

Experimento de Frank-Hertz

Cedric Prieels

22 de marzo 2016

Resumen

El objetivo principal de esta práctica era la observación de los estados discretos de energía de los átomos, la consecuencia de la cuantificación de la energía propuesta por la mecánica cuántica. Por eso, se usa el efecto fotoeléctrico dentro de una bombilla llena de gas neón, que tiene un espectro complejo y interesante a estudiar. Además, se intenta observar la fluorescencia del átomo de Ne con el mismo dispositivo experimental.

1. Introducción teórica

Según el modelo de Bohr, introducido en 1913 por el científico Niels Bohr, los átomos son esferas muy pequeñas compuestas por un núcleo de carga positiva, y por algunas partículas negativas, los electrones, que giran alrededor de este núcleo en órbitas circulares de energía cuantificada. Estos electrones tienen cada uno una energía determinada, pero algunas transiciones aparecen si una excitación es capaz de dar al electrón exactamente la cantidad de energía necesaria para llegar al nivel de energía siguiente. Estas excitaciones se hacen en general por medio de un fotón de energía $E = h\nu$, siendo ν la frecuencia de la luz considerada y h la constante de Planck o por medio de colisiones inelásticas con otros electrones acelerados.

El experimento de Frank-Hertz, desarrollado por los científicos James Franck y Gustav Hertz fue en 1914 la primera demostración experimental de que los estados de energía de los electrones en los átomos están cuantizados. Consiste en usar un filamento que se calienta hasta el punto donde empieza a emitir electrones, una bombilla llena de gas inerte (en este caso, se usa neón a baja presión), y tres diferentes diferencias de potencial que tienen un valor variable y que permiten acelerar o frenar los electrones emitidos por el filamento¹. Con este dispositivo, colisiones inelásticas pueden ocurrir entre estos electrones y los átomos de Ne, y podríamos ser capaces de detectar transiciones internas dentro de los átomos de Ne, por algunos valores de energía discretos.

En este experimento y en la naturaleza, dos tipos de colisiones se pueden producir entre los electrones acelerados y los átomos de neón :

- **Colisiones elásticas.** Este tipo de colisión se produce por cualquier energía de los electrones, que cambian de dirección pero guardan la misma energía después del choque contra el átomo.
- **Colisiones inelásticas.** Son las colisiones interesantes en este caso porque están acompañadas por un cambio de energía entre el electrón acelerado y el átomo, y solo se producen si el electrón tiene justamente una energía igual al salto entre dos niveles diferentes dentro del átomo de Ne.

¹Se estudiará más en detalle en la parte siguiente el dispositivo experimental usado y el desarrollo del experimento.

Los electrones están acelerados por una diferencia de potencial, y obtienen una energía cinética dada por la ecuación (1), siendo e la carga elemental del electrón.

$$E_{cin} = e \cdot V \quad (1)$$

Entonces, se ve claramente que por algunos valores de V , los electrones tendrán justamente la energía necesaria para colisionar de manera inelásticas con los átomos de neón.

Se estudia en esta práctica la relación entre la intensidad de la corriente debida a los electrones que pueden llegar el colector (en nA) y el valor de la segunda tensión aplicada al sistema (cf. figura 1 dentro de la parte siguiente). En el vacío, representar una gráfica con estas variables no tendría mucho interés porque solo podríamos ver una curva creciendo linealmente, pero la presencia de neón implica la aparición de picos a diferentes tensiones determinadas que se pueden estudiar. Pero entender bien lo que pasa, es necesario estudiar el dispositivo experimental que teníamos y el método seguido.

2. Dispositivo y método experimental

El dispositivo experimental usado se representa en la figura 1. Está compuesto principalmente por una bombilla llena de neón a baja presión, un filamento caliente emisor de electrones y existen tres diferentes diferencias de tensiones que permiten acelerar y/o frenar los electrones.

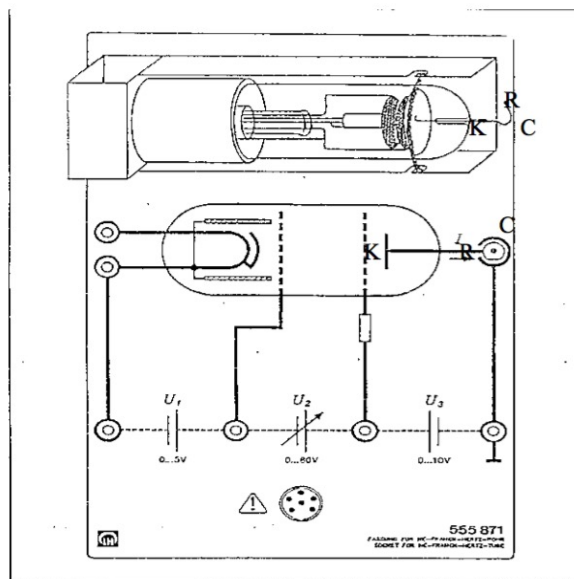


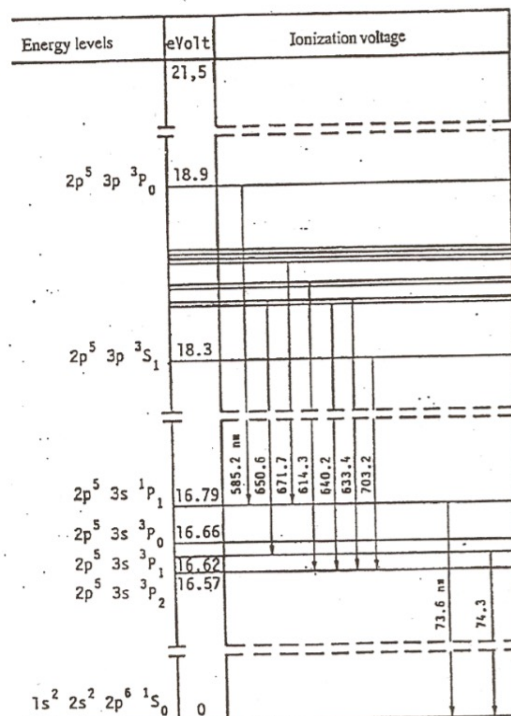
Figura 1: Dispositivo experimental usado.

En resumen, los electrones se emiten con una energía cinética casi nula al nivel del filamento caliente K , dentro de una bombilla llena de gas neón a baja presión. El número de electrones emitidos se regula mediante el uso de una primera diferencia de potencial, llamada U_1 y que puede tomar valores entre 0 y 5V (y lo podemos cambiar nosotros en el laboratorio). Estos electrones empiezan a dirigirse hacia una rendija (llamada R en este esquema de la práctica) y están acelerados por el uso de una segunda diferencia de potencial U_2 , que tiene el mismo signo que U_1 pero tiene un valor de tensión que cambia entre 0 y 80V. Tras pasar esta rendija, los electrones encuentran una última barrera de potencial U_3 , esta vez en el sentido opuesto, y solo los electrones que tienen una energía cinética bastante grande pueden atravesar esta barrera y llegar al colector, cerrar el circuito y iniciar una corriente eléctrica que podemos medir.

Durante la práctica, teníamos que elegir y fijar unos valores para U_1 y U_3 , y observar el espectro (una gráfica de la intensidad medida en función del valor de tensión U_2 , que cambia automáticamente entre 0 y 80V) que aparece en la pantalla del ordenador. El objetivo era cambiar estos valores iniciales introducidos a mano para mejorar el más posible el espectro obtenido, para tener algo que no llegue a la saturación (el detector satura y no puede medir corrientes de más de 12nA) y que tenga unos picos claramente visibles y bien definidos.

Estos picos vienen de la interacción entre los electrones y los átomos de neón, como ya explicado antes, y corresponden a valores de tensión U_2 tal que los electrones tienen justamente la energía cinética necesaria para excitar los electrones de neón. Los electrones pierden entonces casi toda su energía y la barrera de potencial es demasiado fuerte : ningún electrón es capaz de atravesarla, y la corriente medida cae rápidamente, y vuelve a subir después cuando el potencial U_2 sube, porque en este caso la energía de los electrones no es exactamente igual a la energía de transición entre niveles de neón, y no pueden ocurrir colisiones de tipo inelásticas. Los electrones siguen sin perder energía dentro de toda la bombilla de neón, solo pueden cambiar de trayectoria, pero siguen teniendo una energía más grande que la necesaria para atravesar la barrera de potencial debida a U_3 .

Existen diferentes picos en el espectro medido porque el átomo de neón tiene diferentes niveles de energía y entonces existen diferentes energías de transición posible (aunque todas las transiciones no sean posibles porque existan algunas reglas de selección). El espectro del neón se representa en la figura 2. Dos tipos de transiciones principales existen : transiciones directas del nivel fundamental al primer nivel excitado, y también transiciones que pasan un electrón del nivel fundamental a un nivel excitado más alto (existen unos 10 niveles a una energía de más o menos 19 eV), electrón que baja de energía para llegar a la primera zona de niveles excitados de energía más baja (4 niveles alrededor de 16,5 eV), emitiendo un fotón de energía fija y de longitud de onda correspondiente a un color naranja-rojo. Esta emisión de luz se puede observar al ojo.



(2)

Figura 2: Espectro de energía del neón.

3. Resultados obtenidos

Lo que teníamos que hacer primero era medir la corriente final en función de la tensión U_2 , eligiendo unos valores de U_1 y de U_3 para tener un espectro el más preciso posible. Por eso, teníamos que estudiar un poco el impacto que tienen estos valores de tensión sobre la gráfica final obtenida.

- Al aumentar la tensión U_1 , se disipa la nube de electrones en frente del cátodo del sistema, y entonces aumentar esta tensión tiene por consecuencia una aumentación del número de electrones emitidos y de la corriente medida. Hay que tener en cuenta que el dispositivo tiene una corriente de saturación alrededor de 12nA, así que hay que cambiar U_1 hasta tener un espectro que tiene un número de electrones grande, pero que no mide corrientes superiores a 12nA.
- Aumentar el valor de la barrera U_3 tiene por efecto que solo los electrones que tienen una energía grande puedan contribuir en el espectro final que medimos. Aumentar U_3 disminuye entonces la corriente medida.

Hay que cambiar estos dos valores para optimizar el espectro obtenido. Lo que hemos observado es que lo mejor es aumentar la tensión U_1 si observamos picos demasiados llanos, y disminuirlo si los picos superan el valor de la corriente de saturación. Tocar al valor de U_3 nos permitió cambiar la definición de la curva.

Los resultados obtenidos son los siguientes (el dispositivo experimental cambia automáticamente el valor de U_2 entre 0 y más o menos 80V) :

| U_1 (V) | U_3 (V) | Espectro obtenido |
|-----------|-----------|--|
| 0,5 | 5 | No se ve nada (intensidad igual a 0 por cada valor de U_2) |
| 1 | 5 | Se ve una saturación después los 2 primeros picos |
| 2 | 5 | La saturación llega a un valor de $U_2 \simeq 40V$ |
| 2 | 2 | La saturación llega antes, cuando $U_2 \simeq 25V$ |
| 2 | 6 | La saturación llega también, pero después, cuando $U_2 \simeq 45V$ |
| 2 | 10 | El espectro sigue mejorando, la saturación llega cuando U_2 es superior a 60V. |
| 1,5 | 9 | El espectro parece bien, se ve grande y sin saturación. Los 4 picos aparecen. |

Cuadro 1: Espectros obtenidos para diferentes valores de U_1 y U_3

Después de continuar haciendo pequeñas correcciones, el mejor espectro ha sido obtenido con los valores de tensión $U_1 = (1,59 \pm 0,02)V$ y $U_3 = (9,28 \pm 0,02)V$. El espectro obtenido se representa en la figura 3, y los errores se estiman mirando las fluctuaciones con el tiempo de la tensión que nos da el dispositivo de medida.

En esta figura, los 4 picos se ven claramente, y no parece que el detector llega a su punto de saturación. Parece que los valores de U_1 y de U_3 han sido bien elegidos.

La siguiente etapa consistía en medir la tensión y la intensidad que corresponden al máximo de cada pico. Por eso, se importan los datos a Kaleidagraph, y se puede hacer una interpolación cuadrática, seleccionando los puntos cerca al máximo. Por ejemplo, en la figura 4 se pueden ver los puntos seleccionados para proceder a la interpolación del cuarto pico.

Si hacemos una interpolación cuadrática, podemos ver muy bien un máximo único y podemos determinar al ojo su valor aproximado, estimando el error que estamos comidiendo (debido a la selección del tipo de regresión, y debido al uso del ojo como instrumento de medida del máximo, por ejemplo). Los resultados obtenidos se presentan en el cuadro 2, donde la energía en eV corresponde exactamente al valor de la tensión por el factor e que aparece en la conversión entre J y eV y en la ecuación (1).

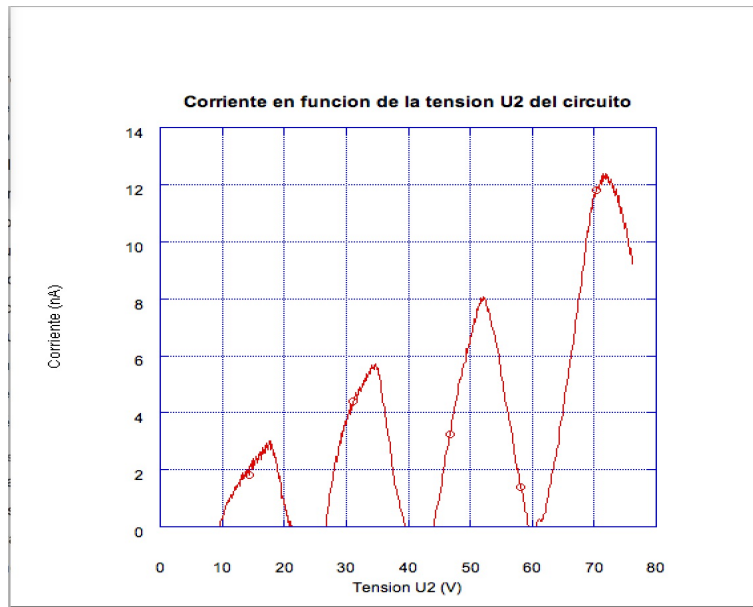


Figura 3: Corriente medida en función de la tensión U_2 aplicada el circuito.

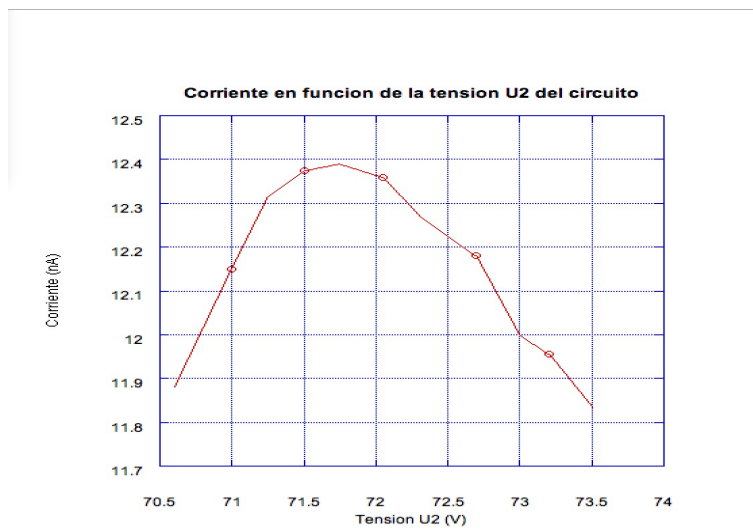


Figura 4: Puntos que forman el máximo del cuarto pico del espectro.

| Pico | Tensión maxima | Intensidad maxima | Cambio de tensión |
|--------|------------------------------|---------------------------------|----------------------------|
| Pico 1 | $(17,8 \pm 0,1) \text{ V}$ | $(3,025 \pm 0,005) \text{ nA}$ | $(17,8 \pm 0,1) \text{ V}$ |
| Pico 2 | $(34,76 \pm 0,05) \text{ V}$ | $(5,733 \pm 0,003) \text{ nA}$ | $(17,0 \pm 0,1) \text{ V}$ |
| Pico 3 | $(51,9 \pm 0,1) \text{ V}$ | $(8,07 \pm 0,01) \text{ nA}$ | $(17,1 \pm 0,1) \text{ V}$ |
| Pico 4 | $(71,8 \pm 0,1) \text{ V}$ | $(12,390 \pm 0,005) \text{ nA}$ | $(19,9 \pm 0,1) \text{ V}$ |

Cuadro 2: Posición y error estimado sobre la posición del máximo de los 4 picos del espectro.

Como ya visto antes, los valores de cambio de tensión nos indican directamente a los valores resonantes del potencial a los que la energía cinética de los electrones equivale exactamente a la energía entre dos niveles de los átomos de neón. Observamos que el cambio de tensión entre dos máximos sucesivos es más o menos constante. Esto es porque después del primer pico, si aumentamos U_2 , los electrones pueden volver a tener una energía cinética suficiente para colisiones más de una vez de manera inelástica con los átomos de neón. Esto pasa a multiples exactos de $e \cdot U_2$.

Con estos valores, se puede concluir que he verificado que los 4 primeros niveles excitados del neón tienen una energía entre 17,0 y 19,9 eV con un error relativamente pequeño.

Por fin, la última observación que se puede hacer con este dispositivo es sobre las bandas luminosas rojas-naranjas que pueden aparecer en la bombilla de neón, en función del valor de tensión de U_2 y debidas a las transiciones internas del neón. Como ya explicado en la parte teórica con mas detalles, se pueden observar transiciones de los niveles de energía más alta a los primeros niveles excitados que se acompañan de la emisión de un fotón de longitud de onda fija.

Se pueden ver hasta 4 bandas, en 4 lugares distintos pero que tienen el mismo color. La primera banda aparece cuando $U_2 \simeq 34\text{V}$, la segunda cuando $U_2 \simeq 48\text{V}$, la tercera cuando $U_2 \simeq 63\text{V}$ y por fin se puede ver la cuarta banda cuando $U_2 \simeq 79\text{V}$, aunque esta banda sea muy débil. En la parte siguiente (cuestión 1) se estudiará un poco porque se pueden ver 4 bandas, y porque la luz emitida aparece en forma de bandas.

4. Cuestiones

4.1. Cuestión 1

La luz aparece en formas de bandas porque cada plano corresponde a una zona donde la diferencia de potencial tiene un valor fijo. Hay una relación clara entre el número de bandas y de picos observados en el espectro (cuatro), porque tienen el mismo origen. Las bandas se deben a la emisión de fotón que sigue las desexcitaciones dentro del átomo de neón, y este fenómeno corresponde a una caída de la intensidad de corriente, que se observa en el espectro.

4.2. Cuestión 2

Cuando la corriente presenta su primer valle, la zona del tubo en la cuál se producen la mayor parte de las excitaciones corresponde a la zona donde los electrones se frenan. Esto se explica porque en la primera valle, el valor del potencial U_2 todavía es pequeño y entonces la energía cinética de los electrones queda pequeña también. No pueden llegar a una gran distancia con una energía pequeña, y entonces le mayoría se para rápidamente.

4.3. Cuestión 3

Para impactar el colector, los electrones tienen que tener una energía suficiente para estar capaz de atravesar la zona de potencial U_3 que los frena. El valor de energía cinética mínima para llegar al detector se puede escribir en términos matemáticos, por la relación siguiente :

$$E_{cin}^{min} = e \cdot V_{frenado} = e \cdot U_3 \quad (3)$$

4.4. Cuestión 4

Con la temperatura, la densidad de vapor de neón puede cambiar. Esto afecta por supuesto a los resultados obtenidos, porque si hay menos átomos de neón presente en el tubo, la probabilidad de ver colisiones entre átomos y electrones disminuye. En este caso, la probabilidad de que los electrones cedan una energía grande a los átomos disminuye también, y más átomos tienen bastante energía para poder llegar al colector. Esto resulta en una subida de la intensidad de la corriente medida, y al final tiene el mismo resultado que una disminución del potencial de frenado U_3 .

4.5. Cuestión 5

La caída de corriente que aparece después del segundo pico se debe a dos excitaciones de los primeros estados excitados del neón, y esto se ve porque el segundo pico aparece a un valor de potencial U_2 que vale exactamente el doble del valor del potencial en el primer pico. Sigue así hasta el cuarto pico.

4.6. Cuestión 6

Como siempre en los experimentos, la práctica no corresponde exactamente a la teoría. En este caso, existe una probabilidad de que algunos electrones que tienen una energía perfecta para excitar un átomo de neón no colisionen con ningún átomo, y que lleguen al colector directamente, lo que se traduce por la aparición de una corriente eléctrica que no se debería ver. Esta probabilidad depende de muchos parámetros (como la densidad de neón y entonces la temperatura, la distancia entre las rejillas o de la energía de los electrones) y contribuye en la bajada suave de la corriente.

4.7. Cuestión 7

Los electrones que no pueden superar el potencial de frenado no pueden llegar al colector por definición del problema, y se quedan entonces simplemente en la zona donde se han parado. Una vez perdida toda su energía cinética, ya no pueden mover, y se quedan retenidos en la rendija.

5. Conclusión

Durante esta práctica, repetimos la experiencia de Frank y Hertz que permitió en 1914 demostrar por primera vez la existencia de niveles cuantificados dentro de los átomos. Por eso, estudiamos un dispositivo experimental lleno de neón y de electrones de energía variable, y estudiamos la corriente que sale del dispositivo, después de aplicar un potencial de frenado para seleccionar un umbral de energía mínima.

Se observan de esta manera las caídas de corriente eléctrica que corresponden a valores determinadas de energía de electrones, por las cuales colisiones inelásticas pueden ocurrir entre los electrones y los átomos de neón.

Pudimos determinar que los primeros niveles excitados del neón tienen que estar a una energía entre $(17,0 \pm 0,1)$ y $(17,8 \pm 0,1)$ eV, lo que corresponde más o menos al valor conocido hoy en día (cf. figura 2). Parece que el cuarto pico observado corresponde a una excitación a un nivel del tipo 3p, que tiene una energía un poco más grande (medido como igual a $19,9 \pm 0,1$ eV).

También se observaron las bandas luminosas naranjas que corresponden a una excitación de un electrón de neón a un nivel excitado seguido por la emisión de un fotón y de la bajada a los primeros niveles excitados del neón.