

# SIMULACIONES DE LOS EXPERIMENTOS DEL TUBO DE LEYBOLD Y DEL ESTUDIO DE LA RADIACIÓN TÉRMICA

## SIMULATIONS OF LEYBOLD TUBE EXPERIMENTS AND THE STUDY OF THERMAL RADIATION

J. ORTEGA BRETO

Departamento de Física, Instituto de Ciencias Básicas, Universidad Tecnológica de la Habana “José Antonio Echeverría” CUJAE, La Habana, Cuba; justoo@automatica.cujae.edu.cu<sup>†</sup>

<sup>†</sup> autor para la correspondencia

Recibido 9/03/2020; Aceptado 27/09/2020

PACS: Physics learning (aprendizaje de la física), 01.50.H-; laboratory computer use (uso de computadoras en el laboratorio), 01.50.Lc; computer software and software reviews (software de computadoras y revisiones de software), 01.50.hv

En general se comprende cuál es la importancia del laboratorio de Física en el nivel universitario, pero sucede que el equipamiento experimental necesario suele tener precios elevados y se requiere una preparación adicional de los profesores. Los costos del equipamiento se pueden disminuir mediante la construcción de los equipos a partir de partes y piezas de uso, como el tubo de pantalla de un televisor [1], lo que implica de todos modos más trabajo por parte de los profesores. Otra variante, entre otras, consiste en acceder de forma remota y controlar un experimento didáctico, como se ha hecho en el caso del experimento de Thomson [2].

En el presente trabajo se trata el diseño de dos simulaciones computarizadas de experimentos de Física para el nivel universitario, con el objetivo de mejorar la preparación del estudiante y acercarlo al experimento real.

Las simulaciones se han desarrollado mediante el sistema de autor Easy Java Simulations, conocido por EJS. Aunque se dice que los sistemas de autor simplifican las tareas de programación algunas personas no están de acuerdo con esto. EJS es un software libre con herramientas para el desarrollo de gráficos dinámicos. Puede descargarse desde el sitio <http://fem.um.es/EJS> [3].

Se han tomado como base el experimento del tubo de Leybold, a partir del cual se puede comprobar el valor de la relación carga– masa del electrón y el experimento sobre el estudio de la radiación térmica. El tubo de Leybold posee un cátodo emisor de electrones que son acelerados bajo una tensión  $V_a$ . Los electrones se mueven en una región donde existe un campo magnético aproximadamente uniforme, de inducción magnética  $\vec{B}$  perpendicular a la velocidad de dichos electrones. Estos se encuentran dentro de un bulbo de vidrio en cuyo interior hay un gas enrarecido que produce cierta luminiscencia al interactuar con el haz y esta luminiscencia permite visualizar la trayectoria circular de los electrones.

El campo magnético es producido por unas bobinas de Helmholtz como se muestra en el problema 28.67 de la referencia [4].

Puede demostrarse que la relación carga-masa del electrón

está dada por:

$$\frac{e}{m_e} = \frac{8V_a}{B^2 D^2} \quad (1)$$

donde  $m_e$  es la masa del electrón,  $e$  su carga,  $v$  su rapidez,  $D$  el diámetro del haz de electrones y  $B$  el valor de la inducción magnética.

La simulación consiste en un fichero ejecutable (.jar) que se ha empaquetado a partir de la simulación original y necesita para funcionar la instalación de una máquina virtual de java. Aparecen simultáneamente dos ventanas: la de ejecución (Fig. 1) y la de descripción (Fig. 2). En la primera se muestra una fotografía del equipo experimental junto con dos deslizadores que se utilizan para variar la intensidad de la corriente en las bobinas y la tensión aceleradora.

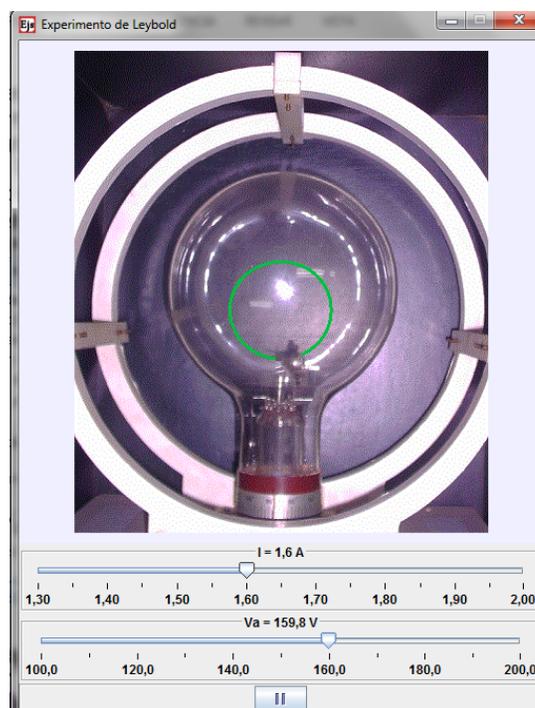


Figura 1. Ventana de ejecución de la simulación sobre el experimento de Leybold. Se muestra el haz de electrones.

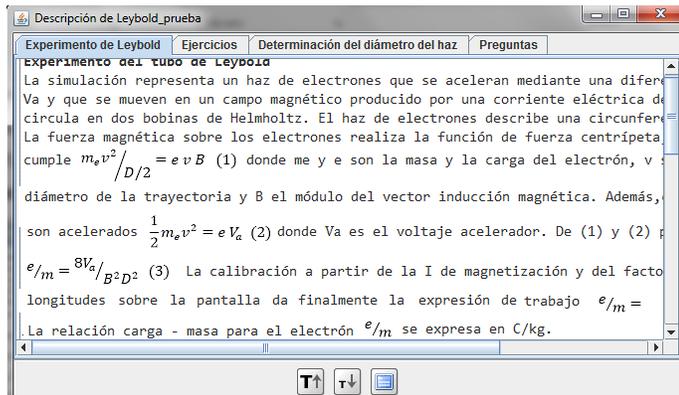


Figura 2. Ventana para la descripción del experimento. Fundamentos teóricos.

La expresión de trabajo es:

$$\frac{V_a}{I^2} = 2.35 \cdot 10^{-9} \frac{e}{m_e} D^2, \quad (2)$$

ya que es necesario tener en cuenta que la inducción magnética en (1) debe expresarse en función de la intensidad de la corriente  $I$  que genera el campo magnético, lo que requiere una calibración y también hay que relacionar las coordenadas en pantalla con las dimensiones del equipo real.  $D$  se expresa en dichas coordenadas,  $V_a$  en V y el valor de la relación carga-masa en C/kg.

La ventana para la descripción del experimento contiene varias pestañas: fundamentos teóricos (Fig. 2), ejercicios, determinación del diámetro del haz (Fig. 3) y preguntas (Fig. 5). Los ejercicios de la simulación son los siguientes:

- Realice al menos diez mediciones del diámetro  $D$  del haz de electrones para diez valores diferentes de la tensión  $V_a$  con un valor constante de la intensidad de corriente de magnetización.
- Construya un gráfico de  $D^2$  contra  $V_a/I^2$  utilizando el método de los mínimos cuadrados. Calcule su pendiente.
- Con la pendiente y la expresión (2), calcule la relación carga-masa del electrón.

Se obtiene para la relación carga-masa:

$$\frac{e}{m_e} = 1.75 \cdot 10^{11} \text{ C/kg}. \quad (3)$$

El gráfico con los resultados de la simulación se muestra a continuación en la Fig. 4.

La ecuación de ajuste es:

$$D^2 = 412.4 \left( \frac{V_a}{I^2} \right) + 2.080, \quad (4)$$

y el coeficiente que caracteriza el grado de linealidad:

$$R^2 = 0.9995. \quad (5)$$

Es posible ejercitar el cálculo de incertidumbres en la relación carga-masa a partir de la incertidumbre en la pendiente debida a las resoluciones de la tensión y las coordenadas en pantalla.



Figura 3. Determinación del diámetro del haz de electrones.

La ventana de descripción incluye una lista de preguntas que pueden ayudar al estudiante en el análisis de los resultados y la interpretación de todo el experimento.

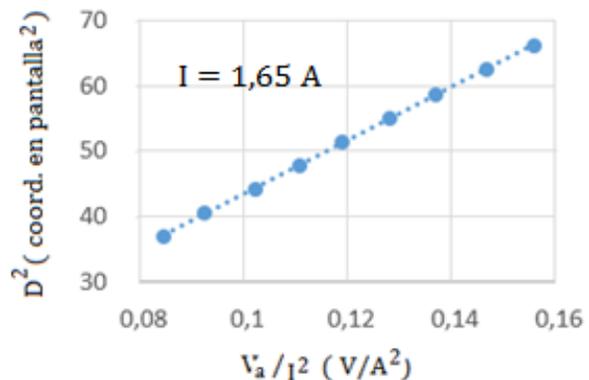


Figura 4. Gráfico de  $D^2$  contra  $\frac{V_a}{I^2}$ .

La simulación en su conjunto es una pequeña unidad de instrucción. Se trata de incentivar el trabajo independiente de los alumnos en la preparación de una práctica de laboratorio [5] o en la aproximación al trabajo experimental si no se cuenta con el equipamiento adecuado. En el caso del experimento descrito la simulación sirve además para prolongar el tiempo de vida limitado de este equipo.

Se hizo un ensayo con dos grupos de estudiantes de 2do año de la carrera de Ingeniería Industrial que cursaban la asignatura Física II. Se coordinó con los alumnos un horario para consultas, al que asistieron sólo 21. El 63,2% de los 57 estudiantes confrontó dificultades a la hora de estudiar independientemente los fundamentos teóricos y las instrucciones de la simulación, lo que se puso de manifiesto en la discusión con el profesor de los resultados del trabajo.

Al final las calificaciones fueron las siguientes: 9 alumnos con 5, 12 con 4, 20 con 3 y 16 con 2. Las notas con 2 o 3 se debieron a la razón expuesta antes sobre la interpretación de

los contenidos. A pesar de eso todos los alumnos calificaron el trabajo de muy interesante.

A continuación se muestra la lista de las preguntas (Fig. 5).

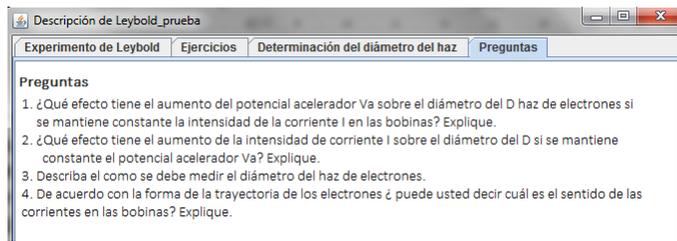


Figura 5. Preguntas para la preparación de los estudiantes.

La simulación sobre el estudio de la radiación térmica es una versión del experimento correspondiente que es parte de los cursos de Física III en nuestro centro.

El experimento (Fig. 6) consiste en medir la iluminación a una cierta distancia fija de un filamento de tungsteno, que se considera un cuerpo gris, por el que circula una corriente eléctrica de intensidad  $i$ . Se hace variar la tensión  $v$  en el filamento y se mide la intensidad de corriente  $i$  a través de él. Para demostrar la expresión de trabajo se toma como punto de partida la ley de Wien ya que se trabaja en la región del espectro visible a temperaturas absolutas cercanas a  $T = 1000$  K.

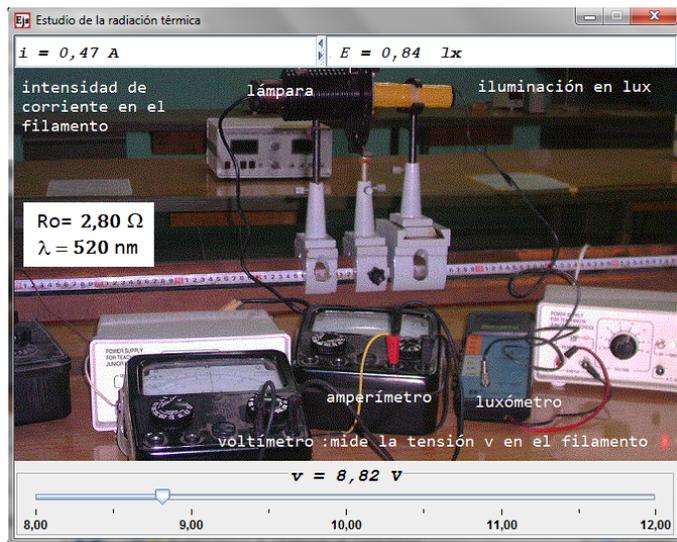


Figura 6. Montaje experimental. Estudio del fenómeno de la radiación térmica.

El intervalo de las longitudes de onda de trabajo se estrecha mediante un filtro de longitud de onda característica  $\lambda$ . La iluminación  $E$  medida con el luxómetro se expresa en función del poder emisor espectral y la temperatura del filamento se mide a partir de su resistencia:

$$R = \frac{V}{i}, \quad (6)$$

y las expresiones:

$$R = R_0(1 + \alpha t + \beta t^2 + \gamma t^3), \quad (7)$$

despreciando los términos cuadrático y cúbico de  $t$ .

$$R = R_0(1 + \alpha t), \quad (8)$$

$$T(K) = \frac{R - R_0}{\alpha R_0} + 273, \quad (9)$$

donde  $R_0$  es la resistencia del filamento para  $t = 0^\circ\text{C}$ . Se conoce que para el tungsteno  $\alpha = 5.238 \cdot 10^{-30} \text{C}^{-1}$ .

Finalmente se puede obtener la ecuación de trabajo:

$$\ln\left(\frac{E}{E_0}\right) = \frac{hc}{\lambda k} \ln\left(\frac{T - T_0}{TT_0}\right), \quad (10)$$

donde  $E_0$  y  $T_0$  son los valores mínimos en los pares de valores de la iluminación y la temperatura absoluta;  $h$  es la constante de Planck,  $c$  la rapidez de la luz en el vacío y  $k$  la constante de Boltzmann.

La resistencia del filamento a  $t = 0^\circ\text{C}$  es  $R_0 = 2.80 \Omega$  y la longitud de onda característica del filtro es de 520 nm.

Se puede comprobar la linealidad de (10) e incluso calcular la constante  $h$  a partir de los valores de las otras dos.

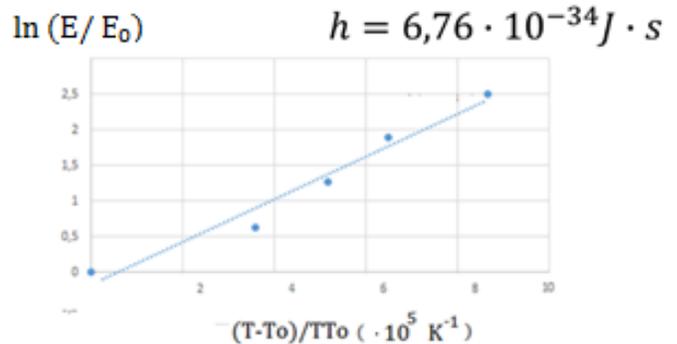


Figura 7. Gráfico de  $\ln\left(\frac{E}{E_0}\right)$  vs  $\ln\left(\frac{T-T_0}{TT_0}\right)$ .

Se obtiene  $h = 6.76 \cdot 10^{-34} \text{Js}$ .

En resumen se da continuidad al trabajo del autor sobre el perfeccionamiento del laboratorio de Física en la Enseñanza Universitaria [6]. Se trata de acercar la simulación al experimento real, no de sustituir el experimento por la simulación.

El trabajo se basa en dos experimentos de laboratorio realizados con el equipamiento proveniente de la República Popular China y que se encuentra en nuestro departamento desde el año 2007.

Se ha partido de fotografías del equipamiento con alguna animación. Los procedimientos para medir e ingresar los valores de los parámetros, así como la determinación del diámetro del haz de electrones en el experimento de Leybold, se han diseñado en lo posible casi igual de laboriosos que en el experimento real, lo que no se consigue en algunas otras simulaciones de Física que hemos visto, donde el peso del trabajo se basa sólo en animaciones.

Se logra la ejercitación del procesamiento matemático de los resultados e incluso se puede hacer lo mismo con la

estimación de las incertidumbres. Las ideas expuestas aquí se recomiendan como la base de los instructivos para los experimentos correspondientes.

#### BIBLIOGRAFÍA

- [1] D. Rodrigues, B. Alves y otros, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **36**, 256 (2019)
- [2] E. Kolhy, D. Carvalho y otros, *Revista Iberoam. de Tecnologías de Aprendizaje, IEEE – RITA*, **10**, 186 (2015)
- [3] F. Esquembre EASY JAVA SIMULATIONS, The Manual for version 3.1, España (<http://fem.um.es/Ejs>).
- [4] W. Sears, M.W. Zemansky, H.D. Young y R.A. Freedman, *Física Universitaria con Física Moderna*, 12ª edición, Volumen II, (Addison-Wesley, 2009)
- [5] A.D. Rodríguez y J.J. Llovera, *Lat. Am. J. Phys. Educ.* **8**, 4504-1 (2014)
- [6] J. Ortega, M.L. Martínez y L. Jorge, *Lat. Am. J. Phys. Educ.* **13**, 2305-1 (2019)

---

This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0, <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) license.

