

Table des matières

1	Prérequis	1
2	Introduction	1
3	Partie I : Etude expérimentale des aspects ondulatoire et corpusculaire	1
3.1	Fentes de Young	1
3.2	Effet photoélectrique	1
4	Partie II : Dualité onde-corpuscule en mécanique quantique	2
4.1	Interférences et formalisme de la mécanique quantique	2
4.2	Complémentarité et expérience de pensée d'Einstein.	2
5	Bibliographie	3
6	Questions et remarques des correcteurs	3

1 Prérequis

- ▷ Optique ondulatoire
- ▷ Postulats de la mécanique quantique

2 Introduction

Contexte historique :

- ▷ $XVII^e$ siècle : Huygens (interférences), Newton (réflexion optique).
- ▷ XIX^e siècle : Young s'intéresse surtout à l'aspect ondulatoire de la lumière.
- ▷ XX^e siècle : interprétation corpusculaire de l'effet photoélectrique par Einstein.
- ▷ Dans la suite du XX^e siècle la mécanique quantique a pu allier les deux aspects

3 Partie I : Etude expérimentale des aspects ondulatoire et corpusculaire

3.1 Fentes de Young

Calcul de l'éclairement pour des fentes de Young dans l'approximation scalaire. Calcul de l'interfrange $i = \frac{\lambda D}{a}$.

3.2 Effet photoélectrique

Einstein fait l'hypothèse de quantification : l'énergie d'un "grain de lumière" est $E = h\nu$. Cette hypothèse permet de déduire :

- ▷ $h\nu = W_s + \frac{mv^2}{2} \geq W_s$ donc $\nu_s = \frac{W_s}{h}$ avec W_s l'énergie d'extraction d'un électron de l'atome de métal. W_s change en fonction du métal étudié.
- ▷ Par conservation de l'énergie $\frac{mv^2}{2} = eV_0$ donc $|V_0| = \frac{h}{|e|}(\nu - \nu_s)$
- ▷ P_{opt} étant proportionnelle au nombre de "grains de lumière", elle est également proportionnelle au nombre d'électrons arrivant à la cathode si l'extraction n'est plus limitante ($\nu \gg \nu_s$) et le voyage des électrons non plus ($V \gg V_0$).

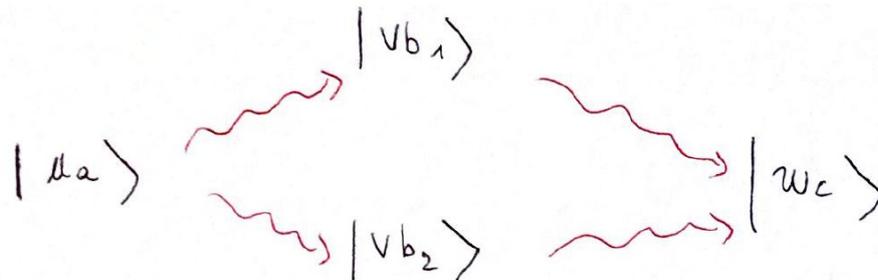
▷ $\frac{mv_{min}^2}{2} = eV_0 = h\nu - W_s$, V_0 ne dépend pas de P_{opt} .

L'hypothèse de quantification de la lumière en corpuscules explique donc l'effet photoélectrique. Transition : Les sources de photons uniques ont permis d'observer les deux effets à la fois (reconstitution de figures d'interférence en envoyant des photons un par un sur un système interférentiel). Le formalisme de la mécanique quantique est adapté pour décrire cette dualité.

4 Partie II : Dualité onde-corpuscule en mécanique quantique

4.1 Interférences et formalisme de la mécanique quantique

On modélise les fentes de Young de la manière suivante :



On prépare initialement le système dans l'état $|u_a\rangle$ en obtenant la valeur propre a lors d'une mesure de l'observable A . Cette préparation représente la source de photons. On réalise les deux expériences suivantes :

- ▷ Expérience 1 : Avant que le système ait le temps d'évoluer, on fait une mesure de l'observable C . La probabilité d'obtenir c lors de cette mesure est $P_a(c) = |\langle w_c | u_a \rangle|^2$. La valeur propre c représente la position du photon sur l'écran.
- ▷ Expérience 2 : Avant que le système ait le temps d'évoluer, on mesure l'observable B puis l'observable C . Intercaler la mesure de B entre celle de A et C correspond à intercaler les fentes de Young entre la source et l'écran. Lors de la mesure de B , on peut obtenir soit la valeur propre b_1 soit la valeur propre b_2 . Ces deux valeurs propres possibles représentent les deux chemins possibles. Juste après la mesure de B le système est dans l'état $|v_{b_i}\rangle$ avec $i = 1$ ou 2 . La probabilité de trouver b_i lors de la première mesure puis c lors de la deuxième est alors $P_{a,b_i}(c) = |\langle w_c | v_{b_i} \rangle|^2 |\langle v_{b_i} | u_a \rangle|^2$

On va voir que la probabilité d'obtenir le chemin $a \rightarrow c$ n'est pas la somme des probabilités d'obtenir les chemins $a \rightarrow b_i \rightarrow c$.

En effet, si l'on suppose que $|v_{b_1}\rangle, |v_{b_2}\rangle$ forment une base de l'espace (c'est à dire pas d'autre chemin possible pour la particule), on a :

$$P_a(c) = |\langle w_c | (\langle v_{b_1} | u_a \rangle |v_{b_1}\rangle + \langle v_{b_2} | u_a \rangle |v_{b_2}\rangle) |^2 = |\langle w_c | v_{b_1} \rangle|^2 |\langle v_{b_1} | u_a \rangle|^2 + |\langle w_c | v_{b_2} \rangle|^2 |\langle v_{b_2} | u_a \rangle|^2 + \langle w_c | v_{b_1} \rangle^* \langle v_{b_1} | u_a \rangle^* \langle w_c | v_{b_2} \rangle \langle v_{b_2} | u_a \rangle + \langle w_c | v_{b_2} \rangle^* \langle v_{b_2} | u_a \rangle^* \langle w_c | v_{b_1} \rangle \langle v_{b_1} | u_a \rangle = P_{a,b_1}(c) + P_{a,b_2}(c) + 2\text{Re}(\langle w_c | v_{b_1} \rangle^* \langle v_{b_1} | u_a \rangle^* \langle w_c | v_{b_2} \rangle \langle v_{b_2} | u_a \rangle)$$

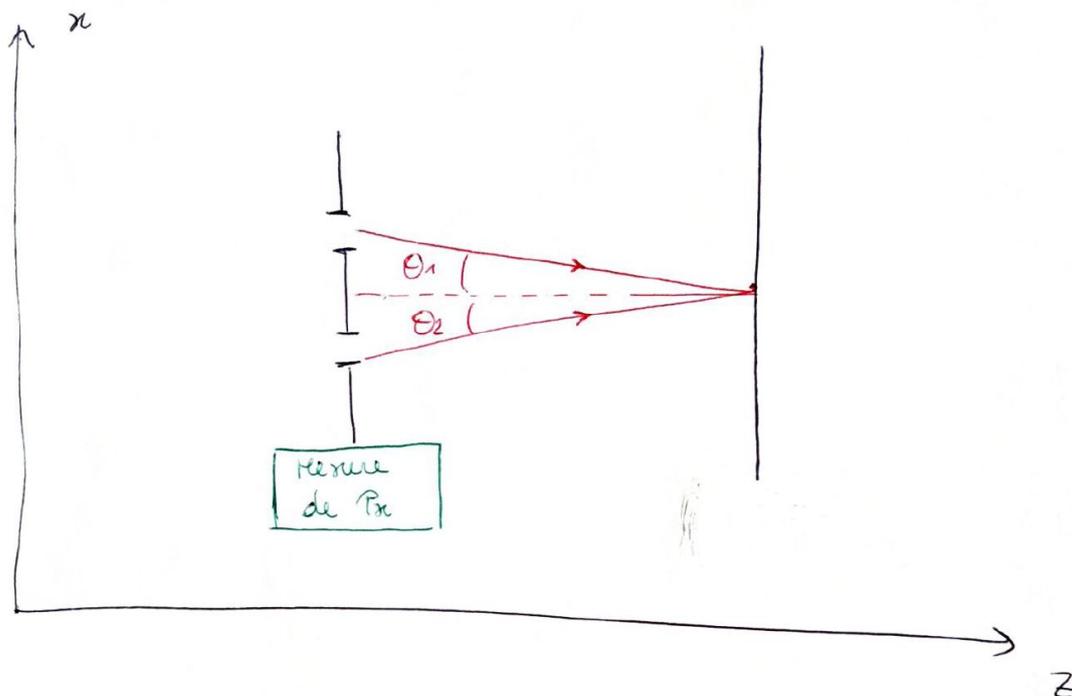
On voit l'apparition d'un terme d'interférence entre les deux chemins possibles. En mécanique quantique il est en effet indispensable de raisonner sur les amplitudes de probabilité et non sur les probabilités, comme lorsqu'on fait des calculs en optique ondulatoire.

On voit également qu'il s'agit de probabilités. Un photon envoyé par la source frappe l'écran suivant cette loi de probabilité. De plus, en envoyant un grand nombre de photons, on reconstitue la figure d'interférences (voir la thèse de Vincent Jacques).

4.2 Complémentarité et expérience de pensée d'Einstein

On considère les notations résumées sur la figure suivante. On note en plus a la distance entre les fentes de Young et D la distance entre les fentes et l'écran.

On envoie des photons un par un sur les fentes de Young. L'expérience de pensée d'Einstein est la suivante : que se passe-t-il si on considère qu'on peut savoir expérimentalement par quel trou chaque photon est passé ?



On introduit pour cela un dispositif de mesure de l'impulsion transversale de la plaque comportant les deux fentes de Young. Si la particule passe par le trou 1, la plaque subit une variation d'impulsion transversale égale à $P_{in}\theta_1$ avec P_{in} l'impulsion du photon incident. Si la particule passe par le trou 2, la plaque subit une variation d'impulsion transversale égale à $P_{in}\theta_2$. On considère alors qu'on sait mesurer la variation d'impulsion de la plaque avec une précision $\Delta P < P_{in}|\theta_1 - \theta_2|$. On sait alors mesurer par quel trou la particule est passée.

Dès lors, d'après l'inégalité de Heisenberg, la position de la plaque contenant les fentes de Young est connue avec une précision $\Delta x > \frac{\hbar}{2\Delta P}$, soit avec $P_{in} = \frac{h}{\lambda}$ et $|\theta_1 - \theta_2| > \frac{a}{D}$, $\Delta x > \frac{D\lambda}{4\pi a}$. La position de la plaque étant connue à la précision Δx près, l'endroit où le photon frappe l'écran est connu à une précision Δx près. Il y a alors brouillage des interférences sur une largeur $\frac{D\lambda}{4\pi a}$ au moins. Cette largeur est de l'ordre de grandeur de l'interfrange. **Il y a donc brouillage des interférences.** Cette déduction a été validée expérimentalement par la ligne de lumière PLEIADES au Synchrotron SOLEIL et l'équipe suédoise du Royal Institute of Technology.

Si on caractérise totalement l'aspect corpusculaire de la lumière (on connaît le chemin parcouru par chaque photon), alors on ne peut pas observer l'aspect ondulatoire de la lumière caractérisé par les interférences. **On ne peut pas observer à la fois l'aspect ondulatoire et l'aspect corpusculaire de la lumière. Ces deux aspects sont complémentaires : ils sont tous deux nécessaires pour décrire l'intégralité des phénomènes physiques mais sont exclusifs.**

5 Bibliographie

- ▷ Mécanique Quantique, Claude Aslangul (pour l'effet photoélectrique)
- ▷ Mécanique Quantique, Claude Cohen-Tannoudji (pour le II/1.)

6 Questions et remarques des correcteurs

Suggestions de bibliographie :

- ▷ le livre de Feynmann
- ▷ le livre de Serge Aroch
- ▷ Foundations of quantum mechanics, Auletta (pour la complémentarité)
- ▷ Le Bellac ou Dalibard (atomes froids)