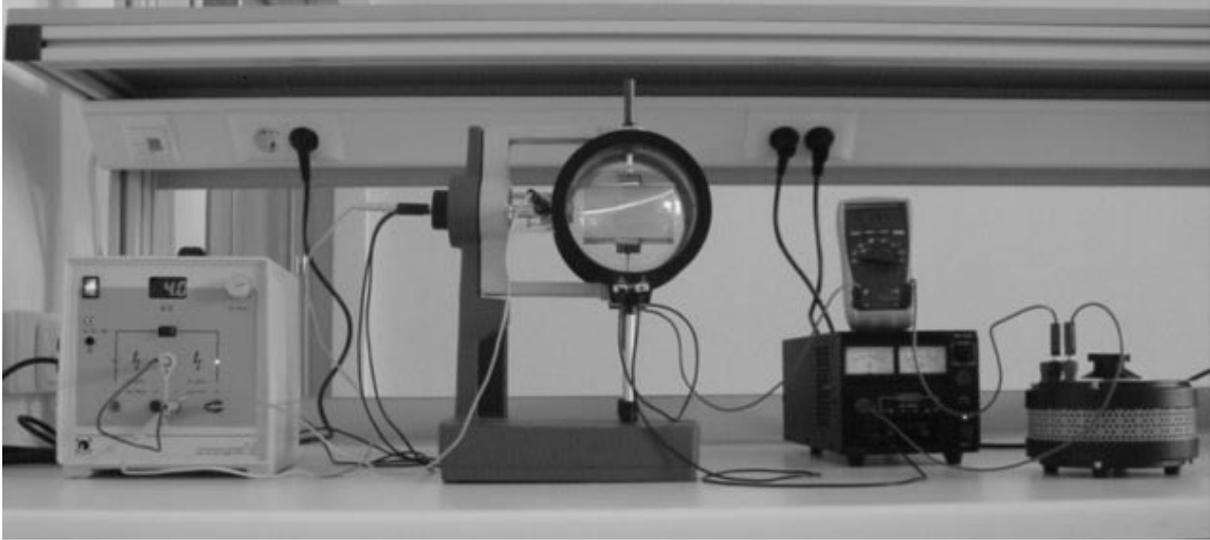


**PRÁCTICA N° 1.****DESVIACIÓN DE UN HAZ DE ELECTRONES POR CAMPOS ELÉCTRICOS Y MAGNÉTICOS.****1. OBJETIVOS:**

- a) Observar la trayectoria de partículas cargadas en el seno de campos eléctricos y magnéticos.
- b) Determinar la carga específica del electrón.
- c) Medir la velocidad de un haz de electrones.

**2. MATERIAL:** Tubo de rayos catódicos, 2 fuentes de alta tensión, reostato, bobinas de Helmholtz, fuente de alimentación de corriente continua, multímetro, teslámetro y sonda Hall axial, cables de conexión.

**3. FUNDAMENTO TEÓRICO**

En esta práctica analizaremos la trayectoria que sigue un haz de electrones con velocidad  $v$  al atravesar una región del espacio donde están localizados un campo magnético o un campo eléctrico.

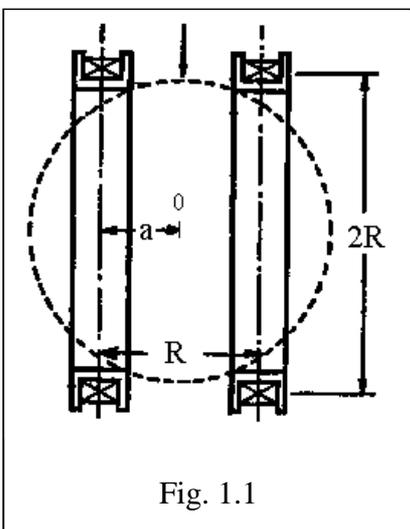
**3.1 Bobinas de Helmholtz.**

Fig. 1.1

Se utilizan cuando se desea obtener un campo magnético relativamente uniforme en una pequeña región del espacio. Consisten en dos bobinas con el mismo número de espiras,  $n$ , e igual radio,  $R$ , separadas una distancia  $2a$  (Fig.1.1). Si se hace circular por las bobinas una intensidad de corriente continua  $I$  (con el mismo sentido en las dos bobinas), la intensidad del campo magnético creado en el punto  $O$  situado en la línea que une el centro de las bobinas puede obtenerse aplicando la ley de Biot-Savart:

$$H = \frac{n R^2 I}{(R^2 + a^2)^{3/2}} \quad (1.1)$$

Consideraremos que  $H$  es constante en el espacio situado entre las dos bobinas.

En nuestro caso se tiene  $n = 320$  vueltas,  $R = 6,8$  cm y  $a = 3,4$ cm, resultando:

$$H = 33,7 \times 10^2 \text{ I } \quad (\text{A m}^{-1}) \quad (1.2)$$

### 3.2 Generación de un haz de electrones.

Los electrones libres son producidos por medio de un filamento incandescente (emisión termoiónica) y son acelerados hasta la velocidad  $v$  por medio de una diferencia de potencial  $V_A$  existente entre dos placas (ánodo y cátodo). La energía comunicada a un electrón de carga  $e$  al ser sometido a la tensión anódica  $V_A$  es:  $e V_A$ , que se invierte en aumentar su velocidad. Por tanto:

$$e V_A = \frac{1}{2} m v^2 \quad (1.3)$$

es decir, la velocidad adquirida será:

$$v = \sqrt{(2 e V_A)/m} \quad (1.4)$$

donde  $m$  es la masa del electrón.

La trayectoria que sigue el haz de electrones queda visualizada sobre una pantalla de sulfuro de zinc por la luminiscencia que producen los electrones al incidir sobre ella.

### 3.3 Desviación del haz por un campo magnético.

Un electrón de masa  $m$  y carga  $e$  que se mueve con velocidad  $v$  perpendicularmente a un campo magnético  $B = \mu_0 H$ , experimenta una fuerza

$$F = e v \mu_0 H \quad (1.5)$$

que le hace describir una trayectoria circular. Si  $r$  es el radio de curvatura de la trayectoria, la aceleración centrípeta será  $a_c = v^2/r$  y por tanto

$$e v \mu_0 H = m v^2/r \quad (1.6)$$

Sustituyendo en (1.6) la expresión de  $v$  dada por (1.4), podemos obtener la carga específica del electrón:

$$\frac{e}{m} = \frac{2 V_A}{\mu_0^2 H^2 r^2} \quad (1.7)$$

Esta expresión permitirá la determinación de la carga específica del electrón,  $e/m$ , si medimos  $V_A$  con el multímetro, determinamos  $r$  experimentalmente a partir de la trayectoria del haz de electrones sobre la pantalla y utilizamos un valor conocido de  $H$  creado por un par de bobinas de Helmholtz.

### 3.4 Desviación del haz en presencia de un campo eléctrico.

Sea un electrón que llega con velocidad  $v$  a una región del espacio donde existe un campo eléctrico homogéneo creado por un condensador plano (cuya diferencia de potencial entre placas es  $V_P$  y la distancia entre placas  $d$ ). Si la velocidad a la entrada es perpendicular al campo eléctrico, el electrón se mueve siguiendo una trayectoria parabólica dada por la ecuación:

$$y = \frac{e V_P}{2 m d v^2} x^2 \quad (1.8)$$

Determinando los puntos  $(x,y)$  de la trayectoria, midiendo  $V_P$  con el multímetro y conocidos  $e/m$  (del apartado anterior) y  $d$ , se puede obtener la velocidad con la que incide el electrón ( en nuestro caso, el haz de electrones).

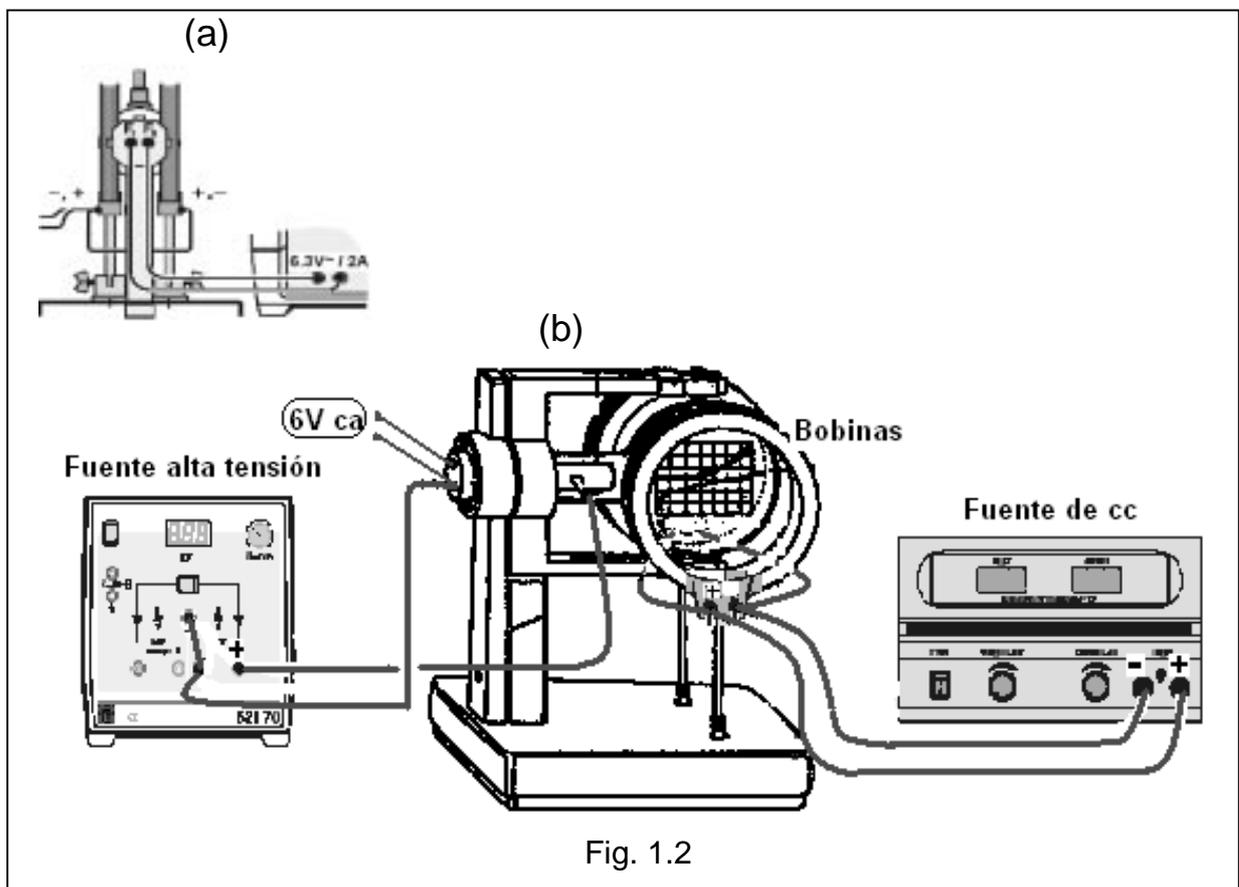
## 4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

### 4.1 PRECAUCIONES

1. En esta práctica se trabaja con fuentes de alta tensión que pueden ser peligrosas para quien no esté familiarizado con su uso. Por eso, no se debe conectar las fuentes a la red sin consultar previamente con el profesor.
2. Antes de conectar la fuente a la red, girar el mando selector de voltajes a la posición O (a tope a la izquierda, sin forzar).
3. Cualquier intervención en el montaje debe efectuarse únicamente después de haber desconectado la fuente de alta tensión.
4. No se debe tocar ninguna parte del circuito que no esté aislada inmediatamente después de desconectar el aparato, debido a que la tensión de salida no se hace cero hasta pasado un tiempo (por la capacidad que presenta el circuito a tensiones elevadas).
5. La corriente máxima que soportan las bobinas es de 2 A. Se debe realizar la práctica trabajando con intensidades inferiores a 1,5 A.

### 4.2. Determinación de la carga específica del electrón ( $e/m$ ).

- 1) Monte el tubo de desviación con las bobinas de Helmholtz tal y como se indica en la Figura 1.2. Para conseguir que la intensidad de corriente que circula por las dos bobinas, lo haga en el mismo sentido (se suman los campos magnéticos creados), es preciso unir el borne de conexión "+" de una con el "-" de la otra y



ambos al polo positivo de la fuente de corriente continua; al polo negativo se conectan el "-" de la primera bobina y el "+" de la segunda, a través del reostato.

La fuente alta tensión tiene en la parte posterior una toma de corriente alterna a 6.3V (Fig 1.2 a) que alimenta el filamento interno situado en el cuello del bulbo. Al ponerse incandescente este filamento, se liberan los electrones que formarán posteriormente el haz. Si se utilizara otra fuente externa de c.a. **NO SE DEBERÁ SOBREPASAR EN NINGUN CASO LA TENSION DE 6.3 V en la alimentación del filamento.**

La fuente de alta tensión establece la diferencia de potencial,  $V_A$ , entre el ánodo y el cátodo necesaria para acelerar los electrones.

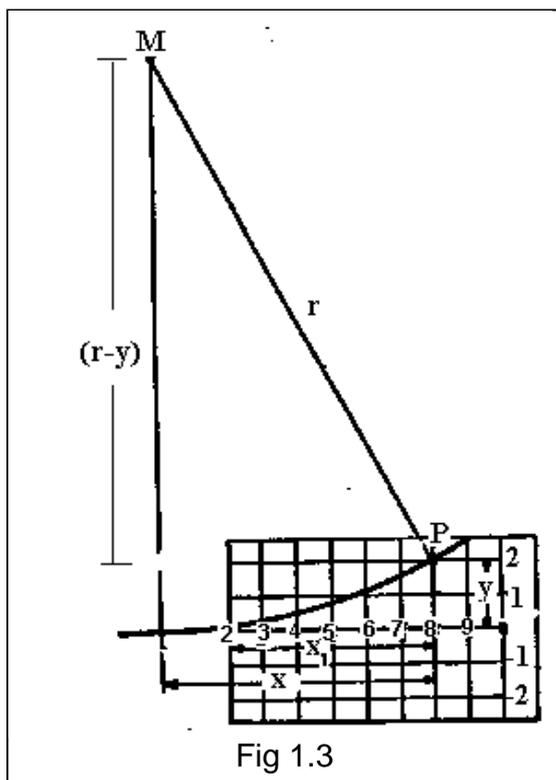
Un voltímetro (incorporado a la propia fuente o externo) permite realizar la lectura de las diferencias de potencial.

2) Aumente gradualmente la tensión anódica,  $V_A$ , girando el selector de la fuente de alta tensión hasta llegar a un valor lo suficientemente alto como para que se pueda observar, en azul claro, la trayectoria del haz de electrones sobre la pantalla del interior del bulbo. Anote el valor de  $V_A$ .

3) Con ayuda de un reostato es posible regular la intensidad de corriente que circula por las bobinas (si la fuente de c.c. tiene regulación en intensidad prescindiremos del reostato). Observe cómo cambia la trayectoria del haz de electrones al aumentar o disminuir la intensidad. Describa y explique lo observado al cambiar la polaridad del circuito que alimenta las bobinas.

4) Seleccione una intensidad de corriente tal que la trayectoria curva del haz sobre la pantalla pase por algunos puntos, cuyas coordenadas  $(x,y)$  puedan leerse de forma fácil sobre el retículo. Anote ese valor de  $I$ .

5) Obtención del radio de curvatura de la trayectoria:



El radio de curvatura del rayo visualizado sobre la pantalla se puede obtener de la relación

$$r^2 = x^2 + (r-y)^2 \quad (1.9)$$

donde  $x$  e  $y$  son las coordenadas de un punto cualquiera de la curva que describe el haz. La expresión anterior podemos escribirla de la forma

$$y = (x^2 + y^2)/2r \quad (1.10)$$

Si representamos los valores de  $y$  frente a  $(x^2 + y^2)$  se obtendrá una recta cuya pendiente es  $K = 1/2r$ .

5.1) Construya una tabla con los valores de las ordenadas y las abscisas de 4 ó 5 puntos del haz, leídos directamente sobre el retículo centimétrico de la pantalla.

5.2) Calcule los valores correspondientes a  $(x^2 + y^2)$ .

5.3) Determine, utilizando el método de los mínimos cuadrados, la pendiente de la recta que más se ajuste a la representación de  $y$  frente a  $(x^2 + y^2)$ .

5.4) Con el valor de la pendiente, calcule el radio de curvatura  $r$ .

6) Utilice (1.1) para determinar la intensidad del campo magnético,  $H$ , entre las bobinas. Las bobinas pueden conectarse en serie o en paralelo, debiendo tener en cuenta en cada caso la intensidad de corriente que circula por cada bobina.

7) Determine el valor de la carga específica del electrón ( $e/m$ ), a partir de (1.7).

8) Realice el cálculo de errores y escriba los resultados finales.

### Resultados

Expresar, con sus correspondientes errores, los valores medidos o calculados de

$V_A$ ,  $I$ ,  $H$ ,  $K$ ,  $r$ ,  $e/m$

### 4.3.- Determinación de la velocidad de los electrones del haz.

1) Monte el tubo de desviación con las dos fuentes de alta tensión tal y como se indica en la Fig. 1.4.

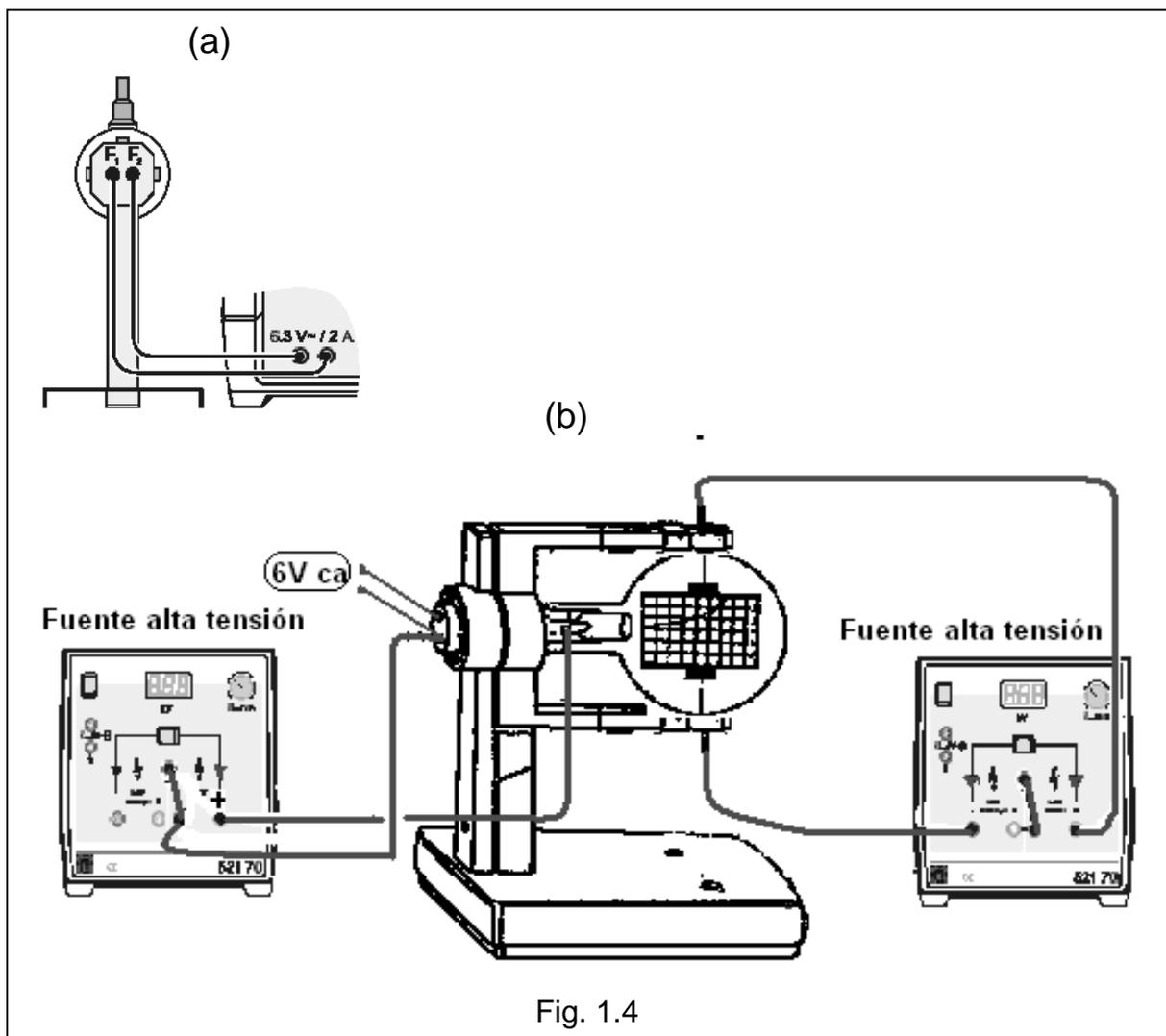


Fig. 1.4

Como en el apartado anterior, la toma de corriente alterna a 6 V sirve para poner incandescente el filamento, mientras que la primera fuente de alta tensión acelera los electrones colimados en un haz.

La segunda fuente de alta tensión está conectada a las placas del condensador plano situadas en los bordes superior e inferior de la pantalla. El campo eléctrico (que consideramos uniforme en primera aproximación) creado en el interior del condensador, desviará el haz de electrones produciendo una trayectoria parabólica descrita por la ecuación (1.8).

2) Elija una tensión anódica que permita visualizar el rayo azulado. Anote el correspondiente valor  $V_A$ .

3) Aumente gradualmente, partiendo desde cero, la diferencia de potencial entre las placas del condensador,  $V_P$ , hasta conseguir una desviación apreciable del haz electrónico. Describa lo que ocurre al aumentar o disminuir  $V_P$ . Describa lo que ocurre al aumentar  $V_A$  manteniendo  $V_P$  constante. De una explicación razonada de lo observado en ambos casos.

4) Seleccione una tensión entre las placas del condensador,  $V_P$ , de forma que sea posible leer directamente sobre el retículo las coordenadas  $(x,y)$  de 4 ó 5 puntos pertenecientes a la curva descrita por el rayo de electrones. Anote ese valor de  $V_P$ .

5) Lleve sobre una tabla los pares de valores  $(x,y)$  leídos.

6) Calcule los correspondientes valores de  $x_1 = (x - 2)$ , dado que la desviación del haz se produce a partir de  $x = 2$  por la situación del condensador.

7) Represente gráficamente los valores de  $y$  frente a los correspondientes  $(x-2)^2$ . Obtenga, por el método de los mínimos cuadrados, la pendiente,  $K'$ , de la recta que mejor se ajusta a los puntos del gráfico.

8) Llevando este valor de  $K'$  a la ecuación (1.8) y utilizando el valor de  $e/m$  obtenido en el apartado anterior, determine la velocidad  $v$  de los electrones del haz.

9) Compruebe si se cumple la ecuación (1.4).

Una de las causas por las que puede no cumplirse exactamente dicha ecuación es que el campo eléctrico real entre las placas del condensador no es uniforme como hemos supuesto. Dado que medimos la diferencia de potencial entre placas,  $V_P$ , se puede calcular cuál es la distancia efectiva entre placas,  $d_{\text{efectiva}}$ , que da lugar al campo eléctrico efectivo. Esta distancia es distinta, en general, a la  $d$  geométrica. Obtenga la  $d_{\text{efectiva}}$  en este caso.

10) Realice el cálculo de errores y escriba los resultados finales.

## Resultados

Expresar, con sus correspondientes errores, los valores medidos o calculados de

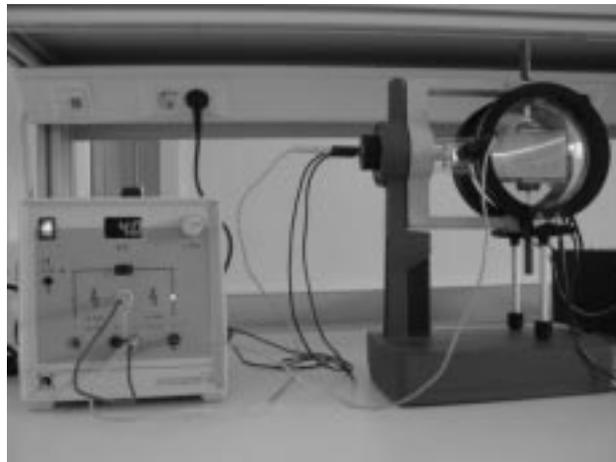
$V_A$ ,  $V_P$ ,  $d$ ,  $K'$ ,  $v$ ,  $d_{\text{efectiva}}$

**Realizar un informe completo de la práctica que contenga el procedimiento seguido, los datos, ajustes, cálculos y resultados correspondientes a cada una de los apartados, así como la resolución de las cuestiones propuestas.**

## 5. CUESTIONES

1. Realice el esquema correspondiente para poder hallar el campo magnético creado por las dos bobinas en el punto medio de la recta que une sus centros ( apartado 3.1 del fundamento teórico) y deduzca la ecuación (1.1).
2. Se llama electrónvoltio (eV) a la cantidad de energía adquirida por un electrón al someterlo a una diferencia de potencial de un voltio. Deducir la equivalencia entre esta unidad de energía y el julio.
3. Hacer un esquema gráfico correspondiente al apartado 3.4 del Fundamento Teórico y deducir, en base a él, la expresión (1.8).
4. Calcular la fuerza que actúa sobre un electrón al pasar a través de un condensador cuya distancia entre placas es 5 cm , siendo la diferencia de potencial entre las mismas de 3 kV. Si el electrón llega perpendicular al campo eléctrico con una velocidad de 20000 km/s y la longitud de las placas es 7 cm, calcular el ángulo de la dirección de salida respecto a la de entrada.
5. A partir de los datos encontrados en la bibliografía para la carga y la masa del electrón, hallar el valor de su carga específica. ¿Coincide este valor con el que acabamos de obtener experimentalmente en el laboratorio? Tratar de dar alguna explicación a las discrepancias, si es que las hay.
6. ¿Cuáles son las unidades de la pendiente de la recta del apartado 4.3?

*Desviación del haz de electrones mediante un campo magnético.*



*Desviación del haz de electrones mediante un campo eléctrico.*

