

M10 : Spectrométrie Optique

Rapport du jury :

Quel que soit l'appareil de mesure utilisé, notamment le spectromètre à entrée fibrée interfacé avec l'ordinateur, son principe de fonctionnement et ses caractéristiques d'utilisation, en particulier son pouvoir de résolution, doivent être connus et leurs limitations discutées. S'il souhaite utiliser un réseau en incidence normale, le candidat doit s'assurer de la réalisation expérimentale correcte de cette incidence. La spectrométrie par transformée de Fourier, souvent réalisée de façon semi-quantitative sur les raies du mercure ou du sodium, se prête à un enregistrement numérique, qui sans être indispensable, est bien plus démonstratif et permet des mesures sensiblement plus précises. Si le cœur du sujet est la mesure de longueurs d'onde, les phénomènes qui affectent la résolution des spectromètres ne doivent pas être ignorés. La mesure de longueurs d'onde est le cœur du sujet mais il faut aborder la notion de résolution des appareils de mesure et les phénomènes responsables de sa limitation. La notion de résolution est importante et doit être abordée. Il en est de même de l'influence de la largeur de la fente d'entrée.

Introduction :

→ Définition spectroscopie (Cf Sextant)

La spectroscopie, ou spectrométrie, est l'étude expérimentale du spectre d'un phénomène physique, c'est-à-dire de sa décomposition sur une échelle d'énergie, ou toute autre grandeur se ramenant à une énergie (fréquence, longueur d'onde, etc.). Cela permet de séparer des longueurs d'onde d'un éclaircissement de façon à pouvoir les mesurer.

Il existe 2 types de dispositif : dispersif (réseaux, PVD..) et interférentiel.

Dans ce montage, nous nous intéresserons à une méthode de mesure de longueur d'onde ainsi qu'à la détermination du pouvoir de résolution de certains appareils. En effet, ce pouvoir de résolution, qui dépend de plusieurs paramètres que nous mettrons en évidence, détermine la capacité d'un appareil à séparer deux longueurs d'onde très proches, sa capacité à pouvoir résoudre le doublet du sodium par exemple.

(A savoir : PVD: le verre disperse en $1/\lambda^2$, c'est non-linéaire. L'intérêt du réseau est que l'on connaît la loi théorique de dispersion contrairement au prisme.)

I - Spectroscopie à fentes

1) Mesure d'une longueur d'onde

M10 I.2.1

Un spectroscopie permet d'observer les spectres lumineux. On souhaite mesurer les longueurs d'ondes d'une lampe spectrale : lampe Mercure à partir du goniomètre. Pour cela, on utilise la méthode du minimum de déviation, car cette méthode est plus précise que celle de l'incidence normale. Attention, cette méthode est plus longue.

La déviation du faisceau incident par rapport à sa trajectoire initiale dépend de l'angle incident et passe par un minimum pour un certain angle i . La déviation minimale est atteinte lorsque $\theta = -i$. Soit $D_{\min} = 2\theta_{\min}$. (Cf annexe II.2)

-Réglage goniomètre (Annexe II +

https://younalouyer.files.wordpress.com/2019/06/m10_11_goniometre_baptiste.pdf)

-On utilise un réseau avec un nombre de traits connu avec 4 chiffres significatifs (Exemple: $n=5750$ traits/cm).

-On ajuste la largeur de la fente source du collimateur au plus fin tout en conservant une luminosité suffisante pour pouvoir observer les principales raies de la lampe.

-Recherche du minimum de déviation (Cf Annexe II.2). Il faut faire ce réglage pour chaque mesure.

-On mesure D , puis on calcule λ à l'ordre 1 sachant que $2\sin(D_{\min}/2)=kn\lambda$, que l'on compare avec les valeurs attendues (avec $k=1$ et n =nombre de traits du réseau).

Voir Excel

Incertitudes : On s'aperçoit qu'une modification de 1° ou 2° de l'incidence a très peu d'impact sur la déviation et sur le calcul de λ . Il faut régler au mieux l'appareil cela réduit considérablement les incertitudes. L'utilisation d'un réseau connu évite des incertitudes sur le réseau.

2) Pouvoir de résolution

M10 - I.2.3

Le pouvoir de résolution d'un spectroscope est défini par la relation : $PR = \lambda/\Delta\lambda$. Beaucoup de paramètres peuvent limiter le pouvoir de résolution du spectroscope : pouvoir de résolution intrinsèque de l'élément dispersif, largeur des fentes d'entrée et de sortie..

On va montrer que la largeur éclairée du réseau impose son pouvoir de résolution théorique du spectroscope : $PR=k.N$ avec N le nombre de trait éclairés sur le réseau.

Pour pouvoir résoudre un écart en longueur d'onde, il faut que le diamètre angulaire de la fente source soit inférieur à l'écart angulaire entre 2 longueurs d'ondes.

On réalise le réglage en minimum de déviation comme précédemment.

Pour chaque ordre (ordre 1 et ordre 2, difficile après):

-On ferme la fente source jusqu'à distinguer les 2 raies jaune du sodium.

-On relève D_{\min} , et on calcule λ .

-On obtient l'écart du doublet du sodium dans les 2 ordres.

-On calcule l'écart relatif pour chaque ordre par rapport à la valeur théorique de 0,6 nm.

-On calcule le $PR = \lambda/\Delta\lambda$ pour chaque ordre

Voir Excel

Incertitudes : sur le réglage du goniomètre et qualité du réseau.

Conclusion : On remarque que le pouvoir de résolution augmente avec l'ordre du fait qu'on augmente la largeur de la fente source mais on atteint une limite dans la précision des mesures, car ordre 3 quasi impossible à obtenir pour la lampe de sodium.

On voit donc que la largeur de la fente source influe sur le pouvoir de résolution, plus la largeur de la fente source est grande, plus la résolution est meilleure.

II - Spectroscopie interférentielle

→ M8 - III et M10-II

La mesure de la largeur d'une raie est très compliqué à réaliser, donc intéressant avec un système interférentiel de la mesurer.

-Faire les mesures plusieurs fois en préparation pour obtenir une moyenne (car valeurs peu précises).

Le Michelson en anneaux (lame d'air) est moins sensible à la cohérence spatiale de la source si on observe les interférences au loin. Il est en tout rigueur complètement insensible à la cohérence spatiale lorsque l'on effectue une observation à l'infini. L'observation dans le plan focal d'une lentille correspond à ce cas de figure. **Justification page 64 [4] Françon : vibration lumineuses optique cohérente.** On peut alors utiliser une source large et observer les phénomènes interférentiels dans les meilleures conditions.

→ **Mesure du doublet du sodium:**

M10-II.2

Le sodium a 2 raies dans le visible avec $\lambda_{\text{moy}} = 589,3 \text{ nm}$, on utilise le Michelson pour mesurer la largeur $\Delta\lambda$ entre les 2 raies.

Réglages du Michelson :

Très bonne démarche dans le Sextant + Démarche décrite aussi à la fin de ce doc

On chariotte, et on constate autour du contact optique une succession de brouillage des anneaux avec une périodicité donnée par : $\Delta\delta = 2 \cdot \Delta e = \lambda_{\text{moy}}^2 / \Delta\lambda$.

Pour améliorer la mesure, on peut aller jusqu'à 3 ou 4 anti-coïncidences, de chaque côté du contact optique (soit 6-8 anti-coïncidences), on obtient Δe (distance entre 2 anti-coïncidences), et $\Delta\lambda$.

→ Calculer les incertitudes (**Cf Excel**) : on néglige l'incertitude sur la longueur d'onde moyenne car elle est plus faible que les autres.

Conclusion: On retrouve bien la valeur annoncée dans le Handbook, avec une très bonne précision. On voit ainsi l'intérêt des spectroscopes interférentiels concernant l'étude des détails fin d'un spectre, et où les spectroscopes à fente trouvent leur limite. Plus les détails sont fins, plus il est difficile de les séparer.

- Comparer le pouvoir de résolution du spectroscopie interférentiel avec celui du spectroscopie à fente. Ce qui limite le pouvoir de résolution du Michelson, c'est la taille des bras, car l'ordre est lié au chariotage, alors que pour le réseau, on peut observer au maximum l'ordre 0, 1, 2 ou 3.

Remarque : Pouvoir de résolution d'un interféromètre : $R = F \cdot k$ avec F la finesse (2 pour Michelson, 15 pour Fabry- Pérot). Avantage du Michelson, c'est l'accès à des ordres d'interférences très grands.

Conclusion:

Permet de caractériser la source via l'étude de la lumière émise.

Ouverture : il est possible d'évaluer des largeurs de raie, comme celle du Mercure.

Application: Composition des étoiles en astronomie, spectroscopie UV-visible en chimie, ...

Remarques :

-Attention : le moindre écart dans les mesures, ou des incertitudes qui ont un mauvais odg, coûtent cher.

Questions :

-Origine de la largeur des raies ? élargissement naturel (le principe d'incertitude relie la durée de vie Δt d'un état excité et la précision de son niveau énergétique ΔE) / élargissement Doppler : l'effet Doppler provoque un décalage vers le rouge ou vers le bleu du rayonnement selon que la source s'éloigne ou se rapproche de l'observateur. Dans un gaz, toutes les particules sont en mouvement dans toutes les directions, ce qui provoque un élargissement des raies spectrales. / élargissement collisionnel : la collision entre particules (atomes ou molécules) modifie légèrement leurs niveaux énergétiques, d'où l'élargissement des raies. La grandeur de cet effet dépend de la densité du gaz.

→ Réseaux:

-Facteurs influant sur la résolution : fente, nombre de traits, diffraction..
-Qu'est-ce qui est le plus limitant pour la résolution dans un spectromètre à réseau ? pas du réseau ou taille de la fente source ? Il me semble que c'est la fente source.
-Conditions d'éclairage de la fente, c'est important ? comment est éclairé le réseau ? On éclaire le réseau par des faisceaux de lumière parallèle. Il faut se placer dans les conditions de Fraunhofer.
-A quoi ressemble la forme de la figure de diffraction par un réseau, et où interviennent les différentes longueurs caractéristiques (taille de la fente a , pas du réseau p) ?
https://media4.obspm.fr/public/ressources_lu/pages_interference/reseau_impression.html
http://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/jacques_charrier/tp/interferences/fentes6_2d.html

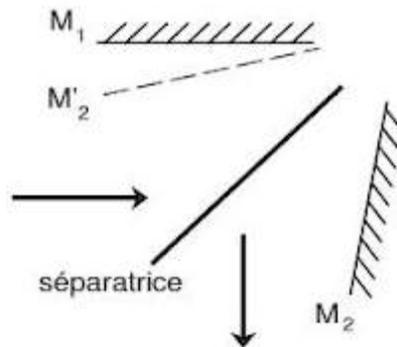
→ Michelson:

-Expliquer les choix d'éclairage, de lentilles du Michelson. Aurait-on pu résoudre le doublet du sodium en coin d'air ? La figure d'interférences est située à l'infini, on choisit une lentille pour observer la figure d'interférences dans le plan focal image. Cohérence spatiale non négligeable en coin d'air contrairement à celle en anneaux.
- Pourquoi choisir une source spatialement étendue quand on observe la figure d'interférences dans le plan focal d'une lentille ? Il est en toute rigueur complètement insensible à la cohérence spatiale lorsque l'on effectue une observation à l'infini, donc on peut utiliser une source spatialement étendue.
-On perd en contraste, comment le récupérer, quel type de cohérence est désormais à prendre en compte ? Cohérence temporelle.

Annexe : Généralités sur le Michelson

L'interféromètre de Michelson est composé de 2 bras à l'extrémité desquels on trouve 2 miroirs. Grâce à une séparatrice (lame semi réfléchissante), le faisceau incident est divisé en 2 d'intensité égale. Après réflexion, ils se recombinent au niveau de la séparatrice et on observe leurs interférences dans une direction transverse au faisceau incident.

L'association miroir séparatrice revient à créer une image du miroir M_2 par S qu'on appelle M_2' .



On a une lame compensatrice dans le 2ème bras afin de compenser la différence de marche induite par l'épaisseur de la séparatrice. Il est donc nécessaire que la compensatrice et la séparatrice soient parallèles.

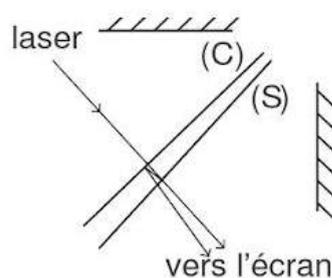
Quand les miroirs M1 et M2' sont rigoureusement parallèles on obtient des anneaux d'égalé inclinaisons situées à l'infini.

Quand les miroirs M1 et M2' ont une une petite inclinaison, on a des franges d'égalé épaisseur.

Réglages :

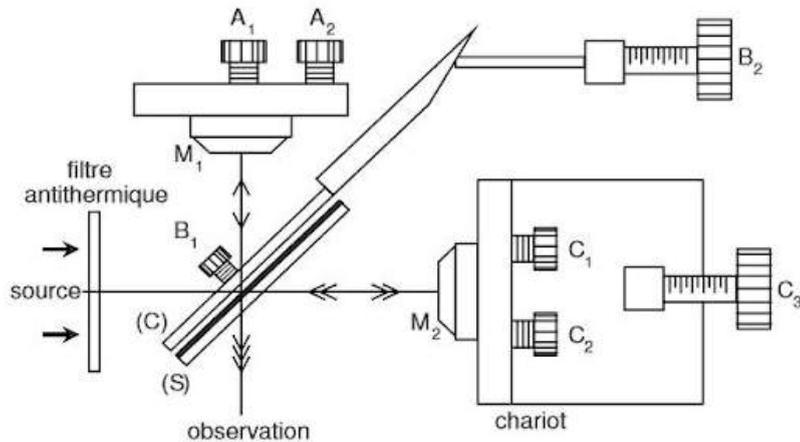
-Utilisation d'un laser

Réglage pour que la compensatrice et la séparatrice soient parallèles : On envoie un faisceau perpendiculairement à l'ensemble compensatrice/séparatrice et on superpose tâches. S'assurer qu'on a la même distance entre miroirs et compensatrice.



Puis on place le faisceau à l'incidence du Michelson.

Maintenant on veut le parallélisme des miroirs : on superpose les tâches en agissant sur vis C1 et C2. On peut employer une source large pour négliger la différence de marche.



On note e l'épaisseur entre M_1 et M_2' . Pour obtenir une géométrie où M_1 et M_2' sont rigoureusement parallèles et une différence de marche presque nulle, il faut que $e=0$.

Explication : Pour comprendre ce réglage, il faut avoir à l'esprit les points suivants :

- Quand la différence de marche diminue, les anneaux d'égale inclinaison défilent vers leur centre (le démontrer à partir de la formule $2e \cos i = k\lambda$ avec k constant pour un anneau donné).
- Quand la différence de marche diminue, les anneaux se transforment progressivement en franges d'égale épaisseur si les miroirs ne sont pas rigoureusement parallèles (en effet pour une faible épaisseur les variations d'inclinaison des rayons changent beaucoup moins la différence de marche que lorsque l'épaisseur e est grande).
- Quand l'épaisseur moyenne e est nulle et que l'on diminue l'angle entre les miroirs, l'interfrange augmente et tend vers l'infini (teinte plate lorsque les miroirs sont parallèles).

Mise en oeuvre : Interposer entre le laser et le Michelson une lentille de très courte distance focale (un condenseur, $f \sim 5\text{mm}$), vous observez des anneaux dont le centre n'est pas nécessairement visible. Charioter (vis C_3) de façon à faire défiler les anneaux vers leur centre de courbure (la différence de marche diminue – cf. 1). Lorsque les franges sont devenues rectilignes (cf. 2) cesser le chariotage et jouer sur l'angle des miroirs (vis C_1 et C_2) de façon à augmenter l'interfrange (cf. 3). Pour cela agir sur C_1 dans le sens qui accroît l'interfrange jusqu'au maximum, puis faire de même avec C_2 . Si lors de ce réglage une courbure apparaît charioter à nouveau en priorité. Lorsqu'il n'y a plus que quelques franges rectilignes sur l'ensemble du champ, agir sur les vis de réglage fin du parallélisme (A_1 et A_2) pour obtenir une teinte plate : le champ a une teinte et une luminosité uniformes, on est au voisinage du contact optique avec des miroirs parallèles. **Noter la valeur repérant la position du chariot.**

Pour avoir le contact optique précisément : on remplace laser par la lampe à sodium + condenseur 6cm. Contact optique indépendant de la source.