

Medición de la constante de Planck y la función trabajo del potasio mediante el efecto fotoeléctrico

Fernández Casafuz, Agustina; Martínez, Luciana; Nuñez Barreto, Nicolás

Laboratorio 5 - Dpto. de Física - FCEyN - UBA

Abril 2015

Resumen

Se estudió el efecto fotoeléctrico en un sistema ánodo-cátodo al cual se lo iluminó con leds azul, blanco y rojo. Se midió la fotocorriente con un Lock-in en función del voltaje aplicado al fototubo. Obteniendo los potenciales de retardo V_0 en función de las frecuencias de la luz, se obtuvo la constante de Planck $h = (4 \pm 1)10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s}$ y $h = (3 \pm 1)10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s}$ con dos criterios diferentes al obtener V_0 . Los valores se superponen con el valor tabulado $h = 4,1 \cdot 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s}$. Se llegó a una frecuencia de corte, a partir de la cual no hay efecto fotoeléctrico, y con la misma se obtuvo la función trabajo ϕ del potasio (material del cátodo) $\phi = (1,7 \pm 0,1) \text{ eV}$, siendo $2,2 \text{ eV}$ el valor tabulado para la misma. Para obtener distintas frecuencias se utilizó un monocromador junto con los leds. Previamente se caracterizó al instrumento utilizando fuentes con líneas espectrales bien definidas, como Kriptón e Hidrógeno. Se discute cómo afecta la abertura de salida del monocromador a las mediciones, ya que esta deja pasar más de una longitud de onda, lo cual dificulta la relación V_0 -frecuencia incidente y el encuentro de la frecuencia de corte.

1. Introducción

El efecto fotoeléctrico, observado por Heinrich Hertz en 1887 y descrito finalmente por Albert Einstein, lo cual le valdría el premio Nobel en 1921, consiste en la emisión de electrones (llamados fotoelectrones) de un material al ser éste iluminado con radiación electromagnética.

Los fotones inciden con energía $h\nu$, es decir, proporcional a la frecuencia. Dicha energía se transfiere a los electrones del material incidido (cátodo). Un esquema se aprecia en la figura 1.

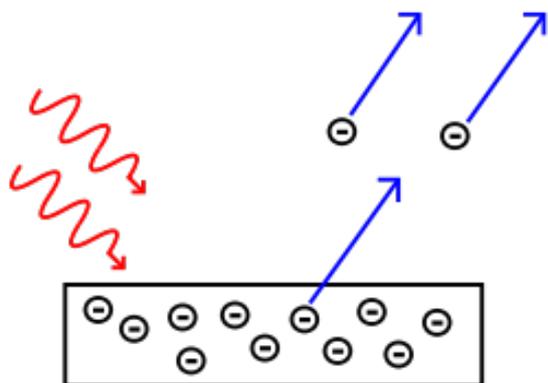


Figura 1: Esquema teórico del efecto. Los electrones son emitidos con energía proporcional a la frecuencia de la luz.

Para que los electrones sean extraídos de éste,

será necesario entregar una energía mínima. Dicho valor, ϕ , se conoce como la **función de trabajo** del sólido, y representa el trabajo necesario para llevar un electrón hasta la superficie del material con energía cinética nula. Si la energía entregada es mayor a éste valor, se producirá la emisión fotoeléctrica y el electrón será liberado de la superficie.

Si se enfrenta un ánodo al cátodo, y se aplica sobre éstos una diferencia de potencial V negativa, dicho efecto se cancelará ya que los electrones se verán frenados por éste. Un diagrama completo de esto se aprecia en la figura 2.

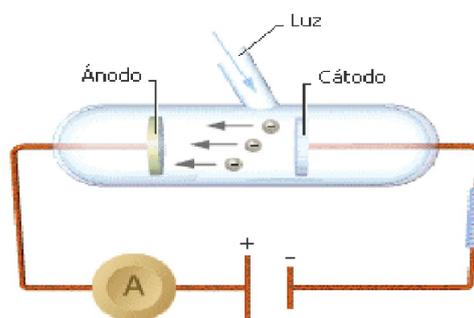


Figura 2: Ilustración del efecto, en el cual se cierra el sistema ánodo-cátodo mediante un circuito al que se le aplica un potencial de frenado.

Si se varía dicho potencial, se encontrará cierto V_0 a partir del cual el efecto será visible. Ésto es representado por la ecuación 1.

$$eV_0 = h\nu - \phi \quad (1)$$

Por lo cual, si se determina el potencial mínimo para el cual el efecto es observable (V_0) en función de la frecuencia de la onda incidente (por ejemplo, una fuente monocromática en donde ν está bien definida), es posible determinar la constante de Planck y ϕ . El problema es la existencia de un potencial adicional de contacto comparable con el potencial aplicado, lo cual, sumado a V_0 , correría la ordenada al origen y dificultaría la determinación de ϕ .

Es sabido además que existe una frecuencia mínima ν_{min} para la cual, si se incide con una frecuencia menor, no habrá circulación de corriente en el circuito, sin importar el potencial adicional. Por lo cual se puede plantear la ecuación 2 para la determinación de ϕ [2].

$$h\nu_{min} = \phi \quad (2)$$

Mediante estas dos maneras, es posible entonces determinar la constante de Planck h y la función trabajo ϕ , para su posterior comparación con valores teóricos.

2. Desarrollo experimental

El objetivo de la experiencia consiste en medir la fotocorriente en un fototubo de potasio, para así determinar h y la función trabajo ϕ del mismo. Para ello se utilizaron distintas fuentes de luz provenientes de leds de distintos colores.

Para determinar la longitud de onda λ correspondiente se utilizó un monocromador de prismas Winkel-Zeiss Gottingen Nr. 516. El monocromador recibe la luz y la hace pasar por dos prismas a distintos ángulos, regulables con una perilla. De esta manera se selecciona una longitud de onda λ del espectro incidente con la ayuda de un visor que marca un error de $10nm$. El monocromador también cuenta con dos rendijas regulables a la entrada y a la salida. La rendija de salida sirve para variar la resolución: mientras más abierta esté más luz deja pasar. Esto implica que la luz de salida tiene mayor intensidad, pero un mayor rango de longitudes de ondas no filtradas.

En primer lugar se realizó una calibración del monocromador con la rendija de salida fija, utilizando fuentes de luz con longitudes definidas, como es el caso de los espectros de emisión de ciertos gases. Se usaron entonces distintas lámparas de descargas de gases (sodio, hidrógeno, neón y kryptón) de las cuales se conocen las líneas espectrales[3]. Utilizando el esquema descrito en la figura 3, se midió la intensidad a la salida del monocromador, para las distintas longitudes de onda que marcaba el visor, con un fotodiodo conectado a un osciloscopio Tektronix TDS1002B.

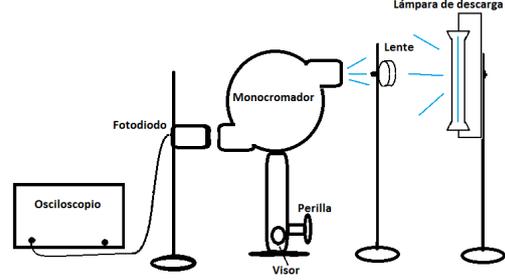


Figura 3: Dispositivo experimental para calibrar el monocromador.

Se registraron los valores de λ del visor para los cuales la intensidad era máxima en la pantalla del osciloscopio y luego se los comparó con los tabulados en un ajuste lineal para ver qué relación tienen.

Luego se usaron tres leds, blanca, azul y roja como fuentes de luz, y utilizando el monocromador, se filtraron longitudes de ondas incidentes sobre el fototubo. El dispositivo experimental se puede observar en la fig.4

Se midieron las fotocorrientes utilizando un amplificador Lock-in Stanford SR510 conectado a la PC mediante una placa GPIB. Desde el Lock-in también se controló el voltaje del cátodo y ánodo del fototubo. La adquisición fue con Labview; desde el mismo era posible realizar barridos de voltaje o aplicar voltajes fijos. En el programa podíamos ver el voltaje de entrada y de salida (proporcional a la fotocorriente) y configurar al Lock-in.

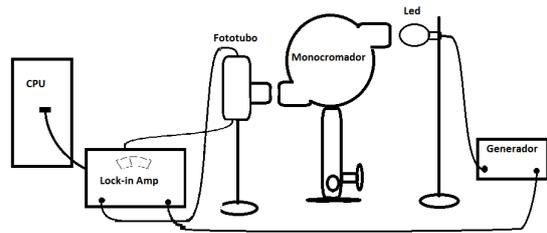


Figura 4: Esquema del dispositivo experimental para medir las fotocorrientes del tubo de potasio.

La señal de los leds fue modulada con una oscilación sinusoidal de $f = 2012Hz$ y $V_{p ap} = 5V$ con un offset de $V = 2,5V$ controlada por un generador de funciones Tektronix AFG3021D. Esto permite eliminar el ruido de línea a la hora de medir las fotocorrientes, con el amplificador Lock-in, ya que se dispuso que la referencia del mismo sea la señal del generador. Era importante que esta frecuencia no fuera un múltiplo de la frecuencia de línea (50 Hz)

para que el Lock-in no amplifique también al ruido, además de ser mucho mayor. Otro cuidado a tener en cuenta es que las leds realmente se estuvieran modulando con la frecuencia elegida. Como las leds se tratan de diodos se agregó un offset a la señal de forma que la polarización fuera siempre la misma y no haya momentos de intensidad nula.

Por otro lado hubo que ajustar manualmente en fase el Lock-in con la señal del generador para maximizar la señal de salida. Para esto, se busca dónde la señal de salida es máxima, dado un potencial fijo. Como un potencial máximo significa menos sensibilidad, se buscó el punto en que están en contrafase, es decir donde la señal sea mínima pero al medir podemos optar por una mejor sensibilidad. A esa fase se le sumaron 90° para llegar a la fase óptima donde la señal de salida fuera máxima.

Se configuró el programa de Labview con un tiempo de integración de 30 ms, con 10 veces más de tiempo entre cada medición, a modo de estabilizar la señal entre mediciones.

Finalmente medimos la fotocorriente para varias longitudes de onda, realizando un barrido de diferencia de voltaje en el cátodo y ánodo entre $-10V$ y $10V$. Como el objetivo era encontrar los potenciales mínimos donde ocurría el efecto, se modificaba el rango para la zona de interés.

En principio con el monocromador, teniendo una led blanca teóricamente era posible obtener todo el espectro visible, pero como las leds tienen distintas intensidades para cada longitud de onda, se decidió solo medir las longitudes más intensas. Luego con las leds azul y roja se pudieron barrer más longitudes en cada una.

3. Resultados y análisis

3.1. Calibración del monocromador

Utilizando lámparas con espectro teórico conocido, se compararon los valores de las longitudes de ondas teóricas con las que marcaba el visor del monocromador. Se obtuvo la figura 5

El error asignado a longitud de onda experimental es de $10nm$, siendo ésta la división mínima del monocromador. Se realizó un ajuste lineal con r -square $0,99$, obteniéndose una pendiente de $(1,01 \pm 0,04)$ y una ordenada al origen de $(11 \pm 25)nm$. Esto quiere decir que el monocromador marca $11nm$ más de lo que corresponde, que de todas formas ya estaban contemplados en el error inicial. Por otro lado el error $25nm$ marca una dispersión de la longitud de onda.

Sin embargo algo que no se tuvo en cuenta en la calibración, fue que las líneas del espectro de estos gases están muy definidas porque están discretizadas, a diferencia del espectro de las leds que se trata de un continuo. Por lo tanto, de acuerdo a la

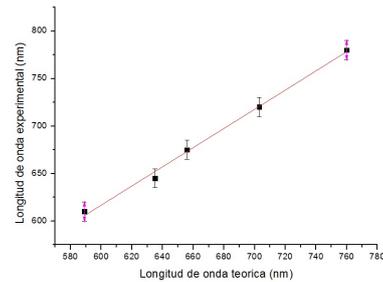


Figura 5: Longitud de onda medida con el monocromador en función de la longitud de onda de los máximos de intensidad del espectro teórico para lámparas de descargas de sodio, hidrógeno, neón y kriptón.

resolución del monocromador, para el caso de los gases, las frecuencias se filtran mejor que para las leds donde se deja pasar un ancho de frecuencias. Desde la calibración que hicimos podemos ver como mide para líneas del espectro discretizadas, pero no podemos dar certeza de que longitud de onda se mide cuando se incide un espectro continuo de leds, análisis que se puede complementar utilizando un espectrómetro. Para la experiencia, vamos a considerar que el visor indica la frecuencia central, y que la fotocorriente, aunque esté generada por un ancho de frecuencias, corresponde a un V_0 de la frecuencia central.

3.2. Efecto fotoeléctrico: obtención de la constante de Planck h y función de trabajo ϕ

Comenzamos la experiencia midiendo la fotocorriente para una led azul, modificando la longitud de onda con el monocromador. En la figura 6 mostramos la medición con un ajuste polinómico de grado 10.

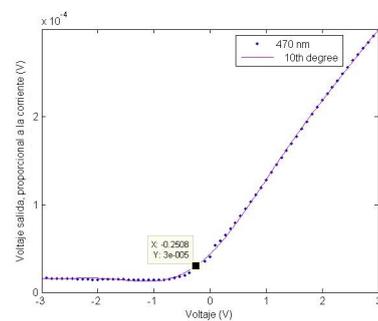


Figura 6: Voltaje proporcional a la corriente en función del voltaje aplicado para una longitud de onda de 470 nm. Conversión de unidades para eje y : La corriente tiene valores entre 0 y 200 pA.

De la figura 6 obtuvimos el potencial retardador V_0 , es decir el potencial mínimo para el cual se ob-

serva la fotocorriente. Como vemos en la figura, este cambio no es abrupto por lo que la determinación del V_0 puede depender del criterio. Para esto se utilizaron dos criterios:

- Primer criterio: Asumiendo que el primer tramo la fotocorriente es constante, se mide con el cursor el primer punto del voltaje donde la fotocorriente muestra un aumento.
- Segundo criterio: Realizando un ajuste polinómico de grado diez de la corriente, se mide el voltaje donde la derivada segunda de la corriente es máxima. Este criterio no asume a la fotocorriente constante en el primer tramo, sino que se fija el punto donde la variación de las pendientes (derivada primera) es máxima. A continuación en la figura 7 puede verse el máximo de la derivada segunda.

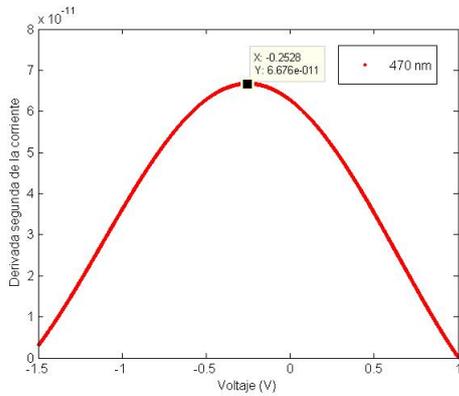


Figura 7: Derivada segunda de la corriente en función del voltaje aplicado para una longitud de onda de 470 nm.

Como el máximo presenta un ancho, establecemos que V_0 está entorno a $-0,25V$. Cabe remarcar que la derivada fue realizada con el Matlab de forma numérica con valores discretos de la corriente, pero el ajuste polinómico de grado diez fue necesario para obtener más puntos entorno al V_0 . Es decir que si hubiéramos medido mas puntos no necesitaríamos realizar un ajuste polinómico y podríamos hacer la derivada segunda numéricamente de forma directa. Entonces con este criterio, debemos tener en cuenta el error al ajustar con el polinomio y el ancho de la derivada segunda.

En la figura 6, indicamos el $V_0 = -0,25V$ con este segundo criterio. Podemos ver que ese punto no es igual al primer criterio, ya que la fotocorriente comenzó a aumentar antes en $V_0 = -0,7V$, por lo que es de esperar que la relación de los V_0 y las frecuencias f dependa del criterio elegido. En ambos casos se tomo un error de $0,4V$, para contemplar los dos criterios.

A continuación mostramos los ajustes obtenidos de V_0 en función de las frecuencias f para ambos

criterios. Las frecuencias fueron obtenidas por la relación $\lambda \cdot f = c$, siendo c la velocidad de la luz en el vacío.

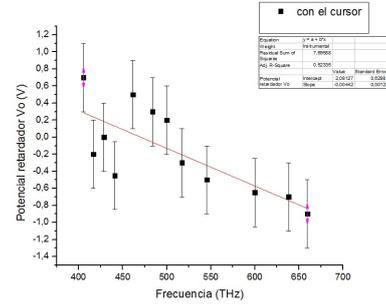


Figura 8: Potencial retardador V_0 en función de las frecuencias para el primer criterio.

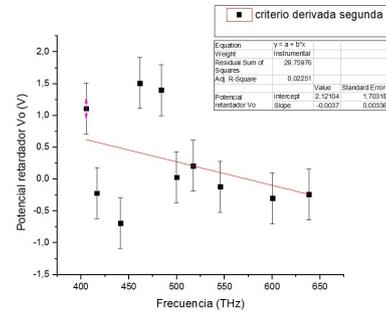


Figura 9: Potencial retardador V_0 en función de las frecuencias para el segundo criterio.

Para las dos figuras, se realizó un ajuste lineal de forma de obtener h por la ecuación 1. En ambos casos puede verse que el ajuste no pasa por todos los puntos, sobre todo para las frecuencias mas bajas (primeros cinco puntos), correspondientes al led rojo. Como pasa para ambos criterios, creemos que esto no solo puede tratarse de un error a la hora de analizar los V_0 , sino a la hora de etiquetar las frecuencias; discutiremos sobre esto más adelante.

Para el segundo criterio, realizamos nuevamente un ajuste en la figura 10 considerando solo los V_0 que ajustaban a la recta, es decir sin tomar los valores del led rojo.

Los parámetros obtenidos del ajuste están en la tabla 1, siendo h el valor de la pendiente.

Criterio	h	ord. de origen/ e
Cursor	$(4 \pm 1)10^{-15} eV \cdot s$	$(-2, 1 \pm 0, 6)eV$
Der. segunda	$(4 \pm 3)10^{-15} eV \cdot s$	$(-2 \pm 2)eV$
Der. segunda 2	$(3 \pm 1)10^{-15} eV \cdot s$	$(-1, 6 \pm 0, 6)eV$

Cuadro 1: Valores obtenidos por el ajuste lineal para ambos criterios, para el caso de la derivada tomando menos frecuencias para el segundo ajuste. En las figuras los parámetros tiene los signos cambiados por la carga del electrón.

calcula la función trabajo del potasio, obteniéndose $\phi = (1,7 \pm 0,1)eV$. El valor tabulado para ésta es de 2,2 eV, por lo que el valor hallado es del orden de magnitud del tabulado, pero su rango no se solapa. Es posible que la abertura haya jugado un papel extra al dejar pasar más de una longitud de onda, más precisamente un cierto rango. Dicha abertura no se varió durante toda la experiencia, ya que achicarla haría que la intensidad de luz recibida sea menor, por lo que se decidió trabajar siempre con la misma abertura. Una posible ampliación del experimento es el estudio del efecto con la variación de la misma. Lo ideal sería cerrarla lo más posible colocando leds más potentes a modo de no perder intensidad. También es posible el uso de un espectrómetro para hallar un error extra en la longitud de onda de salida del monocromador.

Sin embargo, basándonos en un estudio previo [4] en el cual se midió el ancho espectral de un láser de He-Ne (el cual posee una λ bien definida en 632,8 nm), allí se halló un ancho espectral de aproximadamente 80 nm. Si bien desconocemos si la abertura fue la misma o no, esto denota el gran efecto sobre los resultados que posee ignorar la abertura del monocromador, encontrando intensidad en rangos por fuera del espectro real de la fuente. Creemos, por ende, que visualizamos intensidad en rangos de longitudes de onda en los cuales es posible que el led no estuviera emitiendo.

Adicionalmente, en el gráfico se aprecia, además, que luego de 750 nm la fotocorriente es menor al valor con el led apagado. Pero existe un efecto adicional: a medida que la longitud de onda aumenta, el valor de la fotocorriente decrece. Esto puede deberse a corrientes espurias generadas por potenciales que se generan por depósito de potasio del cátodo en el ánodo. De todas formas esto no afecta a los cálculos de h y ϕ donde trabajamos para longitudes de onda mayores.

Otra fenómeno para notar es que para la longitud de onda donde se observa el efecto fotoeléctrico (740 nm), a pesar de estar el voltaje fijo, la fotocorriente muestra un aumento con el tiempo. Esto podría deberse a un efecto capacitivo de las conexiones. Como realizamos esta medición solo para la longitud de onda de 740 nm para tiempos cortos no podemos afirmar una dependencia de este fenómeno con la longitud de onda ni con el tiempo. Suponemos que al realizar los barridos de voltaje el fenómeno no es apreciable porque el voltaje fijo por segundo tiene un tiempo de duración muy corto y no deja estabilizar al sistema.

4. Conclusiones

Medimos h (constante de Planck) y ϕ del potasio, mediante el estudio del efecto fotoeléctrico en un par ánodo-cátodo dentro de un fototubo, al cual

iluminamos con luz previamente pasada por un monocromador. Éste debía dejar pasar idealmente sólo la longitud de onda especificada en su visor, pero la realidad es que deja pasar un determinado espectro que varía con la abertura de salida. Idealmente, ésta debe ser lo más chica posible, pero al reducirse ésta se reduce la intensidad de salida, lo cual hace que el efecto sea menos notorio y haya más ruido en la medición. Se trabajó durante todo el experimento con el mismo valor de abertura, el cual, a pesar de que se obtuvieron valores del mismo orden de magnitud de los valores tabulados, puede achicarse, lo cual mejoraría los resultados. Para obtener h nos basamos en la dependencia lineal entre los potenciales de retardo V_0 y la frecuencia de la luz. Para encontrar V_0 establecimos dos criterios diferentes. El primer criterio, asumiendo que la fotocorriente era constante para $V < V_0$, se midió el primer valor del voltaje aplicado donde la fotocorriente mostraba una diferencia. En este caso se obtuvo $h = (4 \pm 1)10^{-15}eV.s$, siendo la constante de Planck tabulada $h = 4,1,10^{-15}eV.s$. El segundo criterio se fija donde la derivada segunda es máxima, es decir donde la variación de las pendientes es máxima. La derivada segunda se obtuvo numéricamente, pero como teníamos pocos puntos cercanos a V_0 se realizó un ajuste polinómico grado diez de donde se obtuvieron más datos. En este caso $h = (3 \pm 1)10^{-15}eV.s$, el error proviene principalmente a la desviación de los V_0 obtenidos, esto puede deberse a que el criterio no es óptimo pero también al ajuste polinómico que tuvo que hacerse, que aunque el mismo sea de grado diez, no ajusta igual para todas las longitudes de onda. Una forma de verificar si este criterio sirve, es tomar más puntos en un rango cercano al V_0 para poder realizar la derivada numérica de forma directa sin tener que pasar por un ajuste. Para este criterio los V_0 ocurren aproximadamente 0,4 V más grandes que los V_0 determinados por el primer criterio, por lo que se uso este valor como error en el ajuste. Para ambos criterios hay que tener en cuenta que la frecuencia de luz puede estar mal etiquetada para ciertos casos. Basándonos en la experiencia de grupos anteriores con la frecuencia de corte, encontramos que en nuestra configuración seguimos observando el efecto fotoeléctrico hasta 740 nm máxima. De acuerdo a la calibración que realizamos previamente, es posible que este valor tenga un error de 25 nm, pero continua sin solaparse con el valor tabulado por lo que creemos que teníamos la rendija demasiado abierta. Con nuestra frecuencia de corte la función de trabajo es $\phi = (1,7 \pm 0,1)eV$, mientras que el tabulado $\phi = 2,2eV$.

Referencias

- [1] Constantes tabuladas. URL [http : //hyperphysics.phy – astr.gsu.edu/hbasees/tables/photoelec.html](http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/tables/photoelec.html).
- [2] Guía de efecto fotoeléctrico. URL [http : //users.df.uba.ar/bragas/Labo5_1er2011/fotoelec.pdf](http://users.df.uba.ar/bragas/Labo5_1er2011/fotoelec.pdf)
- [3] Líneas espectrales para distintos gases. URL [http : //hyperphysics.phy – astr.gsu.edu/hbasees/quantum/atspect.html](http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/quantum/atspect.html).
- [4] M. Cóppola, Máximo; Santaya. Cuaderno de efecto fotoeléctrico, pág 146.