

MÉCANIQUE QUANTIQUE RELATIVISTE. — *Symétrie temporelle de la transition quantique et paradoxe d'Einstein, Podolsky et Rosen.* Note (*) de M. Olivier Costa de Beauregard, présentée par M. André Lichnerowicz.

La non-localité faisant l'objet du paradoxe est très voisine de celle du système électron-positon de Feynman : la somme de deux quadrivecteurs du genre temps à quatrièmes composantes de signes opposés peut être du genre espace. La symétrie temporelle intrinsèque de la transition quantique consiste en la présence des deux ondes, retardée et avancée, au sein de l'onde « collapsée ».

Le paradoxe d'Einstein, Podolsky et Rosen ⁽¹⁾, formulé en termes de spins d'électrons ⁽²⁾ ou de polarisations de photons ⁽³⁾, permet de trancher ⁽⁴⁾ entre toute théorie locale à variables cachées et la mécanique quantique. Notant λ l'ensemble des hypothétiques variables décrivant, à l'instant des deux mesures, simultanées dans le laboratoire, l'état des photons issus d'une cascade C et des deux appareils, analyseur et compteur, opérant en L et N, \mathbf{l} et \mathbf{n} les orientations respectives des analyseurs L et N, \mathcal{L} et \mathcal{N} les prédictions quantiques pour les résultats des deux mesures ⁽⁵⁾, Bell ⁽⁶⁾ a lui-même résumé son ⁽⁴⁾ argument sous la forme suivante : sous l'hypothèse :

$$(1) \quad \mathcal{L} = \mathcal{L}(\lambda, \mathbf{l}), \quad \mathcal{N} = \mathcal{N}(\lambda, \mathbf{n})$$

il est impossible, mais sous l'hypothèse :

$$(2) \quad \mathcal{L} = \mathcal{L}(\lambda, \mathbf{l}, \mathbf{n}), \quad \mathcal{N} = \mathcal{N}(\lambda, \mathbf{l}, \mathbf{n})$$

il est possible, de reproduire \mathcal{L} et \mathcal{N} .

Cet énoncé étant manifestement non local, le « remède » des variables cachées n'est pas moins paradoxal que le « mal » qu'il espérait guérir. Si donc la mécanique quantique franchit la nouvelle épreuve, maintes fois suggérée, et récemment ⁽⁷⁾ projetée expérimentalement, d'une mesure où les orientations \mathbf{l} et \mathbf{n} des polariseurs seront arbitrairement changées dans un temps comparable au temps de vol des photons de C en L et en N, la physique théorique sera confrontée à un paradoxe ⁽⁸⁾ aussi radical que ceux des théories de Copernic, Einstein et Planck.

Ce paradoxe, parfaitement discerné par Einstein ⁽⁹⁾ dès 1928, et discuté aussi par Schrödinger ⁽¹⁰⁾, de Broglie ⁽¹¹⁾ et Renninger ⁽¹²⁾, consiste en ce que, d'après la mécanique quantique, *ce n'est pas en C que « les dés sont jetés »* (comme en théorie classique) *mais plus tard, en L et en N* (fig. 1). Dans l'exemple ici discuté cela résulte de l'incompatibilité de deux mesures \mathcal{L} pour des orientations \mathbf{l} non orthogonales du polariseur L.

La mécanique quantique implique donc qu'il y ait, entre les mesures faites en L et N, non seulement « télédiction » comme en théorie classique, mais aussi « téléaction », en ce sens que les mesures en L et N produisent *le même* collapse du ψ dans leur commun passé C. Ces mesures ne sont donc pas indépendantes (ou « séparables » ⁽¹³⁾), comme elles le seraient en théorie classique, et comme Einstein [⁽⁹⁾, ⁽¹⁾] considérait évident qu'elles dussent l'être. Et Bell ⁽⁴⁾ montre que le paradoxe ne peut pas être levé par le recours aux variables cachées.

Stapp ⁽¹⁴⁾ et nous-même ⁽¹⁵⁾ avons indépendamment énoncé que la non-localité en question est de la même nature que celle du système électron-positon en théorie de Feynman (fig. 2) : la somme de deux vecteurs du genre temps aux quatrièmes composantes de signes opposés peut être du genre espace. Nous proposons donc que la corrélation entre les mesures \mathcal{L} et \mathcal{N} soit propagée non pas directement le long du vecteur du genre espace LN (fig. 1), mais le long des deux vecteurs du genre temps CL et CN. C'est bien ce chemin que parcourent idéalement l'inférence logique et le calcul de la corrélation et réellement les trains d'ondes corrélés. Nous considérons donc que l'interdiction (macroscopique) de « télégraphier dans le passé » d'Einstein est levée au niveau de la transition quantique individuelle. Par contre, l'interdiction de télégraphier directement dans l'ailleurs reste absolue ⁽¹⁶⁾.

Rappelons que la symétrie intrinsèque passé-futur existe déjà pour l'événement aléatoire, ou « choc », de la mécanique statistique classique, où elle a donné lieu aux paradoxes

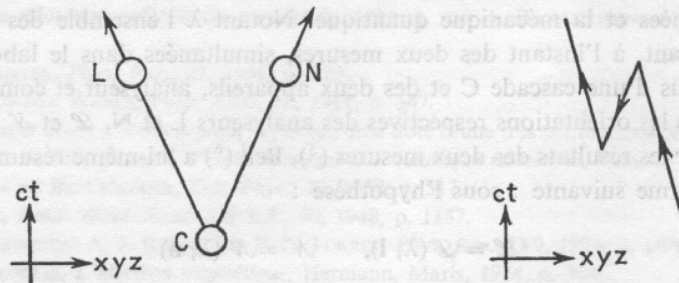


Fig. 1

Fig. 2

Fig. 1. — Le paradoxe E.P.R.

Fig. 2. — Le système électron-positon de Feynman.

bien connus de Loschmidt et de Zermelo. Elle existe aussi dans le calcul des probabilités classique lui-même, où elle n'est levée que moyennant la règle supplémentaire qu'il est permis de calculer « aveuglément » ⁽⁷⁾ en prédiction mais interdit de le faire en rétrodiction. En rétrodiction l'on se pose des « problèmes de probabilité des causes », impliquant l'idée que les interactions agissent de manière entièrement retardée, et introduisant un jeu de probabilités extrinsèques de Bayes. Van der Waals ⁽¹⁸⁾ le premier a signalé que la déduction statistique de la croissance de l'entropie postule une application temporelle du principe de Bayes.

En mécanique quantique l'événement aléatoire est la transition ou *collapse* du ψ . Or (et c'est un point capital qui n'a guère été explicité) le *collapse* du ψ a intrinsèquement la symétrie passé-futur, et produit une « fonction propre » s'étendant de $t = -\infty$ à $t = +\infty$.

Dans le présent problème les mesures en L et T sont des mesures de position et de spin ⁽¹⁹⁾ de deux photons. Nous ⁽²⁰⁾ avons proposé un formalisme covariant relativiste permettant en particulier de traiter ce problème; pour être bref nous allons le résumer en termes de fonction d'onde scalaire ψ obéissant à l'équation de Klein-Gordon, c'est-à-dire en négligeant le spin.

La fonction propre associée à la réponse *oui* à la question « la particule traverse-t-elle l'élément $d\sigma^i$ ($i = 1, 2, 3, 4$) d'hypersurface du genre espace σ ayant son instant-point

moyen en x_0^i » noté simplement x_0 , est le propagateur de Jordan-Pauli $\langle x | x_0 \rangle$. Cela résulte de la formule résolvant le problème de Cauchy

$$(3) \quad \langle x | a \rangle = \langle x | x_0 \rangle \langle x_0 | a \rangle,$$

c'est-à-dire développant une solution $\psi_a(x) \equiv \langle x | a \rangle$ sur le système orthogonal complet des $\langle x | x_0 \rangle$ ayant leurs sommets x_0 sur l'hypersurface σ , les coefficients du développement étant les $\psi_a(x_0) \equiv \langle x_0 | a \rangle$ sur σ .

Or, le propagateur $\langle x | x_0 \rangle$, différence des propagateurs retardé et avancé, est identiquement nul dans l'ailleurs et non nul dans le futur *et le passé*. Dans l'exemple ici discuté le double collapse opéré en L et N est, en C, *le même collapse*. Ceci implique bien, entre L et N, téléaction *et téléaction*, et devrait être confirmé par la nouvelle expérience (7) en cours de montage.

Notons bien que la téléaction en question concerne *essentiellement* la double mesure *individuelle* et n'implique *aucunement* la transmission d'un signal *macroscopique* entre L et N.

Pour passer au niveau macroscopique il faut concevoir des *répétitions* de la (double) mesure et recourir au formalisme des ensembles de von Neumann. C'est à ce niveau *seulement* qu'une *règle supplémentaire* (souvent informulée) sélectionne les solutions retardées à entropie croissante. Nous (2) avons montré qu'une simple relecture de la démonstration d'irréversibilité de von Neumann associe, réciproquement et nécessairement, ondes retardées et entropie croissante. Fock (22) avait déjà signalé qu'en mécanique quantique les ondes retardées et avancées servent respectivement à la prédiction et à la rétroaction statistique (aveugles (17)), d'où il suit notamment que *rétroaction aveugle interdite* ou *exclusion macroscopique des ondes avancées* sont deux énoncés équivalents de la *règle d'irréversibilité*.

Au total, bien plus qu'une *mécanique ondulatoire*, la mécanique quantique est un *nouveau calcul ondulatoire des probabilités*, dont l'originalité principale est la *loi d'addition*, ou *d'interférence*, des *amplitudes*. Son étude est susceptible de dévoiler des aspects paradoxaux de la transmission par ondes, de l'information, et implique en particulier que, dans les fluctuations statistiques, la décroissance de l'entropie est corollaire d'ondes avancées.

NOTE RELATIVE A L'OPÉRATEUR DE POSITION. — Bien des opérateurs de position ont été proposés (23) en théorie relativiste des particules à spin, se rapprochant plus ou moins des composantes 14, 24 et 34 du moment angulaire (orbital+propre) à six composantes. Celui impliqué dans notre théorie de la mesure de position, où σ est donnée, est tout simplement x_0^i . En effet, en représentation k (quadrifréquence), la fonction propre de la position x est $\exp(i k_i x_0^i)$, dont la transformée de Fourier suivant notre (20) formalisme est le propagateur $\langle x | x_0 \rangle$. Cet argument transpose exactement celui classique en mécanique quantique non relativiste, le propagateur $\langle x | x_0 \rangle$ remplaçant la distribution de Dirac $\delta(x-x_0)$. Notre formalisme d'intégrales triples échappe donc aux objections que L. de Broglie (24) tirait d'un formalisme d'intégrales quadruples.

(*) Séance du 5 avril 1976.

(1) A. EINSTEIN, B. PODOLSKY et N. ROSEN, *Phys. Rev.*, 47, 1935, p. 777. Dans cet article le paradoxe est énoncé sous forme non relativiste.

(2) D. BOHM, *Quantum Theory*, Prentice Hall Inc., chap. 22, 1951.

- (³) J. F. CLAUSER, M. A. HORNE, A. SHIMONY et R. A. HOLT, *Phys. Rev. Lett.*, 23, 1969, p. 880.
- (⁴) J. S. BELL, *Physics*, 1, 1965, p. 195.
- (⁵) Il s'agit d'une combinaison linéaire *ad hoc* des probabilités d'une double réponse *oui* pour divers angles entre les polariseurs L et N.
- (⁶) J. S. BELL, *Epistemological Letters*, 7, 1975, p. 2.
- (⁷) A. ASPECT, *Phys. Lett.*, 54 A, 1975, p. 117.
- (⁸) Un *paradoxe* est par définition un « énoncé surprenant, mais vrai ».
- (⁹) A. EINSTEIN in *Rapports et discussions du 5^e Conseil Solvay*, Gauthier-Villars, Paris, 1928, p. 253-256.
- (¹⁰) E. SCHRÖDINGER, *Naturwiss*, 23, 1935, p. 807, 823 et 844.
- (¹¹) L. DE BROGLIE, *Une tentative d'interprétation causale et non linéaire de la mécanique ondulatoire*, chap. 7, Gauthier-Villars, Paris, 1956.
- (¹²) W. RENNINGER, *Physik*, 158, 1960, p. 417; *Phys. Zeits*, 136, 1963, p. 251.
- (¹³) B. d'ESPAGNAT, *Conceptual Foundations of Quantum Mechanics*, Benjamin, 3^e partie, 1971; *Phys. Rev.*, D 11, 1975, p. 1424.
- (¹⁴) H. P. STAPP, *Nuovo Cim.*, 29 B, 1975, p. 170.
- (¹⁵) O. COSTA DE BEAUREGARD, *Rev. Intern. Philos.*, 61-62, 1962, p. 1; *Dialectica*, 19, 1965, p. 280; in, *Proc. Intern. Conf. Thermodynamics*, P.T. LANDSBERG éd., Butterworths, 1970, p. 540-542.
- (¹⁶) Pour une réfutation radicale du concept de tachyon, voir A. RAMAKRISHNAN, *J. Math. Analys*, 42, 1973, p. 377.
- (¹⁷) S. WATANABE, *Phys. Rev.*, 27, 1955, p. 179.
- (¹⁸) J. D. VAN DER WAALS, *Phys. Zeits*, 12, 1911, p. 547.
- (¹⁹) Pour couper court à toute argutie le photon sera doté d'une très petite masse propre.
- (²⁰) O. COSTA DE BEAUREGARD, *Précis de mécanique quantique relativiste*, Dunod, Paris, 1967.
- (²¹) O. COSTA DE BEAUREGARD, *Cah. Phys.*, 12, 1958, p. 317.
- (²²) V. FOCK, *Dokl. Akad. Nauk S.S.S.R.*, 60, 1948, p. 1157.
- (²³) Voir notamment A. J. KALNAY et P. L. TORRES, *Phys. Rev.*, D 9, 1974, p. 1670.
- (²⁴) L. DE BROGLIE, *L'électron magnétique*, Hermann, Maris, 1934, p. 304.

Laboratoire de Physique théorique,
 Institut Henri-Poincaré,
 11, rue Pierre-et-Marie-Curie,
 75005 Paris.