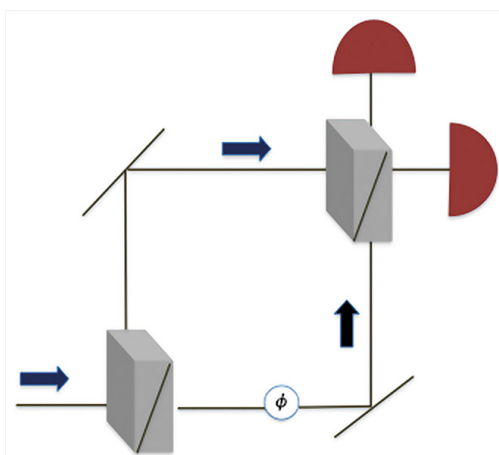


# EXPÉRIENCE À CHOIX RETARDÉ DE WHEELER ET COMPLÉMENTARITÉ ONDE-PARTICULE

**Thomas DURT<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Aix Marseille Univ, CNRS, Centrale Marseille, Institut Fresnel, 13013 Marseille, France

\*thomas.durt@centrale-marseille.fr



**L'expérience à choix différé de Wheeler (1978) permet de repositionner le débat Bohr-Einstein de 1927 sur la complémentarité onde-particule. Lors d'une telle expérience, on choisit de fermer ou non un interféromètre à sa sortie, alors que l'objet quantique est déjà en cours de route. Le mode fermé induit un comportement de type onde; le mode ouvert un comportement de type particule. Cette expérience à choix retardé a été réalisée pour la première fois en 2006 avec des photons uniques.**

<https://doi.org/10.1051/photon/202211523>

Article publié en accès libre sous les conditions définies par la licence Creative Commons Attribution License CC-BY (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), qui autorise sans restrictions l'utilisation, la diffusion, et la reproduction sur quelque support que ce soit, sous réserve de citation correcte de la publication originale.

**S**elon Richard Feynman [1], tout le mystère de la mécanique quantique est contenu dans l'expérience dite des deux fentes de Young lors de laquelle « tout se passe comme si » la particule (en fait sa fonction d'onde quantique) passait simultanément par les deux fentes, ce qui donne lieu à un patron

d'interférences auquel contribuent les ondes passant par chaque fente. À l'occasion de la conférence Solvay de 1927, Albert Einstein et Niels Bohr ont confronté leurs points de vue divergents concernant l'interprétation de la théorie quantique [2]. Einstein a proposé en 1927 l'expérience de pensée suivante : supposons que, lors de la réalisation de l'expérience de Young, l'écran

contenant les deux fentes soit mobile, ce qui permettrait d'enregistrer le recul lié à la déflexion subie par la particule lors de son passage à travers la (les fentes). En mesurant ce recul, l'on pourrait selon Einstein, savoir par quelle fente est passée la particule, sans altérer les interférences. Wheeler écrit à ce sujet [3]: *...Einstein's further reasoning as reported by Bohr (...) is familiar.* ●●●

## INCERTITUDES ET COMPLÉMENTARITÉ

Bohr a montré que, pour satisfaire aux exigences d'Einstein,  $\delta p_x$ , l'incertitude sur l'impulsion (selon X) du premier écran (celui dans lequel sont gravées les deux fentes) doit être inférieure aux impulsions de recul (toujours selon X) correspondant aux passages par la fente du haut et celle du bas, ici nous imposerons  $1/\pi$  fois cette quantité, pour simplifier la discussion. Celles-ci sont de l'ordre de  $(h/2\lambda) \cdot (d/D)$  où  $\lambda$  est la longueur d'onde d'Einstein-de Broglie de la particule diffractée,  $h/\lambda$  son impulsion,  $d$  la distance entre les deux fentes et  $D$  la distance entre le premier écran et le second écran (celui sur lequel on observe le patron d'interférence). En vertu des relations d'incertitude de Heisenberg, l'incertitude  $\delta x$  sur la position verticale du premier écran vaut donc au moins  $h/(4\pi\delta p_x)$ , qui vaut au moins  $\lambda \cdot (D/2d)$ .

Par ailleurs, la distance (toujours selon X) entre une frange brillante et une frange sombre sur le second écran vaut aussi  $\lambda \cdot (D/2d)$ . Au final on trouve que l'incertitude en impulsion requise afin de pouvoir déterminer par quelle fente est passée la particule est telle que l'incertitude en position est de l'ordre de la distance entre deux extrema successifs du patron d'interférence. En moyennant sur cette incertitude, les interférences disparaissent [2]. Si interférences il y a, il est donc impossible de savoir par quelle fente est passée la particule; si par contre l'on sait par quelle fente celle-ci est passée (par exemple en bouchant une des deux fentes ou en mesurant le recul de l'écran comme ci-dessus), on détruit les interférences. Cette expérience illustre le principe de complémentarité cher à Bohr [2,3] selon lequel les comportements corpusculaire et ondulatoire constituent deux propriétés complémentaires mais incompatibles des systèmes quantiques, impossibles à mesurer simultanément.

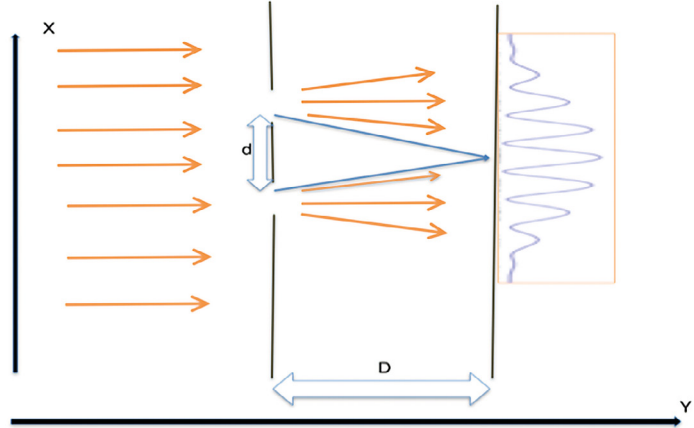


Figure 1. Interféromètre à deux fentes.

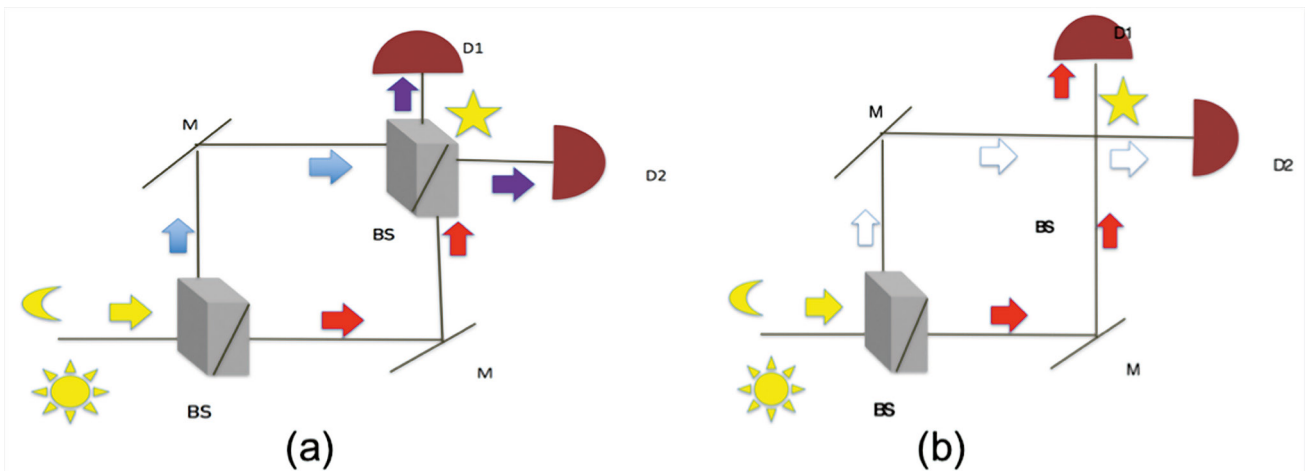
*Record both the kicks and the fringes. Conclude from the kicks that each quantum of energy comes through a single slit alone; from the fringes, that it nevertheless also comes through both slits. But this conclusion is self-contradictory. Therefore quantum theory destroys itself by internal inconsistency. ... Bohr a objecté du fait que l'écran*

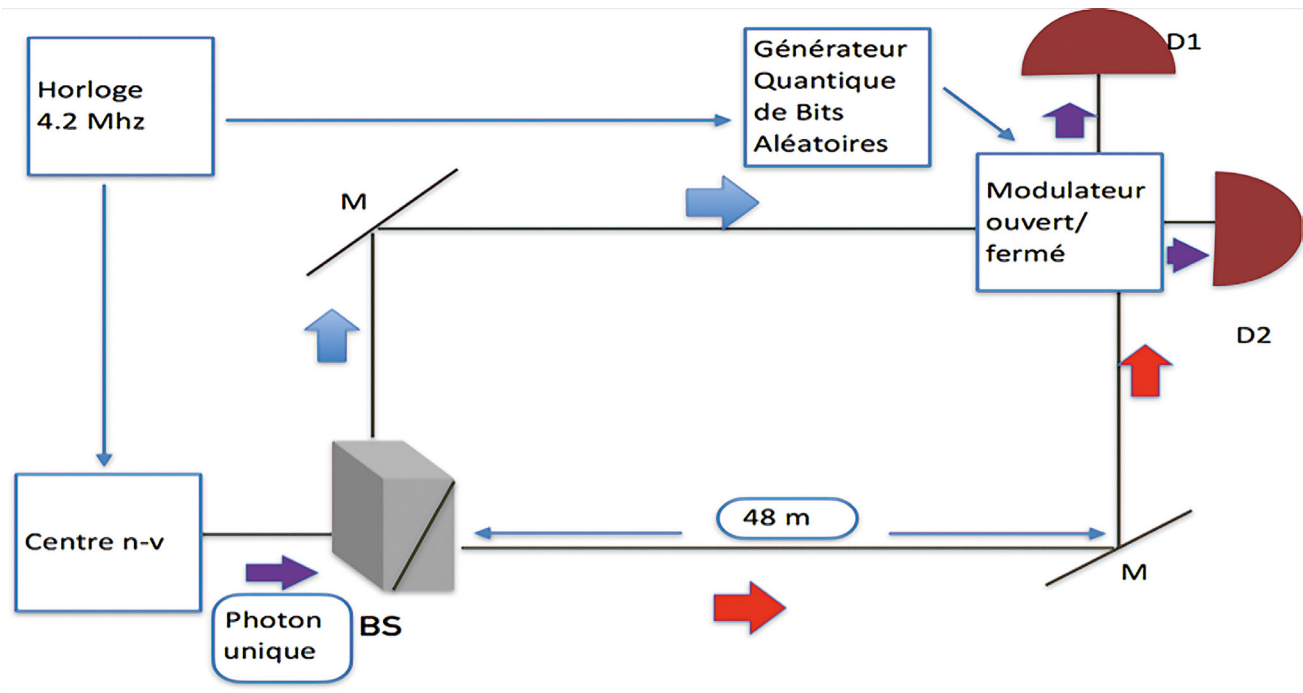
lui-même devait être considéré comme un objet quantique, soumis aux relations d'incertitude de Heisenberg, qui contraignent, pour tout objet quantique, le produit de

l'incertitude en position avec l'incertitude en impulsion.

Comme nous le montrerons ci-dessous, le paradoxe de Wheeler [3] apporte un éclairage neuf sur la question, et remet en cause la préconception classique selon laquelle les résultats des observations pré-existent à la mesure.

Figure 2. Paradoxe de Wheeler: (a) comportement ondulatoire, (b) comportement corpusculaire.





**EXPÉRIENCE À CHOIX RETARDÉ DE WHEELER**

Considérons un interféromètre de Mach-Zehnder dans lequel interfèrent deux chemins : le chemin du haut (*up*) et le chemin du bas (*down*). Ce schéma est très proche de l'interféromètre de Young (le chemin du haut (bas) correspondant à la fente du haut (bas)), mais il permet en outre de choisir en fin de parcours si l'on fait interférer

Figure 3. Réalisation expérimentale.

ou non les deux chemins. Le choix se fait en interposant (ou non) un séparateur de faisceau (*beam splitter-BS*) en fin de parcours. Si l'interférence a lieu (figure 2a), on met en évidence une propriété ondulatoire, sinon on peut savoir quel était le chemin suivi (figure 2b), ce qui révèle une propriété corpusculaire de

l'objet quantique envoyé dans l'interféromètre. L'idée de Wheeler [3] est que l'expérimentateur situé en fin de parcours peut retarder son choix jusqu'au dernier moment. John Bell écrit à ce sujet [4]: ... « *Here it seems possible to choose, later, whether the particle, earlier, passed through one slit or two !* »...

« Tout se passe donc comme si » le choix fait en fin de parcours par l'expérimentateur localisait ●●●

(ou non) l'objet quantique a posteriori, ce qui semble contredire le principe de causalité. Wheeler va même jusqu'à imaginer un interféromètre de taille cosmique (plusieurs années-lumière), auquel cas le choix se fait plusieurs années après que l'objet ait pénétré dans l'interféromètre.

**RÉALISATION EXPÉRIMENTALE**

Les expériences de pensée conçues par les pères fondateurs de la théorie quantique sont désormais réalité. L'expérience du choix retardé à la Wheeler a par exemple été réalisée à Paris avec des photons uniques [4]. Lors de cette expérience, la taille de l'interféromètre était de 48 m. Le temps mis par la lumière pour traverser l'interféromètre est alors de seulement 160 ns. Néanmoins le choix de la base de mesure (ondulatoire ou corpusculaire) était bien effectué après que la lumière

ait pénétré dans l'interféromètre, ce qui en fait une authentique expérience à choix différé. En outre, tout a été mis en œuvre pour éviter que le choix du mode (ouvert ou fermé) ne soit divulgué au moment où celle-ci pénètre dans l'interféromètre, ce qui a donné lieu à divers raffinements technologiques :

1. Le photon unique est produit par l'activation d'un centre NV commandé par une horloge émettant des impulsions courtes au rythme de 4.2 MHz, soit un nouveau photon toutes les 238 ns environ.
2. L'horloge commande simultanément l'activation du mode (ouvert ou fermé) en sortie d'interféromètre, conformément au choix fait par un générateur quantique de bits aléatoires indépendant basé sur le bruit de grenaille d'une source lumineuse placée près de la sortie et consultée « au dernier moment ».

3. Ce choix est imprévisible et n'advient que lorsque la lumière est déjà à mi-chemin dans l'interféromètre (après 80 ns). L'activation du mode prend elle-même un temps de l'ordre de 40 ns.
4. En mode ouvert, les détections en sortie sont quasiment (à 99 %) les mêmes que celles obtenues en bouchant un des deux chemins.
5. En mode fermé on obtient des interférences de haute visibilité (94 %) en variant la différence de chemin optique entre les deux bras.
6. Pour vérifier que la source émet bien des photons uniques, on mesure le taux de détection en coïncidence par un détecteur placé dans le chemin vertical (D1 dans les figures 2a et 2b) et l'autre dans le chemin horizontal (D2 dans les figures 2a et 2b). Le taux mesuré ainsi est proche de zéro.

**TRAJECTOIRES QUANTIQUES À LA DE BROGLIE-BOHM**

Dans l'interprétation réaliste de de Broglie-Bohm [4,6], la particule se comporte comme un point matériel, dont la trajectoire, continue dans l'espace et le temps est supposée obéir à l'équation de guidance  $v_Q = J_Q/\rho_Q$  où  $J_Q$  représente le flux de probabilité associé à la densité  $\rho_Q$  via l'équation de conservation  $(\partial/\partial t)\rho_Q + \text{div.}(J_Q) = 0$ .

Par exemple, dans l'expérience des deux fentes, la densité  $\rho_Q$  au point  $x$  vaut  $|\Psi(x, t)|^2$  et le flux  $J_Q$  est proportionnel à  $\text{Im.}((\Psi^*(x, t) \nabla)\Psi(x, t))$ , tandis que l'« onde-pilote » est la superposition d'une onde associée au passage par la fente du dessus avec une onde associée au passage par la

fente du dessous :  $\Psi(x, t) = \Psi_{\text{up}}(x, t) + \Psi_{\text{down}}(x, t)$ . Les trajectoires quantiques se focalisent dans les régions où ces deux ondes interfèrent de manière constructive (ventres), et fuient les régions d'interférence destructive (noeuds) de manière à reproduire à chaque instant la distribution de probabilité quantique  $\rho_Q(x, t)$ , comme on peut le voir sur les figures 4a et 4b. Contrairement à l'intuition d'Einstein, il n'y a pas de déflexion « ressentie » par le premier écran lors du passage du corpuscule par une des fentes car il n'y a pas de rétroaction du corpuscule sur son onde pilote. En outre la déflexion s'explique ici en termes de self-accélération due au guidage du corpuscule par l'onde pilote, ce qui annule l'argument d'Einstein basé sur les lois de conservation. Les lois de conservation, ainsi que les relations d'incertitude sont vraies « en moyenne seulement » et sont violées au niveau des trajectoires de de Broglie-Bohm individuelles.

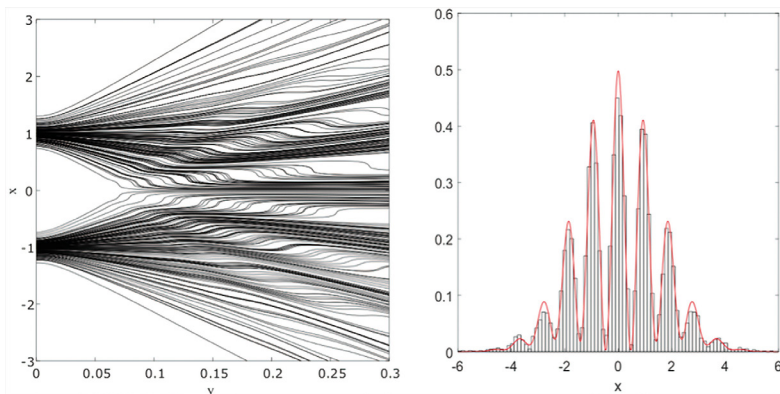


Figure 4. (a) Trajectoires individuelles de de Broglie-Bohm dans une interférence à la Young (cf figure 1) et (b) histogramme des populations au niveau du second écran (cf. figure 1) obtenues en moyennant sur les trajectoires reprises en figure 4a. © M. Hatifi

**DISCUSSION ET CONCLUSION**

Le choix retardé semble ici influencer le passé causal de l'objet. De fait, l'on peut objecter à juste titre que le paradoxe n'est qu'apparent [3]: rien ne dit que la réalité de la nature corpusculaire ou ondulatoire de l'objet quantique pré-existe à la mesure. Wheeler écrit à ce sujet [3]: ... « *More generally, we would seem forced to say that no phenomenon is a phenomenon until (...) it is an observed phenomenon* »... L'on sait désormais que la mesure quantique est intrinsèquement contextuelle, ce qui est une manière de dire que, d'une certaine manière, l'observation crée le résultat de la mesure, comme Bohr l'avait déjà pressenti. Même si, encore aujourd'hui, le débat semble donner raison à Bohr plutôt qu'à Einstein, à tout le moins en ce qui concerne la complémentarité onde-corpuscule, le débat de fonds entre réalistes (Einstein, de Broglie, Bohm) et orthodoxes (Bohr, Heisenberg, von Neumann, Pauli) n'est cependant pas entièrement clos. Rien n'interdit en effet d'imaginer ce qui se passe en l'absence de mesure. C'est le cas dans l'approche de de Broglie-Bohm (voir figures 4 et 5) selon laquelle les corpuscules quantiques possèdent une trajectoire continue dans l'espace et le temps [4,6], régie par l'équation de guidance de de Broglie. Dans les

expériences considérées ici (interféromètres de Young et ou Mach-Zehnder), même si la particule passe par un des bras de l'interféromètre seulement (comme le pensait Einstein), son onde pilote se bilocalise le long des deux chemins, ce qui nous éloigne irrémédiablement de la description d'un corpuscule classique. Dans cette interprétation, la particule est toujours localisée, à tout instant, et le choix retardé à la Wheeler n'influence en aucune manière le passé [4,6]. Cependant, ce choix influence de manière contextuelle l'évolution subséquente des trajectoires quantiques.

Quelle que soit l'interprétation adoptée pour décrire la dualité onde-particule, il est impératif de dépasser nos

préconceptions classiques. En particulier il faut abandonner l'idée selon laquelle les résultats des observations préexistent à la mesure : « tout se passe comme si » la mesure cocréait le résultat de mesure. Il faut aussi oublier l'image du point matériel newtonien uniquement soumis à des influences locales. Bohr a été le premier, avec raison, à attirer notre attention sur le fait que nos présupposés et nos préjugés ne nous permettront jamais d'appréhender toute la réalité du monde physique et que la connaissance de cette dernière ne peut s'obtenir en absence de mesure. Cette vérité élémentaire constitue aussi une porte ouverte à la diversité des schémas interprétatifs de la physique quantique [4]. ●

RÉFÉRENCES

- [1] R.P. Feynman, R. B. Leighton, M. L. Sands, Lectures on Physics (Addison-Wesley, Reading, MA), 1965
- [2] M. Rabinowitz, Mod. Phys. Lett. B 9, 763 (2005)
- [3] J.A. Wheeler, "The "Past" and the "Delayed-Choice Double-Slit Experiment", pp 9-48 in Mathematical Foundations of Quantum Theory, (A.R. Marlow, editor), Academic Press, 1978
- [4] J. Bell, Int. Journ. Of Quantum Chemistry: Quantum Chemistry Symposium 14, pp 155-159 (1980). Reprinted in Speakable and Unspeakeable in Quantum Mechanics, First Edition, World Scientific Singapore, 2001
- [5] V. Jacques, E. Wu, F. Grosshans, F. Treussart, P. Grangier, A. Aspect, J.-F. Roch, Science 315, 966-968 (2007)
- [6] D.J. Bohm, C. Dewdney, and B. H. Hiley, Nature 315, 294-297 (1985)



**LA FLEXIBILITÉ ET L'EXPERTISE  
AU SERVICE DE L'INNOVATION**



**LED UV**

LED / MODULES LED / SOLUTIONS DÉDIÉES  
SERVICE SUR MESURE / POUR PETITES À GRANDES SÉRIES

**CARACTÉRISTIQUES**  
De 255nm à 405nm - Boitier CMS ou traversant - Longues durées de vie  
Différents angles de distribution optique disponibles

**NOUVEAUTÉ**  
WICOP UVC forte densité mW/mm<sup>2</sup> - 275nm - CMS - Sans bonding  
Dimensions : 0,96 x 0,60 mm - Large choix de modules standards  
jusqu'à 820mW

**APPLICATIONS**  
Décontamination - Stérilisation surfaces, fluides et air  
Analyse de gaz - Spectroscopie - Curing - Fluorescence  
Effets spéciaux - Forensic - Détection de contrefaçon...

Société HTDS - info@htds.fr - www.htds.fr - Tel : +33 (0)1 64 86 28 28

