programme de mesures.

Un autre exemple de complémentarité sera fourni par la répétition de la mesure de position étudiée au n° 5 .

Soient σ_1 et σ_2 deux successifs hyperécrans d'Univers du genre espace ne se coupant pas, x_1 et x_2 deux instants-points leur appartenant respectivement, tels que le quadrivecteur $x_2 - x_1$ soit du genre temps ; on peut imaginer que deux petites ouvertures sont percées respectivement en x_1 et x_2 dans σ_1 et σ_2 .

Un corpuscule ne peut pas être porté à la fois par une onde $D(x - x_1)$ et par une onde $D(x - x_2)$; effectivement, nous avons montré que ces deux fonctions de x ne sont pas orthogonales au sens covariant par nous défini [4].

Avant la mesure σ_1 , il a pu y avoir d'autres mesures de position réductibles, en rétrodiction, à (σ_1) . De même, après la mesure σ_2 , il pourra y avoir d'autres mesures de position réductibles, en prédiction, à (σ_2) .
Nous sommes ainsi autorisés à parler de deux états successifs du corpuscule, un état 1 et un état 2, chacun objectivé par une onde et le nombre d'occupation de cette onde, mais mutuellement irréductibles. L'onde $D(x - x_1)$ doit être considérée comme éteinte, vers le futur, par l'écran parfaitement absorbant σ_2 ;

de même, l'onde $D(x - x_2)$ est éteinte, vers le passé, par σ_1 ; c'est ainsi qu'est traduit le fait qu'une probabilité de prédiction devient sans objet dès que le résultat de la nouvelle mesure est connu, qu'une probabilité de rétrodiction devient sans objet dès que le résultat (d'abord oublié ou perdu) de l'ancienne mesure est retrouvé. Chacun des deux calculs de prédiction et de rétrodiction équivaut, dans le cas considéré, au calcul de l'éclairement d'un hyperécran d'Univers du genre espace σ par une source ponctuelle x ; l'éclairement de chaque élément de σ est défini comme le flux du courant de présence.

Demander sur quelle onde $D(x - x_1)$ ou $D(x - x_2)$ est le corpuscule entre σ_1 et σ_2 n'aurait aucun sens. Si le corpuscule franchit les deux instant-points x_1 et x_2 séparés par un intervalle du genre temps, entre x_1 et x_2 **il est "assis entre deux chaises" .**

Mais tous les observateurs, déjà unanimes à reconnaître un état et le nombre d'occupation de cet état, sont également unanimes à évaluer la probabilité de transition d'un état à un autre état ;ici, la matrice (hermitienne à éléments imaginaires purs [4]) des amplitudes de transition est $D(x_2 - x_1)$, et celle des probabilités de transition $|D(x_2 - x_1)|^2$. Il y a symétrie complète entre la prédiction et la rétrodiction, et l'analogie avec le battage du jeu de cartes est complète sur tous les points considérés.

8.- Cas d'un hyperécran du genre Temps.

Imaginons qu'une onde portant un corpuscule et un seul tombe sur un écran plan percé d'un trou qui s'ouvre et se ferme. Soit x_1 un axe galiléen d'espace normal à l'écran ; dans l'Univers, nous avons un écran plan tridimensionnel percé d'un trou et parallèle aux trois axes x_2, x_3, $x_4 = ict$.

Si l'écran est parfaitement diffusant ou réfléchissant, il y a une onde transmise (1) et une onde réfléchie (2). Les intensités relatives des deux ondes sont aisées à calculer : ce sont les flux du courant de Dirac de l'onde incidente à travers les deux domaines, vide et plein, de l'écran d'Univers. Elles représentent les probabilités *a priori* de retrouver le corpuscule sur l'onde (1) ou sur l'onde (2) .

Ces deux ondes se séparent dans l'espace, et deux observateurs, O_1 et O_2 , très distants l'un de l'autre, peuvent opérer respectivement sur elles.

Supposons que l'observateur O_1 barre le faisceau (1) au moyen d'un écran ; de deux choses l'une, il trouve le corpuscule, ou ne le trouve pas.

Faut-il dire que, ce faisant, il oblige l'observateur O_2 à ne pas trouver, ou à trouver, le corpuscule sur le faisceau (2) ? Ce serait là, non pas de la causalité instantanée à distance (notion antirelativiste), mais de la causalité d'abord "avancée" le long du faisceau (1), puis "retardée" le long du faisceau (2) .

Mais, même ainsi précisée, cette conception, (souvent suggérée par la manière de s'exprimer des représentants de la Complémentarité) est inconsistante et irrecevable. En effet, les deux observateurs O_1 et O_2 jouent, réellement ou virtuellement, des rôles semblables, et rien n'autorise à dire que l'un agit sur l'autre plutôt que l'autre sur l'un.

La vérité est que, par hypothèse, nous sommes à l'intérieur d'un même programme de mesures, et qu'il y a objectivité à l'intérieur d'un même programme de mesures (nos 4 et 5).

Si, au lieu d'un écran, O_1 dispose en série des compteurs de Geiger-Müller, tous les compteurs seront unanimes dans leur réponse : présence, ou absence, du corpuscule sur le faisceau (1).

Il n'est pas très heureux de dire que "avant d'arriver sur l'écran, le corpuscule ne sait pas quel faisceau il choisira" parce que, du point de vue relativiste, l'onde et son nombre d'occupation sont déployés d'un seul coup dans tout l'espace-temps. Par contre, il faut dire que, avant d'être arrivé au temps d'ouverture du diaphragme, l'observateur ne sait pas sur quel faisceau il retrouvera le corpuscule.

Avant d'avoir ouvert n'importe laquelle de deux urnes où est cachée une boule, l'observateur ne sait pas dans quelle urne est la boule.

9.- La description quantique est-elle complète ou incomplète ?

Le nombre d'occupation d'une onde a le même degré d'objectivité que l'onde définie par un appareillage macroscopique, mais sa valeur est aléatoire. Telle est la conception de la Complémentarité qui s'impose , toute autre étant inconsistante.

Lors d'un changement de programme de mesures (comparable au battage d'un jeu de cartes) la théorie définit univoquement le nouveau système complet des questions posées en fonction de l'ancien (ou le contraire), mais seulement les valeurs probables des réponses correspondantes en prédiction (ou en rétrodiction).

Ces réponses étant (nous y avons insisté) objectives, faut-il en conclure que la description quantique est incomplète ?

Ainsi posée, la question est assez oiseuse. La question intéressante est celle-ci : la prédiction (ou la rétrodiction) quantique est-elle incomplète ?

Autrement dit, la relation entre passé et futur, lors d'un changement de programme de mesures, est-elle irréductiblement aléatoire, ou bien admet-elle le jeu d'un déterminisme caché ?

A ne s'en tenir qu'à la Physique, rien n'incline à rechercher le jeu d'un déterminisme caché. Les lois aléatoires de la mécanique quantique expriment adéquatement tous les faits actuellement discutés ; elles sont phénoménologiques, donc physiquement satisfaisantes.

Mais nous ne sommes pas en mesure de nier l'existence de paramètres cachés. Nous devons simplement affirmer qu'ils sont vraiment cachés à la Physique en son état actuel, autrement dit qu'ils sont méta-physiques par rapport à cette Physique.

10.- La position d'Einstein [6] et celle de Bohr [2].

Discutant une expérience de pensée très analogue à celle du n° 8, Einstein [6] dit expressément ceci : "Si, sans aucunement agir sur un être physique (disons : le faisceau (2) précédent) l'on peut faire une mesure (disons : sur le faisceau (1) précédent) d'où résulte la connaissance exacte d'une grandeur attachée à l'être considéré, alors il existe un élément correspondant d'objectivité attaché à cet être". C'est la thèse même de l'objectivité de l'onde et de son nombre d'occupation, que nous avons soutenue.

Dans sa réponse, Bohr [2] concède ce point essentiel, mais ajoute : l'objectivité de l'onde et de son nombre d'occupation ne sont définies que au sein d'un certain cadre macroscopique, définissant un programme de mesures. A la charnière entre deux programmes de mesure non mutuellement réductibles se joue un coup de dés.

La thèse de la Complémentarité, en dernière analyse, est qu'il n'y a rien à chercher au-delà des lois aléatoires de ce coup de dés.

BIBLIOGRAPHIE

[1] BOHR (N.).- La théorie atomique..., traduit par A.LEGROS et L.ROSENFELD, Paris, 1932 .

[2] BOHR (N.).- Phys.Rev.48, 1935, p.696-702 .

[3] BROGLIE (L.de).- Mécanique ondulatoire du photon et théorie quantique des champs, Paris, 1949, p.80-84 .

[4] COSTA DE BEAUREGARD (O.).- Exposé du 9 Novembre 1954 au Séminaire L.de Broglie.

[5] DUHEM (P.).- La théorie physique, son objet, sa structure, Paris, 1906 .- Nouvelle édition, augmentée, 1914 .

[6] EINSTEIN (A.), PODOLSKY (B.), ROSEN (N.).- Phys. Rev. 47, 1935, p.777-780 .

[7] FRÉCHET (M.).- Généralités, <u>in</u> Calcul des Probabilités, Fascicule XII du Formulaire de Mathématiques à l'usage des Physiciens et des Ingénieurs, CNRS, Paris, 1952, p.7-8 .

[8] MEYERSON (E.).- Identité et Réalité, Paris, 1907 .- Nouvelle édition, augmentée, 1926 .

[9] NEUMANN (J.von).- Les fondements mathématiques de la mécanique quantique, traduit par A.PROCA, Paris 1946 .