



2000

**concours externe
de recrutement de professeurs agrégés**



option : physique

composition de physique



Calculatrice électronique de poche - y compris programmable, alphanumérique ou à écran graphique - à fonctionnement autonome, non imprimante, autorisée conformément à la circulaire n° 99-186 du 16 novembre 1999.

Tout document et tout autre matériel électronique sont interdits.

À PROPOS DE L'INTERFÉROMÈTRE DE MICHELSON :

QUELQUES DÉVELOPPEMENTS ET APPLICATIONS

Le sujet comporte une question préliminaire et neuf parties . La question préliminaire et les quatre premières parties sont largement utilisées dans les parties suivantes . Les parties V à IX peuvent être traitées de façon indépendante .

Si, au cours de l'épreuve, un candidat repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il le signale sur sa copie et poursuit sa composition en indiquant les raisons des initiatives qu'il est amené à prendre .

La plus grande importance sera donnée à la qualité de la rédaction et de la présentation .

Dans tout le sujet, sauf dans la partie VIII qui concerne la polarisation, on se place dans l'approximation de l'optique : la grandeur qui se propage peut être assimilée à un scalaire .

Question préliminaire .

Le candidat répondra brièvement mais soigneusement à cette question et pourra ensuite avec profit utiliser les résultats obtenus pour traiter des questions ultérieures .

On se place ici dans le cas idéal de deux sources lumineuses S_1 et S_2 ponctuelles, monochromatiques, de même longueur d'onde λ et de même intensité I_0 . On pose $a = S_1S_2$ et on appelle C le milieu du segment S_1S_2 .

Les deux sources sont d'abord à distance finie .

1. 1.a Exprimer l'intensité lumineuse en P en fonction de S_1P et S_2P , et en déduire la forme générale des surfaces d'égale intensité .

On utilise maintenant un écran (E) et on appelle axe du système la droite normale à l'écran passant par C et on suppose aussi en plus que S_1 et S_2 sont suffisamment éloignées du point P qui, lui, est voisin du point B, intersection de l'axe avec (E) .

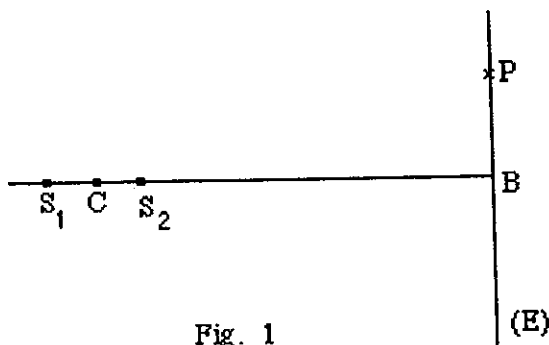


Fig. 1

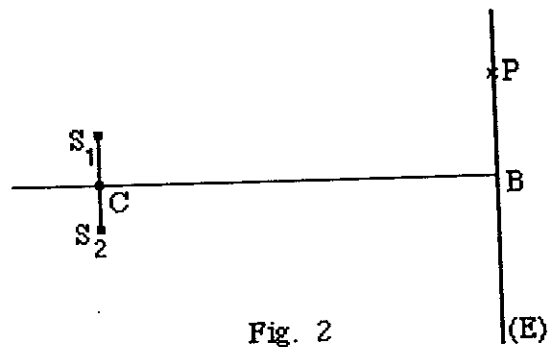


Fig. 2

1.b (voir fig. 1) On place (E) perpendiculairement à la droite S_1S_2 en B, supposé centre de l'écran (E) . Justifier la forme des franges d'interférence obtenues ?

Soit r une dimension caractéristique d'une frange . On considère la frange repérée (à partir du centre) par le numéro n , pour laquelle r vaut r_n . Exprimer r_n en fonction des données du problème (on pourra noter p_0 l'ordre d'interférence, supposé entier au point B). Commenter .

1.c (voir fig. 2) On place maintenant (E) parallèlement à la droite S_1S_2 . Quelle est la forme des franges d'interférence observées ?

Soit P un point de l'écran (E), situé au voisinage du point B . Définir et exprimer l'interfrange i en fonction des données . On pose $\overline{BP} = x$. Exprimer l'éclairement I au point P en fonction de x .

2. Un cas important est celui où les deux sources sont à l'infini: les deux ondes qui interfèrent sont alors des ondes planes de vecteurs d'onde \vec{k}_1 et \vec{k}_2 . Exprimer dans ce cas l'intensité

lumineuse $I(P)$ en P en fonction des vecteurs \vec{k}_1 , \vec{k}_2 et \vec{OP} , où O est l'origine des axes, supposée quelconque.

La suite de l'épreuve est consacrée à l'interféromètre et à l'expérience de MICHELSON.

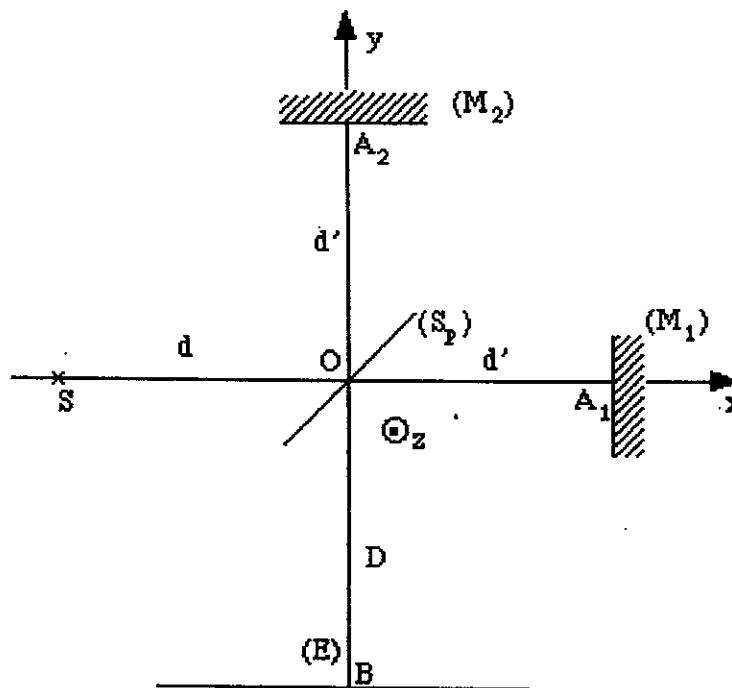


Fig. 3

L'interféromètre (voir fig. 3) est constitué de :

- deux miroirs réglables (M_1) et (M_2), dont l'un, (M_1) est susceptible de subir un mouvement de translation parallèlement à la direction Ox (appelé parfois mouvement de "chariotage");
- une lame semi-réfléchissante (Sp) (dite séparatrice), qui réfléchit la moitié de la lumière qu'elle reçoit. Cette lame est placée en O et fait un angle invariable de 45° avec les axes Ox et Oy .

Dans un premier temps, on suppose que l'épaisseur de la lame séparatrice est négligeable et qu'elle n'introduit aucun déphasage et on n'envisage pas de lame compensatrice.

L'interféromètre est dit "réglé" lorsque (M_1) est exactement orthogonal à Ox et (M_2) orthogonal à Oy , et dans leurs positions initiales (M_{10}) et (M_{20}) symétriques par rapport à (Sp). On suppose que (M_1) et (M_2) peuvent tourner autour des axes A_1z et A_2z orthogonaux au plan de la figure.

L'écran (E) est placé perpendiculairement en B à Oy . On pose $OB = D$.

Sont mises à disposition des lentilles (L_1), (L_2), (L_3) convergentes, de distances focales 0,5 cm , 20 cm , 1 m .

I Interféromètre utilisé avec une source ponctuelle

Une source ponctuelle monochromatique de longueur d'onde λ est placée en S sur l'axe Ox . On pose : $SO = d$.

I.1 Comment peut-on obtenir *simplement* une telle source à partir d'un laser et de lentille(s) ?

I.2 On part de l'interféromètre réglé avec $OA_1 = OA_2 = d' = 10,00$ cm et on déplace (M_1) par translation d'une distance e dans la direction des x croissants .

I.2.a Faire une figure soignée et montrer qu'on observe alors des franges d'interférence en précisant la position des sources secondaires S_1 et S_2 . Comment procéder pour obtenir ces franges ?

I.2.b Quelle est leur forme géométrique? Calculer les dimensions sur l'écran des trois premières franges sombres pour $d = 10,0$ cm , $D = 10$ cm , $e = 0,5$ mm , $\lambda = 632,8$ nm .

I.2.c Montrer qu'on peut obtenir géométriquement les sources secondaires en utilisant la source primaire et les miroirs (M_2) et (M'_1) [(M'_1) est l'image de (M_1) par rapport à la séparatrice] .

I.3 On part à nouveau de l'interféromètre réglé et on fait tourner (M_1) autour de A_1 d'un angle α petit .

I.3.a Faire une figure soignée et montrer qu'on observe alors des franges d'interférence, en précisant la position des sources secondaires S_1 et S_2 . Comment procéder pour obtenir ces franges et les observer? Quelle est leur forme géométrique? Calculer la position sur l'écran des franges sombres. Faire l'application numérique pour $d = 10$ cm , $D = 10$ cm , $\alpha = 2'$, $\lambda = 546$ nm.

On suppose que les miroirs gardent la même position dans toute la question I.3.

I.3.b On remplace la source ponctuelle par une fente très fine . Comment faut-il disposer celle-ci pour obtenir des interférences sur l'écran?

I.3.c A partir du cas précédent , on élargit maintenant la fente de façon symétrique en lui donnant une largeur b . Montrer, en supposant que la source est uniformément éclairée sur sa largeur, qu'on a une superposition continue de systèmes d'interférences, ce qui conduit à une diminution du contraste. Exprimer l'intensité lumineuse sur l'écran; comment définir le contraste en fonction de b et des autres données? Justifier le terme "contraste" utilisé à propos de la grandeur ainsi définie .

Faire l'application numérique avec $b = 0,2$ mm : calculer le contraste obtenu .

I.3.d Qu'appelle-t-on cohérence spatiale d'une source? En utilisant les résultats de la question précédente, définir et calculer la largeur de cohérence de la fente .

I.3.e Existe-t-il une solution pour obtenir des interférences quelle que soit la largeur de la fente source ?

II Interféromètre utilisé avec une source large

On utilise un interféromètre réglé et on déplace le chariot portant (M_1) d'une distance e , dans le sens des x croissants .

II.1 On considère une direction de rayons issus de la source caractérisée par l'angle i avec l'axe Ox . Montrer qu'un tel rayon, dédoublé par la séparatrice, donnera à la sortie un ensemble de deux rayons parallèles .

II.2 Calculer la différence de chemin optique (ou différence de marche) δ entre ces deux rayons .

II.3 Montrer qu'en plaçant en un point de l'axe Oy une lentille convergente (L) de distance focale f' , d'axe Oy , les franges d'interférence s'observent dans le plan focal image de (L). Quelle est leur forme ?

II.4 *Application numérique* : calculer les caractéristiques géométriques des deux premières franges sombres obtenues avec une source de longueur d'onde $\lambda = 546 \text{ nm}$, pour $e = 0,5 \text{ mm}$ et en utilisant la lentille (L_3) de distance focale $f'_3 = 1 \text{ m}$.

II.5 La largeur de la source intervient-elle sur le contraste des anneaux ? Que détermine-t-elle ?

II.6 Décrire les phénomènes observés lorsqu'on déplace lentement le chariot portant (M_1) dans le sens des x décroissants .

II.7 Comment doit-on choisir les lentilles à utiliser dans chacun des cas suivants :

- a) on cherche à présenter le phénomène à toute une classe ;
- b) on désire enregistrer un interférogramme ?

Justifiez votre réponse .

III Interférogrammes obtenus avec diverses radiations

On munit maintenant la vis qui commande le déplacement du chariot portant (M_1) d'un moteur (voir fig. 3). De cette manière, la translation du miroir (M_1) s'effectue à vitesse constante V .

On appelle $x(t)$ l'abscisse du point A_1 sur l'axe Ox . A l'instant initial $x(0) = d' - e$.

Dans le plan focal de la lentille de projection (L_2), une photodiode placée sur l'axe Oy délivre un photocourant $I(t)$ proportionnel à l'intensité lumineuse reçue. Un enregistreur permet de tracer la courbe $I(t)$.

III.1 On éclaire l'interféromètre par un laser de longueur d'onde $\lambda = 632,8$ nm. Tracer l'allure de l'interférogramme $I(t)$ obtenu. Quelle est l'expression de sa période temporelle T ?

III.2 On utilise maintenant une lampe à vapeur de mercure "haute pression", munie d'un filtre interférentiel jaune qui laisse passer le doublet jaune du mercure, constitué de deux radiations de même intensité, de longueurs d'onde $\lambda_1 = 577$ nm, $\lambda_2 = 579$ nm, soit $\delta\lambda = 2$ nm.

Tracer l'allure de l'interférogramme $I(t)$.

Sur cet interférogramme, dégager deux temps caractéristiques : T analogue à celui de la question précédente et T' , et les relier aux caractéristiques des radiations étudiées et de la vitesse V imposée par le moteur. Que vaut numériquement $\frac{T'}{2T}$? Que représente ce nombre ?

III.3 En fait les deux composantes du doublet jaune du mercure sont mieux modélisées par des raies lorentziennes de même profil (c'est-à-dire de même intensité et de même largeur spectrale $\Delta\lambda = 0,1$ nm) centrées sur les nombres d'onde $\sigma_1 = \frac{1}{\lambda_1}$ et $\sigma_2 = \frac{1}{\lambda_2}$.

Pour la raie 1, la distribution de densité spectrale peut s'écrire : $B_1(\sigma) = \frac{B_0 (\Delta\sigma)^2}{(\sigma - \sigma_1)^2 + (\Delta\sigma)^2}$;
pour la raie 2, de même, $B_2(\sigma) = \frac{B_0 (\Delta\sigma)^2}{(\sigma - \sigma_2)^2 + (\Delta\sigma)^2}$, les deux largeurs $\Delta\sigma$ étant supposées identiques.

III.3.a On suppose pour commencer que l'interféromètre est éclairé par la seule raie 1. Déterminer le photocourant en fonction de la différence de marche δ .

On sait que la transformée de Fourier d'une lorentzienne est une exponentielle et on admet que :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\cos(2\pi\alpha x) dx}{(x - x_0)^2 + \beta^2} = \frac{\pi}{\beta} \cos(2\pi\alpha x_0) e^{(-2\pi|\alpha|\beta)}$$

Exprimer en fonction de V et des autres données le temps caractéristique τ de la décroissance de l'enveloppe de $I(t)$.

III.3.b L'interféromètre est maintenant éclairé par les deux raies du doublet. Donner l'allure de l'interférogramme $I(t)$ obtenu en évaluant le rapport $\frac{2\tau}{T'}$.

Proposer une méthode expérimentale pour mesurer la largeur spectrale des composantes du doublet jaune du mercure .

III.4

III.4.a Quel est le phénomène physique qui permet de justifier que le profil des raies d'une lampe spectrale haute pression peut effectivement être modélisé par une lorentzienne ? Connaissez-vous d'autres phénomènes qui contribuent à la largeur des raies spectrales ?

III.4.b) C'est l'enregistreur qui impose une limitation pour la vitesse de translation V du fait de son temps de réponse . Sachant que ce temps de réponse est de l'ordre de 0,05 seconde , calculer la vitesse V correspondante .

La vis micrométrique entraînant la translation du chariot a un pas de 0,5 mm, et elle tourne en faisant un tour en dix minutes . La condition précédente est-elle vérifiée ?

IV Franges d'égale épaisseur

L'interféromètre étant réglé, on fait tourner le miroir (M_1) autour de A_1z d'un angle α faible . Il est alors "réglé en coin d'air".

On éclaire avec un laser ($\lambda = 632,8$ nm) muni d'un élargisseur de faisceau donnant un pinceau de rayons sensiblement parallèles .

IV.1 Caractériser les interférences obtenues avec ce dispositif . Comment peut-on les observer ? Où doit-on placer l'écran ?

Comment doit-on choisir la lentille qui permet d'obtenir des franges d'interférence bien visibles sur l'écran ? Quelle est la forme et la disposition de ces franges ?

IV.2 On choisit $\alpha = 2'$.

Comment peut-on le plus commodément, à l'aide de l'une des trois lentilles proposées (L_1), (L_2) ou (L_3), obtenir des franges distantes de 2 mm sur l'écran (E) en conservant $d' = 10,00$ cm ?

A quelle distance de O doit-on placer cette lentille et l'écran (E) ?

IV.3 La source est toujours monochromatique. On la place dans le plan focal d'une lentille convergente de distance focale $f' = 10$ cm.

Mais cette fente possède une certaine largeur géométrique (elle est assimilable à une fente fine, de largeur b), ce qui fait que tous les rayons qui en sont issus n'ont pas le même angle d'incidence .

IV.3.a Donner les composantes des vecteurs d'onde \vec{k}_1 et \vec{k}_2 des rayons qui interfèrent après réflexion sur les miroirs (M'_1) et (M_2) , en notant i l'angle d'incidence sur (M'_1) .

IV.3.b En déduire l'intensité lumineuse correspondante et déterminer la valeur de i donnant aux franges le meilleur contraste possible .

IV.3.c Évaluer la largeur b maximale admissible pour conserver 500 franges bien contrastées et disposées de part et d'autre de l'ordre zéro .

IV.4 A l'aide d'une lampe à vapeur de sodium, on éclaire maintenant une fente fine qui sert donc de source et qui est placée dans le plan focal objet d'une lentille convergente de distance focale 10 cm .

On suppose que la lampe à vapeur de sodium délivre uniquement les deux radiations de même intensité et de longueurs d'onde $\lambda_1 = 589,0 \text{ nm}$, $\lambda_2 = 589,6 \text{ nm}$.

IV.4.a Comment doit-on disposer cette fente pour obtenir des franges bien contrastées ?

IV.4.b On déplace le miroir (M_1) en le translatant dans la direction de Ox . Décrire les phénomènes observés . De combien faut-il déplacer (M_1) pour retrouver exactement le même contraste ?

V Interférences en lumière blanche

Comme précédemment , l'interféromètre est soigneusement réglé et on a fait tourner le miroir (M_1) d'un angle α supposé faible . On utilise maintenant une lampe délivrant de la lumière blanche .

V.1 Décrire le phénomène obtenu. Que se passe-t-il lorsqu'on déplace le miroir (M_1) en le translatant parallèlement à Ox ?

V.2 On dispose à la place de l'écran (question IV.2) la fente d'un spectroscopie à prisme, disposée en B parallèlement à Oz . On déplace le miroir (M_1) d'une distance e .

Qu'observe-t-on dans le spectroscopie ?

La lumière blanche utilisée étant supposée correspondre à des longueurs d'onde comprises entre 400 et 750 nm, décrire précisément le phénomène si :

a) $e = 0,02 \text{ mm}$;

b) $e = 1,5 \text{ mm}$.

V.3 On revient au dispositif de la question II : l'interféromètre est réglé, et la radiation incidente est monochromatique . On introduit devant le miroir (M_2) une lame à faces parallèles très mince de verre d'indice $n = 1,5$ et d'épaisseur e . Que se passe-t-il ?

V.4 On effectue la même expérience en lumière blanche.

V.4.a Que se passe-t-il lorsqu'on introduit la lame? Comment et de combien doit-on déplacer (M_1) pour obtenir à nouveau des franges ?

V.4.b En fait , l'indice du verre de la lame dépend de la longueur d'onde. On admet que l'indice varie suivant la loi : $n = A + \frac{B}{\lambda^2}$. Comment le résultat précédent est-il qualitativement modifié ?

V.4.c Définir les trois termes: ordre zéro, frange achromatique, teinte plate, et les illustrer en utilisant les expériences décrites dans cette question V.4 . Donner en particulier l'ordre p_a de la frange achromatique en fonction de B.

V.5 On règle un interféromètre de Michelson à la teinte plate. Décrire succinctement ce réglage . On introduit ensuite devant le miroir (M_2) la lame de verre utilisée précédemment . Que doit-on faire pour retrouver la teinte plate ? Comparer avec le résultat de la question V.4.

V.6 Quelle est l'utilité de la lame compensatrice, dans un interféromètre réel ? Pourquoi a-t-on besoin de "compenser" le chemin optique parcouru dans la lame séparatrice ?

VI Interféromètre de Twyman

On reprend le dispositif du I (source ponctuelle monochromatique) , mais on remplace le miroir (M_1) par un miroir sphérique (M_1) (concave ou convexe) de rayon $R = 10$ m et d'axe Ox . On réalise $OA_2 = OA_1$.

VI.1 L'observation se fait à l'oeil nu . Quel phénomène d'interférences observe-t-on ? Déterminer la position des franges brillantes . Le résultat est-il le même pour un miroir convexe et un miroir concave ?

VI.2 On déplace (M_1) dans le sens de l'axe Ox . Comment se déplacent les franges d'interférences ?

VI.3 Montrer comment un tel dispositif peut être utilisé pour détecter les défauts d'usinage d'un objectif , d'un prisme ...

VII Mesures physiques faites à l'aide de l'interféromètre de Michelson

Dans cette partie, l'interféromètre est utilisé pour réaliser des expériences mettant en jeu de faibles variations d'indice .

L'interféromètre est utilisé en "coin d'air" . Pour cela , on fait subir au miroir (M_1) une rotation autour de l'axe A_1z , dans le sens positif , d'un angle α petit ($\alpha = 10^{-3}$ rad) (voir partie IV) . La source est le laser muni de l'élargisseur de faisceau et on projette des franges verticales sur l'écran (E) à l'aide d'une lentille (IV.2) . Le grandissement est $\gamma = -10$. Le plan de l'écran est rapporté à des axes BX , BZ (B est le centre de l'écran, point conjugué du centre des miroirs, BX parallèle à Ox , BZ parallèle à Oz) .

VII.1 On produit, devant le miroir (M_1) et parallèlement à celui-ci, un jet de gaz butane dont on suppose qu'il est horizontal et que son diamètre est de l'ordre de 1 mm (ce jet peut être aisément

obtenu à partir d'un briquet à gaz). L'indice de l'air dans les conditions de l'expérience est de 1,00029, et celui du butane de 1,00062 .

Dessiner en la justifiant l'allure des franges obtenues .

VII.2 On place maintenant devant (M_1) une cellule à faces parallèles d'épaisseur $a = 1$ cm qui contient initialement de l'air ambiant ($P_0 = 1$ bar , $T_0 = 293$ K) . On suppose que l'indice de réfraction n d'un gaz est tel que $n - 1$ soit proportionnel à sa masse volumique (loi de Gladstone) .

VII.2.a Montrer que, si l'on comprime l'air de la cellule à température constante , les franges se déplacent . Déterminer le sens du déplacement et la surpression que l'on peut ainsi détecter , si l'on considère qu'il est possible d'apprécier un déplacement de franges de 0,05 interfrange . Les hypothèses seront clairement indiquées et justifiées .

VII.2.b Si l'air contenu dans la cellule est chauffé à la pression de 1 bar , montrer que les franges se déplacent également . Donner le sens du déplacement et la variation de température qu'il est ainsi possible de détecter .

VII.3 On place devant (M_1) une cellule d'épaisseur $a = 1$ cm et de largeur $a = 1$ cm , de hauteur $c = 10$ cm , divisée en deux compartiments : le compartiment inférieur ($-\frac{c}{2} < z < 0$) contient une solution diluée constituée par un solvant (s) et un soluté de concentration moléculaire C_{o2} . Le compartiment supérieur ($0 < z < \frac{c}{2}$) contient de même le solvant (s) avec le même soluté, mais de concentration moléculaire C_{o1} . A l'instant $t = 0$, on supprime la paroi qui sépare les deux compartiments . Le soluté diffuse parallèlement à l'axe Oz avec un coefficient de diffusion D . On note $C(z,t)$ la concentration moléculaire du soluté à un instant quelconque t . Le rôle de la pesanteur est négligeable .

VII.3.a L'indice de réfraction du solvant seul est noté n_s et $n(z,t)$ est l'indice de la solution diluée. On définit : $A = \left(\frac{dn}{dC} \right)_{C=0}$. Exprimer l'indice de la solution $n(z,t)$ en fonction de n_s , A et $C(z,t)$ pour une solution diluée .

VII.3.b Exprimer la nouvelle différence de marche δ en fonction de x (déplacement du miroir (M_1)) , α , $n(z,t)$ et a . Quelle est la forme des franges d'interférence observées avant qu'on supprime la paroi ?

VII.3.c Quelle sera la forme de ces franges au bout d'un temps très grand ? En fait, il existe dans ce phénomène de diffusion un temps caractéristique τ au-delà duquel les franges n'évoluent plus sensiblement . Donner l'expression de τ en fonction des données du problème .

VII.3.d On se place dans le cas où $t \ll \tau$, ce qui permet de considérer la dimension verticale de la cellule , c , comme très grande .

Quelles sont les conditions initiales $C(z , t = 0)$ et les conditions aux limites $C(z \rightarrow -\infty , t)$ et $C(z \rightarrow +\infty , t)$? Quelles sont les deux conditions aux limites en $z = 0$ pour $t > 0$?

VII.3.e La solution est de la forme suivante (E, F, G et H sont des constantes) :

$$C(z < 0, t) = E + F \int_{-\infty}^{u(z,t)} \exp(-w^2) dw$$

$$C(z > 0, t) = G + H \int_{+\infty}^{u(z,t)} \exp(-w^2) dw ; u(z,t) = \frac{z}{2\sqrt{Dt}}$$

(on admettra la forme de cette solution sans chercher à le vérifier) . Déterminer les constantes E , F , G , H en fonction des données, sachant que : $\int_0^{+\infty} \exp(-w^2) dw = \frac{\sqrt{\pi}}{2}$.

VII.3.f A la date $t = 120$ s, on évalue sur l'écran rapporté aux axes BX, BZ avec un grandissement $|\gamma| = 10$ la pente $\frac{dX}{dZ}(Z = 0, t) \approx 1$ et l'écart entre les franges dans les deux compartiments $\Delta = X(Z \rightarrow +\infty, t) - X(Z \rightarrow -\infty, t) = 10$ mm En déduire l'ordre de grandeur du coefficient de diffusion D et du temps caractéristique τ . Conclusion ?

VIII Interférences en lumière polarisée

Sur les bras d'un interféromètre réglé en coin d'air (voir question IV), et utilisé en lumière monochromatique de longueur d'onde λ , on introduit des lames polarisantes P_1, P_2, P_e, P_s ou des lames cristallines . On appelle "axe" d'une lame polarisante la direction du champ électrique de l'onde qui en sort . On suppose pour simplifier que les lames de l'interféromètre (séparatrice et compensatrice) n'agissent pas sur la polarisation de la lumière .

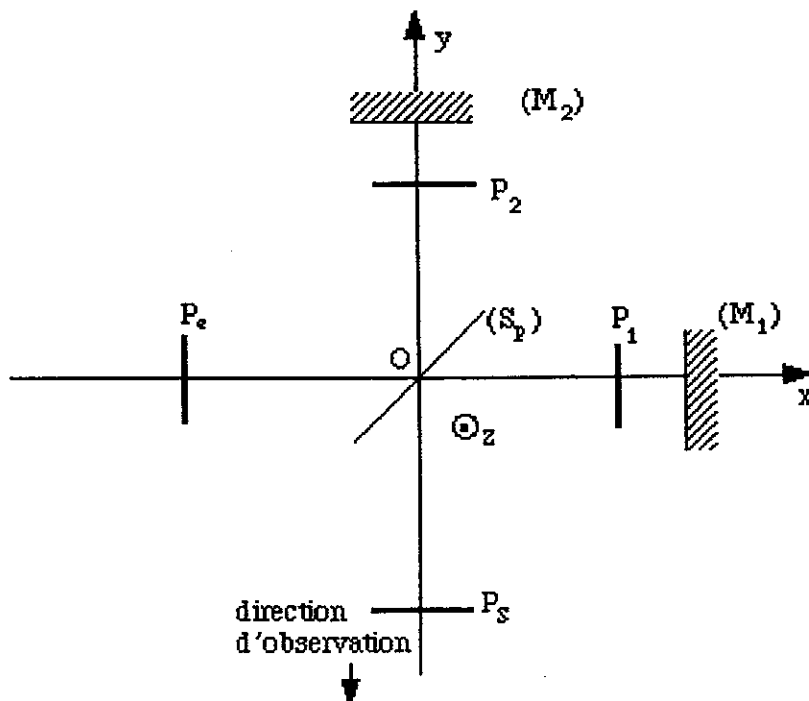


Fig. 4

L'observation est faite dans la direction indiquée sur la figure (voir fig. 4), en notant α_e , α_1 , α_2 , α_s les angles que font les axes des lames avec l'axe Oz (comptés positivement autour des directions Ox et Oy).

VIII.1 Au départ, on place seulement les polariseurs P_1 , P_2 avec leurs axes parallèles à Oz. Que voit-on ?

VIII.2 On fait tourner P_1 de $\frac{\pi}{2}$ autour de Ox. Que voit-on ? On conserve cette disposition des polariseurs croisés dans la suite de la partie VIII.

VIII.3 On ajoute la lame P_s , que l'on fait tourner autour de Oy. Calculer le contraste des franges en fonction de α_s . Pour quelles valeurs de α_s est-il maximal ?
Qu'illustre cette expérience? Quel nom lui donne-t-on ?

VIII.4 On retire P_s , et on introduit P_e . Qu'observe-t-on pour une valeur donnée de α_e ?
Que se passe-t-il quand on fait tourner P_e autour de Ox ?

VIII.5 On replace P_s , avec $\alpha_s = \frac{\pi}{4}$, en maintenant P_e . Que se passe-t-il quand on fait tourner P_e autour de Ox ? Comparer à l'un des cas précédents.

VIII.6 P_s est enlevé; on place le polariseur P_e avec $\alpha_e = 0$. Devant (M_1) et (M_2), on remplace les polariseurs par deux lames quart d'onde à la longueur d'onde λ telles que Oz soit bissectrice des angles entre axes lent et rapide des lames, bissectrice intérieure pour l'une et bissectrice extérieure pour l'autre. Qu'observe-t-on? Justifier le résultat.

VIII.7 Le polariseur P_e étant toujours seul utilisé avec $\alpha_e = 0$, et on place devant les miroirs (M_1) et (M_2) deux lames de quartz identiques d'épaisseur 2,5 cm et de pouvoir rotatoire $2170^\circ \cdot \text{m}^{-1}$.
Qu'obtient-on à la sortie ?

VIII.8 On garde le polariseur P_e dans sa position précédente et on met sur les deux bras de l'interféromètre deux "canons" de flint (verre au plomb), de longueur 5 cm placés dans l'entrefer de deux électroaimants produisant un champ magnétique sensiblement uniforme de 0,1 T longitudinal, c'est-à-dire parallèle à la direction de propagation de la lumière, les deux champs étant opposés (voir fig. 5 page suivante). La constante de Verdet du flint est de $530^\circ \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{T}^{-1}$.

Qu'obtient-on dans la direction d'observation ? Quelle est la valeur numérique du contraste des franges ?

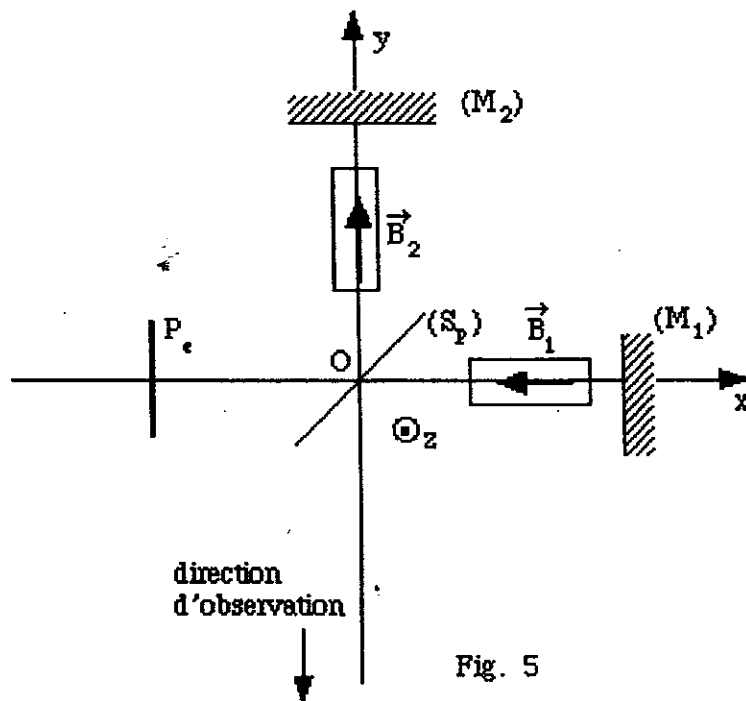


Fig. 5

IX Expérience de Michelson

IX.1 La source S étant supposée au repos dans le référentiel (R_0) , l'interféromètre de MICHELSON est animé d'un mouvement de translation rectiligne uniforme de vitesse v parallèle à l'axe des x (voir fig. 6). On appelle (R) le référentiel lié à l'interféromètre. Pour simplifier, on note maintenant $L = OA_1 = OA_2$ la longueur commune des bras de l'interféromètre.

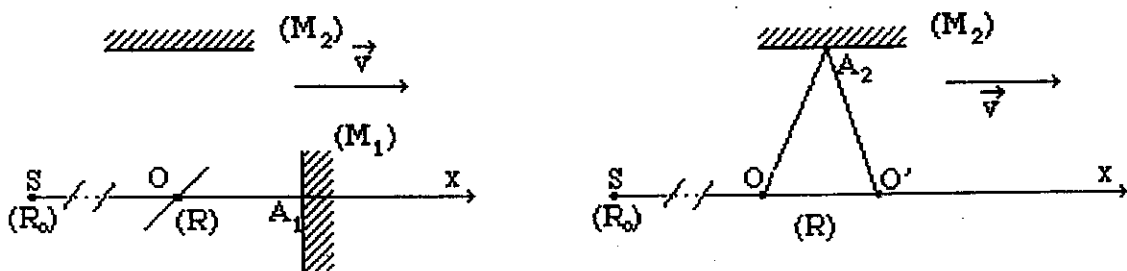


Fig. 6

IX.1a On suppose valables les lois de la mécanique newtonienne : la vitesse de la lumière se compose comme n'importe quelle vitesse, c'est-à-dire que le pinceau lumineux issu de S est animé par rapport à (R_0) d'une vitesse c et par rapport à (R) d'une vitesse tenant compte de la vitesse d'entraînement v .

A quelle(s) vitesse(s) la lumière parcourt-elle les deux trajets OA_1 et A_1O ? Calculer le temps t_1 mis par la lumière pour parcourir l'aller et retour le long de l'axe Ox .

IX.1.b Le long de l'autre bras, la lumière met le temps t_2 pour parcourir l'aller et retour. Pendant cette durée, la lumière parcourra à la célérité c le trajet OA_2O' , où O' est la position du centre O de l'interféromètre lorsque la lumière y revient. Calculer t_2 .

IX.1.c Déterminer la différence $\Delta t = t_1 - t_2$ en fonction de L , v et c , en supposant $v \ll c$. Évaluer cet intervalle de temps en choisissant pour les paramètres des valeurs réalistes. Peut-on espérer mesurer cet intervalle de temps ? Comment peut-on tenter de s'affranchir de l'erreur due à l'inévitable inégalité des dimensions des deux bras de l'interféromètre?

IX.1.d La source S est le Soleil immobile dans (R_0) ; le référentiel (R) est lié à la Terre animée de la vitesse $v = 30 \text{ km.s}^{-1}$ par rapport au Soleil.

Les bras de l'interféromètre ont pour longueur commune $L = 20 \text{ m}$ et la lumière solaire a la longueur d'onde moyenne $\lambda = 500 \text{ nm}$.

Montrer qu'une méthode interférentielle permet de traduire cette différence Δt en terme de décalage des franges d'interférences et calculer ce décalage.

Comment peut-on envisager des longueurs de bras aussi importantes ?

L'expérience de Michelson fut maintes fois recommencée : MICHELSON (1881), MICHELSON et MORLEY (1887), JOOS (1930). Mais elle n'a jamais mis en évidence un décalage des franges (plus exactement, les inévitables incertitudes de mesure donnent pour v une valeur maximale très inférieure à la valeur admise).

IX.2 Qu'appelle-t-on principe de relativité en mécanique newtonienne?

Donner un argument permettant de montrer que l'électromagnétisme ne vérifie pas ce principe de relativité newtonienne, par exemple en justifiant que, si les équations de MAXWELL sont valables dans (R_0) , elles ne peuvent pas l'être dans (R) .

IX.3 L'existence d'un référentiel privilégié (R_0) , baptisé *éther*, et dans lequel la célérité de la lumière serait c , est peu satisfaisante.

L'invariance de la célérité c de la lumière permet de montrer que l'abscisse et l'instant où se produit un événement (x_0, t_0) dans (R_0) , (x, t) dans (R) sont liés par :

$$x = \gamma(x_0 - vt_0) \quad \text{et} \quad t = \gamma\left(t_0 - \frac{v x_0}{c^2}\right) \quad \text{où} \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

IX.3.a Montrer que le bras parallèle à l'axe des x , de longueur L dans (R) , a, dans (R_0) une longueur $L_0 < L$. Trouver l'expression de L_0 .

IX.3.b Le bras perpendiculaire à l'axe de x a la même longueur dans (R) et dans (R_0)
Pouvez-vous donner un argument simple permettant de justifier ce résultat ?

IX.3.c Calculer dans ces conditions les durées t'_1 et t'_2 des trajets OA_1O et OA_2O .
Conclusion ?