



## TD S8 – INTRODUCTION AU MONDE QUANTIQUE

D.Malka – MPSI 2016-2017 – Lycée Saint-Exupéry

Données pour l'ensemble des exercices :

- constante de Planck  $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$ ,
- célérité de la lumière dans le vide :  $c = 3,0 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$ ,
- nombre d'Avogadro  $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ ,
- électron-volt :  $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ .

### S1 – Sensibilité de la rétine

*On cherche à évaluer la sensibilité de la rétine de l'œil humain en terme de nombre de photons reçues.*



La rétine est composée de cellules photosensibles appelées cônes et bâtonnets. En vision nocturne, la pupille de l'œil s'ouvre pour atteindre un diamètre de  $4 \text{ mm}$  et la sensibilité des bâtonnets augmente énormément. On peut alors voir de façon continue à l'œil nu des étoiles dont la puissance lumineuse est supérieure ou égale à  $10^{-14} \text{ W.cm}^2$ .

On rappelle qu'une excitation de la rétine persiste pendant  $0,1 \text{ s}$  (phénomène de persistance rétinienne).

1. Estimer l'énergie d'un photon composant la lumière visible.
2. Combien de photons émis par une étoile de très faible intensité lumineuse la rétine perçoit-elle par unité de temps ?
3. Estimer alors la sensibilité de la rétine en terme de nombre de photons reçus. Commenter.

### S2 – Diffusion Compton

L'américain Arthur Compton a réalisé en 1923 l'expérience suivante. Il a envoyé des rayons X durs (c'est-à-dire une onde électromagnétique de fréquence élevée, donc de très faible longueur d'onde  $\lambda \approx 1 \text{ pm}$  à  $\lambda \approx 1 \text{ nm}$ ) sur une mince feuille de graphite. Il a observé que l'onde était diffusée (déviée) dans une certaine gamme de direction vérifiant :

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{mC}(1 - \cos \theta)$$

où  $\lambda'$  est la longueur d'onde diffusée,  $m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$  la masse de l'électron,  $h$  la constante de Planck et  $c$  la vitesse de la lumière.

1. Montrer que  $\lambda_C = \frac{h}{mC}$  est homogène à une longueur et la calculer. C'est la longueur Compton de l'électron.
2. Pourquoi l'effet Compton est facilement mis en évidence avec des rayons X durs ?
3. Comment évolue l'énergie d'un photon dans cette expérience, que se passe-t-il ?
4. Pour des rayons incidents tels que  $\lambda = 7,08 \cdot 10^{-11} \text{ m}$ , Compton a observé des rayons X diffusés à  $90^\circ$ . Quelle est leur longueur d'onde ?

5. Quelle est l'énergie perdue par un photon? Qu'en déduire sachant que l'énergie d'ionisation de la matière est de l'ordre de la dizaine d'eV ( $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ )?

*Cette expérience interprétée de façon corpusculaire a été une confirmation éclatante de la notion de photon.*

### S3 – Expérience de SHIMIZU et TAKUMA

En 1992, les physiciens japonais SHIMIZU et TAKUMA réalisaient une expérience d'interférences atomiques : un nuage d'atomes de néon (masse molaire  $M = 20,12 \text{ g.mol}^{-1}$ ) est lâché sans vitesse initiale  $76 \text{ mm}$  au dessus d'un écran percé de deux fentes parallèles, de largeur  $2 \mu\text{m}$  et distantes de  $e = 6,0 \mu\text{m}$ . Un détecteur MCP est située à une distance  $D = 113 \text{ mm}$  à l'aplomb du plan des fentes. Chaque point noir sur la plaque réceptrice représente l'impact d'un atome (fig.1) sur le détecteur.

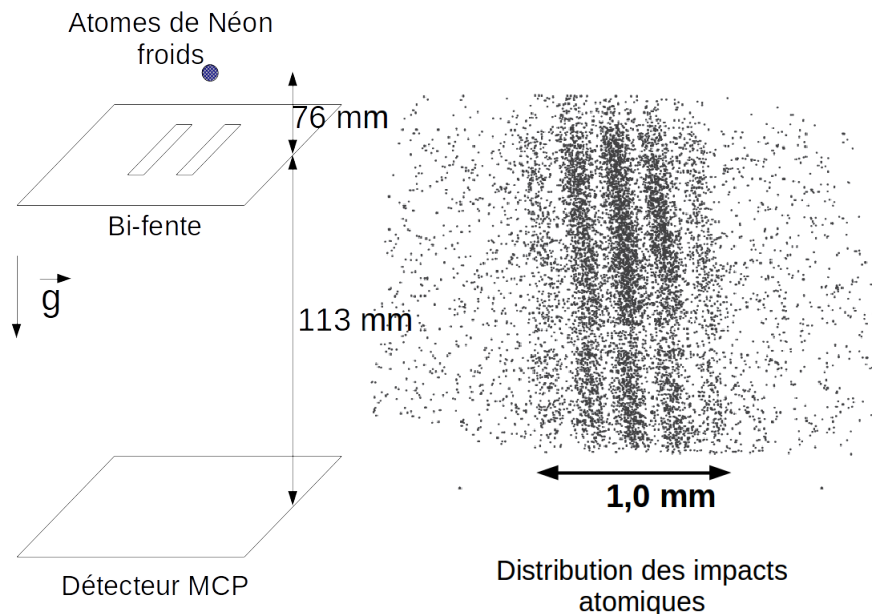


FIGURE 1 – Expérience de SHIMIZU et TAKUMA

1. En supposant que l'on peut traiter classiquement la chute des atomes de Néon, calculer la vitesse  $v_s$  de mouvement des atomes de Néon au niveau des fentes.
2. Vont-ils manifester un comportement (classiquement) ondulatoire? Justifier.
3. Expérimentalement, on observe la figure d'interférences (fig.1) sur la plaque de détection. Mesurer l'interfrange  $i$  (la distance entre deux franges brillantes) de la figure d'interférence.
4. L'interfrange est lié à longueur d'onde des atomes de Néon par la relation :

$$i = \frac{h}{m_{Ne} v_s} \frac{D}{e} \frac{2(\sqrt{1+\alpha}-1)}{\alpha} \quad \text{avec} \quad \alpha = \frac{2gD}{v_s^2}$$

Calculer la valeur théorique de  $i$ . Que penser du modèle?

### S4 – Absorption de photons par un puits quantique

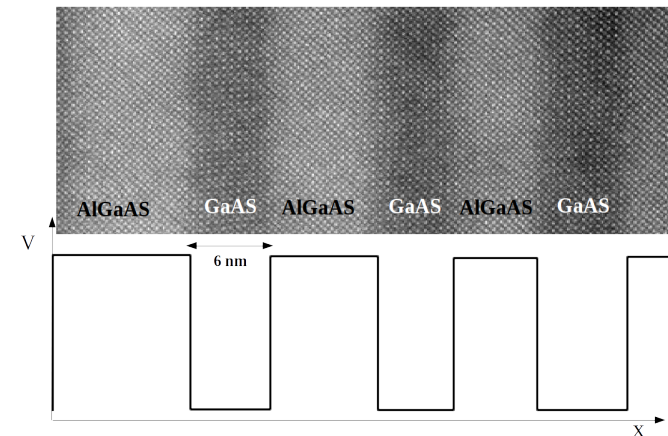


FIGURE 2 – Hétérostructures AlGaAs-GaAs-AlGaAs

1. En utilisant une analogie avec les modes propres d'une corde vibrante, déterminer l'expression des énergies accessibles  $E_n$  d'une particule libre de masse  $m$  confinée dans un puits quantique de largeur  $L$ . On exprimera

le résultat en fonction de  $m$ , de  $L$ , de la constante de Planck  $h$  et d'un entier naturel  $n$  non nul.

2. Ce puits quantique peut émettre ou absorber un photon de fréquence  $\nu_{n,k}$  si l'écart  $E_n - E_k$  entre deux niveaux d'énergie du puits vérifié la relation :

$$E_n - E_k = h\nu_{n,k}$$

- 2.1 Quelle est la signification physique de la relation précédente ?
- 2.2 Déterminer les fréquences  $\nu_{2,1}$  et  $\nu_{3,1}$ , ainsi que les longueurs d'onde correspondantes  $\lambda_{2,1}$  et  $\lambda_{3,1}$  pour un puits à semi-conducteur à base d'arséniure de gallium ( $AsGa$ ), de largeur  $L = 6,0 nm$  et tel que  $m = 0,067 m_e$  avec  $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} kg$ .
- 2.3 A quel domaine du spectre appartient les longueurs d'onde des photons obtenues dans la question précédente ? Proposer des applications pratiques de tels puits quantiques.