ⵜⴰⴳⵍⴷⵉⵜ ⵏ ⵍⵎⵖⵔⵉⴱ
ⵜⴰⵎⴰⵡⴰⵙⵜ ⵏ ⵓⵙⴳⵎⵉ ⴰⵏⴰⵎⵓⵔ ⴷ ⵓⵙⵎⵓⵜⵜⴳ ⴰⵣⵣⵓⵍⴰⵏ
ⴷ ⵓⵙⵙⵍⵎⴷ ⴰⵏⴰⴼⵍⵍⴰ ⴷ ⵓⵔⵣⵣⵓ ⴰⵎⴰⵙⵙⴰⵏ

المملكة المغربية
وزارة التربية الوطنية والتكوين المهني
والتعليم العالي والبحث العلمي

Centre Régional des Métiers de l'Éducation et de Formation Casablanca-Settat

Concours d'Entrée en Première Année du Cycle de Préparation
Á l'Agrégation de Sciences Physiques
Option : Physique
Session : Juillet-2018

ÉPREUVE DE PHYSIQUE II

Durée 4 heures

Cette épreuve comporte 11 pages au format A4, en plus de cette page de garde
L'usage de la calculatrice est *autorisé*

wadifa-info.com
نماذج المباريات من موقع وظيفة إنفو

L'énoncé de cette épreuve comporte 11 pages.
L'usage de la calculatrice non programmable est autorisé.

On veillera à une présentation claire et soignée des copies. Il convient en particulier de rappeler avec précision les références *des questions abordées.*

Cette épreuve est constituée de deux parties totalement indépendantes. La première partie traite l'effet Zeeman dans le cadre de la physique classique. La deuxième partie s'intéresse au principe de fonctionnement d'une lentille électrostatique.

Dans le cas où un candidat repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il le signale très lisiblement dans sa copie, propose la correction et poursuit l'épreuve en conséquence.

Données :

- Célérité de la lumière dans le vide $c = 3,00.10^8\ m.s^{-1}$
- Masse de l'électron $m_e = 9,11.10^{-31}\ kg$
- Charge de l'électron $q = -e = -1,60.10^{-19}\ C$
- Permittivité diélectrique du vide $\varepsilon_0 = 8,85.10^{-12}\ F.m^{-1}$
- perméabilité du vide : $\mu_0 = 4\pi.10^{-7}\ H.m^{-1}$
- μ_0 et ε_0 vérifient la relation : $\mu_0\varepsilon_0 c^2 = 1$

Formulaire :

- $$\overrightarrow{\mathrm{rot}}(\overrightarrow{\mathrm{rot}}\,\overrightarrow{A}) = \overrightarrow{\mathrm{grad}}(\mathrm{div}\,\overrightarrow{A}) - \overrightarrow{\Delta A}$$
$$\int_0^{\pi} \sin^3(\theta)d\theta = \frac{4}{3}$$
- fonction sinus-cardinal :
$$\mathrm{sin_c}(x) = \frac{\sin(x)}{x}$$
- Formules de trigonométrie :
$$\sin(a+b) - \sin(a-b) = 2\sin(b)\cos(a)$$
- Divergence en coordonnées cylindriques d'un champ vectoriel $\overrightarrow{a} = a_r(r,z)\overrightarrow{u}_r + a_z(r,z)\overrightarrow{u}_z$:
$$\mathrm{div}\,\overrightarrow{a} = \frac{1}{\mathrm{r}}\frac{\partial(\mathrm{ra_r})}{\partial \mathrm{r}} + \frac{\partial \mathrm{a_z}}{\partial \mathrm{z}}$$
- Rotationnel en coordonnées cylindriques d'un champ vectoriel $\overrightarrow{a} = a_r(r,z)\overrightarrow{u}_r + a_z(r,z)\overrightarrow{u}_z$:
$$\overrightarrow{\mathrm{rot}}\,\overrightarrow{a} = \left(\frac{\partial a_r}{\partial z} - \frac{\partial a_z}{\partial r}\right)\overrightarrow{u}_\theta$$

wadifa-info.com نماذج المباريات من موقع وظيفة إنفو
Source: www.wadifa-info.com/fr/modele-concours/4265 - Wadifa Info - page 2/13

1ère partie

Modèle de Thomson et effet Zeeman

À la suite de ses travaux sur les rayons cathodiques et de sa découverte de l'électron, Joseph John Thomson, physicien anglais, émit l'hypothèse que les électrons étaient contenus dans les atomes. Il proposa un modèle de l'atome qu'il surnomma lui-même "plum pudding model" . Les atomes de Thomson sont constitués :

- d'une sphère pleine, positivement et uniformément chargée, dont le rayon est de l'ordre du ,nanomètre ;
- d'électrons ponctuels qui peuvent vibrer librement à l'intérieur de la sphère. L'atome reste électriquement neutre.

Ainsi l'atome d'hydrogène est représenté par une sphère de rayon R(charge +e), de centre O et un électron (charge -e, masse m).
L'expérience de Rutherford conduisit à réviser en profondeur le modèle atomique.

1.1. Mouvement de l'électron dans l'atome de Thomson

L'atome d'hydrogène n'est soumis à aucune action extérieure. On s'intéresse à l'oscillation libre de l'électron par rapport à la sphère de centre O. On admet dans cette première partie que l'électron ne perd pas d'énergie par rayonnement.

1.1.1. À l'instant t, l'électron est en M tel que $\overrightarrow{OM} = \overrightarrow{r} = r\overrightarrow{e}_r (r \leq R)$. Montrer que l'électron est soumis à un champ électrique $\overrightarrow{E}$ créé par la charge +e répartie uniformément dans la sphère de rayon R tel que $\overrightarrow{E} = kr\overrightarrow{e}_r$. Exprimer k en fonction de R , e et ε_0.

1.1.2. À l'instant t=0, l'électron est écarté de sa position d'équilibre par une perturbation quelconque.

1.1.2.1. Montrer que le mouvement de l'électron est plan.

1.1.2.2. Montrer qu'il décrit une trajectoire rectiligne ou circulaire ou elliptique avec une pulsation ω_0 telle que :

$$\omega_0^2 = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 R^3}$$

1.1.2.3. Calculer la valeur de R pour laquelle la pulsation ω_0 correspond à la fréquence ν_0 d'une raie du spectre de Lyman de l'atome d'hydrogène ($\lambda_0 = 121,8\ nm$). Commenter.

1.1.3. On admet que l'électron décrit une trajectoire circulaire de rayon a dans un plan Oxy perpendiculaire à un axe Oz dans le sens direct. L'atome possède alors un moment dipolaire $\overrightarrow{p} = -e\overrightarrow{r}$ équivalent à deux dipôles élémentaires $p_x(t)$ et $p_y(t)$.

1.1.3.1. Montrer que $p_x(t)$ et $p_y(t)$ s'expriment par :

$$p_x(t) = p_0\cos(\omega_0 t); \quad p_y(t) = p_0\sin(\omega_0 t)$$

où p_0 est une constante dont on donnera son expression en fonction de e et a.

1.1.3.2. Montrer que l'énergie mécanique $\mathscr{E}_M$ de l'oscillateur constitué par l'électron s'exprime sous la forme :

$$\mathscr{E}_M = \frac{m\omega_0^2 p_0^2}{e^2}$$

wadifa-info.com نماذج المباريات من موقع وظيفة إنفو
Source: www.wadifa-info.com/fr/modele-concours/4265 - Wadifa Info - page 3/13

1.2. Champ électromagnétique dans le vide

1.2.1. Rappeler les équations de Maxwell dans le vide

1.2.2. On repère tout point M de l'espace à l'aide du repère $(O, \overrightarrow{e}_x, \overrightarrow{e}_y, \overrightarrow{e}_z)$

1.2.2.1. Déterminer l'équation de propagation vérifiée par le champ électrique.

1.2.2.2. Montrer qu'une onde plane rectiligne $\overrightarrow{E} = E_0 \cos(\omega t - kx)\overrightarrow{e}_y$ peut se propager dans le vide. E_0 est une amplitude constante.

1.2.2.3. Préciser la direction de propagation et la valeur de la norme k du vecteur $\overrightarrow{k}$.

1.2.2.4. Donner l'expression du champ magnétique $\overrightarrow{B}$ associé. Faire un schéma représentant $\overrightarrow{E}$, $\overrightarrow{B}$ et $\overrightarrow{k}$, le vecteur d'onde.

1.2.2.5. On définit le vecteur de Poynting par $\overrightarrow{R} = \frac{1}{\mu_0}\overrightarrow{E} \wedge \overrightarrow{B}$. Donner la signification physique de ce vecteur et son unité. Calculer sa valeur moyenne $\langle \overrightarrow{R} \rangle$ sur une période, en fonction de E_0, ε_0 et c.

1.2.3. Un faisceau laser polarisé rectilignement est assimilable à une onde plane de section $1\ mm^2$. Pour une puissance transportée P_0 de 100 mW, calculer l'amplitude du champ électrique correspondant .

1.2.4. On définit une onde $\overrightarrow{E} = E_0 \cos(\omega t - kx)\overrightarrow{e}_y + E_0 \sin(\omega t - kx)\overrightarrow{e}_z$.

1.2.4.1. Pourquoi cette onde est-elle appelée circulaire ?

1.2.4.2. Déterminer le champ $\overrightarrow{B}$ associé et le vecteur de Poynting $\overrightarrow{R}$. Conclure.

1.3. Champ électromagnétique rayonné par un dipôle

Pour $r = OM \gg \lambda = 2\pi c/\omega$, le champ électromagnétique rayonné en M par un dipôle oscillant, de moment dipolaire $\overrightarrow{p} = p_0 \cos(\omega t)\overrightarrow{e}_z$, placé en O est tel que :

$$E_\theta = \frac{-\omega^2 \sin(\theta)}{4\pi\varepsilon_0 r c^2} p_0 \cos(\omega(t - r/c)); \quad B_\varphi = E_\theta / c$$

Les autres composantes sont négligeables.

1.3.1. Justifier, par des considérations de symétrie, la direction des champs $\overrightarrow{E}$ et $\overrightarrow{B}$.

1.3.2. L'onde électromagnétique est-elle une onde plane ? quasi-plane ?

1.3.3. Exprimer le vecteur de Poynting $\overrightarrow{R}$ de cette onde et sa valeur moyenne $\langle \overrightarrow{R} \rangle$.

1.3.4. Montrer que l'énergie moyenne rayonnée par unité de temps à travers la sphère de rayon r est :

$$P_R = \frac{\omega^2 p_0^2}{12\pi\varepsilon_0 c^3}$$

1.4. Rayonnement de l'électron dans le modèle de Thomson

L'atome d'hydrogène est modélisé comme un double dipôle oscillant appliqué en O : $p_x = p_0 \cos(\omega t)$; $p_y = p_0 \sin(\omega t)$. Il rayonne un champ électromagnétique.

wadifa-info.com نماذج المباريات من موقع وظيفة إنفو

Source: www.wadifa-info.com/fr/modele-concours/4265 - Wadifa Info - page 4/13

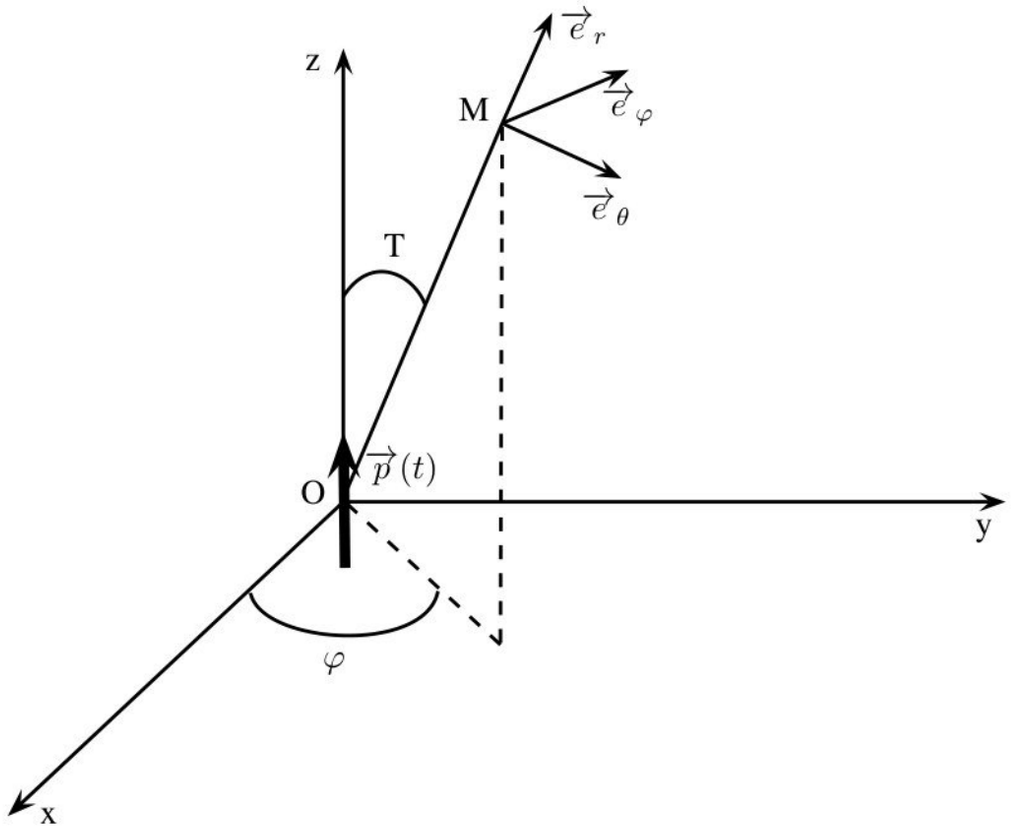


Figure 1:

1.4.1. Montrer que le champ crée par $\overrightarrow{p}_x(t)$ en un point M du plan de l'orbite (Oxy) de l'électron est donné par :

$$\overrightarrow{E}_1 = -\frac{\omega^2 P_0}{4\pi\varepsilon_0 r c^2}\sin(\alpha)\cos(\omega t - \omega r/c)\overrightarrow{e}_\alpha$$

En déduire le champ $\overrightarrow{E}$ associé aux deux dipôles en M. Quel est l'état de polarisation de l'onde dans ce plan ?

1.4.2. Donner les composantes du champ $\overrightarrow{E}$ en un point P($OP = r$) de l'axe Oz de l'orbite. En déduire l'état de polarisation l'onde en P.

1.4.3. On admet que l'énergie moyenne rayonnée par unité de temps P_R est celle de deux dipôles d'amplitude p_0, de pulsation ω.
Cette énergie correspond à une diminution $P_R = -\frac{d\mathscr{E}_M}{dt}$ de l'énergie mécanique $\mathscr{E}_M$ de l'oscillateur constitué par l'électron.

1.4.3.1. En déduire que p_0 et donc le rayon a de l'orbite de l'électron doit décroître.
On admet que la pulsation reste inchangée et que p_0 décroît suffisamment lentement dans le temps pour que le mouvement reste circulaire durant des intervalles de temps grand devant $T = 2\pi/\omega$ correspondant à la période de la radiation considérée de l'hydrogène ($\lambda = 434,1\ nm$).

1.4.3.2. Montrer que l'on peut écrire la relation suivante

$$\frac{d\mathscr{E}_M}{dt} = -\frac{\mathscr{E}_M}{\tau}$$

Donner l'expression de la constante de temps τ et l'expression de $\mathscr{E}_M(t)$

wadifa-info.com نماذج المباريات من موقع وظيفة إنفو
Source: www.wadifa-info.com/fr/modele-concours/4265 - Wadifa Info - page 5/13

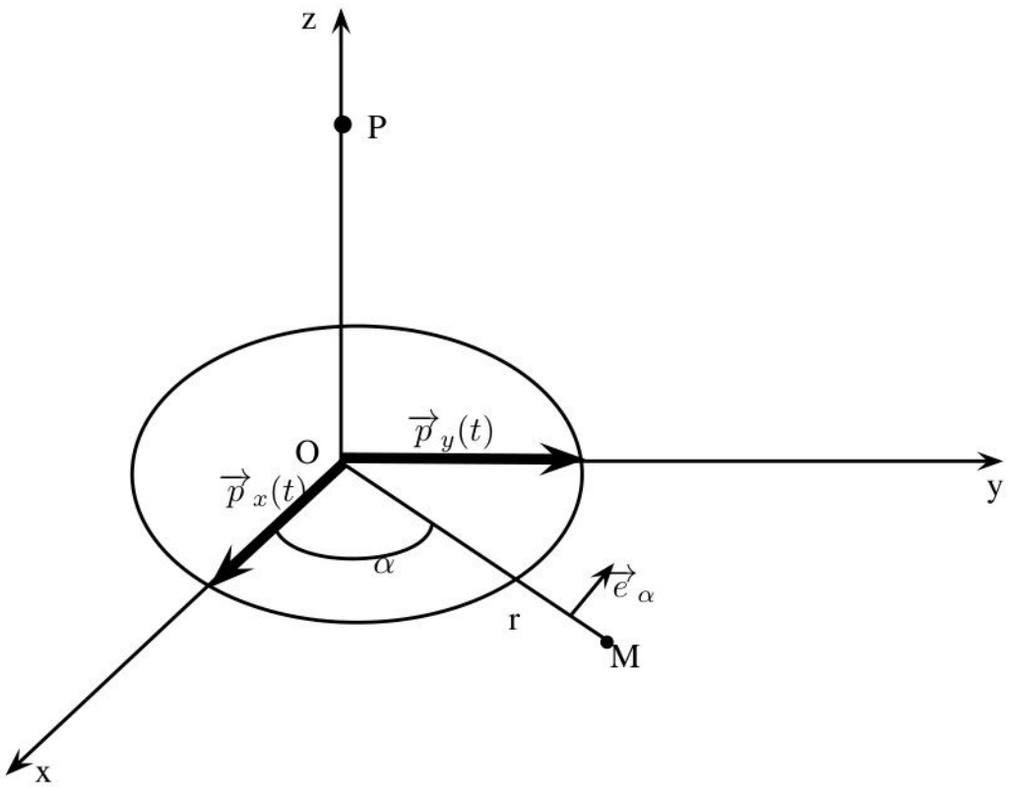


Figure 2:

1.4.3.3. Application numérique $\omega = 4,34.10^{15}\ rad.s^{-1}$. Calculer la constante de temps τ et le comparer à T. Conclure.

1.5. Diffusion de Rayleigh

Soit un milieu constitué d'atomes d'hydrogène. Le nombre d'atomes par unité de volume est N. Une onde électromagnétique plane polarisée rectilignement se propage dans la direction Ox. Le champ électrique est : $\overrightarrow{E} = E_0 \cos(\omega t - kx)\overrightarrow{e}_z$. L'électron de l'atome oscille dans la direction $\overrightarrow{e}_z$.

1.5.1. Montrer que le déplacement z de l'électron appartenant à un atome situé dans le plan d'abscisse x est décrit par l'équation différentielle suivante :

$$\ddot{z} + \omega_0^2 z = \frac{-e}{m} E_0 \cos(\omega t - kx)$$

Justifier vos approximations.

1.5.2. On néglige le régime transitoire.

1.5.2.1. Donner l'expression z(t,x) du régime forcé à la pulsation ω.

1.5.2.2. Donner l'expression du dipôle induit $\overrightarrow{p}$. On précisera son amplitude p_0.

1.5.3. Donner l'expression de l'énergie moyenne rayonnée par unité de temps P_R par le dipôle $\overrightarrow{p}$.

1.5.4. La puissance moyenne de l'onde traversant sous incidence normale une surface d'aire S est $P_i = c\varepsilon_0 E_0^2 S/2$. Exprimer P_R en fonction de P_i.

wadifa-info.com نماذج المباريات من موقع وظيفة إنفو

Source: www.wadifa-info.com/fr/modele-concours/4265 - Wadifa Info - page 6/13

1.5.5. En fait la puissance rayonnée qui correspond à une diffusion provient de la diminution de P_i et donc de E_0 lorsque l'onde se propage dans le milieu. On peut admettre que P_i (et donc E_0) dépend de x mais varie lentement selon x.

1.5.5.1. En réalisant un bilan énergétique dans un cylindre de section x et x+dx montrer que l'on peut écrire :

$$\frac{dP_i(x)}{dx} = -\frac{P_i(x)}{\ell}$$

Exprimer ℓ en fonction de N, ω, ω_0, m, c, e. Préciser son unité.

1.5.5.2. Que devient l'expression de ℓ pour $\omega \ll \omega_0$(cas de la diffusion Rayleigh) ? Calculer alors les valeurs de ℓ pour les ondes électromagnétiques correspondantes aux radiations rouge (800 nm) et bleu (400 nm). On prendra ω_0 correspondant à $\lambda_0 = 121,8\ nm$ et $N = 10^{25}$ électrons par m^3.

1.5.5.3. À l'aide de ces résultats donner une interprétation du bleu du ciel et de la couleur du rouge de soleil au couchant.

1.6. Effet Zeeman

Dans le modèle de Thomson de l'atome d'hydrogène, le mouvement de l'électron en l'absence de champ extérieur est celui d'un oscillateur harmonique de pulsation ω_0. On considère maintenant une situation où l'atome est placé dans un champ magnétique uniforme constant $\overrightarrow{B}_0$ à l'instant t=0. On utilise un système de coordonnées ayant pour origine O le centre du noyau. L'axe Oz est tel que $\overrightarrow{B}_0 = B_0 \overrightarrow{e}_z$. L'électron est repéré par le vecteur $\overrightarrow{OM} = r \overrightarrow{e}_r$. On suppose qu'avant d'appliquer $\overrightarrow{B}_0$, l'électron est sur une orbite circulaire de rayon a dont l'axe forme l'angle θ avec Oz. Pour simplifier, on supposera que la position initiale de l'électron à l'instant t=0 est $\overrightarrow{OM_0} = a\sin(\theta)\overrightarrow{e}_z - a\cos(\theta)\overrightarrow{e}_y$ et sa vitesse initiale est $\overrightarrow{v}_0 = \omega_0 a \overrightarrow{e}_x$.

1.6.1. Donner les équations du mouvement de l'électron sur les axes du trièdre Oxyz. On utilisera la pulsation $\Omega = eB_0/2m$.

1.6.2. Déterminer z(t) pour $t > 0$.

1.6.3. On introduit le nombre complexe $Z = x + iy$ avec $i^2 = -1$.

1.6.3.1. Déterminer l'équation différentielle vérifiée par $Z(t)$.

1.6.3.2. On considère dans toute la suite de cette partie que $\Omega \ll \omega_0$; montrer que

$$Z(t) = (ia/2)\exp(i\Omega t)\left[(1-\cos(\theta))\exp(-i\omega_0 t) - (1+\cos(\theta))\exp(i\omega_0 t)\right]$$

1.6.3.3. En déduire les fonctions x(t) et y(t).

1.6.3.4. Déduire de ces résultats que le mouvement de l'électron est la superposition d'un mouvement sinusoïdal de pulsation ω_0 suivant Oz et de deux mouvements circulaires directs dans le plan xOy de pulsation $\omega_1 = \omega_0 + \Omega$ et $\omega_2 = \omega_0 - \Omega$.

1.6.3.5. On peut admettre que ce mouvement confère à l'atome un moment dipolaire $\overrightarrow{p}$. Donner les composantes de ce dipôle suivant le trièdre Oxyz.

1.6.4. On observe le rayonnement de l'atome dans la direction du champ magnétique, en un point de l'axe Oz. Montrer que l'onde émise en présence de $\overrightarrow{B}_0$ est la superposition de deux ondes polarisées circulairement de fréquence $\nu_0 + \Delta\nu$ et $\nu_0 - \Delta\nu$ très voisines. C'est l'effet Zeeman longitudinal.
Donner l'expression de $\Delta\nu$.
Calculer $\Delta\nu$ et $\Delta\nu/\nu_0$ pour $B_0 = 0,1\ T$ et une fréquence ν_0 correspondant à la radiation à $434,1\ nm$ de l'hydrogène. commenter.

wadifa-info.com نماذج المباريات من موقع وظيفة إنفو
Source: www.wadifa-info.com/fr/modele-concours/4265 - Wadifa Info - page 7/13

1.6.5. On observe le mouvement dans une direction perpendiculaire au champ magnétique c'est à dire dans le plan xOy. Montrer que l'onde émise est la superposition de trois ondes polarisées rectilignement comportant trois fréquences très voisines. C'est l'effet Zeeman transversal.

1.7. Observation des raies Zeeman

On étudie expérimentalement l'effet Zeeman avec un interféromètre de Michelson.

1.7.1. Les interféromètres à deux ondes sont produits par des dispositifs à division du front d'onde ou des dispositifs à division d'amplitude.

1.7.1.1. Préciser pour les deux types de dispositifs la localisation des franges en lumière monochromatique dans les cas :

- d'une source ponctuelle ;
- d'une source étendue

On donnera un exemple de dispositif à division d'amplitude autre que le Michelson.

1.7.1.2. Quel est le rôle de la longueur de cohérence temporelle dans les conditions d'observation des franges d'interférences ?

1.7.2. Un interféromètre de Michelson (figure3) est constitué d'une lame semi-réfléchissante, non absorbante, appelée séparatrice S_P dont les facteurs de transmission et de réflexion sur les amplitudes valent $1/2$, et de deux miroirs plans M_1 et M_2 perpendiculaires l'un à l'autre. La lame séparatrice S_P est inclinée à $45°$ par rapport aux normales à M_1 et M_2. L'interféromètre est plongé dans l'air. On ne tiendra compte, ni des inconvénients liés à l'épaisseur non négligeable de la séparatrice (qui sont supposés parfaitement corrigés grâce à une lame compensatrice), ni d'éventuels changements de phase par réflexion. L'indice de l'air sera pris égal à 1.

On utilise comme source étendue une lampe spectrale de symétrie de révolution autour de l'axe SO parallèle à l'axe Ox. On observe en lumière monochromatique dans le plan focal d'une lentille mince convergente L d'axe optique Oy et de distance focale f'=1 m.

1.7.2.1. On part de la situation où les deux bras sont égaux $OA_1 = OA_2$. Qu'observe-t-on ?

1.7.2.2. Pourquoi est-il nécessaire de diaphragmer la lentille ou de limiter l'inclinaison des rayons incidents issus de la source primaire ?

1.7.3. On déplace M_2 normalement à son plan d'une distance $e = 1,05\ mm$ dans la direction des x positifs.

1.7.3.1. On peut montrer que le phénomène d'interférences observé est analogue à celui d'une lame d'air à faces parallèles. Quelle est l'épaisseur de cette lame d'air équivalente ?

1.7.3.2. Justifier que la figure d'interférence obtenue est sous forme d'anneaux clairs et sombres alternés. Déterminer la différence de marche δ entre les deux rayons qui interfèrent en un point de l'écran en fonction de e et i(angle d'incidence supposé très petit devant π).

1.7.3.3. Calculer l'ordre d'interférence au centre de la figure d'interférence correspondant à une raie de longueur d'onde incidente $434,1\ nm$. En déduire le rayon du premier anneau brillant.

1.7.4. La source primaire est maintenant une lampe à hydrogène. À l'aide d'un filtre interférentiel on sélectionne la radiation de longueur d'onde λ_0. Cette radiation n'est pas rigoureusement monochromatique : on admet que l'intensité lumineuse spectrale émise $I_\nu = I_0/\Delta\nu$ est constante entre $\nu_0 - \Delta\nu/2$ et $\nu_0 + \Delta\nu/2$; ν_0 est la fréquence centrale de la raie.

wadifa-info.com نماذج المباريات من موقع وظيفة إنفو

Source: www.wadifa-info.com/fr/modele-concours/4265 - Wadifa Info - page 8/13

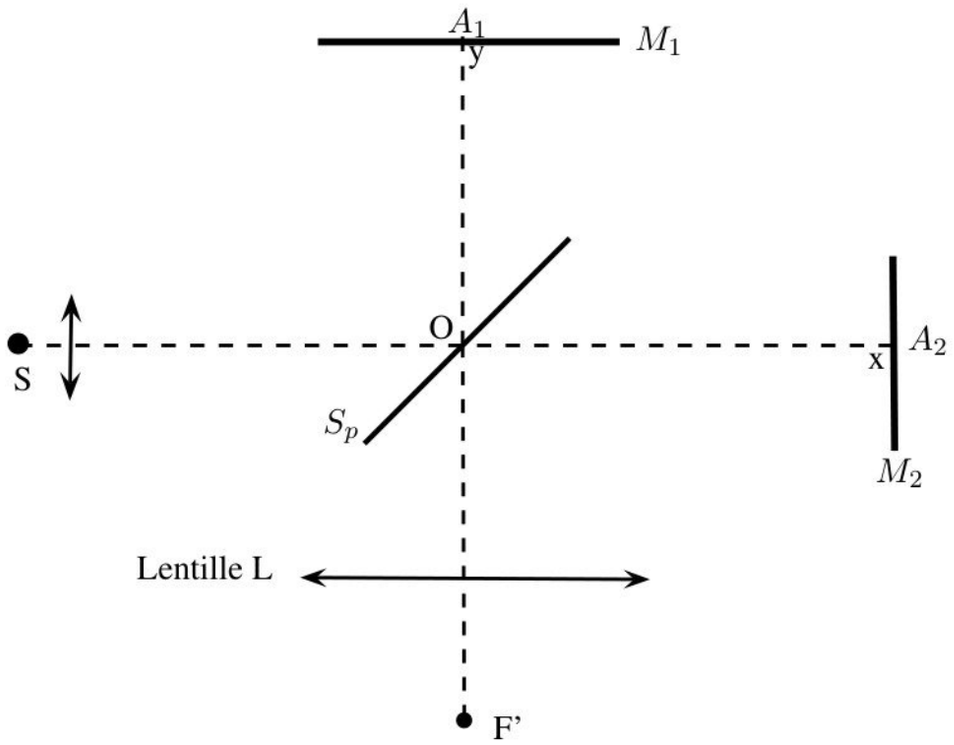


Figure 3:

1.7.4.1. Montrer que l'intensité lumineuse détectée $I(e)$ au foyer F′ de la lentille pour une distance $e = OA_2 - OA_1$ s'exprime par :

$$I(e) = 2I_0 \left[1 + \sin_c\left(\frac{2\pi\Delta\nu e}{c}\right)\cos\left(\frac{4\pi e\nu_0}{c}\right)\right]$$

où c représente la vitesse de la lumière dans le vide.

1.7.4.2. On enregistre $I(e)$ en fonction du déplacement e à l'aide d'un photomultiplicateur. On définit le contraste $\mathscr{C}$ des franges par la relation :

$$\mathscr{C} = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}$$

où I_{max} représente l'intensité maximale et I_{min} est l'intensité minimale. Déterminer le contraste $\mathscr{C}$ des franges d'interférence en fonction de la distance e, de $\Delta\nu$ et de la vitesse de la lumière dans le vide c.
Pour quelle valeur de e, le facteur $\mathscr{C}$ s'annule-t-il pour la première fois ?
Montrer alors que l'on peut déterminer la longueur de cohérence $L_c = c/\Delta\nu$ de la radiation.

1.7.5. On soumet maintenant la lampe à hydrogène à un champ magnétique intense et on sélectionne à l'aide d'un filtre interférentiel les radiations de fréquence $\nu_1 = \nu_0 + \Delta\nu$ et $\nu_2 = \nu_0 - \Delta\nu$ dues à l'effet Zeeman. Pour simplifier on admettra que les deux raies ont une intensité d'émission I_0 égale et qu'elles sont rigoureusement monochromatiques.

1.7.5.1. Déterminer l'éclairement $I(e)$ au foyer F′ de la lentille en fonction du déplacement $e = OA_2 - OA_1$.

1.7.5.2. Montrer qu'on peut déduire la valeur $\Delta\nu$ d'un enregistrement de I(e).

wadifa-info.com نماذج المباريات من موقع وظيفة إنفو
Source: www.wadifa-info.com/fr/modele-concours/4265 - Wadifa Info - page 9/13

1.7.5.3. Avec quel autre interféromètre pourrait-on mesurer $\Delta\nu$ avec une plus grande précision ?

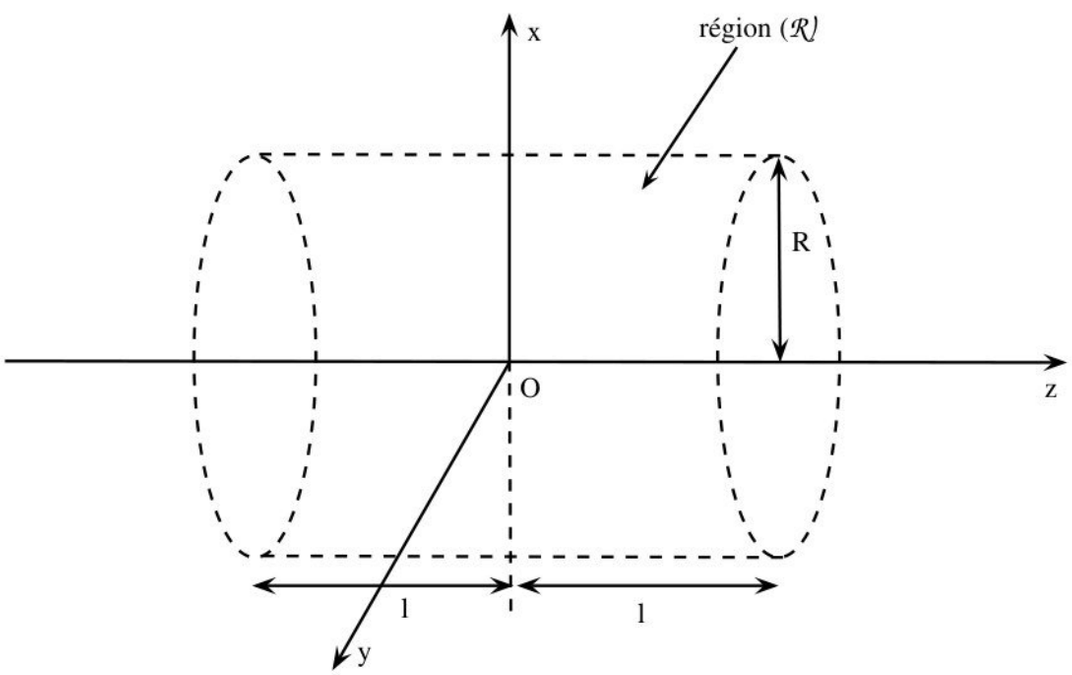
2ème partie
Lentille électrostatique

Dans le microscope électronique, comme dans le microscope optique, la formation d'une image agrandie de l'objet à observer nécessite l'utilisation de dispositifs capables de dévier la direction de propagation de l'onde. Le but de cette section est d'étudier le principe de fonctionnement d'une lentille électrostatique qui peut être utilisée pour dévier la trajectoire des électrons dans un microscope électronique.

2.1. Champ électrostatique dans la lentille

Dans la région ($\mathcal{R}$) de l'espace appelée « lentille électrostatique » règne un champ *électrostatique* non uniforme $\overrightarrow{E}$. La région ($\mathcal{R}$) est vide de charge électrique et telle que : $x^2 + y^2 \leqslant R^2$ et $-\ell \leqslant z \leqslant +\ell$. Le champ électrostatique $\overrightarrow{E}$ est produit par un dispositif invariant par rotation d'un angle θ quelconque autour de l'axe Oz et qui admet le plan $z = 0$ comme plan de symétrie.

Le champ électrostatique est nul en dehors de la région ($\mathcal{R}$).



2.1.1. Montrer, en évoquant des arguments clairs, que le champ électrostatique $\overrightarrow{E}$ s'écrit en coordonnées cylindriques (r, θ, z) d'axe Oz sous la forme :

$$\overrightarrow{E} = F(r,z)\ \overrightarrow{u}_r + G(r,z)\ \overrightarrow{u}_z \tag{1}$$

où F et G sont deux fonctions quelconques des coordonnées r et z uniquement que l'on ne demande pas d'expliciter pour le moment. $(\overrightarrow{u}_r, \overrightarrow{u}_\theta, \overrightarrow{u}_z)$ est la base orthonormée locale du système de coordonnées cylindriques.

2.1.2. Que vaut $G(r,z)$ dans le plan $z = 0$? Justifier.

2.1.3. Rappeler les équations locales vérifiées par le champ électrostatique $\overrightarrow{E}$ dans la région ($\mathcal{R}$).

wadifa-info.com نماذج المباريات من موقع وظيفة إنفو
Source: www.wadifa-info.com/fr/modele-concours/4265 - Wadifa Info - page 10/13

2.1.4. En déduire que les composantes F et G du champ électrostatique vérifient les équations aux dérivées partielles suivantes :

$$\begin{cases} \dfrac{\partial F}{\partial z} - \dfrac{\partial G}{\partial r} = 0 \\ \dfrac{\partial (r\,F)}{\partial r} + \dfrac{\partial (r\,G)}{\partial z} = 0 \end{cases} \tag{2}$$

2.1.5. Le dispositif qui crée le champ électrostatique $\overrightarrow{E}$ dans la région $(\mathcal{R})$ impose

$$F(r,z) = \beta\, r$$

avec $\beta = 2\,U_0/R^2$, U_0 étant une constante. En déduire que $G(r,z) = \beta'\, z$ et donner l'expression de β' en fonction de β.

2.1.6. Montrer que le champ électrostatique $\overrightarrow{E}$ dérive d'un potentiel électrostatique ϕ que l'on exprimera en fonction de U_0, r et z.

2.1.7. Quelle est la nature de la surface équipotentielle passant par l'origine ? Justifier la réponse et représenter graphiquement cette surface. Que représente U_0 ?

2.2. Mouvement de l'électron dans la lentille

À l'instant choisi comme origine, un électron pénètre dans la région $(\mathcal{R})$ au point I_0 de coordonnées $r = r_0 \ll R$, $z = -\ell$ avec une vitesse $\overrightarrow{v}_0 = v_0\ \overrightarrow{u}_z$, $v_0 > 0$. Dans toute la suite, on négligera l'action de la pesanteur sur le mouvement de l'électron.

2.2.1. En exploitant la projection du théorème du moment cinétique sur l'axe Oz, montrer que, dans la région $(\mathcal{R})$, le mouvement de l'électron se fait dans un plan méridien $\theta =$ constante.

2.2.2. Établir les équations différentielles vérifiés séparément par r et z. À quelle condition sur U_0, le mouvement de l'électron est-il confiné au voisinage de l'axe Oz. En supposant que cette condition est satisfaite dans toute la suite, montrer que les équations différentielles précédentes peuvent s'écrire :

$$\frac{\mathrm{d}^2 r}{\mathrm{d}t^2} + \omega^2\, r = 0 \qquad \text{et} \qquad \frac{\mathrm{d}^2 z}{\mathrm{d}t^2} - 2\,\omega^2\, z = 0 \tag{3}$$

et donner l'expression de ω en fonction de e, m_e, U_0 et R.

2.2.3. Résoudre l'équation différentielle en z et déterminer l'expression de $z(t)$ vérifiant les conditions initiales.

2.2.4. Dans toute la suite, on suppose satisfaite la condition $\omega\,\ell \ll v_0$. Montrer alors, que la vitesse $\dot{z}$ de l'électron reste pratiquement égale à v_0 et en déduire la durée t_1 nécessaire à l'électron pour traverser la zone $(\mathcal{R})$.

2.2.5. Résoudre de même l'équation différentielle en r et montrer que la trajectoire électronique reste au voisinage de l'axe Oz. Quelle est l'hypothèse correspondante en optique ?

2.2.6. Déterminer les composantes du vecteur vitesse de l'électron au point I de sa sortie de la région $(\mathcal{R})$.

2.2.7. Montrer que le mouvement de l'électron est rectiligne uniforme en dehors de la région $(\mathcal{R})$.

wadifa-info.com نماذج المباريات من موقع وظيفة إنفو
Source: www.wadifa-info.com/fr/modele-concours/4265 - Wadifa Info - page 11/13

2.2.8. Déterminer la coordonnée $z_{F'}$ du point d'intersection de la trajectoire électronique avec l'axe Oz. La position de F' dépend-elle de I_0 ? Justifier le nom de foyer donné à F'. Cette lentille électrostatique est-elle convergente ou divergente ? Comment peut-on agir sur la distance focale de la lentille.

2.2.9. Application numérique : calculer $z_{F'}$ pour $\ell = 1,0 \times 10^{-4}$ m et $\omega\,\ell/v_0 = 10^{-2}$.

wadifa-info.com نماذج المباريات من موقع وظيفة إنفو

Source: www.wadifa-info.com/fr/modele-concours/4265 - Wadifa Info - page 12/13

Wadifa Info

www.wadifa-info.com

Le sujet suivant à préparer — **النموذج التالي للتحضير**

نموذج مباراة ولوج مسلك تكوين أطر الإدارة التربوية - اختبار في علوم التربية - دورة 2025

Modèle : Concours d'accès à la filière de formation des cadres de l'administration pédagogique - épreuve de sciences de

www.wadifa-info.com/fr/modele-concours/1329

Chaîne WhatsApp — **قناة واتساب**

المباريات الجديدة والنتائج كل يوم

Nouveaux concours et résultats chaque jour

wadifa-info.com/wa

Chaîne YouTube — **قناة يوتيوب**

امتحانات تجريبية بالتصحيح، بالدارجة

Examens blancs corrigés, expliqués en darija

youtube.com/@wadifainfo

Envoyer à un ami — **أرسل النموذج لصديق**

شارك هذا النموذج على واتساب مع من يحضّر معك

Partagez ce sujet sur WhatsApp

wa.me