

Travaux Pratiques de Physique

Lycée
Charlemagne
Paris

MP

4 heures

Calculatrices autorisées

Le spectrogoniomètre à réseau

Objectif

L'objectif de ce TP est l'utilisation du spectrogoniomètre avec un réseau comme élément diffractant. Ce sera également l'occasion de revoir comment régler un spectrogoniomètre.

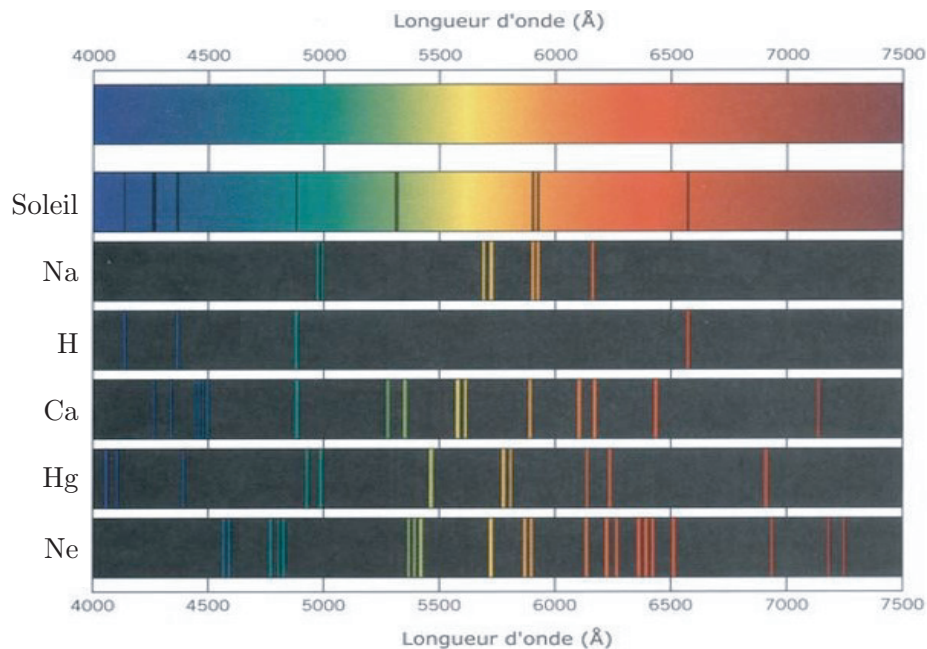
On rappelle que :

les ampoules des lampes spectrales sont fragiles et coûteuses. Les lampes resteront allumées pendant toute la séance. Il ne faut ni rallumer ni déplacer brutalement une ampoule encore chaude.

I- Généralités

1. Le matériel

Au cours de ce TP, les lampes à vapeur de mercure et de sodium vont être utilisées afin d'étudier leurs spectres d'émission :



On trouve, dans littérature, les valeurs numériques des longueurs d'onde susceptibles de composer ces spectres :

LONGUEURS D'ONDE DES LAMPES SPECTRALES

LAMPE AU MERCURE

Couleur	λ (nm)	Intensité
Rouge	690,7	pâle
Rouge	623,4	pâle
Rouge	612,3	très pâle
Rouge	607,2	très pâle
Jaune.....	579,1 – 577,0	doublet intense
Vert-jaune..	546,1	intense
Vert	496,0	très pâle
Vert-bleu...	491,6	pâle
Bleu-violet..	435,8	pâle
Violet	407,8	pâle
Violet	404,7	intense

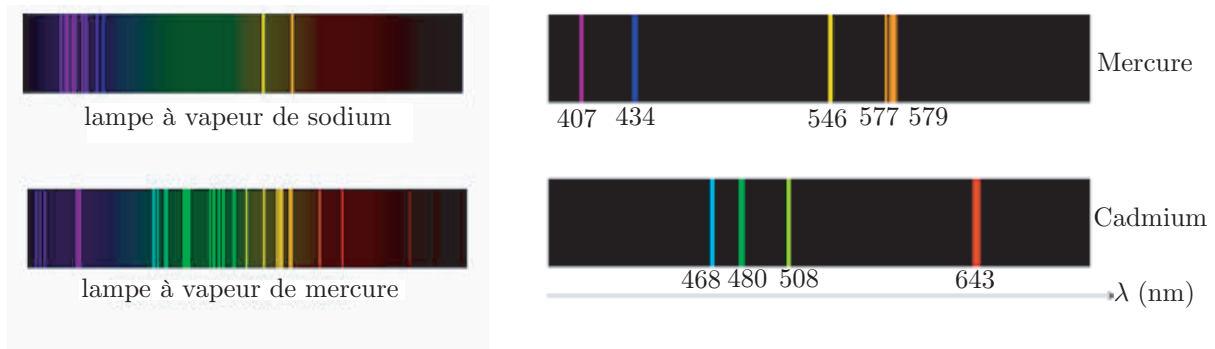
LAMPE AU SODIUM

Couleur	λ (nm)	Intensité
Rouge	615,7	intense
Jaune.....	589,6 – 589,0	doublet intense
Vert-jaune..	568,8 – 568,3	doublet intense
Vert	515,2	intense
Bleu-vert...	498,1	intense
Bleu-violet..	475,0	très pâle
Violet	466,7	intense

On trouve également des lampes qui contiennent plusieurs éléments (par exemple Cd+Hg) afin d'augmenter le nombre de raies spectrales.

Enfin, il existe également des spectres simplifiés qui ne consignent que les principales raies (ce sont celles qui sont en général identifiables avec les spectrogoniomètres).

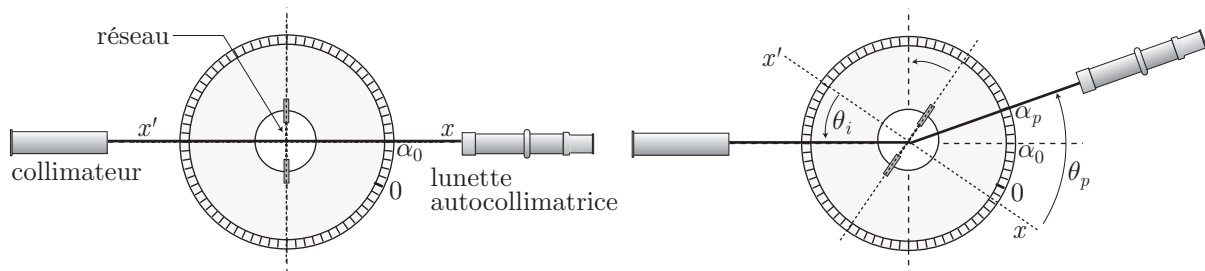
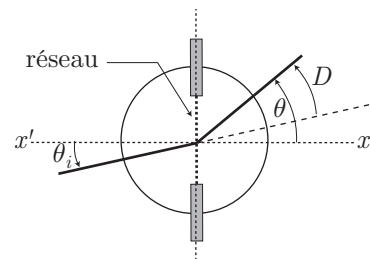
SPECTRES SIMPLIFIES



Pour mener à bien cette étude, il conviendra d'utiliser un spectrogoniomètre dont l'élément dispersif sera un réseau (de pas a , de longueur L et comportant N traits, c'est-à-dire $n = \frac{N}{L} = \frac{1}{a}$ traits par mètre).

On note θ_i l'angle d'incidence du rayon lumineux sur le réseau et θ_p l'angle où se trouve le maximum d'intensité lumineuse à l'ordre p . Quant au repérage de ce rayon, il se fait par lecture de l'angle α sur le *limbe* (périphérie) du plateau.

Enfin, on note α_0 la direction du rayon incident, repérée au limbe.



2. Expériences qualitatives

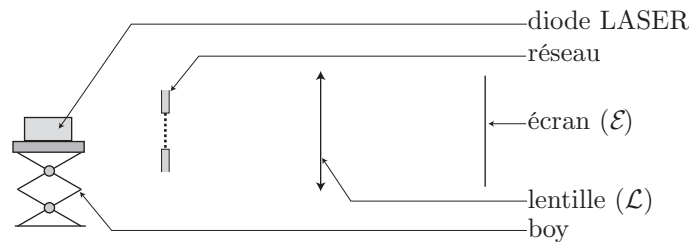
a- Déviation d'un faisceau LASER

Questions

- Démontrer la formule du réseau dans l'air : $\sin \theta_p - \sin \theta_i = p \frac{\lambda}{a}$, où $p \in \mathbb{Z}$ est l'ordre de diffraction.
- Établir que la déviation D_p devient minimum ($D_{p \min}$) pour un angle $\theta_{p \min} = -\theta_{i \min}$, avec :

$$\sin \left(\frac{D_{p \min}}{2} \right) = \frac{p\lambda}{2a} \quad (1)$$

Réaliser le montage schématisé ci-dessous :



dans lequel :

- la diode LASER délivre un faisceau lumineux de longueur d'onde $\lambda \simeq 650 \text{ nm}$;
- le réseau sera successivement l'un des réseaux disponibles ;
- l'écran \mathcal{E} se trouve dans le plan focal image de la lentille convergente \mathcal{L} (que l'on choisira judicieusement) ;

Pour chacun des réseaux disponibles, réaliser l'expérience en observant sur \mathcal{E} la figure nette d'interférences.

Question

Quelle est l'influence du pas a ?

Choisir un des réseaux disponibles. Mesurer l'interfrange Δx entre deux images successives à l'écran.

Question

En déduire une évaluation de a . Conclure.

Faire tourner le réseau sur son support, de manière à faire varier θ_i .

Question

On observe que le centre de la figure d'interférences n'est pas affecté par l'opération. Pourquoi ?

Mettre en évidence l'existence d'un minimum de déviation pour le faisceau qui arrive sur l'écran : en faisant tourner le réseau sur son support, l'image reçue par l'écran se concentre vers son centre, puis se dilate.

b- Déviation d'un faisceau de lumière blanche

Remplacer, dans le montage précédent, le LASER par une fente éclairée en lumière blanche et située dans le plan focal objet d'une lentille convergente de faible distance focale ($f' \leq 10 \text{ cm}$). Observer, sous incidence nulle ($\theta_i = 0$), la figure d'interférences formée sur l'écran (situé dans le plan focal image de \mathcal{L}').

Question

Soient λ_1 et $\lambda_2 = \lambda_1 + \delta\lambda$ (et $\delta\lambda \ll \lambda_1$) deux longueurs d'onde du spectre d'un faisceau lumineux éclairant le réseau. Les maxima d'intensité, à l'ordre p , sont alors observés dans les directions angulaires respectives θ_{1p} et $\theta_{2p} = \theta_{1p} + \delta\theta_p$. On appelle *dispersion angulaire* la grandeur :

$$\text{Disp.} = \frac{\delta\theta_p}{\delta\lambda_p}$$

Exprimer cette grandeur en fonction de p , a et λ_p .

Choisir, parmi les réseaux disponibles, celui qui produit sur l'écran des spectres d'ordre 0, 1, 2, -1, -2.

Questions

- Expliquer pourquoi la raie centrale est blanche.
- Quelle est la couleur la plus déviée ? la moins déviée ? Interpréter.
- Comment varie la dispersion en fonction de p ? en fonction de la longueur d'onde λ ? Interpréter.

II- Mesure du pas du réseau

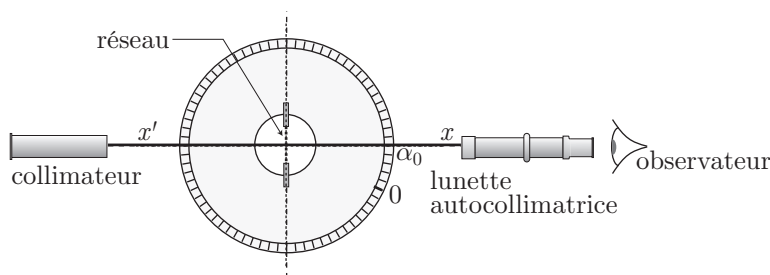
Régler le spectrogoniomètre (*cf.* TP de spectroscopie à prisme) : collimateur et lunette autocollimatrice réglés à l'infini.

Appeler le professeur

Montrer le spectroscopie réglé et expliquer en quoi ont consisté ces réglages.

1. Mesures en incidence normale

Le spectrogoniomètre étant réglé «à l'infini», aligner le collimateur et la lunette autocollimatrice ; on note α_0 l'angle lu sur le limbe du goniomètre.

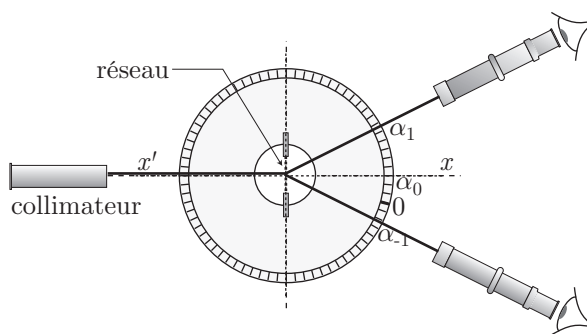


On utilise la lampe à vapeur de mercure, dont le spectre comporte plus de composantes connues.

Question

Comment s'assure-t-on que la lunette autocollimatrice est alignée avec le collimateur et non avec un maximum de diffraction d'ordre $p \neq 0$?

En utilisant le réseau qui vous semble le mieux adapté, repérer la direction α_1 correspondant aux diverses raies de longueurs d'onde λ à l'ordre $p = 1$.



Questions

1. Donner la valeur de α_0 mesurée et précisez avec quel réseau. Justifier ce choix.
2. Montrer, à l'aide d'un schéma clair que, pour un ordre p quelconque :

$$\theta_p = \alpha_p - \alpha_0 \tag{2}$$

La formule du réseau : $\sin \theta_p = \frac{p\lambda}{a}$ montre qu'il est alors possible de trouver a en traçant un graphe.

Questions

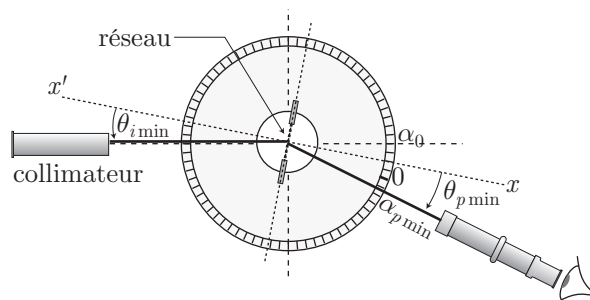
Quel est ce graphe ?

Le mettre en œuvre et évaluer la valeur de a . Conclure.

2. Mesures au minimum de déviation (1)

Cette série de mesures se fera au cours de cette séance de TP s'il reste du temps. Sinon, elle pourra faire l'objet d'une préparation à l'oral.

Il s'agit d'utiliser ici la formule (1) : $\sin\left(\frac{D_{p\min}}{2}\right) = \frac{p\lambda}{2a}$, en remarquant que $D_{p\min} = \alpha_{p\min} - \alpha_0$.



On gardera la valeur de α_0 précédente ainsi que le réseau choisi.

Question

En fixant un ordre p (par exemple $p = 1$), trouver un protocole expérimental permettant la détermination de a à partir des valeurs $D_{p\min}$ associées à diverses longueurs d'onde λ .

Mettre en œuvre ce protocole et donner une estimation de a , puis conclure.

3. Mesure au minimum de déviation (2)

La deuxième méthode présentée ci-dessous utilise à nouveau la relation (1), en s'affranchissant de la mesure de α_0 .

On considère que pour un ordre et une longueur d'onde donnés, le minimum de déviation a été trouvé pour un angle d'incidence $\theta_{i\min}$, dans la direction $\theta_{p\min}$ (repérée par $\alpha_{p\min}$) ; le rayon a donc été dévié de :

$$\begin{cases} D_{p\min} = \alpha_{p\min} - \alpha_0 \\ D_{p\min} = \theta_{p\min} - \theta_{i\min} \end{cases} \quad \text{avec } \sin\left(\frac{D_{p\min}}{2}\right) = \frac{p\lambda}{2a} \quad \text{car } \theta_{i\min} = -\theta_{p\min} \quad (3)$$

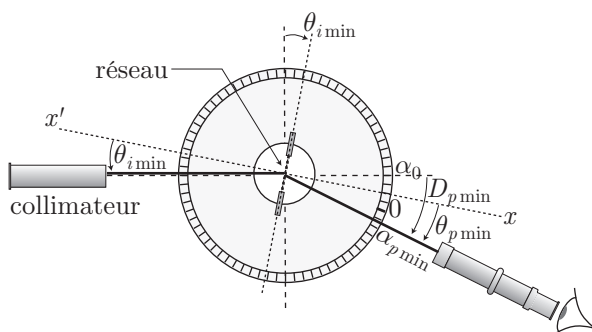


Figure 1

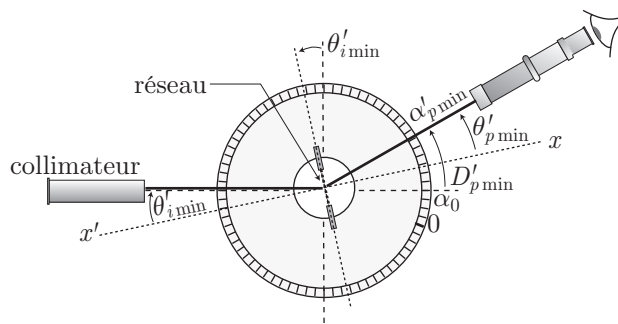


Figure 2

Les valeurs de $\theta_{i\min}$, $\alpha_{i\min}$ étant recueillies, on tourne le réseau de manière à l'éclairer sous l'incidence $\theta'_{i\min} = -\theta_{i\min}$ (il s'agit toujours d'un minimum de déviation puisque le réseau est symétrique par rapport à son axe $x'x$). Les équations (3) sont donc encore exploitables :

$$\begin{cases} D'_{p\min} = \alpha'_{p\min} - \alpha_0 \\ D'_{p\min} = \theta'_{p\min} - \theta'_{i\min} \end{cases} \quad \text{avec } \sin\left(\frac{D'_{p\min}}{2}\right) = \frac{p\lambda'}{2a} \quad \text{car } \theta'_{i\min} = -\theta'_{p\min}$$

Questions

À partir de ces équations :

1. Démontrer que $D'_{p\min} = -D_{p\min}$.
2. En déduire que $\Delta\alpha_p = \alpha_{p\min} - \alpha'_{p\min} = 2D_{p\min}$.
3. Établir enfin que :

$$\sin\left(\frac{\Delta\alpha}{4}\right) = \frac{p\lambda}{2a} \quad (4)$$

À l'aide du réseau déjà utilisé au cours des expériences précédentes, et en fixant p (par exemple $p = 1$), mesurer $\alpha_{p \min}$ et $\alpha'_{p \min}$.

Question

Faire cette opération pour plusieurs longueurs d'onde, consigner les résultats dans un tableau et utiliser une méthode graphique pour accéder à la valeur de a . Donner celle-ci et conclure.

III- Spectroscopie

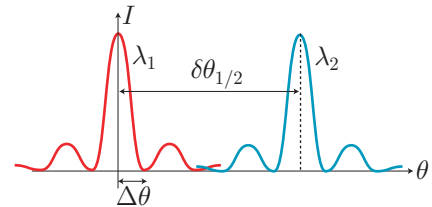
Questions

- En vous inspirant de la relation (4), proposer un protocole permettant d'étalonner le spectrogoniomètre, c'est-à-dire de tracer une courbe reliant linéairement les longueurs d'onde aux angles $\Delta\alpha$.
- Mettre en œuvre ce protocole à l'aide d'une lampe possédant de nombreuses raies de longueurs d'onde connues.
- Utilisez cette courbe d'étalonnage pour déterminer la longueur d'onde moyenne du doublet jaune du sodium. Conclure.

Soient λ_1 et $\lambda_2 = \lambda_1 + \delta\lambda_{1/2}$ deux longueurs d'onde du spectre de la lumière analysée. Les maxima d'intensité sont alors observés dans des directions séparées d'une distance angulaire $\delta\theta_{1/2}$ donnée par la *dispersion angulaire* :

$$\delta\theta_{1/2} = \frac{p}{a \cos \theta_p} \delta\lambda_{1/2}$$

En outre, chaque «pic» de diffraction possède une largeur angulaire $\Delta\theta$ correspondant à un déphasage $\Delta\varphi = \frac{2\pi}{N}$. Les deux raies apparaîtront alors distinctes si les courbes d'intensité ne se chevauchent pas, c'est-à-dire si $\delta\theta_{1/2} > \Delta\theta$. Il s'agit du **critère de résolution de Rayleigh**.



Question

Après avoir établi que $\Delta\theta = \frac{\lambda}{Na \cos \theta_p}$, montrer que le critère de Rayleigh donne une valeur maximale au *pouvoir de résolution* $R = \frac{\lambda}{\delta\lambda_{1/2}}$:

$$R_{\max} = p \times N$$

Ce n'est cependant pas le facteur le plus limitant.

De par sa largeur h_s , la fente source émet un faisceau incident dans la direction i à $\pm\Delta i$, avec $\Delta i = \frac{h_s}{2f_c}$ (f_c étant la distance focale du collimateur). Pour une longueur d'onde et un ordre donnés, le faisceau diffracté correspond alors à la direction θ à $\pm\delta\theta$. La différentielle de la formule des réseaux fournit :

$$\cos \theta \delta\theta - \cos i \, di = 0 \Rightarrow \frac{\delta\theta}{di} = \frac{\cos \theta}{\cos i}$$

et, pour de petits angles : $\delta\theta \simeq \Delta i$. La distance angulaire entre les deux raies doit être supérieure à $\delta\theta$ pour qu'elles soient séparées.

$$\frac{p\lambda_2}{a} - \frac{p\lambda_1}{a} \geq \delta\theta = \Delta i \Rightarrow \delta\lambda_{1/2} \geq \frac{a \Delta i}{p} \Rightarrow R = \frac{\lambda_m}{\delta\lambda_{1/2}} \leq \frac{p\lambda_m}{a \Delta i}$$

C'est la largeur de la fente source qui limite, en pratique, le pouvoir de résolution. Il faut veiller à l'affiner le plus possible.

Question

Après avoir donné une estimation de la largeur minimale h_s de la fente, donner le pas maximum que doit posséder un réseau pour résoudre la raie jaune du sodium à l'ordre $p = 1$. Vérifier ce résultat expérimentalement.

Matériel disponible :PAILLASSES ÉLÈVES

- 1 diode LASER ;
- 1 écran + support ;
- 1 petit boy (support élévateur) permettant l'alignement de la diode LASER (*cf.* schéma page 3) ;
- 1 lumière blanche + support ;
- 1 fente de largeur réglable ;
- 1 lentille convergente de $+1 \delta$ avec pied ;
- 1 lentille convergente de $+8 \delta$ avec pied ;
- 1 lentille convergente de $+2 \delta$ avec pied ;
- 1 goniomètre ;
- 1 miroir pour régler le goniomètre ;
- 1 alimentation double pour lampe Hg et Na ;
- 1 lampe à vapeur de sodium ;
- 1 lampe à vapeur de mercure basse pression ;
- 1 lampe blanche Ovio 5V + son alimentation ;
- 1 grande fente servant à cacher la lumière parasite des lampes spectrales ;
- 4 réseaux (100, 300, 600, 1000 traits/mm) + support sur goniomètre + pied (*cf.* schéma page 3).

PAILLASSES PROFESSEUR

- 1 mètre à ruban ;
- papier millimétré.