

APLICACIONES COMPLEMENTARIAS DE LA PRÁCTICA DE MEDICIÓN DE LA CARGA ESPECÍFICA DEL ELECTRÓN

COMPLEMENTARY APPLICATIONS OF THE PRACTICE OF MEASUREMENT OF THE SPECIFIC ELECTRONIC CHARGE

M. Ovejero, H. Brizuela, C. Figueroa*

Departamento de Física-FACET– Universidad Nacional de Tucumán.
Av. Independencia 1800 – (4000) Tucumán – Argentina

En el experimento usual de medición de la razón e/m , se dispara un haz de electrones dentro una ampolla que contiene He a baja presión, inmersa en un campo magnético que confina al haz en una trayectoria circular. A partir de la medición del radio de ésta y de otros parámetros, se calcula la razón e/m . En el presente trabajo, se propone un método para estimar la intensidad de corriente inicial del haz de electrones. Por otra parte, a partir de fotografías digitales, se estima el cambio de la intensidad luminosa absoluta del haz. Por medio del ajuste de estos datos con un modelo teórico de la dinámica de partículas en un medio, se obtiene la sección eficaz de interacción electrón-helio. El objetivo es didáctico, y apunta a justificar cuantitativamente supuestos iniciales de la práctica usual, y a dar una introducción al estudio de la interacción de un haz de partículas con un gas neutro por medio del formalismo de Inmersión Invariante.

Palabras clave: Inmersión Invariante, carga específica, electrón.

In the usual experiment of the measurement of the e/m ratio, an electron beam is fired into an ampoule containing helium at low pressure, immersed in a magnetic field that confines the beam in a circular path. From the measurement of the radius of this path and other parameters, the e/m ratio is calculated. In the present work, a method is proposed to calculate the initial current of the electron beam. On the other hand, from digital photographs, the change of the absolute luminous intensity of this beam is estimated. Then these data are adjusted with a theoretical model of the dynamics of the same, from which the effective section of electron-He interaction is obtained. The objective is didactic, and aims to quantitatively justify initial assumptions of the usual practice, and to give an introduction to the interaction of a beam of particles with a neutral gas by means of the Invariant Imbedding formalism.

Keywords: Invariant Embedding, specific charge, electron.

I. INTRODUCCIÓN:

En el experimento de medición de la carga específica del electrón, común en muchos laboratorios de carreras de Física e Ingeniería, se dispara un haz de electrones dentro una ampolla que contiene helio a baja presión, inmersa en un campo magnético uniforme creado por dos bobinas de Helmholtz (Fig. 1-a). Este campo es perpendicular al haz, de tal forma que los electrones describen una trayectoria circular. Esta se hace visible por la emisión de luz resultante de las colisiones entre electrones y átomos de helio (Fig 1-b). A partir de la medición del radio de dicha trayectoria, de la corriente que crea el campo magnético y del potencial acelerador, es posible calcular el valor de la razón e/m . La extensión que aquí se propone consiste en cuantificar la corriente del haz de electrones que emite el cañón, lo que permite evaluar cuantitativamente supuestos iniciales, y brindar una introducción al método de Inmersión Invariante (MII)¹, que modela la interacción de flujos de partículas con el medio en el que se propagan, aplicándola a la interacción entre los electrones y el helio^{2,3}. Esta interacción es la causa de la notoria atenuación del haz de electrones, que usualmente no se tiene en cuenta. Con las estimaciones de la corriente del haz de electrones y de la atenuación de su intensidad luminosa, medida a partir de fotografías digitales, se obtienen interesantes aplicaciones didácticas para la introducción al estudio de interacciones entre partículas.

II. MATERIALES Y MÉTODOS:

Además del dispositivo de la Fig. 1, se cuenta con una fuente de tensión DC de 0 a 500 V que provee el potencial acelerador U_A , una fuente AC de 0 a 8 V para la tensión de calefacción del cátodo, U_K , y una fuente DC de 0 a 24 V para la corriente por las bobinas de Helmholtz. Para la medición de las corrientes I_{AC} e I_{Af} se usó un multímetro digital de 4 dígitos y medio. Las fotografías se tomaron con un teléfono celular de 12 megapíxeles.



Figura 1 – a) Dispositivo. b) Haz de electrones.

III. ESTIMACION DE LA CORRIENTE DEL HAZ DE ELECTRONES:

A los fines de estudiar la interacción de los electrones con el helio, y de justificar supuestos que se hacen en la medición de e/m , se busca conocer el valor de la corriente del haz de electrones, I_H . Para ello nos valemos del esquema de conexiones de la Fig. 2 y de las siguientes observaciones: con el filamento frío ($U_K = 0$) y Potencial acelerador no nulo ($U_A \neq 0$) se mide una corriente I_{Af} ,

que según el circuito vale: $I_{Af} = U_0/R_{KA}$, donde la resistencia entre cátodo y ánodo R_{KA} es de 20 kΩ. Por otra parte, con el filamento caliente ($U_K \neq 0$) y potencial acelerador no nulo ($U_A \neq 0$) se mide una corriente I_{Ac} que incluye la anterior más la del haz de electrones entre cátodo y ánodo.

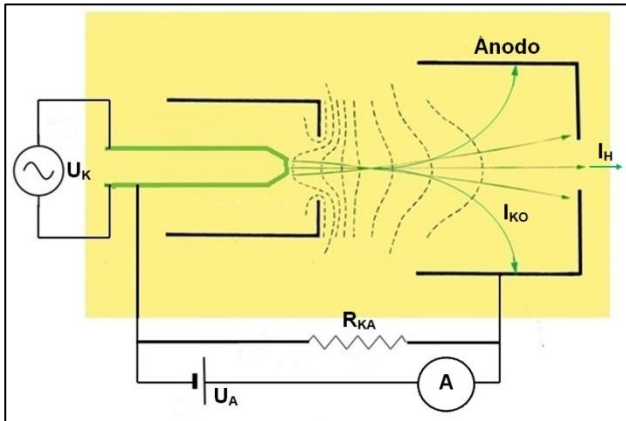


Figura 2 - Esquema del circuito del cañón de electrones. Por simplicidad, no se considera la tensión del Wehnelt.

Además, para voltajes aceleradores menores que un umbral ($U_0 = 17$ V), no se observa la emisión del haz hacia fuera del cañón (Fig. 4-a) y se puede realizar el siguiente planteo: al calentarse el filamento, y aplicarse potenciales aceleradores menores que U_0 , a la corriente I_{Af} se suma la corriente I_{K0} que se establece entre el cátodo y el ánodo, de tal forma que la corriente medida es

$$I_{Ac} = I_{K0} + I_{Af}$$

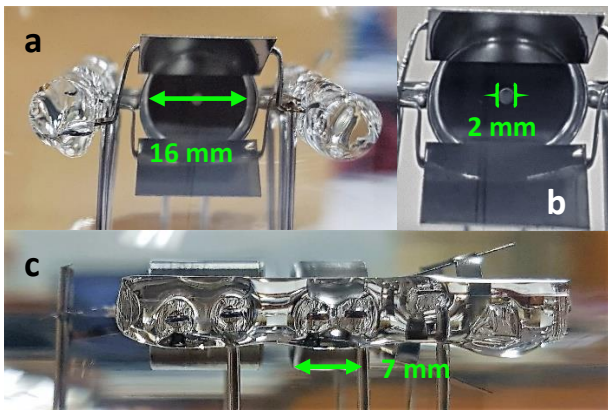


Figura 3 - Cañón de electrones. Se ve parcialmente el cátodo, el tubo de Wehnelt, el ánodo y placas desviadoras. - a) Vista de frente - b) Zoom vista de frente - c) Vista lateral

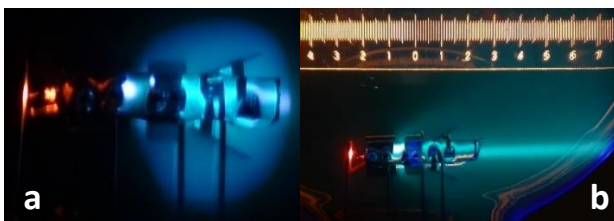


Figura 4. a) Para un potencial acelerador de 17 V no emerge el haz- b) Haz para un potencial acelerador de 300 V.⁷

Por lo tanto: $I_{K0} = I_{Ac} - I_{Af}$ [1]. Suponiendo que la corriente I_{K0} se distribuye en el área A del ánodo (Fig. 1), su densidad es $J_{K0} = I_{K0} / A$. Para voltajes aceleradores mayores que U_0 , una parte del haz es emitido hacia afuera (Fig. 4-b), por lo que no se cumple la ecuación [1]. Para estimar la intensidad de corriente I_H del haz de electrones emitidos, suponemos que la corriente de cátodo I_K es proporcional al voltaje acelerador aplicado. Por lo tanto para voltajes altos (por encima de 150 V) se cumple: $I_K = I_{K0} U/U_0$ y su densidad correspondiente es

$$J_K = J_{K0} \frac{U}{U_0}$$

Entonces, bajo la suposición de que el flujo de electrones se distribuye uniformemente en el área A , es posible estimar la intensidad I_H del haz emitido, como $I_H = J_K \cdot A_0$ donde A_0 es el área del orificio de salida. En la Tabla 1 se muestran los resultados obtenidos. Las dimensiones del ánodo para determinar A y A_0 se estiman a partir de fotografías digitales (Fig. 3).

U_A (V)	U_K (V)	I_{KA} (mA)	I_H (A)
17	4	0,04	0
17	5	0,05	0
17	6	0,06	0
300	4	0,70	$4 \cdot 10^{-6}$
300	5	0,88	$5 \cdot 10^{-6}$
300	6	1,05	$6 \cdot 10^{-6}$

Tabla 1 – Estimación de la intensidad de corriente I_H del haz emitido. Primera columna: potencial acelerador U_A . Segunda: potencial de calentamiento del cátodo. Tercera: corriente de cátodo I_K . Cuarta: corriente del haz, I_H . Debido a que se trata de valores estimados, no se incluye el cálculo de errores.

IV. MEDICIÓN DE LA INTENSIDAD LUMINOSA DEL HAZ:

A medida que aumenta el recorrido $x = R \cdot \theta$, la intensidad luminosa del haz $I(x)$ se atenúa por la dispersión que causan las colisiones electrón - helio (Fig. 5,a). Nos proponemos medir esta intensidad, y bajo la hipótesis de que la misma es proporcional al flujo electrones del haz, determinaremos la sección eficaz de dispersión. Para ello, mediante el programa llamado "ImageJ" convertimos una fotografía original a tonos de grises, asociando así la intensidad del haz (brillo en la imagen) a una escala de grises, donde a cada pixel se le asigna un valor entre 0 (negro) y 255 (blanco).

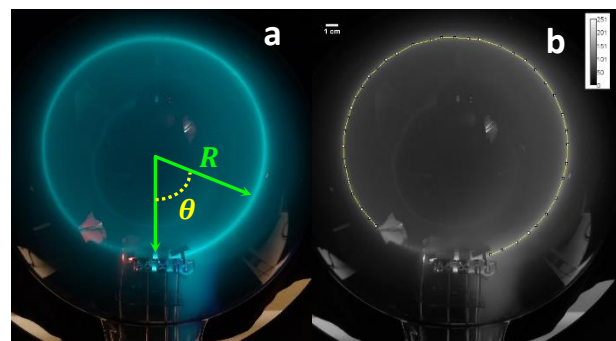


Figura 5 -a) Foto original del haz - b) Foto procesada por ImageJ en escala de grises.

V. INTERACCIONES ELECTRÓN – HELIO.

Normalizando la intensidad de grises obtenida por el proceso anterior, obtenemos la intensidad en función del recorrido x (Fig. 6, línea roja).

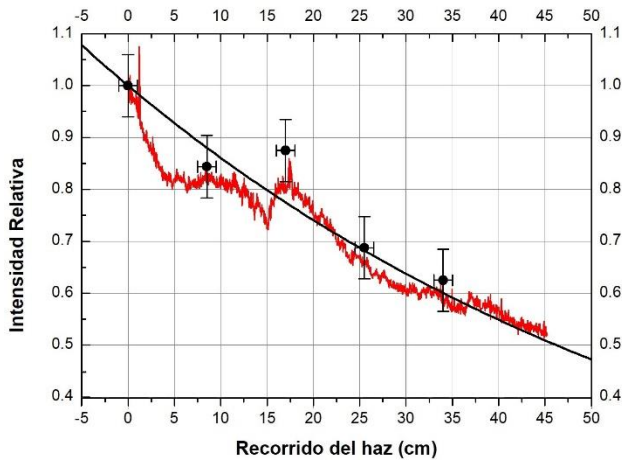


Figura 6 – Intensidad relativa obtenida con ImageJ (rojo) y con Luminancímetro (cruces). Curva de ajuste (negro) de Intensidad relativa vs trayectoria del haz.

Para verificar si la información obtenida del procesamiento digital es precisa, se midió la luminancia para diferentes distancias x con un luminancímetro Minolta LS 110 (Fig. 6, cruces). Se advierte una muy buena correspondencia, por lo que consideramos válido el procedimiento de escala de grises descripto.

Por otra parte, el Método de Inmersión Invariante (MII, ver Apéndice) da como resultado que la fracción de electrones $T(x)$ que llegan a un punto del recorrido $x = R\theta$, disminuye exponencialmente con x :

$$T(x) = e^{-sx}$$

Entonces, ajustando la intensidad relativa a una función exponencial (Fig. 6, curva negra), se obtiene:

$$s = (0.015 \pm 0.003) \text{ cm}^{-1}$$

Sabemos que el helio se encuentra a una presión P de 10^{-2} mm Hg⁶. Suponiendo una temperatura T de 300 K, podemos calcular la densidad atómica del gas n_V considerándolo como un gas ideal. Entonces:

$$n_V = \frac{PN_A}{RT} = 3 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$$

Calculando la sección eficaz $\sigma = s/n_V$ obtenemos $\sigma = (5 \pm 1) \cdot 10^{-17} \text{ cm}^2$. En la bibliografía⁷ encontramos que para electrones de 300 eV el valor de la sección eficaz del He es de: $\sigma_t = (2.78 \pm 0.03) \cdot 10^{-17} \text{ cm}^2$. Comparando, vemos que el valor experimental se aproxima satisfactoriamente al teórico.

VI. CONCLUSIONES

I- Empleando el dispositivo de medición de e/m , común en muchos laboratorios, un multímetro digital de cuatro dígitos y medio, fotografías digitales, y software libre para medición de distancias e intensidades de luz, es posible desarrollar una práctica nueva aplicable como introducción a la interacción entre partículas. En este caso, lo utilizaremos para introducir el Método de

Inmersión Invariante. Se sugiere como una práctica curricular de Laboratorio de Física Moderna, o asignatura equivalente de tercer año de Licenciatura en Física.

II – Con mediciones realizadas con un multímetro digital en la condición en que los electrodos emitidos por el cátodo no emergen del ánodo (Fig. 4-a), y con mediciones de la geometría de éste, es posible estimar la corriente I_H del haz de electrones. Esto permite justificar supuestos bajo los cuales se hace la medición habitual de e/m . Por ejemplo, se puede justificar cuantitativamente la no relevancia del campo magnético creado por el haz.

APÉNDICE. EL MÉTODO ANALÍTICO.

EL MII fue desarrollado para resolver problemas de transporte de partículas. En este caso, se puede describir el movimiento circular de los electrones utilizando un modelo unidimensional, a partir del cual se obtienen las funciones que relacionan parámetros de la interacción electrón-helio con la atenuación del haz. Debido a que la energía típica de los electrones del haz es de 300 eV y la energía de ionización del He es de 24.6 eV, estos pueden ionizar el He y producir una diversidad de interacciones inelásticas con los electrones atómicos. Un electrón del haz, por lo tanto, puede producir más de una excitación, pero al estar girando en un campo B , apenas cambia su energía cinética, se desvía de la trayectoria principal. Se infiere entonces, que basta con una primera interacción para que el electrón sea dispersado del haz. Se puede calcular con MII el coeficiente de transmisión de los electrones, $T(x)$, en función de la distancia recorrida $x=R\theta$. A efectos de calcular $T(x)$, puede considerarse un tipo único de interacción que atenúa efectivamente al haz, cuya probabilidad por unidad de longitud es “ s ” y es la suma de las probabilidades de todos los tipos posibles de interacción electrón-helio.

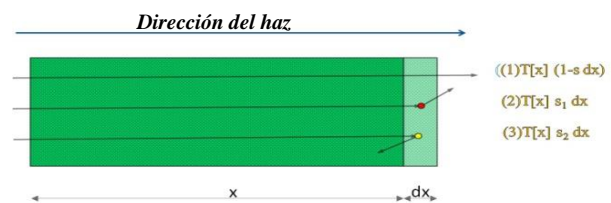


Fig. 7- Tipos posibles de interacción electrón –He

A la distancia $x + dx$, sólo la trayectoria (1) contribuye a $T(x)$, (2) y (3) no contribuyen, debido a que los electrones fueron desviados de la trayectoria principal. Operando se obtiene:

$$\begin{aligned} T(x + dx) &= T(x)(1 - s dx) \\ T(x + dx) - T(x) &= -T(x)s dx \\ \lim_{dx \rightarrow 0} \left(\frac{T(x + dx) - T(x)}{dx} \right) &= -T(x)s \\ \frac{d}{dx} T(x) &= -T(x)s \end{aligned}$$

Cuya solución es:

$$T(x) = e^{-sx}$$

REFERENCIAS

- 1- Ver, por ejemplo, Plan de estudios de la Licenciatura en Física, Uiversisad Nacional de Tucumán, http://www1.herrera.unt.edu.ar/carrerasfisica/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=22&Itemid=23
- 2- Figueroa C, Brizuela H. "*Aplicación del método de Inmersión Invariante: control de supuestos de un experimento de medición de la carga específica del electrón*". 100 Reunión Nacional de la AFA. 22 al 25 de setiembre de 2015. Villa de Merlo, San Luis.
- 3- Chandrasekhar, S. "Radiative Transfer" Dover Publications Inc. 1960-
- 4- C. Figueroa, H. Brizuela y S.P. Heluani. Journal of Materials Science, ISSN: 0022-2461, Vol. **45**, 18, pp. 5118-5123 **2010**-.
- 5- C. Figueroa, N. Nieva, H. Brizuela, and S. P. Heluani. J. Appl. Phys. 112, 114914 **2012**-; doi: 10.1063/1.4768197.
- 6- The PASCO Model SE-9638 e/m apparatus, <http://www.pasco.com/prodCompare/electron-charge-to-mass-ratio-system/index.cfm>.
- 7- Shah, M.B. et al. J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 21 1988- 2751-2761 7- Kimball Physics Inc , 311 Kimball Hill Road, Wilton, New Hampshire, 03086-5715 USA.