

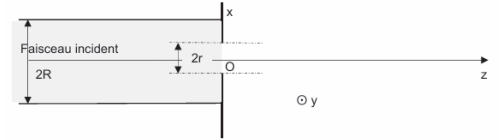
DS 2h Induction et quantique

1 Dualité onde-corpuscule

Données : Constante de Planck $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$; Constante de Planck réduite $\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,05 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$; Vitesse de la lumière dans le vide $c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; Constante de Boltzmann $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$; Masse de l'électron $m = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$; Charge élémentaire $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$; Constante des gaz parfaits $R = 8,31 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$; Constante d'Avogadro $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \cdot \text{mol}^{-1}$

A/ pour la lumière

Q1. a) On considère un faisceau parallèle de photons associés à une onde électromagnétique, de longueur d'onde λ , se propageant dans l'air assimilé au vide dans la direction Oz de vecteur unitaire \vec{e}_z (figure). Rappeler ce que vaut leur énergie E en fonction de λ, c et de h et leur quantité de mouvement \vec{p} en fonction de λ, h et de \vec{e}_z .



b) Calculer l'énergie en eV d'un photon de lumière bleue de longueur d'onde 475 nm

Q2. Ce faisceau parallèle cylindrique de rayon R arrive face à un écran, perpendiculaire à l'axe du faisceau, percé d'un trou circulaire T_1 de centre O et de rayon r (inférieur à R) (figure).

a) Établir, à partir de l'inégalité d'Heisenberg spatiale, qu'il y a forcément ouverture angulaire du faisceau.

b) Donner un ordre de grandeur de cette ouverture angulaire supposée petite. Commenter. Comment appelle-t-on ce phénomène ?

Q3. Citer une expérience qui met en évidence l'aspect corpusculaire de la lumière.

Q4. Un électron est expulsé d'un métal sous l'effet d'une radiation s'il absorbe une énergie au moins égale à W_e , énergie appelée travail " d'extraction ". Le tableau ci-dessous indique les valeurs du travail " d'extraction " pour différents métaux :

Métal	Cs	Na	K	Ti	Fe
We en eV	1,15	2,11	2,22	4,33	4,67

Avec quels métaux cités dans le tableau, la lumière bleue du Q1.b permet-elle d'obtenir un effet photoélectrique? Justifier. Quelle sera la vitesse maximale des électrons émis? Commenter.

Q5. a) On utilise une source optique de puissance 1 mW : évaluer l'ordre de grandeur du nombre de photons qui sortent de la source par unité de temps en supposant le faisceau rigoureusement monochromatique de longueur d'onde $\lambda = 632,8 \text{ nm}$.

b) À quel niveau de puissance faudrait-il descendre, pour une source, pour que la lumière qu'elle émet soit détectée photon par photon? On admet que les détecteurs photoniques ont un temps de réponse de l'ordre de la picoseconde (le préfixe pico correspond à 10^{-12}).

c) Décrire l'évolution des observations sur le détecteur en fonction de la durée d'observation dans la situation des interférences, par deux fentes d'Young éclairées par la source du Q5.b, modélisée par une source à photons uniques.

d) Traduire ces observations en termes d'amplitude de probabilité pour un photon, détecté en un point M. Le principe de superposition s'applique-t-il aux probabilités ou aux amplitudes de probabilités (= fonctions d'onde) ?

B/ Pour la matière

Q6. a) Après avoir rappelé la formule de De Broglie, établir la longueur d'onde associée à un faisceau d'électrons accélérés par une différence de potentiel égale à $U = 100 \text{ V}$.

b) Pourquoi un microscope électronique a-t-il un meilleur pouvoir de résolution qu'un microscope optique conventionnel? Après la réalisation d'interférences avec des électrons et des neutrons, des expériences " historiques " d'interférences avec des atomes ont été réalisées en 1991 avec de l'Hélium par Carnel et Mlynek à Constance et en 1992 avec du Néon par Shimizu et Takuma à Tokyo.

Q7. Après avoir cité le théorème d'équipartition de l'énergie, établir la valeur de la vitesse quadratique moyenne u d'un atome de masse m à la température T . Indiquer les valeurs manquantes du tableau ci-dessous (cellule notée « ? »).

Réponse : Le théorème d'équipartition de l'énergie indique que chaque degré de liberté du système apporte une énergie cinétique valant $\frac{1}{2}k_B T$ où $k_B = \frac{R}{N_A}$ est la constante de Boltzmann.

Pour des atomes seul, il n'y a que trois degrés de liberté correspondant aux trois translations dans l'espace.

On a donc : $\frac{1}{2}mu^2 = \frac{3}{2}k_B T$, et donc : $u = \sqrt{\frac{3k_B T}{m}} = \sqrt{\frac{3RT}{mN_A}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}$.

Atome	Masse atomique en $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$	Vitesse u à $T_1 = 295 \text{ K}$	Vitesse u à $T_2 = 83 \text{ K}$	Vitesse u à $T_3 = 2,5 \text{ mK}$
Hélium	4	?	$225 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	—
Néon	20	—	—	?

Q8. Dans l'expérience de 1991 (figure 6), la source est un dispositif d'émission thermique d'atomes d'hélium He suivie d'une fente diaphragme F. Le montage est celui d'une division du front d'onde de type fentes d'Young. Le plan de la double fente est placé à la distance $L = 64 \text{ cm}$ de la fente F et à la distance $L' = 64 \text{ cm}$ du plan le long duquel est déplacé le détecteur qui comptabilise les impacts de particules.

Les atomes d'hélium sont émis soit à la température $T_1 = 295 \text{ K}$, soit à la température $T_2 = 83 \text{ K}$.

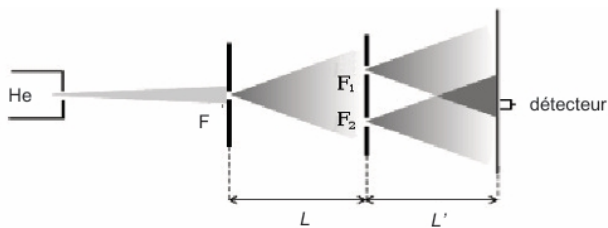


Figure 6 - Expérience de 1991

a) On admet qu'il y a diffraction du faisceau de particules au passage par F, puis par les fentes F_1 et F_2 , c'est-à-dire ouverture angulaire du faisceau d'un angle voisin de $2\lambda/\varepsilon$ avec ε la largeur de fente. La largeur de la fente F vaut $2\mu\text{m}$ et celles des fentes F_1 et F_2 valent $1\mu\text{m}$. La distance entre elles vaut $a = 8\mu\text{m}$. Vérifier que les chemins d'amplitude de probabilité permettent d'envisager deux chemins différents des particules avant leur détection.

b) Le détecteur met en évidence des droites parallèles équidistantes sur lesquelles le nombre des impacts est très élevé et entre ces droites, des zones quasiment sans impacts. Interpréter.

c) Estimer la distance entre ces droites pour les températures T_1 et T_2 .

Q9. L'expérience de 1992 est aussi un dispositif interférentiel de fentes d'Young, mais on utilise le champ de pesanteur pour accélérer les atomes de Néon (figure 7). Les atomes de Néon, supposés indépendants les uns des autres, sont lâchés sans vitesse initiale et tombent dans le champ de pesanteur $g = 9,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

a) On mesure un interfrange de $1,1 \text{ mm}$: que vaut la longueur d'onde associée ? Quelle valeur de la vitesse en déduisez-vous au niveau du détecteur ?

b) En appliquant les lois de la mécanique classique, évaluer la vitesse des particules en chute libre au niveau des fentes. Que vaut-elle au niveau du détecteur ? Commenter.

c) Pourquoi a-t-on utilisé des atomes ultra-froids ?

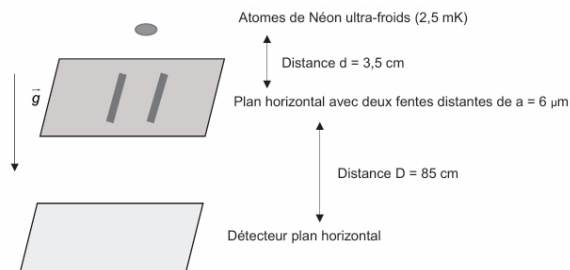


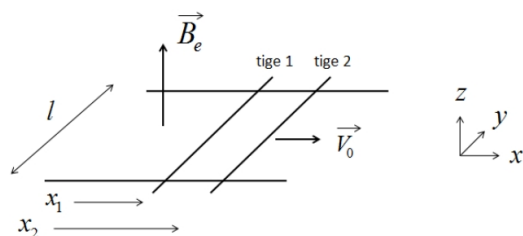
Figure 7 - Expérience de 1992

2 Double rail de Laplace

Deux tiges de Laplace, de même masse m , de longueur l , peuvent glisser sans frottement sur deux rails orientés selon un axe (Ox) . On note R la résistance (constante) de l'ensemble du circuit conducteur ainsi formé.

Un champ magnétique extérieur \vec{B}_e , uniforme et permanent, est créé. On néglige l'induction propre du circuit.

Initialement, les deux rails sont côte à côte, à l'abscisse $x_1(0) = x_2(0) = 0$. A $t = 0$, la tige 2 est lancée avec une vitesse initiale V_0 , alors que la tige 1 est immobile. On néglige les frottements.



1) Montrer qualitativement que la tige 2 va ralentir, alors que la tige 1 va se mettre en mouvement.

2) Déterminer l'équation mécanique de chaque tige, notamment en fonction du courant i circulant dans le dispositif.

3) Exprimer le flux du champ \vec{B}_e à travers le circuit. En déduire le courant i circulant dans le montage, en fonction de B_e, l, V_1, v_2 et R . En déduire le système de 2 équations couplées, vérifiées par v_1 et v_2 (aucune autre variable que v_1 et v_2 ne doit apparaître).

4) On pose $S = v_1 + v_2$ et $D = v_2 - v_1$. Déterminer $S(t)$ ainsi que $D(t)$.

5) En déduire l'évolution de $v_1(t)$ et $v_2(t)$. Quel type de mouvement obtient-on après une durée suffisamment longue ?

6) Calculer la variation d'énergie cinétique ΔE_c du système { tige 1 + tige 2 }, et commenter.