

Efecto fotoeléctrico

Objetivo

Comprender la relación que existe entre la teoría clásica y la teoría cuántica de la luz. Así mismo, calcular de forma experimental la constante de Planck.

Introducción

La emisión y absorción de luz fue tema de investigación del físico Max Planck. Cuando Planck trató de formular una teoría sobre la base del modelo de onda clásico, se encontró con demasiadas dificultades para explicar la distribución espectral de la luz emitida. La teoría clásica (ley de Rayleigh - Jeans) predice que la cantidad de luz emitida por un cuerpo negro aumenta dramáticamente a medida que la longitud de onda disminuye, mientras que el experimento demostraba que la cantidad de luz se aproximaba a cero; es decir, todo lo contrario. Esta discrepancia se conocía como la catástrofe ultravioleta.

Los datos experimentales para la radiación de la luz emitida por un cuerpo muy caliente (que brilla intensamente) demuestran que la intensidad máxima de luz emitida tampoco concuerda con los valores clásicos predichos por la ley de Wien. Para reconciliar la teoría con los resultados de laboratorio, Planck, se vio forzado a desarrollar un nuevo modelo para la luz llamado modelo cuántico, el cual presupone que la luz se debe emitir en pequeños paquetes de energía, llamados cuantos.

La relación entre la teoría clásica y la teoría cuántica para la emisión de la luz, puede investigarse empleando el equipo de laboratorio denominado “aparato h/e ”. Usando el aparato en combinación con una fuente de luz de vapor de mercurio, se puede determinar aproximadamente la relación h/e y de esta forma calcular la constante de Planck h .

Teoría

Teoría cuántica de Planck

En 1901 Planck publicó su ley de radiación. En ella indica que un oscilador o cualquier sistema físico similar tienen un conjunto discreto de valores o niveles posibles de energía, y que las energías entre estos valores o niveles no pueden existir.

Planck observó que la emisión y la absorción de la radiación están asociadas con transiciones o saltos entre dos niveles de energía. La energía perdida o ganada por el oscilador se emite o se absorbe como un cuanto de energía radiante, cuya magnitud está expresada por la siguiente ecuación:

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

donde E es la energía radiante, ν es la frecuencia de la radiación, y h es la constante de Planck.

Se ha encontrado que la constante de Planck no solamente es una simple relación entre la frecuencia y la energía de la luz (de las ondas electromagnéticas), sino que esta constante ha resultado ser la piedra angular de la Mecánica Cuántica para explicar el mundo subatómico. Por su trabajo, Planck recibió el premio Nobel de Física en 1918.

El efecto fotoeléctrico

En el fenómeno de la llamada emisión fotoeléctrica, un haz de luz al chocar contra un material causa que electrones del material sean emitidos. Por otro lado, el modelo clásico de la onda predice que entre más intensidad tenga un haz de luz mayor será su amplitud y, por tanto, mayor será la energía de la onda.

De esta manera, un haz de mayor intensidad al chocar en un material debería inducir fotoelectrones más energéticos. Por su parte, el modelo cuántico predice que la luz a frecuencias mayores debería producir fotoelectrones de mayor energía, independiente de la intensidad, mientras que al aumentar la intensidad de la luz sólo debe incrementarse el número de electrones emitidos (es decir, la corriente fotoeléctrica).

A principios del año 1900, varios investigadores encontraron que la energía cinética de los fotoelectrones depende de la longitud de onda, o de la frecuencia, y es independiente de la intensidad. Mientras que la magnitud de la corriente fotoeléctrica, o número de electrones, depende de la intensidad de la luz como lo predice el modelo cuántico. Einstein aplicó la teoría de Planck y explicó adecuadamente el efecto fotoeléctrico en términos del modelo cuántico usando su famosa ecuación:

$$E = h\nu = KE_{max} + W_0 \quad (2)$$

donde KE_{max} es la energía cinética máxima de los fotoelectrones emitidos, W_0 se conoce como la función de trabajo, y es la energía necesaria para removerlos completamente del material, y E es la energía del fotón.

El experimento h/e .

Un fotón de luz con energía $h\nu$ incide sobre un electrón del cátodo de un tubo al vacío. El electrón gasta una energía W_0 para escapar del cátodo e inmediatamente adquiere una energía en forma de energía cinética KE_{max} . Por lo general, los electrones emitidos alcanzan el ánodo del tubo y pueden medirse como una corriente fotoeléctrica. Sin embargo, aplicando un potencial invertido V entre el ánodo y el cátodo, la corriente fotoeléctrica puede anularse. De esta forma, KE_{max} puede obtenerse midiendo el potencial invertido mínimo necesario (potencial de frenado) para detener a los fotoelectrones y reducir la corriente fotoeléctrica hasta cero.

Relacionando la energía cinética con el potencial de frenado se obtiene:

$$KE_{max} = Ve \quad (3)$$

Sustituyendo la ecuación (3) en la ecuación (2), se obtiene:

$$h\nu = Ve + W_0 \quad (4)$$

despejando para V, se obtiene:

$$V = \left(\frac{h}{e}\right)\nu - \frac{W_0}{e} \quad (5)$$

Si se realiza una gráfica de V vs ν para diferentes frecuencias de luz, se obtiene algo similar a la gráfica de la figura 1. De la figura 1 y de la ecuación (5), se puede determinar el valor de la pendiente, y la cual es: $\frac{h}{e}$.

Acoplando el valor experimental de la relación h/e con el valor aceptado de la carga eléctrica del electrón $e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$, se puede calcular la constante de Planck.

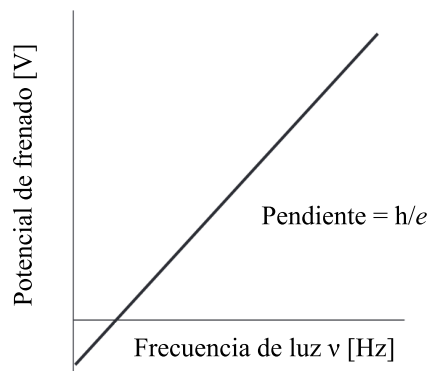


Figura 1. Gráfica de V vs ν .

Material

- 1 Aparato h/e .
- 1 Kit de accesorios para aparato h/e .
- 1 Lámpara de Mercurio.
- 1 Multímetro.
- 2 Cables banana-banana.

Instalación del equipo

Voltaje de las baterías

Aunque el aparato h/e requiere de una cantidad pequeña de corriente y las baterías duran normalmente algo de tiempo, es recomendable comprobar el voltaje de salida antes de cada uso. Las terminales de prueba de la batería están situados en el panel lateral del aparato h/e cerca del interruptor ON/OFF como se muestra en la figura 2. Compruebe que el voltaje de las baterías entre el terminal de salida de tierra y cada una de las terminales de la batería -6V MIN y +6V MIN, da un voltaje mayor o igual a

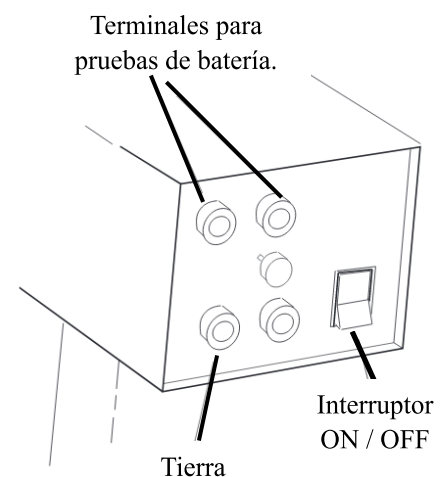


Figura 2. Prueba de batería.

6V. Si alguna de las baterías tiene un voltaje menor a 6V, pídale al técnico del laboratorio que las reemplace.

Arreglo experimental

La instalación del arreglo experimental para el experimento de efecto fotoeléctrico se muestra en la figura 3. A continuación se describen los pasos a seguir para el armado experimental.

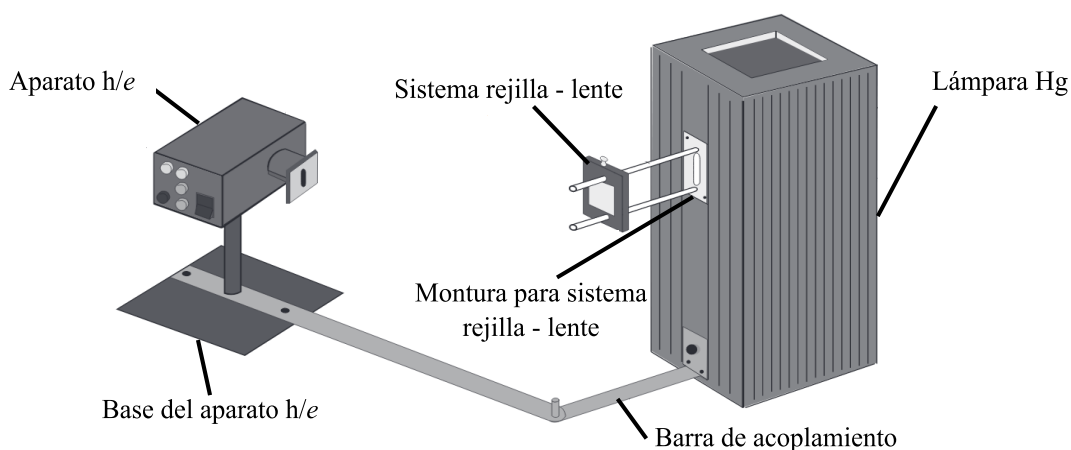


Figura 3. Arreglo experimental del efecto fotoeléctrico.

1. Instale el bloqueador de luz en el canal de la parte trasera de la lámpara, como se observa en la figura 4. Usted verá que se bloquea el orificio de la parte trasera de la lámpara.
2. Deslice la montura de abertura de luz en el centro de la canaleta de la lámpara, y fíjelo con los dos tornillos que tiene la montura.
3. Coloque el sistema rejilla - lente sobre las barras del soporte de la montura de abertura de luz, como se observa en la figura 5. Afloje el tornillo, deslice el sistema rejilla - lente sobre las barras de la montura y atorníllelo para mantenerlo fijo.

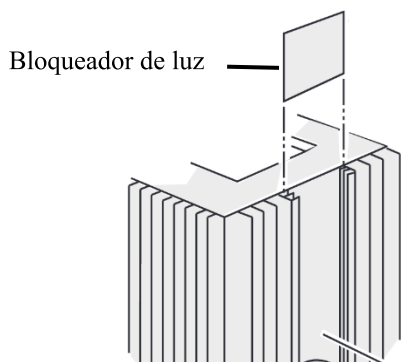


Figura 4. Colocación del bloqueador de luz.

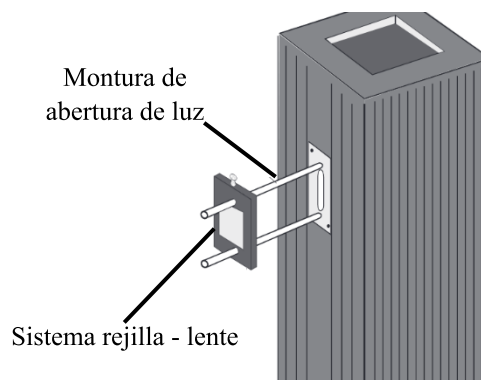


Figura 5. Colocación de la montura y el sistema rejilla – lente.

4. Encienda la fuente de luz y permita que se caliente por cinco minutos, compruebe la alineación de la fuente de luz y la abertura mirando cómo incide la luz en la parte posterior de la rejilla. Si es necesario, ajuste la montura hasta que la fuente de luz se encuentre alineada.
5. Inserte y fije el soporte de la barra de acoplamiento a la fuente de luz como se observa en la figura 3.
6. Quite el tornillo del poste e introdúzcalo por el orificio de la base del soporte para el aparato h/e, luego fije el poste con la base mediante el tornillo.
7. Coloque el aparato h/e sobre el poste de la base.
8. Coloque la montura de la base sobre la punta del extremo de la barra acopladora.
9. Con los cables banana-banana conecte el voltímetro a las terminales de salida del aparato h/e, con el medidor en el rango de 2 o 20 V.
10. Coloque el aparato de h/e enfrente de la fuente de luz de vapor de mercurio. Deslice el sistema rejilla - lente hacia delante o hacia atrás, hasta que obtengas una luz brillante en la máscara reflejante del aparato.
11. Rote el protector de luz del aparato h/e para revelar la máscara del fotodiodo blanco que se encuentra dentro. Rote el aparato hasta que una línea espectral esté centrada en la ventana de la máscara del fotodiodo. Después, apriete el tornillo del poste de la base para sostener el aparato en ese lugar.
12. Igual que en el paso 10, deslice la rejilla hacia atrás o hacia adelante hasta que se aprecie una imagen clara de la abertura sobre la ventana en la máscara del fotodiodo. Apriete el tornillo y regrese el protector de luz a su lugar.
13. Encienda el aparato y observe que en el multímetro se registre un voltaje.

NOTA: La máscara reflejante blanca del aparato h/ e está hecha de un material fluorescente especial. Esto permite ver la línea ultravioleta como una línea azul, y que la línea violeta aparezca más azul. Los colores actuales pueden verse utilizando una hoja blanca de material no fluorescente enfrente de la máscara.

Es importante que al realizar las mediciones se tenga cuidado de incidir solamente un color sobre la ventana del fotodiodo. No debe haber traslapo de máximos espectrales adyacentes.

14. Presione el botón “PUSH TO ZERO” en la parte trasera del aparato de h/e para descargar algún potencial acumulado en la unidad electrónica. Esto asegurará que el aparato registre sólo el potencial de la luz que se está midiendo. Observe que la salida de voltaje decae cuando existe ausencia de luz en el fotodiodo.
15. Registre el voltaje de salida con el voltímetro digital, el cual es una medición directa del potencial de frenado para los fotoelectrones.

NOTA: Para algunos aparatos h/e es posible que el potencial que se lee inicialmente sea un valor alto, sin embargo, decrecerá poco a poco hasta llegar al potencial de frenado.

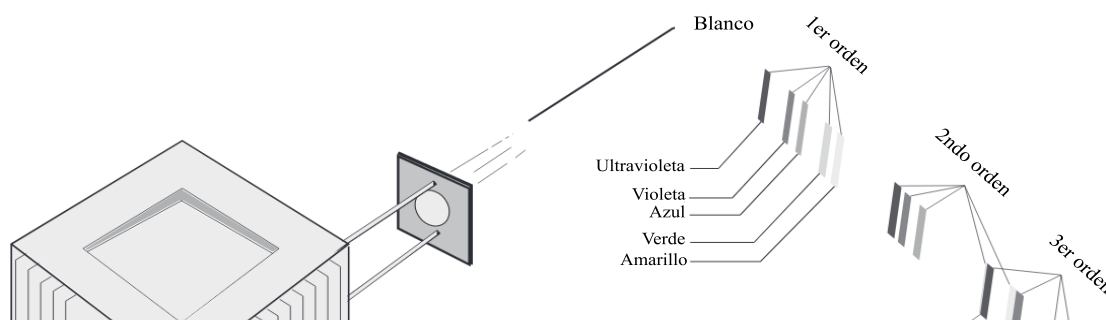


Figura 6. Se muestran los tres órdenes de difracción.

Color	Frecuencia [Hz]	λ [nm]
Amarillo	5.18672×10^{14}	578
Verde	5.48996×10^{14}	546.074
Azul	6.87858×10^{14}	435.835
Violeta	7.40858×10^{14}	404.656
Ultravioleta	8.20264×10^{14}	365.483

Tabla 1. Frecuencia y longitud de onda de cada color.

Uso de filtros

El kit del aparato h/e contiene tres filtros: verde, amarillo, y un filtro de transmisión variable. Los marcos de cada filtro tienen tiras magnéticas para ser montados en la máscara reflejante del aparato h/e.

Utilice los filtros de color verde y amarillo, cuando usted requiera medir el potencial de frenado de las líneas espectrales verde y amarillo, ya que estos filtros limitan el paso de otras ondas electromagnéticas de luz generadas por la luz ambiental u otras líneas espectrales.

Use el filtro de transmisión variable para variar la intensidad de la luz que incide sobre el fotodiodo. Este filtro consta de un patrón de puntos y líneas que permiten variar la transmisión en los siguientes porcentajes relativos: 100%, 80%, 60%, 40% y 20%.

Procedimiento

Experimento 1: Modelo clásico vs. Modelo cuántico

Según el modelo cuántico de la luz, la energía cinética máxima $K_{\max}$ de los fotoelectrones depende solamente de la frecuencia de la luz incidente y es independiente de la intensidad de la luz. Por lo que, se entiende que a mayor frecuencia de la luz, mayor será la energía cinética de los fotoelectrones.

En contraste, el modelo clásico de la onda de la luz predice que $K_{\max}$ dependerá de la intensidad de luz. Es decir, cuanto más brillante sea la luz mayor es la energía de los fotoelectrones.

En este experimento se analizan ambas aseveraciones. En la parte A se seleccionan dos líneas espectrales de una fuente de luz de vapor de mercurio y se investiga la energía máxima de los fotoelectrones como función de la intensidad. En la parte B se seleccionan diferentes líneas espectrales y se analiza la energía máxima de los fotoelectrones en función de la frecuencia de la luz.

Parte A.

1. Ajuste el aparato h/e de forma que sólo una de las líneas espectrales incida sobre la abertura de la máscara del fotodiodo. Si se selecciona la línea espectral verde o amarilla coloque sobre la máscara reflejante blanca, el filtro al color correspondiente de la línea espectral.
2. Coloque el filtro de transmisión variable enfrente de la máscara reflejante blanca (y sobre el filtro de color, si se utiliza) para que la luz pase a través de la sección marcada 100% y alcance al fotodiodo. Registre la lectura de voltaje en la tabla 2. Presione el botón de descarga del instrumento y suéltelo, observe cómo se requiere mucho tiempo para que el sistema se estabilice hasta el voltaje registrado.
3. Mueva el filtro de transmisión al siguiente porcentaje de transmisión, para que varíe la intensidad de la luz incidente en el fotodiodo. Registre la nueva lectura y mida el tiempo que pasa a partir de que se descarga el sistema hasta que logra estabilizarse al voltaje registrado. Repita este paso varias veces, hasta que se hallan ocupado las cinco secciones del filtro.
4. Repita el paso 3 para otra línea espectral, y registre sus datos en la tabla 2.

Tabla 2. Registro de datos para dos líneas espectrales diferentes del experimento A.

Color #1: _____		
% Transmisión	Potencial de frenado [V]	Tiempo de carga aproximado. [s]
100		
80		
60		
40		
20		
Color #2: _____		
% Transmisión	Potencial de frenado [V]	Tiempo de carga aproximado. [s]
100		
80		
60		
40		
20		

Parte B.

1. Ajuste el aparato h/e para que uno de los cinco espectros amarillos incida sobre la abertura de la máscara del fotodiodo. Coloque el filtro de color amarillo sobre la máscara blanca reflejante.
2. Registre el voltaje que indica el voltímetro en la tabla 3, recuerde que este voltaje es el de frenado de los fotoelectrones.
3. Repita el procedimiento para cada color del espectro que se observa (se recomienda utilizar las líneas espectrales de primer orden). Recuerde utilizar los filtros para las líneas espectrales de color verde y amarillo.

Tabla 3. Registro de datos para el experimento B.

Color de la línea espectral	Potencial de frenado [V]
Amarillo	
Verde	
Azul	
Violeta	
Ultravioleta	

Análisis.

1. Describa el efecto que ocurre al medir el potencial de frenado de las diferentes intensidades del mismo color de luz. Así mismo, con la energía máxima de los fotoelectrones y el tiempo de carga del aparato h/e .
2. Describa la relación que existe entre cada uno de los diferentes colores de luz y su potencial de frenado, así como con la energía máxima de los fotoelectrones.
3. Básese en los resultados experimentales para determinar si este experimento apoya al modelo cuántico de la luz, o al modelo clásico de la luz. Explique por qué existe una pequeña caída en el potencial de frenado cuando la intensidad de luz disminuye.

Experimento 2: Relación entre Energía, Longitud De Onda Y Frecuencia.

De acuerdo al modelo cuántico de la luz, la energía de un fotón es directamente proporcional a su frecuencia; esto quiere decir que a mayor frecuencia mayor energía. Este experimento se realiza con la finalidad de determinar la constante de Planck. Una vez que se eligen diferentes líneas espectrales se mide el potencial de frenado, y conociendo la longitud de onda de cada color se puede determinar el valor de la constante de Planck.

1. Ajuste cuidadosamente el aparato h/e hasta que una línea espectral de primer orden incida sobre la abertura de la máscara del fotodiodo.
2. Registre el potencial de frenado de cada línea espectral de primer orden en la tabla 4. Luego registre el potencial de frenado de cada línea espectral de segundo orden en la

tabla 4. El orden de los espectros se muestra en la figura 6. Recuerde utilizar los filtros amarillo y verde cuando se midan las líneas espectrales amarilla y verde.

3. Oriente el aparato h/e hacia las líneas espectrales de segundo orden y repita el procedimiento 2. Registre los datos en la tabla 4.

Tabla 4. Registro de los datos experimentales para el experimento 2.

Color de 2 ^{do} orden	λ (nm)	Frecuencia (10^{14} Hz)	Potencial de frenado [V]
Amarillo			
Verde			
Azul			
Violeta			
Ultravioleta			

Análisis.

Determine la longitud de onda y la frecuencia de cada línea espectral. Además, realice una gráfica del potencial de frenado vs frecuencia. Determine la pendiente y la intersección en el eje de las ordenadas (eje-Y) e interprete los resultados en términos de la relación h/e y W_0/e . Calcule h y W_0 e interprete los resultados basados en el modelo cuántico de la luz.