

FRANCK-HERTZ

1. Introduction:

Cette expérience est composée de deux parties.

La première partie est une expérience imaginée par Franck et Hertz en 1913. C'est une confirmation de la théorie de Bohr qui dit que l'énergie emmagasinée par un atome ne peut prendre que des valeurs discrètes quantifiées. Cette expérience consiste à observer comment des électrons qui sont accélérés dans un gaz (ici, du mercure, Hg) par un potentiel extérieur peuvent entrer en collision avec les atomes de ce gaz et les exciter.

La deuxième partie est une expérience de spectroscopie optique dans laquelle on va déterminer les différentes énergies nécessaires pour atteindre les différents états excités du mercure. L'énergie du premier état excité de l'atome de mercure correspond à l'énergie déterminé par l'expérience Franck-Hertz.



Hg – mercure

Travailler avec la ventilation enclenchée
Danger en cas de rupture du tube de Franck – Hertz
Vapeurs de mercure – évacuer le local
Prévenir l'assistant et le préparateur

2. Références:

Physique atomique 1	Cagnac, Pebay-Peyroula. Dunod, 1971 N°8 TPI
Introduction to atomic spectra	White, Mc. Graw-Hill. Book Co. NewYork, 1934
Atomic spectra, atomic structure	Gerhard Herzberg. Dover public. New York 1945
Physique générale	J. Rossel. Ed. du Griffon, 1970

3. Théorie de Bohr:

D'après la théorie de Rutherford-Bohr, l'atome est constitué d'un noyau lourd de charge $+Z \cdot e$ autour duquel gravitent Z électrons et e est le quantum de charge. Ceci implique que les électrons peuvent avoir énergie quelconque et la « hauteur » de l'orbite s'adapte à la vitesse. Cette image classique n'explique pas pourquoi le spectre émis par un atome est discret. Pour expliquer l'émission de lumière caractéristique observée en spectroscopie, Bohr proposa un concept constitué des deux hypothèses suivantes:

- Sur le nombre infini d'orbites que pourraient avoir les électrons autour du noyau d'après la mécanique classique, seule une série discrète (discontinue) d'orbites est possible, satisfaisant des conditions quantiques. En plus, en contradiction avec la théorie classique de Maxwell, les électrons situés sur ces orbites, bien qu'en mouvement accéléré, n'émettent pas d'ondes électromagnétiques.
- Le passage d'un électron d'un niveau d'énergie ($\hat{=}$ orbite) à un autre est toujours lié à l'absorption ou l'émission d'un quantum d'énergie électromagnétique, le photon. Si les niveaux d'énergie de l'atome sont notés par $E_0, E_1, E_2, \dots, E_n, \dots, E_p$, on peut schématiser la situation ainsi :

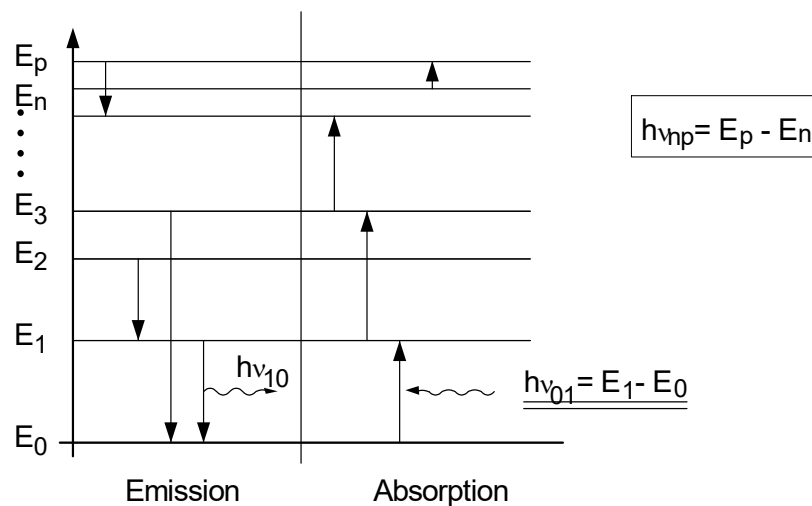


fig. 1

E_0 = énergie de l'état fondamental.

4. Expérience Franck-Hertz:

4.1 Dispositif :

Le but de l'expérience de Franck et Hertz est d'observer si les niveaux énergétiques d'un atome sont discrets comme postulé par la théorie de Bohr. Le tube de Franck-Hertz est un tube à cathode incandescente chauffée indirectement et qui contient une goutte de mercure. Pour vaporiser le mercure, le tube entier est chauffé à environ 150-200°C maximum.

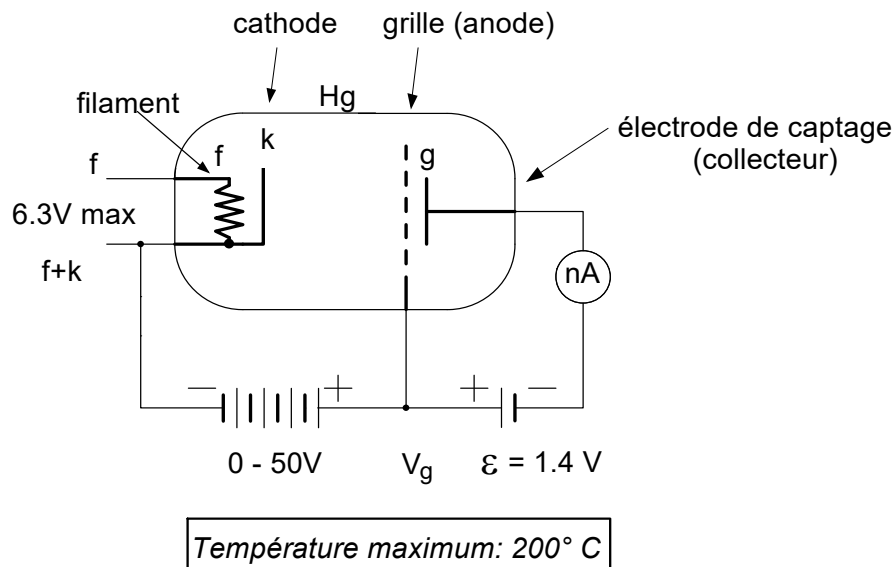


fig. 2

Le filament f chauffe la cathode k lui permettant de céder des électrons dans le vide. Les électrons émis par la cathode k sont accélérés vers l'anode g grâce à la tension V_g (tension de grille/accélération). Soit V la différence de potentiel entre la cathode ($x_0 = 0$) et un point x dans l'espace, alors l'énergie cinétique d'un électron qui a traversé la distance $x_0 - x$ est:

$$E = eV \quad \left[\text{unité eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot \text{V} \right], \text{ avec}$$

$$e = \text{charge de l'électron}$$

Tant que la tension V_g est faible, les électrons ne subissent que des chocs élastiques, donc ne perdent pas leur énergie. Par conséquent, le courant I collecté augmente continuellement avec la tension de grille V_g . Cette partie de la courbe est semblable à la caractéristique I - V d'une diode.

Dès que V_g dépasse un seuil critique V_s , le courant diminue brutalement indiquant qu'à cette valeur de V_g , les électrons cèdent par collision inélastique toute leur énergie cinétique $E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} m_e v_e^2 = eV_s$ aux atomes de mercure qui sont ainsi excités. La majeure partie des électrons qui atteignaient précédemment l'anode est donc arrêtée en cours de vol avant d'atteindre l'anode g .

Si V_g continue d'augmenter, ces électrons regagnent à nouveau suffisamment d'énergie cinétique, soit pour atteindre la grille après quelques collisions élastiques, soit (si $E_{\text{kin}} \geq eV_s$) pour céder de nouveau l'énergie d'excitation eV_s aux atomes par une seconde collision inélastique, ce qui produira une nouvelle chute brusque de I . En continuant d'augmenter V_g , le phénomène se reproduira encore plusieurs fois (3, 4,...n collisions inélastiques).

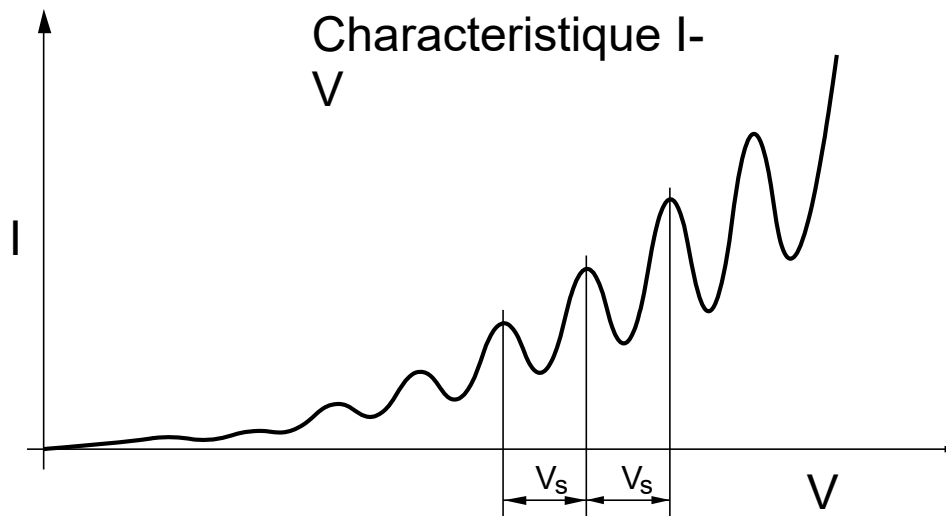


fig. 3

Remarques:

L'ajustage de la tension du filament de chauffage V_f a pour but d'obtenir une meilleure résolution des maxima et minima de la caractéristique I-V.

Le rôle de la faible tension fixe d'opposition ε entre la grille et le collecteur est d'empêcher que les électrons qui ont perdu toute leur énergie cinétique ne puissent atteindre le collecteur. Seuls les électrons ayant une énergie suffisante ($>\varepsilon$) contribueront au courant anodique.

4.2 Exercices et questions:

- A) Relevez au moyen du système à disposition les courbes caractéristiques I-V pour différentes températures et diverses valeurs de V_f . Utilisez l'option «rampe» pour des courbes lisses. La valeur maximale de V_g est fixé à 28.3 V.
 - i) Commencez à $T = 180^\circ\text{C}$ avec $V_f = 3\text{ V}$. Observation ?
 - ii) Relevez I-V aussi pour $V_f = 4, 4.5, 5, 5.2, 5.4, 5.6, 5.8, 6, 6.2$ et 6.4 V . Comparez et discutez les courbes obtenues. (= une figure dans le rapport).
 - iii) A $150, 160, 170, 190$ et 200°C , relevez les courbes I-V, chaque fois pour $V_f = 4, 5, 5.5, 6$ et 6.4 V . Comparez et discutez les I-V pour un même V_f en fonction de la température. (= deux figures dans le rapport, p.e. pour $V_f = 6$ et 6.4).

- B) Déterminez la valeur $\Delta V = V_S$ à partir des courbes I-V et calculez la longueur d'onde λ de la lumière émise par les atomes de Hg lorsqu'ils se désexcitent. Tracez la position du maximum (en V) en fonction du nombre de maximum. Utilisez la régression linéaire pour déterminer ΔV .
- C) Calculez la valeur de la vitesse des électrons lorsqu'ils ont atteint l'énergie eV_S et la vitesse d'agitation thermique des atomes. Comparez et discutez.

4.3 Conseils pour le rapport :

Nettoyez les courbes I-V : i) additionner/sustraire une constante pour que I-V commence à $I = 0$ pour $V = 0$, comme montre la fleche dans la fig. 4. ii) Supprimer des points aberrantes des courbes, comme montrent les cercles rouges dans la fig. 4.

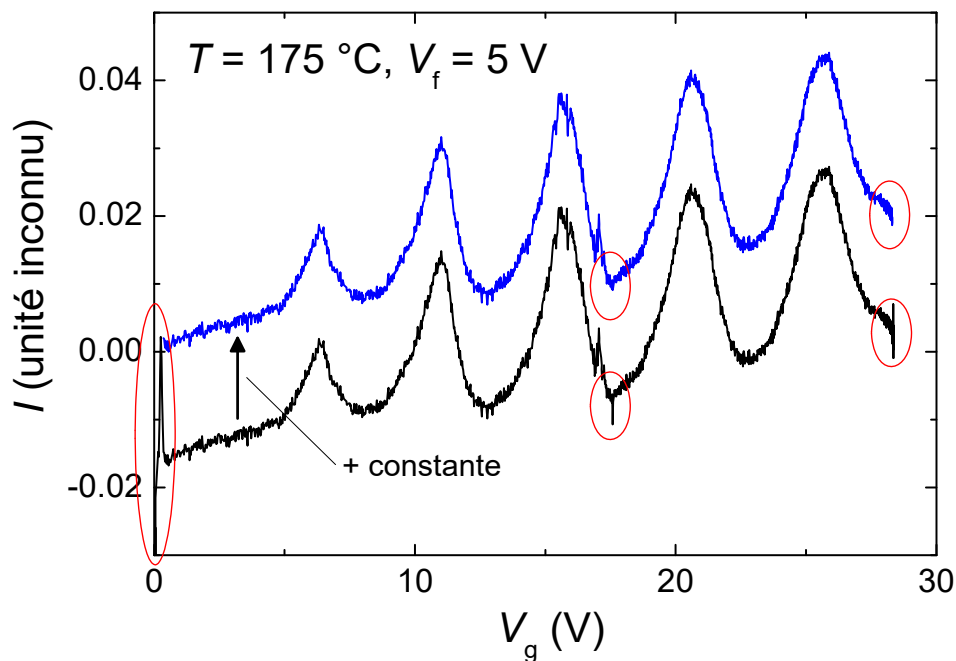


fig. 4

4.3 Matériel à disposition:

- ☐ Boîtier renfermant le tube hermétique, qui contient une goutte de mercure, un corps de chauffe et une sonde de température, le tout placé sous la ventilation ouverte à 45° .
- ☐ Régulateur de chauffage Omron E5CJ-Q2HB.
- ☐ Boîtier de source de tension et d'amplification des signaux f , $f+k$, g et gestion de la rampe V_g de 0 à 28.4V.
- ☐ Module E/S NI6009 sur entrées différentielles.
- ☐ PC avec un logiciel LabView pour l'acquisition des données.

FRANCK-HERTZ 2 : SPECTROSCOPIE UV

1. But:

Mesurer par spectroscopie optique les différentes énergies nécessaires pour atteindre les différents états excités du mercure. Déterminez les longueurs d'onde des photons émis lors de la désexcitation des atomes de mercure.



Lampe spectrale à vapeur de mercure
L'ultra violet est invisible mais dangereux pour la vue.
**Porter en permanence les lunettes de protection
mises à disposition dès que la lampe fonctionne.**

2. Références:

- Berkeley, cours de physique, tome 4 (physique quantique), p. 100 et 101. (Bibliothèque centrale: cote 200 BER).
- Franck J. und Einsporn E., Z. für Phys. 2, 18 (1920).
- Hertz G., Z. für Phys. 22, 18 (1924).
- CRC Handbook of Chemistry and Physics, 59th edition, p E-276

3. Introduction:

Les états excités de l'atome de mercure neutre sont représentés très schématiquement dans la figure 1.

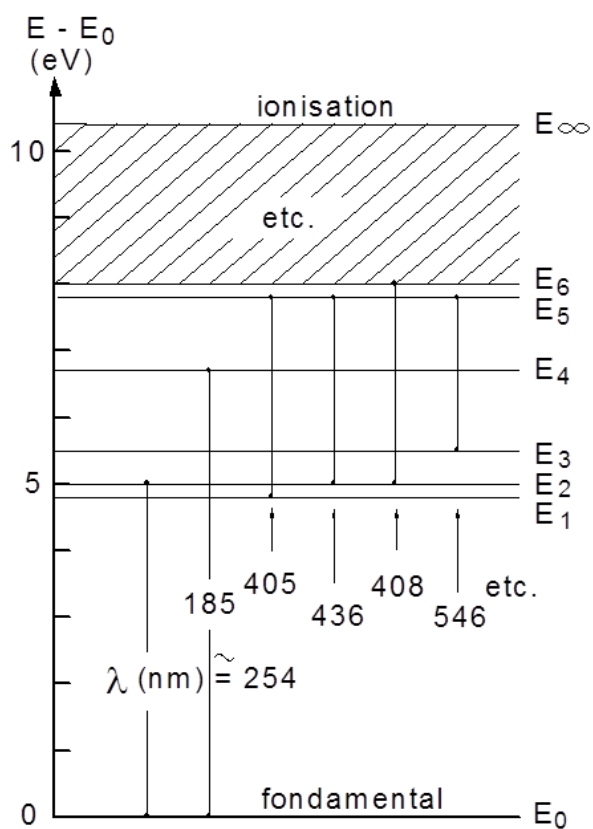


fig. 1

Longueur d'onde (Å)	Longueur d'onde (Å)
2536.52	4046.56
2652.04	4077.81
2655.13	4108.1
2752.78	4339.22
2856.94	4347.5
2893.60	4358.34
2925.4	4916.07
2967.3	5025.64
3021.5	5460.75
3023.48	5769.59
3027.49	6234.4
3125.66	6716.4
3341.48	6907.5
3650.15	7728.8
3654.83	10139.79

Tableau 1 : Energies de transitions électroniques du Mercure
Ref : Handbook of Chemistry and Physics 95TH W.M. Haynes

La transition du premier état excité au niveau fondamental n'est pas observable par spectroscopie optique (voir discussion à la fin de l'article de Hertz). On admettra le schéma de la figure 1 comme connu et on calculera l'énergie de cette transition en procédant par différences.

Questions:

- Qu'est un état ionisé?
- Dans quels domaines du spectre électromagnétique sont situées les transitions recherchées?

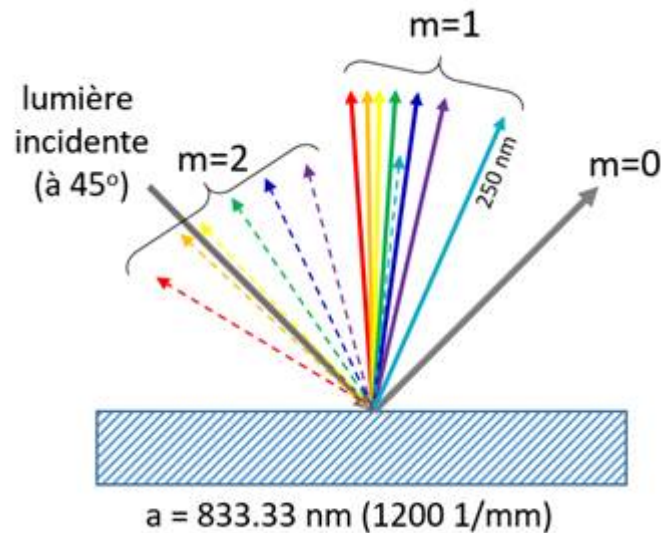
4. Spectrométrie:

Le but est d'observer la lumière de différentes longueurs d'ondes émises par une lampe au mercure. Cette lampe produit un faisceau lumineux qui est concentré par une lentille. Pour séparer les rayons de lumière en fonction de leurs longueurs d'ondes, la lumière est projetée sur un réseau de diffraction. On observe les rayons diffractés à l'aide d'une lentille oculaire, qui projette les rayons parallèles sur un écran. A l'aide de l'angle entre la normale au réseau et les rayons incident et diffracté, on peut mesurer les longueurs d'onde de l'émission du mercure.

Soit θ_i (θ_d) l'angle entre la normale au réseau et la direction du rayon incident (diffracté). La condition pour que l'on ait un maximum d'intensité à l'ordre m est:

$$a(\sin\theta_i - \sin\theta_d) = m\lambda,$$

où a est la période du réseau et λ est la longueur d'onde du rayon lumineux. Le réseau utilisé ici a 1200 lignes par millimètre.



Réseau par réflexion

Questions:

- Qu'est-ce qu'un réseau ? Comment fonctionne-t-il ? Quelle est la différence entre un réseau par transmission et le réseau blazé que nous utilisons ?
- Qu'est-ce que le pouvoir séparateur (pouvoir de résolution) ?
- Calculer le pouvoir séparateur $R = \delta\theta_d / \delta\lambda$ au premier ordre ($m=1$) pour différents angles de diffraction θ_d entre 20 et 110°. Quelle est la signification de R ?

Indication :

Partez de la formule $a(\sin\theta_i - \sin\theta_d) = m\lambda$ et effectuez un différentiel de θ_i en fonction de la longueur d'onde λ .

5. Utilisation du spectromètre:

5.1) **Sécurité:**

L'ultra violet est invisible mais dangereux pour la vue.

La source lumineuse utilisée est très intense (env. 100 watts)

Portez en permanence les lunettes de protection mises à disposition dès que la lampe fonctionne.

Question:

- Pourquoi est-ce que cette source lumineuse nécessite de porter une protection oculaire, 100 watts se trouvent aussi avec des bulbes incandescents qui ne nécessitent pas de protection?

5.2) Mise au point:

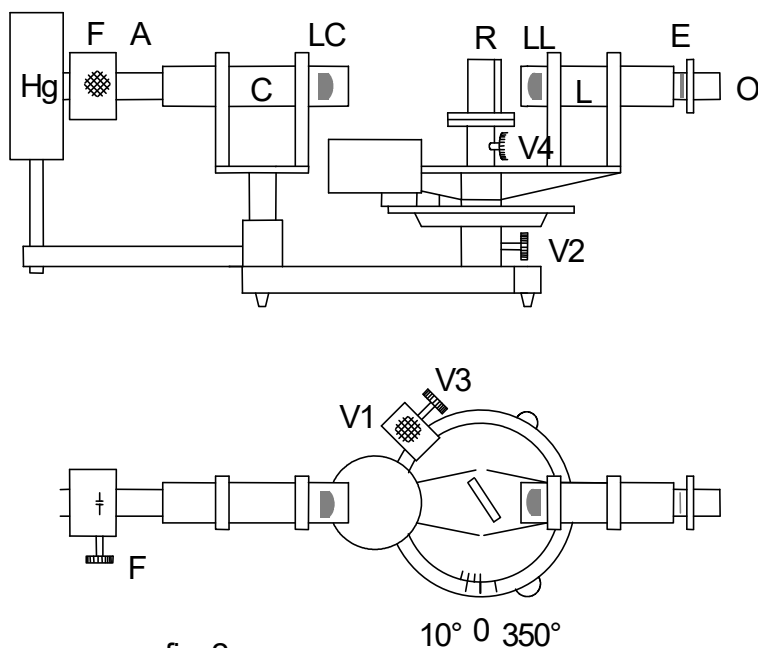


fig. 2

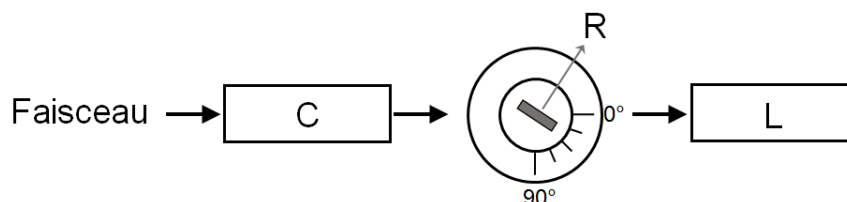
Hg	lampe spectrale à vapeur de mercure
F	fente de largeur variable
A	mise au point du collimateur
C	collimateur
LC	lentille du collimateur
R	réseau
L	lunette
LL	lentille de la lunette
E	tube avec écran fluorescent translucide
O	oculaire
V1	blocage du cercle divisé solidaire de la lunette
V2	blocage du cercle divisé de référence
V3	vis à pompe (agit lorsque V1 est serrée)
V4	blocage du plateau du réseau

Le spectromètre représenté dans la fig. 2, a été modifié pour pouvoir travailler dans l'U.V. proche. Les lentilles originales ont été remplacées par des lentilles de quartz là où c'était nécessaire.

1. Allumez la lampe spectrale. Celle-ci demande quelques minutes pour atteindre son point de fonctionnement. Elle ne se réamorç pas si elle est encore chaude.

!!! ATTENTION : La protection inox de la lampe devient TRES CHAUDE !!!
Mettez les lunettes de protection U.V.

2. Le collimateur contient une fente réglable et une lentille de focale ≈ 30 cm. La fente permet de choisir le meilleur compromis netteté / luminosité. Le réseau doit recevoir un faisceau parallèle. La fente doit donc être au foyer de la lentille du collimateur pour donner une image à l'infini.
3. Otez le réseau de son support en tirant dessus délicatement, sans toucher ses faces miroir avec les doigts et écartez la lunette du faisceau direct. Réglez les tubes coulissants du collimateur en "A" de façon à ce que l'image des bords de la fente soit net sur le mur du local voisin. Pour cela, tournez l'ensemble et dirigez le faisceau sur le mur derrière l'expérience «Milikan» et demandez l'aide d'un autre étudiant qui vérifiera la netteté. Bougez le tube A pour obtenir une image nette et verticale. Remettez l'ensemble à sa place et remettez la lunette dans le faisceau.
4. Grâce à une lentille, la lunette L permet de reformer une image de la fente à distance finie, soit sur l'écran fluorescent dans le tube E. Un oculaire permet d'examiner cette image et de l'aligner avec un réticule vertical. Mettez au point l'oculaire et l'écran en bougeant le tube E. Ceci dépend de l'œil de l'expérimentateur et est optimal lorsque l'image de la fente et le réticule soient nets.
5. Mise à zéro du spectromètre :
 - Mettez les lunettes de protection U.V.
 - Desserrez les vis à molettes V1 ; V2 ; V3 ; V4.
 - Le plot de la molette V3 doit se trouver à mi-course afin d'avoir suffisamment de réglage fin dans chaque sens lorsque la molette V1 sera serrée.
 - Placez l'oculaire dans l'axe du faisceau.
 - Tournez le support du réseau perpendiculairement au faisceau pour ne pas gêner la visée.
 - Tournez la couronne extérieure graduée et positionnez la graduation de 90° perpendiculaire au faisceau et le plus proche du repère 0 de la bague intérieure :



- Serrez la molette V1.
- Avec V3 et la loupe de visée, affinez le réglage entre la bague et la couronne jusqu'à ce que le 0 de la bague intérieure et les 90° de la couronne correspondent.
- Regardez à travers l'oculaire placé en face du faisceau et recherchez la fente de la source lumineuse jusqu'à ce que l'image (lumière verte) de la fente tombe sur le réticule.
- Cherchez le faisceau et le rendre net en coulissant l'oculaire en avant ou en arrière.
- Améliorez la netteté et l'intensité lumineuse (largeur) de la fente par l'intermédiaire de la vis à molette F ainsi que la verticalité de la fente (serrer la vis F pour plus de luminosité, pivoter pour la verticalité).

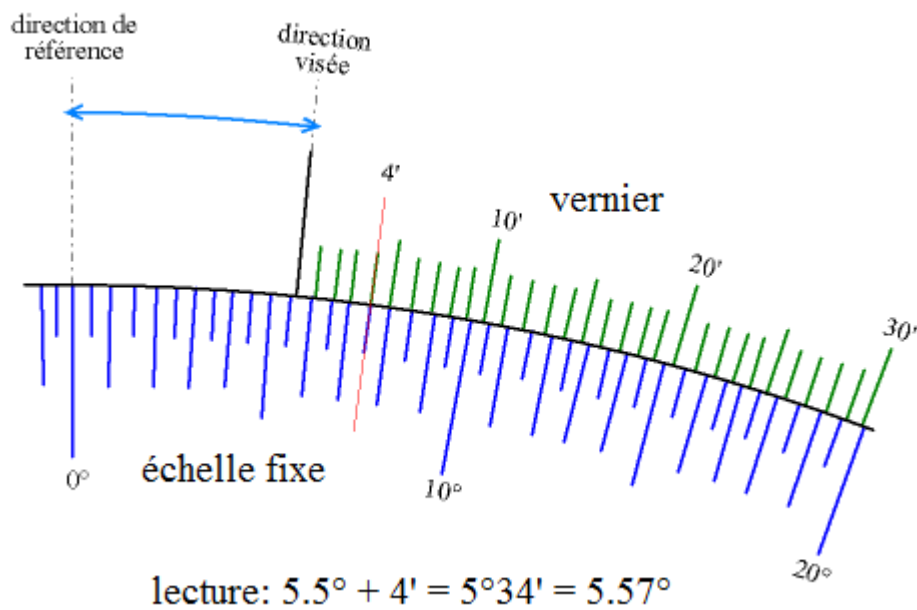
Attention : La protection inox de la lampe spectrale très chaude !

- Une fois l'oculaire aligné sur le faisceau, serrez la molette V2 tout en observant le faisceau car en serrant la molette, l'oculaire tend à se déplacer.
- Desserrez la molette V1 et pivoter l'oculaire de 90° .
- Serrez la molette V1 lorsque les deux 0 sont au plus près.
- Avec V3 et la loupe de visée, affinez le réglage entre la bague et la couronne jusqu'à ce que le 0 de la bague intérieure et le 0° de la couronne correspondent.
- Placez le réseau sur son support sans toucher à la surface du miroir.
- Faites pivoter le réseau sur son support jusqu'à ce que l'image lumineuse soit visible dans l'oculaire. La lumière verte doit être réfléchi à 90° donc le réseau est positionné à 45° .
- Ajustez la verticalité de la fente lumineuse en pivotant le support de la vis à molette F
- Centrez l'image lumineuse sur le fil de visée de l'oculaire en ne pivotant que le support du réseau. Pour la netteté, avancez ou reculez l'oculaire.
- Serrez le support du réseau avec la molette V4.
- Desserrez la molette V1.

Maintenant le spectromètre devrait être aligné. Pour vérifier ceci on peut rapidement regarder si on trouve les lignes suivantes :

- Vers 35° une ligne bleue est visible
- Vers 42° une ligne verte est visible
- Vers 45° une ligne jaune est visible

Fig 3 : Principe de lecture du vernier sur un goniomètre



$$1' = (1/60)^\circ = 0.0166667^\circ$$

$$\text{Ex : } 5.5^\circ + 4' = 5.5^\circ + (4 \times 0.0166667^\circ) = 5.57^\circ$$

La bague extérieure du goniomètre du TP possède des traits toutes les quart de degré, soit toutes les 15 minutes. Le vernier (échelle intérieure) allant de 0 à 15 minutes, permet de mesurer l'angle à la minute près.

6. Mesures :

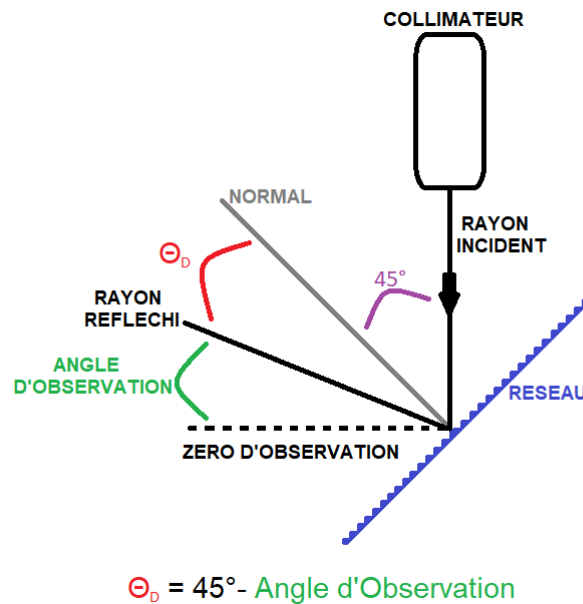


Fig 3 : Schéma du montage de la spectroscopie UV pour un angle d'incidence de 45°

A) Le but est l'étude de la structure énergétique du mercure. Pour cela, mesurez les angles de diffraction de toutes les raies du spectre de la façon suivante.

- Alignez à la main la lunette pour que l'image de la fente se superpose au réticule.
- Serrez V1, finissez le réglage avec V3 et lisez l'angle (voir fig. 3). En utilisant la formule pour le réseau calculez la longueur d'onde. Si vous avez besoin d'aide pour lire l'échelle de Vernier, reportez-vous sur la page Wikipédia correspondante [[http://fr.wikipedia.org/wiki/Vernier_\(mesure\)](http://fr.wikipedia.org/wiki/Vernier_(mesure))].

Commencez par le visible et retouchez si nécessaire la verticalité de la fente, qui doit être parallèle à la gravure du réseau. Le réticule lui-même peut aussi pivoter. Retouchez l'allongement de la lunette en arrivant dans l'U.V.

Notez la couleur de chaque raie observé.

Une fois obtenue les angles, calculez les longueurs d'onde correspondantes. Comparez-les avec les valeurs approximatives de la fig. 1 et du tableau 1. Vérifiez que vous avez bien trouvé les raies permettant de calculer les transitions $E_i - E_o$ pour $i=1, 2, 3, 5$ et 6.

Comparez la valeur obtenue pour l'énergie du premier état excité avec la mesure Franck-Hertz. Discutez les erreurs et comparez les méthodes.

B) Vous avez calibré le spectroscope pour que le réseau soit orienté d'un angle de 45° par rapport au faisceau incident. Répétez la même calibration et les mêmes mesures pour une orientation du réseau de 55° par rapport au faisceau incident. Comparez les deux méthodes. Trouvez-vous plus de raies ? L'intensité des raies est-elle différente ? Les valeurs d'énergies sont-elles similaires ?

6. Matériel à disposition:

- ☐ Lampe au mercure
- ☐ Support lampe avec plateau gradué
- ☐ Oculaire
- ☐ Réseau de diffraction réglable angulairement
- ☐ Support papier fluorescent
- ☐ Lunettes de protection
- ☐ Lampe tamisée pour réglages nocturne

version	17.05.85 aj
mise à jour	20.05.85 aj
...	
corrections	nov 2014 lw
mise à jour	avril 2017 GS
mise à jour	mars 2019 IA