

Activité : Interférences avec des atomes.

Syllabus de la préparation aux IPhOs France

6 Physique quantique

6.1 Densité de probabilité

Dualité ondes-particules :

Compétences et connaissances du programme de Tle S :

<i>Notions et contenus</i>	<i>Compétences exigibles</i>
Propriétés des ondes Diffraction. Influence relative de la taille de l'ouverture ou de l'obstacle et de la longueur d'onde sur le phénomène de diffraction. Cas des ondes lumineuses monochromatiques. Interférences.	Connaître et exploiter la relation $\theta = \lambda/a$. Identifier les situations physiques où il est pertinent de prendre en compte le phénomène de diffraction. Connaître et exploiter les conditions d'interférences constructives et destructives pour des ondes monochromatiques.

<i>Notions et contenus</i>	<i>Compétences exigibles</i>
Dualité onde-particule Particule matérielle et onde de matière ; relation de de Broglie.	Extraire et exploiter des informations sur les ondes de matière et sur la dualité onde-particule. Connaître et utiliser la relation $p = h/\lambda$. Identifier des situations physiques où le caractère ondulatoire de la matière est significatif.

Références :

Double-slit Experiment with atoms : A simple Atom Interferometer, PRL Volume 66 (21), 2689

Document EDUSCOL : Expérience de Carnal et Mlynek.

Measurement of the Wigner function of an ensemble of helium atoms, Nature vol. 386, 150

Double slit interference with ultracold metastable neon atoms, PRA, vol. 46 (1) R17

Introduction.

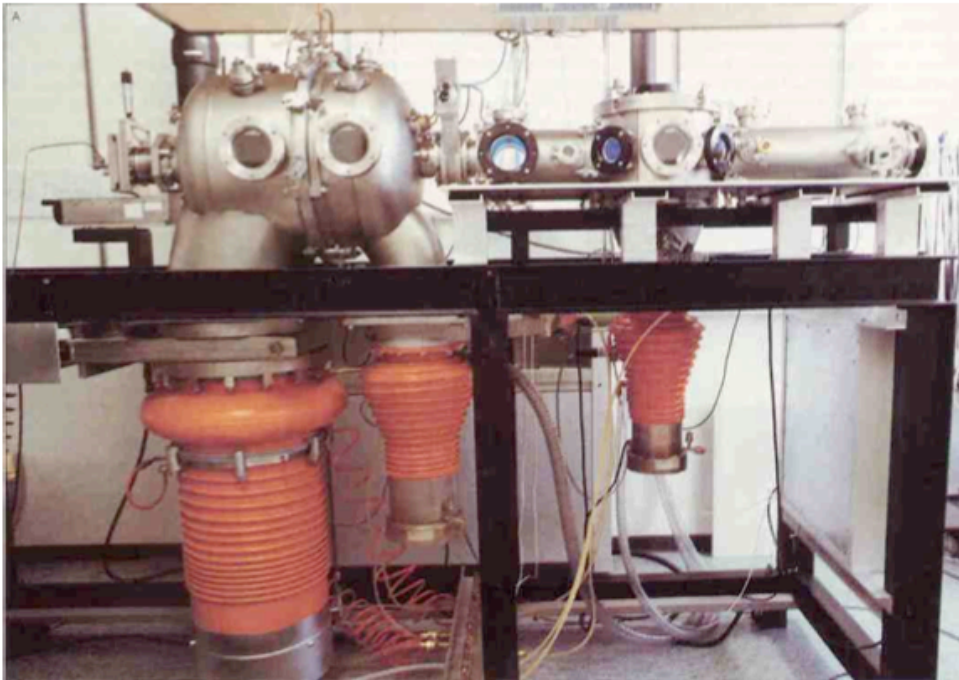
Cette activité repose sur la description et l'utilisation d'une expérience récente d'interférences utilisant des atomes d'hélium métastables.

Données :

- Masse d'un atome d'Hélium : $m_{\text{he}} = 4,00 \text{ u.a.}$
- Masse d'un atome de Néon : $m_{\text{ne}} = 20,2 \text{ u.a.}$
- Constante de Planck : $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$
- Constante de Boltzmann : $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$

Document 1 : Le principe.

En 1991, O. Carnal et J. Mlynek publient un article dans la revue scientifique *Physical Review Letters*. Les deux documents ci-dessous donnent la photographie du dispositif expérimental ainsi qu'un schéma très simplifié de l'expérience.



Document 1 – photographie du dispositif expérimental (La Recherche 247, oct. 1992)
Les dispositifs de couleur orange sont des pompes permettant d'obtenir un très bon vide dans l'enceinte supérieure où se déroule l'expérience.

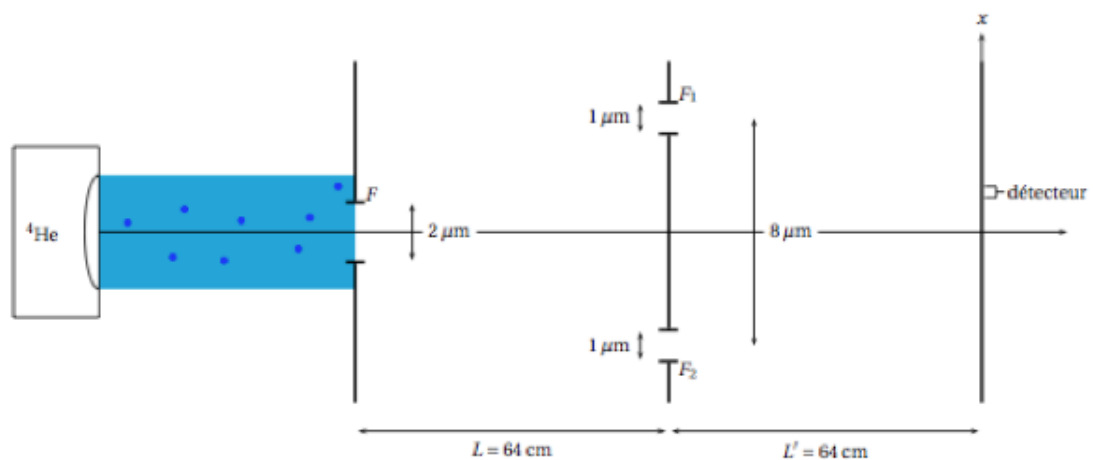


Figure 2. Schéma simplifié de l'expérience de Carnal et Mlynek.

Description sommaire de l'expérience :

Un réservoir, situé à gauche, émet des atomes d'hélium.

Ces atomes rencontrent une première fente F réalisée dans une feuille d'or. Ils rencontrent ensuite une autre feuille d'or percée de deux fentes F_1 et F_2 .

Le détecteur, situé à droite et placé à l'arrière de l'écran, compte les impacts individuels des atomes d'hélium. Le vide dans l'enceinte est suffisamment poussé pour que la probabilité d'une collision entre atomes d'hélium et molécules résiduelles de N_2 et O_2 soit extrêmement faible.

Document 2. Analogie avec une expérience d'optique.

2.1 Le rôle de la première fente :

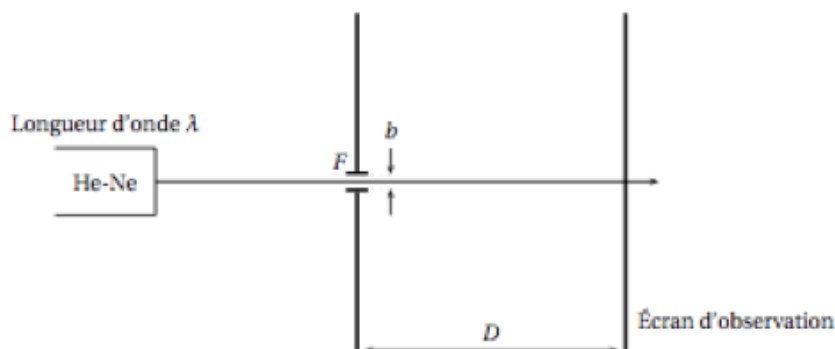


Figure 3. Diffraction par une fente de largeur b d'un faisceau laser monochromatique de longueur d'onde λ , la figure de diffraction est observée sur un écran placé à une distance D de la fente.

On éclaire une fente suffisamment fine à l'aide d'une source lumineuse monochromatique, un laser HeNe par exemple.

Questions pour le document 2.1 :

- Dessiner et nommer la figure obtenue sur l'écran ci-dessus.
- Donner l'expression de la largeur de la tache lumineuse observée sur l'écran en fonction de λ , b et D .
- En transposant le résultat de la question à l'expérience de Carnal et Mlynek décrite sur la figure 2, proposer une explication à la détection d'atomes d'hélium par le détecteur placé après les fentes F_1 et F_2 .

2.2 Analogie avec l'expérience des fentes de Young en optique.

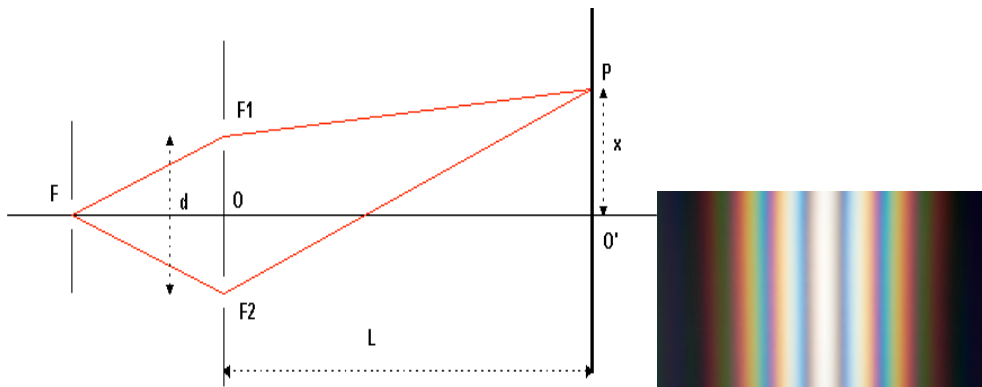


Figure 4. Dispositif des fentes de Young en optique. Un faisceau de lumière blanche traverse une première fente F puis il est diffracté sur deux fentes F1 et F2 séparés d'une distance d . On observe sur un écran placé à une distance L des fentes une figure d'interférences dont l'interfrange $i = \lambda L/d$.

Dans le cas des fentes d'Young éclairées par une onde lumineuse monochromatique, l'interfrange est la distance séparant deux franges consécutives de même nature (claires ou sombres).

Document 3. Les résultats.

Deux expériences ont été réalisées à 2 températures différentes du gaz d'hélium, température ambiante et température de l'azote liquide ;

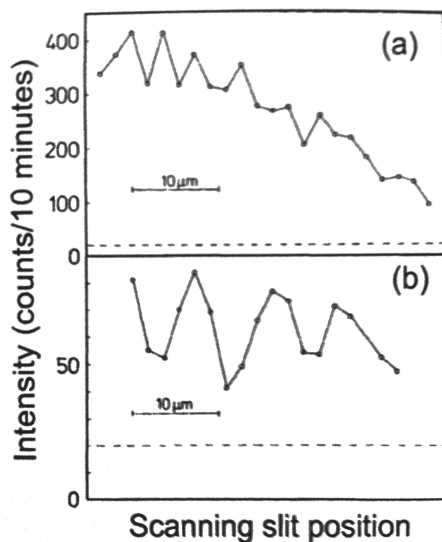


Figure 5. Résultat du détecteur pour deux températures différentes. a) $T = 295 \text{ K}$ b) $T = 83 \text{ K}$.

Le détecteur possède une résolution de $2 \mu\text{m}$ et il est déplacé toutes les 10 minutes de $1,88 \mu\text{m}$. Les pointillés représentent le bruit de fond du détecteur. En ordonnée, le nombre d'atomes détectés en 10 minutes.

Questions pour le document 3 :

- Estimer les interfranges des deux expériences, puis donner une valeur encadrée des longueurs d'onde associées aux atomes d'Hélium.
- Pourquoi l'interfrange de l'expérience b) est-elle plus petite que celle de l'expérience a).
- Proposer une explication pour la mauvaise visibilité des franges.

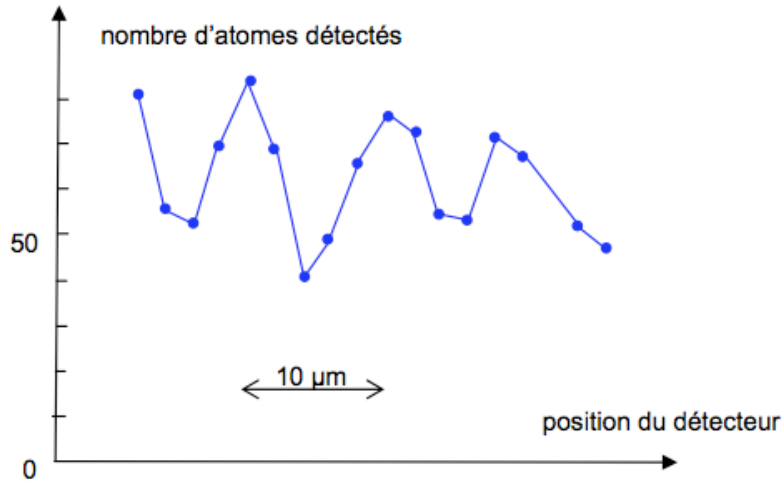


Figure 6. Résultat de l'expérience pour une température de 83 K. La vitesse moyenne des atomes d'hélium dans le dispositif expérimental est de $970 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

- Calculer la longueur d'onde associée aux atomes d'hélium puis l'interfrange théorique attendu. Comparer avec les résultats de l'expérience.

Document 4. Cohérence atomique.

Dans une autre expérience réalisée l'année suivante à Tokyo, des atomes de néon métastables, refroidis autour du 2,5 mK, sont lâchés sur une double fente. Ils sont détectés sur une galette de détection. On observe là aussi une figure d'interférences analogue à celle des fentes de Young en optique.

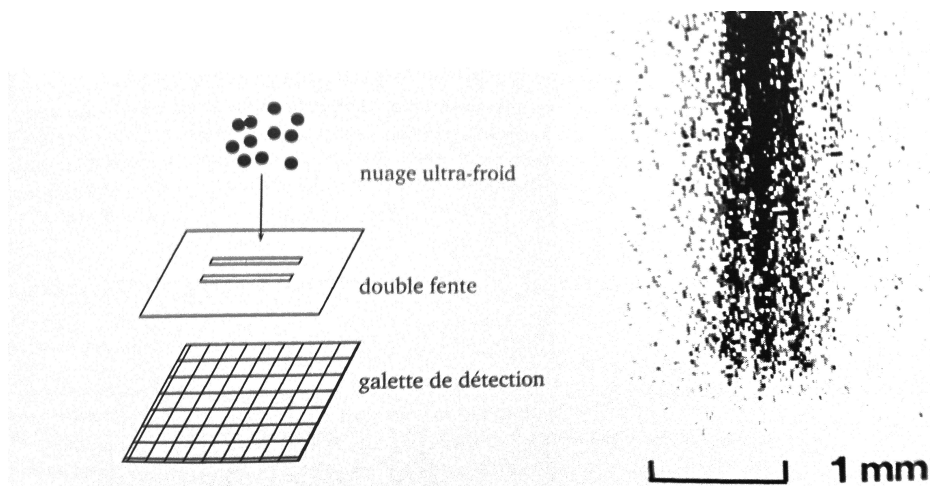


Figure 7. Schéma de l'expérience de Tokyo. Figure d'interférences composée de 6000 impacts d'atomes de Néon sur la galette de détection. Le nuage ultra-froid d'atomes de Néon (d'un mm de diamètre) est placé à 76 mm au-dessus des fentes qui ont une largeur de $2 \mu\text{m}$ et un espacement de $6 \mu\text{m}$. La galette de détection est située à 113 mm en dessous des fentes.

Pour la cohérence d'une assemblée d'atomes, on utilise la longueur d'onde thermique de de Broglie : elle correspond à l'étalement du paquet d'onde d'un atome. C'est l'analogie strict de la longueur de cohérence qui caractérise un train d'onde d'une source lumineuse.

$$\lambda_{Th} = h / \sqrt{3mkT}$$

Questions pour le document 4 :

- Calculer cette longueur d'onde thermique pour les atomes de Néon à la température de l'ordre de 2,5 mK. La comparer à l'espacement des fentes. La comparer à la longueur d'onde thermique de De Broglie des atomes d'Hélium à 83 K dans l'expérience de Mlynek. Pourquoi n'y a-t-il pas besoin de fente supplémentaire dans cette expérience ? (résultat à comparer avec des franges de Young prises en lumière blanche et avec une lampe spectrale).

« On peut préciser les deux expériences d'optiques analogues aux deux expériences atomiques précédentes (celle de Carnal et Mlynek et celle de Tokyo). L'expérience de Carnal et Mlynek ressemble à une expérience d'optique (de type fentes de Young) menée avec une lampe à incandescence. Cette source est très peu monochromatique, la cohérence est très faible. Il est donc délicat de réaliser des interférences avec cette source. En pratique, il faut une première fente de diffraction et l'on n'obtient malgré tout que quelques franges visibles. L'expérience de Tokyo consiste, elle, à partir d'emblée avec une source beaucoup plus cohérente. On pourrait considérer une lampe spectrale, par exemple une lampe au sodium, dont on a isolé une raie d'émission. Avec une telle source, il est relativement facile d'obtenir une dizaine de franges d'interférences. »

E. Jahier ; Les atomes froids ; EDP Sciences.

Document 5. Approfondissements : Une expérience similaire en 1998.

En 1998, Mlynek a amélioré son expérience de 1991 en utilisant cette fois ci un détecteur d'atomes résolu en temps.

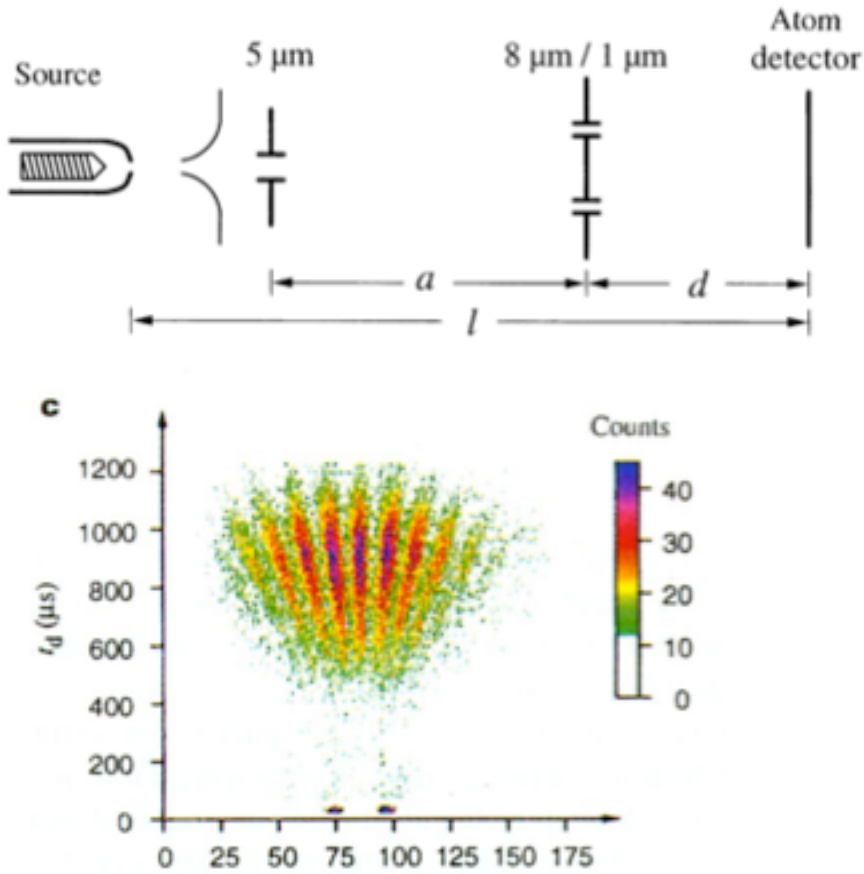


Figure 8. Expérience de Constance en 1998. Schéma de l'expérience. Une source produit un jet pulsé d'atomes d'hélium dont la vitesse peut varier entre 1000 et $3000\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Ces atomes traversent une première fente de collimation de largeur $5\ \mu\text{m}$ puis arrivent sur un système de double fente dont la largeur vaut $1\ \mu\text{m}$ et l'espacement est de $8\ \mu\text{m}$. Ils sont détectés par la suite sur un détecteur linéaire de $200\ \mu\text{m}$ de large et résolu en temps ($100\ \text{ns}$) situé à $d = 1,95\ \text{m}$ des fentes.

Résultats expérimentaux sur le détecteur résolu en temps pour une durée d'acquisition de 49 heures. En ordonnée, le temps de vol des atomes entre les fentes et le détecteur : $t_d = d/v$. En abscisse, la résolution spatiale du détecteur en μm . En couleurs, les atomes détectés.

Questions pour le document 5 :

- A l'aide d'une mesure de temps de vol sur les résultats de la figure 8, retrouver la vitesse des atomes correspondants puis la valeur de l'interfrange pour cette vitesse. Le résultat est-il cohérent avec les valeurs expérimentales ?