



ACTIVITÉ DOCUMENTAIRE S8

DUALITÉ ONDE-CORPUSCULE

D.Malka – MPSI 2017-2018 – Lycée Saint-Exupéry

Capacités exigibles	
Décrire un exemple d'expérience mettant en évidence la nécessité de la notion de photon.	✓
Décrire un exemple d'expérience illustrant la notion d'ondes de matière.	✓
Interpréter une expérience d'interférences (matière ou lumière) « particule par particule » en termes probabilistes.	✓

En s'appuyant sur les documents ci-après, répondre précisément aux questions suivantes :

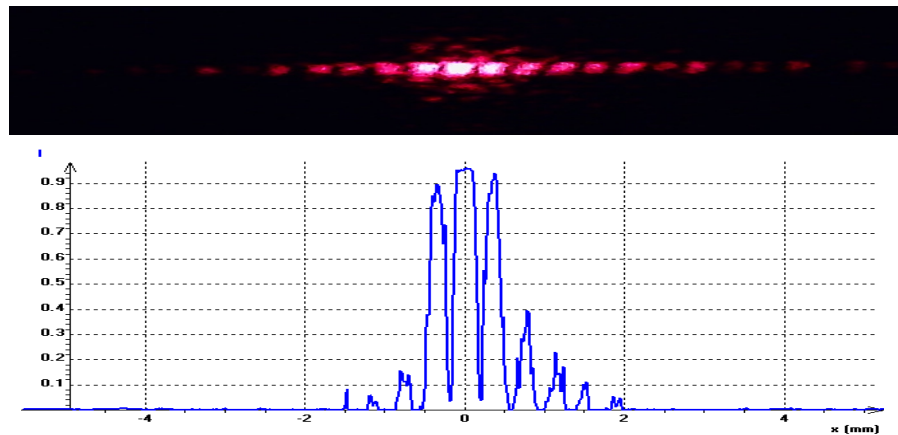
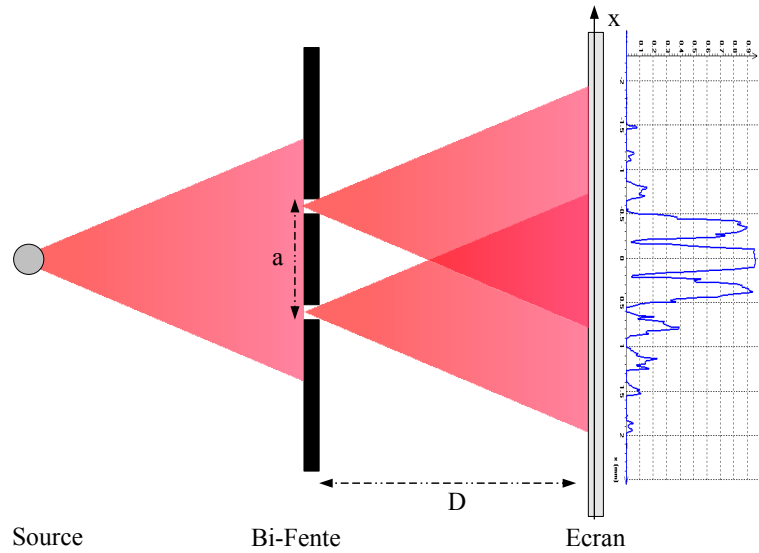
- D'après l'expérience des fentes d'Young, quelle est la nature de la lumière ?
- La théorie classique de la lumière prévoit un seuil en intensité pour l'effet photoélectrique tandis que la théorie d'Einstein prévoit un seuil en fréquence. Commenter. Déterminer le travail d'extraction W du zinc.
- On s'intéresse au comportement de la lumière dans l'expérience du document 3 :
 - Si la lumière se comporte comme une onde, quelle valeur du coefficient de corrélation A attend-on ?
 - Si la lumière se comporte comme un corpuscule (le photon), et admettant que pas plus d'un photon ne peut exister dans l'appareil de mesure pendant la fenêtre de détection, quelle valeur du coefficient de corrélation A attend-on ?
 - Conclure.
- On s'intéresse au comportement de la lumière dans l'expérience du document 4 :
 - En quoi cette expérience est paradoxale ?
 - Expliquer la phrase : « *Un photon interfère avec lui-même.* »
- Dans l'expérience de Tonomura, montrer que les électrons sont envoyés un à un dans le dispositif. Commenter le résultat de l'expérience.
- Les objets quantiques sont parfois appelés quantons. Finalement, diriez-vous qu'un quanton est :
 - une onde ?
 - un corpuscule ?
 - une onde et un corpuscule ?
 - ni l'un ni l'autre ?

Quelques constantes fondamentales :

- charge élémentaire $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$
- constante de Planck $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J s}$
- célérité de la lumière dans le vide $c = 3.0 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$

Document 1 – L'expérience des fentes d'Young

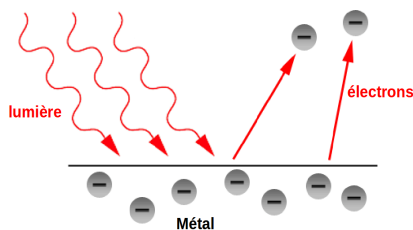
Au début du XIX^{ème} siècle, Young réalise l'expérience suivante.



2 fentes fines sont illuminées par une source de lumière monochromatique. Ces deux fentes diffractent la lumière et se comportent alors comme deux sources secondaires cohérentes (donc synchrones) qui illuminent un écran placé parallèlement au plan des fentes. On y observe une figure d'interférences.

Document 2 – Sur la piste du photon – Interprétation d’Einstein de l’effet photoélectrique

Une plaque métallique isolée prend, sous l’action d’un éclairage lumineux, une charge positive. Inversement, une plaque de zinc initialement chargée négativement se décharge par insolation avec un rayonnement ultraviolet, ceci même lorsqu’elle est placée dans le vide (fig.1). Si une différence de potentiel est appliqué, on mesure un courant. C’est l’effet photoélectrique.



L’effet photoélectrique



<https://vimeo.com/davidmalka/s81>

FIGURE 1 – L’effet photoélectrique

En 1905, EINSTEIN interprète l’effet photoélectrique en quantifiant les champ électromagnétique incident en « Lichten Quanten » baptisé plus tard photon. L’échange d’énergie entre l’onde lumineuse et les électrons du métal se fait par absorption d’un photon d’énergie $E = h\nu$ (où h est la constante de PLANCK) par un électron. Si $h\nu < W$ alors l’électron n’a pas suffisamment d’énergie pour être arraché du métal. Si $h\nu > W$ soit $\nu > \frac{W}{h}$ alors l’électron est arraché du métal et son énergie cinétique maximale vaut, par conservation de l’énergie :

$$E_{c,max} = h\nu - W$$

W est appelé *travail d’extraction* du métal. C’est l’énergie minimale qu’il faut fournir pour arracher un électron du métal. W dépend de la nature du métal.

Robert MILLIKAN a cherché 10 ans à infirmer la théorie d’EINSTEIN. Les résultats de ses travaux sont synthétisés : fig.2.

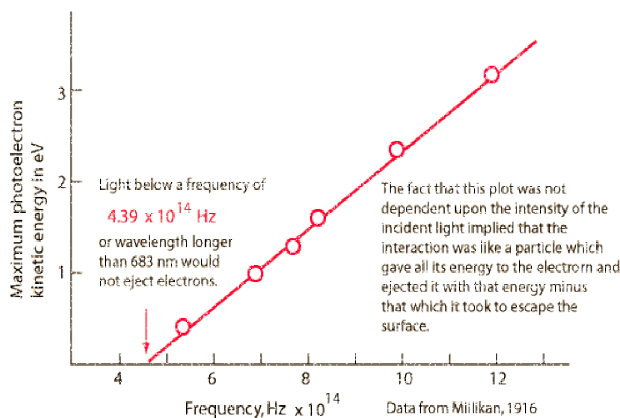


FIGURE 2 – Intensité du courant en fonction de la fréquence du rayonnement incident

Simulation de l’effet photoélectrique : <https://phet.colorado.edu/fr/simulation/photoelectric>

Document 3 – Expérience à photon unique (I)

Le présent document s'appuie sur la thèse de Vincent Jacques, chercheur au laboratoire de Photonique Quantique et Moléculaire à l'ENS Cachan : Sources de photons uniques et interférences à un seul photon : de l'expérience des fentes d'Young au choix retardé., publiée en 2007. Il comprend des simplifications visant à rendre l'expérience accessible à un niveau L1.

Expérience à photon unique (I) – Comptage des photons



<https://vimeo.com/davidmalka/s82>

Des impulsions de lumière de photoluminescence émises par un centre coloré NV individuel sont envoyées en incidence normale sur un bi-prisme de Fresnel. Deux détecteurs fonctionnant en régime de comptage de photon sont positionnés en sortie de chacun des deux chemins de l'interféromètre, loin de la zone de recouvrement des faisceaux issus du bi-prisme (fig.3). Le dispositif est réglé de façon à ce que, dans l'hypothèse de l'existence du photon, il en existe au plus un seul dans l'appareil de mesure durant la fenêtre de détection des compteurs.

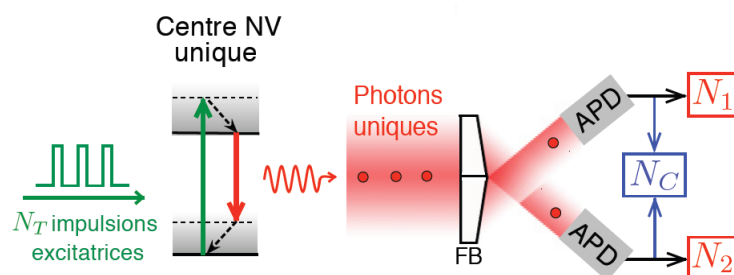


FIGURE 3 – Bi-prisme de Fresnel : comptage de photons à partir d'une source à photon unique

Si la lumière se comporte comme une onde, elle se sépare en deux au niveau du bi-prisme et emprunte simultanément les deux chemins. Si la lumière est de nature corpusculaire, chaque photon ne peut emprunter qu'un seul des deux chemins.

On définit le paramètre de corrélation A par :

$$A = \frac{N_C \times N_T}{N_1 \times N_2}$$

avec N_T , N_C , N_1 et N_2 sont respectivement le nombre d'impulsions lumineuses émises, le nombre de détections coïncidentes au niveau des détecteurs en 1 et 2, le nombre de détections du détecteur en 1 et le nombre de détections du détecteur en 2.

Avec un intervalle de confiance de 95%, on mesure finalement :

$$A = 0.13 \pm 0.01$$

Document 4 – Expérience à photon unique (II)

Le présent document s'appuie sur la thèse de Vincent Jacques, chercheur au laboratoire de Photonique Quantique et Moléculaire à l'ENS Cachan : Sources de photons uniques et interférences à un seul photon : de l'expérience des fentes d'Young au choix retardé., publiée en 2007. Il comprend des simplifications visant à rendre l'expérience accessible à un niveau L1.

Expérience à photon unique (II) – Interférences



<https://vimeo.com/davidmalka/s83>

Des impulsions de lumière de photoluminescence émises par un centre coloré NV individuel sont envoyées en incidence normale sur un bi-prisme de Fresnel. Une caméra CCD intensifiée refroidie à la température $-25^{\circ}C$ (iStar, ANDOR TECHNOLOGIES) est positionnée dans la zone de recouvrement des deux fronts d'onde déviés par le bi-prisme (fig.4). Le dispositif est réglé de façon à ce qu'il existe au plus un seul photon dans l'appareil de mesure durant la fenêtre de détection de la caméra. Ce dispositif est équivalent à celui des fentes d'Young (document 1).

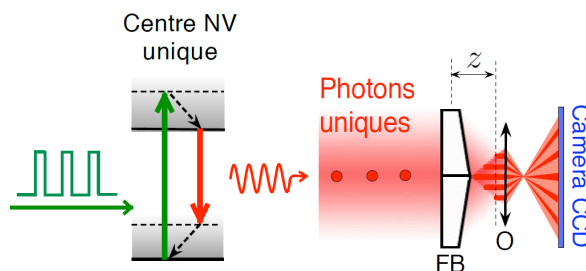


FIGURE 4 – Bi-prisme de Fresnel : enregistrement du champ d'interférences

2000 clichés, équivalents à la détection d'environ 2×10^5 photons, ont été réalisés. Ces clichés accumulés ont été utilisés pour réaliser un film qui permet de visualiser très clairement la construction photon par photon de franges d'interférences (fig.5).

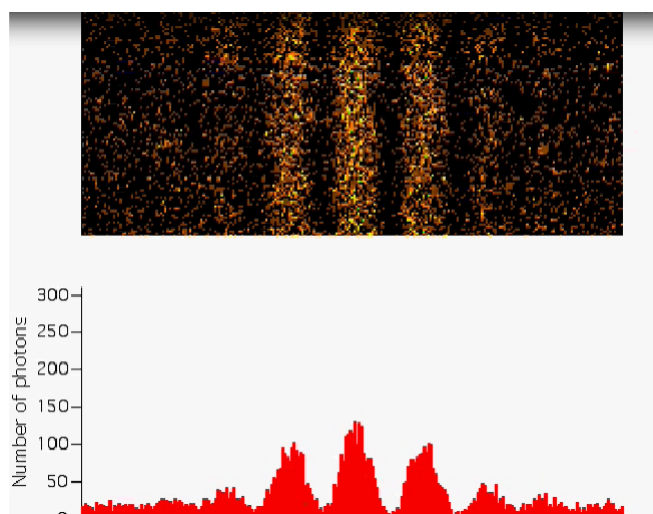


FIGURE 5 – Reconstitution des franges d'interférences photon par photon : <https://www.youtube.com/watch?v=NaEo517NDXo>

Document 5 – Expérience de Tonomura

Une équipe d'Hitachi a réalisé en 1989 une expérience analogue aux fentes d'Young mais en utilisant des électrons et un « bi-prisme électromagnétique ».

▶ Expérience de Tonomura

<https://vimeo.com/davidmalka/s84>

Des électrons, émis par une source identique à celle d'un microscope électronique, sont accélérés sous une différence de potentiel de 50 kV , puis dirigés vers un ensemble de trois électrodes. Une électrode centrale cylindrique, de diamètre inférieur au micromètre, est portée à un potentiel supérieur de 10 V à celui de deux électrodes planes disposées latéralement. La distance entre les deux électrodes latérales est de 10 mm . La distance entre la source d'électrons et le détecteur est de $1,5 \text{ m}$.

Le faisceau électronique est ainsi divisé en deux faisceaux, déviés dans des sens opposés. Un détecteur est placé dans la zone de recouvrement des deux faisceaux. L'impact d'un électron en un point du détecteur produit des photons (par fluorescence), qui sont ensuite multipliés, détectés et localisés. La position de l'impact d'un électron sur le détecteur peut ainsi être mesurée. Le flux d'électrons est contrôlé. Il est égal à 103 électrons par seconde, ce qui correspond à un courant d'intensité $1,6 \cdot 10^{-16} \text{ A}$. La vitesse des électrons est égale à $1,5 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$.

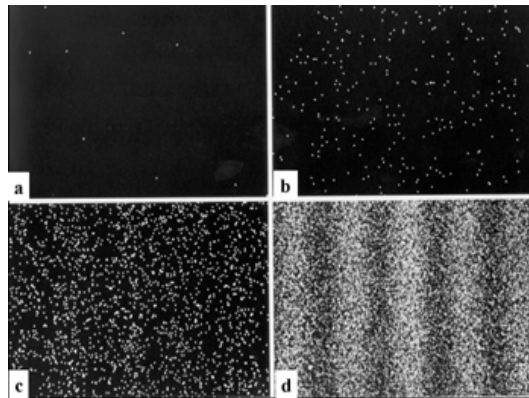


FIGURE 6 – Reconstitution des franges d'interférences électron par électron : <http://www.youtube.com/watch?v=5oQWtcfZN4M>