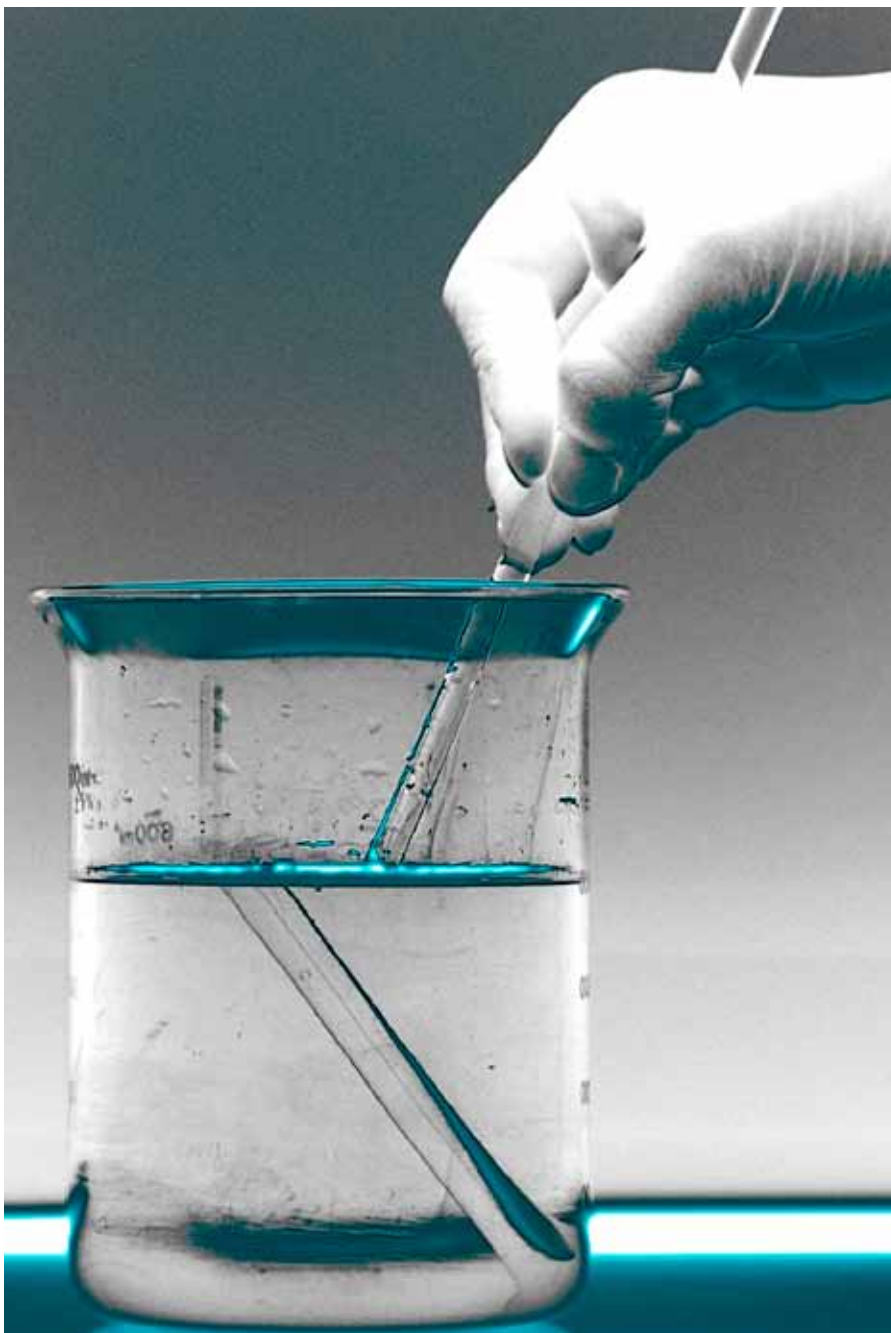


## Los metamateriales

# Luz obediente

por Gabriel Stekolschik | [gstekol@de.fcen.uba.ar](mailto:gstekol@de.fcen.uba.ar)

**Desde el principio, el hombre buscó dominar a la naturaleza. Y en gran medida lo consiguió. Pero, hasta hace pocos años, no había podido someter a la luz. Ahora, los científicos crearon materiales que permiten controlar el comportamiento de las radiaciones, lo que abrió el camino a aplicaciones insospechadas. Entre ellas, la posibilidad de hacer invisibles a los objetos.**



El mundo con el que se encontraron los primeros humanos debió distar mucho de ser el Edén. Probablemente, en aquel ambiente inhóspito, nuestra frágil especie no habría sobrevivido si no hubiera tenido la habilidad para fabricar herramientas. Así, nuestra civilización se fue desarrollando en la medida en que lograba dominar las propiedades de los materiales.

Primero fueron la madera, el hueso y la piedra. Después, los metales. En aquellas edades tempranas, en las que apenas empezábamos a manejar algunas cualidades mecánicas de la materia, la luz era, simplemente, “algo” que diferenciaba el día de la noche.

Hoy, varios milenios después, se sabe mucho acerca de la luz y, sin embargo, recién comenzamos a domesticarla, o sea, a confinarla y decirle qué camino seguir. Lograrlo posibilitaría, por ejemplo, reemplazar los circuitos electrónicos por otros, fotónicos, mucho más veloces y eficientes; o, también, crear lentes que nos permitirían ver los átomos; o, incluso, poder hacer invisibles los objetos.

Para “amansar” a la luz, hubo que dejar de lado a los materiales tal como los ofrece la naturaleza e inventar otros nuevos: los metamateriales, que son elementos fabricados de forma artificial en el laboratorio a partir de sustancias naturales, pero que poseen propiedades que no se encuentran en la naturaleza.

“Nadie esperaba que en una ciencia tan antigua como la óptica iba a aparecer una novedad como ésta”, se apasiona Ricardo Depine, investigador del Conicet en el Departamento de Física de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (FCEyN) de la Universidad de Buenos Aires.



Ricardo Depine

### Trampear a la luz

Cuando la luz llega a un objeto, una parte se refleja. Pero otra parte puede penetrar en él y, al hacerlo, choca con los átomos que lo componen y se desvía. Este fenómeno, que se denomina refracción de la luz, se puede comprobar, por ejemplo, sumergiendo lentamente una varilla en el agua: se observará que la porción que está por debajo de la superficie del líquido parece doblarse (ver Figura 1A). Esta imagen distorsionada se debe a que, al penetrar en el agua, la luz es desviada por las moléculas del líquido, haciéndonos creer que el objeto se ha doblado.

Existe una magnitud física, llamada índice de refracción, que indica cuánto se desvía la luz al atravesar un material. Este índice resulta de dividir la velocidad de la luz en el vacío por la velocidad de la luz en el material en cuestión. En el vacío, la luz no choca con nada y, por lo tanto, alcanza su velocidad máxima, mientras que, dentro de cualquier material, la luz será frenada por los millones de átomos que lo componen y su velocidad será menor que en el vacío. Así, para la luz visible, el índice de refracción de cualquier material es siempre positivo y mayor que 1. Por ejemplo, el índice de refracción del aire es 1,0003; el del agua, 1,3; y el del vidrio, 1,52. En general, cuanto más denso es un material, más frenará la luz y, por lo tanto, mayor será su índice de refracción.

Por lo tanto, si se quisiera controlar el comportamiento de la luz, una posibilidad sería manipular el índice de refracción de los materiales.

Hace unos 50 años, el físico ruso Víctor Veselago especuló con la posibilidad de crear materiales con índice de refracción negativo. Según el científico, el comportamiento que tendría la radiación al atravesar ese material sería muy diferente a todo lo conocido. De hecho, si el agua tuviera índice de refracción negativo, la varilla del ejemplo anterior parecería doblarse hacia “el otro lado” (ver Figura 1B).

En aquel tiempo, la idea era poco menos que descabellada. No obstante, tres décadas más tarde, con el desarrollo tecno-

lógico y la posibilidad de manipular materiales a escalas cada vez más pequeñas, aquella hipótesis teórica de Veselago fue verificada empíricamente.

### Materiales a la carta

Para lograr que la luz se comporte de manera distinta a como lo haría espontáneamente había que crear materiales cuyo índice de refracción pudiera manipularse. Entonces, a finales del siglo pasado, a un inglés llamado John Pendry, se le ocurrió una manera de lograrlo.

Pendry propuso construir un material conformado por muchos alambrecitos metálicos muy delgados, alineados uno junto al otro y separados entre sí por una mínima distancia. “Visto desde lejos, se ve como un material homogéneo. Sería algo así como un metal de baja densidad, que ahora deja pasar luz que el metal antes no dejaba pasar”, explica Depine.

La idea original de Pendry permitió crear materiales con índice de refracción negativo, una propiedad que no existe en la naturaleza y que ha dado lugar a numerosos desarrollos. A estas estructuras artificiales periódicas –conformadas por una fina y complicada arquitectura microscópica hecha de barras y anillos– se las denominó metamateriales, término acuñado en 1999 por Rodger Walser, profesor de la Universidad de Texas, para describir materiales que tienen un “funcionamiento más allá de las limitaciones de los compuestos convencionales”.

Así, la diferencia esencial entre los materiales y los metamateriales es que, en el primer caso, sus propiedades dependen de su com-

posición, es decir, de los átomos y moléculas que los forman. En cambio, las propiedades de los metamateriales –propiedades que no se encuentran en la naturaleza– dependen más de su estructura que de su composición. O sea, según la forma y la distribución de los materiales que constituyen el metamaterial, será el comportamiento que tendrá la luz al atravesarlo. En consecuencia, manipulando esa forma y distribución, se consigue guiar a la luz por caminos que no recorrería espontáneamente.

Desde la idea original de Pendry hasta nuestros días, han pasado poco más de diez años. En ese breve lapso, se han ido desarrollando infinidad de metamateriales, cada vez más complejos, en función del objetivo que se quiere alcanzar. Así, los científicos montan, minuciosamente y a escalas minúsculas, elementos como el cobre, el aluminio o el silicio para dar forma a estos arreglos periódicos que gobiernan a la luz.

En la actualidad, el diseño de estas estructuras es llevado a cabo mediante el modelado computacional, que predice el funcionamiento que tendrá el metamaterial a fabricar.

Ahora, los investigadores disponen de una herramienta que les permite manejar a voluntad el comportamiento de la luz: “Es como jugar a ser un semidios que hace nuevos materiales”, ilustra Depine.

### Invisibilidad ¿sí o no?

Vemos un objeto porque la luz que se refleja en él llega a nuestros ojos con la información sobre el objeto. Por lo tanto, si quisiéramos hacerlo invisible deberíamos lograr que la luz lo esquive.

Una analogía habitual para ilustrar esto es pensar en la luz como si fuera el agua de un río. Cuando se encuentra con una roca, el líquido se separa para rodear el obstáculo y, después, se vuelve a juntar. Si esperamos río abajo, el agua no nos traerá ninguna información acerca de la presencia de la roca que estaba río arriba. Para nosotros, la roca no existe.

¿Cómo se puede lograr que la luz esquive el objeto? Modificando el índice de refracción del material de tal manera que la luz, en lugar de reflejarse o de atravesarlo, lo rodee. Para ello, podría involucrarse el objeto en un metamaterial que desvíe la luz. Entonces, si la luz no se refleja en el objeto, no podremos verlo. Lo que sí veremos es todo lo que hay detrás del objeto, como si no existiera, porque la luz que viene desde atrás lo rodea y llega a nuestros ojos con las imágenes de lo que hay en el fondo.

Con el invento de los metamateriales parecería que es relativamente simple hacer esto. Sin embargo, todavía existen limitaciones tecnológicas para poder cumplir la fantasía del hombre invisible.

En principio, para que un metamaterial funcione como tal, es decir, que afecte a la luz incidente y tenga refracción negativa, es necesario que los elementos que conforman su estructura interna sean de un tamaño menor al de la longitud de onda ( $\lambda$ ) de la luz utilizada (ver recuadro “La luz es pura onda”). En otras palabras, hay que conseguir que, para la luz incidente, el material se vea homogéneo lográndose así que la radiación no pueda distinguir las discontinuidades del metamaterial.

Poco a poco, esta limitación está siendo sorteada. En el año 2006, se consiguió que un anillo pequeño de cobre se hiciera invisible para las microondas que, como tienen una  $\lambda$  de alrededor de 1 centímetro, requirieron de metamateriales cuyas estructuras fueran menores a esa dimensión, lo cual no precisó de tecnologías muy sofisticadas.

Llevó un poco más de tiempo fabricar metamateriales que pudieran utilizarse en el

rango de la luz visible, cuyas  $\lambda$  son mucho menores. No obstante, en 2007 se pudo construir el primer metamaterial que opera en el rango de la radiación visible, más precisamente en el límite superior, es decir, alrededor de los 700 nanómetros (nm).

Esto no significa que se esté cerca de invisibilizar cualquier objeto, porque los seres humanos percibimos constantemente un gran abanico de longitudes de onda. Por lo tanto, hasta que no se fabrique un metamaterial que sea invisible para cualquier  $\lambda$  del espectro visible (no solo para una), la invisibilidad completa de un cuerpo no será posible.

Y todo se complica aun más si pensamos en invisibilizar un cuerpo en movimiento. Porque, en ese caso, la capa de metamaterial que cubra al individuo debería ajustar

constantemente su índice de refracción a esos movimientos. Además, debería ser muy resistente pues, de lo contrario –con los metamateriales que se fabrican hoy– se rasgaría al dar el primer paso.

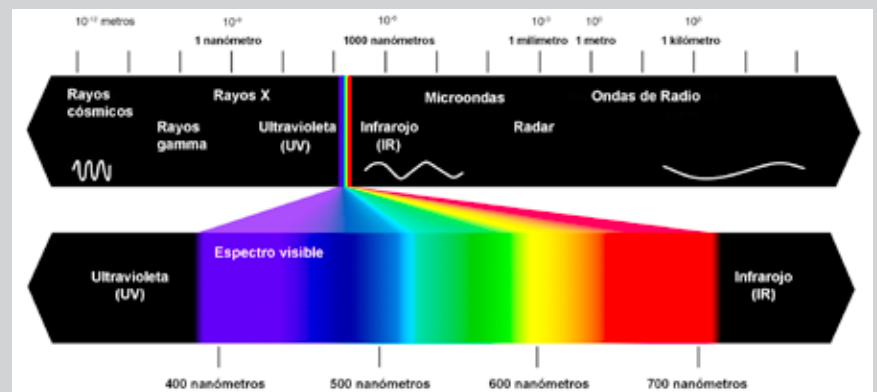
**Lentes perfectas**

Las leyes fundamentales de la óptica dicen que, con cualquier lente, es imposible captar la imagen de un objeto cuyas dimensiones sean menores que la longitud de onda de la luz con la que se ilumina a ese objeto. En otras palabras, esto significa que si ilumino un objeto con luz visible ( $\lambda = 400$  a  $700$  nm.), aunque utilice el microscopio óptico más poderoso no podré ver con nitidez objetos menores a  $400$  nm.

Esto se debe a que, si bien gran parte de la luz que se refleja en el objeto se propaga a través de la lente y llega a nuestros ojos,

**LA LUZ ES PURA ONDA**

La luz es una radiación que se desplaza como una onda. Como puede verse en el siguiente esquema, de acuerdo a cuán larga sea esa onda, será el tipo de radiación:



Como vemos, el ojo humano solamente puede percibir una pequeña parte de todas las radiaciones: lo que se llama “luz visible”, que es aquella cuya longitud de onda ( $\lambda$ ) está –aproximadamente– entre los 400 y los 700 nanómetros (1 nanómetro es la millonésima parte del milímetro).

La luz visible, que vemos blanca, en realidad está compuesta por la suma de los siete colores del arco iris. Cada uno de estos colores es radiación que se mueve con diferentes longitudes de onda. Así, hay ondas que cuando llegan a nuestros ojos “nos muestran” el color rojo, hay otras ondas que “nos muestran” el azul, y lo mismo sucede con los otros colores.

Por otra parte, no podemos ver las radiaciones que están por fuera del rango visible. Por ejemplo, los rayos X, cuya  $\lambda$  es menor a 1 nanómetro (nm), o los rayos ultravioleta, cuya  $\lambda$  está comprendida entre los 15 nm y los 400 nm. También existen radiaciones con  $\lambda$  muy grande como para que podamos verlas. Por ejemplo, las ondas de radio, que pueden tener longitudes que van desde unos pocos centímetros a varios kilómetros.

otra porción de la luz reflejada se “desvanece” (al fenómeno se lo llama “evanescencia”) y no llega a atravesarla, con lo cual se pierden los detalles pequeños del objeto.

En el año 2000, Pendry teorizó que los metamateriales podrían sortear este problema que presentan las lentes convencionales con índice de refracción positivo y que, entonces, se lograría fabricar lo que él denominó la “lente perfecto”.

“El metamaterial con índice de refracción negativo tiene la particularidad de amplificar la onda que está evanesciendo y hacer que llegue al otro lado de la lente. Esto, idealmente, permitiría aumentar el poder de resolución al infinito y que, quizás algún día, podamos llegar a ver los átomos con un microscopio óptico”, explica Depine.

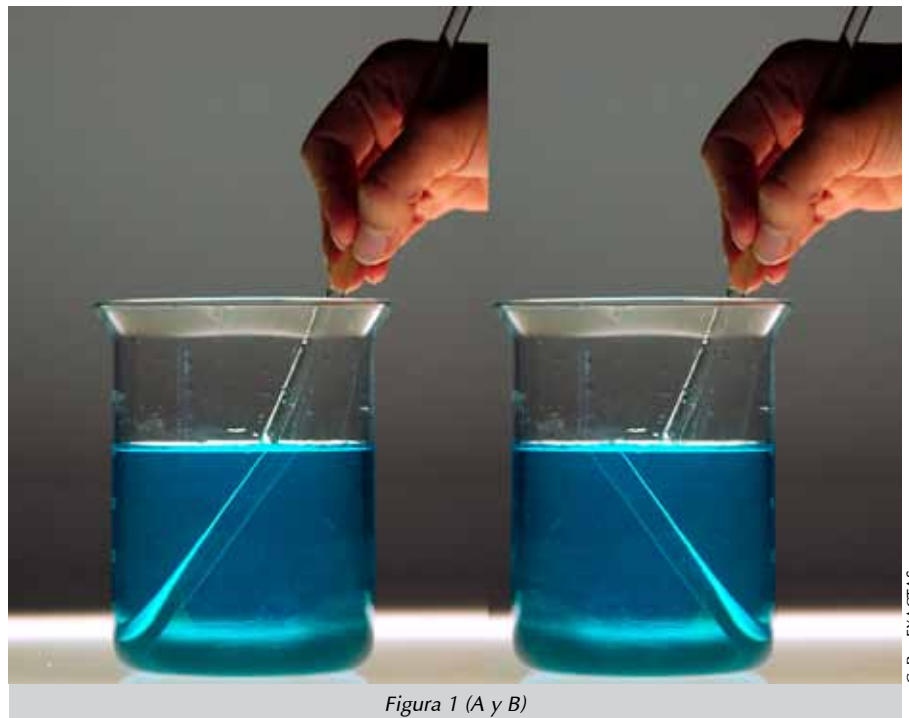
De hecho, hace muy pocos meses, un equipo de investigadores de la Universidad Politécnica de Valencia y del King’s College de Londres parece haber dado un paso significativo en este sentido, pues fabricaron un metamaterial que permite captar longitudes de onda por debajo de los 100 nm, lo que haría posible, con un microscopio óptico, ver objetos tan pequeños como una cadena de ADN.

### Circuitos de luz

Suele decirse que vivimos en la era del silicio, un material con el que se fabrican los transistores que dan vida a todos los artefactos electrónicos que comparten nuestra cotidianeidad.

Pero la mayoría de los científicos del área coinciden en que el fin de esta era puede estar próximo. Algunos expertos arriesgan que la posibilidad de miniaturización de los transistores de silicio alcanzará su límite en menos de diez años.

“Ahora, el cuello de botella es la velocidad de los procesadores, que está limitada por lo electrónico. Además, si bien cada vez se hacen más chicos, va a llegar un momento, cuando sean apenas una capa de



átomos, en que no se van a poder miniaturizar más”, señala Depine

En este contexto, la posibilidad de gobernar la luz para crear –por ejemplo– el equivalente óptico del transistor o, también, diseñar circuitos ópticos, posibilitaría un nuevo salto tecnológico, porque la luz viaja más rápido que los electrones y, además, a diferencia de éstos, no tiene masa, con lo cual las posibilidades de miniaturización serían prácticamente ilimitadas.

En este camino, se está tratando de aprovechar un fenómeno óptico: los plasmones superficiales. ¿Qué es esto? Sabemos que la luz viaja por las tres dimensiones del espacio y que no se la confina con facilidad. Sin embargo, bajo ciertas condiciones, la luz puede quedar atrapada sobre ciertas superficies y viajar “pegada” a ellas e, incluso, ser guiada por esa superficie para que recorra un circuito determinado. A esta luz bidimensional se la denomina “plasmón” y, hasta ahora, era un patrimonio exclusivo de los metales.

“Hasta hace muy poquito se sabía que los plasmones solo existían en las superficies metálicas. Ahora, con los nuevos metamateriales de índice de refracción negativo, aparece toda una familia de plasmones nuevos que tienen propiedades inesperadas. Nosotros hemos investigado diversas configuraciones que permiten guiar a esos plasmones en los metamateriales, por ejemplo dándole forma a la superficie”,

revelan Mauro Cuevas y Ricardo Depine, quienes, en el Grupo de Electromagnetismo Aplicado de la FCEyN, realizan un trabajo pionero a nivel mundial con plasmones en metamateriales.

“También, los nuevos metamateriales permiten que haya plasmones que se puedan propagar sobre superficies transparentes, como el vidrio”, agrega Cuevas.

Por otra parte, los plasmones tienen, además, la capacidad de almacenar luz en espacios reducidos: “Se puede iluminar la superficie con luz de 600 nm de longitud de onda y, por ejemplo, confinarla en 50 nm”, ilustra.

Así, de la misma manera que se hace viajar a los electrones por un cable y a la luz por la fibra óptica, podrían construirse circuitos ópticos utilizando plasmones, pero con otra ventaja: “La fibra óptica tiene el problema de que cuando se supera cierto tamaño de longitud de onda, la luz ‘se escapa’ del cable. En cambio, el plasmón confina muchísimo más”.

No parece aventurado predecir que, en un futuro no muy lejano, surgirán aplicaciones sorprendentes a partir de las novedosas y variadas propiedades de los metamateriales. Tal vez, el potencial de este campo de la física se puede dimensionar a partir de las palabras de Ricardo Depine: “Cosas que hasta ahora eran impensables, con los metamateriales se pueden pensar”. □