

1979-3

# EINSTEIN

## 1879-1955

Colloque du Centenaire  
Collège de France  
6-9 juin 1979

Organisé par le Ministère de la Culture et de la communication  
avec le concours du CNRS

pp. 263-267  
« Le Paradoxe d'Einstein, Podolsky et Rosen ;  
même introduction au sujet »  
Olivier Costa de Beauregard

EXTRAIT

CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



## LE PARADOXE D'EINSTEIN, PODOLSKY ET ROSEN: BREVE INTRODUCTION AU SUJET

O. Costa de Beauregard

Institut Henri Poincaré  
11 rue Pierre et Marie Curie  
75231 Paris Cedex 05

En 1927, au 5e Conseil Solvay, sur le berceau même de la Nouvelle Mécanique Quantique, Einstein [1] sut discerner un "paradoxe" toujours aprement discuté en 1979. Soit (Fig. 1), disait-il, une onde plane qui tombe sur un écran plan percé d'un petit trou C et porteuse (pour simplifier) d'une seule particule (un photon ou un électron, par exemple). L'onde est diffractée par l'ouverture, et l'on détecte ensuite la particule au moyen d'une plaque photographique hémisphérique de centre C, dont un grain L sera noirci "au hasard". Comment comprendre le mécanisme de la corrélation "bloquant" le noircissement de tout autre grain N de la plaque?

Notons bien qu'il n'y aurait aucun paradoxe si l'on pouvait concevoir que "le dé est jeté" en C. Mais justement, d'après l'interprétation probabiliste de la mécanique quantique énoncée en 1926 par Born [2], c'est en L et/ou N que le dé est jeté. Cette "télégraphie instantanée de l'information" (information entendue au sens technique) est difficile à comprendre; de plus, elle semble contredire le principe relativiste de la vitesse-limite des signaux. Incidemment, comme l'a expliqué plus tard Renninger [3], le

paradoxe peut être présenté sous forme négative: si un grain tel que N n'a pas été noirci après le temps nécessaire pour que la particule ait certainement été absorbée, comment est télégraphiée l'information qu'un autre grain L a été noirci?

Sur cet exemple particulier l'on pourrait à la rigueur arguer que le coup de dé se joue en C: il est possible de calculer à l'ordinateur les lignes de courant du "fluide de probabilité" conduisant univoquement la particule (si elle en suivait une) d'un point de l'ouverture à un point de la plaque. Mais c'est l'ensemble du formalisme quantique qui rend intenable cette position. En dernière analyse, c'est la substitution par Born d'un principe d'addition des amplitudes partielles (ayant son origine dans la théorie classique des ondes) au principe d'addition des probabilités partielles qui oblige à dire que le dé est jeté en L et/ou N et non en C.

Montrons ceci sur l'exemple des récentes expériences [4] qui ont mis en évidence la réalité physique du paradoxe d'Einstein, au moyen de la corrélation des polarisations linéaires de deux photons issus d'une cascade atomique en C. Soit donc (Fig. 2) C un atome typique tombant d'un niveau supérieur sur un niveau inférieur à travers un niveau virtuel intermédiaire en émettant deux photons "corrélés"; de ces paires on sélectionne celles qui parcourent en sens opposés un même axe x'x dans le laboratoire.

En L et N sont placés deux polariseurs linéaires faisant entre eux l'angle ajustable  $\alpha$ , puis deux photomultiplicateurs L' et N' fonctionnant en coïncidence (puisque'il est évidemment essentiel d'associer les deux photons d'une même paire). Rappelons que si un photon tombe sur un polariseur linéaire, de deux choses l'une: ou il passe, répondant ainsi oui (noté 1) à la question "votre polarisation est-elle trouvée parallèle à la direction du polariseur", ou il ne passe pas, répondant ainsi non (noté 0) à cette question, c'est à dire oui à la question posée pour la

direction perpendiculaire à celle du polariseur.

Pour les deux photons de chaque paire il y a donc 4 réponses possibles, notée  $\langle 1,1 \rangle$ ,  $\langle 0,0 \rangle$ ,  $\langle 1,0 \rangle$ ,  $\langle 0,1 \rangle$ . La mécanique quantique énonce qu'il y a deux, et seulement deux, types de cascades possibles; avec le premier type on a

$$(1) \quad \langle 1,1 \rangle = \langle 0,0 \rangle = \frac{1}{2} \cos^2 \alpha, \quad \langle 1,0 \rangle = \langle 0,1 \rangle = \frac{1}{2} \sin^2 \alpha,$$

et avec le second type,

$$(2) \quad \langle 1,1 \rangle = \langle 0,0 \rangle = \frac{1}{2} \sin^2 \alpha, \quad \langle 1,0 \rangle = \langle 0,1 \rangle = \frac{1}{2} \cos^2 \alpha.$$

L'expérience [4] vérifie parfaitement ces énoncés.

Agréables à lire et tout à fait "innocents" à première vue, ils fêlent irrémédiablement le vase où était présenté le bouquet de la vue du monde traditionnelle [5]. Il n'y a aucun doute que si les expériences vérifiant les précédentes formules avaient pu être faites avant 1924, elles auraient provoqué une stupéfaction égale à celle de l'expérience de Michelson. La crise qu'elles ouvrent est comparable à celle de la Relativité en 1905, ou à celle de Copernic en 1543.

Pour le voir crûment, faisons  $\alpha = \pi/2$  dans les formules (1), d'où

$$\langle 1,1 \rangle = \langle 0,0 \rangle = 0, \quad \langle 1,0 \rangle = \langle 0,1 \rangle = \frac{1}{2} :$$

toutes les paires de photons détectées sont trouvées avoir des polarisations linéaires parallèles entre elles (jusqu'ici, "pas de problème") mais de plus parallèles soit à l'un, soit à l'autre des deux polariseurs croisés, quelles que soient leurs directions (orthogonales)! Ce résultat aurait stupéfait le physicien "paléoquantique", qui utilisait l'ancien calcul des probabilités, et qui pensait que les deux photons corrélés quittent la source C en possédant des polarisations (compatibles avec la dynamique du

problème, et initialement cachées). Par exemple, ce pouvaient être (pensait-il) deux polarisations circulaires de même hélicité (le moment angulaire total devant être nul), auquel cas l'on obtiendrait un nombre considérable de réponses (1,1) : exactement,  $1/4$ , quel que soit l'angle  $\alpha$ . Ou bien ç'auraient pu être deux polarisations linéaires parallèles entre elles, mais (à part celà) d'orientation quelconque, auquel cas l'on obtiendrait encore un nombre considérable de réponses (1,1) :  $1/8$  (en prenant la moyenne de toutes les directions possibles). L'hypothèse de polarisations elliptiques aurait conduit (classiquement) aux valeurs comprises entre  $1/4$  et  $1/8$ . En aucun cas l'on ne trouverait la valeur zéro de la nouvelle mécanique quantique, et celle que l'expérience vérifie.

Ceci montre que :

- 1° Les deux photons ne possèdent pas de polarisations en quittant la source C;
- 2° qu'ils en acquièrent une en interagissant avec les appareils de mesure (un leitmotiv de la nouvelle mécanique quantique);
- 3° que néanmoins ces polarisations sont corrélées!

En termes plus littéraires :

- 1° Ce n'est pas en C, lorsqu'on les agite dans le cornet, que les dés sont jetés, mais :
- 2° en L et en N, lorsqu'ils finissent de rouler sur la table, et cependant :
- 3° ils sont corrélés!

A vrai dire, ce sont des quasi-dés l'Alice au Pays des Merveilles, car on ne peut pas les concevoir comme des objets qui seraient séparément dotés de propriétés. C'est là une conséquence de la validité du "calcul ondulatoire des probabilités" défini en 1926 par Born.

\*

Je n'ai pas parlé du théorème de Bell; c'eût été déplacé, puisqu'il est

présent ici.

Mais ce qui précède suffit à montrer la gravité du paradoxe de 1927 d'Einstein, qui est substantiellement le même que le paradoxe E.P.R. [6] de 1935.

J'invite maintenant chacun des huit participants à cette table ronde à exposer, dans l'ordre qui a été tiré au sort, sa manière de présenter le paradoxe, et de le résoudre, si possible!

---

#### BIBLIOGRAPHIE

- [1] A. Einstein, in Rapports et discussions du 5e Conseil Solvay, Gauthier Villars, Paris, 1928, p.253-256.
- [2] M. Born, Zeits.f. Phys. 38, 803 (1926).
- [3] W. Renninger, Physik 158, 417 (1960); Phys. Zeits. 136, 251 (1963).
- [4] S. J. Freedman et J. F. Clauser, Phys. Rev. Lett. 28, 938 (1972); J. F. Clauser, Phys. Rev. Lett. 36, 1223 (1976); E. S. Fry et R.C. Thompson, Phys. Rev. Lett. 37, 465 (1976).
- [5] A. Einstein, B. Podolsky et N. Rosen, Phys. Rev. 47, 777 (1935).

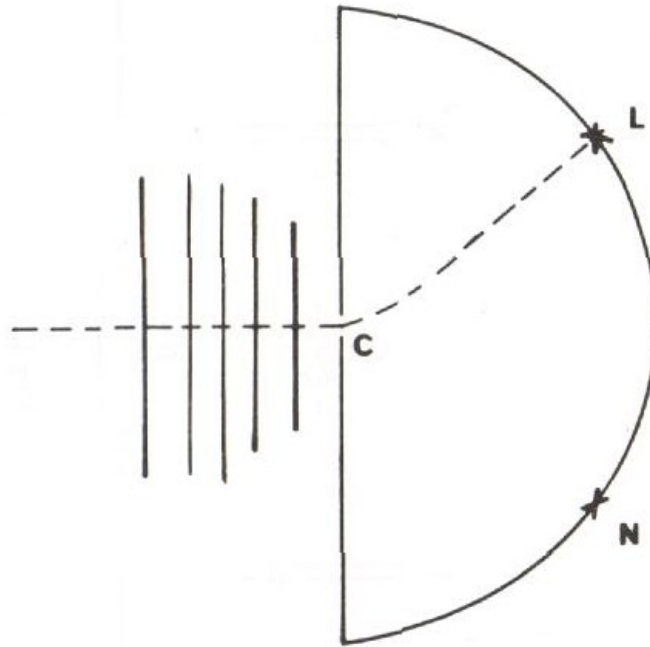


Fig 1

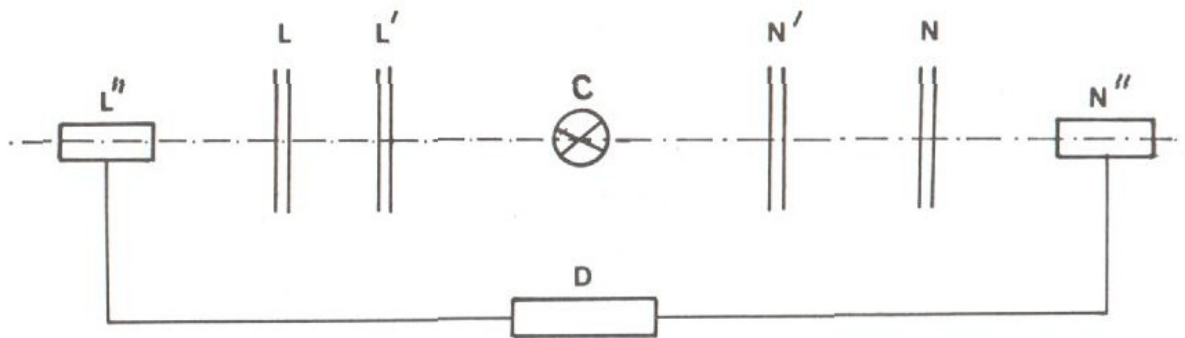


Fig.2