

## Une explication relativiste pour les expériences dites à un seul photon

JEAN PERDIJON

Le Rosat, 38330 Saint-Ismier

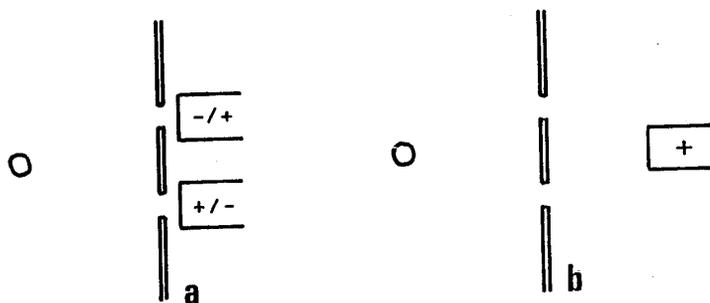
RESUME. On considère pour simplifier une expérience à un seul photon réalisée avec un interféromètre d'Young : une nette anticorrélation est observée entre les deux photomultiplicateurs, en face de chaque fente, alors qu'une interférence est observée sur un écran, derrière les deux fentes. On propose une nouvelle forme du principe de complémentarité, dans laquelle on suppose que la lumière présente alternativement des propriétés ondulatoires et corpusculaires, mais que la succession des deux états possédant ces propriétés est si rapide que nos mesures, qui ne fournissent que des valeurs moyennes, sont seulement capables d'enregistrer un état ou l'autre, suivant le dispositif qui est utilisé. L'état "onde" correspondrait à un faisceau large mais peu dense, qui aurait une forte probabilité de passer par les deux fentes et de produire une interférence. Alors que l'état "corpuscule" correspondrait à un pinceau très étroit qui, lorsque par chance il passe par une fente, aurait une densité suffisante pour déclencher le photomultiplicateur situé en face. Or un tel rayonnement à géométrie variable est précisément celui qui est produit par un électron qui est accéléré jusqu'à une vitesse relativiste, avant d'être brutalement freiné.

*ABSTRACT. A single-photon experiment with a Young interferometer is considered : a strong anticorrelation is observed between both photomultipliers, in front of each slit, whereas an interference is observed on a screen behind both slits. A new form of the complementarity principle is proposed, in which it is supposed that light exhibits wave and particle properties alternatively, but that the succession of both states having these properties is so quick that our measurements, which yield mean values, are only able to record one state or the other, according to the device which is used. The state "wave" would correspond to a wide beam with a weak power per unit solid angle, which would have a strong probability to go through both*

*slits and produce an interference. And the state “particle” would correspond to a very narrow pencil which, when by chance it goes through one slit, would have a power strong enough to be detected by the facing photomultiplier. Such a beam with a variable geometry is just that which is radiated by an electron which is accelerated to an ultrarelativistic speed, before being stopped.*

Lors d’une première étude [1], nous avons proposé une explication entièrement classique –et plus précisément relativiste– des propriétés ondulatoires de la matière. Pour être complet, il faut rendre compte également des propriétés corpusculaires de la lumière. Notre première étude [1] donnait aussi une explication entièrement classique (relativiste) de l’effet photoélectrique, et on sait qu’il est possible d’expliquer l’effet Compton à partir de l’effet Doppler [2]. Cependant les expériences qui montrent de la façon la plus frappante la dualité onde-corpuscule, en ce qui concerne la lumière, sont celles qu’on appelle “expériences à un seul photon” [3] ; nous allons considérer plus particulièrement celle réalisée par Grangier et al. [4] et voir s’il n’est pas possible de lui trouver aussi une explication entièrement classique.

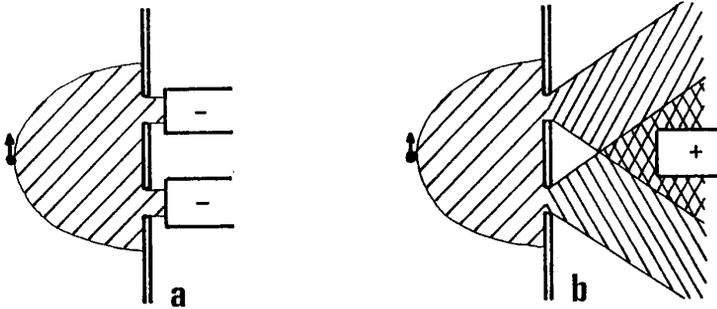
Dans cette expérience [4], une source à cascade est utilisée : le premier photon déclenche l’activation des photomultiplicateurs, qui sont disposés de façon à détecter la présence du second photon. Dans une première série d’expériences (série *a*), une lame semi-transparente divise le faisceau en deux parties, qui tombent chacune sur un photomultiplicateur : on observe une nette anti-corrélation entre les comptages des deux photomultiplicateurs, ce qui prouve l’aspect corpusculaire de la lumière. Dans une seconde série où le dispositif n’est que très légèrement modifié (série *b*), la simple lame est complétée de façon à constituer un interféromètre et des franges sont observées avec une excellente visibilité à l’aide d’un photomultiplicateur, ce qui prouve l’aspect ondulatoire de la même lumière. Le principe et le résultat de ces belles expériences peuvent être schématisés par les figures 1*a* et 1*b* où, pour plus de simplicité, on a remplacé la lame séparatrice et l’interféromètre de Mach-Zehnder par des fentes d’Young ; il faut bien noter que les résultats correspondent à des valeurs moyennes obtenues après l’émission d’un grand nombre de photons.



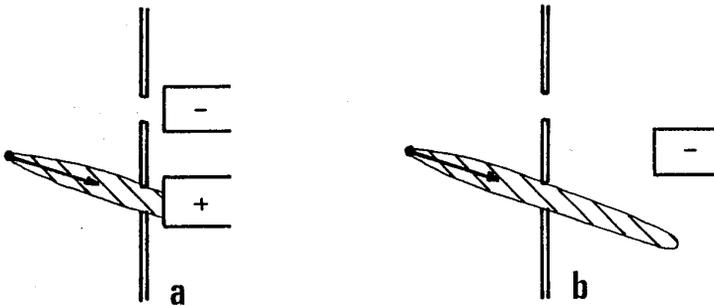
**Figure 1.** Principe et résultats d'expériences du type de celles réalisées par Grangier et al. [4] : a) anti-corrélation entre les deux branches du séparateur, b) interférences dans l'interféromètre ( - : pas de comptage, + : comptage).

Des explications ondulatoires de ces résultats ont déjà été fournies par Marshall et Santos [5,6] et par Surdin [7] ; elles ne sont cependant pas entièrement classiques puisqu'elles supposent l'existence d'un champ de zéro. Nous allons rechercher s'il existe une autre solution, également ondulatoire, mais qui aurait l'avantage de rester entièrement classique : modifiant le principe de complémentarité, nous supposons que la lumière présente alternativement les propriétés "onde" et "corpuscule", mais qu'elle passe de l'état possédant la première propriété à celui possédant la seconde avec une rapidité telle que nos compteurs, qui ne permettent d'obtenir que des valeurs moyennes portant sur un grand nombre d'évènements pendant une durée de l'ordre de la seconde, ne peuvent pas suivre ces variations d'état et ne sont capables que d'enregistrer l'un ou l'autre état, suivant le dispositif de mesure utilisé. L'état "onde" correspond à ce qu'on appelle aussi "onde vide", l'état "corpuscule" à ce qu'on appelle "photon" ou bien "singularité". Puisque nous adoptons une description ondulatoire, nous pouvons caractériser chacun de ces états, d'une part par l'angle d'ouverture du faisceau émis et d'autre part par la densité maximale d'énergie émise par unité d'angle solide. Pour que la succession très rapide de ces états produise, par intégration des comptages, les résultats des expériences *a* et *b* de la figure 1, il faut que : (1) dans son état "onde", la lumière du second photon soit émise avec une large ouverture, donc une faible densité ; ainsi le faisceau a une forte probabilité pour traverser à la fois les deux fentes et provoquer les interférences de la série *b* (fig. 2*b*), mais la densité est trop faible pour déclencher les photomultiplicateurs des comptages de la série *a* (fig. 2*a*) ;

(2) dans son état "corpuscule", cette même lumière soit émise avec une très faible ouverture, donc une très forte densité (Nadelstrahlung) ; ainsi le pinceau a une très faible probabilité pour traverser à la fois les deux fentes et provoquer les interférences de la série *b* (fig. 3*b*), mais la probabilité est un peu plus grande pour qu'il traverse au moins l'une des fentes et sa densité est alors suffisante pour déclencher le seul photomultiplicateur qu'il trouve en face de lui lors des comptages de la série *a* (fig. 3*a*).



**Figure 2.** Effet d'un faisceau large et peu dense sur les montages de la figure 1 : a) avec le séparateur, b) avec l'interféromètre (– : pas de comptage, + : comptage).



**Figure 3.** Effet d'un pinceau étroit et très dense sur les montages de la figure 1 : a) avec le séparateur, b) avec l'interféromètre (– : pas de comptage, + : comptage).

Une telle description explique clairement aussi bien l'anti-corrélation observée dans la série *a* que les interférences observées dans la série *b*. Elle implique cependant quelques présuppositions que nous allons brièvement discuter. Tout d'abord en ce qui concerne l'état "onde" : (1)

un faisceau de trop faible densité ne peut déclencher un photomultiplicateur ; ceci est en accord avec notre explication de l'effet photoélectrique [1] où nous avons montré que, si l'énergie lumineuse pouvait être fournie en quantité aussi faible qu'on le veut, par contre seule une quantité suffisante, correspondant à l'énergie d'un photon, pouvait être absorbée par un électron et ainsi déclencher le photomultiplicateur ; (2) par contre le phénomène stationnaire, que constituent les interférences créées à partir de ce même faisceau, peut être enregistré par le même photomultiplicateur, car le temps de cohérence n'intervient plus. En ce qui concerne l'état "corpuscule" : (3) lorsque le faisceau est de très faible ouverture, la probabilité de division en deux de ce faisceau par le séparateur est très faible, ce qui est évident quand c'est le front d'onde qui est divisé mais l'est moins quand c'est l'amplitude ; on peut cependant remarquer que la couche semi-transparente d'une lame séparatrice est très hétérogène à l'échelle microscopique ; (4) lorsque ce même pinceau passe par l'une des fentes au cours des expériences de la série *b*, la visibilité des franges n'est pratiquement pas altérée, ce qui est normal car la probabilité d'un tel passage est faible, comparée à celle du passage par les deux fentes d'un faisceau large.

Il reste encore à trouver le phénomène qui peut produire un tel rayonnement à "géométrie variable". Puisque, dans la théorie classique, la principale source de rayonnement électromagnétique est constituée par l'accélération d'une charge, nous allons considérer un électron qui est accéléré. Tant que sa vitesse est bien inférieure à celle de la lumière, il émet selon deux lobes de large ouverture, situés symétriquement de part et d'autre de sa trajectoire ; par contre, lorsque son mouvement devient relativiste, l'ouverture des lobes diminue considérablement pour former, comme dans le cas du rayonnement synchrotron, deux pinceaux qui sont pratiquement orientés suivant le vecteur vitesse [8]. La succession état "onde"-état "corpuscule" peut donc être facilement obtenue en considérant un électron qui est progressivement accéléré jusqu'à une vitesse proche de celle de la lumière, avant d'être brutalement freiné. Et les sources utilisées dans les expériences à un seul photon peuvent être considérées comme étant constituées d'un grand nombre d'électrons qui sont ainsi excités, de façon aléatoire. Dans cette perspective, l'aspect corpusculaire de la lumière apparaît comme une simple conséquence de la relativité. On voit aussi que notre hypothèse pourrait être testée en essayant de réaliser des expériences à un seul photon avec une source de rayonnement à "géométrie fixe": faisceau toujours large (basse fréquence) ou pinceau toujours étroit (synchrotron).

C'est en 1952 que Einstein affirma [9] : "Nous sommes encore loin de posséder une théorie rationnelle de la lumière et de la matière qui soit en accord avec les faits ! Je pense que seule une spéculation hardie est à même de nous faire progresser, et non pas une accumulation d'expériences. Du matériel empirique incompréhensible, nous en avons plus qu'il n'en faut."

## Références

- [1] J. Perdijon, *Ann. Fond. Louis de Broglie* **11** (1986) 313.
- [2] R. Kidd, J. Ardini et A. Anton, *Am. J. Phys.* **53** (1985) 641.
- [3] F.M. Pipkin, *Adv. At. Mol. Phys.* **14** (1978) 281.
- [4] P. Grangier, G. Roger et A. Aspect, *Europhys. Lett.* **1** (1986) 173.
- [5] T. Marshall et E. Santos, *Proc. 2nd Int. Symp. Foundations of Quantum Mechanics* (Tokyo, 1986), p. 66.
- [6] T. Marshall et E. Santos, *Europhys. Lett.* **3** (1987) 293.
- [7] M. Surdin, *Ann. Fond. Louis de Broglie* **11** (1986) 319.
- [8] J.D. Jackson, *Classical Electrodynamics*, Wiley (New York, 1963), chap. 14.
- [9] A. Einstein, *Correspondance avec Michele Besso*, Hermann (Paris, 1979), p. 285.

*(Manuscrit reçu le 23 février 1988, révisé le 20 juillet 1988)*