

Expérience de Franck-Hertz avec le mercure

Tracé avec l'oscilloscope,
avec l'enregistreur XY ou point par point

Objectifs expérimentaux

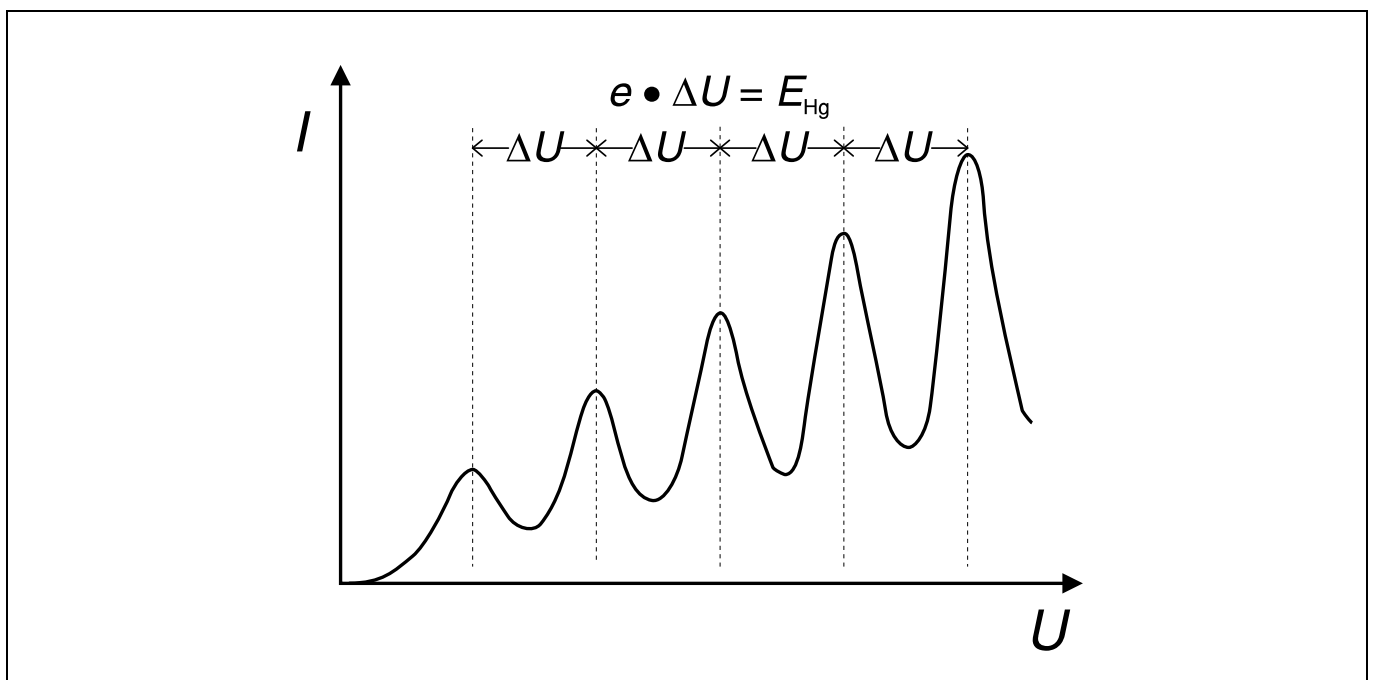
- Tracé d'une courbe de Franck-Hertz pour le mercure
- Mesure de la libération d'énergie discontinue d'électrons libres en cas de choc inélastique
- Interprétation du résultat de mesure sous forme d'absorption d'énergie discrète d'atomes de mercure

Principes de base

En 1914, *James Franck* et *Gustav Hertz* ont fait un compte-rendu sur la perte d'énergie progressive suscitée au passage des électrons dans de la vapeur de mercure et sur l'émission de la raie ultraviolette ($\lambda = 254 \text{ nm}$) du mercure qui lui est subordonnée. Quelques mois plus tard, *Niels Bohr* a reconnu dans cette étude une preuve pour le modèle d'atome mis au point par lui-même. L'expérience de Franck-Hertz est donc une expérience classique pour la confirmation de la théorie des quanta.

Un tube en verre dans lequel il a été préalablement fait le vide contient des atomes de mercure avec une pression de vapeur d'env. 15 hPa, maintenue constante par régulation de la température. Il est étudié la perte d'énergie d'électrons libres par diffusion inélastique, donc par l'excitation par choc d'atomes de mercure.

Représentation schématique du courant électronique qui circule vers le collecteur en fonction de la tension d'accélération dans le cas de l'expérience de Franck-Hertz avec le mercure



Matériel

| | |
|---|---------|
| 1 tube de Franck-Hertz au mercure | 555 85 |
| 1 douille de raccordement pour le tube de Franck-Hertz 555 85 avec prise multiple | 555 861 |
| 1 four électrique, 220 V | 555 81 |
| 1 alimentation pour tube de Franck-Hertz | 555 88 |
| 1 sonde de température NiCr-Ni | 666 193 |

Recommandé pour l'optimisation de la courbe de Franck-Hertz:

| | |
|--|---------|
| 1 oscilloscope à deux canaux 303 | 575 211 |
| 2 câbles de mesure BNC/4 mm | 575 24 |

Recommandé pour le tracé de la courbe de Franck-Hertz:

| | |
|---------------------------------------|---------|
| 1 enregistreur XY-Yt SR 720 | 575 663 |
|---------------------------------------|---------|

Câbles d'expérience

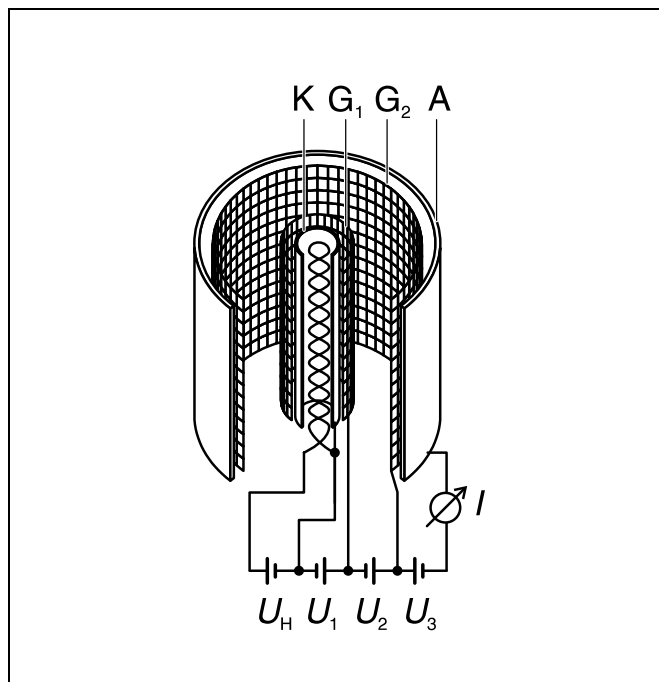


Fig. 1: Représentation schématique du tube de Franck-Hertz au mercure

Le tube en verre comprend un système cylindrique, symétrique de quatre électrodes (voir fig. 1). La cathode K est entourée à une distance de quelques dixièmes de millimètre d'une électrode de commande G_1 en forme de grille, un peu plus loin d'une grille d'accélération G_2 et à l'extérieur d'une électrode collectrice A. Le chauffage de la cathode est indirect afin d'éviter une différence de potentiel le long de K.

Des électrons s'échappent de la cathode chaude et forment un nuage de charge d'espace. Ils sont aspirés par la tension U_1 entre la cathode et la grille G_1 . Le courant d'émission est quasiment indépendant de la tension d'accélération U_2 entre les grilles G_1 et G_2 , abstraction faite d'une inévitable pénétrabilité. Entre la grille G_2 et le collecteur A, il y a une tension inverse U_3 . Seuls des électrons avec une énergie cinétique suffisante arrivent à l'électrode collectrice et apportent leur contribution au courant du collecteur.

Dans l'expérience, on augmente la tension d'accélération U_2 de 0 V à 30 V pour une tension d'aspiration U_1 fixe et une tension inverse U_3 , puis on mesure le courant du collecteur I_A correspondant. Dans un premier temps, il augmente un peu comme dans le cas d'une tétrode classique, mais il atteint un maximum lorsque l'énergie cinétique des électrons suffit juste devant la grille G_2 pour délivrer par collision l'énergie requise pour l'excitation d'un atome de mercure ($E_{\text{Hg}} = 4,9 \text{ eV}$). Le courant du collecteur baisse nettement étant donné que les électrons ne peuvent plus surmonter la tension inverse U_3 après le choc.

Au fur et à mesure que la tension d'accélération U_2 augmente, les électrons atteignent l'énergie nécessaire à l'excitation des atomes de mercure toujours plus loin avant la grille G_2 . Après le choc, ils sont à nouveau accélérés et absorbent à nouveau, pour une tension d'accélération suffisante tellement d'énergie du champ électrique qu'ils peuvent exciter un atome de mercure. Il s'en suit un second maximum et pour une tension U_2 encore plus grande, d'autres maxima du courant du collecteur I_A .

Remarque préliminaire

La courbe de Franck-Hertz peut être entièrement saisie en fonctionnement manuel.

Pour une rapide vue d'ensemble, par ex. en vue de l'optimisation des paramètres expérimentaux, il est recommandé d'utiliser un oscilloscope à deux canaux. Mais il faut tenir compte du fait qu'une image stationnaire obtenue à l'oscilloscope exige une fréquence de répétition pour la tension d'accélération pour laquelle les capacités du tube de Franck-Hertz et de la douille jouent un rôle. Le courant requis pour l'échange de charge des électrodes occasionne un léger décalage et une légère distorsion de la courbe de Franck-Hertz.

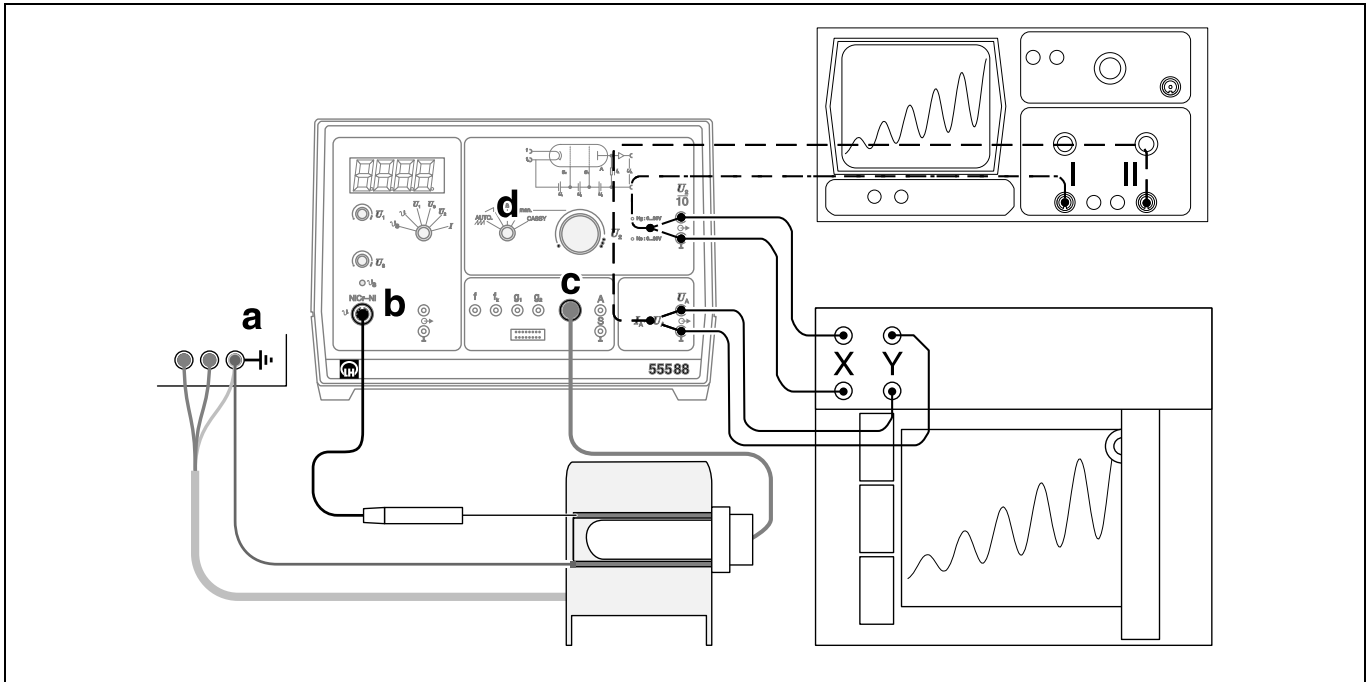
Pour le tracé de la courbe de Franck-Hertz, il est recommandé d'utiliser un enregistreur XY.

a) Mesure en fonctionnement manuel:

- Positionner le commutateur du mode de fonctionnement sur MAN. et lentement faire varier manuellement U_2 entre 0 V et 30 V.
- Relever la tension U_2 et le courant I_A sur l'affichage; pour cela, procéder à la commutation avec le commutateur sélecteur.

b) Représentation avec l'oscilloscope:

- Relier les douilles de sortie $U_2/10$ au canal II (0,5 V/DIV) et les douilles de sortie U_A au canal I (2 V/DIV) de l'oscilloscope; faire fonctionner l'oscilloscope en mode XY.
- Positionner le commutateur du mode de fonctionnement de l'alimentation pour tube de Franck-Hertz sur «dent de scie»
- Choisir la position Y de telle sorte que la partie supérieure de la courbe soit entièrement représentée.



c) Tracé avec l'enregistreur XY:

- Relier les douilles de sortie $U_2/10$ à l'entrée X (0,2 V/cm CAL.) et U_A à l'entrée Y (1 V/cm CAL.) de l'enregistreur XY.
- Positionner le commutateur du mode de fonctionnement sur RESET.
- Régler le zéro de l'enregistreur en direction X et Y et placer une marque sur le papier en abaissant brièvement la plume.
- Pour le tracé, positionner le commutateur du mode de fonctionnement sur «rampe» puis abaisser la plume.
- Une fois le tracé terminé, relever la plume et commuter sur RESET.

Montage

Le montage expérimental est représenté à la fig. 2.

d'abord:

- Laisser l'alimentation hors service.
- Brancher le four par le biais des douilles de sécurité de 4 mm (a) au dos de l'alimentation.
- Brancher aussi le fil de cuivre du tube en cuivre à fiche de 4 mm à la douille de sécurité jaune-verte (protection du tube de Franck-Hertz contre les champs perturbateurs).
- Brancher la prise DIN de la sonde de température à la douille (b) de l'alimentation et la prise DIN du tube de Franck-Hertz à la douille (c).

Chauffage:

Remarque:

En cas de mauvais contact thermique de la sonde de température, la température du four mesurée est trop faible et le tube est trop chauffé.

- Introduire la sonde de température dans l'alésage du four prévu à cet effet, jusqu'au bout du trou borgne du tube en cuivre, puis placer le tube de Franck-Hertz avec le tube en cuivre dans le four.
- Positionner le commutateur du mode de fonctionnement (d) sur RESET et mettre l'alimentation en marche (au bout de quelques secondes, la LED d'affichage pour le mercure passe du vert au rouge).

Fig. 2: Montage expérimental pour l'expérience de Franck-Hertz avec le mercure

- Vérifier le préréglage $\vartheta_s = 180^\circ\text{C}$ et attendre jusqu'à ce que la température de service soit atteinte (la LED d'affichage passe de rouge au vert, la température ϑ atteint d'abord un maximum et baisse ensuite jusqu'à la valeur finale).

Si l'affichage clignote:

- Corriger l'erreur de montage au niveau de la mesure de la température (voir mode d'emploi).

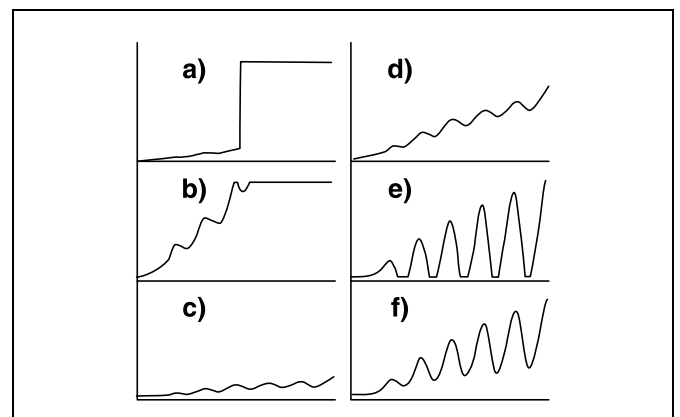
Optimisation de la courbe de Franck-Hertz:

- régler la tension d'aspiration $U_1 = 1,5\text{ V}$ et la tension inverse $U_3 = 1,5\text{ V}$ puis tracer la courbe de Franck-Hertz (voir remarque préliminaire).

a) Optimisation de ϑ

Si la courbe de Franck-Hertz augmente brusquement (voir fig. 3a) et qu'il se manifeste à travers le trou du four une décharge de gaz visible sous forme de luminescence bleue dans le tube de Franck-Hertz:

Fig. 3: Schéma synoptique pour l'optimisation des courbes de Franck-Hertz par le choix approprié des paramètres ϑ , U_1 et U_3



- immédiatement positionner le commutateur du mode de fonctionnement sur RESET et attendre jusqu'à ce que la température de service soit atteinte.
- éventuellement augmenter la valeur de consigne ϑ_s à l'aide du potentiomètre (par ex. de 5 °C) puis attendre quelques minutes jusqu'à l'établissement du nouvel équilibre thermique.

b) Optimisation de U_1 :

Plus la tension d'aspiration U_1 est élevée, plus le courant d'émission des électrons est important.

Si la courbe de Franck-Hertz monte en pente trop raide, donc si déjà en-dessous de $U_2 = 30$ V la capacité de charge de l'amplificateur de mesure du courant est atteinte et que la courbe de Franck-Hertz est coupée en haut (voir fig. 3b):

- réduire U_1 jusqu'à ce que la pente de la courbe corresponde à la fig. 3d.

Si la courbe de Franck-Hertz monte trop faiblement, donc si le courant du collecteur I_A reste partout inférieur à 5 nA (voir fig. 3c):

- augmenter U_1 (max. 4,8 V) jusqu'à ce que la pente de la courbe corresponde à la fig. 3d.

Si la courbe de Franck-Hertz reste trop aplatie malgré l'augmentation de U_1 :

- Réduire la valeur de consigne ϑ_s pour la température du four à l'aide d'un potentiomètre.

c) Optimisation de U_3 :

Plus la tension inverse U_3 est élevée, plus les maxima et les minima de la courbe de Franck-Hertz sont marqués, le courant du collecteur étant, dans l'ensemble, simultanément réduit.

Si les maxima et les minima de la courbe de Franck-Hertz sont mal marqués (voir fig. 3d):

- augmenter alternativement d'abord la tension inverse U_3 (maximum 4,5 V) et ensuite la tension d'aspiration U_1 jusqu'à obtention de la forme de courbe de la fig. 3f.

Si les minima de la courbe de Franck-Hertz sont «coupés» à la base (voir fig. 3e):

- réduire alternativement d'abord la tension inverse U_3 (maximum 4,5 V) et ensuite la tension d'aspiration U_1 jusqu'à obtention de la forme de courbe de la fig. 3f.

Réalisation

- Tracer la courbe de Franck-Hertz (voir remarque préliminaire)
- Eventuellement, pour une meilleure représentation des premiers maxima, augmenter la sensibilité de l'entrée Y et recommencer le tracé.

Exemple de mesure et exploitation

$$U_1 = 1,58 \text{ V}$$

$$U_3 = 3,95 \text{ V}$$

$$\vartheta_s = 180 \text{ °C}$$

L'écartement des maxima qui se succèdent sur la fig. 4 est en moyenne de la valeur

$$\Delta U_2 = 5,1 \text{ V,}$$

ce qui correspond à un transfert d'énergie

$$\Delta E = 5,1 \text{ eV.}$$

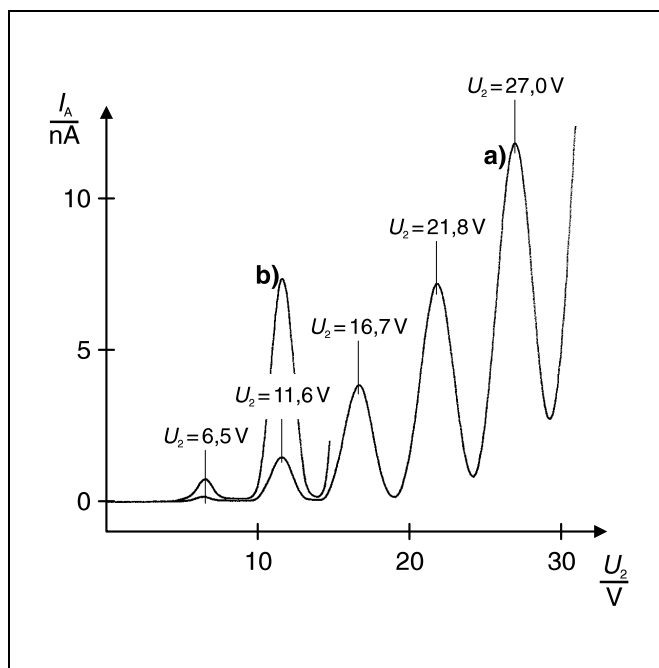


Fig. 4: a) Courbe de Franck-Hertz pour le mercure (tracée avec l'enregistreur XY)
b) Extrait avec l'ordonnée 5 fois plus grande

Cette valeur est à comparer avec la valeur littéraire

$$E_{\text{Hg}} = 4,9 \text{ eV}$$

pour l'énergie de transition des atomes de mercure de l'état fondamental 1S_0 au premier état 3P_1 .

On calcule l'énergie cinétique des électrons à la grille G_2 à partir de

$$E_{\text{cin}} = e \cdot (U_1 + U_2)$$

et on s'attend donc au premier maximum du courant du collecteur pour $U_1 + U_2 = 4,9$ V, en réalité, il est enregistré pour $U_1 + U_2 = 8,1$ V. La différence entre les deux valeurs est la tension de contact effective entre la cathode K et la grille G_2 .

Informations supplémentaires

Plusieurs effets contribuent à une tension de contact effective; les plus importants méritent d'être mentionnés:

La tension de contact proprement dite est suscitée par les différents travaux d'extraction de la cathode et de la grille. Les propriétés d'émission de la cathode à oxyde mixte et la charge de gaz, soit la couverture de mercure de la grille, jouent ici un rôle à ne pas négliger.

Les électrons qui sortent de la cathode ont une vitesse initiale subordonnée à la température de la cathode.