

MP10 - SPECTROSCOPIE OPTIQUE

25 novembre 2016

Alexia Barbosa De Lima & Pierre Ragueneau



Réponse Partie 2

Commentaires du jury

- Quel que soit l'appareil de mesure utilisé, notamment le spectromètre à entrée fibrée interfacé avec l'ordinateur, son principe et sa manipulation doivent être connus. Le prisme à vision directe doit être réservé aux observations qualitatives.
- 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.
- Si le candidat utilise un réseau éclairé en incidence normale, il doit s'assurer de la bonne réalisation expérimentale de cette incidence.

Bibliographie

- ↗ *Optique expérimentale*, **Sextant** → La bible des expériences
- ↗ *Montages d'optique pour l'agrégation*, **Duffait** → Pareil, et pour les références des raies du Mercure

Table des matières

1	Spectroscopie Dispersive	2
1.1	Prisme à vision directe	2
1.2	Réseaux, 1 ^{ère} mesure du doublet	2
2	Mesure de Biréfringence	3
2.1	Montage	3
2.2	Spectre cannelé avec un spectromètre commercial	3
3	Spectroscopie Interférentielle par Transformée de Fourier	4
3.1	2 ^{ème} mesure du doublet du Mercure	4
3.2	Mesure du profil du filtre interférentiel	5

Introduction

- Spectrométrie = étude des spectres $I(\lambda)$. En particulier mesure de longueur d'onde λ .
- Science métrologique : importance du pouvoir de résolution $R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}$.
- Deux méthodes présentées : Spectrométrie dispersive où la direction de rayon $\theta(\lambda)$ dépend de λ et spectrométrie interférentielle où l'on cherche à remonter vers λ à partir de la figure d'interférence.

1 Spectroscopie Dispersive

1.1 Prisme à vision directe

Pour observer un spectre, il faut de manière simple et générale un fente et un système dispersif. Prenons pour commencer une fente et un prisme et observons le spectre d'une lampe spectrale, ici Mercure-Cadmium.

Spectre du Mercure-Cadmium avec le prisme.

↗ Sextant p.217

⊖ 4min

On monte le spectromètre en donnant la recette :

- Une source à analyser (ici suivit d'un condenseur pour l'intensité)
- Une fente au foyer d'une lentille convergente (courte focal pour un bon agrandissement). Les éléments dispersifs ne sont stigmatiques qu'en lumière parallèle !
- Un élément dispersif proche de la lentille (toujours pour le grandissement)
- L'écran -> montage simplifié sans seconde lentille.

On montre le spectre de la Lampe à Mercure-Cadmium grâce au prisme à vision directe. On voit que celui-ci comporte différentes raies dans le visible, à des longueurs d'onde allant du jaune au violet.

Ici, on décompte 7 raies différentes. On sait que ce spectre doit contenir un doublet jaune que l'on ne voit pas ici. On cherche alors un moyen de les séparer.

↓ *La dispersion du prisme n'est pas simple en fonction de la longueur d'onde (formule de Cauchy $n(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4} + \dots$). Il convient donc d'utiliser un autre système dispersif pour des mesures quantitatives.*

1.2 Réseaux, 1^{ère} mesure du doublet

Influence du réseau sur le spectre du Mercure-Cadmium

↗ Sextant p.221

⊖ 2 min

On montre ici le même spectre que précédemment, mais avec différents ordres. On peut montrer que l'allure du spectre, c'est à dire l'espacement entre chaque raie et entre chaque ordre, dépend du réseau utilisé, de l'ordre, et de la distance réseau-écran

- Plus le nombre de trait par millimètre augmente, plus le spectre est résolu et les raies distinguables, mais plus la distance entre les raies de l'ordre 1 et la raie de l'ordre 0 augmente. Ceci est embêtant expérimentalement car au bout d'un certain nombre de trait, on ne peut plus faire apparaître l'ordre 0 et l'ordre 1 sur le même écran.
- Pour observer plusieurs ordres, afin d'avoir également une meilleure résolution, on ne doit pas prendre un réseau trop grand. → On doit faire un compromis entre ces différents paramètres

La spectroscopie par réseau est un montage de diffraction de Fraunhofer. Comme on l'a vu, il y a des liens entre les différents paramètres. On donne la formule des réseaux : $\sin(\theta_p) - \sin(\theta_0) = \frac{p\lambda}{a}$ avec p l'ordre et a le pas du réseau.

Lorsqu'on se place en incidence normale et aux faibles angles, le spectre et ses raies sont reliés au réseau de la manière suivante : $\theta_p = \frac{p\lambda}{a}$ et

$$x = \frac{p\lambda D}{a} \quad (1)$$

avec x la distance à l'ordre 0 et D la distance réseau/écran.

On voit que l'on va obtenir une relation linéaire entre x et λ .

Etalonnage du spectromètre p.222

↻ Sextant

⊖ 5 min

On prend la lampe précédente avec le réseau qui va bien afin d'avoir une distance à l'ordre 0 qui vérifie l'hypothèse des faibles angles et un ordre convenable. On fait attention d'être en incidence normale. On mesure la différence de longueur entre l'ordre 0 et les différentes raies à l'ordre voulu

Ici, on prend un réseau de 300 tr/mm. Pour chaque longueur d'onde λ théorique tabulée, on associe la distance raie-ordre 0 nommée x . On trace ensuite λ en fonction de x pour vérifier la formule des réseaux décrite précédemment et on obtient bien une droite comme expliqué précédemment. On peut vérifier le coefficient directeur avec les paramètres du montage.

On peut regarder la résolution de ce spectromètre en étudiant l'influence qu'à la largeur de la fente sur le montage et la précision de nos mesures.

Résolution et influence de la fente

↻ sextant p.218

⊖ 2 min

L'optique géométrique nous donne la résolution du spectromètre. La théorie donne

$$R = \frac{\lambda}{\alpha} \frac{d\theta}{d\lambda}$$

où α est l'ouverture du faisceaux et

$$\frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{p}{a}$$

est la dispersion angulaire.

On règle la largeur de la fente pour juste distinguer le doublet. On vérifie la relation avec la largeur de la fente donnée par le vernier.

Maintenant que nous avons étudié le spectromètre, on peut faire une mesure du doublet du Mercure et estimer sa précision. Résultat : $\Delta\lambda = \dots \pm \dots \text{nm}$

2 Mesure de Biréfringence

2.1 Montage

La spectroscopie peut avoir des utilités dans plusieurs domaines de la physique et on va prendre ici l'exemple de la biréfringence. Ici, on garde le système précédent auquel on rajoute une lame biréfringente entre deux polariseurs. On place les polariseurs croisés afin d'avoir l'extinction de la lumière, et on rajoute la lame en faisant en sorte d'avoir la luminosité maximale.

Avec une lame de quartz (axe parallèle, $e=4\text{mm}$), on obtient un spectre de lumière blanche qui comporte des cannelures. Les deux polarisations interfèrent constructivement lorsque $e\Delta n = k\lambda$, $k \in \mathbb{Z}$. Les cannelures sont équidistantes en nombre d'onde $\sigma = \frac{1}{\lambda}$, en effet :

$$\sigma_{i+1} - \sigma_i = \frac{1}{e\Delta n} \quad (2)$$

. Cela nous permet de mesurer la biréfringence Δn du quartz.

2.2 Spectre cannelé avec un spectromètre commercial

Enregistrement du spectre et exploitation

↗ Duffait p.153

⊖ 5 min

Avec le même montage, on utilise un spectromètre commercial avec une grande gamme de longueur d'onde afin d'enregistrer un maximum de pic, et donc plus de points. Une fois le spectre enregistré, on utilise l'outil de détection de pics. on calcul la différence en fréquence entre chaque pic $\sigma_{i+1} - \sigma_i$, on a mesurer l'épaisseur e au palmer en préparation : On détermine ainsi la biréfringence Δn .

Lors du traitement des données, on remarque $\Delta n(\lambda)$ car le quartz est dispersif : on ajuste alors par la formule de Cauchy. On trouve de cette façon une biréfringence $\Delta n = \dots \pm \dots$ pour $\lambda = \dots$ nm. (valeur tabulée pour $\lambda = 400$ nm, $\Delta n = 9.504 \cdot 10^{-3}$)

On peut également discuter des erreurs. Ici, on a la formule de propagation suivante :

$$\left(\frac{\delta \Delta n}{\Delta n}\right)^2 = \left(\frac{\delta e}{e}\right)^2 + \left(\frac{\delta \sigma_i}{\sigma_i}\right)^2 + \left(\frac{\delta \sigma_{i+1}}{\sigma_{i+1}}\right)^2 \quad (3)$$

Or $\frac{\delta \sigma}{\sigma} = \frac{\delta \lambda}{\lambda}$ On peut donc quantifier la dispersion de mesure sur λ .

On donne la dispersion statistique sur Δn par la distribution de l'écart entre nos mesures et le modèle. On montre l'histogramme des mesures, où on déduit $\frac{\delta \Delta n}{\Delta n} = 3\%$, et donc $\frac{\delta \lambda}{\lambda} = 2\%$. On distinguera la différence entre cette erreur statistique et la résolution donné par le constructeur ($R=2000$)!

↓ *La périodicité des cannelures est interprétable sur sa TF. D'une manière plus générale il est possible d'obtenir un spectre via sa TF par un système interférométrique.*

3 Spectroscopie Interférentielle par Transformée de Fourier

L'utilisation d'un interféromètre de Michelson en lame d'air donne pour une source monochromatique l'intensité :

$$I(\delta) = B[1 + \cos(2\pi\sigma\delta)]$$

Pour une source étendu on intègre sur le domaine spectral :

$$I(\delta) = I_0 + \int_0^\infty B(\sigma) \cos(2\pi\sigma\delta) d\sigma$$

L'intensité de la figure d'interférence et le spectre de la lumière sont donc lié : On peut mesurer l'un pour remonter à l'autre!

3.1 2^{ème} mesure du doublet du Mercure

Mesure du doublet du Mercure

↗ Sextant/Duffait

⊖ 10 min

Après avoir réglé le Michelson en lame d'air éclairé par la lampe HgCd suivit d'un filtre interférentiel ($\lambda = 578$ nm), on voit apparaître des anneaux, alternant franges sombres et brillantes. Mais si on tourne le vernier, dans un sens ou dans l'autre, on remarque non seulement que les anneaux rentrent ou sortent, mais aussi qu'il y a maximum d'intensité et brouillage à des intervalles réguliers. En mesurant ces intervalles, en privilégiant les brouillages car plus simples à estimer, on fait une mesure de la différence de longueur d'onde $\Delta \lambda$ entre le doublet jaune du mercure.

L'interférogramme est réalisable en préparation en une dizaine de minute. Les résultats semble meilleur si l'on filtre le signal du photorécepteur. La lampe spectral fonctionne avec des décharges à 100Hz, un filtre passe bas permet de s'en débarrasser (Duffait p.82) et diminue ainsi le bruit.

On réalise cette expérience avec un moteur qui va permettre de translater à faible vitesse le vernier et enregistrer la variation de franges sombres franges éclairés, mais aussi et surtout le contraste dû au doublet du Mercure. On observe des extinctions à des intervalles réguliers et on peut mesurer ainsi la différence $\Delta \lambda$ entre les deux raies du doublet.

On peut également enregistrer plusieurs extinctions afin d'obtenir une série statistique et limiter ainsi les erreurs et on obtient ainsi le $\Delta\lambda$ de la manière suivante :

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda_{moy}^2}{2\Delta x} \quad (4)$$

avec $\lambda_{moy} = 578,05\text{nm}$ pour le Mercure.

Par mesure sur l'interférogramme on trouve $\Delta\lambda = \dots\dots \pm \dots\dots\text{nm}$

On voit que cette méthode est la plus précise car on arrive à séparer aisément le doublet. En effet le plus petit intervalle spectral $\Delta\sigma$ que l'on peut résoudre est lié à la différence de marche maximale de l'interférogramme δ_{max} par la relation d'incertitude :

$$\Delta\sigma\delta_{max} \approx 1$$

On a donc $R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{\sigma}{\Delta\sigma} = \delta_{max}\sigma = 20000$.

↓ *Le manque de contraste précédent nous invite à caractériser le filtre interférentiel. Est-il de bonne largeur ?*

3.2 Mesure du profil du filtre interférentiel

Mesure du profil lorentzien du filtre interférentiel

↻ Duffait p.81

⊖ 3 min

On éclaire l'entrée du michelson par une lampe QI + filtre anticalorique + filtre interférentiel. On lance l'enregistrement du spectrogramme.

L'interprétation de l'interférogramme peut nous donner :

- la longueur d'onde centrale $\lambda_{centrale}$ en comptant le nombre de frange N sur un intervalle $\delta_2 - \delta_1 = N\lambda$. Mesure délicate car il faut distinguer les franges !
- la largeur du filtre : $\Delta\lambda = \frac{\lambda_{centrale}^2}{2\Delta x}$
- la forme de la raie : enveloppe exponentielle indique une raie lorentzienne.

Enfin si votre interférogramme est beau, vous pouvez en faire la TF par informatique.

Conclusion

Dans ce montage, nous nous sommes intéressés à la fabrication et à l'utilisation de spectromètres. En premier, nous avons présenté un spectromètre à réseau et son utilisation avec une source de longueurs d'onde connues a permis de vérifier la formule des réseaux. En deuxième, nous avons utilisé un spectromètre commercial pour mesurer la biréfringence d'une lame. Enfin, pour dépasser les limites de résolution des spectromètres à réseau, nous avons utilisé la spectroscopie par transformée de Fourier afin de déterminer l'écart entre les deux raies du doublet du Mercure que l'on étudie depuis le départ. Le filtre interférentiel a également été caractérisé. Avec toutes ces expériences au cours du montage nous avons pu étudier la lampe spectrale de mercure de plusieurs manières afin de la caractériser et s'en servir pour des mesures, telles que la biréfringence.

Un autre type de spectrométrie interférentielle est possible : Fabry-Pérot. Celle-ci a l'avantage de présenter des pics d'une plus grande finesse par rapport au Michelson.

Commentaires