

SESSION DE 1994**concours externe
de recrutement de professeurs agrégés****section : sciences physiques**

option : physique

épreuve A : composition de physique

Durée : 5 heures

L'usage de calculatrice électronique de poche — y compris calculatrice programmable et alphanumérique — à fonctionnement autonome, non imprimante, est autorisé conformément à la circulaire n° 86-228 du 28 juillet 1986.

Tout document interdit.

Les différentes parties de cette épreuve sont très largement indépendantes.

Tournez la page S.V.P.

I. PHÉNOMÈNE DE POLARISATION DE LA LUMIÈRE. POLARISEURS RECTILIGNES

I.1. Mise en évidence expérimentale.

Décrire une expérience permettant de réaliser une lumière polarisée rectilignement et de l'analyser.
Interpréter cette expérience.

I.2. États de polarisation d'une onde électromagnétique plane sinusoïdale.

I.2.a. Polarisation rectiligne.

Définir l'état de polarisation rectiligne.

Donner l'expression du champ électrique d'une onde plane sinusoïdale, polarisée rectilignement, qui se propage selon l'axe Oz dans le sens des z croissants.

I.2.b. Polarisation elliptique.

Définir l'état de polarisation elliptique et préciser la condition pour que l'onde soit polarisée elliptiquement à droite ou à gauche.

Dans le cas particulier d'une onde polarisée circulairement, indiquer les composantes du champ électrique dans un plan d'onde en distinguant les deux sens de polarisation.

I.3. Loi de Malus.

I.3.a. Énoncer la loi de Malus dans le cas d'un polariseur rectiligne parfait.

I.3.b. Considérer le cas où le polariseur rectiligne n'est pas parfait (par exemple un polaroïd). T_1 désigne le coefficient de transmission en énergie, selon la direction de transmission privilégiée du polariseur et T_2 le coefficient de transmission analogue, selon la direction perpendiculaire. On supposera $T_2 < T_1$.

Une onde électromagnétique plane, polarisée rectilignement, arrive normalement sur la face d'entrée d'un polaroïd; le vecteur champ électrique de l'onde fait un angle θ avec la direction de transmission privilégiée du polaroïd.



Calculer le coefficient de transmission T de l'onde à travers ce polaroïd en fonction de T_1 , T_2 et de l'angle θ . Retrouver la loi de Malus dans le cas particulier du polariseur parfait.

I.3.c. Une onde de lumière naturelle arrive normalement sur un ensemble constitué de deux polaroïds identiques, disposés en série, parallèlement. Les directions de transmission privilégiée des polariseurs font un angle α . Les polariseurs ne sont pas idéaux; ils sont caractérisés par les coefficients T_1 et T_2 définis dans la question I.3.b.

Exprimer, en fonction de T_1 et de T_2 , le coefficient de transmission T_0 de l'ensemble des deux polariseurs lorsque $\alpha = 0$.

Exprimer, de même, le coefficient de transmission T_{90} de l'ensemble des deux polariseurs lorsque

$$\alpha = \frac{\pi}{2}.$$

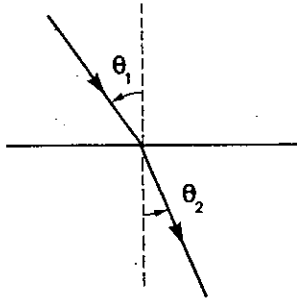
Exprimer, pour un angle α quelconque, le coefficient T_α de l'ensemble des deux polariseurs en fonction de T_1 , de T_2 et de α . Montrer que, dans l'approximation $T_2 \ll T_1$, on retrouve la loi de Malus.

II. DIFFÉRENTS PHÉNOMÈNES PRODUISANT UNE POLARISATION. POLARISEURS

II.1. Polarisation par réflexion.

II.1.a. Angle de Brewster.

Une onde électromagnétique plane se propage dans un milieu transparent d'indice de réfraction n_1 et arrive sur un dioptre, sous un angle d'incidence θ_1 . L'angle de réfraction est θ_2 dans le milieu transparent d'indice de réfraction n_2 .



Le vecteur champ électrique de l'onde incidente est contenu dans le plan d'incidence.

En considérant les sources de l'onde réfléchie et leur direction d'émission, prévoir, sans aucun calcul, qu'il existe un angle d'incidence θ_B (angle de Brewster) pour lequel il n'y a pas d'onde réfléchie.

Exprimer l'angle θ_B en fonction des indices n_1 et n_2 .

Donner la valeur de l'angle de Brewster dans le cas de la transmission air-verre puis dans celui de la transmission air-eau sachant que les indices de l'air, du verre et de l'eau sont respectivement 1, 1,5 et 1,3.

II.1.b. L'onde plane incidente est constituée par de la lumière naturelle qui arrive sur le dioptre, sous l'incidence brewstérienne.

Quel est l'état de polarisation de la lumière réfléchie ?

Proposer une expérience simple permettant de vérifier cet état de polarisation.

Quel est l'état de polarisation de la lumière transmise ?

II.1.c. Formules de Fresnel.

On appelle R_{\parallel} le coefficient de réflexion en énergie pour des vibrations parallèles au plan d'incidence et R_{\perp} le coefficient de réflexion en énergie pour des vibrations perpendiculaires au plan d'incidence.

On rappelle les expressions de R_{\parallel} et R_{\perp} en fonction de θ_1 et de θ_2 :

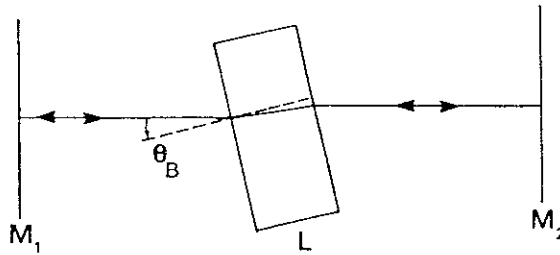
$$R_{\parallel} = \frac{\tan^2(\theta_2 - \theta_1)}{\tan^2(\theta_2 + \theta_1)} \quad \text{et} \quad R_{\perp} = \frac{\sin^2(\theta_2 - \theta_1)}{\sin^2(\theta_2 + \theta_1)}$$

Proposer une méthode expérimentale simple et rapide pour déterminer la direction de polarisation d'un polaroid.

Retrouver la valeur de θ_B , angle d'incidence brewstérienne.

Calculer les coefficients de transmission en énergie T_{\parallel} et T_{\perp} pour une lame à faces parallèles d'indice de réfraction $n = 1,5$, placée dans l'air, la lumière arrivant sur la lame en incidence brewstérienne. Calculer également la fraction de l'énergie incidente transmise par la lame.

II.1.d. Considérer le dispositif représenté sur la figure ci-dessous.



Une lame L transparente, à faces parallèles, est placée entre deux miroirs semi-réfléchissants parallèles M₁ et M₂.

Un pinceau de lumière monochromatique subit un grand nombre d'allers et retours entre les deux miroirs et traverse la lame sous l'incidence θ_B . Au départ, la lumière n'est pas polarisée.

Montrer qualitativement l'état de polarisation de la lumière après un grand nombre d'allers et retours.

Citer une application pratique de ce dispositif.

II.1.e. *Degré de polarisation.*

Un faisceau parallèle de lumière naturelle arrive obliquement sur un dioptre. On peut considérer que la lumière transmise est un mélange de lumière naturelle et de lumière polarisée dont la vibration est parallèle au plan d'incidence. L'intensité transportée par la lumière non polarisée est notée I_n ; l'intensité transportée par la lumière polarisée est notée I_p .

Le degré de polarisation de la lumière est défini par :

$$V = \frac{I_p}{I_n + I_p}.$$

Soit I_{\perp} l'intensité de la lumière transmise, transportée par la vibration perpendiculaire au plan d'incidence, I_{\parallel} l'intensité de la lumière transmise, transportée par la vibration parallèle au plan d'incidence.

Exprimer V en fonction de I_{\perp} et de I_{\parallel} , puis en fonction de T_{\perp} et de T_{\parallel} .

Calculer le degré de polarisation de l'onde transmise de l'air dans le verre (indice de réfraction 1,5) pour l'incidence brewstérienne. Commenter le résultat.

II.2. Polarisation par double réfraction.

II.2.a. *La biréfringence.*

Décrire une expérience mettant en évidence le phénomène de biréfringence obtenu avec un cristal de spath (ou de calcite). Expliquer comment on peut montrer expérimentalement la polarisation des rayons ordinaire et extraordinaire.

II.2.b. *Interprétation du phénomène de biréfringence.*

II.2.b.1. Préliminaire.

Un dioptre plan sépare deux milieux transparents isotropes d'indices de réfraction respectifs n_1 et n_2 . Une onde plane se propage du milieu 1 vers le milieu 2 et aborde le dioptre sous un angle d'incidence θ_1 .

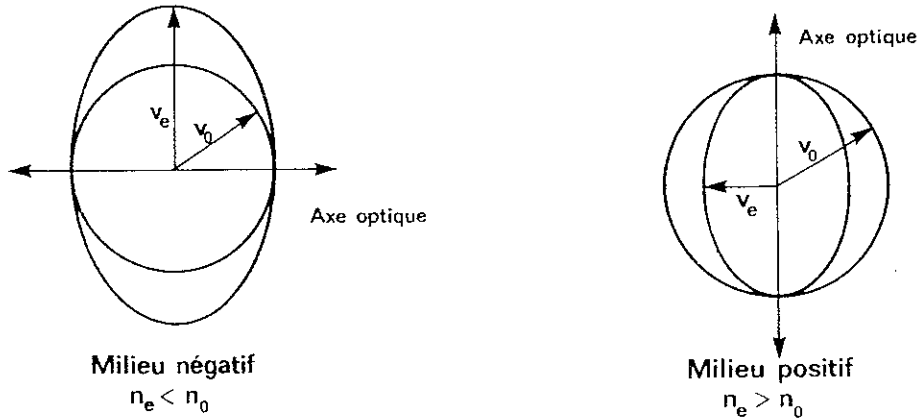
Énoncer le principe d'Huygens.

Appliquer ce principe pour construire un plan d'onde de la lumière réfractée. Préciser la direction des rayons lumineux par rapport aux surfaces d'onde et retrouver les lois de Descartes relatives à la réfraction.

H.2.b.2. Milieu anisotrope uniaxe.

Définir expérimentalement l'axe optique d'un cristal.

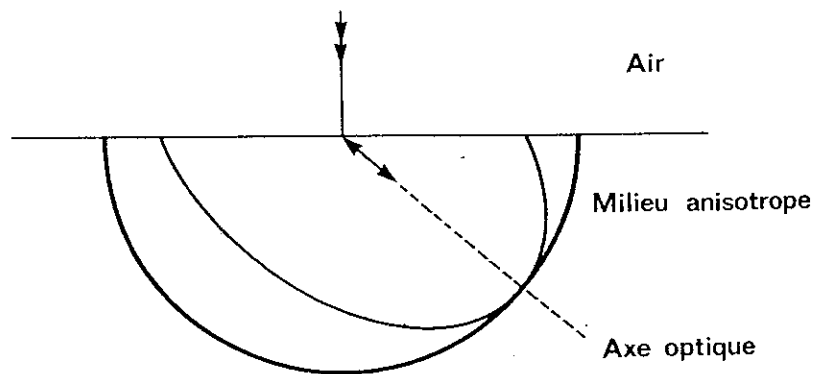
L'étude théorique des milieux uniaxes permet d'établir que la surface d'onde dans ces milieux comporte deux nappes, l'une sphérique, l'autre ovoïdale de révolution, tangentes sur l'axe optique.



La surface d'onde sphérique correspond à l'onde ordinaire ; son rayon a pour valeur v_0 , la vitesse de phase de l'onde ordinaire dans le cristal. On définit un indice de réfraction ordinaire $n_0 = \frac{c}{v_0}$, c désignant la vitesse de la lumière dans le vide. La surface ovoïdale à symétrie de révolution autour de l'axe optique correspond à l'onde extraordinaire ; les demi-axes ont pour longueur v_0 et v_e , vitesse de phase extraordinaire telle que $v_e = \frac{c}{n_e}$, n_e désignant l'indice extraordinaire.

Expliquer en quoi la forme de ces surfaces d'onde traduit le caractère anisotrope du milieu.

Une onde plane incidente non polarisée, de direction de propagation donnée, arrive normalement sur un dioptre air-milieu anisotrope. La figure représente l'intersection, pour un cristal uniaxe positif, de la surface d'onde et du plan défini par le rayon incident et par l'axe optique appartenant au plan d'incidence.



Construire les vecteurs d'onde correspondant respectivement à l'onde ordinaire et à l'onde extraordinaire. Énoncer les lois de Descartes.

Préciser pour chacune de ces ondes la direction du vecteur déplacement électrique \vec{D} dans le milieu.

Quelle est la valeur de l'indice lorsque \vec{D} est parallèle à l'axe optique ?

Quelle est la valeur de l'indice lorsque \vec{D} est perpendiculaire à l'axe optique ?

Entre quelles valeurs l'indice est-il compris lorsque le champ \vec{D} a une direction quelconque par rapport à l'axe optique ?

Tournez la page S.V.P.

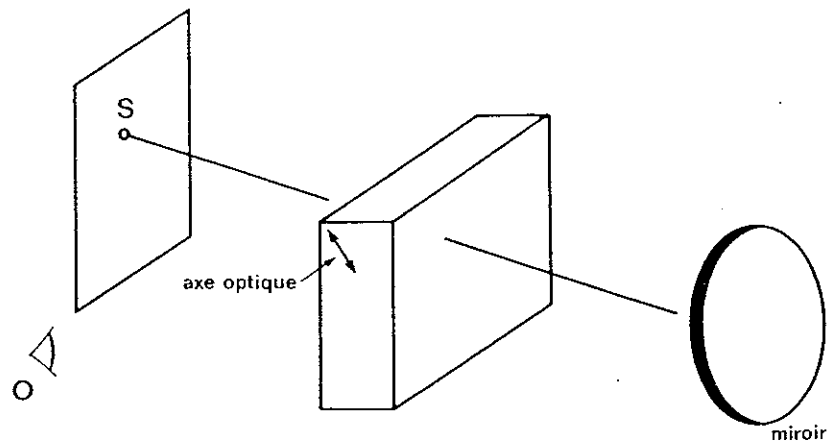
II.2.c. Exercices.

1. On considère une lame cristalline uniaxe, dont l'axe optique est parallèle aux faces. Une onde incidente arrive perpendiculairement à la lame.

Prévoir, en le justifiant, l'état de polarisation de la lumière à la sortie de la lame, dans les cas suivants :

- l'onde incidente est polarisée rectilignement et parallèlement à l'axe optique;
- l'onde incidente est polarisée rectilignement et perpendiculairement à l'axe optique;
- l'onde incidente est polarisée rectilignement, la direction de polarisation étant orientée obliquement par rapport à l'axe optique.

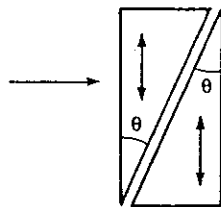
2. La figure montre un rayon de lumière qui traverse une lame de calcite et qui se réfléchit sur un miroir plan pour traverser à nouveau la lame en sens inverse. La lame a ses grandes faces parallèles au plan du miroir. Le rayon est proche de la perpendiculaire au miroir.



L'observateur placé en O verra-t-il une double image du spot S ?

II.2.d. Dispositif polariseur.

Le polariseur de Glan-Foucault.



Ce polariseur est constitué de deux prismes en calcite, de même angle, entre lesquels on laisse une couche d'air. Les prismes sont disposés de telle sorte que les axes optiques soient parallèles.

On donne $n_o = 1,658$ et $n_e = 1,486$. L'indice de l'air est pris égal à 1. Un pinceau de lumière naturelle arrive perpendiculairement à la face d'entrée.

Montrer que si l'angle θ des prismes est bien choisi, on récupère à la sortie du dispositif un pinceau de lumière polarisée. Indiquer l'état de polarisation du pinceau de sortie.

II.3. Polarisation par dichroïsme.

- II.3.a. Définir brièvement le phénomène de dichroïsme.

Expliquer l'étymologie du mot dichroïsme.

- II.3.b. Certains cristaux naturels comme la tourmaline présentent cette propriété.

Expliquer pourquoi une lame de tourmaline traversée par la lumière blanche présente une couleur verdâtre pour une certaine orientation et apparaît opaque pour une autre.

II.3.c. Grille métallique.

Une grille constituée de fils métalliques parallèles, régulièrement espacés, dont la période est de l'ordre de la longueur d'onde de la lumière, présente la propriété de dichroïsme. Expliquer pourquoi.

Un onde de lumière naturelle arrive perpendiculairement à la grille. Quel est l'état de polarisation à la sortie ?

Pourquoi est-il plus commode de réaliser de tels polariseurs dans le domaine de l'infrarouge ?

Citer une technique permettant de construire un tel polariseur.

II.3.d. Feuilles polarisantes.

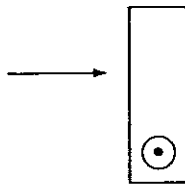
Décrire la technique de fabrication des feuilles polarisantes, ou feuilles polaroïds, inventées par E.H. Land et expliquer l'origine du dichroïsme présenté par ces feuilles.

III. LAMES À RETARD

III.1. Principe.

On se limitera au cas des lames à retard taillées dans des matériaux uniaxes. L'axe optique est parallèle aux faces de la lame.

Un pinceau de lumière monochromatique transportant une onde polarisée rectilignement arrive normalement à la lame.



Le pinceau subit-il une déviation ?

Expliquer la modification subie par l'onde à la sortie de la lame.

Définir les lignes neutres de la lame.

Dans le cas d'un cristal positif ($n_e > n_o$), préciser l'axe lent et l'axe rapide. Justifier la réponse.

III.2. Détermination expérimentale des lignes neutres.

Décrire une expérience permettant de déterminer les lignes neutres d'une lame à retard.

III.3. Lames demi-onde, quart d'onde.

III.3.a. Donner la définition d'une lame demi-onde et d'une lame quart d'onde. Elles seront notées respectivement D et Q par la suite.

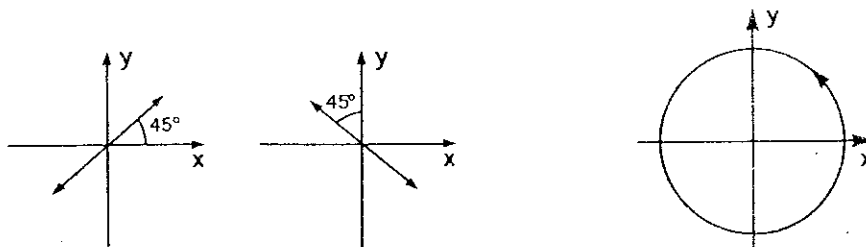
III.3.b. Calculer l'épaisseur minimale d'une lame de calcite D pour une longueur d'onde $\lambda = 600$ nm sachant que les indices de réfraction sont alors $n_o = 1,658$ et $n_e = 1,486$.

Même question pour une lame de quartz D sachant que, à cette longueur d'onde, les indices de réfraction sont $n_o = 1,544$ et $n_e = 1,553$.

Comparer les résultats et conclure.

Tournez la page S.V.P.

III.3.c. Considérer l'action d'une lame D puis d'une lame Q sur une onde monochromatique, polarisée conformément aux schémas ci-dessous, sur lesquels les axes Ox et Oy représentent les lignes neutres des lames :



III.3.d. On dispose d'un polaroïd et d'une lame Q.

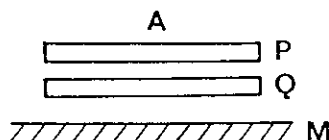
Proposer et justifier une méthode permettant de distinguer une lumière naturelle d'une lumière polarisée circulairement ou d'un mélange de lumière naturelle et de lumière polarisée circulairement.

III.4. Polariseur circulaire.

III.4.a. Montrer qu'il est possible d'obtenir un polariseur circulaire en associant convenablement un polaroïd et une lame à retard bien choisie.

Dans quel cas obtient-on un polariseur circulaire droit ou un polariseur circulaire gauche ?

III.4.b. On place, sur un miroir plan, l'ensemble constitué d'un polariseur rectiligne P et d'une lame quart d'onde Q.



Pour une certaine orientation du polariseur P, le miroir paraît obscur lorsqu'on le regarde normalement. Interpréter le phénomène et préciser l'orientation du polariseur P par rapport aux lignes neutres de la lame Q lorsque le miroir paraît obscur.

On retourne l'ensemble PQ sur le miroir. Peut-on observer le même phénomène ? Justifier la réponse.

Applications :

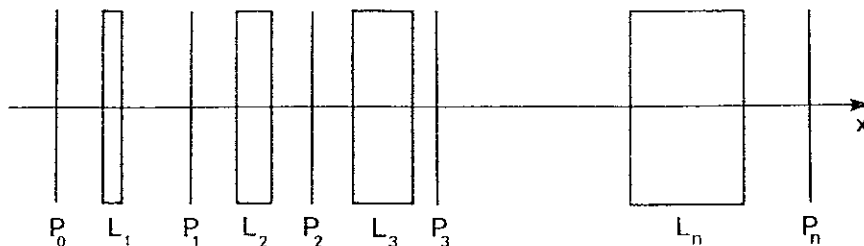
Montrer que le réglage d'un polariseur circulaire peut être obtenu à l'aide d'un simple miroir plan.

On illumine une scène avec un flash à travers une fenêtre. Comment se débarrasser des reflets gênants provenant de la lumière sur la vitre ? On supposera l'éclairage quasiment normal à la surface de la vitre.

III.5. Filtre de Lyot.

On réalise le montage de la figure ci-dessous, dans lequel $P_0, P_1, P_2, \dots, P_n$ sont des polaroïds parallèles, L_1, L_2, \dots, L_n sont des lames biréfringentes dont les axes sont parallèles et orientés à 45° de la direction privilégiée des polaroïds.

Les épaisseurs respectives de ces lames taillées dans le même matériau sont $e, 2e, 4e, 2^{(n-1)}e$.



La lame L_1 introduit entre les vibrations, selon les lignes neutres, la différence de phase φ . Le système est éclairé en lumière blanche naturelle.

III.5.a. Exprimer φ en fonction de la longueur d'onde λ , de la biréfringence $\Delta n = |n_e - n_o|$ de la lame et de son épaisseur e .

III.5.b. Exprimer l'intensité I transmise par le système en fonction de φ et de l'intensité I_0 transmise par le polariseur P_0 . On négligera l'absorption due aux traversées des lames et ses polaroïds successifs.

III.5.c. Déterminer la position des maxima principaux et montrer que les maxima secondaires correspondent à une intensité négligeable.

Donner l'allure de la courbe représentant I en fonction de φ .

Pourquoi ce dispositif peut-il être qualifié de monochromateur ?

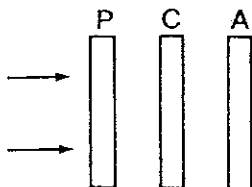
III.5.d. Traiter le cas particulier de quatre lames. Prendre $e = 250 \mu\text{m}$ et la biréfringence $\Delta n = |n_e - n_o| = 10^{-2}$.

Calculer les longueurs d'onde transmises dans le visible en supposant la biréfringence Δn indépendante de la longueur d'onde.

III.6. Détermination de la biréfringence d'une lame cristalline.

Une lame cristalline C taillée parallèlement à son axe optique a pour épaisseur e . On se propose de déterminer sa biréfringence.

III.6.a. La lame C est placée entre un polariseur P et un analyseur A croisés. L'ensemble est éclairé par un faisceau parallèle de lumière naturelle monochromatique.

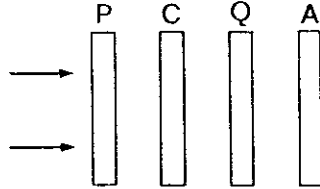


On fait tourner C jusqu'à l'extinction de la lumière. On fait tourner C de 45° à partir de cette dernière position et on note sa position.

Quelle est la position des lignes neutres de C par rapport à la direction de transmission privilégiée du polariseur P ?

Tournez la page S.V.P.

- III.6.b. On remplace la lame C par une lame quart d'onde Q entre le polariseur P et l'analyseur A. L'ensemble est encore éclairé par un faisceau parallèle de lumière naturelle monochromatique. On fait tourner Q jusqu'à l'extinction de la lumière et on note sa position. Quelle est la position des lignes neutres de Q par rapport à la direction privilégiée du polariseur P ?
- III.6.c. On place maintenant, entre le polariseur et l'analyseur croisés, les lames C et Q dans les positions repérées en III.6.a. et III.6.b. L'ensemble est toujours éclairé par le même faisceau de lumière.



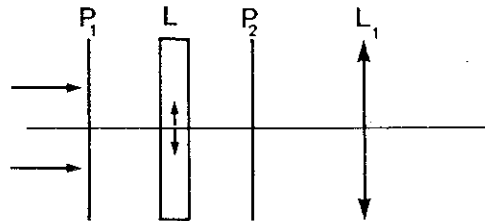
Pour rétablir l'extinction, il faut faire tourner l'analyseur d'un angle α .

Montrer que l'angle α peut être relié simplement au déphasage φ introduit par la lame C entre les deux vibrations qu'elle transmet selon son axe lent et son axe rapide.

- III.6.d. Exprimer la biréfringence $\Delta n = |n_e - n_o|$ de la lame C en fonction de α , de e et de la longueur d'onde λ_0 de la lumière utilisée.

III.7. Interférences en lumière polarisée.

Une lame cristalline L taillée parallèlement à son axe optique est placée entre deux polariseurs rectilignes P_1 et P_2 .



- III.7.a. L'ensemble est éclairé par un faisceau parallèle de lumière naturelle normal au système.

Pourrait-on observer des interférences en l'absence de P_1 ?

- III.7.b. Montrer que la présence du polariseur P_2 est indispensable pour obtenir des interférences.

- III.7.c. Comment faut-il placer P_1 et P_2 de préférence ? Justifier la réponse.

- III.7.d. On éclaire le dispositif en lumière blanche.

Qu'observe-t-on avec une lame d'épaisseur uniforme ?

Qu'observe-t-on avec une lame d'épaisseur non uniforme ?

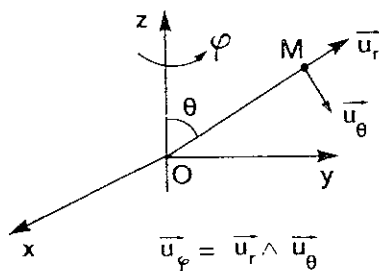
On remplace le polariseur rectiligne P_1 par une lame biréfringente de spath qui permet de dédoubler le faisceau. Qu'observe-t-on avec une lame d'épaisseur uniforme ?

IV. POLARISATION PAR DIFFUSION

IV.1. Rayonnement du dipôle électrique.

Un dipôle D constitué d'une charge $-q$ à l'origine O des coordonnées et d'une charge q animée, le long de l'axe Ox , d'un mouvement rectiligne sinusoïdal d'équation horaire $z = a \cos \omega t$. On posera $p_0 = qa$.

On considère le champ électromagnétique rayonné par le dipôle en un point M défini par ses coordonnées sphériques r, θ, φ . On suppose $r \gg a$ (approximation dipolaire). De plus, les dimensions du dipôle sont supposées petites devant la longueur d'onde.



IV.1.a. Montrer par des considérations de symétrie que le champ électrique n'a pas de composante suivant \vec{u}_φ .

IV.1.b. Dans le cadre des approximations précédentes, le calcul donne :

$$\vec{E} = - \frac{p_0 \omega^2 \sin \theta}{4 \pi \epsilon_0 c^2 r} \cos \omega \left(t - \frac{r}{c} \right) \vec{u}_\theta;$$

$$\vec{B} = \frac{\vec{u}_r \wedge \vec{E}}{c}.$$

Interpréter physiquement ces résultats en traitant les points suivants :

- structure locale de l'onde rayonnée ;
- polarisation de l'onde ;
- directivité de l'émission du dipôle oscillant ;
- variation du champ électromagnétique avec la distance.

IV.1.c. Citer d'autres modes d'émission de rayonnement dans le domaine des ondes hertziennes. Quel est le processus prépondérant qui intervient dans le rayonnement des atomes ?

IV.1.d. Calculer l'intensité énergétique du rayonnement en un point donné M , c'est-à-dire la puissance moyenne reçue par unité de surface. En déduire la puissance moyenne rayonnée par le dipôle dans l'espace et montrer qu'elle est proportionnelle à $\left(\frac{1}{\lambda}\right)^4$.

IV.2. Diffusion d'un rayonnement par un électron atomique.

Une telle diffusion est interprétée à l'aide du modèle élastique dans lequel un électron atomique de charge $q = -e$, de masse m , est soumis au champ électromagnétique, à une force élastique $-m\omega_0^2 \vec{r}$, à une force de frottement visqueux $-\frac{m}{\tau} \frac{d\vec{r}}{dt}$.

IV.2.a. Établir l'expression complexe du moment dipolaire de l'atome sachant que le champ électrique de l'onde électromagnétique s'écrit : $\vec{E} = E_m e^{-i\omega t} \vec{u}_z$.

Tournez la page S.V.P.

IV.2.b. On considère le cas particulier de la diffusion Rayleigh pour laquelle $\omega_0 \gg \omega \gg \frac{1}{\tau}$.

Montrer que la puissance moyenne rayonnée par l'atome est alors proportionnelle à $\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^4$ la longueur d'onde λ_0 correspondant à la pulsation ω_0 .

IV.3. La couleur bleue du ciel.

Dans l'atmosphère, les électrons atomiques vibrent avec une fréquence de l'ordre de 10^{17} Hz.

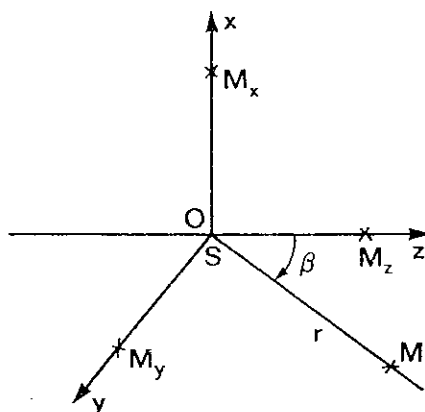
IV.3.a. Interpréter la couleur bleue du ciel et la couleur rouge du soleil couchant.

IV.3.b. Pourquoi, sur la Lune, le ciel paraît-il noir ?

IV.4. Polarisation de la lumière diffusée.

Une onde électromagnétique plane, non polarisée, se propage suivant l'axe Oz. Elle induit, sur un atome diffusant S situé en O, un moment dipolaire oscillant qui rayonne à son tour.

IV.4.a. Indiquer l'état de polarisation de la lumière diffusée par l'atome aux points M_x , M_y et M_z placés respectivement sur les axes Sx, Sy, Sz.



IV.4.b. On considère un point M_i dans le plan yOz et repéré par ses coordonnées polaires r et β .

Montrer que la lumière diffusée par la particule S en M_i est partiellement polarisée et calculer

l'indice de polarisation P défini par $P = \frac{I_x - I_h}{I_x + I_h}$ où I_x désigne l'intensité transportée par la vibration orientée selon l'axe Sx et I_h l'intensité transportée par la vibration orientée dans le plan horizontal ($OyOz$).

IV.5. Polarisation de la lumière diffusée par les molécules de l'air éclairé par le Soleil.

IV.5.a. On observe le ciel diurne à travers une lame polaroïd, dans une direction perpendiculaire à celle du Soleil.

Décrire et interpréter le phénomène de polarisation observé.

IV.5.b. On réalise une expérience analogue en observant le ciel dans une direction voisine de celle du Soleil.

L'onde diffusée dans cette direction est-elle polarisée ?

IV.5.c. Comment évolue la polarisation partielle de l'onde diffusée :

- lorsque l'altitude augmente ?
- lorsqu'on observe la lumière à travers un filtre jaune ou rouge ?

IV.5.d. Indiquer une méthode utilisée en photographie pour augmenter le contraste entre le ciel bleu et les nuages. Expliquer le phénomène.

IV.6. Expérience de cours.

On verse quelques gouttes de lait dans un récipient transparent contenant de l'eau et on éclaire le liquide avec le faisceau d'une lampe électrique.

IV.6.a. Prévoir la couleur de la lumière diffusée latéralement par les « particules » de lait.

IV.6.b. Prévoir l'état de polarisation de la lumière diffusée :

- dans une direction perpendiculaire à celle de la lumière incidente ;
- dans la direction de la lumière incidente.

IV.6.c. On ajoute progressivement du lait ; le faisceau de lumière dans l'eau devient blanchâtre.

Comment évolue la polarisation de la lumière diffusée dans une direction perpendiculaire à celle de la lumière incidente ?

La lumière solaire diffusée par un nuage blanc est-elle polarisée ?

IV.7. Applications à la biologie.

Les yeux de certains insectes ou animaux sont sensibles à la lumière polarisée. Citer un ou plusieurs exemples.

V. DESCRIPTION DES ÉTATS DE POLARISATION

Notation.

Lorsqu'une grandeur varie sinusoïdalement au cours du temps sous la forme $A \cos(\omega t - \varphi)$, nous lui associons la grandeur complexe $A e^{-i(\omega t - \varphi)}$.

Un état de polarisation d'une onde plane sinusoïdale qui se propage le long de l'axe Oz est entièrement caractérisé par la donnée de deux composantes du champ électrique dans le plan d'onde. Cet état est représenté, selon une notation due à Jones, par une matrice colonne dont les deux lignes sont proportionnelles aux amplitudes complexes du champ électrique :

$$\begin{bmatrix} E_{mx} \\ E_{my} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_x e^{i\varphi_x} \\ A_y e^{i\varphi_y} \end{bmatrix}$$

A_x et A_y sont réels.

Il peut être commode de normaliser la matrice précédente et de manipuler des matrices du type :

$$\frac{1}{\sqrt{A_x^2 + A_y^2}} \begin{bmatrix} A_x e^{i\varphi_x} \\ A_y e^{i\varphi_y} \end{bmatrix}.$$

V.1. Quelle est la signification physique de $\sqrt{A_x^2 + A_y^2}$, de $\varphi_y - \varphi_x$?

V.2. Identification d'états.

Que représentent les états suivants :

$$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}, \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix}, \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix}.$$

Tournez la page S.V.P.

V.3. **Superposition d'états cohérents.**

On considère la superposition des deux états $\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix}$, $\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix}$,

sous la forme : $\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix} + \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix} = \sqrt{2} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$.

Décrire physiquement les trois états représentés ci-dessus et justifier la règle d'addition.

V.4. **Transformation d'états.**

Les dispositifs (polariseurs, lame à retard...) qui agissent sur un état de polarisation sont ainsi représentés par des matrices 2×2 à éléments complexes.

Identifier les dispositifs associés aux matrices suivantes :

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} , \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} , \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} , \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} , \begin{bmatrix} e^{-i\pi/2} & 0 \\ 0 & e^{i\pi/2} \end{bmatrix} , \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & i \end{bmatrix}.$$

V.5. **Application.**

Le filtre de Lyot a été décrit dans la question III.5.

Quelle est la matrice colonne de Jones représentant l'onde à la sortie du polariseur P_0 ?

En considérant les matrices de la lame L_1 et du polariseur P_1 , exprimer la matrice de Jones associée à l'onde qui sort de la cellule ($L_1 P_1$).

En déduire la matrice de Jones associée à l'onde qui sort du dispositif entier et retrouver ainsi le résultat du III.5.b.

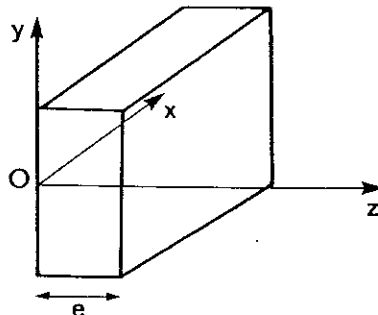
V.6. Pourquoi ce formalisme ne convient-il pas pour décrire des états de polarisation partielle ?

VI. MOMENT CINÉTIQUE DU RAYONNEMENT

VI.1. **Moment du couple exercé sur une lame cristalline.**

VI.1.a. Montrer qu'une onde électromagnétique traversant un solide diélectrique anisotrope exerce sur le solide un couple par unité de volume $\frac{d\vec{\Gamma}}{dv} = \vec{D} \wedge \vec{E}$, \vec{D} étant le vecteur déplacement électrique.

VI.1.b. Soit une lame anisotrope d'épaisseur e et de surface S . Le repère d'étude est choisi de telle sorte que les lignes neutres de la lame soient confondues avec les axes Ox et Oy .



Une onde électromagnétique plane monochromatique se propage dans la lame suivant l'axe Oz perpendiculaire à la face d'entrée qui coïncide avec le plan (Ox Oy).

Les indices de réfraction selon les axes Ox et Oy sont tels que :

$$n_x^2 = \epsilon_x \text{ et } n_y^2 = \epsilon_y, \quad \epsilon_x \text{ et } \epsilon_y \text{ désignant les permittivités relatives.}$$

À l'entrée de la lame, les composantes du champ électrique sont donnés par :

$$\begin{aligned} E_x &= E_0 \cos \omega t \\ E_y &= E_0 \cos (\omega t - \alpha). \end{aligned}$$

Calculer la moyenne temporelle $\langle \Gamma_z \rangle$ du moment du couple exercé sur la lame en fonction de E_0, α, n_x, n_y et $\varphi = \omega (n_x - n_y) e/c$, c désignant la vitesse de la lumière dans le vide.

Exprimez $\langle \Gamma_z \rangle$ en fonction de la puissance moyenne $\langle P \rangle$ transportée par l'onde.

VI.1.c. *Cas particulier d'une lame quart d'onde.*

L'onde incidente est circulaire gauche. Quel est l'état de polarisation de l'onde émergente ?

Exprimer $\langle \Gamma_z \rangle$ en fonction de $\langle P \rangle$ dans ce cas particulier.

L'onde qui a traversé la lame pendant le temps Δt a échangé avec elle un moment cinétique.

Exprimer la variation de moment cinétique de l'onde $\Delta \sigma_z$ en fonction de la pulsation et de l'énergie échangée par l'onde pendant le temps Δt .

VI.1.d. Compléter le tableau suivant :

Polarisation de l'onde incidente	Nature de la lame	Polarisation de l'onde émergente	$\langle \Gamma_z \rangle$ pour la lame
Circulaire G	Quart d'onde		
Circulaire D	Quart d'onde		
Rectiligne à 45° des lignes neutres	Demi-onde		
Circulaire G	Demi-onde		
Circulaire D	Demi-onde		
Quelconque	Onde		

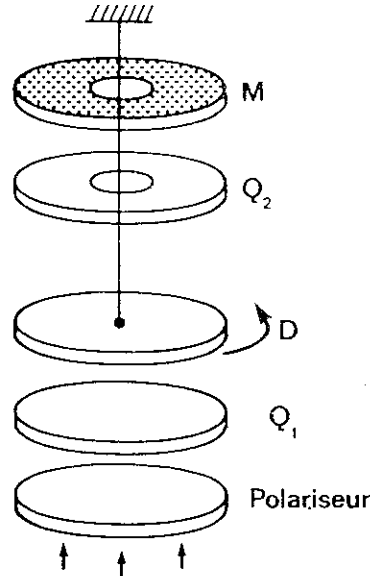
VI.1.e. *Interprétation des résultats précédents.*

Une onde polarisée rectilignement transporte-t-elle un moment cinétique ?

Exprimer le moment cinétique transporté par une onde circulaire droite, par une onde circulaire gauche, en fonction de l'énergie W véhiculée par l'onde. Vérifier sa dimension.

VI.2. Expérience de Beth.

Une lame cristalline demi-onde D est suspendue à un fil de torsion confondu avec l'axe Oz (figure ci-dessous). On l'éclaire par dessous avec une lumière monochromatique de pulsation ω , polarisée circulairement à gauche. À la sortie de la lame D , l'onde lumineuse traverse une lame quart d'onde fixe Q_2 puis est réfléchiée par un miroir M . L'onde réfléchiée par le miroir traverse successivement la lame Q_2 puis la lame D .



La direction de propagation de la lumière incidente est normale aux lames.

VI.2.a. Exprimer le couple moyen Γ_z qui s'exerce sur la lame D en fonction de la puissance moyenne P reçue par la lame.

Proposer des solutions pour augmenter le couple Γ_z .

Que se passe-t-il si l'on tourne le quart d'onde Q_1 de 90° ?

VI.2.b. On provoque un changement du sens de la polarisation circulaire incidente, périodiquement, avec des intervalles de temps valant la moitié de la période propre du pendule de torsion.

Prévoir qualitativement le mouvement de la lame.

VI.3. Transitions de résonance magnétique.

VI.3.a. *Moment cinétique de l'atome.*

Exposer très sommairement les résultats de mécanique quantique concernant le moment cinétique atomique : moment cinétique orbital, spin, addition...

VI.3.b. *Levée de la dégénérescence d'un niveau énergétique en présence d'un champ magnétique.*

Le champ magnétique est dirigé selon l'axe Oz .

Exprimer la composante \mathcal{M}_z du moment magnétique d'un atome sur l'axe Oz en fonction du facteur g de Landé, du magnéton de Bohr μ_B et du nombre quantique magnétique M .

La magnéton de Bohr est donné par $\mu_B = \frac{e\hbar}{2m}$ où e désigne la valeur absolue de la charge de l'électron et m sa masse.

Expliquer en quoi consiste la levée de la dégénérescence d'un niveau énergétique.

VI.3.c. Considérer le cas particulier de deux niveaux E_1 et E_2 tels que $E_2 > E_1$. Les niveaux E_1 et E_2 sont caractérisés par les nombres quantiques $J_1 = \frac{3}{2}$ et $J_2 = \frac{5}{2}$. On suppose g positif. Indiquer les sous-niveaux Zeeman en présence d'un champ magnétique.

Quelles sont les transitions possibles entre les sous-niveaux Zeeman en présence d'un champ magnétique ? Rappeler et justifier les règles de sélection.

Indiquer, pour chaque type de transition, la nature de la polarisation de la lumière émise.

N.B. — La polarisation circulaire est repérée par rapport au champ \vec{B} et non pas par rapport au sens de la propagation.

VI.3.d. La raie D_1 du sodium ($\lambda = 589,6$ nm) correspond à une émission entre le niveau E_2 ($J_2 = \frac{1}{2}$) et le niveau E_1 ($J_1 = \frac{1}{2}$).

Montrer que les niveaux sont dédoublés en présence du champ magnétique.

On désire provoquer la transition $(E_1, M_1 = -\frac{1}{2})$ vers le niveau $(E_2, M_2 = \frac{1}{2})$ en présence du champ magnétique. Quel doit être l'état de polarisation de l'onde absorbée ? Justifier la réponse.

En quoi consiste le pompage optique ? Pourquoi peut-on parler de température négative lors d'une inversion de population ? Citer des applications pratiques du pompage optique.

