

Constante de Planck

Rubí Esmeralda Ramírez Milián
Universidad de San Carlos,
Escuela de Ciencias
Físicas y Matemáticas
Guatemala, Guatemala
201804565

Jorge Alejandro Ávalos Haidacher
Universidad de San Carlos,
Escuela de Ciencias
Físicas y Matemáticas
Guatemala, Guatemala
201804857

Jorge Alejandro Rodríguez Aldana
Universidad de San Carlos,
Escuela de Ciencias
Físicas y Matemáticas
Guatemala, Guatemala
201804766

I. OBJETIVOS

I-A. General

Medir la constante de Planck.

I-B. Específicos

1. Montar el experimento en el laboratorio y tomar datos.
2. Analizar los datos obtenidos en el laboratorio para medir la constante de Planck.
3. Comparar los resultados obtenidos con el valor más aceptado de la constante de Planck.

II. MARCO TEÓRICO

La constante de Planck es una constante física importante en la teoría de la mecánica cuántica, el físico y matemático Max Planck fue quien la descubrió. Denotada como h , es la constante que frecuentemente se define como el cuanto elemental de acción. Planck la denominó «cuanto de acción», debido a que la cantidad denominada acción de un proceso físico (el producto de la energía implicada y el tiempo empleado) solo podía tomar valores discretos, es decir, múltiplos enteros de h [1].

II-A. Espectro electromagnético

Se denomina radiación electromagnética al flujo saliente de energía de una fuente en formas de ondas electromagnéticas. El espectro electromagnético es el conjunto de todas las frecuencias posibles a las que se produce la radiación electromagnética. El límite inferior del espectro electromagnético es 0 y no hay límite teórico superior. Aunque el espectro no tiene un límite superior y es continuo, se cree que la longitud de onda electromagnética más pequeña es la longitud de Planck ($l_p \approx 1,616252 \cdot 10^{-35} \text{m}$) [2].

No todas las ondas electromagnéticas se comportan de la misma forma en el medio de propagación. Por ello, el espectro electromagnético se divide convencionalmente en segmentos o bandas de frecuencia. La clasificación más típica del espectro electromagnético establece las siguientes categorías de radiación electromagnética: Ondas subradio, ondas radioeléctricas, microondas, rayos T, rayos infrarrojos, luz visible, rayos ultravioleta, rayos X, rayos gamma, rayos cósmicos [2].

II-B. Efecto fotoeléctrico

La mayoría de metales emiten electrones bajo la influencia de la radiación, este fenómeno se conoce como efecto fotoeléctrico. Se ha demostrado que el proceso de emisión depende fuertemente de la frecuencia de la luz y que para cada metal existe una frecuencia crítica tal que la luz de una menor frecuencia es incapaz de liberar electrones mientras que la luz con frecuencia más alta sí lo es. Más aún si la frecuencia de la luz aumenta, la energía de los electrones emitidos también lo hace en relación lineal. También se ha demostrado que la emisión de los electrones ocurre con un periodo corto después de la incidencia de la radiación, y que el número de electrones emitidos es estrictamente proporcional a la intensidad de la radiación [3].

La explicación de el físico Albert Einstein para estas observaciones fue que la luz en sí misma está cuantizada, la energía de la luz no se transfiere continuamente como una onda clásica sino que lo hace en pequeños paquetes o «cuantos». El tamaño de estos paquetes de energía, se llamarían posteriormente fotones, estos eran los mismos que los «elementos de energía» propuestos por Max Planck, dando así la versión moderna de la relación de Planck-Einstein:

$$E = h\nu \quad (1)$$

donde ν es la frecuencia de radiación y h es la constante de Planck [1].

Además se asume que los electrones están atrapados dentro de la superficie del metal con una energía $e\phi_C$ llamada la función de trabajo y que todos ellos tienen la misma probabilidad de absorber un fotón. Luego si la frecuencia de la luz es tal que al multiplicarla por la constante h supera a la función de trabajo $h\nu > e\phi_C$ es posible que despidan fotoelectrones, de lo contrario es imposible. De manera formal, el exceso de energía cinética del electrón tal que [3]

$$h\nu = \frac{1}{2}mv^2 + e\phi_C. \quad (2)$$

La ecuación 2 ha sido verificada varias veces en muchos materiales y en una amplia gama de frecuencias. Lo que se mide experimentalmente es la energía emitida en una forma simple, con un potencial de frenado. Dado que la función de trabajo es usualmente desconocida de antemano, la energía

cinética de los fotoelectrones $E_e = \frac{1}{2}mv^2$ se puede obtener como una función de ν de las dos ecuaciones anteriores [3]:

$$E_e = h\nu - e\phi_C$$

siendo h la pendiente y el intercepto en el punto $\nu = 0$ daría $e\phi$.

Cuando se usa el potencial de frenado para medir E_e se tiene que $E_e = eV_o$, de ello lo que en realidad se debe determinar es la razón h/e

$$V_o = (h/e)\nu - \phi_C. \quad (3)$$

El arreglo para el experimento consiste generalmente en una superficie de metal y un ánodo rodeando el cátodo, ambos sellados al vacío. Esto para que cuando la radiación incida en el cátodo, los electrones emitidos alcancen el ánodo y así pueda detectarse una corriente. Si un potencial negativo V es aplicado al ánodo, solo los electrones con $E_e > eV$ podrán alcanzar el ánodo y para algún potencial V_0 ningún electrón llegará al ánodo, este potencial de frenado multiplicado por e es igual la energía de los electrones más rápidos emitidos. Debido que en la práctica no todos los electrones son emitidos con la misma energía, el pico en V_0 no será muy pronunciado [3].

Un hecho importante a tomar en cuenta en este experimento es que el potencial aplicado y medido a través del ánodo y del cátodo no es el mismo potencial que el electrón tiene que superar cuando viaja del cátodo al ánodo, puesto que los materiales del ánodo y el cátodo son esencialmente distintos. Considérese un voltaje externo V' aplicado entre las superficies metálicas, ϕ_C y ϕ_A sean las funciones de trabajo del cátodo y ánodo respectivamente, generalmente $\phi_A > \phi_C$ y se desprecia el voltaje de caída ohmico en los metales. Luego los electrones dentro del ánodo están a un potencial V' más alto que los electrones dentro del cátodo. La pérdida de energía en el circuito debe ser cero, si el potencial V visto por el electrón libre, se obtiene:

$$e\phi_A + eV = e\phi_C + eV'$$

o bien,

$$V = V' - (\phi_A - \phi_C) \quad (4)$$

donde el término $(\phi_A - \phi_C)$ es conocido como la diferencia de potencial de contacto [3]. Con esta ecuación y la ecuación 2 se puede corregir la ecuación 3, notando que si la emisión se detiene para un potencial de frenado aplicado V'_0 , se tiene que

$$V_0 = V'_0 + (\phi_A - \phi_C)$$

$$e|V_0| = h\nu - e\phi_C$$

tal que

$$|V'_0| = (h/e)\nu - \phi_A. \quad (5)$$

Ahora la nueva función corregida ya no tendrá el intercepto en la función de trabajo del cátodo sino del ánodo [3].

II-C. Corriente oscura

Muchos de los fotodetectores como fotodiodos, fototransistores, sensores CCD y fototubos producen una corriente de señal que es aproximadamente proporcional a la potencia óptica incidente. Incluso en ausencia de cualquier entrada de luz, a menudo hay una pequeña cantidad de corriente continua, lo que se denomina corriente oscura. Una posible corriente térmica fluctuante con valor medio cero generalmente no se denomina corriente oscura. Según el dispositivo fotodetector y las condiciones, la corriente oscura puede tener magnitudes muy diferentes, a veces muy por debajo de 1 nA, en otros casos muchos órdenes de magnitud más [4].

Cuando es necesario detectar potencias ópticas extremadamente pequeñas esta corriente oscura es muy importante. En principio, se puede restar la corriente oscura de la señal obtenida con electrónica analógica o con software, pero eso funciona solo de forma limitada, porque la corriente oscura puede depender sustancialmente de la temperatura y del ruido del disparo [4].

III. RESULTADOS

Para obtener las siguientes gráficas primero se analizó las escalas en las que fueron tomados los datos para utilizar todos los valores en la misma escala y que las dimensionales fueran las correctas [V]. Para realizar estos cambios de escala además de la corrección por corriente oscura, se editó el código original para que solicitara valores de cantidad de voltios por división, y ejecutara las operaciones correspondientes con los datos ingresados. Además se cambió el tipo de archivo, agrupando los datos tomados con y sin luz en un mismo documento csv con 6 columnas.

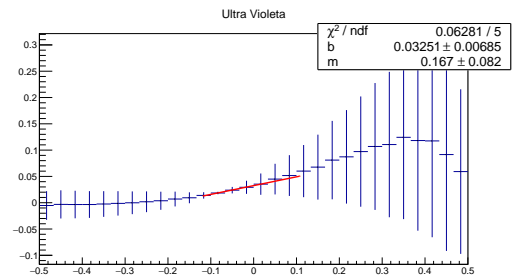


Figura 1. La línea recta dada por la ecuación $I = 0.167 \pm 0.082V + 0.03251 \pm 0.00685$ para el espectro ultravioleta.

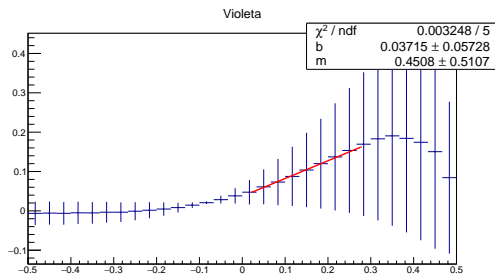


Figura 2. La línea recta dada por la ecuación $I = 0.4508 \pm 0.5107V + 0.03715 \pm 0.05728$ para el violeta.

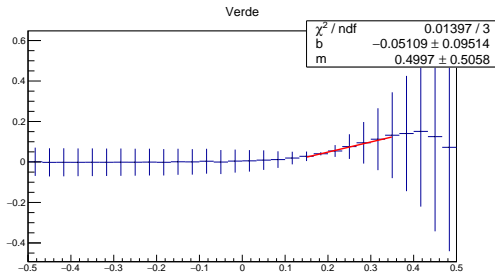


Figura 3. La línea recta dada por la ecuación $I = -0.05109 \pm 0.09514V + 0.4997 \pm 0.5058$ para el verde.

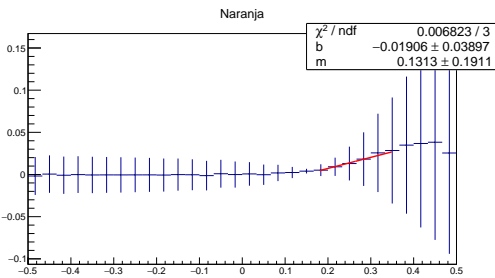


Figura 4. La línea recta dada por la ecuación $I = 0.1313 \pm 0.03897V - 0.01906 \pm 0.03897$ para el naranja

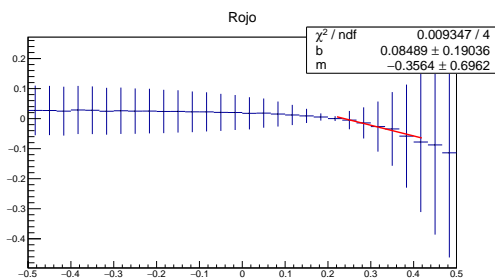


Figura 5. La línea recta dada por la ecuación $I = -0.3564 \pm 0.6962V + 0.08489 \pm 0.1903$ para el rojo

Se encuentra el intercepto en el eje del voltaje de cada recta y así se estima el potencial de frenado.

La siguiente gráfica muestra los cinco datos obtenidos con su respectiva incerteza, graficados contra la frecuencia

correspondiente a cada color (ver anexo) y el ajuste que dará la ecuación de la nueva recta.

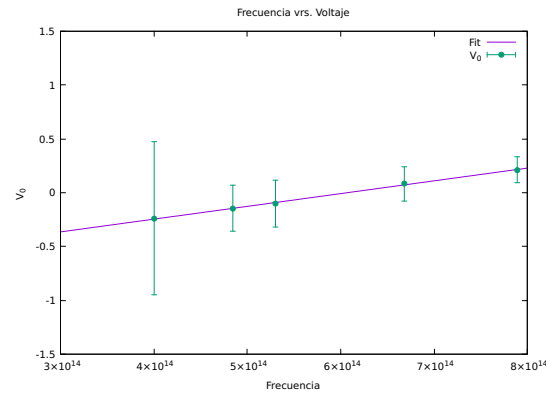


Figura 6. Gráfica del potencial de frenado contra la frecuencia.

La ecuación de la recta obtenida es:

$$V_0 = (1.184 \pm 0.335) \times 10^{-15} \nu - 0.719 \pm 0.023.$$

De ello se obtiene que: $h/e = (1.184 \pm 3.351) \times 10^{-15}$. Multiplicando por la carga del electrón $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ se encuentra:

$$h = (1.897 \pm 0.283) \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

III-A. Discusión de resultados

Como se puede ver, el valor obtenido de la constante de Planck es uno distinto al valor teórico, este experimento solamente llegó a acertar en el orden de magnitud. Esto se debe a distintos factores que pueden alterar el resultado, especialmente la susceptibilidad al error humano presente en este procedimiento experimental. Desde la toma de datos, se requiere cierta precisión para alinear el color correcto con la rendija, y aunque esto se hizo con cuidado, la precisión estaba dada únicamente por nuestros ojos. Después, la elección del intervalo en el que se ajusta la recta se hace de forma manual también, lo que agrega más dependencia al factor humano.

Otra cosa que merece discutirse es el histograma realizado para la luz roja, ya que este tiene un comportamiento inesperado. Lo que está ocurriendo es que la corriente causada por efecto fotoeléctrico es muy pequeña en comparación incluso a la corriente oscura, por lo que al restarse la gráfica debería tender al cero. En nuestro caso en particular, realizamos las mediciones de la corriente oscura y la corriente con la luz roja con distinto nivel de precisión, colocando más precisión en la corriente con luz roja, razón por la cual los valores capturados son «menores» que la corriente oscura, aunque cuando se aproximan dan los mismos valores. Esto fue un error de cómo se tomaron los datos que lamentablemente no se pudo corregir. Sin embargo se realizó un ajuste a esta gráfica y el valor del voltaje aún concuerda con la tendencia del resto, razón por la cual se colocó el dato.

Al analizar los datos es evidente, por los grandes valores de las incertezas obtenidas al realizar la agrupación en histogramas, que nuestro experimento se hubiera visto beneficiado

si hubiera sido posible recojer los datos a lo largo de un mayor intervalo de tiempo, ya esto permitiría aumentar el número de puntos en cada histograma y de ese modo disminuir la incerteza en el valor de la media del *bin*. Sin embargo, debido a la forma en la que se utilizó la red pitaya, solo se contaba con un máximo de cinco repeticiones automáticas en las que se midieron los datos experimentales de forma casi gráfica. Por otro lado, el salto abrupto en el voltaje de parada generado por los instrumentos podría haber aumentado la incerteza de los valores de corriente más grandes, ya que esta, en lugar de aumentar de forma constante presenta una curva inesperada. Se sugiere, para asegurar en este punto no incluir mayores incertezas, que en una próxima oportunidad, la señal del voltaje de parada sea triangular en lugar de poseer forma de sierra y así evitar saltos abruptos. Por último se podría mejorar el análisis de los datos si se formula un criterio menos empírico y más objetivo para calcular el voltaje de frenado a partir de las mediciones obtenidas, ya que en el presente análisis se eligieron los puntos con un comportamiento lineal de forma heurística y una elección distinta permitiría cambiar el resultado final del experimento.

IV. CONCLUSIONES

- El experimento fue montado exitosamente utilizando un kit de laboratorio, y los datos de corriente contra potencial de frenado fueron capturados utilizando la red pitaya, tanto para condiciones en la que los electrodos se encontraban sometidos a flujos de fotones o condiciones oscuras.
- Se comprobó experimentalmente la dependencia, aparentemente lineal, del potencial de frenado en función de la frecuencia de los fotones incidentes. Como se explicó previamente en el marco teórico este es el hecho experimental explicado por Albert Einstein en su descripción del efecto fotoeléctrico.
- Al analizar los datos experimentales se obtiene un valor para la constante de Planck de $h = (1.897 \pm 0.283) \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$, que se encuentra en el mismo orden de magnitud que el valor medido con mejores equipos experimentales y procedimientos de laboratorio.
- Se han descrito las razones que podrían explicar la diferencia entre el valor de la constante de Planck medida y el valor aceptado actualmente: Se considera importante el hecho de que la intensidad de las distintas longitudes de onda solo se podía ajustar manualmente, sin ninguna comprobación experimental; que los valores experimentales obtenidos para la longitud de onda roja no fueron tomados de la manera adecuada; que no se aprovecharon al máximo las capacidades estadísticas de la agrupación en histogramas; y, por último, que no se utilizó un método objetivo para calcular el voltaje de frenado.

V. ANEXOS

Color	m	$\pm \Delta m$	b	$\pm \Delta b$	V_0	ΔV_0	ν [5]
UV	0.1533	0.082	0.0325	0.00685	0.2120678408	0.121918384	789THz
Violet	0.4508	0.5107	0.0372	0.05728	0.08240905058	0.1576735092	668THz
Green	0.4997	0.5058	-0.0511	0.09514	-0.1022413448	-0.2167026283	530THz
Naranja	0.1313	0.1911	-0.0191	0.003897	-0.1451637471	-0.2133524617	484THz
Rojo	-0.3564	0.6962	0.0849	0.19036	-0.2381874299	-0.7083567776	400THz

Cuadro I
DATOS OBTENIDOS CON SU RESPECTIVA INCERTEZA.

REFERENCIAS

- [1] "Planck constant - wikipedia." https://en.wikipedia.org/wiki/Planck_constant#Photoelectric_effect.
- [2] J. L. Ordóñez, "Espectro electromagnético y espectro radioeléctrico," *Manual formativo de ACTA*, no. 62, pp. 17–31, 2012.
- [3] A. C. Melissinos and J. Napolitano, *Experiments in modern physics*. Gulf Professional Publishing, 2003.
- [4] D. R. Paschotta, "Dark current," *Encyclopedia of Laser Physics and Technology: RP Photonics Consulting GmbH*, 2009.
- [5] "Visible spectrum - wikipedia." https://en.wikipedia.org/wiki/Visible_spectrum.