34 Olimpiada Española de Física

Fase de Aragón

2ª PRUEBA

24 de febrero de 2023

Problema experimental. Efecto fotoeléctrico

Si bien Albert Einstein es principalmente conocido por su *Teoría de la relatividad*, recibió el premio Nobel en 1921 por la explicación del *efecto fotoeléctrico*, por el cual la luz es capaz de arrancar electrones de la superficie de un metal.

Modelo teórico.

La originalidad de la teoría formulada por Einstein en 1905 consistió en suponer que, cuando interacciona con la materia, la luz puede considerarse como un conjunto de partículas, llamadas fotones, cada una de las cuales tiene una energía $E = h \cdot f$, donde f es la frecuencia de la luz y h la constante de Planck, una constante universal. Cuando se ilumina la superficie de un metal, un fotón interacciona con un electron del metal, le cede toda su energía, y si esta es suficiente, lo arranca del átomo. Si no tiene energía suficiente, no puede arrancar el electrón, por mucho que se aumente la intensidad de la luz (es decir, el número de fotones).

Si la energía del fotón incidente es mayor que la necesaria para arrancar el electrón, el resto de energía le proporciona energía cinética, de modo que la máxima energía con la que sale el electrón del metal viene dada por

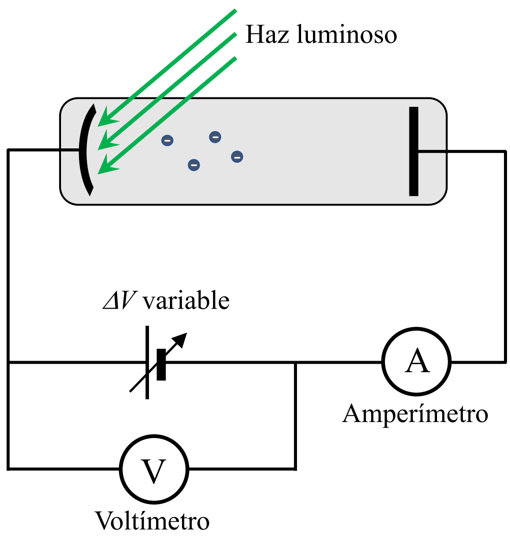
$$(E_c)_{\max} = \frac{1}{2} m_e v_{\max}^2 = hf - W_o \qquad (1)$$

donde W_o es la energía necesaria para arrancar el electrón de la superficie del metal. Por ello se le denomina *función trabajo* (o *trabajo de extracción*) y depende de las características del metal.

El efecto fotoeléctrico sólo tiene lugar si la frecuencia del fotón supera a la correspondiente a la *frecuencia umbral*, f_o, de modo que $W_o = h \cdot f_o$, por lo que podemos reescribir (1) en la forma

$$(E_c)_{\max} = h(f - f_o) \qquad (2)$$

Montaje experimental.



En la figura se muestra un esquema del dispositivo empleado para estudiar el efecto fotoeléctrico. La placa metálica sobre la que incide la luz se encuentra dentro de un tubo en el que se ha hecho el vacío, en uno de sus extremos. En el otro se coloca otra placa metálica. Ambas se conectan eléctricamente a través de un amperímetro, que permite medir la intensidad de corriente en el circuito, y una fuente de tensión (o diferencia de potencial) variable, de valor ΔV. Los electrones producidos por efecto fotoeléctrico salen de la placa metálica con una energía cinética máxima dada por (2) y pueden llegar a la placa del otro extremo cerrando el circuito. Variando la diferencia de potencial ΔV se pueden frenar los electrones, impidiendo que lleguen a la placa, y por tanto haciendo cero la intensidad. El valor más pequeño de ΔV para el cual la intensidad del amperímetro es cero se denomina *potencial de frenado*, V_f, y corresponde a

$$V_f = \frac{h}{e}(f - f_o) \qquad (3)$$

Preguntas.

En la siguiente tabla se recogen los valores del potencial de frenado V_f cuando se ilumina el metal con luz de diferentes frecuencias.

Color de la luz	**f (·10^{14} Hz)**	**V_f (V)**
Amarillo	5,20	0,49
Verde	5,49	0,68
Azul	6,88	1,24
Violeta	7,41	1,41
Ultravioleta	8,22	1,76
Ultravioleta	8,98	2,12

a) Representa gráficamente en el papel milimetrado los puntos $(x, y) = (f, V_f)$.

b) Determina el valor de la pendiente p de la recta que mejor se ajusta a estos puntos.

c) A partir de la pendiente p y de la expresión (3) deduce el valor de la constante de Planck, h.

d) Haz una estimación razonada de la incertidumbre Δp de la pendiente obtenida en el apartado b).

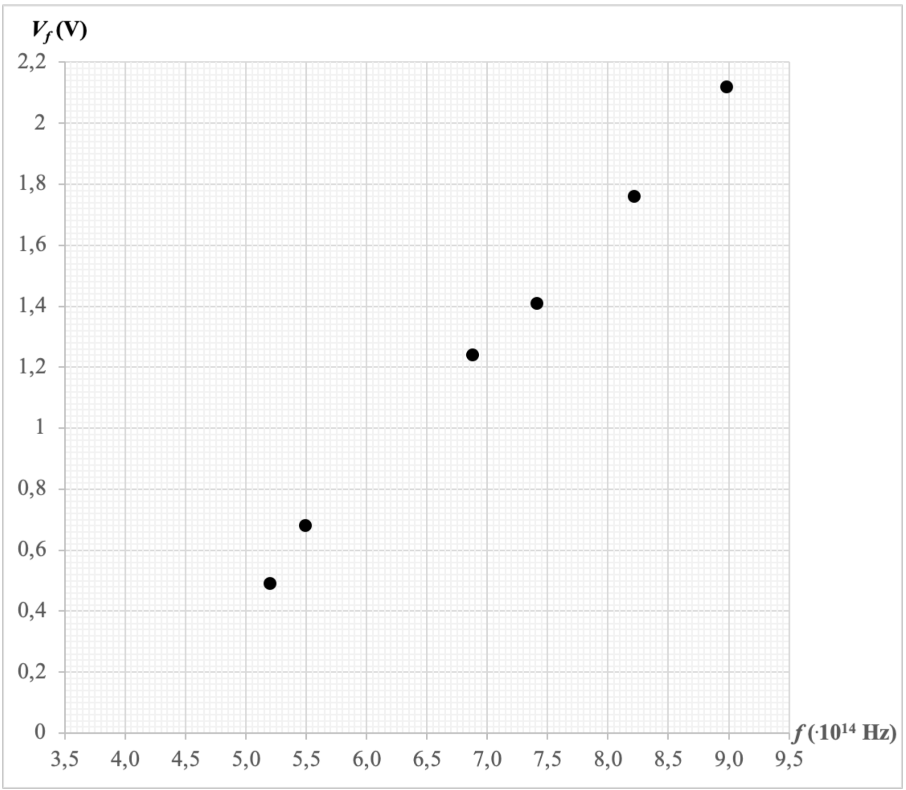
e) Teniendo en cuenta lo anterior, haz una estimación de la incertidumbre Δh en el valor de la constante de Plank que has obtenido en c).

f) Determina el valor de la frecuencia umbral, f_o, y de la función trabajo, W_o.

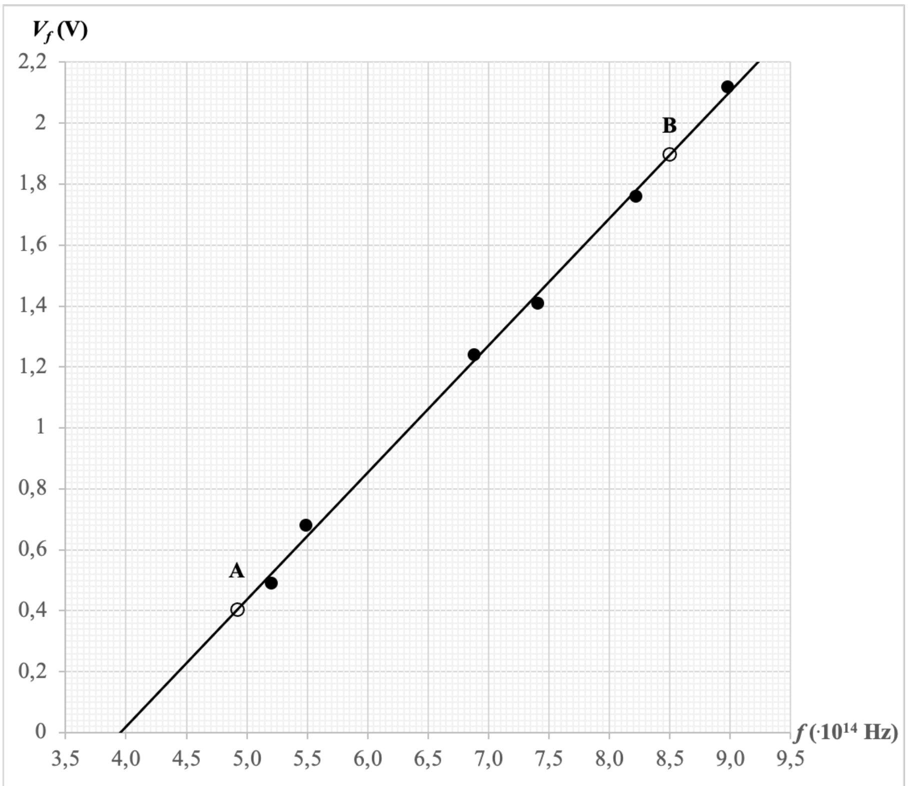
Dato: - Carga del electrón, $e = 1{,}602 \cdot 10^{-19}$ C.

Problema experimental. Solución

a) A continuación se presenta la gráfica pedida, con el aspecto que tendría dibujada en papel milimetrado.



b) Para determinar de forma "manual" la recta que mejor se ajusta a los puntos experimentales se busca la recta que pasa lo más cerca posible de todos ellos y de forma que queden igual de dispersos a cada lado.



Tomamos dos puntos auxiliares alejados sobre esta recta (no puntos experimentales), por ejemplo $A(4{,}9\cdot 10^{14};\ 0{,}4)$ y $B(8{,}5\cdot 10^{14}; 1{,}9)$.

La pendiente de la recta es

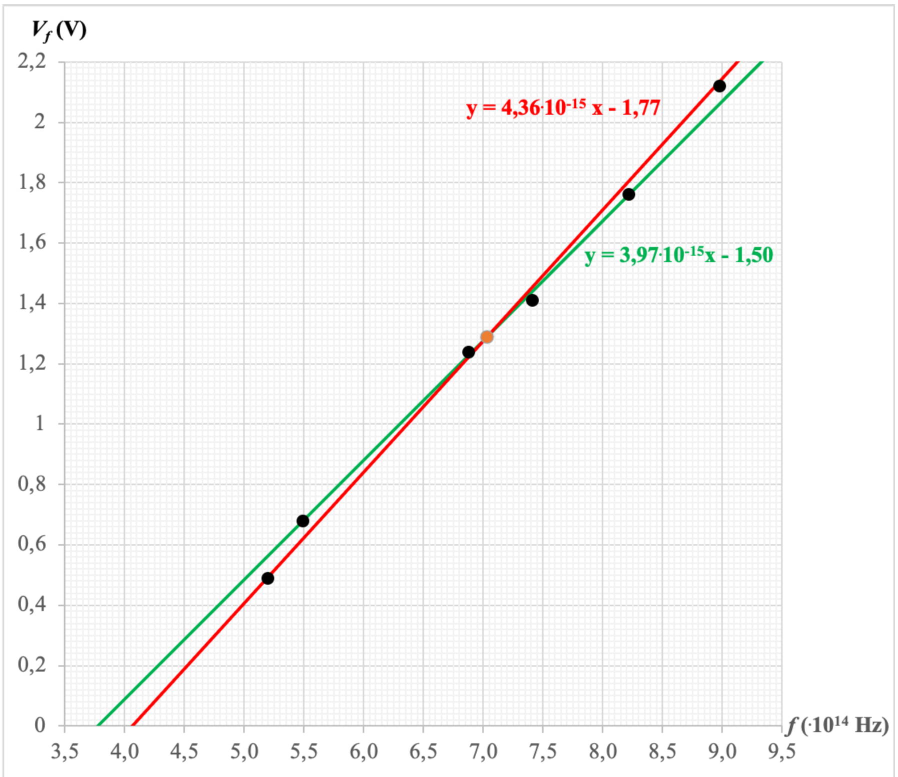
$$\boxed{p = \frac{y_B - y_A}{x_B - x_A} = \frac{1{,}9 - 0{,}4}{(8{,}5 - 4{,}9)\cdot 10^{14}} = 4{,}17\cdot 10^{-15}\ \mathrm{V\cdot s}}$$

Un ajuste analítico por el método de *mínimos cuadrados* conduce a un valor prácticamente igual.

c) De acuerdo con la expresión (3) del enunciado, se espera que la dependencia de V_f con f sea lineal, con pendiente

$$p = \frac{h}{e} \quad \rightarrow \quad h = p\cdot e \quad \rightarrow \quad \boxed{h = 6{,}68\cdot 10^{-34}\ \mathrm{J\cdot s}}$$

d) Para hacer una estimación de la incertidumbre Δp trazamos, de nuevo "a ojo", las rectas que pasando por el "centro" de los puntos, $(\bar{x}, \bar{y}) = (7{,}03;\ 1{,}28)$ y, con pendientes máxima y mínima, se ajustan razonablemente a los puntos experimentales.



La incertidumbre estimada de la pendiente, Δp, vendrá dada por

$$\Delta p = \frac{p_{\max} - p_{\min}}{2} \quad \rightarrow \quad \boxed{\Delta p = \frac{(4{,}36 - 3{,}97)\cdot 10^{-15}}{2} = 0{,}2\cdot 10^{-15}\ \mathrm{V\cdot s}}$$

Dado que sólo tenemos 6 puntos experimentales, la incertidumbre se da con una cifra significativa, de modo que la pendiente con su incertidumbre será

$$\boxed{p = (4{,}2 \pm 0{,}2)\cdot 10^{-15}\ \mathrm{V\cdot s}}.$$

e) Dado que la constante de Planck es proporcional a la pendiente *p*, su incertidumbre se puede obtener directamente como

$$\Delta h = e\cdot \Delta p \qquad \Delta h = 0{,}3\cdot 10^{-34}\ \mathrm{J\cdot s}$$

donde también hemos tenido en cuenta que, en este caso, la incertidumbre se da con una cifra significativa.

Así, a partir de los datos del experimento, podemos concluir que

$$\boxed{h = (6{,}7 \pm 0{,}3)\cdot 10^{-34}\ \mathrm{J\cdot s}}$$

El valor actualmente aceptado para la constante de Planck es $h = 6{,}62607015\cdot 10^{-34}\ \mathrm{J\cdot s}$, que queda dentro del intervalo determinado en el experimento.

f) Si sustituimos $f = f_o$ en la expresión (3) del enunciado obtenemos

$$V_f(f = f_o) = 0$$

de modo que $f = f_o$ corresponde al punto de corte de la recta de mejor ajuste con el eje *x*. De la gráfica correspondiente

$$\boxed{f_o = 3{,}95\cdot 10^{14}\ \mathrm{Hz}}$$

A partir de este valor y del valor de *h* que hemos determinado obtenemos la función trabajo del metal,

$$W_o = hf_o \quad \Rightarrow \qquad \boxed{W_o = 2{,}65\cdot 10^{-19}\ \mathrm{J}}$$

Dividiendo W_o por la carga de electrón podemos expresar la función trabajo en eV,

$$\boxed{W_o = 1{,}65\ \mathrm{eV}}$$