

Optical invisibility by refraction index matching... but revealed by fluorescence

Invisibilidad óptica por ajuste de índice de refracción... pero desvelada por fluorescencia

María del Mar Sánchez-López^{1,2,S*}, Ignacio Moreno^{3,S}

1. *Departamento de Física y Arquitectura de Computadores, Universidad Miguel Hernández, 03202 Elche (Alicante), SPAIN.*

2. *Instituto de Bioingeniería, Universidad Miguel Hernández, 03202 Elche (Alicante), SPAIN.*

3. *Departamento de Ciencia de Materiales, Óptica y Tecnología Electrónica, Universidad Miguel Hernández, 03202 Elche (Alicante) SPAIN.*

*) E-mail: mar.sanchez@umh.es

S: miembro de SEDOPTICA / SEDOPTICA member

Received / Recibido: 01/06/2015

Accepted / Aceptado: 18/06/2015

DOI: 10.7149/OPA.48.2.99

ABSTRACT:

The phenomenon of optical invisibility associated to refraction index matching is demonstrated by a series of laboratory photographs. Two pyrex glass recipients, one placed inside the other, are filled subsequently with sunflower oil, resulting in the optical disappearance of the smaller recipient. However, the presence of the smaller recipient can be revealed by using the fluorescence properties of the sunflower oil when incident with light from a simple laser pointer.

Key words: Optics Education, Optics Experiments, Optical Cloaking, Fluorescence.

RESUMEN: Mediante una serie de fotografías de laboratorio se demuestra el fenómeno de la invisibilidad óptica asociada al ajuste del índice de refracción. Dos recipientes de vidrio pyrex, introducidos uno en el interior del otro, se rellenan sucesivamente con aceite de girasol, observándose la desaparición aparente del recipiente de menor tamaño. Sin embargo, la presencia de este recipiente queda desvelada empleando las propiedades de fluorescencia del aceite de girasol cuando se incide con luz de un simple puntero láser.

Palabras clave: Educación en Óptica, Prácticas de Óptica, Invisibilidad Óptica, Fluorescencia.

REFERENCES AND LINKS / REFERENCIAS Y ENLACES

- [1] J. B. Pendry, D. Schurig, D. R. Smith, "Controlling Electromagnetic Fields," *Science* **312**, 1780–1782 (2006).
<http://dx.doi.org/10.1126/science.1125907>
- [2] D. Schurig, J. J. Mock, B. J. Justice, S. A. Cummer, J. B. Pendry, A. F. Starr, D. R. Smith, "Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies," *Science* **314**, 977–980 (2006).
<http://dx.doi.org/10.1126/science.1133628>
- [3] "Invisibility cloak a step closer as scientists bend light 'the wrong way'". *Daily Mail* (London, 11 August (2008).
- [4] A. C. Atre, A. García-Etxarri, H. Alaeian, J. A. Dionne, "A broadband negative index metamaterial at optical frequencies," *Adv. Opt. Materials* **1**, 327-333 (2013).
<http://dx.doi.org/10.1002/adom.201200022>
- [5] J. C. Howell, J. B. Howell, J. S. Choi, "Amplitude-only, passive, broadband, optical spatial cloaking of very large objects," *Appl. Opt.* **53**, 1958-1963 (2013).
<http://dx.doi.org/10.1364/AO.53.001958>
- [6] J. S. Choi, J. C. Howell, "Paraxial ray optics cloaking," *Opt. Express* **22**, 29465-29478 (2014).
<http://dx.doi.org/10.1364/OE.22.029465>

- [7] <http://www.rochester.edu/newscenter/watch-rochester-cloak-uses-ordinary-lenses-to-hide-objects-across-continuous-range-of-angles-70592/>
- [8] <http://experimentoscaserosparaninos.blogspot.com.es/2014/10/23-invisibilidad-refraccion.html>
- [9] E. Sikorska, I. Khmelinskii, M. Sirkorski, "Analysis of olive oils by fluorescence spectroscopy: methods and applications," InTech (2012), ISBN: 978-953-307-921-9.
- [10] http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/2014
- [11] <http://www.filmetrics.com/refractive-index-database>
- [12] BOE num. 317, 30 diciembre 2010, Sec. I. Pág. 108824, BOE-A-2010-20067.
- [13] http://www.roithner-laser.com/laser_pointers.html
- [14] N. B. Kyriakidis, P. Skarkalis, "Fluorescence spectra measurement of olive oil and other vegetable oils", J. AOAC Int. **83**, 1435-1439 (2000).

1. Introducción

Hacer algo invisible ha estimulado nuestra imaginación en muchas historias de ciencia ficción, desde la memorable novela de H. G. Wells "El Hombre Invisible", a la capa de invisibilidad de Harry Potter en la saga de J. K. Rowling, o los poderes del anillo ideado por J. R. R. Tolkien en "El Señor de los Anillos". Hace algunos años la Ciencia demostró que la invisibilidad es factible manipulando la trayectoria de la luz alrededor de un objeto. Desde el trabajo de John Pendry publicado sobre el tema [1] y el primer prototipo demostrado por investigadores de la Universidad de Duke (Reino Unido) [2], el llamado *optical cloaking* ha atraído la atención de la comunidad científica y de la sociedad en general [3] por sus potenciales aplicaciones, por ejemplo en defensa. Se han desarrollado métodos sofisticados basados en el uso de metamateriales (materiales artificiales, consistentes en patrones periódicos micro o nanoestructurados para el control de la radiación electromagnética) desarrollados mediante complejos algoritmos [4]. Recientemente, investigadores de la Universidad de Rochester han demostrado un método alternativo más sencillo para conseguir *optical cloaking* empleando espejos [5] o lentes [6], el cual ha sido bautizado como el *Rochester cloak*. En contraste con la técnica más sofisticada basada en metamateriales, este método permite hacer invisibles grandes objetos y no requiere iluminación coherente ni de un rango espectral determinado, basta luz natural. El efecto es impresionante, tal y como puede observarse en el video publicado por los autores de esta técnica [7].

Las fotografías y la discusión presentadas en el presente artículo pretenden ser una demostración básica del principio que subyace en el *optical cloaking*, y surge como resultado de nuestra experiencia en la divulgación de la Óptica y la Fotónica entre estudiantes de Educación Primaria y Secundaria, así como en seminarios destinados al público en general que estamos realizando en el entorno de la Universidad Miguel Hernández de Elche con motivo de este 2015 Año Internacional de la Luz. El principio básico del experimento de invisibilidad que analizamos aquí está basado en la refracción de la luz, uno de los fenómenos ópticos más conocidos popularmente, directamente observable y explicado en libros de texto de diferentes niveles educativos. O, para ser más precisos, en la cancelación de la desviación de la luz por refracción cuando se produce un ajuste de los índices de refracción de dos medios.

La ley de la refracción (o ley de Snell) describe cuánto se desvía un rayo de luz que incide desde un medio homogéneo con índice de refracción n_1 y se propaga hasta un segundo medio con índice de refracción n_2 . Si θ_1 indica el ángulo de incidencia en el primer medio y θ_2 el ángulo con el que la luz se transmite al segundo medio, ambos tomados respecto a la normal a la interfase, la ley de refracción:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 ; \quad (1)$$

muestra que se produce una desviación de la trayectoria del rayo causada por la diferencia de índice de refracción entre los dos medios. Ello explica, por ejemplo, por qué un lápiz introducido en un vaso de agua parece estar quebrado, una demostración inmediata de la refracción que los estudiantes comprenden rápidamente.

Pero ¿y si la luz viaja a la misma velocidad en ambos medios? En esa situación el índice de refracción es el mismo en ambos medios, y el rayo no se desvía en la superficie de separación. El efecto para el observador es el mismo que si no hubiese ningún cambio de medio. Usando estos sencillos conceptos de óptica geométrica presentamos una demostración experimental muy simple pero impactante, que puede

encontrarse en internet [8], de cómo volver invisible un recipiente de vidrio colocándolo en el interior de un recipiente mayor y llenando ambos con un líquido del mismo índice de refracción que el de los vidrios empleados. Además esta demostración puede realizarse con materiales comunes como el aceite de girasol y el vidrio pyrex.

La segunda parte del trabajo, según nuestro conocimiento, es una idea original y muestra cómo la presencia del recipiente invisible queda revelada utilizando el fenómeno de la fluorescencia del líquido empleado (en este caso aceite de girasol). La fluorescencia es un proceso de fotoluminiscencia por el cual una molécula, al absorber radiación (UV, visible o NIR) se promueve a un estado electrónico excitado del cual decae siguiendo una serie de procesos no radiativos para finalmente decaer al estado fundamental emitiendo un fotón de frecuencia menor al absorbido. La fluorescencia es la base de muchas técnicas de investigación analíticas [9] y es también el fundamento de la técnica de microscopía de alta resolución galardonada con el Premio Nobel de Química en 2014 [10].

2. Ajuste de índice de refracción

2.a. Materiales empleados en el experimento

Los materiales necesarios para la primera parte de la demostración se pueden encontrar en cualquier hogar: dos recipientes de vidrio pyrex de distinto tamaño y aceite de girasol. El vidrio pyrex es el nombre con el que actualmente se conoce al vidrio de borosilicato desarrollado a finales del siglo XIX por el vidriero alemán Otto Schott y comercializado inicialmente bajo el nombre "Duran". El nombre comercial Pyrex se lo debemos a *Corning Glass*, empresa que desarrolló una versión en 1915. Este vidrio contiene boro, además de silicio, carbonato de sodio y carbonato de calcio, materiales usados tradicionalmente en la fabricación del vidrio. Se caracteriza por su durabilidad y resistencia a las altas temperaturas, por lo que se emplea frecuentemente para cocinar en horno, así como en el equipamiento de laboratorios de química. El vidrio pyrex tiene un índice de refracción de $n=1.470$ a 25°C en la longitud de onda de 589 nm [11].

Para llevar a cabo el experimento de invisibilidad es necesario utilizar un líquido cuyo índice de refracción se ajuste lo mejor posible al del pyrex. Podría emplearse glicerina ($n=1.473$), pero para la segunda parte del experimento es necesario usar un líquido que muestre además fluorescencia, así que emplearemos aceite de girasol. Según el Real Decreto 1716/2010 por el que se aprueba la Reglamentación Técnico-Sanitaria de Aceites Vegetales Comestibles, el índice de refracción del aceite de girasol a 25°C esté entre $n=1.462$ y $n=1.467$ [12].

En la segunda parte del experimento se requieren dos punteros láser. Se ha utilizado un puntero de color violeta de longitud de onda $\lambda=405\text{ nm}$, y otro puntero verde de $\lambda=532\text{ nm}$. Este tipo de punteros se emplean habitualmente en las clases para demostrar algunos fenómenos ópticos y pueden adquirirse a través de distribuidores comerciales [13].

2.b. Invisibilidad óptica de un vaso de pyrex

La Figura 1 muestra los pasos seguidos en el experimento. Por simplicidad, en lo sucesivo denotaremos los vasos de pyrex empleados como: Vaso#1 (el mayor) y Vaso#2 (el menor). Las fotografías tomadas desde arriba (segunda fila) se incluyen únicamente para compararlas con los resultados que se mostrarán en la siguiente sección. La situación de la Fig. 1(a) corresponde a la luz atravesando la siguiente secuencia de medios: aire-Vaso#1-aire-Vaso#2-aire. La luz se refleja y se refracta en cada una de las interfaces y se desvía en cada cambio de medio, por lo que claramente se observan los dos vasos. El Vaso#2 se llena con aceite de girasol en la Fig. 1(b); la secuencia de medios es ahora: aire-Vaso#1-aire-Vaso#2-aceite. Distinguimos claramente el segundo vaso porque el aceite absorbe parte del espectro de longitudes de onda, lo que le confieren el característico tono amarillento del aceite de girasol. La Fig. 1(c) muestra la situación en la que el aceite se vierte también en el Vaso#1 hasta aproximadamente la mitad de su altura, de manera que la luz encuentra las interfases: aire-Vaso#1-aceite-Vaso#2-aceite para los rayos en la mitad inferior, mientras que los rayos incidentes en la mitad superior encuentran las interfases: aire-Vaso#1-aire-Vaso#2-aceite. Debido al ajuste de índice de refracción del vidrio pyrex y del aceite de girasol (son iguales con una precisión de dos cifras decimales) la luz no sufre desviación en la interfase aceite-Vaso#2-aceite. En otras palabras, para un observador los rayos siguen el mismo camino que si sólo estuviera el Vaso#1 conteniendo aceite, y por consiguiente la mitad inferior del Vaso#2 se vuelve invisible. Finalmente, como muestra la Fig. 1(d), llenando el primer vaso con aceite hasta arriba, el Vaso#2 desaparece por completo.

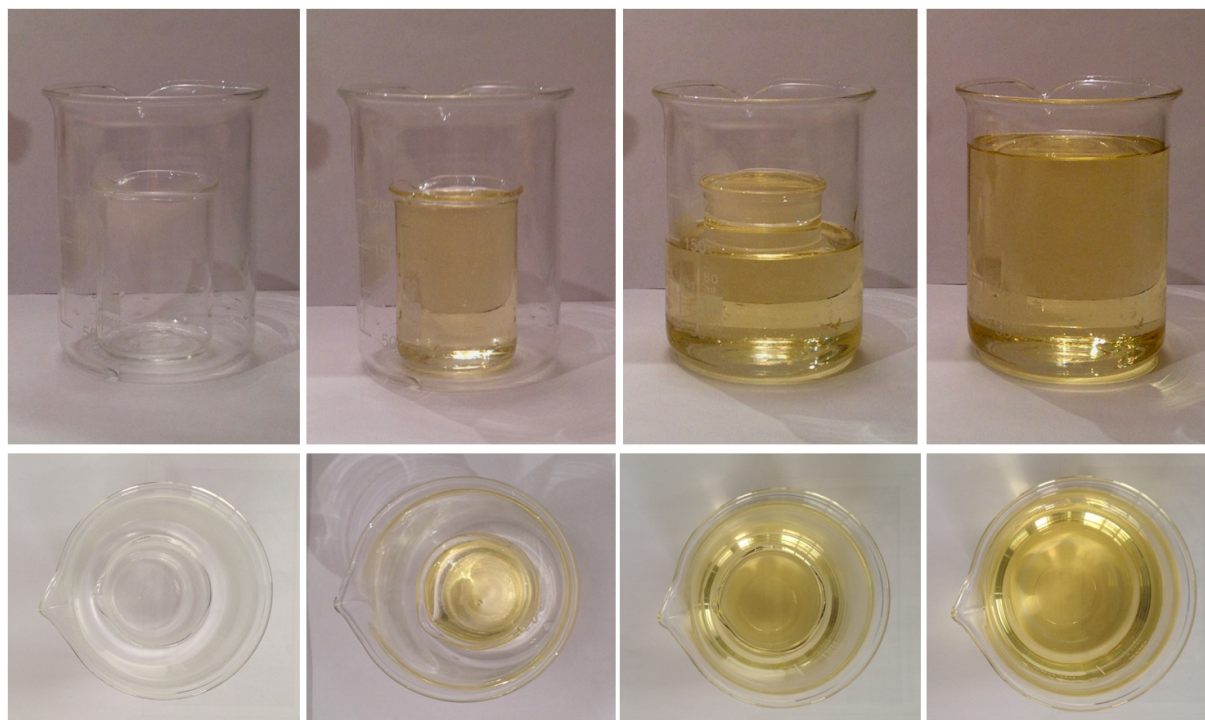


Fig.1. Demostración de cómo el vaso pequeño de pyrex se torna invisible. La primera fila muestra fotografías tomadas de frente mientras que las de la segunda fila están tomadas desde arriba. (a) Vasos de pyrex vacíos, el Vaso#2 está dentro del Vaso#1. (b) El Vaso#2 se llena con aceite de girasol. (c) Se vierte aceite en el Vaso#1 hasta media altura. (d) Se llena con aceite todo el Vaso#1.

3. Uso de la fluorescencia para desvelar la invisibilidad

El aceite de girasol, al igual que otros aceites vegetales como el aceite de oliva, de soja o de maíz, contiene fluoróforos, es decir, componentes naturales fluorescentes [14]. La espectroscopía de fluorescencia, unida a los modernos métodos de análisis de datos espectroscópicos, constituye una técnica de análisis alimentario cualitativo y cuantitativo, que se utiliza para discriminar diferentes grados de calidad del aceite, detectar posibles adulteraciones, autenticar aceites de oliva vírgenes, y monitorizar cambios en la calidad del aceite durante su almacenamiento debido a procesos térmicos y a la foto-oxidación [9]. Nosotros emplearemos la fluorescencia del aceite de girasol para revelar la presencia del vaso invisible; la situación se muestra en la Fig. 2.

Las fotografías en la Fig. 2 corresponden al sistema en la Fig. 1(d), en que el Vaso#2 resulta invisible al observador. Los dos punteros láser empleados tienen una longitud de onda suficientemente corta como para inducir la fluorescencia en el aceite de girasol. La fluorescencia del aceite de girasol al absorber radiación de estas longitudes de onda se aprecia claramente en la Fig. 2(a), en forma de los rayos blanquecino (para el puntero violeta de $\lambda=405$ nm) y amarillento (para el puntero verde de $\lambda=532$ nm), respectivamente. Sustancias con otros fluoróforos mostrarían fluorescencia en otros colores. Sin embargo, dado que el vidrio pyrex no contiene fluoróforos, estos rayos emitidos por fluorescencia del aceite muestran sendos *gaps* precisamente en el lugar en que está el borde del vaso invisible, delatando así su presencia. El grosor del Vaso#2 se puede inferir a partir de la medida del tramo en que no hay fluorescencia. La Fig. 2(b), en la que se incide solamente con uno de los punteros láser, ilustra además el efecto de lente asociada a la forma convexa del vaso exterior, que desvía el haz láser.

Este efecto se ilustra mejor en la Fig. 3. En ella iluminamos el Vaso#1 con el puntero láser violeta, incidiendo siempre con la misma orientación pero sobre diferentes zonas de la superficie convexa del vaso. En la fotografía central, en que la incidencia es normal, no se observa ninguna desviación del haz láser en ninguna de las superficies del sistema. Por el contrario, en las fotografías laterales, se observa la desviación característica de las lentes. Resulta interesante observar directamente en el puntero láser (y en el rastro de fluorescencia que deja en el aceite) la cancelación de la desviación de la luz en el interior del Vaso#2, y en particular en las superficies aceite-pyrex-aceite correspondientes a la posición del Vaso#1, que nuevamente se revelan por la ausencia de fluorescencia.



Fig.2. Demostración de cómo desvelar la presencia del vaso invisible. (a) Vista superior del resultado de incidir sobre el sistema con dos punteros láser, violeta y verde, perpendicularmente. (b) Vista frontal al incidir sobre el sistema sólo con el láser violeta.

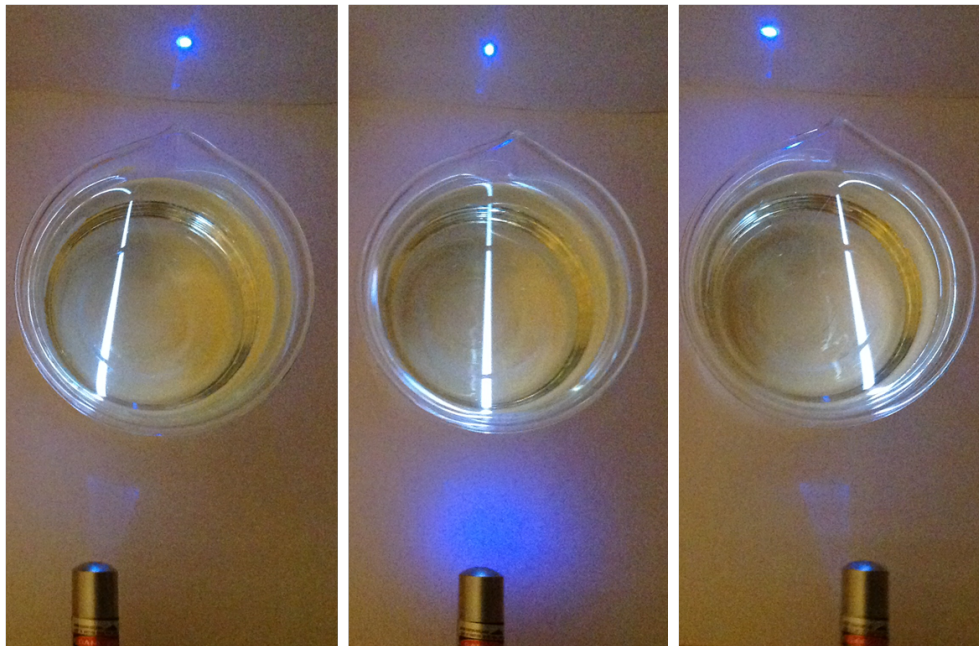


Fig.3. Demostración de la desviación del haz láser en las separaciones inicial (aire-pyrex) y final (pyrex-aire), y de la ausencia de desviación en las separaciones pyrex-aceite.

4. Conclusiones

En resumen, el experimento que hemos descrito permite introducir de una forma muy atractiva a un público sin conocimientos de óptica, los fenómenos de la refracción y la fluorescencia, empleando materiales y fuentes de luz fácilmente accesibles. Da pie, asimismo, a comentar técnicas de *optical cloaking* basadas en la óptica paraxial usando lentes y espejos, y a explicar las aplicaciones del análisis de fluorescencia en la industria alimentaria, mostrando con estos ejemplos el impacto que las tecnologías basadas en la luz tienen en la sociedad.

Agradecimientos

Agradecemos el apoyo del Ministerio de Economía y Competitividad y fondos FEDER mediante el proyecto FIS2012-39158- C02-02.