Ondes et particules

Bac S 2014 Amérique du Nord (ancien programme) · Exercice 1 **6 points** **Durée conseillée 1 h**

1 Partie A. Qualifier les interférences aux points A et B de l'écran.

Le point A est situé au centre d'une frange brillante : l'intensité lumineuse y est maximale, les interférences y sont **constructives**.

Le point B est situé au centre d'une frange sombre : l'intensité lumineuse y est minimale, les interférences y sont **destructives**.

En A : interférences constructives ; en B : interférences destructives.

COMPRENDRE
Les deux fentes se comportent comme deux sources cohérentes. Selon la différence de marche entre les deux ondes au point considéré, leurs effets s'ajoutent ou se compensent.

2 Partie A. Parmi les ondes (a), (b) et (c), choisir en justifiant les deux ondes qui interfèrent en A et les deux qui interfèrent en B.

Les ondes (a) et (c) ont la même période et sont **en phase** : leurs maxima se produisent aux mêmes dates. Leur superposition donne une onde d'amplitude plus grande : ce sont elles qui interfèrent en A (interférences constructives).

Les ondes (a) et (b) ont la même période mais sont **en opposition de phase** : quand l'une passe par un maximum, l'autre passe par un minimum. Leurs élongations se compensent : ce sont elles qui interfèrent en B (interférences destructives).

En A : ondes (a) et (c) ; en B : ondes (a) et (b), ou de même (b) et (c).

PIÈGE
Citer les couples sans justification. Les mots attendus sont « en phase » pour A et « en opposition de phase » pour B.

MÉTHODE
Pour comparer deux ondes de même période, regarder la première variation à partir de l'origine : (a) et (c) commencent par croître, (b) commence par décroître.

1.1 Partie B. Peut-on prévoir la position de l'impact d'un électron sur l'écran ? Justifier.

Sur le document 2, pour 50 ou 100 impacts, les points sont répartis sur l'écran sans ordre apparent, alors que tous les électrons sont émis dans les mêmes conditions.

La position de l'impact d'un électron donné est donc aléatoire.

Non : on ne peut pas prévoir la position de l'impact d'un électron.

COMPRENDRE
Seule la probabilité qu'un électron arrive à un endroit donné de l'écran peut être connue : le phénomène a un caractère probabiliste.

1.2 Partie B. En quoi cette expérience met-elle en évidence la dualité onde-particule pour l'électron ?

Aspect particulaire. Chaque électron laisse sur l'écran un impact ponctuel, localisé : il est détecté comme une particule.

Aspect ondulatoire. Quand le nombre d'impacts devient grand (1000 puis 5000 impacts), des bandes verticales riches en impacts alternent avec des bandes presque vides. Cette figure est une figure d'interférences, analogue aux franges brillantes et sombres obtenues avec la lumière : or les interférences sont caractéristiques des ondes.

Les électrons étant émis un à un, c'est bien à chaque électron qu'il faut associer une onde.

L'électron présente à la fois un comportement de particule (impacts ponctuels) et un comportement d'onde (figure d'interférences) : c'est la dualité onde-particule.

PIÈGE
« Détailler » demande deux arguments tirés des documents : un pour l'aspect particule, un pour l'aspect onde. Affirmer la dualité sans s'appuyer sur les impacts ne rapporte pas les points.

COMPRENDRE
Les ondes de matière ne figurent plus au programme actuel de spécialité. Les interférences lumineuses, elles, y sont toujours.

2.1.1 Déterminer la valeur de la longueur d'onde de l'onde de matière associée à un électron, donnée par la relation de de Broglie.

Données utiles $h = 6{,}6 \times 10^{-34}\ \text{J} \cdot \text{s}$; $m_e = 9{,}1 \times 10^{-31}\ \text{kg}$; $v = 1{,}3 \times 10^{8}\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; incertitude admise : $5 \times 10^{-13}\ \text{m}$

Relation de de Broglie : $\lambda = \dfrac{h}{p}$, où $p = m_e\, v$ est la quantité de mouvement de l'électron. Donc

$$\lambda = \frac{h}{m_e\, v} = \frac{6{,}6 \times 10^{-34}}{9{,}1 \times 10^{-31} \times 1{,}3 \times 10^{8}} = 5{,}6 \times 10^{-12}\ \text{m}$$

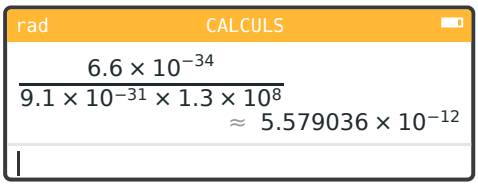
Avec l'incertitude admise par l'énoncé, $5 \times 10^{-13}\ \text{m} = 0{,}5 \times 10^{-12}\ \text{m}$:

$\lambda = (5{,}6 \pm 0{,}5) \times 10^{-12}\ \text{m}$, soit environ 5,6 pm.

COMPRENDRE
Deux chiffres significatifs, comme toutes les données. L'incertitude porte sur le chiffre des dixièmes de picomètre : le résultat s'arrête à ce chiffre.

COMPRENDRE
La relation de de Broglie et la quantité de mouvement ne sont plus au programme actuel de spécialité. De plus, à 43 % de c, l'expression $p = m_e\, v$ n'est qu'approchée ; le sujet l'admet.

À LA CALCULATRICE



2.1.2 Vérifier la cohérence des observations expérimentales avec le résultat précédent.

Données utiles document 1 : $b = 0{,}8 \pm 0{,}2\ \mu\text{m}$, $D = 35{,}0 \pm 0{,}1\ \text{cm}$; $\Delta i = 0{,}2\ \mu\text{m}$; λ (2.1.1)

Interfrange. Sur le document 2 (5000 impacts), les bandes riches en impacts sont centrées en $y = -4$; -2 ; 0 ; 2 et $4\ \mu\text{m}$: quatre interfranges couvrent $8{,}0\ \mu\text{m}$, donc $i = \dfrac{8{,}0}{4} = 2{,}0\ \mu\text{m}$.

Longueur d'onde expérimentale. De $i = \dfrac{\lambda D}{b}$ on tire

$$\lambda_{\text{exp}} = \frac{i\,b}{D} = \frac{2{,}0 \times 10^{-6} \times 0{,}8 \times 10^{-6}}{35{,}0 \times 10^{-2}} = 4{,}57 \times 10^{-12}\ \text{m}$$

Incertitude.

$$\Delta\lambda = 4{,}57 \times 10^{-12} \times \sqrt{\left(\frac{0{,}2}{2{,}0}\right)^2 + \left(\frac{0{,}2}{0{,}8}\right)^2 + \left(\frac{0{,}1}{35{,}0}\right)^2} = 1{,}2 \times 10^{-12}\ \text{m}$$

Arrondie par excès à un chiffre significatif : $\Delta\lambda = 2 \times 10^{-12}\ \text{m}$, d'où $\lambda_{\text{exp}} = (5 \pm 2) \times 10^{-12}\ \text{m}$.

Comparaison. L'intervalle expérimental $[3\ ;\ 7]\ \text{pm}$ contient la valeur $5{,}6\ \text{pm}$ de la question 2.1.1 (intervalle $[5{,}1\ ;\ 6{,}1]\ \text{pm}$).

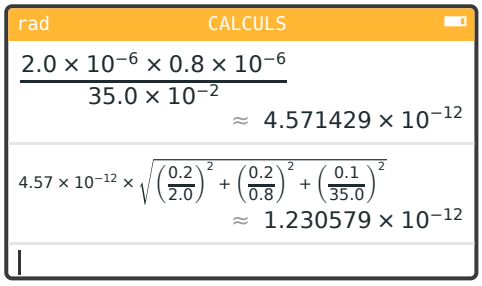
$\lambda_{\text{exp}} = (5 \pm 2) \times 10^{-12}\ \text{m}$: les observations sont cohérentes avec la valeur $(5{,}6 \pm 0{,}5) \times 10^{-12}\ \text{m}$ donnée par la relation de de Broglie.

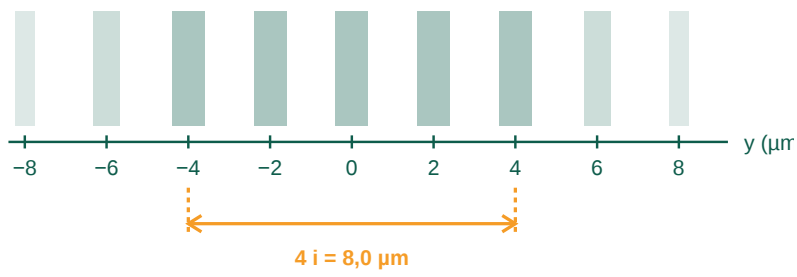
PIÈGE
Convertir i, b et D en mètres avant le calcul. Garder la valeur non arrondie $4{,}57 \times 10^{-12}$ pour calculer l'incertitude, et n'arrondir qu'à la fin.

COMPRENDRE
Le terme en $\Delta b/b$ (25 %) domine largement : c'est la distance entre les fentes, mal connue, qui limite la précision de la mesure.

MÉTHODE
Mesurer plusieurs interfranges puis diviser : la lecture est plus précise que sur un seul. Deux résultats sont cohérents quand leurs intervalles, valeur ± incertitude, se recouvrent.

À LA CALCULATRICE





2.1.2 · Document 2 (5000 impacts) : lecture de quatre interfranges

2.2.1 Une seule fente, de largeur a, reste ouverte. Quel est le phénomène physique observé ?

Après la fente, les électrons ne restent pas sur l'axe Ox : ils se répartissent sur l'écran en une tache centrale large, bordée de taches secondaires beaucoup moins marquées, séparées par des zones où la probabilité de présence est nulle.

Le phénomène observé est la **diffraction** de l'onde de matière associée aux électrons par la fente.

COMPRENDRE
La diffraction est, comme les interférences, propre aux ondes. Plus la fente est étroite, plus la tache centrale est large.

2.2.2 À partir du document 3, déterminer la valeur de l'angle θ.

Données utiles $D = 35{,}0\ \text{cm}$; document 3 : première annulation en $y = 8\ \mu\text{m}$; $\tan\theta \approx \theta$

Sur le schéma, M est le bord de la tache centrale, c'est-à-dire la première annulation de la densité de probabilité. Le document 3 donne $OM = 8{,}0\ \mu\text{m}$ (demi-largeur de la tache centrale).

Dans le triangle rectangle formé par la fente, O et M : $\tan\theta = \dfrac{OM}{D}$, et comme l'angle est petit, $\theta \approx \tan\theta$:

$$\theta = \frac{OM}{D} = \frac{8{,}0 \times 10^{-6}}{35{,}0 \times 10^{-2}} = 2{,}3 \times 10^{-5}\ \text{rad}$$

$\theta = 2{,}3 \times 10^{-5}\ \text{rad}$

PIÈGE
Prendre la largeur totale de la tache centrale ($16\ \mu\text{m}$) au lieu de sa demi-largeur : θ est repéré depuis l'axe Ox. L'angle obtenu est en radians, pas en degrés.

À LA CALCULATRICE

rad CALCULS

$$\frac{8.0 \times 10^{-6}}{35.0 \times 10^{-2}} \approx 2.285714 \times 10^{-5}$$

2.2.3 À partir de la valeur de cet angle, retrouver l'ordre de grandeur de la longueur d'onde de l'onde de matière associée à un électron.

Données utiles $a = 0{,}2\ \mu\text{m}$; θ (2.2.2)

Pour la diffraction par une fente de largeur a, l'angle θ entre le centre de la tache centrale et la première extinction vérifie $\theta = \dfrac{\lambda}{a}$, avec θ en radians. Donc

$$\lambda = \theta\, a = 2{,}3 \times 10^{-5} \times 0{,}2 \times 10^{-6} = 5 \times 10^{-12}\ \text{m}$$

$\lambda \approx 5 \times 10^{-12}\ \text{m}$: quelques picomètres, le même ordre de grandeur que la valeur $5{,}6 \times 10^{-12}\ \text{m}$ de la question 2.1.1.

COMPRENDRE
Un seul chiffre significatif, comme a. On retrouve exactement la valeur de la question 2.1.2 : le document 3 a été construit avec $b = 4a$ et $OM = 4i$.

À LA CALCULATRICE

rad CALCULS

$$\frac{8.0 \times 10^{-6}}{35.0 \times 10^{-2}} \times 0.2 \times 10^{-6} \approx 4.571429 \times 10^{-12}$$