



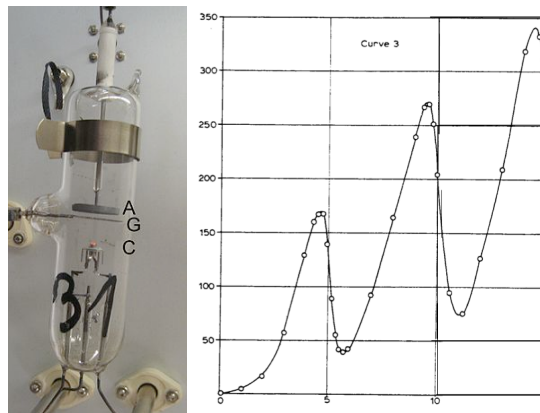
UFR FACULTE DES SCIENCES

Travaux Pratiques de Licence

L3 - Mécanique Quantique II

ANNÉE UNIVERSITAIRE 2013-2014

L'expérience de Franck et Hertz



1 Introduction

Ce TP est scindé en deux sessions bien qu'un seul compte-rendu doive être rendu.

L'expérience est basée sur une expérience classique de James Franck et Gustav Ludwig Hertz réalisée à Berlin en 1914. L'expérience a démontré que les niveaux d'énergie internes dans un atome sont quantifiés. Elle a ainsi permis de conforter le modèle de Bohr de l'atome, qui avait été présenté l'année précédente. Il s'agissait d'un élément de première importance pour la formulation de la mécanique quantique en général et pour le modèle quantique de l'atome en particulier.

À l'époque il était bien établi que les atomes sont constitués de charges positives et négatives et qu'une grande majorité de la masse est concentrée sur la charge positive - le noyau. On savait aussi que les charges négatives étaient formées d'unités discrètes - les électrons. D'un point de vue classique, ces électrons devraient être liés au noyau via la force électrostatique et se mouvoir sur une orbite elliptique autour du centre de masse. Ce même point de vue classique permettrait à chaque électron d'avoir n'importe quelle énergie, conduisant à une distribution continue d'énergies de liaison et de grandeurs associées comme les rayons d'orbite.

Cependant, il était aussi évident qu'un tel modèle classique d'électrons orbitant autour d'un noyau était inadéquat. Par exemple, on ne pouvait pas expliquer l'émission et l'absorption. De plus, dans un modèle classique, une charge accélérée doit perdre de l'énergie par rayonnement et des orbites stables ne sont donc pas possibles. Une des suggestions les plus audacieuses de Bohr, dans son modèle, était que seules certaines orbites discrètes étaient permises. Ceci impliquait que les électrons, liés au noyau par l'interaction électrostatique, ne pouvaient avoir que des énergies distribuées de façon discrète - les niveaux d'énergie atomique. Bohr n'a pas avancé de raison a priori par laquelle les atomes devraient se comporter ainsi (la mécanique quantique n'était pas encore inventée). Il a simplement postulé un tel comportement, reconnaissant que ce modèle rend bien compte des données expérimentales concernant l'atome d'hydrogène.

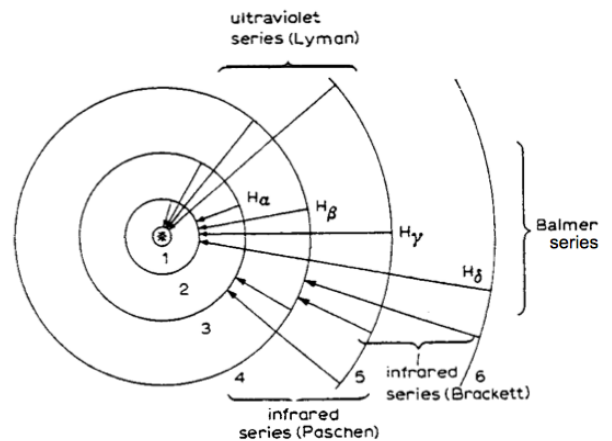


FIG. 1 – Le modèle de l'atome d'hydrogène de Bohr

L'expérience de Franck et Hertz était révolutionnaire, parce qu'elle a fourni la première preuve expérimentale directe que les énergies des atomes sont effectivement quantifiées. Ceci a été réalisé à l'aide d'électrons libres (d'énergie cinétique arbitraire) entrant en collision avec des atomes, afin d'essayer de transférer une partie de l'énergie cinétique des électrons libres aux atomes.

1.1 Collisions entre atomes et électrons

On considère un modèle très simpliste d'un atome constitué d'un électron orbitant autour d'un noyau positivement chargé, liés par l'interaction coulombienne. Un électron d'énergie cinétique initiale E_{ci} entre en collision avec l'atome, dont le centre de masse est supposé immobile (voir fig. 2).

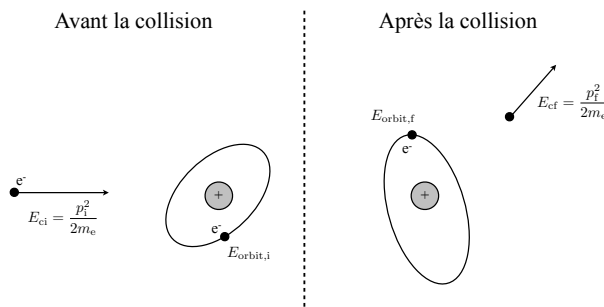


FIG. 2 – Une collision entre un électron (projectile) d'énergie cinétique initiale E_{ci} , et un atome simpliste (cible), où un électron lié a une énergie totale $E_{orbit,i}$. Après la collision, l'énergie cinétique de l'électron libre devient E_{cf} et l'énergie de l'électron lié $E_{orbit,f}$.

Inversement, une *collision inélastique* est telle que $E_{orbit,f} < E_{orbit,i}$. Dans ce dernier cas, une partie (ou la totalité) de l'énergie cinétique de l'électron incident est transférée à l'atome.

1.2 Conséquence de la quantification de l'énergie atomique

On considère maintenant comment le résultat d'une collision comme celle de la figure 2 peut être affecté par le fait que la distribution d'énergies atomiques soit discrète ou continue. En particulier, on considère une expérience où l'on peut choisir l'énergie cinétique

On suppose que le noyau est tellement plus massif que l'électron qu'on peut négliger son recul pendant la collision, en termes de conservation de l'énergie (on fixe la masse du noyau comme infinie). Ainsi, la conservation de l'énergie donne simplement :

$$E_{ci} + E_{orbit,i} = E_{cf} + E_{orbit,f} . \quad (1)$$

On définit ensuite une *collision élastique* comme vérifiant $E_{orbit,f} = E_{orbit,i}$, de sorte qu'aucune énergie n'est transférée à l'atome (l'électron lié). Inversement,

entrante du projectile électronique et étudier ensuite le résultat quand on fait varier $E_{\text{orbite},i}$.

Dans le cas d'une distribution continue d'énergies possibles pour l'atome, la quantité d'énergie transférée à l'atome peut prendre n'importe quelle valeur entre zéro à $E_{\text{orbit},i}$. Par exemple, il est tout à fait possible pour l'électron de céder juste une très petite quantité de son énergie, laissant l'atome seulement très légèrement excité.

Au contraire, si le spectre d'énergie atomique est discret (quantifié), il y a un état de plus basse énergie qu'on appelle le *fondamental*. La deuxième énergie possible la plus basse est le *premier état (ou niveau) excité*. Puis, il y a un nombre d'états excités de plus hautes énergies. Si n'importe quelle sorte de mesure de l'énergie est faite, les seuls résultats possibles correspondent à n'importe lequel de ces états (en mécanique quantique, ceux-ci correspondent aux valeurs propres du hamiltonien qui décrit l'interaction de l'électron atomique avec le noyau). Si l'atome cible est supposé dans son état fondamental, et si l'énergie cinétique du projectile est plus faible que la différence d'énergie avec celle du premier état excité, un transfert d'énergie de l'électron incident vers l'atome est maintenant impossible! Sans niveau d'énergie disponible entre le fondamental et le premier état excité, l'atome ne peut que rester dans l'état fondamental. Hélas, dans ce cas, les seules collisions possibles sont *de type élastique*.

Ainsi, si l'on peut concevoir une expérience qui permette de discriminer entre collisions élastiques et inélastiques, et si l'on fait varier l'énergie $E_{\text{orbit},i}$ du projectile, on est en mesure de trancher la question sur la nature continue ou discrète du spectre d'énergies des atomes. Dans ce dernier cas, on aurait un effet visible à chaque fois que $E_{\text{orbit},i}$ atteint une valeur qui correspond à la différence d'énergie entre deux niveaux d'énergie autorisés. Dans ces cas-là, des canaux de collisions inélastiques devraient apparaître. C'est précisément ce qui est exploré dans l'expérience de Franck et Hertz.

2 Principes d'une expérience de Franck-Hertz

Dans une expérience de Franck-Hertz, des électrons sont émis d'une cathode et accélérés vers une anode, où ils sont collectés et mesurés comme un courant. Ceci a lieu dans un tube qui contient un gaz dilué de l'espèce d'atomes étudiée. Si la pression de vapeur du gaz est appropriée, les électrons ont une probabilité élevée d'entrer en collision avec des atomes au long de leur trajectoire de la cathode vers l'anode, tout en ayant une probabilité non moins négligeable d'atteindre l'anode. Un schéma d'un montage typique

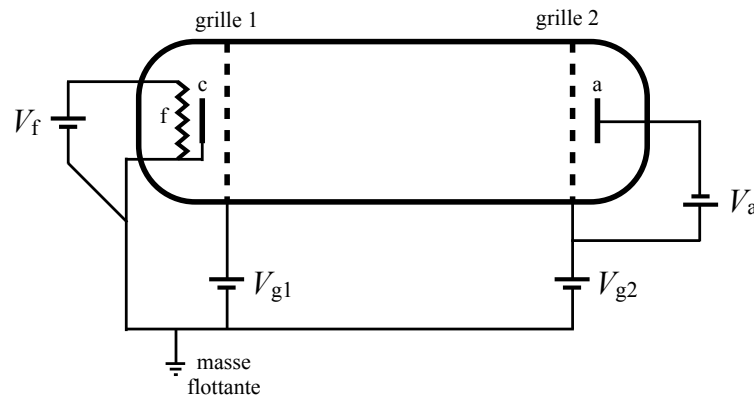


FIG. 3 – Un gaz dilué d'une espèce étudiée est contenu à l'intérieur d'un tube. Aux extrémités des tubes se trouvent des électrodes. La cathode (c) est indirectement chauffée par un filament (f), causant la libération d'électrons à sa surface. V_f est la tension fournissant le courant du filament. La grille 1 facilite l'extraction des électrodes si on lui impose une petite tension positive V_{g1} . L'accélération principale est réalisée en imposant à la grille 2 une tension positive plus élevée, V_{g2} . Les électrons qui ont assez d'énergie seront captés par l'anode (a), à laquelle on applique typiquement une petite tension de retard

de Franck-Hertz est montré en figure 3.

Les électrons sont initialement émis par la cathode chauffée. Une grille à laquelle on applique une petite tension positive (par rapport à la cathode qui est mise à la terre), située très près de la cathode, aide à extraire les électrons de la cathode (ceci n'est pas strictement nécessaire, mais aboutit typiquement à un signal plus important). Une deuxième grille est élevée à une tension considérablement plus élevée et ainsi les électrons sont accélérés vers l'anode. Finalement, on impose à l'anode un potentiel légèrement inférieur à celui de la grille 2. Ceci produit une tension dite *de retard* (ou contre-tension) qui empêche des électrons trop lents d'atteindre l'anode. Ceci permet d'augmenter la sensibilité de détection des collisions inélastiques, comme nous le verrons plus loin.

Dans la région entre V_{g1} et V_{g2} , règne un champ électrique et un gradient de potentiel. Ainsi, une particule chargée, tel qu'un électron libre, est accéléré vers le potentiel plus élevé (V_{g2}). De la sorte, l'énergie cinétique du projectile est fonction de la position entre les grilles ; au plus l'électron se rapproche de la grille 2, au plus élevée est sa vitesse.

Dans une expérience typique, on fait varier le potentiel d'accélération V_{g2} . Initialement, lorsque l'énergie cinétique du projectile est inférieure à la plus faible énergie d'excitation

de la cible, les collisions inélastiques sont impossibles (dans l'hypothèse où les niveaux d'énergie atomiques sont quantifiés). Ces collisions inélastiques font dévier les électrons-projectile quelque peu, mais sans réduire leur énergie cinétique. De plus, ils restent dans le même champ électrique et continuent d'être accélérés vers la grille 2 et même si leur trajectoire à travers le tube est de type billard, il est probable qu'ils atteignent finalement l'anode, où ils peuvent être détectés. Lorsque V_{g2} augmente, l'accélération devient de plus en plus efficace, conduisant à un signal accru. Lorsque V_{g2} est suffisamment élevée pour que les projectiles électroniques acquièrent une énergie cinétique égale à l'énergie du premier niveau excité de l'atome cible, des collisions inélastiques deviennent soudainement possible (dans la terminologie de la physique des collisions, le *canal inélastique* s'ouvre puisque son *seuil* est atteint). À ce stade, quelques atomes près de grille 2 sont excités et l'électron de projectile perd essentiellement toute son énergie cinétique. En conséquence, il n'a pas assez d'énergie pour surmonter la tension de retard appliquée à l'anode et il ne peut donc atteindre cette dernière (il est capté par la grille 2). Ainsi, il devrait y avoir un *creux* important dans le signal, pour cette valeur du potentiel d'accélération. L'atome excité se désexcite finalement vers son état fondamental, émettant typiquement un photon. Ceci implique qu'à la position dans le tube où de telles collisions ont lieu, il apparaît une fluorescence dont la longueur d'onde correspond à la différence entre les niveaux d'énergie atomique.

Si on augmente encore V_{g2} , le point où le seuil de collision inélastique est atteint se rapproche de la grille 1. Après une collision, le projectile demeure dans un champ électrique, et même s'il perd toute son énergie cinétique, il est ré-accélééré et peut encore atteindre l'anode. Ainsi, le signal doit à nouveau croître. Lorsqu'on continue d'augmenter V_{g2} , les électrons ré-accéléérés acquièrent à nouveau suffisamment d'énergie cinétique pour rendre une collision inélastique possible. De la sorte, le signal doit à nouveau subir une chute brutale. Cette fois-ci, cela implique que l'électron subit *deux* collisions inélastiques lors de son périple à travers le tube, à deux endroits différents. Si l'on continue de procéder ainsi, la variation de V_{g2} résulte en une série de creux équidistants, avec une séparation liée à l'énergie du premier état excité.

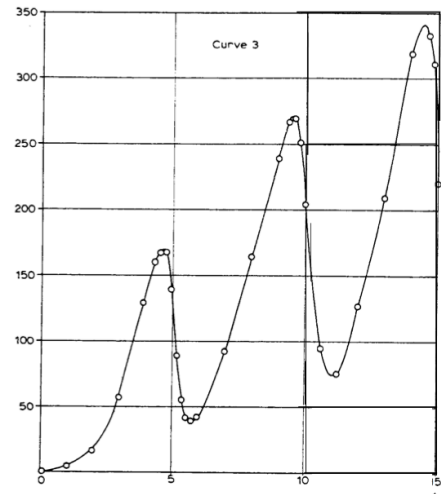


FIG. 4 – Une spectre typique dans une expérience Franck-Hertz. On peut voir une succession de creux équidistants, qui correspondent d'un nombre de collisions inélastiques.

3 Préparatifs expérimentaux, et théoriques

Les expériences sont réalisées avec deux échantillons différents, contenus dans deux tubes différents. La majorité des expériences est réalisée avec du mercure (Hg) liquide à la température ambiante. Pour avoir une pression de vapeur suffisante (une densité suffisante), le tube doit être chauffé autour de 200 °C dans un four. Un petit orifice est situé à l'une des extrémités du tube, par lequel la fluorescence est observée. Dans le tube à mercure, les électrodes et les grilles sont montées radialement.

La dernière expérience est réalisée avec du néon (Ne), qui est gazeux à la température ambiante. Dès lors, il n'est pas nécessaire de chauffer le tube. Dans le tube de néon, les électrodes et les grilles sont montées longitudinalement (comme dans le schéma principal de la fig. 3. L'absence de four permet d'observer la fluorescence facilement.

3.1 Acquisition de données assistée par ordinateur

Le signal (un courant converti vers une tension) est enregistré avec une carte d'acquisition. Avant brancher la carte, vérifier que toutes les tensions sont au-dessous 10 V, est mesurer le facteur de calibration.

3.2 Contrôle expérimental

Le four à mercure reçoit un courant de l'arrière d'une alimentation pour ces expériences. La température est mesurée thermo-électriquement et est affichée numériquement, avec une résolution de 1 °C. On notera que la résistance thermique du tube est très grande. Ceci implique qu'à chaque fois que le courant du four est modifié, il faut un certain temps pour stabiliser la température.

Avec un bloc de fonctions (voir fig. 5) chaque grille, g_1 ou g_2 , du tube peut être polarisée par deux types de tensions :

- Une tension continue réglable respectivement entre 0 et 5 V environ pour V_{g_1} et entre 0 et 40 V environ pour V_{g_2} .
- Une tension variant linéairement avec le temps (on dit rampe ou balayage de tension) dans les mêmes gammes. Quand les inverseurs sont tous deux sur la position 'rampe' les tensions V_{g_1} et V_{g_2} varient en même temps, la première de 0 à 5 V, la seconde de 0 à 40 V, en quelques minutes. La rampe peut être déclenchée, arrêtée ou ramenée à zéro à l'aide du commutateur C. Dans la pratique, seule V_{g_2} sera utilisée sur la position

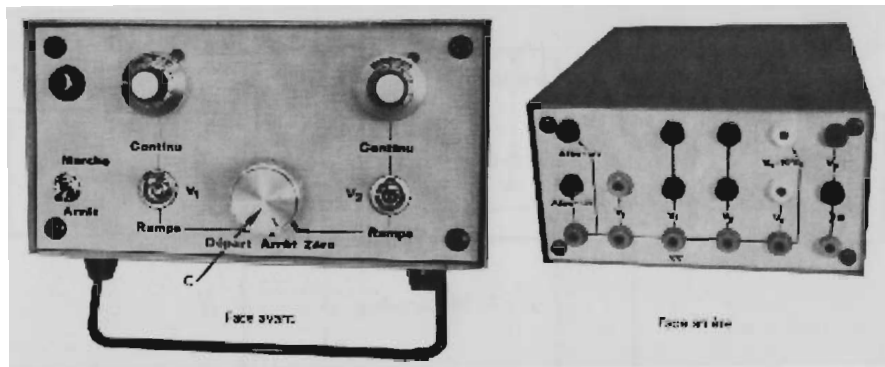


FIG. 5 – Le bloc de fonction ; faces avant et arrière.

‘rampe’.

Sur le bloc, on dispose également de la source V_f destinée au chauffage du filament, et d’une source annexe V_a , pour la contre-tension de l’anode.

3.3 Convertiseur courant-tension (I/V)

Cet appareil permet de transformer le très faible courant émis par l’anode (quelques nA) en une tension mesurable.

4 Expérience I : L’expérience de Frank & Hertz avec le mercure (Hg)

Dans cette première expérience, à l’image de la version original due à Frank & Hertz, chaque électron peut exciter un ou plusieurs atomes, via des collisions inélastiques dont le nombre dépend de l’énergie cinétique de l’électron.

4.1 Manipulation

- Fixer la température du four à environ $190\text{ }^\circ\text{C}$ ($\pm 2^\circ$).
- L’alimentation principale étant déconnectée, réaliser les connexions montrées sur le diagramme de circuit de la fig. 6, et ajuster la gamme du convertisseur I/V à 3×10^{-9} A.

4. EXPÉRIENCE I : L'EXPÉRIENCE DE FRANK & HERTZ AVEC LE MERCURE (HG)9

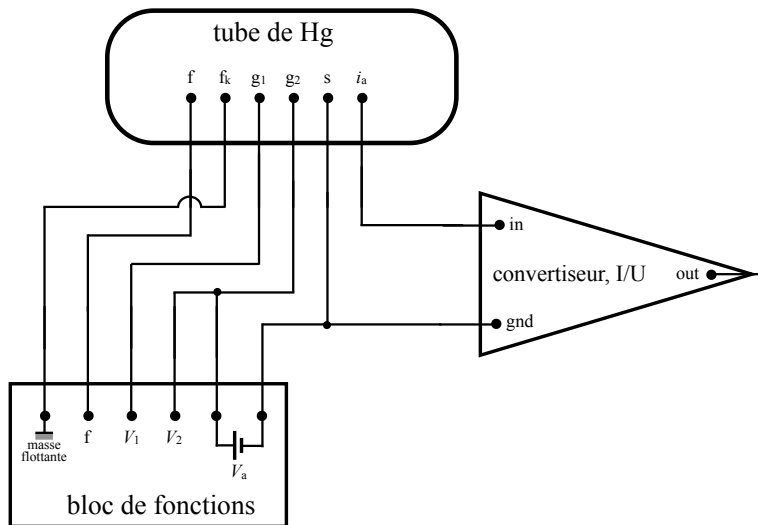


FIG. 6 – Branchement électrique (sauf les connections avec l'interface et l'ordinateur).

- Fixer les deux boutons pour V_1 et V_2 sur *continu*, et fixer V_1 à environ 3 V (mesuré sur un voltmètre).
- Ajuster le bouton pour V_2 à *zéro*, puis à *continu*. En même temps, démarrer le balayage (scan) sur l'ordinateur.
- Lorsque V_2 a atteint sa valeur finale, arrêter le balayage sur l'ordinateur.
- Pendant que vous balayez l'énergie du projectile, observez le tube à travers le petit trou dans le four, et notez si, et pour quelles tensions d'accélération, vous détectez de la fluorescence.
- Sauvegardez les données dans un fichier, et dans une image ; imprimez l'image.
- Par incréments de 5 °C, augmentez la température et répétez l'expérience pour des températures jusqu'à 200 5 °C.

4.2 Analyse et questions

- Quelle structure du spectre correspond aux résonances en énergie ? Les pics ou les creux ? Expliquez pourquoi !
- Si la première structure résonante du spectre correspond à une collision inélastique, où l'énergie cinétique du projectile est transférée vers une excitation atomique pour la cible, quelle est l'origine physique des collisions suivantes ?
- Mesurez la séparation entre résonances successives dans le spectre. Quel est le premier potentiel d'excitation, V_0 , de l'atome de Hg ?

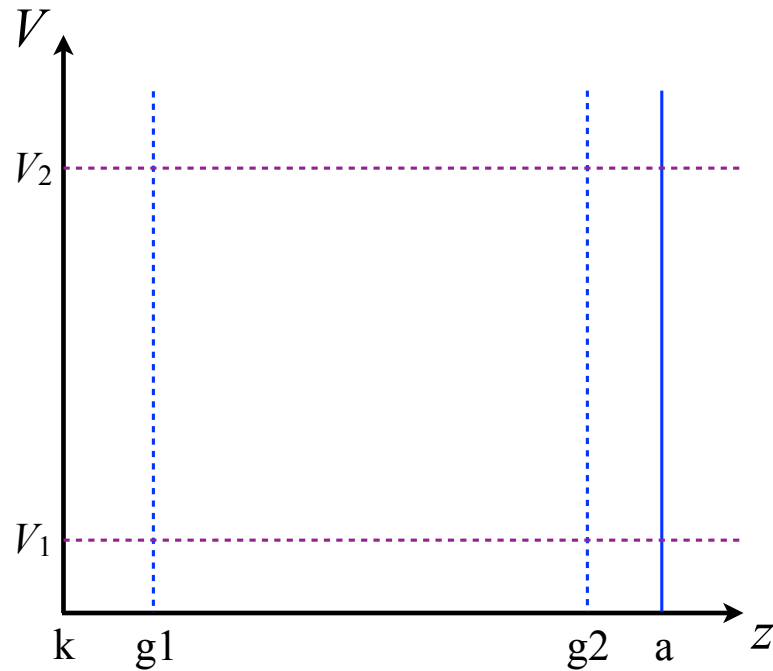


FIG. 7 – Distribution spatiale des potentiels dans le tube pour la mesure du potentiel du résonance (à compléter).

- Pourquoi la première résonance n'est-elle pas située à V_0 ? Calculez le potentiel de contact.
- Relevez-vous une différence systématique dans le spectre pour différentes températures?
- Calculez la longueur d'onde de la lumière qui correspond à V_0 . A quelle gamme de longueur d'onde appartient-elle?
- Comparez vos résultats aux données tabulées pour Hg.
- Reproduisez le schéma de la fig. 7 et complétez-le en y indiquant la distribution des potentiels dans le tube (supposez des variations linéaires entre les électrodes). Ne pas oublier que l'anode est au même potentiel que la terre qui n'a pas été choisie ici comme potentiel de référence.
- Dans chacune des 3 régions inter-électrodes, indiquez le sens du champs électrique et de la force subie par les électrons qui s'y trouvent.
- Quelles sont les conclusions finales de l'expérience? Qu'est-ce que cela indique sur la quantification de l'énergie atomique? Qu'apprend-on au sujet des niveaux d'énergie du mercure? Peut-on s'attendre à des excitations plus élevées et/ou à une possible ionisation des atomes de mercure?

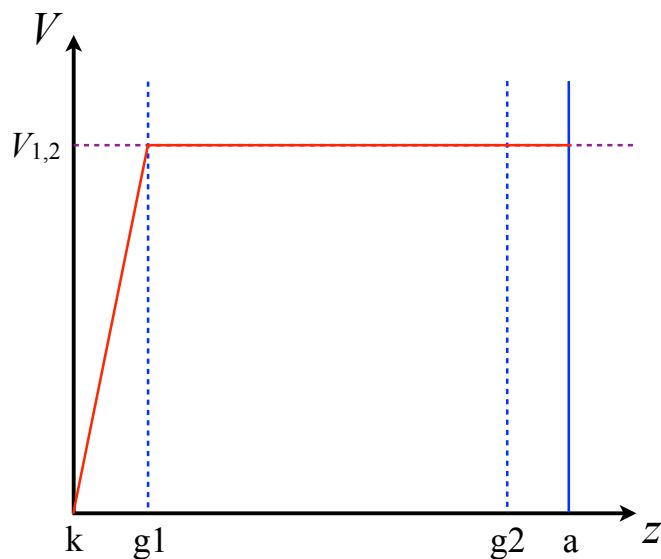


FIG. 8 – Distribution des potentiels dans le tube pour l'expérience II.

5 Expérience II : Excitation d'un atome unique – excitations plus élevées

La principale différence de cette deuxième expérience tient au fait fait qu'on accélère les électrons jusqu'à leur énergie cinétique finale déjà avec la grille 1 ; avant qu'ils n'entrent dans la région principale d'interaction. Dans la région principale d'interaction, the potentiel est plat.

5.1 Manipulation

- Choisissez la température du four qui vous a donné le meilleur signal dans l'expérience I.
- Etablir dans le tube une distribution de potentiels conforme au schéma de la fig. 8.
- Comment faut-il modifier le schéma de la figure 4 pour arriver à ce résultat ? Dessinez le nouveau schéma du câblage et modifiez le circuit en conséquence.
- Balayez la tension d'accélération de 0 à 40 V, comme dans l'expérience précédente. Enregistrez le spectre.

5.2 Analyse et questions

- Quelles sont les différences immédiates que vous observez dans le spectre en comparaison de l'expérience I ?
- Le spectre courant présente-t-il une structure qui soit commune au spectre de l'expérience I ?
- Essayez d'expliquer les structures que vous observez maintenant.
- Reproduisez la figure 6 et indiquez de nouveau le champ électrique et la force subie par les électrons dans chaque région.
- Tirez quelques brèves conclusions finales de cette expérience.

6 Expérience III : Ionisation par impact d'électron

Dans cette troisième expérience avec le tube de mercure, on ionisera les atomes cibles. Pour démontrer que c'est bien ce qui est réalisé, on doit détecter l'atome chargé positivement au lieu de l'électron. Il va donc falloir modifier les potentiels en conséquence. L'anode doit maintenant attirer l'ion, et repousser les électrons libres. De plus, l'ion est beaucoup plus massif et plus gros que l'électron, de sorte qu'afin de lui permettre d'atteindre finalement l'anode, on doit réduire la pression de vapeur dans le tube.

6.1 Manipulation

- Réduire la température du four à environ 40 °C.
- Etablir dans le tube une distribution de potentiels conforme au schéma de la fig. 9.
- Dessinez le circuit électrique qui permet de réaliser cette distribution de potentiel et modifiez le circuit en conséquence.
- Balayez la tension d'accélération de 0 à environ 15-20 V. Enregistrez le spectre.

6.2 Analyse et questions

- Quel est le trait marquant du spectre ? Pourquoi y-a-il si peu de structure cette fois ?
- Avez vous décelé des indications du même phénomène d'ionisation dans les expériences précédentes (I et/ou II) ?
- Calculez l'énergie d'ionisation du mercure ? Comparez aux données tabulées.
- Si vous vouliez ioniser deux fois un atome de mercure, pensez-vous que la même énergie serait nécessaire pour ioniser un deuxième électron ? Justifiez votre réponse.

7. EXPÉRIENCE IV : L'EXPÉRIENCE DE FRANK & HERTZ AVEC LE NÉON 13

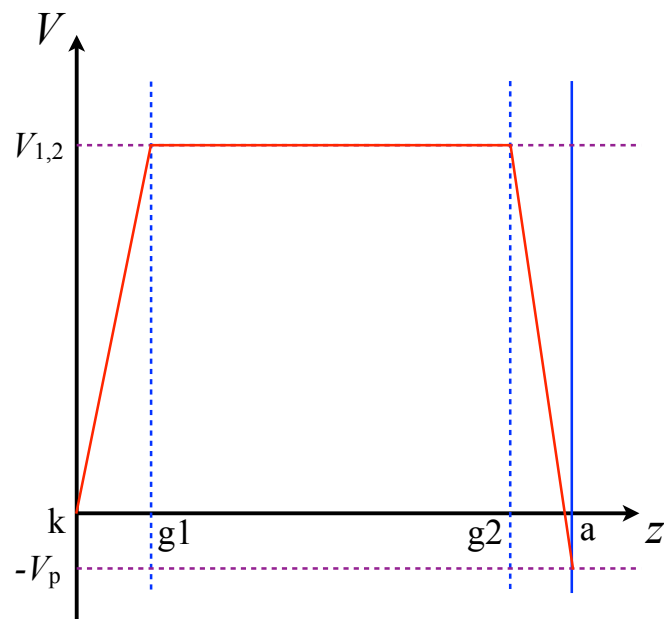


FIG. 9 – Distribution des potentiels dans le tube pour l'expérience III.

- Reproduisez la fig. 9 et indiquez, dans chaque région, le champ électrique et les forces subies par les ions et aussi par les électrons .
- Tirez quelques brèves conclusions finales de cette expérience.

7 Expérience IV : L'expérience de Frank & Hertz avec le néon

Dans cette dernière expérience, on utilise un autre tube, rempli de néon à la place du mercure. Ce qui conduit à des différences importantes. La première est que Ne est gazeux à température ambiante, contrairement à Hg. Cela implique qu'il n'est pas nécessaire de chauffer le tube ; il a été rempli à une pression appropriée par le fabricant. L'absence de four entraîne qu'on peut directement observer la fluorescence induite dans le tube.

De surcroît, Ne est un gaz rare, doté d'une couche électronique externe complètement remplie. Ceci implique qu'il est très stable, et qu'une énergie importante est nécessaire pour lui permettre d'atteindre les niveaux excités les plus bas. Ainsi, il nous faut dès lors accélérer les électrons projectiles à des énergies cinétiques plus élevées. Un autre point est qu'au-dessous des premiers niveaux excités, il y a de nombreux niveaux peu espacés,

ce qui implique en pratique que nous exciterons des bandes d'énergies plutôt larges, et que le spectre sera moins propre que dans le cas du mercure.

7.1 Manipulation

- Le montage est toujours celui de figs. 3 et 6, avec les variations suivantes :
- la tension V_2 doit atteindre 60 V ; utilisez l'alimentation prévue à cet effet. Il n'y a pas de générateur de rampe ; seul un potentiomètre permet de faire varier V_2 . Cette alimentation inclut aussi la contre-tension qui vaut 6 V. Les tensions V_f et V_1 sont prises sur le bloc de fonctions.
- Effectuez le montage.
- Fixez V_1 à environ 3 V.
- Démarrez le balayage (scan) sur l'ordinateur et commencez à augmenter lentement la tension V_2 à la main. En même temps, observez la fluorescence dans le tube. Où est-elle localisée dans le tube, et de quelle couleur est-elle ?
- Balayez très lentement entre les résonances, et tentez de détecter des sous-structures.

7.2 Analyse et questions

- Déterminez l'énergie d'excitation pour le Ne ?
- Si vous avez pu détecter des sous-résonances, de quelle énergie sont-elles séparées des résonances principales ?
- Calculez les longueurs d'onde associées aux énergies évoquées ci-dessus.
- Comparez les longueurs d'onde calculées aux données tabulées pour Ne, et la couleur de la fluorescence observée. Quelles conclusions en tirez-vous ?
- Tirez quelques brèves conclusions finales de cette expérience.