

Determinación de la Constante de Planck (relación h/e)

Gerardo V. Morelli¹, Mariano A. Nicotra¹, Víctor Arreguine² y Javier Martín¹

1. Dpto. de Física – Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales – UNC
2. Observatorio Astronómico de Córdoba - UNC

Resumen:

En este trabajo se plantea la ejecución práctica de un experimento llevado a cabo para determinar la constante de Planck, más precisamente la relación h/e , utilizando un moderno equipo Pasco - AP-8209 adquirido recientemente por el Laboratorio de Enseñanza de la Física de la FCEfYN (LEF).

Objetivo:

Instrumentar un Trabajo práctico de laboratorio para medir determinar la constante de Planck en la Cátedra de Física III para Ingeniería.

Efecto Fotoeléctrico. Resumen histórico:

El efecto fotoeléctrico en general, consiste en la extracción o liberación de electrones por los átomos de cualquier muestra de materia, cualquiera sea su estado, por acción de la radiación electromagnética que incide sobre la misma (en especial, luz ultravioleta o visible y rayos X).

Cuando Heinrich Hertz, en 1886-87, confirmó experimentalmente la existencia de las ondas electromagnéticas, predichas teóricamente por James C. Maxwell, también detectó que la incidencia de luz ultravioleta facilitaba el proceso de descarga eléctrica en chispa entre los electrodos que formaban parte del rudimentario oscilador eléctrico que utilizaba. Hertz, no se dedicó a profundizar sobre este fenómeno. Sí lo hicieron, en cambio, Lénard, Hallwachs y otros, comprobando que las partículas emitidas eran electrones y precisando datos empíricos y características de los fenómenos fotoeléctricos.

Se debe a Einstein, en 1905, la introducción de un modelo cuántico que permite la comprensión del fenómeno. Para ello, hubo de extender al fenómeno lumínico el concepto de cuantificación de la energía que ya había efectuado Planck en 1900 en su teoría sobre la radiación de calor por parte de un cuerpo negro. Por su propuesta, Einstein recibió el Premio Nóbel en Física en 1921.

Los resultados experimentales:

Los electrones de conducción de un metal se encuentran en un “pozo de energía potencial”. Esto implica que la interacción de ellos con los iones que integran el retículo cristalino del metal, aunque de intensidad débil, no permite que los electrones abandonen el volumen metálico, a menos que de algún modo se les suministre un nivel suficiente de energía adicional que permita a los electrones superar las “paredes” del pozo de energía potencial.

Los electrones de conducción poseen distintos niveles de energía:

$$E = \frac{1}{2}mV^2 + U_{pot}$$

Dentro del material algunos de ellos alcanzan un nivel de máxima energía denominado nivel de Fermi, en esta situación con el aporte de una energía Φ los electrones estarán en condiciones de abandonar la superficie del metal. A Φ se le denomina energía de extracción o función de trabajo de extracción. La misma depende de la naturaleza química del material emisor.

Desde el punto de vista puramente ondulatorio, el efecto fotoeléctrico es perfectamente espectable, pues se sabe que la luz transporta energía proporcionalmente al cuadrado de la amplitud de la onda, es decir, proporcionalmente a su intensidad. Esta energía bien puede ser suministrada a los electrones hasta que éstos estén en condiciones energéticas de abandonar el material, por un proceso de mera acumulación de la energía cedida a éstos por la onda. Pero resulta que algunas características experimentales típicas de este fenómeno no son compatibles con un punto de vista puramente ondulatorio para la energía luminosa, a saber:

1. Si la luz de una dada frecuencia no expulsa electrones de una sustancia dada, no lo hará por más alta que sea la intensidad luminosa.
2. Si la luz produce efecto fotoeléctrico, lo hará por más baja que sea su intensidad, aunque a menor intensidad, la cantidad de electrones emitidos será menor, lo que se traduce en un nivel menor de intensidad de corriente fotoeléctrica.
3. La emisión de electrones tiene una respuesta inmediata a la iluminación, por baja que sea la intensidad de la luz; la emisión, cuando existe, se hace sin retardos apreciables (los electrones emitidos no demuestran que estén acumulando energía durante un cierto intervalo temporal).

Ecuación de Einstein:

Einstein supuso que si bien la radiación electromagnética responde a nivel macroscópico a las ecuaciones de Maxwell, en su interacción con los electrones se comporta más bien como si estuviera formada por corpúsculos o "paquetes" de energía $E=h.f$, en donde f es la frecuencia de la onda electromagnética y h es la constante de Planck. Cuando los fotones interactúan con los electrones solo pueden intercambiar con ellos la totalidad de la energía E . Cuando un electrón que se encuentra en el material en el nivel de Fermi intercambia un paquete de energía mayor que Φ escapa del metal con una velocidad V .

Cuando un electrón logra por salir del emisor con máxima energía cinética:

$$\frac{1}{2}mV_{máx}^2 = h.f - \Phi$$

donde Φ , llamada "función trabajo", es el mínimo valor que toma el conjunto de los desniveles energéticos Φ' . La última expresión es denominada la ecuación de Einstein para el efecto fotoeléctrico.

El dispositivo experimental para el estudio del fenómeno:

Si el colector de la fotocelda se polariza negativamente respecto al emisor, a medida que se incrementa el valor absoluto de esa d.d.p. ΔV , la intensidad de la corriente fotoeléctrica i va disminuyendo. Para una sustancia dada del emisor y una frecuencia f de la luz que penetra en la fotocélula, existe un valor de ΔV que anula la corriente fotoeléctrica; es decir que el campo eléctrico entre emisor y colector ha tomado un valor tal que frena a todos los electrones que se desprenden en el emisor. Este valor de ΔV se denomina potencial de corte (ΔV_c) y no depende de la intensidad de la luz (figura 1). Cuando el colector se polariza positivamente frente al emisor la corriente fotoeléctrica crece junto con la d.d.p. hasta estabilizarse. Esta corriente máxima depende de la intensidad de la luz (figura 1) y es mayor cuanto mayor es la intensidad I de la luz incidente en el emisor.

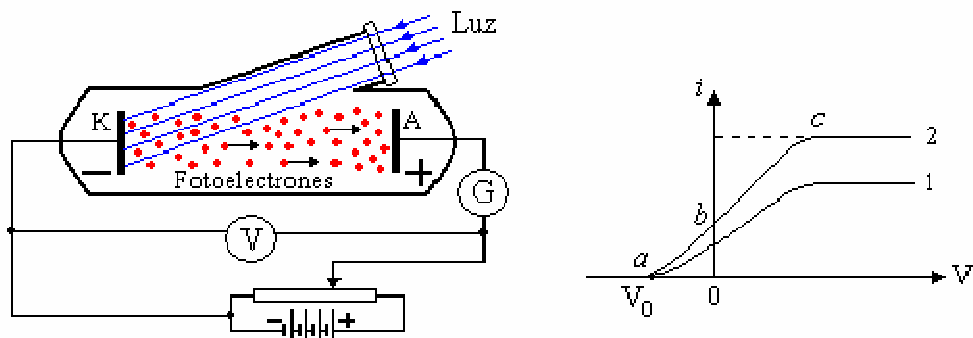


Figura 1: Esquema de la configuración experimenta y curvas resultantes

Cambiando la frecuencia f de la luz incidente cambia la d.d.p. de corte ΔV_c manteniéndose constante a esta frecuencia sin importar la intensidad de la luz. En la figura 2 se grafica en ordenadas el producto entre la carga del electrón y la d.d.p. de corte $e \cdot \Delta V_c$, que puede expresarse en joule (J) o en electrón-voltios (eV) y en abscisas, la frecuencia f de la luz que ingresa, expresada de hertz (Hz). Para una sustancia dada en el emisor, existe un valor de frecuencia, llamada umbral (f_u) por debajo del cual no se produce fenómeno fotoeléctrico. Para otro metal este valor es diferente, pero la recta que representa la relación es paralela a la anterior, es decir, la pendiente no depende del material del emisor.

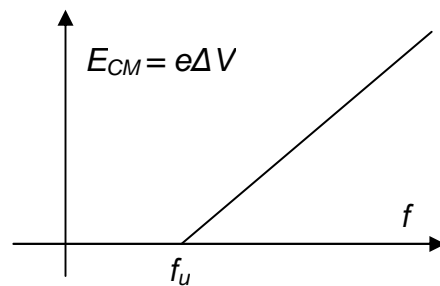


Figura N°2: curva característica

Cuando con ayuda del potenciómetro, se consigue anular la corriente fotoeléctrica, se ha producido un campo eléctrico que frena todos electrones emitidos incluso los los que escapan con mayor velocidad. La energía cinética con que se desprenden esos electrones más veloces $m \cdot V_{\text{max}}^2 / 2$ se transforma en energía potencial eléctrica $e \cdot \Delta V_c$ y los electrones retroceden antes de alcanzar el colector. De modo que cuando $i = 0$ se puede escribir que:

$$\frac{1}{2} m V_{\text{máx}}^2 = h \cdot f - \Phi = e \cdot \Delta V_c$$

que es, precisamente, la ecuación de la recta de la Figura 2. En general, al emisor ingresan numerosos fotones por cada segundo. Este número tiene que ver con la intensidad I de la luz, que desde el punto de vista cuántico está dada por $I = N \cdot hf$, donde N es el número de fotones que incide sobre el emisor por metro cuadrado y por segundo, resultando I en watt/metro².

Tabla I

Lon. de onda nm	Frecuencia $\times 10^{14}$ Hz	d.d.p. frenado V	Diametro mm
365	8,219	1,743	2
405	7,407	1,38	2
436	6,881	1,193	2
546	5,495	0,62	2
577	5,199	0,509	2
365	8,219	1,781	4
405	7,407	1,403	4
436	6,881	1,2	4
546	5,495	0,619	4
577	5,199	0,508	4
365	8,219	1,81	8
405	7,407	1,424	8
436	6,881	1,216	8
546	5,495	0,62	8
577	5,199	0,516	8

Resultados experimentales:

Para realizar el experimento se utilizó el dispositivo para determinar la Constante de Planck (relación h/e) Pasco - AP-8209, equipo disponible en el LEF (anexo I). Este equipo, que se esquematiza en la figura 1, utiliza el tradicional método de emisión fotoeléctrica con determinación del potencial de frenado para distintas longitudes de onda, y permite variar la intensidad luminosa cambiando el diámetro de la abertura que ilumina la célula foto voltaica. La tabla I y la figura 3 sintetizan los resultados experimentales.

Conclusión:

En las tres determinaciones experimentales que se realizaron en esta actividad se obtuvieron valores de h con un error menor al 5% que esta dentro de lo especificado por la firma Pasco para el equipo AP-8209. Por otro lado es preciso destacar

que si bien la operación del equipo es relativamente simple, su puesta a punto requiere de algunos cuidados y conocimiento sobre la forma en que se debe operar el equipo por lo que creemos que no es recomendable plantear este experimento como un trabajo práctico a realizar por los alumnos. Por lo que se aconseja su utilización como un recurso didáctico en el dictado de clases teóricas operado por personas bien entrenadas en el uso de este dispositivo.

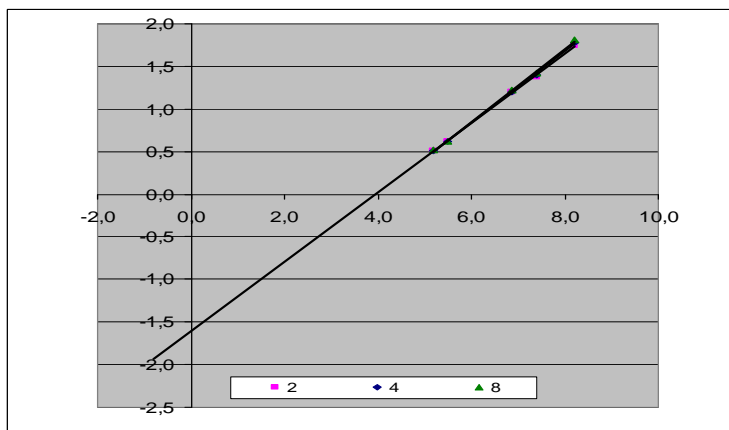


Figura N°3: grafica e. ΔV vs f

Bibliografía:

Morelli, Gerardo V. (2008) Física III. Física Moderna; Editorial Universitatis, 1ra. edición, Córdoba, pág. 115-121.

Anexo I

Sistema para determinar la Constante de Planck (relación h/e) Pasco - AP-8209



Generalidades

Fuente de luz de Hg.
Filtros de 365, 404.7, 435.8, 546,1 y 578nm
Tres juegos aperturas
Incluye caja de control y medición

Cabezal Fotoeléctrico

Respuesta espectral: 300 a 700nm
Sensibilidad: 1microA/Lm
Ánodo anular de níquel
Corriente de fuga menor a $2e-13A$ cuando $V_{ak} < 2V$

Caja de Medición y Control

Amplificador de corriente
6 rangos entre $1e-8$ y $1e-13A$
Display: 3 1/2 dígitos
Deriva térmica: menor al 0,2% de fondo de escala después de 30 minutos
Tiempo de estabilización previa: 20minutos

Tensión de salida

2 rangos continuamente regulables entre -2 y +2V, y entre -2 y +30V
Estabilidad mejor que el 0,1%
Display de 3 1/2 dígitos

Error en la determinación experimental menor al 5%