

Efecto fotoeléctrico

Diego Hofman y Alejandro E. García Rosselli

Departamento de Física, Laboratorio 5, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales,
Universidad de Buenos Aires

A lo largo de este trabajo se estudió el efecto fotoeléctrico y fue posible calcular la constante de Planck a través de la medición directa de la corriente entre los electrodos de un fototubo. A su vez luego de determinar el valor de h se procedió a calcular el trabajo necesario para extraer un electrón del cátodo, es decir, la energía necesaria para llevar un electrón hasta la superficie del cátodo con energía cinética nula..

1. Introducción

Cuando un fotón incide sobre un cátodo de material fotosensible, éste emite un electrón con una energía cinética que depende de la frecuencia del fotón y del material del cátodo. Este proceso se denomina emisión fotoeléctrica y montando el experimento que se esquematiza en la siguiente figura es posible estudiarlo.

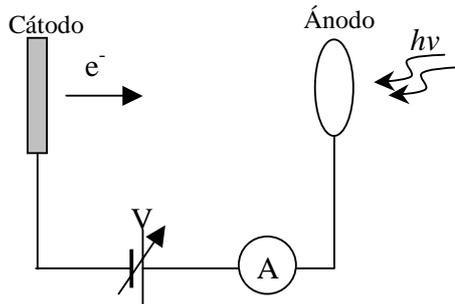


Fig1. Diagrama esquemático del experimento para estudiar el efecto fotoeléctrico.

El efecto fotoeléctrico es una de las formas de interacción entre la radiación y la materia. Según la teoría cuántica enunciada por Einstein en 1905 sobre este efecto cuando un fotón con energía $h\nu$ interactúa con un electrón, el primero impartiría al electrón una energía igual a la que posee. Este enunciado implica la consideración de la luz como un chorro de partículas cada una con energía $h\nu$. De esta manera el fenómeno no dependería de la intensidad de la luz, o sea que sin importar la potencia de la fuente lumínica, si los fotones que emite no tienen la energía necesaria para liberar electrones individualmente, no se observará corriente alguna entre los electrodos.

Si la energía del fotón es mayor que el trabajo necesario para llevar al electrón hasta la superficie del cátodo, el electrón puede escapar

con energía cinética no nula y trasladarse hasta el ánodo. La energía del electrón satisface:

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

Donde T es la energía cinética del electrón y ϕ es el trabajo necesario para llevar el electrón hasta la superficie del cátodo.

Como la energía cinética que adquiere el electrón es proporcional a la diferencia de potencial entre los dos electrodos, entonces podemos expresar la ecuación (1) de esta otra forma:

$$e.V = h\nu - \phi \quad (2)$$

Si entre el ánodo y el cátodo ponemos una diferencia de potencial V negativa (potencial frenador) entonces existirá un potencial V_0 tal que si $V < V_0$ el electrón no llegará al ánodo y no mediremos corriente en el amperímetro. Ese potencial V_0 satisface:

$$e.V_0 = h\nu_{\min} - \phi \quad (3)$$

$$V_0 = \frac{h}{e} \nu_{\min} - \frac{\phi}{e} \quad (4)$$

En la ecuación (4) se puede observar que realizando mediciones de V_0 y de ν_{\min} es posible determinar el valor de h/e y de ϕ/e .

2. Arreglo experimental

Para poder medir la fotocorrientes fue necesario utilizar un amplificador Lock-In^[1]. En la figura 2 se puede observar un esquema del arreglo experimental utilizado.

se procedió a calibrar dicha escala sustituyendo la lámpara dicróica por una lámpara de mercurio, primero y una de sodio después, cuyos espectros de emisión eran conocidos. Con ambas medidas fue posible realizar el siguiente gráfico.

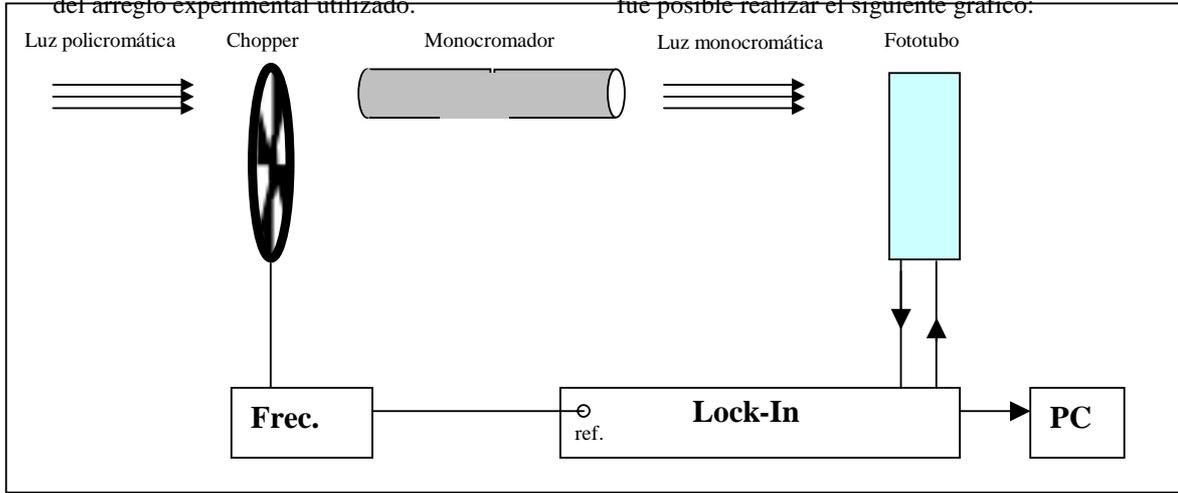


Fig. 2. Arreglo experimental utilizado para el estudio del efecto fotoeléctrico. La luz incide sobre un disco metálico con aberturas (chopper) que gira con velocidad angular constante ω_0 controlada por un frecuencímetro. Luego se la hace pasar por un monocromador que permite seleccionar la longitud de onda de la luz que incidirá sobre el fototubo donde ocurre el efecto. Luego la señal de salida del fototubo se la amplifica con un Lock-In que amplifica sólo lo que esta a frecuencia ω_0 . Finalmente la salida del Lock-In RS232 se conecta a una PC

La luz proveniente de una lámpara dicróica (con un espectro continuo) se la hace pasar por un chopper. Esto hace que la fotocorriente esté modulada a la misma frecuencia de giro del disco (ω_0). Esta frecuencia está controlada por un frecuencímetro que provee al Lock-In de una frecuencia de referencia.

Luego de pasar por el chopper, se hace pasar a la luz por un monocromador que permite seleccionar la longitud de onda deseada para que incida sobre el fototubo. En el fototubo es donde ocurre el efecto fotoeléctrico y de donde se extrae una señal proporcional a la corriente que es amplificada por el amplificador Lock-In.

A la salida del Lock-In se conecta una PC por medio de la interfase RS232 de manera que desde la computadora es posible adquirir la corriente en función del tiempo. Es también posible variar el potencial de retardo entre el cátodo y el ánodo desde la PC mediante una salida analógica del Lock-In

3. Resultados

El monocromador poseía una escala graduada para seleccionar la longitud de onda de la luz a la salida del mismo. En un primer lugar

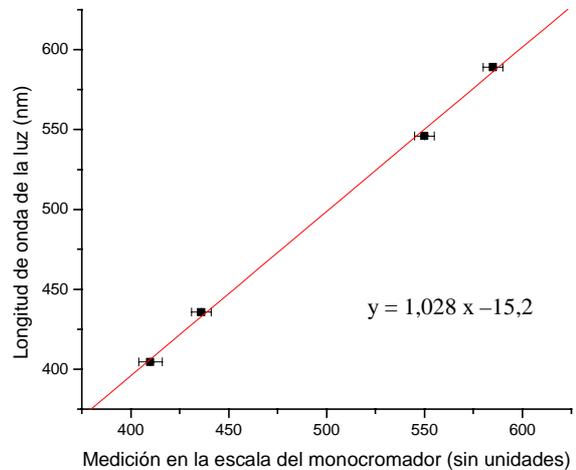


Fig 3. Curva de calibración del monocromador

En el fito lineal de la curva el valor del parámetro R obtenido fue de 0,9992.

Los valores utilizados para realizar la calibración se muestran en la siguiente tabla.

Fuente	Color	λ (nm)
Mercurio	Verde	546,072
Mercurio	Índigo	435,83
Mercurio	Violeta	404,67
Sodio	Amarillo	589,59

Tabla 1. Descripción de los picos de emisión más intensos del mercurio y del sodio utilizados en la calibración.

En las siguientes mediciones el objetivo fue determinar el valor de V_0 (potencial retardador) para el que comenzaba a apreciarse el efecto fotoeléctrico para cada longitud de onda. Se realizaron una 40 mediciones para longitudes de onda desde 400nm hasta 800nm utilizando la lámpara dicróica como fuente lumínica. En todas las mediciones se obtuvieron gráficos similares al siguiente:

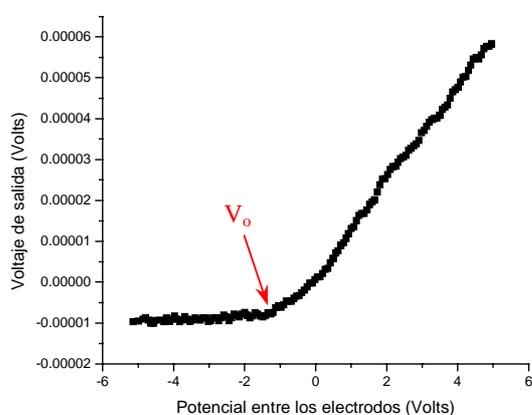


Fig. 4 Voltaje de salida vs. Voltaje entre los electrodos para una luz incidente de 430 nm

En esta figura se muestra un gráfico del voltaje medido en función del potencial retardador para fotones con 430 nm de longitud de onda. Puede apreciarse que para los valores mas negativos del potencial retardador el valor de la señal de salida se mantiene constante hasta que llega a un valor por encima del cual la señal aumenta con un cambio en la pendiente apreciable. Este es valor del potencial de retardo V_0 tal que debajo de ese valor, el efecto no ocurre si no se altera la frecuencia de los fotones incidentes.

El criterio utilizado para determinar el valor de V_0 fue el siguiente: Se realizó un fiteo lineal abarcando a todos los puntos en los que se observa que V se mantiene constante y luego se realizó un fiteo polinómico (de grado 9) para todos los puntos de la curva. Se consideró a V_0 como la abscisa para la cual las curvas de ambos fiteos se intersectan.

Por otra parte, las intersecciones entre las bandas de predicción fueron consideradas como

criterio para determinar el error en la medición de V_0 .

En la siguiente figura se muestra para la misma curva mostrada en la figura 4 los dos fiteos explicados anteriormente:

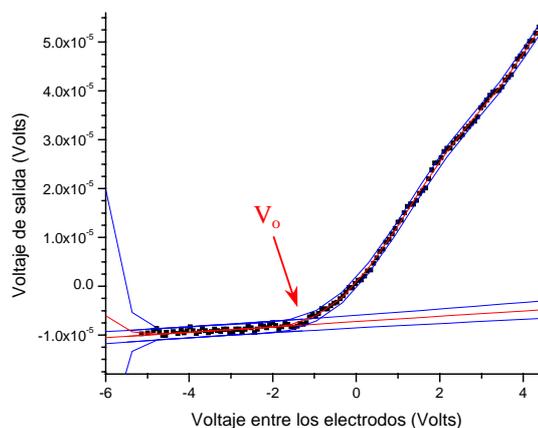


Fig.5 Fiteo lineal parcial y polinómico total para la curva mostrada en la figura 4 junto con sus líneas de predicción

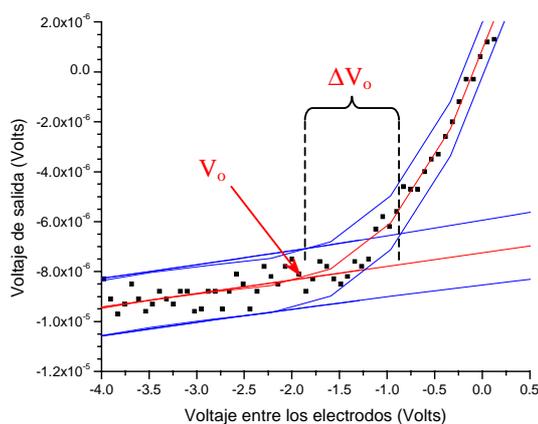


Fig.6 Ampliación de la región de interés de la figura 5 en la que se observa la intersección del fiteo lineal junto con el polinómico y el criterio utilizado para determinar el error en la medición de V_0

Para cada una de las frecuencias analizadas entre los 400 nm y los 800 nm, en saltos de a 10 nm aproximadamente se determinó el valor de V_0 y luego se pudo obtener el gráfico que se muestra en la figura 7 que corresponde a la fórmula (4) y de cuyo fiteo lineal se obtuvo una pendiente que resulta ser el cociente entre h y e .

El valor fue el siguiente:

$$\left(\frac{h}{e}\right)_{\text{medido}} = (-3,4 \pm 0,7) \cdot 10^{-15} \text{ J}\cdot\text{s}/\text{C} \quad (5)$$

$$\left(\frac{h}{e}\right)_{\text{teórico}} = -4,135 \cdot 10^{-15} \text{ J}\cdot\text{s}/\text{C} \quad (6)$$

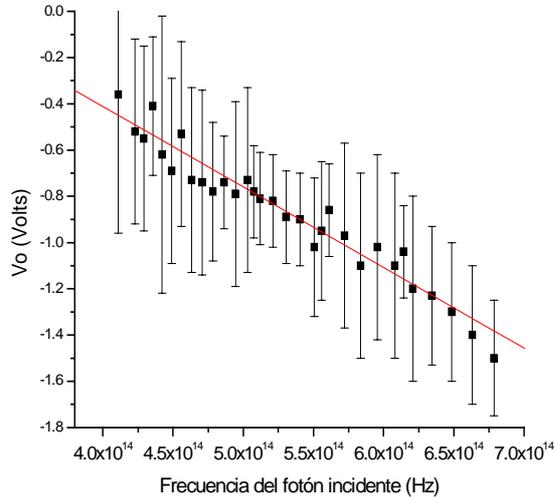


Fig. 7: V_o vs. frecuencia del fotón incidente. El ajuste lineal se obtuvo con un valor del parámetro $R=0,96$

Considerando a la carga del electrón como $1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ C}$; el valor de h obtenido fue:

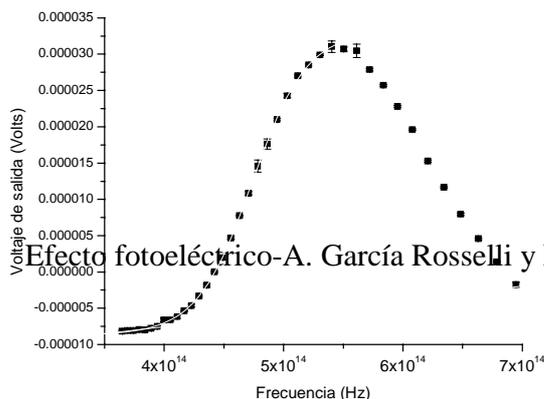
$$h = (5,4 \pm 1,1) \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s} \quad (7)$$

Una vez determinado el valor de h se procedió a tomar otra serie de mediciones con el objetivo de determinar el valor de ϕ , el trabajo necesario para llevar al electrón hasta la superficie del cátodo.

Estas nuevas mediciones se realizaron manteniendo el potencial entre los electrodos fijo en un valor de 0V . De esta manera, variando la frecuencia de los fotones incidentes con el monocromador resulta posible determinar la frecuencia mínima (ν_{min}) en la que comienza a circular corriente dentro del fototubo. Para ν_{min} podemos plantear la siguiente ecuación:

$$h\nu_{\text{min}} = \phi \quad (8)$$

La curva obtenida fue la siguiente:



En la figura 8 puede apreciarse como para las frecuencias más bajas, la corriente dentro del fototubo se mantiene constante y una vez alcanzado un determinado valor, la señal a la salida comienza a subir.

Para determinar el valor de la frecuencia en la que la señal comienza a subir se realizó un fiteo lineal de la primer parte de la curva obtenida (que ajusto con un valor del coeficiente R de $0,93$) y luego un fiteo sigmoideal a toda la subida de la curva obtenida. El fiteo sigmoideal ajustó con un valor de Chi^2 de $0,995$.

El valor de ν_{min} se consideró como el valor en el que las dos curvas se separan en forma análoga a lo explicado anteriormente.

Ambos fiteos se muestran en la siguiente figura:

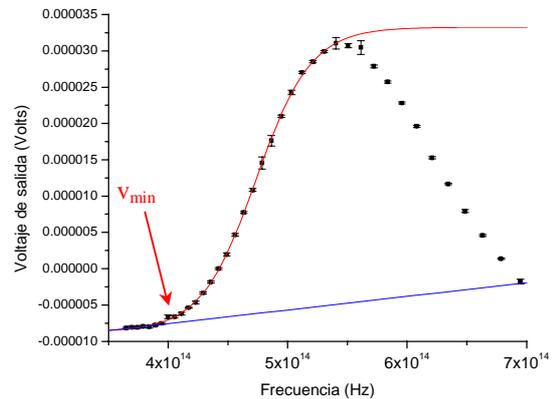


Fig. 8: Fiteo lineal y sigmoideal para la curva mostrada en la figura 7

El valor obtenido para ν_{min} fue de $(3,83 \pm 0,15) \cdot 10^{14} \text{ Hz}$. Entonces:

$$\phi = (2,06 \pm 0,5) \cdot 10^{-19} \text{ J} \quad (9)$$

4. Conclusiones

A lo largo de este trabajo fue posible determinar el valor de la constante de Planck con una diferencia respecto del valor tabulado de aproximadamente el $18,5\%$. Si bien la diferencia

entre el valor teórico y el valor medido es menor al error de la medición, resulta más importante aclarar que en el intervalo en donde se encuentra el valor de h medido el cero está excluido. Esto resulta imprescindible para poder dar como válidas las hipótesis sobre la cuantificación de la energía.

Acerca de los errores en la medición, es importante destacar que los más grandes se introducen al determinar V_0 en el proceso para medir h . El criterio descrito probablemente pueda ser mejorado buscando la manera de tomar un error estadístico, por ejemplo, realizando varias mediciones para cada frecuencia. De esta manera se podría tomar como error en la medición a la desviación entre los valores de V_0 de cada curva.

El amplificador Lock-In resultó ser de mucha utilidad ya que al filtrar la mayor parte del ruido de la señal de salida permite destinar la mayor parte del tiempo al análisis de los datos en lugar de destinarlo al refinamiento en los métodos de medición.

5. Bibliografía

- [1]. Apunte de Laboratorio 5, "*Efecto fotoeléctrico*"
- [2]. R.M.Eisberg, "*Fundamentos de Física Moderna*". Limusa 1997
- [3]. John H. Scofield, "*Frequency-domain description of a lock-in amplifier*", Am.J.Phys. 62(2) Feb.1994, pag 129