



TD S8 – INTRODUCTION AU MONDE QUANTIQUE

D.Malka – MPSI 2018-2019 – Lycée Jeanne d'Albret

Données pour l'ensemble des exercices :

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

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 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 $1 \times 10^{14} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$.

On rappelle qu'une excitation de la rétine persiste pendant 0,1 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 λ' est la longueur d'onde diffusée, $m = 9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}$ la masse de l'électron, h la constante de Planck et c la célérité 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 ?

- Comment évolue l’énergie d’un photon dans cette expérience, que se passe-t-il ?
- Pour des rayons incidents tels que $\lambda = 7,08 \times 10^{-11}$ m, Compton a observé des rayons X diffusés à 90° . Quelle est leur longueur d’onde ?
- 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’électron-volt ?

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 $M = 20,12 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$) est lâché sans vitesse initiale 76 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.

- 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.
- Vont-ils manifester un comportement (classiquement) ondulatoire ? Justifier.
- 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.
- 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

- 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

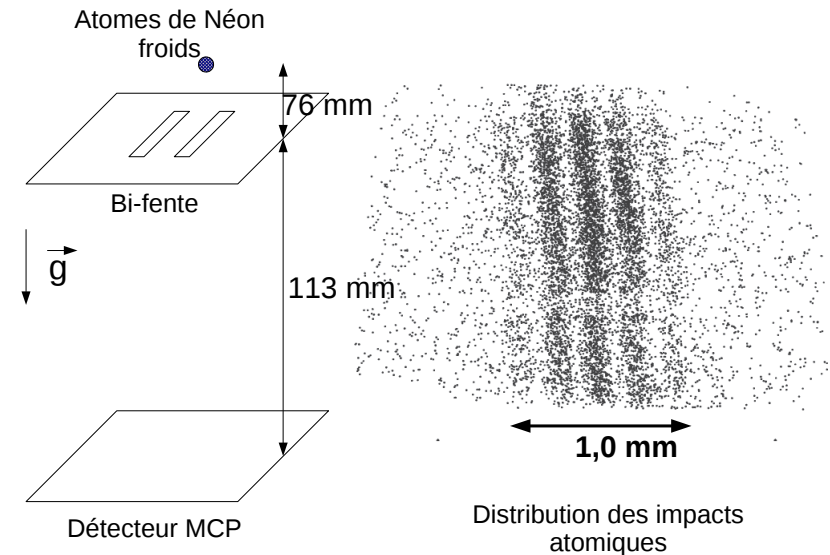


FIGURE 1 – Expérience de SHIMIZU et TAKUMA

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

- 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 :

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

- Quelle est la signification physique de la relation précédente ?
- 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 $L = 6,0 \text{ nm}$ et tel que $m = 0,067m_e$ avec $m_e = 9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}$.
- 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.

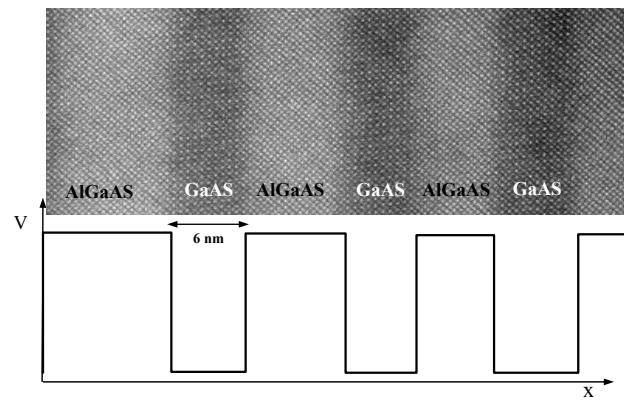


FIGURE 2 – Hétérostructures AlGaAs-GaAs-AlGaAs