

PRÁCTICA 4

EXPERIMENTO DE FRANCK-HERTZ

OBJETIVO

Verificar que la transferencia de la energía en las colisiones entre electrones libres y átomos de mercurio y de neón se produce de forma discontinua, es decir, está cuantizada.

LECTURAS RECOMENDADAS

- [1]<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/627/A4.pdf?sequence=4>.
- [2][https://www.pas.rochester.edu/~rrubenza/projects/RAR_PHY243W_Lab2_FranckHertz.pdf\(rochester.edu\)](https://www.pas.rochester.edu/~rrubenza/projects/RAR_PHY243W_Lab2_FranckHertz.pdf(rochester.edu))
- [3]<https://www.physics.purdue.edu/~sergei/classes/phys342l/franckhertz.pdf>

FUNDAMENTOS FÍSICOS

Según la mecánica cuántica, los átomos poseen niveles discretos de energía, de forma que pueden absorber o emitir solamente la energía correspondiente a la diferencia entre dos de dichos niveles. Este hecho puede verificarse para átomos no hidrogenoides estudiando las energías de ionización de los átomos con el tubo electrónico de Franck-Hertz.

En 1913 Niels Bohr propuso el modelo atómico de Bohr, que supone que los átomos sólo pueden existir en ciertos estados de energía ligada. Esta idea recibió un poderoso impulso en 1914 cuando James Franck y Gustav Hertz realizaron un experimento que demostró la existencia de niveles de energía cuantificados en mercurio (Hg). El experimento consistió en enviar un haz de electrones a través de vapor de Hg y observar la pérdida de energía cinética cuando un electrón choca inelásticamente con un átomo de mercurio y lo excita desde su estado de energía más bajo a uno más alto.

El **átomo de mercurio** neutro tiene 80 electrones, distribuidos en la siguiente configuración:
 $1s^2, 2s^2, 2p^6, 3s^2, 3p^6, 3d^{10}, 4s^2, 4p^6, 4d^{10}, 4f^{14}, 5s^2, 5p^6, 5d^{10}, 6s^2$

Los átomos de vapor de mercurio normalmente están en su estado más bajo o fundamental, con los dos electrones de valencia que ocupan un estado designado por $(6s)^2$ (dos electrones en $n = 6$, $l = 0$). Los dos electrones no se mueven independientemente, por lo que tres cantidades (el momento angular de giro total S , el momento angular orbital total L , y el momento angular total J son constantes del movimiento, designadas por los números cuánticos S , L y J , respectivamente). Así, los estados de los electrones se designan con la notación espectroscópica $^{2S+1}L_J$. El valor de L será S cuando $L = 0$, P cuando $L = 1$, etc. El estado fundamental del mercurio es entonces 1S_0 .

Como se ve en la Figura 1, los siguientes niveles energéticos por encima del fundamental son los tripletes (3P_0 , 3P_1 y 3P_2), donde los espines de los electrones están paralelos. Hay un estado singlete superior 1P_1 con espines antiparalelos. En una colisión con un electrón energético, el átomo podría elevarse a cualquiera de estos estados excitados. En el experimento de Franck-Hertz clásico se observa principalmente excitación al estado 3P_1 .

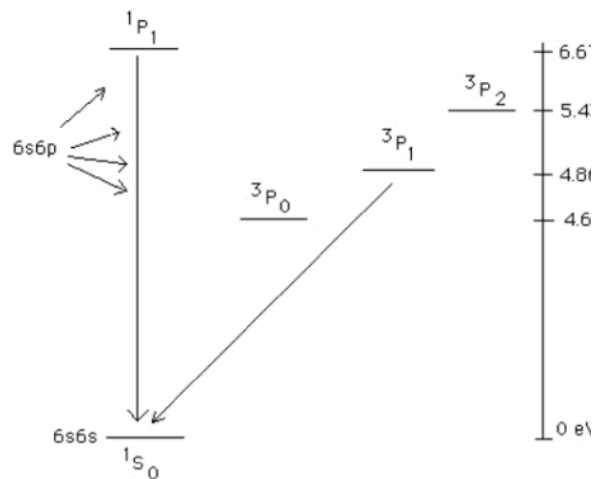


Figura 1. Niveles de energía del átomo de mercurio

La desexcitación que sigue desde el estado excitado al fundamental se produce emitiendo un fotón de energía igual a la diferencia de energía entre ambos niveles (correspondiente a una emisión en el ultravioleta, con $\lambda = 254 \text{ nm}$). Puesto que esta emisión no está en el visible, no es posible demostrar el fenómeno mediante simple visualización de la luz emitida, siendo necesario realizar un experimento más elaborado, implicando la aplicación de diferencias de potencial entre electrodos para visualizar cambios en la corriente recogida cuando se producen las excitaciones.

En el caso de **Neón** la configuración electrónica es:
 $1s^2, 2s^2, 2p^6$

La excitación más probable mediante colisión inelástica se produce desde el estado fundamental a los estados 3p, que tienen energías entre 18.4 eV y 19.0 eV sobre el estado fundamental, mientras que la excitación a los estados 3s, con energía menor (entre 16.6 y 16.9 eV) tiene una probabilidad menor (ver Figura 2). La desexcitación desde los niveles 3p al fundamental se produce mediante transición previa a los estados 3s con la emisión de un fotón cuya energía corresponde al rango visible (entre rojo y verde), y por tanto se puede visualizar con el ojo.

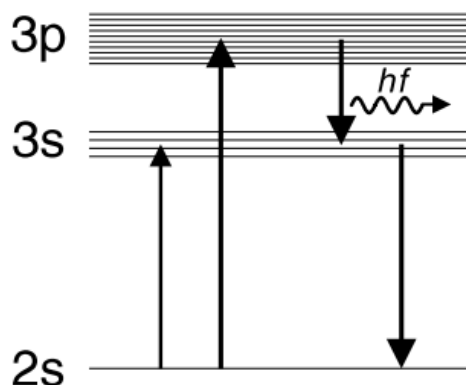


Figura 2. Diagrama de energías simplificado para neón

Sistema experimental

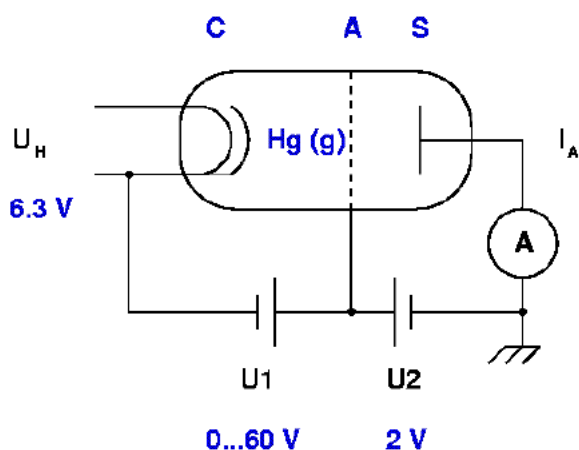
El equipo de Franck-Hertz es un equipo que incluye tres componentes: 1) el tubo de Franck Hertz, consistente en un dispositivo de emisión de electrones de energía cinética controlable que atraviesan un gas diluido de átomos (comúnmente de Hg o Ne); 2) unidad de control que permite variar los diversos parámetros ajustables del experimento; 3) ordenador portátil equipado con un software de Phywe (Measure).

El experimento se realizará con Hg y con Ne, utilizando tubos diferentes, con sus correspondientes unidades de control, siendo el ordenador el mismo. A continuación, se describe cada uno de ellos de forma separada:

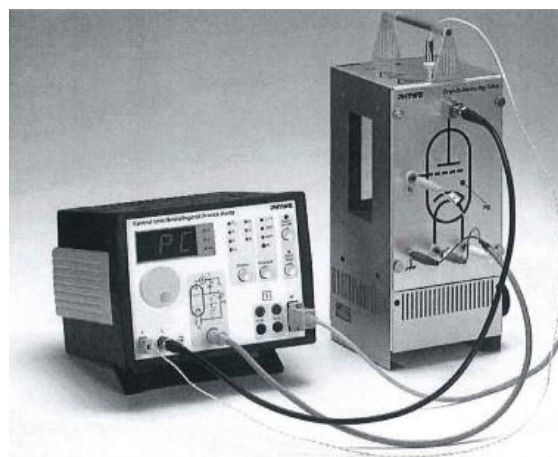
Dispositivo Franck Hertz con Hg

El tubo consta de un dispositivo emisor de electrones, que consta de 3 electrodos (ver esquema y fotografía en Figura 3):

1. **Cátodo C emisor de termoelectrones.** La emisión de los electrones por el filamento emisor se produce por efecto térmico debido a someterlo a una tensión alterna de calentamiento, U_H , que se fija en 6.3 V.
2. **Ánodo A en forma de rejilla,** para acelerar estos electrones. Se aplica una diferencia de potencial variable, U_1 (entre 0 y 60 V), entre C y A, que define la energía cinética de los electrones $E_K = e U_1$ que se moverán de C a A.
3. **Electrodo colector S.** Su papel es recoger parte de los electrones (los que tienen energía cinética suficiente para llegar), midiéndose la corriente I_A . Se aplica una diferencia de potencial de oposición o frenado (contratensión) U_2 entre A y S (prestad atención a la polaridad), que permite recoger sólo los electrones con mayor velocidad y por tanto visualizar los picos de forma más contrastada. El experimento se realiza con un valor fijo de U_2 (entre 0.5 y 2V).



(a)



(b)

Figura 3. a) Esquema del tubo de Franck-Hertz con Hg; (b) Fotografía de tubo (calefactado) y unidad de control.

El tubo contiene vapor de Hg, de modo que los termoelectrones pueden chocar con los átomos de Hg cuando se mueven hacia el ánodo, A. Al ir aumentando la tensión de aceleración U_1 , llega un momento en que los termoelectrones adquieren energía cinética suficiente para que la energía liberada en el choque (inelástico) sea suficiente para que los electrones de valencia del mercurio, al absorberla, puedan pasar del nivel fundamental a niveles excitados. Como consecuencia, los termoelectrones no alcanzan el electrodo colector S (que está conectado a una tensión ligeramente negativa respecto al ánodo A) y se produce un mínimo de la corriente recogida por I_A . Al seguir aumentando la tensión U_1 , el proceso se repite, siempre que la energía de los termoelectrones, que viene dada por (eU_1) , siendo e la carga del electrón, sea un múltiplo entero de la energía de excitación E_a de los átomos de mercurio.

En este experimento se pretende obtener experimentalmente la curva de variación de la corriente I_A en función de la tensión de aceleración U_1 . La corriente irá aumentando, presentando mínimos para ciertos valores de U_1 ($U_{1,\min}$ que vendrá dado, en primera aproximación por:

$$U_{1,\min} = n E_a/e = n E_{a,eV} \text{ siendo } n=1,2,3,\dots \text{ el número de mínimo} \quad (1)$$

siendo $n=1,2,3,\dots$ el número de mínimo, E_a la energía de excitación (diferencia de energía entre el estado fundamental y el excitado, expresada en julios) y e la carga del electrón ($E_{a,eV}$ es la energía de excitación en unidades de electrón voltio). Para poder tener vapor de mercurio y para que su densidad sea la adecuada para una buena observación de los mínimos (el recorrido libre medio de los electrones debe ser menor a la distancia entre C y A), es necesario calentar el tubo a una temperatura entre 140°C y 175°C . Por ello, el tubo está calefactado (va incorporado en un horno). Por encima de este intervalo de temperatura la corriente I_A disminuye y los mínimos tienden a desaparecer. Por debajo de 140°C , la corriente aumenta rápidamente y si se mantiene la tensión el tubo se podría quemar.

POR TANTO, ATENCIÓN:

NO TOCAR EL SELECTOR DE TEMPERATURA DEL HORNO (ESTÁ YA AJUSTADO PARA QUE LA TEMPERATURA PERMITA EL RANGO $145\text{-}175^\circ\text{C}$). El horno se activa al conectarlo a la red.

LA APLICACIÓN DE CORRIENTES CATODICAS ELEVADAS A TEMPERATURAS MENORES DE 100°C PODRÍA DAÑAR EL APARATO

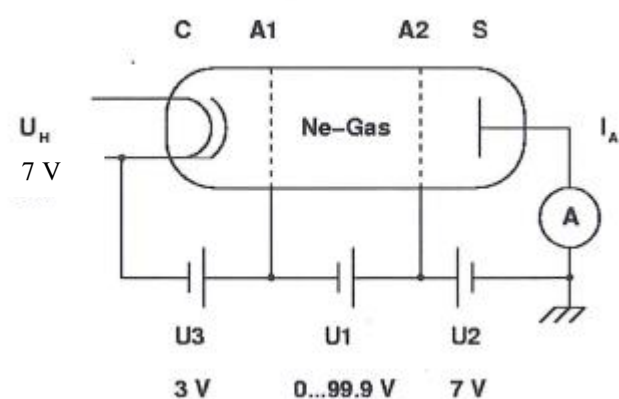
PARA EL ESTUDIO CON T QUE SE PIDE CON EL TUBO DE Hg, LA TEMPERATURA DE MEDIDA SE SELECCIONA CON EL SOFTWARE, NUNCA CAMBIANDO EL SELECTOR DEL HORNO.

Dispositivo Franck Hertz con Ne

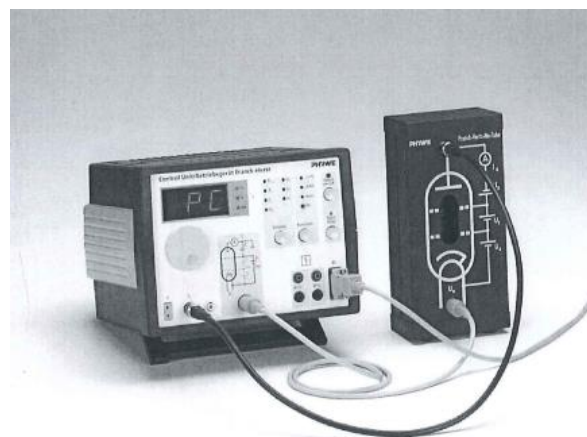
Este dispositivo va equipado con 4 electrodos, en lugar de 3 y no está calefactado. El sistema es similar al utilizado con Hg, pero en este caso hay dos rejillas, en lugar de 3 (ver Figura 4). Consta de:

1. **Cátodo C emisor de termoelectrones.** Su papel es similar al caso del Hg. La tensión de calentamiento U_H , que se fija en 7 V (para valores más altos se corta la medida porque se producen descargas en el tubo que pueden dañarlo).
2. **Ánodo A1 en forma de rejilla,** colocado cerca del cátodo C. Se aplica una diferencia de potencial fija entre C y A1, que llamamos U_3 , que dirige los termoelectrones generados en C hasta A1.

3. **Ánodo A2 en forma de rejilla** colocado a una distancia de A1 suficiente para que se puedan producir choques entre los electrones y los átomos de Ne (grande comparada con el recorrido medio de los electrones en el gas). Se aplica un potencial de aceleración U_1 entre A1 y A2, variable (en este caso entre 0 y 99.9 V).
4. **Electrodo colector S.** Su papel es similar al caso del Hg. Se aplica una contratensión U_2 para facilitar la recolección de los electrones y la visualización de los máximos y mínimos de corriente.



(a)



(b)

Figura 4. a) Esquema del tubo de Franck-Hertz con Ne; (b) Fotografía de tubo y unidad de control.

REALIZACIÓN DE LA PRÁCTICA

1. Tubo de Franck-Hertz con Hg

Objetivo 1: Experimento clásico de Franck Hertz. Obtener la curva de corriente I_A en función del potencial de aceleración U_1 y a partir de ella la energía de excitación del Hg desde el estado fundamental al primer excitado. Esta energía corresponde aproximadamente al espaciamiento entre los mínimos (se asume que el espaciamiento entre los dos mínimos consecutivos es constante al aumentar n , de acuerdo con la ecuación 1).

Objetivo 2: Estudiar la dependencia con la T. Analizar posibles efectos en las energías de excitación e investigar el papel del recorrido libre medio.

Montaje del sistema experimental

1. Tubo de Franck-Hertz calefactado. Conectar el cable del sensor de temperatura (T) a la unidad de control. A continuación, conectar el cable de suministro eléctrico del horno. El selector de temperatura ya está ajustado para que la temperatura permita medir en el rango entre 145 y 175 °C (NO TOCARLO). Debe esperarse varios minutos para esté caliente y se puedan hacer medidas. Mientras tanto ir conectando los cables a la unidad de control según se explica en el punto 2.
2. Conectar la unidad de control a la red alterna y encender con el interruptor de alimentación situado en la parte trasera. Conecta el tubo de Hg con la unidad de control mediante un cable de 5 polos (con etiquetas, para suministrar U_H , U_1 , U_2 y U_3) y un cable BNC (para medir I_A).
3. Conectar la unidad al ordenador mediante un cable RS232. Encender el ordenador e iniciar el programa de software (Measure). El programa detecta si está conectado un tubo de Hg o

de Ne. Los parámetros necesarios para medir están preconfigurados con los siguientes valores: U1 final: 60 V; U2 = 2 V; UH = 6.3 V; T = 175 °C.

Medidas y análisis

1. **Experimento clásico de Franck-Herzt.** Obtener la curva de U1 en función de I_A para los parámetros preconfigurados, así como para dos casos más, cambiando U2 (= 1 V; 1.5 V).

Determina el espaciamiento entre dos mínimos consecutivos $\Delta U_{1,\min}$ para cada caso (se sugiere despreciar el primer mínimo, $n = 1$) Suponiendo que este espaciamiento es independiente del número de mínimo (n), determina la energía de excitación promedio y su error. Prueba también a representar $U_{1,\min}$ en función de n y ajustando con la ecuación (1) obtén la energía de excitación. Comprobar si corresponde con el nivel de energía 3P_1 (4.89 eV, Figura 1).

2. **Estudio del efecto de la temperatura.** Poniendo de nuevo los parámetros preconfigurados, haz medidas cambiando la temperatura (cada 5 °C) a la que ésta se realiza en el rango entre 145 y 175 °C. Determina el espaciado entre mínimos consecutivos $\Delta U_{1,\min}$ y represéntalo, para cada T, en función del número de mínimo.

En este caso realiza un análisis acorde al llevado a cabo en el trabajo de R. Rubenzah et al. (lectura recomendada [2]). Según este estudio, el espaciado entre mínimos $\Delta U_{1,\min}$ (para una T dada) no es constante al aumentar el número de mínimo (n), sino que aumenta según la ecuación:

$$\Delta U_{1,\min}(n) = \left(1 + \frac{l}{L}(2n - 1)\right) V_a, \quad (2)$$

donde V_a es el voltaje de aceleración mínimo al que pueden producirse colisiones elásticas (4.67 eV, coincidente con el nivel 3P_0), l es el recorrido libre medio y L es la distancia entre el cátodo y la rejilla.

- a) Para cada T, representa $\Delta U_{1,\min}$ en función de n . Ajusta los resultados con la ecuación (2) y extrapola el valor de $\Delta U_{1,\min}$ para $n = 0.5$, que corresponderá con el valor de V_a mínimo para que se produzcan colisiones elásticas. Verifica que la energía obtenida corresponde al nivel 3P_0 .
- b) Analiza el efecto de la temperatura representando $\Delta U_{1,\min}$ (para $n = 2$) en función de la temperatura. Explica a qué es debido el comportamiento observado, explicando el papel del recorrido libre medio l . ¿Puedes determinar (o estimar) el valor de l en tus experimentos y su dependencia con la T?

2. Tubo de Franck-Hertz con Ne

Objetivo 1: Obtener la curva de corriente I_A en función del potencial de aceleración U1 y a partir de ella la energía de excitación del Ne desde el estado fundamental al primer excitado. Esta energía corresponde aproximadamente al espaciamiento entre los mínimos (se asume que el espaciamiento entre los dos mínimos consecutivos es constante al aumentar n, de acuerdo con la ecuación 1).

Objetivo 2: Observar cualitativamente la emisión de la luz en el tubo, como consecuencia de la desexcitación desde el estado excitado al fundamental.

Montaje del sistema experimental

Conectar el tubo de Franck-Hertz con Ne (en este caso no está calefactado) con la unidad de control y ésta con el ordenador (ver Figura 4b). En el programa de software (Measure) los parámetros para

medir están preconfigurados con los siguientes valores: $U_H = 8 \text{ V}$; U_1 final: 99.9 V ; $U_2 = 7 \text{ V}$; $U_3 = 3 \text{ V}$.

MUY IMPORTANTE: CAMBIAR U_H A UN VALOR MENOR $U_H = 7 \text{ V}$ (la medida se corta porque la corriente parece ser excesiva). Cada vez que se hace una nueva medida el programa lo cambia al valor preconfigurado (**ASEGURAR QUE SE CAMBIA A 7 V**)

Medidas y análisis

a) Obtención de curvas de I_A versus U y obtención de energía mínima de excitación del Ne. Obtener curvas variando diferentes parámetros, explicando la razón de las diferencias observadas, en función del papel que juegan en el experimento:

- Efecto de cambiar la corriente de calefacción U_H . Obtener curvas con $U_H = 7 \text{ V}$ y $U_H = 6 \text{ V}$. El resto de los parámetros fijos: U_1 final = 99.9 V ; $U_2 = 7 \text{ V}$; $U_3 = 3 \text{ V}$.
- Efecto de cambiar U_3 . Obtener curvas para diversos valores de U_3 (en torno a 3 V) con el resto de los parámetros fijos: $U_H = 7 \text{ V}$ (o 6 V), U_1 final = 99.9 V ; $U_2 = 7 \text{ V}$.
- Efecto de cambiar U_2 . Obtener curvas para diversos valores de U_2 (en torno a 7 V) con el resto de los parámetros fijos: $U_H = 7 \text{ V}$ (o 6 V), U_1 final = 99.9 V ; $U_3 = 3 \text{ V}$.
- Con las mejores curvas obtenidas, determina el espaciado entre mínimos consecutivos, para obtener la energía de excitación del Ne y conocer a qué nivel excitado corresponde (Figura 2).

b) Realiza de nuevo varios experimentos, con los parámetros que mejores curvas hayan dado, y presta atención a la emisión de luz del tubo. i) Observad si se produce en el momento justo después de la observación de un mínimo; ii) ¿Se observa algún cambio en la posición (distancia a A1) desde la cual se ve la luz emitida al ir aumentando el voltaje de aceleración U_1 ?; iii) A partir del color de la emisión, ¿puedes estimar su longitud de onda y comprobar si es coherente con la diferencia de energía entre el estado fundamental y el excitado? Para esta parte puede ser útil grabar un video del tubo, que comience justo cuando se inicia la medida.