

# Mécanique quantique – L3 FIP

Pierre-François Cohadon – Tristan Villain – Qinhan Wang

TD 1 - 25/09/2024

Expériences d'interférences

## 1 Expérience d'interférences avec des atomes

Après des expériences réalisées avec des électrons (expériences de Davisson et Germer, et indépendamment de G. P. Thomson, sur la diffraction des électrons par les cristaux, réalisées en 1927 et récompensées par le Prix Nobel de Physique en 1937) ou des neutrons (à partir des années 1970), la première expérience d'interférences avec des atomes a été réalisée sur le modèle des fentes d'Young en 1991 à l'Université de Constance.

Des atomes d'hélium ( $^4\text{He}$ ) émis par une source thermique passent successivement par une fente d'entrée (largeur  $s_1 = 2\mu\text{m}$ ), puis par une double fente (écartement  $d = 8\mu\text{m}$ , largeur  $s_2 = 1\mu\text{m}$ ), avant d'être détectés. La figure d'interférences est observée avec une fente de sortie.

1. Pourquoi n'est-il pas étonnant que cette expérience ait d'abord été réalisée avec des atomes d'hélium ?
2. Donner un ordre de grandeur de la longueur d'onde de de Broglie  $\lambda_{\text{dB}}$  des atomes pour une température de la source  $T = 295\text{ K}$ .  
On rappelle la valeur de l'unité atomique de masse :  $1\text{ uma} \simeq 1,6 \times 10^{-27}\text{ kg}$ .
3. Quel est le rôle de la fente d'entrée ?
4. Quel est l'interfrange mesuré pour  $T = 295\text{ K}$  ? En déduire la valeur de  $\lambda_{\text{dB}}$  des atomes et la comparer à l'estimation réalisée précédemment.  
Reprendre la question pour  $T = 83\text{ K}$ .

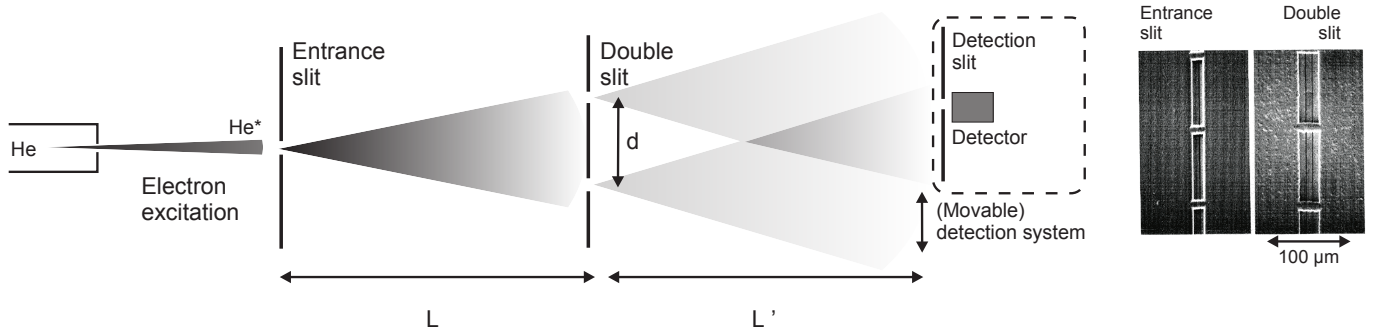


FIGURE 1 – Montage expérimental utilisé par Carnal et Mlynek. La figure d'interférences est visualisée en déplaçant l'ensemble constitué par la fente de sortie et le détecteur.  $L = L' = 64\text{ cm}$ . A droite, vue au microscope électronique des fentes utilisées..

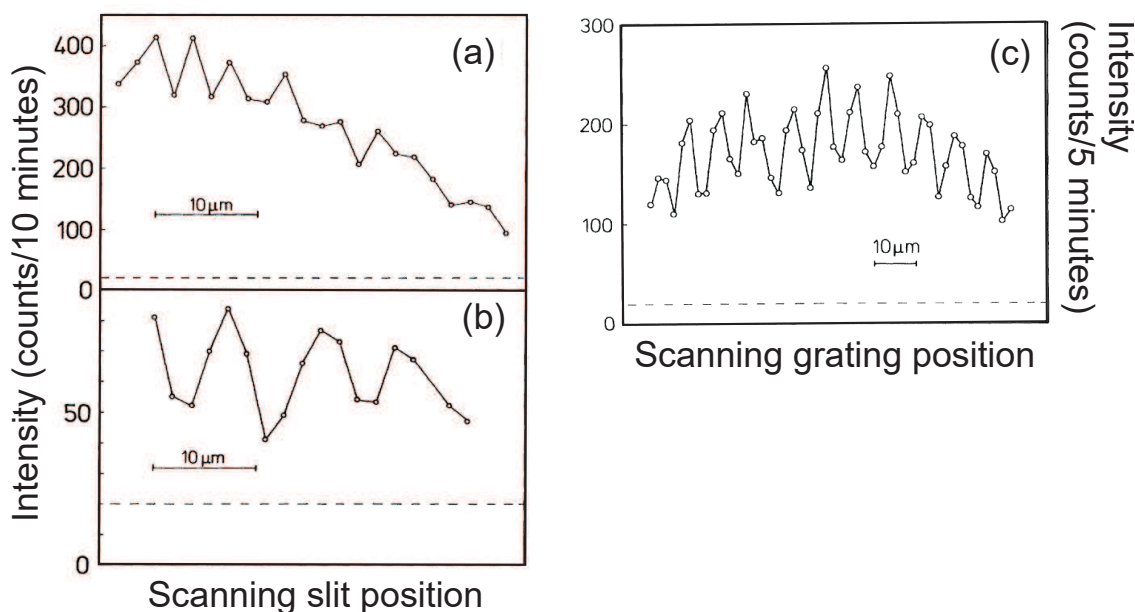


FIGURE 2 – **Résultats expérimentaux de Carnal et Mlynek.** Figures d'interférences obtenues pour  $T = 295$  K (a) et  $T = 83$  K (b et c). Pour limiter la durée de l'expérience, seule une moitié de la figure est visualisée. Remplacer la fente de sortie par un réseau dont la période est égale à celle attendue pour la figure d'interférences permet d'augmenter significativement le signal observé (c) par rapport à (b). Les pointillés représentent le bruit de fond du détecteur.

5. Quels facteurs peuvent limiter la visibilité des interférences ?
6. Pourquoi la source thermique ne peut-elle pas être un simple four ?
7. Depuis, des expériences similaires ont également été réalisées avec des entités aussi complexes que des biomolécules comme  $C_{60}$  ou  $C_{60}F_{48}$  (de masse  $m = 1632$  uma).  
Quelles en sont d'après vous les principales difficultés ?

### Bibliographie :

La première expérience d'interférences avec des atomes, discutée ici :

O. Carnal et J. Mlynek, *Young's double-slit experiment : A simple atom interferometer*, Phys. Rev. Lett. **66**, 2689 (1991).

Deux expériences réalisées avec des molécules massives (fullérènes et biomolécules) :

M. Arndt *et al.*, *Wave-particle properties of  $C_{60}$  molecules*, Nature **401**, 680 (1999).

L. Hackermueller *et al.*, *Wave Nature of Biomolecules and Fluorofullerenes*,

Phys. Rev. Lett. **91**, 090408 (2003).

## 2 Interférences et règle de Born

En physique quantique, la densité de probabilité de présence d'une particule est donnée par le carré du module de sa fonction d'onde, de la même façon qu'en optique ondulatoire, l'intensité détectée est quadratique en champ. Pour tester cette hypothèse (dans le cadre de théories alternatives à la physique quantique), on réalise une expérience d'interférences lumineuses à trois fentes. Le montage expérimental est présenté sur la figure 3.

Soient  $\mathcal{E}_{A,B,C}$  les amplitudes du champ associées au passage de la lumière par une des trois fentes  $A, B, C$ .

1. Supposons  $C$  fermée. Ecrire la valeur  $P_{AB}(\mathbf{r})$  de l'intensité lumineuse détectée au point  $\mathbf{r}$  en fonction de  $\mathcal{E}_A$  et  $\mathcal{E}_B$ . Identifier le terme d'interférences  $I_{AB}$ .
2. L'expérience permet de mesurer les 7 figures d'interférences possibles avec au moins une fente ouverte :  $P_{ABC}, P_{AB}, P_{AC}, P_{BC}, P_A, P_B, P_C$ . Que vaudrait, en supposant qu'il existe, la valeur du terme d'interférences à trois chemins  $I_{ABC}$  en fonction de ces probabilités ?
3. On définit  $\epsilon = P_{ABC} - (P_{AB} + P_{AC} + P_{BC}) + (P_A + P_B + P_C)$  et  $\delta = I_{AB} + I_{AC} + I_{BC}$ , et on trace la quantité sans dimension  $\kappa = \epsilon/\delta$  pour différentes intensités de la source lumineuse. Interpréter les résultats et conclure.

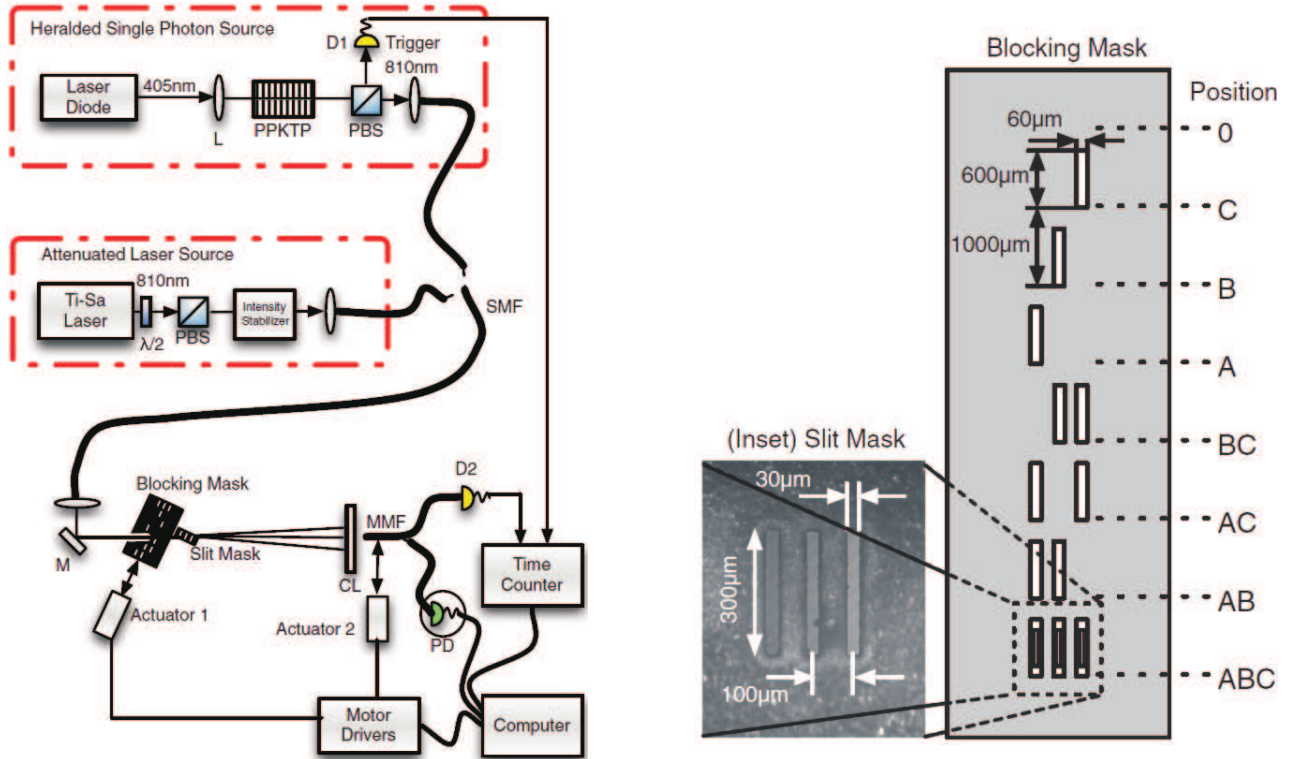


FIGURE 3 – Montage expérimental utilisé par Sinha *et al.* Deux sources lumineuses différentes (laser et source de photons uniques basée sur un cristal non linéaire qui émet des paires de photons) sont envoyées sur un système de fentes interchangeable. La figure d'interférences permet de remonter au facteur  $\kappa$  défini dans l'énoncé. A droite, détail des jeux de fentes utilisés.

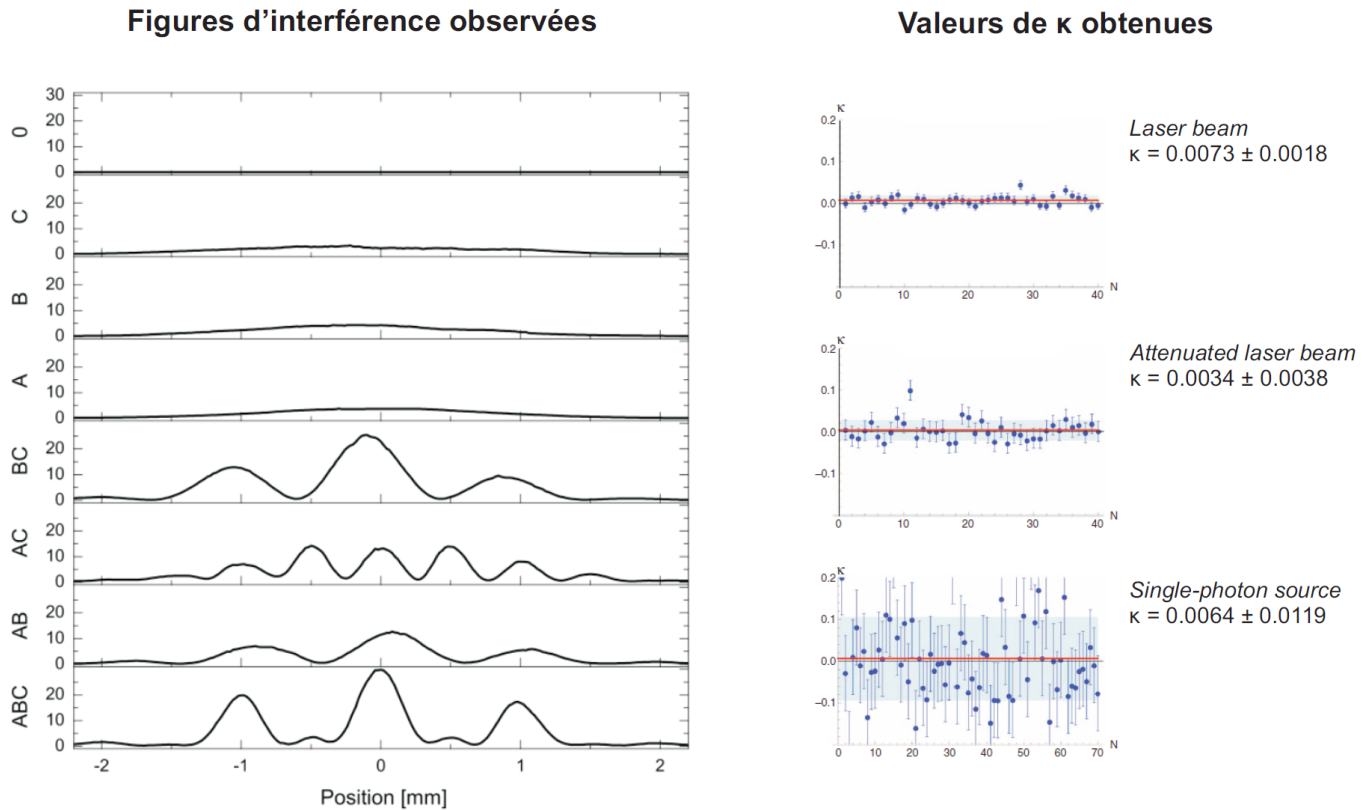


FIGURE 4 – Résultats de l'expérience de Sinha *et al.* A gauche : figures d'interférences obtenues expérimentalement pour les différents jeux de fentes. A droite : valeurs de  $\kappa$  obtenues au centre de la figure d'interférences, pour différents régimes d'intensité lumineuse et différentes réalisations de l'expérience.

4. Pourrait-on tester la règle de Born avec seulement deux fentes ? Quel est l'intérêt d'en utiliser trois ?
5. Quel est l'intérêt d'utiliser trois fentes fixes (slit mask) en plus du jeu de fentes multiples (blocking mask) ?

### Bibliographie :

U. Sinha, C. Couteau, T. Jennewein, R. Laflamme, G. Weihs,  
*Ruling out Multi-Order Interference in Quantum Mechanics*, Science **329**, 418 (2010).