

TDMQ1 – Introduction à la physique quantique

0 Exercices classiques vus en cours :

- A.2 – Annexe 1 :** Photon - Analyse de l'effet photoélectrique
- A.3 – Annexe 2 :** Onde de matière – Analyse de l'expérience des fentes d'Young
- B.2 :** Approche probabiliste – Interprétation de la figure d'interférences
- B.3 :** Inégalité de Heisenberg – Interprétation de la figure de diffraction
- C.2 :** Modèle de Bohr de l'atome d'H – Spectre d'émission

Capacités exigibles	ChMQ1	Ex1-2	Ex3	Ex4-6
Dualité onde-particule pour la lumière et la matière. Photon : énergie et impulsion. Décrire un exemple d'expérience mettant en évidence la nécessité de la notion de photon. Onde de matière associée à une particule. Relation de de Broglie. Décrire un exemple d'expérience mettant en évidence le comportement ondulatoire de la matière. Évaluer des ordres de grandeurs typiques intervenant dans des phénomènes quantiques.	•	•		•
Introduction au formalisme quantique. Fonction d'onde : introduction qualitative, interprétation probabiliste. Interpréter une expérience d'interférences (matière ou lumière) « particule par particule » en termes probabilistes. Inégalité de Heisenberg spatiale. Etablir par analogie avec la diffraction des ondes lumineuses, l'inégalité en ODG : $\Delta p \cdot \Delta x \geq \hbar$	•		•	
Quantification de l'énergie. Modèle planétaire de Bohr. Limites. Exploiter l'hypothèse de quantification du moment cinétique orbital pour obtenir l'expression des niveaux d'énergie électronique de l'atome d'H.	•			

1 Poussé par le Soleil ?

- 1 - Le flux lumineux solaire reçu sur Terre vaut $\phi = 1 \cdot 10^3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. En déduire le flux de photons ϕ_{ph} correspondant, c'est-à-dire le nombre de photons arrivant par mètre carré par seconde.
- 2 - Ces photons sont absorbés par un homme dos au Soleil. Quelle quantité de mouvement reçoit-il en une seconde ?
- 3 - À quelle force cela équivaut-il ? Commenter la valeur numérique obtenue.

2 Microscope électronique

Dans un microscope électronique, les électrons sont accélérés par une différence de potentiel d'une cinquantaine de kV, ce qui leur communique une énergie cinétique de 50 keV.

1. Quelle est la longueur d'onde de De Broglie d'un tel électron ?
2. Conclure quant à l'intérêt par rapport à un microscope optique.

3 Piégeage d'atomes

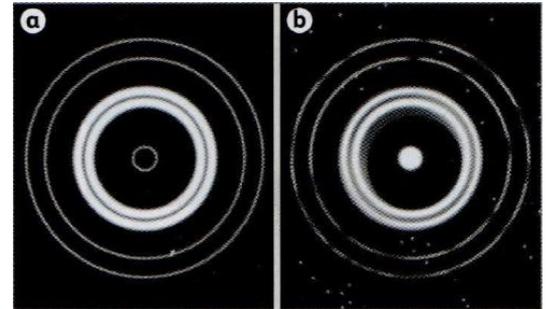
Par des techniques de refroidissement laser et confinement magnétique, on peut piéger un nuage d'atomes de sodium.

- ▷ Masse molaire du Sodium : $M = 23 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$
 - ▷ En étudiant les positions des atomes du nuage, on mesure une dispersion $\Delta x \sim 3 \mu\text{m}$;
 - ▷ En étudiant les vitesses de ces atomes, on mesure une dispersion $\Delta v \sim 2 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$.
- Peut-on améliorer le piégeage en gardant la même dispersion des vitesses ?

4 Expérience de G.P. Thomson

En 1927, les physiciens américains Davisson et Germer fournissaient la preuve expérimentale de l'hypothèse de Louis de Broglie en mettant en évidence le phénomène de diffraction d'électrons sur un échantillon monocristallin de Nickel. Quelques mois plus tard, le Britannique G. P. Thomson confirmait ce résultat en faisant passer un faisceau d'électrons monocinétique à travers une mince feuille de métal. Avec des électrons accélérés par une différence de potentiel de l'ordre de la dizaine de kilovolt, il obtint sur une plaque photographique placée derrière la cible une figure de diffraction comparable à celle observée avec des rayons X de même énergie.

La figure ci-contre représente les anneaux concentriques obtenus par diffraction (a) de rayons X ; (b) d'électrons, sur un mince feuillet métallique.



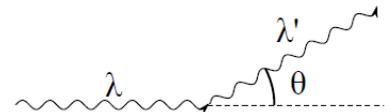
1. En quoi l'expérience de G. P. Thomson confirma-t-elle la nature ondulatoire des électrons ?
2. Expliquer pourquoi l'utilisation des rayons X est adaptée pour mener une étude cristallographique par diffraction.
3. Etablir la relation numérique approchée $\lambda \approx \frac{1,23}{\sqrt{U}}$ nm où U est la tension accélératrice en volts. En déduire la longueur d'onde des électrons utilisés par Thomson. Commenter.

5 Effet Compton

A. Compton a réalisé en 1923 l'expérience suivante : il a envoyé des rayons X durs (i.e. une onde électromagnétique de très faible longueur d'onde $\lambda \in [1 \text{ pm}, 1 \text{ nm}]$) sur une mince feuille de graphite.

Il a observé que l'onde était diffusée (déviée) dans une certaine gamme de directions θ (cf figure) vérifiant :

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



où λ' est la longueur d'onde diffusée, m la masse de l'électron, h la constante de Planck et c la vitesse de la lumière.

1. Montrer que $\frac{h}{mc}$ est homogène à une longueur et la calculer.
2. Pourquoi cette expérience est-elle spécialement intéressante pour les rayons X ?
3. Comment évolue l'énergie d'un photon dans cette expérience, que se passe-t-il ?
4. Pour des rayons X incidents tels que $\lambda = 7,08 \cdot 10^{-11} \text{ m}$, Compton a observé des rayons X diffusés à 90° . Quelle est leur longueur d'onde ?
5. Quelle est l'énergie perdue par le photon dans ce cas ? Conclure sachant qu'une énergie d'ionisation est de l'ordre de la dizaine d'eV?

Cette expérience peut être interprétée en termes corpusculaires, mais pas de manière ondulatoire, vu le changement de fréquence du rayonnement. Tout comme l'effet photoélectrique, elle illustre la nécessité de la notion de photon.

6 Suivi de la croissance d'une monocouche de semi-conducteur par diffraction RHEED (D'après PT 2016)

Les composants semi-conducteurs sont très répandus dans l'électronique moderne.

L'épitaxie par jet moléculaire est un processus de fabrication qui a commencé à être utilisé dans les années 70. Grâce à des jets d'atomes ou de molécules relativement lent, ce procédé a permis la création de couches de semi-conducteur dont l'épaisseur peut être monoatomique. On a pu ainsi créer des composants plus petits.

Principe de l'analyse RHEED :

Le contrôle de la croissance d'une monocouche se fait en temps réel au moyen d'une technique appelée diffraction d'électrons de hautes énergies en incidence rasante (en anglais RHEED). Le principe est d'envoyer des électrons d'énergie élevées sur le cristal en formation. Les électrons arrivant en incidence rasante, ils ne pénètrent pas dans le cristal et n'interagissent qu'avec la surface : on obtient donc une information uniquement sur la surface du cristal (ce qu'on cherche!). A la surface, les électrons vont être diffractés par chaque atome de Gallium du réseau cristallin. L'observation de la figure de diffraction (forme et intensité) donne des informations sur la structure de la couche formée et sur l'état d'avancement de la couche.

Modèle étudié :

Pour simplifier l'étude, on considérera une ligne d'atomes de Gallium uniformément répartis et non une surface. On limitera l'étude au plan d'incidence, c'est-à-dire le plan formé par le faisceau unidirectionnel incident d'électron et la « ligne » d'atomes de Gallium.

Soit un faisceau d'électron monodirectionnelle et monocinétique (tous les électrons ont la même énergie cinétique) arrivant sur une ligne d'atomes de Gallium avec un angle θ_0 (angle entre la ligne d'atomes et le faisceau (cf. Figure B.7)). Chaque atome agit comme un obstacle qui diffracte le faisceau incident dans toutes les directions de l'espace. On note θ l'angle entre la ligne d'atomes et un rayon électronique diffracté.

On place en aval une lentille convergente de distance focale f et un écran fluorescent dans le plan focal image de la lentille. Les tâches lumineuses sur l'écran sont proportionnelle à l'intensité du faisceau électronique incident.

Données :

- Distance entre deux atomes de Gallium successifs à la surface : $a=0,3 \text{ nm}$
- Ordre de grandeur de la taille d'un atome de Gallium : $r_{Ga} \approx 130 \text{ pm}$
- Énergie cinétique des électrons émis $E_e=1 \times 10^4 \text{ eV}$ (on prendra $1 \text{ eV}=2 \times 10^{-19} \text{ J}$)
- Distance focale de la lentille $f'=50 \text{ cm}$

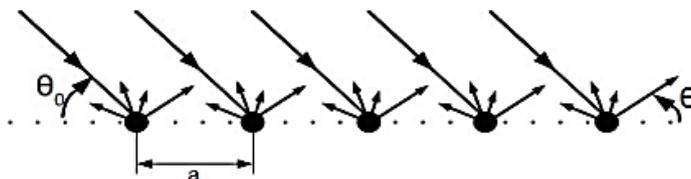


Figure B.7 : Diffraction du faisceau électronique sur le réseau d'atomes.

Q34. Quel aspect dual de la matière la relation de De Broglie souligne-t-elle ?

Q35. Justifier qu'un faisceau électronique dit « monocinétique » est aussi un faisceau électronique « monochromatique », c'est-à-dire ne possédant qu'une seule longueur d'onde λ . Déterminer l'expression puis la valeur numérique de λ (on négligera toute considération relativiste, bien qu'en réalité, les vitesses mises en jeu sont très importantes).

Q36. Dans quel cas le phénomène de diffraction devient-il non négligeable ? Est-on dans cette configuration ici ?

Le traitement du faisceau électronique étant ondulatoire, nous allons étudier la figure obtenue comme s'il s'agit d'une figure d'interférences obtenues par un faisceau lumineux. On considère donc des ondes planes de longueur d'onde λ arrivant sur les atomes assimilable à des objets ponctuels diffractants. On se limite dans un premier temps à la diffraction par deux atomes de Gallium seulement. On considère deux rayons incidents sur ces deux objets et les deux rayons diffractés dans la direction θ issu de ces deux rayons incidents (cf. Figure B.8).

On veut déterminer l'intensité lumineuse sur l'écran. On note O le centre optique de la lentille. On rappelle que l'écran est placé dans le plan focal image de la lentille.

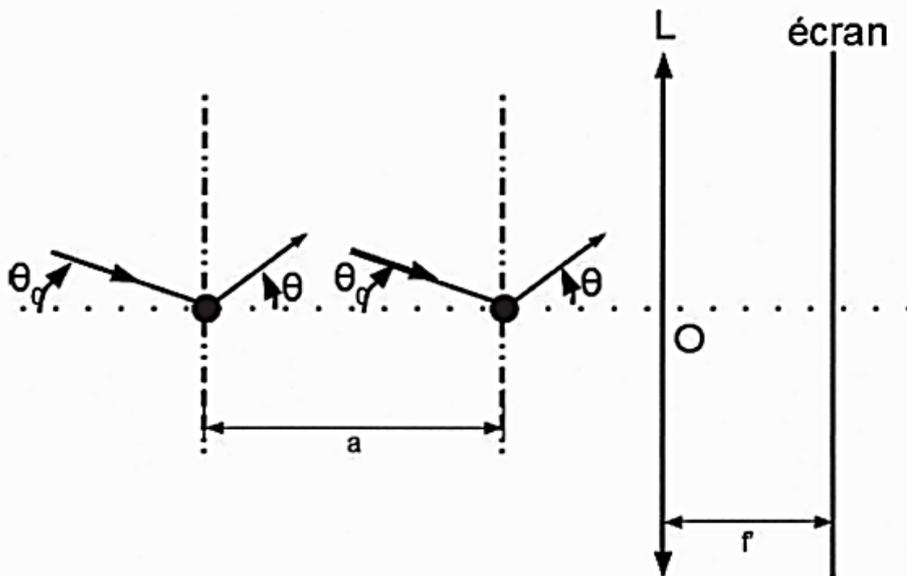


Figure B.8 :

Q37. Reprendre le schéma de la Figure B.8 et prolonger le tracé des deux rayons diffractés. En déduire que ces deux rayons vont interférer sur l'écran.

Q38. Déterminer la différence de marche entre les deux rayons sur l'écran. En déduire que les directions θ donnant lieu à des interférences constructives doivent vérifier : $\cos\theta = \cos\theta_0 + m\frac{\lambda}{a}$ avec $m \in \mathbb{N}$.

On considère maintenant la ligne composé de N objets.

Q39. Justifier soigneusement que les positions des maxima d'intensité sont toujours les positions déterminées par la condition trouvée à la question Q38.

Q40. Déterminer les positions x_m des maxima d'intensité sur l'écran. On se placera dans le cadre de l'approximation de Gauss. On donne $\cos(\alpha) \approx 1 - \frac{\alpha^2}{2}$ pour $\alpha \ll 1$.

Q41. Pour obtenir un maximum d'informations, il est préférable d'augmenter le nombre de maxima d'intensité observables. Est-il préférable dans ces conditions d'utiliser des faisceaux de haute ou de basse énergie ?