

EXPERIMENTO 3: FRANCK-HERTZ

Estudiantes: Vicente Lacroix - Marcelo Ojeda - Ana María Salas
Fecha laboratorio: 27/04/2023, Entrega: 11/05/2023

Resumen

En esta experiencia de laboratorio, se buscó comprobar que bombardear átomos con electrones de baja energía se lograban excitar y que la energía está cuantizada. Para esto se utilizó un horno de Frank-Hertz en cuyo interior se hallaba gas de mercurio. Este se calentaba y desde el cátodo se despedían electrones que interactuaban con este. Se observaron aumentos y caídas de corriente (voltaje) en las curvas de ambas temperaturas estudiadas, explicándose esto a partir de choques elásticos e inelásticos según la energía de los electrones en movimiento. Se obtiene experimentalmente la cuantización de energía de los electrones que coincide con el planteamiento del modelo atómico de Bohr. Sin embargo, cuantitativamente, la diferencia de potencial entre cada peak o disminución de corriente difiere en un 69.59 % en promedio respecto a la literatura, mientras que respecto al potencial de la rejilla difiere solo en un 5.35 %, concluyendo que para diferentes valores en el potencial de la rejilla significa un umbral mínimo de energía que requieren los electrones para llegar al ánodo. Como perspectivas futuras se propone repetir el experimento y estudiar una mayor cantidad de temperaturas y tipos de gas, esperando valores cuantitativos más certeros.

1. Introducción

1.1. Objetivos

Los objetivos de esta experiencia son, en primer lugar, observar si es posible lograr la excitación de átomos a través del bombardeo de electrones de baja energía, y en segundo lugar, a partir de esto, determinar si la energía adquirida por los átomos debido a las colisiones de electrones se presenta siempre en niveles discretos. Para ello se proponen los siguientes objetivos específicos: Lograr un montaje que permita observar, a través de un osciloscopio, el comportamiento de los electrones en un sistema cátodo-ánodo en un medio aislado con gas de Mercurio, donde, a través de la manipulación de una fuente de voltaje, se pueda observar la cantidad de electrones que lleguen al ánodo, y en base a ello interpretar y conocer el sentido físico del comportamiento observado en el osciloscopio. Se busca también determinar, si existe, una relación entre los resultados encontrados con el modelo atómico de Bohr, junto con discutir la importancia de las diferentes variables del montaje, como la tensión de la rejilla del sistema cátodo-ánodo, o la posibilidad de utilizar un gas distinto al Mercurio.

1.2. Marco Teórico

Una de las maneras de estudiar los átomos de un gas y su energía es analizando su comportamiento al interactuar con otras partículas, como por ejemplo, electrones en movimiento.

Lo anterior fue realizado en el experimento de Franck-Hertz en el año 1914, donde los físicos Gustav Hertz y James Franck demostraron la existencia de la excitación de átomos de Mercurio [1]. El experimento consiste en la incidencia de un haz de electrones acelerados por una diferencia de potencial desde el cátodo hacia una rejilla positiva y luego hacia el ánodo (ver 1). Los electrones avanzan por un tubo de vacío que contiene Mercurio de forma gaseosa. La densidad del gas, además del movimiento de electrones, permite choques entre estos últimos y los átomos del gas.

El estudio de los choques consiste en su naturaleza elástica o inelástica según la energía cinética de los electrones en movimiento. Por lo tanto, si los electrones tienen poca energía, es decir, el potencial de aceleración es pequeño, entonces los choques

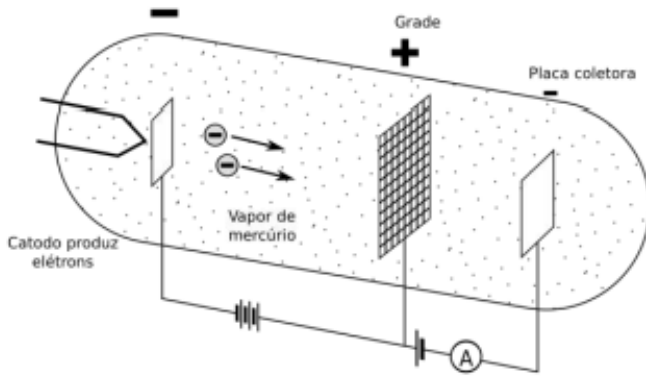


Figura 1: Esquema representativo de la estructura del cátodo-rejilla-ánodo por donde se mueven los electrones. Extraída de [4]

con el gas serán elásticos y los electrones podrán llegar al ánodo, donde luego se mide la corriente eléctrica correspondiente. Por el contrario, si la energía de las partículas en movimiento es alta, es decir, se tiene una diferencia de potencial mayor, se producen choques inelásticos, y por lo tanto, se espera una transferencia concreta de energía entre el electrón y el átomo del gas colisionado, en particular, la transformación de energía cinética a potencial desde el electrón que estaba en movimiento hacia el electrón del átomo de Mercurio. Esto resulta en la excitación del átomo y por tanto, el cambio de órbita del electrón. Lo anterior además significa que, por ejemplo, el electrón acelerado no sea capaz de llegar al ánodo, y por lo tanto ocurre una caída de corriente.

El electrón que colisiona puede ser nuevamente acelerado, aumentando el potencial, lo que resulta en la llegada de electrones al ánodo y por lo tanto un aumento en la medición de corriente. La tensión continua aplicada entre el cátodo y la rejilla permite calcular la energía transferida a partir de la relación entre trabajo y energía cinética dada por:

$$eV = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1)$$

Donde e corresponde a la carga del electrón, V al potencial aplicado, m la masa del electrón y v su velocidad.

Así, los electrones deben portar cierta energía mínima para que al chocar con los átomos del gas se produzca una transferencia de la misma (choques inelásticos), pues los electrones del átomo colisionado solo pueden recibir energía en una cantidad concreta para que se produzca la excitación del electrón y por ende un cambio de órbita. Lo anterior demuestra el postulado y modelo atómico de Niels Bohr sobre la cuantización de las órbitas de los electrones.

Entonces, considerando que la energía puede transferirse en cantidades concretas y que Niels Bohr plantea la cuantización de estados para los electrones, se puede utilizar la siguiente relación de energía:

$$eV = h \cdot \nu = \frac{h \cdot \lambda}{c} \quad (2)$$

Con h la constante de Planck, ν y λ frecuencias y longitudes de onda específicas del gas trabajado y c la velocidad de la luz.

1.3. Contexto

La importancia de estudiar experimentalmente los conceptos introducidos radica en la posibilidad de replicar la experiencia de Franck-Hertz y reproducir los resultados sobre la transferencia de energía en cantidades concretas y cuantizadas entre la colisión de electrones y un átomo.

Lo anterior permite comprender la naturaleza del átomo y su energía, reforzando el modelo atómico propuesto por Bohr, comprobando los estados excitados del átomo, en particular, del Mercurio. Además, representa un experimento fundamental en áreas como la teoría cuántica sobre electrones, donde se determina que estos se ubican en lugares concretos con determinados estados de energía.

El descubrimiento de éste comportamiento de la materia a muy pequeña escala supuso un gran cambio de paradigma en la física del Siglo XX, contrastando con la idea de energía continua con la que se trabaja en la mecánica clásica, abriendo una nueva gran rama de investigación en física y matemáticas trayendo consigo grandes avances tecnológicos que fueron fundamentales para el desarrollo del mundo del Siglo XXI, como es el caso de la electrónica y los circuitos integrados. Los descubrimientos sobre la naturaleza del átomo y las teorías de la Relatividad de Einstein sentaron las bases de lo que hoy conocemos como Física Moderna. [3]

2. Montaje y procedimiento

El montaje constó en la conexión de diferentes instrumentos. Primero, se une el Horno de Franck-Hertz desde la estructura del ánodo hacia un amplificador y desde este último se utiliza un cable coaxial que llega a una de las entradas del osciloscopio. Luego, desde el cátodo (en el Horno), se realizan conexiones hacia la fuente de poder, al igual que con la rejilla. Esto permitiría establecer la diferencia de potencial.

Conjuntamente, desde la fuente de poder se realiza otra conexión hacia la entrada restante del osciloscopio, terminando así con el circuito. Para medir la diferencia de potencial se utiliza un multitéster

(voltímetro) conectado directamente a la fuente de poder, y para medir la temperatura se hace uso de un termómetro que se introduce hasta la mitad en el horno, debido a la variación de temperatura según la ubicación en este. El montaje indicado se muestra en la figura 2.

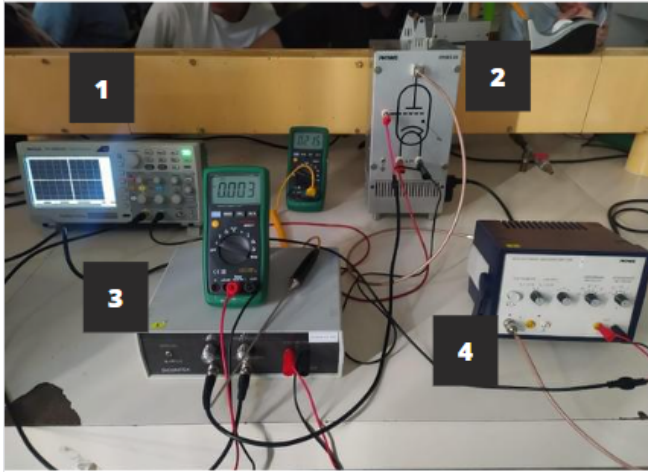


Figura 2: Foto representativa del montaje utilizado. (1) corresponde al osciloscopio, (2) al Horno de Franck Hertz, (3) la fuente de poder y (4) el amplificador. Se ven además los cables banana, el termómetro (multitéster del fondo) y voltímetro (multitéster delantero).

Luego de armar el montaje, se encendió el horno y se esperó por aproximadamente 10 minutos hasta la estabilización de la temperatura, tomando nota de esta última variable. Se encendió el amplificador utilizando un valor de $10^{13}\Omega$ en impedancia y 0 de amplificación, disponiendo la fuente de voltaje con un valor de 40V en el modo barrido. Además, se utiliza un potencial en la rejilla de 1.5 eV, lo que significa una barrera energética que deben sobrepasar los electrones para llegar al ánodo.

Finalmente, se observó la curva de corriente en la pantalla del osciloscopio, representado por el voltaje medido versus el voltaje de aceleración, utilizando un pendrive para la extracción de datos. Lo anterior se repitió para dos temperaturas diferentes.

3. Análisis y resultados

El análisis se basa en el estudio de curvas de voltaje (corriente) para electrones que son acelerados desde el cátodo al ánodo a partir de una diferencia de potencial.

Las curvas obtenidas fueron para temperaturas de 112.8°C y 137.28°C respectivamente y se presentan junto a máximos locales en las figuras 3 y 5.

En cada una se observa aumento y caída de corriente (voltaje) más o menos periódicas. Esto significa que efectivamente al presentarse un gas como el

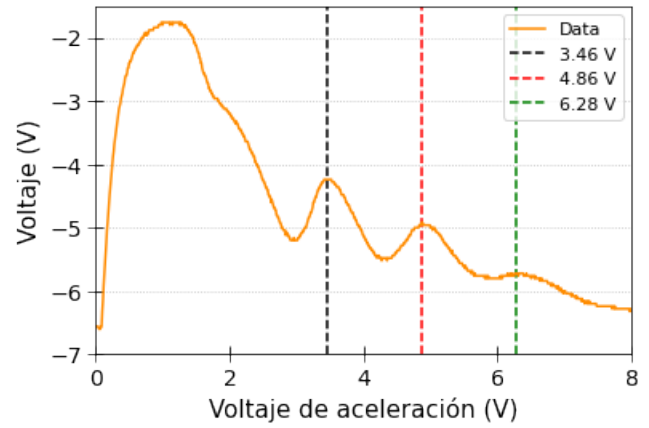


Figura 3: Gráfico para cuando el gas está a 112.8°C que relaciona el voltaje de aceleración al que se someten los electrones v/s el voltaje captado por el ánodo, asociado directamente con la intensidad de la corriente y, por tanto, a la cantidad de electrones que cruzaron la barrera de potencial.

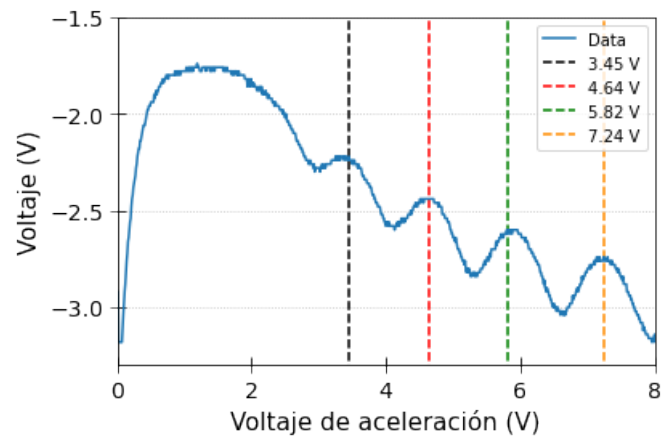


Figura 4: Gráfico a una Temperatura de 137.2°C . Relaciona el voltaje de aceleración al que se someten los electrones v/s el voltaje captado por el ánodo, asociado directamente con la intensidad de la corriente y, por tanto, a la cantidad de electrones que cruzaron la barrera de potencial.

Mercurio y acelerar electrones que pasen a través de este gas, se producen choques de dos tipos. Los choques elásticos son representados por el aumento de voltaje de ambas gráficas y significa que cuando las partículas en movimiento no tienen energía suficiente para excitar los electrones del átomo de Mercurio logran llegar al ánodo y por lo tanto se registra la corriente respectiva.

Por otra parte, las caídas en la curva estudiada se explican por los choques de tipo inelásticos entre los electrones acelerados y los átomos del gas, pues hay transferencia de energía hacia los electrones del átomo, por lo tanto, el electrón en movimiento pierde la energía y no llega al ánodo, mientras que el electrón del átomo es excitado y salta de órbita puesto que recibió una cantidad de energía mínima y cuantizada para que esto ocurra.

Luego se repite el proceso, al acelerar nuevamente los electrones, que llegan al ánodo y así sucesivamente, por eso en la curva continua con aumento y caída de voltaje.

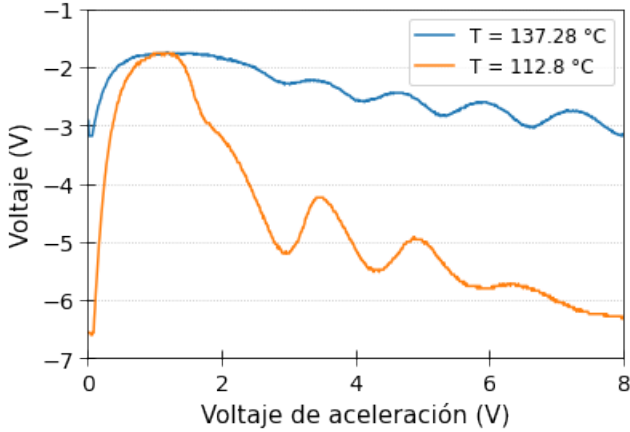


Figura 5: Comparación de las curvas a temperaturas 112.8 °C y 137.2 °C. Se puede notar que la de mayor temperatura posee un peak más y es menos pronunciada que la de menor temperatura.

Al comparar en una misma gráfica las curvas obtenidas para diferentes temperaturas, se observan diferencias. Primero, la curva que tiene una temperatura mayor está por sobre la curva de temperatura menor y segundo, la curva de mayor temperatura parece ser más plana respecto de la otra. Esto se puede explicar debido a que con una mayor temperatura, hay mayor movimiento también de las partículas del gas (mayor densidad), lo que aumenta la posibilidad de que ocurran choques y por lo tanto disminuye el camino libre de los electrones por lo que estos últimos interactúan con el gas.

Así, los electrones pueden no superar el potencial de la rejilla, por lo que el aumento de corriente para la curva de mayor temperatura es menos acentuada con respecto a la curva de menor temperatura, ya que como se explicó, interactúa con mayor frecuencia con el gas, y por lo tanto es menor la cantidad de electrones que llega al ánodo.

Lo obtenido experimentalmente es consecuente con el planteamiento que realiza Bohr respecto a los electrones dentro del átomo. Estos se encuentran en órbitas de mínima y concreta energía alrededor de núcleo en zonas determinadas por dicha energía, y al absorber una cantidad concreta de ella pueden ser capaz de saltar entre los niveles energéticos. Lo anterior solo es posible para una cantidad de energía determinada (ver ecuación 2), y esto se observa experimentalmente en el hecho de que no todos los

casos correspondían con choques inelásticos, pues había situaciones en los que el electrón no tenía esta energía mínima suficiente para excitar los electrones del átomo del gas y por lo tanto continuaba su camino hacia el ánodo.

Lo anterior puede ser replicado con otro tipo de gas, por ejemplo con el Neón ([1]) o Argón ([4]), entre otros. Se esperaría que si se sigue cumpliendo el planteamiento de Bohr por igual para los demás gases, entonces al repetir el experimento con otro gas, se debería observar en la gráfica regiones de aumento y caída de corriente producto de los mismos motivos ya explicados. Sin embargo, una diferencia podría ser en el voltaje alcanzado para cierta temperatura, lo que significa por ejemplo, en un cambio de escala en el osciloscopio que dependerá de las propiedades de los átomos del nuevo gas, pues estos podrían alcanzar mayores valores de voltaje para un voltaje de aceleración igual que el aplicado para otro gas.

Además, otra diferencia se podría encontrar en la diferencia de potencial entre los peaks de corriente encontrados, pues la energía de excitación para la transición de otro gas, por ejemplo el Neón, es diferente a la del Mercurio, por lo que si bien la distribución de la curva puede ser similar, su diferencia estaría presente en la separación de los máximos locales (potencial de excitación promedio) que se relacionan justamente con la energía de transición mencionada.

Para el caso del Mercurio, se encontró una diferencia promedio en los máximos que se presenta en la siguiente tabla.

Temperatura (°C)	112.8	137.28
Δ voltaje (V)	1.41	1.57

Tabla 1: Potencial de excitación promedio para las temperaturas de 112.8 °C y 137.28 °C.

Los valores obtenidos para la diferencia de potencial son diferentes respecto a los esperados. En principio, se esperaba un valor del 4.9 eV dado por la literatura, que corresponde a la diferencia de potencial entre cada peak o caída de corriente correspondiente al Mercurio. Sin embargo, la diferencia de potencial obtenido se acerca más al potencial de la rejilla utilizado, con un valor de 1.5 eV.

Debido a lo anterior, se realizan las comparaciones respecto a los dos valores. Primero, respecto al valor de la literatura, obteniéndose un error porcentual promedio del 69.59%. Por su parte, respecto al po-

tencial de la rejilla respecto al ánodo, se presenta un error promedio del 5.35 %.

Se ve entonces que porcentualmente los ΔV obtenidos experimentalmente son similares al potencial de la rejilla, por lo que si este valor cambia, significa que los electrones deberían superar otro umbral de energía para lograr llegar al ánodo, y que los ΔV serían iguales a este nuevo valor del potencial, de aquí su importancia.

Así, por ejemplo, si se aumenta el valor del potencial de la rejilla, el número de electrones que llega al ánodo sería menor, lo contrario sucedería si el valor del potencial umbral disminuye. A pesar de la discordancia con el valor esperado, se observa igualmente que las caídas de corriente en cada curva estudiada ocurren cada 1.5 V, lo que da lugar a la naturaleza cuantizada de la energía de un átomo y en particular del electrón que cambia de órbita, respaldando esto lo enunciado en la teoría de Bohr.

4. Conclusiones

La experiencia permitió reproducir el experimento de Franck Hertz para el gas de Mercurio logrando comparar los resultados experimentales con los planteamientos teóricos propuestos por Niels Bohr sobre el átomo y sus niveles de energía determinados, comprobando así experimentalmente la excitación de átomos a partir de la interacción con electrones acelerados.

Se obtuvo que los electrones de los átomos solo reciben energías en cantidades concretas, de lo contrario no ocurre transferencia de energía y por lo tanto el cambio de orbital de los electrones del Mercurio no es posible.

Los resultados experimentales sobre el aumento y caída de corriente concuerdan cualitativamente con lo dispuesto en la teoría a partir del análisis en la naturaleza de los choques entre electrones en movimiento y los del átomo del gas, concluyendo que el experimento puede ser replicado para otros gases y que si bien la distribución de las curvas sería similar, tendrían diferentes valores de potencial de excitación según la naturaleza energética del átomo estudiado.

Lamentablemente se obtuvo que la separación media entre los peaks vale aproximadamente 1.5 V, que no concuerdan con los 4.9 V de la literatura. Se acerca más bien a la barrera de voltaje de la rejilla, lo que podría significar un error a la hora de la realización del montaje. Los errores porcentuales obtenidos de la diferencia de voltajes para el gas de mercurio respecto al de la rejilla y a la de la literatura son de 5.35 %

y 69.59 %, respectivamente. Aún así, este error no se interpuso en el principal objetivo de esta experiencia de comprobar la cuantización de la energía, como se mostró anteriormente.

Como posible mejora, se plantea volver a realizar el experimento poniendo más atención a la hora de hacer el montaje. También se propone estudiar curvas con otras temperaturas y gases de otros elementos para realizar un mayor número de comparaciones, además de mejorar la medición del termómetro dentro del Horno, pues la temperatura variaba mucho cuando se cambiaba la altura de la varilla del multitéster alcanzada.

Referencias

- [1] Franck-Hertz Experiment. (s.f.). <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/frhz.html: :text=El>
- [2] Instituto de Física UC. (Octubre, 2014). Experimento de Franck-Hertz (Fiz0311). Guía.
- [3] Beiser, A. (2003). Concepts of Modern Physics. McGraw-Hill Science, Engineering & Mathematics.
- [4] Universidad Católica del Norte. (2017, junio). Experimento de Franck Hertz para el argón. física ucn. Recuperado 11 de mayo de 2023, de <http://www.fisica.ucn.cl/wp-content/uploads/2017/06/Experimento-de-Franck-Hertz-para-el-arg>