Ondes 1 : Lois de l'optique géométrique

Exercice 1 : Doublage de fréquence

Le rayon laser utilisé à l'observatoire du CERGA pour mesurer la distance Terre-Lune est obtenu par doublage de fréquence à partir d'un laser de longueur d'onde $\lambda_1 = 1{,}064\,\mu\text{m}$.

Q.1 Quelle est la longueur d'onde λ_2 de la lumière envoyée vers la Lune ? Quelle est sa couleur ?

Q.2 On envoie en fait des impulsions durant 0,1 ns. Calculer le nombre d'oscillations du signal lumineux dans une impulsion.

Exercice 2 : Expression de l'angle limite de réflexion totale

Considérons un dioptre séparant deux milieux transparents d'indices n_1 et $n_2 < n_1$. Un rayon lumineux se propageant dans le milieu d'indice n_1 fait un angle i_1 avec la normale au dioptre.

Q.1 Faire un schéma en faisant apparaître le dioptre, la normale au dioptre, l'angle incident, le rayon réfléchi et le rayon réfracté ainsi que les angles d'incidence i_1, de réflexion r et de réfraction i_2. Est-ce que le rayon réfracté s'approche ou s'écarte de la normale au dioptre ?

Q.2 Montrer que le rayon réfracté n'existe que tant que l'angle d'incidence est plus petit qu'un angle i_l dont on donnera l'expression.

Q.3 L'angle i_l est appelé «angle limite de réflexion totale». Expliquer cette dénomination. Que se passe-t-il pour $i_1 > i_l$?

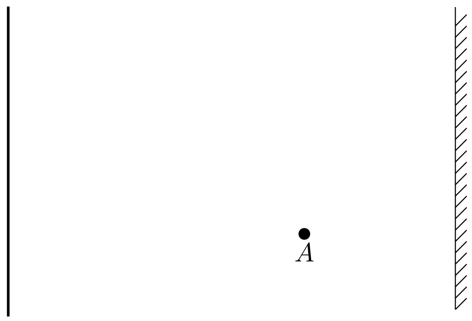
Q.4 Calculer l'angle limite de réflexion totale dans le cas d'une interface eau ($n_v = 1{,}33$)-air ($n_a = 1{,}00$) et diamant ($n_d = 2{,}54$)-air ($n_a = 1{,}00$).

Exercice 3 : Image d'un point au travers d'un miroir plan

On considère un point objet A situé devant un miroir plan.

Q.1 En exploitant la loi de la réflexion de Snell-Descartes, trouver graphiquement la position de l'image A' de A par le miroir plan. Cette image est-elle réelle ou virtuelle ?

Q.2 Montrer que A' est le symétrique de A par le plan du miroir.



Exercice 4 : Déviation d'un rayon lumineux

On considère une goutte d'eau sphérique d'indice $n = 1{,}33$. On se place dans un plan passant par le centre O de la goutte. Un rayon pénètre au point I dans la goutte avec un angle d'incidence i_1. Il se réfracte une nouvelle fois au point J où il émerge de la goutte. Le rayon incident est dirigé par le vecteur $\overrightarrow{u_1}$ et le rayon émergent par le vecteur $\overrightarrow{u_3}$.

Q.1 Exprimer l'angle de déviation $D = (\overrightarrow{u_1}, \overrightarrow{u_3})$ du rayon lumineux en fonction de i_1 et de r_1.

Q.2 Calculer D pour $i_1 = -45°$.

Exercice 5 : Incidence de Brewster

Un dioptre plan sépare l'air d'indice égal à $n_{air} = 1{,}00$ d'un autre milieu d'indice n. Un rayon lumineux arrive avec un angle d'incidence i sur ce dioptre.

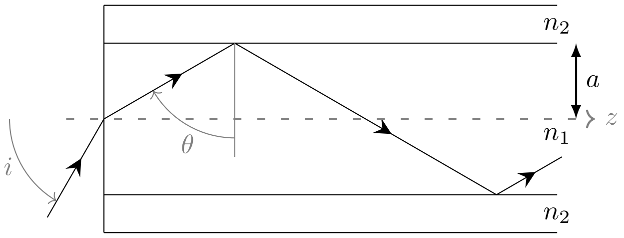
Q.1 Exprimer en fonction de i et de l'angle de réfraction i' l'angle α formé par le rayon partiellement réfléchi avec le rayon réfracté.

Q.2 En déduire en fonction de n l'expression de l'angle d'incidence i_b tel que le rayon partiellement réfléchi soit perpendiculaire au rayon réfracté.

Exercice 6 : Fibre optique à saut d'indice

On considère un guide d'ondes diélectrique constitué de deux cylindres concentriques de section circulaire, et constitués l'un et l'autre de matériau isolant (la silice). L'indice de réfraction de la partie centrale, appelée cœur, est noté n_1 ; l'indice de la partie périphérique, appelée gaine, est noté n_2, avec $n_2 < n_1$. Le milieu extérieur est l'air, assimilé au vide et donc d'indice égal à 1 (valeur qu'on prendra dans les calculs littéraux).

Dans ce problème, on s'intéresse essentiellement à un type de fibre optique particulier : les fibres à saut d'indice. Dans une fibre à saut d'indice, le coeur et la gaine sont des milieux homogènes : $n_1 = 1{,}456$ et $n_2 = 1{,}410$ sont uniformes. On note z la direction générale de propagation. Le diamètre du coeur vaut $a = 50\,\mu\text{m}$.



Q.1 Montrer que le rayon lumineux est guidé par réflexion totale dans le coeur (c'est-à-dire qu'il n'en sort pas) si θ est supérieur à une certaine valeur θ_L que l'on exprimera en fonction de n_1 et de n_2. Calculer θ_L.

Q.2 On note i l'ange d'entrée du rayon à l'extérieur de la fibre.

a) Montrer que la valeur maximale de i (notée i_{max}) pour que le guidage soit assuré dans la fibre, vaut :

$$i_{max} = \arcsin\sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

b) Calculer numériquement $N = \sin i_{max}$ appelée ouverture numérique de la fibre, puis i_{max}.

Q.3 Schématiser le trajet de la lumière le plus court à travers la fibre.

Q.4 Exprimer la durée τ_1 de ce parcours.

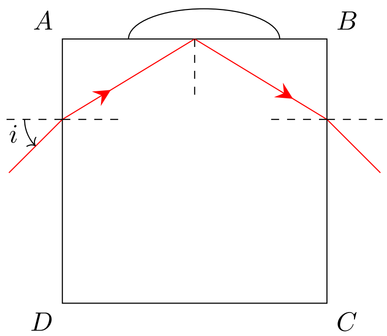
Q.5 Schématiser le trajet de la lumière le plus long à travers la fibre.

Q.6 Exprimer la durée τ_2 de ce parcours.

Q.7 Exprimer la différence de durée de parcours $\Delta t_{max} = \tau_2 - \tau_1$.

Exercice 7 : Réfractomètre de Pulfrich

On veut mesurer l'indice de réfraction n d'un liquide. On dépose une goutte de ce liquide sur un cube de verre transparent d'indice $N = 1{,}50$. On éclaire ce cube par un faisceau lumineux d'incidence i variable sur la face d'entrée AD. On mesure la valeur de l'angle limite d'incidence i_l pour lequelle la goutte apparaît lumineuse.



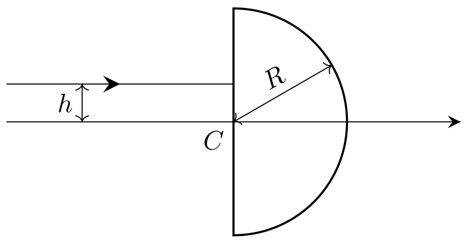
Q.1 Justifier pourquoi pour $i \geqslant i_l$, la goutte est si lumineuse.

Q.2 Déterminer alors l'indice de réfraction n en fonction de N et i_l.

Q.3 Montrer que ce réfractomètre mesure des indices n compris entre deux valeurs à déterminer.

Exercice 8 : Demi-Boule de verre :

On considère une demi-boule de verre de centre C et de rayon, d'indice n. On éclaire cette boule par un faisceau de rayons lumineux parallèle à cet axe. On observe les rayons transmis par le dispositif.



Q.1 Reproduire et légender le schéma ci-dessus.

Q.2 On considère un rayon lumineux proche de l'axe. Dessiner la marche de ce rayon lumineux. On définit le point F' comme l'intersection entre le rayon émergeant de la demi-boule et l'axe de la demi-boule. A quelle distance de C se trouve-t-il ?

Q.3 Montrer que si $h \ll R$ la position de F' est indépendante de h.

Q.4 On considère un rayon lumineux éloigné de l'axe. Quel phénomène observe-t-on ?

Q.5 En déduire la distance à l'axe à partir de laquelle un rayon incident ne sera pas observé par un observateur placé de l'autre côté du dispositif ?

Ondes 2 : Formation des images

Exercice 1 : Image à l'infini ?

Q.1 On dispose d'une lentille divergente L dont la distance focale est égale à $-40\,\text{mm}$. Quelle doit être la position d'un objet AB de taille égale à 2,0 mm pour que son image $A'B'$ par la lentille soit à l'infini ?

Q.2 Préciser la nature de AB.

Q.3 Sous quel diamètre apparent (le diamètre apparent est l'angle sous lequel on voit un objet lointain), un observateur plaçant son œil derrière la lentille L verra-t-il l'image $A'B'$?

Exercice 2 : Pouvoir séparateur de l'œil

Q.1 Par quoi modélise-t-on l'œil ?

Q.2 Déterminer la distance minimale séparant deux point objets pour que leurs images puissent être vues séparément lorsqu'ils se trouvent à 30 m et 60 m.

Exercice 3 :

Une lentille mince donne d'un objet AB réel une image A'B' réelle deux fois plus grande. La distance AA' est de 90 cm.

Q.1 Identifier la nature de la lentille.

Q.2 Faire une construction graphique pour placer AB, A'B', la lentille, F et F'.

Q.3 Déterminer $\overline{OA}$, $\overline{OA'}$ et f' par le calcul.

Exercice 4 : Distance entre objet et image

Un objet (AB) et un écran (E) sont fixes et distants de D.

Entre l'objet et l'écran, on déplace une lentille mince convergente de distance focale image f'.

Q.1 Montrer qu'il existe une valeur minimale de D pour laquelle on ne peut pas former d'image sur (E).

Q.2 Calculer la ou les positions de la lentille convergente pour lesquelles on peut former une image nette sur l'écran. Exprimer la différence entre ces deux positions qu'on notera d.

Q.3 Exprimer f' en fonction de D et d.

Exercice 5 : Doublet de Huygens

On appelle doublet un ensemble de deux lentilles minces de même axe optique. En appelant L_1 et L_2 les deux lentilles (la première lentille rencontrée par la lumière est L_1), on note O_1 et O_2 leurs centres optiques, F_1 et F_2 leurs foyers objets, F_1' et F_2' leurs foyers images. Un doublet est caractérisé par les distances focales image des deux lentilles f_1' et f_2' et son épaisseur $e = \overline{O_1O_2}$.

Le doublet de Huygens est tel que : $f_1' = 3a$, $e = 2a$, $f_2' = a$, où a est une longueur quelconque.

Q.1 Déterminer graphiquement la position du foyer image F' du doublet de Huygens (on pourra prendre l'échelle $a = 2\,\text{cm}$).

Q.2 Retrouver ce résultat par un calcul en déterminant l'expression de $\overline{F_2'F'}$.

Q.3 Déterminer graphiquement la position du foyer objet F du doublet de Huygens.

Q.4 Retrouver ce résultat par un calcul en déterminant l'expression de $\overline{F_1F}$.

Exercice 6 : Étude d'un téléobjectif d'appareil photographique

Un téléobjectif est constitué de deux lentilles minces dont les axes optiques coïncident. La lentille d'entrée L_1 a une vergence $C_1 = 10\,\delta$ et est suivie d'une lentille L_2 de vergence $C_2 = -40\,\delta$. La distance O_1O_2 séparant les deux lentilles vaut 8 cm. Un objet AB de hauteur égale à 0,5 m est placé à une distance $d = 100\,\text{m}$ de O_1 sur l'axe optique.

Q.1 Déterminer les caractéristiques de l'image intermédiaire A_1B_1 donnée par L_1.

Q.2 Quel rôle joue cette image pour la seconde lentille ? Déterminer les caractéristiques de l'image définitive $A'B'$.

Q.3 Les résultats de la question précédente sont-ils conformes aux propriétés attendues pour l'image donnée par un téléobjectif sur la pellicule photographique ?

Q.4 Déterminer la position de la lentille convergente unique qui permettrait d'arriver au même résultat. Préciser sa distance focale.

Q.5 Conclure quant à l'intérêt du téléobjectif.

Exercice 7 : L'œil

Un œil normal observe sans accomoder des objets à l'infini. On l'assimile à une lentille convergente (modélisant le cristallin) de distance focale $f' = 1{,}5\,\mathrm{cm}$ au repos. Le pouvoir séparateur de l'œil est $\alpha = 5 \times 10^{-4}\,\mathrm{rad}$.

Q.1 Calculer un ordre de grandeur de la distance h entre deux cellules photosensibles de la rétine.

Q.2 Un objet ponctuel A se trouve dans le champ de vision, à une distance d. Exprimer en fonction du rayon R de la pupille le rayon r de la tache image sur la rétine, l'œil ne faisant pas l'effort d'accommoder.

Q.3 On considère que A est vu net si $r < h$. Justifier ce critère. Pour $R = 1\,\mathrm{mm}$, calculer la distance minimale d'un objet qui est vu "net" en même temps qu'un objet à l'infini. Commenter le résultat.

Exercice 8 : Lunette astronomique

On considère une lunette astronomique formée :

- d'un objectif constitué d'une lentille mince convergente $\mathscr{L}_1$ de distance focale image $f_1' = 25\,\mathrm{cm}$;
- d'un oculaire consitué d'une lentille mince convergente $\mathscr{L}_2$ de distance focale $f_2' = 5\,\mathrm{cm}$.

Ces deux lentilles ont le même axe optique. Cette lunette astronomique est utilisée pour observer Mars. L'axe optique de l'instrument est pointé vers le centre de Mars, on note A et B les points objets situés à deux extrémités opposées de la planète. Les rayons issus de A et B arrivant au niveau de la lunette forment un angle α au niveau de la Terre, appelé angle apparent. On rappelle qu'un œil emmétrope, c'est-à-dire sans défaut, voit net un objet sans accomoder quand celui-ci est placé à l'infini.

Q.1 Quelle doit être la distance entre les centres optiques des lentilles pour que l'utilisateur puisse observer la planète sans accomoder ?

Q.2 Faire le schéma de la lunette. Dessiner sur ce schéma la marche à travers la lunette d'un faisceau lumineux formé de rayons issus de la planète. On appellera $\overline{A_1B_1}$ l'image intermédiaire.

Q.3 On souhaite photographier cette planète. Où faut-il placer la pellicule ?

Q.4 On note α' l'angle que forment les rayons émergents en sortie de la lunette. L'image finale est-elle droite ou renversée ?

Q.5 La lunette est caractérisée par son grossissement $G = \alpha'/\alpha$. Exprimer G en fonction de f_1' et f_2'.

Exercice 9 : Distance hyperfocale

On modélise l'objectif d'un appareil photo par une lentille convergente L, de centre O et de distance focale image f'.

Q.1 Lorsque l'appareil est mis au point à l'infini (objet à l'infini), où doit-on placer la pellicule ?

Q.2 On considère un point objet A à la distance d_A devant la lentille. La pellicule est dans la position de la question (1).

a) Exprimer la position $\overline{OA'}$ de l'image A' de A.

b) On note D_L le diamètre utile de la lentille (diamètre du faisceau au niveau de la lentille) et D_A le diamètre de la tache du faisceau sur la pellicule. Exprimer D_A en fonction de D_L, f' et d_A.

c) La pellicule est formée de grains de diamètre ϵ. Quelle est la condition sur ϵ pour que l'image d'un point A situé à une distance d_A soit net ?

d) Calculer la distance d_A minimale (appelée distance hyperfocale) qui donnera une image nette sur la pellicule. Application numérique pour $f' = 3{,}0\,\mathrm{cm}$; $D_L = 2\,\mathrm{mm}$ et $\epsilon = 2\,\mathrm{\mu m}$.

Ondes 3 : Propagation d'un signal

Exercice 1 : Téléphonie mobile

Q.1 La distance entre un téléphone mobile et une antenne-relais est de 2 km. Évaluer le temps qui s'écoule entre l'émission d'un signal par le téléphone et sa réception par l'antenne.

Q.2 Estimer un ordre de grandeur de la longueur d'onde des ondes émises par le téléphone mobile.

Exercice 2 : Ondes progressives

Q.1 Donner la période, la fréquence, la pulsation, le nombre d'onde, le vecteur d'onde, la longueur d'onde et la phase à l'origine de l'onde décrite par

$$s_1(x,t) = 5\sin(2{,}4\times 10^3\pi t - 7{,}0\pi x + 0{,}7\pi)$$

En déduire sa célérité.

Q.2 Une onde sinusoïdale se propage dans la direction des x positifs avec la célérité c. En $x = 0\,\mathrm{m}$, on a :

$$s_2(x=0,t) = S_0\cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right)$$

Donner l'expression de $s_2(x,t)$ et tracer l'allure du signal temporel perçu en $x = \dfrac{\lambda}{4}$.

Q.3 Une onde sinusoïdale se propage dans la direction des x négatifs avec la célérité c. En $t = 0\,\mathrm{s}$, on a :

$$s_3(x,t=0) = S_0\cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right)$$

Donner l'expression de $s_3(x,t)$ et tracer l'allure du signal temporel perçu en $t = \dfrac{T}{4}$.

Q.4 En $x = 0\,\mathrm{m}$ on excite un train d'ondes :

$$s_4(x=0,t) = S_0\exp\left(-\left(\frac{t}{\tau}\right)^2\right)\cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right)$$

avec $T = 0{,}2\,\mathrm{s}$ et $\tau = 1\,\mathrm{s}$. L'onde se propage dans la direction des x positifs à la célérité $c = 2\,\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$. Donner l'expression de $s_4(x,t)$.

Exercice 3 : Évolution temporelle d'une onde

On considère une onde sonore d'expression :

$$p(x,t) = p_0\cos(\omega t - kx)$$

où ω, $k = \dfrac{2\pi}{\lambda}$ et p_0 sont des constantes.

Q.1 Quelles sont la direction et le sens de propagation de l'onde ?

Q.2 Tracer l'allure spatiale de l'onde aux instants $t = 0\,\mathrm{s}$, $t = \dfrac{T}{4}$, $t = \dfrac{T}{2}$ et $t = T$ où T est la période de l'onde.

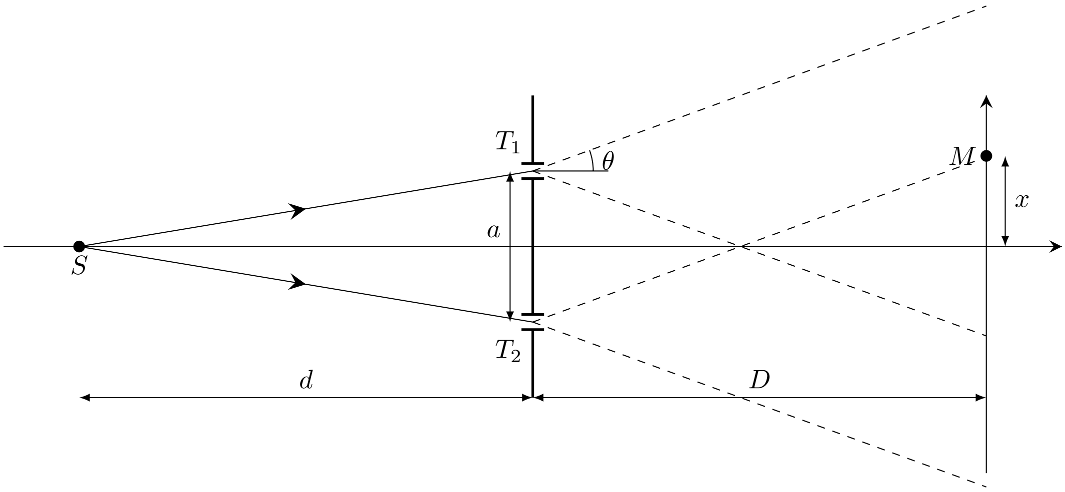
Q.3 Un microphone est placé en $x = \dfrac{7\pi}{2k}$. Il restitue une tension $u(t)$ similaire à la surpression p régnant en x. Exprimer puis représenter la tension $u(t)$.

Exercice 4 : Expérience des trous de Young

On considère un dispositif de trous de Young permettant d'observer des interférences lumineuses. Ce dispositif est constitué de deux trous T_1 et T_2 percés dans un écran opaque de rayon $r = 5{,}0\,\mu\mathrm{m}$, séparés d'une distance $a = 50\,\mu\mathrm{m}$. Dans l'expérience considérée ici, les trous sont éclairés par une onde lumineuse de longueur d'onde $\lambda = 500\,\mathrm{nm}$ émise par une source ponctuelle S d'intensité I_0 située à une distance $d = 1{,}0\,\mathrm{m}$ des trous sur l'axe optique, qui correspond à la bisectrice de T_1T_2 perpendiculaire à l'écran contenant les trous. L'indice optique de l'air est supposé égal à 1.

Lorsque la lumière incidente passe au travers d'un trou de petite dimension, un péhnomène de diffraction a lieu. Le faisceau en sortie du trou présente alors un demi-angle d'ouverture θ tel que $\sin(\theta) \sim \dfrac{\lambda}{2r}$.

La faible valeur du rayon r des trous T_1 et T_2 par rapport à λ conduit à des faisceaux de grande ouverture en sortie des trous, permettant aux ondes de se superposer dans un volume de l'espace. La zone où une onde passant par T_1 et une onde passant par T_2 se superposent est appelée **champ d'interférences**. Un écran est placé dans cette zone à une distance $D = 1{,}0\,\mathrm{m}$ du plan des trous. On y observe des interférences qui se manifestent par une alternance de zones de forte intensité appelées **franges brillantes** et de zones de faible intensité appelées **franges sombres**.



Q.1 Associer aux franges brillantes et sombres le caractère constructif ou destructif de l'interférence lumineuse.

Q.2 Justifier que la frange située sur l'écran au niveau de l'axe optique (au point O) est une frange brillante.

On considère un point M de l'écran d'abscisse x. La différence de marche $\delta(M)$ en M entre les ondes passant par T_2 et par T_1 s'écrit :

$$\delta(M) = (ST_2M) - (ST_1M)$$

où $(ST_iM) = (ST_i) + (T_iM)$ représente le chemin optique entre S et M en passant par le trou T_i.

Q.3 Reproduire le schéma et ajouter les rayons lumineux correspondant aux chamins suivis par les deux ondes se superposant en M.

Q.4 Exprimer $\delta(M)$ en fonction de a, x et D.

Q.5 Montrer que dans l'approximation paraxiale où l'on impose $a, x \ll D$, la différence de marché s'écrit au premier ordre en x/D :

$$\delta(M) \simeq \frac{ax}{D}$$

Pour cela on donne le DL_1 : pour $\epsilon \ll 1$, $\sqrt{1+\epsilon} \simeq 1 + \dfrac{\epsilon}{2}$.

Q.6 En utilisant la formule de Fresnel exprimer l'éclairement $I(x)$ sur l'écran :

$$I(x) = 2I_0(1 + \cos(\Delta\varphi))$$

Q.7 On appelle **interfrange** i, la distance séparant deux franges brillantes sur l'écran. Déterminer l'expression de l'interfrange i et calculer sa valeur.

Q.8 Déterminer le diamètre d_e du champ d'interférences au niveau de l'écran et calculer sa valeur.

Q.9 En déduire le nombre de franges brillantes observables sur l'écran.

Ondes 4 : Introduction à la mécanique quantique :

Exercice 1 : Laser et effet photoélectrique :

Dans un laser, des particules excitées passent d'un niveau d'énergie E_2 à un niveau d'énergie E_1 plus stable ; ce processus est à l'origine de l'émission de la lumière du laser. On considère un laser ayant une puissance de 2 mW émettant $5{,}3 \times 10^{15}$ photons par seconde.

Q.1 Déterminer l'écart entre les deux niveaux d'énergie E_1 et E_2 mis en jeu dans ce laser.

Q.2 Quelle est la couleur de ce laser ?

Ce laser est utilisé pour éclairer une plaque de Cesium.

Q.3 Sachant que le travail d'extraction d'un électron est $W = 1{,}9\,\mathrm{eV}$, va-t-on observer l'effet photoélectrique ?

Q.4 Si oui, quelle sera alors l'énergie cinétique maximale des électrons éjectés de la plaque ?

Données : masse d'un électron $m_e = 9{,}1 \times 10^{-31}$ kg constante de Planck : $h = 6{,}63 \times 10^{-34}\,\mathrm{J \cdot s}$.

Exercice 2 : Vitesse de propagation de l'onde de de Broglie :

Une particule de masse m se déplace à la vitesse v très inférieure à la vitesse de la lumière. Elle n'est soumise à aucune force donc son énergie E se réduit à son énergie cinétique. On souhaite trouver la vitesse de propagation de l'onde de de Broglie.

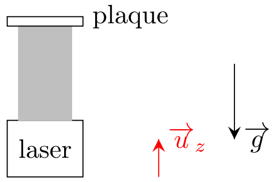
Q.1 Exprimer le vecteur d'onde k_{DB} de l'onde de de Broglie en fonction de m et v.

Q.2 En admettant que la formule reliant l'énergie du photon à sa pulsation reste valable pour la particule, trouver une expression de ω_{DB} en fonction de m et v.

Q.3 En déduire la vitesse de propagation de l'onde de de Broglie.

Exercice 3 : Lévitation optique d'une plaque absorbante

On considère une plaque carrée de côté $L = 7\,\mathrm{mm}$ et d'épaisseur $e = 10\,\mathrm{\mu m}$ composée d'un matériau parfaitement absorbant de masse volumique $\rho = 1500\,\mathrm{kg \cdot m^{-3}}$. Cette plaque est éclairée par le dessous par un laser monochromatique de longueur d'onde $\lambda = 532\,\mathrm{nm}$ d'intensité I uniforme dont le faisceau laser est cylindrique de diamètre $a = 5\,\mathrm{mm}$ (voir figure ci-contre). On note $\overrightarrow{g}$ le vecteur d'accélération de la pesanteur.



Dans le modèle corpusculaire de la lumière, l'onde électromagnétique émise par le laser est composée de photons, particules élémentaires transportant une énergie $\mathscr{E} = h\nu$ et une quantité de mouvement $\overrightarrow{p} = \dfrac{h\nu}{c}\overrightarrow{u}_z$ où $\nu = \dfrac{c}{\lambda}$. La plaque absorbe parfaitement l'onde incidente et donc les photons associés, il en résulte un transfert de quantité de mouvement s'interprétant comme une force appliquée du faisceau laser sur la plaque. En considérant un élément de surface élémentaire $\mathrm{d}S$ du faisceau, la force résultante de l'absorption des photons par la plaque s'écrit $\mathrm{d}\overrightarrow{F} = p_{\mathrm{rad}}\mathrm{d}S\overrightarrow{u}_z$ où p_{rad} est homogène à une pression et est nommée *pression de radiation*.

Q.1 Exprimer le nombre de photons δN absorbés par une surface élémentaire $\mathrm{d}S$ de la plaque durant un intervalle de temps infinitésimal $\mathrm{d}t$.

Q.2 En déduire l'expression de la quantité de mouvement $\delta\overrightarrow{P}$ absorbée par cet élément de surface $\mathrm{d}S$ durant $\mathrm{d}t$ en fonction de I, $\mathscr{E}$, h, ν, $\mathrm{d}S$ et $\mathrm{d}t$.

Q.3 Exprimer la force $\mathrm{d}\overrightarrow{F}$ subie par un élément $\mathrm{d}S$ de la plaque et en déduire l'expression de la pression de radiation p_{rad}.

Q.4 Déterminer l'expression de la force de pression de radiation totale subie par la plaque sous l'action du faisceau laser.

Q.5 Déterminer la valeur de l'intensité I du faisceau laser permettant d'atteindre un équilibre de lévitation de la plaque.

Exercice 4 : Retour sur l'expérience d'interférométrie atomique

Revenons sur l'expérience de O. Carnal et J. Mlynek présentée dans la partie méthode. On rappelle que dans cette expérience un jet d'atomes d'hélium est envoyé sur un dispositif de fentes d'Young noté B sur le schéma de l'expérience en **figure 1**. Un détecteur mobile (SEM) permet de comptabiliser le nombre d'atomes arrivant en un point de l'écran durant 5 min. Le résultat de l'expérience est donné sur la **figure 1**.

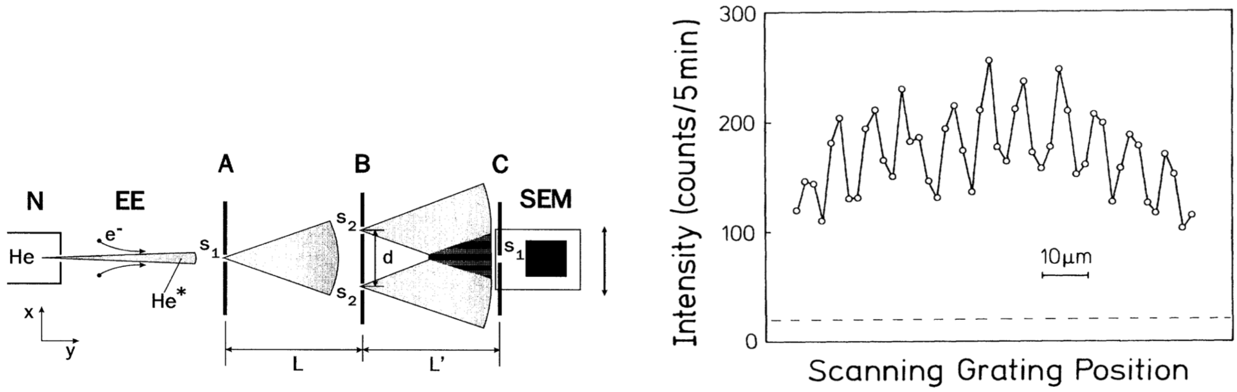


Figure 1 - À gauche, schéma de l'expérience avec $d = 8\,\text{mm}$, $L = L' = 64\,\text{cm}$, $s_1 = 2\,\mu\text{m}$ et $s_2 = 1\,\mu\text{m}$. À droite, nombre d'atomes arrivant en un point de la zone de détection durant 5 min. La longueur d'onde de de Broglie est $\lambda_{\text{dB}} = 1{,}03 \times 10^{-1}\,\text{nm}$.

Le jet atomique n'est pas dirigé directement vers le dispositif de fentes d'Young, il passe tout d'abord au travers d'une première fente notée A sur le schéma de la **figure 1**.On rappelle que lorsqu'un faisceau passe au travers d'une fente de largeur a, un péhnomène de diffraction a lieu et le faisceau présente en sortie de la fente un demi-angle d'ouverture θ tel que $\sin(\theta) \simeq \dfrac{\lambda}{a}$.

Q.1 Expliquer l'utilité de la fente A. Calculer le diamètre du faisceau au niveau des fentes d'Young. Est-ce que ce diamètre est suffisant pour que les atomes puissent passer au travers des deux fentes ?

Q.2 Estimer la largeur de la zone d'interférences au niveau de l'écran.

Q.3 Calculer l'interfrange théoriquement attendue au niveau de l'écran.

Q.4 À partir de la figure 1, mesurer l'interfrange au niveau de l'écran et estimer l'incertitude-type. Comparer à la valeur théorique calculée précédemment.

Exercice 5 : Estimation de la constante de Rydberg

On considère un atome d'hydrogène composé d'un neutron et d'un électron. Dans le cadre du modèle de Bohr, on peut montrer que les niveaux d'énergie de l'électron sont quantifiés et s'écrivent :

$$\mathscr{E}_n = -\frac{\mathscr{E}_0}{n^2} \qquad \text{avec } n \in \mathbb{N}^*$$

où $\mathscr{E}_0 = 13{,}624\,\text{eV}$. Lorsque l'électron va d'une orbite externe de nombre quantique n_i vers une orbite interne de nombre quantique $n_f < n_i$, on parle de désexcitation ce qui se traduit par l'émission d'un photon. On donne $h = 6{,}6261 \times 10^{-34}\,\text{J}\cdot\text{s}$ la constante de Planck et $c = 2{,}9979 \times 10^8\,\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ la vitesse de la lumière dans le vide.

Q.1 Montrer que la longueur d'onde λ du photon émis lors d'un désexcitation est liée aux nombres quantiques n_i et n_f des orbites de départ et d'arrivée de l'électron par le formule de Rydberg-Ritz :

$$\frac{1}{\lambda} = R_{\text{H}} \left[\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right] \qquad \text{avec } n_i > n_f$$

R_{H} est la constante de Rydberg. Préciser l'expression de R_{H} en fonction de $\mathscr{E}_0$, h et c. Calculer sa valeur et préciser son unité.

Les raies de la série de Balmer sont celles pour lesquelles l'électron est revenu à la couche K ($n_f = 2$) donnant lieu à une émission dans le domaine visible et proche UV. Les longueurs d'onde des raies de la série de Balmer peuvent être mesurées en utilisant un spectromètre à fibre. Les valeurs de longueurs d'onde λ mesurées sont résumées dans le tableau ci-dessous.

λ (nm)	656,3	486,4	434,2	409,8

L'incertitude-type sur λ est de 0,5 nm.

Q.2 Associer à chaque longueur d'onde mesurée la valeur du nombre quantique de l'état de départ n_i correspondant.

Q.3 En utilisant un traitement statistique, donner l'estimation expérimentale de la valeur de la constante de Rydberg $R_{\text{H,exp}}$ ainsi que son incertitude-type.

Q.4 Comparer la valeur mesurée de la constante de Rydberg à la valeur prédite dans le cadre du modèle de Bohr.