

Sur une interprétation physique des corrélations EPR

DAMIAN CANALS-FRAU

22 rue d'Athènes, F-75009 Paris

RESUME. Dans un article très général sur les inégalités de BELL paru aux Annales de la Fondation Louis de Broglie en 1982, l'auteur a mis en évidence les éléments nécessaires pour comprendre physiquement les corrélations EPR. L'objet du présent travail est de reprendre ces éléments pour construire un "modèle" physique qui montre clairement le mécanisme auquel obéissent ces corrélations. Cette interprétation des faits physiques est basée sur l'hypothèse que les polarisations des deux photons émis en cascade –bien que spatialement séparés à un moment donné– sont cohérentes et en phase en polarisation. Les conclusions sont en accord avec les expériences faites et avec la mécanique quantique et forcément en désaccord avec les conclusions de BELL.

ABSTRACT. In an article about BELL's inequalities published in 1982 in Annales de la Fondation Louis de Broglie, the author displayed also the necessary elements to understand physically EPR's correlations. The object of the present article is to build a physical model showing clearly the mechanism which these correlations are submitted to. This interpretation of physical facts is based on the following hypothesis : the polarisations of the two photons emitted in an atomic cascade –though spatially separated– are coherent and in phase in polarisation. Our conclusions are in accordance with the experiments carried out and with quantum mechanics, and necessarily in discordance with BELL's conclusions.

Introduction

Dans les années 20, pendant la gestation de ce qui allait devenir la mécanique quantique, EINSTEIN a soulevé des objections à l'encontre

de cette nouvelle façon de voir la physique du tout petit. Ces objections ont été formalisées dans un article, devenu fameux depuis, d'EINSTEIN, PODOLSKY et ROSEN [1] (EPR), où ils arrivent à la conclusion que la mécanique quantique est incomplète. La même année, dans la même revue et sous le même titre, BOHR [2] publie une réponse qui défend la mécanique quantique, nouvelle à l'époque. Malheureusement, sa démonstration n'est pas tout à fait limpide. On peut résumer librement son point de vue en disant que la mécanique quantique est complète puisqu'elle contient tout ce que les physiciens savent sur la nature physique, et que le point de vue d'EPR, par contre, contient une dose de métaphysique. En conséquence de quoi leur point de vue n'est pas opposable à la physique [3][4].

Pendant presque 30 ans BOHR a eu pratiquement le dernier mot. En 1964, BELL [5] prétend qu'on peut déterminer expérimentalement laquelle des conceptions a droit de cité en physique : il propose de mesurer les corrélations entre les orientations des spins des électrons en l'état singulet. Il développe un raisonnement mathématique qui aboutit aux "inégalités de BELL". La violation de ces inégalités donnerait raison à la mécanique quantique, leur satisfaction confirmerait le point de vue d'EPR.

Le raisonnement de BELL a aussi été appliqué aux corrélations des polarisations des deux photons γ de la désintégration du positonium [6], et aux corrélations des polarisations de deux photons émis dans une cascade atomique [7].

Les expériences [8] ont donné raison à la mécanique quantique.

Le point de vue d'EPR contenant une dose de métaphysique, il est évident que les expériences ne pouvaient qu'être favorables à la violation des inégalités. C'est-à-dire, soit dans la déduction des inégalités, soit dans les hypothèses de départ du raisonnement de BELL, il a dû s'y glisser au moins une contrevérité physique. La déduction mathématique étant transparente, il ne reste que les hypothèses de départ.

En effet, tout en considérant deux électrons dans l'état singulet, BELL affirme qu'on peut parler séparément de chaque électron [9]. Ce qui revient à dire qu'ils sont indépendants. Ce qui est encore équivalent à dire que les électrons ne sont pas dans l'état singulet. Il y a donc contradiction entre les expériences faites avec des électrons en l'état singulet et les vraies hypothèses de départ utilisées dans les calculs de BELL. Évidemment, on a la même contradiction quand on traite les polarisations des photons émis dans une cascade radiative comme étant indépendantes.

En plus, les physiciens décrivent couramment les polarisations des photons et les orientations des spins des électrons à partir de fonctions d'onde qui, en principe, ont des amplitudes et des phases. Mais, les quantités intervenant dans les calculs de BELL sont des quantités qui, d'une façon ou d'une autre, sont proportionnelles au module carré de la fonction d'onde [10]. Alors, la façon dont BELL a posé les conditions initiales de son traitement mathématique ne lui permet de tenir compte ni des effets dus aux amplitudes, ni des effets dus aux phases [11]. Par contre, les expériences faites ne s'opposent en rien à l'existence d'effets dus aux amplitudes et aux phases, autant à la source que lors de l'interaction avec les polariseurs ou les Stern-Gerlach.

Vu que la description des polarisations des photons (ou les orientations des spins des électrons) dépend des amplitudes et des phases de la fonction d'onde, le traitement du problème par BELL n'avait aucune chance de réussir. Et pour peu que les corrélations entre les polarisations des photons émis en cascade (ou entre les orientations des spins des électrons en l'état singulet) dépendent, elles aussi, des amplitudes ou des phases des fonctions d'onde, les conclusions de BELL ne pouvaient nullement être en accord avec les faits.

Poser un problème en les termes corrects et adéquats c'est pratiquement l'avoir résolu, disait mon maître.

Beaucoup d'autres arguments valables ont été opposés aux conclusions de BELL [12][13].

Autant les conséquences tirées par BELL ("... ainsi nous ne pouvons pas écarter l'intervention sur un des côtés comme influence causale sur l'autre" [9]), que le concept très peu physique de "non-séparabilité" [14] sont la suite logique des paralogismes ici dénoncés et déjà traités ailleurs.

La nouvelle interprétation

Signaler les paralogismes de la démarche de BELL c'est bien, proposer un "mécanisme" permettant d'expliquer les résultats expérimentaux obtenus c'est encore mieux.

Pour le cas des spins des électrons en l'état singulet, j'ai déjà suggéré une explication des corrélations observées [15]. Explication, qui n'épuise pas totalement le problème puisqu'elle le ramène partiellement au phénomène inexplicé de la quantification spatiale. Cette suggestion est la suivante : les corrélations observées sont la conséquence de la

conservation du spin global (cause commune à la source) et de la quantification spatiale (interaction avec le champ magnétique de l'appareil de mesure).

Maintenant je propose de présenter une interprétation simple du comportement apparemment étrange des photons émis dans une cascade radiative. Cette interprétation a l'avantage supplémentaire d'infirmer celle proposée par BELL [5][9] et devenue en quelques années l'"orthodoxie ambiante". Bien que cette dernière soit basée, entre autres erreurs [13], sur celle physique et logique de traiter, en réalité, les électrons en l'état singulet (ou les photons émis en cascade) comme étant indépendants. La démarche qui conduit à notre interprétation se trouvait déjà dans un article des Annales de la Fondation Louis de Broglie de 1982 [10], page 229.

Ces corrélations se présentent expérimentalement ainsi : une source émet un photon dans une direction $(+z)$ et un autre dans la direction opposée $(-z)$. Chaque paire de photons est issue d'un même atome par émission en cascade avec conservation du moment angulaire $J = 0 \rightarrow 1 \rightarrow 0$. De chaque côté de la source, sur l'axe $\pm z$, il y a un filtre qui laisse passer une seule fréquence, un polariseur linéaire et un détecteur de photons. On enregistre les coïncidences dans l'arrivée des photons.

La mécanique quantique nous dit que, si N est le nombre moyen de coïncidences par unité de temps en absence de polariseurs, on doit observer $(N/2) \cos^2 \alpha$ coïncidences en moyenne, quand les polariseurs sont en place et leurs directions de passage forment un angle α entre elles. Les résultats des expériences coïncident avec la prédiction de la mécanique quantique [8].

L'hypothèse de base de notre modèle est la suivante : les deux photons émis en cascade sont circulairement polarisés –gauche $|G\rangle$ ou droite $|D\rangle$ – et malgré leurs directions de propagation opposées et leur décalage dans le temps, ils forment un seul état de polarisation : ils sont cohérents, ou mieux, "en phase" en polarisation.

Les polarisations, comme le spin, sont indépendantes de l'énergie ; donc le fait que les fréquences des deux photons soient différentes, n'est pas un obstacle. Quant au décalage dans le temps –de l'ordre de $5ns$ entre l'un et l'autre photon– il ne joue aucun rôle puisque d'après notre hypothèse les photons sont "en phase quant à leurs polarisations". C'est-à-dire, ces polarisations forment un seul état de polarisation, bien que spatialement séparées. Elles sont donc définies par rapport à un même axe, perpendiculaire à la droite $\pm z$ de propagation.

Par contre, si les photons n'étaient pas issus en cascade d'un même atome avec conservation du moment angulaire, les polarisations seraient aléatoires l'une par rapport à l'autre.¹

Dans un langage classique on dirait que les deux trains d'ondes, qui se propagent dans des directions opposées, sont cohérents et en phase en polarisation. Evidemment, ils conserveront cette cohérence tout le temps que rien n'agit sur eux, même si une grande distance les sépare à un moment donné. En d'autres mots, chaque train d'ondes conserve "en mémoire" sa direction originelle de définition, c'est-à-dire, la direction par rapport à laquelle sa phase est zéro, direction qui est commune aux deux.

Alors, quand ces deux photons –cohérents en polarisation et qui forment un même état de polarisation– arrivent à des polariseurs linéaires parallèles (chacun à son polariseur), il n'y a pas de différence de phase en polarisation entre eux. Et chacun aura, face à son polariseur, le même comportement que l'autre face au sien. La probabilité que les deux passent, chacun par son polariseur, est donc de $1/2$, puisque nous avons un état de polarisation unique et deux polariseurs linéaires parallèles.

Tournons d'un angle α l'un des polariseurs par rapport à l'autre. Cela est équivalent à introduire un "retard" ou une "avance" en polarisation. En arrivant à son polariseur, un des photons se trouve maintenant déphasé de α en polarisation. La probabilité que les deux photons passent chacun par son polariseur est maintenant diminuée d'un facteur $\cos^2 \alpha$ supplémentaire, puisque notre état de polarisation unique doit se "composer" avec deux directions de polarisation, dont l'une est tournée de α par rapport à l'autre.

Tout cela est clairement suggéré par les formules développées plus loin.

A toutes fins utiles je voudrais rappeler une propriété des polarisations circulaires [16]. Apparemment, les polarisations circulaires gauche $|G\rangle$ ou droite $|D\rangle$, sont indépendantes de toute référence à des systèmes de coordonnées x, y, z , c'est-à-dire, indépendantes d'une direction privilégiée. Mais en réalité, elles gardent "en mémoire" leurs

¹ Dans ces conditions on n'observerait pas les corrélations qu'on observe. Mais dans le cas de l'expérience qui sert de base à notre interprétation, expérience réalisée par ASPECT [8] (voir aussi [6] et [7]), et où les polarisations des deux photons émis en cascade ne sont pas aléatoires l'une par rapport à l'autre, aucune référence à des inégalités du type BELL n'est possible.

directions originelles de définition : il suffit de composer $|G\rangle$ et $|D\rangle$ pour voir réapparaître x, y . Voilà pourquoi dans notre cas, quand l'état de polarisation des deux photons interagit avec chaque polariseur leur direction originelle commune de référence réapparaît et dicte le résultat.

Le fait qu'il y ait une direction privilégiée dissimulée dans les polarisations circulaires pourrait être interprété, par les défenseurs des théories à variable cachées [17], comme preuve de l'existence de telles variables. En fait, notre interprétation qui s'appuie effectivement sur cette direction privilégiée conservée dans chaque polarisation circulaire, ne fait que renvoyer à la source l'aspect aléatoire du problème. Mais avec la restriction importante déjà signalée par ailleurs, que ce sont les différentes paires de photons qui, dans notre cas, sont aléatoires entre elles.

Pour compléter ce travail appliquons à notre situation, pas à pas, les règles de calcul de la mécanique quantique, ce qui fait "sauter aux yeux" la genèse de notre interprétation.

Soit les axes de coordonnées x, y, z . L'étude de la source qui émet les photons permet d'écrire l'état de polarisation des deux photons émis en cascade [7] (voir l'Annexe) :

$$\begin{aligned} |2 \text{ photons} \rangle &= (1/\sqrt{2})[|D_A\rangle |D_B\rangle + |G_A\rangle |G_B\rangle] \\ &= (1/\sqrt{2})[|x_A\rangle |x_B\rangle + |y_A\rangle |y_B\rangle] \end{aligned}$$

où $|x_A\rangle$, $|D_A\rangle$ et $|G_A\rangle$ sont, respectivement, les états de polarisation du photon A d'après l'axe x , la circulaire droite et gauche.

Les polariseurs A et B sont définis par rapport à l'axe x par les angles ϕ^A et ϕ^B , donc leurs "états" de polarisation sont

$$\begin{aligned} |\phi^A\rangle &= \cos \phi^A |x_A\rangle + \sin \phi^A |y_A\rangle \quad , \\ |\phi^B\rangle &= \cos \phi^B |x_B\rangle + \sin \phi^B |y_B\rangle. \end{aligned}$$

C'est-à-dire, un photon qui a traversé son filtre et son polariseur est polarisé dans la direction définie par l'angle ϕ correspondant.

La probabilité que l'état de polarisation des "2 photons" soit aussi l'état de polarisation du polariseur B , est le module carré de l'amplitude

$$|U^A\rangle = \langle \phi^B | 2 \text{ photons} \rangle = (1/\sqrt{2})[\cos \phi^B |x_A\rangle + \sin \phi^B |y_A\rangle].$$

Si $\alpha = \phi^B - \phi^A$, on trouve

$$|U^A\rangle = (1/\sqrt{2})[\cos \alpha | \phi^A \rangle + \sin \alpha | \phi^A + (\pi/2) \rangle],$$

où la parenthèse est l'état de polarisation du polariseur B , exprimé en fonction de l'état de polarisation du polariseur A . Avant même que le photon A interagisse avec le polariseur A , l'état de polarisation de ce qui reste des "2 photons" se trouve être l'état de polarisation défini par le polariseur B , et cela avec la probabilité $|\langle U^A \rangle|^2 = 1/2$. Ce qui montre que l'état de polarisation des "2 photons" se comporte comme un seul état de polarisation, indépendamment des distances qui peuvent séparer la source des polariseurs A et B .

La probabilité que l'état de polarisation des "2 photons" soit aussi l'état de polarisation du polariseur B , et en même temps aussi l'état de polarisation du polariseur A (tourné d'un angle α par rapport au B) est le module carré de l'amplitude

$$\langle \phi^A | U^A \rangle = (1/\sqrt{2}) \cos \alpha \quad , \text{ soit } \quad |\langle \phi^A | U^A \rangle|^2 = (1/2) \cos^2 \alpha.$$

Vu les indications données par les équations qui décrivent correctement les faits expérimentaux, j'ai suggéré l'interprétation ici proposée : les polarisations individuelles des "2 photons" sont "cohérentes" et "en phase" en polarisation.

Il s'avère alors que notre seule hypothèse –les deux photons émis en cascade avec conservation du moment angulaire sont "cohérents et en phase en polarisation"– nous a conduit au résultat trouvé expérimentalement et prédit par la mécanique quantique. Il faut donc admettre que notre interprétation décrit correctement les faits.

Il est évident que mutatis mutandis, l'interprétation s'applique aussi aux corrélations des deux photons γ de la désintégration du positonium.

Le lecteur remarquera que dans tous les cas il y a toujours une "cause commune à la source" et une "interaction avec l'instrument de mesure".

On peut encore ajouter qu'à la lumière de notre description des corrélations EPR, le concept très peu physique de "non-séparabilité" [14], se trouve maintenant totalement hors de question, de même que les spéculations philosophiques autour de ce thème.

Pour finir, je voudrais attirer l'attention de ceux des lecteurs qui, partisans des théories à variables cachées, pourraient être tentés de raisonner de la façon suivante : 1) L'interprétation des corrélations EPR proposée par CANALS-FRAU pourrait être considérée comme entrant dans cette catégorie de théories : les polarisations varieraient alors

d'une émission à l'autre. 2) Il a été démontré de manière générale que de tels modèles à variables cachées conduisent toujours à des résultats en accord avec les inégalités de BELL. Ils sont alors en contradiction et avec les prédictions de la mécanique quantique et avec les résultats expérimentaux.

Ces lecteurs concluraient alors que mon interprétation est fautive puisqu'elle ne peut pas rendre compte des faits.

A ceux des lecteurs qui seraient tentés par ce raisonnement, je leur dirai : Il est évident à la lecture de mon travail, que le point no. 1 n'est pas, en fait, exact, puisque j'insiste à plusieurs reprises : les polarisations *ne varient pas d'une émission à l'autre*, car, dû au fait que les photons sont émis en cascade, leurs polarisations ne sont pas indépendantes. Elles sont cohérentes et en phase en polarisation. (Cela est d'ailleurs une des contributions originales de mon travail).

En ce qui se réfère au point numéro 2 du raisonnement sus-dit, il est évident aussi que pour mon interprétation des corrélations EPR, je n'ai nullement besoin de prendre position pour ou contre l'*hypothèse* de l'existence de variables cachées. Cela est un autre problème. Mais, s'il devait y avoir des variables cachées, je pense qu'elles devraient :

- a) affecter les phases ou les amplitudes des photons,
- b) ne pas être indépendantes l'une de l'autre, pour pouvoir déterminer les polarisations des photons émis en cascade et donner alors des résultats en accord avec les expériences et avec la mécanique quantique.

Annexe

La formule qui représente l'état de polarisation des deux photons est due à CLAUSER [7]. Les grandes lignes de sa déduction sont les suivantes.

Soit les axes de coordonnées x, y, z . La source est placée à son origine, le filtre B (qui ne laisse passer que la fréquence ν_B) le polariseur B et le détecteur B sont placés sur l'axe $-z$; le filtre A (qui ne laisse passer que la fréquence ν_A), le polariseur A et le détecteur A , sur $+z$.

L'étude de la source qui émet les photons en cascade (par ex., un atome de Ca) permet de décrire l'état de polarisation des deux photons.

On commence par écrire l'état de polarisation le plus général :

$$\begin{aligned} |2 \text{ photons}\rangle = & a |D_A, +\rangle |G_B, +\rangle + b |G_A, +\rangle |D_B, +\rangle \\ & + c |D_A, -\rangle |G_B, -\rangle + d |G_A, -\rangle |D_B, -\rangle \\ & + e |D_A, +\rangle |D_B, -\rangle + f |G_A, +\rangle |G_B, -\rangle \\ & + g |D_A, -\rangle |D_B, +\rangle + h |G_A, -\rangle |G_B, +\rangle, \end{aligned}$$

où le vecteur *ket* $|D_A, +\rangle$ désigne l'état de polarisation circulaire droite ($G =$ gauche) du photon A qui se déplace dans la direction $+z$, etc.

Nous savons que les états atomiques initial ($4p^2\ ^1S_0$) et final ($4s^2\ ^1S_0$) de la transition ont un moment angulaire zéro et la même parité ; ils sont symétriques par rapport à une rotation de 180° autour de l'axe y . Donc, l'ensemble des deux photons émis doit avoir aussi un moment angulaire zéro, une parité paire et la même symétrie. Cet argument permet de remplacer les 4 coefficients a, b, c et d par un seul, de même que e, f, g et h par un autre. D'autre part, le filtre placé sur $+z$ laisse passer seulement les photons de fréquence ν_A , celui placé sur $-z$ ne laissant passer que ceux de fréquence ν_B . Cela réduit l'équation à deux termes seulement qui, convenablement normalisés, constituent notre formule de départ : après le passage par les filtres, l'état de polarisation des deux photons est

$$|2 \text{ photons}\rangle = (1/\sqrt{2})[|D_A\rangle |D_B\rangle + |G_A\rangle |G_B\rangle].$$

COSTA DE BEAUREGARD [11] a écrit cette même formule dans un autre contexte.

Références

- [1] A. Einstein, B. Podolsky, N. Rosen, Phys. Rev., **47**, 777 (1935).
- [2] N. Bohr, Phys. Rev., **48**, 696 (1935).
- [3] Voir aussi les différents points de vue dans *A. Einstein : Philosopher-Scientist*, P.A. Schilp éditeur, Tudor Publ. Comp. New York, 1945.
- [4] D. Canals-Frau, Ann. Fond. L. de Broglie, **10**, 133 (1985).
- [5] J.S. Bell, Physics, **1**, 195 (1964).
- [6] L. Kasday, *Fondamenti di meccanica quantistica*, cours 49 de l'école Enrico Fermi. Academic Press 1971.
- [7] J.F. Clauser, Phys. Rev. A, **6**, 49 (1972).
- [8] Voir les très belles expériences décrites dans la thèse d'A. Aspect (soutenue le 1er Février 1983 à l'Institut d'Optique, Centre d'Orsay, Université de Paris-Sud) où le lecteur trouvera une bibliographie complète.

- [9] J.S. Bell, J. de Phys., Colloques C-2, **42**, 940 (1981).
- [10] D. Canals-Frau, Ann. Fond. L. de Broglie, **7**, 217 (1982). (La 9^{ème} ligne de la page 230 de cet article doit être lue : “polariseur B , tourné d’un angle α par rapport au A ”. En regardant la formule qui précède cette ligne, le lecteur aura rectifié de lui-même).
- [11] Voir O. Costa de Beauregard, Nuovo Cimento, **42** B, 41 (1977), qui exprime la même chose d’une autre façon.
- [12] G. Lochak, Found. Phys., **6**, 173 (1976) ; Revue de Métaphysique et de Morale, **88**, no. 1, 85 (1983), no. 3, 400 (1985) ; et diverses livraisons des Lettres Epistémologiques (Institut de la Méthode, Bienne, Suisse). V.F. Weiskopf, Scientific American, May 1980, p. 8.
- [13] D. Canals-Frau, Lettres Epistémologiques, **34**, 1 (1983) ; Ann. Fond. L. de Broglie, **10**, 141 (1985), **11**, 301 (1986).
- [14] B. d’Espagnat, *Une incertaine réalité*, Gauthier-Villars-Bordas, Paris 1985.
- [15] D. Canals-Frau, Ann. Fond. L. de Broglie, **11**, 301 (1986), p. 306.
- [16] Feynman-Leighton-Sands, *The Feynman Lectures on Physics*, III, Addison-Wesley, Reading 1965, p. 11-11.
- [17] C. Cormier-Delanoue, Ann. Fond. L. de Broglie, **9**, 143 (1984).

(Manuscrit reçu le 25 novembre 1987)