Total internal reflection: light on the other side

Reflexión total: luz al otro lado

Sebastián Jarabo

Departamento de Física Aplicada – Facultad de Ciencias – Universidad de Zaragoza
Corresponding author email: sjarabo@unizar.es

ABSTRACT:

The evanescent wave associated with the total internal reflection is clearly demonstrated by taking a laboratory photograph. Total internal reflection takes place at the interface of glass (equilateral prism) and water. Fluorescence generated by the evanescent wave can be observed due to a dye (rhodamine B) dissolved in water.

Key words: Optics Education, Optics Experiments, Total Internal Reflection, Evanescent wave.

RESUMEN:

Se presenta una fotografía de laboratorio que ilustra la existencia de la onda evanescente asociada al fenómeno de reflexión total. La reflexión total se produce en la superficie de separación entre vidrio (prisma equilátero) y agua. En el agua se ha disuelto un colorante (rodamina B) que emite fluorescencia debido a la energía de la onda evanescente presente en el segundo medio.

Palabras clave: Educación en Óptica, Prácticas de Óptica, Reflexión Total, Onda Evanescente.

Fig.1. Demostración experimental de la existencia en el segundo medio de la onda evanescente asociada al fenómeno de reflexión total.

REFERENCES AND LINKS

[1] S. Zhu, A. W. Yu, D. Hawley yR. Roy, "Frustrated total internal reflection: A demonstration and review", Am. J. Phys. **54**, 601-607 (1986).
[2] W. J. McDonald, S. N. Udey y P. Hickson, "Almost Total Reflection", Am. J. Phys. **39**, 1141-1142 (1971).
[3] F. Albiol, S. Navas y M. V. Andrés, "Microwave experiments on electromagnetic evanescent waves and tunneling effect", Am. J. Phys. **61**, 165-169 (1993).
[4] R. Weigand y J. M. Guerra, "Demonstration of the evanescent wave through absorption", Am. J. Phys. **64**, 913-916 (1996).
[5] F. P. Zanella, D. V. Magalhães, M. M. Oliveira, R. F. Bianchi, L. Misoguti y C. R. Mendonça, "Frustrated total internal reflection: A simple application and demonstration", Am. J. Phys. **71**, 494-496 (2003).
[6] D. A. Papathanassoglou y B. Vohnsen, "Direct visualization of evanescent optical waves", Am. J. Phys. **71**, 670-677 (2003).
[7] E. R. Van Keuren, "Refractive index measurement using total internal reflection", Am. J. Phys. **73**, 611-614 (2005).
[8] Y. You, X. Wang, S. Wang, Y. Pan y J. Zhou, "A new method to demonstrate frustrated total internal reflection in the visible band", Am. J. Phys. **76**, 224-228 (2008).
[9] Z. Vörös y R. Johnsen, "A simple demonstration of frustrated total internal reflection", Am. J. Phys. **76**, 746-749 (2008).
[10] R. Salman, S. Rashid y M. S. Anwar, "A visual classroom demonstration of frustrated total internal reflection as an analogue to optical tunnelling", Eur. J. Phys. **34**, 1439–1443 (2013).
[11] G. S. Lándsberg, *Óptica* (segundo tomo, pp. 79-86), Mir, Moscú (1984).

1. Introducción

La reflexión total es uno de los fenómenos ópticos más habituales y extendidos en los libros de texto de todos los niveles educativos y en las demostraciones didácticas dedicadas a temas científicos. Considerando medios homogéneos y siguiendo una descripción básica que asume que la luz se propaga mediante rayos, se demuestra que si la luz se propaga desde un medio a un segundo medio con menor índice de refracción, e incide con un ángulo superior al llamado ángulo límite en la superficie de separación entre dos medios, la luz se refleja totalmente. Como es bien conocido, a partir de la ley de Snell para la refracción, el ángulo límite $\varepsilon_{límite}$ viene dado por la expresión

$$\varepsilon_{límite} = arcsen(n_2 / n_1),\ n_2 < n_1, \qquad (1)$$

donde n_1 y n_2 son los índices de refracción del primer y del segundo medio, respectivamente.

Sin embargo, cuando se describe la luz como una onda electromagnética, el fenómeno de reflexión total no resulta tan simple. De hecho, se produce una onda en el segundo medio (llamada onda evanescente) cuya amplitud se amortigua rápidamente, decayendo de forma exponencial conforme se propaga. La existencia de la onda evanescente indica que parte de la energía consigue atravesar la superficie de separación entre los dos medios. Además, puede conseguirse que la luz pase a un tercer medio si se le acerca lo suficiente a la superficie de separación (reflexión total frustrada). En la Ref. 1 se puede encontrar una magnífica descripción (teórica y experimental) del fenómeno de la reflexión total.

Aunque se encuentran publicadas muchas demostraciones de la reflexión total y de la reflexión total frustrada, apenas se encuentran imágenes en las que se vea la onda evanescente, es decir, en las que se aprecie claramente que hay luz al otro lado de la superficie de separación. Como la reflexión total (frustrada o no) sirve de base para diversas aplicaciones: pantallas táctiles, sensor de lluvia o niveles de líquidos, biosensores, microscopia de fluorescencia por reflexión total, medida de índices de refracción, etc., las demostraciones experimentales [1-10] son enfocadas usualmente pensando en su utilidad práctica y la reflexión total se analiza a partir de medidas de luz transmitida, por diferentes métodos y montajes, pero no llega a verse claramente la onda evanescente.

Y éste es el objetivo de este artículo: presentar una demostración experimental sencilla que resulte muy visual, que permita ver claramente la existencia de luz en el segundo medio y que su intensidad decae rápidamente conforme penetra en él.

2. Así se hizo

La demostración experimental desarrollada es una adaptación del sencillo método propuesto por los científicos rusos L. I. Mandelstam y Seleni [11]. Se dispone un prisma equilátero de vidrio de forma que una de sus caras esté en contacto con un líquido fluorescente. En dicha cara se produce reflexión total siempre que el haz de luz entre al prisma en incidencia normal por cualquiera de las otras dos caras del prisma. Parte de la energía que llega al segundo medio (líquido) es absorbida siempre que la longitud de onda del haz de luz incidente esté situada dentro de alguna banda de absorción de la sustancia fluorescente. El líquido reemitirá una parte de la energía absorbida en forma de fluorescencia. Como la fluorescencia se produce en una longitud de onda diferente y, además es isótropa, se diferencia fácilmente de la luz incidente. Siguiendo este método resulta sencillo preparar un montaje experimental en el que se vean claramente la luz incidente, la luz reflejada y la fluorescencia generada por la onda evanescente (Figura 1).

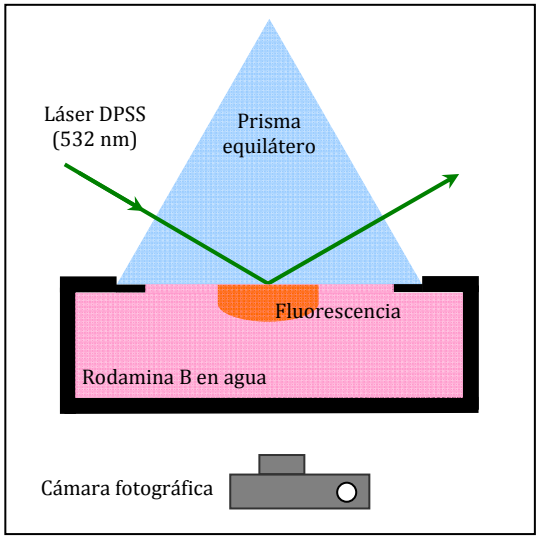

Fig.2. Esquema del primer montaje experimental.

En la Figura 2 se muestra un esquema del montaje experimental. Se empleó un láser de Nd:YVO_4 bombeado por diodo y doblado en frecuencia, que emite 200 mW en 532 nm (verde). Se construyó una cubeta con un perfil de aluminio rectangular al que se le practicó una abertura a lo largo de uno de sus laterales, la cual queda cerrada por una de las caras de un prisma equilátero de vidrio. La cubeta se rellenó con una disolución muy diluida de rodamina B en agua. La rodamina B es un colorante orgánico que presenta fuerte absorción precisamente en la región verde del espectro y que emite fluorescencia en las regiones amarilla y roja (conforme aumenta su concentración, la emisión se desplaza hacia el rojo). Con la fuente de luz empleada se consigue una emisión intensa que puede ser fotografiada fácilmente (cámara digital Olympus, modelo XZ-10, 12 Mp, focal 26-130 mm, f/1.8-f/2.7).

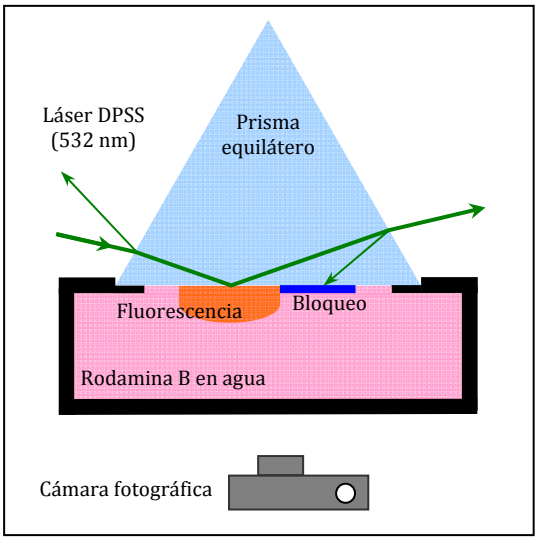

Fig.3. Esquema del montaje experimental final.

Ahora bien, debido a la alta potencia de la fuente, la potencia reflejada en la tercera cara del prisma es lo suficientemente alta como para producir una segunda onda evanescente que también genera fluorescencia, la cual es lo bastante intensa como para dificultar la interpretación del fenómeno. La solución más sencilla consiste en modificar el ángulo de incidencia en la primera cara de forma que modificamos la posición dónde incide la luz reflejada por la tercera cara del prisma y colocar un obstáculo que la bloquee. Así pues, el montaje experimental final está representado esquemáticamente en la Fig. 3.

3. Resultado: la fotografía

Empleando un montaje sencillo, económico y con material habitual en un laboratorio de Óptica se ha obtenido una imagen (Figura 1) que ilustra de forma muy visual la existencia en el segundo medio de la onda evanescente asociada al fenómeno de la reflexión total. Gracias a la difusión que sufre debida al polvo presente en el ambiente, se aprecia claramente el haz incidente y el haz totalmente reflejado en la superficie de separación entre ambos medios. Como el segundo medio es fluorescente, la energía presente en el segundo medio se hace patente en forma de una intensa emisión de color amarillo en la región más cercana al prisma. En cuanto nos alejamos de

la superficie de separación entre ambos medios, la energía de la onda evanescente decae rápidamente, lo que conlleva una emisión de fluorescencia más débil (color rojizo).

Aunque el resultado cumple con el objetivo propuesto, es necesario realizar algunas puntualizaciones. En primer lugar, como el líquido fluorescente absorbe en la longitud de onda del haz incidente, esta absorción también contribuye a que la emisión decaiga conforme nos alejamos de la superficie de separación entre ambos medios. No obstante, como se emplea una disolución de rodamina muy diluida, este decaimiento es bastante más lento que la amortiguación de la onda evanescente y apenas influye.

Otro detalle que se aprecia en la imagen es que el haz láser no es un rayo por lo que no incide en un punto, sino en un área de la superficie de separación entre ambos medios. Debido a ello, la fluorescencia más intensa se ve en un spot elíptico y, además, aunque sea más débil, se emite fluorescencia en una región del líquido mucho más amplia.

Por último, es interesante resaltar que el prisma puede ser prácticamente de cualquier tipo de vidrio, siempre que sea equilátero. Considerando que la incidencia sea normal en la primera cara del prisma, imponiendo en la Ec. (1) que el ángulo límite sea menor o igual que 60 deg y asumiendo que el índice de refracción del agua es 1.33, es suficiente con que el índice de refracción sea mayor o igual que 1.535 para que se produzca reflexión total en la segunda cara. Sin embargo, para un prisma recto, haría falta, como mínimo, que el índice de refracción fuese 1.88, valor demasiado alto para los prismas disponibles habitualmente