Reflexión y transmisión de la luz

Roberto Machorro

1st October 2002

Lab. de Óptica, Fac. Ciencias UABC

1 Resumen

Se analiza el comportamiento de la luz cuando cambia de un medio de propagación a otro diferente. La forma en que la luz es desviada de su camino, así como la fracción de energía transmitida y reflejada son dos aspectos fundamentales de la propagación. Estudiaremos la ley de Snell, las relaciones de Fresnel y algunas aplicaciones de ambas.

2 Introducción

Toda onda sufre un cambio al pasar de un medio de propagación a otro diferente. Las leyes que las rigen son prácticamente iguales para ondas sonoras, luminosas, funciones de onda cuánticas, oleaje marítimo, etc. Las ondas electromagnéticas no son la excepción.

Fueron estudiadas desde hace muchos años, inclusive se propusieron modelos corpusculares que explicaban lo que ahora conocemos como ley de Snell, es decir, la relación que hay entre el ángulo de entrada al medio, con el ángulo de transmisión o de propagación en el nuevo material. Este modelo corpuscular era muy sencillo, dos plataformas horizontales, unidas por una pendiente a un ángulo fijo. Una canica que viaje sobre la superficie superior, llega a la "interfaz" y, debido a la pendiente, se desvía y acelera, llegando a la segunda superficie horizontal a un ángulo diferente respecto al superior. Con todo y que este modelo explica la relación de ángulos, dependiendo de la pendiente que los une, tiene una grave limitación: La canica aumenta la velocidad de viaje, en cambio la luz disminuye su velocidad al entrar a un medio más denso.

Posteriormente Snell propone la relación entre los senos trigonométricos de los ángulos de entrada y salida. Esta regla ha sido demostrada teóricamente utilizando varias maneras, desde el principio de Fermat, continuidad de los campos electromagénticos en las fronteras, geométricamente, etc. [1]. Ahora es asume como una ley incontrovertible y fácilmente demostrable. Se observa continuamente en la naturaleza, en la vida diaria. Hemos visto un conjunto de videos donde se ilustra el ángulo visión de un pez dentro del agua [2], la desviación de la luz por un vaso de agua, por un bloque de plástico, la reflexión total interna, etc. Los videos fueron presentados al inicio de las sesión, por lo que la comprensión de todo el material no fue completa. Los conceptos fueron reforzados al momento de producirlos nosotros mismos en el laboratorio.

No siempre la transición se da bruscamente un medio a otro distinto, puede darse el caso donde el medio varia gradualmente de densidad, como es el caso de la atmósfera, el aire caliente en las carreteras, etc. Los espejismos son un fenómeno explicable con la ley de Snell ([1] ejercicio XX).

Un ángulo muy interesante es el conocido como ángulo crítico. Da lugar cuando la luz viaja de un medio denso a otro menos denso, sigue la ley de Snell rigurosamente, por lo que al salir el ángulo es mayor que al entrar. Esto es conocido como reflexión interna.

Otro aspecto importante que sufre la luz al cambiar de medio es que no toda la onda, y con ello la energía, se transmite (T). Parte de ella se regresa al medio incidente (R) y viaja en la dirección opuesta a la que venía originalmente. Una vez en el material, la luz puede sufrir otros fenómenos físicos igualmente relevantes. Si la frecuencia de oscilación de la luz viajante sintoniza con la frecuencia de resonancia de los dipolos que representan a los átomos o moléculas del material, y si además éste oscilador es amortiguado, por sus características físicas, entonces le transfiere energía, la luz se absorbe (A), inclusive puede liberar electrones de los átomos, como en el caso de semiconductores. Si encuentra partículas de densidad distinta, de tamaño similar a la longitud de onda de la luz, hay una interacción entre las dos, la luz se desvía de camino, se esparse (S) y generalmente cambia de polarización, como se verá en el capítulo correspondiente. Suponiendo que no hay fuentes de luz en el material, entonces el principio de conservación de energía nos dirá que la suma de las energías distribuidas dará la incidente: $R + T + A + S = 1$. En este reporte nos restringiremos a los dos primeros términos, pero no debemos olvidar que prácticamente todos los materiales tienen absorción y esparcimiento.

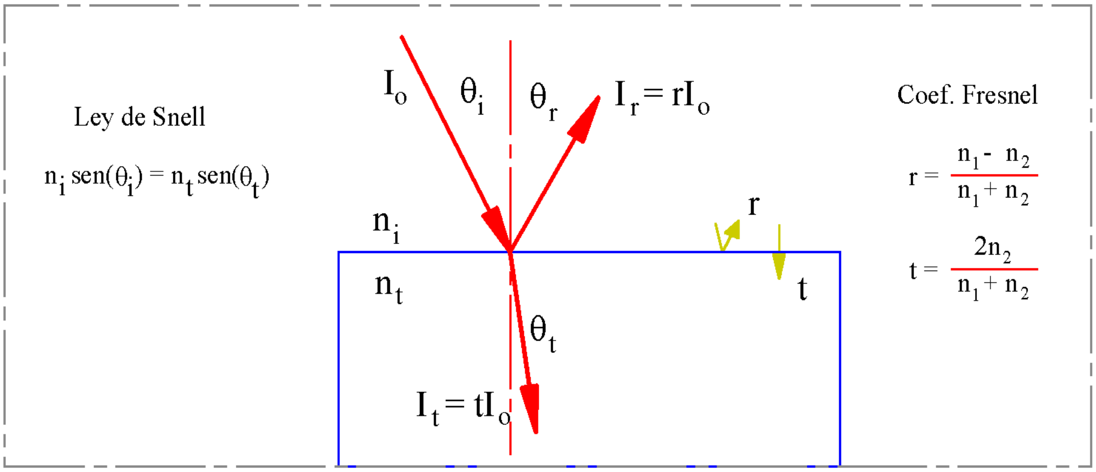
La fracción de energía reflejada, aunque pequeña, ayuda enormemente para hacer coincidir varias superficies ópticas cualesquiera, igualando sus ejes ópticos. Esto es particulamente sencillo utilizando un láser, tanto porque sus rayos son paralelos (o casi) entre si, como por su "alta" potencia. El proceso de alineación se conoce como autocolimación, debido a que el haz entrante y el saliente se alienan entre si, para cada una de las superficies que componen al sistema.

Fresnel derivó unas expresiones, empleando la continuidad de los campos eléctricos y magnéticos en la interfaz entre dos medios, para la fracción del campo reflejado y transmitido ([1], pág. XX). En esta práctica mediremos la transmitancia de unas placas de vidrio, de manera simple y compleja, para verificar la validez de las relaciones de Fresnel. Nos limitaremos a incidencia normal generalemente, aunque las ecuaciones son válidas para cualquir ángulo.

3 Objetivo

Utilizar los fenómenos físicos que se dan al cambiar la luz de un medio a otro (Snell y Fresnel), verificar la alineación de componentes ópticas y para medir las propiedades de

Figure 1: Definiciones



los materiales.

4 Metodología

Por simplicidad, dividiremos la práctica en tres secciones: verificación de la ley de Snell, la reflexión/transmisión en una interfaz, y autocolimación. NO debemos olvidar que las tres secciones son parte de una misma peculiaridad de la luz, la continuidad de los campos electromagnéticos en la interfaz. Las describiremos en orden diferente al utilizado en el laboratorio, ya que empleamos la autocolimación desde un principio, sin preocuparnos mucho de que era en si misma. Aquí la pondremos como última parte, ya con mejor comprensión de lo que es.

4.1 Ley de Snell

4.1.1 Postulado de ley de Snell

La luz se desvía de su trayectoria al cambiar de medio de propagación, siguiendo la regla siguiente

$$n_{\mathrm{i}} \sin \theta_{\mathrm{i}} = n_{\mathrm{t}} \sin \theta_{\mathrm{t}}$$

donde los ángulos de incidencia y transmisión, así como los índices respectivos, están definidos en la siguiente figura. Recordar que el plano de incidencia está definido por el haz incidente, el reflejado y la normal a la interfaz. Los ángulos se miden respecto a esta última.

4.1.2 Banco óptico y goniómetro

En esta sección utilizamos un banco óptico sencillo [5]. El arreglo experimental se muestra en la figura 1. El banco óptico es un perfil angular de aluminio, en forma de una V con cuatro soportes a la mesa de trabajo. Sobre el banco descansan todas las componentes y se fijan con grapas a presión.

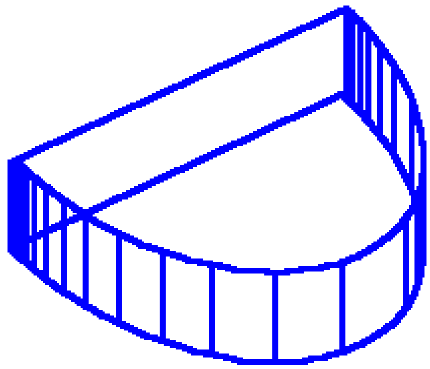
Una fuente de luz, que consiste en un foco de tungsteno y una lente positiva, montados ambos en una base cilíndrica, que tiene un soporte no cinemático, pero funcional. De entrada formamos la imagen del filamento sobre una superficie lejana, que debiera ser a infinito en caso ideal; esto se llama colimar la fuente de luz, es decir, los rayos a la salida de la lente salen paralelos entre sí, y se cruzan en infinito.

Un soporte de aluminio tiene a una rueda con tres ventanas, una de ellas es una rendija de 1 mm de abertura; la segunda tiene tres rendijas como la anterior, equidistantes a 8 mm entre sí; la tercera una fotografía de una flecha y una retícula graduada. Emplearemos únicamente la primera abertura. Al colocar la rendija simple frente a la fuente de luz, se deja pasar un haz casi paralelo. Puede notarse que diverge, con una pantalla colocada a un metro, el haz tiene una anchura de 3 mm, cuando de entrada tenía 1mm. Disminuimos este problema al colocar el goniómetro muy cerca de la rendija, cuando la divergencia es despreciable, apenas 1/40 mm.

El goniómetro es una plataforma circular pintada de blanco mate, de 20 cm de diámetro, con un eje de rotación en el centro del círculo. En la periferia tiene una graduación a cada grado, con marcas más grandes a los 5 grados y mayores aún a los 10 grados. La platina tiene una inclinación de aproximandamente 5 grados respecto a la horizontal, de manera tal que la luz que le llega de la rendija queda atrapada o se proyecta sobre la platina del goniómetro, permitiendo ver el haz de luz y su posición angular. El eje de rotación no es de calidad, por lo que al girar la platina se debe tener cuidado de no desplazarla lateralmente.

4.1.3 Prismas semicilíndricos

Los prismas que usamos son hechos de placas de lucita, de 12 mm de grosor. La forma es de un semicilíndro, con un plano que pasa por el centro de curvatura (radio de 10 cm). Los cantos están pulidos para minimizar la dispersión de la luz. Es muy probable que la calidad de las superficies no se alta, ni siquiera mediana, pero no afecta el desempeño de la tarea que aquí haremos.



4.1.4 Autocolimación

Para una explicación detallada de esta sección, favor consultar el apartado 4.3. Baste decir que empleamos el haz proveniente de la rendija iluminada para llevarlo a cabo. Fijamos el banco óptico a la mesa de trabajo, empleando cinta adhesiva. Inicialmente ponemos el goniómetro (descrito en sección 4.1.2), con superficie subiendo en la dirección en que viaja la luz, de manera tal que el haz ilumine la línea que une 0 con 180 grados. Colocarlo a 5 cm de la rendija iluminada. Fijar el soporte del goniómetro con cinta adhesiva.

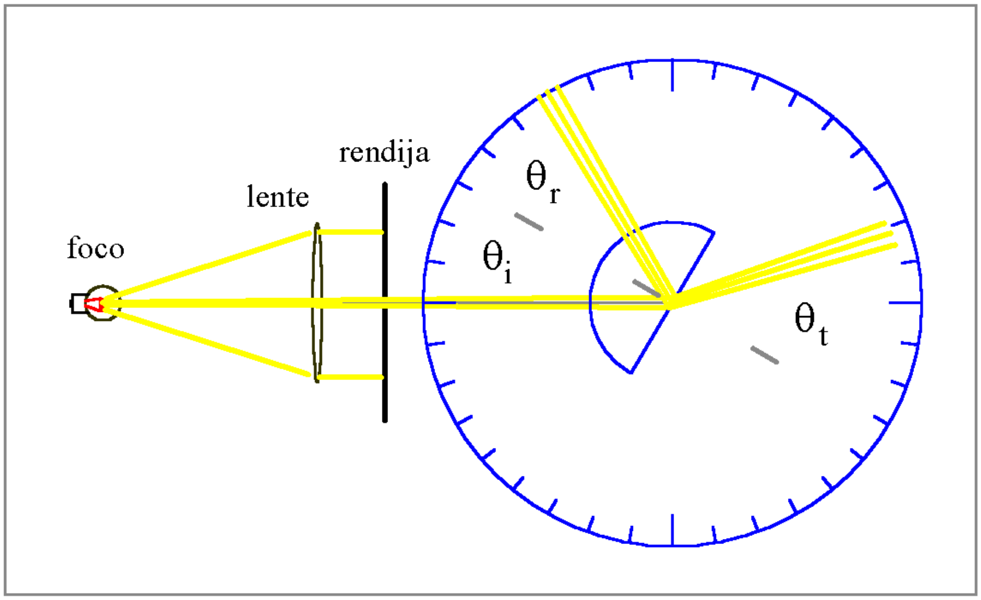
Colocar el prisma sobre la platina con la cara circular hacia la rendija de luz, sin importar mucho, por ahora, su posición. Puede apreciarse que hay dos reflexiones, una en la superficie circular, donde penetra la luz al prisma y llega a la cara plana. Allí se refleja nuevamente y regresa hacia la rendija. Es muy probable que al primer intento las dos reflexiones no coincidan entre si, ni con la rendija. Al mover el prisma lateralmente las reflexiones se alejan o acercan entre sí, dependiendo si nos acercamos o alejamos del eje óptico. Nuestra intención es que ambas reflexiones queden superpuestas y que lleguen a la rendija de entreada. Llegada esta posición, el prisma está alienado con la luz de entrada. Pero aún hay que tener una precaución adicional. El centro de curvatura del prisma debe coincidir con el centro de rotación del goniómetro. Después de varios intentos se logra esta situación.

Hay que notar al haz reflejado en la superficie circular, una vez que llegamos a la alineación descrita en el párrafo anterior. Al incidir sobre esta superficie la luz arriba con un ángulo de 0 grados, por lo que según la ley de Snell, penetra al medio haciendo 0 grados con la normal, esto es, no se desvía. Igual sucede con el haz que viene de regreso, una vez reflejado en la superficie plana. Con esto nos aseguramos que el ángulo externo es igual al ángulo dentro del prisma semicilíndrico, lo que resulta muy cómodo para hacer las lecturas.

Es conveniente empezar las mediciones con reflexión interna, cuando la luz viaja del prisma al aire, en la superficie plana, ya que la sensibilidad a errores en la autocolimación es muy superior respecto a la reflexión externa. Esto lo veremos cuantitativamente en la sección 4.1.4.

4.1.5 Medición de ángulos

Reflexión interna Iniciamos con la reflexión interna, colocando al prisma con su parte circular de entrada al haz de luz, saliendo por la parte plana. Haremos mediciones de los ángulos de incidencia, reflexión y transmisión cada 10 grados [17].



Cuando nos acerquemos al ángulo de reflexión total interna el incremento lo reduciremos a dos grados. La tabla siguiente muestra nuestras mediciones.

θi	$\theta r \pm \delta\theta$	$\theta t \pm \delta\theta$	$\sin\theta i$	$\sin\theta t$	$\sin\theta i/\sin\theta t$	δn		Comentarios
0	0±0.5	0±0.5	0	0	0	indefinido		
10	10±0.5	15±0.5	0.174	0.259	1.49	0.054		
20	20±0.5	30±0.5	0.342	0.500	1.46	0.023		
30	30±0.5	48±0.5	0.500	0.743	1.49	0.012		
40	4±0.75	73±1.0	0.643	0.956	1.49	0.004		
41	41±0.75	90±1.0	0.676	1.000	1.48	0.000		
42.5	xx±1				?			Violeta
42.5	xx±1				?			Verde
43	xx±1				?			Rojo

Es importante hacer notar que, llegando al ángulo crítico, cerca de los 40 grados de incidencia, la luz transmitida ya no es blanca, como a la entrada, sino que se separa en colores. La que más se desvía es la luz violeta, de longitud de onda menor, y la que menos lo hace es el rojo. Es una indicación de que el índice de refracción depende del color. Anotamos en la tabla el ángulo de incidencia en el cual se logra la reflexión total para cada color, al menos visualmente, para el rojo, el verde y el violeta. Con estos valores podremos obtener los índices correspondientes.

La incertidumbre en la medida de los ángulos, $\delta\theta$, cambia con el ángulo mismo, como se muestra en la tabla I. La columna con δn corresponde a la propagación de los errores, la manera en que repercute las medidas de los ángulos en el índice de refracción. Estos valores se calculan derivando por parciales a la ley de Snell:

$$n_{\rm i} \sin\theta_{\rm i} = n_{\rm t} \sin\theta_{\rm t}$$

donde n_i y n_t son los índices de refracción del medio incidente y a donde se transmite la luz; θ_i y θ_t son los ángulos de propagación en el medio incidente y al que se transmite la luz. Suponiendo al indice del aire, en este caso $n_{\rm t} = 1.0$, el valor esperado para n_i, el índice de refracción del prisma, será

$$n_{\rm i} = n_{\rm t} \sin\theta_{\rm t} / \sin\theta_{\rm i} = \sin\theta_{\rm t} / \sin\theta_{\rm i}$$

de donde derivamos las parciales con respecto a $\theta_{\rm t}$ y θ_i, lo que da la expresión

$$\delta n_{\rm i} = \frac{\partial(\sin\theta_{\rm t}/\sin\theta_{\rm i})}{\partial\theta_{\rm t}}\delta\theta_{\rm t} + \frac{\partial(\sin\theta_{\rm t}/\sin\theta_{\rm i})}{\partial\theta_{\rm i}}\delta\theta_{\rm i} = \frac{\cos\theta_{\rm t}}{\sin\theta_{\rm i}}\delta\theta_{\rm t} + \frac{\sin\theta_{\rm t}\cos\theta_{\rm i}}{(\sin\theta_{\rm i})^2}\delta\theta_{\rm i}$$

de donde la desviación para el error en el índice se reduce a (ver Preston, pag. 13):

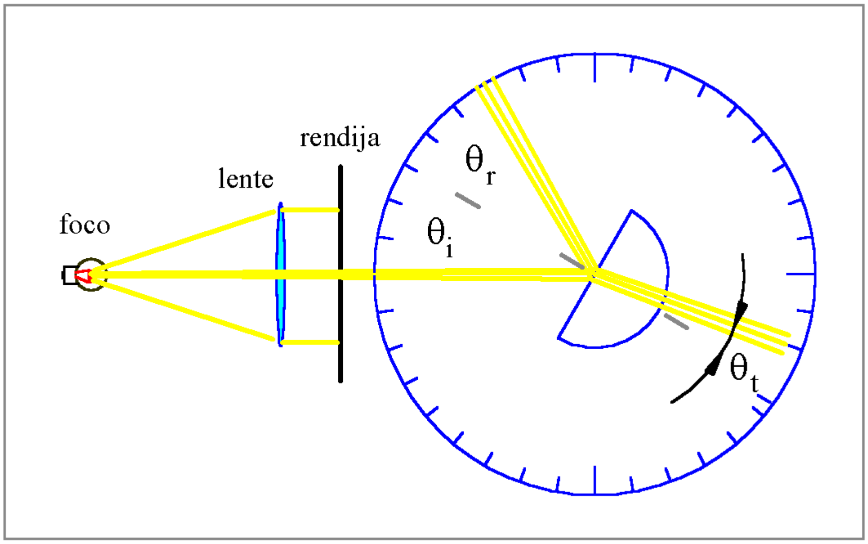
$$\delta n_{\rm i} = \sqrt{\left[\frac{\cos\theta_{\rm t}}{\sin\theta_{\rm i}}\delta\theta_{\rm t}\right]^2 + \left[\frac{\sin\theta_{\rm t}\cos\theta_{\rm i}}{(\sin\theta_{\rm i})^2}\delta\theta_{\rm i}\right]^2}$$

Donde $\delta\theta_{\rm i}$ y $\delta\theta_{\rm t}$ son las incertidumbres al medir los ángulos de incidencia y transmisión, determinados por el goniómetro y la anchura de la zona iluminada por la rendija. La columna δn presenta el error en el índice, para cada ángulo de incidencia y transmisión. Puede apreciarse que para ángulos de incidencia menores la incertidumbre aumenta, ya que $\sin\theta_{\rm i}$ y $(\sin\theta_{\rm i})^2$ están en el denominador. La influencia del error en el ángulo de incidencia pesa menos que la del error en transmisión. En la gráfica siguiente se muestra la dependencia con cada uno de ellos.

Esta técnica de reflexión total interna es ampliamente usada para la caracterización de vidrios. A nivel comercial existe un instrumento, conocido como refractómetro de Abbe, basado en este principio [9]. En condiciones controladas puede determinarse el índice del vidrio hasta con 5 cifras decimales. Seleccionando la fuente de luz, puede medirse la dispersión del propio índice, su dependencia con el color.

Reflexión externa Fijamos ahora el prisma con su parte plana de entrada al haz de luz, saliendo por la parte circular. Nuevamente haremos mediciones de los ángulos de incidencia, reflexión y transmisión cada 10 grados. En este caso la reflexión total interna se da en los 90 grados, o incidencia rasante. La tabla siguiente muestra nuestras mediciones.

Figure 2:



θi	$\theta r \pm \delta\theta$	$\theta t \pm \delta\theta$	$\sin\theta i$	$\sin\theta t$	$\sin\theta i/\sin\theta t$	δn	Comentarios
0	0±0.5	0±0.5	0	0	0	indefinido	
10	10±0.5	6.5±0.5	0.174	0.113	1.53	0.051	
20	21±0.5	13.5±0.5	0.342	0.233	1.47	0.025	
30	31±0.5	20±0.5	0.500	0.342	1.46	0.017	
40	41±0.5	26±0.5	0.643	0.438	1.47	0.012	
50	52±0.5	31.5±0.5	0.766	0.522	1.47	0.010	
60	62±0.5	36.5±0.5	0.866	0.595	1.46	0.008	
70	71.5±0.5	40±0.5	0.940	0.643	1.46	0.007	
80	82±0.5	43±1.0	0.985	0.682	1.48	0.006	

Algo que nos fue inevitable es el hecho de que la reflexión no cumple del todo la ley correspondiente, $\theta_i = \theta_r$, sobre todo en ángulos grandes. La alineación del prisma resulta mucho más crítica que en el caso de reflexión interna, con la cual era más precisa la ubicación del centro de rotación. Debió dedicarse más tiempo para esta tarea, ya que vimos compañeros que si lograron el cometido con mucha mejor precisión.

Veamos cual es la influencia de este error en la determianción de la ley de Snell. Con estos valores podremos obtener los índices correspondientes.

La incertidumbre en la medida de los ángulos, $\delta\theta$, cambia con el ángulo mismo, como se muestra en la tabla II. La columna con δn corresponde a la propagación de los errores, la manera en que repercute las medidas de los ángulos en el índice de refracción. Estos valores se calculan derivando por parciales a la ley de Snell:

$$n_{\mathrm{i}} \sin\theta_{\mathrm{i}} = n_{\mathrm{t}} \sin\theta_{\mathrm{t}}$$

suponiendo al indice del aire, en este caso $n_{\mathrm{i}} = 1.0$, y nuestro valor esperado para n_t

el índice de refracción del prisma, y despejando para

$$n_{\mathrm{t}} = n_{\mathrm{i}} \sin\theta_{\mathrm{i}} / \sin\theta_{\mathrm{t}} = \sin\theta_{\mathrm{i}} / \sin\theta_{\mathrm{t}}$$

de donde derivamos las parciales con θ_{t} y θ_i lo que da la expresión

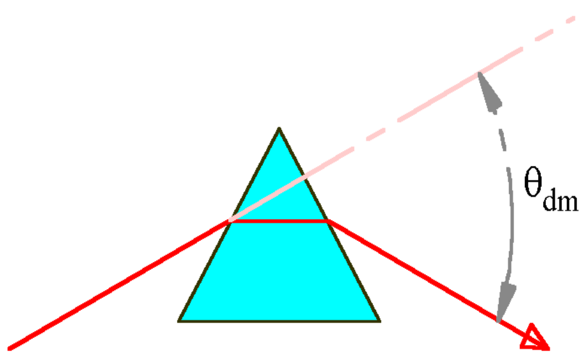
$$\delta n_{\mathrm{t}} = \frac{\partial(\sin\theta_{\mathrm{i}} / \sin\theta_{\mathrm{t}})}{\partial\theta_{\mathrm{i}}}\delta\theta_{\mathrm{i}} + \frac{\partial(\sin\theta_{\mathrm{i}} / \sin\theta_{\mathrm{t}})}{\partial\theta_{\mathrm{t}}}\delta\theta_{\mathrm{t}} = \frac{\cos\theta_{\mathrm{i}}}{\sin\theta_{\mathrm{t}}}\delta\theta_{\mathrm{i}} + \frac{\sin\theta_{\mathrm{i}}\cos\theta_{\mathrm{t}}}{(\sin\theta_{\mathrm{t}})^2}\delta\theta_{\mathrm{t}}$$

La columna δn presenta este error en el índice, para cada ángulo de incidencia. Puede apreciarse que para ángulos menores la incertidumbre aumenta, ya que $(\sin\theta_{\mathrm{t}})^2$ está en el denominador. Y de manera inversa para ángulo mayores, que es donde la incertidumbre es menor.

Podemos concluir esta sección con el valor estimado del índice de refracción del material usado para construir el prisma semicilíndrico, comunmente llamado Lucita, el cual es $n_{\mathrm{Lucita}} = 1.49 \pm 0.02$. Hay que notar que el valor máximo, para 10 grados, queda incluido dentro de este resultado, considerando los intervalos de error.

4.1.6 Angulo de desviación mínima

Aplicando la ley de snell al paso de luz por un prisma cualquiera se aprecia un fenómeno interesante. A medida que giramos el prisma, suponiendo que iniciamos con luz rasante a una de las caras, el haz saliente tiende a acercarse a la línea extrapolada del haz incidente (de color rosa en la figura siguiente). Seguimos girando al prisma y el haz se sigue acercando más aún, pero desplazandose menos cada vez, hasta que prácticamente se detiene, y al continuar girando, el haz !regresa nuevamente! alejándose de la trayectoria. Este ángulo se conoce como de desviación mínima, y tiene que ver con el ángulo del prisma y el índice de refracción del material con que está hecho.



En el laboratorio montamos un prisma en un goniómetro (Ref. Ealing), con resolución en los giros de 0.01 grados. La base del prisma tiene ajuste vertical y con dos inclinaciones, ortogonales entre sí. Autocolimamos al prisma con un láser de HeNe, de manera similar a como se hizo con las lentes. En esta posición leemos el valór del ángulo en las reglillas, este es nuestra posicón "cero". Localizamos el ángulo de desviación mínima, ayudandonos de una pantalla con marcas de referencia. Leemos la posición angular en la reglilla, y restamos respecto al "cero", este es el valor del ángulo de desviación minima θ_{dm} .

Con el valor θ_{dm} utilizamos un nomograma [8] el cual deriva el valor del índice de refracción, dados los ángulos del prisma y de desviación mínima. En nuestro caso medimos $\theta_{\text{dm}} = 48^o$, con lo que el valor de índice de refracción es de 1,61. Note que únicamente pueden tenerse 2 decimales, pero dada la simplicidad del arreglo, resulta un método muy conveniente para este propósito.

4.2 Coeficientes de Fresnel

La luz se refleja parcialmente al cambiar de medio, y parcialmente se transmite, y parcialmente se absorbe y dispersa. Partiendo de que las componentes del campo eléctrico paralela a la interfaz tiene continuidad en la frontera, es decir son iguales en ambos medios, puede demostrarse que

$r = \frac{n_i - n_t}{n_i + n_t}$ y $t = \frac{2n_t}{n_i + n_t}$,

conocidos como los coeficientes de Fresnel (Ref. [1], pag. ww). Indican la fracción de la amplitud del campo eléctrico que es regresada al medio incidente y la que es tranmitida al siguiente medio (ver figura 1). Las cantidades medibles son la reflectancia (R) y transmitancia (T), que se deducen por el vector de Stokes, y se propaga en la dirección en que viaja la onda (no siempre es así), perpendicular a los campos eléctrico y magnético. En términos de los coeficientes de Fresnel, la R y T están definidas como sigue:

$R = r^2$ y $T = t^2$

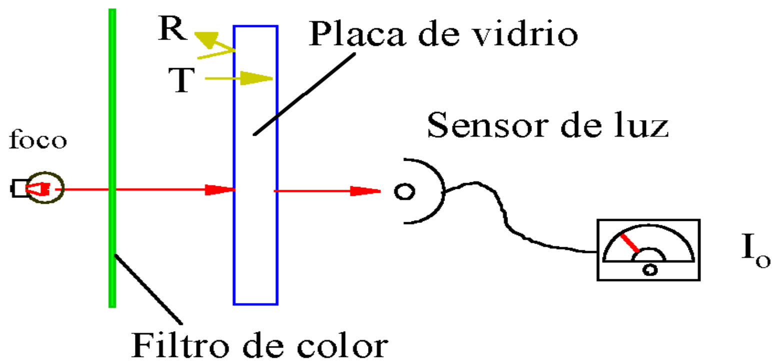
Estas cantidades son un indicador de la semejanza entre las propiedades ópticas de los dos medios en que se propaga la luz. Si la diferencia es pequeña la reflectancia también lo es, y viceversa. Esto explicaría que el hombre invisible, si existiera, estaría ciego, no podría enfocar imágenes, de otra manera lo veríamos, al menos veríamos dos lentecillas flotando en el espacio.

Podríamos preguntarnos, si el vidrio en aire, suponiendo un índice de 1.5 para el primero, refleja el 4% de la energía incidente, porque cuando está molido no nos deja ver a través de él? Su apariencia es blanca, como la sal, el azúcar y la nieve, que son otros ejemplos similares. La respuesta es que la luz incidente encuentra no una superficie, sino muchas de ellas, en forma desordenada, dando lugar a múltiples reflejos que a su vez llegan a otros granos de vidrio o sal o azúcar o agua, y así de manera indefinida. Eventualmente, parte de la luz dispersada de esta manera, llega a nuestros ojos, sin orden alguno, como viniendo de varias direcciones. Un artículo interesante es el escrito por XXX, preguntando ¿a dónde se va el blanco de la nieve? [10].

Dado que la reflectancia y transmitancia están ligados a las propiedades del material donde incide la luz, al medirse R y T puede hacerse la inversión, esto es obtener n. Es precisamente ésta la función de los espectrofotómetros. Más aún, si hay absorción, la medida de ella permite obtener la concentración de la muestra, cuestión que se emplea diariamente en los laboratorios de análisis clínicos, para la determinación de enfermedades o saludes en las personas, animales y plantas.

4.2.1 Espectrómetro simple

Para ilustrar el principio de funcionamiento de un espectrómetro, montamos en el laboratorio un arreglo sencillo que nos permite medir la transmitancia de objetos no difusores. El arreglo es como sigue:

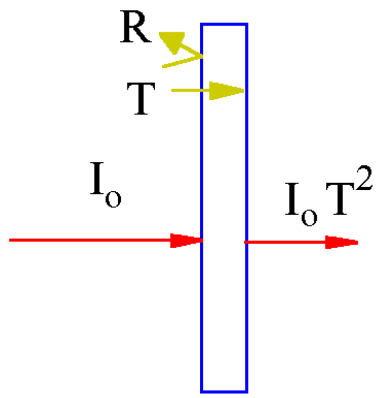


Para medir con el espectrómetro es necesario obtener la respuesta del instrumento, esto es, la señal obtenida en condiciones controladas, SIN la muestra a caracterizar. Esta es la señal de referencia I_{ref}, que se almacena en papel, disco o memoria; se introduce la muestra y la señal medida I_{mue} se divide entre la anterior, de referencia. Este procedimiento es válido tanto para transmisión como para reflexión.

$T = \frac{I_{Tmue}}{I_{ref}}, \ R = \frac{I_{Rmue}}{I_{ref}}$

Con este procedimiento cancelamos los efectos de la fuente de luz, la transmisión del filtro, la repuesta del detector y la electrónica, ya que están tanto en el numerador como en el denominador, y su cociente da uno, suponiendo que nada cambia en todas la partes, excepto que introducimos la muestra.

Para confirmar la validez de lo anterior, determinemos la transmitancia de una placa de vidrio, midamos su transmitancia y de allí determinemos su índice de refracción. Debemos tener cuidado, ya que la placa de vidrio tiene dos superficies, en cada una de ellas se aplica la relación de Fresnel, con lo que a la salida tendremos algo como en la figura siguiente:

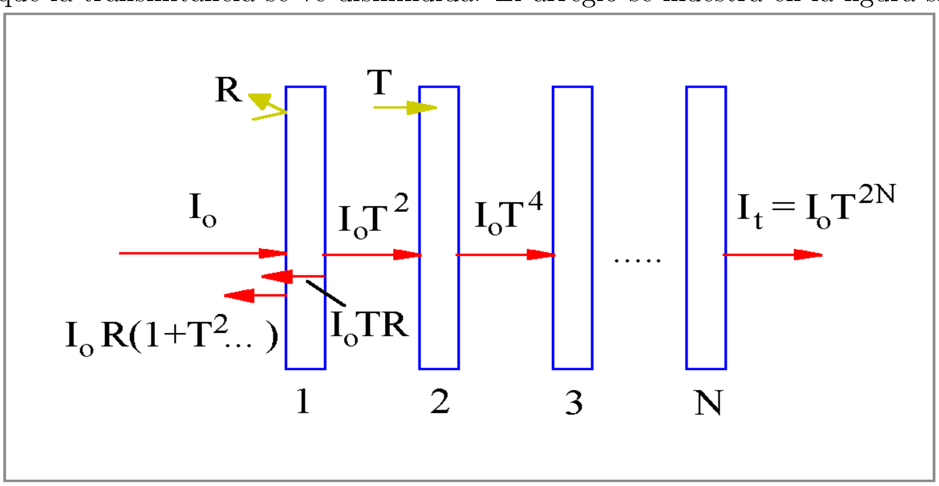


donde la $T = t^2$ y t es el coeficiente de transmisión, definido en el apartado 4.2. , de aquí que tenemos

$T = t^2 = \left[\frac{2n_t}{n_i + n_t}\right]^2$,

con medio incidente al aire, $n_{\rm i} = 1.0$. Note que la cantidad medida es T^2, de donde el índice de refracción del vidrio es igual a $n_{\rm t} = 1.51$ para la región espectral seleccionada por el filtro de color. Medimos para tres filtros de color diferentes, el NHJ, el KJI, POL, con los que se obtienen los valores de índice n1, n2, n3, que son muy parecidos entre sí, lo que indica que la dispersión del índice es casi nula, al menos en la parte visible.

Otro ejercicio que hicimos fue el poner varias placas de vidrio, en serie, de manera tal que la transmitancia se ve disminuida. El arreglo se muestra en la figura siguiente.



Medimos la transmitancia para una, dos, tres y cuatro placas de vidrio.

Una aplicación inmediata que surge del ejercicio anterior es la medición de absorbencia de la luz, como una función de la distancia o de la concentración. El segundo caso se conoce como la ley de Lambert-Beer, el primero sirve para medir las brechas prohibidas o gap de los semiconductores.

4.2.2 Absorción

Ley de Lambert-Beeer $A = abc$

donde A es la Absorbencia, a es absorción molar, b es el espesor de la muestra, c es la concentración [16].

Faltan detalles.....

Brecha de energía La manera más directa y simple de probar la estuctura de bandas de semiconductores es la medición del espectro de absorción. En el proceso de absorción un fotón de energía conocida excita un electrón de un estado bajo de energía a un estado alto. Por lo tanto, al insertar un trozo de semiconductor a la salida de un monocromador y estudiando los cambios en la radiación transmitida es posible descubrir todas las posibles transiciones de un electrón puede hacer y aprender mucho sobre la distribución de estados.

La absorción se expresa en términos del coeficiente $\alpha(h\nu)$ el cual se defiene como la razón relativa del decaimiento de la intensidad de luz $I(h\nu)$ a lo largo de la trayectoria de propagación [11]

$\alpha = \frac{1}{I(h\nu)} \frac{d[I(h\nu)}{dx}$

Por otro lado, la absorción se tiene tambien en la forma

$\alpha = \frac{4\pi\kappa}{\lambda}$ donde κ es la parte imaginaria del índice de refracción ($\widehat{n} = n - i\kappa$), llamada también coeficiente de extinción.

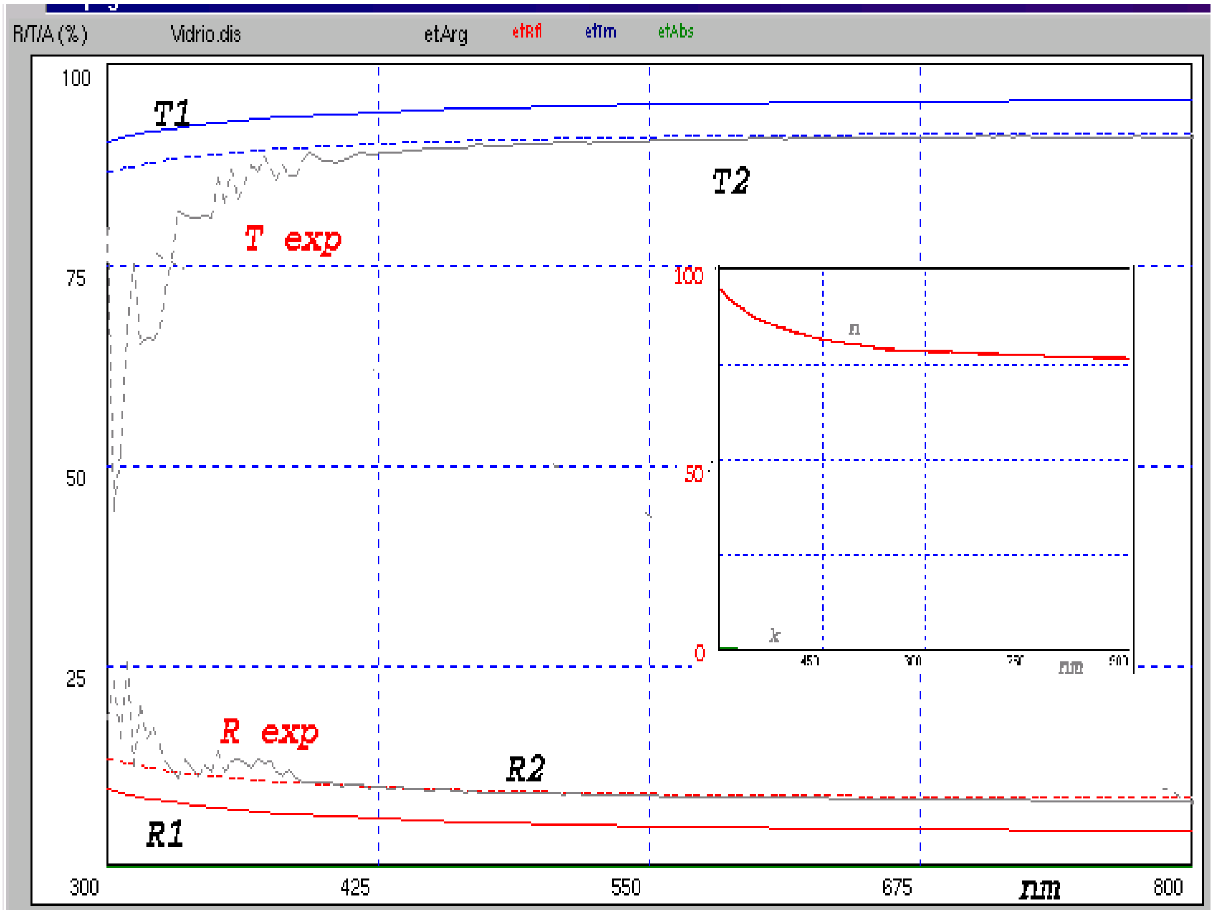
La absorción fundamental refiere a la transición banda-banda o la transición excitónica, es decir, a la excitación de un electrón del estado de valencia al estado de conducción.

4.2.3 Espectrofotometro de doble haz

Existen instrumentos que hacen la tarea descrita en el apartado 4.2.1 de manera automática, y no sólo normalizan las medidas, sino que cambian el color a iluminar. Generalemente emplean monocromador de rejilla de difracción, en lugar del filtro de color, aunque hay sistemas dedicados a una serie discreta de colores, como los que emplean los químicos clínicos, donde se siguen usando los filtros de banda angosta.

Hemos usado el espectrofotómetro Perkin Elmer, ubicado en el CCMC, que tiene doble haz, y doble monocromador. Permite medir de 185 a 2,500 nm, ya que usa dos lámparas, una de tungsteno (IR-VIS) y otra de deuterio (UV), y dos detectores (IR y VIS-UV). El doble monocromador reduce la luz extraviada.

Colocamos una placa similar a las usadas en el espectrómetro simple, y graficamos su espectro, mostrado en la figura inferior.



Junto con el espectro medido hemos graficado la simulación de la transmitancia de una placa de vidrio, ajustando el índice de refracción de manera tal que reproduzca la curva experimental, utilizando para ello los osciladores de Lorentz [11].

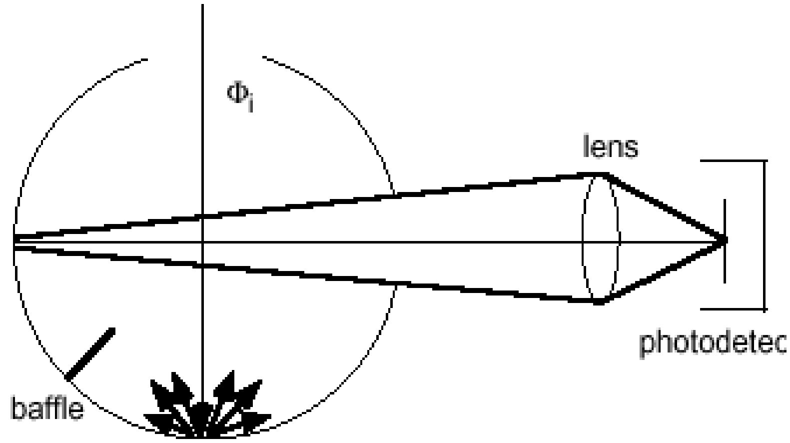
Con esta metodología puede obtenerse tanto la disperción del índice, la brecha de energía, y si hay una capa delgada encima del vidrio, el espesor de la película.

4.2.4 Esfera de integración

Se ha mencionado en la introducción que la luz es reflejada, transmitida, absorbida y esparcida. Hemos tocado, aunque brevemente, las tres primeras componentes de la luz, al penetrar a un medio. El esparcimiento, aún y su importancia en la ciencia, deja mucho que desear en cuanto a su estudio, dada la complejidad de los sistemas [13], [14].

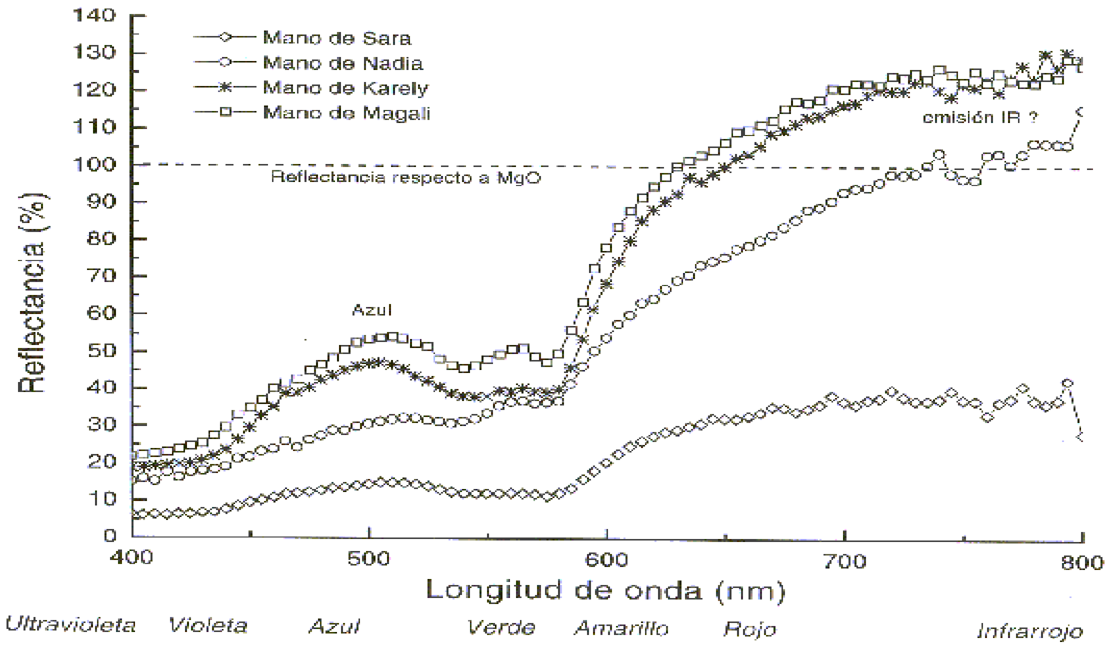
En muestras no dispersoras hay una sola interfaz frente al haz de luz incidente, y de allí parte un solo haz reflejado y uno solo transmitido. En cambio, en superficies dispersoras, de un haz entrante pueden salir una multitud de rayos reflejados y transmitidos. Si nuestro detector, de un área limitada, lo colocamos para capturar cualquiera de los dos, medirá apenas una fracción de la energía radiante, engañando a nuestras medidas.

La manera con que puede capturarse prácticamente toda la energía difusa es empleando una esfera de integración, como la que sigue



El haz vertical, que entra por agujero en la esfera llega hasta la muestra, en la parte inferior de la esfera. La luz sale dispersa en todas direcciones, pero capturada por la superficie de la esfera, hecha de un material poco absorbente y altamente reflector [15, 13]. Obviamente, una fracción de la luz sale por el agujero de entrada y el de detección, pero la fracción es despreciable y puede tomarse en cuanta al momento de calcular la R. Otro agujero observa una sección de la esfera, con una lente que la enfoca sobre un detector de luz. Esta señal es la empleada para medir la R. Las lecturas pueden hacerse como en el caso del espectrómetro simple, turnando la muestra a medir con una referencia conocida, generalmente igual al material de la esfera. Registrando ambas lecturas y haciendo el cociente entre ambas, determinamos la Reflecancia. En el espectrofotómetro del CCMC, que tiene una esfera de integración como accesorio, utiliza tambien un doble haz para hacer la normalización de manera automática. Un haz de luz incide en una sección de la esfera y otro sobre la muestra, de manera alternada, la electrónica y el detector saben en que momento está midendose cada una, y realiza la operación de división, para cada longitud de onda.

La gráfica siguiente muestra varios espectros de reflexión difusa, todos corresponden a manos de personas, y las posibilidades son ilimitadas. El espectro por si solo no proporciona información, debe ir acompañado de datos complentarios y, como en el caso de la mano, aislar el aspecto que se desea resaltar. Por ejemplo, puede apreciarse un aumento en la reflectancia en la región de azules (500nm) , en todos los espectros, pero al en tanto no le incorporemos la fisiología del cuerpo humano, no le podemos asignar una propiedad a ese incremento.



Note que en la región de infrarrojos (longitud de onda mayor que 800nm), la reflectancia aumenta, inclusive llega a ser mayor que la reflectancia de la pastilla de referencia. Sabemos, por el material con que está hecho la pastilla (MgO), la reflectancia es del orden de 92%, y el espectro de la mano llega a 130%. Esto puede explicarse si suponemos que las manos, y todo el cuerpo, están radiando calor, que está en la región del infrarrojo.El espectro con menor reflectancia, inclusive en la parte IR, suponemos que se debe a que los dedos que cubren el orificio de la muestra, dejan espacios por donde la luz escapa hacia afuera de la esfera; la otra posibilidad es que la persona tiene una respuesta radicalmente diferente. Habría que comprobar estas hipótesis con experimentos adicionales, cuestión que sale de la perspectiva de esta práctica.

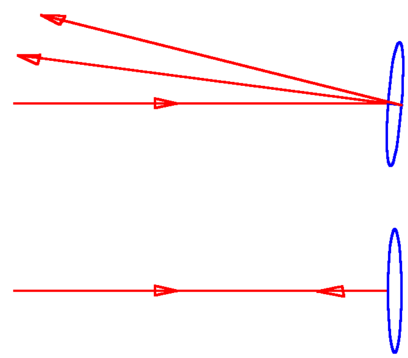
Los espectrómetros con esfera de integración son ampliamente utilizados en la industria, como la del papel, pinturas, autos, alimentos, etc. donde el control del color es fundamental, ya sea para repetir una tonalidad, o para garantizar la frescura de un producto. Con frecuencia se les llama colorímetros. Una búsqueda rápida en la red www, proporciona decenas de sitios sobre el tema (Ref. 15)

4.3 Autocolimación

El láser de He-Ne tiene cualidades muy importantes: intensidad suficiente, 2 mW, concentrada en un área pequeña, un círculo de 2 mm. La divergencia del láser es lo suficientemente pequeña como para despreciarse en nuestros experimentos, apenas uno miliradianes. Por muchos años esta herramienta no se tenía, y la alineación de componentes ópticas era, y sigue siendo, pero en menor escala, delicada y difícil. Una lectura altamente recomendada, que describe las diferentes aplicaciones de esta técnica es la publicada por Edmund Scientific [9].

La técnica de autocolimado es sencilla. La intensidad del láser permite que, a pesar de que las reflexión de la luz al pasar de aire a vidrio sea de 4%, podamos ver al haz reflejado sin dificultad. La ley de reflexión es válida en cualquier parte de una superficie (aún en las rugosas), por lo que, dependiendo del lugar donde incida el láser, será la dirección del haz reflejado (parte a de la fig) . En el caso de una lente simple, con dos interfaces aire-vidrio, tendremos dos reflejos, cada uno cumpliendo la ley mencionada.

En caso de que el haz llegue a cero grados, incidencia normal, el haz reflejado coincide con el haz incidente (parte b de la fig). Si es una lente con los ejes ópticos bien alineados, tendremos los dos haces regresando sobre el incidente. Si no es así, indicaría que las superficies hacen una cuña entre sí, que los ejes no coinciden. Puede apreciarse que la superposición de los haces reflejados es buena cuando se logran franjas de interferencia con ellos. Esto es posible debido a la longitud de coherencia de la luz del láser (del orden de varios centímetros, como se verá en la práctica de interferencia), mucho mayor que el espesor de la lente (de menos de un centímetro).



Aquí aprovechamos el láser para encontrar el eje óptico de una o más superficies ópticas. Una lente simple (lupa) que puede conseguirse en cualquier comercio local, da buenos resultados, a pesar de ser de un precio mínimo.

Colocamos anteojos, lentes para corregir la vista, calibrados para dos participantes en la plática. Montamos cada uno en un soporte que tiene 5 grados de libertad [12]. Fijamos al láser sobre una superficie horizontal. Buscamos que las reflexiones en cada superficie de la lente regresen sobre el haz del láser. Se requiere un poco de práctica para efectuar este paso. Una vez autocolimados los haces reflejados, marcamos sobre la lente (con una cinta adhesiva para protegerla) el lugar en donde llega el haz indicente sobre la lente. Repetimos para el segundo lente. Es de esperarse que las marcar estén, primero describiendo una recta horizontal, paralela al soporte superior de las lentes; segundo que la distancia entre las dos marcas sea parecida a la separación interpupilar de cada usuario. Pudimos apreciar que no fue el caso, en ambos pares de lentes. En uno de ellos hay una diferencia vertical de 0.6 cm. En el otro par una marca cae prácticamente afuera del aro, en tanto que la otra queda casi en el lugar esperado. Sería recomendable notificar al oftalmólogo que recetó los anteojos que verifique el centrado de las lentes antes de entregar al cliente. Estas diferencias están obligando a los ojos a adecuarse para una mejor visión, cansando la vista o deteriorando a los músculos del ojo pemanentemente.

5 Conclusiones

En esta práctica hemos reforzado los conceptos de

- Refracción, y la ley de Snell,
- Reflexión, interna y externa,
- Transmisión,
- Coeficientes de Fresnel,
- Autocolimación,
- Espectrofotómetro, simple y doble haz,
- Esfera de integración,

y muy someramente, la absorbencia y esparcimiento, entre otros. Con experimentos sencillos pudimos medir la relación entre los ángulos de incidencia y transmisión, la fracción de luz transmitida, observamos los ángulos típicos, como reflexión total interna, ángulo de desviación mínima, y con ellos pudimos medir las propiedades ópticas del material.

Debemos enfatizar que los conceptos anteriores se aplican a cualquier fenómeno ondulatorio: sonido, oleaje marino, fenómenos cuánticos, y por supuesto a la luz. Consideramos que es importante su mejor comprensión y el manejarlos correctamente.

Realizamos unos videos sobre tres experimentos, los cuales serán editados y puestos en formato mpeg. Eventualmente podrían llegar a formar una base de experimentos de física.

6 Reconocimientos

Los datos experimentales fueron proporcionados por Mariana Oviedo [17], 4^o semestre de la carrera de Física, UABC. Este reporte fue preparado usando LaTeX [19] , con una fachada Lyx [18], dentro del sistema operativo Linux [20]. Las figuras fueron preparadas con el programa Tek Illustrator [21].

References

[1] *Óptica*, E. Hecht y A. Zajak, Fondo Educativo Interamericano, 1977

[1] *Thin-Film optical Filters*, A. Macleod, Adam Hilger 1986

[3] *Optics*, Miles V. Klein, Johnn Wiley and sons 1970

[2] Video Enciclopedia of physics, faltan datos ???

[5] CI-UNAM, donativo del Centro de Instrumentos a la UABC, 1988, fabricado en sus instalaciones.

[6] http://www.kerncoinstr.com/11n14.htm, o también http://www.edmundoptics.com

[7] Coherent Ealing Electro Optics Ltd, Auburn Division Sales, Watford, Herts, England

[8] *Nomograph for the calculation of the index of refraction of a prism*, Adam Zanker, Appl. Opt. 13, 2449 (1974), .

[9] Manual sobre Colimators de Edmund Scientific.

[10] *When snow melts, where does the white go?*, Ray Williamson, Optics and Photonics News, Enero 1995, pag. 53

[11] Optical properties of solids, Wooten, Addison Willey, 1972

[12] *Building scientific apparatus*, J.H. Moore, C.C. Davis y M. A. Coplan, Addison Wesley, 1983

[13] *Reflectance spectroscopy*, Gustav Kortum, Principles, methods and applications. Springer Verlag, 1969

[14] *Absorption and scattering of light by small particles*, C. Bohren and D. Huffman, Wiley interscience 1998

[15] http://www.labsphere.com/tech_info/default.asp?Show=TechPub

[16] http://dl.clackamas.cc.or.us/ch105-04/colorime.htm

[17] correo-e: oviedo@uabc.mx

[18] http://www.lyx.org/

[19] http://www.latex-project.org/

[20] http://www.linux.org/

[21] Tek Illustrator, CAD, http://www.tommysoftware.com/