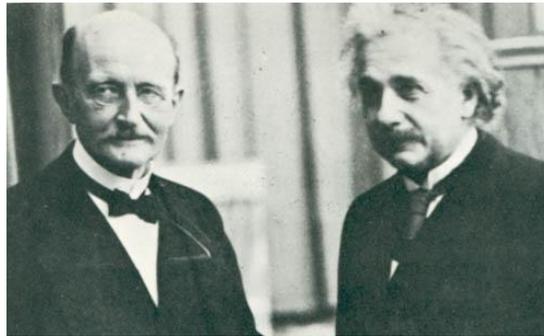




UFR FACULTE DES SCIENCES
Travaux Pratiques de Licence
L3 - Mécanique Quantique II

ANNÉE UNIVERSITAIRE 2015-2016

Le corps noir et l'effet photoélectrique



$$w = \frac{8hc}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda k_B T} - 1}$$

$$\frac{1}{2} mv^2 = h(\nu - \nu_s)$$

Table des matières

1	Le Photon : Introduction	4
1.1	Introduction historique	4
1.1.1	Les faits expérimentaux	4
1.1.2	L'effet photoélectrique	5
1.1.3	Le rayonnement thermique	6
1.2	Les éléments de solution	6
1.3	Le corps noir	7
1.3.1	Définition du corps noir	7
1.3.2	Théorie du rayonnement thermique	7
1.3.3	Etude de la relation de Planck	10
1.3.4	Le corps non noir et le corps gris	11
1.4	L'effet photoélectrique	12
2	Photon 1 : LE CORPS NOIR	13
2.1	Description du matériel	13
2.1.1	La source lumineuse	13
2.1.2	L'alimentation de la source	13
2.1.3	La lentille	13
2.1.4	La cellule	13
2.1.5	Le générateur de tension d'anode	14
2.1.6	Le convertisseur courant-tension	14
2.1.7	Acquisition de données	15
2.2	TECHNIQUE EXPERIMENTALE	15
2.2.1	Montage électrique	15
2.2.2	Caractéristique courant-tension d'une cellule photoémissive	16
2.2.3	Impédance de la cellule	16
2.2.4	Mesure des flux lumineux avec une cellule	17
2.3	Le rayonnement du corps noir	17
2.3.1	Résistance à froid et mesure des faibles résistances	18
2.3.2	Détermination de la température d'un filament à partir de sa résistance	18
2.3.3	Température du filament et intensité lumineuse émise	18
2.3.4	Loi de Stéfan	19
2.3.5	Formule de Planck ; formule de Wien	20
2.4	Le spectre, messages de la lumière	20
2.4.1	Expérience	20
2.4.2	Calculs et observations	21
3	Photon 2 : L'EFFET PHOTOELECTRIQUE	21
3.1	Description du matériel	21
3.1.1	La source lumineuse	21
3.1.2	Les lentilles	22
3.1.3	Ouverture circulaire : iris	22
3.1.4	Les filtres interférentiels	22

3.1.5	La cellule photoelectrique	22
3.1.6	Amplificateur	22
3.2	Principe de l'experience	22
3.3	TECHNIQUE EXPERIMENTALE	24
3.3.1	Mesures et incertitudes	25
3.3.2	La constante de Planck	26

1 Le Photon : Introduction

Cette expérience nécessite deux séances de TP. On commencera toujours par la première partie, consacrée à l'étude du corps noir.

Vous devez écrire un compte-rendu pour le TP entier "le photon". Il doit être impérativement rendu avant la fin de la deuxième session.

1.1 Introduction historique

Lors de la parution, en 1865, du mémoire de James-Clerck Maxwell unifiant les phénomènes électromagnétiques, il semblait que le concept ondulatoire s'imposait au détriment du concept particulaire qui avait été fortement défendu par Isaac Newton. La physique semblait achevée, à part quelques "détails" qui allaient apparaître lors même de la vérification des prédictions de Maxwell.

C'est Hertz qui, en 1888, tentant de vérifier la propagation du champ électromagnétique, allait mettre à jour l'effet photoélectrique. Rayleigh et Jeans, appliquant la théorie de Maxwell au rayonnement des corps chauffés, s'aperçurent que pour des fréquences élevées il y avait désaccord avec l'expérience. De plus l'énergie émise tendait vers l'infini avec la fréquence. La théorie de Maxwell était en échec.

La physique classique était dans l'impasse et la solution allait venir, en 1900, de Max Planck par l'introduction d'hypothèses ad hoc (qu'il n'accepta d'ailleurs pas) qui avaient le mérite de résoudre complètement le problème du rayonnement des corps chauffés, accordant parfaitement théorie et expérience.

En 1905, Albert Einstein reprenait les hypothèses de Planck et pouvait alors donner la théorie de l'effet photoélectrique en accord avec les faits.

Ce faisant, les idées implicites de continuité du rayonnement et de son caractère ondulatoire devaient être abandonnées. Il allait s'ensuivre un bouleversement de la physique classique.

1.1.1 Les faits expérimentaux

Afin de comprendre pourquoi les hypothèses de Planck sont alors révolutionnaires, il importe d'explicitier les résultats expérimentaux et de mettre en évidence les contradictions avec la physique classique de Maxwell.

Hertz s'est aperçu qu'une étincelle pouvait plus facilement jaillir entre deux plaques de zinc portées à des potentiels différents si on les éclairait par de la lumière ultraviolette. Il chargea Hallwachs d'étudier le phénomène, celui-ci constata que les plaques se chargeaient positivement (des charges négatives étaient éjectées de la surface). En 1899, Lenard montra que ces charges étaient

les électrons identifiés par J.J.Thomson en 1897. L'effet photo-électrique était découvert.

1.1.2 L'effet photoélectrique

Prenons un tube, dans lequel on a fait le vide, avec une cathode en zinc éclairée par une lumière de fréquence ν . (Fig.1)

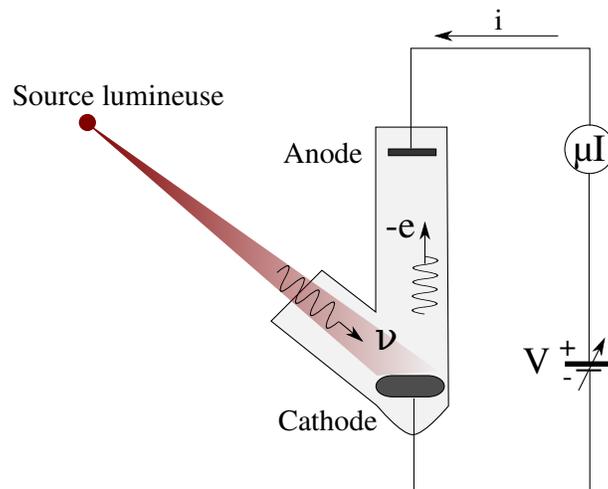


FIGURE 1 – Effet photo-électrique : montage expérimental

Le courant i mesuré donne directement le nombre d'électrons émis par la cathode. Il a la forme suivante (Fig.2) :

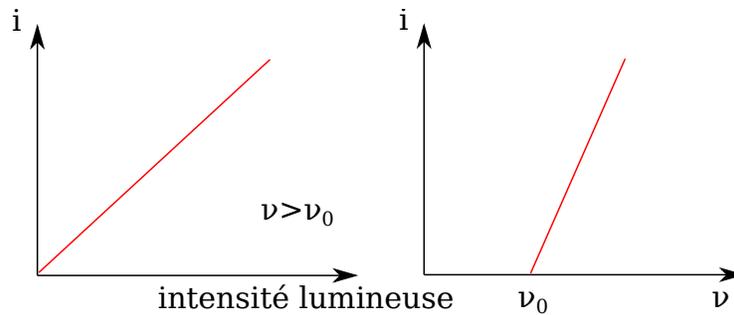


FIGURE 2 – Caractéristiques de l'effet photo-électrique

Classiquement, i et l'intensité lumineuse sont proportionnels. Par contre, l'existence d'un seuil en fréquence ν_0 , indépendant de l'intensité lumineuse et constant pour une cathode de matériau donné ne se comprend pas classiquement.

En effet, dans cette hypothèse l'électron devrait absorber et accumuler l'énergie recue proportionnellement au temps et à l'intensité lumineuse jusqu'à être éjecté. Il y aurait donc un délai entre le début de l'éclairement de la cathode et l'émission d'électrons, et pas de seuil en fréquence. Ce n'est pas ce que l'on constate, il n'y a donc pas d'explication classique valable.

1.1.3 Le rayonnement thermique

Un corps chauffé émet un rayonnement ; si la température T est assez élevée, le rayonnement devient visible, indiquant sa nature électromagnétique. La théorie de Maxwell devrait donc s'appliquer à ce problème.

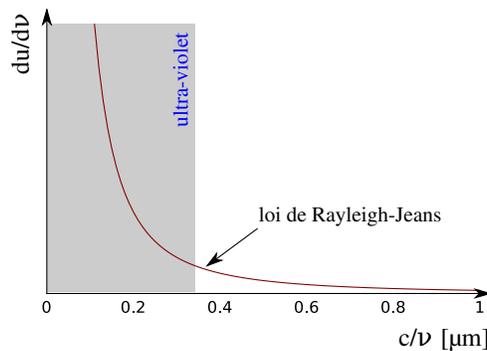


FIGURE 3 – Loi de Rayleigh et Jeans

Rayleigh et Jeans établirent la répartition spectrale de l'énergie émise par un corps chauffé à la température T en fonction de la fréquence : la densité d'énergie $du/d\nu$ par intervalle spectral $d\nu$ serait, d'après eux, $8k_B T \nu^2 / c^3$. L'énergie émise dans l'ultra-violet tendrait vers l'infini et l'énergie totale émise divergerait.

La théorie de Maxwell, qui impose la répartition continue de l'énergie du rayonnement, ne convient pas, alors même qu'il s'agit d'un phénomène électromagnétique. C'est donc que les hypothèses utilisées sont inadaptées.

1.2 Les éléments de solution

Il est possible d'appliquer les principes de la thermodynamique au rayonnement thermique d'un corps chauffé. On détermine ainsi la pression de radiation. Si l'on étudie ce qui se passe lors d'une variation isochore du volume du corps chauffé, on montre que la quantité d'énergie émise sur l'ensemble du domaine spectral est proportionnelle à T^4 ; c'est la loi de Stéfán (1879). De même, une

compression isentropique du rayonnement montre que la fréquence ν_m à laquelle $du/d\nu$ est maximum vérifie $\nu_m = T/\text{constante}$; c'est la loi de Wien (1896).

Malheureusement, bien que donnant des lois générales, la thermodynamique ne donne pas les constantes nécessaires à la vérification de ces lois.

L'idée de Planck a été de combiner les résultats expérimentaux et les résultats de la thermodynamique pour trouver une formule satisfaisant tout ce qui était connu. Son hypothèse fondamentale est de considérer que le rayonnement est émis de manière discrète, par petits paquets, et qu'il existe un paquet minimum ou quantum d'énergie transporté par le rayonnement électromagnétique. C'est ce que l'on appellera le principe de quantification.

En 1905, Einstein appliquera ce principe de quantification à la lumière pour expliquer l'effet photoélectrique. Depuis, il a été appliqué avec succès à d'autres phénomènes comme l'effet Compton, ...

Evidemment, les concepts classiques : rayonnement de nature ondulatoire, continuité du rayonnement, ne représentent plus qu'un aspect des phénomènes. Le retour au concept particulaire de Newton pour la propagation de l'énergie, par l'intermédiaire des quantas de lumière ou photons (1926) ouvrait la voie à la mécanique quantique.

La synthèse viendra de P.A.M. Dirac : le photon, vu comme solution d'une équation, particule support du champ électromagnétique.

1.3 Le corps noir

L'effet photoélectrique traduit l'interaction entre la lumière et la matière. Le bien comprendre signifie connaître les caractéristiques du rayonnement, fourni par la source lumineuse, qui frappe la cathode. C'est pourquoi nous suivons la démarche historique : étude du rayonnement thermique, puis application à l'effet photoélectrique.

1.3.1 Définition du corps noir

C'est un corps qui absorbe tout rayonnement quelle que soit sa fréquence. Un dépôt de noir de fumée réalise approximativement un corps noir. Prenons une enceinte fermée, à parois internes absorbantes, percée d'un petit trou : tout rayonnement entrant va subir des réflexions, diffusions et absorptions successives ; il ne ressortira pas. Le facteur d'absorption du trou sera égal à 1 : le trou représente un corps noir avec une bonne approximation.

1.3.2 Théorie du rayonnement thermique

Le rayonnement absorbé par le corps noir élève sa température. Inversement, quel est le rayonnement émis par le corps noir porté à la température T ? Plus

précisément, on veut déterminer la quantité d'énergie émise dans l'intervalle de fréquences $d\nu$ (autour de ν), par unité de surface du corps noir, en fonction de la température T et de ν .

Hypothèses :

On considère une enceinte fermée en équilibre thermodynamique, opaque au rayonnement, qui servira à réaliser le corps noir, à température T . On suppose que le rayonnement est sous forme électromagnétique, l'enceinte étant dans un état stationnaire (équilibre entre l'énergie qu'elle reçoit d'un générateur et celle qu'elle perd par rayonnement). On suppose que le rayonnement est réparti en modes de vibration de fréquence ν , l'énergie minimale d'un mode étant $h\nu$: c'est le quantum d'énergie associé à chaque photon de fréquence ν . La grandeur h s'appelle constante de Planck, elle a la dimension d'une action, produit d'une énergie par un temps, et vaut $h = 6.62 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$.

On admet que la répartition en énergie des différents modes de vibration est discrète : les énergies $E_0 \dots E_n \dots$ des modes sont telles que :

$$E_n - E_{n-1} = h\nu$$

Le nombre N_n de modes d'énergie E_n est donné par la statistique de Maxwell-Boltzmann :

$$N_n = N_0 e^{-(E_n - E_0)/k_B T} = N_0 e^{-nh\nu/k_B T}$$

L'énergie moyenne $\langle E \rangle$ d'un mode de vibration est :

$$\langle E \rangle = \frac{\sum_{n=0}^{\infty} N_n E_n}{\sum_{n=0}^{\infty} N_n} = \frac{h\nu}{e^{h\nu/k_B T} - 1}$$

Alors la quantité d'énergie émise par intervalle spectral $d\nu$ autour de ν et par unité de volume est appelée densité spectrale énergétique ; on la note :

$$\left| \frac{du(\nu, T)}{d\nu} \right|$$

elle est égale à $\langle E \rangle$ multiplié par le nombre N de modes de vibrations possibles par unité de volume et par intervalle spectral $d\nu$.

On peut montrer que :

$$N = 8\pi\nu^2 d\nu / c^3$$

On en tire alors

$$\left| \frac{du(\nu, T)}{d\nu} \right| = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{h\nu/k_B T} - 1}$$

C'est la formule de Planck.

Il reste maintenant à relier cette grandeur aux grandeurs macroscopiques définissant l'objet qui émet le rayonnement, en substance relier $u(\nu, T)$ avec la puissance

totale rayonnée par unité de surface du corps noir.

Pour cela, considérons un élément de surface fictif dS à l'intérieur de l'enceinte (Fig.3). Perpendiculairement à dS , et dans l'intervalle spectral $d\nu$, il rayonne la puissance :

$$dP_\nu = L_\nu dS d\Omega d\nu$$

L_ν est appelée la luminance spectrale énergétique de la source. Pour l'ensemble des fréquences, il rayonne

$$dP = L dS d\Omega$$

où $L = \int_0^\infty L_\nu d\nu$ est appelée luminance énergétique du point M .

Des arguments thermodynamiques montrent que L_ν et L sont indépendants de la nature des parois et de la direction des rayons lumineux mais ne dépendent que de T et de ν . Alors, la quantité d'énergie contenue par unité de volume de l'enceinte et dans l'intervalle spectral $d\nu$ est :

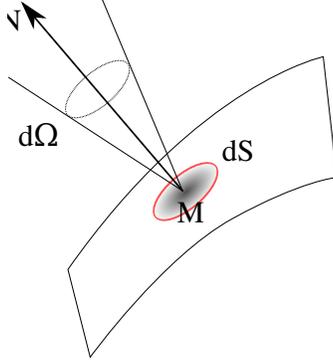


FIGURE 4 -

$$\left| \frac{du(\nu, T)}{d\nu} \right| d\nu = \frac{L_\nu}{c} d\nu = \int_0^{4\pi} d\Omega = \frac{4\pi L_\nu}{c} d\nu$$

Cette énergie est à l'intérieur de l'enceinte.

Cherchons l'énergie que va rayonner vers l'extérieur un petit trou de surface unité.

La puissance dP_ν recue par la surface dS' normale à r est :

$$dP_\nu = L_\nu d\nu \cos(i) dS dS' / r^2$$

Elle est proportionnelle à $\cos(i)$ (loi de Lambert).

La puissance rayonnée dans l'angle solide $d\Omega$ par unité de surface du corps noir est donc $dP = L \cos(i) d\Omega$. Tous les rayons compris dans di dessinent sur la sphère S de rayon unité l'angle solide $d\Omega = 2\pi \sin(i) di$.

Ils transportent la puissance $dP = 2\pi L \cos(i) \sin(i) di$, d'où :

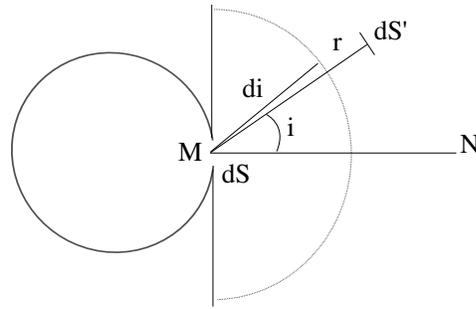


FIGURE 5 -

$$P = \int_0^{\pi/2} dP = \pi L$$

La puissance totale P rayonnée dans tout l'espace par l'unité de surface du corps noir est :

$$P = \pi \int_0^\infty L_\nu d\nu = \frac{c}{4} \int_0^\infty \left| \frac{du(\nu, T)}{d\nu} \right| d\nu$$

On trouve alors

$$P = \sigma T^4$$

où $\sigma = \frac{2k_B^4 \pi^5}{15c^2 h^3} = 5.6704 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ est la constante de Stéfán.

1.3.3 Etude de la relation de Planck

On passe aisément de la représentation en fréquence à la représentation en longueur d'onde grâce aux relations :

$$\left| \frac{du(\nu, T)}{d\lambda} \right| = \frac{\nu^2}{c^2} \left| \frac{du(\nu, T)}{d\nu} \right| \quad \text{et} \quad d\nu = -\frac{c}{\lambda^2} d\lambda$$

d'où

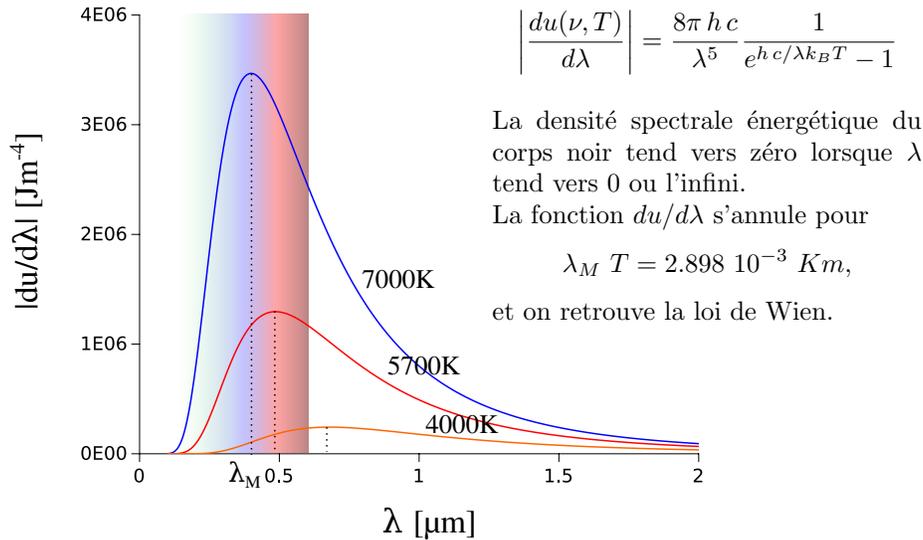


FIGURE 6 – $|du/d\lambda|$ du corps noir à diverses températures.

Remarque : l'unité de $du/d\nu$ est Jsm^{-3} ; celle de $du/d\lambda$ est Jm^{-4} .
 P a pour unité celle d'une puissance rayonnée par unité de surface : Wm^{-2} .

En conclusion, la réalité est correctement décrite et l'on doit donc accepter les hypothèses de Planck : existence d'un quantum d'énergie minimum, émission discrète du rayonnement électromagnétique.

1.3.4 Le corps non noir et le corps gris

On réalise que le corps noir, enceinte fermée à température uniforme dont le rayonnement sort par une petite ouverture (exemple : four métallurgique), n'est pas très commode à utiliser au laboratoire. On se contente souvent d'un corps incandescent tel qu'un métal chauffé sous vide ou sous une atmosphère adéquate (exemple : lampe à filament de tungstène). Il faut alors connaître les différences entre ces deux sources de rayonnement.

La loi de Kirchhoff relie la luminance spectrale l_λ d'un corps non noir avec celle, L_λ , du corps noir :

$$l_\lambda = \alpha_\lambda L_\lambda$$

où α_λ est le facteur d'absorption du corps non noir (plus couramment défini en optique comme le rapport de l'énergie qu'il absorbe à l'énergie qu'il recoit) ; il est toujours inférieur à l'unité (et vaut 1 pour le corps noir), s'il est indépendant de la direction, on dit que la source satisfait la loi de Lambert.

On remarque que la luminance d'un corps quelconque est toujours, à λ et T donnés, inférieure à celle du corps noir.

Si on choisit dans le spectre visible, c'est le corps noir qui paraît le plus lumineux. De ce point de vue, l'expression du corps noir est mal choisie (elle signifie simplement qu'à la température ordinaire il absorbe toute lumière incidente et donc paraît noir).

Remarques :

1. Si α_λ est constant avec λ l'énergie totale émise par la source est inférieure à celle d'un corps noir à la même température mais sa répartition dans le spectre est la même. On dit que l'on a affaire à un corps gris (ex : arc électrique avec électrodes en carbone).
2. Dans le cas des métaux, la décroissance de α_λ avec λ déplace le maximum de l_λ vers les courtes longueurs d'onde, ce qui favorise l'émission dans le spectre visible
3. *Pyrométrie optique* : la connaissance de $\alpha_\lambda(T)$ permet d'utiliser le rayonnement émis par les corps incandescents pour déterminer leur température. L'appareil utilisé, basé sur l'application de la formule de Planck (corrigée par α_λ), s'appelle un pyromètre optique.
4. *Température de couleur* : c'est une notion utilisée dans les techniques d'éclairage (photographie...) ; c'est la température T_c à laquelle il faut porter le corps noir pour qu'il émette un rayonnement de même répartition spectrale que le corps incandescent à la température T .
5. On trouve parfois dans la littérature (surtout technique), la notion d'émissivité e_λ (énergie émise par le corps divisé par l'énergie émise par le corps noir à la même température) en lieu et place du coefficient d'absorption α_λ .

1.4 L'effet photoélectrique

On a vu qu'il apparaît lorsque un rayonnement de fréquence ν frappe une cathode métallique sous vide : des électrons sont éjectés de la cathode. Sa caractéristique est de présenter un seuil en fréquence, au dessous duquel il n'y a pas d'effet, quelle que soit l'intensité lumineuse.

1. Dans un métal, les électrons sont libres de se mouvoir, cependant ils sont liés aux noyaux atomiques par une force de rappel. On représente cette force par un potentiel et les électrons sont dans un "puits" de potentiel. Ils se répartissent en différents niveaux d'énergie, le niveau d'énergie le plus grand E_F , s'appelle niveau de Fermi. Il est clair que cette énergie est insuffisante, à elle seule, pour que l'électron puisse franchir la surface du métal.
2. On peut schématiser cela de la manière suivante :

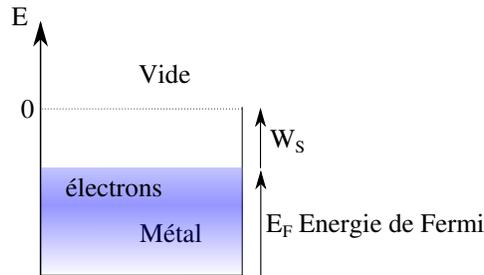


FIGURE 7 – Les électrons dans le métal. W_S est le travail de sortie. (exemples : pour le cuivre $W_S = 4.1 \text{ eV}$, pour l'argent $W_S = 4.7 \text{ eV}$ et pour le potassium $W_S = 2.15 \text{ eV}$).

On comprend alors qu'il faut fournir une quantité d'énergie minimale W_S aux électrons pour qu'ils arrivent en surface du métal. Comme l'énergie est celle du rayonnement qui arrive sur le métal, il est clair que l'effet photoélectrique n'aura lieu que si $h\nu > W_S$. Le seuil $\nu_S = W_S/h$ est ainsi expliqué.

Si l'énergie $h\nu$ du rayonnement est supérieure à l'énergie du seuil, l'excédent se retrouve sous forme d'énergie cinétique :

$$\frac{1}{2}mv^2 = h(\nu - \nu_S)$$

C'est la relation d'Einstein (1905).

2 Photon 1 : LE CORPS NOIR

2.1 Description du matériel

On dispose d'un banc d'optique sur lequel sont alignés :

1. une source lumineuse avec une alimentation,
2. une lentille,
3. un jeu de filtres interférentiels,
4. une cellule photo-émissive (on a le choix entre 2 types de cellules).
5. un générateur de tension d'anode,
6. un convertisseur courant-tension.

On dispose d'un ordinateur et d'un système d'acquisition de données.

2.1.1 La source lumineuse

Il s'agit d'une lampe quartz-iodure 12 V, 50 W à filament de tungstène. La vapeur d'iode forme avec la vapeur de tungstène un iodure qui ne peut pas se déposer sur le quartz (à 600 C) et se décompose sur le tungstène (à 2600 C) pour reformer du tungstène. L'ampoule ne noircit donc pas. On obtient une intensité lumineuse importante, combinée à une bonne durée de vie.

Le boîtier de la lampe est fixé, de manière rigide, en bout de banc ; il est muni de deux types de bornes :

1. des bornes de gros diamètre pour relier la lampe à l'alimentation (il faut pouvoir admettre un fort courant) ;
2. des bornes de petit diamètre pour mesurer la différence de potentiel aux bornes du filament.



2.1.2 L'alimentation de la source

Elle permet d'obtenir un courant continu maximum de 5A sous une tension réglable entre 0 et 12 volts.

Remarque : Avant de mettre cette alimentation sous tension, vérifier que le potentiomètre de réglage est au zéro.

2.1.3 La lentille

Elle est du type bi-convexe, en crown (verre dont le domaine de transparence s'étend de 0.34 à 2.5 μm) ; sa focale est $f = 150 mm$.

2.1.4 La cellule

Une cellule photoémissive est une ampoule à vide contenant deux électrodes :

1. une cathode (K), de grande surface, qui recoit le rayonnement électromagnétique et émet des électrons. Sa composition diffère en fonction du domaine de longueur d'onde désiré (photocathode) ;
2. une anode (A), le plus souvent sous forme d'un fil, destinée à recueillir les électrons.

Dans cette manipulation, on utilise une cellule RTC (ref. 90 CV) avec photocathode en Cs-Ag-O, dont le courant maximum permis est de $10 \mu A$. Cette cellule, dotée d'une bonne sensibilité est utilisée pour toutes les mesures sauf pour la détermination de la constante de Planck. Cette cellule est fixée sur un cavalier qui peut être enlevé du banc quand on ne l'utilise pas.

L'anode est constituée par un anneau de platine. Cette cellule, fixée sur un cavalier, doit être repoussée en bout de banc lorsqu'elle n'est pas utilisée (compte-tenu de sa fragilité elle **ne peut pas être enlevée du banc**).

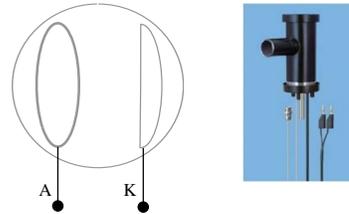


FIGURE 8 – Cellule photo-émisive (LEYBOLD).

Remarque : En l'absence de tout éclairage, ces cellules débitent un faible courant i_0 , appelé "courant d'obscurité". En cas de faible éclairage (ou de faible sensibilité de la cellule) ce courant parasite peut être du même ordre de grandeur que le courant à mesurer ; il faut alors le connaître pour pouvoir le soustraire de la mesure.

2.1.5 Le générateur de tension d'anode

C'est une alimentation qui permet d'obtenir deux formes de tension :

1. une tension continue, réglable entre 0 et 40 V (resp. 2 V) à l'aide d'un potentiomètre multitours.
2. une tension variable automatiquement de manière croissante (rampe) entre 0 et 40 V (resp. 2 V). Le domaine de tension est décrit linéairement en trois minutes environ.

La variation de la tension peut être démarrée (Départ), arrêtée (Arrêt) et ramenée à zéro (Zéro).

2.1.6 Le convertisseur courant-tension

Il permet d'obtenir sur sa sortie une tension de 1 volt pour des courants d'entrée variables entre $10 \mu A$ et $10 pA$.

Remarques :

1. cet appareil est du type flottant, c'est-à-dire que le blindage de l'entrée et le point bas de la sortie sont reliés à la masse de manière interne, mais pas à la Terre.

2. Un courant dont le sens est choisi positif lorsqu'il pénètre dans l'entrée est converti en une tension négative en sortie.
3. Pour des raisons de linéarité des fortes résistances utilisées, on utilisera toujours les sensibilités les plus faibles possibles de manière à mesurer en sortie des tensions de l'ordre du volt, en tout cas jamais supérieures à 10 volts. Sa précision est : 2 % de 10^{-5} à 10^{-7} A/V ; 5 % au-delà.
4. Par construction l'impédance d'entrée de cet appareil est quasi-nulle.

2.1.7 Acquisition de données

On dispose d'un système d'acquisition des données National Instruments et d'un ordinateur pour le traitement et l'analyse des données.

2.2 TECHNIQUE EXPERIMENTALE

2.2.1 Montage électrique

Le montage électrique est donné par la figure 10.

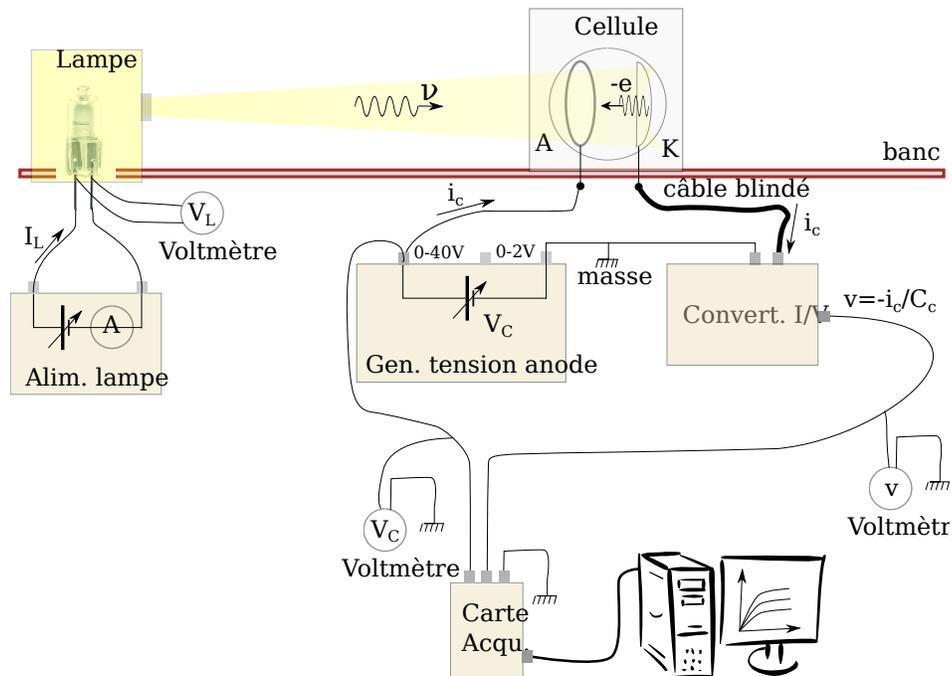


FIGURE 9 – Schéma électrique. C_c est le calibre du convertisseur.

2.2.2 Caractéristique courant-tension d'une cellule photoémissive

On se propose d'étudier, pour un flux lumineux donné, les variations du courant i_c traversant la cellule en fonction de la différence de potentiel V_c appliquée entre anode et cathode. Réalisez le montage de la figure 10 avec la cellule RTC.

On va effectuer cette expérience en lumière blanche non focalisée donc :

1. Enlevez la lentille.
2. Placez la cellule à une distance de 50 cm de la source.
3. Allumez la lampe et réglez la puissance à une valeur voisine de 50 W mais en aucun cas supérieure.
4. Connecter l'interface National Instruments et lancer le logiciel d'acquisition de données (NB : calibrez la tension V_c mesurée avec le logiciel d'acquisition).
5. Faites varier la tension de 0 à 30 volts à l'aide du potentiomètre en observant la caractéristique V_c vs $v = -i_c/C_c$ mesurée.
6. A l'aide de la tension V_c mesurée avec un multimètre, calibrez les valeurs numériques mesurées par la carte d'acquisition. Choisissez un temps d'échantillonnage tel d'avoir un nombre de données raisonnable (inférieure à 50 échantillons dans ce cas).
7. Ramenez V_c à zéro, puis faites l'acquisition de la caractéristique en utilisant la fonction "RAMPE".
8. Vous disposez d'un logiciel de tableur (gnumeric). Observez l'allure des caractéristiques mesurées et enregistrées.

Recommencez la même expérience, pour quatre autres valeurs de d supérieures à 50 cm (c'est à dire quatre autres valeurs du flux lumineux) sans changer les autres réglages. Eteignez les appareils. Notez sur l'enregistrement :

1. le calibre C_c du convertisseur ;
2. les distances d source-cellule.

Graduez les axes, x en volts et y en μA . Vous venez de tracer le réseau de caractéristiques de la cellule RTC sur lequel vous pouvez identifier deux régions de potentiel :

1. une région où i_c varie beaucoup avec V_c
2. une région où i_c varie très peu avec V_c : c'est le régime de saturation.

2.2.3 Impédance de la cellule

La cellule se comporte comme une résistance variable en fonction de V_c et du flux lumineux φ (résistance non-linéaire).

Tracez l'impédance $Z = V_c/i_c$ de la cellule (en $M\Omega$) en fonction de V_c pour la valeur du flux lumineux φ correspondant à $d = 50 \text{ cm}$.

Comment varie Z avec V_c ?
(la représentation des rectangles d'erreur est ici inutile).

Observez le réseau de caractéristiques et indiquez comment varie Z avec φ .

2.2.4 Mesure des flux lumineux avec une cellule

On sait que le flux lumineux φ , qui arrive sur un écran, est inversement proportionnel au carré de la distance d de la source à l'écran :

$$\varphi = \frac{A}{d^2}$$

φ est une puissance et s'exprime en watts ; A est une constante de proportionnalité.

Tracez la courbe :

$$\frac{1}{\sqrt{i_c}} = f(d)$$

dans le régime de saturation (par exemple pour $V_c \simeq 30 \text{ V}$).

Quelle est l'allure de cette courbe ?
Si vous trouvez une loi de la forme :

$$\frac{1}{\sqrt{i_c}} = a(d + d_0)$$

quelles sont alors la valeur et la signification du paramètre d_0 ?

En définitive, si on néglige d_0 , quelle est la relation qui lie i_c et φ ?

Aurait-on pu réaliser cette expérience en conservant la lentille entre la cellule et la lampe ? Justifier votre réponse.

Déterminer la sensibilité de la cellule : $\eta = i_c/P_r$ avec i_c dans le régime de saturation et $P_r =$ puissance lumineuse reçue (puissance électrique de la lampe corrigée par l'angle solide sous lequel la lampe voit la cellule).

2.3 Le rayonnement du corps noir

Dans cette partie, on se propose d'étudier et de retrouver (ou de vérifier) les lois du rayonnement du corps noir.

2.3.1 Résistance à froid et mesure des faibles résistances

Le filament de tungstène de la lampe possède une résistance qui varie entre quelques dixièmes d'Ohm (à froid) et quelques Ohms (à chaud). La mesure d'une telle résistance est difficile à cause des résistances de contact (culot de la lampe) qui sont quelquefois du même ordre de grandeur que la résistance cherchée.

Si R est la résistance cherchée : $R = V_L/I_L$ où I_L est le courant dans le filament et V_L la d.d.p. aux bornes du filament.

La mesure de V_L peut être faussée par les résistances de contact ; on peut toutefois s'affranchir de cet inconvénient en branchant le voltmètre aussi près que possible du filament (bornes de tension petites).

2.3.2 Détermination de la température d'un filament à partir de sa résistance

La loi de variation de la résistance R avec la température (en $^{\circ}C$) est donnée par :

$$R = R_0(1 + a\theta + b\theta^2)$$

où R_0 est la résistance mesurée à $\theta = 0$ $^{\circ}C$, $a = 5.238.10^{-3}$ $^{\circ}C^{-1}$ et $b = 7.10^{-7}$ $^{\circ}C^{-2}$.

R_0 n'est pas accessible par l'expérience, mais on peut mesurer R à la température ambiante et en déduire R_0 à l'aide de la formule (en négligeant le terme en $b\theta^2$ devant $a\theta$ dans ce cas). Pour tout $\theta > 100$ $^{\circ}C$, on doit utiliser la solution générale de l'équation :

$$\theta = \frac{-a + \sqrt{a^2 - 4b(1 - R/R_0)}}{2b}.$$

Mesure de la résistance à froid du filament :

1. La lampe doit être à la température ambiante.
2. Déterminez la résistance à froid R du filament en mesurant quelques couples (I_L, V_L) pour I_L très faible (< 100 mA).
3. En déduire la résistance R_0 du filament à 0 $^{\circ}C$.

2.3.3 Température du filament et intensité lumineuse émise

Réalisez le même montage mais avec la cellule RTC, utilisée pour mesurer un flux lumineux ($V_c > 0$) et un voltmètre électronique branché à la sortie du convertisseur.

1. Placez la cellule à environ 60 cm de la source ; choisissez un filtre (jaune $n.4$ ou rouge $n.5$) et placez-le contre la cellule.
Notez λ_M sur le compte-rendu.
2. A l'aide de la lentille, focalisez la lumière sur le filtre.

3. Appliquez à la cellule une d.d.p. V_c convenable pour mesurer un flux lumineux.
4. Mesurez-la avec l'un des voltmètres et notez sa valeur.

Pour une puissance électrique $P_L = V_L I_L$ envoyée dans la lampe on va mesurer, quand il existe, le flux lumineux reçu par la cellule (mesure de v à la sortie du convertisseur).

De la mesure de I_L et V_L on va déduire la résistance R de la lampe à chaud et la température T en Kelvin du filament est $T = \theta + 273.15$.

L'ensemble de ces mesures et calculs sera regroupé dans le tableau suivant :

V_L	I_L	P_L	v (V)	C_c (A/V)	i_c	$i_c - i_0$	R/R_0	T (K)	$1/T$ (K^{-1})

Relevez 15 points en changeant V_L .
 Détaillez le calcul de l'erreur sur T .

Commencez les mesures lampe à fond et opérez en faisant décroître la puissance électrique. Avant chaque mesure, laissez la température du filament se stabiliser (I_L et V_L ne doivent pas dériver avec le temps).

Tant que la lampe rayonne i_c varie ; en dessous on mesure le courant d'obscurité i_0 .

Continuez à faire décroître la puissance jusqu'à I_L et V_L nuls ; à la limite (et si on attend que la température décroisse) on doit retrouver la valeur de la résistance à la température ambiante.

2.3.4 Loi de Stéfan

Tracez, en Log-Log, la courbe $P_L = f(T)$.
 Pourquoi peut-on dire que P_L est une loi "puissance" ?

$$P_L = a_0 T^n$$

Déterminez la pente de cette courbe ; déduisez-en n (et sa précision). Trouvez graphiquement a_0 (et sa précision).

Comparez avec la loi de Stéfan (formule 12) en admettant, bien sûr, que toute l'énergie électrique est transformée en rayonnement.

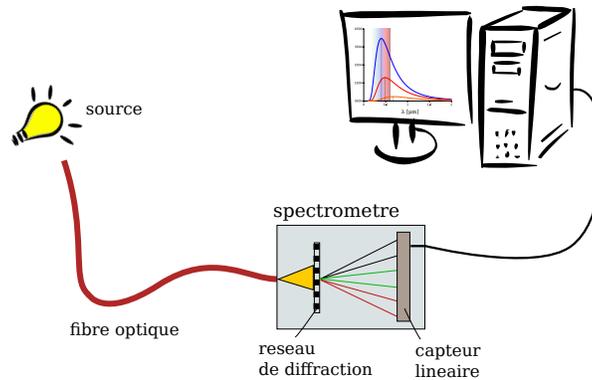


FIGURE 10 – Le spectrometre.

Expliquez la différence entre a_0 et le σ de la loi de Stefan.

2.3.5 Formule de Planck; formule de Wien

Considérons la formule de Planck donnant $du/d\lambda$. L'exposant de l'exponentielle est de l'ordre de 10 à 20 pour nos mesures; on peut donc négliger 1 devant l'exponentielle.

On aboutit à la formule de Wien :

$$\frac{du}{d\lambda} \simeq \frac{8\pi h c}{\lambda^5} e^{-\frac{hc}{\lambda k_B T}}$$

Sachant que $du/d\lambda$ est proportionnel à $i_c - i_0$ vérifiez cette loi en traçant $i_c - i_0 = f(1/T)$ en coordonnées semi-logarithmiques.

Conclusion : Trouvez la pente de la fonction tracée et déduisez-en la constante de Boltzmann k_B et sa précision (utilisez la vraie valeur de h dans les calculs).

2.4 Le spectre, messages de la lumiere

La spectroscopie est l'étude des rayonnements électromagnétiques émis, absorbés ou diffusés par la matière. L'analyse des rayonnements en leurs différentes fréquences s'effectue à l'aide de spectromètres : elle permet d'obtenir leurs spectres électromagnétiques.

2.4.1 Expérience

On dispose d'un spectromètre (USB650 Red Tide, plage longueur d'onde $\lambda = 350 - 1000 \text{ nm}$). Branchez le câble USB du spectromètre à l'ordinateur et utilisez le logiciel Overture pour observer le spectre d'émission d'une source.

Observez les spectres d'émission des sources suivantes :

1. lampe halogène (puissance électrique de l'ordre de $\sim 40\text{ W}$)
2. lampe du plafonnier, tube fluorescent
3. lumière du soleil diffusée par l'atmosphère

Enregistrez et tracez les spectres observés.

2.4.2 Calculs et observations

Décrivez et motivez les différences observées entre les trois spectres :

1. De quel type est le spectre de la lumière émise par la lampe halogène ? et par le tube fluorescent ?
2. Quelles entités chimiques sont présentes dans le tube fluorescent ?
3. De quel type est le spectre du rayonnement solaire terrestre ?
4. Estimez, si possible, la température de la surface du Soleil.

Ne	439	583	618	640	660	..
Ar	416	420	435	476	487	..
Kr	466	474	476	557	587	..
Hg	405	436	546	577	615	..
H	410	434	486	656
O ₂	628	687	759

Ex. de longueurs d'onde (en nm) des raies d'émission de différents gaz.

3 Photon 2 : L'EFFET PHOTOELECTRIQUE

L'objectif de cette expérience est de vérifier l'effet photoélectrique et de déterminer la constante de Planck h .

3.1 Description du matériel

3.1.1 La source lumineuse

La source lumineuse est une lampe à mercure à haute pression. La lampe est branchée à sa alimentation. Une fois allumée, laissez la source chauffer pendant environ 10 minutes.

ATTENTION : la source fonctionne à une température de $\sim 200\text{ C}$, **ne pas toucher la boîte de protection de la source.**

ATTENTION : la source à mercure émet de la lumière dans l'UV, cette longueur d'onde est très dangereuse pour l'œil. **Ne jamais observer directement la source, utiliser les lunettes de protection UV.**

3.1.2 Les lentilles

Vous disposez d'une lentille bi-convexe, en crown de focale $f = 100 \text{ mm}$.

3.1.3 Ouverture circulaire : iris

Une ouverture circulaire variable, ou iris permet de contrôler l'intensité lumineuse incidente sur la cellule photoélectrique.

3.1.4 Les filtres interférentiels

Ils sont du type multi-couches et permettent d'obtenir une lumière presque monochromatique. Le facteur de transmission d'un tel filtre (énergie transmise/énergie incidente) a l'allure de la figure 8. Les caractéristiques des 4 filtres utilisés sont à déterminer en utilisant le spectromètre.

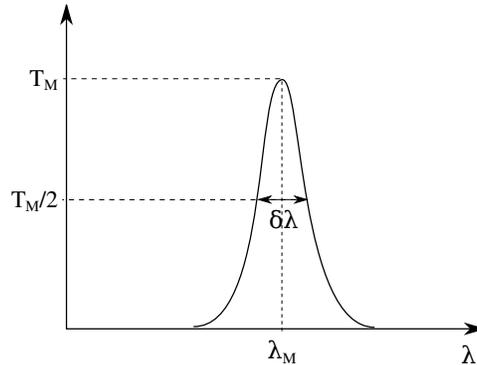


FIGURE 11 – Transmission d'un filtre.

3.1.5 La cellule photoélectrique

Une cellule photoémissive (voir expérience corps noir) du type LEYBOLD.

3.1.6 Amplificateur

Amplificateur opérationnel de gain ~ 1 . L'entrée de l'amplificateur est liée à un condensateur de capacité $C = 100 \text{ pF}$. La sortie donne directement la valeur de la tension où le condensateur est chargé.

Le rôle de l'amplificateur est d'adapter les impédances entre le condensateur C et un éventuel appareil de mesure de tension (par exemple un voltmètre).

3.2 Principe de l'expérience

Les électrons peuvent être libérés de la surface de certains métaux, en les irradiant avec de la lumière d'une longueur d'onde suffisamment courte (effet

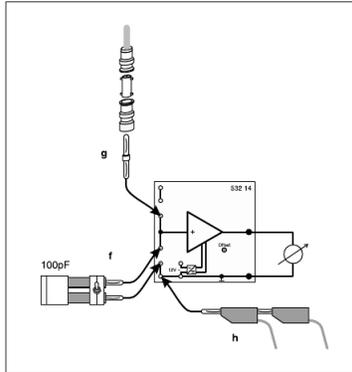


FIGURE 12 – Amplificateur.

photoélectrique). Leur énergie dépend de la fréquence ν de la lumière incidente , mais pas de l'intensité ; l'intensité détermine uniquement le nombre d'électrons libérés. Chaque photoélectron est libéré par un photon et quitte l'atome avec l'énergie cinétique

$$E_c = h\nu - W_S.$$

Nous pouvons déterminer la constante de Planck h en exposant une cellule

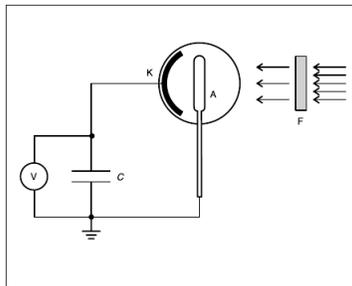


FIGURE 13 – Principe de l'expérience.

photoélectrique à une lumière monochromatique et mesurer l'énergie E_c cinétique des électrons éjectés.

La figure 13 montre une représentation schématique d'une telle expérience. La lumière traverse une anode annulaire , un fil de platinium, et arrive sur une surface de potassium. Grâce à son faible travail de sortie W_S les électrons de valence des métaux alcalins sont faiblement liés.

Quelques-uns des photoélectrons éjectés voyagent à l'anode où ils sont enregistrés sous la forme d'un courant i photoélectrique. Si les photoélectrons sont éjectés contre un potentiel négatif qui est progressivement augmenté, le photocourant diminue aussi progressivement. La tension à la quelle le photo-courant

s'annule est appelée la tension limite U_0 . À ce niveau même les électrons avec les liaisons les plus faibles ne peuvent plus vaincre la tension d'anode.

Dans cette expérience, la tension d'anode est générée en utilisant un condensateur qui est chargé par les électrons incidents jusqu'à la tension U_0 (voir Fig.13). Nous pouvons utiliser cette tension limite U_0 pour calculer l'énergie cinétique de ces électrons faiblement liés :

$$eU_0 = h\nu - W.$$

En mesurant U_0 pour différents longueurs d'onde on peut déterminer la constante de Planck h .

3.3 TECHNIQUE EXPERIMENTALE

La fig. 14 montre le montage expérimental.

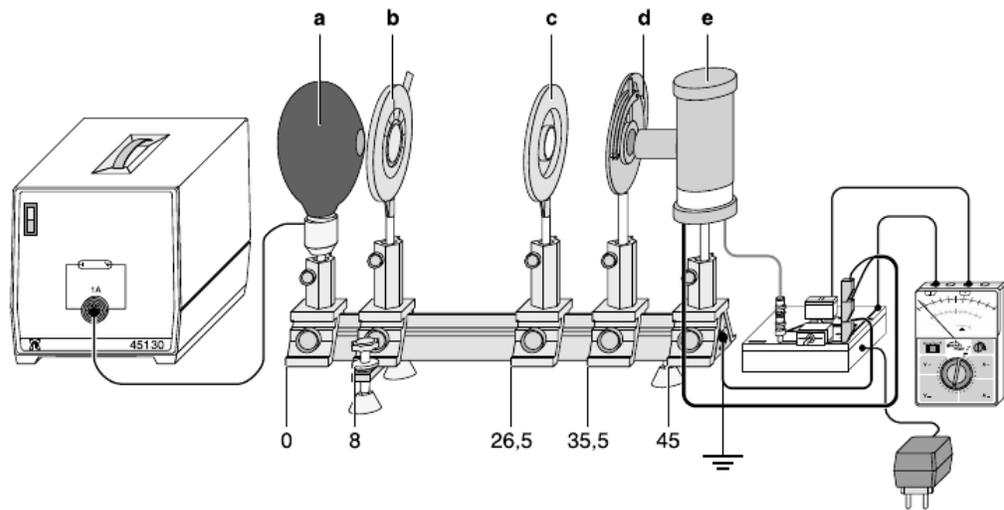


FIGURE 14 – Montage expérimentale : a) lampe à mercure, b) iris, c) lentille, d) filtres interférentiels, e) cellule photo-électrique. Les numéros sont les positions des éléments en *cm*.

Remarque : La lampe à mercure à haute pression atteint son intensité maximale après une période d'échauffement de ~ 10 minutes. Allumez la lampe à mercure lorsque vous commencez la mise en place de l'expérience.

Realisez le montage expérimental.

1. Dans un premier temps remplacez la phot cellule par le spectromètre, observez et effectuez des acquisitions du spectre d'émission de la lampe à mercure sans et avec les filtres interférentiels.

Comparez les intensités : les raies ont elles la même intensité ?
 Est-ce que une différence d'intensité pourrait fausser la mesure de h ?

Mesurez la longueur d'onde λ_M et la largeur de bande $\Delta\lambda$ pour les quatres raies après les filtres.

2. Remplacez le spectromètre par la cellule photoélectrique et réalisez l'alignement de l'expérience :
 - (a) La lumière de la lampe devrait maintenant produire une forte tache lumineuse sur le revêtement noir (la zone sensible) de la photocellule. La lumière ne doit pas tomber sur l'anneau métallique ni sur la une partie de la zone noire revêtue à laquelle les contacts sont attachées. Les zones de bord ne doivent pas être éclairées non plus. Effectuer la procédure suivante :
 - i. Variez la hauteur du diaphragme et de la lentille de manière à avoir la tache lumineuse sur la zone noire de la cellule photoélectrique.
 - ii. En déplaçant la lentille ajustez la taille de la tache lumineuse.
 - (b) Placez le couvercle sur la cellule photoélectrique.
3. Branchez les deux câbles noirs de la photocellule à la masse de l'amplificateur et le câble BNC à l'entrée de l'amplificateur.
4. Connectez un multimètre à la sortie de l'amplificateur.
5. Connectez la table optique à la masse de l'amplificateur et connectez cette borne à la terre externe de la prise de distribution.

3.3.1 Mesures et incertitudes

1. Branchez l'amplificateur à son alimentateur et allumez le multimètre.
2. Tournez le barillet des filtres interferentiels pour avoir une lumière jaune.
3. Déchargez le condensateur avec l'interrupteur.
4. Démarrez la mesure en relâchant l'interrupteur ; attendre environ ~ 1 minute, jusqu'à avoir le condensateur chargé à U_0 .
5. répétez la procédure de mesure pour les trois autres longueurs d'onde.

L'ensemble de ces mesures sera regroupé dans le tableau suivant :

<i>Couleur</i>	λ_M (nm)	$\Delta\lambda$ (nm)	ν (THz)	$\Delta\nu$ (THz)	U_0 (V)	ΔU_0 (V)
jaune						
vert						
bleu						
violet						

Variez l'intensité de la lumière incidente à la cellule en utilisant le diaphragme et mesurez la tension U_0 .

Le potentiel U_0 change-t-il ? et pourquoi ?

Eteignez la lampe à la fin des mesures.

3.3.2 La constante de Planck

Quel graphe faut-il tracer pour obtenir une droite dont la mesure de la pente permet de déduire la constante de Planck h ?

1. Tracez ce graphe.
2. Trouvez h et sa précision ; comparez à la valeur théorique.
3. Le graphe permet de trouver le travail de sortie W_s du potassium ($W_s \simeq 2.15 \text{ eV}$) constituant la photocathode.
Déterminez W_s en eV et sa précision.

La mauvaise valeur trouvée s'explique par deux arguments :

1. le potassium, métal volatil, s'évapore de la cathode et se dépose sur l'anode. Il provoque alors un effet photo-électrique sur l'anode.
2. Il y a une différence de potentiel de contact entre les métaux constituant l'anode (Pt) et la cathode dont on n'a pas tenu compte dans les calculs.