



Dispositifs interférentiels

Les différents exercices de ce recueil sont agencés selon la progression des différents paragraphes du cours. Le niveau de difficulté approximatif est mentionné pour chacun d'eux à travers un nombre d'étoiles (★), sauf pour les exercices type résolution de problème (♣♥♦).

La résolution d'un exercice nécessite un temps de lecture, un temps de recherche et un temps de rédaction. Aucun de ces trois ne doit être négligé. Pour favoriser votre apprentissage, il est vivement recommandé de réaliser les phases de lecture et de recherche en amont de la séance, le minimum exigé étant un schéma de situation et les lois à mettre en œuvre.



Flashez ce code pour accéder aux réponses des exercices

Interférométrie à division de front d'onde

Exercice 1 : Mesure de l'épaisseur d'une lame

★ ☆ ☆

Un dispositif de trous d'Young est éclairé en incidence normale par une source ponctuelle de lumière blanche suivie d'un filtre coloré permettant de sélectionner finement une composante spectrale de longueur d'onde dans le vide $\lambda_0 = 500 \text{ nm}$. Les deux trous, notés S_1 et S_2 , sont séparés d'une distance $a = 2,00 \text{ mm}$ et le plan qui les contient est distant de $D = 3,00 \text{ m}$ de l'écran d'observation. L'ensemble du montage est baigné d'air, que l'on supposera d'indice de réfraction égal à celui du vide.

On fixe l'origine O du repère d'étude au milieu du segment joignant les deux trous et on note $M(x, y)$ un point de l'écran dont les coordonnées (x, y) sont respectivement repérées suivant un axe (Ox) passant par les deux trous et un axe (Oy) perpendiculaire au précédent contenu dans le plan de l'écran.

1. Exprimer la différence de marche $\delta = (S_2M) - (S_1M)$ entre les ondes interférant en un point M de l'écran.
2. Donner l'allure de la figure d'interférence observée sur l'écran en justifiant votre réponse. Préciser la valeur de l'interfrange et déterminer la position de la frange d'ordre $p = 0$ correspondant à une différence de marche nulle.

On rajoute désormais une lame d'indice de réfraction $n = 1,4$ et d'épaisseur constante e en aval du trou S_1 . On supposera pour simplifier que tout point de la lame est éclairée sous incidence normale et que l'on peut négliger tout phénomène de réflexion sur les faces.

3. Expliciter ce que sous-entend l'hypothèse simplificatrice d'éclairement à incidence normale de la lame.
4. Exprimer la nouvelle différence de marche δ' entre les ondes interférant en un point M de l'écran.
5. Déterminer la nouvelle position de la frange d'ordre $p = 0$ et exprimer son déplacement en unité d'interfrange. Vérifier que cette approche revient à exprimer la variation Δp de l'ordre d'interférence p due à la présence de la lame.

On retire le filtre coloré pour éclairer le dispositif en lumière blanche : des franges irisées apparaissent sur la figure d'interférence projetée sur l'écran. Un opérateur estime que le décalage de la frange $p = 0$ équivaut à 6 fois l'interfrange déterminée à $\lambda_0 = 500 \text{ nm}$.

6. Expliquer la raison de l'irisation observée.
7. Justifier l'intérêt expérimental de cette démarche. En déduire la valeur de l'épaisseur e de la lame.

Exercice 2 : Interférométrie stellaire



La plupart des étoiles ont des tailles angulaires trop petites pour être résolue, même lorsqu'elles sont observées à travers une lunette astronomique ou un télescope. L'image est donc le plus souvent une tâche dont la dimension dépend de l'instrument. Les principales sources d'élargissement sont :

- les aberrations géométriques (astigmatisme) et chromatiques (couleurs)
- les fluctuations atmosphériques qui déforment le front d'onde
- la diffraction par l'ouverture limitée de l'instrument

Le VLT (Very Large Telescope) est un ensemble de plusieurs télescopes connectés entre eux afin d'accroître la résolution angulaire des observations astronomiques sans avoir à concevoir des télescopes de très grands diamètres.

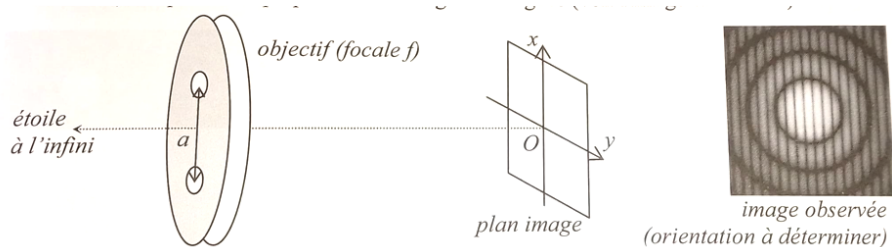


1. Préciser la source d'élargissement que le VLT cherche à limiter.
2. Expliquer la différence entre une lunette astronomique et un télescope.

On considérera par la suite que les observations sont réalisées à l'aide d'une lunette astronomique dont l'objectif de centre optique O est caractérisé par une distance focale objet f .

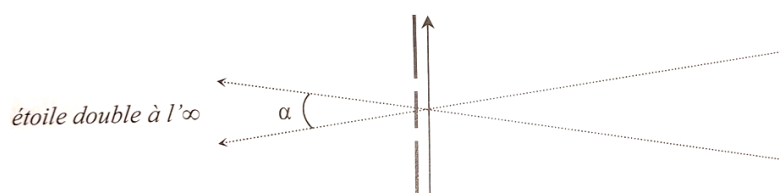
3. Exprimer en fonction de f la position $\overline{OA'}$ de l'image d'une étoile A située à l'infini sur l'axe optique de la lunette.

On place contre l'objectif un écran opaque percé de deux trous identiques séparés d'une distance a réglable. La dimension des trous est suffisamment réduite pour produire un fort phénomène de diffraction isotrope. L'image de l'étoile n'est donc plus ponctuelle et l'on observe dans le plan image une tâche de lumière comportant des anneaux concentriques auquel se superposent des franges rectilignes comme représenté ci-après :

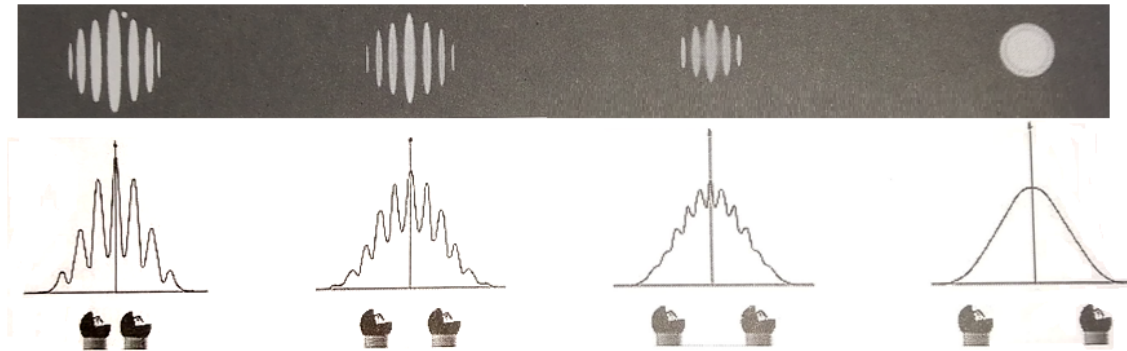


4. Expliquer l'argument selon lequel la diffraction est isotrope.
5. Expliquer la figure observée en identifiant la contribution liée à la diffraction et celle des interférences. Justifier l'allure et l'orientation des franges décrites.
6. En supposant que le dispositif est éclairé par une lumière monochromatique de longueur d'onde λ_0 et qu'il est placé dans l'air d'indice de réfraction assimilé à $n = 1$, exprimer la variation d'éclairement $\epsilon(x, y)$ dans le plan image à un facteur ϵ_0 près que l'on ne cherchera pas à expliciter. En déduire une représentation graphique de cette fonction.
7. Expliquer ce que devient l'éclairement si l'étoile observée n'est plus située sur l'axe optique mais sous un angle θ .

On observe désormais une étoile double dont on cherche à estimer la distance angulaire α entre les membres du couple. On suppose que les étoiles émettent des ondes lumineuses de même intensité et de même longueur d'onde mais qui sont mutuellement incohérentes.



8. Justifier le choix des hypothèses proposées et expliquer les conséquences de cette nouvelle observation sur la fonction éclairement de l'écran.
9. Représenter graphiquement sur une même figure les éclaircissements de chacune des deux étoiles et montrer qu'il est possible pour certaines valeurs de a de faire disparaître les franges d'interférences. Donner la valeur de a la plus faible respectant cette condition.
10. Montrer que le résultat précédent peut également s'obtenir en utilisant comme critère de visibilité des interférences la condition $\Delta p < 1/2$ où Δp correspond à la variation d'ordre d'interférences en un point donné de l'image quand on passe d'une étoile donnée à l'autre.



Évolution des franges d'interférences avec la distance entre deux télescopes observant une étoile (source VLT)

11. Déterminer la distance a maximale séparant deux télescopes du VLT d'après les informations contenues dans l'énoncé. Donner le diamètre du télescope correspondant permettant d'atteindre une résolution angulaire similaire en supposant que sa seule limitation serait la diffraction.

Interférométrie à division d'amplitude

Exercice 3 : Mesure de l'indice de l'air

★★☆

Un interféromètre de Michelson réglé en lame d'air est éclairé par une lampe à vapeur de Mercure basse pression dont la lumière est concentrée sur les miroirs par un condenseur. Un filtre permet d'isoler la raie d'émission verte de longueur d'onde dans le vide $\lambda_0 = 546,1 \text{ nm}$. On cherche à mesurer l'indice de réfraction de l'air à l'aide de ce dispositif.

1. Décrire l'allure de la figure d'interférence observée sur un écran placé en sortie du montage dans le plan focal image d'une lentille convergente. Préciser le rôle de la lentille.
2. Expliquer la protocole à suivre pour régler le dispositif au contact optique en précisant notamment s'il faut tourner ou translater le miroir et dans quel sens ou encore l'aspect de l'éclaircissement une fois le contact optique atteint.

On place une cuve cylindrique fermée (la base du cylindre étant accolée au miroir) dont les parois en verre sont d'épaisseur constante $e_{\text{verre}} = 0,5 \text{ mm}$ et d'indice $n_{\text{verre}} = 1,5$. La cuve contient initialement de l'air à la pression extérieure sur une épaisseur notée e_0 .

3. Exprimer la différence de marche δ et expliquer pourquoi on observe des anneaux sur l'écran.
4. Donner la propriété de cohérence temporelle pour que les interférences restent visibles en présence de cette cuve. En déduire une longueur minimale de la longueur de cohérence temporelle L_c ainsi que la largeur spectrale $\Delta\lambda$ correspondante.

On translate le miroir devant lequel se trouve la cuve afin de faire défiler les anneaux vers l'extérieur jusqu'à obtenir un éclairement homogène sur l'écran.

5. Exprimer la différence de marche δ' une fois la manipulation réalisée. En déduire la distance x sur laquelle le miroir a été translaté et préciser s'il a été éloigné ou rapproché de la séparatrice en justifiant la réponse.
6. Proposer un protocole pour mesurer l'indice de réfraction de l'air.

Exercice 4 : Planéité d'un miroir

★ ★ ★

Un interféromètre de Michelson réglé en coin d'air est éclairé par une source lumineuse étendue produisant un faisceau quasi-parallèle de lumière monochromatique de longueur d'onde dans le vide λ_0 . Le diamètre du faisceau de lumière est suffisamment large pour couvrir la surface des miroirs, sur lesquelles il arrive à incidence normale. En sortie de l'interféromètre, la lumière est collectée par une lentille convergente de distance focale objet f qui forme une image des miroirs sur un écran situé à une distance D en aval de la lentille.

1. Préciser le rôle de la lentille et déterminer la valeur de f permettant de former une image agrandie 10 fois sur un écran positionné tel que $D = 2$ m.
2. En supposant les miroirs parfaitement plans¹ et que l'interféromètre est réglé au contact optique, décrire l'allure de l'éclairement observé en précisant ce qu'est le contact optique.
3. Même question si l'angle du coin d'air vaut α non nul mais très petit avec la verticale. Préciser le réglage à effectuer et la nature de l'action à effectuer pour annuler l'angle α .

On remplace l'un des miroirs par un miroir dont on souhaite contrôler la planéité. On règle son orientation de façon à obtenir le moins de franges possibles sur l'écran et on obtient, sous éclairement à la longueur d'onde dans le vide $\lambda_0 = 500$ nm, la figure ci-après :



4. Commenter le relief du miroir et déterminer la hauteur du plus petit relief détectable avec cette technique.

1. En réalité on lit souvent qu'un miroir est plan à $\lambda/20$ près, autrement dit que la variation du relief sur toute la surface est garantie à moins d'un vingtième de la longueur d'onde, soit un ordre de grandeur de 25 nm.