

MP09 : Spectrométrie optique.

Augustin Ernoult, Raphaël Poryles

2012-2013

Rapport du jury

2012,2011,2010,2009 : 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.

2008 : 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 coeur du sujet est la mesure de longueurs d'onde, les phénomènes qui affectent la résolution des spectromètres ne doivent pas être ignorés.

2007,2005 : 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. L'usage des spectromètres informatisés à fibre ne doit pas être exclusif.

2004 : Dans ces montages, les mesures de largeurs de fentes mal calibrées, ou dont la largeur est donnée de manière indicative (sans indication de précision), ne peuvent pas constituer le thème central de l'étude. Il serait illusoire d'espérer déterminer avec une précision satisfaisante la longueur d'onde d'un laser He-Ne à partir de l'analyse de la figure de diffraction par une fente, même calibrée. L'utilisation de montages avec réseaux doit être mieux maîtrisée, en évitant de confondre angles et déviations par rapport à l'ordre zéro. Les conditions de Fraunhofer, plus larges que la simple "diffraction à l'infini", gagneraient à être connues. Dans les expériences de filtrage spatial de type passe-haut, l'utilisation d'objets de phase serait certainement plus pertinente que celle d'une plume."

Références

- [1] Duffait d'optique
- [2] Sextant d'optique

Pré-requis

- Optique géométrique.
- Optique ondulatoire.
- Transformée de Fourier.

Table des matières

1	Introduction	1
1.1	1ère Manipulation qualitative.	1
2	Spectromètre à réseau	1
2.1	Mesure du doublet jaune de Hg	1
2.2	Pouvoir de résolution	1
3	Spectromètre interférentiel	2
3.1	Mesure du doublet du Na	2
3.2	Spectrométrie par transformée de Fourier de la lumière blanche	2
3.3	Blanc d'ordre supérieur/ Blanc d'ordre 0	2
4	Application de la spectroscopie : Raies de l'hydrogène et constante de Rhydberg.	3

Les schémas des montages sont donnés en annexe, la notation Δ correspond aux incertitudes.

1 Introduction

- Montrer les différents spectres que la lumière peut avoir (continu, de raie, laser), et dire pourquoi on cherche à les étudier (notion de cohérence temporelle).

1.1 1ère Manipulation qualitative.

Au prisme à vision directe présenter le spectre de la lumière blanche (continu) et le spectre de raie du mercure. Rappeler que l'indice du prisme varie en fonction de la longueur d'onde (milieu dispersant) $n = A + B/\lambda^2$ ce qui permet d'observer les différentes raies, mais que de par sa dispersion non linéaire (proportionnelle en $1/\lambda^2$) et de part la faible résolution $R = \frac{\lambda}{\delta\lambda_{min}}$ de ce montage, on préférera utiliser un réseau.

2 Spectromètre à réseau

2.1 Mesure du doublet jaune de Hg

On éclaire une fente réglable par une lampe Hg ou Hg-Cd, dont on fait l'image par une lentille (achromate 160mm) sur un écran placé à l'infini c'est à dire à environ un bon mètre de la lentille. Il est TRES IMPORTANT d'avoir une image bien nette de la fente. On place juste derrière la lentille notre réseau, un bon choix est un réseau 600tr/mm qui est un bon compromis entre une figure qui ne sort pas de l'écran et une dispersion des raies assez importante

Rappeler la formule des réseaux : $\sin\theta_p - \sin\theta_0 = \frac{p\lambda}{a}$ et en incidence normale $\lambda = \frac{ax}{pD}$ pour des faibles angles.

Etalonner pour les raies violettes et verte du mercure en utilisant des valeurs tabulées.

Penser à montrer que l'on ne voit pas certaines raies violettes du mercure directement sur l'écran mais que l'on peut les observer grâce à une feuille de papier qui va fluorescer.

On obtient une relation affine $\lambda = ax + b$.

On peut alors déterminer $\delta\lambda$ pour le doublet jaune du mercure avec une incertitude $\Delta\lambda = x\Delta a + a\Delta x + \Delta b$.

$$\lambda_1 = (\pm)nm \quad (2.1)$$

$$\lambda_2 = (\pm)nm \quad (2.2)$$

Passer en lampe à Na, mesurer la longueur d'onde de la raie jaune

$$\lambda_{moy}(Na) = (\pm)nm \quad (2.3)$$

On observe que l'on ne voit pas la séparation du doublet jaune.

2.2 Pouvoir de résolution

On peut alors borner le pouvoir de résolution ($R = \frac{\lambda_{moy}}{\delta\lambda}$) de notre spectromètre à réseau par :

$$\frac{\lambda_{moy}(Hg)}{\delta\lambda(Hg)} = \frac{578,02(nm)}{2,10(nm)} < R < \frac{\lambda_{moy}(Na)}{\delta\lambda(Na)} \quad (2.4)$$

Où $\frac{\lambda_{moy}(Na)}{\delta\lambda(Na)}$ est la résolution nécessaire pour détecter le doublet du sodium, que l'on calculera par la suite.

Rappeler que la résolution dépend du spectromètre dans son intégralité et pas seulement de l'élément dispersif (évoquer le critère de Rayleigh de brouillage par diffraction). Montrer notamment qu'en augmentant la taille de la fente on va augmenter la taille des raies sur l'écran ce qui diminuera notre précision mais qui aura le bon goût d'augmenter la luminosité. Aussi dire que la résolution dépend de la clarté de notre image : si le montage est bien effectué cela aura peu d'influence mais garder en tête que si l'image n'est pas nette, on ne pourra pas séparer le doublet du mercure.

3 Spectromètre interférentiel

3.1 Mesure du doublet du Na

On cherche à mesurer le doublet du sodium grâce à l'interferometre de Michelson.

On se place en lame d'air (cercle à l'écran) avec un éclairage en lumière non parallèle et on observe à l'infini (toujours l'écran à environ 1 mètre).

Remarque : Faire le zero sur le petit capteur placé sur le vernier de l'interferometre au contact optique, ce qui sera très utile pour plus tard.

Faire chariotter jusqu'à une première zone de brouillage, noter la valeur, continuer à chariotter jusqu'au prochain brouillage et reprendre la valeur.

On a alors :

$$\delta\lambda = \frac{(\lambda_{moy})^2}{2\delta e}$$

$$\frac{\Delta(\delta\lambda)}{\delta\lambda} = \frac{\Delta(\delta e)}{e}$$

D'où $\delta\lambda = (\pm) nm$

On peut alors conclure que la résolution du spectro par interference est supérieure à celui à réseau : On a réussi à mesurer le doublet du sodium!!!

On a alors $R_{PVD} < 275,3 < R_{Reseau} < 982,2 = \frac{\lambda_{moy}(Na)}{\delta\lambda(Na)} < R_{Michelson}$

Remarque 1 : Les années précédentes on faisait défiler N brouillages et ensuite on moyennait, mais étant donné la difficulté à repérer les brouillages, cela ne me semble pas pas être quelque chose de nécessaire et prendrait surtout plus de temps avec plus de risque de se tromper.

Remarque 2 : Les résolutions dépendent de la longueur d'onde à laquelle on travaille. Ici elle sont comparables car on se place dans à des longueurs d'onde proches!

3.2 Spectrométrie par transformée de Fourier de la lumière blanche

On revient au contact optique avec la lampe QI et on se place en coin d'air : Lumière incidente le plus parallèle possible, les interférences seront localisées au voisinage des miroirs d'où l'utilisation d'une lentille de projection.

On projette la figure d'interférence sur Caliens qui est relié à un oscilloscope.

On incline les miroirs de manière à avoir une figure d'interférence qui tienne sur la barrette ccd de Caliens. On pourra alors revenir au spectre de la lumière sans avoir à chariotter, par transformée de Fourier.

$$I(\delta) = I_0 + \int \frac{B(\sigma)}{2} e^{2i\pi\sigma\delta} d\sigma + CC \quad (3.1)$$

Par TF, on trouve $B(\sigma)$ avec σ qui est le nombre d'onde, et l'on peut donc remonter à la distribution spectrale de la lumière sortant de notre système avec $\sigma = \frac{1}{\lambda}$.

ATTENTION, il faut bien différencier le spectre de la lumière sortant du système et le spectre de la lampe QI, car tout les éléments du système auront une réponse spectrale qui ne sera pas forcément plate, mais qui déformera le spectre de la lumière incidente.

La méthode que nous proposons ici n'est pas la méthode standard qui consiste à faire défiler la figure d'interférence en chariotant grâce à un moteur, en faisant l'acquisition avec une photodiode.

Notre méthode est moins précise car nous effectuons la transformée de Fourier de notre intensité sur un espace limité par la taille de la barrette CCD, mais cette méthode est beaucoup plus rapide.

3.3 Blanc d'ordre supérieur/ Blanc d'ordre 0

Il s'agit principalement de présenter le spectromètre Ulice sur un exemple précis. C'est un spectromètre à entrée en fibre optique qui fonctionne par dispersion grâce à un réseau blazé.

On agrandit les franges, de façon à ce que leur taille soit supérieure à celle de l'entrée de la fibre optique. On observe alors les 2 différents spectres, en se plaçant une première fois dans la frange centrale d'ordre 0, où l'on voit l'ensemble du spectre de la lumière blanche, puis en se plaçant dans le blanc d'ordre supérieur où cette fois ci on observe le spectre cannelé de la lumière blanche.

4 Application de la spectroscopie : Raies de l'hydrogène et constante de Rhydberg.

On cherche ci à retrouver la constante de Rhydberg en étudiant le spectre d'une lampe à hydrogène.

Pour obtenir ce spectre, on se sert directement de Ulice en faisant condenser la lumière directement sur l'entrée de la fibre optique.

On observe alors à l'écran 3 raies de l'hydrogène qui correspondent aux transitions électroniques des couches $n > 2$ aussi appelées transition de la série de Balmer (on observera en pratique 3 raies correspondant à $n = 3, 4, 5$).

La longueur d'onde émise est alors donnée par la formule :

$$\frac{1}{\lambda_n} = R_H \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

avec $n > 2$.

On relève alors les 3 longueurs d'onde qui seront de l'ordre de $\lambda_3 = 656\text{nm}$, $\lambda_4 = 486\text{nm}$ et $\lambda_5 = 434\text{nm}$.

En effectuant une régression linéaire (sur régressi) de la courbe $\frac{1}{\lambda_n} = f\left(\frac{1}{n^2}\right)$, on obtient R_h qui est la pente de la courbe.

L'incertitude sur cette mesure sera de l'ordre de $\frac{\Delta R_H}{R_H} = \frac{\Delta \lambda}{\lambda}$.

D'où $R_H = \pm$ à comparer avec la valeur théorique $R_H = 0,0109737\text{nm}^{-1}$.

Conclusion

On a pendant ce montage étudié différents spectres de la lumière avec plusieurs méthodes présentant différents avantages : le spectromètre à réseau, le spectromètre interférentiel, et le spectromètre contrôlé par ordinateur.

Le spectromètre à réseau a pour avantage d'être très facile à mettre en place mais a une résolution limitée (on n'arrive pas à séparer le doublet du sodium).

Le spectromètre interférentiel (Michelson) a une résolution bien meilleure mais constitue un montage beaucoup plus lourd à mettre en place.

Finalement le spectromètre à entrée fibré permet une bonne résolution et est très facile à étudier, mais ne présente pas de réel intérêt pédagogique pour ce qui est de la mise en place de l'expérience. (cf Rapport du jury)

L'ouverture peut se faire en évoquant une autre leçon (par exemple dire que le spectre est directement relié à la cohérence spatiale), ou discuter de l'utilisation de la spectrométrie notamment en Astrophysique pour déterminer les constituants des étoiles.

On peut rappeler aussi l'utilisation de spectroscopie en chimie analytique (spectre d'absorption cette fois) et qu'il existe d'autres types de spectroscopie (IR, RMN, de masse).

Annexe

Autres manipulations possibles :

- Spectroscopie d'absorption (ex : Permanganate de Potassium)
- Spectromètre à Fabry-Pérot
- Étude des modes d'un LASER.
- Comparaison lampe chaude/lampe froide.
- Largeur d'une raie unique par brouillage au Michelson (notion de cohérence).