

*Benemérita Universidad Autónoma
de Zacatecas*

Unidad Académica de Física

**Manual de prácticas del Laboratorio
de Óptica**

Elaborado por: Rumen Ivanov Tsonchev

.....

Vigente desde:.....

Índice de Prácticas

- Práctica 1. Leyes de reflexión y refracción
- Práctica 2. Refractómetro de Abbe
- Práctica 3. Lentes delgadas
- Práctica 4. Polarización de la luz y ángulo de Bruster
- Práctica 5. Actividad óptica
- Práctica 6. Difracción
- Práctica 7. La difracción de un cabello.
- Práctica 8. Rejillas de difracción
- Práctica 9. Propiedades ópticas de láser
- Práctica 10. Interferómetro de Michelson
- Práctica 11. Interferómetro de Fabry-Perot.
- Práctica 12. Fotoelasticidad

Práctica 1. Leyes de la reflexión y refracción de la luz.

Objetivos:

El estudiante,

Se familiarizará y observará con el fin de caracterizar cualitativa y cuantitativamente los fenómenos de la reflexión, la refracción, y la reflexión total interna de la luz.

Llevará a cabo el procedimiento experimental que le permita medir ángulos de incidencia, reflexión y refracción de los haces de radiación utilizados en la práctica.

Comprobará la validez de la ley de la refracción mediante la determinación experimental de los índices de refracción correspondientes a los materiales empleados en la práctica y efectuará el reporte de todas las magnitudes involucradas en el experimento con el análisis pertinente de los errores.

Introducción teórica:

Además de la conocida ley de la propagación rectilínea de la luz, hecho experimental totalmente válido dentro de las aproximaciones de la óptica geométrica, otro importante resultado de ésta es la llamada Ley de la reflexión, la cual establece que cuando un rayo de luz es reflejado por una superficie plana, el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión, como se muestra en la Fig. 1:

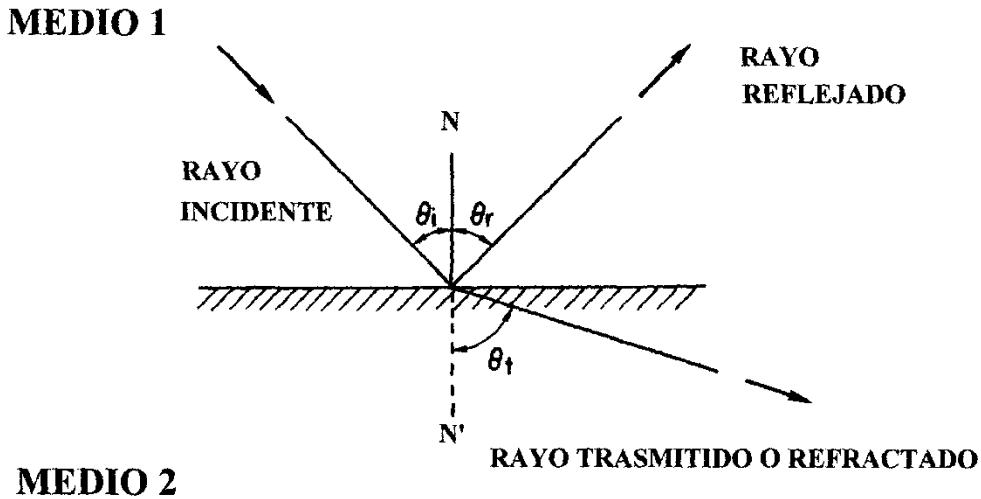


Fig. 1 Representación esquemática de las Leyes de la Óptica Geométrica.

es decir,

De la figura anterior se observa que coexisten en el mismo plano, el rayo incidente, el reflejado y el refractado o transmitido, lo cual no sólo desde el punto de vista teórico valida los resultados ya discutidos al estudiar el comportamiento de las ondas al arribar a una interfaz o frontera entre dos medios, sino que desde el punto de vista experimental sugiere las zonas de búsqueda de los diferentes rayos según sea el ejercicio que se realice.

La relación cuantitativa entre el ángulo de incidencia y el de refracción o trasmisión se expresa mediante la Ley de Snell o ley de la refracción, según sigue: Si llamamos n_1 al índice de refracción del medio del cual procede el rayo luminoso, (recuerde que este índice expresa la relación entre la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de fase de la luz en el medio) y n_2 a dicha magnitud asociada con el segundo medio, entonces se cumple que:

Si en lugar de utilizar los índices de refracción absolutos, empleamos el índice de refracción relativo del segundo medio con respecto al primero, la expresión (2) puede reescribirse como:

y ahora, n_{21} representa la relación entre las velocidades de fase de la luz de los medios primero y segundo respectivamente.

Es conveniente aclarar que el índice de refracción, para cualquier medio excepto el vacío, depende de la frecuencia de la radiación, de la temperatura, densidad, etc., de la sustancia a través de la cual se propaga y en el caso de que sea anisótropa, dependerá también de la dirección de propagación y de su polarización.

Cuando un haz luminoso se propaga desde un medio más denso e incide sobre uno de menor densidad, como se muestra en la Fig. 2, la Ley de Snell estipula que el rayo transmitido se aleje de la normal, por tanto, tiene sentido determinar el ángulo de incidencia específico para el cual se cumple que el rayo refractado sale justamente a lo largo de la superficie de separación entre ambos medios. Este ángulo de incidencia recibe el nombre de ángulo crítico o de reflexión total.

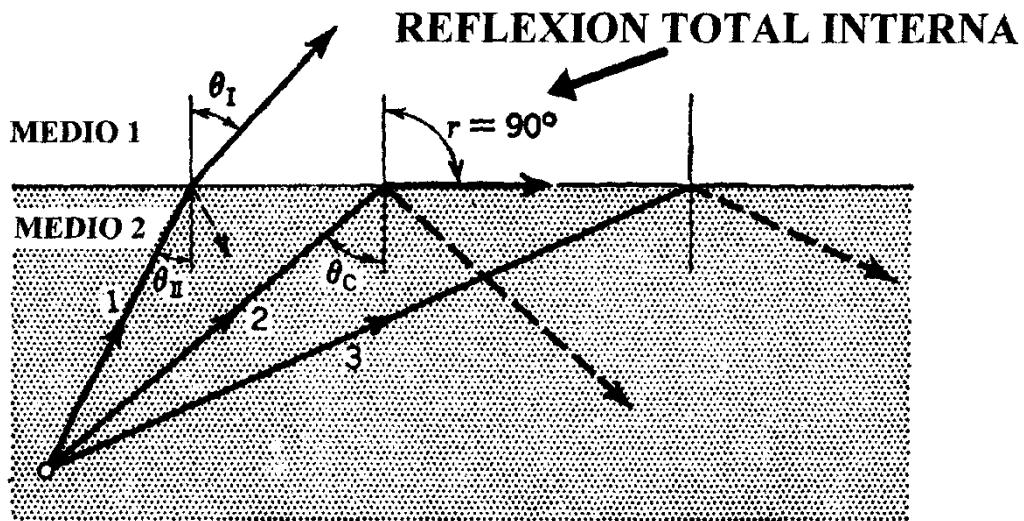


Fig. 2 Representación del fenómeno de reflexión total interna. Nótese la necesidad de definir el ángulo crítico.

Material y equipo:

Para llevar a cabo el experimento utilizamos los siguientes materiales:

1. fuente de láser de He-Ne de 0.5 [mW]
2. banco óptico
3. mesita óptica giratoria
4. transportador angular
5. portacomponentes estándar
6. portacomponentes especial
7. abertura rectangular
8. pantalla con escala milimétrica
9. espejo plano
10. placa de acrílico
11. calibrador con vernier

Experimento I: Ley de la reflexión

Ubique la fuente de luz a la izquierda del banco óptico de forma tal que el aditamento de translación angular quede a 25 cm aproximadamente del borde de la fuente, garantice el paralelismo entre todos los aditamentos, el haz de luz y el banco óptico.

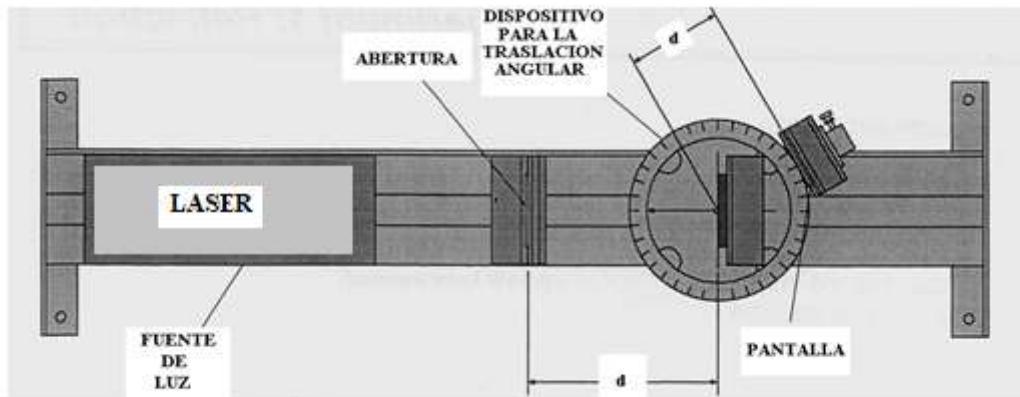


Fig. 3 Representación esquemática del montaje experimental requerido.

Ubique la abertura rectangular (aditamento) a unos 6.5 cm del dispositivo de translación angular. Con la pantalla graduada centre y mida la imagen de la ranura. Reporte convenientemente la medición.

Utilice un espejo plano para analizar la relación entre el ángulo de incidencia y de reflexión para diferentes valores del ángulo de incidencia. Repita estos pasos utilizando la placa de vidrio y acrílico. Concluya a la luz de estos cambios si existe algún incumplimiento de la tendencia observada cuando utilizó el espejo plano. Analice dentro de los límites experimentales que supone su puesto de trabajo, el cumplimiento o no de la Ley de la Reflexión.

Discuta, utilizando la descripción por medio de rayos, las razones por las cuales al emplear vidrio y acrílico obtiene varias imágenes reflejadas. Exprese su criterio para la selección de una de estas imágenes.

Experimento II: Ley de la Refracción.

Ubique la fuente de luz a la izquierda del banco óptico de forma tal que el aditamento de translación angular quede a 25 cm aproximadamente del borde de la fuente, garantice el paralelismo entre todos los aditamentos, el haz de luz y el banco óptico. Véase el montaje experimental que aparece en la Fig. 3.

Ubique la abertura rectangular (aditamento) a unos 6.5 cm del dispositivo de translación angular. Con la pantalla graduada centre y mida la imagen de la ranura.

Utilice una placa de vidrio de caras planas paralelas para analizar la relación entre el ángulo de incidencia y de refracción para diferentes valores del ángulo de incidencia. Repite estos pasos utilizando la placa de caras paralelas de acrílico. Concluya a la luz de estos cambios si existe algún incumplimiento de la tendencia observada cuando utilizó la placa de vidrio.

En este punto el profesor realizará demostraciones sobre el fenómeno de la reflexión total interna de lo que se te plantearán algunas preguntas.

Grafique el comportamiento del ángulo de incidencia en función del ángulo de refracción. Analice la gráfica y obtenga la relación para la Ley de la Refracción.

Determine el índice de refracción para una placa de caras paralelas de vidrio y otra de acrílico, utilizando alguno de los procedimientos experimentales a los que hace referencia la Fig. 4.

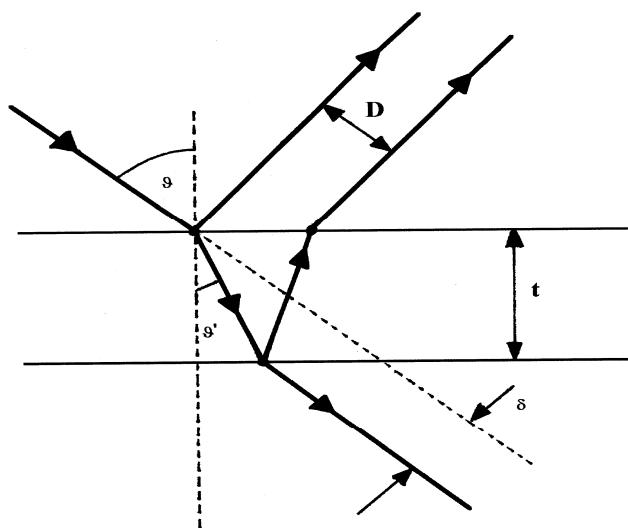


Fig. 4 Refracción de la luz en una placa de material transparente.

Primer procedimiento.

Mida t, θ y d.

Aplique la relación:

$$\tan \theta' = \frac{d}{t}$$

Aplique la Ley de Snell para determinar n.

Segundo procedimiento.

Mida t, θ y δ .

$$(\cos \theta) (\tan \theta') = (\sin \theta) - \frac{d}{t}$$

Aplique la relación:

Aplique la Ley de Snell para determinar n.

Tercer procedimiento.

Mida t, θ y D.

Aplique la relación:

$$\tan \theta' = \frac{D}{(2 t \cos \theta)}$$

Aplique la Ley de Snell para determinar n.

De la figura se deduce el significado de cada uno de los símbolos. En este experimento se determinará el índice de refracción aplicando el tercer método, los otros dos se proporcionan como información. Este método consiste en observar el reflejo de imágenes en la lámina de caras planas paralelas. Debe haber por lo menos dos imágenes reflejadas.

Para efectuar las mediciones correspondientes proceda del siguiente modo:

1. Coloque la fuente de radiación, (evalúe la conveniencia de usar una fuente de radiación láser), en el extremo izquierdo del banco óptico y el aditamento de translación angular a 25 cm de él, garantice el paralelismo entre todos los

- aditamentos, el haz de luz y el banco óptico. Haga un ajuste cuidadoso de las partes con que cuenta para realizar el experimento.
2. Sujete la placa de vidrio al portador de componentes del aditamento de traslación angular de tal forma que la superficie de la placa coincida con la línea perpendicular de la base móvil.
 3. Gire la base móvil los siguientes ángulos: 25° , 30° , 35° , 40° , 45° , 50° , 55° , y 60° , realice las mediciones y calcule para cada una de ellas el valor de n .
 4. Repita el procedimiento con la placa plano paralela de acrílico y calcule el valor del índice de refracción.
 5. Realice la deducción de la ecuación de trabajo.

Presentación de resultados.

1. Para cada experimento haga un diagrama y acompañelo de una breve explicación.
2. Para cada conjunto de mediciones, discuta cualitativamente su comportamiento.
3. Adjunte todas las tablas y procesamientos pertinentes.
4. Grafique los resultados en los casos requeridos.
5. Reporte las magnitudes solicitadas con su error y un análisis de sus fuentes así como los procedimientos que siguió o seguiría para minimizarlos.

Cuestionario

1. ¿Cómo se definen los ángulos de incidencia, reflexión y transmisión?
2. ¿Qué es el índice de refracción de una sustancia y cuáles son sus unidades en el SI?
3. ¿Qué establece la ley de Snell?
4. ¿En qué consiste el fenómeno de reflexión interna total?
5. ¿Qué se entiende por “ángulo crítico”?

Bibliografía.

1. P. M. Fishbane y otros. Física para Ciencias e Ingeniería. Volumen II. Editorial Prentice – Hall Hispanoamericana, S.A.
A. Cromer. Física en la Ciencia y en la Industria. Editorial Reverté, S.A.
2. R. A. Serway. Física. Tomo II. Editorial McGraw – Hill.
3. R. L. Soto Morán y otros. Análisis y Procesamiento de los Datos Experimentales. Facultad de Física Universidad de la Habana. Cuba. 1999.

4. Hecht E.; “ÓPTICA”. Editorial Adisson –Wesley Iberoamericana. 3^a. Edición.España, 2000.♦
5. Resnick R., Halliday D.y Krane K.S.; “FÍSICA” Vol. I. Editorial C.E.C.S.A. 3^a edición. México, 1997.

Práctica 2. Refractómetro de Abbe

Objetivos:

El estudiante

1. Aprenderá el principio de funcionamiento del refractómetro
2. Aprenderá el método de medición con el refractómetro de Abbe

Introducción teórica:



El Refractómetro de Abbe se utiliza para medir índices de Refracción (nD) de líquidos que sean transparentes o translúcidos y sólidos siendo el uso más frecuente con líquidos transparentes. El Refractómetro lleva acoplado un sistema con termostato para regular la temperatura por medio de un baño de agua y una bomba.

El índice de refracción es una importante constante óptica en las sustancias, y pueden ser utilizadas para determinar el comportamiento óptico , pureza, concentración, etc. Es posible calcular el porcentaje de azúcar contenido en disoluciones de sacarosa en un rango de 0% a 95%, lo que se corresponde con un índice de refracción de 1,333 a 1,531.

Refractometría:

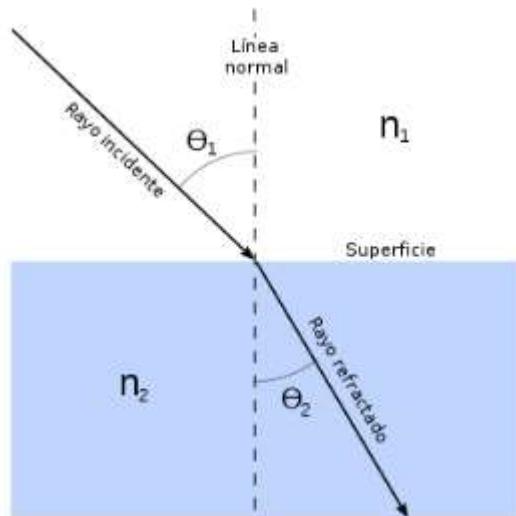
Cuando un rayo de luz llega a la superficie de separación entre dos medios distintos, parte de la luz se refleja y otra se refracta (entra en el interior del segundo medio), propagándose este último con un ángulo y una velocidad diferente al del primer medio. Estas dos magnitudes se pueden caracterizar mediante el índice de refracción, que es un valor característico para cada sustancia.

Los refractómetros pueden ser de distintos tipos pero la mayoría se basan en el mismo principio.

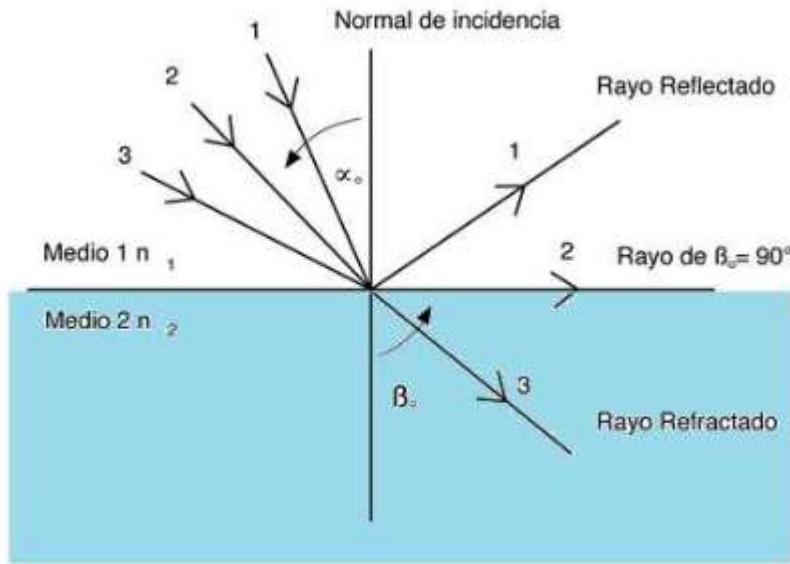
El principio básico de un Refractómetro está acorde con la siguiente Ley de Refracción:

$$n_1 \cdot \operatorname{sen} \theta_1 = n_2 \cdot \operatorname{sen} \theta_2$$

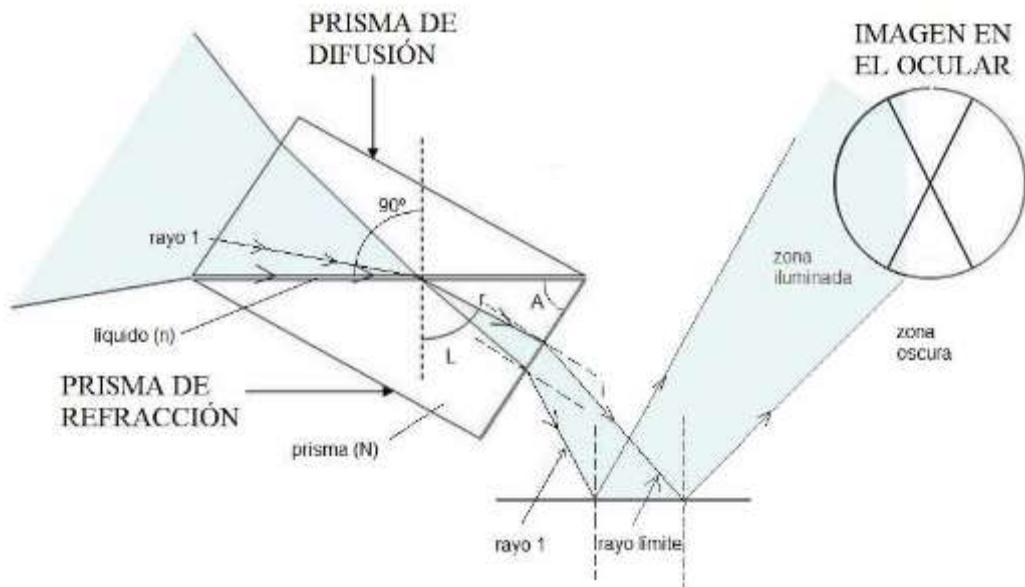
Siendo n_1 y n_2 los índices de refracción del medio a ambos lados del límite entre medios distintos, donde Θ_1 es el ángulo incidente y Θ_2 el ángulo de refracción. Cuando un haz luminoso pasa de un medio ópticamente más denso a otro ópticamente más ligero, el ángulo de incidencia es menor que el ángulo de refracción.



Sean tres rayos de radiación monocromática que atraviesan un medio de diferente densidad con ángulos de incidencia distintos. Dos de estos rayos se refractan y producen iluminación al otro lado del medio. Sin embargo, el tercer rayo y todos los demás con ángulo de incidencia igual o mayor que Φ_2 recibe el nombre de rayo crítico y el ángulo que forma con la normal, ángulo crítico:



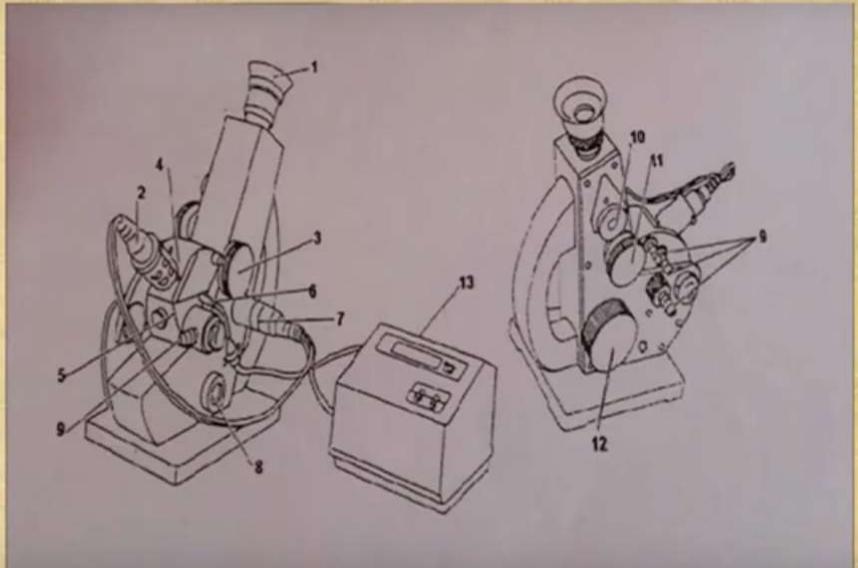
Se utiliza el rayo crítico para medir el índice de refracción de muestras desconocidas ya que el ángulo crítico es diferente para cada sustancia. El índice de refracción depende de la longitud de onda de la radiación incidente y la temperatura a la que se efectúa la medición, por lo que conviene en referir las lecturas a las efectuadas iluminando la muestra a medir con la luz procedente de la emisión de la línea D del sodio y a 20 °C. Otros equipos cuya fuente luminosa no es una lámpara de sodio, sino luz continua (tungsteno) o luz solar disponen de un sistema compensador de longitudes de onda para seleccionar la longitud de onda más adecuada.



Partes

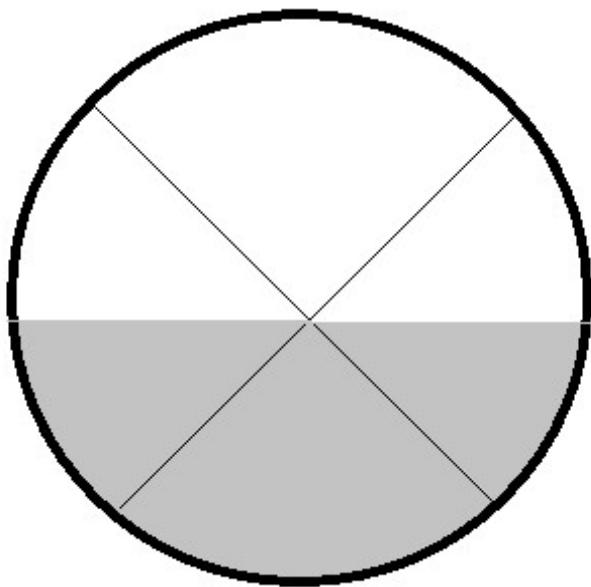
1. Ocular
2. Ensamble de iluminación de la muestra
3. Perilla de apertura del prisma.
4. Prisma secundario
5. Prisma principal
6. Termistor
7. Ensamble de iluminación de la escala
8. Caja desecadora
9. Conexiones de entrada y salida de agua para el control de temperatura
10. Tornillo de ajuste
11. Perilla de compensación de color
12. Perilla de medición

13. TERMOMETRO



Procedimiento de medición:

1. Colocar un par de gotas de la sustancia en el prisma principal.
2. Se cierra el prisma secundario y se observa a través del ocular la medida del índice de refracción.
3. ENFOCAR: observando a través del objetivo de enfoque tendremos en campo la retícula. Se gira cuidadosamente la rueda de enfoque hasta que se con siga una clara línea de demarcación entre los campos claro/oscuro.
4. Observa por el ocular, gira la perilla de compensación de color hasta que aparezca una línea clara y definida en el campo de visión
5. AJUSTE DE CAMPOS: una vez delimitados los dos campos claro y oscuro giraremos lentamente hasta conseguir que la separación entre campos coincida, exactamente, con el punto central delimitado por dos diagonales, tal y como se puede observar en el dibujo:



6. LECTURA: observando a través del ocular de aumento se efectúa la lectura del índice de refracción hasta la cuarta cifra.



7. Tras la medición limpiar perfectamente con éter o alcohol y con ayuda del algodón los prismas.

Material y equipo:

Para llevar a cabo el experimento utilizamos los siguientes materiales:

1. Refractómetro ABBE,
2. Goteros,
3. Agua destilada
4. Alcohol,
5. Diferentes líquidos y soluciones
6. Azúcar de caña,
7. Dosificador
8. Balanza
9. Servilletas para limpiar.

Experimento I: Medición del índice de refracción de agua destilada y otros líquidos y soluciones

Usando el procedimiento de medición se hacen las mediciones. Los datos se ponen en una tabla.

Experimento II: Preparar la recta de calibración para la solución de azúcar con agua destilada

1. Se preparan soluciones de azúcar con agua destilada con las siguientes concentraciones C(%): 0% (agua); 5%; 10%; 15%; 20%; 25%; 30% y una solución con concentración desconocida C_x.
2. Se miden los índices de refracción para cada solución.
3. Los datos se ponen en una tabla y se dibuja una recta $n = f(C\%)$, donde n es el índice de refracción de cada solución. Se determinan los coeficientes A y B en esta función lineal:

$$n = A * C\% + B$$

4. Se aplica esta función lineal para la solución con concentración desconocida y se despeja el valor de C_x.

Cuestionario

1. ¿Qué parámetros afectan el índice de refracción?
2. Realice un cuadro comparativo entre el índice de refracción obtenido en el laboratorio y el reportado en la literatura, si existe diferencia, explique el porqué.
3. Mencione cinco aplicaciones del uso del refractómetro en la ciencia y en la industria

Bibliografía.

1. <https://www.monografias.com/trabajos59/refractometria/refractometria2.shtml>
2. <https://www.equiposylaboratorio.com/portal/articulo-ampliado/refractometria>
3. <https://www.kruess.com/en/produkt-kategorie/refractometers/abbe-refractometers/>
4. <http://www.ictsl.net/productos/01d63694a80f7db0d/refractometrodesobremesa-abbe320lan.html>
5. <https://www.youtube.com/watch?v=7eZUiIGe6wM>

Práctica 3. Lentes delgadas

Objetivos:

El estudiante,

1. Determinará la distancia focal para diferentes tipos de lentes y combinaciones de éstos.
2. Reportará los resultados en consecuencia con el tratamiento de los errores experimentales pertinente.

Introducción teórica:

La dirección que sigue el haz de radiación cuando atraviesa un medio transparente, está determinada por la Ley de la refracción; esta es la razón por la cual las lentes convergentes, las divergentes y las combinaciones de éstas poseen características refractivas bien diferentes, como se muestra en la Fig. 1.

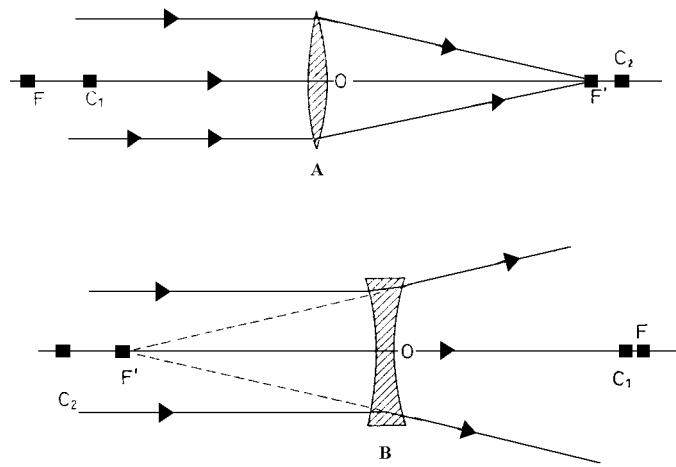


Fig. 1 Rayos incidentes y refractados para lentes convergentes y divergentes respectivamente.

La recta C_1OC_2 , que une los centros de curvatura de las dos caras esféricas de la lente recibe el nombre de eje principal y el punto F' , para el cual convergen los rayos, en el caso de la lente convergente o parece que divergen, si se trata de una lente divergente, es el segundo foco principal. Por extensión, el punto F recibe el nombre de primer foco principal y la distancia OF , numéricamente igual a OF' , será la distancia focal de la lente.

Si nos referimos al contenido de la Fig. 2, es inmediato que un objeto ubicado en la posición marcada como O , producirá una imagen a la que hemos llamado I . Estas posiciones o puntos específicos reciben el nombre de conjugados.

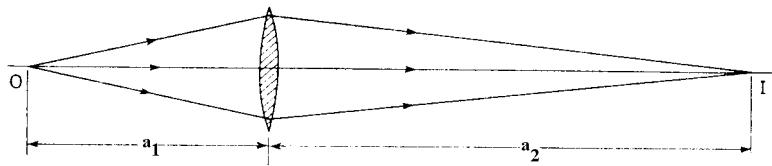


Fig. 2 Representación de los llamados puntos conjugados así como las distancias objeto e imagen respectivamente.

Basándonos en la propia Fig. 2 podemos hacer extensiva la relación funcional que establece el cálculo de la distancia focal de una lente, a otros dispositivos ópticos como los espejos, así, si se designa por a_1 la distancia al objeto, medida desde la lente, a_2 la respectiva distancia a la imagen, medida igualmente desde la lente, la distancia focal f , podrá determinarse según:

Como se apuntó, la expresión (1) es igualmente aplicable a todos los casos de refracción de la radiación en materiales transparentes, pero ello requiere la aplicación de un convenio de signos que posibilite catalogar de forma útil los resultados numéricos que se obtienen. El convenio de signos mencionado expresa que:

CONVENIO

1. Todas las distancias se miden desde la fuente.
 2. Se consideran positivas todas las distancias a los objetos e imágenes que sean reales.
 3. Se consideran negativas todas las distancias a los objetos e imágenes que sean virtuales.
 4. La distancia focal de una lente convexa se considera positiva mientras que la de una lente cóncava será negativa.

El tratamiento cuantitativo de las lentes y de los sistemas delgados o gruesos supone el uso de la magnitud amplificación o aumento lineal transversal, la cual expresa la relación que guarda el tamaño de la imagen al tamaño del objeto. Por consiguiente, en consonancia con el convenio de signos apuntado, valores positivos del aumento lateral corresponden a imágenes derechas, mientras que un valor negativo implicará una imagen invertida; ello, si se adopta como definición de la magnitud citada la siguiente:

Si dos lentes delgadas se ponen en contacto, conocidas las distancias focales respectivas, es decir, f_1 y f_2 , la combinación de éstas se comporta como una lente simple de distancia focal f dada por:

expresión que puede ser utilizada sin restricciones relativas al número de lentes delgadas en contacto, siempre que pueda seguir siendo considerado despreciable el espesor que alcanza la lente compuesta.

La distancia focal de una lente también puede ser caracterizada mediante los radios de curvatura de cada cara y el valor del índice de refracción del material usado en su construcción, así,

donde n_{21} es el índice de refracción relativo (material de la lente/medio circundante), r_1 y r_2 , los radios de curvatura de cada cara de la lente y f , su distancia focal. Conviene aclarar se considerará el radio de curvatura positivo si dicha cara es convexa al medio, mientras para una cara cóncava al medio que rodea la lente, el radio de curvatura se tomará por convenio, siempre negativo.

Material y equipo:

Para llevar a cabo el experimento utilizamos los siguientes materiales:

1. Riel óptico,
2. Series de lentes convergente y divergentes,
3. Portalentes,
4. Flexómetro,
5. Pantalla,
6. Fuente de luz incandescente.

Experimento I: Determinación de la distancia focal de una lente convexa.

La lente, la fuente de imagen y la pantalla se ponen sobre el riel óptico según la Fig.2

Moviendo la lente, se busca una imagen nítida en la pantalla.

Se miden los valores de a_1 y a_2 (Fig.2)

Usando la ecuación (1) se despeja el valor de la distancia focal de la lente.

Esto se repite 10 veces para diferentes valores de a_1 y a_2 . Luego se realiza propagación de errores para determinar el valor y el error experimental para la distancia focal de la lente.

Experimento II: Método del desplazamiento.

De acuerdo con la Fig. 3, que representa un esquema del banco óptico que utilizará durante esta práctica de laboratorio, si se coloca la lente en

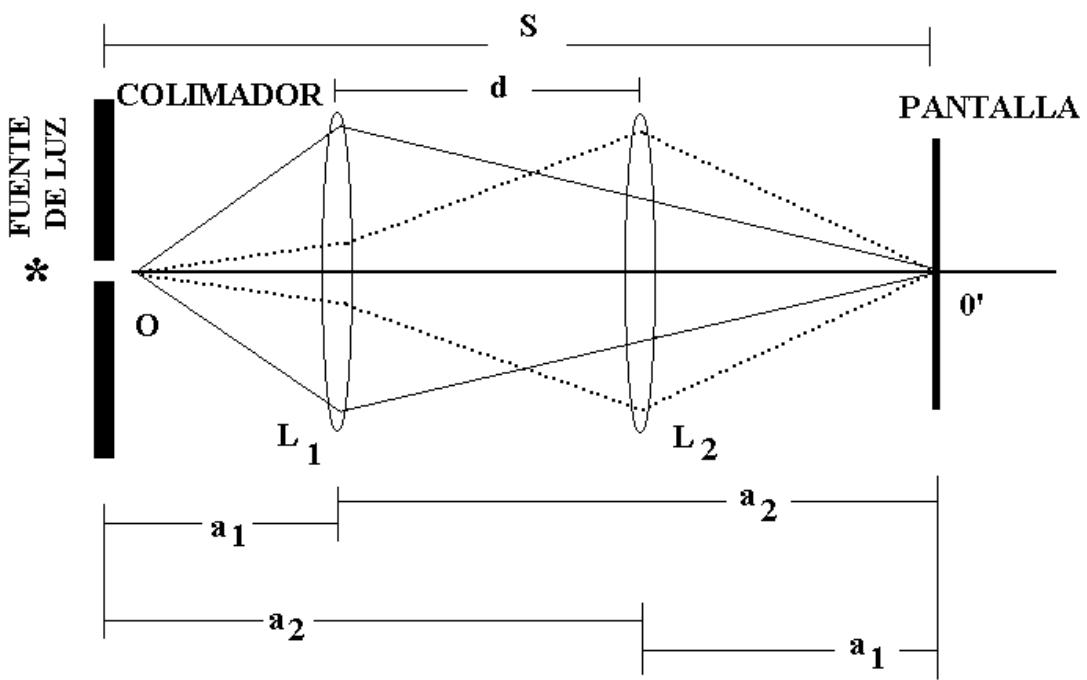


Fig. 3 Representación esquemática de la disposición para las lentes, pantalla y fuente luz para la aplicación del método del desplazamiento.

la posición marcada como L_1 , se producirá una imagen del punto objeto O en O' . Ahora bien, como el objeto y su imagen son intercambiables, si cambiamos la posición de la lente hasta L_2 , se formará entonces una segunda imagen en O' . Puesto que en esta segunda posición las distancias a_1 y a_2 están intercambiadas y según la propia Fig. 3, la distancia entre O y O' es S, mientras que la separación entre las posiciones L_1 y L_2 es d, entonces tendremos que:

luego,

de modo que utilizando (1), quedará:

y de aquí, despejando f , tendremos:

De (8), queda claro que al medir S y d , podrá calcularse de inmediato la distancia focal de la lente.

Colóquese la fuente luminosa en la posición cero de la escala del banco óptico (200 mm). Fíjese el retículo en forma de flecha (objeto) a la fuente de iluminación (este se moverá para ajustarlo de acuerdo a las circunstancias). Sitúa la lente que será caracterizada a 15 cm del objeto. Muévase la pantalla de proyección desde el extremo del banco óptico hacia la lente hasta obtener una imagen nítida. Si la pantalla queda a 20 o menos centímetros de la lente colóquese la pantalla en la posición 25 cm. Si la distancia es mayor colóquese en la posición 50 cm (los 25 y 50 cm medidos desde la posición cero de la escala). Con este proceder se garantiza que la separación entre el objeto y la pantalla sea mayor que 4 veces la distancia focal de la lente, bajo estas condiciones iniciales del montaje experimental se determinan dos posiciones de la lente que produzcan una imagen nítida sobre la pantalla.

Anótese la distancia S de la pantalla al objeto. Colóquese la lente lo más cerca posible del objeto y desplácese alejándose de este hasta obtener una imagen nítida en la pantalla.

Anótese la distancia a_1 de la lente al objeto, continúe desplazando la lente hacia la pantalla hasta que vuelva a aparecer otra imagen nítida del objeto. Si la imagen es muy brillante

puede formarse un resplandor que dificulta la determinación de esta posición. En tal caso desvíese la dirección del haz luminoso de tal manera que no incida sobre la lente. Determíñese la distancia a_2 de la lente al objeto y calcúlese la distancia d entre las posiciones L_1 y L_2 .

Para cada posición, analice cuántas mediciones debe realizar considerando apropiadamente el error instrumental en el sistema, así como los errores sistemáticos en la determinación de las distancias, debido a los espesores de los marcos y soportes.

Reporte la distancia focal promedio obtenida, su error total y la discrepancia porcentual con lo reportado por el fabricante.

Grafique $(S^2 - d^2)$ en función de S . A partir de los resultados del procesamiento gráfico anterior, reporte igualmente el valor de la distancia focal de la lente y compare con lo obtenido analíticamente.

Experimento III: Determinación de la distancia focal de una lente cóncava

Colóquese la fuente luminosa en la posición cero de la escala del banco óptico (200 mm). Sitúa la lente que será caracterizada en un portador de componentes y colócalo en la posición 4 cm.

En una hoja de papel trácese un círculo de igual diámetro que la lente y otro concéntrico de doble diámetro y fíjese a la pantalla.

Coloca la pantalla frente a la lente y muévela hasta un posición en que el círculo luminoso proyectado sobre la pantalla sea de las dimensiones del circulo mayor marcado en la pantalla.

Realiza los ajustes correspondientes para que se cumplan las condiciones anteriores y anota la distancia de la lente a la pantalla a la cual se cumplen dichas condiciones .

Analiza cuantas mediciones debes realizar considerando apropiadamente el error instrumental en el sistema, así como los errores sistemáticos debidos a los espesores de los

marcos y soportes. Reporta la distancia focal promedio obtenida, su error total y la discrepancia porcentual con lo reportado por el fabricante.

Presentación de resultados.

Para cada experimento haga un diagrama y acompañelo de una breve explicación.

Para cada conjunto de mediciones, discuta cualitativamente su comportamiento.

Adjunte todas las tablas y procesamientos pertinentes.

Grafique los resultados en el caso que proceda.

Reporte las magnitudes solicitadas con su error y un análisis de sus fuentes así como los procedimientos que siguió o seguiría para minimizarlos.

En todos los casos, compare sus resultados con los que le suministrará el profesor, a fin de que pueda analizar porcentualmente las discrepancias.

Cuestionario

1. ¿Qué se entiende por “imagen” de una fuente puntual?
2. ¿Cuál es la diferencia entre una imagen real y una imagen virtual?
5. ¿Qué relación guardan entre si las distancias focales objeto e imagen, en el caso de una lente delgada?
6. ¿Cuál es la forma gaussiana de la ecuación de las lentes delgadas?
7. ¿Cómo se define el “aumento lateral” de una imagen?

Bibliografía.

1. P. M. Fishbane y otros. Física para Ciencias e Ingeniería. Volumen II. Editorial Prentice – Hall Hispanoamericana, S.A.
A. Cromer. Física en la Ciencia y en la Industria. Editorial Reverté, S.A.
2. R. A. Serway. Física. Tomo II. Editorial McGraw – Hill.

3. R. L. Soto Morán y otros. Análisis y Procesamiento de los Datos Experimentales. Facultad de Física Universidad de la Habana. Cuba. 1999.
4. Hecht E.; “ÓPTICA”. Editorial Adisson –Wesley Iberoamericana. 3^a. Edición.España, 2000. •
5. Resnick R., Halliday D.y Krane K.S.; “FÍSICA” Vol. I. Editorial C.E.C.S.A. 3^a edición. México, 1997.

Práctica 4: Polarización de la luz y ángulo de Bruster

Objetivos:

El estudiante,

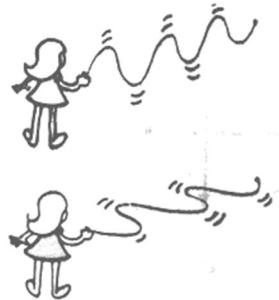
1. Comprobará si el haz del láser se encuentra polarizado.
2. Describirá el comportamiento de un haz de luz que atraviesa dos filtros polarizadores al girar uno de ellos.
3. Comprobará el cumplimiento de la Ley de Malus.
4. Determinará experimentalmente el ángulo de Brewster tanto para el vidrio como para el acrílico.

Introducción teórica:

La intensidad y la difracción constituyen la mejor evidencia de que la luz tiene naturaleza ondulatoria. En términos generales, el movimiento ondulatorio puede ser longitudinal o transversal. El sonido viaja en el aire en ondas longitudinales, de modo que el movimiento vibratorio se realiza a lo largo de la dirección de propagación de la onda. Si se sacude una cuerda tensa, el movimiento vibratorio que se propaga a lo largo de ella es perpendicular, o transversal. Tanto las ondas longitudinales como las transversales exhiben los efectos de interferencia y difracción. Entonces, ¿las ondas luminosas son longitudinales o

transversales? El hecho de que las ondas de luz puedan ser polarizadas demuestra que son transversales.

Si se sacude una cuerda hacia arriba y abajo, como en la Fig. 1, viaja una onda transversal a lo largo de la cuerda, en un plano. Decimos que una onda de este tipo está polarizada en un plano. Si la cuerda se sacude verticalmente, la onda está polarizada en un plano vertical. Si



la sacudimos a derecha e izquierda, producimos una onda polarizada en un plano horizontal.

Fig. 1

Un electrón vibrante emite una onda electromagnética que también está polarizada en un plano. La polarización en un plano será a lo largo de la dirección de la vibración de la carga. Entonces, un electrón que se acelera verticalmente emite luz que está polarizada verticalmente, en tanto que uno que se acelera en la horizontal emite luz polarizada horizontalmente Fig. 2.

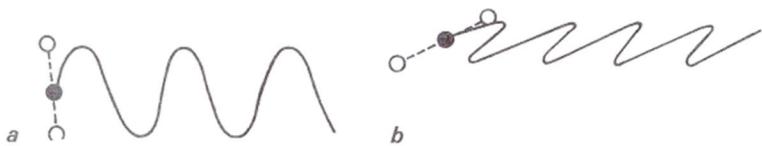


Fig. 2

Una fuente luminosa común, como un foco incandescente, una lámpara fluorescente, la llama de una vela o una lámpara de arco, emiten luz no polarizada. Esto se debe a que no existe una dirección preferida de vibración para las cargas aceleradas que producen la luz. El número de plano de vibración podría ser tan grande como el de las cargas aceleradas que los producen. En la Fig. 3a están representados unos cuantos planos. Podemos representar todos estos planos por medio de rectas radiales Fig. 3b o, de manera más sencilla, mediante vectores en dos direcciones mutuamente perpendiculares Fig. 3c, como si hubiéramos

resuelto todos los vectores de la fig. 3b en sus componentes horizontal y vertical. Esta representación esquemática más sencilla es una simbología útil. En este caso, el diagrama representa luz no polarizada; la polarizada se representaría con un solo vector.

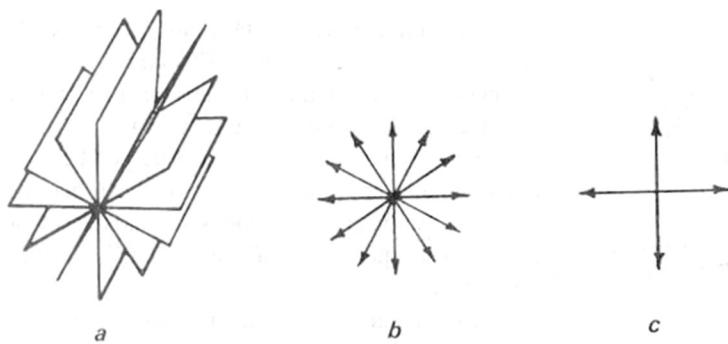


Fig. 3

Todos los cristales transparentes con forma natural no cúbica tienen la propiedad de transmitir la luz en dos planos mutuamente perpendiculares. Ciertos cristales no sólo producen dos haces internos polarizados, formando ángulos rectos entre sí, sino que también absorben intensamente uno de los haces, al mismo tiempo que transmiten el otro Fig. 4. La herapatita es uno de esos cristales comunes. Cristales microscópicos de herapatita se incrustan entre láminas de celulosa, alineándolos uniformemente, y se emplean en la fabricación de los filtros Polaroid.

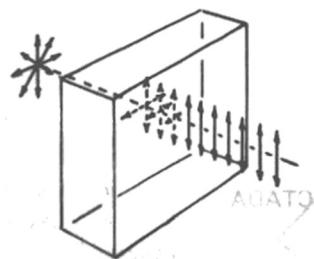


Fig. 4

Si el lector mira luz no polarizada a través de un filtro Polaroid, puede hacer girar éste en cualquier dirección y la luz no se alterará. Pero si está luz está polarizada, entonces conforme haga girar el filtro puede eliminar en forma progresiva más y más de la luz hasta que la bloquee por completo. Un Polaroid ideal transmitirá el 50 % de la luz no polarizada

que reciba; por supuesto, ese 50 % sale polarizado. Si se disponen dos Polaroid de modo que sus ejes de polarización queden alineados, la luz parará a través de los dos Fig. 5a. Si se disponen sus ejes de modo que formen ángulos rectos, nada de luz parará a través del par de filtros Fig. 5b. En realidad, pasarán algunas de las longitudes de onda más cortas, pero no en grado apreciable. Al emplear filtros Polaroid en pareja, como se ha descrito, el primero se llama polarizador y el segundo analizador.

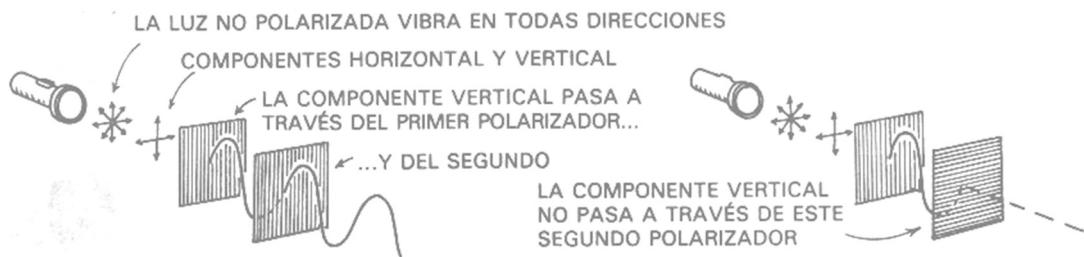


Fig. 5

Polarización por absorción selectiva

En la Fig. 6 se representa un haz de luz no polarizado que incide sobre la primera lámina polarizadora, donde el eje de transmisión está indicado por la recta que cruza al polarizador.

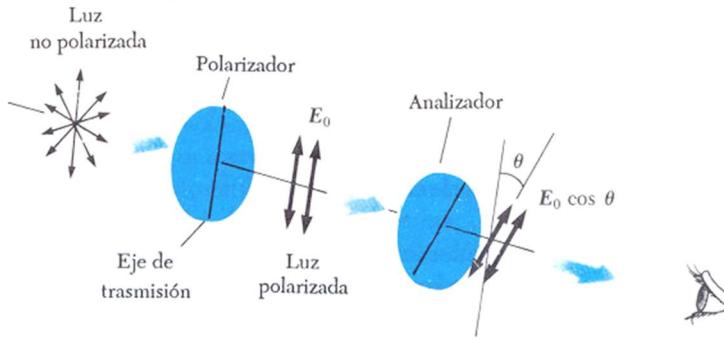


Fig. 6

La luz que sale de la lámina está verticalmente polarizada, como se muestra, donde el vector eléctrico transmitido es E_o . Una segunda lámina polarizadora, cuyo eje forma un ángulo θ con el eje del polarizador, intercepta este haz. La componente de E_o perpendicular al eje del analizador es completamente absorbida, y la componente de E_o paralela al eje del analizador es $E_o \cos \theta$ y como la intensidad transmitida varía con el cuadrado de la amplitud transmitida, se puede concluir que la intensidad varía con:

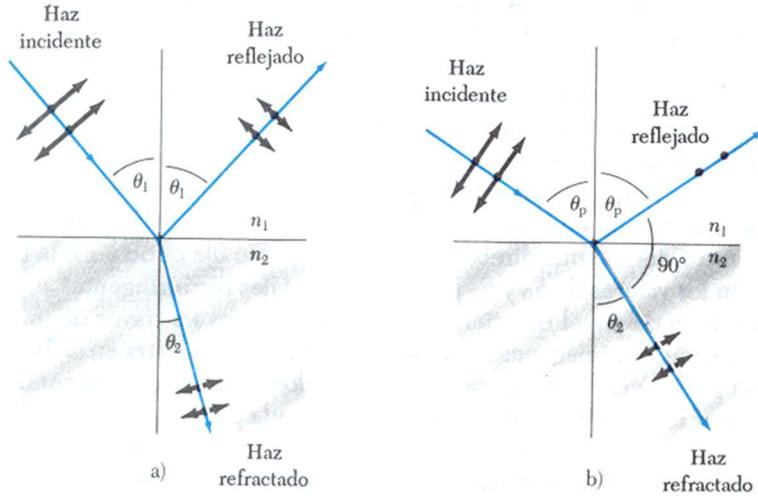
$$I = I_o \cos^2 \theta$$

donde I_o es la intensidad de la onda polarizada que incide sobre el analizador. Esta ecuación, conocida como ley de Malus, se aplica a dos placas polarizadoras cuyos ejes formen un ángulo θ entre sí. Nótese, en esta ecuación, que la intensidad transmitida es un máximo cuando los ejes de trasmisión son paralelos $\theta = 0\text{ ó }180^\circ$. Por otra parte, la intensidad transmitida es cero (completamente absorbida por el analizador) cuando los ejes de trasmisión son perpendiculares entre sí.

Polarización por reflexión

Otro método para obtener luz polarizada es por reflexión. Cuando un haz de luz no polarizado se refleja en una superficie, la luz reflejada está polarizada por completo, parcialmente polarizada o no polarizada, dependiendo del ángulo de incidencia. Si el ángulo de incidencia es 0° o 90° (ángulo normal o ángulo rasante), el haz reflejado no está polarizado. Sin embargo, para ángulos de incidencia intermedios, la luz reflejada tiene algún grado de polarización. Por este motivo, para un ángulo de incidencia en particular, la luz reflejada está totalmente polarizada.

Analicemos el haz de luz no polarizado que incide sobre una superficie como se muestra en la Fig. 7. El haz se puede describir por dos componentes del vector eléctrico, uno paralelo a la superficie (los puntos) y el otro perpendicular al primero y a la dirección de propagación (las flechas). Se ha encontrado que la componente paralela se refleja con mayor intensidad



que la otra componente, y esto da por resultado un haz parcialmente polarizado Fig. 7a. Por otra parte, el haz refractado también está polarizado en forma parcial.

Fig. 7

Ahora supongamos que el ángulo de incidencia θ_1 , se varía hasta que el ángulo entre los haces reflejado y el refractado sea 90° Fig. 7b. Para este ángulo de incidencia, los experimentos han demostrado que el haz está polarizado por completo con el vector eléctrico paralelo a la superficie, mientras que el haz refractado está parcialmente polarizado. El ángulo de incidencia para el cual ocurre esto se llama ángulo de polarización θ_p .

Una ecuación que relaciona al ángulo de polarización con el índice de refracción n de la sustancia reflectora se puede obtener utilizando la Fig. 7b. De esta figura, se puede ver que: $\theta_p + 90^\circ + \theta_2 = 180^\circ$, entonces:

$\theta_2 = 90^\circ - \theta_p$. Con la Ley de Snell, se obtiene:

$$n = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{\sin \theta_p}{\sin \theta_2}$$

Como $\sin \theta_2 = \sin(90^\circ - \theta_p) = \cos \theta_p$, así la ecuación para n queda como:

$$n = \frac{\sin \theta_p}{\cos \theta_p} = \tan \theta_p$$

Esta ecuación se llama Ley de Brewster, y el ángulo de polarización θ_p algunas veces se llama ángulo de Brewster.

Ya que n para una sustancia dada, varía con la longitud de onda, el ángulo de Brewster también varía con la longitud de onda.

La polarización por reflexión es un fenómeno común. La luz solar reflejada en el agua, el vidrio y la nieve está parcialmente polarizada. Si la superficie es horizontal, el vector eléctrico de la luz reflejada tendrá una componente horizontal intensa. Los lentes fabricados con material polarizadores reducen el brillo deslumbrante de la luz reflejada. Los ejes de trasmisión de los lentes están orientados verticalmente de tal forma que absorben la componente intensa de la luz reflejada.

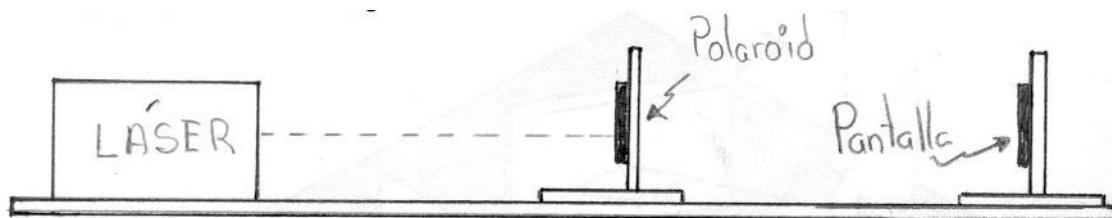
Material y equipo:

1. Banco óptico,
2. Laser (He –Ne o Diodo),
3. Polarizadores,
4. Celda fotovoltaica
5. Multímetro
6. Mesita óptica giratoria
7. Pantalla óptica

Procedimiento experimental:

Experimento I: Comprobación sobre la polarización del haz del láser.

Realiza el montaje indicado en la figura.



Gira el Polaroid y observa en la pantalla la intensidad de la imagen. Describe tus observaciones.

Verificar tus observaciones usando el fotómetro.

Experimento II: Comprobar el cumplimiento de la Ley de Malus.

En el montaje anterior coloca un segundo polaroid para que funcione como analizador

Ajusta el segundo polaroid de manera que el eje de trasmisión sea paralelo al eje del polarizador.

Coloca la pantalla a la izquierda del analizador y ajústala para que el haz golpee la pantalla.

Observa los cambios en la intensidad de la imagen cuando giras el analizador .

Regresando el montaje a las condiciones iniciales del experimento, quita la pantalla y coloca en su lugar el fotómetro. Ahora gira el analizador y realiza un registro de la intensidad del haz transmitido para varios ángulos (10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90). Para cada una de las mediciones efectuadas realiza el cálculo de la intensidad transmitida y compáralo con el determinado experimentalmente indicando la diferencia porcentual entre el valor teórico y el experimental.

Repite el procedimiento para los ángulos: -10, -20, -30, -40, -50, -60, -70, -80, -90.

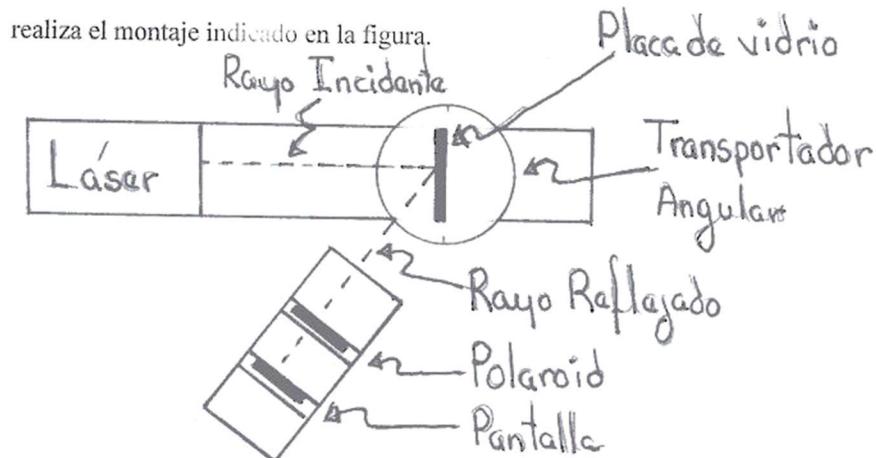
Realiza un gráfico de I contra $\cos^2 \theta$.

Ajusta el polarizador y el analizador de manera que no haya intensidad transmitida. Ahora coloca un tercer polaroid entre ellos de manera tal que el eje de trasmisión del tercero forme un ángulo de 45° con el primero. ¿Describe tus observaciones? Da una explicación a lo observado.

Repite el punto anterior pero en lugar del Polaroid coloca entre el polarizador y el analizador un tubo lleno de solución de azúcar. En función de los resultados obtenidos qué pregunta o preguntas te formularías, solicita a tu maestro lo que requieras para su comprobación experimental.

Experimento III: Determinación experimental del ángulo de Brewster para el vidrio y el acrílico

Realiza el montaje indicado en la figura.



Inicia el análisis 20° con respecto al eje perpendicular a la placa de vidrio.

Con la extensión del banco óptico busca el haz reflejado en la placa de vidrio, ajusta de tal forma que dicho haz incida en el Polaroid y golpee la pantalla. Ahora gira el Polaroid hasta encontrar la posición en que el haz de luz se bloquea por completo o en su defecto ocurra una disminución en la intensidad. Espera un momento y analiza lo que ocurre.

A partir de esta posición gira el transportador angular de 5° en 5° hasta encontrar el ángulo de reflexión para el cuál la polarización es total -Ángulo de Brewster-, en este caso ocurre un mínimo absoluto en la intensidad luminosa.

Sustituye la placa de vidrio por la de acrílico y determina experimentalmente el ángulo de Brewster para el acrílico.

Determina la diferencia porcentual entre los valores reportados por la literatura y los obtenidos experimentalmente.

Presentación de resultados.

Para cada experimento haga un diagrama y acompañelo de una breve explicación.

Para cada conjunto de mediciones, discuta cualitativamente su comportamiento.

Adjunte todas las tablas y procesamientos pertinentes.

Grafique los resultados en los casos requeridos.

Reporte las magnitudes solicitadas con su error y un análisis de sus fuentes así como los procedimientos que siguió o seguiría para minimizarlos.

Cuestionario

1. ¿En qué caso se dice que una onda electromagnética está polarizada linealmente?
2. ¿Qué tipo de polarización tiene la luz natural?
3. ¿En qué consiste un polarizador?
4. ¿Qué establece la ley de Malus?
5. ¿Cómo se explica la polarización de la luz por reflexión?
6. ¿Cómo se define el “ángulo de Brewster” o “ángulo de polarización”?

Bibliografía.

1. P. M. Fishbane y otros. Física para Ciencias e Ingeniería. Volumen II. Editorial Prentice – Hall Hispanoamericana, S.A.
A. Cromer. Física en la Ciencia y en la Industria. Editorial Reverté, S.A.
2. R. A. Serway. Física. Tomo II. Editorial McGraw – Hill.
3. R. L. Soto Morán y otros. Análisis y Procesamiento de los Datos Experimentales. Facultad de Física Universidad de la Habana. Cuba. 1999.
4. R. Resnick y D. Halliday. Tomo II. Editorial Continental, S. A.
5. H. Eugene y A. Zajac. Óptica. Addison Wesley Longman de México. México. 1998.

Práctica 5: Actividad óptica

Objetivos:

El estudiante debe:

1. Estudiar el efecto que tienen ciertas sustancias sobre la luz polarizada.
2. Encontrar la gráfica y ecuación de la concentración de azúcar en agua en función de la rotación, por medio de soluciones de azúcar de concentración conocida. Con esta ecuación determinará el valor de la rotación específica de la sacarosa.
3. Medir la concentración de azúcar en un refresco.

Introducción teórica:

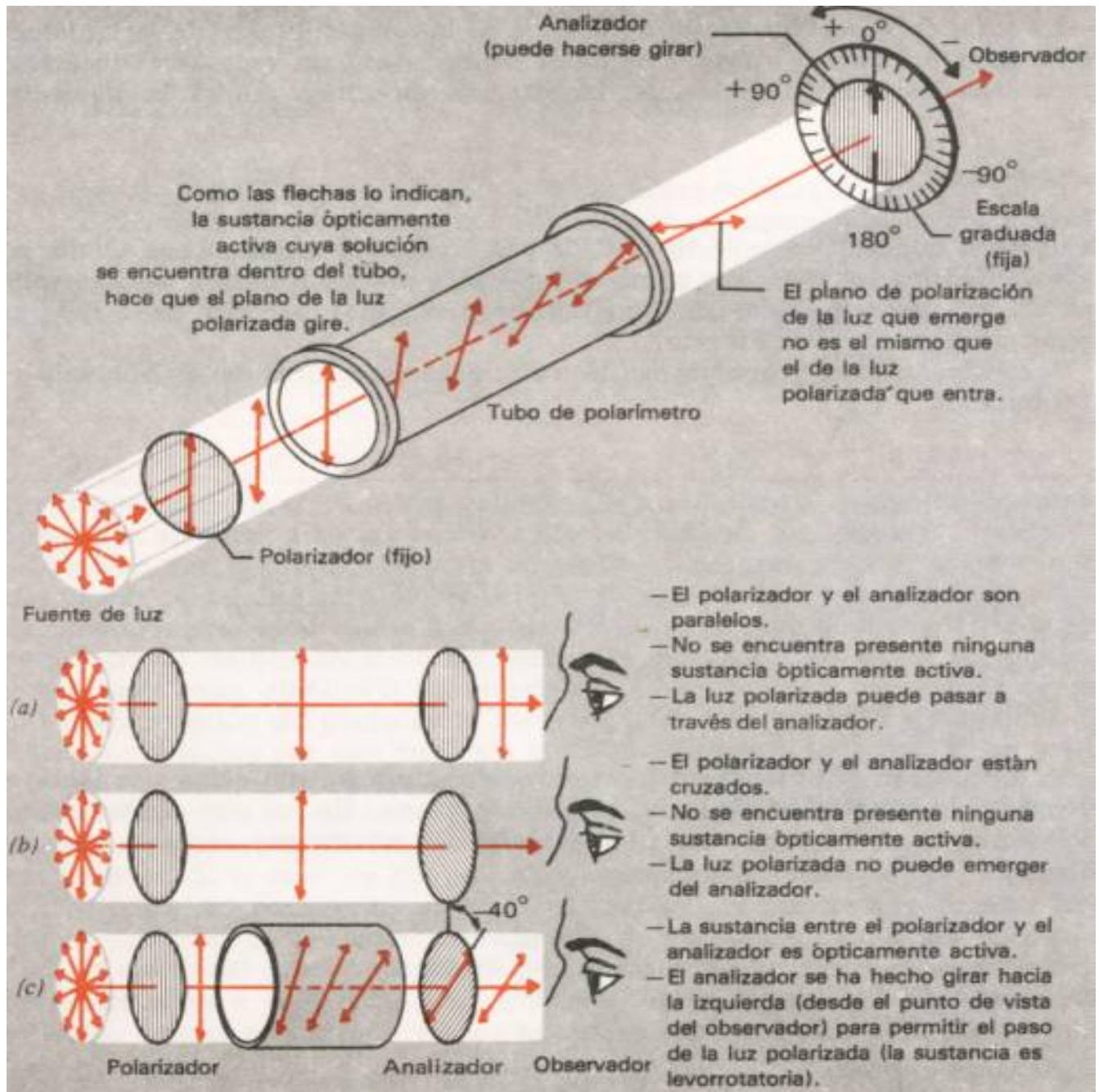
La actividad óptica es una propiedad de las moléculas quirales, por la cual modifican el plano de rotación de la luz polarizada. Una molécula quiral es ópticamente activa y hace girar el plano de polarización de la luz polarizada a la derecha o a la izquierda.

La actividad óptica se debe a la asimetría. Si la molécula tiene un átomo de carbono quiral, es asimétrica, y por lo tanto, la sustancia presentará actividad óptica.

Con todo, la presencia de un átomo de carbono quiral no es una condición necesaria para la existencia de actividad óptica. Por ejemplo: el ion complejo hexacoordinado dicloro bis etilendiamincobalto(III), no tiene ningún carbono quiral, y sin embargo presenta actividad óptica, debido a que su estructura es asimétrica. Por el contrario, existen moléculas que, aún teniendo carbonos quirales, presentan por “compensación interna” una simetría tal que resultan ópticamente inactivas. Este es el caso, por ejemplo, de uno de los isómeros del ácido tartárico (ácido dihidroxibutanodioico), compuesto que presenta dos carbonos quirales iguales entre sí (unidos a idénticos grupos).

Cuando la luz polarizada pasa a través de una solución que contiene ciertos tipos de moléculas asimétricas, el plano de oscilación gira. Este ángulo de giro se mide con una aparato llamado polarímetro.

EL POLARÍMETRO



El dispositivo que se utiliza para medir el efecto de la luz polarizada sobre los compuestos ópticamente activos es un polarímetro. En la figura se muestra su diagrama. Las partes fundamentales de la operación de un polarímetro son:

- 1) una fuente de luz (por lo general una lámpara sodio)
- 2) un polarizador
- 3) un tubo para mantener la sustancia (o solución) ópticamente activa en el rayo luminoso
- 4) un analizador
- 5) una escala para medir el número de grados que el plano de la luz polarizada ha girado.

El analizador de un polarímetro no es más que otro polarizador. Si el tubo del polarímetro está vacío, o si se encuentra presente una sustancia ópticamente inactiva, los ejes de la luz polarizada plana y del analizador estarán completamente paralelos cuando el instrumento da una lectura de 0° y el observador detectará que se transmite una cantidad máxima de luz. Si por lo contrario, el tubo contiene una sustancia ópticamente activa, por ejemplo una solución de un enantiómero, el plano de polarización de la luz habrá girado un ángulo α a medida que pasa a través del tubo. Para detectar la máxima brillantez de la luz el observador tendrá que hacer girar $\alpha(^{\circ})$ el eje del analizador en dirección de las manecillas del reloj o en dirección contraria. Si el analizador gira en dirección de las manecillas del reloj, se dice que la rotación es positiva (+). Si la rotación es contraria a la de las manecillas del reloj, se dice que la rotación es negativa (-). Se dice también que una sustancia que hace girar la luz polarizada plana en la dirección de las manecillas del reloj es dextrógira y la que hace girar la luz polarizada plana en dirección opuesta es levógira.

El ángulo α varía de acuerdo al número de moléculas con actividad óptica que se encuentren en el trayecto de la luz polarizada, por lo que la rotación observada dependerá de la longitud de la trayectoria que recorra la luz polarizada a través de la muestra ópticamente activa y de la concentración si está en solución El ángulo depende de la longitud de onda de la luz empleada, razón por la cual los polarímetros trabajan con luz de una determinada longitud de onda.

Cada sustancia ópticamente activa se caracteriza por una determinada rotación específica $[\alpha]$ que se define como:

$$[\alpha]_{\lambda}^T = \frac{\alpha}{lC} \quad \text{Ley de Biot}$$

donde α es la rotación (en grados) medida en el polarímetro, l es la longitud del tubo con la muestra (en decímetros), y c es la concentración (gramos de soluto en 100mL de solución). La longitud de onda λ de la luz del polarímetro y la temperatura de trabajo se especifican como subíndice y superíndice respectivamente. Los polarímetros más sencillos utilizan en general una lámpara de vapor de sodio; línea amarilla D correspondiente a 589 nm. La rotación específica es una propiedad característica como el punto de fusión, el punto de ebullición, etc.

Debido a que los enantiómeros son isómeros con igual estructura pero configuración opuesta, producen el mismo ángulo de rotación del plano de vibración de la luz polarizada pero en sentido contrario

Los enantiómeros tienen iguales propiedades físicas y químicas, excepto:

- a) su acción sobre la luz polarizada (siendo diferente el sentido de la rotación pero igual el valor del ángulo)
- b) la reacción con otro compuesto ópticamente activo.

Material y equipo:

1. Riel óptico.
2. Tres soportes para el riel.
3. Fuente de luz.
4. Filtro óptico. Unos equipos pueden usar el filtro verde y otros el filtro rojo.
5. Dos polarizadores (Uno es el polarizador y el otro el analizador).
6. Tubo porta-soluciones.
7. 50 ml de un refresco transparente: de limón, toronja, etc.

8. 50 ml de un refresco dietético.
 9. Termómetro.
 10. Regla de 30 centímetros.
11. Cinco diferentes concentraciones de azúcar refinada en agua de 50 ml cada una. El alumno, antes de la sesión experimental, preparará las soluciones con sumo cuidado. Las concentraciones recomendadas son:

Concentración acuosas de azúcar (g por 100 ml)
24
20
16
12
8

Experimento I: Efecto de ciertas sustancias sobre la luz polarizada.

Construya el polarímetro colocando las partes en el riel óptico tal como se indica en el diagrama:

DIAGRAMA

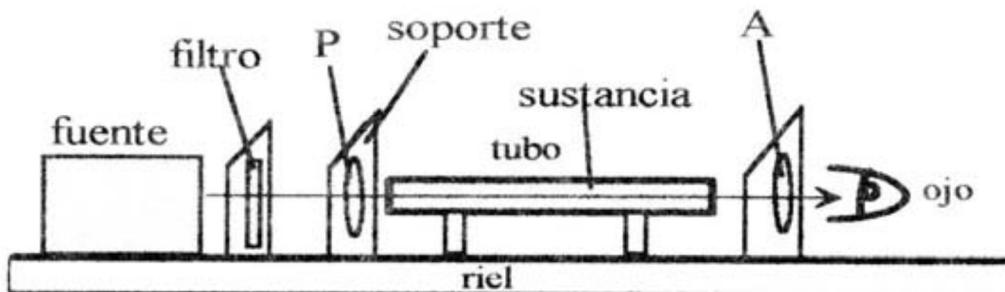
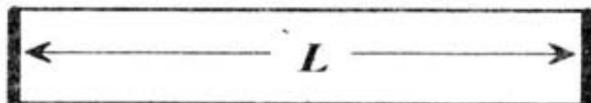


Diagrama del polarímetro



Longitud del tubo

- Primero la fuente.
- Enfrente de la fuente coloque un soporte con el filtro seleccionado.
- Enseguida, coloque el polarizador en el segundo soporte (en el dibujo se señala con la letra P).
- Luego el tubo en el que se colocaran los líquidos que se analizarán.
- Después el segundo polarizador, que es llamado analizador (en el dibujo se señala con la letra A).

Procure que las diferentes partes no queden muy espaciadas entre sí para observar más claramente los fenómenos. Pueden quedar los polarizadores junto al tubo porta-soluciones.

2. Ponga en cero grados el analizador y encienda la frente.
3. Mire la energía luminosa de la fuente a través del analizador y rote el polarizador hasta que la intensidad de la luz que observe sea mínima. Si tiene dificultades para encontrar el mínimo de intensidad, rote levemente el polarizador en ambas direcciones (a favor o en contra de las manecillas del reloj) y de ese modo trate de hallar ese mínimo. Cuando se presenta ese mínimo de intensidad, se dice que los polarizadores están cruzados.
4. Enseguida llene el tubo porta-soluciones con agua y colóquelo en el lugar que se ha indicado.

5. Observe la luz de la fuente a través del analizador y observe si el agua le produjo un cambio notable a la intensidad luminosa.
6. Enseguida vacíe el tubo porta-soluciones y llénelo de un refresco transparente (no dietético) y colóquelo en el lugar que se ha indicado.
7. Observe la luz de la fuente a través del analizador y determine si se presentó algún cambio en la intensidad luminosa como producto de la solución que se colocó.
8. Vacíe el tubo porta-soluciones y échele un poco del refresco dietético. Agite el líquido y luego tírelo. A continuación, llénelo del mismo refresco y coloque el tubo en el lugar indicado y observe la luz de la fuente a través del analizador y determine si se presentó algún cambio en la intensidad luminosa.
9. Anote todas las observaciones que considere pertinentes.
Deje montado el dispositivo para usarlo en el siguiente objetivo.

Experimento II: La concentración en función del ángulo de rotación y su rotación específica.

Cada miembro del equipo realizará la medición de al menos una concentración.

1. Llene el tubo porta-soluciones de agua y colóquelo en el lugar indicado.
2. Ponga en cero grados el analizador y rote el polarizador hasta que ambos estén cruzados (mínimo de intensidad luminosa).
3. Vacíe el tubo y viértale un poco de la solución de azúcar de más baja concentración y agite la solución. Enseguida, vacíelo y llénelo de la misma solución.
Cada vez que trabaje con una nueva solución o sustancia, repita este procedimiento para eliminar los residuos de la anterior y no se provoque un error experimental.
4. Coloque el tubo con la solución en el lugar indicado y observe a través del analizador si se produjo algún cambio en la intensidad luminosa.
5. Mirando la fuente a través del analizador, rótelo en el sentido de las manecillas del reloj hasta que vuelva a establecer el mínimo de intensidad. Establecido dicho estado, mida y anote el ángulo que roto el analizador. Esa cantidad son los grados que esa concentración de azúcar giró el plano de polarización del campo eléctrico.
6. Repita el paso 3 y llene el tubo porta-soluciones de la siguiente concentración y repita los pasos 4 y 5.
7. Con las restantes concentraciones de azúcar, repita el paso número 6.
8. Con la regla mida la longitud L del tubo porta-soluciones, expresándola en decímetros. Es importante aclarar que debe medirse la longitud del recorrido que realiza la luz a través

del líquido y que por lo tanto no debe tomarse en cuenta el grosor de las tapas que posee el tubo.

9. Para finalizar, mídase la temperatura de las soluciones. Si obtiene valores ligeramente diferentes, reporte el promedio de las mismas.

Experimento III: Concentración de azúcar en un refresco.

Cada miembro del equipo deberá medir una vez el ángulo de rotación que produce el refresco.

1. Vacíe el tubo porta-soluciones y elimine todos los residuos usando el método antes indicado.
2. Llénelo de agua y colóquelo en el lugar indicado.
3. Ponga en cero grados el analizador y rote el polarizador hasta que ambos queden cruzados.
4. Enseguida, retire el agua del tubo y llénelo del refresco transparente y colóquelo en el lugar indicado. Recuerde que antes de llenarlo de refresco debe darle una enjuagada al tubo con esa misma sustancia.
5. Observe la luz de la fuente a través del analizador, vuelva a obtener el mínimo de intensidad luminosa, girándolo en el sentido de las manecillas del reloj y mida el ángulo que rotó el analizador. Ese es el ángulo que el refresco hace rotar el plano de polarización del campo eléctrico.
6. Gire de forma aleatoria el analizador para que, a continuación, otro miembro del equipo mida el ángulo de rotación a la misma muestra de refresco. Hágase del mismo modo para que el resto del equipo realice la medición de dicho ángulo.

Presentación de resultados.

En el siguiente cuadro anote los valores de las cantidades que se indican. La concentración exprésela en gramos por 100 mililitros y la longitud en decímetros.

L = T = Filtro utilizado

Medición	Concentración (C), (gramos por cada 100 ml)	Rotación medida (grados)
----------	--	-----------------------------

1		
2		
3		
4		
5		

Con los ángulos de rotación medidos y la concentración de la solución correspondiente, hágase una gráfica de la concentración en función del ángulo de rotación y ajuste una recta a los datos. En el siguiente espacio anote los resultados obtenidos para la ecuación y la pendiente de la recta.

En el siguiente espacio anota las características de la ecuación obtenida por ajuste:

Ecuación obtenida:

Pendiente de la ecuación:

Compare la fórmula que proporcionan los libros de texto para la concentración de la sustancia en función del ángulo de rotación, con la obtenida mediante el ajuste de los datos y a partir de ello, calcule el valor de la rotación específica para la sacarosa. Para el cálculo tenga presente el valor de la longitud del tubo medida y expresada en decímetros.

Cuestionario

1. ¿Qué tipo de estructura presentan las sustancias ópticamente activas?
2. ¿A qué se le llama sustancias dextrógiras y a cuáles levógiras? La sacarosa ¿A cuál de ellas pertenece?
3. La gráfica de la expresión que describe el comportamiento de la concentración de azúcar en función del ángulo de rotación, es una recta que pasa por el origen. La ecuación que obtuvo mediante ajuste de datos ¿pasa por el origen? Si no es así ¿cómo explica tal diferencia?
4. ¿El ojo humano está diseñado para distinguir luz polarizada de luz no polarizada?
5. Si un refresco no dietético tiene un volumen de 473 mililitros ¿Cuántos gramos de azúcar contiene? ¿Y un refresco de 2 litros? Para realizar los cálculos, use los resultados que obtuvo para la concentración de azúcar en el refresco que seleccionó.

Bibliografía.

1. P. M. Fishbane y otros. Física para Ciencias e Ingeniería. Volumen II. Editorial Prentice – Hall Hispanoamericana, S.A.
A. Cromer. Física en la Ciencia y en la Industria. Editorial Reverté, S.A.
2. R. A. Serway. Física. Tomo II. Editorial McGraw – Hill.
3. R. L. Soto Morán y otros. Análisis y Procesamiento de los Datos Experimentales. Facultad de Física Universidad de la Habana. Cuba. 1999.
4. Hecht E.; “ÓPTICA”. Editorial Adisson –Wesley Iberoamericana. 3^a. Edición.España, 2000.♦
5. Resnick R., Halliday D.y Krane K.S.; “FÍSICA” Vol. I. Editorial C.E.C.S.A. 3^a edición. México, 1997.

Práctica 6: Difracción

Objetivos:

El estudiante,

Observará y analizará el fenómeno de la Difracción.

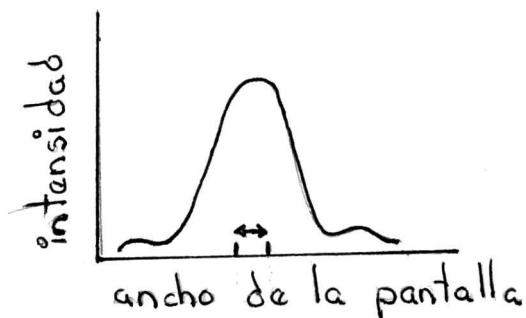
Determinará la longitud de onda del láser a partir de un patrón de difracción.

Parte I: Difracción por rendijas

Introducción teórica:

Cualquier desviación de la luz por otro medio que no sea la reflexión y la refracción se llama DIFRACCIÓN. El caso más común es el de la difracción a través de aberturas. Cuando el tamaño de la abertura es grande en comparación con la longitud de onda, el efecto de dispersión es pequeño, pero conforme se reduce la abertura la dispersión de las ondas es más apreciable. Lo mismo ocurre para todas las clases de ondas, incluyendo las de luz.

En la figura, se muestra una gráfica de la distribución de la intensidad para la luz difractada al pasar por una sola ranura delgada. Debido a la difracción, se presenta un aumento gradual en la intensidad de la luz, en lugar de un cambio abrupto de lo oscuro a lo iluminado. Si se barriera con un foto – detector de un lado a otro de la pantalla, aquella detectaría un aumento gradual, desde nada de luz hasta iluminación máxima (En realidad, existen ligeras bandas o franjas de intensidad hacia ambos lados del patrón principal; estas bandas constituyen la evidencia de que ocurre interferencia, la cual resulta más pronunciada con una ranura doble o múltiple).



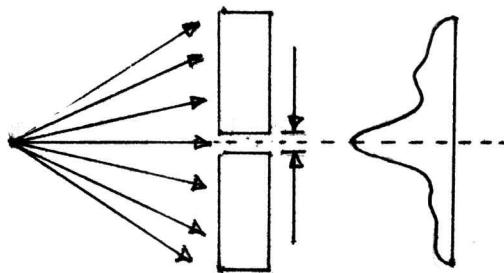
La difracción no es exclusiva de las ranuras angostas o de las aberturas en general, sino que puede verse en todas las sombras. Si se examina con cuidado, incluso la sombra más definida está ligeramente borrosa en el borde.

Una consecuencia negativa de la difracción es el límite que impone a la microscopía. Las sombras de los objetos pequeños se vuelven cada vez menos definidas, a medida que el tamaño del objeto se aproxima a la longitud de onda de la luz que lo ilumina. Si el objeto es más pequeño que una sola longitud de onda, no puede verse estructura alguna. Ninguna amplificación ni perfeccionamiento del diseño del microscopio puede vencer este límite.

fundamental de la difracción. Para evitar este problema, los microscopios iluminan los objetos diminutos con haces de electrones, en lugar de hacerlo con luz; empleando los llamados microscopios electrónicos, en los que se aprovecha que toda la materia tiene propiedades ondulatorias; un haz de electrones tiene menor longitud de onda que la luz visible. Por tanto, el límite de difracción de un microscopio electrónico es mucho menor que el de uno óptico, que se restringe a la luz visible. En aquél se emplean campos eléctricos y magnéticos, en lugar de lentes ópticas, para enfocar y amplificar las imágenes.

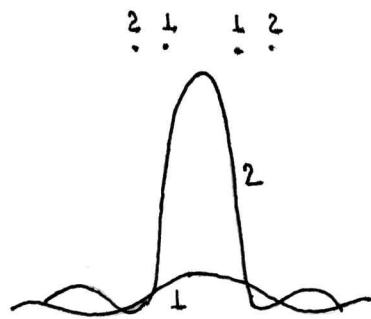
Difracción de Fresnel.

Cuando la fuente se encuentra próxima a la abertura y la pantalla a una distancia finita de la abertura, y no se ha utilizado lente alguna para obtener un haz de rayos paralelos, el patrón observado se conoce como difracción de Fresnel.



El patrón consta de una región central brillante flanqueada por muchos máximos secundarios.

La distancia de los mínimos desde el centro del máximo central crece con la disminución de a . De esta manera, con la reducción del ancho de la rendija la franja brillante central se ensancha. Al contrario, con el aumento del ancho de la rendija la posición de los primeros mínimos se acerca cada vez más al centro del máximo central, de manera que el máximo central se torna más brillante. En este caso, la intensidad relativa del máximo no varía; pero su magnitud absoluta crece, ya que crece la energía que pasa a través de la rendija amplificada.



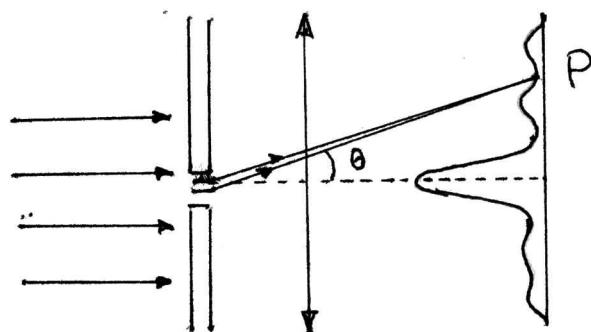
Difracción de Fraunhofer.

La difracción de Fraunhofer, ocurre cuando los rayos que llegan a un punto son aproximadamente paralelos. Esto se puede lograr en forma experimental, ya sea colocando la pantalla de observación lejos de la abertura o utilizando una lente convergente para enfocar los rayos paralelos sobre la pantalla. A lo largo del eje x se observa una franja brillante cuando $\theta = 0$, con franjas oscuras y brillantes alternadas a ambos lados del máximo central.

No existe naturalmente entre ambos casos ninguna diferencia en cuanto a la naturaleza del proceso de difracción, y la difracción de Fresnel se mezcla gradualmente con la de Fraunhofer cuando la pantalla se aleja de la rendija, o si disminuye la anchura de esta.

Se presenta también la difracción de Fraunhofer cuando se coloca una lente muy próxima a la rendija, puesto que la lente concentra en su plano focal toda la luz que se propaga en una dirección determinada. Esto es, la lente forma en su plano focal una imagen reducida de las figuras que aparecerían, en ausencia de la lente, sobre una pantalla infinitamente distante.

Debido a que la observación se efectúa en donde la luz es recogida por la lente, el cuadro de difracción adquiere mucho mas brillo, lo que facilita la observación.

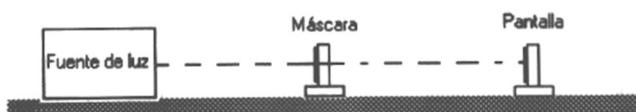


Material y equipo:

1. Banco óptico,
2. Pantalla,
3. Laser (He –Ne o Diodo),
4. Rendija simple y dobles,
5. Rendija cuadrada y
6. Abertura circular

Experimento I: Patrón de difracción

Realiza el montaje que se indica en la figura.



Ajusta las posiciones hasta que tengas la imagen más nítida en la pantalla.

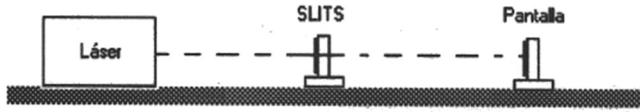
Reemplaza la plantilla con ventana ancha, por una plantilla con ventana estrecha, sin modificar las posiciones iniciales de la fuente, mascara y pantalla.

Haz un análisis comparativo de los dos patrones observados. Repite el procedimiento cuantas veces sea necesario hasta que estés seguro de tus resultados. ¿En cual de los dos casos la luz se ha difractado?

Resultados, análisis y conclusiones.

Experimento II: Difracción de Fresnel.

Realiza el montaje que se indica en la figura.



Ajusta la plantilla de una rendija hasta que el haz del láser incida directamente en lo ancho de la abertura del modelo A.

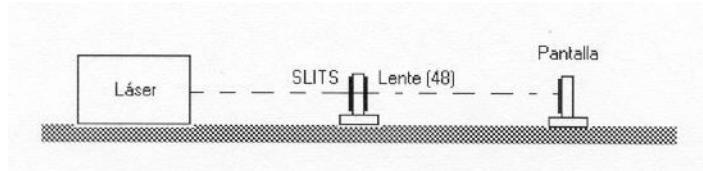
Ajusta la posición de la pantalla hasta obtener la imagen más definida. Este es un ejemplo de Difracción de Fresnel.

Observa la Difracción de Fresnel en las rendijas de los modelos B, C y D, haz un análisis comparativo de los patrones observados.

Resultados, análisis y conclusiones.

Experimento III: Difracción de Fraunhoffer

Realiza el montaje que se indica en la figura.



Ajusta la plantilla de una rendija hasta que el haz del láser incida directamente en lo ancho de la abertura del modelo A.

Ajusta la posición de la pantalla hasta obtener la imagen más definida. Este es un ejemplo de difracción de Fraunhoffer.

Observa la Difracción de Fraunhoffer en las rendijas de los modelos B, C y D, haz un análisis comparativo de los patrones observados.

Resultados, análisis y conclusiones.

Experimento IV: Medición de un patrón de difracción

Realiza el montaje correspondiente para realizar un patrón de difracción de Fraunhofer efectuando las mediciones de la intensidad luminosa I para diferentes distancias y usando el fotómetro (recuerda que este procedimiento lo empleaste en el Experimento No. 4), reporta dichas mediciones en una tabla de datos.

Emplea el modelo A de la plantilla de una rendija.

Construye el gráfico I en función de y correspondiente.

Realiza el análisis del gráfico.

Experimento V: Difracción – Interferencia en rendijas múltiples

Observa la Difracción de Fresnel y Fraunhofer en rendijas múltiples y haz un análisis comparativo de los patrones observados.

Empleando el fotómetro mide el patrones de difracción de Fraunhofer experimentalmente para un de los modelos (C) de la plantilla de rendijas múltiples y construye el gráfico I en función de y correspondiente.

Realiza el análisis de los diferentes gráficos obtenidos.

Parte II: Difracción en aberturas circulares.

Introducción teórica:

Otro tipo de abertura muy común e importante es la circular. Su importancia radica en el hecho de que la enorme mayoría de los instrumentos ópticos tienen abertura circular. Por lo común se llama disco de Airy a la región interior al primer anillo oscuro, cuyo diámetro angular θ es:

$$\operatorname{Sen} \theta = 1.22 \lambda / 2a = 1.22 \lambda / D ,$$

donde D es el diámetro de la abertura. Si el patrón se forma en el plano focal de una lente con diámetro D y distancia focal f , el radio r del disco de Airy estará dado por:

$$r = 1.22 \lambda f / D .$$

Si suponemos una longitud de onda de 500 nm, el diámetro de este disco queda dado por:

$$2r = 1.22 f / D \text{ } \mu\text{m},$$

lo cual es muy útil y fácil de recordar, pues en forma aproximada se puede expresar esto diciendo que el diámetro del disco de Airy es la relación focal de la lente, en micras.

El tamaño finito del disco de Airy es la razón de la limitación en el poder resolutor de cualquier sistema óptico formado por lentes redondas.

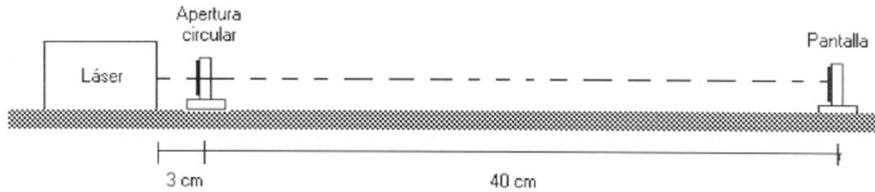
Las lentes circulares tienden también a difractar la luz provocando un disco de Airy pues la luz atraviesa más vidrio en el centro de la lente que en los bordes. El tamaño más pequeño de tal disco caracteriza el poder de resolución de la lente. O sea que la lente no puede distinguir entre dos puntos cuya separación sea inferior al diámetro del más pequeño disco de Airy.

Se recordará que las expresiones numéricas del aumento de un anteojos o de un microscopio, contienen únicamente (si se exceptúan ciertos valores numéricos) las distancias focales de las lentes que formaban el sistema óptico del instrumento. Parece a primera vista que puede obtenerse cualquier aumento que se desee, eligiendo adecuadamente estas distancias focales. Sin embargo, pasado un cierto límite, aunque la imagen formada por el instrumento se hace mayor (o subtende un ángulo mayor) no gana en detalle, aunque se corrijan todas las aberraciones de las lentes. Este límite del aumento útil se produce por el hecho de que la luz es un movimiento ondulatorio, y las leyes de la óptica geométrica no se cumplen estrictamente para un frente de onda de extensión limitada. Físicamente, la imagen de un manantial no es la intersección de los rayos procedentes del manantial, sino la figura de difracción de las ondas procedentes del manantial que pasa a través de las lentes del sistema.

Es un hecho experimental importante que la luz procedente de un manantial puntual, difractada por una abertura circular, no es concentrada por una lente en un punto geométrico, sino en un disco de radio finito rodeado por anillos brillantes y oscuros. Cuanto más grande sea el frente de onda admitido (es decir, mayores las lentes o diafragmas de un sistema óptico) tanto menor será la figura de difracción de un manantial puntual, y tanto más juntos pueden estar dos manantiales sin que sus discos de difracción se superpongan y dejen de distinguirse. Se dice que un sistema óptico es capaz de resolver o separar dos manantiales puntuales si las correspondientes figuras de difracción son suficientemente pequeñas o están lo bastante separadas para poder distinguirse. La medida numérica de la posibilidad del sistema para separar dos de estos manantiales puntuales se denomina poder separador del mismo.

Experimento VI: Determinación de la longitud de onda del láser

Realiza el montaje que se indica en la figura.



Trabaja con las dos aberturas circulares cuyos diámetros son 0.04 y 0,08 mm respectivamente.

Observa los patrones obtenidos y haz un análisis comparativo de los mismos, tanto por difracción de Fresnel como por difracción de Fraunhoffer.

Usando el fotómetro mide un patrón de difracción de Fraunhoffer. Calcular a partir del patrón obtenido la longitud de onda del láser. Usa la lente de 127 mm de distancia focal para el montaje. Para el calculo hay que tener en cuenta que el ángulo límite de resolución de la abertura circular esta dado por:

$$D \operatorname{sen} \theta = 1.22 \lambda.$$

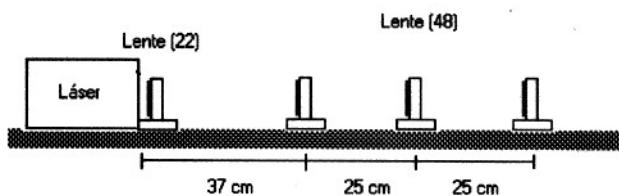
NOTA:

El fabricante reporta como longitud de onda del láser 632.8 nm.

Se recomienda que realices un diagrama para que puedas deducir el procedimiento para calcular el ángulo θ

Experimento VII: Difracción de una lente

Realiza el montaje que se indica en la figura, el rayo debe cubrir la lente de 48 mm.



La lente divergente tiene su punto fuente a 22 mm dentro del láser. Aplicando la fórmula de Gauss determina en qué posición se debe colocar la pantalla, para observar el disco de Airy que resulta de la difracción de la luz en la lente. Para realizar dicho cálculo te recomiendo que hagas un diagrama.

Resultados, análisis y conclusiones.

Presentación de resultados

Para cada experimento haga un diagrama y acompañelo de una breve explicación.

Para cada conjunto de mediciones, discuta cualitativamente su comportamiento.

Adjunte todas las tablas y procesamientos pertinentes.

Grafique los resultados en los casos requeridos.

Reporte las magnitudes solicitadas con su error y un análisis de sus fuentes así como los procedimientos que siguió o seguiría para minimizarlos.

Cuestionario

1. Con respecto a los fenómenos ondulatorios en general, ¿a qué se refiere el concepto de difracción?
2. Explique brevemente la difracción de Fresnel o de campo cercano.
3. Explique brevemente la difracción de Fraunhofer o de campo lejano.
4. ¿Cuál es la diferencia entre los patrones de la difracción de Fresnel y la de Fraunhofer?

5. En el experimento de Young se observa, además del patrón de interferencia, una serie de bandas luminosas y obscuras más anchas que las producidas por la interferencia, ¿a qué se debe esto?
6. ¿A qué se les denomina disco y anillos de Airy?
7. La distancia entre máximos, incrementa, decrementa o permanece invariable a medida que la separación entre ranuras incrementa?
8. La distancia entre máximos, incrementa, decrementa o permanece invariable a medida que el ancho de ranura incrementa?
9. La distancia al primer mínimo en la envolvente de difracción, incrementa, decrementa o permanece invariable cuando incrementa la separación entre ranuras?
10. La distancia al primer mínimo en la envolvente de difracción, incrementa, decrementa o permanece invariable cuando incrementa el ancho de ranura?

Bibliografía.

1. P. M. Fishbane y otros. Física para Ciencias e Ingeniería. Volumen II. Editorial Prentice – Hall Hispanoamericana, S.A.
A. Cromer. Física en la Ciencia y en la Industria. Editorial Reverté, S.A.
2. R. A. Serway. Física. Tomo II. Editorial McGraw – Hill.
3. R. L. Soto Morán y otros. Análisis y Procesamiento de los Datos Experimentales. Facultad de Física Universidad de la Habana. Cuba. 1999.
4. Hecht E.; “ÓPTICA”. Editorial Adissoñ –Wesley Iberoamericana. 3^a. Edición.España, 2000. •
5. Resnick R., Halliday D.y Krane K.S.; “FÍSICA” Vol. I. Editorial C.E.C.S.A. 3^a edición. México, 1997.

Práctica VII: La difracción de un cabello

Objetivos:

1. Encontrar la relación matemática entre las posiciones de las irradiancias mínimas pertenecientes a un patrón de difracción originado por un cabello colocado frente a un haz láser y el orden de difracción de cada mínimo.

2. Encontrar la relación matemática entre el orden de difracción y las posiciones de las irradiancias mínimas pertenecientes a un patrón de difracción originado por un cabello colocado frente a un haz láser y la distancia de observación.

Introducción teórica:

Cuando una onda resulta parcialmente obstaculizada por algún objeto, el campo luminoso después del mismo puede mostrar franjas máximas y mínimas sin relación directa con los contornos del objeto que obstaculizan. Esta distribución se conoce como patrón de difracción. Cuando el patrón de difracción se observa a distancias relativamente grandes del objeto, se habla del campo lejano. Para la luz, una distancia mayor que los 50 cm puede bastar para incluirse en dicha región. Cuando el objeto es un cabello interpuesto a un haz láser, el patrón de difracción en campo lejano consta de manchitas separadas por mínimos de irradiancia, que llegan a ser de cero irradiancia prácticamente, aparentemente de igual espaciamiento. Distinguiendo un centro natural del patrón (la manchita más brillante), se asigna un orden de difracción N a cada mínimo, positivo a la derecha y negativo a la izquierda. Sus posiciones cambian con la separación del plano de observación al cabello.

Material y equipo:

1. un apuntador láser
2. un cabello
3. papel milimetrado
4. cinta métrica

Experimento I: Mediciones cuantitativas de la figura de difracción

Disponer del laser como se esquematiza en la Fig.1.

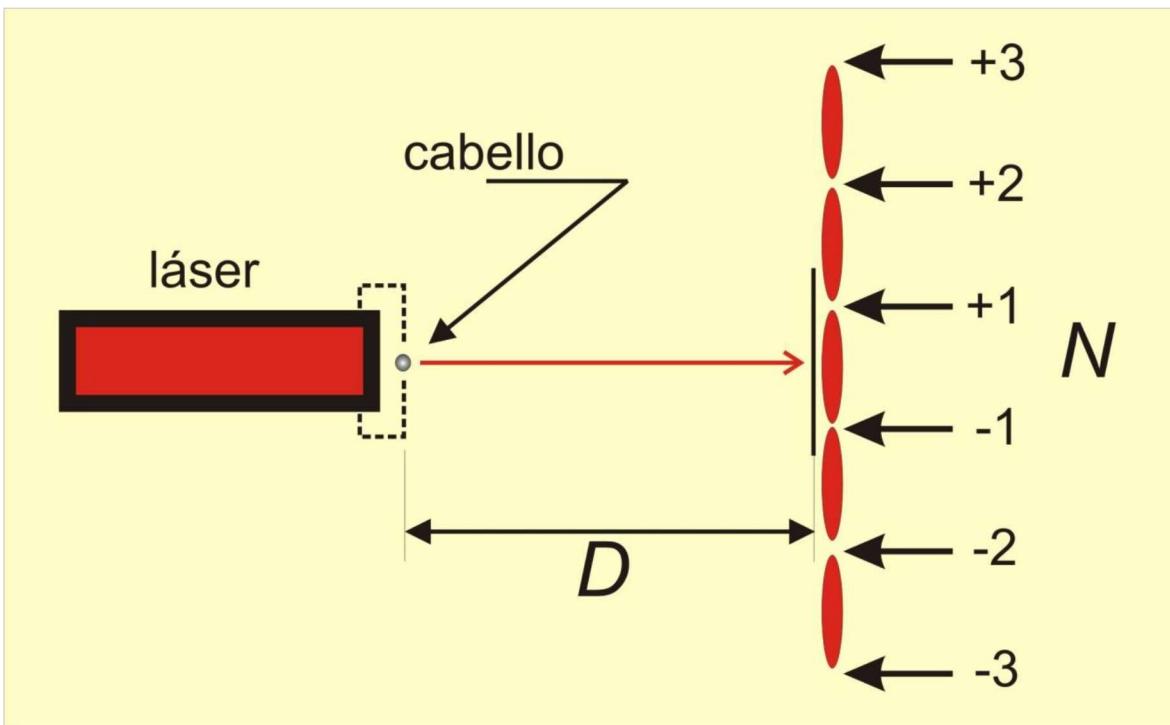


Fig.1. Posición del cabello relativa al láser y a la pantalla de observación. El cabello puede sujetarse al láser directamente.

El cabello puede estar sujeto a la abertura del láser con maskin tape o diurex (punteado en el dibujo), lo que no debe obstaculizar al haz adicionalmente al cabello. Una hoja de papel milimetrado se coloca a la distancia D del cabello, sobre la cual se proyecta el patrón de difracción respectivo. Esta hoja se acomoda de manera que el centro del patrón coincida con el centro de la hoja y una línea, gruesa de preferencia, se alinee con el patrón (que en este caso resulta en una distribución lineal). La distancia D puede elegirse de modo que sea fácil la lectura en las posiciones de los mínimos.

Resultados típicos.

La Fig.2 muestra las posiciones de mínimos en función del orden de difracción para cinco distintas distancias D. Se constata un comportamiento lineal.

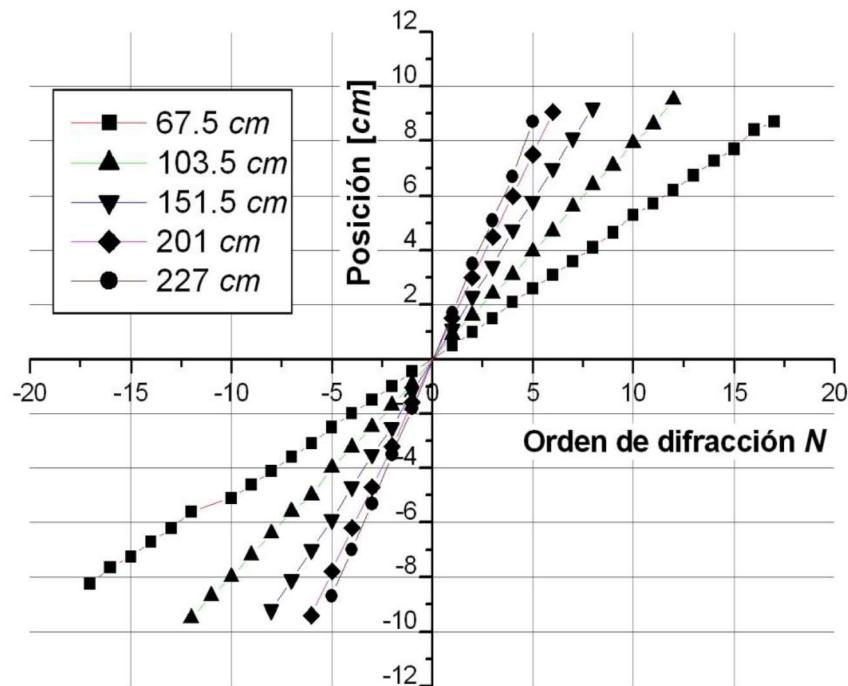


Fig.2. Posiciones de los mínimos Δx (VD) como función de su orden N (VI) para diferentes distancias D medidas del cabello al patrón de difracción.

La gráfica de las pendientes como función de la distancia D se muestra en la Fig.3:

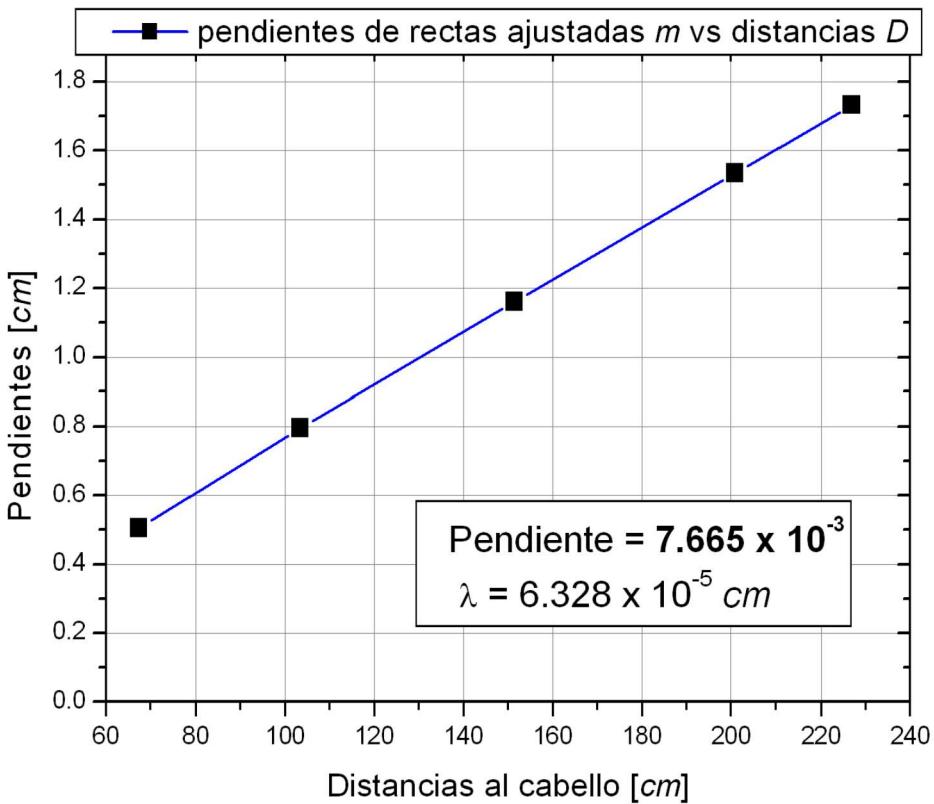


Fig.3. Pendientes m de rectas ajustadas de las posiciones de mínimos como función de las distancias D del cabello al patrón de difracción.

La tendencia lineal sugiere la relación , con el valor de A indicado en la gráfica. La tendencia lineal sugiere la relación , con el valor de A indicado en la gráfica $\Delta x = A * DN + B$. De interpretar a la pendiente A como en el apéndice C.4, vendría a ser el diámetro del cabello, siendo de 0.083 mm aproximadamente con los datos apuntados. B DN Ax □ □□ □a 2

Elegir las distancias D que proporcionen posiciones de mínimos fácilmente registrables sobre el papel milimetrado. Pueden convenir distancias largas (entre 60 cm y 2 m), aunque depende de la potencia del láser empleado.

Cuestionario

¿Por qué el análisis de una rendija puede aplicarse a su contrario, que sería la sección del cabello? Principio de Babinet.

¿Es posible de este modo encontrar el diámetro del cabello?

Bibliografía.

1. P. M. Fishbane y otros. Física para Ciencias e Ingeniería. Volumen II. Editorial Prentice – Hall Hispanoamericana, S.A.
A. Cromer. Física en la Ciencia y en la Industria. Editorial Reverté, S.A.
2. R. A. Serway. Física. Tomo II. Editorial McGraw – Hill.
3. R. L. Soto Morán y otros. Análisis y Procesamiento de los Datos Experimentales. Facultad de Física Universidad de la Habana. Cuba. 1999.
4. Hecht E.; “ÓPTICA”. Editorial Adisson –Wesley Iberoamericana. 3^a. Edición.España, 2000. •
5. Resnick R., Halliday D.y Krane K.S.; “FÍSICA” Vol. I. Editorial C.E.C.S.A. 3^a edición. México, 1997.
6. Physical Science Study Committee (PSSC), Física, Reverté (Barcelona) 1974.
7. R. Feyman, R. Leighton, M. Sands, Lectures on Physics, Addison-Wesley (London) 1977.

8. F. Jenkins, H. White, Fundamentals of Optics, McGraw-Hill (New York) 1957.
9. J. A. González Menéndez, Relaciones empíricas, UNAM (México) 1976.

Addendum: Difracción producida por un cabello

<http://www.heurema.com/PDF58.htm>

Fundamento teórico

Cuando la luz láser se hace incidir sobre un cabello humano, la imagen de difracción que se obtiene es similar a la que produce una doble rendija (fig.1). Existe una máximo principal de difracción fuertemente iluminado y a sus lados, separados por zonas oscuras, aparecen otros máximos, llamados secundarios. Los máximos secundarios son mucho menos intensos que el principal y por ello apenas se aprecian en las fotografías.

Además si nos fijamos en el máximo principal, éste aparece seccionado en una serie de zonas brillantes separadas por zonas oscuras –máximos y mínimos-. Esto se debe a un

fenómeno de interferencia producido por los bordes del cabello, resultando superpuestas una difracción y una interferencia.

Dado que la imagen de interferencia que se obtiene con el cabello humano no es muy definida, nos fijaremos solamente en el máximo principal de difracción, y a partir de medidas realizadas sobre él se determinará aproximadamente el diámetro de un cabello humano.

El esquema del dispositivo experimental es el de la figura 2.

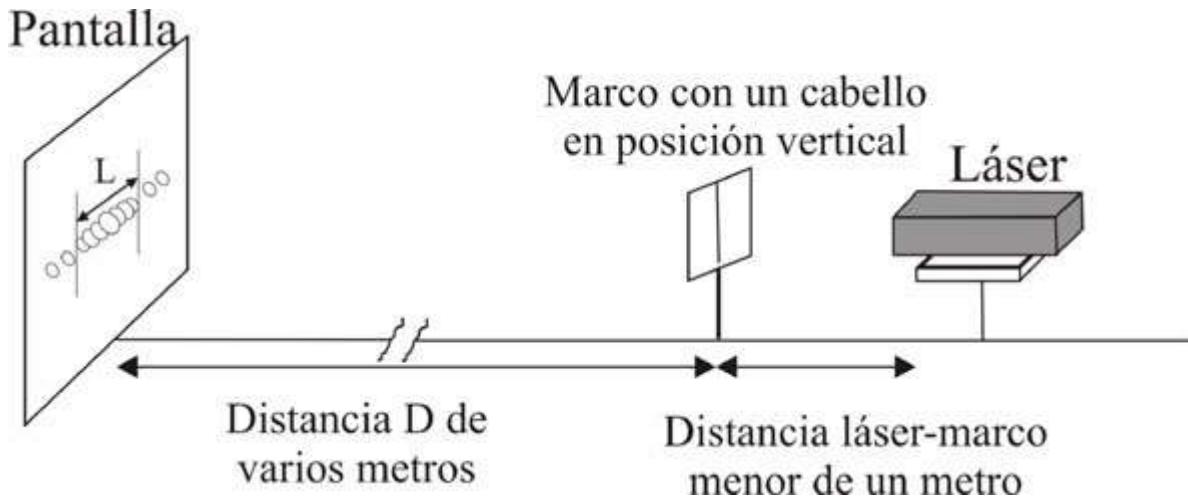


Fig.2

D es la distancia entre el cabello y la pantalla. La distancia D es de varios metros. El láser está apuntando al cabello, situado a una distancia menor de un metro. La imagen de difracción se recoge en la pantalla.

A partir de la teoría ondulatoria de la luz se establece una ecuación matemática que relaciona el diámetro del cabello d , con la distancia entre él y la pantalla D , la longitud de onda del láser λ y la distancia L entre los mínimos nulos de intensidad de luz, que limitan a izquierda y derecha el máximo principal de difracción.

$$\frac{L}{2} = Z = \frac{\lambda D}{d} \Rightarrow L = \frac{2\lambda}{d} D \quad (1)$$

Como en la fotografía resulta difícil determinar esta distancia L , ya que las zonas oscuras no aparecen claramente delimitadas, hacemos la aproximación de que L sea el ancho que tiene el máximo principal.

Si en un experimento se varía la distancia D y se miden los correspondientes valores de L ,

es posible obtener una línea recta cuya pendiente es $\frac{2\lambda}{d}$. En este experimento se ha utilizado un láser de He-Ne, siendo $\lambda = 632,8$ nm, por lo que es posible determinar aproximadamente el diámetro d del cabello.

Medidas

La distancia D, del cabello a la pantalla es un dato que proporcionamos y que se ha medido utilizando una cinta métrica de 20 metros graduada en centímetros.

Estimamos que las distancias D están afectadas de un error de 2 centímetros.

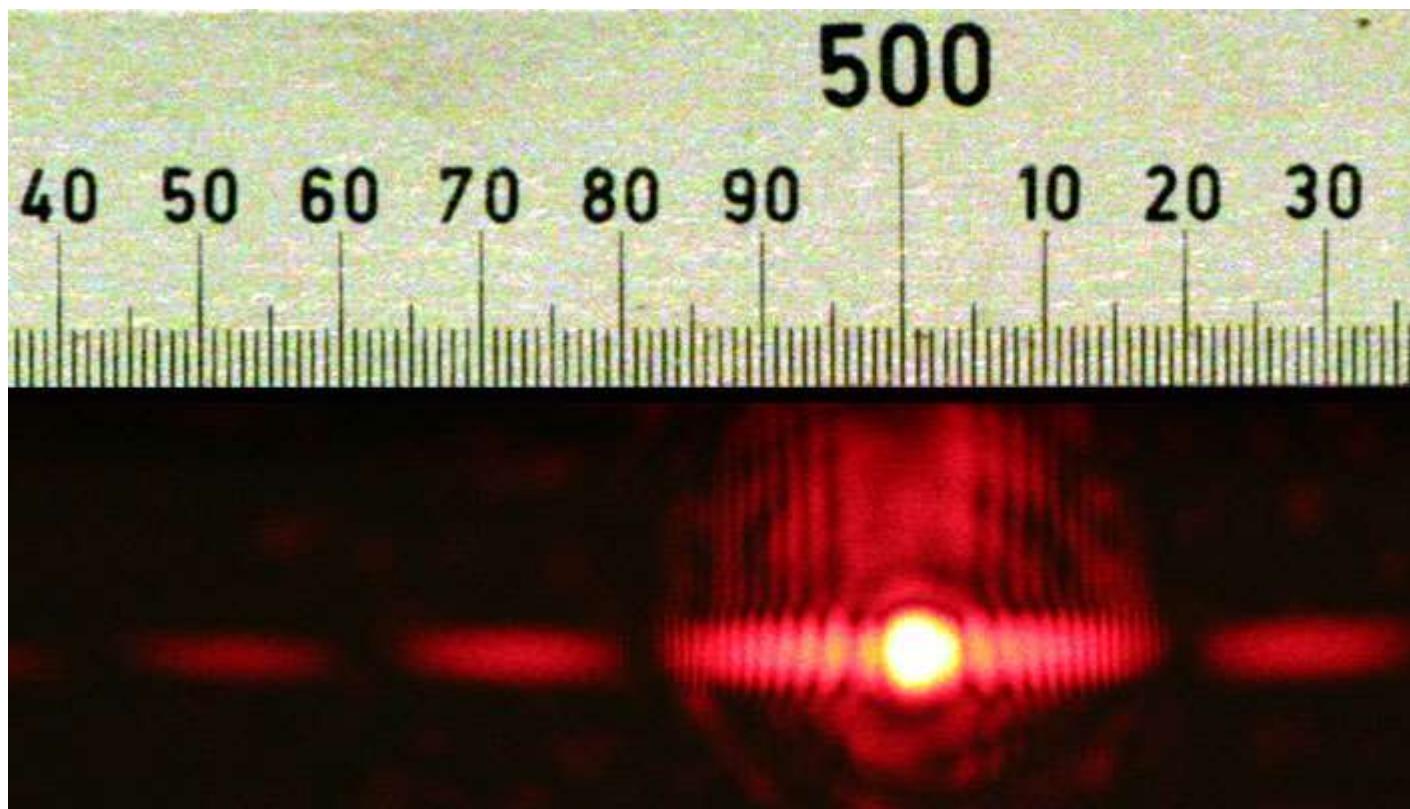
L es la distancia que se corresponde con el ancho que tiene el máximo principal. Esta distancia se mide en las fotografías y luego se convierte en el valor real, lo que se consigue mediante la regla que aparece en las mismas. Así, se toma una distancia entre dos divisiones de la regla, lo más alejadas posibles, y se mide esa distancia en centímetros de la fotocopia. Por ejemplo si tomamos desde la división 200 mm a la 400 mm, el factor de escala es:

$$f = \frac{400-200}{\text{cm en la fotocopia}} = \frac{200 \text{ mm}}{\text{cm en la fotocopia}}$$

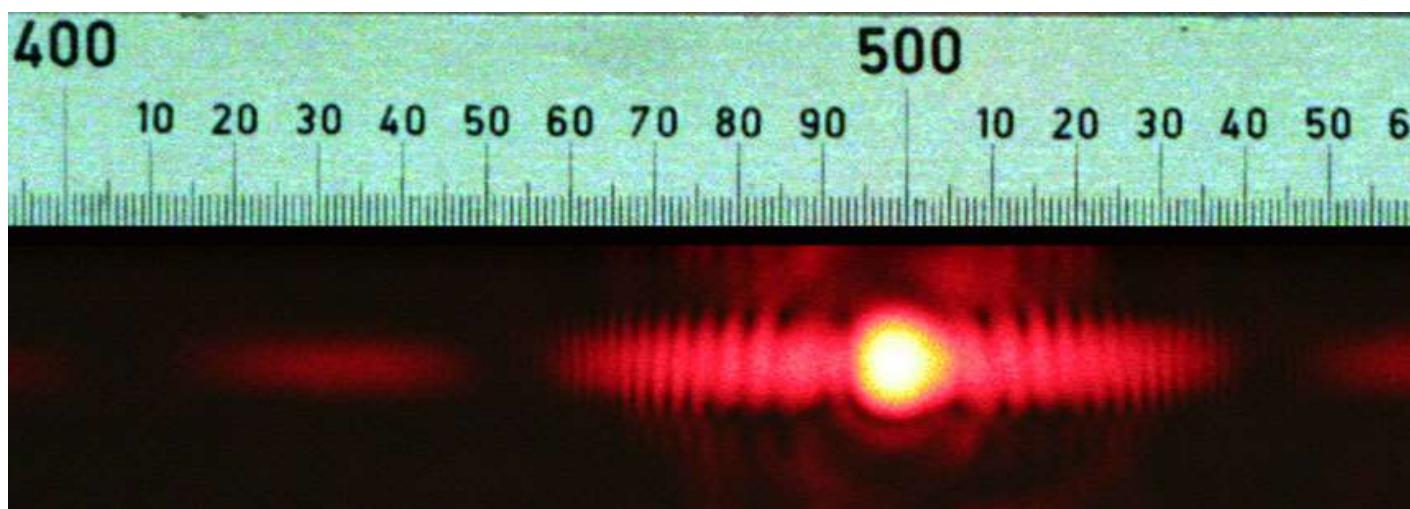
Debe también estimar la incertidumbre con la que mide L. En cada fotografía hay que determinar el factor de escala.

Las medidas se sitúan en la tabla 1 y se completan las columnas que allí figuran.

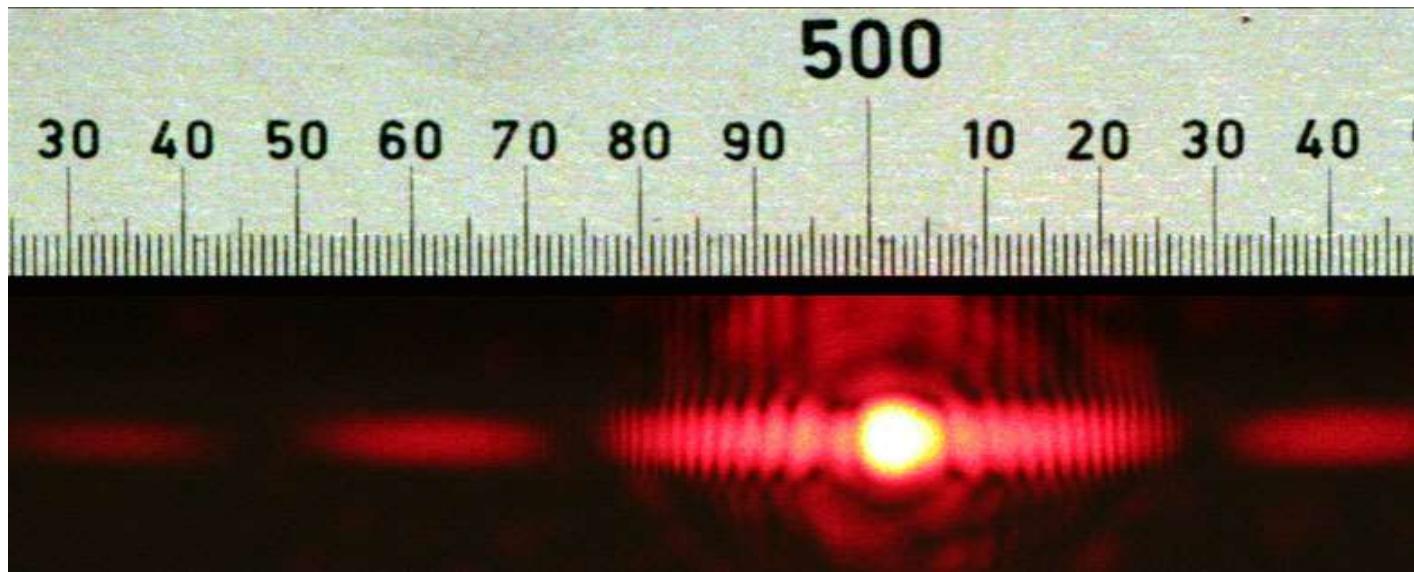
Fotografías



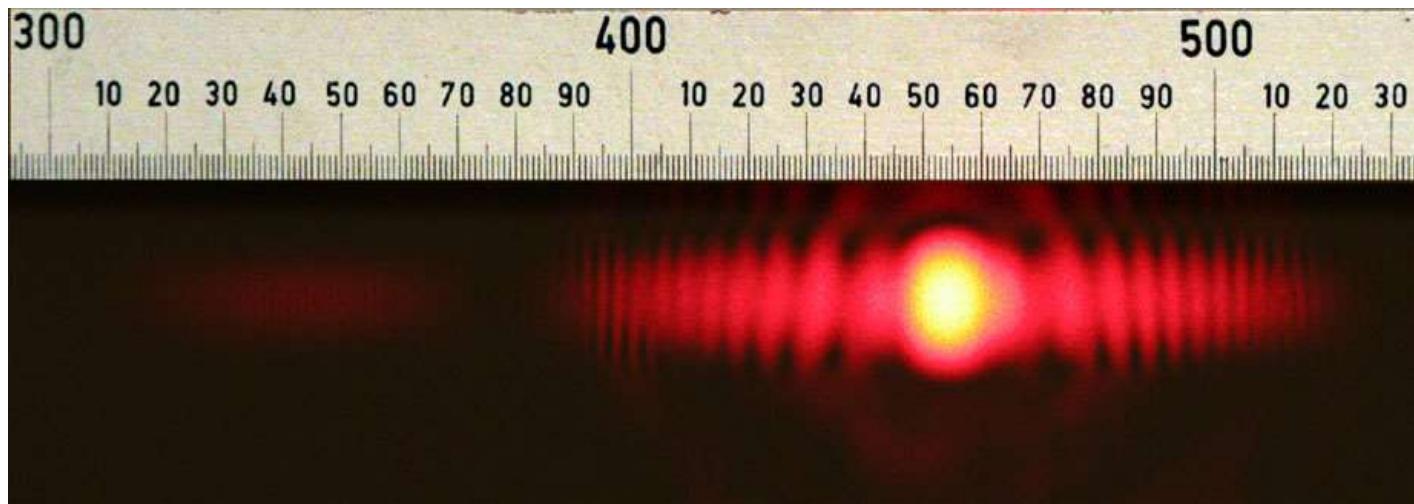
Fotografía 1 para toma de datos



Fotografía 4 para toma de datos



Fotografía 2 para toma de datos



Fotografía 8 para toma de datos

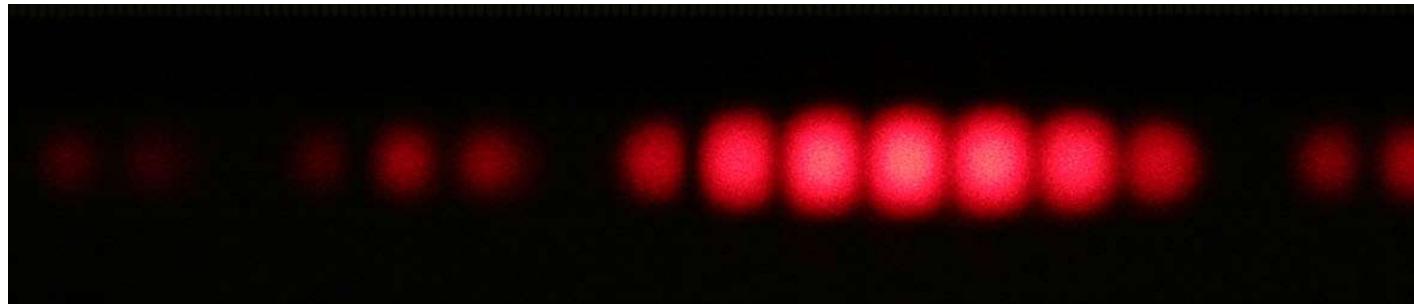
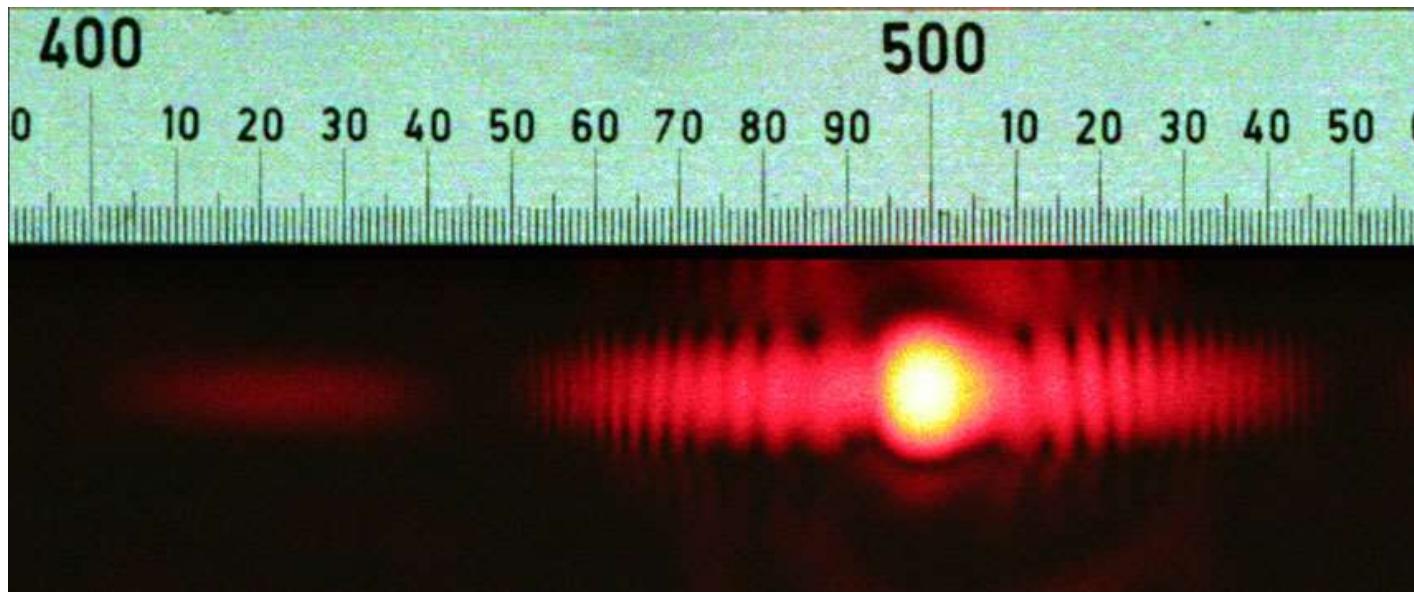
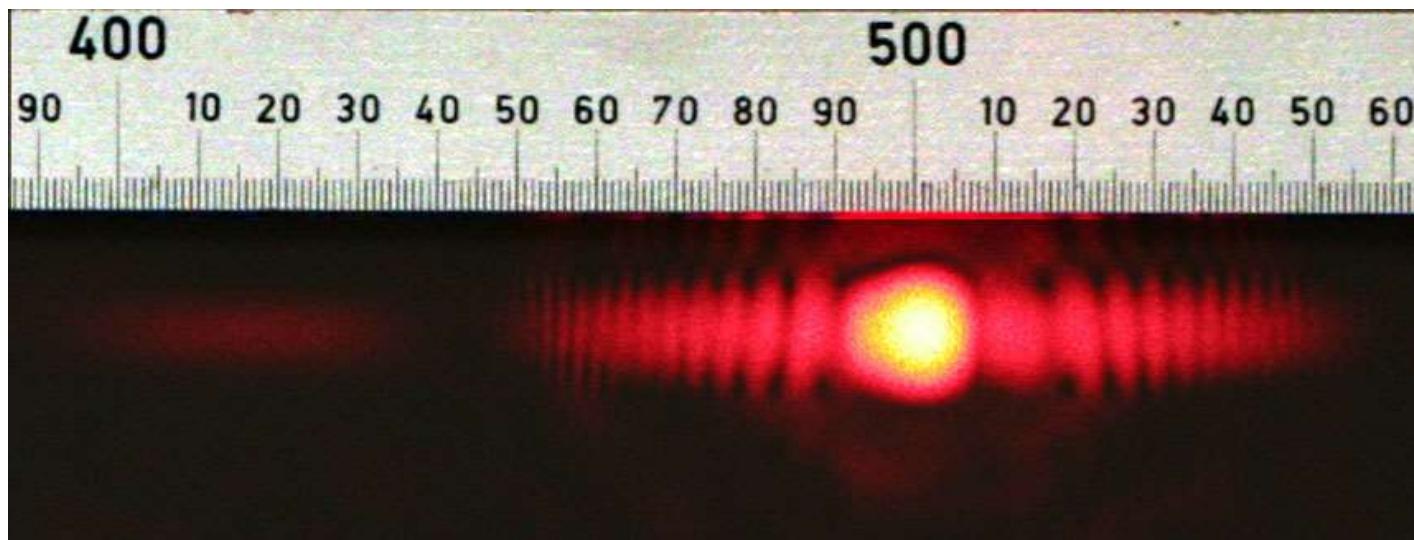


Fig.1



Fotografía 5 para toma de datos



Fotografía 6 para toma de datos

L_{mayor} valor real /mm								
L_{menor} valor real /mm								
D_{mayor} /m								
D_{menor} /m								

Gráficas

Parte 1^a

1.- Con los valores de la tabla 1, sin emplear las incertidumbres, represente en el eje de ordenadas L y en el de abscisas D . Determine la pendiente de la recta y el valor de $\frac{2 \lambda}{d}$.

2.- La longitud de onda del láser He-Ne empleado es $\lambda = 632,8$ nm. Calcule, a partir del valor encontrado en el apartado 1, el diámetro d del cabello, expresando el resultado en milímetros.

3.- En el apartado 1, la ordenada en el origen debe ser nula, pero el ajuste que haya hecho automáticamente la hoja de cálculo dará un valor diferente. Vuelva a hacer la representación del apartado 1 con la hoja de cálculo y obligue a la recta a pasar por el origen de coordenadas. Calcule d .

Con los valores de los apartados 2 y 3 calcule el valor medio de d con su incertidumbre.

Parte 2^a

Represente en el mismo gráfico: a) L mayor (eje Y) frente a D menor (eje X), b) L menor (eje Y) frente a D mayor (eje X). Mande trazar las rectas para a) y b) obligándolas a pasar por el origen de coordenadas. Tome como valor más probable el valor medio de las dos pendientes y dé como incertidumbre de b (diámetro del cabello), un número que sumado o restado del valor medio abarque a los dos anteriores.

Práctica VIII: Rejillas de difracción

Objetivos:

El estudiante,

1. Realizará un análisis de la red de difracción
2. Determinará la longitud de onda del láser.
3. Determinará la constante de una red de difracción
4. Observación del espectro de luz blanca

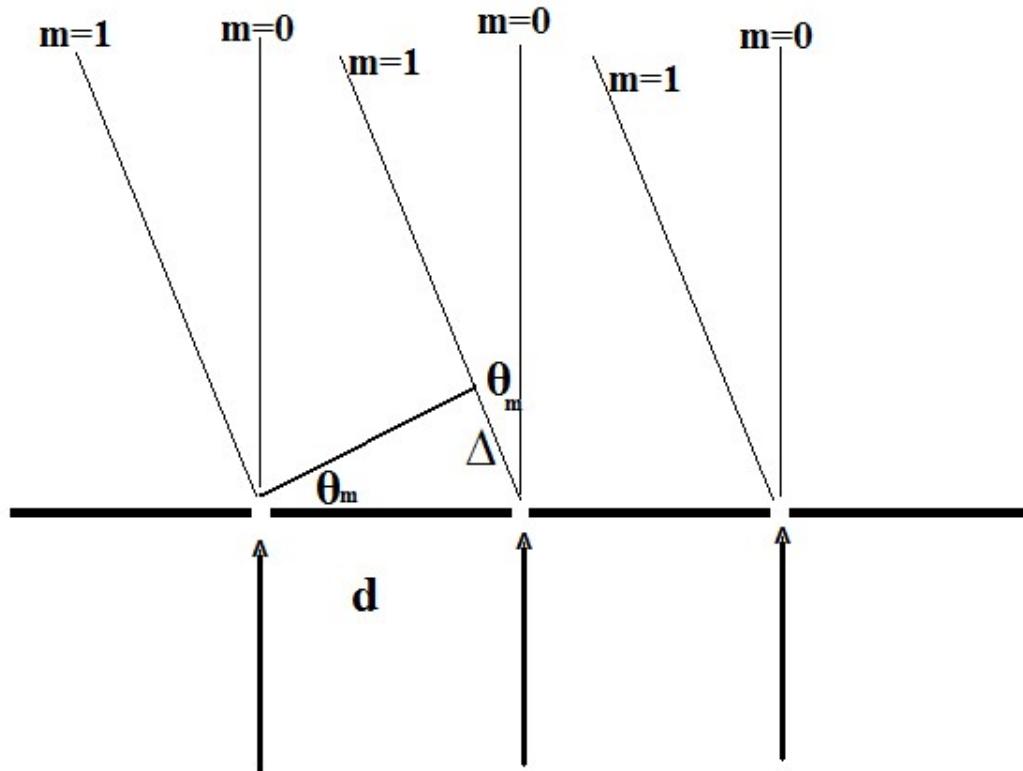
Introducción teórica:

Todo arreglo periódico de elementos de difracción, sean aberturas u obstáculos, cuyo efecto es el de producir alteraciones periódicas en la fase o la amplitud (o ambas) de la onda emergente, se denomina red de difracción.

La realización más común de una red de difracción la constituye un arreglo de múltiples rendijas delgadas paralelas, la cual es una red de transmisión cuyo patrón de difracción es de amplitudes. Otra forma común de una red por transmisión se logra trazando o rayando delgadas líneas paralelas equiespaciadas sobre una superficie plana de vidrio transparente. Cada raya sobre la superficie actúa como fuente de ondas secundarias, y juntas forman un arreglo regular de fuentes lineales paralelas. La manufactura de redes es extremadamente

compleja y difícil. Por lo tanto, en la actualidad la mayoría de las redes comerciales son réplicas fabricadas en plástico (por algún método de fotocopiado u holográfico) de finas redes trazadas con maestría en piezas únicas.

Si un haz monocromático colimado incide perpendicularmente sobre la superficie de la red,



el patrón de difracción que genera la luz transmitida, se compone de un máximo central y un conjunto de máximos laterales cuyos centros se encuentran en las posiciones angulares dadas por

$$d \sin \theta_m = m\lambda. \quad (1)$$

conocida como ecuación de la red para incidencia normal. El parámetro “d” es el espaciado entre los elementos de la red y m especifica el orden de los sucesivos máximos contados a partir del central (correspondiente a $m = 0$). Notar que mientras más pequeño es d , menor será el número de ordenes visibles en la transmisión, que quedan determinados por la condición :

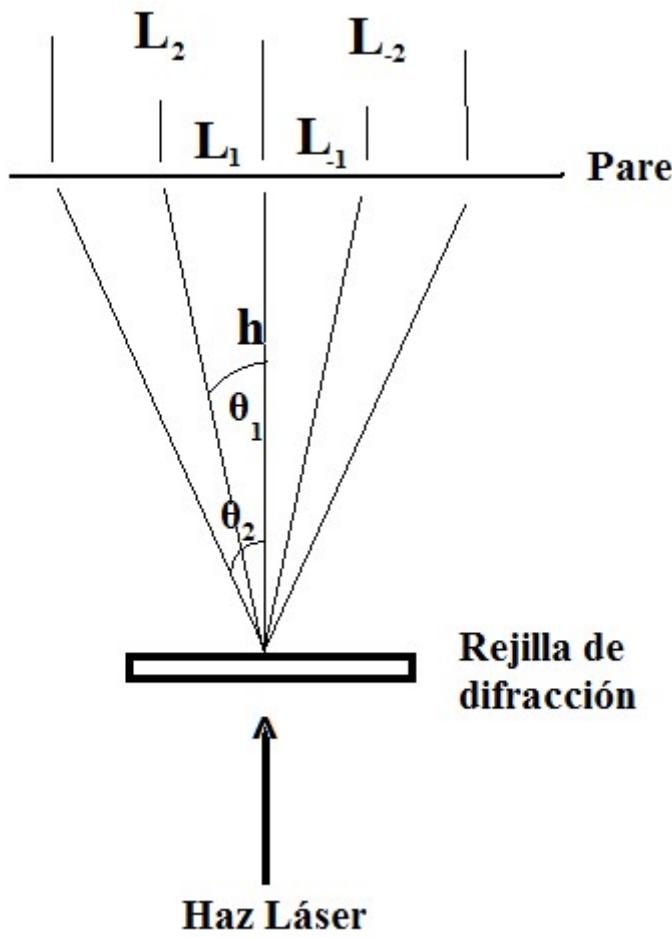
$$\theta_m < 90^\circ$$

No debe sorprender que la ecuación de la red describa la localización de los máximos del experimento de la doble rendija, dado que la red genera efectivamente un patrón de interferencia con el mismo principio, pero superponiendo los haces de todos los elementos que la componen. Pero ahora la condición de interferencia constructiva es mas delicada porque implica la superposición en fase de los haces de todas las fuentes secundarias, generando así máximos mas definidos y localizados.

Material y equipo:

1. Banco óptico,
2. Pantalla,
3. Laser (He –Ne o Diodo),
4. Rejillas de varias líneas por milímetros.
5. Cinta métrica

Experimento I: Medición de la longitud de onda de un láser



Se calcula la constante de la rejilla de difracción d

Se mide h (m)

Se mide L₁ y L₋₁

Se calcula el promedio de L₁ y L₋₁:

$$L_{p,1} = (L_1 + L_{-1})/2$$

Se calcula el ángulo θ₁:

$$\operatorname{tg}\theta_1 = \frac{L_{p,1}}{h}$$

Se sustituye el valor de θ₁ en la fórmula (1) (m = 1) y se determina la longitud de onda λ.

Esto se repite 10 veces y se hace tratamiento estadístico de los resultados para la longitud de onda λ.

Se repite 1 – 7 para m=2

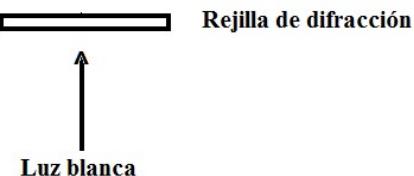
Experimento II: Medir la constante de una red de difracción

Sabiendo que la longitud de onda de un laser de He-Ne es $\lambda = 632.8\text{nm}$, podemos determinar la constante de una rejilla de difracción. Se repiten pasos 1 – 5. Se sustituye el valor de θ_1 en la fórmula (1) ($m = 1$) y se determina la constante de la red d . Luego se calcula cuántas líneas por mm tiene la red de difracción: $k(\text{líneas en 1 mm}) = 1/d(\text{mm})$. Se repite 10 veces y se hace tratamiento estadístico.

Experimento III: Observación del espectro de luz blanca

El espectro de la luz visible

Pared



Se observa el espectro de la luz blanca sobre la pared. Se responde la pregunta: ¿La luz roja o la luz azul tiene mayor longitud de onda y por qué?

Presentación de resultados

Para cada experimento haga un diagrama y acompañelo de una breve explicación.

Para cada conjunto de mediciones, discuta cualitativamente su comportamiento.

Adjunte todas las tablas y procesamientos pertinentes.

Grafique los resultados en los casos requeridos.

Reporte las magnitudes solicitadas con su error y un análisis de sus fuentes así como los procedimientos que siguió o seguiría para minimizarlos

Cuestionario

1. Compare el valor real de λ con el obtenido por Ud. ¿Son iguales?. Explique las posibles fuentes de error.
2. ¿Qué determina el número de ordenes del espectro vistos en la pantalla?. Explique.
3. ¿Qué sucede con el espectro observado cuando el ángulo toma el valor cero?,
4. ¿Qué se observa en esta posición?. Explique.
5. ¿Por qué es conveniente considerar los dos espectros del primer orden?

Bibliografía.

1. P. M. Fishbane y otros. Física para Ciencias e Ingeniería. Volumen II. Editorial Prentice – Hall Hispanoamericana, S.A.
A. Cromer. Física en la Ciencia y en la Industria. Editorial Reverté, S.A.
2. R. A. Serway. Física. Tomo II. Editorial McGraw – Hill.
3. R. L. Soto Morán y otros. Análisis y Procesamiento de los Datos Experimentales. Facultad de Física Universidad de la Habana. Cuba. 1999.
4. Hecht E.; “ÓPTICA”. Editorial Adisson –Wesley Iberoamericana. 3^a. Edición.España, 2000.♦
5. Resnick R., Halliday D.y Krane K.S.; “FÍSICA” Vol. I. Editorial C.E.C.S.A. 3^a edición. México, 1997.

Práctica IX: Medición de las características fundamentales de un láser CW

Objetivos:

El estudiante,

1. Realizará un análisis de las características de la radiación de un láser de He - Ne
2. Medirá en la práctica dichas características.

Introducción teórica:

Las características principales de la radiación láser son :

Longitud de onda (λ) - se mide con Interferómetro de Michelson.

Energía electromagnética (E) de la radiación láser: Potencia de salida

Potencia Radiante (P) - la cantidad de energía transportada por la radiación en la unidad de tiempo :

$$P = \frac{E}{\Delta t}$$

La potencia radiante se mide en las unidades de :

Watios = Julios/seg [W] = [J]/[s]

Densidad de Potencia (Irradiación) - Es la potencia de la radiación (P) dividida por el área de iluminación (Delta s).

$$I = \frac{P}{\Delta s} \quad (1)$$

La densidad de potencia se mide en unidades de :

[Watios/m²]

Distribución transversal de la energía de haz - [Modos Electromagnéticos Transversales \(TEM\)](#).

La sección perpendicular de la radiación láser está descrita por los :

TEM_{mn} = Modos Electromagnéticos Transversales

m = El número de nodos de la distribución de la radiación en el eje x.

n = El número de nodos de la distribución de la radiación en el eje y.

En la figura 1 se muestran algunos de los primeros modos transversales de la radiación.

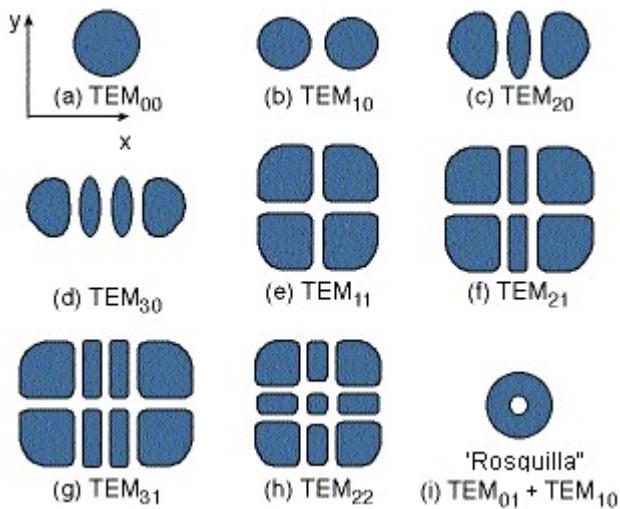


Figura 1 : Modos Electromagnéticos Transversales.

Las áreas oscuras marcan zonas donde se observa radiación electromagnética en el plano, y las áreas en blanco delimitan zonas en las que no hay radiación electromagnética.

El modo más importante es el modo básico transversal TEM₀₀.

Cuando la radiación láser se emite en un modo transversal único, normalmente se trata del modo básico transversal TEM₀₀.

En el modo único básico transversal, la forma de la radiación en un plano perpendicular, es un círculo en el cuál la intensidad en el centro es mayor que en los bordes. En la figura 2 se muestra la distribución de intensidad en el modo láser básico transversal, a lo largo de la sección transversal del haz.

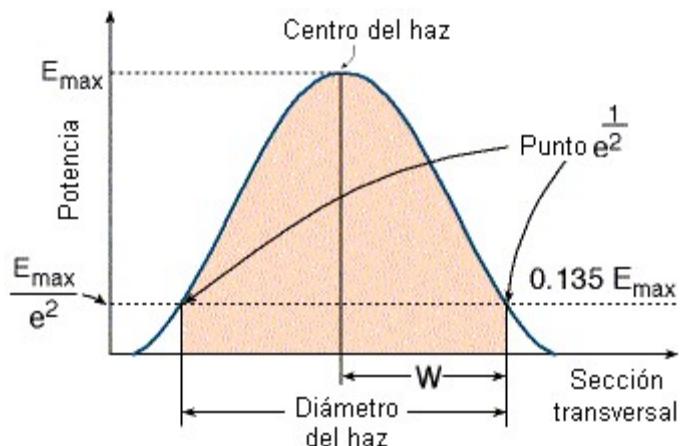


Figura 2 : Haz Láser Gausiano.

Esta curva tiene forma de campana, y se denomina “Gausiana”. Por ello, el modo básico transversal es llamado "Modo Gausiano".

Divergencia del haz láser.

En la figura 3 se describe la radiación emitida por un láser.

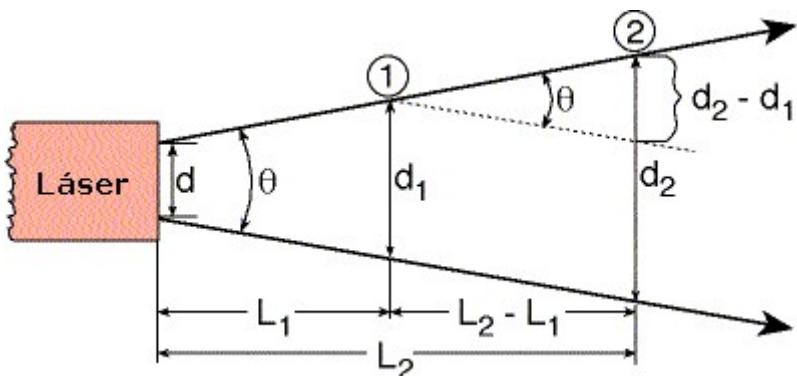


Figura 3 : Divergencia del Haz Láser (Divergencia de Haz □)

Las líneas rectas que definen los bordes del haz (puntos de e^{-2}) generan un ángulo llamado Divergencia de Haz.

Una buena aproximación para la divergencia del haz láser es :

$$\theta = \frac{d_2 - d_1}{L_2 - L_1} \quad (2)$$

θ = Divergencia de Haz (en Radianes).

d_1, d_2 = Diámetros del haz en los puntos “1” y “2”.

L_1, L_2 = Distancias a lo largo el eje del láser, desde el extremo del láser hasta los puntos “1” y “2”.

Polarización del haz

Polarización Lineal - Cuando el campo eléctrico oscila en el plano perpendicular a la dirección de propagación de la onda.

Polarización Parcial - La razón entre la radiación polarizada y la no polarizada.

La polarización parcial de un láser polarizado es normalmente de 1:500.

Grado de polarización - Se define con la máxima intensidad (I_{\max}) transmitida a través del polarizador y la mínima intensidad (I_{\min}), mediante la relación :

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (3)$$

donde P es el grado de la polarización, $0 < P < 1$

Material y equipo:

1. Banco óptico,
2. Pantalla,
3. Laser (He –Ne o Diodo),
4. Expansor de haz.
5. Cinta métrica

Procedimiento experimental:

La longitud de onda de este laser ya se midió con el interferómetro de Michelcon

El laser se ubica frente al medidor de potencia de láser y se mide su potencia óptica. Luego se calcula aproximadamente su irradiación, usando la fórmula (1).

Visualización del modo transversal:

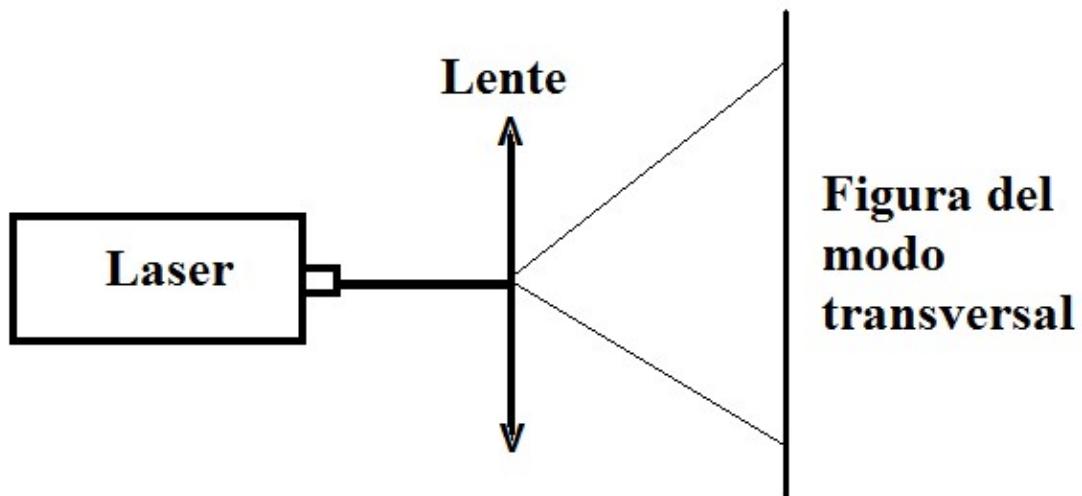
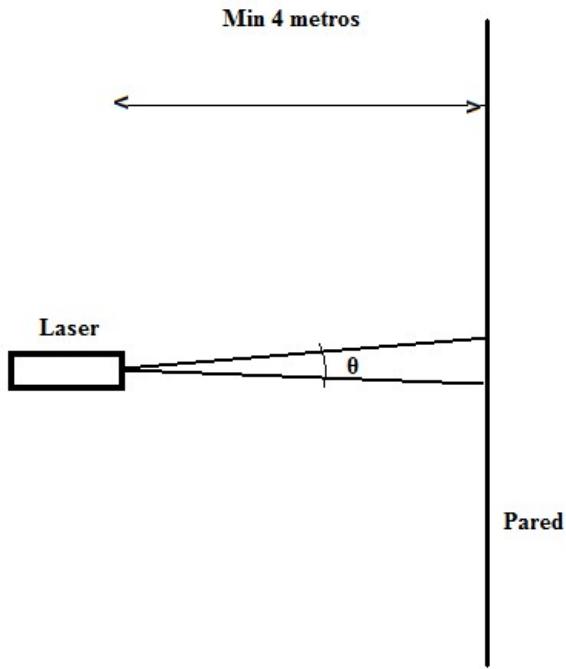


Fig.4: Equipo para la visualización del modo transversal

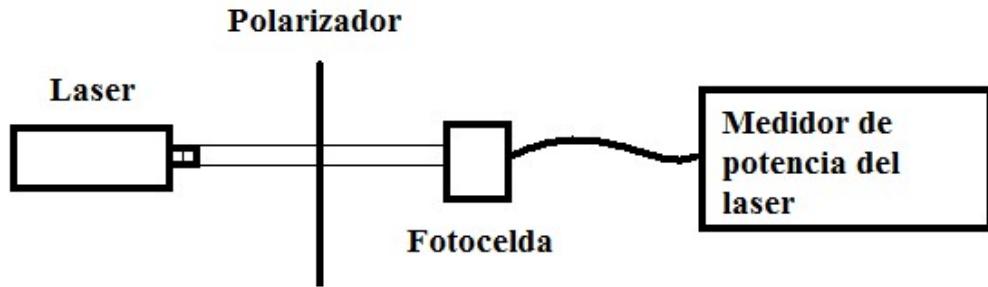
Se arma el equipo de la Fig.4 y se observa la imagen del modo transversal. Se compara con la Fig. 1.

Medición de la divergencia del haz del láser



Se mide los diámetros de la mancha - d_1, d_2 , para dos distancias hasta la pared - L_1, L_2 , y se usa la fórmula (2) para calcular el valor de la divergencia del láser θ .

Medición de la polarización del haz láser



Girando el polarizador se miden I_{\min} y I_{\max} . Usando la fórmula 3 se calcula el grado de polarización.

Presentación de resultados

Para cada experimento haga un diagrama y acompañelo de una breve explicación.

Para cada conjunto de mediciones, discuta cualitativamente su comportamiento.

Adjunte todas las tablas y procesamientos pertinentes.

Grafique los resultados en los casos requeridos.

Reporte las magnitudes solicitadas con su error y un análisis de sus fuentes así como los procedimientos que siguió o seguiría para minimizarlos.

Cuestionario

1. ¿Cuál es la diferencia entre un laser CW y de pulso?
2. El modo Gaussiano es característico para TEM x,y . ¿Qué valor tiene “x” y qué valor “y”?
3. ¿El multímetro debe medir voltaje o corriente?

Bibliografía.

1. P. M. Fishbane y otros. Física para Ciencias e Ingeniería. Volumen II. Editorial Prentice – Hall Hispanoamericana, S.A.
A. Cromer. Física en la Ciencia y en la Industria. Editorial Reverté, S.A.
2. R. A. Serway. Física. Tomo II. Editorial McGraw – Hill.
3. R. L. Soto Morán y otros. Análisis y Procesamiento de los Datos Experimentales. Facultad de Física Universidad de la Habana. Cuba. 1999.
4. Hecht E.; “ÓPTICA”. Editorial Adisson –Wesley Iberoamericana. 3^a. Edición.España, 2000. •
5. Resnick R., Halliday D.y Krane K.S.; “FÍSICA” Vol. I. Editorial C.E.C.S.A. 3^a edición. México, 1997.

Práctica X: Interferómetro de Michelson

Objetivos:

1. El estudiante,
2. Realizará un análisis del interferómetro de Michelson.
3. Obtendrá un patrón de interferencia con dicho interferómetro.
4. Determinará la longitud de onda del láser.
5. Determinará el índice de refracción del aire y del vidrio.

Introducción teórica:

Éste es sin duda uno de los interferómetros más famosos, diseñado por A. A. Michelson (1852 - 1931) con el objeto de efectuar su bien conocido experimento acerca de la velocidad de la luz. La Fig. 1 ilustra este interferómetro, donde se usa una fuente luminosa extendida cuya luz va a dar a una placa semireflectora P_1 que divide el haz en amplitud. Los dos haces resultantes se dirigen, uno hacia el espejo M_1 y el otro hacia el espejo M_2 , de donde regresan para volverse a reunir en la placa divisora de haz y llegar finalmente a la pantalla, o al ojo del observador.

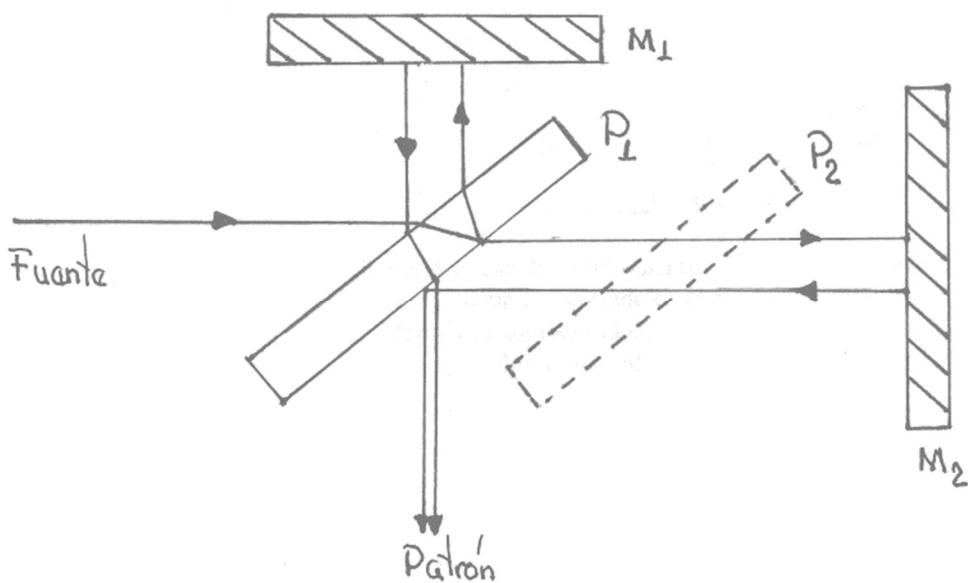


Fig. 1

Nótese que la luz que se refleja en el espejo M_1 atraviesa tres veces la placa divisora antes de llegar al observador, mientras que el otro haz que se refleja en el espejo M_2 solamente la atraviesa una vez. Éste se dice que es un interferómetro no compensado. Si se coloca la placa P_2 en el brazo del interferómetro que tiene el espejo M_2 , ambas trayectorias luminosas recorren la misma cantidad de vidrio. Entonces se dice que el interferómetro está compensado.

El observador ve dos imágenes de la fuente luminosa, una detrás de otra: una que corresponde a la imagen reflejada en M_1 y otra a la imagen reflejada en M_2 . Si el interferómetro está compensado, la distancia que separa las dos imágenes virtuales de la fuente luminosa es igual a la diferencia entre los caminos ópticos recorridos por los dos haces. Dicho de otro modo, las imágenes virtuales coinciden una con otra, cuando la diferencia de caminos ópticos es cero, solamente cuando el interferómetro está compensado.

Vemos que si no está compensado el interferómetro, uno de los haces atraviesa la placa divisoria tres veces, mientras que el otro lo hace sólo una vez. Esto ocasiona que los dos trenes que interfieren tengan diferente función moduladora, aunque no será muy diferente si el rango espectral no es muy grande. Las franjas tendrán buena visibilidad sólo cuando los trenes de onda de los dos haces que interfieren tengan la misma forma, y además coincidan de tal manera que no se adelante uno al otro. Si el rango espectral es muy grande, bastará con hacer que coincidan, moviendo uno de los espejos a lo largo de su eje óptico. En otras palabras, haciendo que se anule la diferencia de camino óptico para la longitud de onda central del espectro.

Sin embargo, si la luz es blanca o el rango espectral es grande, es necesario que el interferómetro esté compensado.

Otra forma de ver lo antes expuesto es decir que la diferencia de camino óptico entre los dos haces que interfieren debe ser igual a menor que $\frac{1}{4}$ de la longitud de onda de la luz para cada longitud de onda presente en el haz luminoso, con el fin de que la interferencia no pase de constructiva a destructiva o viceversa para unas longitudes de onda, mientras que para otras no. Si la luz es blanca, esto es obviamente posible sólo si el interferómetro está compensado

Material y equipo:

1. Láser (He-Ne o Diodo),
2. Kit de interferómetro,
3. Pantalla,
4. Vernier

Experimento I: Obtención del patrón de interferencia

Alinea el láser y la base del Interferómetro, en la forma descrita en la Fig. 2, coloca el espejo móvil en su posición, de tal forma que el rayo incidente y el reflejado sean paralelos (es decir que el rayo reflejado incida sobre el orificio del láser), además procurando de que el láser incida en el centro del espejo móvil.

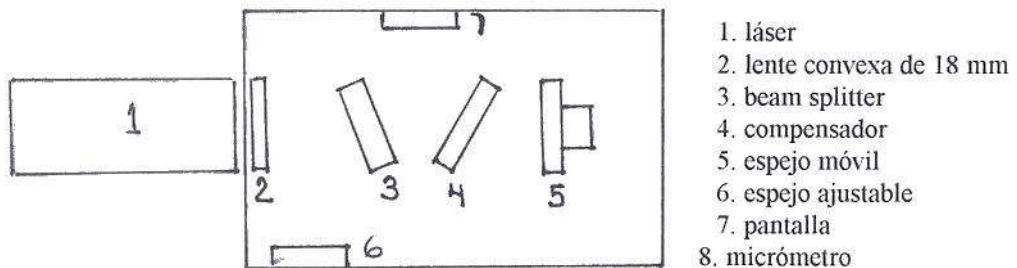


Fig. 2

Coloca la lente convexa de 18 mm enfrente del láser haciendo incidir el láser en el centro de la misma, asegurándose de que el haz de luz siga estando también centrado en el espejo móvil.

Coloca el beam splitter (placa semireflectora) y el compensador, en los lugares indicados; además de la pantalla y el espejo ajustable; ajustando este último de tal forma que se aprecie un patrón de interferencia en la pantalla.

Experimento II: Medición la longitud de onda del láser usando el Interferómetro de Michelson.

Alinea el láser y el interferómetro de Michelson, hasta que el patrón de interferencia sea claramente visible en la pantalla.

Ajusta el micrómetro hasta una cierta medida (aproximadamente $50 \mu\text{m}$), en esta posición la relación entre las lecturas del micrómetro es aproximadamente lineal.

Gire el micrómetro en sentido contrario al de las manecillas del reloj, continua girando hasta que el cero del mango del micrómetro se alinee con algún índice (cualquiera) dicho índice es tu punto de referencia.

Ajusta la pantalla hasta que una de las líneas de la escala de esta, coincida con una de las franjas de tu patrón de interferencia. Notaras que esto facilita contar las franjas fuera del centro del patrón.

Rota el micrómetro lentamente en sentido contrario al de las manecillas del reloj. Cuenta el numero de franjas que pasan por tu marca de referencia. Continua hasta algún predeterminado número de franjas que hayan pasado por tu marca (cuenta al menos 20 franjas). Cuando hayas terminado de contar las franjas debes estar en la misma posición

con respecto a tu marca de referencia donde estabas cuando empezaste a contar. Registra la lectura final del micrómetro.

Registra como X la distancia que recorre el espejo móvil hacia el beam splitter (placa semireflectora) de acuerdo con la lectura del micrómetro. Cada división de la parte fija del micrómetro equivale a 100×10^{-6} m, mientras que cada una de las divisiones de la parte móvil es igual a 10^{-6} μm.

Registra como N, el número de veces que el patrón regresa al estado inicial.

Repite los pasos del 3 al 7, analiza cuantas mediciones debes realizar considerando apropiadamente el error instrumental en el sistema.

Para cada una de las mediciones realizadas calcula la longitud de onda del láser aplicando la expresión. $\lambda = 2X / N$. Reporta la longitud de onda promedio obtenida, su error total y la discrepancia porcentual con la reportada por el fabricante.

Experimento III: Análisis de la influencia de la polarización en la interferencia.

Teniendo el interferómetro en el modelo de Michelson, coloca un polarizador entre el láser y el beam splitter (placa semireflectora). Prueba diferentes ángulos de polarización. ¿Qué efecto tiene esto en el patrón de interferencia?

Retira el polarizador y colócalo enfrente del espejo móvil, o enfrente del espejo fijo. Prueba diferentes ángulos de polarización. ¿Qué efecto tiene esto en el patrón de interferencia?

Ahora prueba con dos polarizadores, uno frente al espejo móvil y el otro enfrente del espejo fijo. Primero rota un polarizador y luego el otro. Nota los efectos.

Experimento IV: Determinación del índice de refracción del aire mediante la interferencia

Coloca el interferómetro en el modelo de Michelson no compensado.

Coloca en la trayectoria del rayo que incide en el espejo móvil la celda cilíndrica de caras paralelas, perpendicular al rayo.

Variando la presión en la celda, ¿qué observas? Da una explicación.

Se asume que existe una dependencia lineal entre la presión y el índice de refracción del aire.

Extrae aire del cilindro y teniendo un punto de referencia cuentan 10 líneas, determina la variación de presión. Datos experimentales N y ΔP. Realiza tres mediciones.

Repite el paso anterior para 15 líneas.

Empleando la expresión $(n_i - n_f) / (p_i - p_f) = (N\lambda) / (2d(p_i - p_f))$ calcula el índice de refracción para cada una de las presiones. Elabora una tabla de datos, enseguida construye el gráfico de índice de refracción en función de la presión.

Del gráfico calcula el índice de refracción del aire.

Experimento V: Medición del índice de refracción de un vidrio

Para medir el índice de refracción de un vidrio es necesario variar la longitud del camino óptico del haz que atraviesa el mismo. Este procedimiento se realizará montando el vidrio sobre la platina de rotación (con sujeción magnética), como se muestra en la Fig. 3.

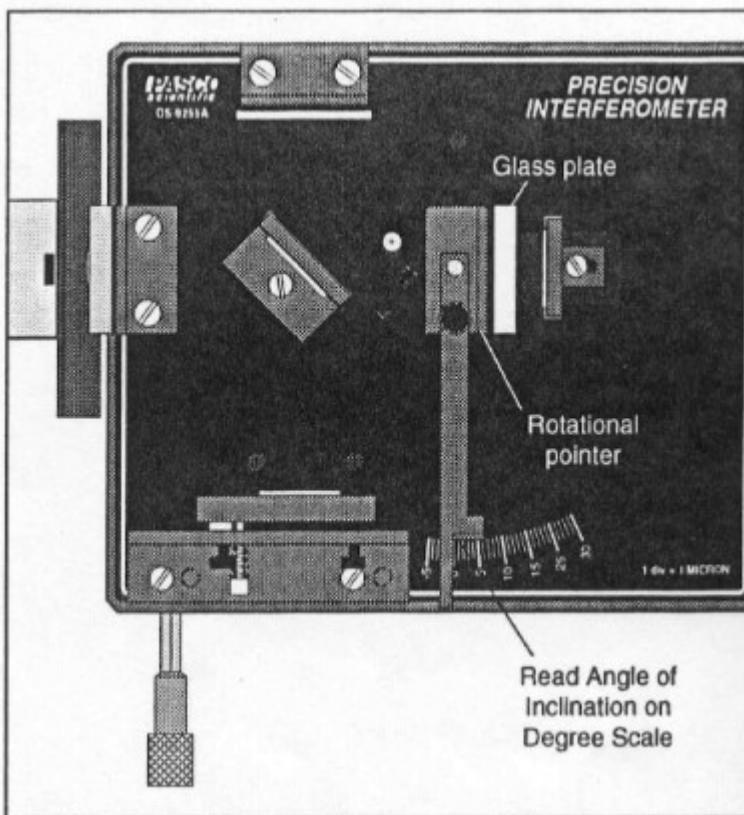


Fig. 3. Sistema óptico para medir el índice de refracción de un vidrio.

Posicionar la platina de modo que su vernier esté alineado con el cero de la escala en grados que está en la base del interferómetro. Remover la lente enfrente del laser y colocar la pantalla entre la placa de vidrio y el espejo móvil. Se debe girar la platina hasta que en la pantalla se observe un único punto brillante. Ahora la placa de vidrio estará perpendicular al haz laser. Corregir el cero de la escala en grados y colocar nuevamente la

pantalla y la lente. Introducir ajustes menores en el espejo fijo de forma que las franjas de interferencia se observen en la pantalla. Rotar lentamente la platina y contar las transiciones de franjas que aparecen al pasar de 0° a un ángulo $\theta > 10^\circ$. El índice de refracción del vidrio n se determinará mediante la expresión:

$$n = \frac{(2t - N\lambda_0)(1 - \cos \theta)}{2t(1 - \cos \theta) - N\lambda_0}$$

Presentación de resultados

Para cada experimento haga un diagrama y acompañelo de una breve explicación.

Para cada conjunto de mediciones, discuta cualitativamente su comportamiento.

Adjunte todas las tablas y procesamientos pertinentes.

Grafique los resultados en los casos requeridos.

Reporte las magnitudes solicitadas con su error y un análisis de sus fuentes así como los procedimientos que siguió o seguiría para minimizarlos

Cuestionario

- a) En el pasado, se pensaba que la luz se propagaba a través del éter. ¿Quiénes fueron los físicos que realizaron el experimento para medir el movimiento de la Tierra a través de este medio?
- b) ¿Cómo se interpreta actualmente la composición del cosmos?
- c) Cuando hay una onda debe haber algo que oscile. ¿Qué era lo que oscilaba en el caso de la luz según la creencia del siglo XIX?
- d) ¿De qué propiedades del medio, a través del cual pasa una onda, depende su velocidad? ¿Qué sucedía con la rigidez del éter y la velocidad de la luz? ¿Cómo podían moverse los planetas a través de un medio tan rígido y qué debía pasar con sus energías?
- e) ¿Qué instrumento desarrolló Michelson para medir la velocidad de la luz?

Bibliografía.

1. P. M. Fishbane y otros. Física para Ciencias e Ingeniería. Volumen II. Editorial Prentice – Hall Hispanoamericana, S.A.
A. Cromer. Física en la Ciencia y en la Industria. Editorial Reverté, S.A.

2. R. A. Serway. Física. Tomo II. Editorial McGraw – Hill.
3. R. L. Soto Morán y otros. Análisis y Procesamiento de los Datos Experimentales. Facultad de Física Universidad de la Habana. Cuba. 1999.
4. Hecht E.; “ÓPTICA”. Editorial Adisson –Wesley Iberoamericana. 3^a. Edición.España, 2000.♦
5. Resnick R., Halliday D.y Krane K.S.; “FÍSICA” Vol. I. Editorial C.E.C.S.A. 3^a edición. México, 1997.

Práctica XI: Interferómetro de Fabry-Perot

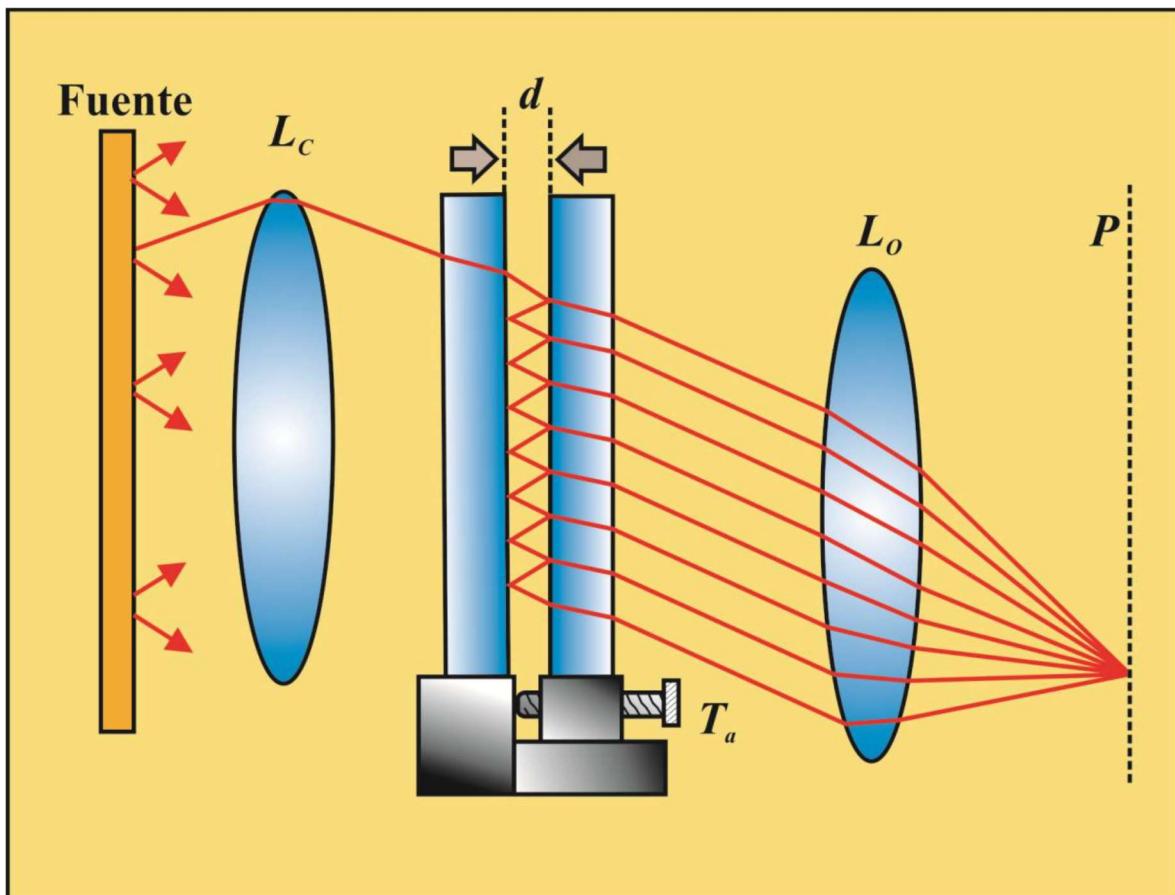
Objetivos:

1. Conocer el interferómetro de Fabry–Perot y familiarizarse con su procedimiento de ajuste.
2. Observar el patrón de interferencia producido por el interferómetro con el haz ensanchado de un láser.
3. Emplear la técnica interferométrica para determinar la longitud de onda del láser de He-Ne.

Introducción teórica:

Un interferómetro tipo Fabry-Perot es un interferómetro compuesto por dos placas planas enfrentadas altamente reflejantes; pero parcialmente transmisoras. Cuando un haz incide en una placa, se refleja en la cara de la segunda placa en un porcentaje relativamente alto, pero también se transmite parcialmente en ella. El haz primero reflejado experimenta un segundo reflejo en la cara de la primera placa y se dirige a la cara de la segunda placa. Ahí se transmite parcialmente, aunque otro porcentaje se refleja de retorno a la primera placa.

En dependencia de la reflectividad de las caras (que puede ser del 90% o mayor), el proceso continúa hasta generarse múltiples haces transmitidos por la segunda placa. Éstas se superponen produciendo una irradiancia total, que es la observada. Una superposición similar se produce hacia la fuente por la superposición de los haces transmitidos por la primera placa. Esta irradiancia no se considerará directamente en el ejercicio experimental propuesto. El esquema adjunto puede proporcionar una idea del proceso descrito.



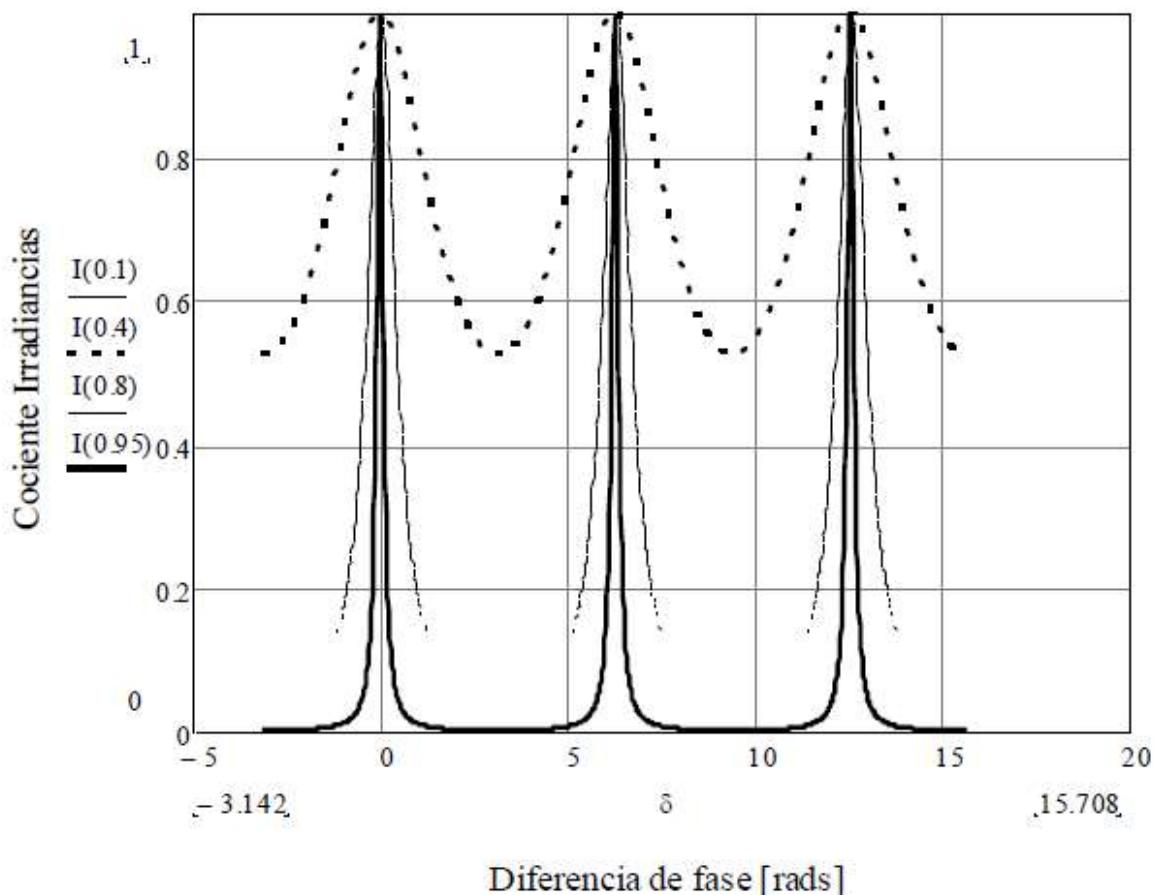
En la figura, una lente colimadora L_c dirige los rayos provenientes de la fuente hacia el par de placas (etalón) montadas en un mecanismo deslizable. El tornillo T_a ajusta al espaciamiento d entre las caras internas caracterizadas por un coeficiente de Fresnel de reflexión r . Otros dos tornillos (no mostrados), ajustan dos ángulos de una placa en ejes perpendiculares. La lente L_o envía a su plano focal P los rayos de igual inclinación (aproximación paraxial). Estos arriban a P con una diferencia de fase δ entre rayos contiguos. Esta fase δ depende del ángulo de incidencia en el espaciamiento de las placas, de la separación d y del índice de refracción de ahí mismo. La superposición de las amplitudes emergentes forma una serie geométrica con base $r^2 \cdot e^{i\delta}$. Puede mostrarse que, en el límite de un número de rayos N tendiendo a ∞ y sin absorción en las placas, la irradiancia total correspondiente I_T puede expresarse como:

$$I_T = I_0 \cdot \frac{1}{(1 + [2r/(1 - r^2)]^2 \cdot \sin^2(\delta/2))}$$

con I_0 la irradiancia total incidente. Cuatro gráficas del cociente

$$I(r) = I_T(r)/I_0$$

como función de δ se muestran a continuación, permitiendo notar la diferencia de anchos entre máximos y mínimos. Los distintos valores de r son, de arriba hacia abajo, 0.1, 0.4, 0.8 y 0.95. La diferencia de anchos es mayor, en particular, para valores de r mayores a 0.8.



El patrón es similar al descrito para el interferómetro tipo Michelson en cuanto a ser de igual inclinación, por lo cual resulta circular en la aproximación paraxial. Así mismo, diferentes puntos de la fuente proporcionan iguales patrones en escala y posición en la misma aproximación. Las franjas brillantes son más estrechas que las oscuras para valores de r suficientemente altos.

Material y equipo:

- base de interferómetro
- láser de He – Ne de 0.5 [mW]
- montaje del espejo estacionario
- espejo móvil
- banco de alineamiento de láser
- portacomponentes especial
- portacomponentes estándar
- pantalla con escala milimétrica
- lente biconvexa $f = 18$ [mm]

EXPERIMENTO I. AJUSTE DEL INTERFERÓMETRO

- I.1 Disponga el equipo como indica la figura 10.1, con excepción de la lente, la cual se deberá incorporar posteriormente. Coloque el láser sobre su banco de alineamiento para que se halle a la altura apropiada.

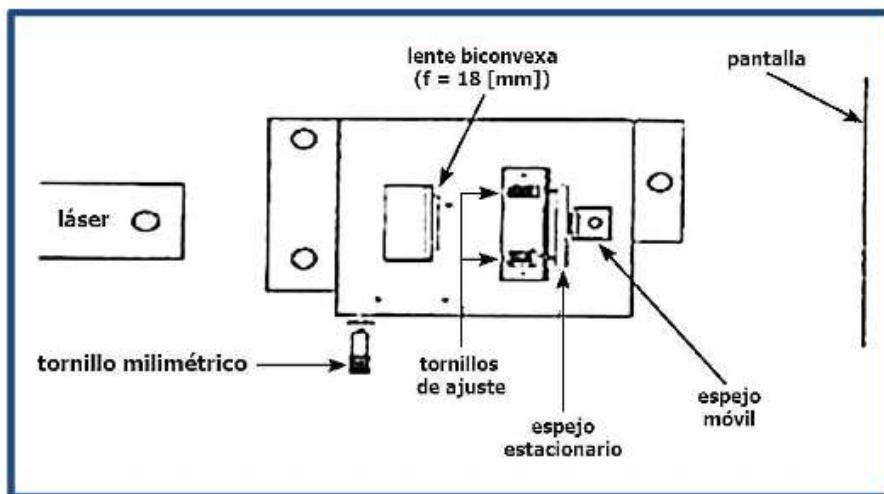


Figura 10.1 Dispositivo experimental

- I.2 Al utilizar el láser deben observarse estrictamente las precauciones siguientes:
- a) Nunca mirar directamente el haz luminoso del láser, ni sus reflexiones en espejos o superficies metálicas.
 - b) Colocar el láser en una posición tal, que se evite cualquier posibilidad de contacto visual accidental con el haz luminoso por parte de los integrantes de la propia brigada de trabajo o de los miembros de otras brigadas.
 - c) Apagar el láser antes de moverlo hacia otro dispositivo experimental.
- I.3 Encienda el láser y dirija su haz a través del etalón hacia la pantalla.
- I.4 Ajuste la inclinación del espejo estacionario hasta que se observe un sólo punto brillante en la pantalla. Para ello utilice los dos tornillos de ajuste ubicados (en posición horizontal) en la parte posterior del espejo.

EXPERIMENTO II. PATRÓN DE INTERFERENCIA

- II.1 Por medio del portacomponentes especial coloque la lente biconvexa sobre la base del interferómetro a 6 [cm] aproximadamente del espejo estacionario, en la trayectoria del láser, como lo indica la figura 9a.1.
- II.2 Observe el patrón de interferencia que se forma en la pantalla y acérquela o aléjela para que la visión del patrón resulte lo más clara posible.

EXPERIMENTO III. LONGITUD DE ONDA DEL LÁSER.

- III.1 Gire suavemente el tornillo micrométrico. Si se halla asegurado, gire la tuerca que lo asegura; ésta es de color negro y se encuentra cerca de la base del tornillo.

Observe cómo al girar el tornillo micrométrico, las franjas del patrón de interferencia se desplazan, de tal manera que la posición original de una franja es ocupada sucesivamente por otras.

- III.2 El tornillo micrométrico controla, por medio de un sistema de palanca, el movimiento del espejo móvil, que lo aleja o lo aproxima al espejo estacionario.

El sistema está calibrado de modo que cada división en la escala del tornillo micrométrico representa un desplazamiento de un micrómetro (μm) por una parte del espejo móvil o, lo que es lo mismo, una vuelta completa del tornillo corresponde a un desplazamiento del espejo de 25 [\mu m] ($\pm 1\%$).

El...

número Δm de franjas que pasan por una posición dada en la pantalla, cuando la separación de los espejos experimenta un cambio Δd , guarda con la longitud de onda λ de la radiación la relación siguiente:

$$\lambda \Delta m = 2 \Delta d$$

- III.3 Registre la lectura del tornillo y luego gírello lentamente al tiempo que cuenta las franjas que pasan por una posición determinada en la pantalla. Cuente 20 o 30 franjas y registre la lectura nueva del tornillo micrométrico. Repita el proceso completo por lo menos 5 veces y anote sus resultados.

Cuestionario

1. ¿Cuál es el principio de operación del interferómetro de Fabry – Perot?
2. ¿Qué parte del interferómetro de Fabry – Perot recibe el nombre de etalón?
3. ¿A cuál de los tipos de interferómetros, divisores de frente de onda o divisores de amplitud, pertenece el de Fabry – Perot?
4. En el interferómetro de Fabry – Perot, y, en general, en la interferencia de haces múltiples, ¿qué relación existe entre la longitud de onda λ de la radiación, la separación d entre las superficies reflectoras y el orden de interferencia m ?

Bibliografía.

1. P. M. Fishbane y otros. Física para Ciencias e Ingeniería. Volumen II. Editorial Prentice – Hall Hispanoamericana, S.A.
A. Cromer. Física en la Ciencia y en la Industria. Editorial Reverté, S.A.
2. R. A. Serway. Física. Tomo II. Editorial McGraw – Hill.
3. R. L. Soto Morán y otros. Análisis y Procesamiento de los Datos Experimentales. Facultad de Física Universidad de la Habana. Cuba. 1999.
4. Hecht E.; “ÓPTICA”. Editorial Adisson –Wesley Iberoamericana. 3^a. Edición.España, 2000. •
5. Resnick R., Halliday D.y Krane K.S.; “FÍSICA” Vol. I. Editorial C.E.C.S.A. 3^a edición. México, 1997.

Práctica XII: Fotoelasticidad

Objetivos:

El estudiante debe ver la utilidad del método de interferogramas en muestras isotrópicas bajo la aplicación de esfuerzos mecánicos.

Introducción teórica:

La velocidad de la luz depende de las características ópticas del medio por el que se propaga. Normalmente, la velocidad de la luz en un medio material se suele relacionar con la que tiene en un medio de referencia (el vacío, normalmente). El índice de refracción, que mide la anterior relación entre las velocidades, se define como el cociente entre la velocidad de propagación de la luz en el vacío (300.000 km/s) y la velocidad en el medio material que se considera. Un medio material se define como ópticamente homogéneo e

isótropo cuando su índice de refracción es el mismo en cualquier punto del sólido y, además, su valor es independiente de la dirección del rayo luminoso que lo ilumina. Algunos materiales exhiben una curiosa propiedad denominada doble refracción o birrefringencia. En este tipo de materiales, el índice de refracción, depende de la orientación relativa del vector campo eléctrico respecto del material considerado. Existen materiales no cristalinos, tales como resinas sintéticas, baquelita, etc., que cuando están libres de tensión presentan propiedades ópticas de carácter isótropo; es decir, el índice de refracción n_0 ($n_0 = c/v$, donde c es la velocidad de propagación de la luz en el vacío y v es la velocidad de propagación en el medio considerado) es independiente de cualquiera que sea la dirección considerada dentro del medio material. Sin embargo, cuando los citados materiales se encuentran sometidos a un estado tensional se vuelven anisótropos, presentando un índice de refracción que depende de cual sea la dirección considerada. Si suponemos que el estado de tensión en un punto del material viene representado por los valores de sus tensiones principales $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, los correspondientes índices de refracción, para cada una de las direcciones principales, vienen dados por lo que se conocen como leyes de Maxwell:

$$n_1 - n_0 = p \sigma_1 + q (\sigma_2 + \sigma_3)$$

$$n_2 - n_0 = p \sigma_2 + q (\sigma_1 + \sigma_3)$$

$$n_3 - n_0 = p \sigma_3 + q (\sigma_2 + \sigma_1)$$

Cuando $\sigma_3=0$ (estado de tensión plana) las expresiones anteriores se reducen, pudiéndose poner la primera de ellas como:

$$n_1 - n_2 = C (\sigma_1 - \sigma_2)$$

siendo C es una constante del material que recibe el nombre de constante fotoelástica del medio en cuestión, que se determina de manera experimental y que depende de la longitud de onda de la luz incidente así como también de la temperatura. La ecuación anterior se conoce como la ley de Brewster y constituye la relación básica de la fotoelasticidad. Antes de continuar es interesante conocer que Sir David Brewster (1781-1868) era profesor de física en la universidad de St. Andrews (Escocia) y a él debemos, además de la importantísima contribución anterior, una invención que la mayoría de nosotros, alguna vez, hemos disfrutado: el caleidoscopio.

Las ondas consisten en dos perturbaciones (un campo eléctrico y otro magnético ortogonales entre si) cuyos vectores representativos son ortogonales a la dirección de propagación, tal como se indica en la figura 1.

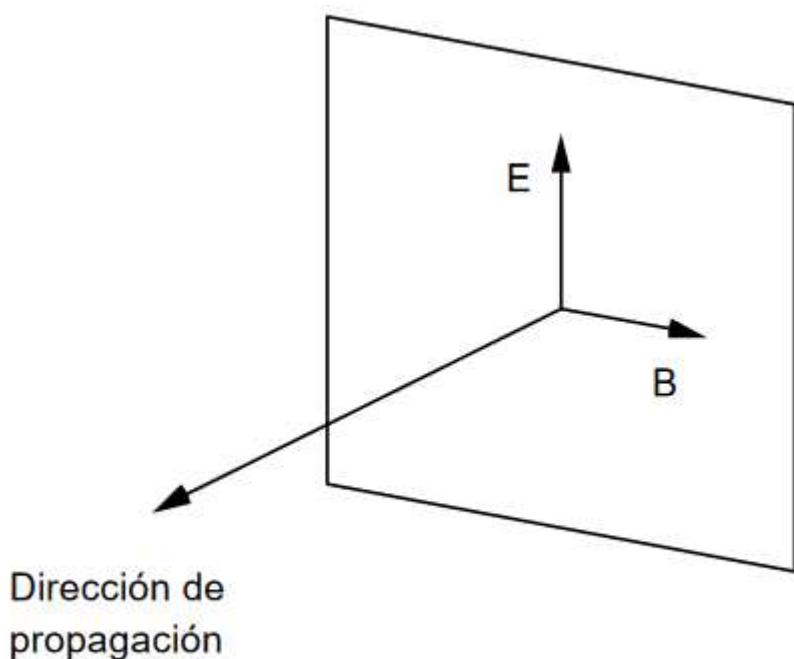


Figura 1

El vector campo eléctrico $E = A \cos(kx - \omega t)$, donde x es la abcisa según la dirección de propagación, A es la amplitud, ω es la pulsación de la onda ($=2\pi f$, siendo f la frecuencia de la onda) y k el número de ondas ($=2\pi/\lambda$, siendo λ la longitud de onda), es ortogonal a la dirección de propagación. En general (luz no polarizada) la dirección de E cambia en un punto considerado a lo largo del tiempo. Si la luz se encuentra polarizada linealmente el vector E siempre se encuentra contenido en el mismo plano. Si la luz se encuentra polarizada circularmente, el extremo del vector E va describiendo, a medida que avanza el tiempo y la luz se propaga, una circunferencia. De manera análoga se puede describir la luz polarizada elípticamente cuando el extremo del vector E describe una elipse. Para familiarizar al lector con la terminología que aparecerá, se denomina Polarizador y Analizador a unas láminas delgadas que convierten la luz sin polarizar en luz polarizada linealmente según una dirección que se denomina eje del polarizador o analizador, respectivamente. Antes de continuar con los desarrollos matemáticos que se avecinan, que resultan algo pesados, es interesante conocer el siguiente anecdotario: la primera hoja polaroid, cuyo nombre ya orienta acerca de su uso, fue inventada en 1928 por Edwin H. Land teniendo 19 años y siendo aún estudiante. Esta hoja incorporaba una sustancia denominada herapatita (luego veremos el origen de este nombre) o peryoduro sulfatado de quinina. Land se apoyó en las observaciones de un físico de Bristol (Inglaterra) llamado William B. Herapath (de ahí el nombre de herapatita) que aprovechó las observaciones de un tal Mister Phelps, que era alumno suyo, y que consistían en lo siguiente: dicho señor había observado que cuando echaba yodo a la orina de un perro, al que se había

incorporado a su dieta quinina, se formaban unos cristalitos de color verde; los critales así formados, y superpuestos unos a otros, fueron analizados al microscopio por el Dr. Herapath quien observó que existían zonas en las que la luz atravesaba la capa de critales y otras zonas se encontraban a oscuras. De esta manera tan rocambolesca fue como se descubrió este nuevo material polarizador. Los instrumentos que se utilizan en las técnicas fotoelásticas son los polariscopios. Los hay de dos tipos: el polariscopio plano y el polariscopio circular. Vamos a usar el primer tipo.

FUNDAMENTO TEORICO DEL METODO DE LA FOTOELATICIDAD Y DEL POLARISCOPIO PLANO

Veamos el funcionamiento del polariscopio plano. Consideremos el esquema que se muestra en la figura 2:

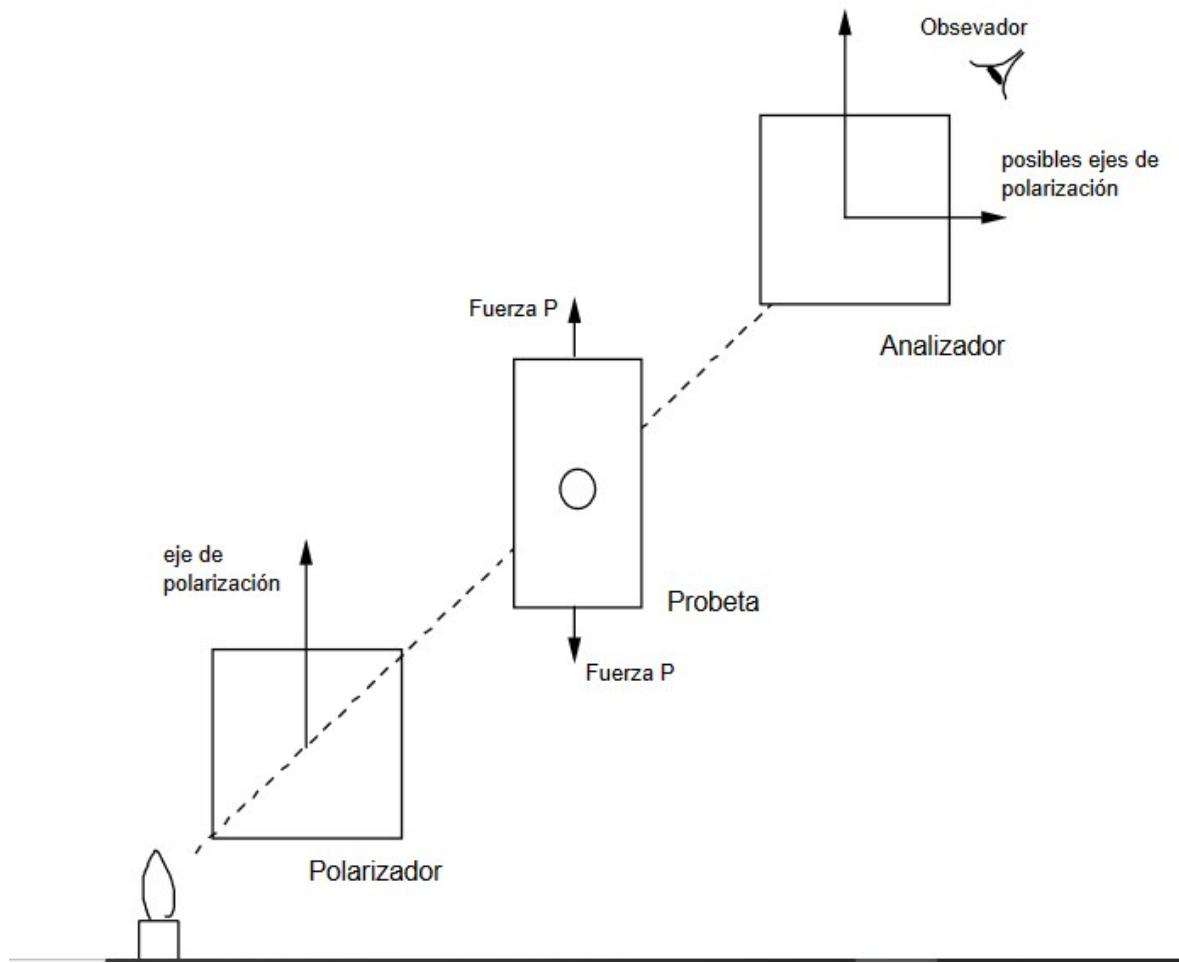


FIGURA 2

La luz que produce un foco luminoso (luz no polarizada) atraviesa un polarizador que la polariza linealmente. El campo eléctrico de la luz polarizada puede ponerse como: $E=A \cos \omega t$. Al atravesar dicha onda luminosa la probeta, se descompondrá de acuerdo a las direcciones principales de la misma (ver figura 3):

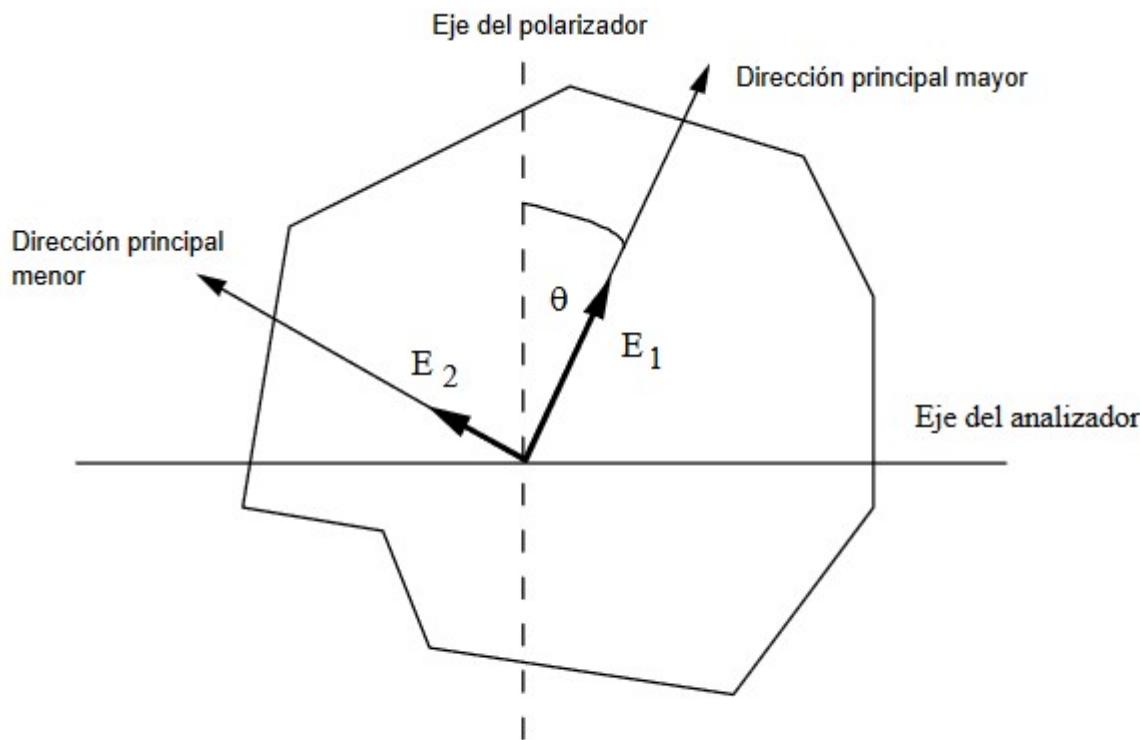


FIGURA 3

Las dos vibraciones que llegan al modelo ($E_1 = A \cos \theta \cdot \cos \omega t$ y $E_2 = A \sin \theta \cdot \cos \omega t$) lo atraviesan sufriendo una retraso respecto de la otra. Si llamamos e al espesor del modelo, el tiempo t_1 que necesita la componente de E paralela al eje principal mayor es:

$$t_1 = \frac{e}{v_1}$$

donde v_1 es la velocidad a la que se propaga esta componente dentro del modelo. De igual manera, el tiempo t_2 que necesita la componente de E paralela al eje principal menor es:

$$t_2 = \frac{e}{v_2}$$

donde v2 representa la velocidad a la que se propaga esta componente. El desfase entre ambas componentes, una vez que han atravesado el modelo será:

$$\omega(t_1 - t_2)$$

y las componentes según los ejes principales mayor y menor serán, respectivamente:

$$E'_1 = A \cos \omega(t - t_1) \cos \theta$$

$$E'_2 = A \cos \omega(t - t_2) \sin \theta$$

Proyectando estas componentes sobre el eje del analizador (que se supone ortogonal al del polarizador) se obtienen las siguientes componentes sobre dicho eje:

$$E''_1 = E'_1 \sin \theta = \frac{A}{2} \cos \omega(t - t_1) \cdot \sin 2\theta$$

$$E''_2 = E'_2 \cos \theta = \frac{A}{2} \cos \omega(t - t_2) \cdot \sin 2\theta$$

La composición de estas dos vibraciones proporciona una perturbación total, según el eje del analizador, dada por:

$$\begin{aligned} & \frac{A}{2} \sin 2\theta \left[\cos \omega(t - t_1) - \cos \omega(t - t_2) \right] = \\ & = A \sin 2\theta \cdot \sin \omega \frac{t_1 - t_2}{2} \cdot \sin \omega \left(t - \frac{t_1 + t_2}{2} \right) \end{aligned}$$

que representa una perturbación de la misma pulsación (frecuencia) que la del rayo incidente y cuya amplitud B vale:

$$B = A \sin 2\theta \cdot \sin \omega \frac{t_1 - t_2}{2} \quad Ec. (1)$$

B es máxima cuando:

$$\omega \frac{t_1 - t_2}{2} = \frac{2n+1}{2} \pi$$

siendo n un número entero, y es nula cuando:

$$\omega \frac{t_1 - t_2}{2} = n\pi$$

pero:

$$\omega \frac{t_1 - t_2}{2} = \frac{\omega e}{2c} (n_1 - n_2)$$

siendo, en este caso, c la velocidad de la luz en el aire. Utilizando la ley de Brewster:

$$\frac{\omega(t_1 - t_2)}{2} = \frac{\pi e}{\lambda} C(\sigma_1 - \sigma_2) \left\{ \begin{array}{l} \text{Interf. construct.: } \frac{eC}{\lambda}(\sigma_1 - \sigma_2) = \frac{2n+1}{2} \\ \text{Interf. destruct.: } \frac{eC}{\lambda}(\sigma_1 - \sigma_2) = n \end{array} \right.$$

Introduciendo una nueva constante (F =valor de franja= λ/C) la interferencia destructiva (franja negra en la pantalla de observación) se produce cuando:

$$(\sigma_1 - \sigma_2) = \frac{nF}{e}$$

se conoce como la fórmula fundamental de la fotoelasticidad. El valor de n puede calcularse en cada punto contando el número de mínimos que se producen al aplicar la carga al modelo. Nótese que la ecuación (1) también se hace nula cuando

$$\operatorname{sen} 2\theta = 0 \Rightarrow \theta = n \frac{\pi}{2} \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

que representan aquellos puntos en los que las direcciones principales son coincidentes con los ejes de polarización del polarizador y del analizador. Usando este polaríscopio se obtiene una superposición de isocromáticas y de isóclinas.

Material y equipo:

1 pinza soporte de mesa	2 pinzas
1 varilla soporte de 25 cm.	2 polaroides
1 varilla soporte de 87,5 cm.	1 pantalla translúcida con vástagos
1 nuez con enchufe	1 soporte para lente de 42 mm. Ø
4 dobles nueces	1 lente de (+ 10 cm.) de 42 mm Ø
1 foco luminoso con lente	2 piezas de celuloide
1 diafragma iris	1 cinta de plástico

Procedimiento experimental:

Se ponen los polaroides en posición de extinción y se introduce la pieza de celuloide.

Al hacer fuerza como con unas tijeras, aparecen curvas de luz y oscuridad.

En determinados puntos se ven acumulaciones de estas líneas, lo que indica que en ellos se producen los mayores esfuerzos y deformaciones; y si fuese, por ejemplo, pieza a escala de una máquina, un útil de trabajo, etc., estos puntos tendrían que ser robustecidos.

Repítase la experiencia con la otra pieza de celuloide y con la cinta de plástico; esta última tirando de sus extremos y retorciéndola.

Presentación de resultados

Fotos de la interferogramas para diferentes muestras y diferentes fuerzas.

Cuestionario

1. Tenemos una muestra isotrópica en la Fig.2 y la fuerza aplicada es cero. ¿Qué vamos a ver?
2. Tenemos una muestra cuadrada isotrópica. Una vez aplicamos una fuerza en la dirección horizontal, otra vez aplicamos la misma fuerza en dirección vertical. ¿Habrá diferencia entre las interferogramas?
3. Tenemos una muestra circular isotrópica (un disco). Una vez aplicamos una fuerza en la dirección horizontal, otra vez aplicamos la misma fuerza en dirección vertical. ¿Habrá diferencia entre las interferogramas?

Bibliografía.

1. P. M. Fishbane y otros. Física para Ciencias e Ingeniería. Volumen II. Editorial Prentice – Hall Hispanoamericana, S.A.
A. Cromer. Física en la Ciencia y en la Industria. Editorial Reverté, S.A.
2. R. A. Serway. Física. Tomo II. Editorial McGraw – Hill.
3. R. L. Soto Morán y otros. Análisis y Procesamiento de los Datos Experimentales. Facultad de Física Universidad de la Habana. Cuba. 1999.
4. Hecht E.; “ÓPTICA”. Editorial Adisson –Wesley Iberoamericana. 3^a. Edición.España, 2000.♦
5. Resnick R., Halliday D.y Krane K.S.; “FÍSICA” Vol. I. Editorial C.E.C.S.A. 3^a edición. México, 1997.

Difracción de electrones en una red policristalina (Difracción de Debye-Scherrer)

Objetivos del experimento

- Determinación de la longitud de onda de los electrones
- Verificación de la ecuación de de Broglie
- Determinación de la distancia reticular interplanar del grafito

Principios

En 1924 Louis de Broglie sugirió que las partículas podrían tener propiedades ondulatorias, además de las propiedades características de las partículas. Presentó la hipótesis de que la longitud de onda de las partículas es inversamente proporcional a su cantidad de movimiento:

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

λ : longitud de onda

h : constante de Planck

p : cantidad de movimiento

Sus conjeturas fueron confirmadas por los experimentos de Clinton Davisson y Lester Germer sobre la difracción de electrones en estructuras cristalinas de níquel en 1927.

En este experimento se demuestra el carácter ondulatorio de los electrones por su difracción en una red policristalina de grafito (difracción de Debye-Scherrer). En contraposición al experimento de Davisson y Germer, en el que la difracción de los electrones se observa por reflexión, este montaje usa un tipo de difracción por transmisión similar al utilizado por G. P. Thomson en 1928.

De los electrones emitidos por el cátodo caliente, un pequeño haz es separado por medio de un diagrama de pines. Luego de pasar por un sistema de enfoque óptico-electrónico, los electrones inciden en forma de un haz monocromático muy limitado en una lámina policristalina de grafito. Los átomos del grafito pueden ser considerados como una red espacial que actúa como una rejilla de difracción para los electrones.

En la pantalla fluorescente aparece un patrón de difracción de dos anillos concéntricos, cuyo centro es el haz de electrones sin difractar (Fig. 1). El diámetro de los anillos concéntricos varía según la longitud de onda λ y por lo tanto

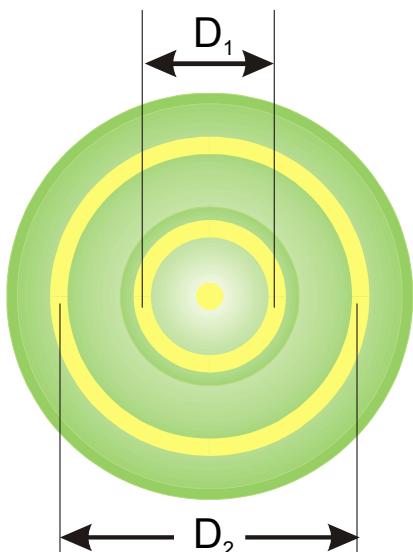


Fig. 1: Representación esquemática del patrón de anillos observado debido a la difracción de electrones en el grafito. Se observan dos anillos de diámetros D_1 y D_2 correspondientes a las distancias reticulares interplanares d_1 y d_2 (Fig. 3).

con la tensión de aceleración U, tal como se desprende de las siguientes consideraciones:

De la ecuación de energía para los electrones acelerados por la tensión U

$$e \cdot U = \frac{1}{2} m \cdot v^2 = \frac{p^2}{2 \cdot m} \quad (\text{II})$$

U: tensión de aceleración

e: carga del electrón

m: masa de la partícula

v: velocidad de la partícula

la cantidad de movimiento p se puede derivar como

$$p = m \cdot v = \sqrt{2 \cdot e \cdot m \cdot U} \quad (\text{III})$$

Reemplazando la ecuación (III) en la ecuación (I) resulta para la longitud de onda:

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2 \cdot m \cdot e \cdot U}} \quad (\text{IV})$$

En 1913, H. W. y W. L. Bragg descubrieron que la disposición regular de los átomos en un cristal simple podría entenderse como una matriz de elementos reticulares en planos reticulares paralelos. Entonces, al exponer esta red cristalina a rayos X monocromáticos o electrones monoenergéticos y, además, suponiendo que éstos tienen una naturaleza ondulatoria, cada elemento en un plano reticular actúa como un "punto de dispersión", en el cual se forma un tren de ondas esféricas. Según el principio de Huygens, estos trenes de ondas esféricas se superponen y crean un frente de onda "reflejado". En este modelo, la longitud de onda λ no se modifica respecto del frente de onda "incidente", y las direcciones de las radiaciones que son perpendiculares a los dos frentes de onda cumplen con la condición "ángulo de incidencia = ángulo de reflexión".

En los rayos vecinos reflejados en los planos reticulares individuales se genera una interferencia constructiva cuando las diferencias de trayectoria $\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 = 2 \cdot d \cdot \sin \theta$ son múltiplos enteros de la longitud de onda λ (Fig. 2):

$$2 \cdot d \cdot \sin \theta = n \cdot \lambda \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (\text{V})$$

d: distancia reticular interplanar

θ : ángulo de difracción

Esta es la denominada "condición de Bragg" y el ángulo de difracción θ correspondiente es conocido como ángulo rasante.

En este experimento se utiliza un material policristalino como objeto de difracción. Esto equivale a una gran cantidad de pequeños cristalitos individuales que están dispersos en el espacio en forma irregular. Como consecuencia de esto, siempre hay algunos cristales en los que se satisface la condición de Bragg para una dirección de incidencia y longitud de onda dadas. Las reflexiones producidas por estos cristalitos quedan en conos cuyo eje común está dado por la dirección de incidencia. De ahí que aparezcan círculos concéntricos en una pantalla ubicada perpendicular a este eje. Los planos reticulares que son importantes para el patrón de difracción de los electrones obtenido con este montaje tienen las distancias reticulares interplanares (Fig. 3):

$$d_1 = 2,13 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

$$d_2 = 1,23 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

De la Fig. 4 se puede deducir la relación

$$\tan 2 \cdot \theta = \frac{D}{2 \cdot L} \quad (\text{VI})$$

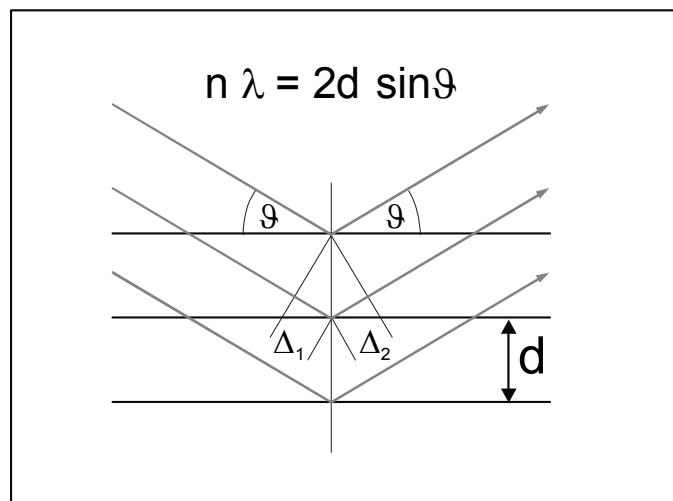


Fig. 2: Representación esquemática de la condición de Bragg.

Aproximando $\tan 2 \cdot \theta = \sin 2 \cdot \theta = 2 \cdot \sin \theta$ para ángulos pequeños se obtiene

$$2 \cdot \sin \theta = \frac{D}{2 \cdot L} \quad (\text{VII})$$

La substitución de la ecuación (VII) en (V) lleva la difracción de primer orden ($n = 1$) a

$$\lambda = d \cdot \frac{D}{2 \cdot L} \quad (\text{VIII})$$

D: diámetro del anillo

L: distancia entre el grafito y la pantalla

d: distancia reticular interplanar

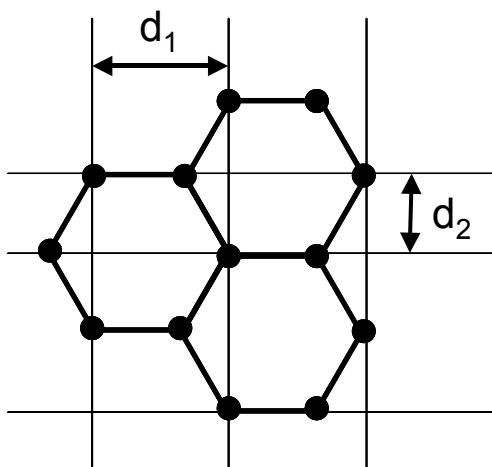


Fig. 3 Distancias reticulares interplanares en el grafito:

$$d_1 = 2,13 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

$$d_2 = 1,23 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

Materiales

1 tubo de difracción de electrones.....	555 626
1 portatubo	555 600
1 fuente de alimentación de alta tensión 10 KV	521 70
1 calibre Vernier de precisión	311 54
1 cable de seguridad de 25 cm rojo	500 611
1 cable de seguridad de 50 cm rojo	500 621
1 cable de seguridad de 100 cm rojo.....	500 641
1 cable de seguridad de 100 cm azul.....	500 642
2 cables de seguridad de 100 cm negros.....	500 644

Según la ecuación (IV), la longitud de onda λ está determinada por la tensión de aceleración U . La combinación de las ecuaciones (IV) y (VIII) muestra que los diámetros D_1 y D_2 de los anillos concéntricos cambian en función de la tensión de aceleración U :

$$D = k \cdot \frac{1}{\sqrt{U}} \quad (\text{IX})$$

con

$$k = \frac{2 \cdot L \cdot h}{d \cdot \sqrt{2 \cdot m \cdot e}} \quad (\text{X})$$

La medición de los diámetros D_1 y D_2 en función de la tensión de aceleración U permite determinar las distancias reticulares interplanares d_1 y d_2 .

Notas de seguridad

Cuando el tubo de difracción de electrones es operado a altas tensiones superiores a 5 kV se generan rayos X.

- No opere el tubo de difracción de electrones a tensiones superiores a los 5 keV.

La conexión del tubo de difracción de electrones con ánodo a tierra indicada en esta Hoja de instrucciones requiere de una fuente de tensión a prueba de alta tensión para calentar el cátodo.

- Use la fuente de alimentación de alta tensión de 10 KV (521 70) para la alimentación de tensión del tubo de difracción de electrones.

Peligro de implosión: El tubo de difracción de electrones es un tubo de alto vacío con paredes de vidrio muy delgadas.

- No someta al tubo de difracción de electrones a esfuerzos mecánicos, y conéctelo únicamente si está montado en el portatubo.
- Manipule con cuidado las clavijas conectadoras del casquillo, no las doble y colóquelas con cuidado en el portatubo.

El tubo de difracción de electrones puede romperse si se le suministran tensiones o corrientes demasiado altas:

- Aténgase a los parámetros de operación indicados en los datos técnicos.

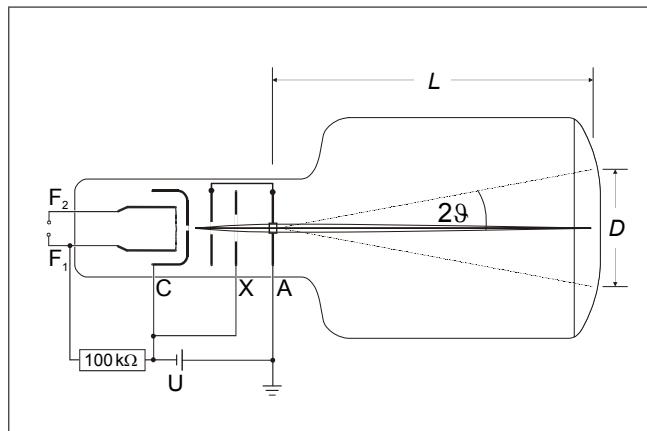


Fig. 4: Bosquejo esquemático para determinar el ángulo de difracción.

$L = 13,5 \text{ cm}$ (distancia entre la lámina de grafito y la pantalla),

D : diámetro de un anillo de difracción observado en la pantalla.

2θ : ángulo de difracción.

Para el significado de F_1 , F_2 , C , X y A ver Fig. 5.

Montaje

La Fig. 5 muestra el montaje experimental (diagrama de cableado).

- Conecte los enchufes hembra para calentar el cátodo F_1 y F_2 del portatubo a la salida en la parte trasera de la fuente de alimentación de alta tensión de 10 KV.
- Conecte los enchufes hembra C (tapa del cátodo) y X (electrodo de enfoque) del portatubo al polo negativo.

- Conecte el enchufe hembra A (ánodo) al polo positivo de la salida de 5 kV/2 mA de la fuente de alimentación de alta tensión de 10 kV.
- Realice la conexión a tierra del polo positivo de la fuente de alimentación de alta tensión de 10 kV.

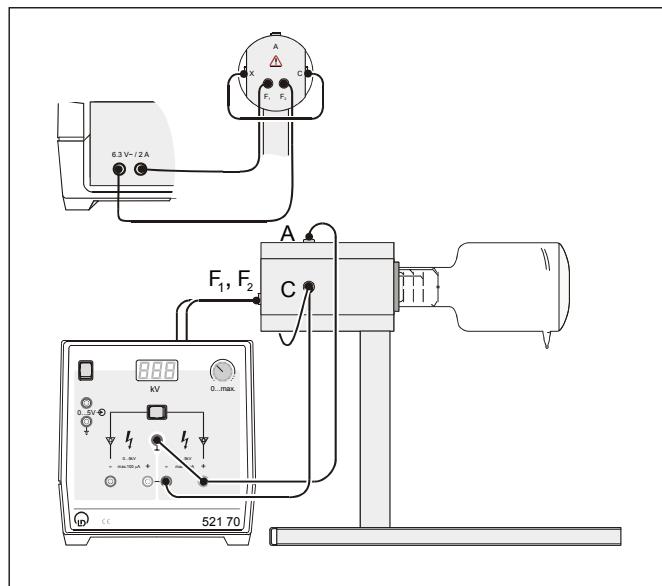


Fig. 5: Montaje experimental (diagrama de cableado) para observar la difracción de los electrones en el grafito.

Conexión de pines:

F₁, F₂: enchufes hembra para calentar el cátodo

C: tapa del cátodo

X: electrodo de enfoque

A: ánodo (con lámina de grafito policristalino, ver Fig. 4)

Realización del experimento

- Aplique una tensión de aceleración U ≤ 5 kV y observe el patrón de difracción.

Consejo: La dirección del haz de electrones se puede influenciar por medio de un imán, que puede aferrarse al cuello del tubo, cerca del sistema de enfoque de electrones. Para iluminar otro punto de la muestra tal vez sea necesario ajustar el imán si no se pueden distinguir perfectamente al menos dos anillos de difracción en el patrón de difracción.

- Varíe la tensión de aceleración U entre 3 kV y 5 kV en pasos de 0,5 kV y mida el diámetro D₁ y D₂ de los anillos de difracción en la pantalla (Fig. 1).
- Mida la distancia entre la lámina de grafito y la pantalla.

Ejemplo de medición

Tabla 1: Mediciones de los diámetros D₁ y D₂ (promedio de 5 mediciones) de los anillos concéntricos de difracción en función de la tensión de aceleración U.

U kV	D ₁ cm	D ₂ cm
3,0	3,30	5,25
3,5	2,83	4,88
4,0	2,66	4,58
4,5	2,40	4,35
5,0	2,33	4,12

Distancia entre la lámina de grafito y la pantalla: L = 13,5 cm

Evaluación y resultados

a) Determinación de la longitud de onda de los electrones

A partir de los valores medidos para D₁ y D₂ y las distancias reticulares interplanares d₁ y d₂, la longitud de onda se puede determinar con la ecuación (VIII). El resultado para D₁ y D₂ está resumido en la Tabla 2 y la Tabla 3 respectivamente.

Nota: Al reescribir la ecuación (VIII) como

$$d = \lambda \cdot \frac{2 \cdot L}{D}$$

se ve que el diámetro D de los anillos (Fig. 1) es inversamente proporcional a las distancias reticulares interplanares d (Fig. 2). Esta información es necesaria para la evaluación de la longitud de onda a partir de las distancias reticulares interplanares (que en este caso se dieron como conocidas) según la ecuación (VIII). Los parámetros del plano reticular se deducen directamente en la parte c) usando las ecuaciones (IX) y (X).

El error dominante en las mediciones es la determinación de los diámetros D₁ y D₂ de los anillos. Para una precisión de lectura aproximada de 2 mm, el error es de aproximadamente 5% y 10 % en el anillo exterior e interior respectivamente.

Tabla 2: Medición del diámetro D₁ de los anillos de difracción concéntricos en función de la tensión de aceleración U. Las longitudes de onda λ₁ y λ_{1, teórica} son determinadas por la ecuación (VIII) y la ecuación (IV) respectivamente.

U kV	D ₁ cm	λ ₁ pm	λ _{1, teórica} pm
3,0	3,30	22,9	22,4
3,5	2,83	21,1	20,7
4,0	2,66	19,4	19,4
4,5	2,40	18,5	18,3
5,0	2,33	17,6	17,3

Tabla 3: Medición del diámetro D₂ de los anillos de difracción concéntricos en función de la tensión de aceleración U. Las longitudes de onda λ₂ y λ_{2, teórica} son determinadas por la ecuación (VIII) y la ecuación (IV) respectivamente.

U kV	D ₂ cm	λ ₂ pm	λ _{2, teórica} pm
3,0	5,25	22,6	22,4
3,5	4,88	21,0	20,7
4,0	4,58	19,7	19,4
4,5	4,35	18,6	18,3
5,0	4,12	17,5	17,3

b) Verificación de la ecuación de de Broglie

La relación de de Broglie (ecuación (I)) se puede verificar con $e = 1,6021 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

$$m = 9,1091 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

$$\hbar = 6,6256 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$$

en la ecuación (IV). Los resultados para la longitud de onda determinados por la ecuación (IV) son λ_1 , teórica y λ_2 , teórica. Están enunciados para los diámetros D_1 y D_2 en la Tabla 2 y la Tabla 3 respectivamente. Los valores λ_1 y λ_2 determinados por el patrón de difracción concuerdan bastante bien con los valores teóricos λ_1 , teórica y λ_2 , teórica según la relación de de Broglie.

c) Determinación de las distancias reticulares interplanares del grafito

En la Fig. 6 se trazaron los diámetros D_1 y D_2 en función de $1/\sqrt{U}$. Las pendientes k_1 y k_2 están determinadas por ajustes lineales que atraviesan el origen según la ecuación (IX) para los datos experimentales:

$$k_1 = 1,578 \cdot m \sqrt{V}$$

$$k_2 = 2,729 \cdot m \sqrt{V}$$

Resolviendo la ecuación (X) para la distancia reticular interplanar d

$$d = \frac{2 \cdot L \cdot h}{k \cdot \sqrt{2 \cdot m \cdot e}}$$

Información complementaria

Luego de los experimentos de Davisson y Germer, otros experimentos con efectos ondulatorios de partículas ocasionados por partículas confirmaron la relación de de Broglie y, por lo tanto, el dualismo onda-partícula. En 1930, por ejemplo, O. Stern e I. Esterman lograron demostrar la difracción de moléculas de hidrógeno y en 1931 difractaron átomos de helio usando un cristal de fluoruro de litio.

Los resultados experimentales que pueden ser descriptos por la teoría cuántica sólo tienen la constante de Planck h en su fórmula básica. En este experimento, por ejemplo, se puede determinar la constante de Planck a partir de la ecuación (X), si se puede asumir que se conocen las distancias reticulares d_1 y d_2 del grafito, por ejemplo, a partir del análisis de la estructura de los rayos X:

$$h = \frac{d \cdot k \cdot \sqrt{2 \cdot m \cdot e}}{2 \cdot L}$$

Usando los valores k_1 y k_2 obtenidos por el ajuste lineal correspondiente a los datos experimentales (Fig. 6), se obtiene

$$d_1: h = 6,724 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$$

$$d_2: h = 6,717 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$$

Bibliografía: $h = 6,6256 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$

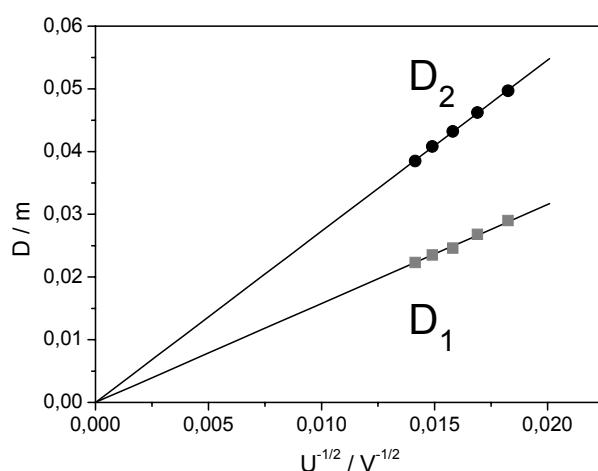


Fig. 6: Diámetros D_1 y D_2 de los anillos en función de $1/\sqrt{U}$. Las líneas continuas corresponden a los ajustes lineales con las pendientes $k_1 = 1,578 \text{ m} \sqrt{V}$ y $k_2 = 2,729 \text{ m} \sqrt{V}$, respectivamente.

tenemos como resultado

$$d_1 = 2,10 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

$$d_2 = 1,21 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

lo cual está dentro de los límites de error según los parámetros especificados en la Fig. 3.

Práctica 4. Difracción de Rayos X

Objetivo: Manejo de un equipo de difracción de rayos X. Obtención de difractogramas, realización de su indexación e identificación de sustancias y mezclas. Obtención del grado de cristalinidad en un polímero

1.- Fundamentos

El fundamento de esta técnica reside en el fenómeno conocido como dispersión “scattering” de una radiación X cuando incide sobre la materia. Este fenómeno consiste en que parte de la radiación X incidente se desvía de su dirección original por interacción con el material irradiado.

1.1.- El estado cristalino

En la mayoría de los sólidos, las grandes fuerzas de atracción o cohesión que existen entre las partículas que lo componen, hacen que éstas se distribuyan regular y simétricamente en el espacio. Estos sólidos reciben el nombre de sólidos cristalinos o cristales.

Existen algunos sólidos, llamados sólidos amorfos o vidrios, a los que les falta la ordenación de largo alcance de los sólidos cristalinos. Estructuralmente, podrían considerarse como líquidos con una gran viscosidad, recibiendo a veces el nombre de líquidos sobreenfriados.

Existen también un gran número de sustancias que, en estado líquido, posee una gran regularidad interna (monodimensional o bidimensional), intermedia entre el desorden de un líquido ordinario y la ordenación periódica de un sólido cristalino. Estas fases líquidas reciben el nombre de cristales líquidos.

1.1.1.- Concepto de cristal

Un cristal puede considerar formalmente descrito por un sistema de átomos o de iones o de moléculas, periódicamente ordenados en el espacio.

Un cristal es una sustancia homogénea, es decir, en cualquier parte del cristal, cada átomo, ión o molécula tiene un entorno idéntico que puede relacionarse con otros por sencillas operaciones de repetición (simetría). Un cristal con estas características sólo es estrictamente homogéneo si la periodicidad de la repetición se extiende hasta el infinito, en cuyo caso se define un cristal ideal.

Un cristal es anisótropo. Sus distintas propiedades físicas como dureza, dilatación térmica, conductividad, etc, dependen de la dirección en que se midan.

Muchas sustancias cristalinas presentan isotropía (metales, muchos minerales, etc.), pero esto es debido a que están formadas por un elevado número de pequeños cristalitos estadísticamente desorientados unos respecto a otros. Este tipo de sustancias reciben el nombre de *policristalinas*.

1.1.2.- Redes espaciales

Un cristal podría representarse por un conjunto infinito de puntos materiales (puntos con masa) homogéneamente ordenados en el espacio. A esta representación se la denomina red espacial.

Desde un punto de vista geométrico, una red plana puede considerarse originada por la sucesiva aplicación a un punto de una serie de traslaciones coplanares definidas por los vectores **a** y **b** (figura 1).

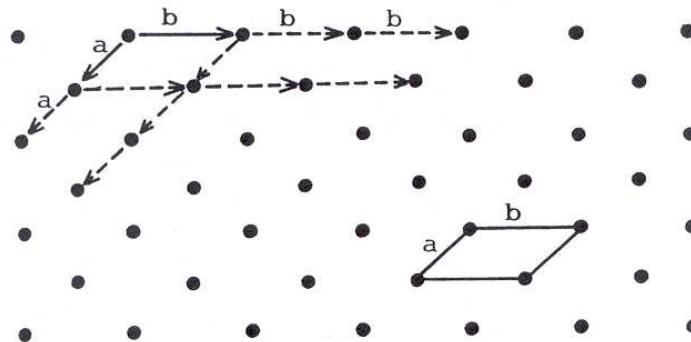


Figura 1.- Red plana. Figura tomada de: ALBELLA, J.M.; CINTAS, A.M.; MIRANDA, T. y SERRATOSA, J.M.: "Introducción a la ciencia de materiales". C.S.I.C., 1993.

De igual modo, una red espacial puede considerarse originada por la sucesiva aplicación a un punto de una serie de traslaciones no coplanares definidas por los vectores **a**, **b** y **c** (figura 2).

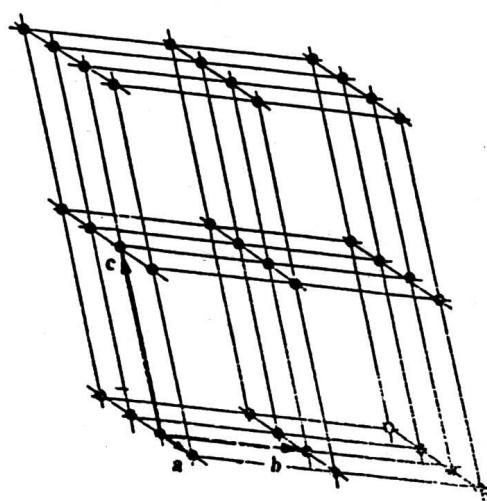


Figura 2.- Red espacial. Figura tomada de: ALBELLA, J.M.; CINTAS, A.M.; MIRANDA, T. y SERRATOSA, J.M.: "Introducción a la ciencia de materiales". C.S.I.C., 1993.

1.1.3.- Celdilla unidad. Parámetros cristalográficos

Uniendo entre sí los puntos de una red, es posible dividir el espacio en las mínimas secciones (paralelepípedos elementales) con simetría (figura 2). La red, por tanto, podría considerarse generada también por traslaciones de uno de estos paralelepípedos, representando cualquiera de ellos las características de la red en todos sus aspectos. A estos paralelepípedos elementales se los denomina *celdilla unidad*. Si tomamos como origen uno de sus vértices, la celdilla unidad queda definida por las direcciones y los módulos de los vectores de traslación **a**, **b** y **c** que definen los ejes cristalográficos. Entonces, para describir una celdilla unidad se necesita conocer las longitudes *a*, *b* y *c* y los ángulos α , β y γ que forman entre sí los tres vectores; estas seis magnitudes reciben el nombre de parámetros de celdilla, parámetros cristalográficos o parámetros de red (figura 3).

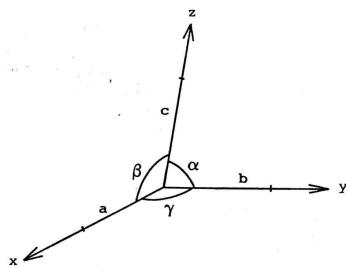


Figura 3.- Parámetros cristalográficos. Figura tomada de: ALBELLA, J.M.; CINTAS, A.M.; MIRANDA, T. y SERRATOSA, J.M.: "Introducción a la ciencia de materiales". C.S.I.C., 1993.

Sólo existen siete posibilidades en cuanto a combinaciones entre los valores de los parámetros de red para un cristal (tabla 1). A cada uno de estos sistemas se los denomina sistemas cristalinos.

Tabla I.- Sistemas cristalinos

Sistema cristalino	Relaciones axiales y angulares	Figura representativa
Triclínico	$a \neq b \neq c$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma$	Paralelepípedo general
Monoclínico	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$	Paralelepípedo oblicuo
Ortorrombico	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	Paralelepípedo rectangular
Trigonal	$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$ (Ejes romboédricos)	Romboedro
	$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$ (Ejes hexagonales)	Prisma hexagonal
Tetragonal	$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	Prisma rectangular
Hexagonal	$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$	Prisma hexagonal
Cúbico	$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	Cubo

1.1.4.- Tipos de celdillas. Redes de Bravais

- Primitiva (tipo P): Cuando en la celdilla unidad sólo existen puntos de red en los vértices. En este caso la red se genera aplicando las tres traslaciones a un solo punto; por eso se dice que tiene asociado un solo punto de red, es decir, su multiplicidad es 1.
- Centrada en dos caras paralelas (tipo A, B ó C, según las caras en cuyos centros estén los puntos): en la celdilla existen puntos en los vértices y en los centros de dos caras paralelas. Su multiplicidad es dos.
- Centrada en todas las caras paralelas (tipo F): en la celdilla existen puntos en los vértices y en los centros de todas las caras. Su multiplicidad es 4.
- Centrada en el cuerpo (tipo I): en la celdilla existen puntos en los vértices y en el centro del cuerpo. Su multiplicidad es 2.

El científico francés A. Bravais demostró, que sólo son posibles 14 redes de traslación tridimensionales y homogéneas, compatibles con las características de simetría de cada sistema cristalino; es decir, sólo hay 14 posibilidades diferentes (figura 4) de asociar átomos, iones o moléculas para formar un cristal.

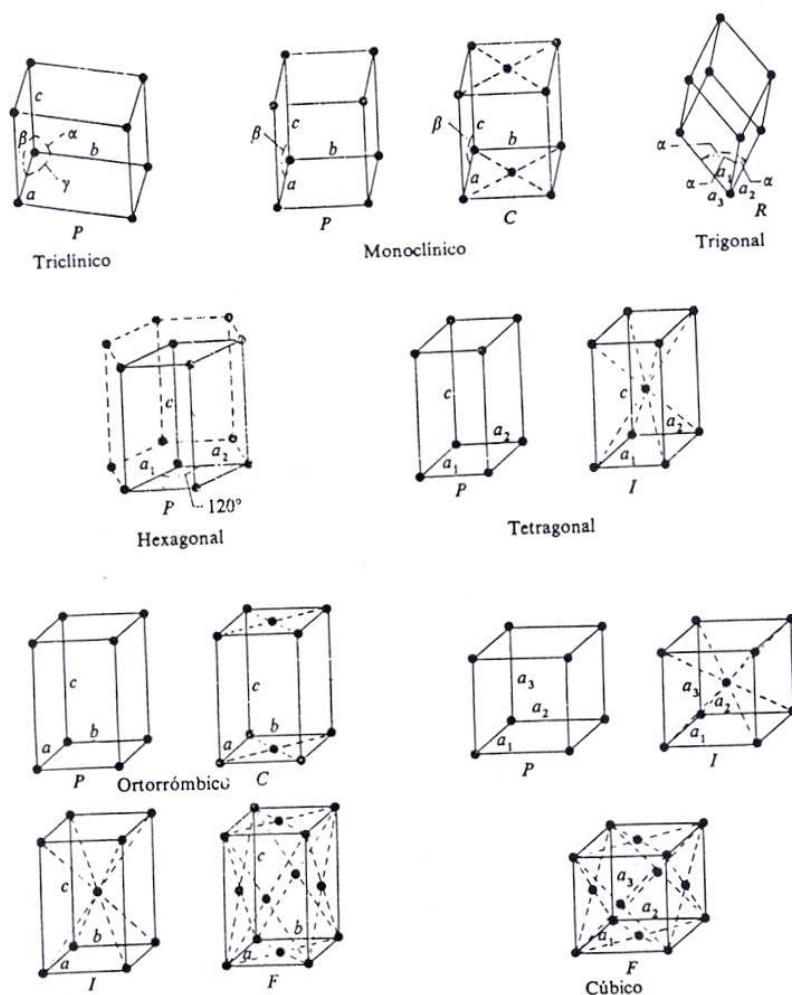


Figura 4.- Las 14 redes de Bravais

1.1.5.- Planos reticulares. Índices de Miller. Espaciados

En una red cristalina pueden trazarse series de infinitos planos paralelos y equidistantes entre sí, conteniendo cada uno de ellos sucesiones lineales de puntos reticulares (figura 5). La distancia d entre dos planos consecutivos de una misma familia se denomina distancia interplanar o, simplemente espaciado.

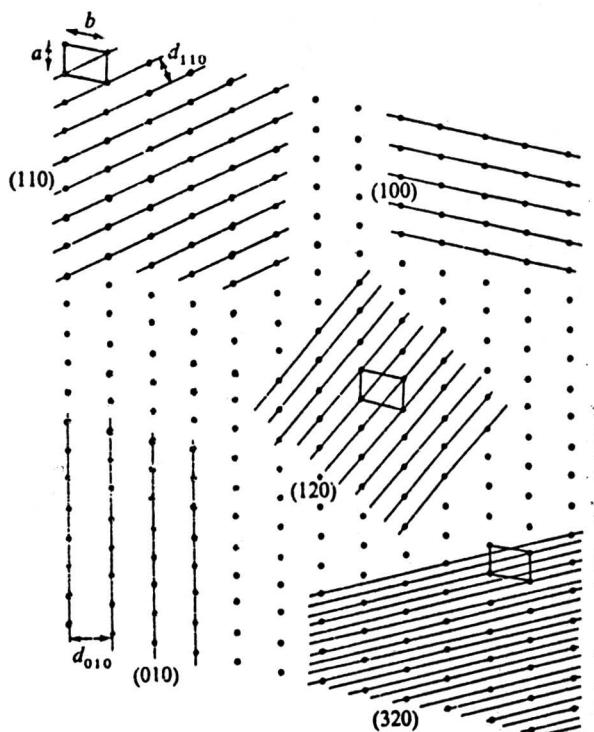


Figura 5.- Red bidimensional mostrando distintas familias de planos reticulares. Nótese cómo los planos de índices más pequeños son los que tienen mayor espaciado y densidad de puntos reticulares. Figura tomada de: ALBELLÁ, J.M.; CINTAS, A.M.; MIRANDA, T. y SERRATOSA, J.M.: "Introducción a la ciencia de materiales". C.S.I.C., 1993.

La posición y orientación de cada familia de planos respecto a los ejes cristalográficos vienen dadas por los índices h , k y l denominados índices de Miller, y se escriben entre paréntesis (hkl) . Cada familia de planos paralelos divide a los ejes cristalográficos en un número entero de partes iguales; los índices de Miller se hallan directamente reduciendo a los menores números enteros los valores inversos de las intersecciones fraccionarias del plano con los ejes cristalográficos.

Ejemplos: (en la primera columna se dan los puntos de corte con los ejes cristalográficos del plano cuyos índices se quieren calcular, en la segunda se indican sus valores inversos, y en la tercera se dan los índices de Miller)

Es interesante destacar que no existen en la naturaleza dos cristales con distinta composición que posean los mismos valores de los parámetros cristalográficos. Como las distancias entre planos dependen de dichos parámetros, puede decirse también que no existen dos cristales que tengan todos sus espaciados iguales.

1.2.- Técnicas difractométricas

En función del tipo de fuente de partículas empleada se puede hablar de difracción de rayos X, difracción de neutrones y difracción de electrones. De éstas, la difracción de rayos X es, sin duda, la técnica de aplicación más general y la más ampliamente utilizada para la identificación de especies cristalinas, determinación de estructuras cristalinas, etc.

1.2.1.- Producción de rayos X. Tubos de rayos X

El método más habitual y práctico de producción de rayos X, se basa en el hecho de que cuando una partícula, con masa muy pequeña y dotada de una gran energía cinética, choca contra un material, una pequeña parte de dicha energía se invierte en la producción de rayos X.

Las partículas más utilizadas para este bombardeo son los electrones, y el dispositivo instrumental utilizado se conoce con el nombre de tubo de rayos X. Existen distintos tipos de tubos de rayos X, pero los más utilizados son los de cátodo incandescente, cuyo esquema se muestra en la figura 6.

Los elementos básicos de este tipo de tubos (figura 6) son: un filamento capaz de emitir electrones por calentamiento, que hace de cátodo, y un ánodo metálico, situados ambos dentro de una ampolla de vidrio en la que se ha hecho un elevado vacío.

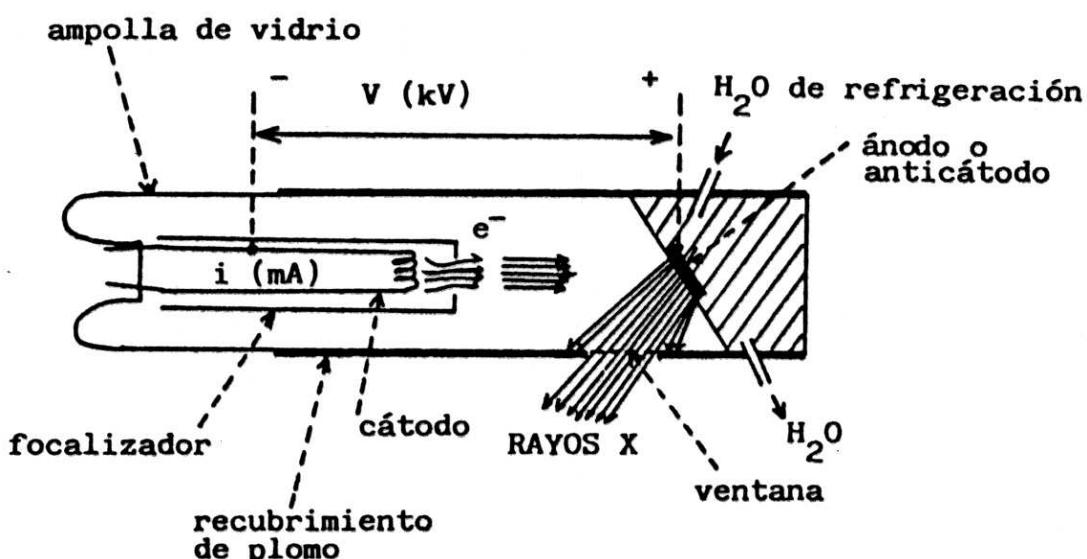


Figura 6.- Esquema de un tubo de rayos X de cátodo incandescente. Figura tomada de: ALBELLA, J.M.; CINTAS, A.M.; MIRANDA, T. y SERRATOSA, J.M.: "Introducción a la ciencia de materiales". C.S.I.C., 1993.

El calentamiento del cátodo, normalmente una espiral de wolframio, se logra haciendo pasar una corriente eléctrica de intensidad i (10 – 60 mA). Si entre el filamento y el ánodo se aplica una diferencia de potencial de varios kV (10 – 60 kV), los electrones emitidos por el filamento incandescente son fuertemente acelerados hacia el ánodo, produciendo, en el choque con él, la emisión de rayos X en todas las direcciones.

La mayor parte de la energía cinética de los electrones ($E_c = e \cdot V = 1/2 m \cdot v^2$. V = diferencia de potencial; e = carga del electrón; m = masa del electrón y v = velocidad del electrón), se invierte en la producción de calor en el ánodo, y sólo una pequeña porción de la misma (menos del 1%) se invierte en la producción de rayos X.

El considerable calor que se produce en el ánodo sería suficiente para fundirlo en un corto espacio de tiempo. Esto hace que sea necesario refrigerarlo (suele hacerse mediante una circulación forzada de agua), y además restringe mucho el tipo de materiales que se pueden utilizar como ánodo (deberá tener un punto de fusión elevado y conducir bien el calor).

Debido al grave peligro que representa la radiación X, la ampolla de vidrio se encuentra recubierta por una envoltura de plomo que absorbe la radiación producida en la mayoría de las direcciones, saliendo ésta al exterior del tubo a través de una o más ventanas, realizadas con un material muy transparente a la radiación (normalmente berilio).

El filamento que hace de cátodo suele estar rodeado de una pantalla metálica llamada focalizador, abierta sólo en la dirección de salida de los electrones hacia el ánodo y mantenida a potencial negativo con objeto de repeler los electrones que van en otras direcciones y dirigirlos hacia el ánodo.

El espectro de rayos X emitido por estos tubos está constituido (figura 7) por radiaciones de distintas longitudes de onda que se extienden de forma continua en un amplio intervalopectral (espectro continuo, no depende del elemento que forma el ánodo), y superpuestas a éstas aparecen unos máximos de intensidad que corresponden a las líneas características de rayos X del elemento que forma el ánodo (espectro característico).

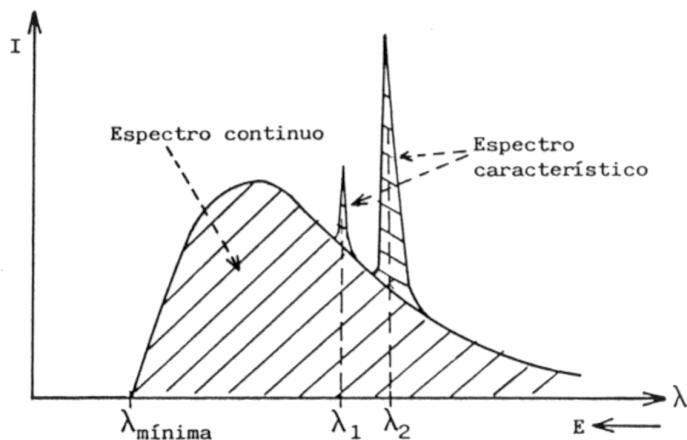


Figura 7.- Espectro de rayos X emitido por un tubo de rayos X. La posición de la longitud de onda mínima sólo depende de la diferencia de potencial aplicada al tubo, mientras que su intensidad total sólo depende de la diferencia de potencial y de la intensidad de corriente aplicadas. Espectro característico: la posición de sus distintos máximos de intensidad (λ_1 , λ_2 , ...) sólo dependen del elemento que forma el ánodo del tubo; su intensidad depende también de la diferencia de potencial y de la intensidad de corriente aplicadas. Figura tomada de: ALBELLA, J.M.; CINTAS, A.M.; MIRANDA, T. y SERRATOSA, J.M.: "Introducción a la ciencia de materiales". C.S.I.C., 1993.

1.2.2.- Origen del espectro característico de rayos X

El proceso de producción del espectro característico, puede esquematizarse del modo siguiente (figura 8):

Excitación: el choque de un electrón incidente (procedente del cátodo) con un electrón de las capas internas de un átomo (del elemento al que corresponde el ánodo), produce la expulsión de dicho electrón quedando el átomo en estado excitado.

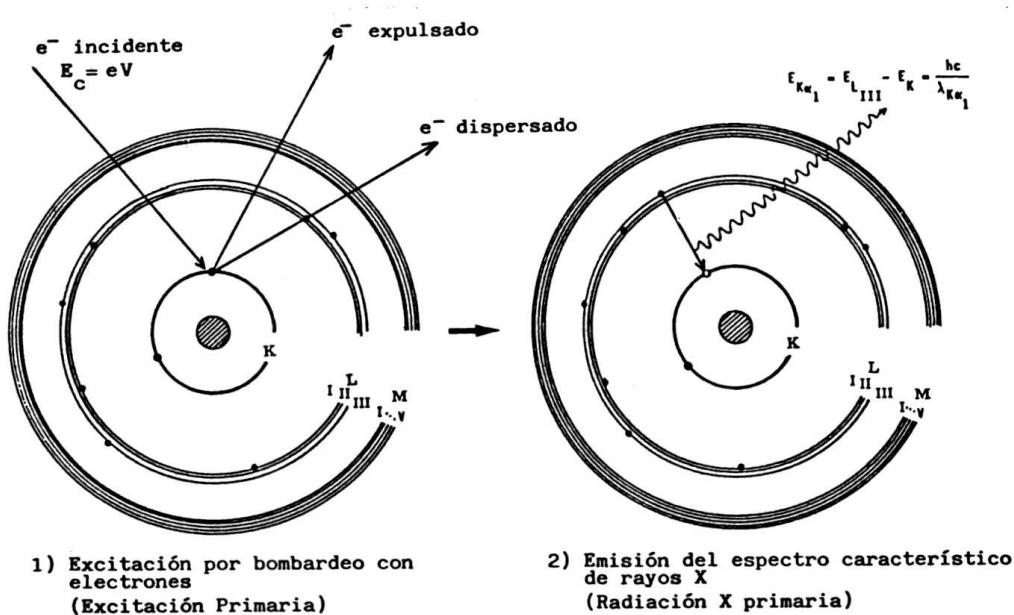


Figura 8.- Producción del espectro característico de rayos X. Figura tomada de: ALBELLÁ, J.M.; CINTAS, A.M.; MIRANDA, T. y SERRATOSA, J.M.: "Introducción a la ciencia de materiales". C.S.I.C., 1993.

Emisión: este átomo en estado excitado tiende a volver inmediatamente a su estado fundamental, para lo cual se producen saltos de electrones de niveles más externos para cubrir el hueco producido. En este proceso hay un desprendimiento de energía, igual a la diferencia de energía entre los dos niveles en los que se produce el salto electrónico, en forma de radiación electromagnética correspondiente a la región de los rayos X.

A esta excitación producida por el bombardeo de partículas se la denomina excitación primaria, y a la radiación así obtenida se la llama radiación X primaria. Al ser, las energías de los distintos niveles electrónicos características para cada tipo de átomos, la radiación X emitida será característica para cada elemento, y, en principio, no dependerá de la sustancia química en la que se encuentre, ya que, en general, estas radiaciones están originadas por transiciones entre los niveles electrónicos internos, cuyas energías no se ven afectadas por el tipo de enlace existente.

Espectro característico de rayos X emitido por los elementos

En la figura 9^a se muestran las transiciones electrónicas permitidas que dan lugar a las líneas más intensas del espectro característico de rayos X.

Cuando la energía de los electrones que inciden sobre un átomo es igual o mayor que la energía del nivel K, puede producirse la expulsión de un electrón de dicha capa K, las transiciones desde niveles superiores dan lugar a una serie de radiaciones características de longitudes de onda similares que constituyen la serie K (se denominan K_{α} , K_{β} ...). Es la serie de mayor energía (menor longitud de onda).

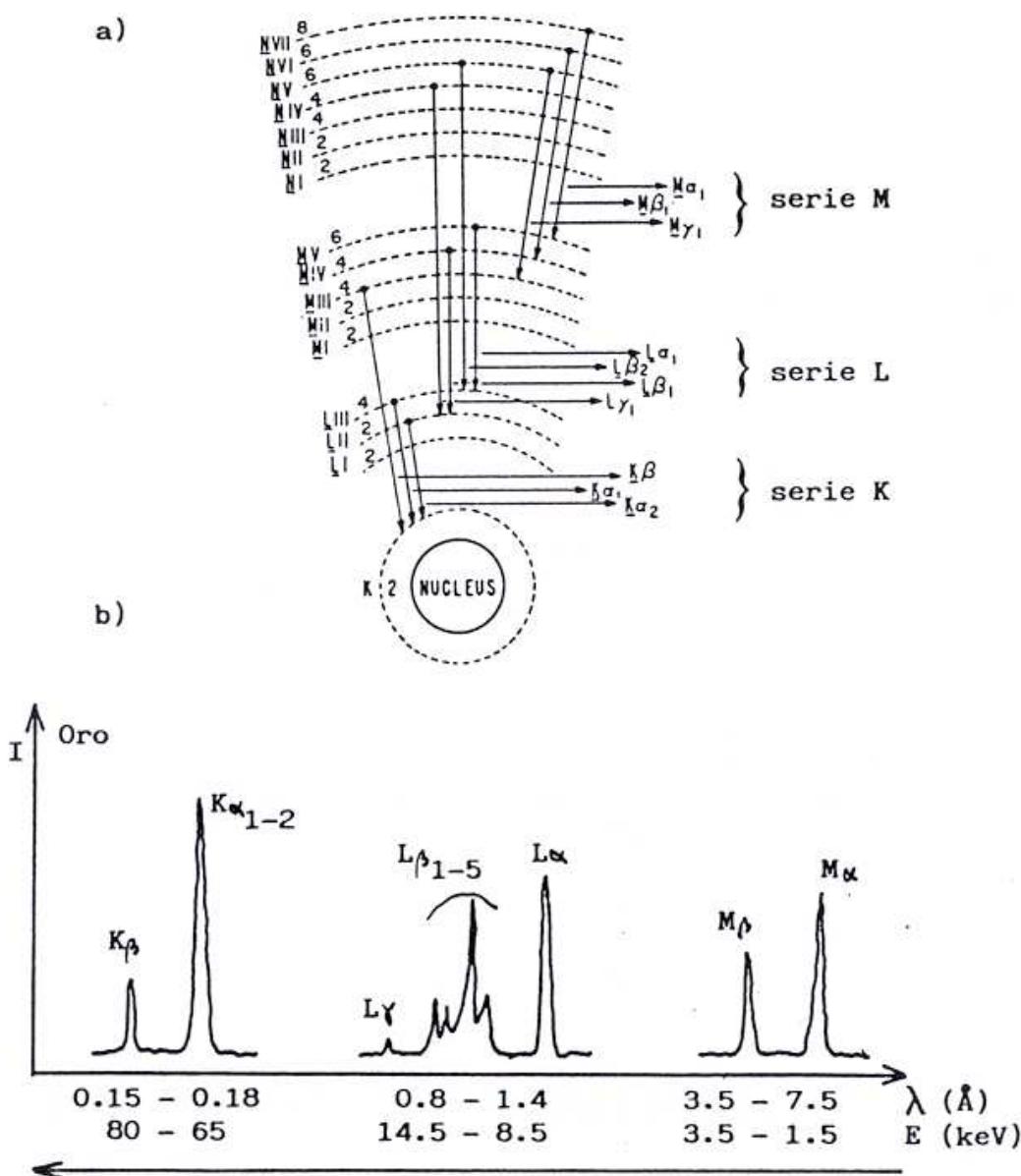


Figura 9.- a) transiciones electrónicas permitidas que dan lugar a las líneas más intensas del espectro característico de rayos X; b) zonas de longitud de onda y energía en las que aparecen las distintas series de líneas características del oro. Figura tomada de: ALBELLA, J.M.; CINTAS, A.M.; MIRANDA, T. y SERRATOSA, J.M.: "Introducción a la ciencia de materiales". C.S.I.C., 1993.

Si la vacante se produce en alguno de los subniveles de la capa L, las transiciones desde niveles superiores dan lugar a las radiaciones características de la serie L (L_α, β, \dots). Lo mismo puede decirse para la capa M.

Aunque el número de radiaciones características posibles para cada elemento es grande, en la práctica la intensidad de muchas de ellas es muy pequeña (probabilidad muy pequeña de que se produzca la transición electrónica que las origina), y no se pueden registrar con los equipos de medida; además, el número de radiaciones que se registran se limita todavía más, debido a que la diferencia de energía entre algunas de ellas es tan pequeña que aparecen juntas. Esto hace que, en la práctica, el espectro característico de un elemento se reduzca a 2 ó 3 radiaciones de la serie K, y de 4 a 10 de la serie L. Las radiaciones de la serie M, en la zona normal de trabajo que va de 0.3 a 20 Å, únicamente suele aparecer para los elementos más pesados. En la figura 9b se indican, para el caso del oro, las zonas de longitud de onda y energía en las que aparecen las distintas series. Como ejemplo real, en la figura 10 se muestran las líneas características de la serie K del hierro y de la serie L del wolframio obtenidas experimentalmente.

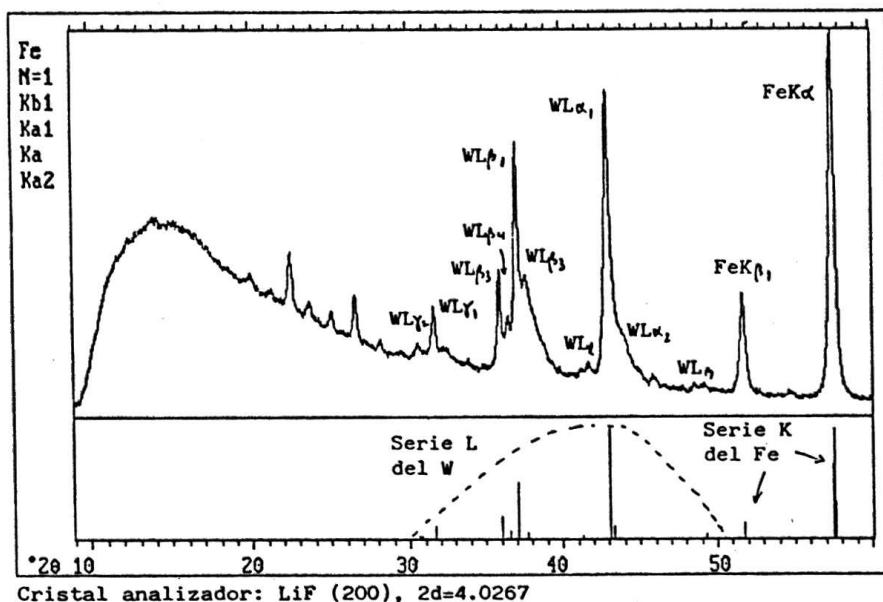


Figura 10.- Líneas características de la serie K del hierro y de la serie L del wolframio obtenidas experimentalmente. Figura tomada de: ALBELLA, J.M.; CINTAS, A.M.; MIRANDA, T. y SERRATOSA, J.M.: "Introducción a la ciencia de materiales". C.S.I.C., 1993.

1.3.- Fenómenos de interacción de los rayos X con la materia

Una vez se ha visto qué son los rayos X, cómo se producen, y cómo es el espectro emitido por éste, trataremos ahora de los fenómenos que ocurren cuando los hacemos incidir sobre un material (figura 11):

- a) absorción
- b) Fluorescencia
- c) Emisión de fotoneutrinos

d) Dispersión (“scattering”) \Rightarrow difracción de rayos X

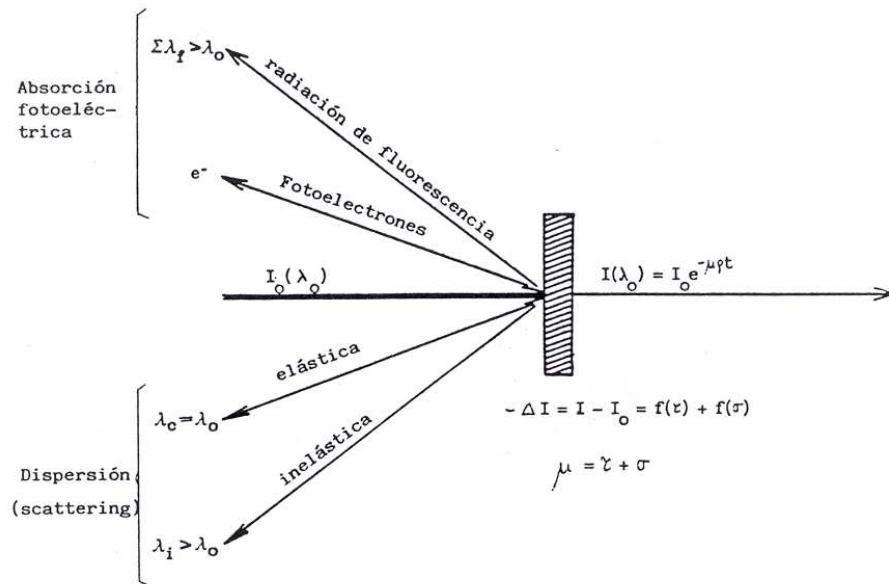


Figura 11.- Fenómenos de interacción de los rayos X con la materia. Figura tomada de: ALBELLA, J.M.; CINTAS, A.M.; MIRANDA, T. y SERRATOSA, J.M.: "Introducción a la ciencia de materiales". C.S.I.C., 1993.

1.4.- Dispersión (“scattering”) de los rayos X. Técnicas

Un mecanismo responsable de la atenuación de la radiación X al incidir ésta sobre la materia es el de la dispersión, que consiste en que el fotón incidente es desviado de su dirección original de propagación con igual (dispersión elástica) o menor (dispersión inelástica) energía, por colisión con un electrón (figura 11). En la dispersión elástica se basa el fenómeno de la difracción de rayos X por los cristales.

Los fenómenos de difracción se producen cada vez que la luz pasa a través de una estructura periódica que posee características que se repiten regularmente o cuando la luz es reflejada por una estructura de esta clase. Para que la difracción sea observable, la distancia que se repite en la estructura periódica debe ser aproximadamente igual a la longitud de onda de la luz utilizada. Una red cristalina es una estructura periódica tridimensional, en donde la distancia que se repite es aproximadamente 10^{-8} cm, distancia que hay entre átomos. Así, pues, debemos esperar, y ciertamente se encuentran, patrones de difracción cuando los rayos X de 10^{-8} cm de longitud de onda aproximadamente, pasan a través de los cristales.

Analicemos qué ocurre cuando los rayos X de longitud de onda λ inciden sobre dos planos de átomos paralelos de índices de Miller (hkl), como en la figura 12, y son difractados en un ángulo θ . Las ondas difractadas producirán intensidad máxima en un detector si si ambos llegan en fase al detector (con una cresta o con un valle), es decir si la diferencia entre las trayectorias de los rayos es un número entero de veces la longitud de onda de los rayos X empleados, $n\lambda$, donde n es un número entero. La figura 12 ilustra cómo puede derivarse la condición necesaria para obtener una intensidad difractada máxima. En dicha figura vemos que la diferencia del recorrido de las dos

ondas es $2 \cdot d_{hkl} \cdot \sin\theta$, donde d_{hkl} es la distancia entre los dos planos de la familia con índices de Miller (hkl). Así tenemos

$$n \cdot \lambda = 2 \cdot d_{hkl} \cdot \sin\theta \quad (1)$$

para la condición que debe cumplirse a fin de obtener un máximo de intensidad difractada. A la ecuación (1) se la llama ecuación de Bragg. Luego si se representa la intensidad de radiación que llega al detector, frente al ángulo θ , aparecerá un pico cuando se cumpla la condición de Bragg, ec. (1), a dicha representación se la denomina diagrama de difracción o difractograma.

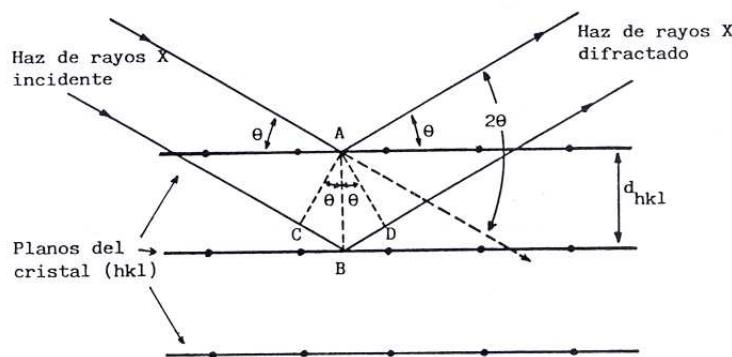


Figura 12.- Difracción de los rayos X por los planos de un cristal. Figura tomada de: ALBELLA, J.M.; CINTAS, A.M.; MIRANDA, T. y SERRATOSA, J.M.: "Introducción a la ciencia de materiales". C.S.I.C., 1993.

La dirección en la que sale el haz difractado forma también un ángulo θ con la superficie de la familia de planos que difractan, es decir, un ángulo 2θ con la dirección de incidencia del haz de rayos X. Además, la dirección del haz incidente y la dirección del haz difractado están contenidas en un plano que es perpendicular a la familia de planos que difractan.

Como en un cristal hay distintas familias de planos, con distintos espaciados, existirán también distintas direcciones de difracción. Al ser el conjunto de espaciados de un cristal característico para cada especie cristalina, si decíamos que no existen dos sustancias cristalinas que tengan un diagrama de difracción idéntico. Se dice que el diagrama de difracción es como una huella dactilar de las sustancias cristalinas

En la obtención de la información que nos proporciona la difracción de rayos X pueden distinguirse dos aspectos claramente diferenciados y complementarios: por una parte, la geometría de las direcciones de difracción, que está condicionada únicamente por el tamaño y la forma de la celdilla unidad del cristal. Conociendo estas direcciones será posible averiguar el sistema cristalino y las dimensiones de la celdilla. El otro aspecto viene dado por las intensidades de estos rayos difractados, que están íntimamente relacionadas con la naturaleza de los átomos y con las posiciones que éstos ocupan en la red cristalina, de forma que su medida constituye un procedimiento para obtener información tridimensional acerca de la estructura interna del cristal.

Método del polvo policristalino

Es el método más general y sus aplicaciones son muy variadas; puede citarse por ejemplo, la identificación de sustancias cristalinas, así como el análisis cuantitativo de éstas, el estudio de soluciones sólidas metálicas, estudio de texturas, determinación del tamaño de los cristalitos, determinación de coeficientes de dilatación térmica, estudios de compuestos y reacciones a alta y baja temperatura, etc.

Este método también es utilizado para aplicaciones de tipo más específicamente cristalográficas, como pueden ser la asignación de índices a las reflexiones y la determinación de los parámetros de celdilla, que en algunos casos sencillos conducen a la resolución de la estructura cristalina.

En la figura 13 se muestra el tipo más sencillo de aparato para observar la difracción de rayos X. Los rayos X de una sola longitud de onda chocan con una muestra constituida por un polvo o agregado policristalino. Esta muestra debe estar integrada por un número muy elevado de pequeñísimos fragmentos cristalinos idealmente desorientados al azar unos respecto a otros, de forma tal que no exista ningún tipo de correlación en la orientación. La muestra se sitúa sobre una plataforma giratoria. Se detecta la radiación difractada por la ionización que ella produce en la cámara D. Cuando se coloca la muestra a un ángulo arbitrario con respecto al rayo X incidente, muy poca radiación difractada alcanza el detector, ya que es posible que a este ángulo no haya plano de la red cristalográfica que satisfaga la condición de Bragg, ec. (1), para que haya una intensidad difractada máxima. Sin embargo, a medida que se hace rotar la muestra, algunos grupos de planos eventualmente llegan a estar alineados a un ángulo θ que satisface la ecuación (1), y una señal fuerte aparece en el detector. A medida que se va rotando la muestra, esta señal desaparece, pero a otro ángulo θ' puede aparecer otra señal de difracción cuando una nueva serie de planos de la red satisfaga la ecuación de Bragg. Como muestra la red de la figura 12, hay muchas series de planos paralelos en una malla, y así la radiación difractada se observa desde muchos ángulos. Sin embargo, sólo los planos de la red que contienen un gran número de átomos reflejarán los rayos X apreciablemente, por lo cual en la práctica se observa solamente la difracción de los planos reticulares más importantes.

En la figura 14 se muestra el diagrama de difracción (difractograma) de una muestra de cobre, obtenido con un difractómetro de rayos X.

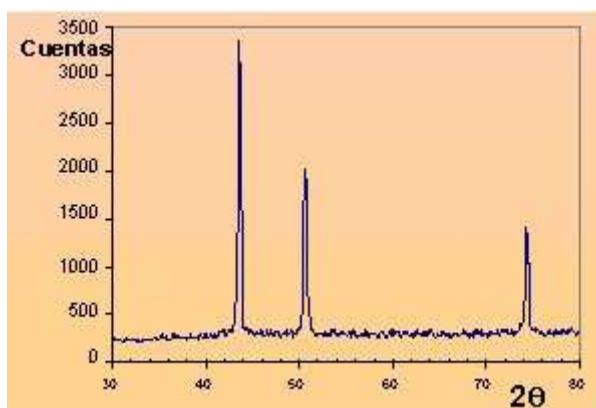


Figura 14.- Diagrama de difracción (difractograma) de una muestra de cobre. Imagen tomada de <http://personales.upv.es/~avicente/curso/unidad3/Fig3-41.jpg>.

2.- Parte experimental

2.1.- Preparación de muestras

Para estudios de difracción de rayos X, la muestra cristalina se muele hasta obtener un polvo fino homogéneo. De esta manera, el enorme número de pequeños cristales está orientado en todas las direcciones posibles; y por tanto, cuando un haz de rayos X atraviesa el material, se puede esperar que un número significativo de partículas esté orientado de tal manera que cumpla la condición de Bragg para la reflexión de todos los espaciados interplanares posibles. Las muestras se colocan en tubos capilares de paredes finas de vidrio o de celofán y éstos se introducen en el haz. Alternativamente, se puede mezclar la muestra con un soporte adecuado no cristalino y moldearla dándole una forma adecuada.

2.2.- Identificación de sustancias cristalinas

La identificación de especies a partir de su figura de difracción de polvo cristalino se basa en la posición de las líneas (en términos de θ o 2θ) y de sus intensidades relativas.

2.2.1.- Lectura de un difractograma

Con una regla milimetrada se mide el ángulo 2θ (eje de abscisas) de cada reflexión, así como su intensidad (altura), colocando ambos valores en una tabla de 5 columnas. En la tercera columna de la tabla se colocan los valores de espaciado d_{hkl} obtenidos, a partir de los valores de 2θ , mediante la expresión de Bragg ($2 d \sen\theta = n\lambda$ para obtener los difractogramas se ha empleado radiación K_α de Cu, $\lambda = 1,5405 \text{ \AA}$). En la cuarta columna se colocan los valores de las intensidades relativas, obtenidas como porcentaje de la más intensa.

Con los valores de espaciado de las tres reflexiones más intensas se consultan las fichas ASTM o tablas que se tengan a mano (anexo I), viendo cual es la que más se ajusta a nuestra sustancia problema y confirmando con el resto de las reflexiones medidas. En general Las fichas de consulta (datos bibliográficos, ASTM, etc.) constan de las siguientes áreas de información:

d	ESPACIADOS MAS INTENSOS			ESP. CARACTERISTICO	COMPUESTO		
I/I₁							
CONDICIONES DE OBTENCION DEL DIFRACTOGRAMA				d Å	I/I₁	hkl	
PARAMETROS DE LA CELDILLA UNIDAD DEL COMPUESTO							
OTRAS INFORMACIONES DE INTERES							

Una vez conocida la sustancia problema y su ficha se pueden colocar en la quinta casilla de la tabla los valores de (hkl) de los planos que han dado lugar a los máximos de

difracción. Con los valores de espaciado de las reflexiones más intensas y sus valores de (hkl), se puede calcular el parámetro de celdilla medio mediante la expresión (en el caso de celdillas cúbicas)

$$1 / d^2 = (h^2 + k^2 + l^2) / a^2 \quad (2)$$

con el parámetro de celdilla **a** se calcula el volumen de la celdilla unidad

$$V = a^3 \quad (3)$$

así como el factor de empaquetamiento

$$\text{fac.emp.} = (\text{vol. átomos celdilla unidad}) / (\text{vol. celdilla unidad}) \quad (4)$$

y conociendo la masa atómica o molecular del compuesto (M), su densidad

$$\delta = (n^{\circ} \text{ at. celdilla unidad} \times M) / (\text{vol. celdilla unidad} \times N^{\circ} \text{ Avogadro}) \quad (5)$$

2.2.2.- A partir de los difractogramas obtenidos para las muestras problema con el difractómetro:

a) Sustancias puras:

- i) Leer el difractograma e identificar mediante las fichas ASTM adjuntas de qué sustancia se trata.
- ii) Decir a qué planos cristalográficos corresponde cada una de las reflexiones que se encuentran en el difractograma y dibujarlos en las correspondientes celdas unidad.
- iii) Calcular el volumen, el factor de empaquetamiento y la densidad de la celda unidad, una vez que se conoce su simetría.

b) Mezclas

- iv) Leer el difractograma e identificar mediante las fichas adjuntas de qué sustancias se trata.

Difracción de Rayos X en Polímeros

1.- Introducción

Los métodos de difracción y dispersión, especialmente la difracción de rayos X, constituyen las técnicas más poderosas para el estudio del estado sólido de polímeros. En general, la mayor parte de la información útil se obtiene en polímeros que forman fibras orientadas, son microcristalinos o están constituidos por cristales simples (monocristales). Los experimentos realizados con difracción de rayos X, dan lugar a los siguientes tipos de información:

- Estimación del grado de cristalinidad de la muestra
- Determinación de la orientación de los cristales
- Análisis de la “macroestructura del polímero. Es decir, la forma en la que se empaquetan los cristales y los bucles de las cadenas
- Determinación de la estructura molecular, incluyendo la conformación de la cadena y la posición de los átomos individuales. Estos estudios son los más complicados pero también los que proporcionan mayor cantidad de información fundamental.

2.- Difracción de rayos X

Como ya sabemos, los rayos X se generan cuando un haz de electrones de alta energía incide en una superficie de un metal (generalmente cobre, molibdeno o hierro). El haz de rayos X generado posee un espectro que consta de dos partes, una banda ancha de radiación continua y unas líneas características, llamadas K_{α} , K_{β} , L_{α} , etc. Estas líneas pueden ser separadas por filtros apropiados para obtener radiación de rayos X monocromática.

La cantidad de radiación absorbida por la muestra viene dada por el coeficiente de absorción (μ), mediante una ecuación del tipo de Lambert-Beer

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\mu l}$$

Donde I_0 es la intensidad del haz incidente, I la del haz transmitido, l el espesor de la muestra, y μ el coeficiente de absorción lineal.

Cuando un haz de rayos X monocromáticos incide en una muestra pueden observarse dos tipos de procesos:

- Si la muestra tiene una estructura periódica (regiones cristalinas), los rayos X resultantes son coherentes. El proceso ocurre sin cambio en la longitud de onda y sin pérdida de fase entre los rayos incidente y transmitido. Este efecto da lugar a la técnica de Difracción de rayos X de ángulo ancho (WAXD, Wide Angle X-ray Diffraction).
- Si la muestra no es periódica y posee regiones de diferente densidad electrónica (regiones cristalinas y amorfas), el haz transmitido no es coherente. El proceso ocurre con cambios en la fase entre los rayos incidente y transmitido. Este efecto se estudia por la técnica de difracción de rayos X a ángulo bajo (SAXD, Small Angle X-ray Diffraction)

Una red cristalina se puede considerar como una familia de planos que se extiende a través de los átomos que la forman. Estos planos se especifican cristalográficamente mediante un conjunto de tres números (hkl), llamados índices de Miller. La radiación ondulatoria incidente se supone que es reflejada por estos planos. El espaciado entre un conjunto de planos adyacentes, d_{hkl} , (con índices de Miller (hkl)), se puede calcular a partir de la relación de Bragg:

$$n \cdot \lambda = 2 \cdot d_{hkl} \cdot \operatorname{sen} \theta$$

donde n es el número de orden (0, 1, 2, 3, ...), λ es la longitud de onda de los rayos X y θ es la mitad del ángulo que forman el haz incidente y el difractado. La geometría de la difracción de rayos X se muestra en la Figura 12.

Cada conjunto de planos da lugar a una serie de diagramas de difracción, a partir de los cuales pueden determinarse las distancias entre ellos.

3.- Aplicaciones a la caracterización de polímeros

3.1.- Determinación de la estructura cristalina

Las estructuras cristalinas de polímeros se determinan empleando los métodos usuales de rayos X, aunque la interpretación de los resultados experimentales es mucho más difícil que en el caso de cristales de moléculas más simples. Las razones de esta dificultad son varias. Primeramente, para la mayoría de los polímeros, no pueden obtenerse grandes cristales con la suficiente perfección, eliminándose así la utilización de un número de técnicas difractométricas modernas. En segundo lugar, debido al débil enlace en ciertas direcciones, la intensidad disminuye rápidamente con 2θ , y el análisis debe efectuarse basándose solamente en unas pocas reflexiones y perdiendo así precisión. Por último, la localización exacta de los grupos laterales, dentro de la red cristalina, tiene un efecto pequeño en las intensidades difractadas, reduciendo la sensibilidad de la técnica.

Debido a todas estas dificultades, lo que se hace normalmente, es diseñar un modelo estructural teórico, obtener por ordenador su diagrama de difracción y compararlo con el obtenido en la muestra a estudiar. Una vez que se consigue una semejanza razonable, se hace un refinamiento posterior, para obtener la conformación de la cadena y la posición de los átomos y grupos laterales. La determinación de la estructura cristalina completa requiere una gran especialización y se emplea solamente al sintetizarse un nuevo polímero cristalino, aunque el diagrama de difracción de una muestra puede usarse como método de identificación del polímero del que se trate.

En algunos casos, la difracción de rayos X se emplea para obtener información en ciertos sistemas poliméricos muy interesantes desde el punto de vista práctico. Por ejemplo, si tenemos una mezcla de polímeros (blend) puede haber una separación de fases de los dos polímeros que lo constituyen. Si uno o ambos cristalizan, puede ser estudiado por rayos X. En mezclas de polietileno y polipropileno se pueden detectar picos de difracción correspondientes a cristales de ambos polímeros, indicando que existe una separación de fases.

Otro ejemplo de la aplicación de rayos X al estudio de sistemas poliméricos, lo constituye el caso de muestras polimórficas, en la que el polímero puede cristalizar en varias formas cristalinas. Este hecho se puede relacionar con las condiciones de cristalización, incluyendo las del procesado de un polímero comercial, o con una posterior modificación del material por diferentes procedimientos. Por ejemplo, el polietileno ortorrómico se puede transformar en su modificación monoclinica mediante una

deformación mecánica, y este hecho puede ser puesto de manifiesto por difracción de rayos X.

Otra propiedad muy importante es la determinación del grado de orientación de los cristales en un polímero microcristalino. Esta orientación tiene una profunda influencia en las propiedades del material. Por ejemplo, una buena orientación, paralela a la dirección de aplicación de una fuerza externa, puede generar una alta resistencia del material a la ruptura. La gran resistencia de las fibras de nylon se puede atribuir, en parte, a este efecto. La cristalográfica de rayos X provee una forma conveniente para la estimación de este efecto.

3.2.- Grado de cristalinidad

El grado de cristalinidad de un polímero semicristalino se puede determinar mediante el análisis de la intensidad de la radiación de rayos X dispersada por la muestra. Para la medida de la intensidad es más conveniente utilizar un sistema detector difractométrico que una cámara fotográfica. En la Figura 15 se muestra la intensidad de la radiación obtenida en una muestra de polietileno. Como vemos existen dos picos, que corresponden a las reflexiones de los planos de átomos (110) y (200), de los cristales ortorrómbicos del polímero. Estos picos son bastante anchos y existe una gran cantidad de radiación a valores de θ alejados de los mismos. Esto es debido a la dispersión por todo el material presente, incluyendo las zonas amorfas.

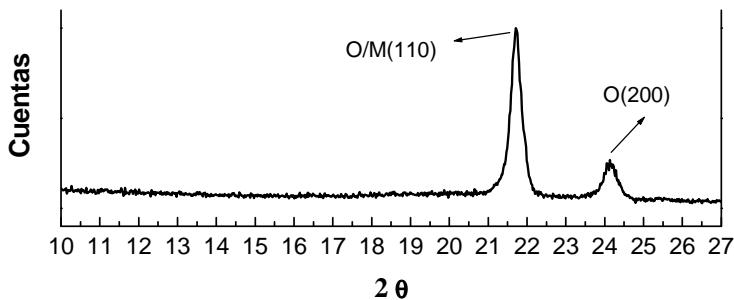


Figura 15.- Difractograma de un polietileno de alta densidad.

Se puede suponer que la dispersión producida por un átomo es la misma, tanto si forma parte del cristal como si se encuentra en una zona amorfica. Las intensidades debidas a los átomos del cristal se suman, sumando una interferencia constructiva y dando lugar a un pico que satisface la condición de Bragg. En las zonas amorficas, la dispersión tiene lugar en todas direcciones, obteniéndose interferencias constructivas muy débiles y dando lugar a un pico muy difuso. Por ello la figura consta de una zona amorfica difusa y unos picos debidos a las zonas cristalinas.

El grado de cristalinidad puede entonces relacionarse con estas dos zonas del diagrama de difracción, suponiendo que la relación entre la cantidad de material cristalino y amorfico es igual a la relación de la intensidad total (integrada) de la parte cristalina y amorfica del diagrama. Así, la fracción de cristalinidad, χ_c , viene dada por la ecuación:

$$\chi_c = \frac{I_c}{I_c + I_a} = \frac{\int_0^{\infty} s^2 I_c(s) ds}{\int_0^{\infty} s^2 I(s) ds}$$

donde $s=(2\sin\theta/\lambda)$, $I(s)$ es la intensidad total dispersada, $I_c(s)$ es la intensidad correspondiente a las zonas cristalinas e I_a , la de las zonas amorfas.

Debido a que la ecuación anterior es simplemente una relación de intensidades, no tiene dimensiones y no es necesario conocer el factor correspondiente a la conversión de área a intensidad de rayos X.

La mayor dificultad de este procedimiento es que, muchas veces, es difícil separar las intensidades correspondientes a ambas zonas. Solamente cuando se conoce bien la curva de la parte amorfica es posible obtener buenos resultados, ya que puede sustraerse de la curva total y obtener la correspondiente a las reflexiones del cristal.

4.- Difracción de rayos X a ángulo bajo (SAXD)

Dentro de una muestra sólida, los rayos X son dispersados primariamente por los electrones. Los efectos de difracción se correlacionan con la disposición de los átomos, ya que la densidad electrónica está íntimamente relacionada con las posiciones de los mismos. Sin embargo, puede haber variaciones en la densidad electrónica a una escala mucho más amplia. Si estas variaciones son periódicas, pueden dar lugar a máximos de difracción del mismo modo a como se dan en redes periódicas de átomos. Sin embargo, generalmente, la periodicidad no es tan regular como la de una red cristalina y los efectos de difracción son menos precisos y más difíciles de interpretar cuantitativamente. Estos efectos se estudian con la técnica de difracción de rayos X a ángulo bajo.

En el caso de polímeros, existen varias estructuras con variaciones de densidad electrónica de este tipo. En primer lugar, los polímeros semicristalinos a menudo poseen estructuras de laminillas. Estas laminillas son regiones generalmente más densas que las regiones no cristalinas y, por lo tanto, poseen una densidad electrónica más alta. El grosor de estas laminillas es del orden de 10 – 30 nm y, al estar generalmente apiladas, constituyen una estructura periódica si las laminillas se organizan en forma de esferulitas. Las regiones entre las laminillas son amorfas y de más baja densidad, dando también lugar a una variación periódica de la densidad electrónica, que corresponde al diámetro de la espferulita (del orden de 1-1000 μm).

Otro ejemplo de estudios de este tipo son los copolímeros de bloque. Estos sistemas, a veces, se separan en dos fases, formando una de ellas estructuras ordenadas (laminillas, cilindros, esferas, etc.), dentro de una matriz continua del otro componente. Las dos fases generalmente tienen diferente densidad electrónica y pueden caracterizarse por SAXD.

Por último, la técnica es muy útil en el estudio de defectos estructurales y superficies de ruptura de materiales polímeros.

Utilizando la ecuación de Bragg, es posible estimar el rango del ángulo de difracción en estos sistemas. Así el orden de magnitud de la periodicidad de una estructura de laminillas es $d = 20 \text{ nm}$. Si utilizamos rayos X correspondientes a la radiación CuK_α ($\lambda=1.542 \text{ \AA}$), obtenemos $\theta = 0.22^\circ$. Como vemos es un ángulo muy pequeño y por ello es necesario un sistema experimental diferente.

5. Experimental

Determinación del grado de cristalinidad de una muestra de polietileno sometido a tensión y sin tensionar.

6. BIBLIOGRAFIA.

Hammond, C. "Introduction to Crystallography". Royal Microscopical Society Microscopy Handbooks 19. Oxford Science Publications. Oxford, 1990.

Willard, H.H.; Merritt, L.L. jr.; Dean, J.A. y Settle, F.A. jr. "Métodos Instrumentales de Análisis", Grupo Editorial Iberoamerica. Mejico, 1991

Albella, J.M.; Cintas, A.M.; Miranda, T. y Serratosa, J.M. "Introducción a la Ciencia de Materiales: Técnicas de preparación y caracterización". Textos Universitarios nº 20, C.S.I.C., Madrid 1993.

Miguel Angel Llorente Uceta y Arturo Horta Zubiaga. Técnicas de Caracterización de polímeros. UNED, Madrid, 1991

ANEXO I

;Er ror ! Ma rca dor no defi nid o.d	2.09	1.81	1.28	2.09	Cu COPPER
	I/I ₁	100	46	20	100
Rad. Cu λ 1.5405 Filter Ni Dia. Cut off Coll. I/I ₁ d corr. abs.? Ref. Stanson & Tatge JC. Fel. Reports NBS 1949	d Å	I/I ₁	hkl		
2.09	100	111			
1.81	46	200			
1.28	20	220			
1.090	17	311			
1.044	5	222			
SysCubic (F.C.) S:G: O ⁵ _H F _{M3M} a _o b _o c _o A C α β γ Z 4 Ref. Ibid.	0.904	3	400		
0.829	9	33 1			
0.808	8	420			

d	2.03	1.17	1.43	2.03	Fe IRON (α PHASE)
I/I ₁	100	30	20	100	
Rad. Cu λ 1.5405 Filter Ni Dia. Cut off Coll. I/I ₁ d corr. abs.? Ref. Stanson et al., NBS Circular 539 vol IV, p3 (1955)	d Å	I/I ₁	hkl		
2.03	100	110			
1.43	20	200			
1.17	30	211			
1.013	10	220			
0.906	12	310			
SysCubic (F.C.) S:G: O ⁵ _H F _{M3M} a _o b _o c _o A C α β γ Z 4 Ref. Ibid.	0.828	6	222		

;Er ror ! Ma rca dor no defi nid o.d	3.36	1.68	2.02	1.16	C Graphite
	I/I ₁	100	80	50	50
Rad. Cu λ 1.5418 Filter Ni	d Å	I/I ₁	Hkl		
3.36	100	002			
2.13	10	100			
2.03	50	101			
1.80	5	102			
1.68	80	004			
Sys Hexagonal P6 ₃ /mmc(194) a _o = 2.46 b _o = c _o = 6.72 α = 120 β γ Ref. Ibid.	1.54	10	103		
	1.23	30	110		
	1.16	50	112		

d	2.09	2.47	2.31	1.69	Zn Zinc
I/I ₁	100	53	40	28	
Rad. Cu λ 1.5405 Filter Ni	d Å	I/I ₁	hkl		
2.47	53	002			
1.31	40	100			
2.09	100	101			
1.69	28	102			
1.34	25	103			
Sys. Hexagonal P6 ₃ /mmc(194) a _o = 2.665 b _o c _o = 4.947 α =120 β γ Ref. Ibid.	1.33	21	110		

!Er ror !	2.10	2.00	1.90	1.23	Mn Manganese
Marca dor no defi nid o.d					
I/I ₁	100	60	25	25	
Rad. Cu λ 1.5405 Filter Ni	d Å	I/I ₁	Hkl		
	4.46	3	110		
	2.82	5	210		
	2.58	5	211		
	2.23	7	220		
	2.10	100	221		
SysCubic (F.C.) S:G: O ⁵ _H F _{M3M} a ₀ b ₀ c ₀ A C α β γ Z 4 Ref. Ibid.	1.997	60	310		
	1.904	25	311		
	1.751	2	320		

d	2.03		1.43	2.03	Fe IRON (α PHASE)
I/I ₁	100	30	20	100	
Rad. Cu λ 1.5405 Filter Ni Dia. Cut off Coll. I/I ₁ d corr. abs.? Ref. Stanson et al., NBS Circular 539 vol IV, p3 (1955)	d Å	I/I ₁	hkl		
	2.03	100	110		
	1.43	20	200		
	1.17	30	211		
	1.013	10	220		
	0.906	12	310		
SysCubic (F.C.) S:G: O ⁵ _H F _{M3M} a ₀ b ₀ c ₀ A C α β γ Z 4 Ref. Ibid.	0.828	6	222		

Efecto fotoeléctrico

Objetivo

Comprender la relación que existe entre la teoría clásica y la teoría cuántica de la luz. Así mismo, calcular de forma experimental la constante de Planck.

Introducción

La emisión y absorción de luz fue tema de investigación del físico Max Planck. Cuando Planck trató de formular una teoría sobre la base del modelo de onda clásico, se encontró con demasiadas dificultades para explicar la distribución espectral de la luz emitida. La teoría clásica (ley de Rayleigh - Jeans) predice que la cantidad de luz emitida por un cuerpo negro aumenta dramáticamente a medida que la longitud de onda disminuye, mientras que el experimento demostraba que la cantidad de luz se aproximaba a cero; es decir, todo lo contrario. Esta discrepancia se conocía como la catástrofe ultravioleta.

Los datos experimentales para la radiación de la luz emitida por un cuerpo muy caliente (que brilla intensamente) demuestran que la intensidad máxima de luz emitida tampoco concuerda con los valores clásicos predichos por la ley de Wien. Para reconciliar la teoría con los resultados de laboratorio, Planck, se vio forzado a desarrollar un nuevo modelo para la luz llamado modelo cuántico, el cual presupone que la luz se debe emitir en pequeños paquetes de energía, llamados cuantos.

La relación entre la teoría clásica y la teoría cuántica para la emisión de la luz, puede investigarse empleando el equipo de laboratorio denominado “aparato h/e”. Usando el aparato en combinación con una fuente de luz de vapor de mercurio, se puede determinar aproximadamente la relación h/e y de esta forma calcular la constante de Planck h .

Teoría

Teoría cuántica de Planck

En 1901 Planck publicó su ley de radiación. En ella indica que un oscilador o cualquier sistema físico similar tienen un conjunto discreto de valores o niveles posibles de energía, y que las energías entre estos valores o niveles no pueden existir.

Planck observó que la emisión y la absorción de la radiación están asociadas con transiciones o saltos entre dos niveles de energía. La energía perdida o ganada por el oscilador se emite o se absorbe como un cuanto de energía radiante, cuya magnitud está expresada por la siguiente ecuación:

$$E = h\nu \quad (1)$$

donde E es la energía radiante, ν es la frecuencia de la radiación, y h es la constante de Planck.

Se ha encontrado que la constante de Planck no solamente es una simple relación entre la frecuencia y la energía de la luz (de las ondas electromagnéticas), sino que esta constante ha resultado ser la piedra angular de la Mecánica Cuántica para explicar el mundo subatómico. Por su trabajo, Planck recibió el premio Nobel de Física en 1918.

El efecto fotoeléctrico

En el fenómeno de la llamada emisión fotoeléctrica, un haz de luz al chocar contra un material causa que electrones del material sean emitidos. Por otro lado, el modelo clásico de la onda predice que entre más intensidad tenga un haz de luz mayor será su amplitud y, por tanto, mayor será la energía de la onda.

De esta manera, un haz de mayor intensidad al chocar en un material debería inducir fotoelectrones más energéticos. Por su parte, el modelo cuántico predice que la luz a frecuencias mayores debería producir fotoelectrones de mayor energía, independiente de la intensidad, mientras que al aumentar la intensidad de la luz sólo debe incrementarse el número de electrones emitidos (es decir, la corriente fotoeléctrica).

A principios del año 1900, varios investigadores encontraron que la energía cinética de los fotoelectrones depende de la longitud de onda, o de la frecuencia, y es independiente de la intensidad. Mientras que la magnitud de la corriente fotoeléctrica, o número de electrones, depende de la intensidad de la luz como lo predice el modelo cuántico. Einstein aplicó la teoría de Planck y explicó adecuadamente el efecto fotoeléctrico en términos del modelo cuántico usando su famosa ecuación:

$$E = h\nu = KE_{max} + W_0 \quad (2)$$

donde KE_{max} es la energía cinética máxima de los fotoelectrones emitidos, W_0 se conoce como la función de trabajo, y es la energía necesaria para removerlos completamente del material, y E es la energía del fotón.

El experimento h/e.

Un fotón de luz con energía $h\nu$ incide sobre un electrón del cátodo de un tubo al vacío. El electrón gasta una energía W_0 para escapar del cátodo e inmediatamente adquiere una energía en forma de energía cinética KE_{max} . Por lo general, los electrones emitidos alcanzan el ánodo del tubo y pueden medirse como una corriente fotoeléctrica. Sin embargo, aplicando un potencial invertido V entre el ánodo y el cátodo, la corriente fotoeléctrica puede anularse. De esta forma, KE_{max} puede obtenerse midiendo el potencial invertido mínimo necesario (potencial de frenado) para detener a los fotoelectrones y reducir la corriente fotoeléctrica hasta cero.

Relacionando la energía cinética con el potencial de frenado se obtiene:

$$KE_{max} = Ve \quad (3)$$

Sustituyendo la ecuación (3) en la ecuación (2), se obtiene:

$$hv = Ve + W_0 \quad (4)$$

despejando para V, se obtiene:

$$V = \left(\frac{h}{e}\right)v - \frac{W_0}{e} \quad (5)$$

Si se realiza una gráfica de V vs v para diferentes frecuencias de luz, se obtiene algo similar a la gráfica de la figura 1. De la figura 1 y de la ecuación (5), se puede determinar el valor de la pendiente, y la cual es: $\frac{h}{e}$.

Acoplando el valor experimental de la relación h/e con el valor aceptado de la carga eléctrica del electrón $e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$, se puede calcular la constante de Planck.

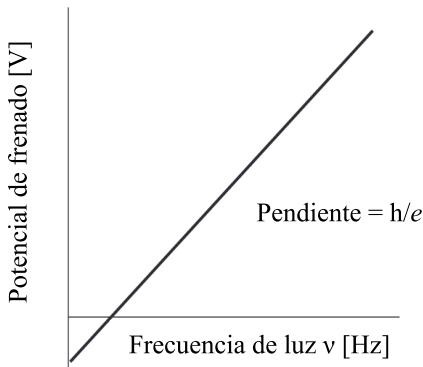


Figura 1. Gráfica de V vs v.

Material

- 1 Aparato h/e.
- 1 Kit de accesorios para aparato h/e.
- 1 Lámpara de Mercurio.
- 1 Multímetro.
- 2 Cables banana-banana.

Instalación del equipo

Voltaje de las baterías

Aunque el aparato h/e requiere de una cantidad pequeña de corriente y las baterías duran normalmente algo de tiempo, es recomendable comprobar el voltaje de salida antes de cada uso. Las terminales de prueba de la batería están situados en el panel lateral del aparato h/e cerca del interruptor ON/OFF como se muestra en la figura 2. Compruebe que el voltaje de las baterías entre el terminal de salida de tierra y cada una de las terminales de la batería -6V MIN y +6V MIN, da un voltaje mayor o igual a

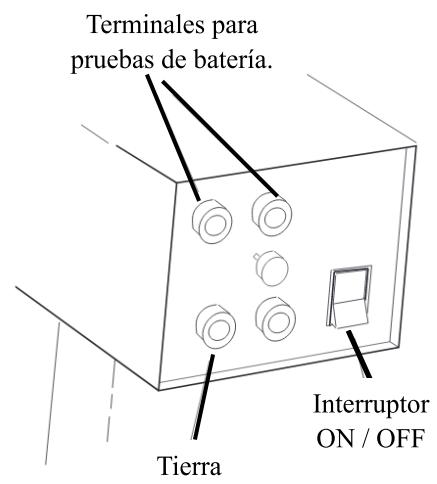


Figura 2. Prueba de batería.

6V. Si alguna de las baterías tiene un voltaje menor a 6V, pídale al técnico del laboratorio que las reemplace.

Arreglo experimental

La instalación del arreglo experimental para el experimento de efecto fotoeléctrico se muestra en la figura 3. A continuación se describen los pasos a seguir para el armado experimental.

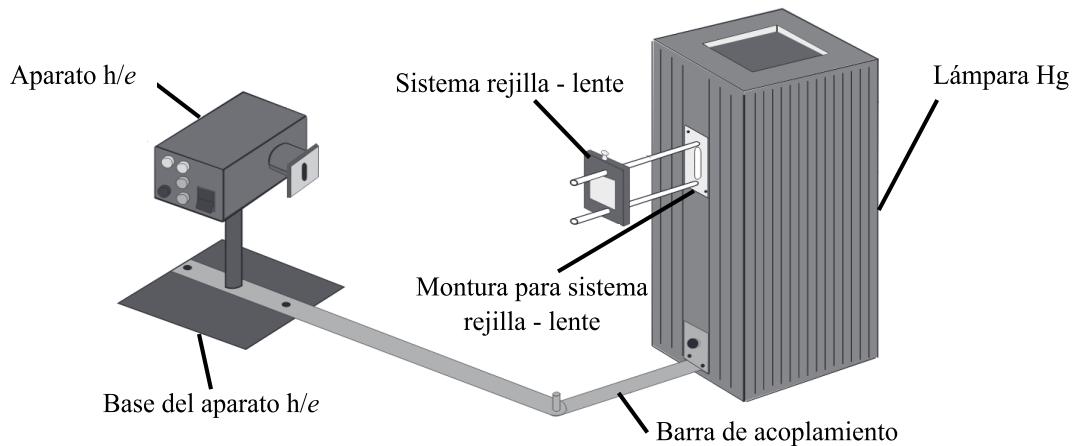


Figura 3. Arreglo experimental del efecto fotoeléctrico.

1. Instale el bloqueador de luz en el canal de la parte trasera de la lámpara, como se observa en la figura 4. Usted verá que se bloquea el orificio de la parte trasera de la lámpara.
2. Deslice la montura de abertura de luz en el centro de la canaleta de la lámpara, y fíjelo con los dos tornillos que tiene la montura.
3. Coloque el sistema rejilla - lente sobre las barras del soporte de la montura de abertura de luz, como se observa en la figura 5. Afloje el tornillo, deslice el sistema rejilla - lente sobre las barras de la montura y atorníllelo para mantenerlo fijo.

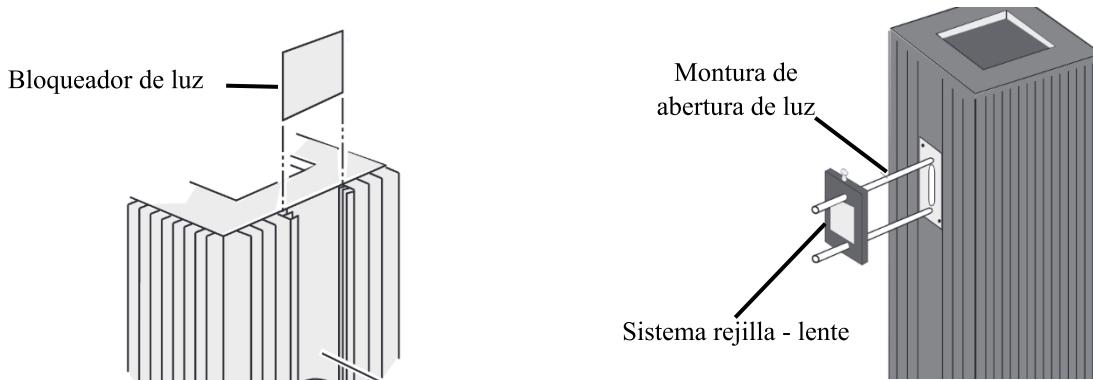


Figura 4. Colocación del bloqueador de luz.

Figura 5. Colocación de la montura y el sistema rejilla – lente.

4. Encienda la fuente de luz y permita que se caliente por cinco minutos, compruebe la alineación de la fuente de luz y la abertura mirando cómo incide la luz en la parte posterior de la rejilla. Si es necesario, ajuste la montura hasta que la fuente de luz se encuentre alineada.
5. Inserte y fije el soporte de la barra de acoplamiento a la fuente de luz como se observa en la figura 3.
6. Quite el tornillo del poste e intodúzcalo por el orificio de la base del soporte para el aparato h/e, luego fije el poste con la base mediante el tornillo.
7. Coloque el aparato h/e sobre el poste de la base.
8. Coloque la montura de la base sobre la punta del extremo de la barra acopladora.
9. Con los cables banana-banana conecte el voltímetro a las terminales de salida del aparato h/e, con el medidor en el rango de 2 o 20 V.
10. Coloque el aparato de h/e enfrente de la fuente de luz de vapor de mercurio. Deslice el sistema rejilla - lente hacia delante o hacia atrás, hasta que obtengas una luz brillante en la máscara reflejante del aparato.
11. Rote el protector de luz del aparato h/e para revelar la máscara del fotodiodo blanco que se encuentra dentro. Rote el aparato hasta que una líneapectral esté centrada en la ventana de la máscara del fotodiodo. Después, apriete el tornillo del poste de la base para sostener el aparato en ese lugar.
12. Igual que en el paso 10, deslice la rejilla hacia atrás o hacia adelante hasta que se aprecie una imagen clara de la abertura sobre la ventana en la máscara del fotodiodo. Apriete el tornillo y regrese el protector de luz a su lugar.
13. Encienda el aparato y observe que en el multímetro se registre un voltaje.

NOTA: La máscara reflejante blanca del aparato h/e está hecha de un material fluorescente especial. Esto permite ver la línea ultravioleta como una línea azul, y que la línea violeta aparezca más azul. Los colores actuales pueden verse utilizando una hoja blanca de material no fluorescente enfrente de la máscara.

Es importante que al realizar las mediciones se tenga cuidado de incidir solamente un color sobre la ventana del fotodiodo. No debe haber traslape de máximos espectrales adyacentes.

14. Presione el botón “PUSH TO ZERO” en la parte trasera del aparato de h/e para descargar algún potencial acumulado en la unidad electrónica. Esto asegurará que el aparato registre sólo el potencial de la luz que se está midiendo. Observe que la salida de voltaje decae cuando existe ausencia de luz en el fotodiodo.
15. Registre el voltaje de salida con el voltímetro digital, el cual es una medición directa del potencial de frenado para los fotoelectrones.

NOTA: Para algunos aparatos h/e es posible que el potencial que se lee inicialmente sea un valor alto, sin embargo, decrecerá poco a poco hasta llegar al potencial de frenado.

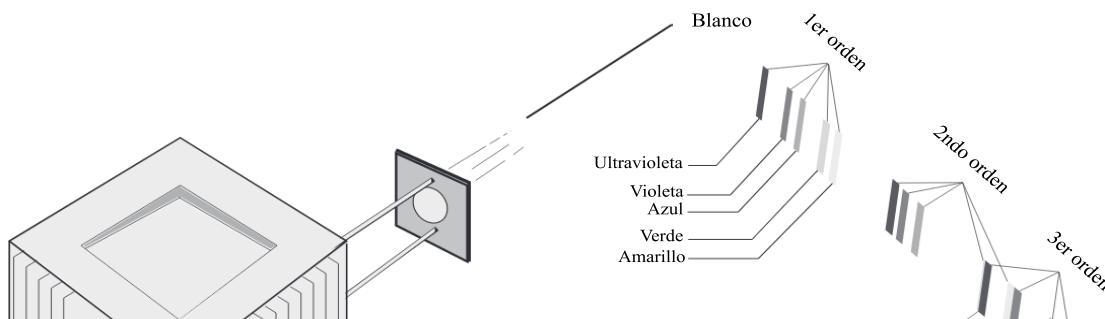


Figura 6. Se muestran los tres órdenes de difracción.

Color	Frecuencia [Hz]	λ [nm]
Amarillo	5.18672×10^{14}	578
Verde	5.48996×10^{14}	546.074
Azul	6.87858×10^{14}	435.835
Violeta	7.40858×10^{14}	404.656
Ultravioleta	8.20264×10^{14}	365.483

Tabla 1. Frecuencia y longitud de onda de cada color.

Uso de filtros

El kit del aparato h/e contiene tres filtros: verde, amarillo, y un filtro de transmisión variable. Los marcos de cada filtro tienen tiras magnéticas para ser montados en la máscara reflejante del aparato h/e.

Utilice los filtros de color verde y amarillo, cuando usted requiera medir el potencial de frenado de las líneas espectrales verde y amarillo, ya que estos filtros limitan el paso de otras ondas electromagnéticas de luz generadas por la luz ambiental u otras líneas espectrales.

Use el filtro de transmisión variable para variar la intensidad de la luz que incide sobre el fotodiodo. Este filtro consta de un patrón de puntos y líneas que permiten variar la transmisión en los siguientes porcentajes relativos: 100%, 80%, 60%, 40% y 20%.

Procedimiento

Experimento 1: Modelo clásico vs. Modelo cuántico

Según el modelo cuántico de la luz, la energía cinética máxima K_{\max} de los fotoelectrones depende solamente de la frecuencia de la luz incidente y es independiente de la intensidad de la luz. Por lo que, se entiende que a mayor frecuencia de la luz, mayor será la energía cinética de los fotoelectrones.

En contraste, el modelo clásico de la onda de la luz predice que K_{\max} dependerá de la intensidad de luz. Es decir, cuanto más brillante sea la luz mayor es la energía de los fotoelectrones.

En este experimento se analizan ambas aseveraciones. En la parte A se seleccionan dos líneas espectrales de una fuente de luz de vapor de mercurio y se investiga la energía máxima de los fotoelectrones como función de la intensidad. En la parte B se seleccionan diferentes líneas espectrales y se analiza la energía máxima de los fotoelectrones en función de la frecuencia de la luz.

Parte A.

1. Ajuste el aparato h/e de forma que sólo una de las líneas espectrales incida sobre la abertura de la máscara del fotodiodo. Si se selecciona la líneapectral verde o amarilla coloque sobre la máscara reflejante blanca, el filtro al color correspondiente de la líneapectral.
2. Coloque el filtro de transmisión variable enfrente de la máscara reflejante blanca (y sobre el filtro de color, si se utiliza) para que la luz pase a través de la sección marcada 100% y alcance al fotodiodo. Registre la lectura de voltaje en la tabla 2. Presione el botón de descarga del instrumento y suéltelo, observe cómo se requiere mucho tiempo para que el sistema se estabilice hasta el voltaje registrado.
3. Mueva el filtro de transmisión al siguiente porcentaje de transmisión, para que varíe la intensidad de la luz incidente en el fotodiodo. Registre la nueva lectura y mida el tiempo que pasa a partir de que se descarga el sistema hasta que logra estabilizarse al voltaje registrado. Repita este paso varias veces, hasta que se hallan ocupado las cinco secciones del filtro.
4. Repita el paso 3 para otra líneapectral, y registre sus datos en la tabla 2.

Tabla 2. Registro de datos para dos líneasspectrales diferentes del experimento A.

Color #1:		
% Transmisión	Potencial de frenado [V]	Tiempo de carga aproximado. [s]
100		
80		
60		
40		
20		
Color #2:		
% Transmisión	Potencial de frenado [V]	Tiempo de carga aproximado. [s]
100		
80		
60		
40		
20		

Parte B.

1. Ajuste el aparato h/e para que uno de los cinco espectros amarillos incida sobre la abertura de la máscara del fotodiodo. Coloque el filtro de color amarillo sobre la máscara reflejante.
2. Registre el voltaje que indica el voltímetro en la tabla 3, recuerde que este voltaje es el de frenado de los fotoelectrones.
3. Repita el procedimiento para cada color del espectro que se observa (se recomienda utilizar las líneas espectrales de primer orden). Recuerde utilizar los filtros para las líneas espectrales de color verde y amarillo.

Tabla 3. Registro de datos para el experimento B.

Color de la línea espectral	Potencial de frenado [V]
Amarillo	
Verde	
Azul	
Violeta	
Ultravioleta	

Análisis.

1. Describa el efecto que ocurre al medir el potencial de frenado de las diferentes intensidades del mismo color de luz. Así mismo, con la energía máxima de los fotoelectrones y el tiempo de carga del aparato h/e .
2. Describa la relación que existe entre cada uno de los diferentes colores de luz y su potencial de frenado, así como con la energía máxima de los fotoelectrones.
3. Básese en los resultados experimentales para determinar si este experimento apoya al modelo cuántico de la luz, o al modelo clásico de la luz. Explique por qué existe una pequeña caída en el potencial de frenado cuando la intensidad de luz disminuye.

Experimento 2: Relación entre Energía, Longitud De Onda Y Frecuencia.

De acuerdo al modelo cuántico de la luz, la energía de un fotón es directamente proporcional a su frecuencia; esto quiere decir que a mayor frecuencia mayor energía. Este experimento se realiza con la finalidad de determinar la constante de Planck. Una vez que se eligen diferentes líneas espectrales se mide el potencial de frenado, y conociendo la longitud de onda de cada color se puede determinar el valor de la constante de Planck.

1. Ajuste cuidadosamente el aparato h/e hasta que una línea espectral de primer orden incida sobre la abertura de la máscara del fotodiodo.
2. Registre el potencial de frenado de cada línea espectral de primer orden en la tabla 4. Luego registre el potencial de frenado de cada línea espectral de segundo orden en la

tabla 4. El orden de los espectros se muestra en la figura 6. Recuerde utilizar los filtros amarillo y verde cuando se midan las líneas espectrales amarilla y verde.

3. Oriente el aparato h/e hacia las líneas espectrales de segundo orden y repita el procedimiento 2. Registre los datos en la tabla 4.

Tabla 4. Registro de los datos experimentales para el experimento 2.

Color de 2 ^{do} orden	λ (nm)	Frecuencia (10^{14} Hz)	Potencial de frenado [V]
Amarillo			
Verde			
Azul			
Violeta			
Ultravioleta			

Análisis.

Determine la longitud de onda y la frecuencia de cada línea espectral. Además, realice una gráfica del potencial de frenado vs frecuencia. Determine la pendiente y la intersección en el eje de las ordenadas (eje-Y) e interprete los resultados en términos de la relación h/e y W_0/e . Calcule h y W_0 e interprete los resultados basados en el modelo cuántico de la luz.



ESPECTROSCOPIA ATÓMICA ESPECTRO DE EMISIÓN DEL H CON UN ESPECTRÓMETRO DE RED

OBJETIVO

Investigación de la región visible del espectro del átomo de Hidrógeno y determinación de la constante de Rydberg.

INTRODUCCIÓN

La espectroscopia es la rama de la física que estudia la interacción entre la radiación electromagnética y la materia. Ésta es una técnica muy empleada en la química y la física para estudiar las propiedades de la sustancia. El espectro característico de una sustancia dada es una característica única de ella, por eso podemos decir que el espectro de una muestra es como la huella dactilar de ésta que la diferencia de las demás.

Existen varias técnicas espectroscópicas que se diferencian en principio por el método utilizado, la región de frecuencias en que se desarrolla, el tipo de fuente de radiación empleado, el tipo de muestra, las interacciones que tienen lugar, etc.

Con un espectrómetro de red que trabaje en la región visible se puede hacer espectroscopía de emisión. Un espectrómetro óptico se utiliza para descomponer un haz de luz incidente en sus respectivas frecuencias o longitudes de onda que la componen. Este dispositivopectral permite visualizar cada una de las líneas espectrales componentes de cierta radiación electromagnética visible y medir su respectiva longitud de onda.

Un elemento atómico gaseoso a baja presión sujeto a una descarga eléctrica produce un espectro de emisión discreto o de líneas. Debido a que cada elemento atómico emite su propio espectro característico (único) y que no existen dos elementos que emitan las mismas líneas spectrales; esta característica es utilizada para identificar los elementos presentes en muestras desconocidas.

Para el estudio de algunos espectros atómicos podemos utilizar los tubos spectrales. Los tubos spectrales contienen uno o más elementos gaseosos atómicos o moleculares a baja presión. La energía se le suministra a través de un campo eléctrico aplicado a los electrodos de los tubos. Los iones y electrones son acelerados por el campo; las colisiones convierten la energía cinética adquirida en otros tipos siendo la energía electrónica una de ellas. Los electrones en los átomos excitados ocupan uno de los muchos estados de energía permitidos, que son determinados por las leyes de la física cuántica. Cada especie atómica excitada emite las longitudes de onda características determinadas por las diferencias entre los niveles de energía presentes en tal especie (átomo o molécula).

El análisis con el espectrómetro de red revelará una serie de líneas de emisión discretas de colores (monocromáticos) fuertes y nítidos. Estas líneas con su respectiva longitud de onda caracterizan a cada especie atómica.

MARCO TEÓRICO

Teoría del Átomo de Hidrógeno: El átomo de hidrógeno se puede considerar como un sistema formado por un núcleo inmóvil de carga Ze ($Z=1$) y un electrón que gira alrededor del mismo, en este sistema la energía potencial del electrón es [1]:

$$U = -\frac{Ze^2}{r} \quad (1)$$

La ecuación que describe el estado del sistema anterior es la ecuación de Schroedinger.



$$\nabla^2 \psi + \frac{2m_e}{\hbar^2} \left(E + \frac{Z e^2}{r} \right) \psi = 0 \quad (2)$$

Este problema tiene simetría esférica por tanto la ecuación toma la forma.

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \phi^2} + \frac{2m_e}{\hbar^2} \left(E + \frac{Z e^2}{r} \right) \psi = 0$$

Esta ecuación tiene soluciones finitas, continuas y univocas en los casos: a) Para todos los valores positivos del parámetro E. b) Para valores discretos y negativos del parámetro E, lo que corresponde a la situación de un electrón enlazado al átomo, la solución para la energía bajo estas condiciones es:

$$E_n = - \frac{m_e e^4}{2 \hbar^2} \frac{Z^2}{n^2} \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (3)$$

Según la teoría cuántica las sustancias no pueden absorber o emitir radiación electromagnética en forma continua sino en forma discreta, en porciones o cuantos de campo electromagnéticos llamados fotones. Cuando un fotón es emitido por un átomo excitado, el electrón realiza una transición radiativa desde un estado de mayor energía a otro de menor energía. El espectro de emisión de una sustancia dada es una característica muy importante, que permite determinar la composición fisicoquímica y algunas características de la estructura y las propiedades de los átomos y las moléculas. Los átomos gaseosos (H, He) a baja presión se pueden considerar como átomos aislados o en estado libre que al excitarlos emiten un espectro de líneas discreto, compuesto por un grupo de líneas espectrales separadas, llamadas series espectrales.

El espectro más simple es el del átomo de Hidrógeno. En una transición radiativa o de emisión de radiación, la energía del fotón, es el negativo de la perdida de energía del electrón o sea:

$$\Delta E = E_f - E_i = \frac{m_e e^4}{2 \hbar^2} \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) = \hbar \omega \quad (4)$$

De donde se desprende que:

$$\omega = \frac{m_e e^4}{2 \hbar^3} \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) = R \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \quad (5)$$

Donde: R es la constante de Rydberg, m_e la masa del electrón, e es la carga del electrón, \hbar es la constante de Planck, y n es el número cuántico principal (1,2,3,...). Las longitudes de onda de las líneas espectrales se determinan por la **formula de Balmer – Rithz**

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) \quad (6)$$

En la cual: λ - Longitud de onda de la línea espectral, R – Constante de Rydberg, n_1 – Estado energético del átomo al cual se realiza la transición del electrón después de la emisión, n_2 - Número del nivel atómico desde el cual se realiza la transición del electrón en la emisión de la radiación electromagnética.

Tabla No.1. Series espectrales del átomo de Hidrógeno

Serie	n_1	n_2	Región de E.E.M
Lyman	1	2, 3, 4...	Ultravioleta (U.V)
Balmer	2	3, 4, 5...	Visible (VIS)
Pashen	3	4, 5, 6...	Infrarroja (I.R.)
Brakett	4	5, 6, 7	Infrarroja (I.R.)
Pfund	5	6, 7, 8	Infrarroja (I.R.)

Para los fotones visibles emitidos por el Hidrógeno, el nivel final de energía es $n_f = 2$.

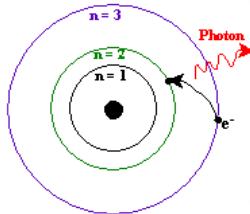
Entonces tenemos que la formula (6) para la serie de Balmer en el átomo de H se escribe así:

$$\frac{1}{\lambda_{\alpha,\beta,\gamma,\delta}} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) ; (n_2 = 3,4,5,6) \quad (7)$$

En el presente laboratorio estudiaremos el espectro de emisión visible del átomo de Hidrógeno el cual esta compuesto por las cuatro primeras líneas de la serie de Balmer, ellas son:

- H_α - Línea Roja (transición de n₂=3 hasta n₁=2)
- H_β - Línea Azul – Celeste (transición de n₂=4 hasta n₁=2).
- H_γ - Línea Celeste (transición de n₂=5 hasta n₁=2).
- H_δ - Línea Violeta (transición de n₂=6 hasta n₁=2)

Un fotón es emitido por un átomo excitado cuando existe una transición radiactiva de un electrón desde un estado de mayor energía a uno de menor energía.



Según la formula 3, la energía de los niveles de energía en el átomo de hidrogeno son:

$$E = - 13.6(eV) \left(\frac{1}{n^2} \right) \quad (8)$$

La energía del fotón, es el negativo de la perdida de energía del electrón o sea:

$$\Delta E = E_f - E_i = 13.6(eV) \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \quad (9)$$

La longitud de onda, λ, del fotón emitido esta dada por la formula:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (10)$$

Donde c es la velocidad de la luz y f es su frecuencia, la energía del fotón emitido y su frecuencia son:

$$\Delta E = \hbar \omega = h f ; \quad f = \frac{\Delta E}{h} \quad (11)$$

ESPECTROS ATÓMICOS

En el presente laboratorio estudiaremos los espectros de emisión visible de los átomos de Hidrógeno, Helio, y el Mercurio, haciendo un barrido manual con un espectrofotómetro el cual mide la intensidad relativa de la luz en función del ángulo. De la gráfica resultante, se determinan las longitudes de onda de las líneas espectrales midiendo el ángulo desde el máximo central hasta cada línea. Se examinarán el primer y segundo orden de difracción. El láser de He-Ne se utilizará para calibrar la red de difracción.

Las longitudes de onda de las líneas espectrales se compararán con los valores aceptados, para el caso del Hidrógeno, se pueden identificar las transiciones electrónicas entre las órbitas que corresponden a las líneas.

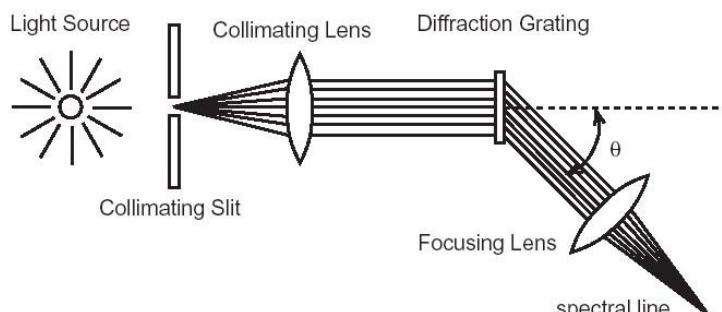
RED DE DIFRACCIÓN

El dispositivo analizador de la radiación es la red de difracción, la cual descompone a la radiación incidente en sus respectivas componentes espectrales, lo cual se utilizará para hallar las longitudes de onda de las líneas espectrales.

Cuando la luz pasa a través de la red de difracción, forma un patrón de difracción. Los ángulos hasta el máximo en el patrón de difracción están dados por:

$$d \sin \theta = m\lambda \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad (12)$$

Donde d es la separación entre las líneas de la red de difracción, λ es la longitud de onda de la luz, m es el orden del patrón de difracción.



EQUIPO

1	Espectrofotómetro	OS-8539
2	Bases y varillas de soporte	SE-9451
1	Láser He-Ne	
1	Lámpara de Mercurio	OS-9286
1	Fuente para los Tubos espectrales	SE-9460
1	Tubo espectral de Hidrógeno	SE-9461
1	Tubo espectral de Helio	SE-9462
1	Interface ScienceWorkshop 750	CI-6450
1	DataStudio + PC	

MONTAJE

- Realice el montaje del espectrofotómetro siguiendo las instrucciones de su respectivo manual.

2. Disponga el espectrofotómetro sobre dos bases de trípode con varilla de tal forma que se pueda ajustar la altura a la de varias fuentes de luz.
3. Conecte el Sensor de Movimiento Rotacional y el Sensor de luz de alta Sensibilidad a la interface ScienceWorkshop 750.
4. Aterrice el espectrofotómetro!.
5. Corra el programa DataStudio y abra el archivo "Atomic Spectra".

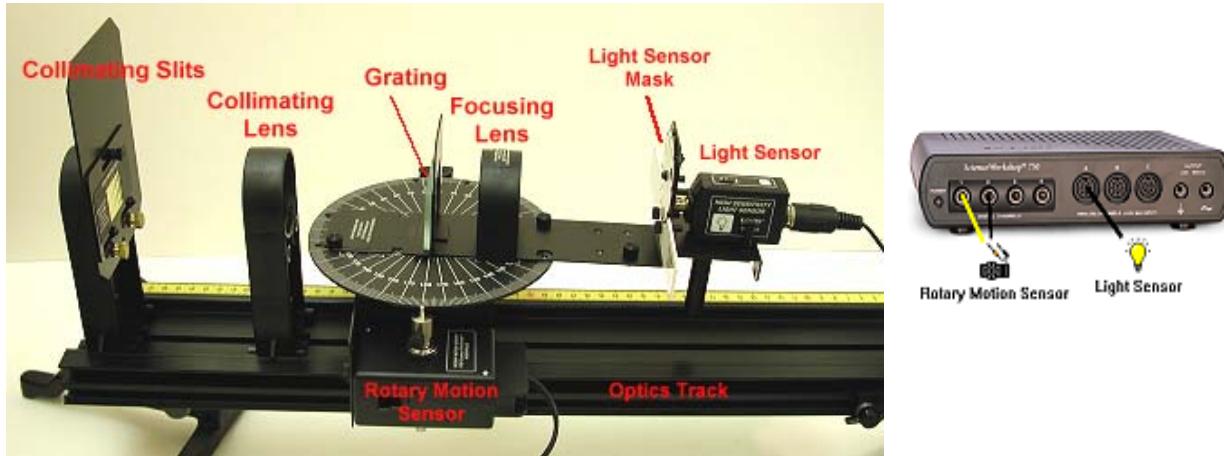


Figura 1: Montaje e interface 750

PROCEDIMIENTOS

Para determinar el periodo de la red d

1. Use el láser He-Ne para determinar el periodo o separación, d , de las líneas en la red. La longitud de onda del láser es: 632.8 nm. Mientras se realiza el barrido, apague las luces y gire la pantalla del computador respecto al sensor.
2. Ajuste la altura del espectrofotómetro a la fuente láser.
Comience el barrido lentamente a un lado del máximo central a través del primer máximo.

Configuración del sensor	
Sensor luz	x1
Ganancia	
Propiedad Sensibl.	Lo w
Rendija Colimadora	#1
Rendija Sensor luz	#2

3. Utilizando la herramienta Smart Tool sobre la grafica, mida el ángulo desde el máximo de orden cero (central) hasta el primer máximo lateral (de orden 1, $m = 1$).
4. Guarde la grafica.
5. Use la longitud de onda del láser He-Ne 632.8 nm para calcularar el periodo de separación, d , de las líneas en la red, utilizando la ecuación 12. Este valor de d se usara para el resto de esta experiencia de laboratorio.



Espectro del Hidrógeno

1. En el Setup haga doble-click sobre el icono del Sensor de luz. Luego vaya a la calibración y seleccione High para la Sensibilidad.

Config sugerida Hidrógeno	
Sensor luz Ganancia	x100
Propiedades Sensibil	High
Rendija Colimadora	#3
Rendija Sensor luz	#2

2. Encienda la lámpara de Hidrógeno y déjela calentarse tres minutos antes de usarla. Ajuste la altura del espectrofotómetro con el centro del tubo de Hidrógeno. Comience el barrido lentamente a un lado del máximo central a través del primer máximo. ($m=1$) pasando por los diferentes colores
3. Utilizando Note (A) en la cima del grafico, marque los picos de las líneas espectrales con el color correspondiente.
4. Utilizando la herramienta Smart Tool sobre la grafica, mida el ángulo desde el máximo de orden cero (central) hasta el primer máximo lateral (de orden 1, $m = 1$). para tres colores diferentes.
5. Archive el gráfico del espectro, desconecte el tubo espectral.
6. Use estos ángulos para determinar la longitud de onda de estos colores. Use el valor de d determinado con el laser.
7. Compare los valores aceptados para las longitudes de onda de estas líneas halle el porcentaje de error.
8. Para cada una de las longitudes de onda halladas par alas líneas del hidrogeno, calcule la energía del fotón en eV.
9. Utilizando estas energías, calcule el numero del nivel de energía inicial desde el cual el electrón decayó cuando emitió cada uno de estos fotones.
10. Realice los pasos anteriores del 1 al 7 para el tubo de He y de Hg.

ANÁLISIS

1. Con ayuda del programa DataStudio, halle la Posición de cada línea espectral y encuentre la longitud de onda respectiva para cada color.
2. Calcule la energía para los primeros 6 niveles permitidos del átomo de H.
3. Calcule la diferencia de energías para las primeras 6 transiciones permitidas de la serie de Balmer para el átomo de H.
4. Encuentre la energía para cada nivel de energía del átomo de H en Joules y en electronvoltios.
5. Calcule las posibles energías de los fotones emitidos para cada una de las líneas visibles del hidrógeno, diga a que transiciones corresponde cada una de ellas y su color.
6. Calcule las frecuencias para cada línea espectral.
7. Para cada línea del H calcule la constante de Plank, halle promedio y % Error.



8. Compare los valores experimentales de λ , y de la constante de Ridberg R con los valores teóricos aceptados, Halle el error relativo.

Tabla de las líneas espectrales su color y longitud de onda dadas para el H.

Nº	Color Línea	λ (nm) Teo	λ (nm) Exp	% Error
1	Roja	656.3		
2	Verde Azul	486.1		
3	Violeta I	434.0		
4	Violeta II	410.2		
5	Violeta III	397.0		

Tabla de datos H.

n	E()	ΔE (Balmer)	f()	λ ()	% Error	R()	% Error
1							
2							
3							
4							
5							
6							

Tabla de las líneas espectrales su color y longitud de onda dadas para el He.

Nº	Color Línea	λ (nm)	Intensidad	Para-OrtoHe	λ_{Exp} (nm)
1	Roja	728,1	3	P	
2	Roja	706,5	5	O	
3	Roja	667,8	6	P	
4	Amarilla	587,6	10	O	
5	Verde	501,6	10	P	
6	Verde	492,2	4	P	
7	Celeste	471,3	3	O	
8	Azul	447,1	6	O	
9	Azul	438,8	3	P	
10	Violeta	412,1	3	O	
11	Violeta	402,6	5	O	

PREGUNTAS

1. Que información podemos obtener de los espectros de los átomos?
2. Cómo cree usted que deben ser los espectros de las moléculas?
3. Que otro tipo de espectros existen?
4. Que aplicaciones tiene la espectroscopia?

OBSERVACIONES CONCLUSIONES.

1.- “CARGA ELÉCTRICA, CAMPO Y POTENCIAL ELÉCTRICO”

Desarrollo Experimental

Para llevar a cabo el experimento utilizamos los siguientes materiales:

- Una piel de conejo.
- Una barra de vidrio.
- Un electroscopio de láminas.
- Un generador Van de Graaff.
- Una caja de acrílico con aceite comestible.
- Electrodos: dos puntuales, cuatro placas planas, dos cilindros huecos y un conductor recto.
- Una caja de acrílico con arena cernida y húmeda.
- Una fuente de poder.
- Cables de conexión.
- Un multímetro digital.
- Dos esferas, una de cargas inducidas y otra de descarga.
- Semillas de pasto.
- Una regla de plástico graduada de 30 cm.
- Un guante de látex.

Procedimiento experimental y observaciones del estudiante

Formas de cargar un cuerpo eléctricamente (contacto, frotamiento e inducción)

- a) Explicación por parte del profesor del principio de funcionamiento del electroscopio de láminas.
- b) Frote la piel de conejo con la barra de vidrio y póngala en contacto con el electroscopio de láminas como se muestra en la figura 1.11a.

Sugerencia: usar el guante de látex para tomar la barra de vidrio



Figura 1.11a Electroscopio de láminas, carga por contacto

1. Explique qué sucede con las hojas del electroscopio en el inciso b).
- c) Frote nuevamente la barra de vidrio con la piel de conejo y acérquela con lentitud al electroscopio de láminas sin que se toque, figura 1.11b.



Figura 1.11b Electroscopio de láminas, carga por inducción

2. ¿Qué sucede con las hojas del electroscopio en el inciso c)?
3. Con respecto a los incisos b) y c), ¿qué formas de cargar un cuerpo observó? Explique.

Operación del Generador Van de Graaff

- d) El instructor explicará el funcionamiento del generador Van de Graaff.
- e) Acerque la esfera de carga inducida al casco del generador Van de Graaff y aproximela lentamente al electroscopio de láminas (figura 1.12).

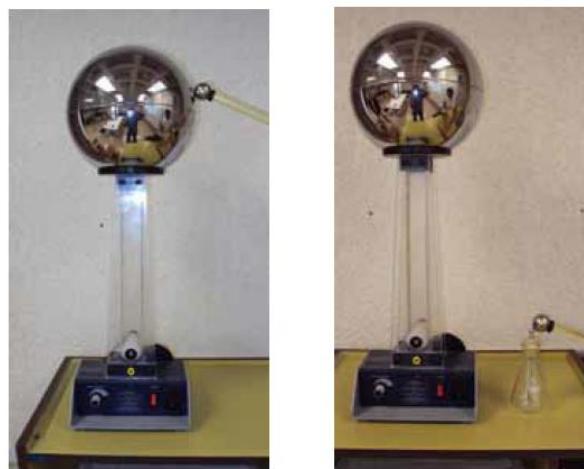


Figura 1.12 Generador Van de Graaff

4. En el Generador Van de Graaff, ¿dónde se acumularon las cargas?

Configuración de campo eléctrico

- f) Considerar el siguiente dispositivo figura 1.13.



Figura 1.13 Configuración de campo eléctrico

g) Coloque de manera correspondiente los siguientes electrodos en la caja de acrílico con aceite comestible.

- Un puntual (antes conecte al casco del generador).
- Un conductor recto (antes conecte al casco del generador).
- Dos puntuales (conecte uno al casco del generador y el otro a la base del mismo).
- Una placa plana (conecte al casco del generador).
- Dos placas planas (conecte una al casco del generador y la otra a la base del mismo), añadiendo posteriormente un cilindro hueco entre ellas.
- Un cilindro hueco (antes conecte éste al casco del generador).

5. Dibuje, auxiliándose con líneas de fuerza, las configuraciones que representan al campo eléctrico debido a los electrodos utilizados en el inciso g).

6. Compare sus configuraciones anteriores con las representaciones de su libro de texto. ¿Qué concluye al respecto?

Determinación de superficies equipotenciales debido a un campo eléctrico uniforme existente entre dos placas paralelas.

h) Arme el dispositivo de la figura 1.14 y aplique un voltaje de 20 [VCD]

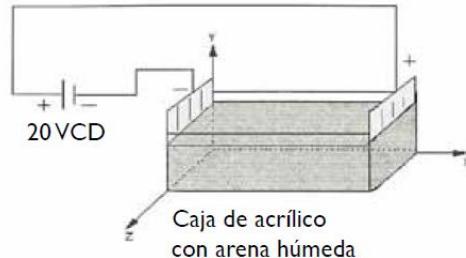
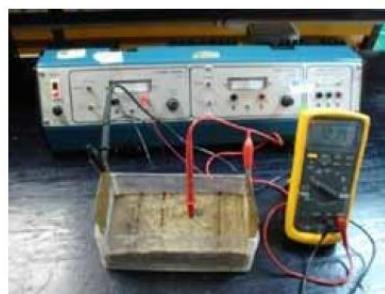


Figura 1.14 Superficies equipotenciales debido a un E entre placas planas

Nota: verifique que la arena esté húmeda y las placas libres de aceite.

i) Con ayuda del multímetro en la función de voltímetro localice superficies equipotenciales entre las placas, en donde el voltaje sea constante e igual a 4, 8, 12, 16 y 20 [VCD]. Anote sus resultados en la tabla 1.1.

VOLTAJE [V]	DISTANCIA (EJE X) [m]	CAMPO ELÉCTRICO [V/m]
4		
8		
12		
16		
20		

Tabla 1.1 Superficies equipotenciales debido a un E entre placas planas

7.- Con los datos de la tabla 1.1 calcule el campo eléctrico para cada caso y concentre sus resultados en la misma.

8.- El campo eléctrico calculado en la tabla 1.1, ¿se comportó de manera uniforme? Explique.

9. Represente en tres dimensiones, por medio de un diagrama, las superficies equipotenciales correspondientes a la tabla 1.1.

10. ¿Qué sucede con el campo eléctrico respecto a los demás ejes en el inciso i)?

j) Introduzca un cilindro electrostático centrándolo en la caja de superficies equipotenciales según se muestra en la figura 1.15.

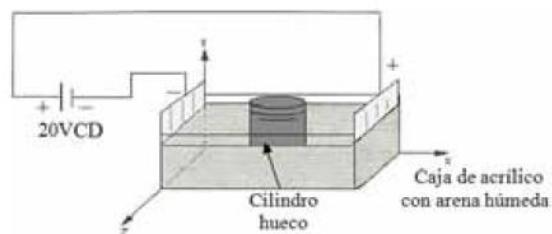


Figura 1.15 Superficies equipotenciales al insertar un cilindro

Nota: verifique que la arena esté húmeda y el cilindro libre de aceite.

k) Con ayuda del multímetro en la función de voltímetro, mida en dos puntos diferentes dentro del cilindro y anote el valor en la siguiente tabla:

LECTURAS	VOLTAJE
	1
	2

Tabla 1.2 Superficies equipotenciales con cilindro

ESCRIBA SUS CONCLUSIONES Y COMENTARIOS DE LA PRÁCTICA CORRESPONDIENTE.

2.- “MEDICIÓN Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE DATOS”

Desarrollo experimental:

Para llevar a cabo el experimento utilizamos los siguientes materiales:

- Una bocina.
- Un generador digital de señales.
- Un tablero con muestras de capacitores.
- Una fuente de poder de CD.
- Un multímetro.
- Capacitores de 2200 mF a 16 V, 500 mF a 50 V, 100 mF a 16 V, 47 mF a 16 V y 22 mF a 16V.
- Un Capacitor de 22 mF a 16 V para prueba destructiva.
- Una caja de acrílico.
- Diez cables de conexión tipo bula.
- Cables de conexión.
- Un LED a 3 V.

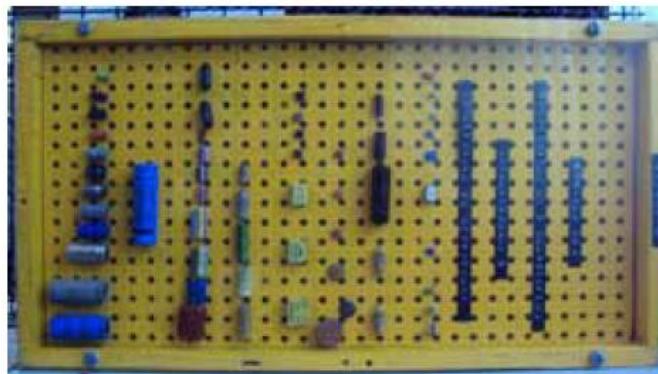


Figura 2.5 Tablero de capacitores

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL Y OBSERVACIONES DEL ESTUDIANTE

Tipos de capacitores y sus características

- a) Explicación por parte del profesor, con ayuda del tablero de muestra de capacitores, de los diferentes tipos y sus características (figura 2.5).

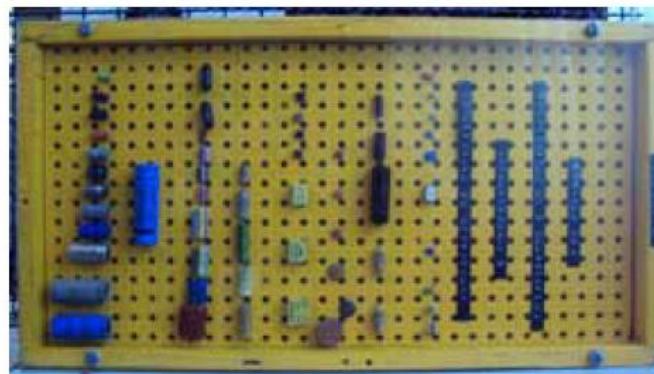


Figura 2.5 Tablero de capacitores

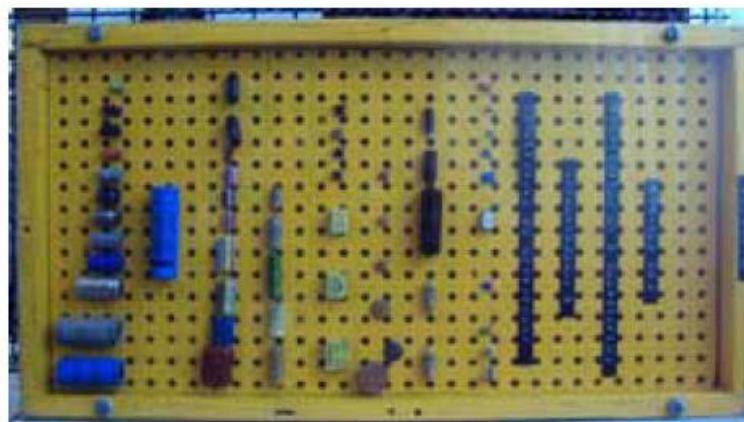


Figura 2.5 Tablero de capacitores

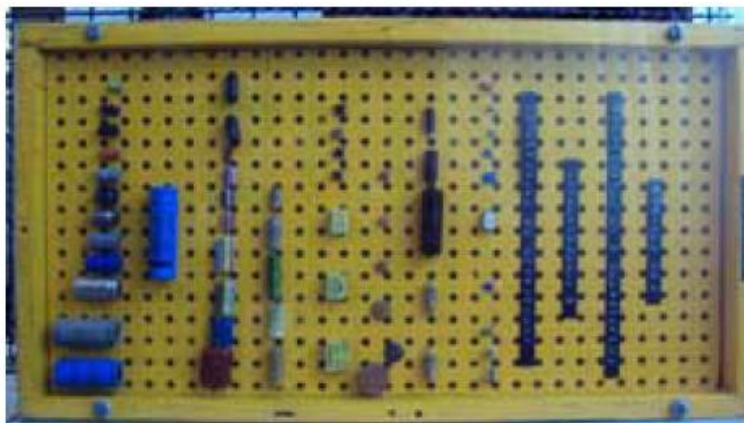


Figura 2.5 Tablero de capacitores

1.- Con base en la explicación y a lo observado, ¿qué parámetros debe especificar el fabricante de un capacitor?

Prueba destructiva de capacidores

- b) Arme el circuito de la figura 2.6, observe que en la conexión de la polaridad del capacitor está invertida y además tiene un voltaje mayor al voltaje de trabajo. Antes de energizar el circuito debe estar puesta la caja de acrílico
- c) Energice el circuito, déjelo conectado por un lapso y observe lo que sucede.

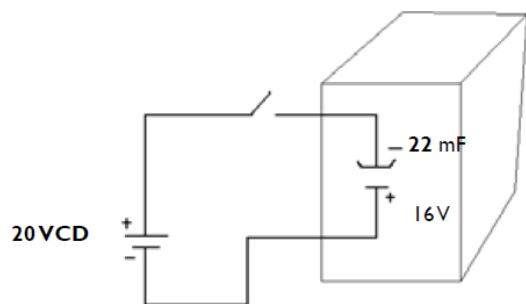


Figura 2.6 Prueba destructiva de capacitor

2.- ¿Por qué debemos respetar el valor del voltaje y la polaridad especificados en los capacitores?

Capacitor como filtro de señal de audio

- d) Explicación por parte del profesor del funcionamiento de un capacitor como filtro de señal de audio.
- e) Arme el circuito de la figura 2.7.



Generador de funciones

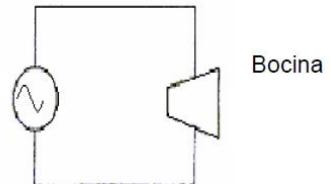


Figura 2.7 Circuito de audio

f) Varíe la frecuencia en el generador, hasta escuchar un sonido y siga incrementándola hasta que se deje de oír.

3.-De acuerdo a lo escuchado, ¿cuál es el rango de la frecuencia audible?

g) Mantenga una frecuencia audible y a continuación agregue un capacitor que sirva como filtro, según se muestra en la figura 2.8 y escuche el cambio de sonido.

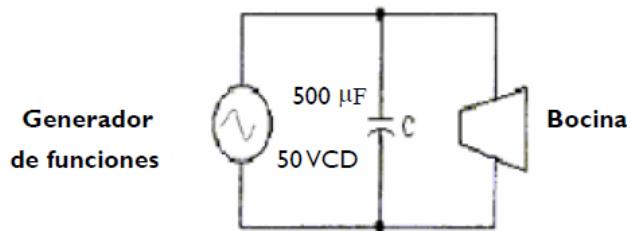


Figura 2.8 Circuito de audio con capacitor (filtro)

4.- ¿Cómo funciona un capacitor como filtro para señales de audio y qué concluye respecto a lo sucedido?

Almacenamiento de energía en un capacitor

h) Verifique que el capacitor de 2200 mF se encuentre descargado y posteriormente conéctelo a la fuente de poder, como se indica en la figura 2.9.

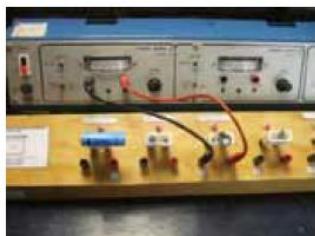


Figura 2.9 Energización de un capacitor

i) Desconecte el capacitor, teniendo cuidado de no tocar sus terminales y conéctelo a las terminales del voltímetro según se muestra en la figura. 2.10.

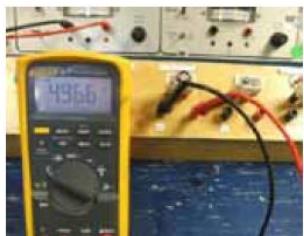


Figura 2.10 Desenergización de un capacitor

5.-De acuerdo a lo sucedido, explique por qué el voltímetro marca un voltaje al conectarse al capacitor.

j) Repita el inciso h), pero ahora conecte un LED (diodo emisor de luz) a las terminales del capacitor, cuidando su polaridad, como se indica en la figura 2.11 y observe lo que sucede.



Figura 2.11 Desenergización de un capacitor con LED

6.- ¿Qué concluye de acuerdo a lo observado en el inciso anterior?

Circuitos con capacitores

k) Arme el circuito de la figura 2.12, cuidando la polaridad de los capacitores.

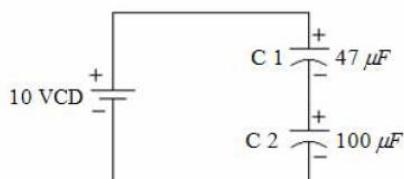


Figura 2.12. Capacitores en serie

l) Mida el voltaje en los capacitores C_1 y C_2 , anotando los valores obtenidos en la tabla

m) Arme el circuito de la figura 2.13.

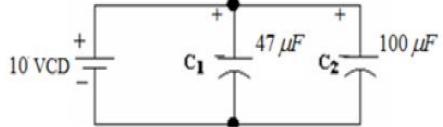


Figura 2.13 Capacitores en paralelo

n) Mida el voltaje en cada capacitor C_1 y C_2 y concentre sus resultados en la tabla 2.1.

ñ) Arme el circuito de la figura 2.14.

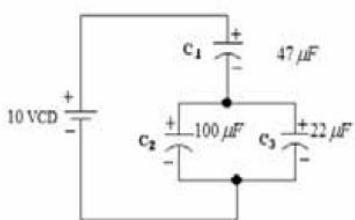


Figura 2.14 Capacitores serie-paralelo

o) Mida el voltaje en cada capacitor C_1 , C_2 y C_3 concentrando sus resultados en la tabla 2.1.

CIRCUITO	$V_{C1}[V]$	$V_{C2}[V]$	$V_{C3}[V]$
Figura 2.12			
Figura 2.13			
Figura 2.14			

Tabla 2.1 concentrado de voltajes de capacitores

7.- A partir de la tabla 2.1, diga si se cumple o no la relación de carga igual en capacitores en serie y justifique su respuesta con cálculos.

8.- Para capacitores conectados en paralelo el voltaje es igual entre sus terminales. De acuerdo a los valores de la tabla 2.1, ¿se cumple para los circuitos de las figuras, 2.13 y 2.14?

9.- De acuerdo a las mediciones de la figura 2.12 y 2.13, ¿en qué circuito se almacena una mayor energía? Justifique su respuesta con cálculos.

ESCRIBA SUS CONCLUSIONES Y COMENTARIOS DE LA PRÁCTICA CORRESPONDIENTE.

3.- "RESISTENCIA ÓHMICA, RESISTIVIDAD Y LEY DE OHM."

Desarrollo experimental

Para llevar a cabo el experimento utilizamos los siguientes materiales:

- Dos multímetros.
- Un puente de Wheatstone.
- Una fuente de poder.
- Tres resistencias (100 W, 2.7 KW, 47 KW, todas a 1/2 W).
- Cables de conexión.
- Un hilo conductor de alambre con su base.
- Un tablero con conductores de alambre magneto de diferentes calibres.
- Tres minas de carbón de diferente dureza (HB, 2H y 4H) y longitud igual.
- Un termistor.
- Una parrilla.
- Un soporte universal y sus accesorios.
- Un vaso Pírex.
- Un termómetro digital y/o de bulbo de mercurio.
- Un vernier.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL Y OBSERVACIONES DEL ESTUDIANTE

Medición de Resistencia Óhmica por diferentes métodos:

Código de colores

a) Usando el código de colores (figura 4.2) identifique los valores de tres resistencias y conciente los resultados en la tabla 4.1.

Color de la banda	Valor de la 1 ^a cifra significativa	Valor de la 2 ^a cifra significativa	Multiplicador	Tolerancia
Negro	+	0	1	
Marrón	1	1	10	±1%
Rojo	2	2	100	±2%
Naranja	3	3	1.000	
Amarillo	4	4	10.000	
Verde	5	5	100.000	
Azul	6	6	1.000.000	
Violeta	7	7	-	
Gris	8	8	-	
Blanco	9	9	-	
Dorado	-	-	0,1	±5%
Platado	-	-	0,01	±10%
Ninguno	-	-	-	±20%

Figura 4.2 Código de colores para resistencias de carbón

Equipo puente de Wheatstone

- b) El profesor describirá el uso y manejo del equipo puente de Wheatstone (figura 4.3).



Figura 4.3 Equipo puente de Wheatstone

- c) Realice con el puente de Wheatstone la medición de las tres resistencias indicadas en la tabla 4.1 y concentre sus resultados en la misma.

Óhmetro

- d) Utilice el multímetro en su función de óhmetro (figura 4.4), para medir las mismas resistencias anteriores y concentre sus valores en la tabla 4.1.

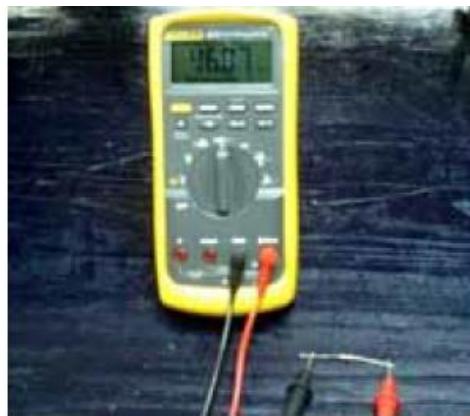


Figura 4.4 Medición de resistencia con multímetro

RESISTENCIA	CÓDIGO DE COLORES [Ω]	PUENTE DE WHEATSTONE [Ω]	OHMETRO [Ω]
$R_1=100 \Omega$			
$R_2=2.7 K\Omega$			
$R_3=47 K\Omega$			

Tabla 4.1 Medición de resistencia óhmica

1. ¿Qué condiciones se deben cumplir para medir el valor de la resistencia desconocida por medio del puente de Wheatstone?

Potencial inducido

- e) Considerando los valores de resistencia dados por el código de colores, calcular el voltaje máximo ($V_{MAX}=$) que se puede aplicar a cada una de ellas y concentre sus resultados en la tabla 4.2.

R	Vmáx [V]
$R_1=100 \Omega$	
$R_2=2.7 K\Omega$	
$R_3=47 K\Omega$	

Tabla 4.2 Voltaje máximo aplicable a cada resistencia

- f) Arme el circuito de la figura 4.5, considerando las resistencias empleadas en el inciso a) una a la vez.

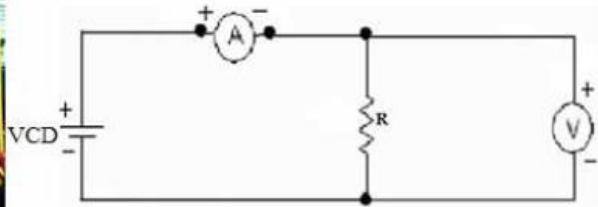


Figura 4.5 Medición de resistencia por potencial inducido

g) Alimente el circuito de la figura 4.5 con un voltaje menor o igual al calculado en la tabla 4.2 para cada resistencia y realice mediciones de voltaje e intensidad de corriente y concentre sus resultados en la tabla 4.3.

RESISTENCIA	VOLTAJE [V]	CORRIENTE [A]	RESISTENCIA [Ω]
$R_1=100 \Omega$			
$R_2=2.7 K\Omega$			
$R_3=47 K\Omega$			

Tabla 4.3 Cálculo de resistencia por potencial inducido

2. Aplicando la Ley de Ohm, encuentre el valor para cada una de las resistencias de la tabla 4.3, y concentre sus resultados en la misma.

3. ¿Con qué método obtuvo mayor exactitud en la medición de resistencia óhmica? (tome como referencia el valor obtenido por código de colores, sin considerar la tolerancia).

Potencia eléctrica en una resistencia

h) Arme el circuito mostrado en la figura 4.6.

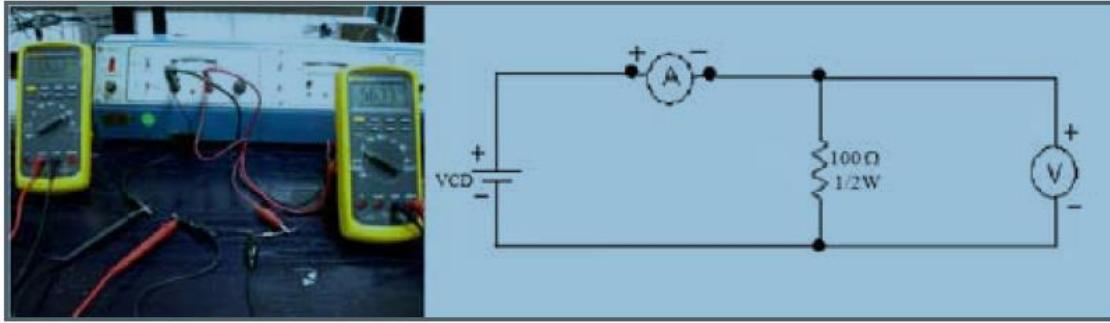


Figura 4.6. Potencia eléctrica en una resistencia

- i) Para cada caso de voltaje indicado en la tabla 4.4 mida la corriente eléctrica y concentre sus mediciones en la misma.

VOLTAJE [V]	CORRIENTE [A]	POTENCIA [W]
2		
4		
6		
8		
10		
12		
14		
16		
18		
20		

Tabla 4.4 Potencia eléctrica

4. Tomando los valores de corriente y voltaje de la tabla 4.4, calcule la potencia y concentre sus resultados en la misma. ¿Coincide la potencia calculada con la especificada por el fabricante? Explique.

5. Realice una gráfica de voltaje contra corriente, tomando como referencia los valores obtenidos en la tabla 4.4.

Medición de la resistencia óhmica en función de la longitud del conductor

- j) Conecte los elementos como se muestra en la figura 4.7.

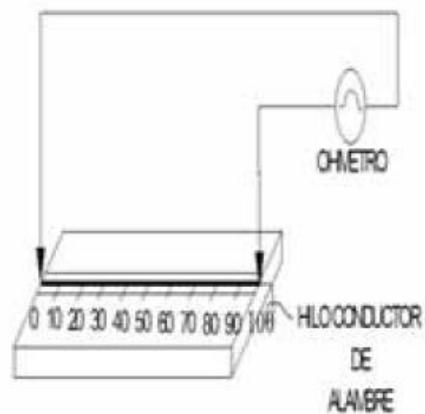
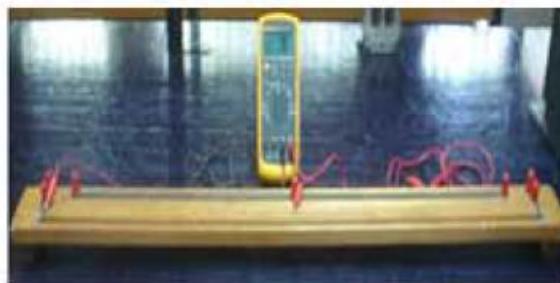


Figura 4.7. Medición de la resistencia óhmica en función de la longitud

- k) De acuerdo a la tabla 4.5 mida la resistencia óhmica en cada caso y concentre los resultados en la misma.

LONGITUD [cm]	RESISTENCIA [Ω]
0	
10	
20	
30	
40	
50	
60	
70	
80	
90	
100	

Tabla 4.5 Resistencia óhmica en función de la longitud

6. Realice una gráfica de resistencia contra longitud, a partir de los valores obtenidos en la tabla 4.5.
7. ¿Qué relación nos muestra la gráfica y la tabla 4.5 respecto a resistencia contra longitud?

Determinación de la resistencia óhmica en función del área de sección transversal del alambre conductor

- l) Mida el diámetro de sección transversal de los conductores, llene las columnas correspondientes al diámetro y al área en la tabla 4.6.

Nota: los diámetros considerados son sin aislante.

m) Mida la resistencia óhmica de cada uno de los conductores contenidos en el tablero (figura 4.8) y concentre sus valores obtenidos en la tabla 4.6.



Figura 4.8 Medición de la resistencia óhmica de conductores de diferentes calibres

CALIBRE #	DIÁMETRO [mm]	ÁREA [mm ²]	RESISTENCIA [Ω]
15			
22			
30			

Tabla 4.6 Resistencia óhmica en función del área de sección transversal

- 8.- ¿Coinciden los datos obtenidos de diámetro y área de los conductores con la tabla de datos del fabricante de conductores de cobre?
- 9.- Con los valores de la tabla 4.6, realice una gráfica de resistencia contra área.
- 10.- ¿Qué relación de proporcionalidad observa a partir de la gráfica elaborada en la pregunta 9?

Determinación de la resistencia respecto a la conductividad de los conductores

- n) Conecte las minas, una a la vez como se muestra en la figura 4.9.

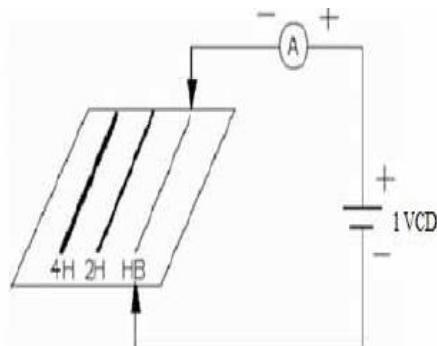


Figura 4.9 Medición de conductividad y resistividad eléctrica.

- o) Aplique una diferencia de potencial de 1 [V] a cada una de las minas de carbón, mida la intensidad de corriente eléctrica y concentre sus mediciones en la tabla 4.7, calculando lo que se indica.

Minas de Carbón	Longitud [m]	Diámetro [m]	Área [m ²]	Corriente [A]	Densidad de Corriente [A/m ²]	Campo Eléctrico [V/m]	Resistividad [Ω ·m]	Conductividad [1/Ω ·m]
HB								
2H								
4H								

Tabla 4.7 Conductividad y resistividad eléctrica

Determinación de la resistencia debido a la variación de la temperatura

- p) Arme el dispositivo que se muestra en la figura 4.10, cuidando de ubicar el sensor de temperatura junto al termistor.

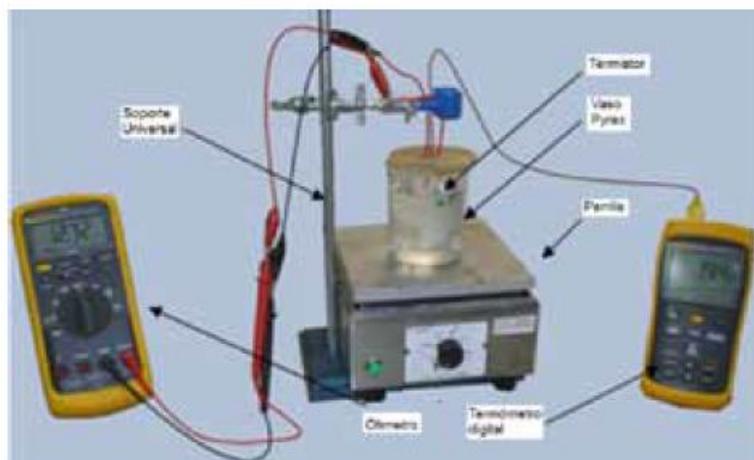


Figura 4.10 Resistencia en función de la temperatura

q) Con el multímetro usado como óhmetro, tome el valor de la resistencia del termistor de acuerdo a los valores de temperatura de la tabla 4.8 y conciente sus resultados en la misma.

T [°C]	R [Ω]
Temperatura inicial	
30	
35	
40	
45	
50	
55	
60	
65	
70	

Tabla 4.8 Resistencia en función de la temperatura

11.- Elabore una gráfica resistencia contra temperatura con los datos de la tabla 4.8.

12.- En el caso de un conductor, ¿cómo varía la resistencia en función de la temperatura y por qué?

ESCRIBA SUS COMENTARIOS Y CONCLUSIONES DE LA PRÁCTICA CORRESPONDIENTE.

5.- "LEYES DE KIRCHHOFF Y CIRCUITO R.C."

Desarrollo experimental

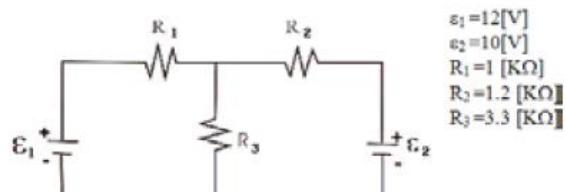
Para llevar a cabo el experimento utilizamos los siguientes materiales:

- Dos fuentes de poder.
- Un osciloscopio.
- Un generador de funciones.
- Un multímetro.
- Tres resistencias 1 [KW], 1.2 [KW], y 3.3 [KW], todas a 1 [W].
- Un potenciómetro de 0 – 10 [KW] a 1[W].
- Un capacitor de 0.047 [mF] a 10 [V].
- Cables para conexión.
- Tableta protoboard.
- Pinzas de punta.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL Y OBSERVACIONES DEL ESTUDIANTE

Circuitos de corriente directa y leyes de Kirchhoff

- a) Arme el circuito mostrado en la figura 7.5.
- b) Realice y anote las mediciones de voltaje y corriente de acuerdo a la tabla 7.1.



$$\begin{aligned}E_1 &= 12[V] \\E_2 &= 10[V] \\R_1 &= 1 [K\Omega] \\R_2 &= 1.2 [K\Omega] \\R_3 &= 3.3 [K\Omega]\end{aligned}$$

Figura 7.5 Circuito resistivo serie-paralelo, con dos FEMs

RESISTENCIA	CORRIENTE [A]	VOLTAJE [V]
R_1		
R_2		
R_3		

Tabla 7.1 Medidas de intensidad de corriente y caída de voltaje

1. Con los valores indicados en el circuito de la figura 7.5 encuentre la intensidad de corriente y el voltaje para cada resistencia.
2. ¿Qué concluye respecto a los valores obtenidos experimental y teóricamente en el circuito de la figura 7.5?
3. ¿Se cumple el principio de conservación de la energía (leyes de corriente y voltaje de Kirchhoff) para las lecturas de la tabla 7.1? ¿Qué consideraciones hay que hacer?

Circuito RC

Calibre el osciloscopio.

- a) Ajuste el generador de funciones de tal manera que obtenga una señal cuadrada de 2 V de amplitud y 2KHz de frecuencia.
- b) Arme el circuito como es mostrado en la figura 7.6.

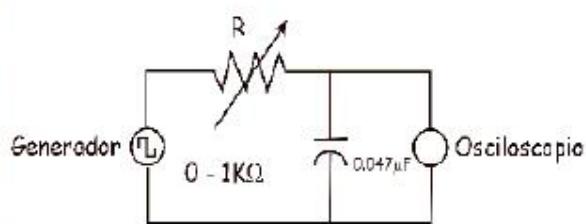


Figura 7.6 Circuito RC

- c) Varíe el potenciómetro hasta obtener una señal fácil de medir en el osciloscopio.
- d) Con ayuda del osciloscopio observe el voltaje en el capacitor y en la resistencia.
- e) Desconecte la resistencia del circuito y mídala con el óhmetro anotando su valor, $R =$

4. Realice una gráfica acotada del voltaje en el capacitor y en la resistencia, en el proceso de carga y descarga, respectivamente del inciso f).

5. Realice la suma de las gráficas de voltaje acotadas en la pregunta 4. ¿Cómo relaciona la señal obtenida con la señal de entrada?

6. De la gráfica de voltaje de carga del capacitor, anote el voltaje y encuentre el valor de la constante de tiempo.

7. Calcule el valor de la capacitancia del capacitor empleado a partir de la constante de tiempo y el valor de la resistencia medida en el inciso h).

ESCRIBA SUS COMENTARIOS Y CONCLUSIONES DE LA PRÁCTICA CORRESPONDIENTE.

6.- “CAMPOS MAGNÉTICOS ESTACIONARIOS”

Desarrollo experimental

Para llevar a cabo el experimento utilizamos los siguientes materiales:

- Dos imanes de barra rectos.
- Dos imanes tipo dona.
- Un imán en forma de U (herradura).
- Un electroimán.
- Un dispositivo de Oersted.
- Limadura de hierro.
- Una bobina con su base.
- Un solenoide con núcleo de hierro.
- Una fuente de poder 30 [V], 10 [A].
- Cuatro brújulas.
- Cables para conexión.
- Una balanza granataria.
- Una regla graduada.
- Un soporte universal y pinza sujetadora.
- Una hoja de papel nueva.
- Un salero.

Procedimiento experimental:

Configuraciones de campo magnético

a) Coloque el imán de barra en forma horizontal sobre la mesa de trabajo; a continuación, encima de él ponga una hoja de papel y rocíe limadura de hierro, finamente con el salero de manera uniforme.

1. Dibuje la forma de las líneas de campo magnético producidas en el plano de la hoja por el imán recto. ¿Qué concluye al respecto?

- b) Repita el procedimiento indicado en el inciso a), utilizando el imán en forma de U.
2. Dibuje la forma de las líneas de campo magnético producidas en el plano de la hoja por el imán en U. ¿Qué concluye al respecto?

- c) Coloque dos imanes de barra como se indica en la figura 8.4. Para cada caso ponga una hoja sobre ellos y rocíe finamente limadura de hierro.

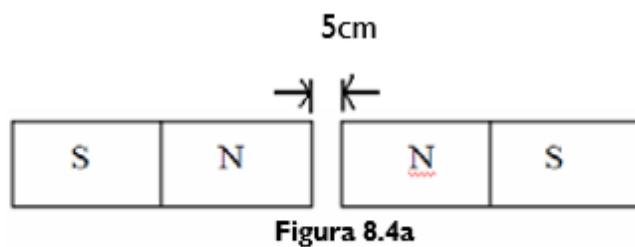


Figura 8.4a



Figura 8.4b



Figura 8.4c

Figura 8.4 Imanes permanentes

3. Dibuje las líneas de campo magnético producido en el plano de la hoja por los dos imanes del inciso c), en cada posición.

Experimento de Oersted

- d) Utilizando el dispositivo de Oersted, coloque cuatro brújulas en la base de acrílico alrededor del hilo conductor en un radio de aproximadamente 3 cm, como se muestra en la figura 8.5 (cerciórese de que todas las brújulas señalen en dirección del norte geográfico).

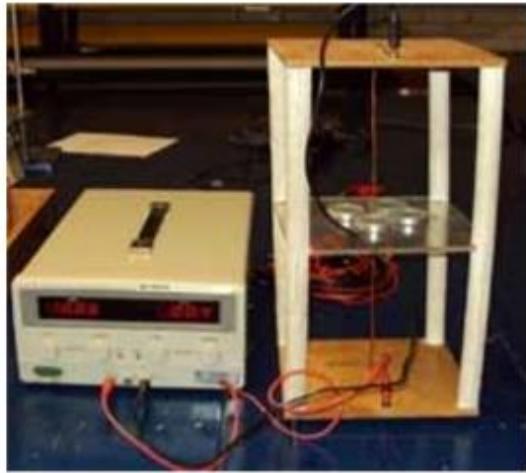


Figura 8.5 Dispositivo de Oersted

- e) Ajuste la fuente de poder hasta obtener una corriente eléctrica de 5 A aproximadamente y observe el sentido del campo magnético indicado por las brújulas.
4. Auxíliese con las brújulas para obtener la configuración del campo magnético del alambre conductor utilizado en el inciso e) ¿Qué concluye al respecto?
5. Si invierte el sentido de la corriente, ¿cuáles serían sus conclusiones respecto a las líneas de fuerza en el inciso e)?
6. La dirección del campo magnético indicada por las brújulas en el inciso e), ¿coincide con la regla de la mano derecha?

Campo magnético producido por una bobina circular y un solenoide

- f) Coloque alrededor de la bobina circular cuatro brújulas como se muestra en la figura 8.6 (cerciórese que el eje axial de la bobina no coincide con el norte-sur geográfico). A continuación, mediante la fuente de poder ajuste la corriente eléctrica a 3A y observe la orientación de las brújulas.



Figura 8.6 Dispositivo de bobina circular

7. Dibuje las líneas de campo magnético producido por la bobina circular, auxíliese por la orientación de las brújulas.

g) Conecte la fuente de poder al solenoide como se muestra en la figura 8.7 y ajuste el voltaje hasta tener una corriente de 1.5A. A continuación coloque una hoja de papel sobre el solenoide con núcleo de hierro estando éste en posición horizontal y rocíe limadura de hierro.

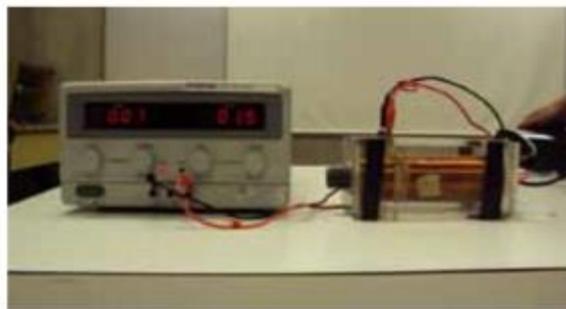


Figura 8.7 Electroimán

8. Dibuje la configuración de campo magnético auxiliándose por medio de líneas de fuerza, observadas en el inciso g).

Fuerza magnética entre polos magnéticos

h) Utilizando la balanza granataria, determine la masa del imán en forma de dona, $M_{\text{imán}} = \underline{\hspace{2cm}}$ Kg.

i) Arme el dispositivo que se muestra en la figura 8.8. Sujetando el “fiel” mantenga la balanza en equilibrio (marcando cero) y fije una distancia de 8 cm entre las caras de ambos imanes, entre éstos debe existir una fuerza de repulsión.

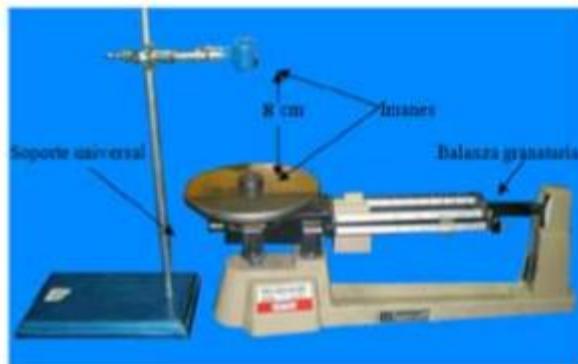


Figura 8.8 Fuerza entre imanes permanentes

- j) Libere el fiel de la balanza y a continuación por medio de los jinetillos restablezca el equilibrio, para obtener M_{lectura} . Concentre su lectura en la tabla 8.1.
- k) Repita lo anterior para las distancias indicadas en la tabla 8.1 y concentre sus lecturas en la misma.

DISTANCIA [m]	M_{lectura} [Kg]	$M = M_{\text{iman}} - M_{\text{lectura}} $ [Kg]	FUERZA [N]
0.08			
0.06			
0.04			

Tabla 8.1 Fuerza entre polos magnéticos

1. Considere los valores de la tabla 8.1. ¿Cómo varía la magnitud del campo magnético respecto a la distancia?
- l) Sustituya el imán superior por el electroimán, colóquelo a una distancia de 4 cm según se muestra en la figura 8.9 y conéctelo a la fuente de poder de manera que provoque repulsión al fluir corriente por él.

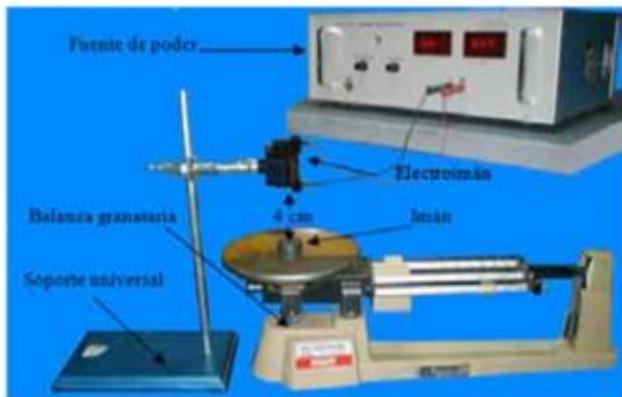


Figura 8.9 Fuerza entre un electroimán y un imán permanente

- m) Ajuste en la fuente la perilla de voltaje al máximo y por medio de la perilla de corriente obtenga los valores indicados en la tabla 8.2.
- n) En cada caso del inciso anterior, para obtener $M_{lectura}$, restablezca el equilibrio en la balanza y concentre sus lecturas en la misma tabla.

CORRIENTE [A]	$M_{lectura}$ [Kg]	$M = M_{imán} - M_{lectura}$ [Kg]	FUERZA [N]
0.5			
1.0			
1.5			
2.0			
2.5			

Tabla 8.2 Fuerza magnética utilizando un electroimán

2. Considere los valores de la Tabla 8.2, ¿cómo varía la magnitud del campo magnético sobre el eje del solenoide? Escriba la ecuación matemática que cuantifica esta variación.
3. Grafique la fuerza magnética contra corriente eléctrica con los valores obtenidos en la tabla 8.2 ¿Cómo varía la fuerza magnética respecto a la corriente?

ESCRIBA SUS COMENTARIOS Y CONCLUSIONES DE LA PRÁCTICA CORRESPONDIENTE

7.- "LEYES DE LA INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA DE FARADAY Y CIRCUITO RL"

Desarrollo experimental

Para llevar a cabo el experimento utilizamos los siguientes materiales:

- Una bobina de 1000 espiras.
- Dos bobinas de 250 espiras.
- un núcleo de hierro en forma de “U”.
- Dos multímetros.
- Cables de conexión.
- Un variac.
- Un osciloscopio.
- Un generador de funciones.
- Un potenciómetro 0-10,000 (Ω).
- Una inductancia de 17.2 [mHr] o valor aproximado.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL Y OBSERVACIONES DEL ESTUDIANTE

Principio básico del transformador eléctrico:

Transformador regulador

Medición de voltaje

- a) Arme el circuito mostrado en la figura 9.6 empleando las bobinas iguales de 250 espiras.

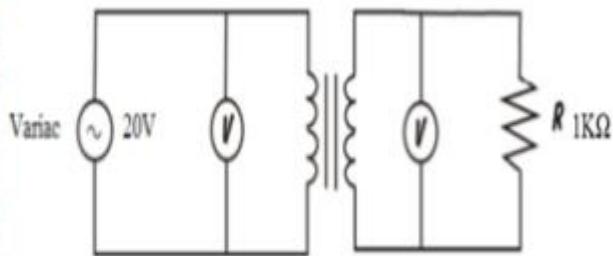


Figura 9.6 Transformador regulador

- b) Mida el voltaje en el primario en vacío.
- c) Mida el voltaje en el secundario en vacío.
- d) Anote los datos obtenidos en la tabla 9.1.

Circuito	Voltaje [V]	
	Primario	Secundario
En vacío		

Tabla 9.1 Transformador regulador

1. ¿Se verificó el fenómeno de inducción electromagnética del circuito primario al secundario?

Transformador reductor de voltaje

- e) Reemplazar en el circuito primario de la figura 9.6, la bobina de 250 espiras por una de 1000 espiras.
- f) Realice las mediciones de la misma forma en que lo hizo en el experimento anterior y anote los resultados en la tabla 9.2.

Circuito	Voltaje [V]	
	Primario	Secundario
En vacío		

Tabla 9.2 Transformador reductor

2. ¿Se comprobó la acción transformadora?

Transformador elevador de voltaje

g) Realice las mismas mediciones que los experimentos anteriores, pero ahora colocando la bobina de 250 espiras en el primario y la de 1000 espiras en el secundario y anote los resultados en la tabla 9.3.

Círculo	Voltaje [V]	
	Primario	Secundario
En vacío		

Tabla 9.3 Transformador elevador

3. Con los datos de los experimentos realizados llene la tabla 9.4 y calcule el voltaje del secundario y los flujos magnéticos para cada caso.

Transformador	N_1	N_2	a	$V_1(t)$	$V_2(t)$		θ_{B1} MAXWELL	θ_{B2} MAXWELL
					EXP.	TEÓR.		
Básico								
Reductor								
Elevador								

Tabla 9.4 Obtención de datos teóricos

4. ¿Qué factores cree que intervengan respecto de sus resultados teóricos y experimentales?

Círculo RL

h) Ajuste el generador de tal manera que obtenga una señal de pulso de 10 V de amplitud y 6 [KHz] de frecuencia.

i) Arme el circuito que se muestra en la figura 9.7.



Figura 9.7 Circuito RL

j) Observe la variación con el tiempo, de la diferencia de potencial en el inductor y el resistor. Mida el valor máximo y el mínimo.

5. Haga una gráfica voltaje-tiempo para la resistencia y otra para el inductor según lo observado en el osciloscopio. Acote ambos ejes de las gráficas.

6. Verifique si se cumple la Segunda Ley de Kirchhoff en el circuito RL, en los procesos de energización y desenergización. Sume gráficamente, punto a punto, para cada proceso.

k) Para un valor de resistencia, mida la constante de tiempo del circuito.

7. Haga una gráfica acotada de voltaje en el resistor-tiempo, e indique cómo determinó la constante de tiempo. Anote el valor medido.

l) Varíe el valor de R de su valor mínimo al máximo.

8. Explique en términos de la constante de tiempo, las variaciones de las formas de onda observadas.

9. ¿Por qué cuando la corriente en el inductor es constante, la diferencia de potencial en sus extremos es cero?

ESCRIBA SUS COMENTARIOS Y CONCLUSIONES DE LA PRÁCTICA CORRESPONDIENTE.



RADIACIÓN DEL CUERPO NEGRO

INTRODUCCIÓN

En esta experiencia de laboratorio se hace un barrido del espectro de una lámpara incandescente utilizando un espectrofotómetro de red de difracción (o de prisma) el cual mide la intensidad relativa de la luz en función del ángulo. Un sensor de luz de amplio espectro es utilizado que cubre el rango espectral desde aproximadamente los 400 nm hasta los 2500 nm. La longitud de onda correspondientes a los ángulos se pueden calcular utilizando las ecuaciones para el espectrofotómetro de red (para el orden uno, conociendo su periodo d). La intensidad relativa de la luz se puede graficar como función de la longitud de onda cuando el espectro se escanea, obteniéndose como resultado la curva característica del cuerpo negro. La intensidad de la luz de la lámpara incandescente se puede regular variando el voltaje y/o corriente, variando de esta forma la temperatura del filamento, si el barrido se repite se puede demostrar experimentalmente como las curvas presentan un corrimiento en el pico de la longitud de onda a medida que se varía la intensidad luminosa.

La temperatura del filamento del bulbo se puede estimar indirectamente determinando la resistencia del bulbo del voltaje y corrientes medidas. De la temperatura, el pico teórico de la longitud de onda puede calcularse y compararse con el pico de longitud de onda medida.

TEORÍA

La intensidad (I) de la radiación emitida por un cuerpo está dada por la ley de Radiación de Planck

$$I(\lambda) = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad (1)$$

donde c es la velocidad de la luz en el vacío, h es la constante de Planck, k es la constante de Boltzmann, T es la temperatura absoluta del cuerpo, y λ es la longitud de onda de la radiación.

la longitud de onda con la mayor intensidad está dada por:

$$\lambda_{\max} = \frac{\text{constant}}{T} = \frac{0.002898 \text{ m} \cdot \text{K}}{T} \quad (2)$$

Donde T es la temperatura absoluta del cuerpo. La temperatura del cuerpo negro de un filamento de lámpara incandescente puede calcularse utilizando la resistencia del filamento mientras está encendido. La resistividad del filamento de tungsteno es una función no lineal de la temperatura. Una función que calibra aproximadamente la curva para la resistividad del tungsteno se usa en el programa de DataStudio setup file para calcular la temperatura.

La resistencia del filamento se calcula usando la ley de Ohm.

$$R = \frac{V}{I}$$

Donde V es el voltaje aplicado a la lámpara e I es la corriente a través de la lámpara.

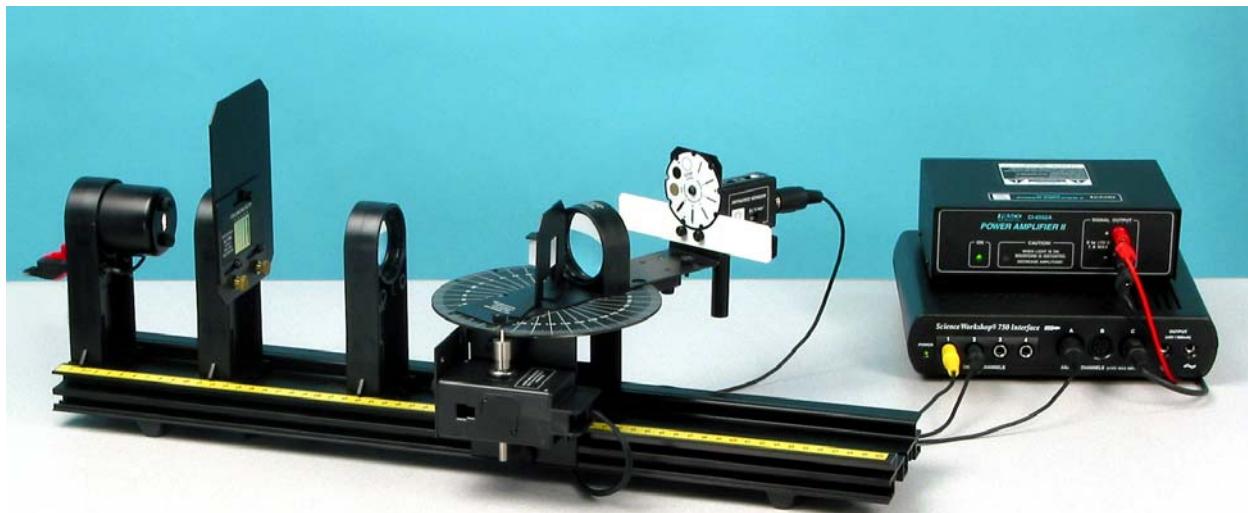


Figura 1: Completo

1. pectrofotómetro como se muestra en la Figura 1. Aterrice la plataforma del espectrofotómetro. Utilice en este experimento un sensor de luz de espectro amplio, y la interface 750 ScienceWorkshop conectada a un computador con el programa de adquisición DataStudio.
2. Revise que la red de difracción este bien colocada.
3. Las lentes colimadoras deben estar a 10 cm de las rendijas colimadoras.
4. Conecte la lámpara incandescente a través de una auto transformador regulable o en su defecto se puede con un Amplificador de Potencia. Conecte el Amplificador de Potencia a través del Canal C de la interface 750 ScienceWorkshop.
5. Conecte el Sensor luminoso al Canal A de la interface. Conecte el Sensor de Movimiento Rotacional en el Canal 1 y 2.
6. Abra el archive de DataStudio llamado "Blackbody".

EQUIPO

1	Sistema del Espectrofotómetro	OS-8539
1	Bulbo incandescente	SE-8509
1	Sensor de Luz	CI-6630
1	Amplificador Potencia	CI-6552A
1	Interface ScienceWorkshop 750	
1	DataStudio + PC	

PROCEDIMIENTO

1. Ponga la rendija colimadora en #4. La mascarilla del sensor de luz en la rendija #4. (ver Fig 3)
2. En el programa DataStudio, haga click sobre la ventana del Generador de Señales y encienda el generador en 10 V DC. *Precaución:* Si se aplican 10 Voltios a una lámpara por un periodo muy largo de tiempo, la vida del bulbo se reduce. Encienda el bulbo solo cuando se estén haciendo las mediciones.



Figura 3: Espectro continuo sobre la
Mascarilla del Sensor de luz

3. Rote el brazo de barrido hasta que el llegue al cero. Esta será la posición de partida para todos los barridos.
4. Coloque el Sensor de luz en una ganancia de x100 y presione el botón de calibración. Click START en DataStudio.
5. Cuando empiece el barrido, revise que el ángulo sea positivo. De lo contrario invierta las conexiones del sensor de movimiento rotacional en la interface y reinicie la toma de datos. Rote lentamente el brazo de barrido a través del espectro y continúe hasta el final. El grafico de la intensidad vs. Longitud de onda se detendrá automáticamente cerca de los 2500 nm porque el vidrio de la óptica del espectrofotómetro no transmite longitudes de onda mayores que 2500 nm.
6. Repita los pasos anteriores para varios voltajes 9V, 7 V , 5V, 4 V, 2V

ANÁLISIS

1. El corrimiento del pico se hace hacia las longitudes de onda cortas o largas cuando la temperatura decrece?
2. Cómo cambia la intensidad cuando la temperatura cambia?
3. Utilice el Cursor Inteligente en la gráfica para hallar la temperatura del filamento. Calcule la longitud de onda del pico para cada temperatura utilizando la ecuación (2). Los valores teóricos corresponden al valor de la longitud de onda del pico en el grafico de intensidad?
4. Utilice la formula de Planck (Ecuación (1)) en la calculadora de DataStudio. La ecuación está en el archivo de configuración. Revise si la forma de la curva experimental coincide con la curva teórica? Puede el bulbo considerarse un cuerpo negro?
5. Como cambia el color del bulbo con la temperatura? Como cambia el color de la composición del espectro con la temperatura? Considerando el pico de las longitudes de onda, Por qué un bulbo es rojo a bajas temperaturas y blanco a altas temperaturas?
6. Acerca de que longitud de onda debe estar el pico de nuestro sol? Que color tiene nuestro Sol? Por qué?
7. Para las temperaturas mas altas, es mayor la intensidad (el área del gráfico de la intensidad vs. longitud de onda) en la parte visible del espectro o en la parte infrarroja del espectro? Como podría un bulbo de luz ser mas eficiente si el produce mas luz en el visible?

Laboratorio 2

Radiación térmica

2.1 Objetivos

1. Introducir experimentalmente el concepto de radiación térmica.
2. Comprobar la Ley de Stefan-Boltzmann para altas temperaturas.
3. Verificar la ley del cuadrado inverso para la radiación térmica.

2.2 Preinforme

1. ¿ En qué consiste la radiación térmica ?.
2. ¿ A qué se le denomina radiación de cuerpo negro ?.
3. ¿ Qué establece la ley de Stefan-Boltzmann?.

2.3 Materiales

- Sensor de radiación PASCO TD-8553.
- Cubo de radiación térmica TD-8554A.
- TD-8555 Lámpara de Stefan-Boltzman.
- voltímetro, Amperímetro, Ohmetro, Fuente de voltaje (12 VDC;3A).
- Ventana de vidrio, láminas aislantes con recubrimiento de aluminio, lámina de triplex pequeña, lámina de aluminio, cinta métrica y algunos otros materiales que puedan ensayarse como bloqueadores de la radiación térmica.

2.4 Fundamento Teórico

La radiación térmica se encuentra en la región infrarroja del espectro electromagnético, el cual se extiende desde las señales de radiofrecuencia hasta los rayos γ . Su fuente son los cuerpos calientes debido a oscilaciones de las moléculas que los conforman. La energía asociada a la radiación térmica se puede medir utilizando sensores tales como termopares los cuales responden al calor generado por algún tipo de superficie. Se dice que un cuerpo se encuentra en equilibrio térmico cuando emite la misma cantidad de radiación térmica que absorbe; desprendiéndose de aquí, que los buenos absorbentes de la radiación son buenos emisores de la misma. A un absorbente o emisor ideal de la radiación se le llama *cuerpo negro*. La física que se conocía hasta el año 1900 había logrado explicar ciertos aspectos relacionados con la radiación térmica.

En 1879 Josef Stefan había observado que la intensidad de la radiación es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura. Años mas tarde Ludwig Boltzmann puso esta observación sobre una sólida base teórica y hoy se conoce como la *Ley de Stefan-Boltzmann* la cual establece que:

$$\mathfrak{R} = \sigma T^4 \quad (2.1)$$

Donde

\mathfrak{R} : es la radiación térmica emitida por un objeto a una temperatura T .

σ : es la constante de Stefan-Boltzmann y es igual a $(5,670400 \pm 0,000040) \times 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}$.

T : es la temperatura del objeto en consideración medida en kelvin.

Los trabajos de Stefan, Boltzmann y Wien, entre otros, sirvieron como base para que Lord Raileigh y Sir James Jeans, llegaran a una fórmula desarrollada en términos de la física clásica para la radiación de cuerpo negro, la cual estuvo de acuerdo con los resultados experimentales sólo parcialmente. La discrepancia fué resuelta poco tiempo después por Max Planck en términos de una nueva concepción de la energía asociada al campo electromagnético, lo que dió origen a la física cuántica.

En condiciones normales de laboratorio, un experimento para comprobar esta ley, debe considerar si la temperatura ambiente dentro del laboratorio afecta o no los resultados. Si se consideran temperaturas del objeto T por encima de 1000 grados Kelvin, la cuarta potencia de la temperatura ambiente es despreciable comparada con la cuarta potencia de la temperatura del objeto. Pero si se consideran temperaturas menores a 370 grados Kelvin, deberá incluirse dentro del procedimiento la



Figura 2.1: Sensor de Radiación PASCO TD-8553

medición de la temperatura ambiente la cual ya no podrá ser despreciada.

En este experimento se utiliza un sensor (Figura 7.1) que consiste en una pequeña termopila la cual produce una diferencia de potencial que es proporcional a la intensidad de la radiación. La respuesta espectral de la termopila es esencialmente plana en la región infrarroja y el rango de voltajes producidos van desde el orden de los microvoltios hasta el orden de los 100 milivoltios. Es necesario utilizar un voltímetro con una buena resolución para realizar las mediciones.

Otro de los elementos utilizados para esta experiencia de laboratorio es el cubo de radiación térmica (Figura 7.2), el cual provee cuatro superficies diferentes de radiación que pueden ser calentadas hasta una temperatura de 120 grados Celcius. El cubo es calentado por un bombillo de 100 W. Una vez conectado a la red (115 o 200 VAC), se coloca el interruptor en "ON" con lo cual le llega corriente al bombillo y la perilla de potencia que se encuentra al lado derecho al interruptor, se gira de "low" a "high" para aumentar temperatura en el interior del cubo.

La temperatura se obtiene midiendo con un óhmetro los cambios de resistencia en un termistor que se encuentra en uno de los costados en la parte inferior del cubo. Los datos de resistencia se convierten a temperatura utilizando la tabla de conversión suministrada por el fabricante la cual se anexa al final de esta guía (Ver tabla 2.4).

Si el detector en el sensor de radiación fuera operado al cero absoluto de temperatura, él podría producir un voltaje directamente proporcional a la intensidad de



Figura 2.2: Cubo de radiación térmica PASCO TD-8554A

radiación que incide en él.

Sin embargo el detector no está al cero absoluto de temperatura, por tanto, él es también un radiador de energía térmica. De acuerdo a la ley de Stefan-Boltzmann, él irradia a una tasa:

$$\mathfrak{R}_{detector} = sT_{detector}^4$$

El voltaje producido por el sensor es proporcional a la radiación incidente sobre él menos la radiación que sale de él. Matemáticamente, el voltaje del sensor es proporcional a:

$$\mathfrak{R}_{neto} = \mathfrak{R}_{rad} - \mathfrak{R}_{det} = s(T^4 - T_{det}^4)$$

Siempre que usted cubra cuidadosamente el sensor de radiación de la radiación del cubo mientras no se estén haciendo las medidas, T_{det} será muy cercana a la temperatura ambiente T_{rm} .

El otro elemento importante para la realización de esta práctica es la lámpara de Stefan-Boltzmann (Figura 7.3), la cual consiste en una fuente de radiación térmica a altas temperaturas. La lámpara puede ser utilizada para investigaciones a altas temperaturas de la ley de Stefan-Boltzmann. Las altas temperaturas simplifican el análisis porque la cuarta potencia de la temperatura ambiente es despreciablemente pequeña comparada con la cuarta potencia de la alta temperatura del filamento de la lámpara. Cuando está apropiadamente orientado, el filamento también provee una buena aproximación a una fuente puntual de radiación térmica. Él, por esta razón, trabaja bien para investigaciones dentro de la ley del inverso del cuadrado.



Figura 2.3: Lámpara de Stefan-Boltzmann TD-8555

Ajustando la corriente y el voltaje del filamento (13 V max, 2 A min, 3 A max), se pueden obtener temperaturas de hasta 3 000 grados Celsius. La temperatura del filamento se obtiene a través de mediciones de diferencia de potencial y corriente dentro de la lámpara. La diferencia de potencial dividida por la corriente da la resistencia del filamento y ésta se utiliza en conjunto con la tabla 2.5 para el cálculo de la temperatura.

2.5 Procedimiento

NOTA: Cuando use el sensor de radiación, siempre protéjalo de objetos calientes excepto por los pocos segundos que realmente toma hacer las medidas. Esto previene el calentamiento de la termopila lo cual cambiará la temperatura de referencia y alterará la lectura.

2.5.1 Ley de Stefan-Boltzmann a altas temperaturas

IMPORTANTE: El voltaje en la lámpara no puede exceder los trece voltios. Realice cada lectura rápidamente. Entre lecturas, coloque un protector reflector de calor entre la lámpara y el sensor, de tal modo que la temperatura del sensor esté relativamente constante (Bloque de icopor).

1. Mida la temperatura en el laboratorio T_{ref} en kelvin ($K = C + 273$). Asuma una resistencia de $(0,3 \pm 0,1)\Omega$ para una temperatura cercana a 295 K.

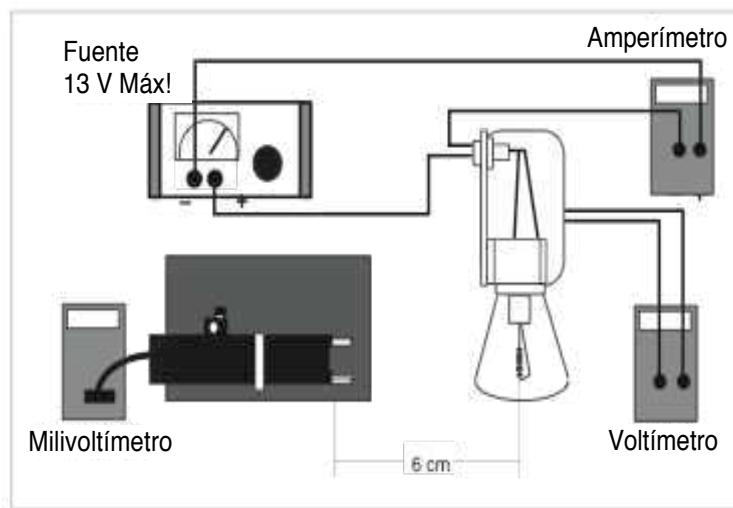


Figura 2.4: Montaje experimental para comprobar la ley de Stefan-Boltzmann a altas temperaturas

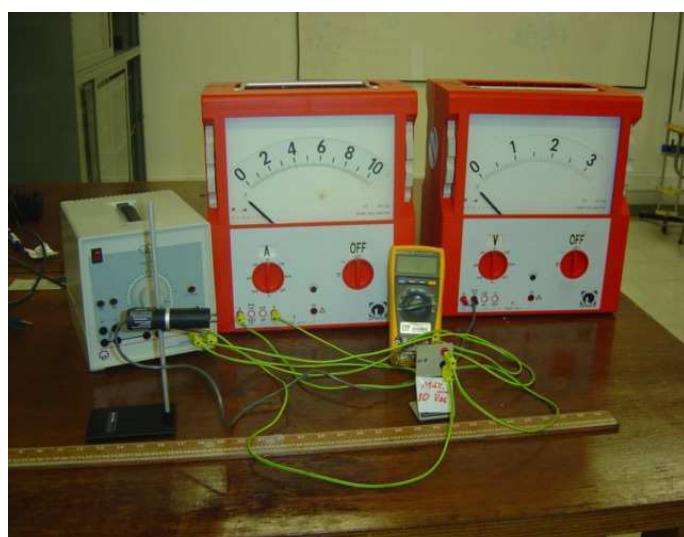


Figura 2.5: Montaje Experimental

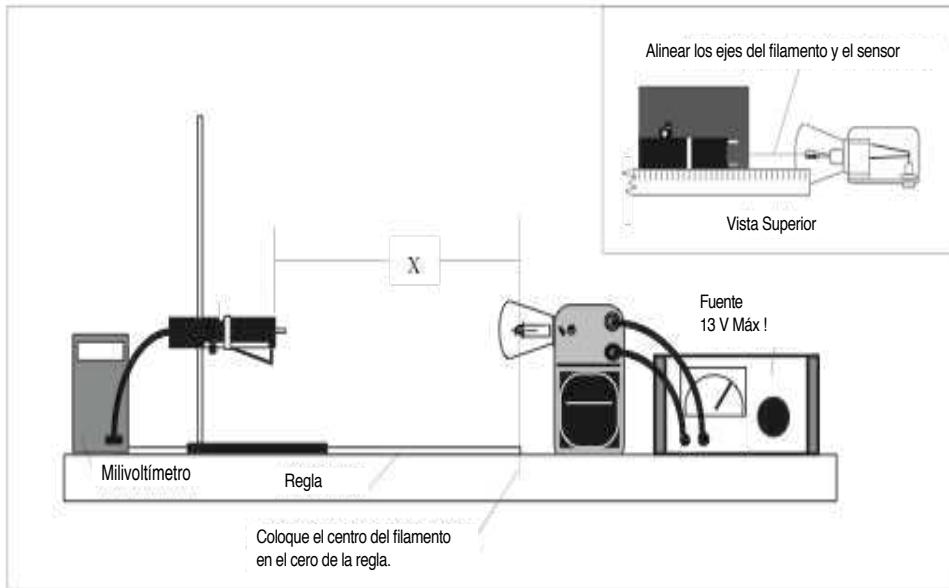


Figura 2.6: Montaje experimental para comprobar la ley del cuadrado inverso.

2. Monte el equipo como indica en la Figura 7.4. El voltímetro debe estar conectado directamente a la lámpara. El sensor debe estar a la misma altura del filamento, con la cara frontal del sensor aproximadamente a 6 cm del filamento. El ángulo de entrada a la termopila no debe incluir otros objetos cercanos diferentes a la lámpara.
3. Encienda la fuente de voltaje. Para cada voltaje de la tabla 7.1, anote el valor de la corriente I leída en el amperímetro, y el valor de la radiación \mathcal{R} leído en el voltímetro.

2.5.2 Ley del cuadrado inverso

IMPORTANTE: Haga cada lectura del sensor rápidamente. Entre lecturas, coloque las dos láminas bloqueadoras de la radiación entre la lámpara y el sensor, con la superficie plateada frente a la lámpara, de tal manera que la temperatura del sensor permanezca relativamente constante.

1. Monte el equipo como se muestra en la Figura 7.5.

- Adhiera la cinta métrica en la mesa.

Datos			Cálculos		
V (Voltios)	I (Amperios)	Rad (mV)	R (Ohmios)	T (°K)	T ⁴ (°K ⁴)
1.00					
2.00					
3.00					
4.00					
5.00					
6.00					
7.00					
8.00					
9.00					
10.00					
11.00					
12.00					

Tabla 2.1: Tabla de datos para comprobar la ley de Stefan-Boltzmann

- Coloque la lámpara de Stefan-Boltzmann en uno de los extremos de la cinta métrica como se muestra. El cero de la cinta métrica debe alinearse con el centro del filamento de la lámpara.
 - Ajuste la altura del sensor de radiacion tal que esté en el mismo plano del filamento de la lámpara de Stefan-Boltzmann.
 - Oriente la lámpara y el sensor de tal modo que, al deslizar el sensor a lo largo de la cinta métrica, el eje de la lámpara se alinee tan cerca como sea posible con el eje del sensor.
 - Conecte el sensor al voltímetro y la lámpara a la fuente de voltaje como se muestra en la Figura 7.5.
2. Con la lámpara apagada, deslice el sensor a lo largo de la cinta métrica. Anote las lecturas del milivoltímetro a intervalos de 10 cm. Promedie estos valores para determinar el nivel ambiental de radiación térmica. Usted necesitará sustraer este valor promedio ambiental de sus mediciones con la lámpara encendida, para poder determinar la contribución de la lámpara sola.
 3. Accione el control de la fuente de voltaje para encender la lámpara. Coloque una diferencia de potencial de aproximadamente 10 V.
 4. Ajuste la distancia entre el sensor y la lámpara para cada una de las posiciones de la tabla 7.2. Anote la lectura en el milivoltímetro para cada posición.

2.5.3 Introducción a la radiación térmica

1. Conecte el óhmetro y el voltímetro (utilice la escala de mV) como se muestra en la Figura 7.6.
2. Lleve el interruptor del cubo de radiación a "ON" y lleve la perilla que controla la potencia del bombillo a la posición "HIGH". Mantenga la vista en la lectura del óhmetro. Cuando ella haya bajado hasta alrededor de 40 $k\Omega$, ponga la perilla en 5.0.
3. Cuando el cubo encuentre el equilibrio térmico (Consulte esta parte con su profesor), la lectura del óhmetro fluctuará alrededor de un relativo valor fijo. Use el sensor de radiación para medir la radiación emitida por cada una de las cuatro superficies del cubo. Coloque el sensor tal que los terminales estén en contacto con la superficie del cubo (esto asegura que la distancia de las mediciones es la misma para todas las superficies). Anote sus medidas en tabla 7.3. Use la información suministrada al final de la guía (ver Tabla 2.4) para determinar la temperatura correspondiente .

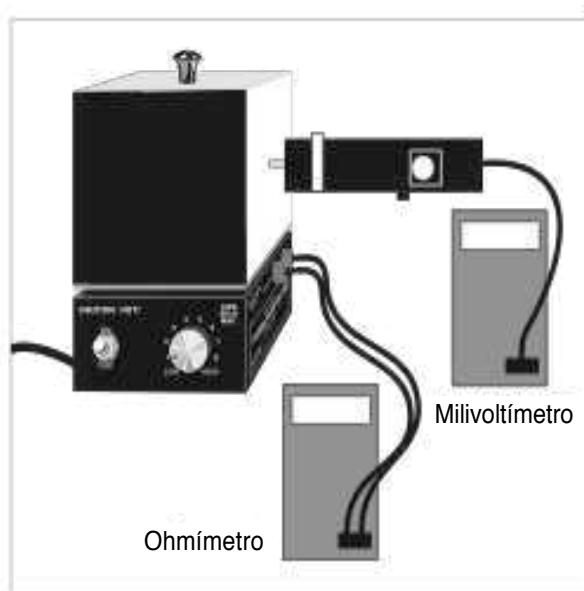


Figura 2.7: Montaje experimental para la introducción a la radiación térmica.

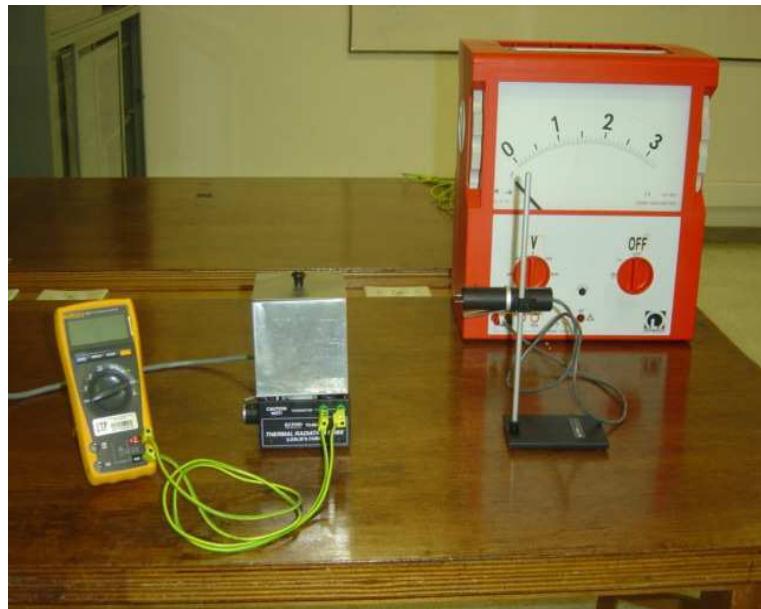


Figura 2.8: Montaje experimental para la introducción a la radiación térmica.

X (cm)	Nivel de radiación ambiental (mV)	X (cm)	Rad (mV)	$1/X^2$ (cm ⁻²)	Rad - Ambient (mV)
10		2.5			
20		3.0			
30		3.5			
40		4.0			
50		4.5			
60		5.0			
70		6.0			
80		7.0			
90		8.0			
100		9.0			
Nivel de radiación ambiental promedio:		10.0			
Nivel de Radiación Ambiental		12.0			
		14.0			
		16.0			
		18.0			
		20.0			
		25.0			
		30.0			
		35.0			
		40.0			
		45.0			
		50.0			
		60.0			
		70.0			
		80.0			
		90.0			
		100.0			
Radiación vs Distancia					

Tabla 2.2:

4. Lleve la perilla de potencia, primero a 6,5, luego a 8,0 y luego a "high". Para cada uno de los valores anteriores espere que el cubo alcance el equilibrio térmico, luego repita las medidas del paso anterior y anote sus resultados en la tabla 7.3.
5. Coloque el sensor aproximadamente a 5 cm de la superficie negra del cubo de radiación térmica y anote la lectura. Coloque una ventana de vidrio entre la superficie y el sensor. ¿Es la ventana de vidrio un efectivo bloqueador de la radición térmica?.
6. Remueva la tapa del cubo de radiación y repita las medidas del paso anterior, ubicando el sensor directamente encima del bombillo. Repita con otros materiales.
7. Apague el cubo de radiación y desconéctelo.

2.6 Análisis

2.6.1 Ley de Stefan-Boltzmann a altas temperaturas

1. Calcule R_T , la resistencia del filamento a cada uno de los voltajes usados ($R = V/I$). Entre sus resultados en la tabla 7.1.
2. Divida R_T por R_{ref} , para obtener la resistencia relativa (R_T/R_{ref}).
3. Utilizando los valores de resistividad relativa del filamento a temperatura T, use la tabla que se suministra al final de la guía para determinar la temperatura del filamento (Tabla 7.4). Entre los resultados en la tabla.
4. Calcule el valor T^4 para cada valor de T y registre sus resultados en la tabla.
5. Construya una gráfica de radiación \mathfrak{R} en función de T^4 .
6. ¿Cuál es la relación entre \mathfrak{R} y T^4 ? ¿Se verifica la ley de Stefan Boltzmann a altas temperaturas?.
7. La ley de Stefan-Boltzmann es perfectamente cierta únicamente para la radiación de un cuerpo negro ideal. ¿Es el filamento de la lámpara un verdadero cuerpo negro?.

VARIACIONES DE RADIACIÓN PROVENIENTES DE DIFERENTES SUPERFICIES					
DATOS Y CÁLCULOS					
DIAL DE POTENCIA : 5,0	DIAL DE POTENCIA : 6,5	DIAL DE POTENCIA : 8,0	DIAL DE POTENCIA : 10,0		
Resistencia Térmica _____ Ohm	Resistencia Térmica _____ Ohm	Resistencia Térmica _____ Ohm	Resistencia Térmica _____ Ohm		
Temperatura _____ °C	Temperatura _____ °C	Temperatura _____ °C	Temperatura _____ °C		
SUPERFICIE	LECTURA DEL SENSOR (mV)	LECTURA DEL SENSOR (mV)	LECTURA DEL SENSOR (mV)	LECTURA DEL SENSOR (mV)	
NEGRA	NEGRA	NEGRA	NEGRA	NEGRA	
BLANCA	BLANCA	BLANCA	BLANCA	BLANCA	
ALUMINIO PULIDO	ALUMINIO PULIDO	ALUMINIO PULIDO	ALUMINIO PULIDO	ALUMINIO PULIDO	
ALUMINIO OPACO	ALUMINIO OPACO	ALUMINIO OPACO	ALUMINIO OPACO	ALUMINIO OPACO	

Tabla 2.3:

2.6.2 Ley del cuadrado inverso

1. Construya una gráfica de nivel de radiación \mathfrak{R} en función de la distancia, usando los datos de la tabla 7.2.
2. Si su gráfica en el punto anterior no es lineal, construya una gráfica de nivel de radiación en función de $1/X^2$, usando los datos de las columnas tres y cuatro de la tabla 7.2.
3. ¿ Cuál de las dos gráficas anteriores es más lineal?. ¿ Es lineal sobre todo el rango de mediciones?.
4. La ley del inverso del cuadrado establece que la energía radiante por unidad de área emitida por una fuente puntual de radiación disminuye con el cuadrado de la distancia de la fuente al punto de detección. ¿ Sus datos verifican esta ley ?.
5. ¿ Es la lámpara de Stefan-Boltzman verdaderamente una fuente puntual de radiación?. Si no, ¿ cómo puede afectar esto sus resultados?. ¿ Se nota este efecto en los resultados que usted tomó?.

2.6.3 Introducción a la radiación térmica

1. Utilice la tabla 7.5 para hacer la equivalencia entre resistencia y temperatura.
2. Ordene las superficies del cubo de radiación de acuerdo a la cantidad de radiación emitida. ¿ Es el orden independiente de la temperatura ?.
3. ¿ Es una regla general que buenos absorbentes de la radiación son también buenos emisores?. ¿ Son sus mediciones consistentes con esta regla?. Explique.
4. ¿ Diferentes objetos, a aproximadamente la misma temperatura, emiten diferentes cantidades de radiación ?.
5. ¿ Puede usted encontrar materiales en el laboratorio que bloquen la radiación térmica?. ¿ Puede usted encontrar materiales que no bloquen la radiación térmica?. (Por ejemplo, ¿ sus ropas efectivamente bloquean la radiación térmica emitida por su cuerpo?).
6. ¿ Qué sugieren sus resultados acerca del fenómeno de pérdida de calor a través de las ventanas?.
7. ¿ Qué sugieren sus resultados acerca del efecto invernadero ?.

2.6. ANÁLISIS

29

Resistencia vs Temperatura para el cubo de radiación térmica.

Therm. Res. (Ω)	Temp. (°C)										
207,850	10	66,356	34	24,415	58	10,110	82	4,615.1	106	2,281.0	130
197,560	11	63,480	35	23,483	59	9,767.2	83	4,475.0	107	2,218.3	131
187,840	12	60,743	36	22,590	60	9,437.7	84	4,339.7	108	2,157.6	132
178,650	13	58,138	37	21,736	61	9,120.8	85	4,209.1	109	2,098.7	133
169,950	14	55,658	38	20,919	62	8,816.0	86	4,082.9	110	2,041.7	134
161,730	15	53,297	39	20,136	63	8,522.7	87	3,961.1	111	1,986.4	135
153,950	16	51,048	40	19,386	64	8,240.6	88	3,843.4	112	1,932.8	136
146,580	17	48,905	41	18,668	65	7,969.1	89	3,729.7	113	1,880.9	137
139,610	18	46,863	42	17,980	66	7,707.7	90	3,619.8	114	1,830.5	138
133,000	19	44,917	43	17,321	67	7,456.2	91	3,513.6	115	1,781.7	139
126,740	20	43,062	44	16,689	68	7,214.0	92	3,411.0	116	1,734.3	140
120,810	21	41,292	45	16,083	69	6,980.6	93	3,311.8	117	1,688.4	141
115,190	22	39,605	46	15,502	70	6,755.9	94	3,215.8	118	1,643.9	142
109,850	23	37,995	47	14,945	71	6,539.4	95	3,123.0	119	1,600.6	143
104,800	24	36,458	48	14,410	72	6,330.8	96	3,033.3	120	1,558.7	144
100,000	25	34,991	49	13,897	73	6,129.8	97	2,946.5	121	1,518.0	145
95,447	26	33,591	50	13,405	74	5,936.1	98	2,862.5	122	1,478.6	146
91,126	27	32,253	51	12,932	75	5,749.3	99	2,781.3	123	1,440.2	147
87,022	28	30,976	52	12,479	76	5,569.3	100	2,702.7	124	1,403.0	148
83,124	29	29,756	53	12,043	77	5,395.6	101	2,626.6	125	1,366.9	149
79,422	30	28,590	54	11,625	78	5,228.1	102	2,553.0	126	1,331.9	150
75,903	31	27,475	55	11,223	79	5,066.6	103	2,481.7	127		
72,560	32	26,409	56	10,837	80	4,910.7	104	2,412.6	128		
69,380	33	25,390	57	10,467	81	4,760.3	105	2,345.8	129		

Tabla 2.4: Resistencia en función de la temperatura para el cubo térmico.

Temperatura vs Resistividad para el Tungsteno

R/R _{300K}	Temp °K	Resistivity $\mu\Omega \text{ cm}$	R/R _{300K}	Temp °K	Resistivity $\mu\Omega \text{ cm}$	R/R _{300K}	Temp °K	Resistivity $\mu\Omega \text{ cm}$	R/R _{300K}	Temp °K	Resistivity $\mu\Omega \text{ cm}$
1.0	300	5.65	5.48	1200	30.98	10.63	2100	60.06	16.29	3000	92.04
1.43	400	8.06	6.03	1300	34.08	11.24	2200	63.48	16.95	3100	95.76
1.87	500	10.56	6.58	1400	37.19	11.84	2300	66.91	17.62	3200	99.54
2.34	600	13.23	7.14	1500	40.36	12.46	2400	70.39	18.28	3300	103.3
2.85	700	16.09	7.71	1600	43.55	13.08	2500	73.91	18.97	3400	107.2
3.36	800	19.00	8.28	1700	46.78	13.72	2600	77.49	19.66	3500	111.1
3.88	900	21.94	8.86	1800	50.05	14.34	2700	81.04	26.35	3600	115.0
4.41	1000	24.93	9.44	1900	53.35	14.99	2800	84.70			
4.95	1100	27.94	10.03	2000	56.67	15.63	2900	88.33			

Tabla 2.5:

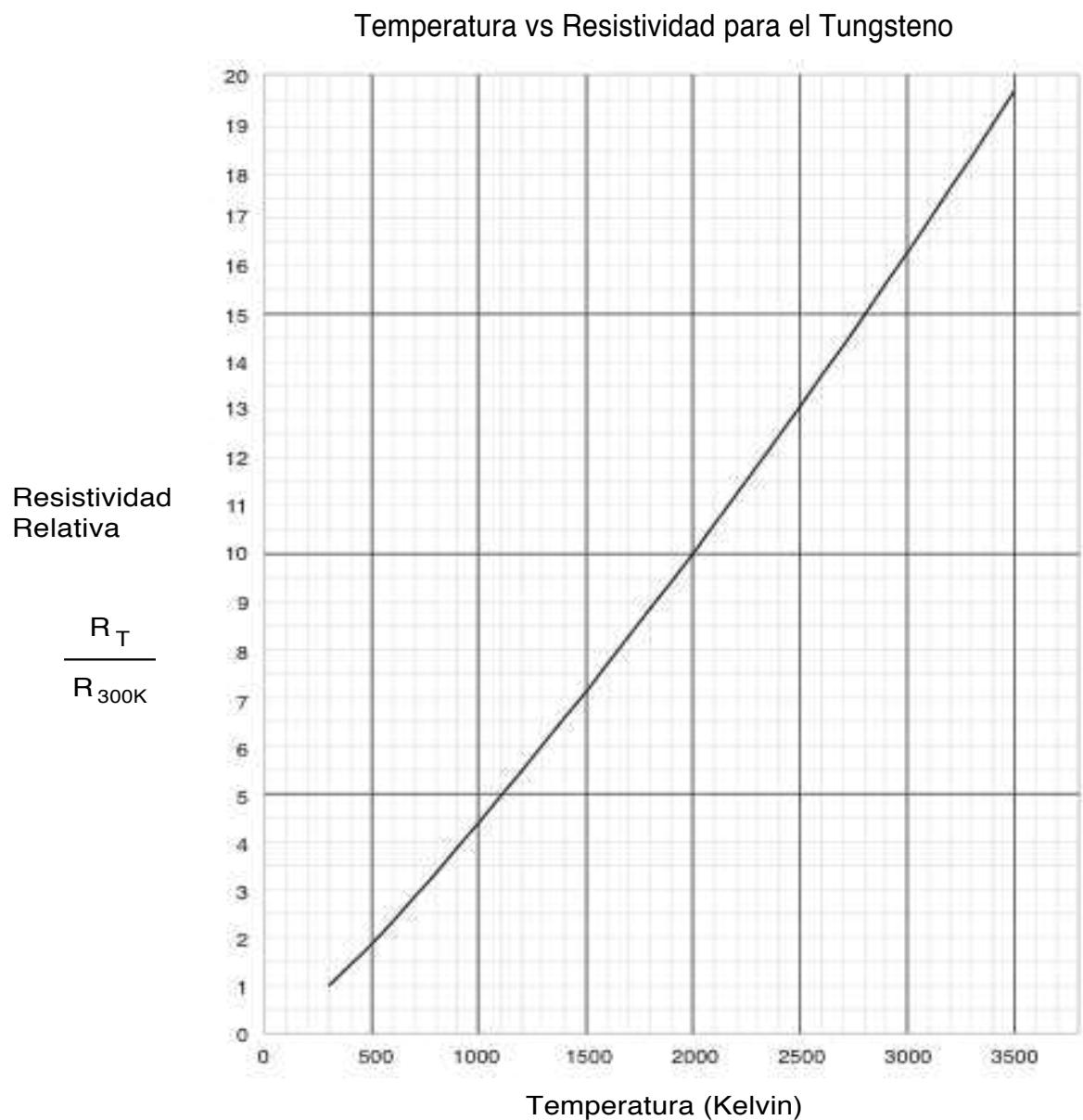


Figura 2.9: Resistencia del Tungsteno en función de la temperatura, obtenida de la tabla 7.5.

Relación carga/masa del electrón

Objetivos

Determinar experimentalmente la relación e/m del electrón.

Introducción

En 1880 J. J. Thomson ganó una posición en el Trinity College de la Universidad de Cambridge para trabajar en el laboratorio Cavendish. En 1884 fue designado director del laboratorio ocupando el mismo lugar que había tenido antes James Clark Maxwell y John William Strutt. Durante su estancia en el laboratorio, Thomson se dedicó a estudiar la naturaleza de los rayos catódicos.

En 1887, J. J. Thomson demostró que los rayos catódicos eran en realidad partículas cargadas negativamente, descubriendo así el electrón. En el mismo año obtuvo experimentalmente la carga específica (e/m) de las partículas de los rayos catódicos, $e/m = 1.7 \times 10^{11} \text{ C/kg}$.

Thomson descubrió que el valor de la relación e/m no dependía del gas utilizado y de la naturaleza de los electrodos. Por lo que, si se conoce experimentalmente el valor de la carga eléctrica del electrón, se puede conocer la masa del electrón, y viceversa.

Principio del experimento

En el tubo e/m los electrones se mueven sobre una trayectoria circular que se encuentra en un campo magnético constante como se muestra en la figura 1. En el interior del tubo se encuentra confinado gas Helio a cierta presión, debido a que la colisión de los electrones puede ionizar a los átomos de gas, logrando así que se emitan fotones y pueda ser visible la trayectoria del haz de electrones.

Dado que se puede medir el radio de la trayectoria circular, el voltaje aplicado al cañón de electrones, la corriente y el campo magnético producido por las bobinas de Helmholtz, es posible calcular la carga específica e/m de un electrón.

Un electrón que se mueve circularmente con una velocidad tangencial v a través de un campo magnético perpendicular B , experimenta una fuerza de magnética

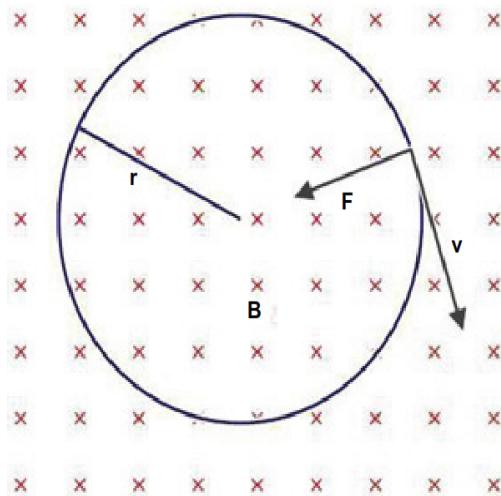


Figura 1. Trayectoria que sigue el electrón, debido a la dirección del campo magnético, la fuerza de Lorentz y la dirección de la velocidad.

perpendicular al campo magnético y al vector de la velocidad tangencial. De forma escalar, la fuerza magnética que siente el electrón se expresa como:

$$F_M = evB \quad (1)$$

donde e es la carga del electrón.

Dado que el movimiento del electrón es circular, también se experimenta una fuerza centrípeta dada por:

$$F_C = \frac{mv^2}{r} \quad (2)$$

donde m es la masa del electrón, r es el radio del movimiento circular y v es la velocidad tangencial del electrón. Debido a que ambas fuerzas actúan sobre el electrón y se encuentran en equilibrio, se puede igualar la ecuación (1) y (2):

$$evB = \frac{mv^2}{r} \quad (3)$$

despejando para la carga específica del electrón se obtiene:

$$\frac{e}{m} = \frac{v}{Br} \quad (4)$$

Por otro lado, debido a que los electrones son acelerados por un potencial V , estos adquieren energía cinética, la cual se expresa como:

$$eV = \frac{mv^2}{2} \quad (5)$$

donde e es la carga del electrón, V es el potencial aplicado para acelerar los electrones, m es la masa del electrón y v es la velocidad tangencial del electrón. Si se despeja v de la ecuación (5), se obtiene:

$$v = \left(\frac{2eV}{m} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

Sustituyendo la ecuación (6) en la ecuación (4), se obtiene:

$$\frac{e}{m} = \frac{1}{Br} \left(\frac{2eV}{m} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

Dado que ambos lados de la ecuación (7), se tiene la razón e/m , se realiza una serie de pasos algebraicos para llegar a la siguiente ecuación:

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

Además, el campo magnético generado por las dos bobinas de Helmholtz está dado por:

$$B = \frac{N\mu_0 i}{a \left(\frac{5}{4} \right)^{\frac{3}{2}}} \quad (9)$$

Sustituyendo la ecuación (9) en la ecuación (8), se obtiene:

$$\frac{e}{m} = \left(\frac{5}{4} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{2Va^2}{(N\mu_0 ir)^2} \quad (10)$$

donde

V : es el potencial eléctrico. [Volt]

a : es el radio de las bobinas de Helmholtz. ($a = 0.158\text{m}$)

N : Número de vueltas de cada bobina de Helmholtz. ($N = 130$)

μ_0 : Permeabilidad magnética del vacío. ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ T}\cdot\text{m/A}$)

i : Corriente eléctrica que pasa por el conductor de las bobinas. [A]

r : Radio de la trayectoria del haz de electrones. [m]

Descripción de las partes del aparato e/m

Tubo e/m.

La base del tubo e/m se puede girar permitiendo orientar el haz de electrones en un ángulo de 0 a 90 grados, con respecto al campo magnético de las bobinas de Helmholtz. Por tanto, el tubo también permite examinar la relación entre la fuerza magnética y las partículas

cargadas en movimiento. El tubo e/m está lleno de gas helio a una presión de 10^{-2} mm Hg, para que los electrones al colisionar con los átomos de gas, estos se exciten y emitan fotones.

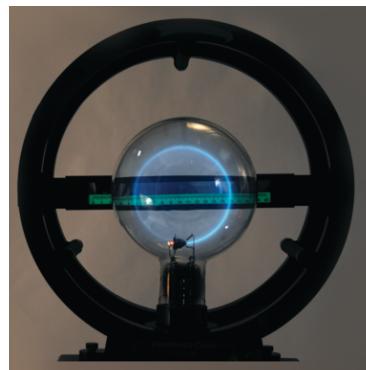


Figura 2. Ejemplo de haz de electrones que se observa en el tubo e/m .

Dentro del tubo e/m se encuentra un arreglo de partes metálicas denominado cañón de electrones, como se observa en la figura 3. El filamento tiene la función de calentar el cátodo para emitir electrones (proceso conocido como efecto termoiónico), los cuales a su vez son acelerados por la aplicación de un potencial eléctrico entre el cátodo y el ánodo. Con el fin de poder enfocar al haz de electrones se coloca una pequeña rejilla, la cual se mantiene positiva con respecto al cátodo y negativa con respecto al ánodo.

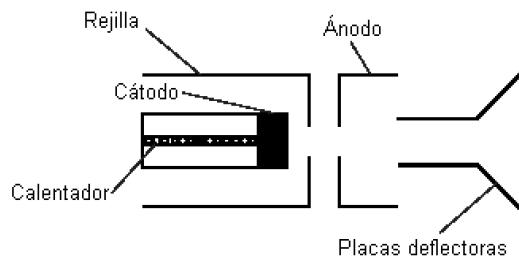


Figura 3. Partes que conforman al cañón de electrones.

PRECAUCIÓN: El voltaje del calentador del cañón de electrones nunca debe exceder 6.3 voltios. Voltajes mayores quemaran el filamento y destruirán el tubo e/m.

Bobinas de Helmholtz.

Las dos bobinas de Helmholtz tienen la función de proporcionar el campo magnético que, debido a su geometría, suministran un campo magnético uniforme en la región central del tubo e/m . El radio de las bobinas es igual a la separación entre ellas, que es de 15.8 cm. Cada bobina tiene 130 vueltas. El campo magnético B producido por una bobina es proporcional a la corriente a través de la bobina.



Figura 4. Se muestra el arreglo de la bobina de Helmholtz.

Material

- 1 Aparato *e/m*.
- 1 Fuente de potencia eléctrica de alto voltaje 0-500V, 0-50 mA (SF-9585A).
- 1 Fuente de potencia eléctrica de bajo voltaje 0-24 VCD, 0-10 A (SF-9585A).
- 1 Fuente de potencia eléctrica 6.3 VCA, 2A (SF-9586).
- 2 multímetros.
- 10 Cables banana-banana.

Procedimiento

1. Con ayuda del profesor o del técnico del laboratorio, realice las conexiones en el panel de control tal y como se muestra en la figura 5, aún no encienda los equipos ya que se pueden dañar. Luego asegúrese que las perillas de los equipos estén en cero.

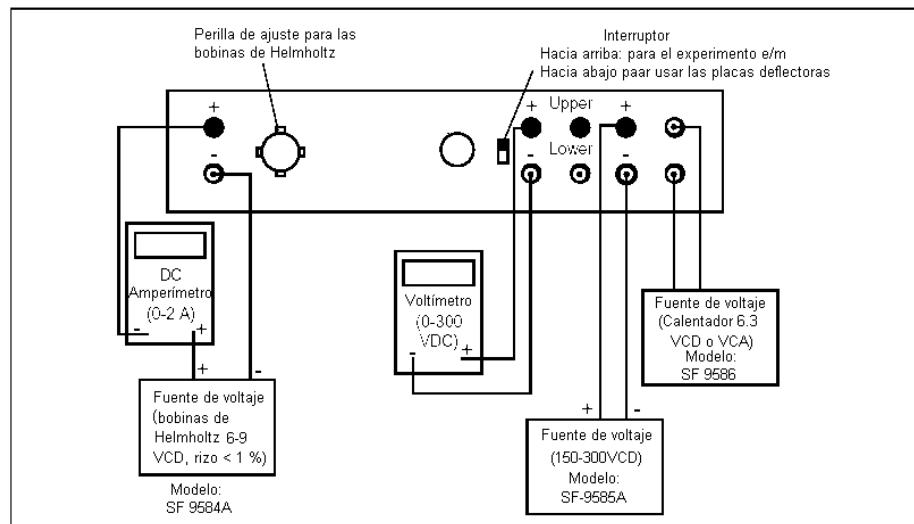


Figura 5. Se muestran las conexiones para el aparato *e/m*.

2. Coloque el interruptor en la posición “Measurement e/m”.
3. Gire la perilla de ajuste de corriente (para las bobinas de Helmholtz) a la posición “OFF”.
4. Verifique nuevamente que las conexiones que realizó en las fuentes de voltaje y en los multímetros sean las correctas, no olvide que las perillas de las fuentes de voltaje deben estar en cero.
5. Encienda la fuente de potencia eléctrica de 6.3 VAC (SF-9586) y no mueva ninguna de las perillas de voltaje. No olvide que los cables banana-banana se conectan a la entrada de 6.3 VAC (conectores de color amarillo). Al cabo de unos segundos el filamento estará al rojo vivo.
6. Encienda la fuente de alto voltaje 0-500 VCD (SF-9585A) y gradualmente con la perilla aumente el voltaje hasta alcanzar los 250 V. Conforme aumente dicho potencial eléctrico empezará a observarse la trayectoria horizontal del haz de electrones dentro del tubo e/m .
7. Gire la perilla de ajuste de la corriente de las bobinas de Helmholtz, hasta que la marca blanca de la perilla llegue a la mitad de la escala total que tiene la perilla, como se observa en la figura 6.
8. Encienda la fuente de bajo voltaje 0-24 VCD (SF-9584A), recuerde que las perillas de la fuente deben estar inicialmente en cero antes de encender la fuente. Con la perilla de la fuente, aumente el voltaje alrededor de 6 V.
9. Para poder desviar el haz de electrones gire lentamente la perilla de ajuste de corriente de la fuente de bajo voltaje y con el multímetro verifique que la corriente no exceda los 2 Amperes. Usted verá cómo se desvía el haz de electrones gradualmente.
10. En caso de que la trayectoria del haz no forme un círculo completo, se puede variar el voltaje de la fuente de alto voltaje (sin exceder los 350 V) y la corriente eléctrica de la fuente de bajo voltaje (sin exceder los 2 A). En caso de que sea necesario, tome el tubo por la base de plástico y gírelo lentamente hasta que el círculo se forme en un solo plano.
11. Con la regla reflejante mida el radio de la trayectoria circular del haz de electrones. Para medir el radio ubique la mejor posición de observación moviendo su cabeza, así se minimizarán los errores de paralelismo. Mida el radio en ambos extremos de la regla y promedie. Se puede ajustar el diámetro de la circunferencia, ajustando la corriente y el voltaje. Una vez que haya medido el radio, registre la corriente y el voltaje que indican los multímetros. Determine la relación e/m haciendo uso de la ecuación 10.
12. Obtenga la relación e/m para diferentes radios del haz de electrones.



Figura 6. Posición en la que debe ser colocada la perilla.