

Efecto fotoeléctrico con diodos led y comparación de resultados con y sin monocromador

Franco Blanco
francoblnc@gmail.com

Nicolas Unger
nicounger@hotmail.com

Laboratorio 5 - Dept. de Física - FCEyN - UBA

1 de noviembre de 2015

Resumen

Investigamos el efecto fotoeléctrico utilizando un fototubo, leds de varios colores, un monocromador y un amplificador lock-in. Caracterizamos el filtrado en longitud de onda del monocromador. Vimos que se perdía gran parte de la intensidad incidente y el ancho de banda que resolvía era parecido al ancho de banda que emite un diodo led. Realizamos dos series de mediciones del potencial de corte en función de la frecuencia del haz incidente, con y sin monocromador. Obtuvimos $h = (3,5 \pm 1,2) \cdot 10^{-34} Js$ con el monocromador y $h = (6,2 \pm 0,4) \cdot 10^{-34} Js$ sin el monocromador. El valor obtenido sin el monocromador es más cercano a el valor tabulado, aunque ambos valores estan dentro del orden de magnitud correcto.

1. Introducción

El efecto fotoeléctrico es un fenómeno de interacción entre la luz y la materia ya conocido desde finales del siglo XIX. Se necesita un fototubo (un foto-tubo no es otra cosa que un ánodo y un cátodo enfrentados uno con el otro)(ver figura 1), y luz visible incidente. Se hace incidir luz monocromática sobre el fotocátodo y se observa que fluye una corriente en el cable entre el ánodo y el cátodo. Un fenómeno importante que se observa es que poniendo una diferencia de potencial V entre el ánodo y el cátodo, para una dada frecuencia de luz, hay corriente solo a partir de un valor de potencial V_0 . Además para un potencial fijo, la corriente es proporcional a la intensidad de la luz incidente, pero el potencial de frenado solo depende de la frecuencia de la luz incidente.

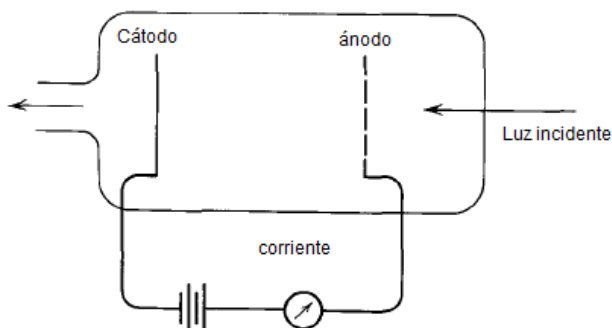


Figura 1: Esquema básico experimental para estudiar el efecto fotoeléctrico. Se puede ver como incide la luz sobre el ánodo-cátodo.

Estos fenómenos no se podían explicar con la teoría clásica de la luz. Luego en 1905 Einstein explicó el efecto fotoeléctrico usando la teoría cuántica de la luz desarrollada por Planck. La energía de un cuanto de radiación electromagnética (ϵ) esta dado por su frecuencia (ν) y la constante de Planck (h) como:

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

Este cuanto, llamado *fotón*, incide sobre el fotocátodo y le entrega su energía a un electrón del material y este se desprende del cátodo. La energía del electrón va a ser cinética y vale $T_e = h\nu - \phi$, donde ϕ es la energía necesaria para extraer un electrón de la superficie del cátodo (llamada función de trabajo). De esa expresión se puede ver que la luz incidente tiene que tener una frecuencia mínima para que el electrón tenga energía suficiente para escapar del fotocátodo. Como se mencionó antes, hay un valor de potencial V_0 tal que si $V < V_0$ la energía del electrón no va a ser suficiente para llegar al ánodo y no se observara una corriente. Entonces:

$$eV_0 = h\nu - \phi \quad (2)$$

Si se busca el potencial retardador mínimo V_0 para el cual hay efecto fotoeléctrico para distintas frecuencias ν de luz incidente, se puede graficar eV_0 en función de ν . De esta manera se obtiene la constante de Planck h como la pendiente de la curva y la función de trabajo como la ordenada al origen.

En este trabajo nuestro objetivo fue estudiar el efecto fotoeléctrico y usando la constante de Planck tabulada

ver si nuestros resultados son consistentes con los esperados por la teoría.

2. Desarrollo experimental

Antes de trabajar con el efecto fotoeléctrico en sí, nos propusimos a estudiar y caracterizar parte del instrumental que utilizamos. Mas específicamente usamos un amplificador lock-in Stanford Research SR830, un monocromador (MC), lamparas led de distintos colores, un fotodiodo y un fototubo.

La función del monocromador es filtrar en longitudes de onda específicas la luz incidente, para ello utiliza un sistema de prismas junto con una abertura. Los prismas desvían la luz de longitudes de onda indeseadas fuera de la abertura de salida del aparato, mientras que la luz de longitud de onda cercana a la que seleccionamos sale por dicha salida (ver figura 3). Para filtrar mejor las frecuencias de luz cercanas la salida del monocromador tiene una abertura regulable, lo que permite que las longitudes de onda cercanas no escapen del aparato y nos quedemos solo con la componente de la luz que seleccionamos, que viaja paralela al eje del cilindro de salida, mientras que las demás están un poco desviadas. Sin embargo este mecanismo no filtra completamente las demás longitudes de onda, esto se ve a simple vista ya que incluso con la abertura cerrada casi por completo se pueden ver diferentes colores a simple vista si cambiamos el ángulo de observación del haz.

Es por esto último que optamos por hacer primero una caracterización del monocromador y ver que tan bien filtra la luz de distintas fuentes. Para hacer dicha caracterización buscamos medir el ancho en frecuencia de la campana de intensidades de la luz que sale del monocromador. Es decir, iluminamos el aparato con una fuente y medimos la intensidad del haz a la salida en función de la frecuencia seleccionada por el monocromador. Si la fuente no era luz blanca, sino que era luz emitida por un led de algún color o por un láser, esperábamos que la distribución de intensidades tuviese un máximo alrededor de la longitud de onda característica de la fuente y que lejos de este punto la intensidad sea casi nula. A partir de esta distribución de intensidades podíamos asignarle un ancho de resolución al aparato y comparar así que tan bien resuelve distintas fuentes.

Como no teníamos otro aparato que filtrara las longitudes de onda la comparación entre estas resoluciones la hicimos utilizando dos fuentes. Por un lado utilizamos un láser que sabemos que tiene una longitud de onda bien definida, y por otro usamos un led de color verde que era uno de los led que mas tarde utilizamos en la experiencia. Si el ancho del perfil de intensidades es similar en ambos casos, es que el monocromador resuelve ambas fuentes de la misma manera aunque una

de ellas tenga un ancho en frecuencias mucho mas pequeño. Por lo tanto puede omitirse la utilización de ese aparato ya que no puede distinguir entre una fuente con una longitud muy bien definida y otra con un espectro de longitud de onda.

Para hacer esta caracterización utilizamos un fotodiodo, conectado a un amplificador lock-in, colocado a la salida del monocromador. Luego levantamos un perfil de intensidades de esta fuente primero encontrando a mano el máximo de intensidad y luego moviéndonos a un lado y a otro del este máximo hasta que la intensidad sea despreciable. Para asignarle una resolución a este perfil de intensidades le aplicamos un ajuste gaussianos a ambas curvas para obtener los parámetros de estos ajustes, en particular nos interesaba la desviación estándar σ del ajuste. Lo que encontramos fue que los σ de ambas distribuciones eran comparables. La desviación estándar de la distribución del láser era $\sigma = 17,2 \pm 3,1$ mientras que para el led verde era de $\sigma = 18,9 \pm 3,7$. Por lo tanto, vemos que el aparato resuelve igual ambas fuentes. Ambas distribuciones se pueden ver en la figura 2

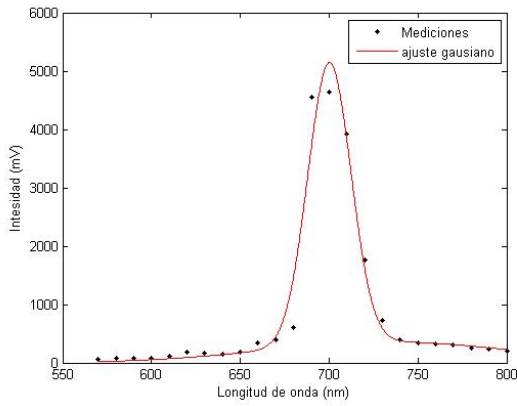
La importante conclusión de esta caracterización es que el monocromador no puede resolver con mucha precisión las longitudes de onda de los leds, y por lo tanto se puede prescindir de este. El no usar monocromador quiere decir que iluminamos el fotocátodo directamente con el led, lo cual tiene la ventaja que el el fotocátodo recibe mas intensidad de luz y a su vez genera mayor fotocorriente. Una fotocorriente mayor hace que sea mas fácil su medición.

2.1. Efecto fotoeléctrico

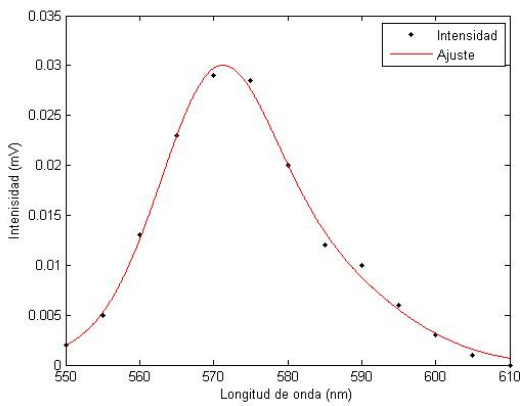
Para estudiar el efecto fotoeléctrico, y obtener los distintos potenciales de frenado máximos, utilizamos lamparas led de diferentes colores. Para eso primero medimos la longitud de onda para la cual cada led emitía con máxima intensidad. Para medir estas longitudes de onda utilizamos un fotodiodo que colocamos a la salida del monocromador y conectamos al amplificador lock-in (necesario debido a que la corriente era del orden de nanoamperes). En el monocromador fuimos variando lentamente la longitud de onda y con el lock-in buscamos donde conseguíamos la máxima señal. Luego usando la calibración de [1], obtuvimos las longitudes de ondas correspondientes para cada lampara led. La calibración simplemente consiste en restarle $11nm$ al valor que se lee con el monocromador. Los resultados se pueden ver en la tabla 1.

2.1.1. Con monocromador

Con esta caracterización hecha, cambiamos el fotodiodo por el fototubo para medir la foto-corriente entre el ánodo y cátodo. El fototubo tiene dos conexiones



(a) Perfil de intensidades del láser.



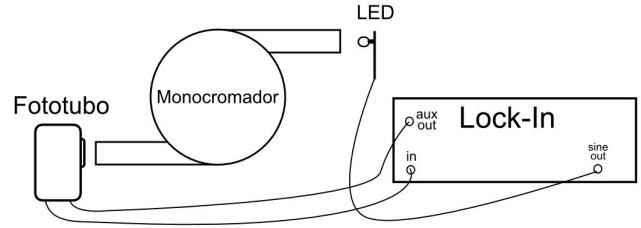
(b) Perfil de intensidades del led verde.

Figura 2: Perfil de intensidades para un láser rojo y un led verde en función de la longitud de onda.

para cables BNC, una de ellas la utilizamos para aplicar una diferencia de potencial entre el ánodo y cátodo y la otra para medir la corriente que circulaba entre ellos. Utilizamos el amplificador lock-in para ambos casos. Alimentamos el led con una función sinusoidal a 12800 Hz. Medimos la corriente en el fototubo, y con una salida auxiliar aplicamos un voltaje entre ánodo y cátodo que variaba entre $-3V$ y $3V$, siendo el potencial negativo tal que frenaba a los electrones desprendidos, mientras que el potencial positivo los impulsaba a llegar hasta el ánodo. Un esquema del armado experimental se puede ver en la figura 3.

Mediante un programa en Matlab podíamos controlar todas las funciones del lock-in. En particular nos interesaba medir la corriente en el fototubo en función del potencial retardador aplicado. Entonces con el programa podíamos medir automáticamente la corriente para valores del potencial retardador entre $-3V$ y $3V$. Esta medición la repetimos para cada una de las lamparas led. La idea era ver a partir de que valor del potencial retardador empieza a circular corriente. Los resultados

Color	Longitud de onda	Corrección
Azul	$472 \pm 2nm$	$461 \pm 2nm$
Verde	$571 \pm 2nm$	$560 \pm 2nm$
Amarillo	$575 \pm 2nm$	$564 \pm 2nm$
Naranja	$590 \pm 2nm$	$579 \pm 2nm$
Rojo	$640 \pm 2nm$	$629 \pm 2nm$

Tabla 1: Longitudes de onda para cada lampara led que utilizamos.

Figura 3: Esquema del armado experimental que utilizamos para medir el efecto fotoeléctrico. La salida *aux out* la utilizamos para aplicar el potencial retardador, la entrada *in* para medir la corriente y la salida *sine out* para alimentar el led.

para los led azul y rojo se pueden ver en la figura 4.

Como se puede ver en la figura 4a y 4b, para potenciales retardadores (voltajes negativos) no hay corriente, hasta que alcanza cierto umbral (V_0) a partir del cual la corriente aumenta de forma lineal con el voltaje. Los valores de V_0 obtenidos para cada led están en la tabla 2.

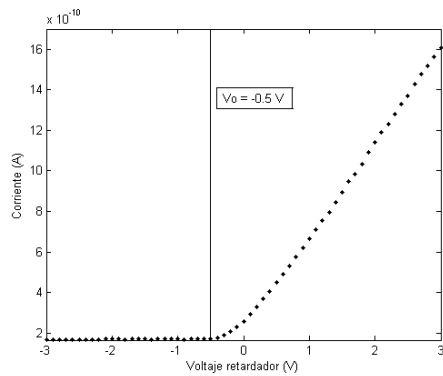
Azul	Verde	Naranja	Rojo
$-0,5V$	$-0,4V$	$-0,2V$	$-0,1V$

Tabla 2: Valores de V_0 obtenidos para cada led en el experimento con el monocromador. El error en todas las mediciones es de $\pm 0,1V$.

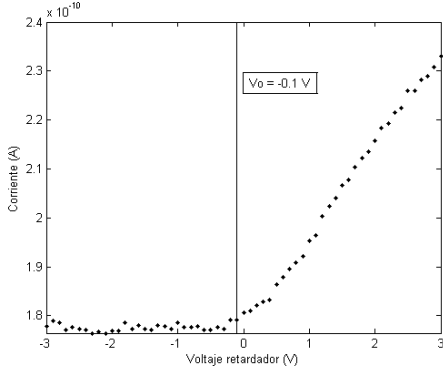
Tomando estos valores de V_0 obtenidos para cada led y graficandolos en función de la frecuencia ν , según la ecuación 2, se puede obtener la constante de Planck como la pendiente y la función trabajo del cátodo como la ordenada al origen. Este representación se puede ver en la figura 5.

Dado que nuestros métodos de medición no son muy precisos, decidimos usar la constante de Planck tabulada ($h = 6,626 \cdot 10^{-34} Js$) y luego compararla con el valor que obtuvimos nosotros para ver si el modelo teórico del efecto fotoeléctrico coincide en cierto orden con lo observado experimentalmente.

Para la figura 5, los valores obtenidos fueron $h = (3,5 \pm 1,2) \cdot 10^{-34} Js$ y $\phi = (-1,4 \pm 0,70) \cdot 10^{-19} J = (-0,87 \pm 0,43)eV$. El valor de la constante de Planck



(a) Para el led azul (461nm).



(b) Para el led rojo (629nm)

Figura 4: Corriente en el fototubo en función del potencial retardador. Esta medición fue hecha *con* el monocromador.

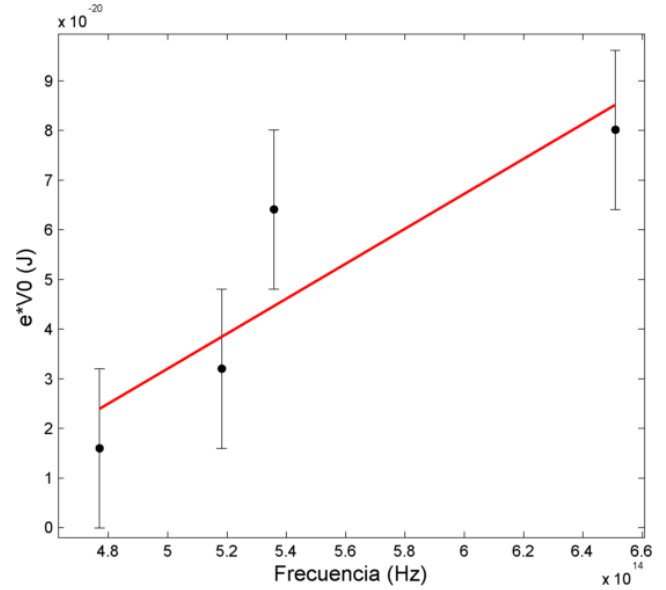
obtenido no coincide con el valor tabulado pero esta dentro del orden de magnitud.

2.1.2. Sin monocromador

Luego volvimos a hacer el mismo experimento, pero esta vez sin usar el monocromador. Es decir colocamos las lamparas led directamente enfrentadas al fototubo. Esto tiene una ventaja inmediata y es que la intensidad de luz que llega al cátodo es mucho mayor y por lo tanto también la corriente va a ser mucho mayor.

Volvimos a medir la corriente para distintos valores del potencial retardador para cada led, esta vez incorporando un color nuevo (Amarillo a 564nm). Los resultados para los led azul y amarillo se pueden ver en la figura 6.

Se puede ver que las mediciones salieron mucho mas limpias y con menos ruido. Además como esperábamos los valores de la corriente son mucho mayores ($\sim 10^{-10} A$ con el monocromador y $\sim 10^{-7} A$ sin el monocromador). En este caso los valores de V_0 obtenidos están en la tabla 3.


Figura 5: eV_0 en función de la frecuencia de la luz de 4 colores distintos de diodos led para el experimento de efecto fotoeléctrico con monocromador.

Azul	Verde	Amarillo	Naranja	Rojo
-0,90V	-0,45V	-0,40V	-0,35V	-0,25V

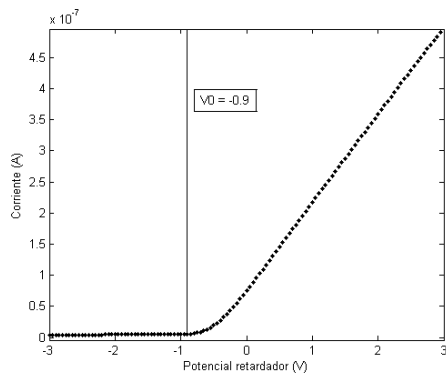
Tabla 3: Valores de V_0 obtenidos para cada led en el experimento sin el monocromador. El error en todas las mediciones es de $\pm 0,05V$.

Comparando con el experimento con el monocromador se puede ver que los valores de V_0 son menores. En principio este valor no tendría que haber cambiado, ya que solo depende de la frecuencia y lo único que cambiamos fue la intensidad de luz. Una razón por la que pudo haber dado valores menores de V_0 , es que al obtener más corriente tenemos mayor resolución y vemos mejor cuando realmente empieza a haber corriente. En la serie de mediciones con el monocromador quizás también empezaba a haber corriente antes pero, como la corriente era tan baja, esto era indistinguible del ruido.

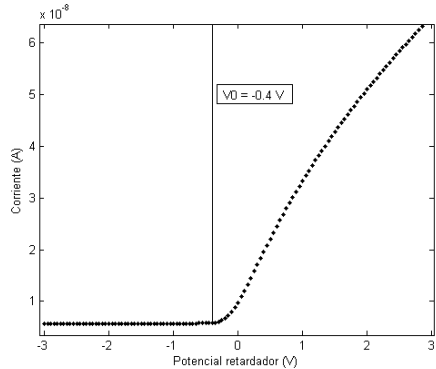
Volviendo a usar la ecuación 2, podemos graficar eV_0 en función de ν para este nuevo set de datos y obtener nuevos valores para la constante de Planck y la función trabajo (ver figura 7).

Para este nuevo experimento los valores obtenidos para la constante de Planck y la función trabajo fueron: $h = (6,2 \pm 0,4) \cdot 10^{-34} Js$ y $\phi = (-2,6 \pm 0,2) \cdot 10^{-19} J = (-1,62 \pm 0,12)eV$. Directamente vemos que los resultados son mucho mejores que en el caso con monocromador.

Con este análisis concluimos que, en el caso de utilizar lamparas led como fuente de luz para el efecto fo-



(a) Para el led azul (461nm).



(b) Para el led amarillo (564nm)

Figura 6: Corriente en el fototubo en función del potencial retardador. Esta medición fue hecha *sin* el monocromador.

toeléctrico, se obtienen mejores resultados si no se usa el monocromador. También podemos mencionar que intentamos utilizar un led blanco en conjunto con el monocromador para poder tomar mediciones de otras frecuencias que no fuesen la de los leds de colores. Sin embargo, dichas mediciones resultaron ser poco confiables ya que la intensidad de luz que llegaba al fototubo era mucho menor a la de los otros casos, lo que dificultaba el reconocimiento de la señal de entre el ruido. Por lo tanto, este tipo de mediciones no son recomendables a menos que se utilice un diodo led de alta potencia.

3. Conclusiones

Hicimos una caracterización del monocromador y su capacidad para resolver, en longitud de onda, un láser y un led. Haciendo esto encontramos que el monocromador generaba un perfil de intensidades con un ancho similar entre ambos, por lo que concluimos que podíamos realizar la experiencia sin el monocromador y aprovechar la intensidad completa del led. Luego, estudiamos los potenciales de frenado V_0 en función de la frecuencia

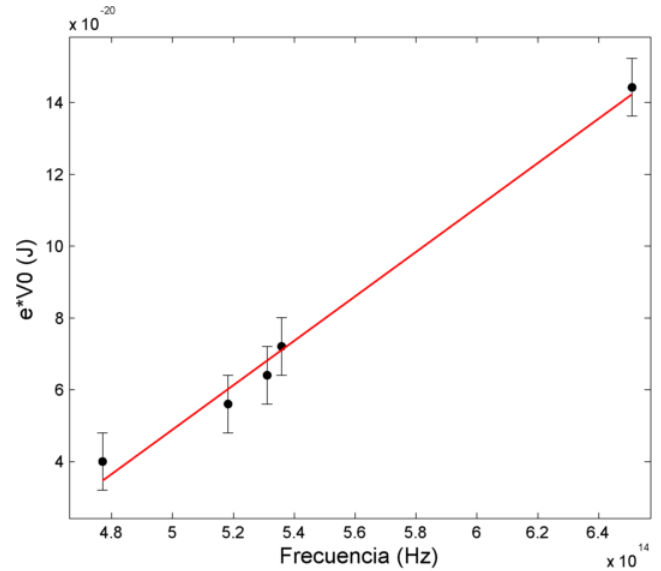


Figura 7: eV_0 en función de la frecuencia de la luz de 5 colores distintos de diodos led para el experimento de efecto fotoeléctrico sin monocromador.

de la luz incidente para dos series de mediciones, una con monocromador y otra sin. En ambos casos obtuvimos valores tanto de la constante de Planck como de la función trabajo del material. Las mediciones con el monocromador devolvieron un valor de la constante de Planck de $h = (3,5 \pm 1,2) \cdot 10^{-34} Js$, que si bien es del orden de magnitud, es peor que el valor hallado con mediciones sin el monocromador $h = (6,2 \pm 0,4) \cdot 10^{-34} Js$. Entonces en el caso de utilizar leds de colores como fuente de luz, es mucho mas ventajoso hacer mediciones sin el monocromador de por medio.

4. Referencias

- [1] A. Berardino, L. Esterson, *Efecto fotoeléctrico en un fototubo*, Laboratorio 5, 2015, Dpto. de Física, FCEN, UBA