



GRADO EN FÍSICA

LABORATORIO DE FÍSICA III

CURSO 2015-2016 1^{er} CUATRIMESTRE

LABORATORIO DE ÓPTICA

PRÁCTICA: Espectroscopia con prisma y con red de difracción.

1. Objetivos:

- Comparación de la resolución espectral de elementos dispersores utilizados en espectroscopia.
- Medida de la resolución espectral de un prisma.
- Medida de la resolución espectral de una red de difracción.
- Comparación de la resolución espectral de elementos dispersores utilizados en espectroscopia.

2. Fundamentos físicos:

El objetivo de un espectroscopio es la separación de la luz en sus diferentes longitudes de onda para que pueda ser analizada. Pieza fundamental de un espectroscopio será por tanto su elemento dispersor. Existen dos principios ópticos fundamentales que permiten separar las distintas longitudes de onda de la luz, por medio de la refracción y por medio de la interferencia. El primero da lugar a los espectroscopios de prisma y el segundo a los basados en redes de difracción. Existen también elementos dispersores híbridos, que suelen ser la combinación de un elemento de cada tipo. Los espectroscopios se usan a menudo en astronomía y en algunas ramas de la química.

Independientemente del diseño del espectroscopio y de su elemento dispersor, su característica fundamental es la *resolución espectral* (R). Este parámetro indica la capacidad del espectroscopio para separar dos longitudes de onda muy próximas, y viene dada por:

$$R = \frac{\lambda}{\delta\lambda} \quad (1)$$

donde λ es la longitud de onda en la que estamos trabajando y $\delta\lambda$ es la *pureza espectral* o *perfil instrumental*, que es una medida de la anchura de cada línea monocromática registrada. Este parámetro nos da idea de la capacidad para "resolver" (distinguir) líneas de longitud de onda cercana y para observar detalles en las líneas (por ejemplo si son dobletes). Si se sigue el criterio de resolución de Rayleigh, se considera que el espectroscopio separa dos líneas cuando la diferencia de longitud de onda de los máximos ($\Delta\lambda$) sea mayor o igual a la pureza espectral: $\Delta\lambda \geq \delta\lambda$. Por tanto, espectroscopios con valores R elevados resuelven líneas espectrales más próximas.

2.1 Prisma óptico

La dispersión de luz es un fenómeno que observó Newton en 1666 al hacer pasar un rayo de luz solar a través de un prisma triangular de vidrio, ver Fig. 1. En su experiencia, Newton dispersó los distintos componentes de la luz natural en lo que denominó espectro. El fundamento de la dispersión de la luz blanca radica en que las distintas radiaciones que componen la luz natural viajan en el vacío con la misma velocidad, mientras que en el vidrio lo hacen con velocidades distintas. A cada frecuencia componente de la radiación luminosa le corresponde por tanto un índice de refracción diferente, y por ello sufren distintas desviaciones. Para un prisma con dispersión normal las desviaciones mayores se producirán para las longitudes de onda menores.

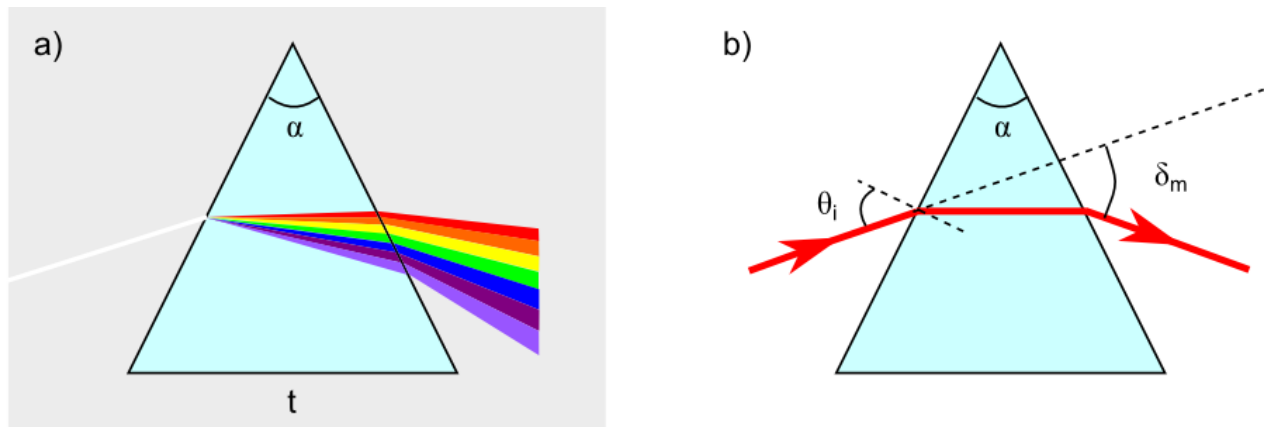


Figura 1. (a) Fenómeno de la dispersión en un prisma y (b) propagación de los rayos en incidencia en desviación mínima.

Un prisma óptico es un medio transparente limitado por dos superficies planas que forman un ángulo diedro α , llamado ángulo de refringencia. Se denomina ángulo de desviación, δ , al ángulo formado entre el haz de salida y el haz de entrada, y depende de este último y del índice de refracción del prisma. Cuando calculamos el valor mínimo, δ_m , de esta función se obtiene que el ángulo de entrada y salida respecto de las normales a las superficies deben ser idénticos, por tanto, la trayectoria debe ser simétrica como se observa en la Fig. 1. Al ser un mínimo podemos acercarnos experimentalmente a ese valor variando el ángulo de incidencia tanto desde ángulos mayores como desde ángulos menores que el de desviación mínima. Mediante este procedimiento podremos encontrar experimentalmente el ángulo de desviación mínima. El índice de refracción de un prisma se puede obtener midiendo el ángulo de desviación mínima, δ_m , y haciendo uso de esta expresión:

$$n = \frac{\sin\left(\frac{\delta_m + \alpha}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \quad (2)$$

con α el ángulo de refringencia del prisma.

Por otro lado, la variación del índice de refracción con la longitud de onda en un intervalo pequeño de longitudes de onda, dentro de la zona de dispersión normal, se puede aproximar por la fórmula de Cauchy:

$$n \cong A + \frac{B}{\lambda^2} \quad (3)$$

En esta práctica la fórmula (2) nos permitirá determinar el índice de refracción de un vidrio en función de la longitud de onda a partir de los valores medidos para los ángulos α y δ_m . La determinación experimental de $n(\lambda)$ servirá para ajustar los parámetros A y B de la fórmula (3).

Si estamos utilizando un espectroscopio con un prisma como elemento de dispersión la *resolución espectral* viene dada por [1]:

$$R = \frac{\lambda}{\delta\lambda} = t \frac{dn}{d\lambda} \quad (4)$$

con t el espesor del prisma (Fig. 1). Por tanto para conseguir más resolución hay que utilizar un vidrio más dispersivo, es decir con mayor variación del índice de refracción con la longitud de onda, un prisma más grande o una combinación de prismas.

2.2 Red de difracción

Se produce interferencia cuando al superponer dos ondas luminosas la cantidad de luz total (energía) evaluada en distintos puntos no es la suma de las cantidades de luz de cada una de las dos ondas evaluada en esos mismos puntos. Una red de difracción, en su versión más didáctica y sencilla, es una serie de rendijas practicadas en un sustrato opaco iluminadas de forma usual con un haz de rayos paralelos entre sí y perpendiculares al plano que contiene las rendijas (y coherentes para que puedan dar lugar a interferencia), ver Fig. 2.

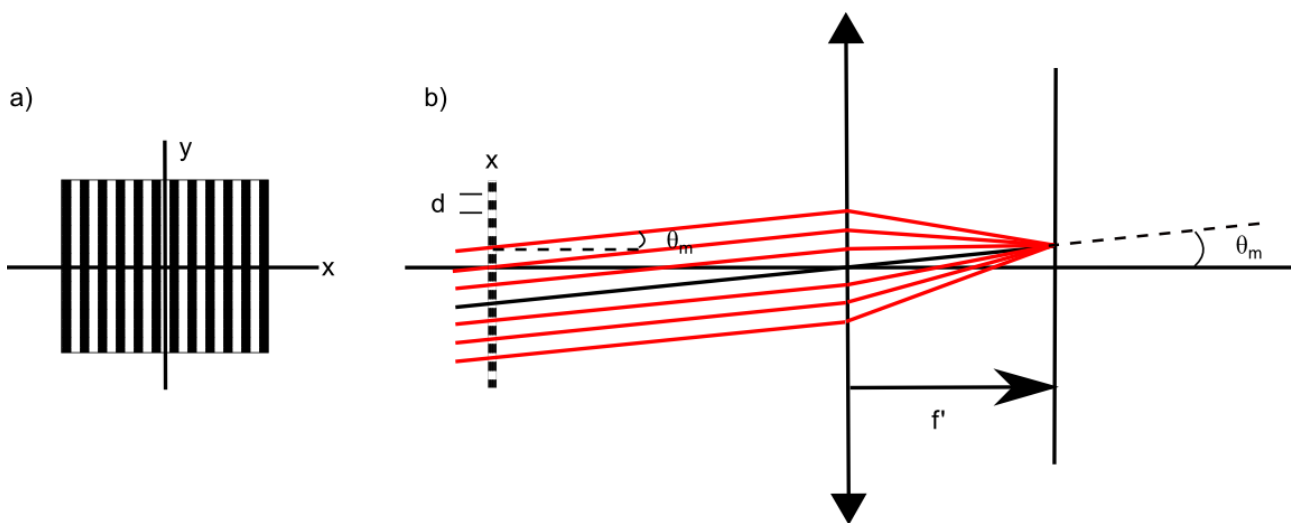


Figura 2. (a) Esquema de una red de difracción y (b) de la dirección de interferencia que produce un máximo de intensidad.

La forma de la interferencia es muy similar a la del interferómetro de Young, una serie de máximos de mayor intensidad luminosa separados por mínimos de intensidad. Si un haz de luz incide de forma normal sobre una red, para que se forme un máximo de interferencia la diferencia de camino entre dos ondas procedentes de rendijas consecutivas debe ser un número entero de longitudes de onda para que las dos ondas oscilen en fase y la suma sea constructiva en lugar de destructiva. En la Fig. 2(b) se muestra esta situación. Los máximos se formarán en aquellas direcciones, medidas respecto a la dirección de incidencia, en las que se verifique

$$d \sin \theta_m = m\lambda \quad (5)$$

donde $m = 0, \pm 1, \pm 2$ son enteros que numeran lo máximos y se denominan generalmente órdenes, d es la separación entre dos rendijas consecutivas llamado *paso o periodo de red* y λ es la longitud de onda de la luz con la que iluminamos la red. La forma más habitual de indicar el periodo de red es utilizando su inversa que nos da el número de líneas (rendijas) que contiene la red por mm. La existencia de muchas aberturas en lugar de las dos del interferómetro de Young tiene un efecto importante: hacer que los máximos sean más estrechos. Respecto a la posición de los máximos la única diferencia con el interferómetro de Young es que la aproximación de ángulos pequeños no es válida.

La ecuación (5) nos indica que si la luz incidente es policromática cada longitud de onda presentará su máximo de orden m en un ángulo diferente. De este modo se puede emplear la red de difracción para separar espacialmente las frecuencias que componen el espectro de la radiación incidente. La utilidad fundamental de una red de difracción es separar las distintas longitudes de onda que contiene un haz de luz y formar parte así de los espectroscopios modernos.

El *poder resolutivo* de una red de difracción indica la capacidad de separar longitudes de onda muy próximas entre sí. Para una red de difracción de longitud $L=dN$, con N líneas (rendijas), el poder resolutivo se obtiene de la siguiente ecuación:

$$R = \frac{\lambda}{\delta\lambda} = mN \quad (6)$$

donde m es el orden de la ecuación (5). Por tanto si d es pequeño y L grande, hace que N sea muy alto y la red será capaz de separar longitudes de onda muy próximas incluso para el primer orden.

3. Método experimental:

Para realizar las medidas angulares se usará un goniómetro que consta de colimador, plataforma y anteojo, ver Fig. 3. El colimador está formado por una rendija y una lente convergente y sirve para producir un haz plano (un haz de rayos paralelos). Para ello hay que situar la rendija en el foco objeto de la lente del colimador. Sobre la plataforma central se coloca el prisma o la red de difracción para dispersar la luz. La luz a la salida de estos elementos se examina con un anteojo (un objetivo y un ocular) que tiene asociado una escala graduada para medir las direcciones angulares del haz de salida. Si el sistema está ajustado, al mirar a través del ocular con el ojo sin acomodar debemos observar el plano focal imagen del objetivo del anteojo. Por tanto estaremos formando imagen de la rendija de antes del colimador, pero en distintas posiciones espaciales para cada longitud de onda debido a la dispersión originada por el prisma o por la red de difracción. Por ello el espectro observado se dice que está compuesto por *líneas espectrales* bien definidas, ver Fig. 4.

Antes de empezar con las medidas hay que ajustar el goniómetro, para ello siga los siguientes pasos: **1.** Ajustese el ocular (metiéndolo o sacándolo del tubo, con mucho cuidado) de modo que el retículo quede perfectamente enfocado. **2.** Enfóquese el anteojo al infinito moviendo la rueda que varía la longitud del tubo. Basta con enfocar a un objeto suficientemente lejano (~ 10 m). Cuando se ve nítido el objeto significa que el ocular observa en el plano focal imagen de su objetivo. **3.** Ahora obsérvese la rendija del colimador a través del anteojo y enfóquese su imagen moviendo la rueda del tubo colimador que varía su longitud.

Cuando se vea nítida la rendija, ésta estará en el plano focal objeto de la lente convergente del tubo colimador. Por tanto se obtiene un frente de onda plano o colimado a la salida del colimador, que es lo que se pretendía. Elíjase un tamaño adecuado de la rendija de entrada del colimador abriéndola o cerrándola con la ruedecilla que tiene acoplada. **4.** Antes de comenzar asegúrese de que sabe leer en la escala del goniómetro por lo que conviene que ensaye algunas medidas. Indíquese con qué precisión puede medir. Nótese que el goniómetro dispone de dos nonius, pero las medidas deben realizarse siempre con el mismo.

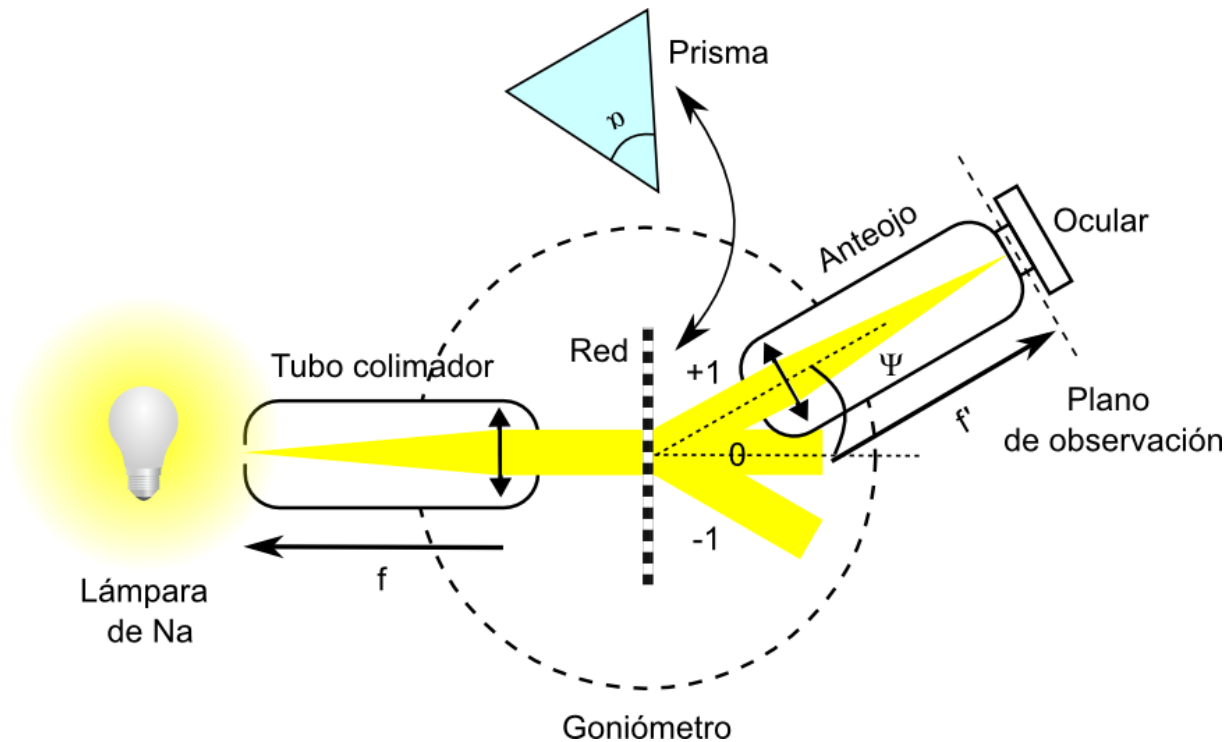


Figura 3. Esquema del montaje con el goniómetro, colimador y anteojo. El prisma o la red de difracción se sitúa en el centro de la plataforma.

3.1-Determinación del índice de refracción de un prisma como función de λ

Vamos a utilizar prismas equiláteros, cuyo α es conocido. Se medirá el ángulo de desviación mínima, δ_m , para distintas longitudes de onda. Para disponer de distintas longitudes de onda se utilizará una lámpara de Na cuyas líneas espectrales de emisión vienen dadas en la Tabla I.

Color	λ (nm)
Rojo (doblete)	616.1 – 615.4
Amarillo (doblete)	589.6 – 589.0
Verde (doblete)	568.8 – 568.3
Verde-azul	515
Verde-azul (doblete)	498.3 – 497.8

Tabla I: Longitudes de onda de las líneas espectrales de emisión de una lámpara de Na.

3.1.1 Medida del ángulo de desviación mínima

Se coloca el prisma en la plataforma central. Utilizaremos como punto de partida una de las dos posiciones del prisma representadas en la Fig. 4. Partiendo de esta posición busque la imagen refractada de la rendija del colimador. Verá algo similar a lo mostrado en la Fig. 4.

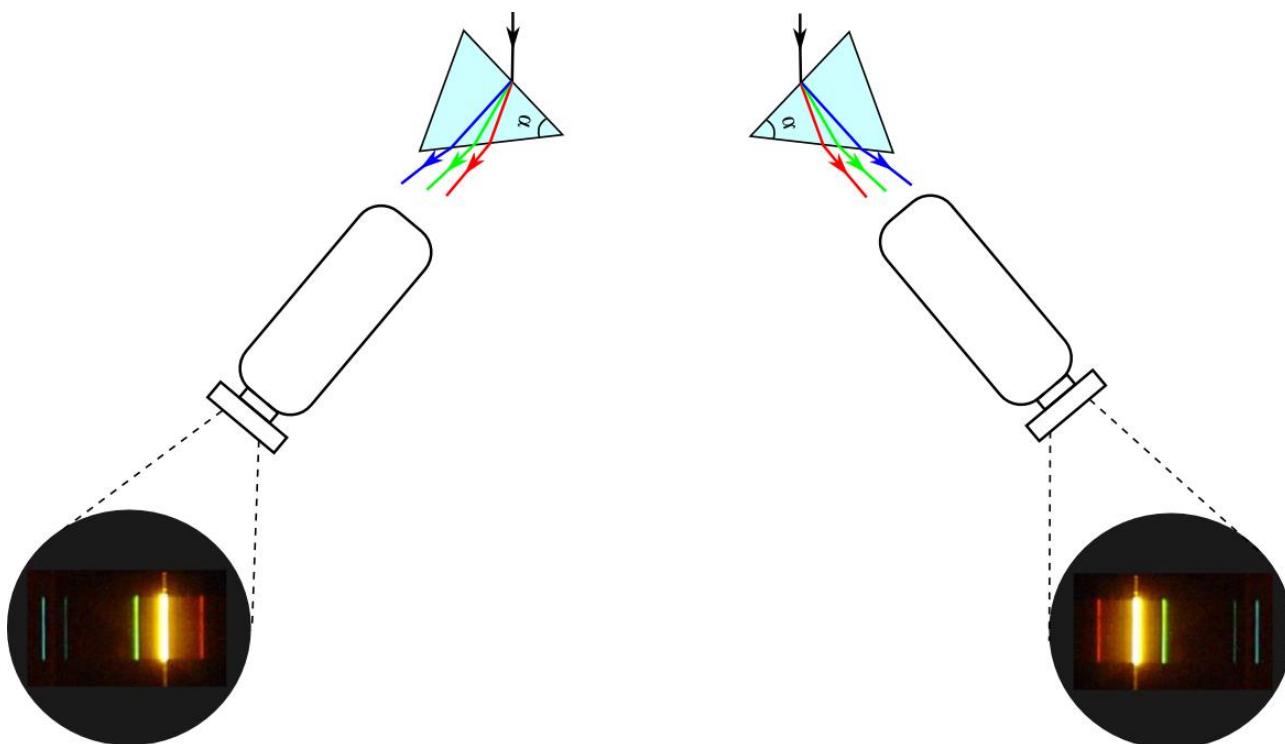


Figura 4: Espectro de emisión de la lámpara de Na del laboratorio

Varíe el ángulo de incidencia girando el prisma sobre su plataforma hasta conseguir que la desviación de las líneas espectrales observadas sea mínima. En esta situación estaremos en condición de ángulo de desviación mínima. Repita el proceso para cada longitud de onda y anote en cada caso la lectura de la posición en la escala del goniómetro (ψ_1). Coloque el prisma en la otra posición de la Fig. 4 y busque de nuevo la posición de desviación mínima para cada longitud de onda (lectura ψ_2). Con estos datos se puede obtener el ángulo de desviación mínima y el índice de refracción para cada línea espectral de la Tabla 1.

3.2-Determinación de la constante de una red de difracción

Se dispondrá el goniómetro de la misma manera que en el apartado anterior. Para simplificar la realización de esta parte es importante que la red esté colocada perpendicular al haz plano incidente. Para ello disponga el anteojo formando un ángulo recto con el colimador y gire la red de difracción hasta que la imagen reflejada de la rendija coincida con el retículo del ocular. En ese momento la normal a la red formará 45° con los ejes del colimador y del anteojo. Si giramos la red con la plataforma graduada del goniómetro 45° (la plataforma situada más arriba) el haz de luz incidirá perpendicularmente a la red y se podrá medir correctamente. La luz que se emplea es de nuevo la lámpara de Na.

Se observarán los máximos de interferencia para cada línea espectral a ambos lados del orden cero. Se anotará para cada longitud de onda la lectura en el goniómetro de los máximos observados. Con estos datos se calculará la constante de la red utilizando la ecuación (5).

4. Bibliografía:

- [1] R. W. Ditchburn, *Óptica* (Reverté, 1982): p.300.
(https://books.google.es/books?id=rQ8VC8_pMyQC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false)
- [2] E. Hecht y A. Zajac, *Óptica* (Addison-Wesley Iberoamericana, Wilmington, EE.UU., 1986).
- [3] J. Casas, *Óptica* (Ed. Librería General, Zaragoza, España, 1994).
- [4] M. Born y E. Wolf, *Principles of optics* (Pergamon Press, Oxford, Reino Unido, 1975).
- [5] J. Goodman, *Introduction to Fourier Optics* (The Mac Graw-Hill, New York, EE.UU., 1968).
- [6] C. Plamer, "Diffraction grating Handbook":
[http://optics.sgu.ru/~ulianov/Students/Books/Applied_Optics/E.%20Loewen%20Diffraction%20Grating%20Handbook%20\(2005\).pdf](http://optics.sgu.ru/~ulianov/Students/Books/Applied_Optics/E.%20Loewen%20Diffraction%20Grating%20Handbook%20(2005).pdf)
- [7] http://en.wikipedia.org/wiki/Diffraction_grating

Plantilla

El informe de esta práctica debe contener única y exclusivamente las respuestas solicitadas en este plantilla. En esta plantilla no debe calcular las incertidumbres de los resultados

Prisma óptico

Medida de los ángulos de desviación mínima para las líneas que aparecen en la Tabla I

- Especifique clara y brevemente cómo ha encontrado los ángulos de desviación mínima.
- Especifique clara y brevemente cómo ha realizado las medidas.
- Exponga en una tabla los resultados de todas las medidas realizadas.
- Exprese claramente el resultado final y su incertidumbre justificando cómo ha llegado a ellos.

Índice de refracción

- Con las medidas realizadas obtenga el índice de refracción y su incertidumbre, para cada longitud de onda de la Tabla I, justificando cómo ha llegado a ellos.
- Calcule los parámetros A y B de la expresión de Cauchy con sus incertidumbres justificando cómo ha llegado a ellos.

Red de difracción

Medida de la posición angular de los máximos de interferencia

- Especifique clara y brevemente el procedimiento experimental para obtener las posiciones angulares de los máximos de interferencia de las líneas que aparecen en la Tabla I.
- Realice estas medidas para los órdenes +1 y -1 y en los casos en los que sea posible mida también los órdenes +2 y -2. Exponga los resultados de todas las medidas realizadas.
- Exprese claramente el resultado final justificando cómo ha llegado a ellos.

Constante de la red, d

- Con las medidas realizadas obtenga la constante de red d y su inversa $1/d$ (expresada en líneas por mm). Justifique brevemente cómo ha llegado a ellos.

Resolución espectral

- Con los datos de que dispone calcule la resolución espectral del prisma y de la red de difracción y compare los resultados. ¿Qué longitud de onda se desvía más en cada caso?

Debe añadir aquí algo que haya observado o ideado y que no esté incluido en lo anterior

Fenómenos interesantes para curiosos

En este apartado no se evaluarán las preguntas solicitadas

- Gira el prisma sobre el goniómetro hasta que no salga luz, ¿qué sucede?
- Coge el prisma y haz pasar luz blanca en vez de la luz de la lámpara de Na. ¿Qué diferencias observa con respecto iluminación con la Lámpara de Na?
- Mira distintas fuentes de luz (fluorescente, lámpara blanca, lámpara de Na, Hg, LED) a través de la red de difracción.

5. Quiero saber más

Dispersión

Este fenómeno se observa siempre que tengamos una superficie de separación entre dos medios, incidamos fuera de la normal y con un haz con distintas longitudes de onda. El ejemplo más cercano de dispersión es el arco iris, que se produce por la refracción de la luz del sol, compuesta por todas las longitudes de onda, en las gotas de agua <http://colorinnature.wordpress.com/2011/05/22/%C2%BFcomo-se-forma-el-arco-iris-2/>

El fenómeno de la dispersión se utiliza en diversos ámbitos. Por ejemplo, se va a utilizar para obtener información acerca no sólo de las fuentes emisoras de luz sino de la materia sobre la que incide mediante espectroscopios. Para la propuesta de nuevos materiales así como la mejora de los existentes es necesaria una caracterización óptica, es decir un estudio del índice de refracción o la permitividad dieléctrica en función de la longitud de onda. El Premio Nobel de Física en 1981 fue dividido, una mitad para Nicolaas Bloembergen y Arthur Leonard Schawlow por sus contribuciones al desarrollo de la espectroscopia láser http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1981/

También Theodor Wolfgang Hänsch, físico alemán, compartió una mitad del Premio Nobel de Física en 2005 con John L. Hall, por sus contribuciones en el desarrollo de la espectroscopia basada en el láser (<http://www.scientificlib.com/en/Physics/Biographies/TheodorWHaensch.html>).

En el ámbito de la astronomía además de indicar la composición elemental de la fuente luminosa y el estado físico de la materia, el espectro revela si el cuerpo luminoso y la Tierra se acercan o se alejan entre sí, además de indicar la velocidad relativa a la que lo hacen (efecto Doppler-Fizeau) (<http://es.wikipedia.org/wiki/Espectroscopia>).

En el ámbito de las comunicaciones por fibra óptica la dispersión de la luz es un factor importante a tener en cuenta para la efectividad en la transmisión de información. El Premio Nobel de Física en 2009 fue dividido y una mitad fue para Charles Kuen Kao por sus estudios relativos a la transmisión de la luz en fibras para comunicaciones ópticas (http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2009/kao-facts.html).

Red de difracción

La primera red de difracción artificial la construyó el astrónomo americano David Rittenhouse en 1786, que consiguió una red de media pulgada con alrededor de 50 aberturas:

- "An optical problem, proposed by Mr. Hopkinson, and solved by Mr. Rittenhouse", Página 201 a 216:

http://books.google.es/books?id=OLgAAAAAYAAJ&pg=PA201&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false

- D. Rittenhouse, "Explanation of an optical deception," *Trans. Amer. Phil. Soc.* **2**, 37-42, (1786).

Desde esa primera red y tal y como señala el Dr. Harrison en su comentario recogido por J. Strong en su artículo de 1960, es difícil señalar ningún dispositivo que haya aportado tanta información importante en diferentes campos de la ciencia como la red de difracción: *"The physicist, the astronomer, the chemist, the biologist, the metallurgist, all use it as a routine tool of unsurpassed accuracy and precision, as a detector of atomic species to determine the characteristics of heavenly bodies and the presence of atmospheres in the planets, to study the structures of molecules and atoms, and to obtain a thousand and one items of information without which modern science would be greatly handicapped."* J. Strong, "The Johns Hopkins University and diffraction gratings" Opt. Soc. Am. 50, 1148-1152 (1960), quoting G. R. Harrison.

La utilidad fundamental de una red de difracción es separar las distintas longitudes de onda que contiene un haz de luz. Por tanto, el poder resolutivo de las redes de difracción y sus cualidades de escaso espesor y menor peso en comparación con los prismas hacen que sean en la actualidad el dispositivo más utilizado para realizar espectroscopia. En los siguientes enlaces se muestran algunos ejemplos de la utilización de las redes en los telescopios astronómicos:

- Proyecto HORUS (IAC): <http://www.iac.es/proyectos.php?op1=7&op2=20&lang=en&id=32>
- Proyecto ESPRESSO: http://astro.up.pt/~mjm/publications/pubs/2010_SPIE7735_77350F.pdf
- Gran Telescopio Canarias: <http://www.iac.es/gtcinauguracion/docs/CanariCam-1.pdf>,
<http://www.gtc.iac.es/instruments/canaricam/#top>
- Telescopio HUBBLE: http://www.stsci.edu/hst/HST_overview/instruments/

En el siguiente enlace se muestra cómo adaptando una red a una cámara fotográfica se puede fotografiar espectros de emisión de fuentes de luz:

http://www.eso.org/~rfosbury/home/natural_colour/spectrophot/nc_spec_slitless.html

Estudios recientes del investigador David Fattal *et al.* apuntan a una nueva tecnología 3D sin gafas para móviles y tabletas en la que se utilizan redes de difracción:

- <http://www.nature.com/nature/journal/v495/n7441/full/nature11972.html>
- <http://www.nature.com/news/hologram-lite-idea-for-3d-phone-displays-1.12647>