

¿Qué es la fotónica?

Jesús Daniel **Valenzuela Sau**

La luz desempeña un papel crucial en la vida como la conocemos. Sin ella, simplemente no podríamos existir. Y como seres curiosos que somos nos preguntamos: ¿qué es la luz? Por mucho tiempo no fue una pregunta sencilla de responder pues su comportamiento puede ser desconcertante. ¿Está compuesta por ondas o por partículas?, ¿onda o partícula?, una cuestión que desató fuertes desacuerdos entre la comunidad científica al tratar de describir la naturaleza de la luz a mediados del siglo XVII.

Newton (1642-1727), considerado por muchos como el científico más importante de la historia, proponía que la luz estaba formada por “corpúsculos”, pequeñas partículas invisibles al ojo humano, mientras que la mayoría de sus contrapartes, entre ellos Hooke (1635-1703), también muy notable, estaba a favor de considerar a la luz como un fenómeno “ondulatorio”.

Hoy en día, gracias a los trabajos en el campo de la mecánica cuántica, es en general aceptado que la luz tiene una naturaleza dual: se comporta como onda y también como partícula. Una partícula puede ser entendida como un objeto material con cierto volumen y cierta masa. Esto es intuitivo y fácil de visualizar. Pero ¿qué es una onda? En palabras simples, se puede decir que una onda es una perturbación que se propaga en un medio (como dato interesante, contrario a una partícula, a una onda no se le puede relacionar con un volumen ni con una masa). Este medio de propagación puede ser el vacío;



Figura 1. Muestra de la fauna en Guaymas, Sonora, México. Fotografía por Yolanda Daniela Rivas Hernández. Instagram @yodakairiher.



Figura 2. Muestra de la fauna en Suaqui Grande, Sonora, México. Fotografía por Sinue Valenzuela Sau.

como en el espacio exterior fuera de la atmósfera del planeta, o puede ser un medio material como la tierra, el agua o el aire.

Por ejemplo, la voz humana son ondas de presión que se propagan a través del aire y que al llegar a nuestros oídos interpretamos como sonidos que nos ayudan a comunicarnos. Por otro lado, en el vacío, las ondas electromagnéticas, que comúnmente llamamos luz, se propagan libremente.

Así es como la luz del Sol nos alcanza viajando a casi 300,000 kilómetros por segundo y tardando poco más de 8 minutos en llegar. Una vez que la luz incide en la superficie terrestre, sus efectos son palpables y evidentes en nuestra vida diaria; pero, ¿se puede obtener un mayor beneficio de ella además de proveernos de alimentos mediante su papel en la fotosíntesis y de brindarnos los medios para poder ver por dónde caminamos? ¡Vaya que sí! Y no me refiero a los paneles solares ni al aprovechamiento térmico de la luz solar para generar electricidad, sino a un uso de la luz mucho más sutil. Tan sutil, que los seres vivos mostrados en las figuras 1 y 2 podrían tener la clave.

A lo largo del siglo XIX se descubrieron las leyes que rigen el electromagnetismo, incluida la luz, claro está. Estas se conocen como las leyes de Maxwell. A partir de ellas, se obtiene una ecuación que puede describir o predecir el comportamiento

de la luz. Esta capacidad de predicción ha dado lugar al diseño de dispositivos que trabajan con luz que podrían sustituir o mejorar los componentes electrónicos, creando así un nuevo paradigma para la fabricación de teléfonos celulares, computadoras, televisores, etcétera. La rama de la física que estudia el control de la luz se conoce como fotónica.

A continuación, se presenta una pequeña reseña de cómo surgió este “control” de la luz y por qué es posible.

UNA IDEA REVOLUCIONARIA

Cuando encendemos una lámpara eléctrica –sea de tipo incandescente, fluorescente o led–, aunque su principio físico de funcionamiento es diferente, su luminosidad se debe a la emisión de fotones provocada por un gran número de electrones que está fluyendo a través de ella.

Estos electrones son provistos por la red de suministro eléctrico a través de cables conductores metálicos de cobre o aluminio que están recubiertos por un material aislante. Los electrones pueden moverse libremente por el elemento conductor, pero no pueden hacerlo por el aislante. Gracias a esto último, el suministro eléctrico es posible, eficiente y seguro.

Pues bien, así como los electrones fluyen libremente en los conductores, pero no en los aislantes,

a Eli Yablonovitch se le ocurrió que era posible que ciertos “colores” de luz podrían no propagarse en ciertos medios especiales. Él propuso que un medio podría funcionar como “conductor” para ciertos “colores” de luz, pero como “aislante” para otros (de forma análoga a lo que sucede en los conductores y aislantes eléctricos) (Yablonovitch, 1987). Fue así como surgió el concepto de los cristales fotónicos. Estos cristales son medios con características especiales que impiden el paso de luz con ciertas longitudes de onda.

LA CONFIRMACIÓN

Fue en 1987 cuando se propuso la existencia de los cristales fotónicos (Yablonovitch, 1987) y, dos años después, su existencia fue confirmada teóricamente (Yablonovitch y Gmitter, 1989). Más tarde, también fue comprobada experimentalmente (Meade *et al.*, 1992).

A partir de entonces, se inició una carrera en la búsqueda de “mejores” cristales fotónicos con diferentes materiales y configuraciones.

Pero ¿qué es un cristal fotónico? Básicamente, es una estructura que tiene periodicidad, es decir, una estructura que tiene un patrón que se repite. Esta periodicidad puede ser en una, dos o tres dimensiones y es la clave para que estos cristales puedan impedir el paso de ciertas longitudes de onda de la luz.

Ya mencionamos que la luz está compuesta por ondas electromagnéticas. Estas son perturbaciones de campo eléctrico y magnético que tienen diferentes frecuencias de oscilación.

Por ejemplo, un color que en condiciones ideales percibimos como rojo, tiene una frecuencia de 442 millones de millones de oscilaciones por segundo (442 terahertz). Cada una de estas oscilaciones mide una longitud de 678 nm (nanómetros); a esa medida se le llama longitud de onda. Como referencia, un cabello humano mide aproximadamente 100 μm (micrómetros o micras), la décima parte de un milímetro. Un nanómetro es la milésima parte de un micrómetro. Entonces, 678 nm sería casi la séptima parte de una micra. Una distancia

realmente pequeña para lo que estamos acostumbrados. Cada color de la luz tiene una frecuencia de oscilación y una longitud de onda propias.

El ser humano puede percibir ondas lumínicas desde los 380 nm hasta 750 nm aproximadamente, abarcando desde el violeta, el azul, el verde, el amarillo, el naranja y hasta el rojo. Comparativamente, el violeta tiene menor longitud de onda que el rojo. Fuera de este rango de colores, que también podemos llamar banda de frecuencias, también existen otros colores, como el ultravioleta (menos de 380 nm) y en infrarrojo (más de 750 nm), pero no podemos verlos.

También existen ondas electromagnéticas con longitudes de onda mucho más pequeñas, como los rayos X, usados para obtener radiografías, o los rayos gamma, que pueden afectar el ADN. Contrariamente, las longitudes de onda pueden ser más grandes: centímetros, metros o incluso kilómetros. Cada tipo de onda tiene un características diferentes y potenciales aplicaciones.

Pues bien. Conociendo estos datos sobre las ondas electromagnéticas, continuamos con los cristales fotónicos.

EL FENÓMENO FÍSICO CLAVE

¿Cómo un cristal fotónico puede impedir el paso de una banda de frecuencias electromagnéticas? Esto sucede debido a su periodicidad y al fenómeno físico conocido como “interferencia destructiva”. Cuando dos o más ondas (sean electromagnéticas o de otro tipo) interactúan entre sí y se cancelan mutuamente, se dice que ocurrió interferencia destructiva. Usualmente, un cristal fotónico está conformado por vacío, o aire y otro material (un dieléctrico o aislante eléctrico).

Cuando una onda electromagnética pasa de un medio a otro, como en este caso de aire a dieléctrico o viceversa, cierto porcentaje de la onda atravesará al otro medio y otro porcentaje será reflejado en direcciones que dependerán de los parámetros del cristal, de manera que, fortuitamente, la



© Emilio Salceda. *Xinacates*. San Nicolás de los Ranchos, Puebla, 2017.

interferencia destructiva aparece. ¿Fortuitamente? ¡Eso no suena muy científico que digamos! ¡Pues así es! No hay manera de saber si un cristal fotónico presentará selectividad para el paso de ciertas longitudes de onda y otras no hasta hacer los cálculos correspondientes. Diferentes parámetros en un cristal fotónico se ajustan para propiciar la aparición de esta selectividad de bandas (bandas permitidas y bandas prohibidas). Uno de estos parámetros es el periodo que, al repetirse, forma el cristal. El tamaño del periodo es muy importante pues determina en qué rango de frecuencias estará la banda prohibida.

Por ejemplo, si se quiere que la banda prohibida esté en el azul a 500 nm, entonces el periodo del cristal debe ser cercano a ese tamaño y estar en ese mismo orden de magnitud, esto es, unos pocos cientos de nanómetros. Esta es una regla general para cualquier cristal fotónico. Ahora, ¿cuál es la utilidad de estas bandas prohibidas?

Retomando el ejemplo anterior, si tenemos un cristal fotónico que tenga una única banda prohibida entre 495 y 505 nm, y la luz del Sol incide sobre él, el cristal absorbería los colores fuera de la banda y reflejaría el color dentro de esa banda, y el cristal aparecería como azul a nuestros ojos. El cristal funcionaría como un espejo monocolor, absorbería todos los colores y reflejaría solo el azul. La interferencia destructiva es el fenómeno físico clave para la existencia de los cristales fotónicos.

LA NATURALEZA PONE EL EJEMPLO

Como se mencionó, parte de las aplicaciones de los cristales fotónicos ha sido enfocada en la mejora o sustitución de los dispositivos electrónicos.

En años recientes, diferentes estudios han sumado esfuerzos para la realización de diodos (Purayil *et al.*, 2022; Ye *et al.*, 2018) y transistores (Arkhipkin y Myslivets, 2013; Yanik *et al.*, 2003) completamente ópticos. Estos dispositivos son elementos fundamentales de la electrónica actual en aplicaciones

simples como los controles de encendido y apagado, o tan complejas como los microprocesadores de última generación.

Así como los dispositivos electrónicos fueron perfeccionándose a lo largo de varias décadas, es de esperar que suceda lo mismo con los dispositivos ópticos.

El estudio de los cristales fotónicos no es más que un suspiro comparado con el uso que la naturaleza les ha dado. Gracias a la ayuda de los microscopios actuales, se ha encontrado que insectos, arácnidos, aves, fauna marina, plantas, etcétera. (Vigneron y Simonis, 2012), integran cristales fotónicos naturales gracias a los cuales estos seres despliegan colores muy llamativos.

En la naturaleza, los colores pueden ser usados para señalar ciertos estados, para asegurar la supervivencia de las especies, proveyendo de alimentos, alertando del peligro, proporcionando la mejor pareja, etcétera.

Aunque no todos los colores en el mundo natural se deben a los cristales fotónicos, una cantidad nada despreciable sí, y unos de los despliegues más impresionantes se dan en el escarabajo de oro (*Chrysina resplendens*), en la mariposa morpho (*Morpho didius*), en las plumas de la cola de pavo real macho (*Pavo cristatus*) y en el escarabajo verde metálico (*Chrysochroa vittata*).

© **Emilio Salceda**. *Xinacates*.
San Nicolás de los Ranchos, Puebla, 2017.



La utilidad de los cristales fotónicos en la naturaleza es evidente, y en las últimas décadas se ha encontrado el fundamento para que el ser humano pueda aprovecharlos también.

CONCLUSIÓN

Gracias a los cristales fotónicos, en un futuro no muy lejano se vislumbran teléfonos celulares y computadoras más eficientes, es decir, que consuman menos energía y sean más rápidos. ¿Son críticos estos dispositivos para la supervivencia del ser humano? Realmente no; sin embargo, si los cristales fotónicos nos llevan a superar dependencias energéticas y a causar menos contaminación, será un gran logro para la humanidad.

REFERENCIAS

- Arkhipkin V and Myslivets S (2013). All-optical transistor using a photonic-crystal cavity with an active Raman gain medium. *Phys. Rev. A* 88:033847.
- Meade R *et al.* (1992). Existence of a photonic band gap in two dimensions. *Appl. Phys. Lett.* 61:495.
- Purayil N *et al.* (2022). All-Optical Diode Action through Enhanced Nonlinear Response from Polymeric Photonic Crystal Microcavity. *ACS Applied Electronic Materials* 4(1):138-148.
- Vigneron J and Simonis P (2012). Natural photonic crystals. *Physica B* 407:032-4036.
- Yablonovitch E (1987). Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics. *Phys. Rev. Lett.* 58:2059.
- Yablonovitch E and Gmitter T (1989). Photonic Band Structure: The Face-Centered-Cubic Case. *Phys. Rev. Lett.* 63:1950.
- Yanik M *et al.* (2003). All-optical transistor action with bistable switching in a photonic crystal cross-waveguide geometry. *Optics Letters* 28(24):2506-2508.
- Ye H *et al.* (2018). Optical Diode Based on Two-Dimensional Photonic Crystal. (Edited by Alexander V. Vakhrushev), *Theoretical Foundations and Application of Photonic Crystals*. IntechOpen.

Jesús Daniel Valenzuela Sau
Instituto de Física “Ing. Luis Rivera Terrazas”
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
daniel.valenzuela@live.com



© Emilio Salceda. *Xinacates*. San Nicolás de los Ranchos, Puebla, 2017.