

MP10: Spectroscopie Optique

Simon Thébaud & Laura Giausserand

7 novembre 2014

Références

- Duffait, Experiences de Physique au CAPES (très synthétique, ce qui peut être pratique)
- Sextant, Optique Experimentale
- Duffait, Experiences d'Optique à l'Agrégation
- Rival, Les Grandes Expériences Scientifiques (aspect historique, dispo en BU)

Table des matières

1	Spectrométrie par réseau de diffraction	2
1.1	Etude du réseau par transmission : influence du pas du réseau et de la largeur de la fente d'entrée, minimum de déviation	2
1.2	Mesure de la position du doublet du Sodium	3
1.3	Mesure de la série de Balmer et de la constante de Rydberg	4
1.4	Ecart du doublet du Sodium, pouvoir de résolution	4
2	Spectrométrie par transformée de Fourier	5
2.1	Ecart du doublet du Sodium	5
2.2	Largeur d'une raie spectrale	5

Introduction

La spectroscopie optique est le domaine de la physique s'attachant à décrire et mesurer le spectre des sources lumineuses.

Le premier à avoir décomposé la lumière blanche et à avoir correctement interprété ses observations est Isaac Newton. Avant lui, les idées d'Aristote prévalaient : la lumière blanche était considérée comme la plus pure, les couleurs résultant d'affaiblissements par réflexion et réfraction. En 1672, Newton effectue une série d'expériences révolutionnaires. Il commence par décomposer un faisceau de lumière solaire grâce à un prisme de verre. Nous allons effectuer une expérience similaire à l'aide d'une lampe Quartz-Iode :

Expérience 1 (qualitative) : décomposition de la lumière blanche par un Prisme à Vision Directe (PVD)

- Faire l'image sur un écran d'une fente éclairée par une lampe QI (c'est un spectre de corps noir).
- Placer juste après la lentille un PVD.
- Enjoy.

Newton parvient ensuite à isoler une partie du spectre (c'est le premier monochromateur) et montre que le faisceau coloré n'est pas décomposé par un prisme. Enfin, il recombine le spectre de la lumière solaire et obtient du blanc. Par ces expériences il prouve que la lumière blanche est la somme de faisceaux colorés qui peuvent être considérés comme des composantes élémentaires de la lumière.

Ces bases théoriques établies, il fallut attendre le XIX^{ème} siècle pour que l'on utilise le spectre d'une source lumineuse afin d'étudier sa composition. En 1814, Fraunhofer observe la présence de 476 raies sombres dans le spectre de la lumière solaire. En 1834, le chimiste Henry Fox Talbot comprend que ces raies sont caractéristiques de composés chimiques et en constituent une sorte "d'empreinte digitale".

Dans le cadre de ce montage, nous supposons connues avec une grande précision (au centième de nm près) les 4 raies les plus lumineuses du Mercure : la raie violette à 404.66 nm, la raie violette ("indigo") à 435.83 nm, la raie verte à 546.07 nm et le doublet jaune à 576.96 et 579.07 (valeurs tirées du Sextant, page 4). Nous cherchons à étudier le doublet du Sodium : position du doublet, écart du doublet et largeur des raies composant le doublet. Nous nous intéresserons également à la série de Balmer de l'Hydrogène.

1 Spectrométrie par réseau de diffraction

Le défaut du prisme est que la relation entre la position sur l'écran et la longueur d'onde n'est pas simple (elle n'est pas linéaire, mais celle du réseau non plus après tout, il y a sinus). Il n'est donc pas facile d'exploiter un spectre obtenu par un PVD. Nous allons donc dans cette partie utiliser un autre objet, le réseau de diffraction, ayant le mérite d'exhiber une loi simple entre longueurs d'ondes et angles par rapport à la normale.

1.1 Etude du réseau par transmission : influence du pas du réseau et de la largeur de la fente d'entrée, minimum de déviation

On notera n le nombre de trait par mm et a le pas du réseau : $a = \frac{1}{n}$. On rappelle qu'un réseau éclairé en conditions de Fraunhofer par une source monochromatique ponctuelle de longueur d'onde λ et d'angle d'incidence θ_0 produira des pics de diffraction très fins aux angles de sortie θ_p donnés par :

$$\sin(\theta_p) - \sin(\theta_0) = p \frac{\lambda}{a} \quad (1)$$

où p est un entier relatif appelé ordre.

Experience 2 (qualitative, cf Sextant page 218 et 221) : réseau de diffraction, influence du pas et de la fente source

- Eclairer une fente réglable par une lampe au Mercure suivie d'un condenseur.
- Avec un achromat de focale 100 mm, faire l'image de la fente sur un écran.
- Placer juste après l'achromat un support contenant des réseaux de 100, 300 et 600 traits par mm. Nous sommes en conditions de Fraunhofer.
- Constater l'influence du nombre de traits par mm et de la largeur de la fente source.

On ne s'intéressera à partir d'ici qu'à l'ordre 1, et on notera son angle de sortie θ . Pour une longueur d'onde λ donnée, la déviation $D = \theta - \theta_0$ admet un minimum lorsque $\theta = -\theta_0$ (on peut le démontrer analytiquement en différenciant la relation 1, ou géométriquement avec le cercle trigonométrique). Alors, la relation 1 se réécrit

$$\sin\left(\frac{D}{2}\right) = \frac{\lambda}{2a} \quad (2)$$

Nous allons utiliser le minimum de déviation pour améliorer la précision de nos mesures.

1.2 Mesure de la position du doublet du Sodium

L'utilisation directe de cette formule implique la connaissance précise de a et de la distance d entre le réseau et l'écran. La mesure de d au mètre ruban donnerait une précision de quelques %, ce qui est mauvais pour la mesure d'une longueur d'onde. On suppose également que a est connu à 1% près, ce qui n'est pas non plus fantastique.

On contourne ces difficultés en procédant par étalonnage : on mesure d'abord sur l'écran les distances entre l'ordre 0 et l'ordre 1 des raies connues du Mercure. On établit ainsi une droite d'étalonnage. Puis, sans toucher au dispositif, on mesure la distance sur l'écran du doublet du Sodium, x_{mes} et on en déduit sa longueur d'onde, λ_{mes} . Notons x la distance mesurée. On a :

$$x = 2d \tan\left(\frac{D}{2}\right) = 2d \frac{\sin\left(\frac{D}{2}\right)}{\sqrt{1 - \sin^2\left(\frac{D}{2}\right)}} = 2d \frac{\frac{\lambda}{2a}}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}} = \frac{d}{a} \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}}$$

On trace donc x en fonction de $f(\lambda, a) = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}}$ et on modélise par une droite :

$$x = m f(\lambda, a) \quad (3)$$

La modélisation nous donne la valeur de m et son incertitude. On peut donc mesurer x_{mes} et en déduire λ_{mes} par l'inversion de la relation 3 :

$$\lambda_{mes} = \frac{x_{mes}}{\sqrt{m^2 + \left(\frac{x_{mes}}{2a}\right)^2}} \quad (4)$$

Erreurs sur f :

- Incertitudes sur les valeurs des raies du Mercure : $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \approx 0.0025\%$
- Incertitude sur a : $\frac{\Delta a}{a} \approx 1\%$

On a donc :

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{1}{1 - \frac{\lambda^2}{4a^2}} \sqrt{\left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{\lambda^2}{4a^2}\right)^2 \left(\frac{\Delta a}{a}\right)^2} \approx \frac{\lambda^2}{4a^2} \frac{\Delta a}{a} \approx 0.03\%$$

On obtient comme valeurs numériques :

- Raie violette 404.66 nm : $f = 407.7 \pm 0.1$ nm
- Raie violette 435.83 nm : $f = 439.6 \pm 0.1$ nm
- Raie verte 546.07 nm : $f = 553.5 \pm 0.2$ nm
- Doublet jaune 578.02 nm : $f = 586.9 \pm 0.2$ nm

Erreurs sur x :

- Erreur de lecture sur l'écran : $\frac{\Delta x^{lecture}}{x} \approx 1\%$
- Erreur $\Delta\beta \approx 1^\circ$ sur l'angle du réseau : $\frac{\Delta x^{reseau}}{x} \approx 0.03\%$
- Erreur $\Delta\alpha \approx 10^\circ$ sur l'orthogonalité de l'écran : $\frac{\Delta x^{ecran}}{x} \approx \frac{\Delta\alpha^2}{2} + \frac{\lambda^2}{4a^2}\Delta\alpha^2$. Le terme constant rentre simplement dans la valeur de m , et le second terme est de l'ordre de 0.3 %.
- Erreur $\Delta\gamma$ sur l'horizontalité du papier millimétré : $\frac{\Delta x^{papier}}{x} = 1 - \cos(\gamma)$ constant donc rentre dans la valeur de m .

On a donc :

$$\frac{\Delta x}{x} = \frac{\Delta x^{lecture}}{x}$$

Erreurs sur λ_{mes} :

- Erreur de lecture sur l'écran de x_{mes} : $\frac{\Delta x_{mes}}{x_{mes}} \approx 1\%$
- Erreur sur a : $\frac{\Delta a}{a} \approx 1\%$
- Erreur sur m : $\frac{\Delta m}{m} = ?$

On a donc :

$$\frac{\Delta \lambda_{mes}}{\lambda_{mes}} = \frac{1}{m^2 + \frac{x_{mes}^2}{4a^2}} \sqrt{m^4 \left(\frac{\Delta x_{mes}}{x_{mes}} \right)^2 + m^4 \left(\frac{\Delta m}{m} \right)^2 + \frac{x_{mes}^4}{16a^4} \left(\frac{\Delta a}{a} \right)^2}$$

soit

$$\frac{\Delta \lambda_{mes}}{\lambda_{mes}} \approx \sqrt{\left(\frac{\Delta x_{mes}}{x_{mes}} \right)^2 + \left(\frac{\Delta m}{m} \right)^2}$$

Expérience 3 (quantitative) : mesure du doublet du sodium par réseau de diffraction

- Reprendre l'expérience 2 et choisir le réseau à 600 traits par mm.
- Se mettre au minimum de déviation et mesurer les positions sur l'écran des raies connues du Mercure.
- Etablir la droite d'étalonnage comme détaillé précédemment. Obtenir la valeur de m .
- Sans toucher à rien, remplacer la lampe à Mercure par une lampe à Sodium.
- Mesurer la position sur l'écran du doublet du Sodium. En déduire sa longueur d'onde.

1.3 Mesure de la série de Balmer et de la constante de Rydberg

Nous mesurons la série de Balmer par la même méthode, mais cette fois en utilisant un spectromètre commercial. Ici, la précision est limitée par la taille de la fente d'entrée, qu'on est obligé d'ouvrir pour augmenter la sensibilité. Il ne faut pas oublier de vérifier l'étalonnage du spectromètre avant de faire les mesures.

Expérience 4 (quantitative) : mesure de la série de Balmer et de la constante de Rydberg

- Eclairer le spectromètre directement par la lampe à vapeur de Mercure. Vérifier l'étalonnage du spectromètre.
- A l'aide d'un condenseur, focaliser la lumière d'une lampe à Hydrogène sur le spectromètre.
- Mesurer les positions des pics de la série de Balmer.
- En déduire la valeur de la constante de Rydberg

1.4 Ecart du doublet du Sodium, pouvoir de résolution

Si l'on reprend l'expérience 3 et que l'on essaie cette fois de mesurer l'écart du doublet du Sodium, on se rend compte que l'on arrive pas à le résoudre : le pouvoir de résolution du dispositif est trop faible.

Le pouvoir de résolution R est défini par :

$$R = \frac{\lambda}{\delta\lambda}$$

où $\delta\lambda$ est le plus petit écart spectral résolu autour de la longueur d'onde λ . Le critère de résolution est souvent celui de Rayleigh : le minimum d'un pic est au maximum de l'autre.

Ici, ce qui limite le pouvoir de résolution est la largeur de la fente d'entrée, que l'on ne peut pas diminuer sans abaisser la luminosité. Il nous faut donc passer à une méthode plus précise : la spectrométrie par transformée de Fourier à l'aide d'un interféromètre de Michelson, dont le pouvoir de résolution n'est limitée que par l'amplitude maximale de chariotage.

2 Spectrométrie par transformée de Fourier

2.1 Ecart du doublet du Sodium

Si l'on fait interférer les deux raies du doublet sodium, situés à $\sigma_0 \pm \delta\sigma$, on obtient l'interférogramme (en négligeant l'épaisseur des raies) :

$$I(\delta) = 2I_0(1 + \cos(2\pi\sigma_0\delta)\cos(2\pi\delta\sigma\delta))$$

On observera donc des annulations de contraste pour $\delta_p = \delta_0 + \frac{1}{2\delta\sigma}p$ où p est un entier relatif, soit, en notant e la distance de chariotage :

$$e_p = e_0 + \frac{1}{4\delta\sigma}p$$

En mesurant les e_p , on peut donc remonter à $\delta\sigma$. Ici, l'erreur dominante est l'évaluation du minimum de contraste par l'expérimentateur.

Expérience 5 (quantitative) : mesure de l'écart du doublet du Sodium

- Régler l'interféromètre de Michelson en lame d'air et l'éclairer avec une lampe à Sodium.
- Charioter et noter les positions pour lequel les anneaux ont un contraste quasi-nul.
- Tracer ces positions en fonction de p et en déduire l'écart du doublet du Sodium.

2.2 Largeur d'une raie spectrale

Par la même méthode, on veut remonter à la largeur de la raie verte du Sodium, $d\sigma$. L'interférogramme de cette raie donne une annulation de contraste pour $\delta \approx \pm \frac{1}{2d\sigma}$. En mesurant l'écart entre les deux annulations de contraste, on remonte à l'ordre de grandeur de $d\sigma$.

Expérience 6 (semi-quantitative) : largeur de la raie verte du Mercure

- Régler l'interféromètre de Michelson en lame d'air et l'éclairer avec une lampe à Mercure. Interposer un filtre interférentiel à 546 nm.
- Charioter et noter les positions pour lequel le contraste s'annule.
- En déduire l'ordre de grandeur de la largeur de la raie verte.

On peut rendre cette expérience précise en traçant l'interférogramme avec le moteur du Michelson. Demander à Romain et Thibaud.

Conclusion

Les méthodes de la spectrométrie optique permettent d'étudier la position et la structure des raies optiques des éléments chimiques. En 1820, Auguste Comte prédisait que l'homme ne pourrait sans doute jamais connaître la nature physico-chimique des étoiles. L'application de la spectrométrie optique à la lumière provenant du Soleil et des étoiles, un demi-siècle plus tard, lui a donné tort.