

Épreuve de physique II

Samedi 11 mars : 8h30-12h30

Piste noire

Instructions générales :

Le candidat attachera la plus grande importance à la clarté, à la précision et à la concision de la rédaction. Si un candidat est amené à repérer ce qui peut lui sembler être une erreur d'énoncé, il le signalera sur sa copie et devra poursuivre sa composition en expliquant les raisons des initiatives qu'il a été amené à prendre.

L'usage de la calculatrice est autorisé.

Mesure de l'activité sismique d'une étoile par interférométrie

Le dispositif étudié constitue un interféromètre compact dédié à l'étude sismique de sources stellaires. Le principe proposé, un peu moins efficace qu'un spectromètre à réseau, conduit à un instrument bien moins encombrant et bien moins coûteux. Le principe de l'interféromètre est analysé, ainsi que son installation au foyer d'un télescope et son fonctionnement dans des conditions d'observation réalistes. On suppose, dans tout le problème, les optiques idéales : lentilles parfaitement transparentes, miroirs totalement réfléchissants, lames semi-réfléchissantes divisant le faisceau incident en deux faisceaux d'intensités lumineuses égales. Un soin tout particulier devra être apporté aux applications numériques.

Grandeurs physiques

$$\text{Vitesse de la lumière : } c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$$

$$\text{Constante de Boltzmann : } k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$$

$$\text{Constante des gaz parfaits : } R = 8,31 \text{ J.K}^{-1}\text{mol}^{-1}$$

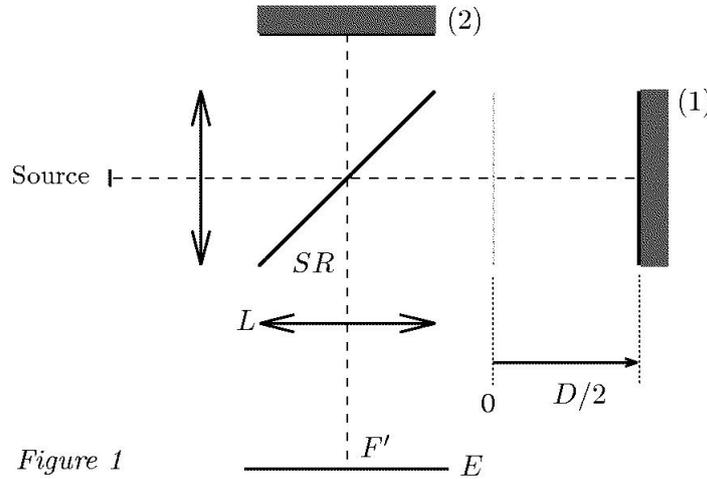
$$\text{Masse de l'atome d'hydrogène : } m_H = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$\text{Masse molaire de l'hydrogène atomique : } M_H = 1 \text{ g.mol}^{-1}$$

I. Interférométrie

Dans tout ce qui suivra on notera σ le nombre d'onde, à savoir l'inverse de la longueur d'onde λ . On exprimera ce nombre d'onde en m^{-1} .

- La figure 1 correspond au montage de principe d'un interféromètre de Michelson. Les miroirs sont réglés de telle façon que l'on observe des anneaux d'interférence circulaires sur l'écran E placé dans le plan focal de la lentille L , de distance focale image f' .
 - Quel est le rôle de la lame semi-réfléchissante SR ? Quel est celui de la lentille L ?
 - Montrer qu'avec ce montage la moitié du flux incident est irrémédiablement perdue.



- La différence de marche, différence entre les deux chemins optiques pour un rayon entrant perpendiculairement au miroir (1), est notée D ; pour un rayon entrant avec une inclinaison i , on rappelle que la différence de marche est alors donnée par $\delta = D \cos i$.
 - L'interféromètre est éclairé par une source étendue, supposée strictement monochromatique de nombre d'onde σ_0 . On suppose la tache centrale en F' brillante. Exprimer le rayon r_1 du 1^{er} anneau sombre, en fonction de σ_0 , D et f' . Faire un schéma de ce que l'on observe sur l'écran.
 - La source est l'image d'une étoile, telle celle fournie par un télescope. Cette image est étalée par la diffraction mais surtout par la turbulence atmosphérique, ce qui donne des rayons entrant dans l'interféromètre d'inclinaisons diverses mais faibles. Quelle est la figure d'interférence observée en fonction de D en présence d'un filtre interférentiel qui sélectionne une très étroite bande passante autour d'un nombre d'onde σ_0 donné?
- On éclaire l'interféromètre par une source monochromatique, de nombre d'onde σ_0 . Un détecteur est placé au foyer F' de la lentille L . Ce détecteur délivre un signal $S(D)$, proportionnel à l'intensité lumineuse au point F' . Ce signal sera appelé dans la suite *interférogramme*. Il dépend de la différence de marche D .
 - Montrer que $S(D)$ est donné par : $S(D) = S_0(1 + \cos 2\pi\sigma_0 D)$. Que représente S_0 ?
 - Quelle est la période de l'interférogramme?
- On illumine l'interféromètre par une source présentant un doublet de nombres d'onde σ_1 et σ_2 voisins. Chacune des raies est supposée monochromatique et leurs intensités sont égales.
 - Déterminer l'expression de l'interférogramme $S(D)$ correspondant. Mettre en évidence deux périodes caractéristiques dans $S(D)$.
 - Application numérique* : Représenter l'allure de l'interférogramme pour le doublet du sodium : $\lambda_1 = 589,0 \text{ nm}$ et $\lambda_2 = 589,6 \text{ nm}$.

II. Interférogramme d'une raie élargie

- On suppose maintenant que le profil spectral de la source n'est plus monochromatique mais possède une largeur $\Delta\sigma$. On désigne par I_σ l'intensité spectrale : dans l'intervalle $[\sigma, \sigma + d\sigma]$ l'intensité émise

est $I_\sigma d\sigma$. On admettra que les rayonnements correspondant à chaque intervalle de largeur $d\sigma$ sont incohérents. On notera I_0 l'intensité lumineuse totale de la raie. I_0 est donc donnée par la somme des intensités de chaque intervalle :

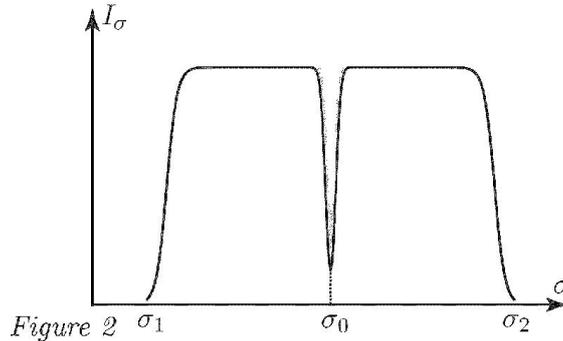
$$I_0 = \int_0^\infty I_\sigma d\sigma.$$

Dans la suite, on prend I_σ de la forme :

$$I_\sigma(\sigma) = \frac{I_0}{\Delta\sigma} \quad \text{si } |\sigma - \sigma_0| \leq \frac{\Delta\sigma}{2}$$

$$I_\sigma(\sigma) = 0 \quad \text{si } |\sigma - \sigma_0| > \frac{\Delta\sigma}{2}$$

- (a) Montrer alors que le signal détecté est donné par : $S(D) = S_0(1 + v \cos 2\pi\sigma_0 D)$ et exprimer la fonction de visibilité des franges v en fonction de D et $\Delta\sigma$. Représenter schématiquement la fonction $v(D)$.
 - (b) Quelle est la plus petite valeur $D_{\Delta\sigma}$ de D qui annule la fonction de visibilité ?
2. On illumine l'interféromètre avec une source stellaire via un filtre de bande passante $[\sigma_1, \sigma_2]$ sélectionnant une raie en absorption (figure 2). Cette raie d'absorption (profil grisé sur la figure 2) est suffisamment étroite pour être considérée comme monochromatique. On note I_c l'intensité totale au travers du filtre (sans absorption) et I_a l'intensité totale absorbée.
- (a) Montrer que, d'après la question précédente, on peut négliger dans le signal interférométrique tout terme interférentiel associé au spectre large délimité par le filtre si D est suffisamment grand, en supposant valables les résultats établis précédemment sur le profil de raie idéalisé.



- (b) En déduire que l'interférogramme s'écrit : $S(D) = S_c(1 + C \cos 2\pi\sigma_0 D)$ où S_c est proportionnel à I_c . Exprimer le contraste de franges C en fonction de I_c et I_a .

III. Élargissement et décalage possibles des raies spectrales. Évaluation de la différence de marche optimale

Une cause possible d'élargissement ou de décalage (en nombre d'onde) d'une raie spectrale est associée au mouvement relatif de la source et de l'observateur (effet Doppler). Soit ν_0 la fréquence d'émission d'une source au repos. Dans tout ce qui suit, lorsque la source (S) se déplace à la vitesse relative V par rapport à l'observateur (O), on admettra que celui-ci reçoit un rayonnement de fréquence ν donnée (pour $V/c \ll 1$) par :

$$\nu - \nu_0 = \nu_0 \frac{V \cos \theta}{c}$$

où c est la vitesse de la lumière, $V = \|\vec{V}\|$ et θ l'angle entre la direction de propagation et \vec{V} (figure 3). Nous examinons dans la suite diverses conséquences de cet effet Doppler sur l'interférogramme.

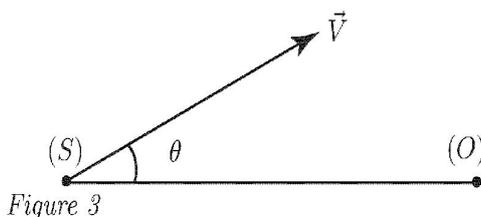


Figure 3

1. À la surface d'une étoile, les atomes (majoritairement de l'hydrogène) sont supposés former un gaz parfait à l'équilibre thermodynamique de température T .
 - (a) Quelle est la vitesse quadratique moyenne V_T d'un atome de cette étoile ?
 - (b) La dispersion des vitesses entraîne par conséquent un élargissement $\Delta\sigma_K$ de la raie symétrique autour de la valeur σ_0 . Donner l'ordre de grandeur de $\Delta\sigma_K$ en fonction de σ_0 , V_T et c .
 - (c) *Application numérique* : Évaluer $\Delta\sigma_K$ pour $T = 6000$ K et $\sigma_0 = 2.10^6$ m⁻¹.
2. La rotation de l'étoile est aussi un paramètre dont il faut tenir compte. On note ψ l'angle entre la direction de visée et l'axe de rotation stellaire.
 - (a) Pour quelle valeur de ψ l'influence de la rotation sur la largeur de raie sera-t-elle nulle ? maximale ? Dans ce dernier cas, expliquer qualitativement pourquoi la rotation de l'étoile, phénomène parfaitement déterminé, conduit à un élargissement de la raie d'émission analogue à celui associé aux mouvements erratiques des atomes et analysé dans la question précédente.
 - (b) Toujours dans le cas d'une influence maximale de la rotation, évaluer la contribution de la rotation stellaire $\Delta\sigma_{rot}$ à la largeur de raie en fonction de la vitesse équatoriale de rotation V_{rot} de la surface de l'étoile. Pour quelle vitesse équatoriale de rotation ce dernier terme est-il comparable à $\Delta\sigma_K$?
 - (c) *Application numérique* : dans ce dernier cas, calculer V_{rot} pour une étoile dont la température de surface est $T_s = 6000$ K.
3. On désire utiliser l'interféromètre comme sismomètre pour détecter les mouvements oscillatoires de la surface stellaire. Une oscillation sismique est assimilée à une variation $\Delta v(t)$ de la vitesse apparente vers l'observateur de l'ensemble de la couche externe de l'étoile. On suppose cette variation sinusoïdale, d'amplitude ΔV , de pulsation ω . Le spectre d'émission et d'absorption de l'étoile est celui de la question II.2. Cette utilisation ne requiert que l'enregistrement de l'interférogramme pour une valeur optimisée de la différence de marche notée D_0 . En l'absence de signal sismique, l'interférogramme est $S(D_0)$ de II.2.b).
 - (a) Montrer qu'à l'instant t , l'interférogramme peut être mis sous la forme :

$$S(D_0) = S_c[1 + C \cos(2\pi\sigma_0 D_0 + \varphi)]$$

où φ est le déphasage de l'interférogramme donné par l'expression :

$$\varphi = 2\pi\sigma_0 D_0 \frac{\Delta v(t)}{c}.$$

- (b) Montrer que cette relation implique, pour une détection optimale, le choix d'une différence de marche D_0 la plus grande possible. Comparer cette nouvelle condition à celle trouvée à la question II.1 et en déduire un ordre de grandeur de la différence de marche optimale pour une étoile de température T_0 , en supposant négligeables les effets de rotation.
 - (c) Montrer alors que le principe instrumental conduit à mesurer un déphasage φ d'amplitude de l'ordre de $\frac{\Delta V}{V_T}$.
4. Au décalage Doppler sismique du spectre stellaire, enregistré sur une nuit entière, se superposent diverses contributions. Estimer succinctement l'influence du mouvement de rotation de la Terre pour une observation menée dans un observatoire situé à la latitude λ . L'amplitude et la pulsation de l'oscillation sismique sont typiquement de l'ordre de 10 cm.s⁻¹ et 10^{-2} rad.s⁻¹.

IV. Amélioration du montage interférométrique

1. Un montage plus efficace que le montage de principe de type Michelson est proposé sur la figure 4. Il reçoit un faisceau de lumière parallèle monochromatique. Il permet de récupérer le flux total incident en utilisant deux détecteurs placés aux deux sorties possibles des faisceaux qui interfèrent.

(a) On suppose que le premier détecteur délivre un interférogramme :

$$S_1 = \frac{S_0}{2}(1 + C \cos \psi).$$

En admettant que les pertes d'énergie lumineuse dans l'appareil sont négligeables, déduire la forme de l'interférogramme S_2 délivré par le second détecteur.

- (b) Montrer comment une combinaison de S_1 et de S_2 permet d'avoir directement accès au terme de modulation interférométrique $C \cos \psi$.
- (c) Montrer que la recombinaison géométrique des faisceaux sur la deuxième lame semi-réfléchissante suppose la symétrie du montage, et donc une observation à différence de marche nulle. Cela est-il intéressant pour l'observation sismique stellaire discutée plus haut ?

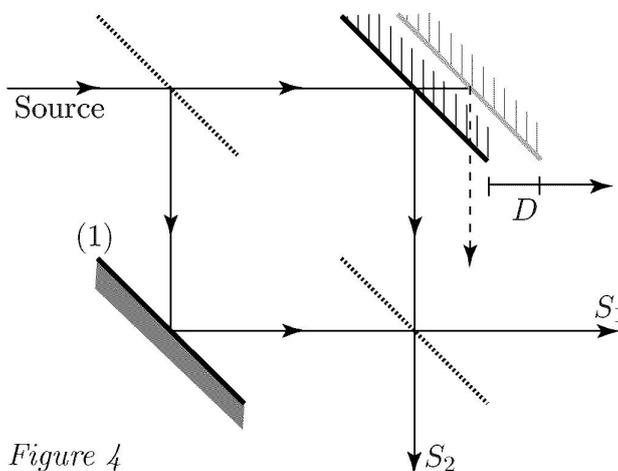


Figure 4

2. Le montage étant initialement symétrique, on interpose, contre l'un des miroirs, une lame de verre à faces parallèles, d'épaisseur uniforme e et d'indice n .

(a) Montrer que, pour une incidence j correspondant à un rayon réfracté repéré par l'angle r , la lame introduit une différence de marche qui s'exprime par :

$$D = 2e(n \cos r - \cos j)$$

Où les interférences sont-elles observables ?

(b) Par un schéma, montrer qu'un réglage de ce montage optique permet alors la recombinaison exacte des faisceaux sur la 2^e lame réfléchissante, tout en assurant une différence de marche non nulle (figure 5).

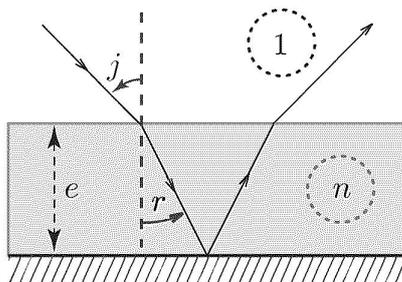


Figure 5

(c) Ce réglage étant effectué, montrer que, pour une incidence j correspondant à un rayon réfracté repéré par l'angle r , la lame introduit une différence de marche qui s'exprime alors par :

$$D = \frac{2e}{\cos r} \left(n - \frac{1}{n} \right).$$

- (d) *Application numérique* : On cherche à imposer dans la configuration précédente une différence de marche de 0,8 cm. Calculer l'épaisseur e de la lame pour un verre d'indice $n = 1,55$ et un angle d'incidence j de 45.

V. Effet de la turbulence atmosphérique

1. L'interféromètre reçoit le flux d'une étoile, objet à l'infini, collecté par un télescope. On suppose le système optique du collecteur équivalent au montage de la figure 6. Ce montage est dit afocal : le foyer image de L_1 est confondu avec le foyer objet de L_2 . La lentille L_1 représente le miroir primaire du télescope, de diamètre a . La lentille L_2 alimente l'interféromètre : le flux issu de L_2 est divisé par la première lame semi-réfléchissante de la figure 4.

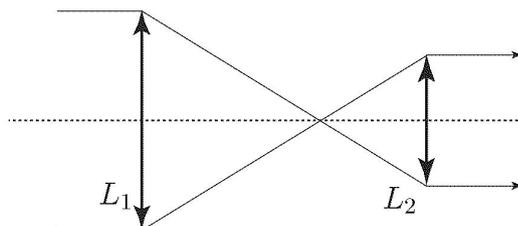


Figure 6

- (a) Justifier l'intérêt de ce montage afocal pour alimenter l'interféromètre.
- (b) Exprimer le grandissement angulaire G en fonction des distances focales images f'_1 et f'_2 des lentilles L_1 et L_2 .
- (c) Déterminer la taille b du faisceau en sortie du collecteur, en fonction de G et du diamètre a du collecteur. En déduire le diamètre minimal des pièces optiques de l'interféromètre. Le calculer pour $a = 3,30$ m et $G = 165$.
2. La tache image de l'étoile n'est en fait ni limitée par la seule diffraction du collecteur, ni stable. La turbulence de l'atmosphère terrestre dévie et étale le faisceau stellaire incident. On s'intéresse principalement à la déviation atmosphérique du faisceau incident, notée i_0 , et l'on suppose la source toujours ponctuelle.
- (a) Déterminer l'angle i sous lequel l'interféromètre voit les rayons d'une source stellaire, en fonction de i_0 et du grossissement G (grandissement angulaire) du télescope collecteur de lumière.
- (b) Estimer la différence de marche $D(i)$, en fonction de la différence de marche sous incidence nulle D_0 et de l'angle i .
- (c) Exprimer la condition sur l'inclinaison maximale admissible dans l'instrument, pour que les fluctuations en différence de marche restent inférieures à une fraction α de longueur d'onde.
- (d) *Application numérique* : On fixe α au plus égal à 5 % ; pour des conditions de turbulence moyenne $i_0 = 1''$; on donne $D_0 = 0,8$ cm et $\sigma_0 = 2.10^6$ m⁻¹. Estimer le grossissement G maximal.
3. (a) Montrer que la turbulence conduit à une mesure de vitesse parasite δv telle que :

$$\frac{\delta v}{c} = \frac{i^2}{2}.$$

- (b) *Application numérique* : Calculer δv pour $i_0 = 1''$, et un grossissement G égal à 165. L'instrument est conçu pour la mesure de vitesses sismiques dont l'amplitude est de l'ordre de 10 cm.s⁻¹. Est-il nécessaire de prévoir, pour alimenter l'interféromètre, un dispositif corrigeant les fluctuations dues à la turbulence atmosphérique ?