

PHYSIQUE THÉORIQUE. — *Collapse du  $\Psi$  et covariance relativiste*. Note (\*) de Olivier Costa de Beauregard, présentée par André Lichnerowicz.

Appelons *macrorelativiste* une théorie invariante sous le groupe de Lorentz orthochrone et obéissant au principe de la causalité retardée « de fait », et *microrelativiste* une théorie invariante sous le groupe de Lorentz complet et CPT symétrique. Les corrélations d'Einstein directes (non-séparabilité de mesures issues d'une préparation commune) et inverses (non-séparabilité de préparations conduisant à une mesure commune) sont incompatibles avec la macro-, mais compatibles avec la microrelativité. On *postule* que toute la physique fondamentale est Lorentz et CPT invariante (le passage au macroscopique introduisant une « asymétrie de fait ») et définit en conséquence le concept du *collapse* — et — *retrocollapse*.

We call *macrorelativistic* a theory invariant under the orthochronous Lorentz group and obeying the "factlike" principle of retarded causality, and *microrelativistic* a theory invariant under the full Lorentz group and CPT symmetric. The Einstein correlations either direct (non-separability of measurements issuing from a common preparation) or reversed (non-separability of preparations producing a common measurement) are incompatible with the macro-, but compatible with the microrelativity. We assume that fundamental physics is fully Lorentz and CPT invariant (the transition to macrophysics introducing a "factlike asymmetry") and consequently define the collapse — and — retrocollapse concept.

1. Le principe d'une T-symétrie intrinsèque des phénomènes élémentaires (discuté au XIX<sup>e</sup> siècle par Loschmidt et Zermelo) n'est pas Lorentz-invariant. Si donc on exige à la fois la Lorentz et la T-invariances, on est conduit à la PT invariance. Ici, la phénoménologie des C violations a imposé un élargissement des concepts et (sous des hypothèses plausibles et générales) la CPT invariance [1], qui sera considérée dans cette Note comme la généralisation covariante et physiquement adéquate de la T-invariance des classiques.

Posons donc *en principe* que non seulement la *formalisation*, mais aussi la *conceptualisation* de la physique fondamentale (y compris notamment celle de la *causalité* et celle du *collapse du  $\psi$* ) doivent être *explicitement Lorentz et CPT invariantes*. Le corollaire est évidemment que la *T-asymétrie macroscopique* résulte exclusivement de la *répétition* d'un phénomène élémentaire donné (par exemple, une mesure au niveau quantique) et qu'elle est « de fait et non de droit » [2] (comme l'est par exemple la T-asymétrie thermodynamique).

La traduction technique de la précédente exigence sera que non seulement la *formalisation* mais aussi la *conceptualisation* de la *mécanique quantique relativiste* soient exprimées en termes de *géométrie quadridimensionnelle* (à la Minkowski et à la Feynman). Nous ne nions pas la possibilité d'obtenir « plus simplement » tel ou tel résultat, mais estimons que la *description* perd alors de sa qualité. A. D. Fokker [3] a tout particulièrement illustré une telle exposition des *connexions géométriques spatio-temporelles*. Comme Wheeler et Feynman [4], c'est de lui qu'on se réclame ici.

On a montré [5] que la phénoménologie des corrélations à distance d'Einstein, ou d'Einstein-Podolsky-Rosen [6] soit directes (non-séparabilité de mesures procédant d'une préparation commune ([7], [8]) soit inverses (non-séparabilité de préparations conduisant à une mesure commune [9]) relève directement du schéma fokkerien des zigzags de Feynman. On va expliciter ici l'incidence de la *Lorentz et de la CPT invariance de ce formalisme* sur les *conceptions de base* de la mécanique quantique : *préparation, mesure, collapse du  $\psi$ , causalité*. D'accord avec Eberhard [10], on estime [5] que la description des corrélations d'Einstein [6] selon un schéma à la fois relativiste et quantique entraîne nécessairement le rejet du concept *asymétrique de la causalité classique*.

Convenons d'appeler *macrorelativiste* tout formalisme invariant sous le groupe de Lorentz orthochrone (seulement) et obéissant à l'interdiction de télégraphier dans le passé d'Einstein

(causalité retardée); et *microrelativiste* tout formalisme invariant sous le groupe de Lorentz complet et CPT invariant. Il a été montré que *l'existence des corrélations d'Einstein est incompatible avec la macrorelativité [11] mais compatible avec la microrelativité [5]*.

On va tirer quelques conséquences *fondamentales* de ce fait théorique.

2. CONCEPT CPT SYMÉTRIQUE DU COLLAPSE — ET — RÉTROCOLLAPSE ». — En guise de préambule (et à titre d'exemple) considérons l'expérience pensée du microscope de Heisenberg. Si c'est l'acte de conscience de l'observateur qui collapse le  $\psi$ , ce collapse est donc provoqué au niveau de son œil ou de son cerveau. Mais, comme l'observation fixe la position de l'électron diffuseur dans le plan-objet, il faut alors qu'il y ait « rétrocollapse ».

On va montrer que le formalisme de la *mécanique quantique relativiste* impose la notion du rétrocollapse plus impérativement encore que ne le fait le formalisme non-covariant.

En théorie relativiste de la première quantification [12], l'extension covariante de la mesure de position  $x_0$  d'une particule à l'instant  $t_0$  se définit comme la question « La particule traverse-t-elle tel élément centré sur  $x_0$  d'une hypersurface arbitraire du genre espace  $\sigma$  », et l'on peut ajouter « avec telle polarisation » si son équation d'onde est du type Dirac, ou Petiau-Duffin-Kemmer, etc.  $\mathcal{P}\mathcal{G}\psi=0$ , où  $\mathcal{G}$  note l'opérateur de Klein-Gordon, et  $\mathcal{P}$  le projecteur approprié. La fonction propre covariante généralisant le  $\delta(x-x_0)$  de Dirac est le propagateur de Jordan Pauli  $\mathcal{P}\mathcal{D}(x-x_0)$ , qui est nul dans l'ailleurs, mais non nul dans le futur et le passé de  $x_0$ . Ainsi, le collapse du  $\psi$  sur  $\mathcal{P}\mathcal{D}$  est aussi un rétrocollapse (*par nécessité mathématique*), et notre explication [5] de la corrélation d'Einstein est basée sur ce concept.

En théorie superquantifiée, le concept CPT invariant du *collapse et rétrocollapse* sera défini comme l'actualisation d'un (et un seul) élément  $\langle \Phi_i | \Psi_j \rangle$  de l'amplitude de transition  $\langle \Phi | \Psi \rangle$ . Le produit scalaire  $\langle \Phi | \Psi \rangle$ , symétrique en  $\Phi$  et  $\Psi$ , peut être pensé, ou calculé, asymétriquement, soit en projetant  $|\Phi\rangle$  sur  $|\Psi\rangle$  (collapse) en vue d'une prédiction, soit en projetant  $|\Psi\rangle$  sur  $|\Phi\rangle$  (rétrocollapse) en vue d'une rétrodictioin (aveugle [13]).

En dehors des deux précédents, nous ne connaissons aucun schème permettant un traitement « *manifestement covariant* » des actes de préparation et de mesure quantiques.

3. PROBABILITÉS CONDITIONNELLES. — L'amplitude de transition  $\langle \Phi | \Psi \rangle$  s'entend essentiellement *si* les préparations  $|\Phi_i\rangle$  et *si* les mesures  $|\Psi_j\rangle$  mentionnées *explicitement* sur la formule *sont effectuées*. Cette clause est *indispensable* pour éviter des paradoxes inessentiels, comme ceux considérés en section 6.

4. NON-EXISTENCE D'UN REPÈRE PRIVILÉGIÉ POUR FORMALISER ET CONCEVOIR LES CORRÉLATIONS D'EINSTEIN. — Raisonons pour abréger sur l'exemple de corrélations de polarisation de deux photons  $a$  et  $b$  issus d'une cascade atomique  $C$ , parcourant en sens opposés un axe  $x$  du laboratoire, et préparés dans l'un des deux états possibles de spin 0. La formule de l'amplitude correspondante est bien connue, en termes des polarisations circulaires  $G$  et  $D$ , ou en termes des polarisations linéaires  $Y_a, Y_b$  et  $Z_a, Z_b$  (non nécessairement parallèles entre elles), ou en termes de  $G_a$  et  $D_a, Y_b$  et  $Z_b$ .

Dans le cas des photons, le vecteur séparant les deux instants — points (flous) des mesures  $A$  et  $B$  est du genre espace (il pourrait être du genre temps avec des particules lourdes) en sorte que leur ordre temporel est *relatif* à une transformation de Lorentz portant sur  $x$  et  $t$ , transformation qui laisse invariants les états de polarisation.

*Non seulement les distances relatives  $x_B - x_A$  et  $x_C - x_A$ , mais aussi les vitesses relatives  $v_B - v_A$  et  $v_C - v_A$  le long de  $x$  laissent invariants les états de polarisation, et sont donc arbitraires.*

- [7] S. J. FREEDMAN et J. F. CLAUSER, *Phys. Rev. Lett.*, 28, 1972, p. 938; J. F. CLAUSER, *Phys. Rev. Lett.*, 36, 1976, p. 1223; E. S. FRY et R. L. THOMPSON, *Phys. Rev. Lett.*, 37, 1976, p. 465.
- [8] A. R. WILSON, J. LOWE et D. K. BUTT, *J. Phys. G.*, 2, 1976, p. 613; M. BRUNO, M. d'AGOSTINO et C. MARONI, *Nuovo Cim.*, 40 B, 1977, p. 143.
- [9] R. L. PFLEGOR et L. MANDEL, *Phys. Rev.*, 159, 1967, p. 1084; *J. Opt. Soc. Amer.*, 58, 1968, p. 946.
- [10] P. H. EBERHARD, *Nuovo Cim.* 46 B, 1978, p. 392.
- [11] B. D'ESPAGNAT, *Conceptual Foundations of Quantum Mechanics*, 2<sup>e</sup> éd., Benjamin, 1976, p. 86; J. F. CLAUSER et A. SHIMONY, *Reports on Progress in Physics*, 41, 1978, p. 1881; voir p. 1920.
- [12] O. COSTA DE BEAUREGARD, *Précis de Mécanique quantique relativiste*, Dunod, Paris, 1967.
- [13] S. WATANABE, *Rev. Mod. Phys.*, 27, 1955, p. 26.
- [14] R. PAYEN et J. M. VIGOUREUX, *Lett. Nuovo Cim.*, 20, 1977, p. 263.
- [15] E. P. WIGNER, *Symmetries and Reflexions*, M.I.T. Press, 1967, p. 171-184.

Équipe de Recherches associée au C.N.R.S. n° 533,  
Institut Henri-Poincaré, 11, rue Pierre-et-Marie-Curie, 75231 Paris Cedex 05.