

Leçon 18 : Interféromètre à division d'amplitude

Niveau :

- CPGE

Pré-requis :

- Electromagnetisme
- Optique géométrique
- Optique ondulatoire
- notion de cohérences

Bibliographie :

- BFR *Optique, Chap 10*
- Pérez *Optique chap 25*
- Dunod PC
- Optique approche expérimentale et pratique, Houard, De Boeck
- Les instruments d'optique, étude théorique, expérimentale et pratique Luc Dettwiller

Introduction

L'obtention d'interférences en optique est délicate et fait apparaître la notion de cohérence entre les vibrations qui doivent interférer. Plusieurs dispositifs permettent de mettre en évidence les interférences : division de front d'onde et division d'amplitude. On présente l'expérience des fentes d'Young. Inconvénients : Sensible à la perte de cohérence spatiale et contraint l'expérimentateur à utiliser des sources de taille réduite, peu de luminosité. On verra que l'on peut pallier à ce problème avec les dispositifs à division d'amplitude.

1. Principe de l'interférométrie

1.1. Avantages et inconvénients de la division d'amplitude

Un train d'onde donne deux trains d'onde images. C'est à dire que la surface des deux fronts n'est pas modifiée mais l'intensité est divisée par deux, Comme les deux rayons sont issus de la même source, l'élargissement de la source n'altère pas les interférences. Frange localisée à l'intersection des couples de rayons.

1.2. Franges d'égales inclinaison (BFR,Perez)

Une source S_0 illumine un système de deux lames de verre, parallèle entre elles distantes de e , d'épaisseur négligeable devant e , d'indice n . On néglige ici les réflexions multiples sur les lames de verre. La lame est éclairée par un rayon incident i . On cherche à calculer la différence de marche δ entre les rayons émergents en I et K . Dans la lame le rayon marqué de deux flèches parcourt le trajet supplémentaire $IJ + JK$. Dans l'air le rayon marqué d'une flèche parcourt le trajet supplémentaire IH où H est la projection de K sur le rayon marqué d'une flèche. En effet les deux rayons font partie d'un faisceau parallèle d'après le théorème de Malus, la surface d'onde est perpendiculaire à ces rayons. H et K appartiennent à la même surface d'onde et la différence de marche dans l'air est représentée par IH . Finalement :

$$\delta = \delta_1 - \delta_2 = n(IJ + JK) - IH$$

On mène le calcul et on parvient à l'expression de δ :

$$\delta = 2ne \cos(\theta) \quad (1)$$

On remarque que la différence de marche ne dépend pas de l'angle d'incidence, on parle d'anneaux d'égale inclinaison.

1.3. Frange d'égale épaisseur (franges de Fizeau Perez) (Perez)

On présente le schéma et on calcule la différence de marche en prenant un rayon incident provenant d'une source ponctuelle. On arrive à la relation :

$$\delta = 2e = 2\alpha x \quad (2)$$

Transition : Ce système de lames permet d'observer des interférences mais totalement fixe, on ne peut pas jouer ni sur l'angle ni sur leur écartement. On doit donc passer à un dispositif concret de division d'amplitude : L'interféromètre de Michelson.

2. Interféromètre de Michelson

Réglage de l'interféromètre sera étudié longuement en TP. Instrument créé par Michelson et amélioré par Morley pour vérifier que la célérité de la lumière se propage à une vitesse soumise aux lois de composition des vitesses. Le résultat fut négatif et amena à repenser la mécanique classique.

2.1. Présentation du dispositif

La séparatrice permet la division d'amplitude, nécessite d'une compensatrice pour que les rayons parcourent le même chemin. **Deux miroirs** M_1 et M_2 qui permettent de

rediriger les rayons vers la séparatrice. Présenter le chemin parcouru par les rayons grâce aux slides. Dans le cas général on voit une coupe des hyperboloïdes de révolution.

2.2. Configuration en lame d'air

Explication du nom, on réduit le système à deux sources secondaires. On montre la ressemblance aux franges d'égalé inclinaison. La différence est la même sauf qu'ici on a une lame d'air $\delta = 2e$. Dans le cas d'une source ponctuelle : deux sources ponctuelles cohérentes entre elles = système équivalent aux trous d'Young. Si la source est étendue, la source étant incohérente spatialement, on additionne les figures d'interférences générées par chaque point de la source : somme d'anneaux = brouillage. Il existe cependant un point de l'écran où il n'y a pas de brouillage : l'infini. Seule l'inclinaison des rayons compte : un déplacement de la source ne changera pas la figure d'interférence. Les interférences sont localisées à l'infini.

Manipulation : Calcul de la largeur du doublet du sodium, calcul de $\Delta\lambda$.

Dans le cas d'une source **polychromatique**, les diverses sources spectrales sont incohérentes entre elles. On somme les figures d'interférences et on obtient sur l'écran la superposition des plusieurs systèmes d'anneaux, associés à chaque longueur d'onde dont le rayon dépend de λ . Dans le cas du sodium, la source émet à deux longueurs d'ondes $\lambda_1 = 589.00 \text{ nm}$ et $\lambda_2 = \lambda_1 + \Delta\lambda = 589.59 \text{ nm}$.

$$I(e) = \frac{I_0}{2} \left[1 + \cos\left(\frac{2\pi\delta}{\lambda_1}\right) \right] + \frac{I_0}{2} \left[1 + \cos\left(\frac{2\pi\delta}{\lambda_2}\right) \right] \quad (3)$$

$$= I_0 \left[1 + \cos\left(2\pi e \left(\frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2}\right)\right) \cos\left(2\pi e \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}\right)\right) \right]$$

$$I(e) = 2I_0 \left[\underbrace{1 + \cos\left(\frac{4\pi e}{\bar{\lambda}}\right)}_{\text{interférences}} \underbrace{\cos\left(\frac{4\pi e}{\lambda_1 \lambda_2} \Delta\lambda\right)}_{\text{Contraste}} \right] \quad (4)$$

En faisant varier e , on observe la variation d'éclairement dite des battements entre les deux longueurs d'onde. On peut mesurer $\bar{\lambda}$ en mesurant la période rapide et $\Delta\lambda$ en mesurant les battements lents. Le contraste s'annule lorsque :

$$\frac{2\pi e}{\lambda_1^2} \Delta\lambda = \frac{\pi}{2} + n\pi. \quad (5)$$

Avec $n \in \mathbb{Z}$ Entre deux annulations on a charioté de $\frac{2\pi\Delta e\Delta\lambda}{\lambda_1^2} = \pi$ on en déduit alors $\Delta\lambda$.

2.3. Configuration en coin d'air

Représentation schématique+construction des rayons lumineux, calcul de la différence de marche et de l'ordre d'interférence. Commenter la figure et leur localisation Comparaison aux franges de Fizeau.

Manipulation : passage en coin d'air.

3. Fabry pérot

Il faut considérer tous les faisceaux en sortie de l'interféromètre et non plus seulement 2. On parle alors d'interférences à ondes multiples. Si le temps le permet on peut mener le raisonnement (TD de Sayrin jusqu'à l'expression de la finesse et des épaisseurs des interférences). Ou alors on donne l'expression de l'intensité et trace le profil des interférences. Donner la relation de la finesse. Plus la Finesse est grande plus la résolution sera bonne. Éventuellement préparer le montage pour observer le doublet du sodium.

Conclusion

On a vu le principe des interféromètres à division d'amplitude, on a détaillé un dispositif en core utilisé aujourd'hui expérimentalement, par exemple le Ligo est un interféromètre de plusieurs kilomètres qui permet aujourd'hui de détecter les ondes gravitationnelles.

Questions :

1. Types d'interférence pour le casque anti-bruit ?

Il y a un micro qui permet d'enregistrer le bruit ambiant. Le signal est ensuite analysé puis un haut-parleur génère un signal de bruit avec une phase exactement opposée à celui qui vient d'être enregistré pour que les deux signaux interfèrent destructivement. Il s'agit donc d'une division du front d'onde.

2. Utilisation des interférences à division d'amplitude ?

Regarder la structure spatiale d'un échantillon, voir des défauts de planéité des miroirs, mesurer la différence d'indice de réfraction d'un gaz, mesurer une variation de température.

3. Comment mesure-t-on l'indice de réfraction d'un gaz ?

En configuration lame d'air, on peut regarder comment changent les franges rectilignes lorsque l'indice de réfraction n du milieu varie. Connaissant la taille du miroir, on peut remonter à n .

4. Quelle configuration pour la planéité des miroirs ?

Configuration coin d'air.

5. En configuration coin d'air, où sont localisées les interférences ?

On verra des franges au niveau des miroirs.

6. Pourquoi au niveau des miroirs ?

Il faut considérer deux points sources S_1 et S_2 proches et tracer les rayons issus de ces points et passant par un point P . Si P est proche du coin d'air, la différence de marche δ_1 entre les rayons issus de S_1 et celle entre les rayons issus de S_2 sont quasiment les mêmes (et égales à $2e(P)$) : il n'y a donc pas brouillage. En revanche, si P s'éloigne du coin d'air, δ_1 devient très différent de δ_2 et on a brouillage (cf. corrigé du TD d'optique sur les interférences). Par ailleurs, une construction géométrique permet de montrer que le lieu d'intersection des rayons réfléchis correspondant à un même rayon incident (condition de localisation vu en 1.1, à savoir $\mathbf{u}_2 = \mathbf{u}_1$) est approximativement le plan faisant l'angle i (où i est l'angle d'incidence) avec (M1'). En pratique, cet angle est si petit (quelques minutes d'arc) que ce plan d'intersection est presque confondu avec (M1') (Dunod Physique tout-en-un 2ème année, PC-PC* 2004).

7. Lorsque la source est ponctuelle, les interférences sont-elles localisées ?

Non. Elles le sont lorsque la source est étendue.

8. Si on a des trous d'Young et une source déplacée de b sur l'axe parallèle à l'axe des trous, comment seront les franges ?

Il y aura une différence de chemin optique additionnelle avant les trous. Les nouvelles franges obtenues se décalent de $\frac{-bD}{d}$, avec d la distance entre la source et les trous d'Young et D la distance entre les trous et l'écran.

9. Peut-il y avoir brouillage si on considère deux sources ponctuelles incohérentes ?

Oui si les deux systèmes de franges créés par les sources sont en anticoincidence (les franges brillantes d'un système de franges se superposent aux franges sombres de l'autre système de franges).

10. Pour la lame d'air, pourquoi appelle-t-on les anneaux "anneaux d'égale inclinaison" ?

Un ordre d'interférence donné correspond à une inclinaison, c'est-à-dire à un même angle d'incidence des rayons lumineux.

11. Pour la lame d'air, est-ce qu'on a le même signe de réflexion des deux côtés ?

Non, $r_1 < 0$, $r_2 > 0$. Il y a un déphasage de π en plus. Dans le Michelson, on oublie car c'est plus compliqué que ça, il y a des traitements en plus. Ce

qui compte c'est que le contact optique est défini non pas par la longueur géométrique mais par la longueur optique.

12. A quoi sert la compensatrice ? On pourrait s'en passer pour le laser en réglant la longueur entre les deux bras de sorte à compenser la différence de marche correspondant à l'épaisseur de la séparatrice.

Si la source est polychromatique, on ne peut pas trouver un pas du miroir qui compense la différence de marche pour toutes les longueurs d'onde car l'indice optique de la séparatrice dépend de la longueur d'onde, d'où la nécessité d'utiliser une compensatrice. Si une seule longueur d'onde, ce n'est pas nécessaire (mais ça n'existe pas dans la vraie vie).

13. Pourquoi tu utilises un verre anticalorique ?

Pour ne pas diffuser de la chaleur provenant de la source sur l'interféromètre, cela modifierait n qui dépend de la température (le Michelson est sensible à des variations d'indice de réfraction de l'ordre de 10^{-4} .)

14. Le laser He-Ne : 10 MHz. Lorsqu'on a fait le calcul on a trouvé 400 MHz. Pourquoi cette différence ?

En réalité, le spectre comporte plusieurs raies. L'enveloppe est à 400 MHz mais la largeur de chaque raie est beaucoup moins : 10 MHz semble raisonnable.

15. Que mesures-tu dans la tomographie ?

Les interférences associées à une certaine épaisseur.