



Ilustración: Mauricio Vázquez Rendón.



# Detrás de la refracción negativa natural

**Juan Diego Mazo Vásquez**

Físico. Estudiante de la maestría en Óptica y Fotónica. Grupo Teórico de Ciencias de los Materiales. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Antioquia.  
Premio Investigación Estudiantil Universidad de Antioquia 2020, primera categoría.

---

Los modelos matemáticos nos permiten describir lo que pasa en escalas muy pequeñas. En esta investigación se usaron para explorar cómo se comportaría la luz al interactuar con un gas donde los electrones están libres y responder si esta interacción pudiese causar, de manera natural, una refracción negativa.

E

s un día caluroso. El sol radiante hace que el clima esté perfecto para darse un chapuzón en la piscina. De repente notamos que en el fondo de la piscina hay una moneda; tratamos de localizarla y nos sumergimos para recogerla. En el momento en que nos zambullimos, nos damos cuenta de que no se encuentra precisamente donde creíamos que estaba.

La explicación a este fenómeno se debe a que la luz que llega a nuestros ojos no sigue una trayectoria recta, sino que se desvía al cambiar el medio en el cual se propaga, por ejemplo, cuando pasa del agua al aire. Este fenómeno se conoce como **refracción**.

La desviación de la luz debido al cambio de medio en que se propaga es, de cierto modo, algo cercano a nuestros sentidos porque lo podemos presenciar cotidianamente de varias maneras, como cuando introducimos un lápiz en un vaso de agua y vemos como si se «quebrara». La luz no sigue la trayectoria que minimiza la distancia, sino la que hace que el tiempo de recorrido sea mínimo. Y aunque la física ha logrado comprender el mecanismo de refracción, aún no tenemos del todo claro muchos aspectos relacionados con otro caso: cuando la luz se desvía en la dirección contraria; es decir, el fenómeno de refracción

positiva se da cuando la luz se refracta en la misma dirección en la que llega, mientras que, en la negativa, la luz se desvía en la dirección opuesta.

La idea de la refracción negativa la formuló el físico ruso Viktor Veselago, quien en 1968 propuso la posibilidad de que existieran sustancias que pudieran desviar la luz en la dirección opuesta a la original. Con esto se abrieron las puertas a la investigación de los metamateriales, tanto desde la teoría como desde la experimentación, debido a que la refracción negativa conduce a otros múltiples fenómenos ópticos interesantes y se puede emplear para diseñar dispositivos como antenas y lentes.

En los años noventa, el físico estadounidense John Pendry propuso la construcción del primer metamaterial, que constaba de una estructura formada por anillos metálicos que, sometida a ciertas condiciones, permitía recrear el fenómeno de refracción negativa. En los años posteriores se han realizado múltiples modificaciones al modelo de Pendry para desarrollar antenas con mejor calidad de recepción y transmisión de señales como radio o luz visible. Además, se ha investigado la posibilidad de implementar paneles con metamateriales para aumentar, por ejemplo, la capacidad de procesamiento de dispositivos tecnológicos como los procesadores de los computadores, o aplicaciones en la industria militar para mejorar técnicas de camuflaje.

Sin embargo, a pesar de que se han logrado diseñar metamateriales artificiales, hasta el momento no se conoce de alguno cuyo origen sea natural. Por esta razón, desde el Grupo Teórico de Ciencias de los Materiales de la Universidad de Antioquia, estudiamos si en un gas de electrones —denominado gas de Fermi relativista— la luz pudiera manifestar refracción negativa, considerando que en los últimos años se ha postulado que este puede ser un buen candidato.

Un gas de Fermi relativista está compuesto por electrones, los cuales se consideran que no interactúan entre sí, que se encuentra en altas densidades y temperaturas, y está presente, por ejemplo, en el plasma que se encuentra en las estrellas. Cuando este gas interactúa con la luz los electrones comienzan a vibrar y a dispersar la luz en diferentes direc-



En la izquierda vemos un ejemplo de refracción positiva; en la derecha vemos una representación de cómo se vería la refracción de la luz si el agua fuese un metamaterial, es decir, un ejemplo de refracción negativa. Imagen: Phys.org.



ciones y, bajo ciertas condiciones, podría manifestar refracción negativa.

Para entender cómo la luz es dispersada por la presencia del gas se recurren a las ecuaciones que gobiernan los campos electromagnéticos y la relatividad especial. Además, se estudia el comportamiento del índice de refracción, el cual es una cantidad que determina cómo es la propagación de la luz dentro del medio dependiendo de varios factores, como la temperatura, la densidad de partículas y la frecuencia de la radiación que incide. En el caso de los materiales que conocemos cotidianamente se encuentra que el índice de refracción es un número positivo, pero para el caso de los metamateriales es de esperarse que sea negativo para que pueda ocurrir la refracción negativa.

En el caso del gas de electrones encontramos que el índice de refracción es un número complejo, es decir, no es un número positivo ni negativo, y por tanto no se puede concluir que ocurra refracción negativa. Pese a lo anterior, el hecho de que sea un número complejo da cuenta de la cantidad de energía que la luz le entrega a las partículas y que, junto con la energía que estas adquieren por la temperatura, se emplea en la creación de antipartículas en el gas.

Por otro lado, uno de los resultados más importantes de la investigación del grupo es que cierta porción de la luz que interactúa con el gas de electrones no se desvía de su dirección original, es decir, que se propaga como si no hubiera partículas presentes.

Además de esto se encontró que, si el gas está bajo ciertas condiciones de temperatura y la luz que incide sobre este tiene determinadas frecuencias, es posible que la onda de luz se propague en la dirección contraria a la que se propaga la energía de dicha onda, lo cual es una de las implicaciones de las ideas de Veselago. Sin embargo, para tener conclusiones más precisas es necesario realizar investigaciones experimentales para verificar los resultados teóricos que obtuvimos.

Los resultados, aunque son preliminares por la falta de corroboración experimental, también nos pueden dar ideas sobre qué ocurre en el medio interestelar y en las estrellas. Además, siendo un modelo relativamente sencillo y con varias consideraciones, se encuentra que la física que subyace es valiosa para el entendimiento de muchos fenómenos y podría ser útil para el desarrollo industrial. ✕

## Glosario

**Antena:** parte de un radio o un televisor desde el cual se transmiten ondas a la atmósfera o al espacio.

**Metamaterial:** tipo de material que posee propiedades que usualmente no ocurren naturalmente, como el índice de refracción negativo.

**Número complejo:** número que tiene parte real y parte imaginaria.

**Refracción:** cambio de la dirección sufrida por una onda cuando pasa de un medio a otro.

Verificar experimentalmente estos resultados es muy difícil, porque requeriría recrear un sistema que esté bajo las mismas condiciones que el material de las estrellas y tener la capacidad de medir cómo se comporta la luz con la presencia del gas en condiciones muy específicas.