

Laboratorio de Física II (ByG)  
2do cuat. 2015

**Guía 1:** Reflexión y refracción de la luz<sup>†</sup>.

Objetivos

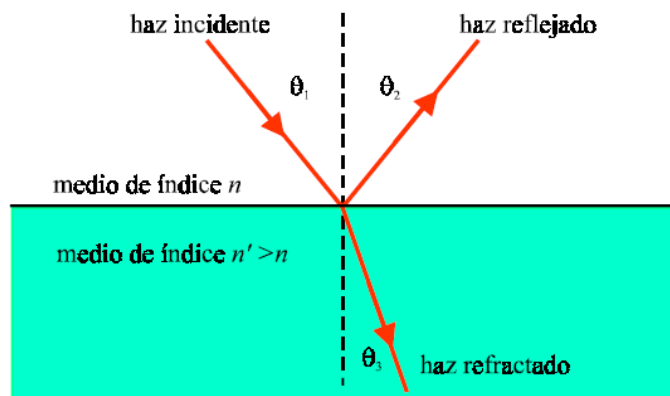
Estudiar experimentalmente las leyes de la reflexión y la refracción de la luz. Determinar el índice de refracción de un material. Observar del fenómeno de reflexión total interna.

Introducción

Cuando un haz de luz incide sobre la superficie que separa dos medios, en los cuales la luz se propaga con diferentes velocidades, parte de la misma se transmite y parte se refleja, como se indica esquemáticamente en la Fig. 1. Para un medio cualquiera, el índice de refracción  $n$  se define como:

$$n = \frac{c}{V}$$

donde  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío y  $V$  la velocidad de la luz en ese medio [1].



**Figura 1** Esquema de reflexión y refracción de un haz de luz.

El objetivo de los siguientes experimentos es estudiar las propiedades generales de la reflexión y refracción de la luz.

Para pensar:

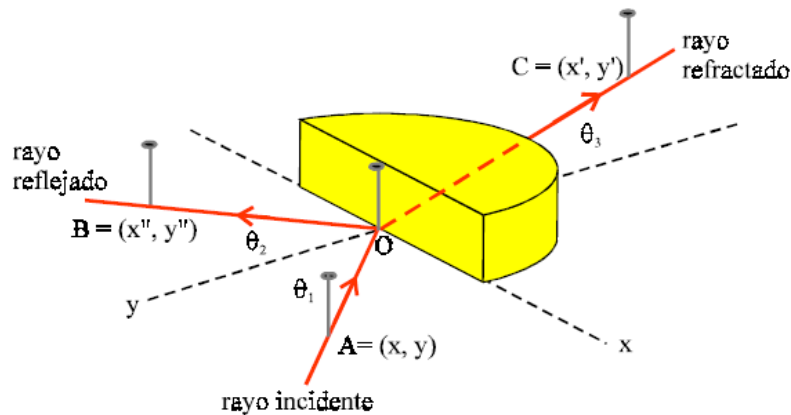
Dado un ángulo de incidencia ¿Cómo son los ángulos de reflexión y de refracción? ¿De qué magnitudes puede depender?

¿Qué métodos se pueden usar para la determinación de los ángulos? ¿Qué incerteza corresponde a cada método?

¿Qué rango de ángulos de incidencia es conveniente estudiar?. ¿El fenómeno observado en todo el rango estudiado será siempre el mismo?

## Actividades

Para la realización de este experimento dispondremos de un semicilindro de acrílico (media caña) de aproximadamente 15 cm de diámetro y 3 cm de altura. Alfileres y una base blanda colocarlos, y un puntero láser. El objetivo de este experimento es investigar la relación entre el *ángulo de reflexión*,  $\theta_2$ , y el *ángulo de refracción*,  $\theta_3$ , en función del *ángulo de incidencia*  $\theta_1$ , todos ellos definidos respecto de la línea normal de la superficie de separación entre los dos medios. El dispositivo se muestra esquemáticamente en la Fig. 2.



**Figura 2** Dispositivo sugerido para estudiar las leyes de la reflexión y la refracción.

## Refracción

Tomamos el punto O como origen de coordenadas. Elegimos el eje  $x$  coincidiendo con la cara plana del mismo y tomamos la normal a dicha cara como el eje  $y$ , respecto del cual medimos los ángulos. El semicilindro se apoya sobre una superficie plana, sobre la que colocamos un papel milimetrado para determinar las coordenadas de cada punto del plano. Un modo simple de determinar la dirección de los rayos de luz consiste en usar tres alfileres, uno de los cuales se mantiene fijo en el centro O: Para determinar la dirección de los rayos incidentes y refractados, se coloca un alfiler en la posición A (cuyas coordenadas son  $(x, y)$ ) otro en O (centro del semicilindro, justamente fuera del mismo) y el tercero en la posición C (cuyas coordenadas son  $(x', y')$ ). La posición de este último alfiler se elige de modo tal que al observar horizontalmente los tres alfileres todos aparezcan alineados. Para facilitar el posicionamiento de los alfileres, puede colocarse el semicilindro encima de una tabla blanda, corcho o cartón blando, que permitan la penetración de alfileres fácilmente. Para realizar el experimento, es importante mantener fijo el alfiler del centro de semicilindro (O). El alfiler en la posición A define el ángulo de incidencia. Mirando desde el lado curvo del semicilindro, se procede a colocar el tercer alfiler en la posición C de modo de ver a los tres alfileres alineados. Cuando se haya logrado tal alineación, se registran los valores de las coordenadas  $(x, y)$  y  $(x', y')$ . Es conveniente repetir este último experimento de modo que el ángulo de incidencia  $\theta_1$  varía desde  $0^\circ$  hasta  $80^\circ$  en pasos de aproximadamente  $10^\circ$ . Si dispone de un puntero láser (o un láser común) es posible visualizar la marcha de los rayos. Para ello haga incidir el láser de modo que el haz incida en la dirección definida por AO, a través de los alfileres, verifique que el haz refractado pasa efectivamente por el punto C.

## Reflexión

Realice el mismo estudio anterior pero con el rayo reflejado. Para ello usando un puntero láser incidiendo en la dirección AO, determine las coordenadas ( $x''$ ,  $y''$ ) del punto B.

- Represente gráficamente  $\theta_3$  en función de  $\theta_1$  y  $\theta_2$  en función  $\theta_1$ . También represente  $\text{sen}(\theta_1)$  en función de  $\text{sen}(\theta_3)$ . Analice las distintas dependencias y discuta sus conclusiones.

- La ley de Snell establece que la relación entre el ángulo incidente ( $\theta_1$ ) y el refractado ( $\theta_3$ ) es:

$$n_1 \cdot \text{sen}(\theta_1) = n_3 \cdot \text{sen}(\theta_3)$$

donde  $n_1$  es el índice de refracción del medio donde se propaga el rayo incidente y  $n_3$  es el índice de refracción correspondiente al medio donde se propaga el rayo transmitido.

Similarmente, la ley de la reflexión establece que el ángulo de incidencia ( $\theta_1$ ) es igual al ángulo reflejado ( $\theta_2$ ), esto es:

$$\theta_1 = \theta_2$$

¿Qué puede decir acerca de la validez de la ley de Snell y la ley de la reflexión para el caso que acaba de estudiar experimentalmente?

- A partir de sus gráficos determine el índice de refracción de la luz en el material del semicilindro ( $n_3$ ). Compare el valor obtenido en su experimento con los valores de tablas para el material en estudio. Recuerde que el índice de refracción del aire en condiciones normales de presión y temperatura es:  $n_1 = 1.00029$ .

- Para estimar la incertidumbre de los ángulos medidos, varíe ligeramente la posición de los alfileres, de modo tal que, a simple vista, parezcan que siguen alineados. Los intervalos de ángulos para los que esta condición de alineación se sigue cumpliendo dan una estimación de la incertidumbre de la determinación de los ángulos. Usando estas consideraciones estime la incertidumbre asociada a la determinación de  $n_3$ .

-Seguidamente, invierta la dirección de incidencia, es decir, haga que el haz incida pasando por la dirección CO y verifique que el mismo pasa por A. Igualmente, si el rayo incidente sigue la dirección BO, verifique que el reflejado sigue la dirección OA. Esta propiedad notable de la luz se conoce como el *principio de reversibilidad óptica*, que establece que, en ausencia de absorción, si se invierten la dirección de la marcha de los rayos de luz, las trayectorias no se alteran. Más generalmente, este principio es una consecuencia del principio de *reversibilidad temporal* de las ecuaciones de la física.

## Reflexión total interna

Investigue el fenómeno de *reflexión total interna*. Para ello haga incidir un láser por el lado la superficie curva de la Fig. 2 y que pase por el punto O (dirección radial). La luz llegará a la cara plana del semicilindro radialmente desde un medio que tiene índice de refracción mayor ( $n_3$ ) a otro de índice menor ( $n_1$ ) que el aire. Observe la transmisión de la luz del semicilindro al aire mientras va cambiando el ángulo ( $\theta_3$ ) de incidencia de la luz sobre la interfase acrílico-aire.

¿Encuentra algún ángulo para el cual la luz deja de transmitirse al aire? Si encuentra dicha condición, esto significa que para dicha incidencia, la reflexión es *total* en la superficie plana interna del semicilindro.

-Usando el puntero láser, estime en forma directa el valor del *ángulo crítico* (o *límite*)  $\theta_{crit}$  para el cual deja de existir el rayo transmitido. Otro modo de determinar el valor de  $\theta_{crit}$  consiste en representar gráficamente  $sen(\theta_3)$  en función de  $sen(\theta_1)$ . A partir de la recta que mejor ajusta los datos experimentales, determine el valor de  $\theta_3$  para el cual  $sen\theta_1 = 1$ . Este valor de  $\theta_3$  es  $\theta_{crit}$ .

Para  $\theta_3 > \theta_{crit}$  no hay rayo transmitido. Usando el puntero láser, compruebe que esta condición se cumple en el caso en estudio y compruebe también que toda la luz incidente se refleja en la cara interna del semicilindro.

-Use la Ley de Snell sujeta a la condición  $sen(\theta_1) = 1$  y establezca una relación entre  $\theta_{crit}$  y el índice de refracción del material del semicilindro ( $n_3$ ). Estime de esta manera el índice de refracción del semicilindro y compare con los valores hallados anteriormente.

Uno de los usos de la reflexión total interna: TIRF o microscopía de fluorescencia por reflexión total interna.

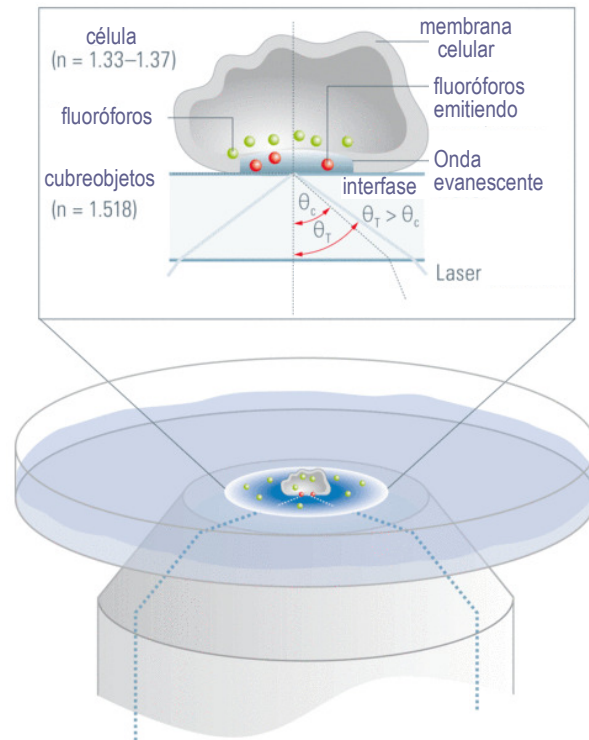
La Microscopía de Fluorescencia por Reflexión Total Interna (TIRF o TIRFM) es una variante de la Microscopía de Fluorescencia, mediante la cual pueden observarse preparados marcados con fluoróforos. Los fluoróforos o moléculas fluorescentes tienen la propiedad de absorber luz de una determinada longitud de onda (color) y emitir luz en otra longitud de onda. Gracias a esta propiedad, la luz proveniente de la fluorescencia puede separarse de la luz de la fuente mediante filtros espectrales, lo que permite visualizar dentro de un preparado sólo aquellas regiones marcadas con los fluoróforos.

TIRF hace uso de la propiedad de reflexión total interna (estudiada en esta guía), que se da cuando un haz de luz incide desde un medio de mayor índice de refracción a uno de menor índice de refracción. En un microscopio TIRF, el láser incide sobre la interfase entre el cubreobjetos y el medio acuoso de la muestra en un ángulo mayor que el ángulo crítico. En esta situación, el haz será “totalmente” reflejado en la interfase por Reflexión Total Interna (RTI).

En condiciones de RTI, cambian las características de la propagación de la luz en el medio de la muestra, y aparece un tipo de propagación que se conoce como onda evanescente: una onda cuya intensidad de luz decae exponencialmente con la distancia a la interfase (Fig. 3).

La ventaja de TIRF, es que la onda evanescente penetra en la muestra sólo unos pocos cientos de nanómetros, lo que hace que las imágenes obtenidas provengan de una sección de la muestra correspondiente sólo a este espesor. Eso mejora varias veces la resolución axial de esta microscopía respecto de otras técnicas con seccionamiento axial como la microscopía confocal (la resolución axial de un microscopio confocal es del orden de los 1000 nm).

Por otra parte, dado que el volumen de observación está en justo en la interfase, la técnica es específica para estudiar procesos que ocurren en la membrana celular o involucrados en la conexión entre la célula y el sustrato.



**Figura 3** Esquema del principio de funcionamiento de un microscopio TIRF. Tomado de [1].

Algunas preguntas<sup>‡</sup>:

- ¿Cuál es el ángulo crítico para una interfase cubreobjetos-medio acuoso? (los índices de refracción están en la Fig.3). ¿Cómo se compara con el ángulo de Reflexión Total hallado en la esta actividad?
- ¿Para cual de estos experimentos usarías un microscopio TIRF?: difusión de una proteína en el núcleo de una célula adherente o difusión en la membrana de una célula adherente. ¿Por qué?

En las referencias [2-4] hay más información sobre los conceptos y aplicaciones de la microscopía TIRF.

## Referencias

<sup>†</sup>Extraído de: S. Gil y E. Rodríguez, *Física re-Creativa*, Prentice Hall, Buenos Aires, 2001.

<sup>‡</sup>Tomadas de L. Estrada, *Algo más que Reflexión y Refracción de la luz...*, guía de laboratorio de Física 2 (ByG), primer cuatrimestre 2015.

[1] F. Sears, M. Zemansky, H. Young y R. Freedman, *Física universitaria*, vol. 2, AddisonWesley Longman, México, 1999.

[2] <http://www.leica-microsystems.com/science-lab/total-internal-reflection-fluorescence-tirf-microscopy/>

[3] [www.microscopyu.com/articles/fluorescence/tirf/tirfintro.html](http://www.microscopyu.com/articles/fluorescence/tirf/tirfintro.html).

[4] D. Axelrod, *Total Internal Reflection Fluorescence*, *Annu. Rev. Biophys. Bioeng.* 13, 247-268.