

Annales de la Fondation Louis de Broglie,  
Vol. 6, n° 4, 1981

COVARIANCE RELATIVISTE ET INTERPRÉTATION  
DE LA MÉCANIQUE QUANTIQUE

par O. COSTA DE BEAUREGARD

Institut Henri Poincaré

11, rue Pierre et Marie Curie

75231 Paris Cedex 05

---

(manuscrit reçu le 20 Décembre 1980)

---

*Résumé : LORENTZ et CPT-invariances imposent de ne pas privilégier l'évolution prédictive d'un système quantique à partir d'une préparation  $|\phi\rangle$  de l'évolution rétrodictive du même système vers une mesure ultérieure  $|\psi\rangle$ . L'on propose donc le concept qu'entre les deux pseudo-instants  $\sigma_1$  et  $\sigma_2$  (au sens de TOMONAGA-SCHWINGER), où sont respectivement faites la préparation  $|\phi\rangle$  et la mesure  $|\psi\rangle$ , le système n'est ni dans l'état  $|U(\sigma_1, \sigma)\phi\rangle$  ni dans l'état  $|U^{-1}(\sigma, \sigma_2)\psi\rangle$  (qui ne sont pas orthogonaux), mais est en train de transiter de l'état  $|\phi(\sigma_1)\rangle$  à l'état  $|\psi(\sigma_2)\rangle$ . Préalablement à l'introduction de ce concept, on survole le schème de la mécanique quantique relativiste, puis l'on discute de l'interprétation du propagateur de*

FEYNMAN en dissociant ce qui, dans sa définition, est essentiel, de ce qui est contingent.

1. La discussion, qui s'éternise<sup>(1)</sup>, quant à l'interprétation de la mécanique quantique -en écho au combat des géants EINSTEIN et BOHR dont le second fut déclaré vainqueur aux points- et qui a rebondi à la suite de l'énoncé du théorème de BELL et de la proposition par SHIMONY et ses collaborateurs d'expériences EPR réelles dont les résultats, en majorité favorables à la "paradoxale" mécanique quantique, continuent à s'accumuler, n'a, selon moi, pas suffisamment recouru à l'argument de la covariance relativiste; plus précisément, de la *micro* covariance relativiste, incluant le retournement de l'axe de temps<sup>(2)</sup> et la CPT-invariance de LÜDERS et PAULI.

Il est bien connu que la "réconciliation des formalismes relativiste et quantique" a été brillamment réalisée au niveau "seconde quantification" par TOMOGANA, SCHWINGER, FEYNMAN et DYSON, de 1946 à 1949. Ces très habiles manipulations formelles ont, comme toujours, exigé par contrecoup des révisions conceptuelles, dont je signalerai simplement l'une : l'ancien formalisme de la théorie quantique des champs attribuait aux particules virtuelles la même masse propre qu'aux particules réelles, et se trouvait obligée de disposer de l'énergie comme degré de liberté, d'où une "non conservation de l'énergie" -sinon, bien sûr, globalement. Dans le formalisme covariant, les particules virtuelles sont décrites par un propagateur solution de l'équation de GORDON inhomogène, et donc développé en intégrale de FOURIER quadruple : la masse propre devient ainsi un degré de liberté, mais, d'autre part, la covariance impose la conservation de l'impulsion-énergie au niveau élémentaire.

C'est un joli numéro de trapèze volant qu'ont exécuté TOMOGANA, SCHWINGER, FEYNMAN et DYSON, et sans le filet qu'eût été un formalisme covariant de la première

quantification. Or, c'est à un tel formalisme que je réfléchissais de mon côté en ces mêmes années, en me heurtant -je puis et dois le dire- au plus déterminé scepticisme de mon entourage scientifique. Quelques Notes aux Comptes Rendus sont pourtant passées, puis des articles au Journal de Physique<sup>(3)</sup>, et finalement deux livres synthétiques<sup>(4)</sup>. Le formalisme exposé là constitue à mes yeux le "chaînon manquant" dans la définition de la *mécanique quantique relativiste*.

Quant au problème du paradoxe d'EINSTEIN (1927), ou EPR (1935)<sup>(5)</sup>, il m'a toujours semblé que la covariance relativiste, jointe à la T-symétrie si générale au niveau élémentaire de la physique, devenue PT-symétrie par raison de covariance, puis CPT-symétrie à la suite des C-violations de LEE et YANG, était essentielle à l'intelligence du problème<sup>(6)</sup>. Le grand boom sur les actions EPR, consécutive aux articles de BELL<sup>(7)</sup>, et de SHIMONY *et alii*<sup>(8)</sup>, m'a incité à creuser plus avant mes précédentes idées<sup>(9)</sup>, et à découvrir ainsi deux choses. La première a été qu'en prenant comme fil d'Ariane la covariance relativiste du formalisme, combinée à la CPT-invariance du niveau quantique, et en la suivant les yeux fermés à travers un labyrinthe semé d'embûches, plusieurs traits radicalement nouveaux -je veux dire, *tout à fait étrangers aux habitudes de pensée* que nous dicte l'expérience de la vie, et dont beaucoup plus qu'on ne l'eût cru sont passées dans l'interprétation de COPENHAGUE-GÖTTINGEN- se trouvent littéralement *imposés*. Cette circonstance, bien sûr, s'était déjà présentée dans l'histoire de la physique, et j'en donnerai comme exemples l'héliocentrisme de COPERNIC et la relativité d'EINSTEIN ; dans ces deux cas une *recette mathématique* (de cinématique) est devenue "paradigme".

Ma seconde -et plus tardive- surprise a été de constater qu'au seuil de 1981 non seulement il ne se trouve pas deux théoriciens pour proposer la même interprétation

des corrélations EPR<sup>(5)</sup>, mais en particulier, que, malgré certaines similitudes apparentes avec les propositions de STAPP<sup>(10)</sup> et de DAVIDON<sup>(11)</sup>, la mienne se singularise de toutes les autres en ceci que, d'abord, elle est la seule à être "manifestement" et totalement LORENTZ et CPT-invariante ; et que, ensuite, elle est la seule à lire *aveuglément* (si j'ose dire) le formalisme, pensant dévoiler par là "le sens des Ecritures". Priorité *absolue* au formalisme, et "advienne que pourra !".

Enfin, pour autant que j'aie réussi à m'assimiler la pensée, éventuellement assez subtile, de tel ou tel ou tel de mes collègues engagés dans la discussion du "paradoxe EPR" et la recherche de la "bonne" interprétation de la mécanique quantique, la proposition que je présente me semble être la seule à *expliquer* un résultat conforme à la mécanique quantique des expériences du type "à décision différée"<sup>(12)</sup> d'ASPECT et de BUTT<sup>(13)</sup> en cours de préparation. Pour autant que je sache cette explication est la seule à être "straight-forward" - si ce n'est qu'elle est "straight backward ... in time"!

## 2. Dissipons d'abord deux malentendus quant au propagateur de FEYNMAN.

On sait que les propagateurs de la mécanique quantique relativiste sont définis à partir d'une même intégrale de FOURIER quadruple dans l'espace des quadrifréquences, et diffèrent entre eux par le lacet d'intégration dans le plan complexe de l'énergie. Si le lacet se ferme à distance finie le propagateur est solution de l'équation de GORDON sans second membre, et représenté par une intégrale de FOURIER triple étendue à tout ou partie de la "mass shell" (exemple : propagateur de JORDAN-PAULI). Si le lacet se ferme à l'infini le propagateur est solution de l'équation de GORDON avec un second membre en  $\delta(x)$ , et représenté en intégrale de FOURIER quadruple (exemple : propagateur de FEYNMAN).

JAUCH et ROHRLICH<sup>(14)</sup> ont montré que la description des particules virtuelles au moyen du propagateur de FEYNMAN (celle prônée par FEYNMAN lui-même) entraîne automatiquement le déclin exponentiel d'un niveau d'énergie supérieur ; c'est la généralisation covariante d'un résultat antérieur de WEISSKOPF et WIGNER<sup>(15)</sup>. Il serait erroné de conclure de là à une asymétrie temporelle de la théorie quantique des champs : le propagateur de FEYNMAN est PT-invariant, en sorte qu'utilisé en prédiction il donne un déclin en  $\exp(-at)$ , mais qu'utilisé en rétrodictioin il ferait *avoir émergé* le niveau supérieur suivant une loi en  $\exp(+at)$ . Ceci est entièrement conforme à ce qu'enseignent toutes les discussions de l'irréversibilité physique, et l'on peut donc dire que l'emploi du propagateur de FEYNMAN exprime "automatiquement" à sa manière le principe d'irréversibilité physique. L'emploi du propagateur "anti-FEYNMAN", les poles étant contournés de l'autre côté, serait "anti-second principe".

Le second point est que FEYNMAN a défini son propagateur de manière à associer les fréquences positives aux ondes retardées et les fréquences négatives aux ondes avancées. *Par définition* ce propagateur associe donc les fréquences positives aux problèmes de prédiction et les fréquences négatives aux problèmes de rétrodictioin. C'est *celà* qui est fondamental quant aux problèmes d'interprétation de la mécanique quantique, toute allusion aux "particules" et aux "antiparticules" étant ici "folklorique" (on sait que l'association particules-fréquences positives et antiparticules-fréquences négatives n'est *que* nominaliste ; et que dans le cas du photon, par exemple, si utilisé dans les expériences EPR, la particule est indiscernable de l'antiparticule).

## 3. Evolution schrödingerienne, collapse, et rétrocollapse, du $\psi$ : une réforme des vues acceptées

Soit, en description non-relativiste,  $U(t_1, t_2)$ , ou,

en description relativiste à la TOMONAGA-SCHWINGER,  $U(\sigma_1, \sigma_2)$  l'opérateur unitaire d'évolution du "système" entre une "préparation initiale" et une "mesure finale". La préparation idéalement faite à  $t_1$ , ou  $\sigma_1$ , et la mesure idéalement faite à  $t_2$ , ou  $\sigma_2$ , sont respectivement symbolisées par des "vecteurs d'état"  $|\phi\rangle$  et  $|\psi\rangle$ , développées suivant des bases orthonormées  $|\phi_i\rangle$  et  $|\psi_j\rangle$ . Dire qu'il y a *transition* de  $|\phi\rangle$  à  $|\psi\rangle$ , c'est dire que  $|\psi\rangle \neq |U\phi\rangle$  ou  $|U^{-1}\psi\rangle \neq |\phi\rangle$ .

L'*amplitude de transition* est le produit scalaire  $\langle\phi|U|\psi\rangle = \langle\psi|U|\phi\rangle^*$  qui est (au sens qu'on vient d'écrire) symétrique en  $|\phi\rangle$  et  $|\psi\rangle$ . Cependant, on peut le penser, et le calculer, asymétriquement, soit en projetant, ou collapsant  $|U\phi\rangle$  sur  $|\psi\rangle$ , soit en projetant, ou rétrocollapsant  $|U^{-1}\psi\rangle$  sur  $|\phi\rangle$ . La première procédure implique l'idée d'une prédiction statistique des résultats d'une mesure succédant à une préparation, et la seconde celle d'une rétrodictioin statistique des résultats possibles d'une préparation ayant précédé une mesure. Dans les deux cas les éléments  $\langle\phi_i|\psi_j\rangle$  de la matrice amplitude de transition sont les mêmes, et ils se lisent soit comme l'amplitude prédictive de passer de  $|\phi_i\rangle$  à  $|\psi_j\rangle$ , soit comme l'amplitude rétrodictive d'être passé de  $|\phi_i\rangle$  à  $|\psi_j\rangle$ .

Tout ceci, qui est bien connu, est rappelé uniquement parce que l'on va en tirer une conséquence radicalement différente d'une des idées ayant cours dans l'interprétation de COPENHAGUE-GÖTTINGEN.

Il est généralement admis que le  $|\phi\rangle$  préparé à  $t_1$ , ou  $\sigma_1$ , évolue ensuite "naturellement" à la SCHRÖDINGER, ou à la TOMONAGA-SCHWINGER, jusqu'à l'instant  $t_2$ , ou le pseudo-instant  $\sigma_2$ , où la mesure qu'on fait produit le "collapse" de  $|U\phi\rangle$  sur  $|\psi\rangle$ . Mais, logiquement, rien n'empêche de concevoir que le  $|\psi\rangle$  mesuré à  $t_2$ , ou  $\sigma_2$ , a préa-

blement évolué naturellement, à la SCHRÖDINGER, ou à la TOMONAGA-SCHWINGER, depuis l'instant  $t_1$  ou le pseudo instant  $\sigma_1$ , où la préparation faite a produit "l'anticollapse" de  $|U^{-1}\psi\rangle$  sur  $|\phi\rangle$ .

Les deux conceptions sont incompatibles en ce sens que "le système" ne peut pas être au "temps"  $t$  ( $t_1 < t < t_2$ ) à la fois dans l'état  $|U(t_1, t)\phi\rangle$  et dans l'état  $|U^{-1}(t, t_2)\psi\rangle$ . On ne peut pas non plus envisager l'idée que "le système" soit dans une superposition de ces deux états, parce qu'ils ne sont pas orthogonaux.

Par contre, les deux conceptions considérées sont compatibles pourvu qu'on définisse une conception qui les synthétise - tout en s'écartant considérablement de la vue présentement acceptée.

Nous dirons que, entre les pseudo-instants  $\sigma_1$  et  $\sigma_2$ , le système est en train de "transiter" de la préparation  $|\phi\rangle$  à la mesure  $|\psi\rangle$  précédemment mentionnées. Cela signifie qu'il subit l'influence retardée de la préparation  $|\phi\rangle$  et l'influence avancée de la mesure  $|\psi\rangle$ , et qu'il "évolue", son opérateur  $U$  obéissant à l'équation d'évolution de TOMONAGA-SCHWINGER. Ce concept est manifestement PT-invariant, et même CPT-invariant, comme l'est essentiellement la mécanique quantique relativiste. La différence d'avec la conception présentement acceptée est (répétons-le) qu'au cours de cette évolution "le système" n'est pas dans un état, mais en train de transiter d'un état à un autre état. Et ceci est écrit en clair dans les formules de la mécanique quantique (non-relativiste, ou relativiste,) pourvu simplement qu'on les lise de manière T-symétrique, ou CPT-symétrique. Une illustration spatialisée de ce processus a été indiquée dans une précédente publication <sup>(16)</sup>.

Quelle différence testable y a-t-il entre la concep-

tion que je propose et celle présentement acceptée ? A première vue, aucune, puisque ces deux conceptions ne font qu'interpréter différemment les mêmes formules. A seconde vue, cependant, il en va autrement dans les "expériences à décision différée" du type discuté autrefois par C. von WEISZÄCKER<sup>(17)</sup> et récemment par J.A. WHEELER<sup>(12)</sup> -tout au moins lorsque de telles expériences mettent en jeu la corrélation à distance du type EINSTEIN ou EPR<sup>(5)</sup>, comme ce sera le cas des expériences d'ASPECT ou de BUTT<sup>(13)</sup>. Si ces expériences donnent le résultat "paradoxal" de la mécanique quantique elles seront bien difficiles à comprendre suivant le schème usuel, mais expliquées directement suivant le schème que j'ai proposé en 1953<sup>(6)</sup> et à maintes reprises depuis<sup>(9)</sup>. Voilà pourquoi il me semble que ces expériences seront cruciales entre le schème en vigueur et celui que je propose.

Une dernière remarque cependant doit être ajoutée. Une idée toute "académique" a été mise en avant bien souvent à propos de la corrélation EPR, -si souvent que je ne juge pas à propos de citer des références. Cette idée est que la corrélation entre les deux mesures distantes qu'on effectue dans les corrélations EPR pourrait être "télégraphiée directement" entre les deux appareils de mesure, et au besoin de manière "tachyonique". Cette idée me semble tout à fait déraisonnable *a priori*, et, de plus, déjà infirmée expérimentalement. Je m'explique.

Il est déraisonnable en physique d'introduire pour les besoins d'une idée *a priori* des éléments non observés et, à ce titre, métaphysiques. Les tachyons n'ont jamais été observés ; et pourquoi donc vouloir expliquer "*obscurum per obscurius*" ? Par contre, entre les deux mesures distantes L et N il existe certainement une connexion physique : celle formée des deux faisceaux issus de la préparation commune C et mesurés en L et en N. Ce "zigzag de FEYNMAN" est parfaitement réel ; de plus, dans le calcul, c'est effectivement lui qui établit la corrélation.

En second lieu, des expériences réelles<sup>(18)</sup> ont parfaitement vérifié que le lien physique de la corrélation est bien le zigzag de FEYNMAN LCN ou NCL, en ce sens qu'elles ont vérifié l'invariance de la formule de la corrélation par déplacements arbitraires des appareils de mesure le long des deux faisceaux CL et CN. Il serait sans nul doute extrêmement difficile (et artificiel) de chercher à retrouver ce résultat au moyen d'une connexion LN directe.

#### 4. Conclusion

Il me semble donc que les expériences déjà faites de WILSON-LOWE-BUTT et de BRUNO-D'AGOSTINO-MARONI<sup>(18)</sup>, et que les expériences en cours de montage d'ASPECT, et de BUTT<sup>(13)</sup> (sous réserve qu'elles donnent le résultat de la mécanique quantique), confirment (et confirmeront) ma conception CPT-invariante d'une transition en train de se faire depuis une préparation  $|\phi\rangle$  jusqu'à une mesure  $|\psi\rangle$  -une transition subissant à la fois l'influence retardée de la préparation  $|\phi\rangle$  et l'influence avancée de la mesure  $|\psi\rangle$ .

## RÉFÉRENCES

- (1) Dans les *Lettres Epistémologiques* de l'Association Ferdinand GONSETH le "Symposium écrit" *Variables cachées et indéterminisme quantique* dure depuis novembre 1973 et, en novembre 1980, en est à sa 28ème livraison, sans que même deux des nombreux intervenants se soient mis d'accord pour proposer le même "paradigme" ! (Association Ferdinand GONSETH, case postale 1081, CH-2501 BIENNE).
- (2) On considère ici le T-retournement de RACAHA, strictement homologue au P-retournement des axes d'espace, et non le T-renversement de WIGNER. L'opération C se définit alors par  $CPT = 1$ .
- (3) O. COSTA DE BEAUREGARD, *Journal de Physique* 15, 810 (1954) ; 16, 770 (1955) ; 17, 872 (1956).
- (4) O. COSTA DE BEAUREGARD, *Théorie Synthétique de la Relativité Restreinte et des Quanta*, Paris, Gauthier-Villars, 1957 ; *Précis de Mécanique Quantique Relativiste*, Paris, Dunod, 1967.
- (5) A. EINSTEIN in *Rapports et Discussions du 5ème Conseil SOLVAY*, Paris, Gauthier-Villars, 1928, p. 253-256. -A. EINSTEIN, B. PODOLSKY et N. ROSEN, *Phys. Rev.* 47, 777 (1935).
- (6) O. COSTA DE BEAUREGARD, *Comptes Rendus* 236, 1632 (1953) ; *Dialectica* 19, 280 (1955) ; *Rev. Intern. Philos.* 61-62, 1 (1962) ; in *Proc. Intern. Conf. Thermodyn., P.T. Landsberg ed.*, Butterworths, 1970, p. 539.
- (7) J.S. BELL, *Physics* 1, 195 (1965).
- (8) J.F. CLAUSER, M.A. HORNE, A. SHIMONY et R.A. HOLT, *Phys. Rev. Lett.* 23, 880 (1969).
- (9) O. COSTA DE BEAUREGARD, *Found. Phys.* 6, 539 (1976) et 10, 513 (1980) ; *Nuovo Cim.* 42B, 41 (1977) et 51B, 267 (1979) ; *Ann. Fond. Louis de Broglie* 2, 231 (1977) et 3, 105 (1978) ; *Physica* 22, 211 (1980).
- (10) H.P. STAPP, *Nuovo Cim.* 29B, 270 (1975). Dans *Found. Phys.* 7, 313 (1977) STAPP s'écarte de la covariance relativiste.
- (11) W.C. DAVIDON, *Nuovo Cim.* 36B, 34 (1976).
- (12) J.A. WHEELER, in *Math. Found. of Quantum Theory*, J.A. MARLOW ed., Acad. Press, 1977, p. 9.
- (13) A. ASPECT, *Phys. Rev. D* 14, 1944 (1976). B.J. HILEY, communication privée.
- (14) J.M. JAUCH et F. ROHRlich, *The Theory of Photons and Electrons*, Addison-Wesley, Cambridge (Mass) p. 408-410.
- (15) V. WEISSKOPF et E. WIGNER, *Z. Phys.* 63, 54 (1930) et 65, 18 (1930).
- (16) O. COSTA DE BEAUREGARD, *Nuovo Cim.* 42B, 41 (1977) : voir p. 62.
- (17) C. VON WEISZÄCKER, *Z. Phys.* 70, 114 (1931).
- (18) A.R. WILSON, J. LOWE et D.K. BUTT, *J. Phys. G*, 2, 613 (1976) ; M. BRUNO, M. D'AGOSTINO et C. MARONI, *Nuovo Cim.* 40B, 143 (1977).