

Détermination de la constante de Planck

Sélection de longueurs d'onde avec des filtres d'interférence sur le banc d'optique

Objectifs expérimentaux

- Mise en évidence de l'effet photo-électrique.
- Mesure de l'énergie cinétique des électrons en fonction de la fréquence de la lumière.
- Détermination de la constante de Planck h .
- Démonstration du fait que l'énergie cinétique des électrons ne dépend pas de l'intensité de la lumière.

Notions de base

Par irradiation avec de la lumière à ondes assez courtes, des électrons peuvent être éjectés de la surface de certains métaux (effet photo-électrique). Leur énergie dépend ici uniquement de la fréquence ν de la lumière incidente et non de son intensité; celle-ci ne détermine que le nombre d'électrons éjectés. Cet état de fait est en contradiction avec la physique classique et a été interprété pour la première fois en 1905 par Albert Einstein. Il supposa que la lumière est constituée d'un flux de particules, lesdits photons, dont l'énergie E est proportionnelle à la fréquence:

$$E = h \cdot \nu \quad (I)$$

Le facteur de proportionnalité h est appelé constante de Planck et a la valeur d'une constante naturelle. Dans cette interprétation de la lumière, chaque photoélectron est libéré d'un photon et quitte l'atome avec l'énergie cinétique

$$E_{\text{cin}} = h \cdot \nu - W_K \quad (II),$$

W_K représentant ici le travail d'extraction des électrons. Il est fonction du matériau irradié.

La constante de Planck h peut être déterminée en faisant incider de la lumière monochromatique sur une cellule photo-électrique, donc de la lumière d'une certaine longueur d'onde et en mesurant l'énergie cinétique E_{cin} des électrons qui s'échappent.

La fig. 1 montre sous forme schématisée le montage pour une telle expérience. La lumière incide à travers une anode annulaire, ici un fil de platine, sur une couche de potassium. Le potassium convient bien comme matériau pour la cathode en raison de son faible travail d'extraction – les électrons de valence ne sont que faiblement liés dans les métaux alcalins.

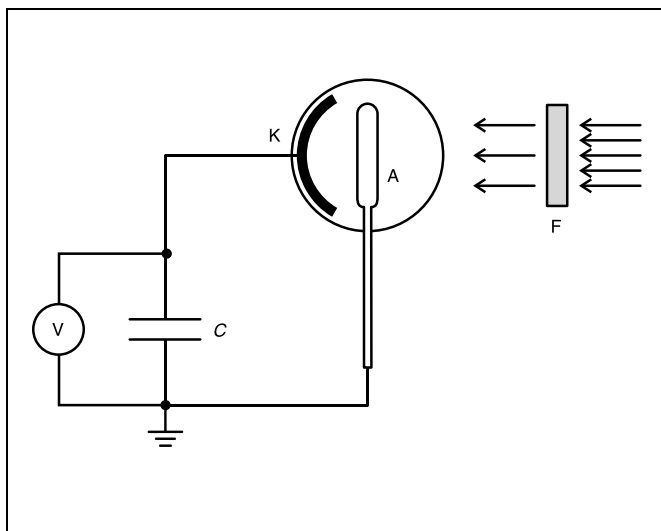
Certains des photoélectrons éjectés parviennent à l'anode et sont décelés sous forme de courant photo-électrique I . Si on laisse les photoélectrons aller à l'encontre d'une tension négative augmentant successivement, le courant photo-électrique diminue continuellement. La tension pour laquelle le courant photo-électrique devient juste zéro est caractérisée de tension limite U_0 . Les électrons les plus faiblement liés, soit ceux avec l'énergie d'extraction la plus faible W_K et donc la plus grande énergie cinétique, ne vont plus à l'encontre de la tension anodique. Dans cette expérience, la tension anodique est générée par l'intermédiaire d'un condensateur que les électrons incidents chargent jusqu'à la tension limite U_0 (cf. fig. 1). Il est possible de déterminer l'énergie cinétique de ces électrons faiblement liés à partir de la tension limite U_0 :

$$e \cdot U_0 = h \cdot \nu - W \quad (III)$$

e : charge élémentaire

Ici, W n'est plus le travail d'extraction W_K de la cathode étant donné que le potentiel de contact entre la cathode et l'anode intervient également dans le bilan énergétique.

Fig. 1 Schématisation du montage expérimental pour la mesure de la constante de Planck h à l'aide de l'effet photo-électrique. De la lumière monochromatique (générée par le filtre de longueur d'onde F) incide sur la cathode K d'une cellule photo-électrique. Les photoélectrons ainsi libérés parviennent à l'anode A et chargent le condensateur C jusqu'à la tension limite U_0 .



Matériel

1 cellule photo-électrique pour la détermination de h	558 77
1 appareil de base pour la cellule photo-électrique	558 791
1 lampe à vapeur de mercure	451 15
1 douille E 27 à fiche multiple	451 19
1 bobine de self universelle 230 V, 50 Hz	451 30
1 lentille $f = + 100$ mm	460 03
1 diaphragme à iris	460 26
1 roue à filtres avec diaphragme à iris	558 792
1 filtre d'interférence 578 nm	468 401
1 filtre d'interférence 546 nm	468 402
1 filtre d'interférence 436 nm	468 403
1 filtre d'interférence 405 nm	468 404
1 amplificateur électromètre	532 14
1 adaptateur secteur enfichable 230 V/12 V_/20 W	562 791
1 condensateur STE, 100 pF, 630 V	578 22
1 bouton-poussoir (contacteur) STE, unipolaire	579 10
1 voltmètre, CC, par ex. multimètre	531 100
1 banc d'optique à profil normalisé, 1 m	460 32
ou	
1 rail complémentaire 0,5 m	460 34
2 cavaliers, $H = 90$ mm/ $l = 50$ mm	460 352
3 cavaliers, $H = 120$ mm/ $l = 50$ mm	460 357
2 fiches de fixation	590 011
1 raccord droit BNC	501 10
1 adaptateur BNC/4 mm, unipolaire	501 09
1 accouplement enfichable	340 89
1 prise de distribution	502 04
Câbles d'expérience	

Les mesures sont réalisées pour différentes longueurs d'onde λ et différentes fréquences

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad (\text{IV})$$

c : vitesse de la lumière dans le vide

de la lumière rayonnée. Si la fréquence de la lumière incidente augmente de $\Delta\nu$, l'énergie des électrons augmente de $h \cdot \Delta\nu$. La tension limite doit être augmentée de ΔU_0 pour compenser à nouveau l'augmentation du courant photo-électrique.

Conseil de sécurité

La lampe à vapeur de mercure émet aussi de la lumière dans l'ultraviolet et risque donc d'abîmer les yeux.

- Ne pas fixer le regard sur le faisceau lumineux direct ou réfléchi de la lampe à vapeur de mercure.
- Lire consciencieusement le mode d'emploi de la lampe à vapeur de mercure et s'en tenir aux indications données.

Si on rapporte la tension limite $U_0(\nu)$ en fonction de ν , on obtient conformément à (III) une droite avec la pente:

$$\frac{\Delta U_0}{\Delta \nu} = \frac{h}{e} \quad (\text{V})$$

Pour une charge élémentaire e connue, on obtient ainsi la constante de Planck h .

Pour la sélection de la longueur d'onde, on utilise dans l'expérience des filtres d'interférence à bande étroite qui sélectionne à chaque fois exactement une raie parmi la lumière spectrale d'une lampe à vapeur de mercure. L'indication de la longueur d'onde sur le filtre se réfère à la longueur d'onde de la raie de mercure transmise.

Montage**Montage optique:**

N.B.: La lampe à vapeur de mercure atteint sa pleine intensité seulement après avoir chauffé pendant environ 10 min.:

Mettre la lampe à vapeur de mercure en service tout au début de l'expérience pour ainsi pouvoir commencer à réaliser les mesures tout de suite après avoir terminé le montage.

Le montage expérimental est représenté sur la fig. 2, la position du bord gauche du cavalier est indiquée ici en cm.

- Brancher la bobine de self universelle au réseau par l'intermédiaire de la prise de distribution.
- Monter la lampe à vapeur de mercure à l'aide d'un cavalier ($H = 90$ mm) en respectant la position indiquée, la brancher à la bobine de self universelle et la mettre en marche.
- Fixer la cellule photo-électrique à l'aide d'un cavalier ($H = 90$ mm) tout en respectant la position indiquée; enlever le capuchon et orienter la cellule photo-électrique de manière à ce que sa surface noire soit tournée vers la lampe à vapeur de mercure.
- Monter le diaphragme à iris sur le banc d'optique à l'aide d'un cavalier ($H = 120$ mm) tout en respectant la position indiquée.
- Monter la lentille à l'aide d'un cavalier ($H = 120$ mm) tout en respectant la position indiquée; régler la hauteur de façon à ce que le centre de la lentille soit à la même hauteur que le centre du diaphragme à iris.

La lumière de la lampe à vapeur de mercure doit être représentée maintenant avec netteté sur la partie noircie – le domaine sensible – de la cellule photo-électrique. La lumière ne doit incider ni sur l'anneau métallique, ni sur l'endroit du domaine noirci où sont fixés les contacts. L'éclairage des bords est aussi à éviter.

Pour cela, procéder comme suit et si besoin est, recommencer aussi souvent que nécessaire, jusqu'à ce que l'image obtenue soit optimisée:

- Modifier la hauteur du diaphragme à iris et de la lentille de manière à ce que le spot lumineux incide sur la zone noircie de la cellule photo-électrique tout en faisant toujours attention à ce que le centre de la lentille reste à la même hauteur que le centre du diaphragme à iris; éventuellement aussi modifier la hauteur de la cellule photo-électrique et son inclinaison (avec les vis en-dessous du socle).
- Régler la taille du spot lumineux à l'aide du diaphragme à iris de manière à ce que la plus grande partie de la zone noircie de la cellule photo-électrique soit éclairée, mais pas les bords, ni la bague métallique, ni les contacts sur la couche noircie.
- Éventuellement régler la netteté du spot lumineux en déplaçant la lentille sur le banc d'optique.

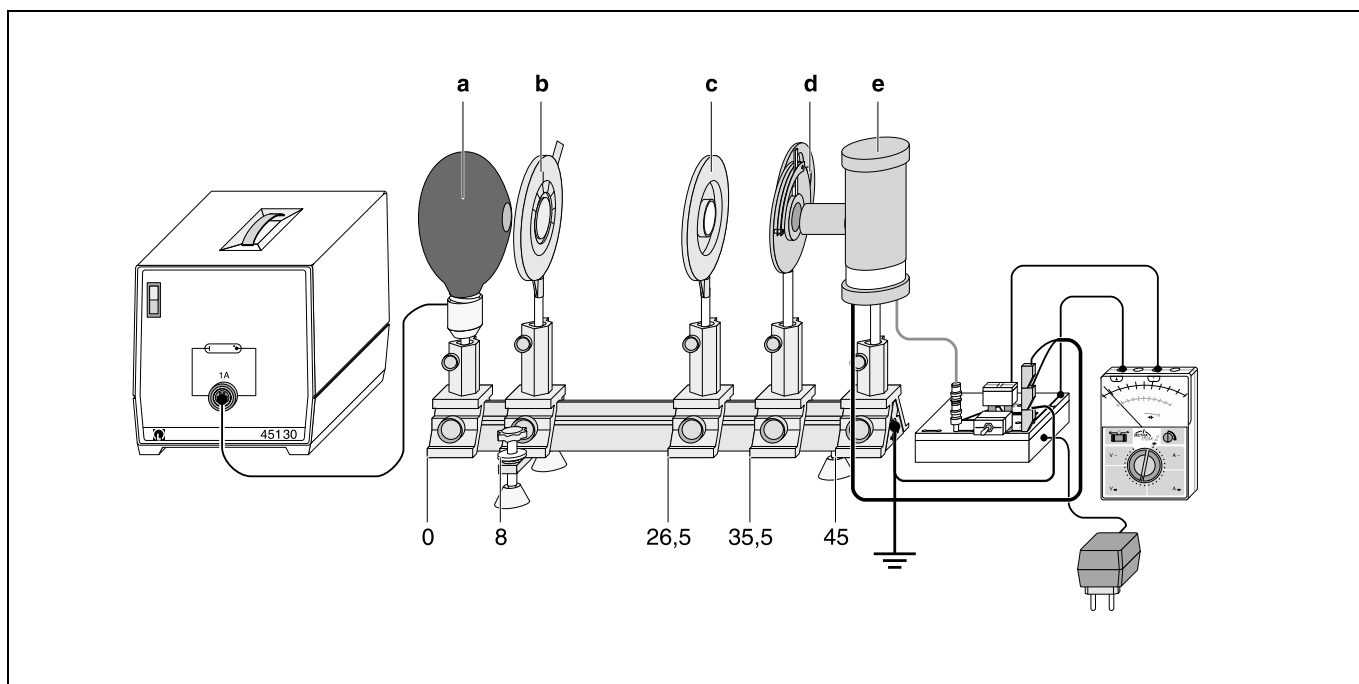


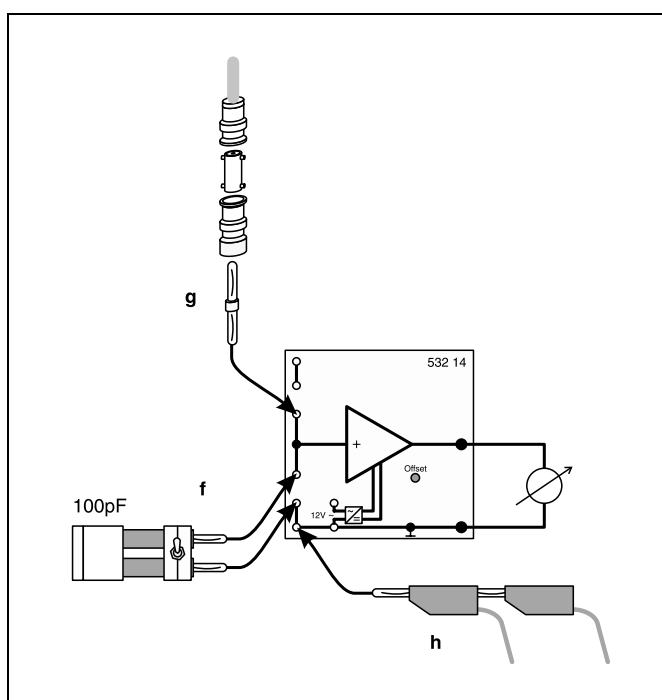
Fig. 2 Montage expérimental sur le banc d'optique avec indication du positionnement en cm pour le bord gauche du cavalier.

- a Lampe à vapeur de mercure
- b Diaphragme à iris
- c Lentille, $f = 100$ mm
- d Roue à filtres avec filtres d'interférence
- e Cellule photo-électrique

N.B. : Une fois ces ajustages réalisés, il faut les laisser tels quels et ne plus les modifier.

- Mettre le capuchon sur la cellule photo-électrique.
- A l'aide d'un cavalier ($H = 120$ mm), positionner la roue à filtres avec diaphragme à iris juste devant la cellule photo-électrique sur le banc d'optique; relier le diaphragme à iris de la roue à filtres avec le capuchon de la cellule photo-électrique afin d'empêcher la pénétration de lumière diffuse dans la cellule photo-électrique.

Fig. 3 Réalisation du circuit de l'amplificateur électromètre pour la mesure de la tension limite U_0 .



Montage électrique:

Les photoélectrons qui incident sur la bague métallique de la cellule photo-électrique chargent un condensateur et génèrent ainsi la tension limite U_0 nécessaire pour la détermination de l'énergie cinétique. La tension au condensateur se mesure avec l'amplificateur électromètre.

Le circuit de l'amplificateur électromètre est réalisé ainsi qu'il lustré sur la fig. 3:

- Enfiler les fiches de fixation (f), raccorder le condensateur 100 pF et le bouton-poussoir.
- Enfiler l'accouplement enfichable (g), raccorder l'adaptateur BNC/4 mm et le raccord droit BNC et relier l'ensemble à la cellule photo-électrique avec le câble blindé gris.
- Brancher les deux câbles noirs (h) de la cellule photo-électrique au raccord de mise à la masse de l'amplificateur électromètre.
- Brancher le multimètre à la sortie de l'amplificateur électromètre.

En outre:

- Pour la mesure de la tension (12 V) de l'amplificateur électromètre, brancher l'adaptateur secteur enfichable et procéder au raccordement au réseau par le biais de la prise de distribution.
- Relier le banc d'optique (éventuellement aussi la tige de l'appareil de base pour la cellule photo-électrique) au raccord de mise à la masse de l'amplificateur électromètre puis connecter ce dernier au raccord externe de mise à la terre de la prise de distribution.

Réalisation

N.B.:

Un dépôt de potassium issu de la couche photosensible de la cathode sur l'anode annulaire risque de susciter un courant électronique perturbateur:

Si besoin est, procéder au nettoyage de l'anode annulaire en la faisant chauffer ainsi que décrit dans le mode d'emploi de la cellule photo-électrique.

Des impuretés sur la cellule photo-électrique peuvent occasionner des courants superficiels entre l'anode et la cathode et affecter ainsi la mesure de la tension limite U_0 .

Nettoyer la cellule photo-électrique avec de l'alcool.

La tension au condensateur peut être influencée par des effets d'influence:

Eviter de bouger pendant la mesure.

Il n'est pas nécessaire d'obscurcir la salle; les résultats des mesures ne sont pas faussés par la lumière environnante.

- Mettre le multimètre en marche et régler le sélecteur de la plage de mesure sur 1 V de tension continue.
- Tourner le filtre d'interférence pour la lumière jaune ($\lambda_{\text{Hg}} = 578 \text{ nm}$) pour le placer dans la marche des rayons.
- Décharger le condensateur; pour ce faire, maintenir le bouton-poussoir enfoncé jusqu'à ce que le multimètre affiche 0 V.
- Lancer la mesure en relâchant le bouton-poussoir, attendre 30 s à 1 min jusqu'à ce que le condensateur se soit chargé jusqu'à la tension limite U_0 . Noter la valeur mesurée pour U_0 .
- Tourner le filtre d'interférence pour la lumière verte ($\lambda_{\text{Hg}} = 546 \text{ nm}$) pour le placer dans la marche des rayons et recommencer la mesure.
- Étendre la plage de mesure à 3 V puis recommencer la mesure avec les filtres d'interférence bleu ($\lambda_{\text{Hg}} = 436 \text{ nm}$) et violet ($\lambda_{\text{Hg}} = 405 \text{ nm}$).
- Faire varier l'intensité de la lumière qui incide sur la cellule photo-électrique avec le diaphragme à iris de la roue à filtres et déterminer à chaque fois la tension limite U_0 .

N.B.: Si le diaphragme à iris est trop fermé, l'éclairage régulier du spot lumineux sur la cathode peut éventuellement changer. Du reste, les courants de fuite jouent un rôle de plus en plus grand.

Exploitation

La fig. 4 montre la tension limite U_0 en fonction de la fréquence ν . Les points de mesure tracés sont en bonne approximation sur une droite.

Une modélisation de la courbe pour les trois premiers points de mesure donne pour la pente de la droite la valeur

$$\frac{\Delta U_0}{\Delta \nu} = 0,38 \cdot 10^{-14} \text{Vs}$$

D'après (V), on a avec $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As}$ pour la constante de Planck

$$h = 6,1 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

Valeur littéraire: $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$.

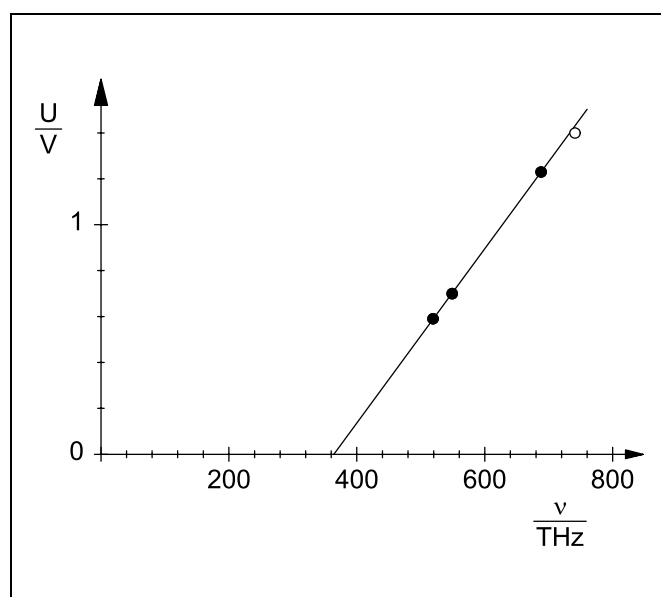


Fig. 4 Tension limite U_0 en fonction de la fréquence ν

Exemple de mesure

Tab. 1: Tension limite U_0 en fonction de la longueur d'onde λ et de la fréquence ν .

Couleur	$\frac{\lambda}{\text{nm}}$	$\frac{\nu}{\text{THz}}$	$\frac{U_0}{\text{V}}$
jaune	578	519	0,59
vert	546	549	0,70
bleu	436	688	1,23
violet	405	741	1,40

Résultat

Dans le cas de l'effet photo-électrique, l'énergie cinétique E_{cin} des électrons éjectés dépend de la fréquence et pas de l'intensité de la lumière rayonnée.

La constante de Planck h peut être déterminée par la mesure de la tension limite U_0 , au-delà de laquelle les électrons ne peuvent plus sortir, en fonction de la fréquence ν .