

SESIÓN 2:

REFRACTOMETRÍA: EFECTO PFUND Y ESTUDIO DEL PRISMA

TRABAJO PREVIO: EFECTO PFUND

○ CONCEPTOS FUNDAMENTALES

- **Reflexión total**

Cuando un rayo de luz incide en una superficie que separa a dos medio de índice de refracción diferentes, n y n' (donde n es el índice de refracción del espacio objeto y n' es el índice de refracción del espacio imagen), si n' es menor que n de acuerdo con la ley de refracción el ángulo de refracción ε' será mayor que el ángulo de incidencia ε . Al ir aumentando el ángulo de incidencia llega un momento para el que el correspondiente ángulo de refracción es de 90° y, en este momento, el rayo refractado emerge rasante a la superficie que separa a los dos medios. Entonces al ángulo de incidencia que origina esto se le conoce como *ángulo límite*. Para ángulos de incidencia mayores que el límite ya no se produce refracción sino solamente reflexión y a éste fenómeno se le conoce como *reflexión total*.

- **Efecto Pfund**

El índice de refracción es el principal parámetro para caracterizar un medio óptico. La medida del índice de refracción, llamada **refractometría**, puede realizarse por medio de técnicas muy diversas. La medida del índice de refracción a partir del efecto Pfund se basa en la determinación del ángulo límite para láminas de caras planas y paralelas.

Mediante la técnica descrita en esta práctica puede determinar el índice de refracción de cualquier lámina de caras planas y paralelas: por ejemplo, un vidrio cuyas caras sean paralelas entre sí y estén limpias y bien pulidas, o un líquido contenido en una cubeta apropiada. La medida del índice de refracción mediante el efecto Pfund es bastante sencilla y rápida, pero no muy precisa, debido a las dificultades para medir con suficiente precisión tanto el espesor de la lámina planoparalela como el radio del círculo observado. Además, con este método se mide el índice de refracción para una sola longitud de onda, en este caso la correspondiente al haz láser empleado.



August Hermann Pfund (Madison, Wisconsin 28 de Diciembre de 1879 - 4 de Enero 1949). Físico y Espectroscopista norteamericano. Se doctoró en la Universidad Johns Hopkins (Baltimore) en 1906, fue profesor de Física en esta universidad y catedrático en 1927. Concentró su investigación en el estudio de la luz y la radiación térmica.

Predijo las líneas espectrales del átomo de hidrógeno relacionadas con transiciones electrónicas del nivel cuántico $n=5$, en el infrarrojo lejano (serie de Pfund). Fue un pionero en la medida de la radiación térmica de estrellas lejanas. Inventó un instrumento capaz de registrar desde 18 millas (28.96 Km) el calor de una vela. Muy activo en la Sociedad Americana de Óptica (OSA), de la cual fue presidente. Recibió en 1939 el más alto honor de la OSA, la medalla Frederick Ives, por sus trabajos en el infrarrojo. Se retiró en 1947.

Considere la sección (plano de incidencia) de una lámina planoparalela cuya superficie inferior es un blanco difusor, según el esquema de la figura 2.1. La luz incidente en un punto P se difundirá en todas las direcciones. Parte de la luz alcanzará la superficie superior de la lámina y será transmitida (rayos 1 y 2), pero otra parte será reflejada por incidir con ángulo superior al ángulo límite (rayos 3 y 4). Los rayos reflejados en la superficie superior (rayos 3 y 4) volverán a incidir nuevamente sobre el difusor (puntos P' y P''), iluminándolo débilmente. Estos puntos P' y P'' serían nuevas fuentes difusoras secundarias, de intensidad muy inferior a la del punto P.

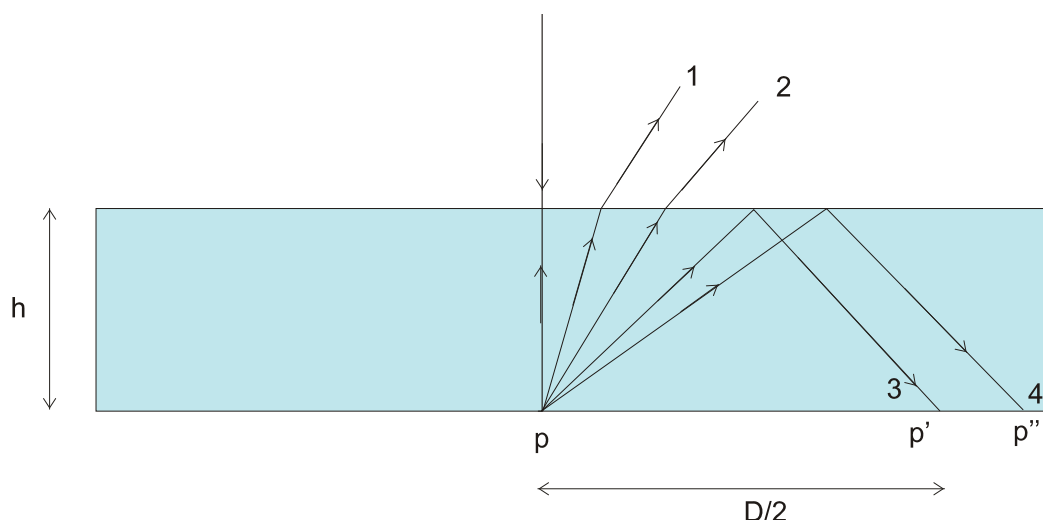


Figura 2.1. Esquema ilustrativo del efecto Pfund: vista lateral (plano de incidencia).

Como existe simetría de revolución respecto a la normal a la superficie (dirección del rayo incidente), desde arriba se observará un punto P muy luminoso rodeado de un círculo oscuro, de diámetro D , y una zona periférica iluminada débilmente (la correspondiente a puntos como P' y P''), según el esquema de la figura 2.2.

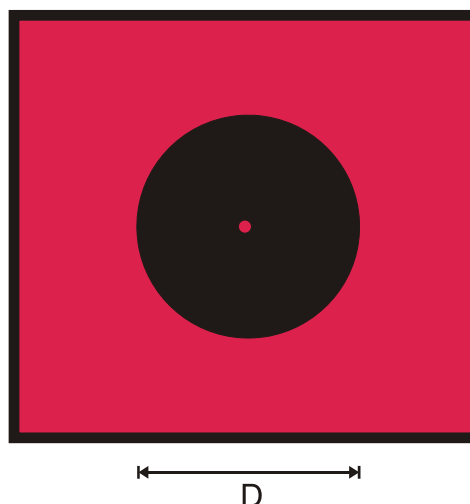


Figura 2.2. Esquema ilustrativo del efecto Pfund: vista superior.

A partir de la medida del espesor h de la lámina y del diámetro D del círculo oscuro, puede determinar el índice de refracción de la lámina planoparalela, mediante la expresión:

$$n = \frac{\sqrt{D^2 + 16h^2}}{D} \quad (2.1)$$

El diámetro del círculo oscuro dependerá del índice de refracción n del vidrio (o líquido) y del espesor h de la lámina planoparalela (o en su caso de la profundidad del líquido contenido en la cubeta). Es decir, las variables D y h no son independientes.

○ CUESTIONES

- 1.- ¿Cómo piensas que puede ser la cota de error que se calcula para el índice de refracción medido por lo explicado en el trabajo previo? ¿Por qué?
- 2.- Deduce la expresión teórica (2.1.) que se ha indicado en el fundamento teórico del trabajo previo.
- 3.- Razona algunas ventajas o inconvenientes que tiene el usar como fuente luminosa un haz láser en lugar de un haz de luz blanca.
- 4.- ¿Qué piensas que ocurriría en el caso de que la incidencia del haz láser no fuera normal?
- 5.- ¿Por qué crees que el papel que está en contacto con una de las superficies de la lámina ha de estar húmedo y en perfecto contacto con la lámina?

GUIÓN DE LA SESIÓN: EFECTO PFUND

○ OBJETIVO

Medida del índice de refracción de láminas de vidrio y del agua por medio de una técnica basada en el efecto Pfund.

○ REALIZACIÓN

La medida del índice de refracción a partir del llamado efecto Pfund, se basa en la determinación del ángulo límite para láminas de caras planas y paralelas.

Puede aplicarse esta técnica a la determinación del índice de refracción de un vidrio cuyas caras sean paralelas entre sí y estén limpias y bien pulidas, o también, a la medida del índice de refracción de un líquido contenido en una cubeta apropiada.

Para observar claramente el efecto Pfund conviene usar una fuente luminosa de alta intensidad y lo más próxima posible al concepto geométrico de rayo luminoso, como es el caso de los láseres. Procure que las superficies de las láminas de vidrio estén limpias. Coloque la lámina de vidrio sobre un papel milimetrado, procurando que el contacto papel-lámina sea bueno. Para ello humedezca con agua el papel milimetrado antes de colocar la lámina encima. Coloque el láser, con la ayuda del soporte, de forma que la incidencia sea lo más próxima posible a incidencia normal, como se muestra en la figura 2.3.

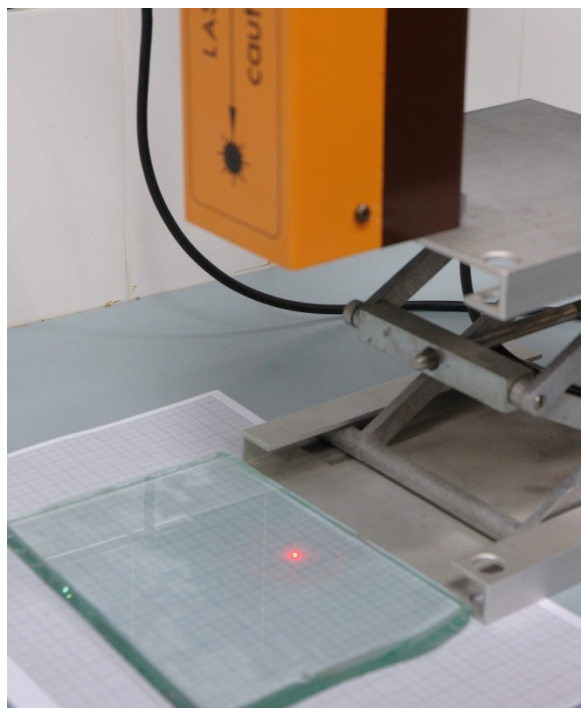


Figura 2.3. Montaje para la realización de la práctica.

Cuanto mejor sea el contacto entre la cara inferior de la lámina de vidrio y el papel, que actúa como difusor, mejor observará el efecto ilustrado en la figura 2.4. Es importante que haga incidir el haz láser con incidencia normal, o lo más próxima posible.

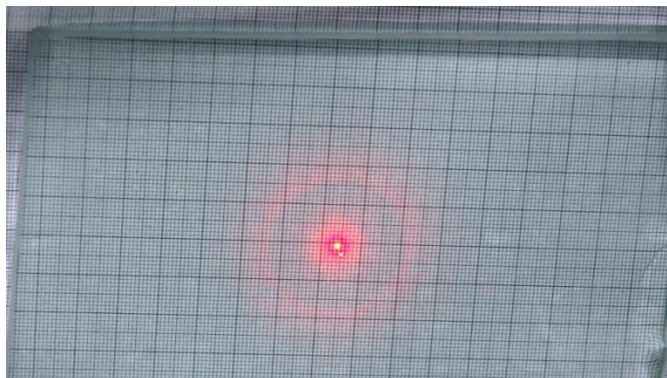


Figura 2.4. Fotografía del círculo producido por efecto Pfund.



Aunque el láser que va a manejar es de baja potencia (0.5 mW) es **MUY IMPORTANTE** evitar que la luz que emite el láser llegue al ojo, o la directamente reflejada en las superficies de las muestras usadas. Un láser puede producir **LESIONES IRREPARABLES** en la retina. Igualmente debe evitar reflexiones del láser que afecten a otros puestos de trabajo diferentes al suyo. Como medida de seguridad, los láseres suelen tener un doble interruptor (como observa en la figura 2.5). Evite también tocar la carcasa del láser con las manos humedecidas, pues podrían producirse descargas eléctricas.



Figura 2.5. Doble interruptor del láser de He-Ne.

Puede medir el diámetro D del círculo oscuro mediante el papel milimetrado, y el espesor h de la lámina de vidrio mediante el calibre, que se muestra en la fotografía de la figura 2.6. Utilice la escala del calibre graduada

en milímetros y tenga en cuenta que, con la ayuda de la escala secundaria (nonius), puede apreciar hasta $1/20$ mm (en el modelo de la fotografía). Con las medidas de D y h calcule mediante la expresión (1) el índice de refracción de la lámina de vidrio y su correspondiente incertidumbre.

Mida el índice de refracción de las dos láminas de vidrio de las que dispone.

❖ Una situación que a veces se observa en la práctica, es el caso de que la lámina planoparalela de vidrio esté en realidad situada sobre una capa de aire o líquido. En estos casos puede observarse un anillo luminoso en torno al círculo oscuro.

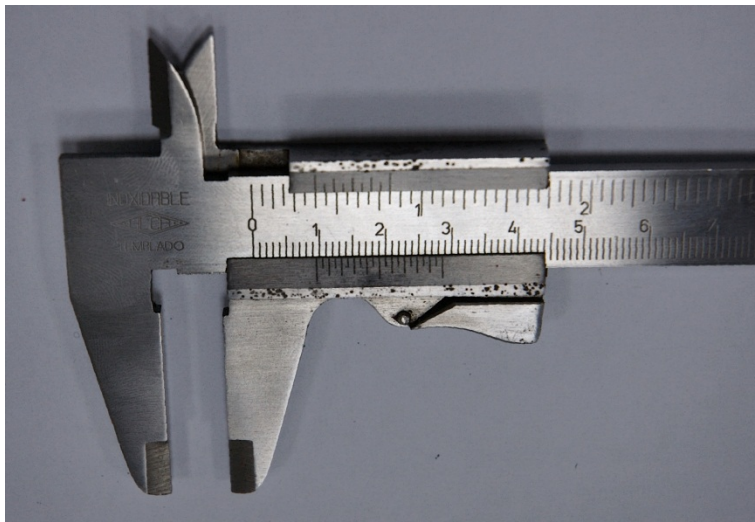


Figura 2.6. Calibre, utilizado en la práctica para medir el espesor de las láminas planoparalelas.

Para el índice de refracción del agua, se utiliza la cubeta disponible, con una cierta cantidad de agua. Se observa nuevamente el círculo oscuro y se mide, al igual que antes, el diámetro del mismo y el espesor del líquido utilizando el calibre. Se añade una nueva cantidad del mismo líquido y se observa cómo cambia el diámetro del círculo oscuro. Deben realizarse medidas para cuatro o cinco cantidades de líquido, y determinarse el índice del líquido problema mediante una regresión lineal que relacione los datos de altura del líquido y diámetro del círculo oscuro medidos.

TRABAJO PREVIO: ESTUDIO DEL PRISMA

○ CONCEPTOS FUNDAMENTALES

• Prisma óptico: definiciones angulares

Un prisma óptico es simplemente un medio transparente limitado por dos superficies planas que forman entre sí un cierto ángulo diedro no nulo, denominado **ángulo de refringencia**. Sea un prisma con un cierto ángulo de refringencia α , y sea r un rayo de una determinada longitud de onda, que incide sobre una de sus caras con un cierto ángulo ε_1 . Puede suceder que, tras sufrir dos refracciones consecutivas, el rayo r' emerja del prisma, como indica la figura 2.7.

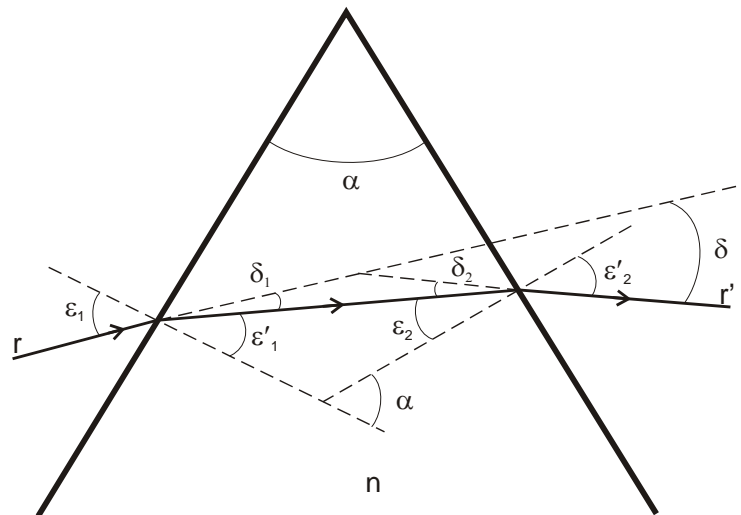


Figura 2.7. Esquema de la desviación producida en un prisma.

El ángulo δ que forma el rayo incidente r y el emergente r' se denomina **ángulo de desviación** (o también desviación angular, o simplemente desviación). Se demuestra que la desviación depende del ángulo de refringencia del prisma α , del ángulo de incidencia ε_1 y del ángulo de emergencia ε_2 conforme a la expresión:

$$\delta = \varepsilon_1 - \varepsilon'_2 - \alpha \quad (2.2)$$

• Mínima desviación

Como indica la expresión (2.2) la desviación δ depende de ε_1 , de forma que existe un cierto valor de ε_1 para el que la desviación es mínima (δ_m). En esta situación de **desviación mínima** se cumple que $|\varepsilon_1| = |\varepsilon'_2|$ y también que $|\varepsilon'_1| = |\varepsilon_2|$. Es decir, en condiciones de desviación mínima el rayo en el interior del prisma es normal al plano bisector del ángulo de refringencia, y la trayectoria de la luz es simétrica respecto a dicho plano. Además, en

condiciones de mínima desviación se cumple que:

$$n = \frac{\text{sen} \left[\frac{(\delta_m + \alpha)}{2} \right]}{\text{sen}(\alpha/2)} \quad (2.3)$$

• Dispersión

El ángulo δ_m es diferente para cada longitud de onda de la luz incidente, por lo que el índice de refracción va a depender de la longitud de onda. A partir de la medida de δ_m y α puede calcular el índice de refracción para diferentes longitudes de onda, usando la ecuación (2.3).



- ❖ El ángulo de desviación en general, no sólo en desviación mínima, depende del índice de refracción, y por tanto de la longitud de onda. Los prismas **dispersan** la luz.

Para caracterizar el índice de refracción medio de un material se toma usualmente la longitud de onda correspondiente a la línea amarilla del espectro del sodio (línea D). Esta longitud de onda está situada en la zona intermedia del espectro visible. Este índice de refracción se designa como n_D . La dispersión de un material es una medida de la diferencia entre los índices de refracción para diferentes longitudes de onda. Para la medida de la dispersión se consideran los índices de refracción para dos longitudes de onda extremas del visible, correspondientes a las líneas azul y roja del espectro del hidrógeno (líneas F y C). Los índices de refracción correspondientes se designan n_F y n_C respectivamente.

- ❖ Las longitudes de onda de las líneas F, D y C en el vacío, son de 486.1 nm, 589.3 nm y 656.3 nm respectivamente.
- ❖ Si no se requiere excesiva precisión pueden usarse las líneas F y C de la lámpara de helio, como hará en esta práctica, ya que son muy próximas a las de la lámpara de hidrógeno.

La diferencia ($n_F - n_C$) se denomina **dispersión absoluta**. El **número de Abbe** ν_D se define por la expresión:

$$\nu_D = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C} \quad (2.4)$$

Se llama **poder dispersivo** al inverso del número de Abbe:

$$\text{Poder dispersivo} = \frac{1}{\nu} = \frac{n_F - n_C}{n_D - 1} \quad (2.5)$$

❖ Para los vidrios ópticos convencionales v_D está comprendido aproximadamente entre 25 y 75, siendo más dispersivos los llamados vidrios **flint** ($v_D < 50$) que los vidrios **crown** ($v_D > 50$).

○ CUESTIONES

- 6.- Obtener la expresión de la desviación mínima en función del ángulo de incidencia y del ángulo de refringencia del prisma.
- 7.- El ángulo de incidencia que produce la desviación mínima ¿depende de la longitud de onda (índice de refracción) de la luz incidente? Justificar por qué. Entonces, si una determinada longitud de onda opera en un prisma en condiciones de desviación mínima, el resto de longitudes de onda ¿podrán estar simultáneamente en desviación mínima?
- 8.- Determina si el siguiente vidrio es Crown o Flint.

$$n_D=1.5235; n_C=1.5201; n_F=1.5291$$

- 9.- Relaciona el fenómeno de dispersión cromática con la formación del arco iris.

GUIÓN DE LA SESIÓN: ESTUDIO DEL PRISMA

○ OBJETIVO

En esta práctica proponemos la medida del índice de refracción de un medio para distintas longitudes de onda y, a partir de ahí, el cálculo del poder dispersivo de ese medio.

○ ESPECTROGONIÓMETRO: PUESTA A PUNTO

Para realizar una medida precisa de cualquier ángulo definido por un haz de luz, como es el caso del ángulo de desviación mínima de un determinado prisma, se emplea un aparato denominado *espectrogoniómetro*. Un espectrogoniómetro permite medir ángulos por métodos óptico-geométricos. Como para cualquier otro instrumento, antes de realizar las medidas experimentales es necesario conocer sus características y ponerlo a punto o calibrarlo.

Básicamente el espectrogoniómetro (figura 2.8) consta de un anteojo móvil, una plataforma giratoria donde situará el prisma, y un colimador fijo. El anteojo del espectrogoniómetro es un anteojo astronómico ordinario pero unido al aparato, que posee una escala graduada para realizar las medidas. Debe empezar por poner a punto el anteojo. Para ello, primero debe sacar o meter el ocular en el tubo del anteojo hasta ver nítidamente el retículo, con lo que el ocular ya está a punto. Seguidamente, mediante un tornillo, modifique la separación objetivo-ocular hasta ver nítidamente un objeto lejano del laboratorio. En ese momento el anteojo está puesto a punto.

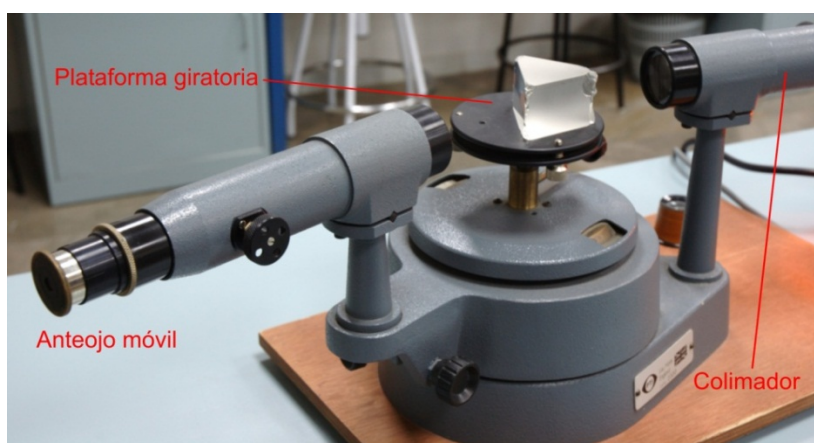


Figura 2.8. Componentes principales de un espectrogoniómetro.

La plataforma circular sirve para colocar el prisma. Puede regularse en altura y nivelarse horizontalmente, mediante tres tornillos situados a 120° , como se observa en las figuras 2.8 y 2.10.

El colimador está formado por una lente convergente y una rendija. La posición y tamaño de la rendija son variables. La rendija será el objeto del sistema óptico y estará iluminada con la lámpara espectral adecuada a la longitud de onda para la cual vaya a calcular el índice de refracción. Para construir el colimador deberá, mediante el tornillo correspondiente, acercar o alejar la rendija hasta verla nítida con el anteojo del espectrogoniómetro, previamente puesto a punto.

❖ Cuando el espectrogoniómetro está puesto a punto, emerge del colimador un haz de rayos paralelos, que incidirá sobre el prisma y volverá a emerger paralelo. La imagen de la rendija a través del objetivo del anteojo se formará en la posición del retículo del anteojo (en el plano focal objeto del ocular), por lo que rendija y retículo son nítidamente observados simultáneamente al mirar por el ocular del anteojo.

Una vez que el espectrogoniómetro está puesto a punto, para realizar las medidas de posiciones angulares convendrá que la rendija sea estrecha.

❖ Si con la rendija estrecha es difícil ver el retículo, puede ayudarse de una linterna, iluminando el objetivo del anteojo para hacer cómodamente las observaciones.

También es importante que la rendija esté orientada de forma que su imagen a través del anteojo pueda coincidir con la línea vertical del retículo. Para conseguir esto puede rotar el plano de la rendija o el del retículo del anteojo.

❖ El espectrogoniómetro utilizado permite medir posiciones angulares con una incertidumbre de ± 1 minuto de arco. Como se observa en la figura 2.9, la escala principal del espectrogoniómetro tiene una sensibilidad de 0.5 grados (30 minutos de arco). Pero con ayuda del nonius de 30 divisiones podrá apreciar hasta 1 minuto de arco. Como los ángulos de desviación mínima δ_m se obtienen por diferencia de dos posiciones angulares del anteojo, la mínima incertidumbre asociada a δ_m será por tanto de 2 minutos de arco. Tenga en cuenta que debe expresar en radianes la incertidumbre de δ_m cuando calcule la incertidumbre asociada al índice de refracción. Así dicha incertidumbre será adimensional, como corresponde al índice de refracción.



Figura 2.9. Detalle del nonius del espectrogoniómetro.

○ **REALIZACIÓN**

Una vez puesto a punto el espectrogoniómetro, sitúe el prisma que va a estudiar en la plataforma circular del espectrogoniómetro, de forma que se produzca la situación mostrada en la figura 2.3. Esto implica que la cara triangular del prisma quede paralela a la base del espectrogoniómetro. De esta forma habrá emergencia de la luz incidente. Debe medir los ángulos de mínima desviación para un prisma de vidrio.

❖ Actúe con cuidado porque algunos prismas de vidrio tienen sin pulir o esmerilada (no transparente) una de sus caras, como se aprecia en la figura 2.10. Si es éste el caso, coloque el prisma de forma que ni la luz incidente ni la emergente pasen por la cara esmerilada. O sea, haga que la cara esmerilada actúe como base del prisma, o cara opuesta al ángulo de refringencia.

En algunas ocasiones se sitúa el prisma de forma que en la segunda cara se produce una reflexión total de la luz, por lo que no podrá observar la imagen a través del anteojo. Para lograr la situación de emergencia, lo más sencillo es hacer incidir la luz saliente del colimador sobre la primera cara del prisma con un ángulo de unos 45° y girar el prisma a la vez que observamos a ojo desnudo cerca de la segunda cara del prisma, hasta que veamos las líneas espectrales. Observará una imagen diferente de la rendija para cada una de las longitudes de onda de la lámpara que esté utilizando. A continuación sitúe el anteojo en la misma posición que ocupaba su ojo y lleve a cabo las medidas, como se explica más adelante.

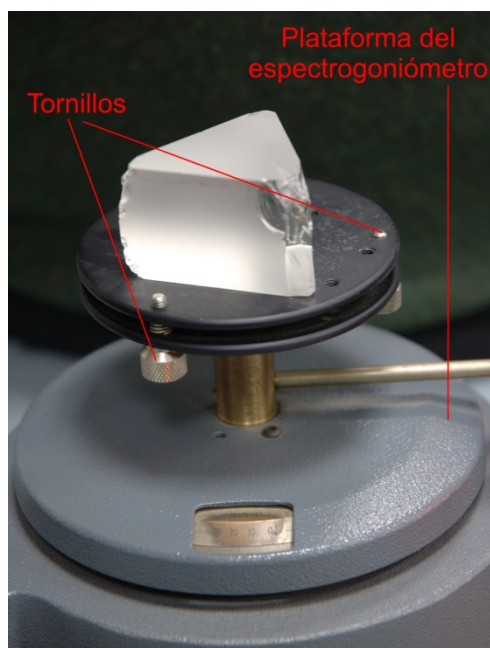


Figura 2.10. Prisma de vidrio sobre la plataforma del espectrogoniómetro (se puede observar que la base del prisma es esmerilada).

- ❖ Debe observar las líneas espectrales con intensidad suficiente para poder medir bien. Para ello la fuente luminosa debe iluminar intensamente la rendija del colimador. También debe procurar trabajar sobre un fondo oscuro, evitando que haya en el campo de observación otras luces diferentes de la que procede del colimador como, por ejemplo, las luces parásitas procedentes de otros puestos de trabajo del laboratorio.

Una vez localizadas las líneas espectrales con el antejo, tiene que buscar la posición de mínima desviación para cada una de las longitudes de onda que le interesan, que son: las líneas D (amarilla), F (azul) y C (roja). Como el ángulo de desviación depende del ángulo de incidencia, modifique el ángulo de incidencia a la vez que observa por el antejo la influencia sobre la imagen de la rendija. Como la dirección del haz incidente permanece fija, puede modificar el ángulo de incidencia ε_1 girando levemente la plataforma del espectrogoniómetro que sustenta el prisma (ver figura 2.10). Deber modificar el ángulo de incidencia de forma que observe por el antejo que la imagen de la rendija se desplaza en el sentido de disminución de la desviación, δ . La desviación δ disminuye si la imagen se mueve hacia la dirección del haz incidente, determinada por el colimador. Si es así, siga girando el prisma (modificando el ángulo de incidencia ε_1) de forma que se vaya reduciendo cada vez más el ángulo de desviación δ . Llegará un momento en que observará que el ángulo de desviación no puede hacerse más pequeño. Es decir la imagen de la rendija no se acerca más a la dirección de incidencia, sino que se aleja, tanto si gira el prisma en un sentido como en el contrario. Cuando esto ocurre es porque se ha alcanzado la posición de mínima desviación.

- ❖ Para determinar con exactitud la posición de mínima desviación utilice como referencia la línea vertical del retículo del anteojo.

Teniendo en cuenta el nonius, mida en la escala del espectrogoniómetro la posición que ocupa la imagen de la rendija en mínima desviación. Designe dicha posición con el nombre L . Tenga en cuenta que esta posición no es el ángulo de desviación mínima, sino sólo la posición del anteojo cuando observa la rendija en desviación mínima. Para obtener el ángulo de desviación mínima necesita medir la dirección del rayo incidente. Para ello quite el prisma y mueva el anteojo hasta observar la rendija iluminada. Mida la posición del anteojo en esta situación (sin prisma), que puede denominar L_0 . El ángulo de desviación mínima es la diferencia entre las posiciones L y L_0 en valor absoluto.

- ❖ Recuerde que para calcular incertidumbres debe realizar al menos tres medidas independientes de L y L_0 , lo que significa quitar el prisma y comenzar de nuevo cada vez.

La posición de mínima desviación debe determinarse individualmente para las líneas D, F y C, con lo cual tendrá que realizar el proceso indicado en el párrafo anterior para cada una de esas líneas, correspondientes a las longitudes de onda λ_D , λ_F y λ_C , respectivamente. En el caso de la longitud de onda λ_D debe utilizar la lámpara de sodio. Con la lámpara de sodio observará muy bien la línea amarilla del sodio y quizá alguna otra línea de escasa intensidad, que no tiene que medir. Para las longitudes de onda λ_F y λ_C debe usar la lámpara de helio. Con la lámpara de helio observará numerosas líneas espectrales, pero sólo ha de medir las líneas F y C. La línea F la identificará fácilmente por ser azul-violeta y muy intensa. La línea C también es fácil de identificar por ser roja y muy intensa.

- ❖ Puesto que sólo se dispone de una lámpara de sodio y otra de helio, en lugar de cambiar la lámpara espectral de su puesto de trabajo, es más cómodo que cambie con la pareja del otro puesto el espectrogoniómetro, manteniendo las lámparas en sus posiciones. Recuerde que la puesta a punto del anteojo es sólo válida para la persona que la ha realizado, salvo que coincidan las ametropías de los observadores. Antes de realizar el cambio es conveniente haber acabado las medidas del ángulo de desviación mínima correspondientes a las longitudes de onda de la lámpara que esté usando para el prisma.

Obtendrá por tanto 3 posiciones de mínima desviación (L_D , L_C y L_F) y sus correspondientes posiciones de cero o de la luz incidente (L_{0D} , L_{0C} y L_{0F}).

❖ Debe medir cada pareja de posiciones angulares, L y L_0 , antes de mover el prisma para realizar otra medida independiente o cambiar de lámpara, puesto que toda la escala del espectrogoniómetro gira cuando mueve la plataforma donde se apoya el prisma.

Los correspondientes ángulos de mínima desviación los calculará con las expresiones siguientes:

$$\begin{aligned}(\delta_m)_D &= | L_D - L_{0D} | \\(\delta_m)_C &= | L_C - L_{0C} | \\(\delta_m)_F &= | L_F - L_{0F} |\end{aligned}\tag{2.6}$$

❖ Tenga cuidado si al medir una posición y su correspondiente ángulo sin desviar atraviesa la posición de $360^\circ/0^\circ$ de la escala del espectrogoniómetro. En ese caso no puede aplicar las expresiones (2.6). Ha de restar a 360 el valor mayor y sumarlo al valor menor.

Si ha operado correctamente deberá obtener que las desviaciones mínimas cumplen $(\delta_m)_F > (\delta_m)_D > (\delta_m)_C$ tal y como se observa con el anteojo, lo que conduce a que $n_F > n_D > n_C$, como era de esperar según la teoría, pues se trata de una dispersión no anómala.

El prisma utilizado está construido con un ángulo de refringencia de 60° . Ya que no conoce la exactitud del fabricante, tome este valor sin incertidumbre. Para calcular los índices de refracción para las longitudes de onda F, D y C utilice la expresión (2.3) con los valores de δ_m oportunos, cuya incertidumbre mínima será de 2 minutos de arco.

❖ Recuerde que para calcular la incertidumbre asociada al índice de refracción la incertidumbre asociada a δ_m debe expresarse en radianes (no en minutos o en grados).

Mediante la expresión (2.4) calcule el número de Abbe con su correspondiente incertidumbre para el material estudiado: vidrio (prisma macizo).

❖ Como siempre, debe tomar el número de medidas necesarias para aplicar correctamente la teoría de errores.

❖ Note que no es correcto calcular los tantos por ciento de dispersión sobre las posiciones absolutas del anteojo (L_D , L_C , L_F ó L_{0D} , L_{0C} , L_{0F}) sino sobre los valores de los ángulos de desviación mínima (diferencia de dos posiciones absolutas): $(\delta_m)_D$, $(\delta_m)_C$ y $(\delta_m)_F$.