

RELACIÓN CARGA/MASA DEL ELECTRÓN

- **OBJETIVO:** Medir la relación carga/masa del electrón y estudiar el comportamiento de los electrones libres en movimiento bajo la acción de campos eléctricos y magnéticos. Observar el comportamiento corpuscular del electrón
- **TEORÍA**

1. Relación carga/masa del electrón

Se determina esta relación sometiendo un electrón que se mueve a una velocidad constante \vec{v} a un campo magnético \vec{B} perpendicular a \vec{v} . Si designamos por e, m , la carga y la masa del electrón, respectivamente, para obtener la relación carga masa, e/m , en función de la velocidad de la partícula y de la intensidad del campo aplicado procedemos como sigue:

La fuerza (\vec{F}_m), debida a la acción de un campo magnético (\vec{B}) que actúa sobre un electrón que se mueve a una velocidad (\vec{v}) es

$$\vec{F}_m = -e \vec{v} \times \vec{B}. \quad (1)$$

Si la velocidad \vec{v} y el campo \vec{B} son perpendiculares, el módulo de la fuerza que actuará perpendicularmente al plano definido por los vectores, \vec{v} y \vec{B} , es

$$F_m = evB. \quad (2)$$

La acción de esta fuerza sobre cada electrón hace que describan una trayectoria circular cuyo radio viene determinado por la compensación de la fuerza magnética con la denominada fuerza centrípeta ($F_c = mv^2/r$) que actúa en la misma dirección que la magnética y en sentido opuesto. Así que la condición de equilibrio conduce a la relación

$$\frac{e}{m} = \frac{v}{rB}. \quad (3)$$

Así pues, para determinar la relación carga masa del electrón, es necesario conocer la velocidad del electrón, el campo magnético aplicado (que produciremos mediante unos anillos de Helmholtz) y el radio de la circunferencia que recorren los electrones.

Los electrones en nuestro experimento son acelerados sometiéndolos a la acción de un potencial electrostático V , lo que les permite ganar una energía cinética igual al potencial aplicado por la carga del electrón, esto es $eV = \frac{1}{2}mv^2$, así que la velocidad que adquiere el electrón es

$$v = \sqrt{\frac{2eV}{m}}. \quad (4)$$

El campo magnético generado por los anillos de Helmholtz, en el eje que une los centros de los anillos viene dado, según la ley de Biot, por

$$B = \left(\frac{5}{4}\right)^{-\frac{3}{2}} \frac{N\mu_0 I}{R_a}. \quad (5)$$

Admitiremos que el campo varía lentamente y este valor sirve en todos los puntos de la trayectoria de los electrones. Con N designamos el número de espiras de cada uno de los anillos de Helmholtz ($N=130$), R_a es el radio de las espiras ($R_a = 15$ cm), I la intensidad de la corriente que circula por los anillos y μ_0 la permeabilidad magnética del vacío ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ N A⁻²). Finalmente llevando las ecuaciones (4) y (5) sobre la ecuación (3) se obtiene

$$\frac{e}{m} = \frac{2V}{B^2 r^2} = \left(\frac{5}{4}\right)^3 \frac{2V R_a^2}{(N\mu_0 I r)^2}. \quad (6)$$

2. Desviación de los electrones en un campo eléctrico.

La lámpara base que se utiliza en el experimento dispone, después de las placas de aceleración, de otro par de placas orientadas perpendicularmente a la trayectoria que siguen los electrones en ausencia del campo magnético. La aplicación de un potencial constante a estas placas permite estudiar el comportamiento del haz cuando se le somete a un campo eléctrico perpendicular a la dirección de su movimiento. Las ecuaciones que rigen este movimiento

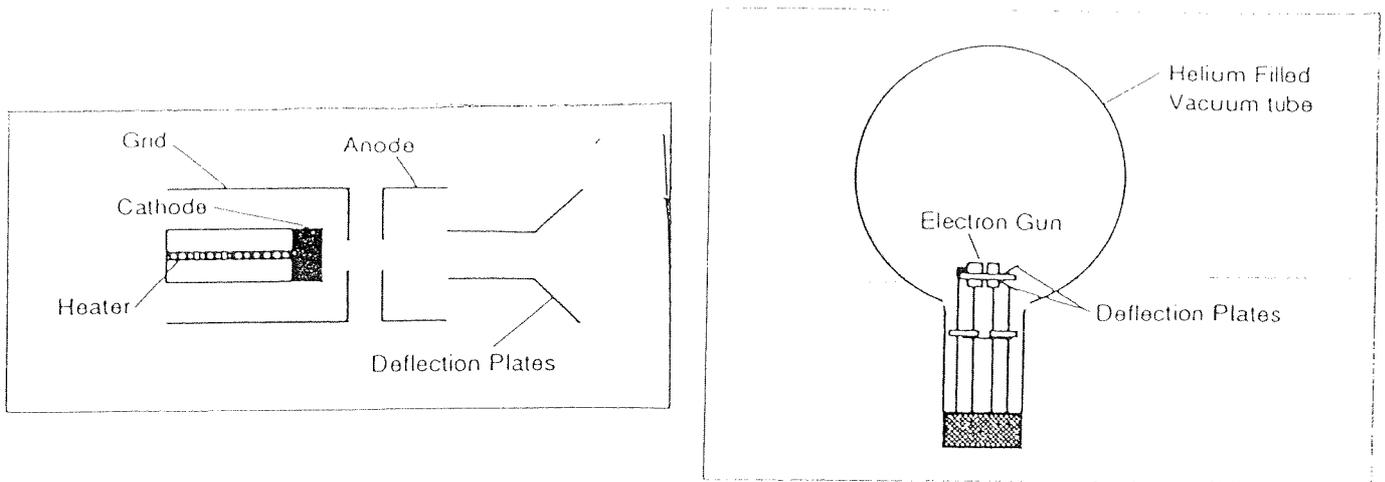


Figure 1: Esquema de la lámpara y de la distribución de los distintos electrodos que la componen.

son similares a las del tiro parabólico, sólo cambian las condiciones iniciales, aunque el objetivo en esta práctica es observar el comportamiento cualitativamente.

• PRÁCTICA

– Material:

1. **Lámpara o tubo e/m :** El tubo es una lámpara llena de helio en la que, además del filamento, tenemos un colimador que sirve de base para el potencial de aceleración, el ánodo y las placas de deflexión. En la figura 1 se muestra un esquema de su estructura interna y la forma del tubo real.
2. **Aparato de distribución de alimentación y anillos de Helmholtz:** en la figura 2 se muestra un dibujo esquemático del aparato con la lámpara.
3. **Fuente de alimentación de bajo voltaje:** Proporciona alimentación a los anillos de Helmholtz (corriente continua 6-9 voltios), alimentación para el calentamiento del filamento de la lámpara (corriente continua o alterna no superior a 6 Voltios).

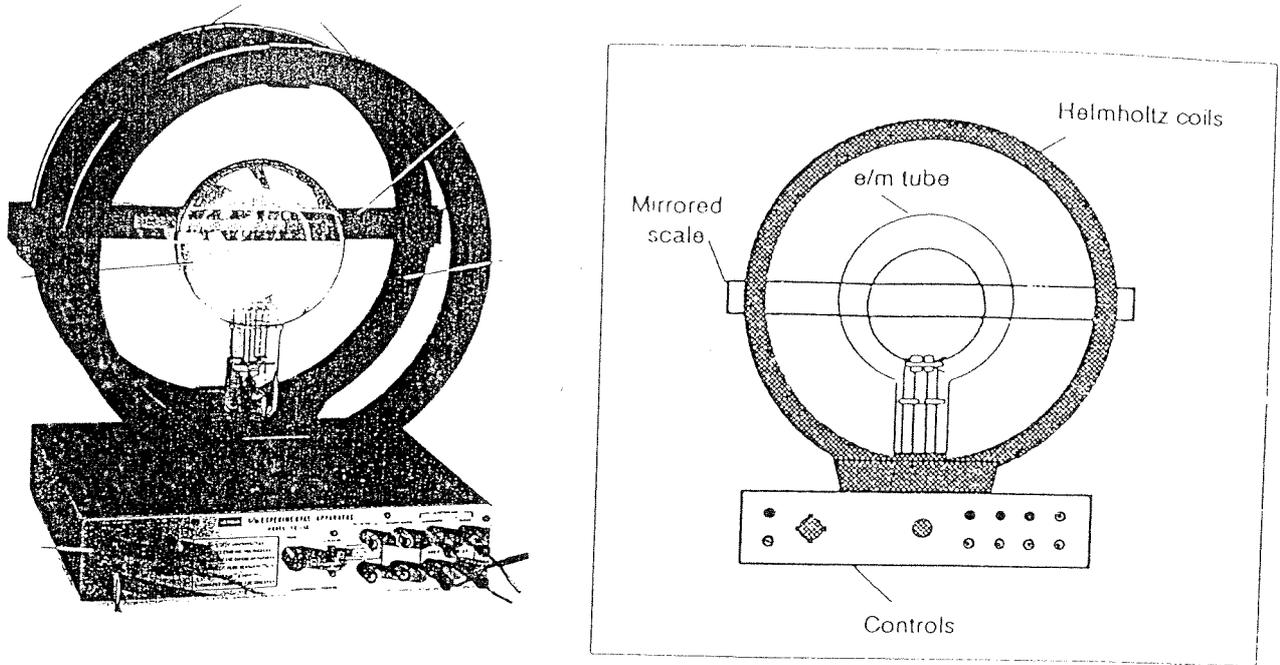


Figure 2: Fotografía y esquema del aparato que alberga la lámpara y controla la salida de los distintos electrodos.

4. **Fuente de alimentación alto voltaje:** Proporciona el voltaje de continua necesario para la aceleración lineal de los electrones (continua de 150-300 voltios).
5. **Amperímetro:** Para medir la intensidad que circula por los anillos de Helmholtz.
6. **Voltímetro:** Para saber el potencial aplicado para acelerar los electrones (incorporado en la fuente de alimentación de alto voltaje).
7. **Cables.**

– **Determinación de la relación carga/masa del electrón.**

Sin que los aparatos estén conectados se realiza la conexión de los mismos según el esquema que se da en las figuras 3 y 4, y se siguen los pasos siguientes:

1. Colocamos el mando de ajuste de la corriente que circula por los anillos de Helmholtz en la posición OFF.
2. Conectamos los aparatos y nos preparamos para iniciar las medidas.

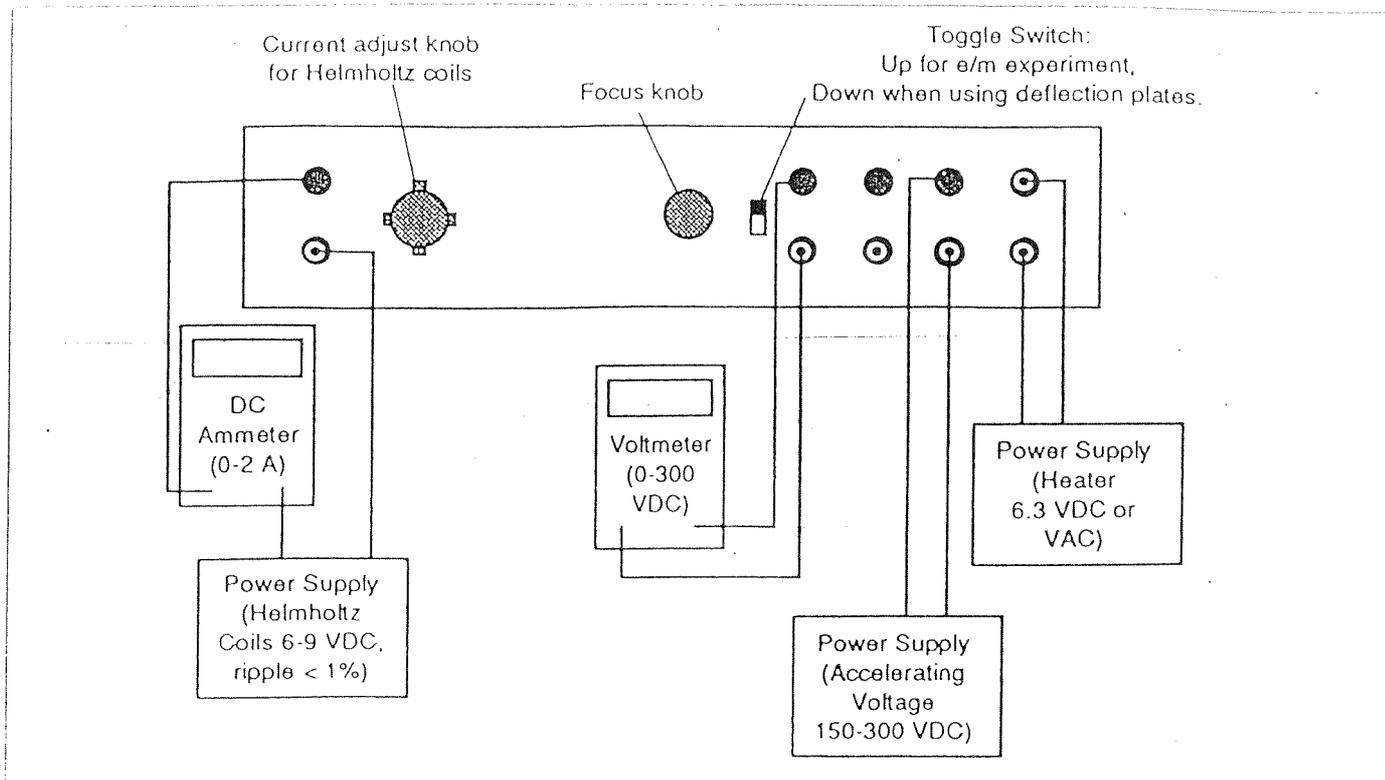


Figure 3: Esquema simplificado del montaje del experimento.

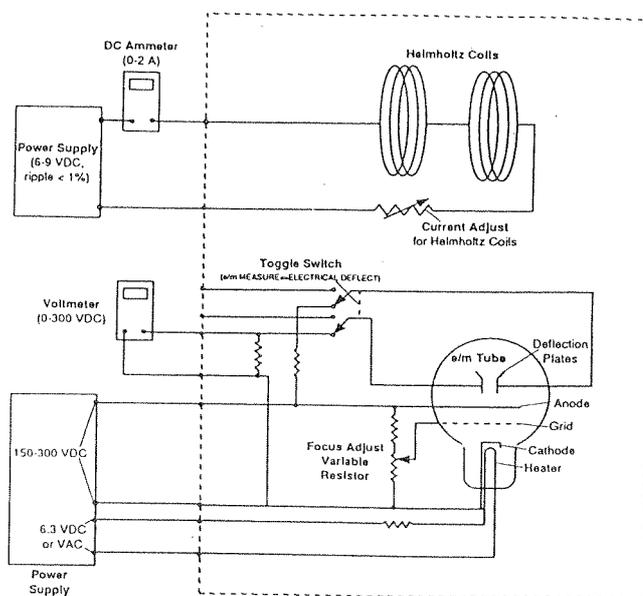


Figure 4: Esquema detallado del montaje del experimento.

3. Se coloca el interruptor del aparato de distribución en '*e/m measure*'.
4. Ajustamos las fuentes de alimentación a los valores siguientes:
 - (a) **PRECAUCIÓN:** El voltaje que calienta el filamento de la lámpara NUNCA DEBE EXCEDER LOS 6 VOLTIOS. A más alto voltaje se funde la lámpara.
 - (b) Con esta precaución tendremos que: (1) Tensión de 6 Voltios aplicada al filamento. (2) Tensión de aceleración entre 150 y 300 voltios (≈ 200). (3) Tensión de alimentación de los anillos de Helmholtz entre 7 y 8 voltios.
5. Comprobado el circuito, se conectan los aparatos. Se esperan unos minutos (≈ 2) para que el filamento se caliente.
6. Lentamente variamos el mando de control de corriente que circula por los anillos de Helmholtz, cuidando de no superar nunca una corriente de 2 amperios. Veremos que el haz de electrones describe una curva debida a la acción del campo magnético generado por los anillos. Comprobar que el haz de electrones es paralelo a los anillos de Helmholtz. Si no es así girar la lámpara hasta que esto se consiga. Se puede hacer con la lámpara encendida, girando la base plástica de la bombilla y cuidando de no tocar el vidrio con los dedos.
7. Medid la corriente que circula por los anillos y el voltaje de aceleración con la mayor precisión posible.
8. Se mide también el diámetro de la circunferencia que describen los electrones (evitar dentro de lo posible los errores de paralaje). Con este dato y conocido el diámetro de los anillos de Helmholtz se tiene toda la información involucrada en la ecuación (6).
9. ¿Donde se debe medir el diámetro de la trayectoria?. ¿En la parte interna, en la central ó en la externa de la trayectoria?. ¿Por qué

– **Aplicaciones adicionales:**

1. Podemos combinar la acción de las placas deflectoras con la del campo magnético generado por los anillos de Helmholtz. En este caso se observará que para una campo magnético determinado, para el que los electrones describen una órbita circular, al incrementar el potencial aplicado a las placas el radio de la circunferencia se modifica. Explicad por qué ocurre esto cualitativamente.

2. Podemos rotar el tubo entre 0-90 grados respecto de la posición paralela a los anillos de Helmholtz (la rotación se puede hacer con el tubo encendido procurando no tocar el vidrio). Estudiar en la posición e/m que es lo que ocurre en este caso.
3. Acercad un imán a la bomnilla y observad su efecto. Mantenedlo alejado mientras se realizan las medidas

EFEECTO FOTOELÉCTRICO

1. TEORÍA

El efecto fotoeléctrico consiste en la emisión de electrones por parte de un material cuando sobre el mismo incide radiación electromagnética. Si se hace incidir radiación monocromática de frecuencia ν sobre una superficie metálica se puede comprobar que:

- La emisión de electrones se produce instantáneamente tras la llegada del frente luminoso, por lo que el tiempo de retardo es cero.
- El efecto fotoeléctrico no aparece para radiación electromagnética de frecuencia menor que la llamada frecuencia umbral del metal, ν_0 , que es característica del mismo.
- La energía máxima de los electrones emitidos no depende de la intensidad del haz luminoso sino de su frecuencia, así como del material emisor.

La teoría clásica de la radiación electromagnética fue incapaz de explicar ninguno de estos hechos, siendo la teoría cuántica de Einstein la primera que proporcionó una explicación satisfactoria de estos resultados experimentales.

Einstein supuso que la energía de la radiación electromagnética es transportada en unidades indivisibles, llamadas cuantos de radiación o fotones, de energía $E = h\nu$, siendo h la llamada constante de Planck. El efecto fotoeléctrico se produce cuando un electrón ligado a la superficie metálica absorbe un fotón siendo instantáneamente emitido de la superficie metálica (por tanto el tiempo de retardo debe ser nulo). En el proceso el electrón absorbe una energía, $h\nu$, proporcionada por el fotón, que se invierte parte en superar la energía de ligadura al metal, W_i , que puede ser diferente para distintos electrones, y el resto se convierte en energía cinética, T_i . El balance energético se puede escribir como

$$h\nu = W_i + T_i$$

La energía cinética máxima, T_m la alcanzarán los electrones menos ligados al metal, W_0 , para los cuales se cumple que

$$T_m = h\nu - W_0.$$

Es obvio a partir de esta expresión que el efecto fotoeléctrico no tendrá lugar para frecuencias menores que $\nu_0 = W_0/h$, así como que la energía máxima de los electrones depende de la frecuencia, ν , y no de la intensidad del haz incidente.

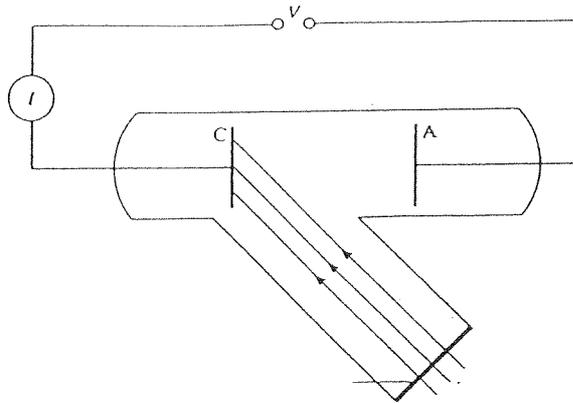


Figure 1: Esquema del montaje del circuito con la célula fotoeléctrica.

2. MONTAJE EXPERIMENTAL

Los electrones emitidos desde el cátodo alcanzan el ánodo dando lugar a una corriente eléctrica que circula por el circuito tal y como se muestra en la siguiente figura 1.

La intensidad de dicha corriente crece hasta un valor máximo cuando la diferencia de potencial es positiva. Sin embargo si ésta se hace negativa, la intensidad de corriente tiende a anularse, lo que se consigue con un cierto valor del potencial V_0 (llamado potencial de frenado), tal y como se indica en la figura 2.

El potencial de frenado depende de la frecuencia de la luz incidente. Una representación gráfica de V_0 en términos de ν (experiencia de Millikan) proporciona una recta cuya pendiente es $h/|e|$ (siendo e la carga del electrón) que corta al eje de abscisas en la llamada frecuencia umbral. La figura 3 muestra gráficamente el tipo de resultado que se debe obtener.

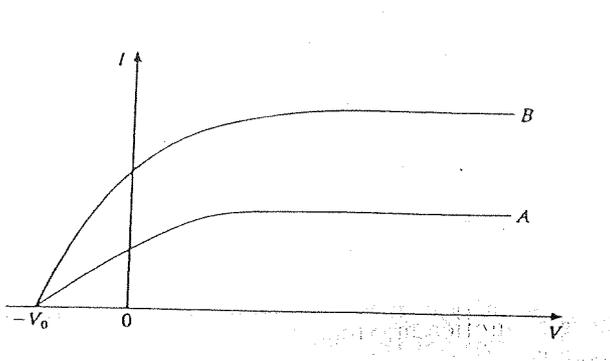


Figure 2: Comportamiento de la intensidad de corriente con el potencial aplicado, sometida la célula fotoeléctrica a radiación.

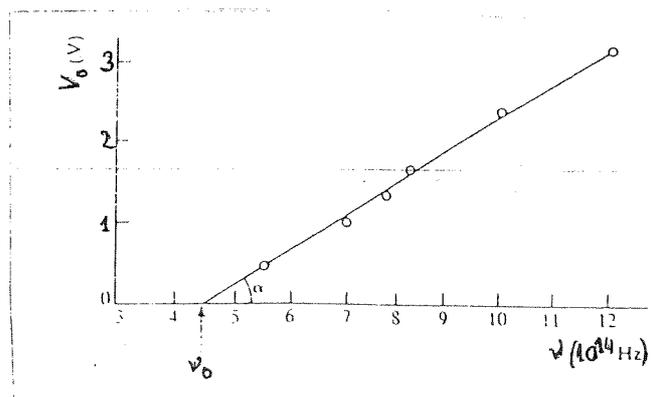


Figure 3: Potencial de frenado frente a frecuencia de la radiación incidente.

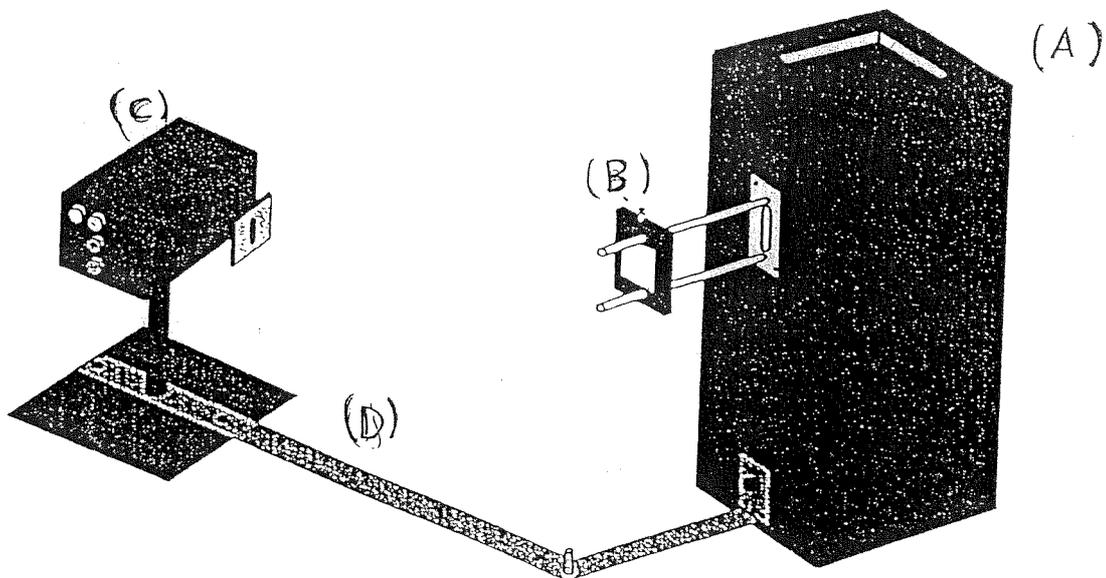


Figure 4: Fotografía del montaje experimental.

3. EQUIPO NECESARIO Y CARACTERÍSTICAS

El equipo utilizado, figura 4, está constituido por los elementos siguientes:

- (a) **Fuente luminosa de vapor de mercurio:** La fuente luminosa se encuentra dentro de una caja metálica con dos rendijas. La luz que emite la lámpara está compuesta por cinco longitudes de onda dominantes: amarilla ($\lambda = 578$ nm), verde ($\lambda = 546.074$ nm), azul ($\lambda = 435.835$ nm), violeta ($\lambda = 404.656$ nm) y ultravioleta ($\lambda = 365.483$ nm), aunque la línea amarilla es un doblete en el que participan dos longitudes de onda de aproximadamente 577 y 579 nm, que no son distinguibles en este experimento.
- (b) **Red de difracción y focalizador:** La luz que sale por la rendija se hace pasar a través de la red de difracción (600 líneas por mm aproximadamente) para separar las diferentes líneas que las componen. Los máximos de la luz difractada ocurren para ángulos que verifican la relación

$$d \sin(\theta) = n\lambda,$$

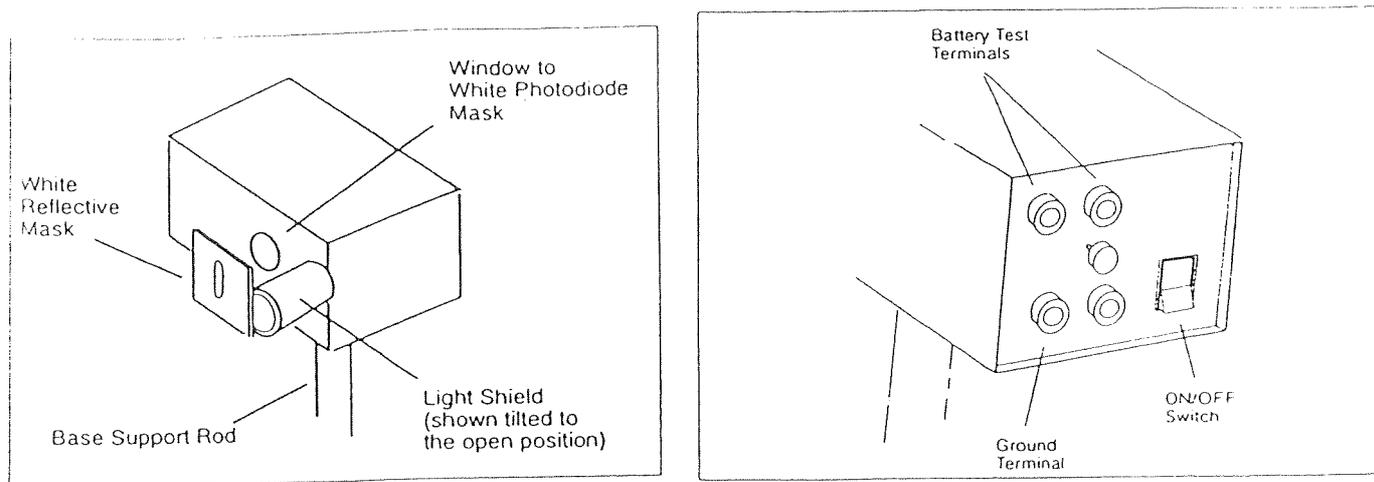


Figure 5: Esquema realista del dispositivo que alberga el circuito y la célula fotoeléctrica.

donde d es la constante de red, es decir la separación entre líneas de la red, θ es el ángulo de difracción, n es el orden de los máximos y λ es la longitud de onda de la luz difractada.

Una vez separadas las diferentes componentes de la luz se hacen pasar por un focalizador para centrarlas perfectamente sobre el aparato fotoeléctrico.

- (c) **Aparato fotoeléctrico:** La figura 5 muestra esquemáticamente la estructura de esta parte del dispositivo. Alberga la célula fotoeléctrica y el circuito electrónico de apoyo. La ventana de entrada de la luz está protegida con un protector de cristal con filtro ultravioleta, delante del cual se pone una pantalla blanca que refleja la luz que no entra por la rendija. En el frontal principal se encuentra el interruptor de encendido-apagado, terminales para comprobar el estado de las baterías, un interruptor para descargar el circuito electrónico y los terminales para medir el potencial de frenado.

El modo de operar el aparato es el siguiente: la luz monocromática incide sobre el cátodo de la célula fotoeléctrica, que tiene una pequeña función trabajo W_0 . Los electrones emitidos alcanzan el ánodo que está sometido a

un potencial, V . La electrónica asociada a este sistema tiene una pequeña capacitancia que se va cargando con la corriente fotoeléctrica. Cuando el potencial de esta capacitancia alcanza el potencial de frenado de los fotoelectrones, la corriente decrece a cero y el potencial cátodo-ánodo se estabiliza. Este potencial final entre ánodo y cátodo es el potencial de frenado y se mide con un voltímetro acoplado a los terminales en el frontal del aparato.

Nota: Debido a la gran impedancia del sistema una vez que el condensador se ha cargado con la corriente fotoeléctrica, tarda un tiempo grande en descargarse, por lo que hay que utilizar el botón *puesta a cero* para aligerar este proceso.

- (d) **Multímetro:** Se utiliza para comprobar el estado de las baterías y para medir el potencial de frenado.
- (e) **Filtros (amarillo, verde, y de intensidad luminosa):** Las diferentes líneas obtenidas con la red de difracción no están perfectamente definidas, especialmente la amarilla y la verde, por lo que para eliminar otras componentes mezcladas con estas se utilizan los filtros amarillo y verde, respectivamente.

El filtro de intensidad luminosa (con factores de disminución desde el 20 al 80 %) se utiliza para hacer un estudio del potencial de frenado en función de la intensidad luminosa incidente.

- (f) **Accesorios:** Sistema mecánico en el que se apoyan los diferentes elementos del sistema.

4. REALIZACIÓN DE LA PRÁCTICA

En primer lugar hay que montar el sistema tal como se muestra en la figura 4. Se enciende la lámpara de mercurio (una vez encendida no volver a apagarla hasta la finalización de la práctica) y se comprueba cómo la red de difracción separa las diferentes componentes de la luz ajustando el enfoque.

Se procede a continuación a realizar las medidas necesarias: Se gira el aparato fotoeléctrico de forma que sobre la rendija incida una de las líneas. El protector de luz se debe encontrar en la posición de *abierto* para comprobar que la radiación del color deseado es la que penetra por la ventana del detector. Decidid si se necesita alguno de los filtros de color de los que se dispone para tomar las medidas del potencial de frenado para algunas de las líneas. A continuación cerrad el protector e iniciad el dispositivo electrónico (puesta a cero), y medid: **(i)** el potencial de frenado e , **(ii)** tiempo que tarda dicho potencial en estabilizarse. Haced esto para para cada una de las intensidades luminosas y cada uno de los colores en el primer orden de difracción. Repitiendo el proceso para cada una de las líneas en el segundo orden de difracción, sin disminuir la intensidad transmitida en este caso.

5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

- Representad gráficamente el potencial de frenado en términos de la frecuencia para una transmisión de intensidad luminosa del 100%. Determinad entonces la constante de Planck, supuesta conocida la carga del electrón ($|e| = 1.602 \cdot 10^{-19} C$). Determinad también la frecuencia umbral y la función trabajo del cátodo.
- Estudiad la dependencia de estos resultados con la intensidad luminosa incidente. Para esto haced lo mismo que en el punto anterior para transmisiones del 20, 40, 60 y 80%. Analizad cómo afectan estos resultados a la teoría clásica de la radiación electromagnética.
- Analizad el tiempo de estabilización del potencial de frenado en términos de la intensidad luminosa. Intentad justificar los resultados.
- Haced un estudio similar al del primer punto con las líneas situadas en el segundo orden de difracción. Analizad detalladamente las razones experimentales que hacen que surjan discrepancias con algunos resultados del primer punto. A continuación seleccionad los datos que, en vuestra opinión no están afectados de error experimental apreciable para calcular de nuevo la constante de Planck, la frecuencia umbral y la función trabajo.

DIFRACCIÓN DE ELECTRONES

OBJETIVOS: 1. Comprobar el carácter ondulatorio de los electrones en movimiento. 2. Comprobar la relación de de Broglie. 3. Medir distancias interplanares en el grafito, a partir de la imagen de difracción producida por el paso de los electrones a través de una muestra policristalina.

MATERIAL:

1. Tubo de difracción de electrones con grafito.
2. Fuente de alta tensión con voltímetro digital.
3. Fuente de alimentación con distintas salidas (continuas y alternas).
4. Conectores.
5. Pie de Rey.

MONTAJE: Una fotografía del montaje se ilustra en la figura 1. En la figura 2 se muestra un esquema de la lámpara con las alimentaciones que deben entrar por cada uno de sus electrodos externos.

TEORÍA:

Cuando un haz monocromático de longitud de onda λ incide sobre una red cristalina (por ejemplo la muestra de grafito policristalino depositado sobre una red de cobre de la que se dispone en la presente práctica) es deflelado de acuerdo con la ley de Bragg:

$$2d \sin(\theta) = n\lambda, \quad n = 1, 2, \dots \quad (1)$$

donde d es el espaciamiento entre planos de átomos de la red (carbono en nuestro caso) y θ es el ángulo de Bragg (ángulo que forman el haz difundido y los planos de la red).

Con el uso de fuentes de longitud de onda conocida se han podido estudiar diferentes redes cristalinas (es decir, determinar las distancias interplanares, d) y, a la inversa, una vez conocida la estructura cristalina de un material, es posible determinar la longitud de onda de otra radiación incidente. En concreto, estas redes cristalinas sirven para explicar el carácter ondulatorio de los electrones, así como a comprobar la relación de de Broglie que le asigna una determinada longitud de onda, tal y como estudiaremos en esta práctica.

El grafito policristalino del que se dispone no presenta simetría de traslación, ya que son granos desligados unos de otros y los planos están cortados y orientados aleatoriamente. Esto supone que cuando la radiación se difracta en la red lo hace formando un cono y produciendo anillos de interferencia. Es precisamente la observación experimental de estos anillos de difracción lo que permite asignar un carácter ondulatorio a la radiación incidente

El ángulo de Bragg, θ , puede calcularse a partir del radio de los anillos de interferencia. El ángulo de desviación observado, α , por la forma del dispositivo experimental (ver figura 2), es el doble que el ángulo de Bragg $\alpha = 2\theta$. Se tiene entonces que

$$\sin(2\alpha) = \frac{r}{R}, \quad (2)$$

donde r es el radio del anillo y R el radio de la lámpara ($D = 2R = (127 \pm 3)\text{mm}$). Para ángulos pequeños ($\alpha \leq 10^\circ$) el seno se puede aproximar por el ángulo, y con la ecuación (1), se obtiene para el radio de los anillos la expresión

$$r = \frac{2R}{d}n\lambda. \quad (3)$$

Por tanto, conocidas las distancias interplanares, la medida del radio de los anillos permite determinar experimentalmente la longitud de onda de la radiación incidente.

Si la radiación incidente es un haz de electrones, podemos comprobar si la longitud de onda, λ , asociada a su movimiento depende de su momento y verifica la relación de de Broglie:

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad (4)$$

donde $h = 6.626 \cdot 10^{-34}$ Js es la constante de Planck, y p el momento del electrón.

En el experimento propuesto, el momento puede ser calculado a partir de la energía cinética, T , que adquiere el electrón sometido al voltaje de aceleración U_A , mediante la ecuación:

$$T = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{p^2}{2m} = eU_A. \quad (5)$$

Y por tanto, la longitud de onda teórica viene dada en estas condiciones por

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2meU_A}}, \quad (6)$$

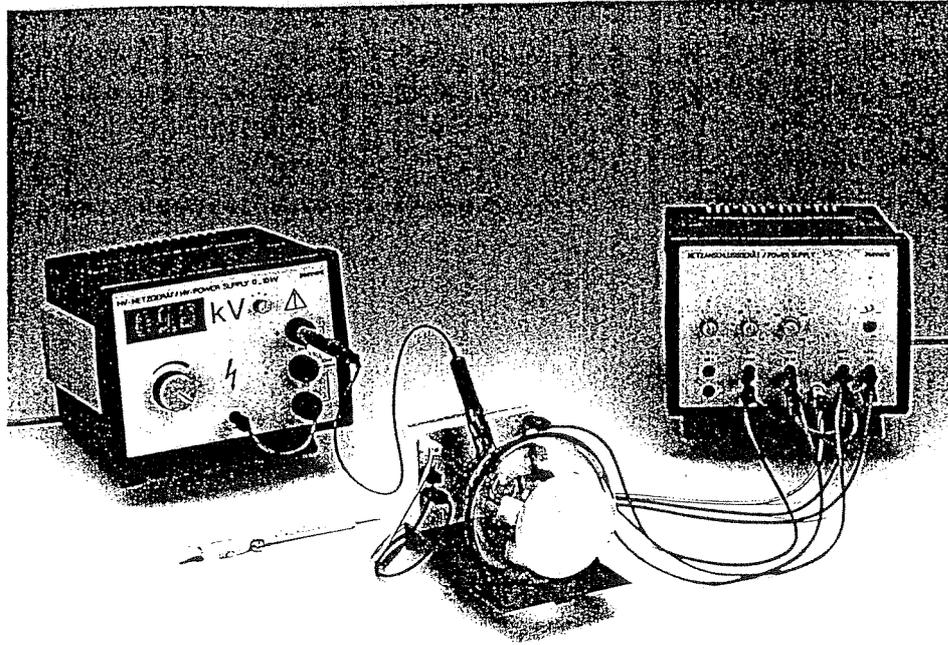


Figure 1: Fotografía del montaje experimental.

donde $e = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{C}$, es el módulo de la carga del electrón y $m = 9.109 \cdot 10^{-31} \text{Kg}$ es su masa en reposo. (Las correcciones relativistas, cuando se trabaja con los máximos voltajes accesibles en esta práctica, son del orden del 0.5%).

PRÁCTICA: Los diámetros de los anillos de difracción son las cantidades experimentales que pueden medirse de forma directa. Dividiremos en dos partes las medidas que se realizarán:

1. Se medirán los diámetros de los dos anillos más internos para distintos voltajes anódicos. Con los valores obtenidos, y con las distancias interplanos del grafito en los que sitúan los átomos de carbono (ver figura 3), se determinará la longitud de onda de los electrones, comprobando que se verifica la relación de de Broglie.

Los dos anillos más internos son producto de la difracción, para $n = 1$, en los planos separados d_1 y d_2 en la figura 3, que son los más separados de la red. Se puede utilizar la ecuación (3) ya que los ángulos son pequeños.

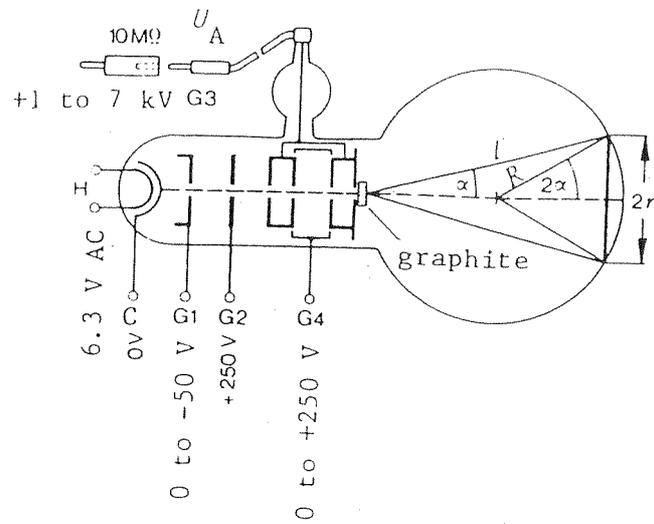


Figure 2: Esquema de la lámpara de difracción con la muestra policristalina de grafito.

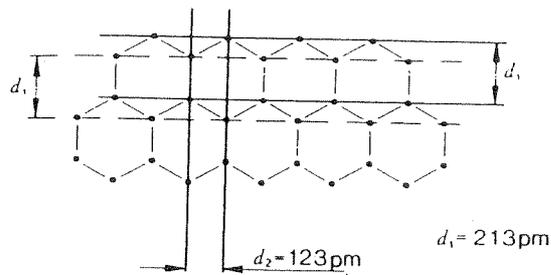


Figure 3: Esquema de la red cristalina indicando las distancias, d_1 y d_2 , que producen los anillos de menor radio.

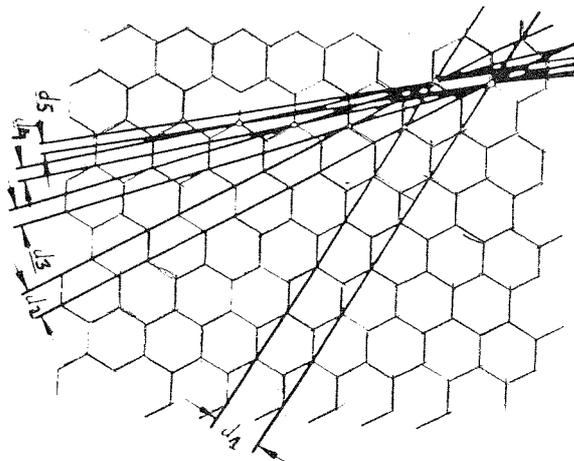


Figure 4: Esquema de la red cristalina indicando los planos que proporcionan los principales círculos de interferencia.

2. Se medirán los diámetros de los anillos más externos a un voltaje anódico fijo (elegido un potencial V_f próximo a 7 kV, pero distinto de este valor). Se calculan teóricamente los radios que se deben obtener, suponiendo que corresponden a difracción por diferentes planos del grafito y/o distintos valores de n en la fórmula de Bragg. Se buscará la correspondencia más adecuada para los diámetros obtenidos experimentalmente.

En la figura 4 se muestran los espaciamentos interplanares que pueden producir la difracción, sus valores en pm (10^{-12}m), son

$$d_1 = 213, \quad d_2 = 123, \quad d_3 = 80.5, \quad d_4 = 59.1, \quad d_5 = 46.5.$$

Los radios calculados para un potencial de 7 kV son los que se muestran en la Tabla 1. Construid una tabla semejante a esta con el potencial V_f elegido. Es de esperar que los radios medidos sean próximos a algunos de estos valores.

Para el cálculo sobre los anillos de difracción más externos se debe utilizar la ecuación exacta sin aproximación, al ser los ángulos demasiado grandes para aproximar el coseno por la unidad y el seno por el valor del ángulo.

	n=1	n=2	n=3	n=4
d1	8.9	17.7	26.1	34.1
d2	15.4	29.9		
d3	23.2			
d4	31.0			
d5	38.5			

Table 1: Valores de los radios de los anillos de difracción en milímetros, para distintos valores de distancia interplanar, dk , y órdenes de difracción, n

La intensidad de los anillos de interferencia de más alto orden es mucho menor que la que corresponde a los primeros órdenes, de manera que la observación será progresivamente más difícil hasta que se haga imposible. Otra dificultad añadida es que órdenes distintos correspondientes a difracciones por planos distintos pueden coincidir.

Comparando las medidas realizadas con la tabla construida, identificad a qué valores de \mathbf{n} y \mathbf{d}_i corresponde cada uno de los anillos observados.

ESPECTROSCOPIA ATÓMICA

1. TEORÍA

Los resultados experimentales conocidos acerca del espectro de emisión del átomo de hidrógeno en la región del visible fueron parametrizados por Balmer mediante la expresión

$$\lambda = C \left(\frac{n^2}{n^2 - 4} \right); \quad n = 3, 4, \dots$$

donde $C = 3646 \text{ \AA}$. Esta expresión fue reproducida mediante el modelo semiclásico de Bohr en 1913 (aunque el valor de la constante C varía ligeramente), obteniéndose además expresiones similares para otras series espectrales de este átomo. Las correspondientes líneas espectrales fueron justificadas como debidas a transiciones entre diferentes estados ligados del sistema en cuestión.

Esto mismo ocurre con todos los demás átomos: la existencia de un conjunto discreto de estados ligados de energía bien definida hace que las transiciones entre ellos dé lugar a la emisión de radiación electromagnética. El conjunto de longitudes de onda emitidas constituye el espectro de emisión del elemento en cuestión. Este espectro es diferente para cada sustancia, de forma que sirve para identificarla.

Los objetivos de esta práctica son los siguientes:

- (a) Calibrado de un espectrogoniómetro calculando la constante de red de una red de difracción. Se utilizará una lámpara de vapor de mercurio.
- (b) Determinación de las longitudes de onda de diferentes rayas espectrales en el visible del átomo de hidrógeno.
- (c) Analizar el espectro del átomo de H con el modelo de Bohr. Determinar C a partir de los datos experimentales

El material utilizado está compuesto por una lámpara de mercurio y otra de hidrógeno, además de un espectrogoniómetro con una red de difracción. La descripción de estos elementos se hará en el siguiente apartado. Se utilizan algunas de las radiaciones emitidas por el mercurio, cuya frecuencia se conoce previamente, para calibrar el sistema de medida.

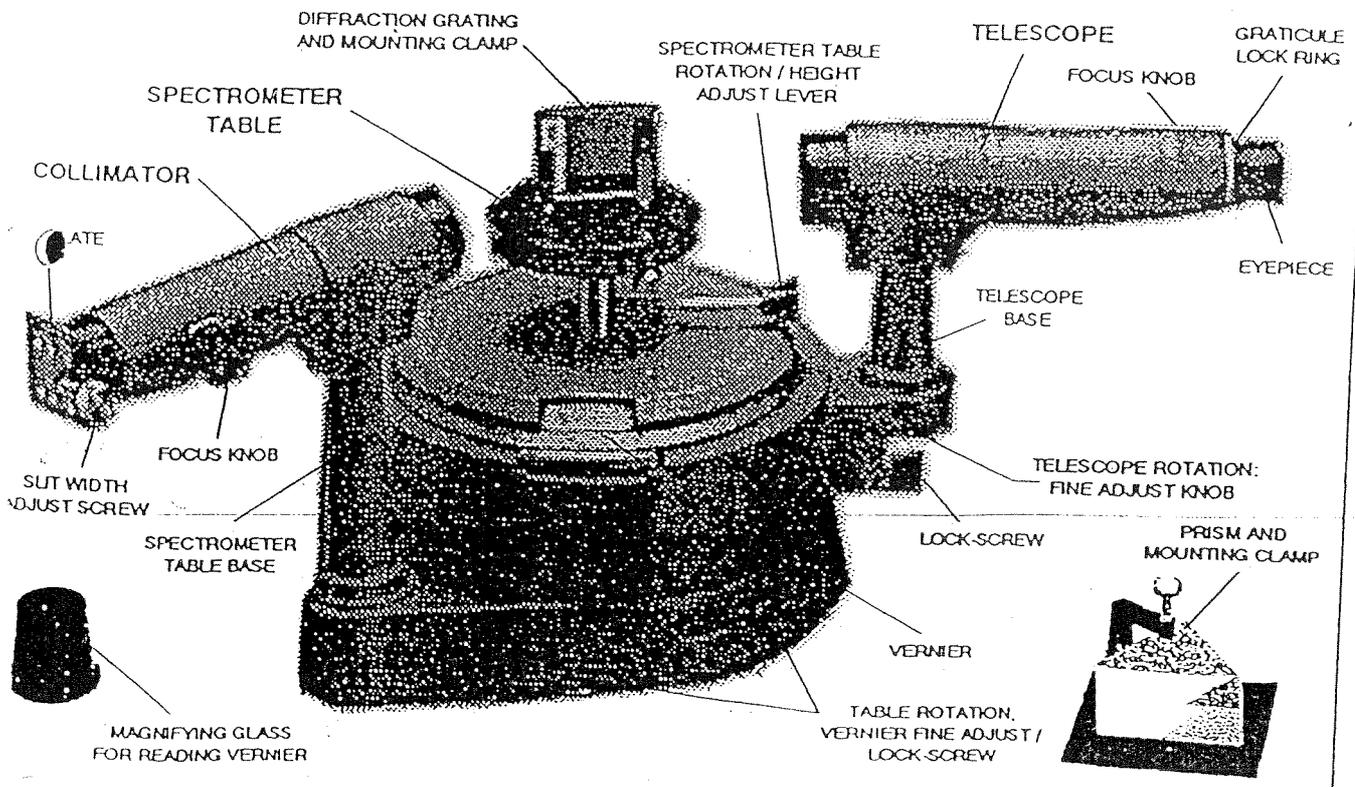


Figure 1: Fotografía del espectro-goniómetro.

2. MONTAJE EXPERIMENTAL

El equipo utilizado en esta práctica está formado por lámparas de gas y por el espectro-goniómetro que se muestra en la figura 1. Sus elementos básicos son un colimador, una red de difracción, un telescopio y un sistema de medida de ángulos. Un diagrama elemental de funcionamiento se muestra en la figura 2.

Los elementos que constituyen el montaje son:

- (a) **Colimador:** Su objetivo es conseguir un haz de luz delgado y paralelo que logre que toda la luz que atravesase la red de difracción lo haga con el mismo ángulo de incidencia ya que con esto se consigue una imagen de difracción mejor definida. Delante del colimador se encuentra un dispositivo con una rendija ajustable en anchura. Si la rendija no está completamente vertical este sistema puede girarse hasta conseguir la verticalidad.
- (b) **Red de difracción:** La luz que sale del colimador se hace pasar a través de la red de difracción (300 o 600 líneas por mm aproximadamente) para separar

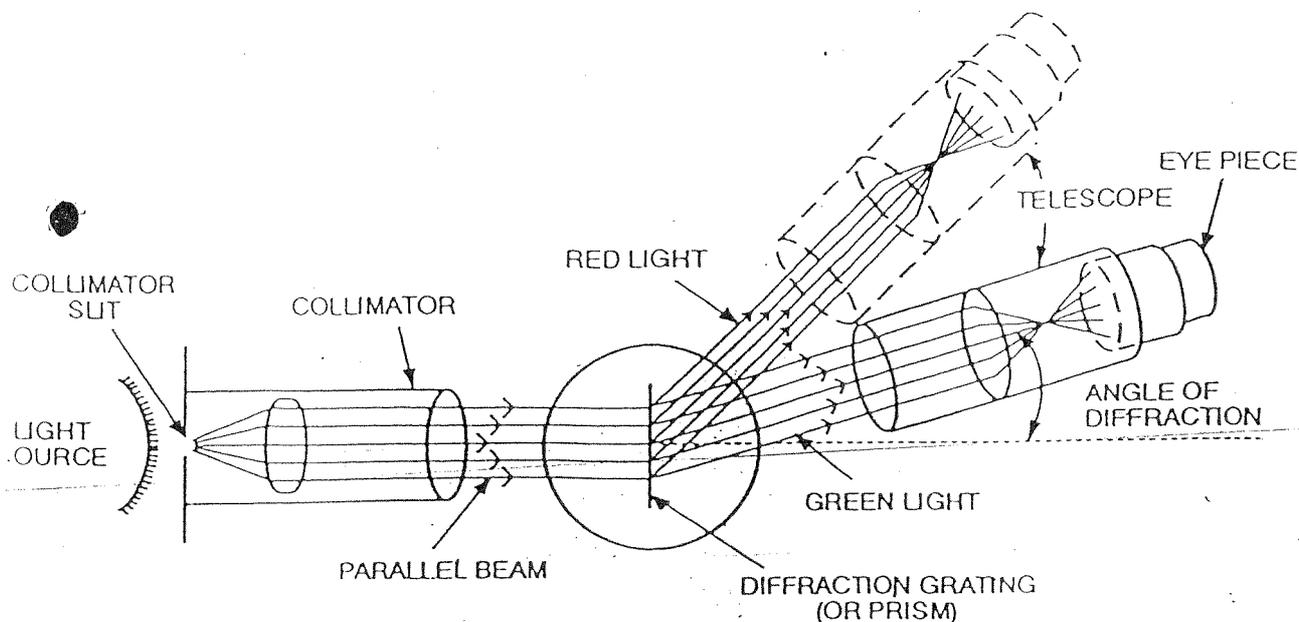


Figure 2: Esquema del montaje experimental.

las diferentes líneas que la componen. Los máximos de la luz difractada verifican la relación (difracción de Fraunhofer)

$$d \sin(\theta) = n\lambda,$$

donde d es la constante de red (separación entre líneas de la red), θ es el ángulo de difracción, n es el orden de difracción y λ es la longitud de onda de la luz difractada. Por tanto si el haz está compuesto de diferentes colores, cada uno de ellos saldrá en una dirección diferente.

- (c) **Telescopio:** Con él se ven las diferentes líneas y está montado sobre una base giratoria que permite determinar ángulos con una precisión de $30''$ de arco. Con el telescopio enfocado a infinito y girando el telescopio sobre su base se irán obteniendo las diferentes imágenes de difracción correspondientes a los diferentes colores y los diferentes órdenes de difracción. La determinación de los ángulos permitirá calcular las longitudes de onda presentes en la luz.

Delante del telescopio se encuentra un visor con dos líneas perpendiculares, de forma que la vertical hay que ajustarla perfectamente con la línea lumi-

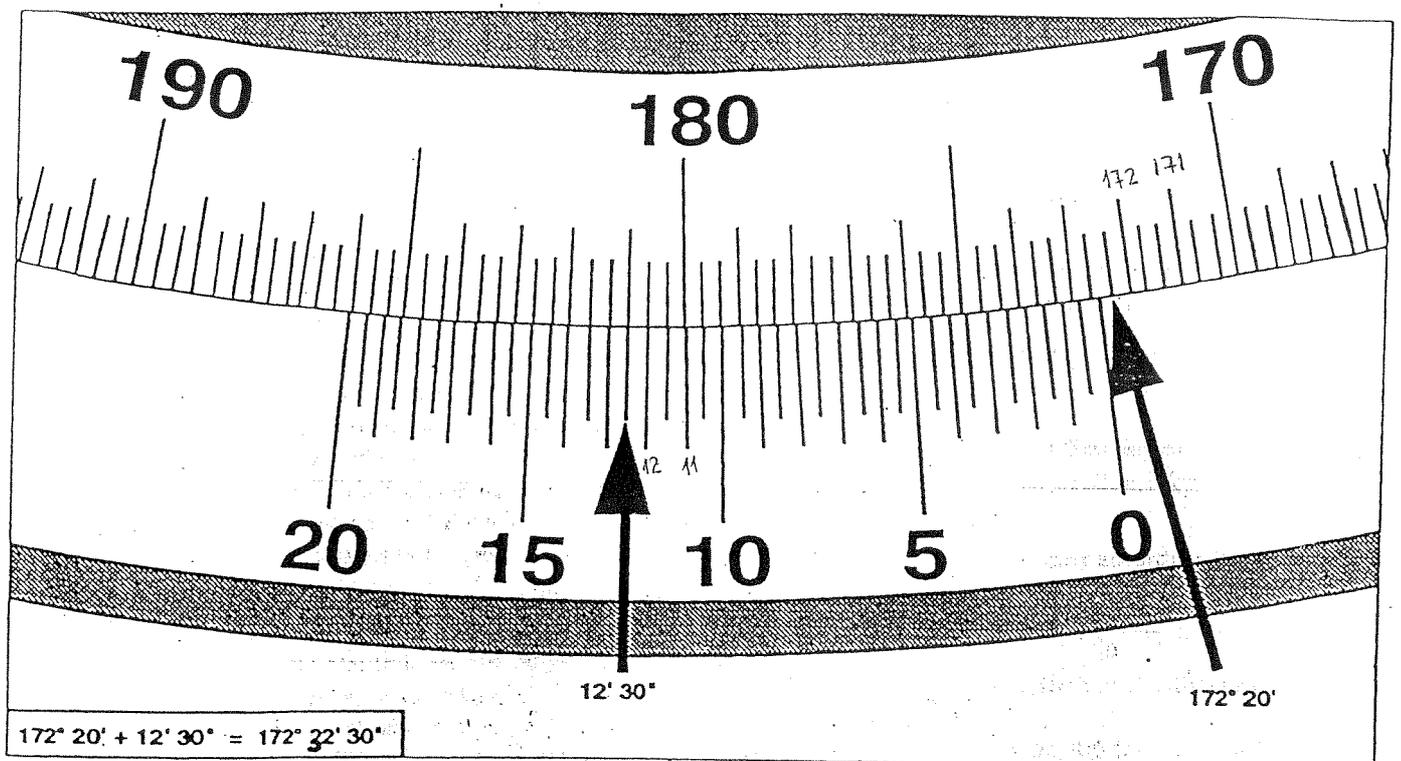


Figure 3: Escala tipo Vernier del espectro-goniómetro.

nosa.

Una vez localizada la línea es conveniente fijar la base giratoria con el tornillo que se encuentra debajo del telescopio y enfocar la línea luminosa con el tornillo de ajuste fino que se encuentra a la derecha del anterior.

- (d) **Escala de medida:** Para medir los ángulos de difracción se utiliza una escala Vernier (tipo nonius), de 360° . Esta escala presenta dos lecturas diferentes. La superior presenta divisiones de $20'$ de arco y la inferior presenta divisiones de $30''$ de arco. Un ejemplo de medida se muestra en la figura 3

Mirando la escala superior vemos que indica un ángulo entre $172^\circ 20'$ y $172^\circ 40'$. Nos quedamos con la lectura menor y nos fijamos que la escala inferior (cuya numeración va de cero a veinte minutos de arco) coincide con la superior en la línea 12 y media. Por tanto la lectura final será $172^\circ 20' + 12' 30'' = 172^\circ 32' 30''$.

3. REALIZACIÓN DE LA PRÁCTICA

Teniendo en cuenta los aspectos técnicos y/o prácticos detallados en el apartado anterior se llevará a cabo la realización de la práctica.

En primer lugar, utilizando la lámpara de mercurio, se alinea y enfoca el sistema con la línea no difractada: primero se enfoca el telescopio al infinito, después se ajusta el colimador hasta que la línea se vea con nitidez. Finalmente se selecciona la anchura de línea (mejor cuanto más fina) procurando que incida verticalmente.

A continuación se mide el ángulo cero, es decir el ángulo que se tomará como referencia para medir los ángulos de difracción.

Colocad a continuación una de las redes de difracción en su posición. Procurad, en principio a simple vista, que la luz incida normalmente a la red. Una forma más detallada de hacerlo es comprobar que una línea determinada se difracta el mismo ángulo a izquierda y a derecha. Si no lo hace modificar ligeramente la posición de la red.

Para calibrar el sistema utilizaremos las líneas visibles del átomo de mercurio: $\lambda = 3650.157, 4046.572, 4358.337, 5460.753, 5769.598, 5790.663 \text{ \AA}$. Midiendo los ángulos de difracción en los diferentes órdenes de difracción que sean visibles con el sistema se determinará la constante de red con su error correspondiente.

A continuación se estudiará el espectro del átomo de hidrógeno, comparando los resultados con las predicciones teóricas, e identificando los estados desde los que se produce la transición en cada caso. En las medidas hay que anotar dos resultados, uno cuantitativo (el ángulo de difracción) y otro cualitativo (color e intensidad), La mayor o menor intensidad de la línea, es decir, más o menos brillante, nos dará cuenta de la probabilidad de transición entre los niveles responsables de dicha línea). En este punto hay que tener en cuenta la sensibilidad relativa del ojo a diversas longitudes de onda para niveles normales de iluminación que, como se observa en la figura 4, es mayor para verde y amarillo y menor para rojo y azul.

Por último se dan los gráficos de las transiciones más importantes para los átomos de mercurio e hidrógeno (Figuras 5 y 6).

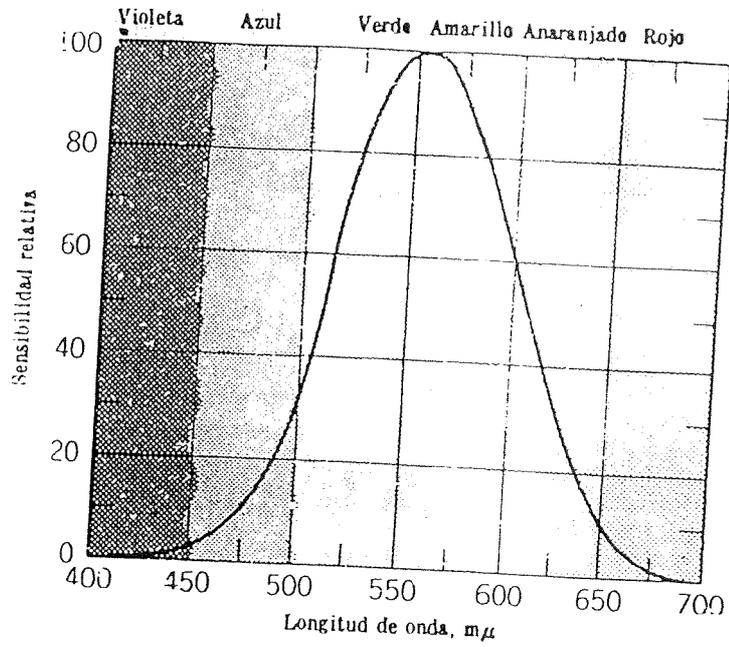


Figure 4: Sensibilidad relativa del ojo humano patrón para distintas longitudes de onda del visible.

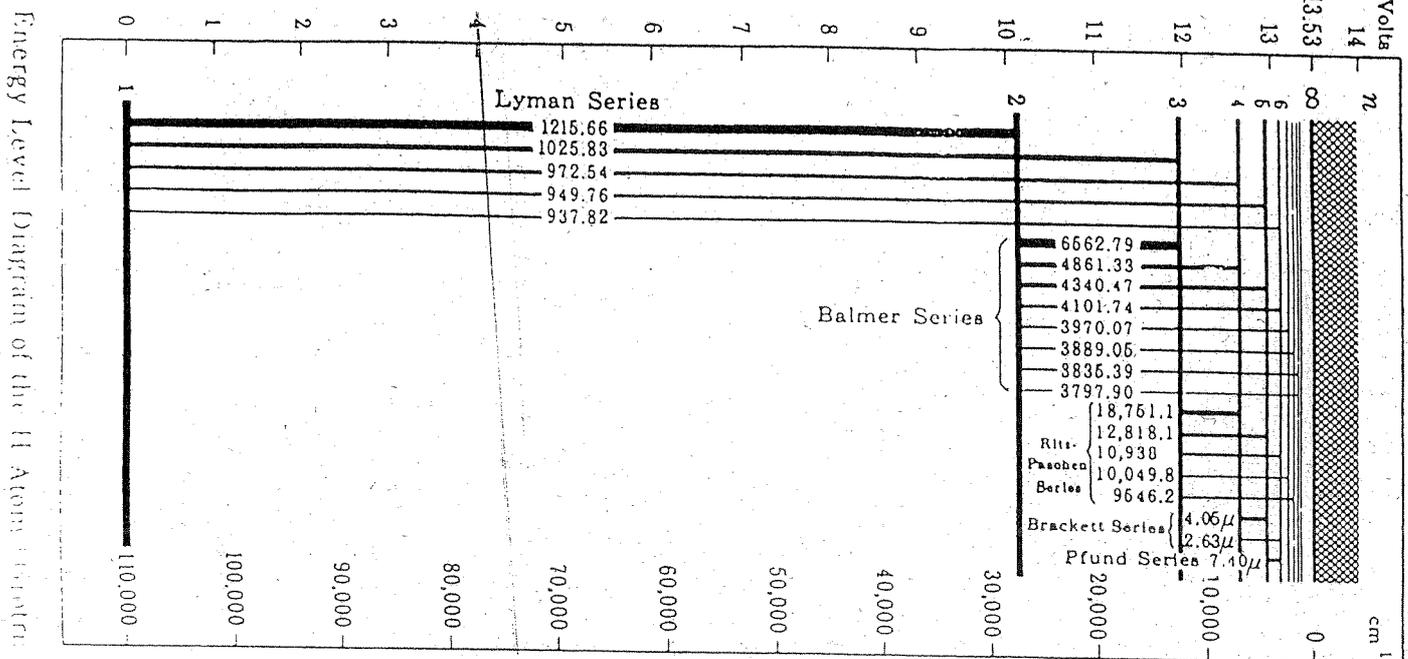


Figure 5: Diagrama de niveles y transiciones más probables para el átomo de hidrógeno.

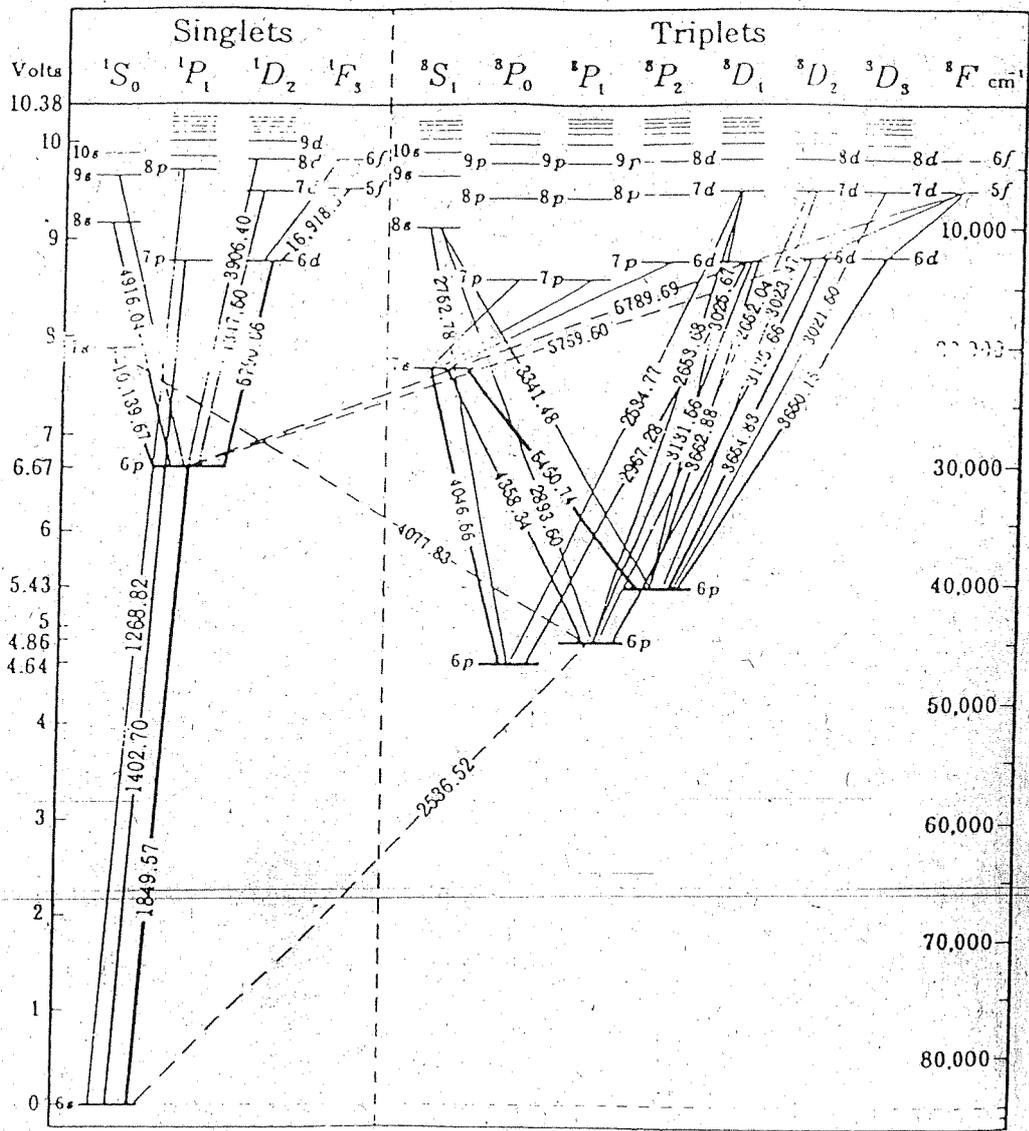


Figure 6: Diagrama de niveles y transiciones más probables para el átomo de mercurio.

EXPERIENCIA DE FRANCK Y HERTZ

- **FUNDAMENTO TEÓRICO:** La interpretación de los espectros atómicos establecía sin lugar a dudas, pero de forma indirecta, la existencia de una serie de niveles de energía estacionarios en los átomos, de acuerdo con la hipótesis de Bohr. FRANCK Y HERTZ en 1914 en una serie de experimentos dan una confirmación directa de su existencia. El montaje experimental usado por FRANCK-HERTZ se representa esquemáticamente en la figura 1.

El vapor de mercurio a temperatura ambiente tiene prácticamente todos sus átomos en el estado fundamental, pues siendo la energía cinética media del orden de $kT \approx 1/40$ eV, los choques interatómicos no pueden producir excitaciones, ya que el primer estado excitado en el mercurio dista del fundamental unos 4.86 eV. Si el potencial V en la placa, R , es próximo a cero, los electrones que vienen del filamento caliente F carecen de energía suficiente para llegar a la placa P , al no poder vencer la diferencia de potencial entre la rejilla R y la placa. A medida que V aumenta llegan más electrones a P , muchos de los cuales habrán chocado en su camino con átomos de mercurio. Estas colisiones son elásticas, es decir, sin transferencia de energía. Si se admite la existencia real de los estados estacionarios, es de esperar que cuando V se aproxime a 5 voltios, los electrones chocarán de forma inelástica con los átomos de mercurio, dejando a estos sistemas en su primer estado excitado y perdiendo, por tanto, casi toda su energía cinética en el choque. Se debe así observar, a partir de $V \approx 5$ voltios una caída brusca de corriente. Si se continúa aumentando V los electrones, después del choque inelástico, tienen aún energía suficiente para llegar a la placa, y la corriente aumentará de nuevo de forma continua hasta $V \approx 10$ voltios, momento en que los electrones podrán chocar dos veces inelásticamente, y se observará una nueva caída de la intensidad de la corriente. La situación experimental queda reflejada en la figura 2, corroborándose así la existencia real de los estados estacionarios discretos.

- **OBJETIVO:** Determinar la energía de excitación del átomo de mercurio a partir de la distancia entre mínimos y/o máximos de corriente en la experiencia de Franck-Hertz. Estudio cualitativo de la dependencia de la forma de la gráfica de Franck-Hertz con el potencial de retardo utilizado.
- **MATERIAL:**
 1. Tubo Franck-Hertz.

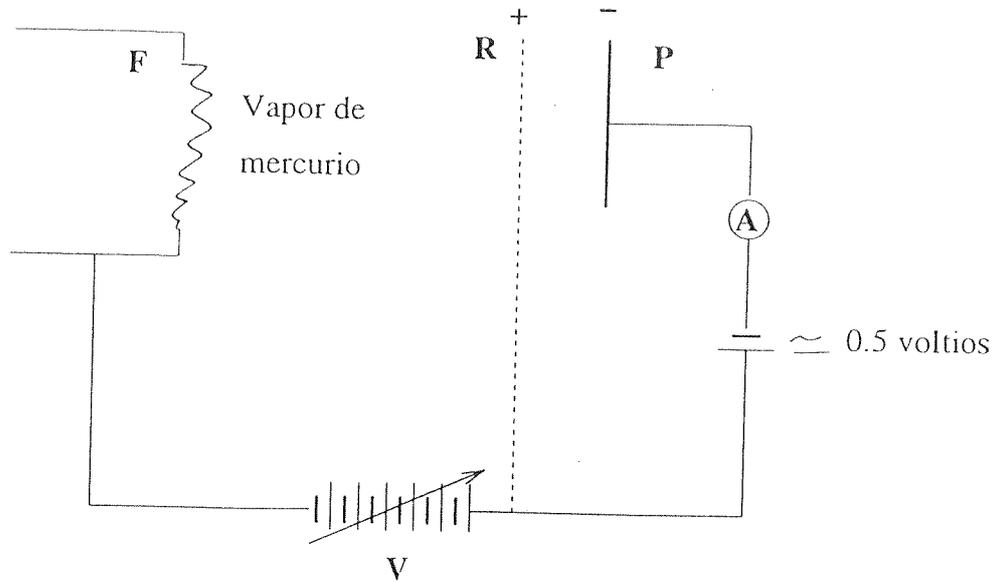


Figure 1: Esquema del montaje de FRANCK-HERTZ.

2. Horno Franck-Hertz.
3. Una fuente de alimentación (FA) de corriente continua que suministra tensiones de 12, 50 y 6.3 voltios.
4. Amplificador de corriente continua.
5. Voltímetro 5/15 V DC.
6. *Interface* COBRA.
7. PC y *Software* COBRA (4 canales).
8. Termómetro digital.
9. Termopar NiCr-Ni, 500 °C max.
10. Interruptor.
11. Diversos cables de conexión, incluyendo dos tipo BNC.
12. Hembrillas de conexión entre el amplificador y las salidas analógicas del COBRA.

La placa de conexión del tubo de Franck-Hertz se muestra en la figura 3, y está unida a la fuente de alimentación que genera las tensiones necesarias para la alimentación de la lámpara y la realización del experimento:

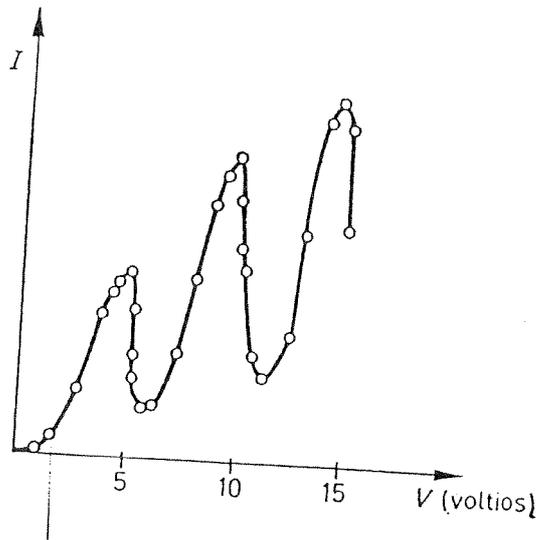


Figure 2: Intensidad en el amperimetro en función de V , en el experimento de FRANCK-HERTZ.

1. **Potencial de frenado**¹ en U_s : La tensión llevada al par de bornes 0...12V (desde la salida 0...12V de la FA) es reducida en la relación 4 : 1 por el divisor de tensión $10\text{ k}\Omega/3.3\text{ k}\Omega$, de modo que, aprovechando todo el intervalo de ajuste, en la FA, se puede variar U_s en el intervalo 0 – 3V. El valor del potencial de frenado se puede leer en la escala de la FA (dividiendo por 4) ó mediante un voltímetro conectado a los bornes U_s .
2. **Tensión anódica**² U_A : Para la representación de la curva de Franck-Hertz, se necesita una tensión anódica creciente con el tiempo. Esto se consigue cargando un condensador C ($2200\mu\text{F}$) a través de una resistencia R ($10\text{ k}\Omega$) mediante una tensión constante U_o (conectar 50 V, al par de bornes “max 60V” desde la salida 0...50V de la FA). Así se tiene, al abrir el circuito, que:

$$U_A(t) = U_o \left(1 - e^{-t/RC}\right) \quad (1)$$

La tensión anódica se puede medir en los bornes marcados con U_A . El condensador se descarga mediante un interruptor externo, a través de la resistencia interna de $100\ \Omega$.

3. **Tensión de calefacción** U_H : La calefacción catódica del tubo de Franck-Hertz tiene lugar directamente desde la salida 6.3V de la FA, sin pasar por el aparato previamente.

• MONTAJE Y REALIZACIÓN:

1. Realizar el montaje detallado en las figuras. 4 y 5.
2. Encender la FA.
3. Poner en funcionamiento el horno. Insertar el termopar NiCr-Ni, que está conectado al termómetro digital (situar éste en la posición 2), en el horno. Trás unos 20-25 minutos de funcionamiento a temperaturas de aproximadamente $165\text{ }^\circ\text{C}$, se habrá generado suficiente vapor de mercurio para la realización de la práctica. Utilizar el termostato para mantener constante la temperatura (alrededor de la posición 6). **Nunca superar** temperaturas de $220\text{ }^\circ\text{C}$. Por otra parte, para temperaturas inferiores a $150\text{ }^\circ\text{C}$ no se evapora suficiente vapor de mercurio como para poder realizar la práctica.
4. Encender el amplificador, utilizándolo en la función de electrómetro, y ajustar un factor de amplificación de 10^0 ó de 10^1 .

¹Potencial entre las placas R y P , en la figura 1.

²Potencial V en la figura 1.

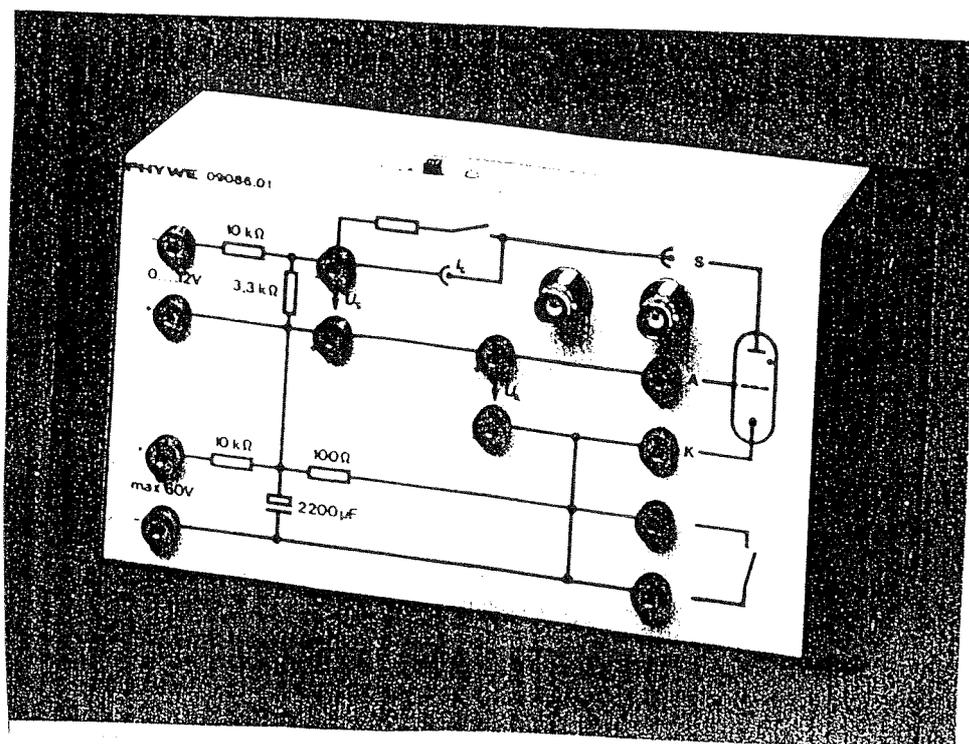


Figure 3: Fotografía de la placa de conexiones del tubo de Franck-Hertz y fuentes de alimentación.

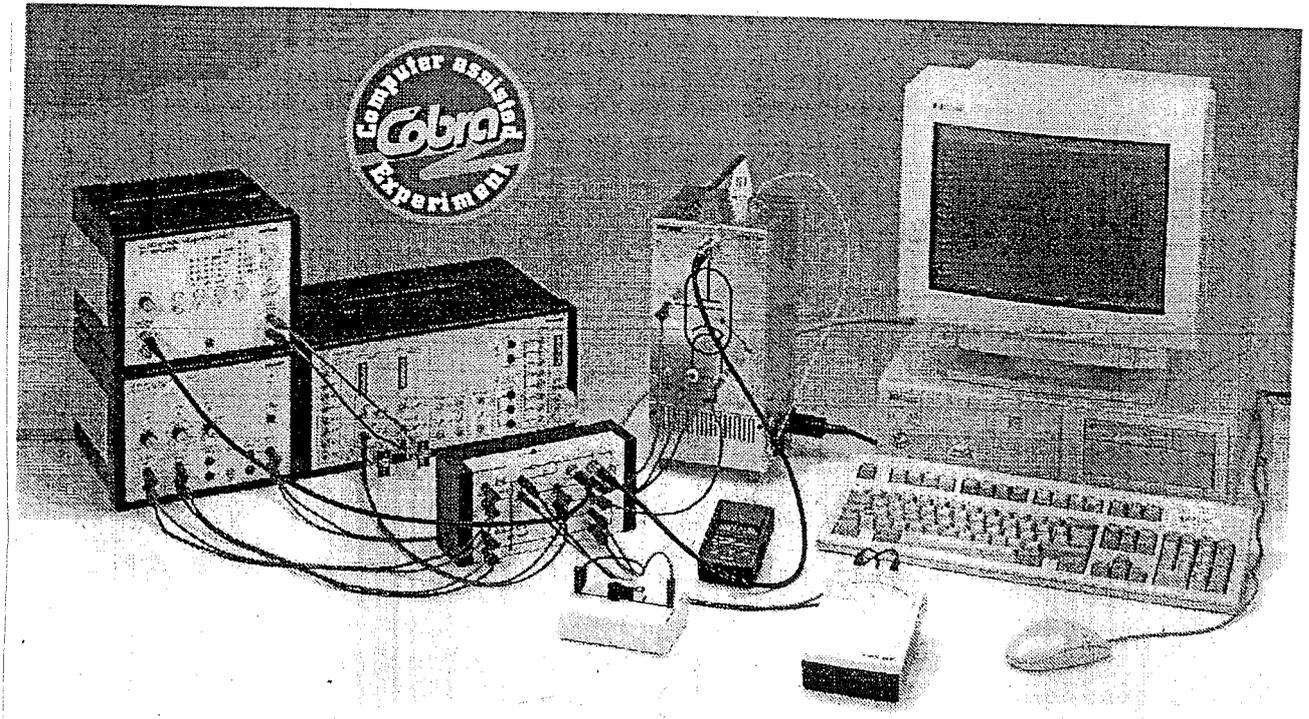


Figure 4: Fotografía del montaje experimental de la experiencia de Franck-Hertz.

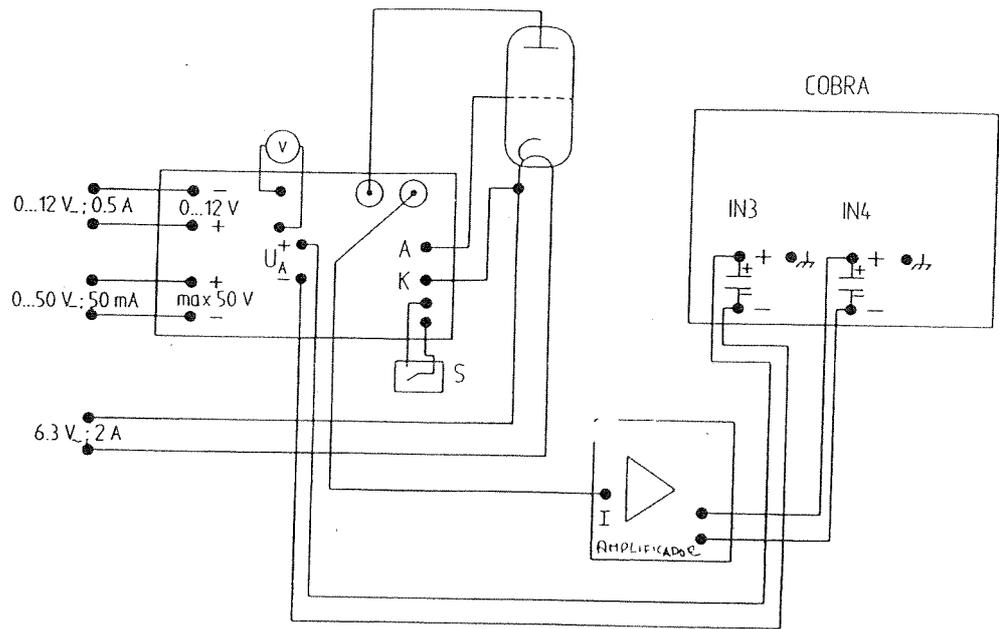


Figure 5: Detalle del circuito eléctrico utilizado en la experiencia.

5. Encender el *interface* COBRA. Encender el PC y preparar el *software* para una medición (ver detalles en el apéndice). Asegurarse que el COBRA está conectado al PC.
6. Suministrar 50 V al tubo Franck-Hertz, para proporcionar la tensión anódica.
7. Fijar la tensión de frenado a un valor de alrededor de 0.5V.
8. Abrir el interruptor *S* e inmediatamente después adquirir datos en el PC.

Mientras el interruptor *S* esté cerrado, el voltaje en el ánodo es de alrededor de 0.5 V, al abrir el interruptor la tensión aumenta de forma rápida con el tiempo (gracias al condensador, ver epígrafe dedicado al tubo de Franck-Hertz). Este potencial dependiente del tiempo se envía al *interface* cobra (IN3) y simultáneamente en la puerta IN4 se introduce, tras ser amplificada y convertida la señal inicial en una señal de tensión, la intensidad de electrones que inciden en *P* (Fig. 1) tras vencer el potencial de retardo. Así generamos, en el PC conectado al COBRA, una gráfica similar a la de la Fig. 2, que permite deducir la energía del primer estado excitado en el átomo de mercurio.

Precaución: *Una vez realizada la medida hay que volver a cerrar el circuito para que la tensión en el ánodo vuelva a 0.5V. En caso contrario puede presentarse un proceso de efluio en el cual una gran cantidad de átomos de Hg son ionizados dando lugar a un aumento brusco de la intensidad de corriente. Esto se visualiza comprobando que la lámpara emite una luz intensa de color azul. En caso de que este proceso ocurra para potenciales bajos, aumentad ligeramente la temperatura del horno.*

La experiencia puede realizarse para diferentes potenciales de retardo.

- **APÉNDICE: Software COBRA**

El citado *software* se encuentra instalado en el subdirectorio XYT del directorio COBRA. EL programa se ejecuta con el fichero **cobra.bat**. En la parte superior aparecen cuatro indicadores de paneles (a los cuales se puede acceder tecleando la letra subrayada): *fichero*, *parámetros*, *medición* y *tratamiento ulterior*.

Para realizar una toma de medidas:

1. **Seleccionar canales 3 y 4 del COBRA:** Para ello en el panel *parámetros* seleccionar el subpanel *canales*. En éste último seleccionar las opciones *libre*, *libre*, *XY-X* y *XY-Y* para los canales 1,2,3 y 4 respectivamente. De esta forma las entradas IN3 (potencial de aceleración variable) e IN4 (intensidad de electrones que inciden en P) del COBRA serán respectivamente los ejes X e Y de la gráfica.
2. **Ajustes de escalas:** En el panel *parámetros* seleccionar el subpanel *presentación*, seleccionar los canales 3 y 4. En el canal 3 utilizar la escala de 100 V, mientras que en el canal 4 seleccionar la escala de 100 mV. Dentro de las escalas elegidas, el rango de representación también puede ser seleccionado.
3. **Inicio de la medida:** Activar el panel *medición* y a continuación seguir las instrucciones suministradas por el programa.

Una vez realizada una medición, es posible cambiar escalas y rangos y volver a representar la gráfica utilizando el panel *tratamiento ulterior*. Así mismo es posible almacenar en un fichero los datos de la gráfica. Para ello activar el panel *fichero*, seleccionar el subpanel *memorizar* y seguir las instrucciones que da el programa (seleccionar el formato ASCII y la opción 1.XY). De esta forma se genera un fichero con tres columnas t(s) X Y que puede ser procesado en cualquiera de los ordenadores del laboratorio.

