




Ouverture vers la physique quantique

-  Difficulté d'analyse et compréhension, initiative requise ;
-  Difficulté technique et calculatoire ;
-  Exercice classique et/ou important.

Flasher ou cliquer
pour accéder
au corrigé



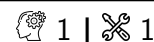
Se préparer

Applications de cours

Ces applications de cours sont des briques élémentaires des raisonnements à mener dans les exercices : les maîtriser est incontournable. Elles sont toutes traitées de manière exhaustive dans le cours.

- O5.1** - Décrire dans les grandes lignes l'effet photoélectrique. L'interpréter en termes de photons.
- O5.2** - Décrire dans les grandes lignes l'expérience de Kimble, Dagenais, Mandel et ses résultats. Expliquer en quoi elle constitue une preuve de la nature corpusculaire de la lumière.
- O5.3** - Décrire dans les grandes lignes une expérience d'interférences de particules uniques (photons ou électrons) et ses résultats. Expliquer en quoi elle met en évidence la dualité onde-corpuscule.
- O5.4** - Estimer le rayon d'un atome d'hydrogène dans son état fondamental (rayon de Bohr) en s'appuyant sur l'inégalité d'Heisenberg.
- O5.5** - Donner les hypothèses du modèle de Bohr. Établir le rayon des orbites permises et l'énergie associée.

Exercice 1 : Longueur d'onde thermique



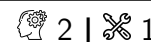
▸ Estimation d'ordres de grandeurs.

Lors du cours d'introduction à la thermodynamique, nous avons modélisé un gaz parfait comme un ensemble de points matériels obéissant aux lois de la mécanique classique.

Question : En estimant la longueur d'onde de de Broglie d'une molécule de diazote à température ambiante, déterminer si la mécanique quantique remet en cause ce modèle.

Donnée : masse molaire $M_N = 14 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$.

Exercice 2 : Aux origines du magnétisme



- Estimation d'ordres de grandeur ;
- Modèle de Bohr.

On s'intéresse à un atome décrit par une approche semi-classique de type modèle de Bohr.

1 - Montrer que la présence d'un électron en orbite circulaire confère à l'atome un moment magnétique $\vec{\mu}_L = \gamma \vec{L}_O$, appelé *moment magnétique orbital*. Déterminer la constante γ , appelée rapport gyromagnétique, en fonction des caractéristiques d'un électron.

2 - En déduire l'ordre de grandeur du moment magnétique d'un aimant macroscopique

3 - Cette approche peut s'appliquer à n'importe quel atome, pourtant les matériaux possédant une aimantation permanente sont minoritaires. Proposer une explication.

Il existe en outre une seconde contribution au moment magnétique d'un atome : le moment magnétique de spin des électrons, qui est une caractéristique purement quantique sans équivalent classique (on le présente parfois comme étant associé à la rotation de l'électron sur lui-même, mais c'est assez douteux). Moment magnétique de spin et moment magnétique orbital sont du même ordre de grandeur, si bien que les estimations faites dans cet exercice restent pertinentes.

Exercice 3 : Expérience de Shimizu, Shimizu, et Takuma



- Interférences à une particule ;
- Longueur d'onde de de Broglie.

L'expérience étudiée dans cet exercice a été réalisée par les physiciens japonais F. Shimizu, K. Shimizu et H. Takuma¹. Ils ont réalisé une expérience d'interférences avec des atomes de néon dans un dispositif de fentes d'Young représenté figure 1.

Un nuage de quelques millions d'atomes de néon est d'abord capturé dans une cellule à vide (« vacuum enclosure ») puis refroidi à 2,5 mK dans un piège laser (« trap »). La taille du piège est de l'ordre de 1 mm. Les lasers formant le piège sont alors éteints, ce qui libère les atomes sans vitesse initiale. On peut alors les considérer en chute libre. Le piège est situé $d = 76$ mm au dessus de deux fentes séparées d'une distance $a = 6$ μm (« double slit »). La largeur d'une fente est de 2 μm . Un écran MCP (« microchannel plate detector ») est placé à une distance $D = 113$ mm sous la double fente et détecte les atomes de Néon avec une résolution de l'ordre de 20 μm .

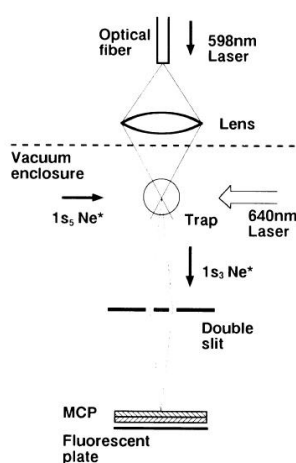


FIG. 1. Schematic experimental configuration. Details of the trap are not shown.



FIG. 2. The interference fringe pattern on the MCP for atoms with the initial velocity of approximately zero. The vertical length of the slit image is 2.8 mm. The spatial resolution of the picture is 20 and 32 μm for the horizontal and vertical directions, respectively. The narrowing of the fringe separation on the upper part is due to the damage of the double-slit structure. This figure contains approximately 6×10^3 atomic counts.

1 - Comment se manifestent respectivement les caractères corpusculaire et ondulatoire des atomes de néon dans cette expérience ? En admettant que les atomes se comportent indépendamment les uns des autres, expliquer ce

1. « Double-slit interference with ultracold metastable neon atoms », Physical Review A, vol. 46, 1992.

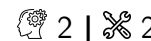
qu'il advient d'un atome de néon lors de sa traversée du dispositif.

2 - Estimer l'ordre de grandeur de la longueur d'onde λ des atomes de néon dans ce dispositif interférentiel. En déduire un ordre de grandeur de la vitesse v des atomes de néon au cours de leur chute.

3 - Comparer à la vitesse d'un corpuscule après une chute libre sans vitesse initiale de hauteur h .

Donnée : masse molaire du néon : $M = 20 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$.

Exercice 4 : Effet Compton



▸ Quantité de mouvement et énergie d'un photon.

L'expérience ayant achevé de convaincre la communauté des physiciens de l'existence des photons est celle réalisée par Arthur Compton, dont l'interprétation a été publiée en 1923. L'expérience consiste à bombarder une mince feuille de graphite avec des rayons X, voir figure 2. Derrière cette cible se trouve un détecteur de rayons X incliné d'un angle θ variable avec le faisceau incident. On observe alors des rayons X diffusés dans toutes les directions, mais dont la longueur d'onde λ' n'est pas égale à la longueur incidente λ et dépend de θ , contrairement à ce que prévoient les lois de la physique classique. Compton interprète ces observations dans le cadre d'un modèle théorique de collision relativiste permettant à un photon incident d'arracher un électron au graphite.

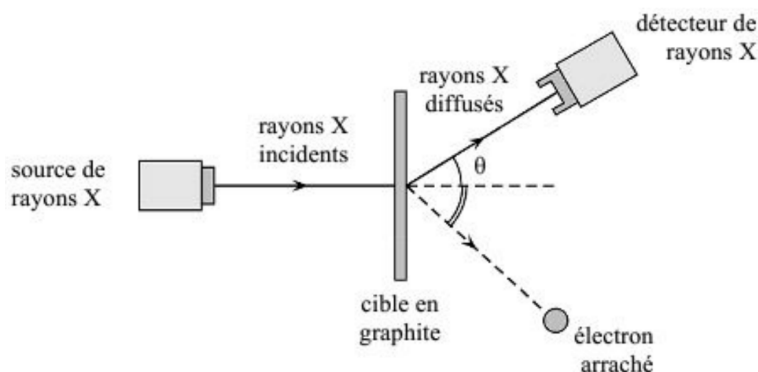


Figure 2 – Schéma de principe de l'expérience de Compton.

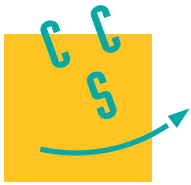
On note \vec{p} la quantité de mouvement du photon incident, \vec{p}' celle du photon après le choc, et \vec{p}_e la quantité de mouvement de l'électron arraché. On néglige le travail d'extraction de l'électron et on le suppose initialement au repos. Le système photon + électron peut alors être supposé isolé, si bien que sa quantité de mouvement et son énergie sont conservées au cours de l'expérience. L'électron arraché doit être traité dans le cadre de la relativité restreinte : son énergie s'écrit $E = \sqrt{p_e^2 c^2 + m^2 c^4}$.

1 - Traduire la conservation de la quantité de mouvement et exprimer p_e^2 en fonction de h , λ , λ' et $\cos \theta$.

2 - Traduire la conservation de l'énergie et exprimer p_e^2 en fonction de h , c , m , λ et λ' . Attention, l'énergie relativiste de l'électron au repos n'est pas nulle.

3 - Montrer que

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



Effet photoélectrique

On souhaite déterminer la constante de Planck en utilisant l'effet photoélectrique. Pour cela, on réalise le montage représenté figure 1.

- Rappeler en quelques mots en quoi consiste l'effet photoélectrique. En quelle année, Albert Einstein proposa-t-il une explication faisant intervenir la notion de particule de lumière ?
- Montrer que le circuit électrique permet de faire varier la tension V de $-E$ à $+E$. En considérant que la résistance équivalente au circuit électrique dans l'ampoule est très grande devant les autres résistances du circuit, exprimer V en fonction de x , E .
- Dans un premier temps, on constate que quelle que soit la valeur de V , l'intensité détectée est nulle si la fréquence du rayonnement incident, f , est inférieure à une certaine valeur, appelée pour la suite f_0 et ce quelle que soit la puissance du rayonnement incident. En quoi ce résultat est-il incompatible avec une approche ondulatoire du phénomène ?
- Dans un second temps, on constate que pour une fréquence donnée, il existe une valeur du potentiel V , dont la valeur absolue est notée $V_{\text{arrêt}}$, pour laquelle le courant détecté s'annule et ce quelle que soit la puissance de l'onde incidente. En quoi ce résultat est-il incompatible avec une approche ondulatoire du phénomène ?
- La relation proposée par Einstein est

$$hf = K_{\text{max}} + \Phi \quad (1)$$

où K_{max} est l'énergie maximale d'un photo-électron et où Φ est le travail d'extraction du métal.

- Interpréter physiquement l'équation 1 et notamment préciser pourquoi un électron peut être éjecté du métal avec une énergie cinétique inférieure à K_{max} .
 - Récrire l'équation 1 en faisant intervenir f_0 et $V_{\text{arrêt}}$.
6. Afin de mesurer h , on détermine $V_{\text{arrêt}}$ pour différente valeur de f . Le graphe obtenu est représenté figure 2. En déduire la valeur expérimentale de h . Conclure.

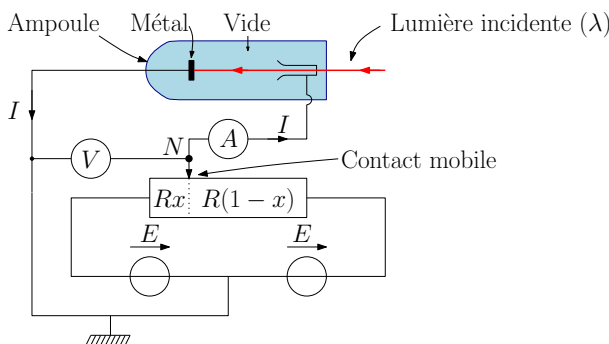
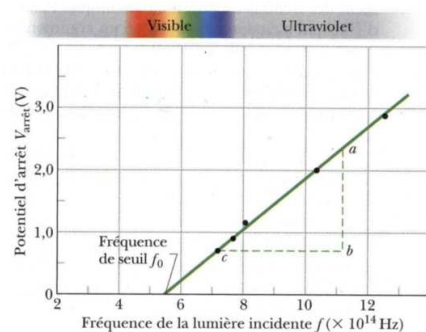


Figure 1 Dispositif expérimental



$$ab = 2,35 \text{ V} - 0,72 \text{ V}$$

$$bc = (11,2 - 7,2) \times 10^{14} \text{ Hz}$$

Figure 2 $V_{\text{arrêt}}$ en fonction de f

Vous introduirez au cours de l'exercice toutes les grandeurs qui vous semblent pertinentes et vous proposerez, si besoin, des ordres de grandeurs pour les applications numériques.