

DETERMINACIÓN DE LA CONSTANTE DE PLANCK POR RADIACIÓN TÉRMICA EN EL LABORATORIO DOCENTE DE FÍSICA

DETERMINATION OF THE PLANCK CONSTANT BY THERMAL RADIATION IN THE PHYSICS TEACHING LAB

J. CRUZ[†], J. LÓPEZ

Departamento de Física, Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría” (CUJAE), 19390 La Habana, Cuba; juan@automatica.cujae.edu.cu[†]

[†] autor para la correspondencia

Recibido 16/3/2017; Aceptado 20/10/2017

PACS: Laboratory experiments, 01.50.Pa; Errors in physics classroom, 01.50.Zv; Laboratory course design, 01.50.Qb

Llevar el fenómeno de radiación térmica a nivel de experimentos de laboratorios docentes es una tarea complicada. Es necesario una adecuada modelación, así como, la medición indirecta de altas temperaturas. Se reporta el uso de lámparas incandescentes para el estudio del fenómeno, tanto en prácticas de la modalidad real [1,2], como de la virtual [3,4].

El trabajo tiene dos propósitos fundamentales: primero, dejar evidencia, para los docentes, de que siempre será posible realizar prácticas reales donde se estudie este fenómeno utilizando dichas lámparas; segundo, reportar resultados obtenidos en laboratorios docentes que se llevan a cabo en la Universidad Tecnológica de la Habana.

Para el primero se realizó un estudio paramétrico donde se compara la radiancia espectral $R_{(\lambda,T)}$ del cuerpo negro (CN), con la del filamento de tungsteno (FT).

Se modeló el FT como un CN que cumple fórmula de Wien de la radiación térmica, aproximación de la ley de Planck, (1), calculando $R_{(\lambda,T)}$ para sus temperaturas típicas de trabajo y utilizando los datos de $\epsilon_{(\lambda,T)}$ para el FT reportados en la literatura [5].

$$R_{(\lambda,T)} = \epsilon_{(\lambda,T)} \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} e^{-\frac{hc}{\lambda kT}}. \quad (1)$$

Los cálculos realizados muestran que el FT presenta una considerable emisión en la región visible del espectro electromagnético tal y como se reporta en la literatura [6,7].

En el estudio paramétrico se considera que la iluminación que produce el cuerpo radiante es proporcional a la intensidad de la radiación $J_{(\lambda,T)}$, con que emiten tanto el CN como el FT en un intervalo de longitudes de ondas $\Delta\lambda$, de la región visible del espectro. La intensidad $J_{(\lambda,T)}$ se obtiene por la ley de Stefan-Boltzman:

$$J_{(\lambda,T)} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_{(\lambda,T)} d\lambda. \quad (2)$$

Se dio solución numérica a la integral de la ecuación (1) para un valor de $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1 = 20$ nm en el entorno de $\bar{\lambda} = 550$

nm. Se utilizan valores de temperaturas comprendidas en el intervalo de 1700 K a 2100 K, valores típicos para el FT.

Como parte esencial del estudio paramétrico, los valores obtenidos de $J_{(\lambda,T)}$ se procesaron mediante el gráfico $\ln \frac{J}{J_0}$ vs $\frac{T-T_0}{T_0}$, donde J_0 y T_0 corresponden a la menor intensidad y temperatura respectivamente. Ver Figura 1.

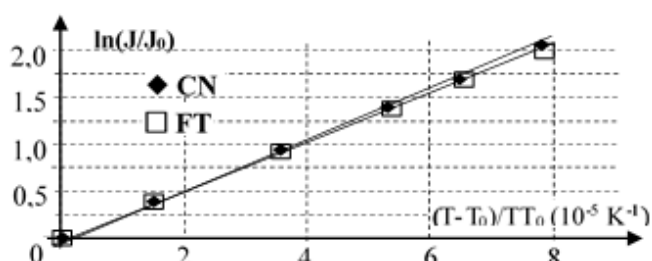


Figura 1. Para el CN, pendiente: (26183 ± 0.42) K, intercepto, $(-3.01 \pm 2.09)10^{-5}$ y $R^2 = 0.999999999$. Para el FT, la pendiente: (26038 ± 2.77) K, intercepto, $(1.89 \pm 1.38)10^{-4}$ y $R^2 = 0.999999955$.

La evidente linealidad de las curvas obtenidas y los valores de las pendientes, sugieren que modelar el FT como un CN en la aproximación de Wien solamente introduciría un error de 0,56 % respecto a este último.

En opinión de los autores este resultado avala que el FT puede utilizarse para el estudio de la radiación del CN, en la aproximación de Wien, para el rango visible del espectro.

I. DISEÑO EXPERIMENTAL REALIZADO EN LA CUJAE

El diseño se muestra en la Figura 2.

Se realizan las mediciones directas de voltaje V , intensidad de corriente I y la iluminación E . Previamente se ha caracterizado al filtro en sus valores de $\bar{\lambda}$ y $\Delta\lambda$, se ha medido la resistencia R_0 a temperatura ambiente y se ha calibrado la respuesta del luxómetro para la $\bar{\lambda}$.

Con los valores de V e I se calcula, mediante la ley de Ohm, la resistencia eléctrica R del FT. La temperatura T del FT se

estima a partir de la relación entre R , R_0 y T dada en [1].

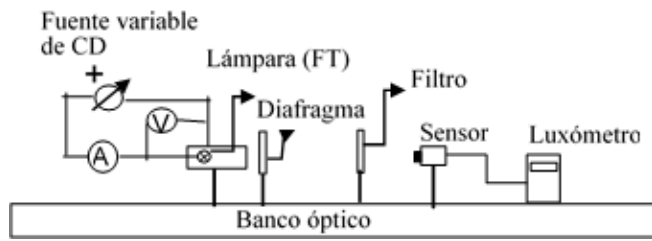


Figura 2. Esquema de instalación experimental.

Presupuestos teóricos:

- $R_{(\lambda,T)}$ del FT se calcula por la aproximación de Wien, (1). La iluminación E es proporcional a $J_{(\lambda,T)}$, según la ecuación (2).
- Como $\Delta\lambda$ es pequeño se puede sustituir el cálculo de la integral por su valor estimado mediante el teorema del valor medio.

De estos supuestos se puede plantear que la iluminación que se mide está dada por

$$E = p \left(\epsilon_{(\lambda,T)} \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \Delta\lambda e^{-\frac{hc}{\lambda kT}} \right)^q \quad (3)$$

Donde p es el coeficiente que permite la conversión de $J_{(\lambda,T)}$ a E , q es el parámetro adimensional que se determina en experimento previo y que permite calibrar el luxómetro para el valor de $\bar{\lambda}$ del filtro, c es la velocidad de la luz en el vacío, k es la constante de Boltzman y h es la constante de Planck.

Normalizando (1) se puede llegar a

$$\ln\left(\frac{E}{E_0}\right) = \frac{qhc}{\bar{\lambda}k} \left(\frac{T - T_0}{TT_0} \right) \quad (4)$$

De la pendiente del gráfico $\ln\left(\frac{E}{E_0}\right)$ vs $\left(\frac{T - T_0}{TT_0}\right)$ puede obtenerse la constante de Planck.

La Tabla 1 muestra resultados experimentales obtenidos en el laboratorio docente de la Universidad Tecnológica de la Habana. Las incertidumbres de las mediciones directas de I , V y E fueron 0.004 A; 0.131 V y 0.058 lx, respectivamente.

Tabla 1.

I (A)	V (V)	E (lx)	R (Ω)	T (K)	$\frac{E}{E_0}$	$\ln\left(\frac{E}{E_0}\right)$	$\frac{T - T_0}{TT_0}$ (10^{-5} K^{-1})
0.400	9.92	3.4	24.8	1799	1.0	0.00	0.00
0.420	11.2	5.0	26.7	1865	1.5	0.39	1.95
0.435	12.2	7.3	28.0	1936	2.1	0.76	3.92
0.450	13.1	9.7	29.1	2002	2.9	1.05	5.62
0.465	14.1	12.9	30.3	2063	3.8	1.33	7.09
0.480	15.0	16.4	31.3	2119	4.8	1.57	8.38

En el experimento $R_0 = (2.40 \pm 0.01) \Omega$ para una temperatura $T = (303 \pm 0.041) \text{ K}$, se utilizó un filtro con transmitancia en el intervalo de $\bar{\lambda} = 580 \text{ nm}$, y $\Delta\lambda = 20 \text{ nm}$.

Se obtuvo experimentalmente $q = 0.784 \pm 0.023$. Los datos de la Tabla 1 se graficaron como se muestra en la Figura 3.

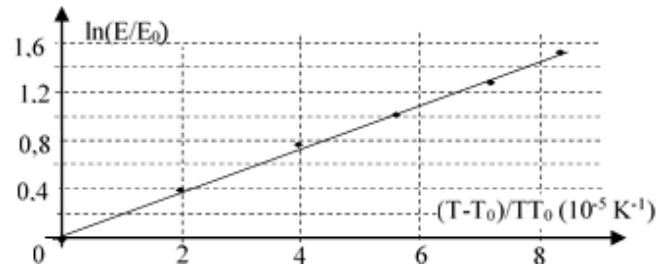


Figura 3. Pendiente: $(18629 \pm 190) \text{ K}$, intercepto: $0,015 \pm 0,010$ y $R^2 = 0,9995$.

A partir de estos resultados se estimó el valor $h = (6,23 \pm 0,56)10^{-34} \text{ Js}$ con nivel de confianza de 95 %. La incertidumbre expandida se calculó utilizando el procedimiento sugerido en [8].

En resumen, se concluye que se pueden realizar con éxito prácticas de laboratorios docentes del fenómeno de radiación térmica utilizando lámparas incandescentes.

El análisis de incertidumbres en esta modalidad de práctica reviste una gran importancia en la formación de los estudiantes por la cantidad y variedad de magnitudes físicas cuya medición la misma involucra.

REFERENCIAS

- [1] M. Vallés, et. al., "Prácticas de laboratorio de Física III", 1ra Ed. (Ed. ISPJAE, La Habana 1987).
- [2] L. Martino, V. Raspa, "Determinación de la constante de Planck usando una lámpara de tungsteno". www.fisicarecreativa.com/inform_mod/constante_plank2k.pdf.
- [3] S. Oliveros, et. al., Rev. Col. de Fís. **38**, 4 (2006).
- [4] Z. Morantes, et. al., Telematique **7**, 2 (2008).
- [5] American Institute of Physics Handbook. 2nd Ed. (McGraw-Hill, New York, 1963).
- [6] L. Landsberg, Óptica Tomo 2, 3rd Ed. (MIR, Moscú, 1980).
- [7] S. Frish, A. Timoreva, Curso de Física General Tomo 3, 1st Ed. (MIR, Moscú, 1968).
- [8] M. Pérez, Rev. Esp. de Metrol., (2012).