

E2 DETERMINACIÓN DE LA CARGA ESPECÍFICA DEL ELECTRON

OBJETIVOS

Describir la interacción entre cargas eléctricas en movimiento y campos magnéticos creados por bobinas.

Determinar la relación carga/masa del electrón analizando su trayectoria en un campo magnético tras ser acelerado por un campo eléctrico.

MATERIAL

Tubo de rayos catódicos, que consta de un cañón de electrones dentro de una cámara con gas a baja presión, filamento emisor de electrones, electrodos, fuente de alimentación para el cañón de electrones de voltaje alto (~300 V), bobinas de Helmholtz, fuente de alimentación para las bobinas de voltaje bajo (~20 V), amperímetro, voltímetro, cajón para atenuar la luz ambiente, cables de conexión, regla, pie de rey.

FUNDAMENTO TEÓRICO

La relación entre la carga y la masa de un electrón, llamada carga específica, e/m , puede obtenerse a partir de las desviaciones que sufre un haz de electrones sometido a la acción de campos eléctricos y magnéticos. En esta práctica analizaremos la trayectoria que sigue un haz de electrones al atravesar una región del espacio donde están localizados un campo magnético y un campo eléctrico.

El descubrimiento del carácter corpuscular de la carga eléctrica lo realizó, en 1897, el físico inglés J. J. Thomson experimentando con un tubo de vacío, que contenía una pequeña cantidad de gas, y donde colocó dos láminas metálicas situadas una frente a la otra (cátodo y ánodo) y aplicó una tensión eléctrica entre ellas. Thomson comprobó que del cátodo salían unos rayos a gran velocidad (rayos catódicos) que atravesaban el ánodo, y si en éste se practicaba un agujero, se producía un pequeño destello al llegar a una pantalla fluorescente. Sometiendo los rayos catódicos a campos eléctricos y magnéticos comprobó que se comportaban de la misma manera independientemente del gas que se colocase en el tubo, y demostró que estaban formados por partículas cargadas, a las que bautizó con el nombre de electrones, pudiendo determinar su relación carga-masa. El descubrimiento de los electrones le valió el premio Nobel en 1906 y constituyó un hito en la historia y el desarrollo de la Física.

Para realizar este experimento vamos a utilizar un tubo de rayos catódicos compuesto por un cañón de electrones dentro de una ampolla transparente con gas a baja presión. Este cañón emite electrones que pueden ser acelerados y colimados y que interaccionan con los átomos del gas de la ampolla formando iones que, al recombinarse emiten luz en el espectro visible, manifestando su trayectoria. Todo este conjunto se coloca en el centro de dos carretes de Helmholtz que proporcionan un campo magnético uniforme perpendicular al haz de electrones haciendo que describan orbitas circulares. En el interior de la ampolla hay unas marcas fosforescentes que permiten conocer el radio de la circunferencia formada por el haz de electrones en este campo magnético.

Seguidamente vamos a estudiar el fundamento teórico de nuestro dispositivo experimental con el que pretendemos determinar la carga específica del electrón.

En primer lugar necesitamos generar un haz de electrones. Dentro del tubo de rayos catódicos, donde se ha realizado parcialmente el vacío, se encuentra el cañón de electrones constituido por un filamento que al calentarse emite electrones por efecto termoiónico, ya que la acción del calor hace que los electrones de las capas externas de los átomos de un conductor puedan adquirir suficiente energía cinética para escapar del material. Un símil de este proceso sería la evaporación de las moléculas de un líquido al calentarse. Este filamento actúa de cátodo (negativo) y enfrente de él se sitúa una placa metálica, a la que se le aplica un potencial positivo y que actúa como ánodo (positivo). Entre ambos electrodos, y cerca del cátodo, se coloca un tercer electrodo o rejilla que sirve para controlar el paso de electrones hacia el ánodo. El ánodo tiene un pequeño orificio que permite al haz de electrones entrar en la ampolla de cristal de forma colimada.

Cuando entre los dos electrodos aplicamos una diferencia de potencial ΔU (potencial o voltaje acelerador), se genera un campo eléctrico \vec{E} . Los electrones al ser partículas cargadas se aceleran en la presencia de campos eléctricos, y por la segunda ley de Newton, y por la relación existente entre la fuerza eléctrica \vec{F}_e y el campo eléctrico \vec{E} , para una partícula con carga q y masa m , se verifica la relación:

$$\vec{F}_e = q\vec{E} = m\vec{a} \quad (1)$$

Si consideramos que los electrones emitidos por el filamento parten del reposo, al final de la región de campo eléctrico los electrones tendrán una cierta velocidad. La energía cinética E_c ganada por el electrón será igual a la energía potencial eléctrica suministrada,

$$E_c = E_{p,elec} = |e|\Delta U \quad (2)$$

donde $|e|$ es el módulo de la carga del electrón.

Si consideramos que el movimiento de los electrones es no relativista, la energía cinética viene dada por:

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \quad (3)$$

siendo m la masa en reposo del electrón y v su velocidad. A partir de las ecuaciones (2) y (3) se puede calcular la velocidad del electrón en función del potencial de aceleración ΔU :

$$v = \sqrt{\frac{2|e|\Delta U}{m}} \quad (4)$$

Como hemos comentado anteriormente, los electrodos de aceleración en el cañón de electrones disponen de unas aberturas que permiten que los electrones no impacten en la placa de potencial positivo, y continúen su camino con la misma energía cinética. De esta manera los electrones acelerados ingresan enfocados en una nueva región del espacio donde ya no hay campo eléctrico sino que existe un campo magnético \vec{B} creado por las bobinas de Helmholtz.

Para conocer el movimiento de un electrón en un campo magnético, hemos de considerar que cuando un electrón de carga $-|e|$ se mueve con una velocidad \vec{v} en un campo magnético de intensidad \vec{B} experimenta una fuerza magnética o de Lorentz, dada por:

$$\vec{F}_m = -|e|(\vec{v} \times \vec{B}) \quad (5)$$

La fuerza magnética tiene dirección perpendicular al plano que forman \vec{v} y \vec{B} , de manera que curva la trayectoria del electrón. En nuestra situación experimental, las bobinas de Helmholtz crean un campo magnético constante y perpendicular a la velocidad del electrón, lo cual dará lugar a que éste se mueva en una trayectoria circular, tal y como se representa en la figura 1. Para ver la dirección y sentido de la fuerza magnética se debe de aplicar la regla de la mano derecha.

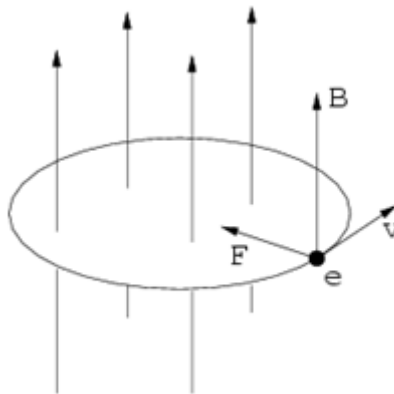


Figura 1.- Esquema de la fuerza magnética de Lorentz sobre un electrón que se mueve en un campo magnético

Si consideramos que $d\vec{\ell}$ es el elemento diferencial de longitud a lo largo de la trayectoria del electrón, el trabajo dW realizado por la fuerza magnética sobre el electrón será:

$$dW = \vec{F}_m \cdot d\vec{\ell} = 0 \quad (6)$$

ya que la fuerza magnética \vec{F}_m y $d\vec{\ell}$ son perpendiculares. Esto significa el electrón no gana energía cinética del campo magnético. El campo magnético sólo cambia la dirección del movimiento del electrón, mientras que el módulo de su velocidad permanece constante.

En nuestro dispositivo experimental se genera un campo magnético uniforme mediante las bobinas Helmholtz. Este campo magnético \vec{B} es perpendicular a la velocidad de los electrones, y ello hace que el electrón se mueva en una órbita circular de radio r alrededor de las líneas de campo magnético experimentando una fuerza centrípeta \vec{F}_c . Si tenemos en cuenta que quien obliga al electrón a moverse en la trayectoria circular es el campo magnético, ello implica que la fuerza centrípeta es igual a la fuerza magnética,

$$\vec{F}_m = \vec{F}_c \Rightarrow |e|vB = m\frac{v^2}{r} \quad (7)$$

Teniendo en cuenta la ec.(4), podemos obtener una relación entre la carga y la masa del electrón $|e|/m$ en función de los valores del potencial acelerador ΔU entre los electrodos, del valor del campo magnético B y del radio de la trayectoria que realiza el electrón, r ,

$$\frac{|e|}{m} = \frac{2\Delta U}{B^2 r^2} \quad (8)$$

esta expresión nos permite obtener la carga específica del electrón conociendo el voltaje de aceleración, el campo magnético que producen las bobinas de Helmholtz y el radio de la trayectoria que realizan los electrones.

A continuación calcularemos el campo magnético que producen las bobinas de Helmholtz. Consisten en dos bobinas de N espiras circulares de radio R separadas por una distancia igual a su radio (ver la figura 2) y recorridas por una corriente I (en el mismo sentido en ambas espiras), ello da lugar a un campo magnético que en el centro de las espiras es prácticamente constante.



Figura 2.- Bobinas de Helmholtz

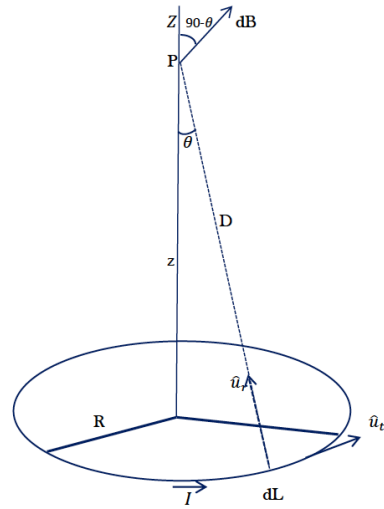


Figura 3. Espira por la que circula una corriente estacionaria

El campo magnético inducido en un cierto punto del espacio por una espira por la que circula una corriente estacionaria I viene dada por la ley de Biot y Savart, obtenida en 1820 por Jean Baptiste Biot y Félix Savart. Consideremos una pequeña porción $d\vec{L}$ de una espira circular de radio R por la que circula una corriente estacionaria I (ver la figura 3), y queremos calcular el campo magnético creado en un punto P del eje de la espira a una distancia z de su centro. Sea D la distancia entre el elemento de corriente $d\vec{L}$ y el punto P . El campo magnético $d\vec{B}$ creado por dicho elemento de corriente $d\vec{L}$ en el punto P , viene dado por:

$$d\vec{B}_{\text{espira}} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{\hat{u}_t \times \hat{u}_r}{D^2} dL \quad (9)$$

siendo \hat{u}_t es un vector unitario cuya dirección es tangente al circuito y que nos indica el sentido de la corriente en la posición donde se encuentra el elemento dL , \hat{u}_r es un vector unitario que señala la posición del punto P respecto del elemento de corriente, μ_0 es la permeabilidad, cuyo valor es $\frac{\mu_0}{4\pi} = 10^{-7} \text{ Tm/A}$. El campo magnético $d\vec{B}_{\text{espira}}$ tiene una dirección que es perpendicular al plano formado por el elemento de corriente y el punto P, y su sentido resulta de aplicar la regla del sacacorchos al producto vectorial $\hat{u}_t \times \hat{u}_r$. Según se puede observar en la figura 3, los vectores unitarios \hat{u}_t y \hat{u}_r forman un ángulo de 90° , ello da lugar a que el vector campo magnético $d\vec{B}_{\text{espira}}$ tenga dos componentes: una a lo largo del eje de la espira, $dB_{\text{espira}} \cos(90 - \theta)$, y otro perpendicular al eje de la espira, $dB_{\text{espira}} \sin(90 - \theta)$. Por simetría, las componentes perpendiculares al eje creadas por elementos diametralmente opuestos se anulan entre sí. Por tanto, el campo magnético resultante está dirigido a lo largo del eje z y puede calcularse mediante una integración sencilla ya que D y θ son constantes:

$$B_{\text{espira}} = \int dB_{\text{espira}} \cos(90 - \theta) = \frac{\mu_0 I}{4\pi D^2} \sin \theta \oint dL = \frac{\mu_0 I}{4\pi D^2} 2\pi R \sin \theta = \frac{\mu_0 I R^2}{2(z^2 + R^2)^{3/2}} \quad (10)$$

El campo magnético creado por una bobina formada por N espiras será:

$$B_{\text{bobina}} = N B_{\text{espira}} = N \frac{\mu_0 I R^2}{2(z^2 + R^2)^{3/2}} \quad (11)$$

El campo magnético total generado por las bobinas Helmholtz será la suma de la contribución de cada bobina, y se puede obtener a partir de la ec.(11). Si asignamos al plano de movimiento de los electrones como $z = 0$, se puede demostrar que la componente del campo magnético entre las bobinas es no nula, y viene dado por:

$$B \cong B(z = 0) = \left(\frac{4}{5}\right)^{3/2} \frac{\mu_0 N I}{R} \quad (12)$$

Si combinamos la ecuación (8) con la ec.(12), tendremos que la carga específica del electrón se puede escribir de la forma:

$$\frac{|e|}{m} = \left(\frac{5}{4}\right)^3 \frac{2R^2 \Delta U}{\mu_0^2 N^2 r^2 I^2} \quad (13)$$

en función de variables que conocemos del dispositivo experimental, como el radio R y el número de espiras N de las bobinas de Helmholtz, y de las variables que podemos medir en nuestro experimento como el voltaje de aceleración ΔU , la intensidad de corriente I que circula por las bobinas y el radio r que describen los electrones.

METODOLOGÍA

El dispositivo experimental consta de un tubo de rayos catódicos dentro de una esfera o ampolla de vidrio con gas a baja presión (0.1 Pa). Dentro se encuentra un cañón de electrones (o tubo electrónico) constituido por un filamento emisor de electrones, por efecto termoiónico, que actúa como cátodo, una placa metálica que actúa como ánodo y una rejilla, o segundo electrodo, colocada cerca del cátodo y que controla el paso de electrones hacia el ánodo.

En la parte inferior del zócalo redondo del tubo electrónico hay dos terminales que conectan con el filamento emisor de electrones, el cual se debe de conectar a la fuente de alimentación de corriente alterna de 6.3 V, que se encuentra en el dispositivo llamado "fuente de alimentación cañón de electrones", tal y como se puede observar en la figura 4.

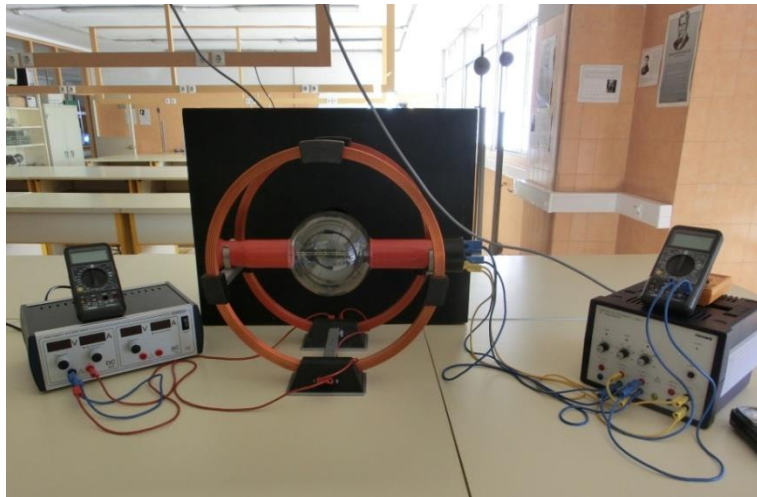


Figura 4.- Dispositivo experimental

Los dos electrodos para acelerar los electrones en el tubo electrónico tienen los terminales de cátodo, rejilla y ánodo en la parte superior del zócalo redondo. El ánodo correspondiente a la indicación +250 V se debe de conectar a la parte positiva + de la fuente de alimentación de corriente continua 0—300 V, mientras que el cátodo (indicación -50 V en el zócalo) tiene que ir conectado a la parte – (negativa) de la fuente de alimentación de corriente continua 0-50 V. La rejilla (con indicación 0 en el zócalo) se debe de conectar al polo negativo de la fuente de alimentación de 0-300 V. Para obtener que los electrodos se encuentren a un potencial + y - es necesario hacer una conexión entre el polo positivo de la fuente 0-50 V con el polo negativo de la fuente 0-300 V. En la figura 5 se presenta el esquema del circuito eléctrico que se debe de realizar, y que hay que entender antes de realizar cualquier conexión.

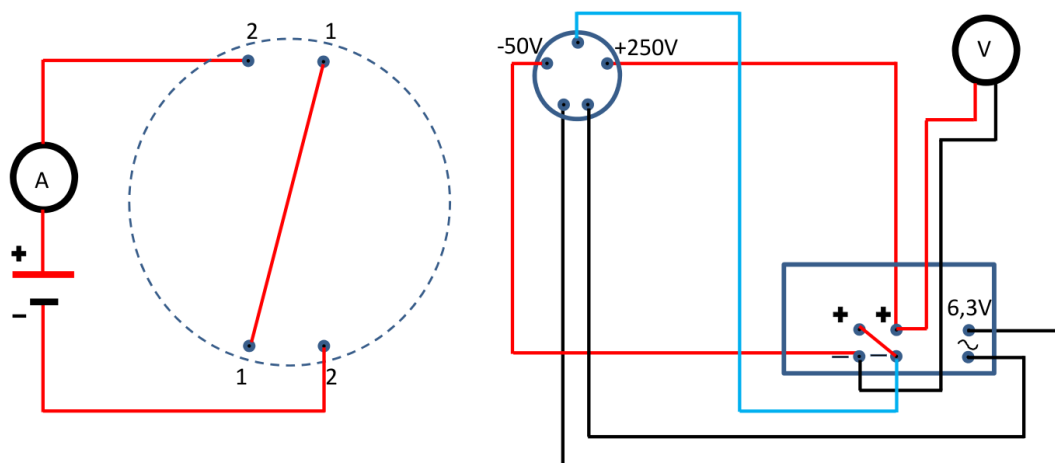


Figura 5.- Esquema del circuito a realizar en el dispositivo experimental

Para poder medir la tensión ΔU aceleradora de los electrones, hemos de colocar el voltímetro en paralelo con la fuente de alimentación 0-300 V. Variando lentamente los potenciómetros de las fuentes de alimentación de 0-300 V y 0-50 V nos permitirá ir modificando el potencial entre los electrodos del cañón de electrones.

Las bobinas de Helmholtz están formadas por dos solenoides de 154 espiras cada una (14 capas con 11 espiras por capa), la resistencia de cada bobina es de $2.1 \, \Omega$ y la corriente máxima que pueden soportar es de 3 A. Mide varias veces el diámetro de las bobinas, así como el grosor de las mismas con el fin de obtener su radio medio R .

CUIDADO DE NO SOBREPASAR LA CORRIENTE MÁXIMA DE 3 A EN LAS BOBINAS.

La fuente de alimentación para suministrar corriente continua (DC) a las bobinas se denomina “fuente alimentación bobinas” y se puede variar modificando la posición de los cursores. Se debe de utilizar un voltaje de entre 100-115 V. El amperímetro se utilizará para medir la corriente que circula por las bobinas y se debe de conectar en serie, como la intensidad de corriente es muy alta (del orden de los amperios) se debe de utilizar en el amperímetro los bornes “COM” y “A” (amarillo) del multímetro, y su correspondiente escala en amarillo en el selector de corriente continua, así la medida que se registra está en amperios. Se ha de comprobar que las bobinas de Helmholtz se han conectado en serie, ello se realiza midiendo la resistencia total mediante el ohmímetro del multímetro.

NO CONECTAR LAS FUENTES DE ALIMENTACIÓN A LA RED HASTA QUE EL CIRCUITO HAYA SIDO REVISADO POR UN PROFESOR/A

Antes de conectar la fuente de alimentación se debe comprobar que los potenciómetros están puestos a cero, así se evita que el cátodo se pueda deteriorar durante el calentamiento inicial al existir una tensión aceleradora. Se debe de oscurecer el entorno del tubo emisor de electrones con el cajón para atenuar la luz ambiente antes de realizar las medidas. Transcurridos un par de minutos después de la conexión, aumentar la tensión en el tubo acelerador lentamente con ambos potenciómetros simultáneamente hasta observar la trayectoria del haz de electrones. El haz de electrones se hace visible como una tenue luz azul-verdosa o anaranjada (dependiendo del dispositivo experimental). Seguidamente conectar el circuito de alimentación de las bobinas de Helmholtz. Si la dirección del campo magnético, que depende del sentido de circulación de las bobinas, es el correcto (recordar que la carga del electrón es negativa) se observará una trayectoria circular. Variando el campo magnético de las bobinas mediante cambios de la intensidad de la corriente que circula por ellas o la velocidad de los electrones mediante cambios en la tensión de aceleración cátodo-ánodo, se puede ajustar la trayectoria circular de los electrones. En el interior del tubo de aceleración existen marcas fosforescentes que identifican los radios de las trayectorias de los electrones, y que corresponden a 2, 3, 4, y 5 cm, y que previamente se deben de iluminar durante unos segundos con una linterna.

Se deben de realizar medidas para cada radio de la trayectoria de los electrones y diferentes valores del potencial de aceleración y de la intensidad de las bobinas. Para un radio de la trayectoria de los electrones determinado, obtener los diferentes valores de ΔU e I que dan lugar a esta misma trayectoria de los electrones.

RESULTADOS

Realizar una tabla con los valores del potencial de aceleración y la intensidad que pasa por las bobinas para los diferentes valores del radio de la trayectoria de los electrones.

Efectuar la representación gráfica adecuada que permita obtener el valor de la carga específica del electrón a partir de la pendiente de la recta.

Calcula el error cometido en la determinación de e/m para cada caso.

Compara el valor experimental de la carga específica del electrón que has obtenido a través de este experimento con el valor de la bibliografía.

Indica posibles errores cometidos al realizar esta práctica y su posible solución.

Gira un poco las bobinas de Helmholtz, observa lo que sucede y porqué.

CUESTIONES

1.- Comenta cual es la utilidad de utilizar las bobinas de Helmholtz.

2.- Consulta los valores de la relación carga-masa para las partículas fundamentales más importantes ¿por qué es importante esta relación para las partículas atómicas?

- 3.- Define las diferentes unidades para el campo magnético y su relación entre ellas (Tesla, Gauss, Weber/m², Maxwell).
- 4.- Explica cómo se producen los rayos X.