

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

REMARQUES SUR L'ARTICLE :  
LIGHT INTENSITY DEPENDENCE OF PHOTON ENERGY  
PAR E. PANARELLA,

*Ann. Fond. Louis de Broglie* 6 p. 197, 1981

par M. SURDIN

Centre de Faibles Radioactivités  
Laboratoire mixte CNRS-CEA  
91190 GIF SUR YVETTE

Dans ce qui suit on se limite, à dessein, à quelques remarques sur les aspects expérimentaux de la nature ondulatoire des photons. En fait, on élargira le débat en considérant la nature ondulatoire des neutrons et des électrons.

Neutrons

Au cours de la dernière décennie de très belles expériences d'interférences et de diffraction ont été effectuées avec des neutrons. Suivant le but recherché ces expériences ont utilisé des neutrons dont la vitesse a été sélectionnée dans une large gamme de vitesses, dont les extrêmes sont : les neutrons ultra froids, correspondants à une température de  $T = 2,3^\circ\text{K}$  et une vitesse de  $440 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$  et les neutrons thermiques de  $T = 300^\circ\text{K}$ , correspondants à une vitesse de  $2,2\cdot 10^5 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ .

On va considérer une expérience d'interférences avec des neutrons thermiques, les plus abondants à la sortie d'un réacteur nucléaire, effectuée avec un interféromètre à "trois épis" constitué par trois dalles de cristal taillées dans un cristal unique de silicium<sup>(1)</sup>.

Dans la version de l'expérience où l'on désire mettre en évidence l'effet de la gravitation terrestre sur l'onde de de Broglie qui accompagne le neutron<sup>(2)</sup> on utilisait des neutrons thermiques et les dimensions de l'interféromètre étaient de l'ordre de 10 cm. Les interférences sont obtenues en comptant le nombre de neutrons reçus dans un détecteur en fonction de l'angle de rotation de l'interféromètre tournant autour d'un axe horizontal. Cette rotation expose les deux faisceaux de neutrons (séparés par l'interféromètre) à des potentiels de gravitation terrestre légèrement différents, d'où les interférences.

Le nombre moyen des neutrons comptés était de  $10 \text{ s}^{-1}$ . Si on considère que les neutrons sont distribués uniformément dans le temps, l'intervalle de temps qui sépare deux neutrons successifs est de  $10^{-1} \text{ s}$ . Pendant ce temps, un neutron ayant une vitesse de  $2,2 \cdot 10^5 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ , parcourt  $2,2 \cdot 10^4 \text{ cm}$ , soit 220 m. Autrement dit, quand un neutron a été détecté le neutron suivant n'est pas encore entré dans l'appareil.

Le rendement des détecteurs de neutrons était de 90 %. Ceci ne modifie pas la conclusion que l'on doit tirer de cette expérience : le neutron "interfère avec lui-même".

En fait, grâce à l'Effet BORRMAN, les neutrons sortant du premier épi de l'interféromètre sont très monochromatiques. La longueur de cohérence du paquet

d'onde qui accompagne chaque neutron est de l'ordre de grandeur des dimensions de l'interféromètre. L'interférence est due à la recombinaison des deux parties, obtenues par séparation dans le premier épi, de l'onde d'un neutron.

### Electrons

On peut considérer l'expérience des trous de YOUNG effectuée par J. FAGET<sup>(3)</sup> qui utilisait des électrons de 50 keV.

Il convient ici de citer J. FAGET l.c. p. 360 "La figure d'interférence occupe une surface d'environ  $1 \text{ mm}^2$  ; pour l'ensemble de cette figure, la plaque a donc reçu  $210^{-12} \text{ C}$ , soit environ 12000 électrons par seconde. Ce sont des électrons de 50 keV dont la vitesse est de l'ordre de  $120.000 \text{ kms}^{-1}$ . Si nous admettons qu'ils sont des corpuscules indépendants les uns des autres et régulièrement répartis dans le faisceau, l'intervalle moyen qui sépare deux électrons successifs serait de 10 km. C'est-à-dire que lorsqu'un électron atteint la plaque l'électron qui le suivra n'a pas encore quitté le filament émetteur".

De même l.c. p. 361

"La figure d'interférences provient des contributions individuelles et indépendantes de chaque électron, qui peut être considéré comme 'interférant avec lui-même'".

### Photons

Tout d'abord une remarque préliminaire sur le rendement des détecteurs de photons. Quand on dit qu'un photomultiplicateur a un rendement de 10 % on ne veut pas dire par là qu'il faut 10 photons *simultanés* pour arracher un électron à la photocathode ; on veut dire qu'en moyenne un photon sur 10 sera compté.

Les photomultiplicateurs modernes réagissent, dans la limite de leur rendement, à des photons individuels et déterminent le temps de détection avec la précision du temps de résolution du photomultiplicateur (de l'ordre de  $10^{-9}$  s).

Ce qui précède est bien connu des expérimentateurs utilisant des comptages en coïncidences. Voir, par exemple, les belles expériences de J.F. CLAUSER<sup>(4)</sup>.

Dans le cas de la plaque photographique, l'argument est le même. Le phénomène qui permet l'impression de la plaque est l'éjection, par un photon, d'un électron qui devient libre et s'attache alors à un centre accepteur. S'il fallait plusieurs photons *simultanés* pour éjecter un électron ces photons devraient être groupés dans une sphère de  $10^{-13}$  cm de rayon.

Si on suppose qu'il faille 10 photons simultanés le nombre de photons reçus par seconde par la plaque serait de  $\frac{3 \cdot 10^{10}}{2 \cdot 10^{-13}} \times 10 \approx 10^{24} \text{ s}^{-1}$  ; pour des photons de quelques eV c'est un "courant" énorme.

MICHELSON, cité par BORN et WOLF<sup>(5)</sup>, a déterminé la forme gaussienne de la raie rouge du cadmium ( $\lambda = 6438 \text{ \AA}$ ) avec une largeur à mi-hauteur de 0,013 Å en observant des interférences pour une différence de marche de 500.000 longueurs d'onde ( $\sim 30 \text{ cm}$ ).

Supposons que l'intensité de la source utilisée soit d'un lumen, pour la raie de cadmium le "courant" de photons correspondant est de  $\sim 3 \cdot 10^{15} \text{ photons}^{-1}$ . L'intervalle de temps moyen d'arrivée des photons sur la plaque est donc  $\sim 3 \cdot 3 \cdot 10^{-16} \text{ s}$ . L'émission des photons

est aléatoire ; la distribution des intervalles de temps entre deux photons successifs est une distribution stationnaire de Poisson. Si on tient compte du rendement de détection de la plaque ( $\sim 1/3$ ) on déduit que l'intervalle de temps entre deux photons détectés peut varier dans un rapport d'au moins 3 (dont la valeur moyenne est de  $\sim 3 \cdot 3 \cdot 10^{-16} \text{ s}$ ), soit dans les limites de  $1,6 \cdot 10^{-16} \text{ s}$  et de  $5 \cdot 10^{-16} \text{ s}$ .

Si on désire attribuer les résultats de Michelson à l'interférence entre deux photons successifs, la différence de marche entre les deux photons sera variable dans les limites de  $1,6 \cdot 10^{-16} \times 3 \cdot 10^{10} = 4,8 \cdot 10^{-6} \text{ cm}$  et de  $5 \cdot 10^{-16} \times 3 \cdot 10^{10} = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ cm}$ , soit une fraction notable de la longueur d'onde. Il s'en suit qu'il est impossible, dans ce cas, d'obtenir les résultats cités plus haut.

Si, cependant, on tient quand même à l'explication de l'interférence entre deux photons successifs, on doit considérer un "courant" de photons tel que la différence de marche soit compatible avec la largeur de la raie observée. Dans ces conditions on obtient un "courant" de photons correspondant à plusieurs centaines de watts, ce qui est insupportable pour une plaque fonctionnant dans des conditions normales.

On conclue, ici encore, que le photon interfère avec lui-même.

Conclusion générale. Dans les expériences d'interférences considérées, les résultats obtenus sont dus à l'onde qui accompagne le corpuscule individuel, que le corpuscule soit un neutron, un électron ou un photon.

## RÉFÉRENCES

- (1) S.A. WERNER, Physics Today, p. 1, Décembre 1980  
K.F. SMITH, Contemp. Phys. 21, p. 631, 1980  
D.M. GREENBERGER et A.W. OVERHAUSER, Rev. Mod. Phys. 51, p. 43, Jan. 1979
- (2) J.L. STAUDENMANN, S.A. WERNER, R. COLELLA et A.W. OVERHAUSER, Phys. Rev. A21, p. 1419, 1980
- (3) J. FAGET, Revue d'Optique, 40, p. 347, 1961
- (4) J.F. CLAUSER, Phys. Rev. D9, p. 853, 1974
- (5) M. BORN et E. WOLF, Principles of Optics 5ème Ed. p. 322, Pergamon Press 1975.