

Experimentos rotativos - Guías

FÍSICA MODERNA



Departamento de Física

2022

Física Moderna
Guía de laboratorio Experimentos Rotativos

Revisión
Jose Ricardo Mejía
Nicolás Berrío Herrera



Universidad de los Andes
Bogotá, Colombia-2021

Índice

1. Carga específica (e/m) del electrón (Antiguo)	1
2. Interferometría	3
3. Doble Rendija	11
4. Relación carga-masa del electrón (Nuevo)	19
5. Fotoconductividad	25
6. Termogenerador - Efecto Seebeck	28
7. Histéresis magnética	31
8. Espectros atómicos A	34
9. Espectros atómicos B	42

Experimento 1

Carga específica (e/m) del electrón (Antiguo)

Objetivos

- * Estudiar la cinemática y dinámica de un electrón en el vacío.
- * Medir la proporción entre la masa y la carga del electrón.

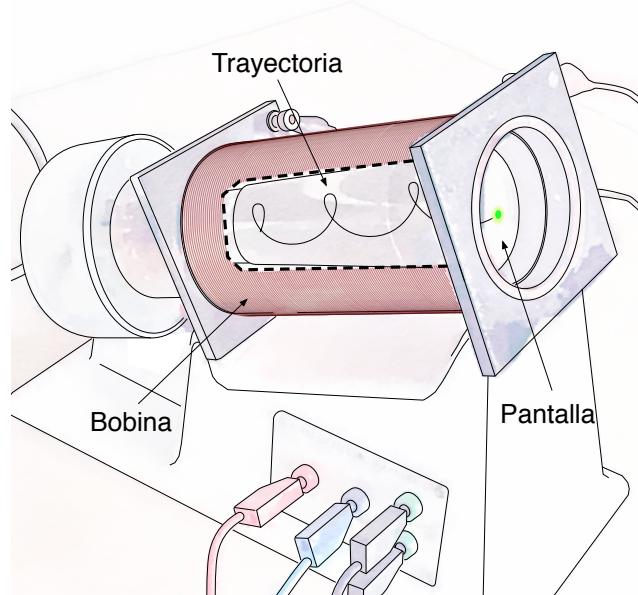


Figura 1.1

Equipo

- * Tubo de rayos catódicos con su fuente de voltaje.
- * Bobina con su fuente de corriente.

Este equipo no es análogo al que originalmente usó Thomson. Aquí disparamos electrones desde el cátodo hacia la pantalla del tubo, con un voltaje conocido. El tubo está inmerso en un campo magnético ajustable, paralelo al tubo. El campo es producido por un solenoide (NO por bobinas de Helmholtz). Un electrón puede llegar del cátodo hasta la pantalla moviéndose paralelamente al campo; pero la mayoría tiene también una pequeña velocidad transversal, de modo que se mueven por trayectorias helicoidales. Si esas hélices describen exactamente un número entero de vueltas antes de chocar con la pantalla, todos los electrones caerán en el mismo punto de ésta, observándose un punto brillante nítido. En cambio, si no se completa un número entero de vueltas, cada electrón alcanza la pantalla en un punto distinto, produciéndose una mancha difusa.

El segmento de tubo por donde viajan los electrones libres debe quedar completamente inmerso en la bobina.

Preparación

Relación entre la velocidad del electrón y el voltaje con que fue disparado. Campo magnético producido por un solenoide. Fuerza magnética sobre una carga puntual. Frecuencia de sincrotrón.

Demostrar que, para el montaje utilizado, el valor de e/m en términos de las cantidades observables es:

$$\frac{e}{m} = \frac{8\pi^2}{\mu_0^2} \frac{n^2}{N^2} \frac{L^2}{l^2} \frac{V}{I^2}, \quad (1.1)$$

donde los observables son: Voltaje (V), corriente (I), longitud del tubo (l , desde el ánodo hasta la pantalla), longitud de la bobina (L ; no es igual a la del tubo), número de vueltas de la bobina ($N = 570$ verificar este valor), y el número de vueltas de hélice descritas por los electrones (n). Se debe mostrar todos los detalles del cálculo.

Procedimiento

Fijamos varios valores del voltaje de disparo (entre 300 V y 600 V aprox; o entre el mínimo que produzca un rayo notable, y el máximo que entregue la fuente). Para cada valor del voltaje buscamos varios valores de la corriente (es decir, del campo magnético) que enfoquen nítidamente el rayo de electrones; así logramos que los electrones describan exactamente un número entero de vueltas de hélice antes de chocar con la pantalla. ¿Cuántas vueltas? Eso se puede inferir aumentando la corriente lentamente desde cero y recordando que $n = 0$ cuando $B = 0$. Cada vez registramos el número de vueltas descritas por los electrones.

Análisis

Se puede graficar los datos de varias maneras: V contra I^2 para cada n , también (si es posible) I contra n para cada V . De cada recta calculamos la pendiente. ¿Las rectas pasan por el origen? En caso contrario, ¿cuál puede ser la causa?

Mencionamos todas las posibles fuentes de incertidumbre: no sólo en voltaje y corriente sino también en las dimensiones del montaje.

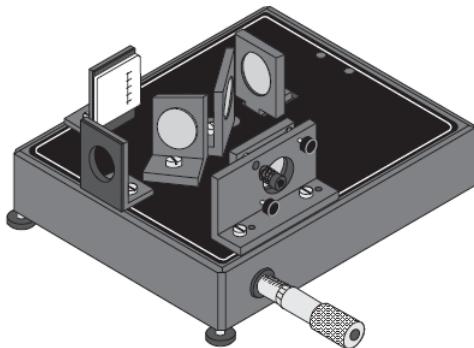
Experimento 2

Interferometría

El premio Nobel en física en el año 1907 se otorgó a Albert Abraham Michelson “*por sus instrumentos ópticos de precisión y por las investigaciones espectroscópicas y metrológicas llevadas a cabo con su ayuda*”.

Equipo

- * Base de aluminio de 5kg (Mesa óptica)
- * Espejo ajustable
- * Espejo móvil
- * Divisor de haz (Beam splitter)
- * Pantalla con escala
- * Lentes de 18mm y 48mm de distancia focal
- * Láser
- * Soporte para el láser
- * Soportes para elementos ópticos
- * Tornillos
- * Bomba de vacío con manómetro
- * Placa de vidrio
- * Puntero rotatorio
- * Polarizadores



Objetivos

- * Observar el fenómeno de interferencia con luz de un láser.
- * Medir experimentalmente la longitud de onda del láser.
- * Medir el índice de refracción del aire y del vidrio.

Conceptos Clave

Interferometría, Láser, Óptica, Lentes, Polarización, Camino Óptico, Refracción, Difracción, Interferómetro de Michelson-Morley, Interferómetro Twyman-Green, Interferómetro de Fabry-Perot.

Marco teórico

El famoso experimento de Michelson-Morley realizado inicialmente en 1881 (solo por Michelson) y repetido en 1887, utilizó la interferencia entre dos haces de luz coherente como principio para medir la velocidad de la luz en el *éter*. Por medio de un interferómetro (un arreglo óptico que permite medir interferencia entre dos o más ondas) lograron demostrar que la velocidad de la luz no cambia con la dirección en la que el sistema de referencia (en este caso la tierra) se mueva a través del espacio, invalidando la teoría del éter y sirviendo de inspiración para la formulación de la teoría de la relatividad especial por Albert Einstein.

El fenómeno de interferencia fue en principio estudiado por Thomas Young con su famoso experimento de doble rendija, el cual, siglos después se sigue usando como experimento para demostrar la controversial dualidad onda-partícula de la luz. Adicionalmente, el uso de interferómetros ha permitido realizar mediciones en innumerables áreas de la física donde se presenten fenómenos ondulatorios. El ejemplo más reciente es el de detección de ondas gravitacionales [1].

Dada la descripción de la luz como una onda electromagnética, esta obedece el principio de superposición, en el cual la intensidad del campo eléctrico \vec{E} resultante en un punto del espacio, será el cuadrado de la amplitud de la suma vectorial de las amplitudes de las ondas que se encuentren en dicho punto del espacio [5]. Explícitamente podemos escribir

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2, \quad (2.1)$$

donde cada campo estará dado por las expresiones

$$\vec{E}_1(\vec{r}_1, t) = \vec{E}_{1i} \cos\left(\vec{k}_1 \cdot \vec{r}_1 - \omega t + \phi_1\right), \quad (2.2)$$

$$\vec{E}_2(\vec{r}_2, t) = \vec{E}_{2i} \cos\left(\vec{k}_2 \cdot \vec{r}_2 - \omega t + \phi_2\right) \quad (2.3)$$

donde ω es la frecuencia angular, \vec{k} es el vector de onda y ϕ es el ángulo de fase. La intensidad será

$$I \propto \left\langle \left(\vec{E}_1 + \vec{E}_2 \right)^2 \right\rangle_t = \langle E_1^2 \rangle_t + \langle E_2^2 \rangle_t + 2\langle \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \rangle_t, \quad (2.4)$$

donde $\langle f(t) \rangle_t = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} f(t') dt'$ es un promedio temporal.

Ejercicio 1

1. Use la ecuación (2.4) suponiendo que las amplitudes iniciales \vec{E}_{1i} y \vec{E}_{2i} son iguales y que los haces de luz son paralelos para calcular la condición para interferencia constructiva $\rightarrow I_{max}$ y negativa $\rightarrow I_{min}$.
2. Use la relación entre la longitud de onda y la norma del vector de onda $|\vec{k}| = 2\pi/\lambda$ para determinar a qué ángulo de fase se obtiene interferencia constructiva y destructiva (suponga que la luz proviene de la misma fuente, por lo tanto tendrá la misma longitud de onda).

3. Investigue acerca de las condiciones sobre las ondas (coherencia, frecuencia, amplitud, etc) para que se pueda observar interferencia.

Interferómetro de Michelson

El interferómetro de Michelson pertenece al tipo de interferómetros donde la amplitud de la onda es dividida. Un esquema del interferómetro se observa en la Fig. 2.1. El interferómetro de Michelson consiste en un divisor de haz (beam splitter),

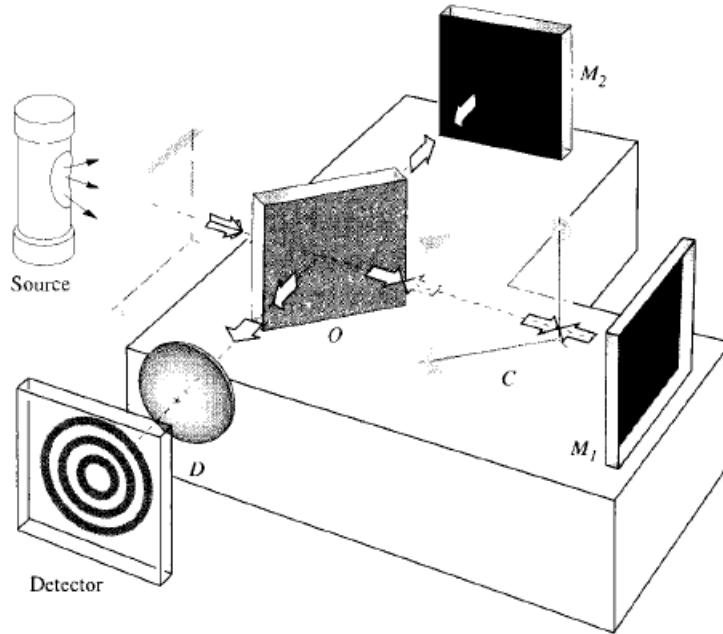


Figura 2.1: Interferómetro de Michelson. Tomada de [5].

dos espejos, una fuente de luz y un detector. Cuando la luz de la fuente se hace incidir sobre el divisor de haz, el 50 % de la luz se transmite y el otro 50 % se refleja de forma especular dirigiéndose a los dos espejos M_1 y M_2 respectivamente. Cuando la luz reflejada por los espejos se dirige al divisor de haz, ocurre el mismo fenómeno: el 50 % de la luz se refleja y el 50 % logra pasar. La luz que viene del espejo M_2 y logra pasar el divisor de haz, y la luz que viene del espejo M_1 y se refleja en el divisor de haz se encuentran y producen un patrón de interferencia. El haz de luz resultante luego pasa por un lente para originar el patrón circular de interferencia. Ya que la luz viene de la misma fuente, los dos haces de luz que hacen interferencia son coherentes $\phi_1 - \phi_2 = 0$ por lo que la interferencia se dará por la diferencia de camino (en longitud) de cada haz. Cambiando la posición de uno de los espejos con respecto al punto O en la Fig. 2.1 se puede cambiar el patrón de interferencia, específicamente la posición sobre el detector de máximos y mínimos.

Ejercicio 2

- Si uno de los espejos se mueve, ¿cuánto cambia el camino óptico del haz que se refleja sobre dicho espejo?
- ¿Cómo puede relacionar el cambio en el camino óptico calculado en el punto anterior con la ocurrencia de un máximo o un mínimo? Use los resultados del Ejercicio 1. A partir de estos resultados obtenga la ecuación

$$\lambda = \frac{2d_N}{N}, \quad (2.5)$$

donde d_N es la distancia que se movió el espejo tal que sobre un punto fijo en el detector ocurrieron N mínimos (durante el movimiento del espejo desde su posición inicial hasta la distancia d_N) y λ es la longitud de onda del haz de luz.

3. Investigue sobre el interferómetro de Fabry-Perot y realice una breve explicación de su funcionamiento.

Montaje y Experimento

Para realizar mediciones de interferometría con el láser, es necesario realizar una alineación de este con la mesa óptica donde se colocarán los elemento ópticos (espejos, divisor de haz). Esta alineación se debe hacer una vez por sesión o en el caso en el que modifique la posición del láser durante el curso de un experimento.

Alineación

Para realizar la alineación primero ubique la mesa óptica en una posición tal que pueda mover sin dificultad el micrómetro incorporado en esta.

Nota: Recomendación: Si el micrómetro queda apuntando hacia la derecha, deje un espacio libre a la izquierda entre la mesa óptica y una pantalla (que puede ser una pared) para poder realizar mediciones con mayor facilidad.

Coloque el espejo móvil¹ en la mesa óptica y apunte el láser para que incida de forma perpendicular a este. Coloque el láser sobre su base ajustable procurando que el haz sea paralelo a la superficie de la mesa óptica y este incida en el centro del espejo móvil. Para asegurarse que la dirección del haz de luz es paralelo a la superficie de la mesa óptica, monitoree la luz con un trozo de papel milimetrado y verifique que el haz impacta siempre a la misma altura sobre el papel milimetrado a lo largo de su camino. Ajuste la posición del láser (moviendo la base o el láser) tal que el haz reflejado del espejo incida sobre la apertura del láser.

⚠️Advertencia: Precaución: Para realizar este último paso en la alineación del láser, mire la apertura del láser desde una altura significativa, no coloque sus ojos a la misma altura que el haz.

Cuando realice la alineación, procure no cambiar la posición del láser para obtener mejores resultados.

Interferómetro de Michelson

Con el láser alineado a la mesa óptica, monte el espejo móvil y el espejo ajustable. Adicionalmente monte el divisor de haz a un ángulo de 45° con respecto al haz incidente, ajuste este ángulo para asegurarse que el haz reflejado impacte al espejo ajustable. En la pantalla debería observar dos conjuntos de puntos brillantes (cada uno acompañado de puntos menos brillantes a sus costados²), uno de estos proviene del espejo móvil y el otro del espejo ajustable. Ajuste el ángulo del divisor de haz tal que los dos conjuntos de puntos brillantes se junten. Cuando asegure el divisor de haz a la mesa óptica, puede hacer un ajuste más fino con los tornillos presentes en el espejo ajustable con el fin de juntar los conjuntos de puntos brillantes aún más. Realice este ajuste hasta que los puntos brillantes se superpongan, esto asegura que se tendrá interferencia entre los dos haces. Finalmente, monte el lente con distancia focal de 18mm a la salida del láser como se muestra en la Fig. 2.2³.

Debería observar en la pantalla un patrón de interferencia circular aproximadamente simétrico como el que se muestra en la Fig. 2.3 (si no es simétrico por lo menos debería ver un patrón de interferencia típico: máximos y mínimos de intensidad). Mueva el micrómetro que controla la posición del espejo móvil y verifique que los máximos y mínimos

¹Procure no tocar la superficie de ningún espejo. Si se encuentran sucias debería limpiarlas con un paño especial para elementos ópticos.

²Esto se debe a múltiples reflexiones

³El compensador que se muestra en la Figura 2.2 no es necesario cuando se trabaja con el láser

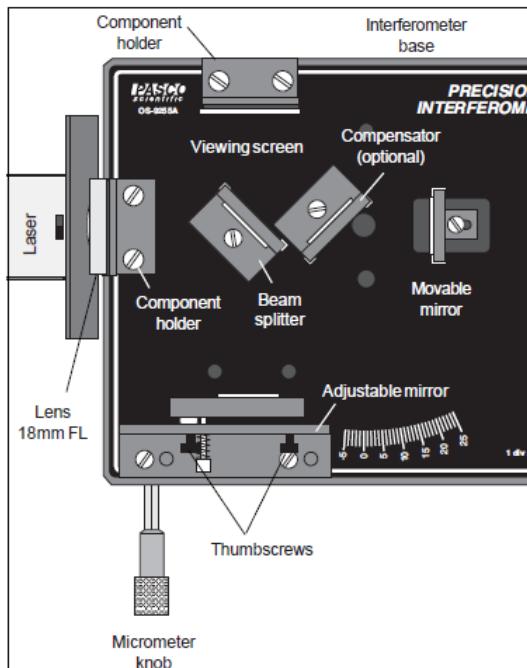


Figura 2.2: Interferómetro de Michelson

cambien de posición simultáneamente. A este proceso lo denominaremos de ahora en adelante *montar la configuración de Michelson*. Ahora está listo para realizar mediciones.

Nota: El micrómetro: tenga en cuenta que una revolución completa del micrómetro genera un movimiento en el espejo móvil de $25\mu\text{m}$, con una incertidumbre de $\pm 1\%$

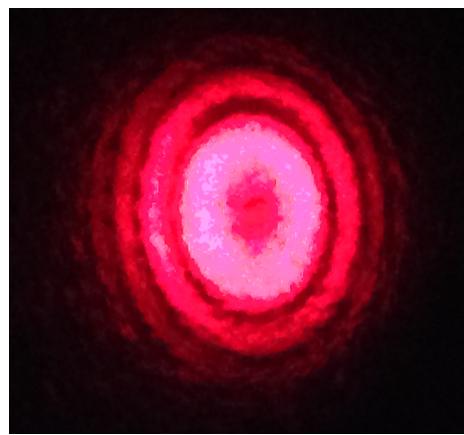


Figura 2.3: Fotografía del patrón de interferencia

Actividad 1

En este ejercicio medirá la longitud de onda del láser usando la ecuación (2.5).

1. Con el interferómetro montado en la configuración de Michelson, marque un punto fijo en la pantalla sobre un mínimo.

Gire lentamente el micrómetro hasta que vea que el patrón de interferencia empieza a *movearse*. Registre la distancia recorrida por el espejo móvil y el número de mínimos (al menos 20) que pasaron por el punto fijo en su pantalla.

Nota: Recomendación: debido a efectos de histéresis del micrómetro, es recomendable realizar una revolución completa girando el micrómetro lentamente y luego comenzar las mediciones, disminuyendo aún más la rapidez de giro. También es recomendable que se ubique inicialmente a una distancia de $50\mu m$ como lo indican las barras fijas (que no rotan) sobre el micrómetro. Adicionalmente, realice siempre giros en la misma dirección.

2. Con los valores medidos en el numeral anterior y usando la ecuación (2.5) obtenga la longitud promedio del láser y su desviación estándar. Compárela con el valor reportado por el fabricante de $632.8nm$.
3. Realice una gráfica para los diferentes valores de d_N y N . ¿Es una gráfica lineal? Si es así, calcule la longitud de onda por medio de una regresión lineal. Si no es lineal, ¿Qué podría decir acerca de la relación entre el giro en el micrómetro y el desplazamiento en el espejo móvil?
4. Si la longitud de onda fuera conocida con suficiente precisión, se podría medir la separación de caminos de los haces, y por lo tanto la distancia entre los espejos y el divisor de haz (debido a una perturbación por ejemplo) observando el desplazamiento del patrón de interferencia en la pared. ¿Cuál sería menor distancia d_N que podría medir con la configuración que tiene del aparato? Mencione algunas aplicaciones (físicas) en las que sería útil medir cómo cambia la distancia entre los espejos y el divisor de haz.

Además de poder calcular la longitud de onda, el interferómetro de Michelson permite calcular aproximadamente el índice de refracción de un material si una pequeña porción de este se coloca en el camino de uno de los haces. En este caso el cambio en la diferencia de camino entre los haces, ocurre debido a que la luz desvía su trayectoria recorriendo una mayor (o menor) distancia en el material. En los siguientes ejercicios se indicará el procedimiento para calcular el índice de refracción del vidrio y del aire.

Actividad 2

Con el interferómetro montado en la configuración de Michelson, debe realizar algunos cambios en el montaje. Primero acople el puntero rotatorio con un soporte y coloque sobre él la placa de vidrio. Coloque el puntero entre el divisor de haz y el espejo móvil. Puede usar la Fig. 2.4 como guía. Para realizar un ajuste más fino, coloque el puntero en 0° y remueva el lente de 18mm que se encuentra al frente del láser. Si coloca la pantalla entre la placa de vidrio y el espejo móvil y observa más de un punto brillante, puede girar el soporte (sobre el puntero rotatorio) y ajustarlo hasta que observe un solo punto. Este procedimiento asegura que la placa de vidrio sea perpendicular al camino óptico. Al volver a colocar el lente de 18mm debería observar un patrón de interferencia circular como el que se muestra en la Fig. 2.3. Este patrón debería cambiar a medida que mueve el puntero a un ángulo diferente.

1. En la pantalla donde observe el patrón de interferencia, y con el puntero en 0° realice una marca en un mínimo. Cuente el número de mínimos que pasan por la marca a medida que el ángulo cambia.
2. Para calcular el índice de refracción, se debe analizar el cambio en la longitud de cada camino de acuerdo a la fracción de haz que pasa por el aire y por el vidrio en función del ángulo θ . En general, calcular esta diferencia de camino es un proceso complicado así que se usará la formula reportada en la literatura [4, 8, 9]:

$$n_{\text{Vidrio}} = \frac{(2t - N\lambda)(1 - \cos \theta) + \frac{N^2\lambda^2}{4t}}{2t(1 - \cos \theta) - N\lambda}, \quad (2.6)$$

donde t es el espesor de la placa de vidrio, λ la longitud de onda del láser, N el número de mínimos que se registran cuando ocurre un desplazamiento angular θ . Por lo general el término $N^2\lambda^2/4t$ es despreciable. Con los datos tomados en el numeral anterior, calcule el índice de refracción del vidrio y compárela con el valor reportado en la literatura.

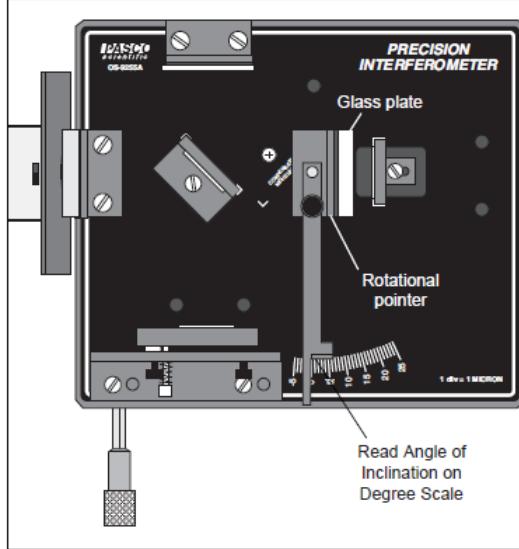


Figura 2.4: Montaje para medir el índice de refracción del vidrio.

Actividad 3

Con el interferómetro montado en la configuración de Michelson debe realizar algunos cambios para medir el índice de refracción del aire. Coloque el puntero rotatorio entre el espejo móvil y el divisor de haz. Acople la cámara de vacío y ajuste el espejo ajustable tal que observe el patrón de interferencia como en la Fig. 2.3⁴. Para mejorar las mediciones, asegúrese que la cámara de vacío sea perpendicular al camino óptico (vea la Actividad 2.2).

El índice de refracción para los gases aumenta linealmente con la presión P de acuerdo a la expresión

$$n - 1 = P \frac{dn}{dP}. \quad (2.7)$$

Ahora, el cambio de fase cuando una onda atraviesa una distancia x en un medio será

$$\delta\phi = \frac{2\pi x}{\lambda}, \quad (2.8)$$

en donde $\lambda = \lambda_0/n$ es la longitud de onda en el medio y λ_0 la longitud de onda en el vacío. Ya que en el camino óptico el haz recorre una distancia de $2t$ por el medio (con t el espesor de la cámara de vacío). Por lo tanto la diferencia de fase será

$$\delta\phi = \frac{4\pi n t}{\lambda_0}. \quad (2.9)$$

Si se cambia la presión al interior de la cámara, el índice de refracción cambiará y por lo tanto la diferencia de fase será diferente, ocasionando un patrón de interferencia diferente. Si se mide el cambio en la diferencia de fase $\delta\phi_f - \delta\phi_i$ a medida que se saca el gas de la cámara y el patrón de difracción cambia (donde se usa N como el número de veces que un mínimo cruza un punto fijo en la pantalla) se obtiene la relación

$$\frac{4\pi\Delta nt}{\lambda_0} = 2\pi N, \quad (2.10)$$

con Δn el cambio neto en el índice de refracción. Así que aproximadamente se obtiene la siguiente relación

$$\frac{dn}{dP} \approx \frac{\Delta n}{\Delta P} = \frac{N\lambda_0}{2t\Delta P}. \quad (2.11)$$

⁴Puede que quede un poco distorsionado debido a imperfecciones en la cámara de vacío. Sin embargo esto no será un problema para la toma de datos.

- Usando la bomba para sacar el aire y medir la presión inicial y final registre el valor de N , P_i y P_f . Con el valor conocido de $\lambda_0 \approx 633nm$, use la ecuación (2.11) para calcular la pendiente de la relación entre n y P .
- Realice una gráfica de n vs P y estime el índice de refracción del aire para una presión de 1Atm. Compare su valor (la parte decimal, sin el 1) con lo que se reporta en la literatura. Tenga en cuenta que la temperatura y condiciones de humedad pueden ser diferentes. Debe obtener resultados similares a los que se ven en la Fig. 2.5

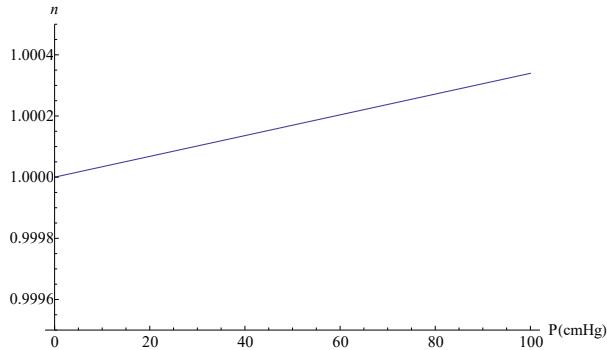


Figura 2.5: Índice de refracción del aire en función de la presión. $n_{1Atm} = 1.0001943$.

Preguntas al acabar el procedimiento

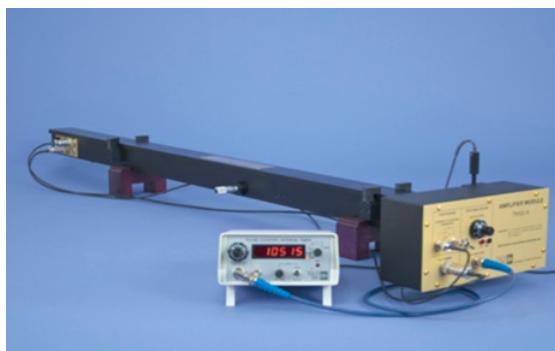
- ¿En qué magnitud cree que afectan las siguientes variables en el experimento? -
 - * Aberraciones en los espejos $M1$ y $M2$
 - * Propagación de la luz por un medio (aire) y no en el vacío
 - * No uniformidad de la temperatura del medio en el que se propaga la luz.
 - * Rotación de la tierra (Ver efecto Sagnac)
 - * Polarización de la fuente y el uso de polarizadores tal que los haces queden con polarizaciones perpendiculares
- ¿Cómo podría (si es posible) minimizar los efectos de las variables mencionadas en el punto anterior?

Experimento 3

Doble Rendija

Equipo

- * Interferómetro de doble rendija de *TeachSpin*
- * Multímetro
- * Cables
- * Conectores BNC
- * Tarjetas en forma de T



Objetivos

- * Realizar un experimento de doble rendija observando el patrón de interferencia
- * Medir el patrón de interferencia de doble rendija y rendija sencilla con ayuda de un fotodiodo.
- * Comparar los resultados de la medición del patrón de interferencia con el modelo teórico de Fraunhofer.

Conceptos Clave

Dualidad onda-partícula, Laser, Doble rendija/ Experimento de Young, Patrón de difracción, Teoría de difracción de Fresnel, Teoría de difracción de Fraunhofer, Fotodiodo, Fotomultiplicador.

Marco teórico

En la mecánica cuántica existe el concepto de dualidad onda-partícula, en el cual fotones y demás partículas elementales exhiben un comportamiento de onda o partícula según el tipo de experimento que se realice sobre ellas. En este experimento nos concentraremos en el caso de los fotones. Históricamente fue Thomas Young quien realizó el primer experimento de doble rendija en donde observó el fenómeno de interferencia en el año 1803. De los experimentos de Young se puede inferir que la luz tiene comportamiento de onda, lo cual, con las teorías de Huygens, Fresnel y Maxwell se ratificaba a finales del siglo XIX. Sin embargo, con el descubrimiento del efecto fotoeléctrico y el efecto Compton, la descripción de luz en términos de cuántos de luz, conocidos como fotones, dio lugar a discusiones acerca de la naturaleza corpuscular de la luz, como lo sugería Sir Isaac Newton. Tras el desarrollo de la teoría cuántica por parte de Dirac, Heisenberg y Pauli y experimentos con difracción de electrones como los de Davison y Thomson, la idea de que las partículas elementales e incluso átomos y moléculas exhiben un comportamiento de onda y partícula fue ampliamente acogida por la comunidad científica. En la actualidad, la Electrodinámica cuántica unifica esta dualidad ya que describe la luz por medio de campos cuánticos con propiedades de onda y de partícula. Las contribuciones de Feynman, Schwinger y Tomonaga fueron galardonadas con un premio Nobel en 1965 [12]. En este experimento veremos las propiedades de onda de la luz al hacerla pasar por una doble rendija y observando el patrón de difracción que ésta produce.

Ejercicio 1

1. Considere el siguiente arreglo de doble rendija con separación entre rendijas d , distancia entre rendija y pantalla $L \gg d$ y concentrémonos a una distancia y (sobre la pantalla) del eje de simetría la cual se relaciona con el ángulo θ de acuerdo a la fórmula $\tan \theta = y/L$.

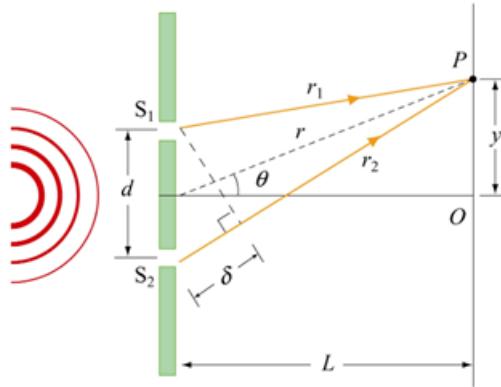


Figura 3.1: Arreglo de doble rendija. Tomado de [11]

Con ayuda de la Fig.3.1 y usando la ley de cosenos calcule las distancias r_1, r_2 en términos de d, θ, r . Realice la resta $r_2^2 - r_1^2 = (r_2 - r_1)(r_2 + r_1)$ y aproxime $r_1 \approx r_2 \approx r$. Adicionalmente, la diferencia de caminos δ se puede escribir aproximadamente como $\delta \approx r_2 - r_1$. Llegue a la relación $\delta \approx dy/L$.

2. Para calcular la intensidad en el punto P, tenga en cuenta que ésta será proporcional a la norma del campo eléctrico que llegue desde la rendija 1 y la rendija 2

$$I \propto (\vec{E}_1 + \vec{E}_2)^2 = E_1^2 + E_2^2 + 2\vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2. \quad (3.1)$$

El término $\vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2$ es el que origina el patrón de interferencia. Para luz no coherente este término se anula, sin embargo, ya que trabajaremos con un láser debemos tenerlo en cuenta. ¿Qué condición se requiere para tener interferencia constructiva/destructiva? Compare la intensidad en la que se tiene interferencia constructiva con aquella que se tendría por una sola rendija.

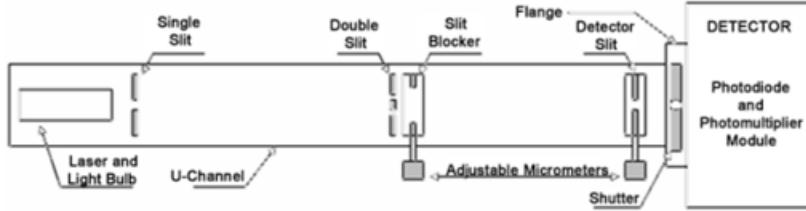


Figura 3.2: Esquema del interferómetro. Tomada de [2].

3. Ahora suponga que las ondas que salen de la doble rendija, son ondas planas las cuales podemos escribir como

$$E_1 = E_0 \sin(\omega t), \quad (3.2)$$

$$E_2 = E_0 \sin(\omega t + \phi), \quad (3.3)$$

Donde ϕ es el desfase entre las dos ondas. Para tener interferencia constructiva, la diferencia de camino δ del punto 1) debe ser un múltiplo entero de la longitud de onda. ¿Qué condición debe cumplir ϕ para que se tenga interferencia constructiva? Basado en este resultado llegue a la expresión

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta. \quad (3.4)$$

4. Suponiendo que el campo eléctrico asociado a las rejillas va en la misma dirección, el campo total será $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$ y la intensidad será proporcional al promedio temporal del cuadrado del campo eléctrico $I \propto \langle E^2 \rangle_t$. Obtenga la expresión

$$I = I_0 \cos^2 \left(\frac{\pi}{\lambda} d \sin \theta \right), \quad (3.5)$$

donde I_0 es la intensidad en el máximo (un valor que usted debe ajustar de acuerdo a los datos que va a tomar).

5. En este procedimiento no se tuvo en cuenta que las rendijas tienen un ancho que llamaremos a . Para tener en cuenta este efecto, realice un procedimiento similar teniendo en cuenta el principio de Huygens. Muestre que la intensidad para la difracción para una sola rendija es

$$I = I_0 \left(\frac{\sin \left(\frac{\pi a}{\lambda} \sin \theta \right)}{\frac{\pi a}{\lambda} \sin \theta} \right)^2. \quad (3.6)$$

El resultado teórico para el experimento de doble rendija será la multiplicación de las ecuaciones (3.5) y (3.6) [11].

6. Investigue cómo funciona el detector de fotodiodo.

Montaje y Experimento

El interferómetro que se usará en este experimento tiene incluido la fuente de luz, el canal donde ocurre la dispersión y difracción y los detectores (ver Fig. 3.2). Este aparato, junto con un multímetro y un contador de frecuencias serán suficientes para medir el patrón de interferencia en dos configuraciones diferentes. En la primera configuración se usará el láser como fuente de luz y el fotodiodo como detector, observando así la naturaleza ondulatoria de la luz. En la segunda configuración se usará un bombillo con un filtro verde como fuente de luz y el tubo fotomultiplicador como detector, observando la naturaleza corpuscular de la luz.

Nota: Precaución: Asegúrese, antes de remover la tapa superior que el obturador que se encuentra en la parte superior del módulo de detección se encuentre completamente cerrado (empújelo hacia abajo). Esto con el fin de proteger el tubo fotomultiplicador ya que es un elemento muy sensible; incluso la luz de una habitación con poca iluminación es suficiente para dañarlo. El obturador lo puede halar hacia arriba solo cuando se asegure que la tapa se encuentre cubriendo la caja y no haya filtraciones de luz al interior del montaje.

Antes de hacer cualquier conexión familiarícese con los elementos que componen el interferómetro. Con el interferómetro orientado tal que el módulo de detección quede en el extremo derecho usted encontrará los siguientes elementos de izquierda a derecha (después de remover la tapa superior): un bombillo con un filtro verde removible, un láser de 670nm y 1mW, un soporte para la rendija colimadora, un soporte para la doble rendija, un soporte para la rendija bloqueadora acoplado a un micrómetro, un soporte para la rendija detectora acoplado a un micrómetro y el módulo de detección.

Este módulo de detección (ver Fig.3.3) cuenta con dos detectores y un obturador para escoger con cuál se medirá. Cuando el obturador se encuentre cerrado (el cilindro completamente abajo) se medirá con el fotodiodo. Cuando el obturador esté abierto (el cilindro arriba) el tubo fotomultiplicador registrará los fotones que lleguen a él.



Figura 3.3: Módulo de detección.

Nota: Precaución: Antes de conectar cualquier cable, asegúrese de que el módulo de alto voltaje se encuentre apagado y la perilla marque cero.

Por último, note que el módulo de detección se encuentra conectado al módulo fuente para la alimentación de poder y la alarma, la cual se activará si el tubo fotomultiplicador está en riesgo de dañarse. El modulo fuente es aquel que se muestra en la Fig.3.4.



Figura 3.4: Módulo fuente.

En el módulo fuente se encuentra un interruptor para cambiar la fuente lumínica a láser, bombillo o ninguna. Además, cuenta con una perilla la cual controla la intensidad del bombillo y la entrada DC del interferómetro.

Alineación

Antes de realizar cualquier medición es necesario alinear el sistema. Para hacerlo primero identifique las diferentes rendijas que vienen con el sistema: debería tener tres rendijas dobles marcadas con los números 14,16, y 18, las cuales corresponden a separación entre centro de las rendijas de 0.356mm,0.406mm y 0.457mm. Adicionalmente debería tener rendijas sencillas y una rendija sencilla más ancha; las rendijas sencillas se usarán en la fuente y detección mientras que la rendija ancha la usará para el bloqueo de luz.

Después de asegurarse que el alto voltaje esté apagado y el obturador del detector está cerrado, conecte el equipo a la fuente de poder y retire la cobertura de aluminio del interferómetro. Realice la alineación del láser manualmente y si es necesario use el tornillo justo debajo del láser para cambiar la dirección de propagación de este. La alineación debe ser tal que la luz del láser llegue con mayor intensidad a donde se encuentra el detector.

Nota: Precaución: No deje que la luz del láser sea reflejada en algún objeto y llegue a sus ojos. Para seguir la luz del láser puede usar las tarjetas blancas en forma de T incluidas con el montaje. Para una mejor alineación, reduzca la intensidad de la luz de la habitación donde se encuentre trabajando.

Ahora agregue las rendijas en el siguiente orden:

- * Coloque la rendija simple en el espacio para la rendija detectora tal que quede orientada de forma vertical.
- * Ubique la rendija bloqueadora (la rendija ancha) y ajuste el micrómetro acoplado a esta en la mitad de su rango (aproximadamente 5mm). Verifique que se obtiene una banda rectangular de luz que llega al detector. Asegúrese que la rendija quede vertical.
- * Coloque la doble rendija de forma vertical. Usando una tarjeta T justo después de la rendija bloqueadora, asegúrese de que ve la luz que pasa por las dos rendijas de forma individual (dos líneas verticales). Si no observa esto, mueva el micrómetro de la rendija bloqueadora.
- * Sitúe la rendija sencilla en el lugar para la rendija colimadora de forma vertical. Puede moverla de forma horizontal para asegurarse que la luz del láser pase por esta y que además llega con mayor intensidad a la doble rendija. Use las

tarjetas T para verificar esto.

- * Finalmente, mueva la rendija bloqueadora con el micrómetro y observe (con ayuda de una tarjeta T justo después de la rendija bloqueadora) la transición entre doble rendija y una sola rendija. Esta transición debe ocurrir lo más rápido posible (mientras se gira el micrómetro), indicando que la doble rendija y la rendija bloqueadora están alineadas. Si este no es el caso, rote ligeramente la rendija bloqueadora y llegue a una alineación óptima.
- * Verifique que usando la rendija bloqueadora puede hacer que la luz pase por alguna de las dos rendijas, las dos rendijas o que no pase luz en absoluto.

Actividad 1

1. Describa el patrón que observa usando una tarjeta T cerca de la rendija detectora en los siguientes casos:

- * La luz pasa por las dos rendijas.
- * La luz pasa por una sola rendija.
- * La luz no pasa por ninguna rendija.

Describa la transición entre una y dos rendijas. ¿Qué sucede con los máximos y mínimos de intensidad? Explique con argumentos físicos lo que sucede. Compare el patrón de interferencia que usted ve con los que se predice teóricamente en los ejercicios 1 y 2.

2. Para realizar mediciones con los micrómetros tenga en cuenta que una vuelta completa de estos corresponde a 0.5mm. Las líneas en el tubo fijo del micrómetro indicando 0mm, 5mm y 10mm le ayudarán a llevar la cuenta del desplazamiento total de este.

Registre los rangos de valores en el micrómetro donde se tiene luz por las dos rendijas, luz por la rendija derecha, luz por la rendija izquierda y la rendija bloqueadora obstruyendo totalmente el haz del láser. Esto le será útil cuando cuando esté operando el interferómetro con la cubierta.

Medición del patrón de interferencia con el láser

En esta configuración la luz que llegará al detector será solo aquella que pase por la rendija detectora. Por lo tanto se podrá analizar una sección particular del patrón de difracción. Moviendo la rendija detectora con ayuda del micrómetro acoplado a esta se podrá medir cuantitativamente el patrón de difracción que usted observó durante la alineación del interferómetro.

Primero coloque la cubierta y ajuste la rendija bloqueadora tal que la luz cruce por las dos rendijas. Active la luz del láser. Alimente el módulo de detección y conecte la alarma desde el módulo fuente. En este parte del experimento se utilizará un fotodiodo como detector; la señal del fotodiodo se transmitirá por el cable que está conectado al obturador. Conecte este cable a la entrada del módulo etiquetado como *Photodiode* y en la salida conecte un multímetro. El voltaje que registra el multímetro es lineal con respecto a la intensidad de luz, por lo tanto midiendo variaciones en este voltaje se podrá medir el patrón de difracción.

El multímetro debería registrar un voltaje del orden de 1V. Si el voltaje que registra es mucho menor, mueva la rendija detectora y encuentre un máximo de voltaje. Para verificar que sí esté midiendo la luz del láser, puede apagarlo y ver si el voltaje cae a cero. Aproveche este momento para anotar el *offset* el cual debería estar en el orden de 10mV. Si registra un valor mayor, es posible que haya una filtración de luz en el aparato.

Nota: Sugerencia: Si el voltaje en el máximo que usted registra es inferior a 1V, debería revisar y mejorar su alineación o verificar la posición de su rendija bloqueadora.

Actividad 2

- Con la rendija bloqueadora ubicada tal que la luz pase por las dos rendijas encuentre el máximo con la rendija detectora. Registre el voltaje y ahora cambie la rendija bloqueadora para permitir que solo pase luz por una de las rendijas. Observará que la intensidad disminuye. ¿En qué factor disminuye? Justifique su respuesta físicamente. (Ver Ejercicio 1.2).
- Registre el patrón de difracción para la doble rendija, la rendija derecha y la rendija izquierda. Grafique y discuta sus resultados. (No olvide corregir sus datos por los valores de *offset* registrados). Realice un ajuste con los esperado usando la teoría del ejercicio 1. Use $a=0.1\text{mm}$.

Nota: Recomendación: Los micrómetros tienen una curva de histéresis asociada que es significativa. Procure siempre hacer las mediciones en la misma dirección de giro. Los mejores resultados se obtienen cuando se va de 10mm a 0mm y se recomienda un barrido con intervalos de 0.1mm-0.2mm.

- ¿Cómo podría calcular la longitud de onda del láser a partir de los resultados de doble rendija? Calcúlela y compárela con el valor reportado por el fabricante de $670 \pm 5\text{nm}$.
- Argumente cómo esta parte del experimento lo lleva a evidenciar la naturaleza ondulatoria de la luz.
- Realice un ajuste a sus datos de doble rendija y de 1 rendija de acuerdo a las expresiones dadas en el marco teórico. De su modelo responda:
 - * ¿La intensidad de los picos se ajusta bien? Intente cambiando el parámetro I_0 o la envolvente cambiando el ancho de cada rendija a .
 - * ¿Predice correctamente la ubicación del máximo central?
 - * ¿Predice correctamente la ubicación de los máximos y mínimos? Cambie el valor de d .
 - * ¿El modelo incluye los efectos de una distribución de valores de longitud de onda? ¿Cómo lo haría?
 - * ¿El modelo incluye el efecto de los anchos de la fuente y las ranuras del detector? ¿Cómo lo haría?
 - * ¿Qué puede decir sobre las deficiencias del modelo de Fraunhofer?

Un ejemplo de las gráficas que puede obtener durante esta sección se puede ver en las Fig. 3.5 y 3.6

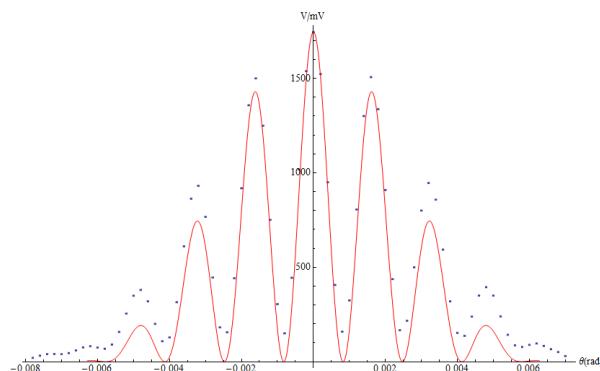


Figura 3.5: Intensidad de voltaje vs ángulo θ en doble rendija. Los puntos corresponden a las mediciones y la linea roja es el ajuste usando la teoría de Fraunhofer.

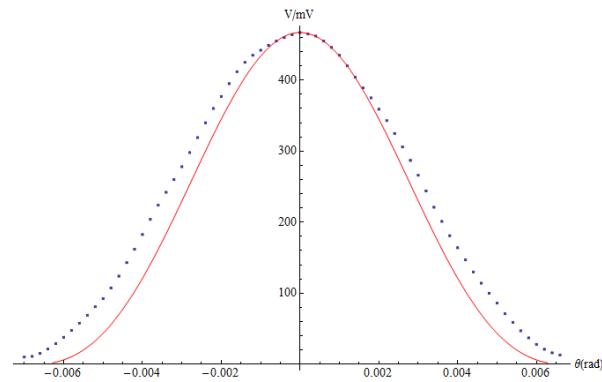


Figura 3.6: Intensidad de voltaje vs ángulo θ para una rendija. Los puntos corresponden a las mediciones y la linea roja es el ajuste usando la teoría de Fraunhofer.

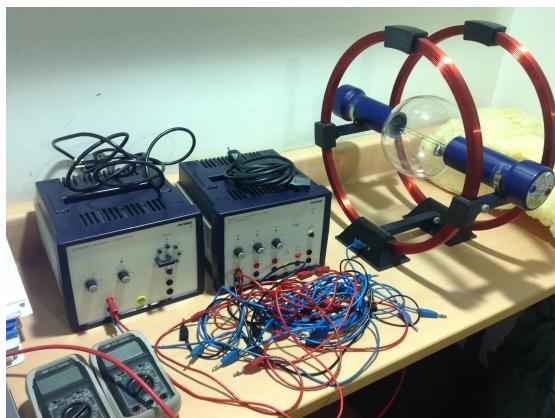
Experimento 4

Relación carga-masa del electrón (Nuevo)

El premio Nobel en física en el año 1906 se otorgó a J.J. Thomson “en reconocimiento de los grandes méritos de sus investigaciones teóricas y experimentales en la conducción de la electricidad generada por los gases”.

Equipo

- * Tubo de rayos catódicos.
- * Bobinas de Helmholtz × 2.
- * Fuente de poder, 0-600 VDC.
- * Fuente de poder, universal.
- * Multímetro × 2.
- * Cables × 13.
- * Teslámetro.



Objetivos

- * Determinar la razón entre la carga y masa del electrón a partir de la trayectoria de un haz de electrones en presencia de un campo magnético.

- * Entender cómo actúa la fuerza de Lorentz sobre un haz de electrones.

Marco teórico

Determinar el valor de la carga de un electrón o su masa de forma individual resulta una tarea laboriosa debido a que son cantidades excesivamente pequeñas : $e = 1.602176634 \times 10^{-19} \text{ C}$, $m_e = 9.1093837015(28) \times 10^{-31} \text{ kg}$. Sin embargo, la razón entre carga y masa e/m es una cantidad que se puede medir relativamente fácil al analizar la trayectoria de un haz de electrones en presencia de un campo magnético. Este experimento fue realizado por primera vez por J.J. Thomson en 1897 mostrando que los rayos catódicos no eran más que un haz de partículas cargadas negativamente a los que llamó corpúsculos [13]. Al calcular la razón carga-masa pudo evidenciar que este valor era independiente del material del cátodo que usara y del gas que usaba en su cámara de vacío. Además, el valor calculado con los datos experimentales lo llevó a pensar que los corpúsculos tenían una masa muy pequeña o una carga muy grande comparado con el ión más liviano conocido: H^+ . Hoy en día sabemos que estos corpúsculos son electrones y que hacen parte fundamental del átomo, como Thomson concluyó a partir de su experimento. El método que se usará para medir la relación carga-masa tiene como principio el mismo que utilizó Thomson: acelerar electrones con un campo eléctrico y desviar su trayectoria con un campo magnético. En este experimento el campo eléctrico y magnético no se encuentran en directa superposición. El campo eléctrico se usará para acelerar los electrones hasta que adquieran una velocidad v . Los electrones en movimiento son luego sometidos a un campo magnético B generado por un arreglo de bobinas de Helmholtz [10] lo cual generará una trayectoria circular. Midiendo el radio de esta trayectoria, el campo magnético y la velocidad inicial de los electrones es posible calcular el valor de e/m . Una aplicación directa de este experimento es lo que se conoce como un espectrómetro de masas, el cual permite encontrar la composición de moléculas en términos de las razones carga-masa q/m de sus componentes. Esto es posible ya que elementos con diferentes razones q/m tendrán una trayectoria diferente en el espectrómetro bajo la acción del mismo campo magnético.

Ejercicio 1

1. Encuentre la velocidad final de un electrón de carga e y masa m que está sujeto a una diferencia de potencial V . Suponga que la velocidad inicial del electrón es nula y este acelera en el vacío.
2. La fuerza de Lorentz actuando sobre un electrón con velocidad v sujeto a un campo magnético B está dada por [6]:

$$\vec{F} = -e\vec{v} \times \vec{B}. \quad (4.1)$$

Si la velocidad es constante y es perpendicular al campo magnético aplicado: ¿cuánto vale el radio de la trayectoria circular descrita?

Use la relación entre la aceleración y velocidad para este tipo de movimiento junto con el resultado para la velocidad final obtenida en el punto 1). Al despejar la razón e/m . Debe obtener:

$$\frac{e}{m} = \frac{2V}{(Br)^2}. \quad (4.2)$$

¿Su respuesta queda indicada en términos de variables que podría medir en el laboratorio?

3. Explique cómo funciona el tubo de rayos catódicos.

Ejercicio 2

Un arreglo de bobinas de Helmholtz consiste en un par de bobinas en planos paralelos separadas por una distancia h . En nuestro caso, el radio de las bobinas es $R = 0.2 \text{ m}$ y el número de vueltas para cada bobina es $n = 154$. En cada una circula una corriente en la misma dirección tal que el campo magnético tiende a reforzarse y es aproximadamente uniforme en el centro de la configuración (a una distancia $h/2$ de la bobina izquierda y derecha) [10].

1. Calcule el campo magnético sobre el eje x siendo este eje el que pasa por el centro de las dos bobinas.
2. Realice una gráfica del campo magnético en función de x para diferentes valores de h . ¿Se puede decir que es uniforme en la región de interés? ¿Para qué valor de h sucede?
3. ¿Cómo sería el campo magnético en una región diferente al eje de simetría x ?

Montaje y Experimento

El experimento se dividirá en dos partes: en la primera se realizarán mediciones del campo magnético sobre las bobinas de Helmholtz y en la segunda parte se determinará la razón carga-masa del electrón. Si no tiene consigo el Teslámetro, conecte las bobinas de acuerdo a la Fig. 4.1 e inicie la actividad 2.

Actividad 1: Medición de campo magnético sobre las bobinas

Con la fuente de poder universal y las bobinas de Helmholtz arme el circuito mostrado en 4.1. No olvide conectar el amperímetro para medir la corriente que pasa por las bobinas.

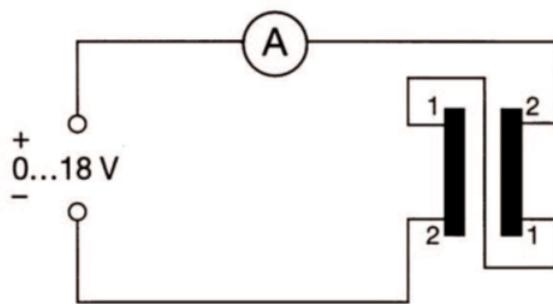


Figura 4.1: Conexión de las bobinas de Helmholtz. Imagen obtenida de [10].

Con la ayuda de un Teslámetro realice mediciones del campo magnético antes de encender la fuente con el fin de registrar la presencia de algún campo magnético que pueda inferir con el experimento. Ahora encienda la fuente y para diferentes valores de corriente tome el campo magnético en diferentes regiones del arreglo de Helmholtz. En particular, realice mediciones en el centro de las bobinas, donde irá el tubo de vacío. Asegúrese de tener la sonda del Teslámetro en la orientación indicada para medir el campo magnético generado por las bobinas.

Nota: Consulte el manual del Teslámetro que está utilizando para conocer la incertidumbre y formas de operación del mismo.

1. ¿Cómo se comporta el campo magnético en el centro del arreglo a medida que la corriente aumenta?
2. ¿Qué tan uniforme es el campo magnético en la región donde luego se colocará el tubo de rayos catódicos?
3. Tome datos de Corriente y Campo magnético en el centro de la configuración. Con estos datos realice una regresión lineal.
4. ¿Cómo se comparan estos resultados con lo que calculó en el Ejercicio 2?

Una vez determinado el comportamiento del campo magnético en las bobinas de Helmholtz, pase a colocar el tubo de rayos catódicos según lo indica la figura 4.2.

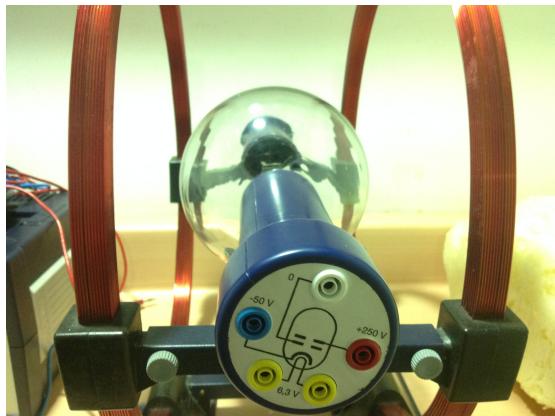


Figura 4.2: Montaje experimental

Actividad 2: Medición de la relación e/m

Comience conectando el tubo de rayos catódicos a la fuente 0-600 VDC de acuerdo al esquema mostrado en la Figura 4.3.

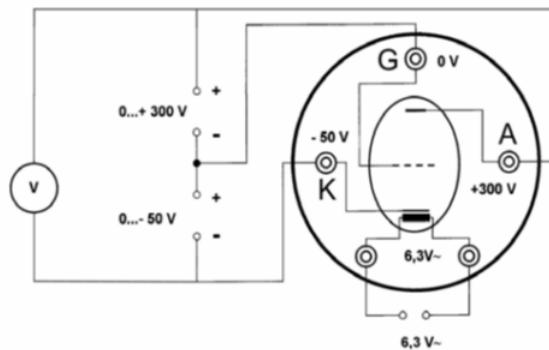


Figura 4.3: Diagrama de conexión del tubo de rayos catódicos. Imagen obtenida de [10].

Note que en la fuente usted puede cambiar el voltaje girando dos perillas: una de 0-50 V y una de 0-300 V. La primera sirve para ajustar el brillo y enfocar el haz de partículas ionizadas que se observa; la segunda perilla se usa para ajustar el voltaje del ánodo. Tenga en cuenta que el voltaje que se debe usar para calcular la velocidad de salida de los electrones es el que se mide en el multímetro colocado entre el cátodo y el ánodo. La conexión que corresponde al voltaje de 6.3V AC se utiliza para inducir el desprendimiento de electrones por emisión térmica [10].

Nota: Asegúrese que las perillas marcan 0V al prender y apagar el aparato. Además, espere un tiempo de 2-3 minutos después de conectar y encender el aparato para comenzar a girar las perillas. La fuente de corriente de las bobinas y la que suministra el voltaje al tubo de rayos catódicos se trabajan de forma independiente (no debe haber ninguna conexión entre las dos).

Con las bobinas de Helmholtz apagadas y en una habitación lo suficientemente oscura aumente la perilla 0-300V lentamente: debería observar un haz brillante. Si no lo observa y ya se aseguró de hacer todas las conexiones de forma

correcta, aumente lentamente el voltaje de la perilla 0-50V hasta que el haz aparezca. Cuando el haz sea visible encienda las bobinas de Helmholtz y aumente lentamente la corriente que pasa por ellas. No sobrepase un valor de corriente de 5A.

- * ¿Por qué es posible observar el haz? ¿Qué lo compone?
- * ¿Qué sucede con el haz a medida que la corriente que pasa por las bobinas aumenta?
- * ¿Cómo influye la dirección en la que fluye la corriente con la dirección en la que se desvía el haz?

Nota: Si está obteniendo trayectorias helicoidales gire el tubo de rayos catódicos para asegurarse que la velocidad de salida de los electrones y el campo magnético sean perpendiculares.

Para realizar las mediciones del radio de la órbita circular, el montaje incluye 4 barras de metal sobre las cuales el haz podría incidir. Estas barras están separadas a una distancia de 4 cm, 6 cm, 8 cm y 10 cm respectivamente del punto donde emergen los electrones.

Para cada uno de los radios, registre valores de la diferencia de potencial entre cátodo y ánodo y la corriente que pasa por las bobinas de Helmholtz tal que el haz impacte en la barra. Por ejemplo, para el radio de 2 cm, cambie el voltaje (cátodo-ánodo) entre 100 V y 275 V en intervalos de 25 V y registre la corriente necesaria para que el haz impacte la primera barra. No olvide la función de la perilla 0-50 V para enfocar el haz, puede resultar útil para valores de voltaje menores a 150 V.

1. Calcule el campo magnético con la fórmula que dedujo para el centro del arreglo de Helmholtz en términos de la corriente y con la regresión lineal que realizó en el Ejercicio 2.
2. Con el valor de campo magnético, el radio y el voltaje entre cátodo y ánodo calcule la razón e/m para un par de datos tomados. ¿Está en el mismo orden de magnitud de lo esperado? Si no es así, revise otro conjunto de datos. Si el error persiste, realice de nuevo sus mediciones.
3. Para el mismo radio y diferentes valores de corriente y voltaje calcule el promedio y la desviación de e/m . Organice sus resultados en forma de tabla.
4. De acuerdo a la ecuación

$$\frac{e}{m} = \frac{2V}{(Br)^2}, \quad (4.3)$$

para cada valor de r realice una gráfica de voltaje V en función del campo magnético al cuadrado B^2 . Al realizar una regresión lineal, encuentre el valor de e/m para cada serie de datos.

5. ¿Cómo se ve afectada la precisión y exactitud del experimento a medida que el radio de la trayectoria cambia?
- El valor reportado por CODATA es $1.75882001076(53) \times 10^{11}$ As/kg [7], mientras que el valor que se obtiene para el radio de 0,02 m es de $(1.76 \pm 0.24) \times 10^{11}$ As/kg¹. Sin embargo a medida que el radio aumenta se puede observar que el valor experimental se aleja del valor teórico y la incertidumbre es mayor como en el caso del radio de 0,04 m donde se obtiene $(2.06 \pm 0.48) \times 10^{11}$ As/kg.
6. ¿Coincidieron sus resultados con el valor reportado por CODATA [7]?
7. Explique por qué para mayores radios y menor voltaje los resultados tienen a desviarse más del valor teórico esperado.

Actividad 3

1. ¿En qué magnitud cree que afectan las siguientes variables en el experimento?
- * Campo magnético terrestre o externo.

¹Datos reales obtenidos con el equipo

- * La condición de vacío en el tubo de rayos catódicos.
 - * No perpendicularidad entre v y B .
 - * La no uniformidad del campo magnético generado por las bobinas de Helmholtz.
 - * La no uniformidad del campo eléctrico que acelera los electrones (causada por el orificio en el ánodo por donde salen los electrones), causando una velocidad un poco menor a la calculada teóricamente.
 - * Efectos cuánticos (piense en el experimento de Stern-Gerlach).
2. ¿Cómo podría (si es posible) minimizar los efectos de las variables mencionadas en el punto anterior?

Experimento 5

Fotoconductividad

Objetivos

- * El objetivo principal del proyecto es caracterizar el comportamiento de un fotorresistor.
- * Medir la corriente mientras se mantiene un voltaje constante y se varía la irradiancia.
- * Medir la corriente mientras se mantiene una irradiancia constante y se varía el voltaje.

Materiales

- * Riel óptico.
- * Bases móviles.
- * Rejilla ajustable.
- * 2 polarizadores.
- * Lente focal.
- * Fotorresistencia.
- * Lámpara.
- * Transformador de 6V.
- * Fuente de corriente ajustable.
- * 2 Multímetros.

Preparación

Para la preparación de esta práctica debe consultar acerca de lo siguiente:

- * Investigar qué es la banda de conducción y de valencia para un sólido.
- * ¿Qué es un semiconductor? ¿Cómo es su estructura de bandas?
- * ¿A qué se refiere con que los portadores de carga sean *huecos*?
- * ¿Qué es la movilidad de portador eléctrico μ ? ¿Cómo se define?
- * ¿Qué es la irradiancia?
- * Defina la polarización de una onda electromagnética.

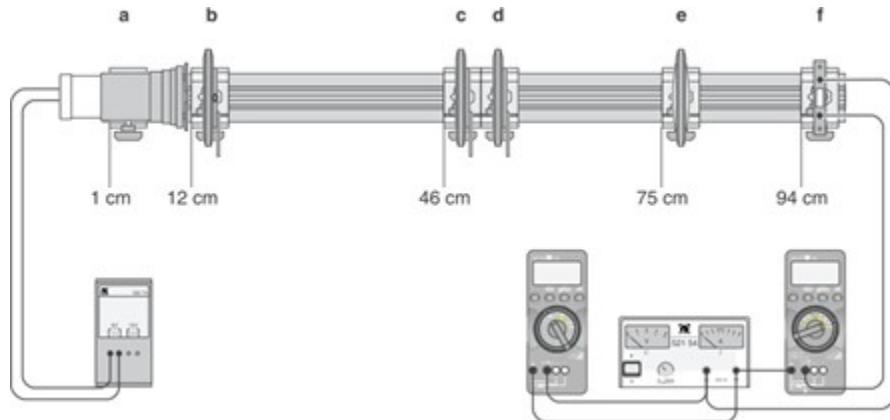


Figura 5.1: Montaje experimental.

Teoría

En este experimento se observara la conductividad en sólidos y como esta puede aumentar con por medio de interacciones con ondas electromagnéticas, en este caso, luz visible, a este fenómeno se le llama fotoconductividad. Esta propiedad es vista generalmente en foto-resistores, que son elementos comúnmente usados en en circuitos como sensores medidores de luz. Debido a la variedad de usos de las foto-resistores durante este experimento se estudiara como aumenta la fotoconductividad en estos materiales, específicamente en un foto-resistor de sulfuro de cadmio (CdS).

La conductividad eléctrica es la capacidad que tiene un material o una sustancia de dejar pasar un flujo de carga eléctrica a través de el. La conductividad eléctrica y resistividad son proporcionales al inverso (una al inverso de la otra). La conductividad σ se puede definir a partir de un punto de vista clásico usando la distribución de Maxwell-Boltzman, que modela la velocidad de los electrones cuando viajan a través del material. Sin embargo, este punto de vista presenta algunas incongruencias, por lo que se usa mejor una expresión de la conductividad a partir de la mecánica cuántica usando la distribución de Fermi-Dirac. Con esta obtenemos mejores resultados para el comportamiento de los electrones dentro del material.

Con esta caracterización de los electrones en un material, se puede observar cómo cambia la conductividad eléctrica de distintas configuraciones atómicas (elementos distintos). Esta depende de la distancia energética entre las bandas de valencia y de conducción de un material. Si estas se encuentran a niveles de energía muy cercanos, la probabilidad de que un electrón pueda saltar a esta banda es muy alta. A estos elementos los llamamos conductores. Elementos con niveles de energía de las bandas alejados, los llamamos aislantes. Otros factores que contribuyen a la conductividad eléctrica es la presencia de portadores de carga libre (ya sean huecos, o cargas). Un material en principio aislante, puede mejorar su conductividad eléctrica dopándolo con otro material que le de estos portadores de carga. Una forma de adquirir estos portadores de carga, o energía suficiente para pasar a la banda de conducción, es debido al fotoefecto interno. La absorción de energía en forma de fotones, permite que electrones con energía insuficiente para dar este salto, lo puedan dar con mayor probabilidad. Este efecto es descrito por la ecuación:

$$\Delta\sigma = e(\Delta p \mu_p + \Delta n \mu_n) \quad (5.1)$$

donde e es la carga elemental, Δp es el cambio en la concentración de los huecos, Δn es el cambio en la concentración de electrones, μ_p es la movilidad de los huecos y μ_n es la movilidad de los electrones. Cuando un voltaje es aplicado, la photocorriente es:

$$I_{Ph} = \frac{A}{D} \Delta\sigma U \quad (5.2)$$

donde A es la sección transversal del camino, D es la distancia entre los electrodos, I_{Ph} es la photocorriente y U es el voltaje. Los resistores semiconductores que dependen de la irradiancia sirven por este principio. En el experimento a realizar, se

variará la irradiancia por dos filtros polarizadores, uno después del otro, donde el ángulo entre ellos (α) será variado. La irradiancia será entonces:

$$\Phi = \Phi_0 D \cos^2(\alpha), \quad (5.3)$$

donde Φ_0 es la irradiancia sin polarizadores, y D es la transparencia cuando los planos de polarización son paralelos.

Procedimiento

Después de haber dejado el montaje experimental como se muestra en la figura 1 siendo *a* la lámpara, *b* la rejilla ajustable, *c* y *d* los polarizadores, *e* el lente focal y *f* la foto-resistencia. Para medir la fotocorriente a irradiancia constante, primero se debe calibrar el experimento midiendo la fotocorriente que es generada por luz residual. Para lograr esto, se tapa el camino del rayo de luz y se mide la fotocorriente I_0 . Luego, empezando desde 20V, se reduce el voltaje U hasta cero, en intervalos de 1 V. En cada caso medimos la fotocorriente I_{Ph} producida. Finalmente, repetimos estas medidas variando el ángulo de los planos de polarización de los filtros (de 10 a 90 grados).

Para la segunda parte del experimento, medimos la fotocorriente como función de la irradiancia a voltaje constante. Para lograr esto, primero ponemos el voltaje a 20 V, interrumpimos el rayo de luz y medimos la fotocorriente debida a luz residual I_0 . Para variar la irradiancia Φ , se cambia el ángulo de los planos de polarización en intervalos de 10 grados. En cada momento medimos la fotocorriente I_{Ph} . Finalmente repetimos estos pasos disminuyendo el voltaje gradualmente (pueden ser pasos de 1 V hasta llegar a 0 V).

Análisis

Justifique qué ley describe el comportamiento de la corriente a través del material cuando la irradiancia es constante.

Considere una regresión lineal para el comportamiento de la foto-resistencia a voltaje constante.

A partir de los datos encontrados realice una regresión lineal para los datos encontrados a una irradiancia constante y estime la resistencia en cada caso. Para las mediciones a un voltaje constante, realice un ajuste polinomial y justifique el orden tomado para el ajuste.

Experimento 6

Termogenerador - Efecto Seebeck

Objetivos

- * Medir voltaje sin carga y corriente de cortocircuito a diferentes diferencias de temperatura para determinar el Coeficiente de Seebeck.
- * Medir la corriente y el voltaje a una diferencia de temperatura constante pero con diferentes resistencias de carga, y determinar la resistencia interna de los valores medidos.
- * Determinar la eficiencia de conversión de energía a partir de la cantidad de calor consumido y la energía eléctrica producida por unidad de tiempo.

Materiales

- * Termogenerador con 2 tanques de agua.
- * Intercambiador de calor de flujo continuo.
- * Pasta conductora de calor.
- * Caja de conexiones.
- * Reóstato de 33Ω .
- * Dos multímetros.
- * Termostato de inmersión Alpha A, 230 V.
- * Baño para termostato.
- * Termómetro.
- * Tubo de goma.
- * Cables.
- * Cronómetro.

Preparación

Ejercicio

- * Investigue qué es el efecto Seebeck, Peltier y Thomson.



Figura 6.1: Montaje experimental para medir voltaje y corriente como función de la diferencia de temperatura.

- * Realice un dibujo en donde indique claramente la dirección del flujo de calor, el gradiente de temperatura y el voltaje inducido.
- * Investigar sobre generadores termoeléctricos.
- * Investigue el valor del coeficiente de Seebeck para diferentes materiales.
- * ¿Qué aplicaciones tiene el efecto Seebeck?

Teoría

Cuando hay una diferencia de temperatura entre un conductor sin corriente compuesto de diferentes materiales, el calor fluye desde la región más caliente a la más fría. Los portadores de carga involucrados en la transferencia de calor están distribuidos de manera no uniforme a lo largo del conductor. Gracias a esto se crea un campo interno que produce la fem \mathcal{E} en los extremos abiertos del conductor.

El voltaje depende de la diferencia de temperatura de los materiales usados. El campo eléctrico generado, es un campo eléctrico *electromotriz* dado por la expresión

$$\vec{E}_{fem} = -S \vec{\nabla}T, \quad (6.1)$$

donde S es el coeficiente de Seebeck de la combinación de los materiales usados y $\vec{\nabla}T$ el gradiente de temperatura. Esta expresión se puede dar en términos de potencial eléctrico inducido \mathcal{E} cuando la densidad de corriente es nula:

$$\mathcal{E} = S(T_h - T_c), \quad (6.2)$$

donde T_h es la temperatura del lado caliente y T_c es la temperatura del lado frío.

El termogenerador consiste de 142 elementos conectados en serie. El coeficiente de Seebeck de la combinación de los semiconductores usada es:

$$S = (142) 4.13 \times 10^{-4} \frac{V}{K}. \quad (6.3)$$

Procedimiento

1. Conecte las mangas a uno de los lados de la celda, llene el recipiente de reserva con agua y encienda la bomba. Ajuste el nivel de temperatura deseado y verifique que sí se está bombeando el agua.

⚠️Advertencia: Verifique que el recipiente de reserva quede un 80 % lleno y además que las abrazaderas de las mangueras estén muy bien ajustadas.

2. Llene el otro lado de la celda con agua+hielo. Monitoree la temperatura de ambos extremos de la celda.
3. Conecte el voltímetro y el amperímetro a la celda. Tome valores de voltaje y corriente a medida que cambia la diferencia de temperatura calentando el recipiente de reserva. Tome al menos 12 cambios de temperatura diferentes.
4. Manteniendo una diferencia de temperatura constante, conecte el reóstato en serie y mida la relación entre voltaje y corriente para la celda. Repita este procedimiento con al menos 5 diferencias de temperatura.
5. Desconecte las mangueras conectadas al recipiente de reserva. En el intercambiador de calor coloque agua hirviendo por un lado y retire el agua con hielo en el otro. Mida cuánta masa de agua hirviendo agrega. Mida la temperatura del lado caliente $T_h(t)$ y del lado frío $T_c(t)$ como función del tiempo por al menos 20 minutos. Mida la corriente y voltaje a través de una resistencia externa con un valor similar a la resistencia interna.

Análisis

1. Realice una gráfica de potencial eléctrico inducido \mathcal{E} vs ΔT . A partir de la gráfica calcule el coeficiente de Seebeck relativo de la celda y su incertidumbre.
2. Realice una gráfica de corriente inducida vs ΔT y comente sobre sus resultados. Si es posible realice un ajuste de mínimos cuadrados.
3. Con los datos de ΔT constante, realice una gráfica de voltaje \mathcal{E} vs corriente I . Ajuste una regresión de la forma

$$\mathcal{E} = a + bI. \quad (6.4)$$

El valor de $|b|$ indica la resistencia interna R_i y el valor de a da el voltaje de circuito abierto V_0 . Para hallar la corriente de corto circuito usamos la ley de Ohm. $I_{cc} = V_0/R_i$. Comparar las corrientes de corto circuito para los diferentes valores de ΔT .

4. Con los datos de temperatura en función del tiempo, grafique ΔT vs t . Encuentre la pendiente de la recta tangente para diferentes valores de ΔT . Esta pendiente $\frac{d\Delta T}{dt}$ se puede relacionar con el cambio de calor o potencia térmica P_T por medio de:

$$P_T = \frac{dQ}{dt} = m_{\text{agua}} c_{\text{agua}} \left| \frac{d\Delta T}{dt} \right|, \quad (6.5)$$

donde c_{agua} es el calor específico del agua.

Encuentre la potencia eléctrica $P_e = VI$ y grafique P_e vs ΔT . Realice un ajuste polinomial y justifique la elección de este ajuste. De aquí obtendrá P_e como función de ΔT .

Calcule la eficiencia como

$$\eta = \frac{P_e}{P_T}, \quad (6.6)$$

para diferentes valores de ΔT . Concluya sobre estos resultados. Realice una gráfica de η vs ΔT .

Experimento 7

Histéresis magnética

Objetivos

- * Obtener la curva de histéresis magnética para dos núcleos de diferente densidad.
- * Obtener el valor de la magnetización remanente y demás parámetros que describen una curva de histéresis magnética.
- * Encontrar el área de la curva de histéresis para los diferentes núcleos y bobinas e interpretar su resultado.
- * Determinar la energía disipada en forma de calor debido a la magnetización remanente.

Materiales

- * Sensor-CASSY.
- * Núcleo de hierro.
- * 2 bobinas de 500 vueltas.
- * Generador de funciones.
- * Resistencia STE de 1Ω , 2 W.
- * Sección de placa base.
- * Cable de conexión 50 cm, negro.
- * 7 cables de conexión, 100 cm, negros.

Preparación

Ejercicio

- * Investigue sobre las propiedades magnéticas de los metales.
- * Investigar sobre materiales ferromagnéticos y paramagnéticos.
- * ¿Cuál es la explicación microscópica de estos fenómenos magnéticos? Describa de forma cualitativa.
- * ¿Cuáles son las zonas y parámetros en una curva de histéresis?
- * ¿Qué es un relé (Relay) y cuáles son sus aplicaciones?

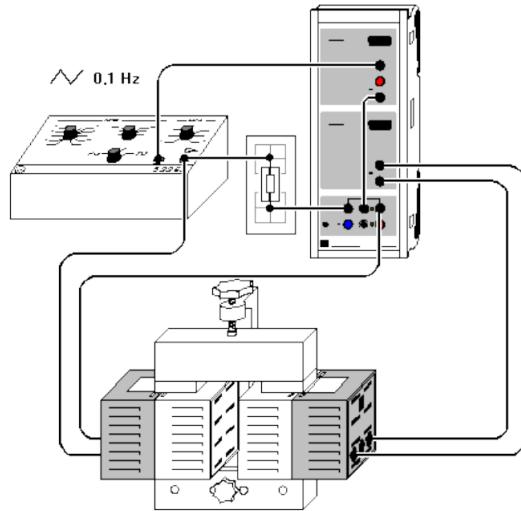


Figura 7.1: Montaje experimental sin la fuente “Power-CASSY” para medir la curva de histéresis de núcleos con diferente densidad.

Teoría

En una bobina el campo magnético está dado por

$$H = \frac{N_1 I}{L}, \quad (7.1)$$

donde I es la corriente que circula por la bobina y N_1/L es la densidad de vueltas efectiva en la longitud L de la bobina. La inducción magnética B , dada por la expresión

$$B = \mu_r \mu_0 H, \quad (7.2)$$

no es lineal con H ya que la permeabilidad relativa μ_r del ferromagneto depende de H , el campo aplicado, y del estado previo del ferromagneto (magnetizado o no). Para un ferromagneto totalmente desmagnetizado se cumple que $B = 0 \iff H = 0$. A medida que H aumenta el valor de B tiende a cambiar hasta llegar a un valor de saturación B_s . Si el campo externo H vuelve a cero después de llegar al valor B_s , existirá una magnetización remanente, es decir $B \neq 0$.

Debido a esta particularidad, es común representar la inducción magnética B por medio de una curva de histéresis, en función de valores positivos y negativos de H . En este experimento no se medirá H y B directamente, pero sí cantidades proporcionales a estos. En el caso de H se medirá la corriente I y para el caso de B se medirá el flujo magnético Φ_B cuya expresión es

$$\Phi_B = N_2 A B, \quad (7.3)$$

donde A es el área transversal de la segunda bobina y N_2 el número de vueltas de esta. Para medir experimentalmente el flujo magnético se realiza la integral de la *fem* inducida \mathcal{E}

$$\Phi_B = - \int \mathcal{E} dt, \quad (7.4)$$

de acuerdo a la ley de inducción de Faraday.

Ejercicio 2

El área que encierra una curva de histéresis es igual a la energía E por unidad de volumen V que se disipa en forma de calor $\epsilon = E/V$ debido a la remagnetización del núcleo:

$$\int B dH = \epsilon. \quad (7.5)$$

Muestre que:

$$\int \Phi_B dI = \frac{N_2}{N_1} E. \quad (7.6)$$

Procedimiento

1. Conecte todo el montaje como se observa en la figura.
2. Por un lado medirá la corriente I que genera el campo H . Por otro lado medirá el voltaje inducido \mathcal{E} sobre la otra bobina.
3. En el software, cree una nueva variable que sea la integral en el tiempo de \mathcal{E} . Mida el área transversal de la bobina y calcule el flujo Φ_B .
4. Desmagnetice el núcleo primero, consulte con su profesor cómo hacerlo.
5. Con el generador de funciones coloque una función de diente de sierra con amplitud de 2V y una frecuencia de 0.1 Hz aproximadamente.
6. Grafique Φ_B como función de I para obtener la curva de histéresis.
7. Obtenga diferentes curvas cambiando la forma de la onda y la frecuencia.

Análisis

1. Obtenga los parámetros de la curva de histéresis para cada núcleo y comente sobre sus propiedades magnéticas.
2. Encuentre la energía disipada en forma de calor en la remagnetización para todas las curvas que obtuvo.

Experimento 8

Espectros atómicos A



El premio Nobel en física en el año 1922 se otorgó a Niels Bohr “*por sus servicios en la investigación de la estructura de los átomos y de la radiación que de ellos emana*”.

Equipo

- * Espectrómetro de prisma
- * Prisma
- * Rejilla de difracción
- * Lámpara de descarga
- * Tubos con diferentes elementos en estado gaseoso (He, Hg, Ne, etc)
- * Guantes desechables
- * Lámpara auxiliar

Objetivos

- * Observar las líneas de emisión y absorción de diferentes elementos usando una rejilla de difracción y un prisma.
- * Relacionar la longitud de onda conocida de las líneas espectrales con una variable de longitud para luego extrapolar la relación y medir cuantitativamente un espectro en principio desconocido.

Conceptos Clave

Espectrómetro de prisma, índice de refracción, rejilla de difracción, espectro de emisión y absorción, líneas espectrales, teoría atómica de Bohr, acople S-L.



Figura 8.1: Montaje experimental disponibles para la práctica

Marco teórico

Desde que Kirchhoff y Bunsen introdujeron el análisis espectral en 1860 con el cual descubrieron elementos como el Cesio y que permitieron a los astrónomos Pierre Janssen y Norman Lockyer descubrir el Helio observando al Sol durante un eclipse en 1868 (ver Fig.8.2). El análisis se basa en el estudio de la radiación electromagnética emitida por un elemento, en particular un gas, cuando este se somete a algún tipo de estímulo como por ejemplo un aumento de temperatura, un alto voltaje o es irradiado con luz. Esta radiación ocurre en determinadas longitudes de onda que varían de acuerdo a la estructura atómica de cada elemento [bohr]



Figura 8.2: Espectro de emisión del Helio

A finales del siglo XIX se habían realizado varios intentos por encontrar un patrón en los espectros de diferentes sustancias teniendo como fundamento vibraciones en un sólido. Sin embargo, este camino resultó infructuoso y se hizo necesario probar mediante el cálculo directo alguna relación entre las longitudes de onda de las líneas espectrales. Fue en 1885 cuando Balmer encontró la siguiente fórmula para el espectro del Hidrógeno

$$\lambda = B \left(\frac{n^2}{n^2 - 2^2} \right), \quad (8.1)$$

con $B = 3.6450682 \times 10^{-7} m$ una constante y $n = 3, 4, 5, \dots$. Más adelante, Rydberg estudiando los espectros de otros elementos llegó a una fórmula más general, explícitamente [3]

$$\frac{1}{\lambda} = R_{\infty} \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right), \quad (8.2)$$

con $n_1 < n_2$ números enteros y R_{∞} la constante de Rydberg. Finalmente en 1913 con la teoría atómica de Bohr y los cuantos de energía propuestos por Planck se logró explicar la fórmula de Rydberg en términos de la energía electromagnética que puede absorber o emitir un átomo cuando realiza un transición de un estado cuántico a otro. Adicionalmente, la constante de Rydberg se pudo calcular en términos de otras constantes fundamentales verificando la validez de la teoría.

Ejercicio 1

1. Realice un breve resumen de la teoría atómica de Bohr.
2. ¿Qué fenómenos físicos alteran las líneas espectrales?
3. Investigue sobre la difracción debido a un prisma. ¿Cómo depende el coeficiente de refracción con respecto a la longitud de onda?
4. Consulte el espectro del Helio, Hidrógeno, Mercurio, Kriptón, Argón y Sodio. Para los tres primeros debe incluir cuáles son los niveles de las transiciones y las longitudes de onda que estas transiciones generan. Adicionalmente para el Sodio, explique el origen del famoso *doblete* alrededor de los 589nm.

Montaje y Experimento

El espectrómetro que se usará durante la práctica consiste en un colimador, un telescopio, una regla amplificada mediante la lámpara auxiliar y un elemento difractivo, en este caso el prisma. Cada uno de estos elementos puede identificarlos en la Fig.9.3.

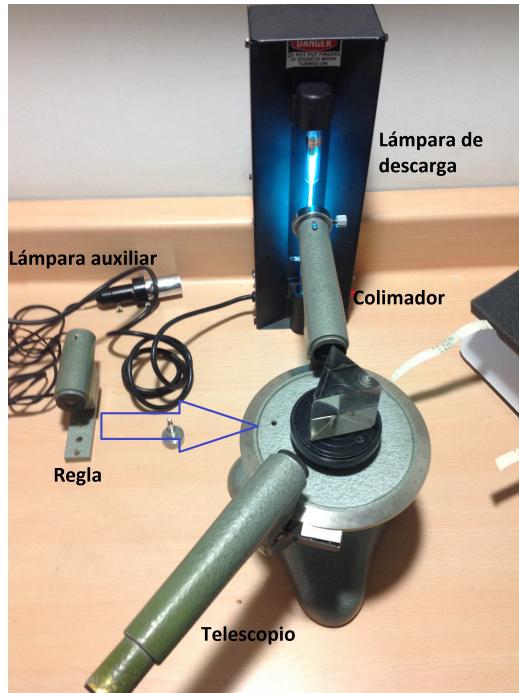


Figura 8.3: Espectrómetro y lámpara de descarga. La flecha indica la posición donde se ajusta la regla.

En la parte inferior del montaje se tienen 3 tornillos. Uno de ellos hace que la base circular con la escala angular pueda girar si este se suelta. Hay otro tornillo relacionado con permitir el giro del telescopio. Finalmente el tornillo en el brazo del telescopio sirve para realizar movimientos angulares finos cuando el telescopio no se puede mover libremente. Identifique cada uno de estos tornillos y déjelos en una posición tal que el montaje se pueda mover libremente. Para alinear y enfocar el espectrómetro debe seguir los siguientes pasos:

- * Retire la lámpara auxiliar del montaje y déjelo como se muestra en la figura 9.3.
- * Usando los guantes desechables, manipule el tubo que contiene Helio (He) y ubíquelo en la lámpara de descarga. Conecte la lámpara y enciéndala. Apunte el colimador hacia la lámpara dejando la menor distancia posible entre el extremo del colimador y la lámpara tal que el tubo de gas pueda cambiarse sin modificar la posición del colimador. Es importante que el colimador apunte al centro de la lámpara, para lograr esto puede colocar la lámpara sobre un soporte para cambiar su altura.
- * Sin colocar el prisma, debe alinear el colimador y el telescopio como se muestra en la Fig. 8.4. El colimador tiene una rendija en el extremo que apunta a la lámpara de descarga cuyo ancho puede variar usando el tornillo en el extremo del colimador. Note que en los extremos del colimador y el telescopio se cuenta con un sistema de enfoque, el cual se usa simplemente halando el tubo en dicho extremo.
- * Ajuste el ancho de la rejilla en el colimador a un valor intermedio y observe por el telescopio. Debería ver la luz proveniente de la lámpara y que pasa por la rendija. La rendija debe verse vertical, de lo contrario gire el extremo del colimador. Ahora realice ajustes en el foco del colimador y el telescopio (preferiblemente en el telescopio) tal que las imperfecciones de la rendija se vean claramente. La linea sobre el telescopio debe estar vertical y alineada con la rendija, ver Fig. 8.4. Cuando realice la alineación asegure el tornillo del telescopio.

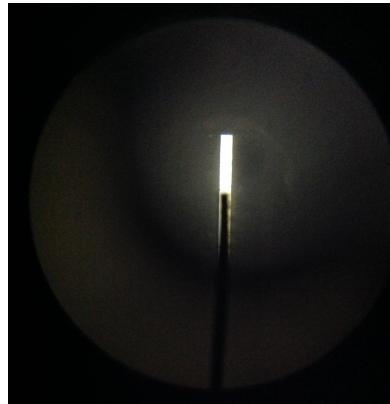


Figura 8.4: Alineación del colimador y el telescopio

- * Note que en la Fig. 9.3 la regla con la lámpara auxiliar se encuentra desmontada. Esto se hace con el fin de rotar la base circular donde se encuentra la escala angular tal que coincida con la escala que se encuentra a la derecha del telescopio. Gire la base circular tal que la escala comience en 0° o en 180° . Luego asegure el tornillo de la base circular y no vuelva a soltarlo por el resto de la práctica.

Con el telescopio y el colimador enfocados, puede proceder a colocar el prisma (manipular con los guantes) como se muestra en la Fig. 9.3.

Actividad 1: Calibración del especlómetro con Prisma

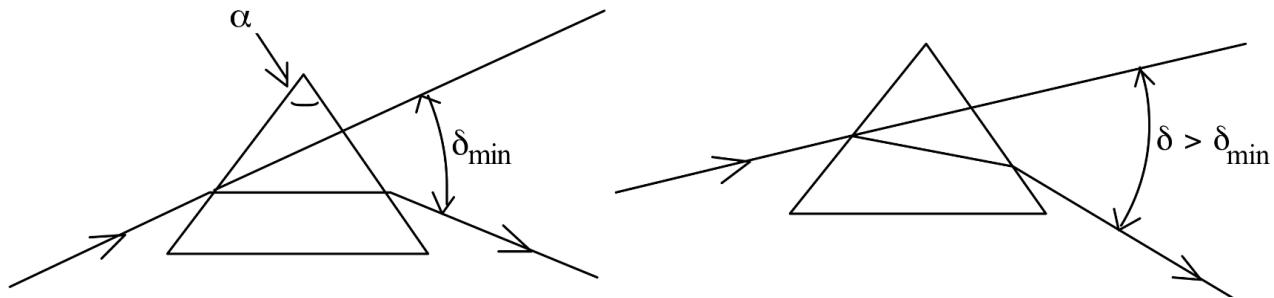
Girando el telescopio en sentido antihorario unos $40^\circ - 50^\circ$ aproximadamente busque las líneas espectrales correspondientes a la lámpara de He. Para saber qué líneas debería observar, observe a través de la rejilla de difracción e identifique los colores.

⚠ Advertencia: Recomendación: Siempre que vaya a realizar observaciones y mediciones del espectro es recomendable que todas las luces del espacio donde se encuentre estén apagadas.

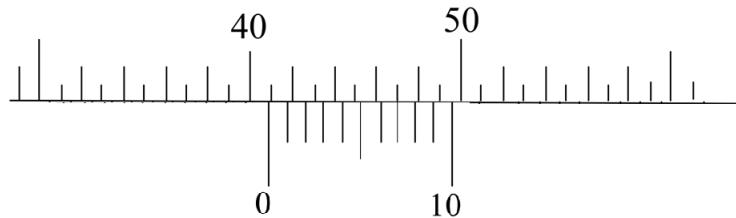
Cuando un haz de luz incide sobre un prisma, el ángulo de desviación δ es el ángulo entre el rayo incidente y el rayo refractado. Este ángulo cambiará de acuerdo al ángulo incidente del haz de luz sobre el prisma. El ángulo δ se minimiza cuando el ángulo de entrada y el de salida medidos con respecto a las superficies el prisma son los mismos, ver Fig 8.5. En este caso de alta simetría se cumple la relación (demostrar)

$$n = \frac{\sin\left(\frac{\alpha+\delta_{\min}}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}, \quad (8.3)$$

donde n es el índice de refracción del material del prisma y α es uno de los ángulos internos del prisma, el cual en este caso se tomará como 60° .

Figura 8.5: Ángulo δ en diferentes configuraciones

Para medir el ángulo δ_{\min} experimentalmente debe mirar por el telescopio y ubicar una linea (por ejemplo la verde), luego gire lentamente el prisma en sentido horario y luego antihorario. Escoja la dirección que visualmente lleve la linea espectral más cerca de los 0° . Repita este procedimiento hasta que no importa en qué sentido gire el prisma la linea siempre se aleje del 0° , esto indica que ya llegó al δ_{\min} del montaje. Para cada linea debe encontrar un δ_{\min} .

Figura 8.6: Forma de medición con la escala angular. La escala de arriba se encuentra en la mesa circular la cual se encuentra estática, la escala de abajo se encuentra en el telescopio. En este caso la medida es 40.7°

En la Fig. 8.6 se da un ejemplo de cómo se miden con las escalas angulares. Su funcionamiento es similar al de un calibrador. Primero se ubica la linea del 0 de las escala inferior con respecto a la escala superior. En este caso nos indica que el valor de la medición tiene está entre 40° y 41° . Para tener más precisión, se revisan todas las líneas de la escala inferior en búsqueda de una coincidencia con una de las líneas de la escala superior, en este caso la línea 7 en la escala inferior cumple esta condición. Por lo tanto la medida es $40^\circ + 0.7^\circ$.

1. Tome una medición del ángulo mínimo δ_{\min} para cada linea espectral en el caso del He.
2. Usando la ecuación (8.3) encuentre el índice de refracción para cada linea espectral.
3. Realice una gráfica del índice de refracción n en términos de la longitud de onda λ y otra en función de $1/\lambda^2$.
4. Realice ajustes del tipo $n = A + B/\lambda^2$ y $n = A' + B'/\lambda^2 + C'/\lambda^4$ e indique cuál representa mejor los datos experimentales. Grafique los residuales para cada ajuste para justificar su respuesta.
5. ¿Por qué algunas de las líneas espectrales se ven más tenues que otras? Ajuste la abertura de la rejilla del colimador y describa que sucede con el ancho e intensidad de las líneas espectrales.

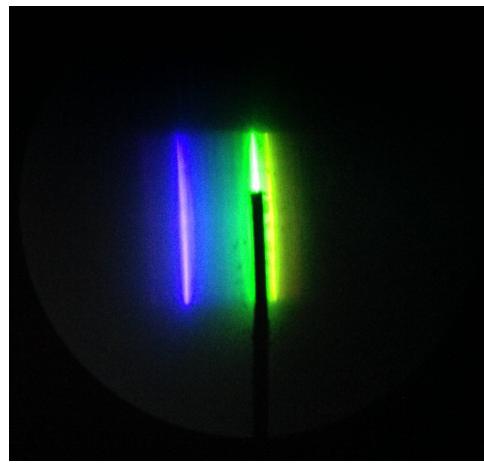


Figura 8.7: Ejemplo de medición de una linea espectral, se ajusta la barra vertical del telescopio para que coincida con la linea.

Actividad 2: Lineas espectrales de H, Hg y constante de Rydberg

- Apague la lámpara de descarga y espere a que el tubo de He se enfríe. Sin mover ningún elemento del montaje, retire el tubo de He usando los guantes desechables y coloque el de Mercurio (Hg). Realice las mediciones del ángulo mínimo e identifique las lineas espectrales del nuevo elemento. Usando el ajuste obtenido en el punto 2), determine la longitud de onda de estas lineas espectrales. Compárelas con las longitudes de onda reales y obtenga un porcentaje de error. ¿Qué tan bueno es el ajuste que realizó? ¿Qué podría hacer para mejorarlo?
- Repita el punto anterior para el tubo que contiene Hidrógeno. Usando los datos de longitud de onda obtenidos del ajuste y sabiendo las transiciones de estado que generan dicha linea espectral, calcule la constante de Rydberg.

Actividad 3: Lineas espectrales de los gases nobles Ne, Ar, Kr y Xe y el doblete del Sodio

- Coloque las lamparas de Neón, Argón,Kriptón y Xenón y mida las lineas espectrales con mayor intensidad. Podría disminuir el tamaño de la rendija del colimador para identificar tales lineas. Con el ajuste realizado en la actividad 2, calcule las longitudes de onda respectiva y compárelas con las reportadas en los espectros de cada elemento. ¿Valdría la pena hacer la calibración con uno de estos elementos? Si lo considera necesario vuelva a realizar la calibración (relación entre n y λ).
- Con la lámpara de sodio, identifique el doblete del sodio, para ver las lineas más finas puede mover de forma sutil el enfoque del telescopio y disminuir el ancho de la rendija en el colimador. Mida la separación entre las lineas del doblete de sodio (si el montaje se lo permite) y compare el valor obtenido con el valor reportado para este elemento.

Actividad 4: Difracción con rejilla

Para esta parte del experimento, debe cambiar el prisma por una rejilla de difracción, se asume que el telescopio y el colimador se encuentran alineados y enfocados. Asegúrese que la rejilla se encuentra perpendicular al camino óptico de la luz que sale del colimador y que además cuando se observa por esta, las lineas espectrales son verticales. Para verificar que la rendija esté alineada con el eje óptico, lleve el telescopio hasta 0° y registre una linea espectral a izquierda y derecha. Los ángulos a los que se encuentren deben ser idénticos, si esto no sucede, rote la rejilla en la dirección apropiada.

- Registre el ángulo para cada linea espectral para la lámpara de Hg, con la cual se calibrará el especlómetro. Con la relación

$$d \sin \theta = n\lambda, \quad (8.4)$$

calcule d , la distancia entre rendijas, para cada longitud de onda y compare el promedio con el valor indicado por el fabricante.

2. Observe diferentes lámparas y registrando el ángulo para cada linea espectral, determine la longitud de onda de acuerdo a la ecuación (8.4).
3. Compare las predicciones hechas con la rendija a aquella hechas con el prisma. ¿Cuál presenta menor error porcentual? ¿Con cuál de los dos métodos es más fácil ver lineas espectrales con baja intensidad? Calcule la constante de Rydberg con la lámpara de Hidrógeno.
4. Realice la medición para el doblete del Sodio. ¿Con cuál método es más fácil diferenciar lineas espectrales que se encuentran muy juntas?

Ejercicio 2

1. ¿En qué magnitud cree que afectan las siguientes variables en el experimento? -
 - * Impurezas en el gas contenido en los tubos
 - * Temperatura del gas
 - * Apertura de la rendija del colimador
 - * Errores de paralaje
 - * Imperfecciones en la rendija de difracción
 - * Ancho de cada rendija en la rendija de difracción
2. ¿Cómo podría (si es posible) minimizar los efectos de las variables mencionadas en el punto anterior?

Experimento 9

Espectros atómicos B



El premio Nobel en física en el año 1922 se otorgó a Niels Bohr “*por sus servicios en la investigación de la estructura de los átomos y de la radiación que de ellos emana*”.

Equipo

- * Espectrómetro de prisma
- * Prisma
- * Rejilla de difracción
- * Lámpara de descarga
- * Tubos con diferentes elementos en estado gaseoso (He, Hg, Ne, etc)
- * Guantes desechables
- * Lámpara auxiliar



Figura 9.1: Montaje experimental disponible para la práctica

Objetivos

- * Observar las líneas de emisión y absorción de diferentes elementos usando una rejilla de difracción y un prisma.
- * Relacionar la longitud de onda conocida de las líneas espectrales con una variable de longitud para luego extrapolar la relación y medir cuantitativamente un espectro en principio desconocido.

Conceptos Clave

Espectrómetro de prisma, índice de refracción, rejilla de difracción, espectro de emisión y absorción, líneas espectrales, teoría atómica de Bohr, acople S-L.

Marco teórico

Desde que Kirchhoff y Bunsen introdujeron el análisis espectral en 1860 con el cual descubrieron elementos como el Cesio y que permitieron a los astrónomos Pierre Janssen y Norman Lockyer descubrir el Helio observando al Sol durante un eclipse en 1868 (ver Fig.9.2). El análisis se basa en el estudio de la radiación electromagnética emitida por un elemento, en particular un gas, cuando este se somete a algún tipo de estímulo como por ejemplo un aumento de temperatura, un alto voltaje o es irradiado con luz. Esta radiación ocurre en determinadas longitudes de onda que varían de acuerdo a la estructura atómica de cada elemento [Bohr•Nobel]



Figura 9.2: Espectro de emisión del Helio

A finales del siglo XIX se habían realizado varios intentos por encontrar un patrón en los espectros de diferentes sustancias teniendo como fundamento vibraciones en un sólido. Sin embargo, este camino resultó infructuoso y se hizo necesario probar mediante el cálculo directo alguna relación entre las longitudes de onda de las líneas espectrales. Fue en 1885 cuando Balmer encontró la siguiente fórmula para el espectro del Hidrógeno

$$\lambda = B \left(\frac{n^2}{n^2 - 2^2} \right), \quad (9.1)$$

con $B = 3.6450682 \times 10^{-7} m$ una constante y $n = 3, 4, 5, \dots$. Más adelante, Rydberg estudiando los espectros de otros elementos llegó a una fórmula más general, explícitamente [3]

$$\frac{1}{\lambda} = R_{\infty} \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right), \quad (9.2)$$

con $n_1 < n_2$ números enteros y R_{∞} la constante de Rydberg. Finalmente en 1913 con la teoría atómica de Bohr y los cuantos de energía propuestos por Planck se logró explicar la fórmula de Rydberg en términos de la energía electromagnética que puede absorber o emitir un átomo cuando realiza un transición de un estado cuántico a otro. Adicionalmente, la constante de Rydberg se pudo calcular en términos de otras constantes fundamentales verificando la validez de la teoría.

Ejercicio 1

1. Investigue qué valor toma la constante de Rydberg en el SI y cómo se puede calcular a partir de constantes fundamentales.
2. Realice un breve resumen de la teoría atómica de Bohr.
3. ¿Qué determina el ancho de una línea espectral?

4. ¿Qué tipo de efectos provocan un corrimiento de las líneas espectrales?
5. ¿Qué tipo de efectos provocan un desdoblamiento en las líneas espectrales?
6. Investigue sobre la difracción debido a una rendija. ¿Cómo depende el ángulo de difracción donde se encuentra un máximo de intensidad de la longitud de onda incidente?
7. Investigue sobre la difracción debido a un prisma. ¿Cómo depende el coeficiente de refracción con respecto a la longitud de onda?
8. Consulte el espectro del Helio, Hidrógeno, Mercurio, Kriptón y Argón. Para los tres primeros debe incluir cuáles son los niveles de las transiciones y las longitudes de onda que estas transiciones generan.

Montaje y Experimento

El especlómetro que se usará durante la práctica consiste en un colimador, un telescopio, una regla amplificada mediante la lámpara auxiliar y un elemento difractivo, en este caso el prisma. Cada uno de estos elementos puede identificarlos en la Fig.9.3.

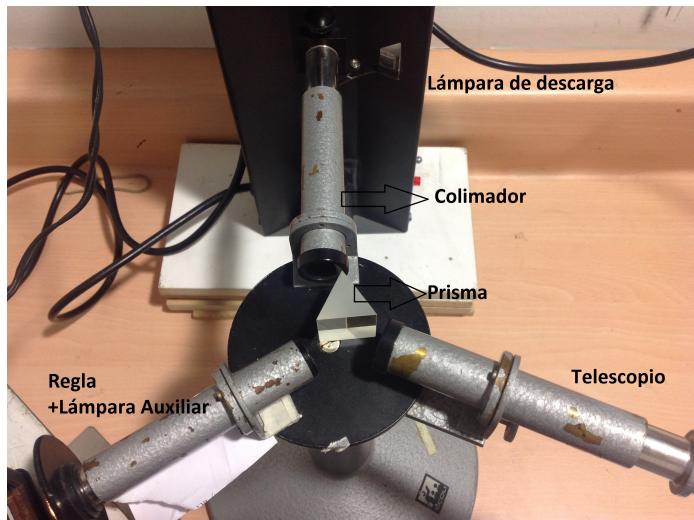


Figura 9.3: Espectrómetro y lámpara de descarga

Para alinear y enfocar el especlómetro debe seguir los siguientes pasos

- * Usando los guantes desechables, manipule el tubo que contiene Mercurio (Hg) y ubíquelo en la lámpara de descarga. Conecte la lámpara y enciéndala. Apunte el colimador hacia la lámpara dejando la menor distancia posible entre el extremo del colimador y la lámpara tal que el tubo de gas pueda cambiarse sin modificar la posición del colimador.
- * Sin colocar el prisma, debe alinear el colimador y el telescopio como se muestra en la Fig. 9.4. El colimador tiene una rendija en el extremo que apunta a la lámpara de descarga cuyo ancho puede variar usando el tornillo en la parte superior del colimador. Note que en los extremos del colimador, el telescopio y la regla se cuenta con un sistema de enfoque, el cual se usa simplemente halando dicho extremo.



Figura 9.4: Alineación del colimador y el telescopio

- * Ajuste el ancho de la rejilla en el colimador a un valor intermedio y observe por el telescopio. Debería ver la luz proveniente de la lámpara y que pasa por la rendija. La rendija debe verse vertical, de lo contrario gire el extremo del colimador. Ahora realice ajustes en el foco del colimador y el telescopio (preferiblemente en el telescopio) tal que las imperfecciones de la rendija se vean claramente.

Con el telescopio y el colimador enfocados, puede proceder a colocar el prisma (manipular con los guantes) como se muestra en la Fig. 9.3.

Actividad 1: Calibración del espectrómetro

Con el prisma en posición, encienda la lámpara auxiliar y ubíquela lo más cerca posible al extremo de la regla. Girando el telescopio en sentido antihorario unos 40° – 60° aproximadamente busque las líneas espectrales correspondientes a la lámpara de Hg. Para saber qué líneas debería observar, observe a través de la rejilla de difracción e identifique los colores.

⚠ Advertencia: Recomendación: Siempre que vaya a realizar observaciones y mediciones del espectro es recomendable que todas las luces del espacio donde se encuentre estén apagadas.

Cuando encuentre las líneas espectrales, debería ver también la regla. Si no logra ver las líneas espectrales, debe modificar la posición de su prisma, rótelos suavemente en sentido horario o antihorario hasta que observe las líneas espectrales. Debería observar algo similar a lo que se muestra en la Fig. 9.5.

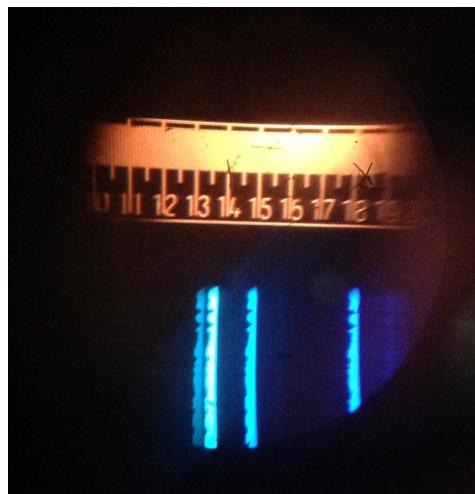


Figura 9.5: Observación a través del telescopio para gas de Helio

Note que en la Fig. 9.5 la regla se encuentra por encima de las líneas espectrales. Para realizar mediciones con mayor precisión las líneas y la regla deberían quedar a la misma altura, de hecho puede ser esta la razón por la que no ve la regla. Para lograr esto, puede cambiar levemente la posición vertical del tubo ajustando el respectivo tornillo o colocando un papel entre el tubo y la mesa giratoria para levantar el cambiar la inclinación del tubo. Si la regla se ve borrosa puede ajustar el foco del tubo de la regla.

1. Ubique el cero en la escala de la regla antes de la primera linea roja que observe en el espectro del Hg. Tome una medición de las líneas espectrales con longitud de onda conocida (según lo que investigó) con respecto a la escala de la regla.
2. Realice una gráfica de la longitud de onda en función de la escala en la regla. ¿Qué comportamiento se observa? Realice un ajuste apropiado.
3. ¿ Por qué algunas de las líneas espectrales se ven más tenues que otras? Ajuste la abertura de la rejilla del colimador y describa que sucede con el ancho e intensidad de las líneas espectrales.

Actividad 2: Lineas espectrales de H, He y constante de Rydberg

1. Apague la lámpara de descarga y espere a que el tubo de Hg se enfrié. Sin mover ningún elemento del montaje, retire el tubo de Hg usando los guantes desechables y coloque el de Helio (He). Realice las mediciones con la regla e identifique las líneas espectrales del nuevo elemento. Usando el ajuste obtenido en el punto 2), determine la longitud de onda de estas líneas espectrales. Compárelas con las longitudes de onda reales y obtenga un porcentaje de error. ¿Qué tan bueno es el ajuste que realizó? ¿Qué podría hacer para mejorarlo?
2. Repita el punto anterior para el tubo que contiene Hidrógeno. Usando los datos de longitud de onda obtenidos del ajuste y sabiendo las transiciones de estado que generan dicha linea espectral, calcule la constante de Rydberg.

Actividad 3: Lineas espectrales de los gases nobles Ne, Ar, Kr y Xe

1. Coloque las lamparas de Neón, Argón, Kriptón y Xenón y mida las líneas espectrales con mayor intensidad. Podría disminuir el tamaño de la rendija del colimador para identificar tales líneas. Con el ajuste realizado en la actividad 2, calcule las longitudes de onda respectiva y compárelas con las reportadas en los espectros de cada elemento.

Ejercicio 2

1. ¿En qué magnitud cree que afectan las siguientes variables en el experimento? -

- * Impurezas en el gas contenido en los tubos
 - * Temperatura del gas
 - * Apertura de la rendija del colimador
 - * Errores de paralaje
2. ¿Cómo podría (si es posible) minimizar los efectos de las variables mencionadas en el punto anterior?

Bibliografía

- [1] B. P. Abbott y col. "Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger". En: *Phys. Rev. Lett.* 116 (6 feb. de 2016), pág. 061102. doi: [10.1103/PhysRevLett.116.061102](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.061102).
- [2] Inc. David A. Van Baak; TeachSpin. *TWO-SLIT INTERFERENCE ONE PHOTON AT A TIME* The Essential Quantum Paradox, *Instruction Manual, TWS1-A*. 2495 Main Street Suite 409 Buffalo NY, 2013.
- [3] R.M. Eisberg y R. Resnick. *Quantum physics of atoms, molecules, solids, nuclei, and particles*. Quantum Physics of Atoms, Molecules, Solids, Nuclei and Particles. Wiley, 1985. ISBN: 9780471873730. URL: <https://books.google.co.in/books?id=mv5QAAAAMAAJ>.
- [4] J J Fendley. "Measurement of refractive index using a Michelson interferometer". En: *Physics Education* 17.5 (1982), pág. 209. URL: <http://stacks.iop.org/0031-9120/17/i=5/a=001>.
- [5] Eugene Hecht. *Optics*. Addison-Wesley, 2002. ISBN: 0321188780,9780321188786.
- [6] John David Jackson. *Classical electrodynamics*. 3rd ed. New York, NY: Wiley, 1999. ISBN: 9780471309321. URL: <http://cdsweb.cern.ch/record/490457>.
- [7] Peter J. Mohr, David B. Newell y Barry N. Taylor. "CODATA Recommended Values of the Fundamental Physical Constants: 2014". En: (2015). arXiv: [1507.07956](https://arxiv.org/abs/1507.07956).
- [8] G.S. Monk. *Light: principles and experiments*. Dover books on physics and mathematical physics. Dover Publications, 1963. URL: https://books.google.com/books?id=lE1gTN%5C_B8gIC.
- [9] Deepak N.Iver. "A Michelson interferometric technique for measuring refractive index of sodium zinc tellurite glasses". Theses and Dissertations. Lehigh University, 2006. URL: <http://preserve.lehigh.edu/etd/954/>.
- [10] *Narrow-beam tube Pair of Helmholtz coils*. URL: <https://www.phywe.com/en/phywe-narrow-beam-tube.html#tabs4>.
- [11] Andy Neely y Robert Redwine. "Study Guide for Physics II". En: cap. 14. URL: <http://web.mit.edu/8.02t/www/materials/StudyGuide/guide14.pdf>.
- [12] Florian Scheck. *Quantum physics*. Springer, 2007.
- [13] J.J. Thomson. "Cathode Rays". En: *Philosophical Magazine* 44.293 (1897). URL: <http://web.lemoyne.edu/~GIUNTA/thomson1897.html>.