

# INVISIBLE



## a la vista



Las insólitas propiedades ópticas de los metamateriales permitirán fabricar objetos que no absorben ni reflejan la luz. Tales objetos, y su contenido, serían invisibles para todo fin práctico.

# INVISIBILIDAD



**Los seguidores de Harry Potter** la conocen muy bien: la capa de invisibilidad fue un regalo de Navidad que recibió el joven aprendiz de mago en su primera aventura y que había pertenecido a su padre. A muchos nos gustaría tener una capa como la de Harry Potter o conocer la fórmula secreta que descubrió el protagonista de *El hombre invisible*. El problema es que la invisibilidad todavía es un don que pertenece a la fantasía y a la ciencia-ficción. ¿Todavía? ¿Acaso podríamos acceder a ella en el mundo real?

**Daniel Martín Reina**

Hasta hace bien poco, los científicos habían descartado esta posibilidad, principalmente porque no se había observado nada parecido en la naturaleza. Pero puede que la realidad vuelva a superar a la ficción. Recientemente, un grupo de investigadores desarrolló un material que esquivo la luz. Este descubrimiento podría ser el primer paso para conseguir la invisibilidad.

### Luz y visión

Empédocles, filósofo griego que vivió en el siglo V a. C., consideraba que la luz era algo que emitía el ojo, aunque no sabía muy bien qué. Luego se dio cuenta de que ese “algo” permitiría ver de noche tan bien como de día. Al final tuvo que desechar su hipótesis, con lo que hizo bueno aque-

llo de que “es de sabios cambiar de opinión”.

Con el paso de los siglos hemos aprendido que la luz proviene del Sol y otros cuerpos luminosos, y que al entrar en el ojo produce la visión. La mayoría de los objetos cotidianos no emiten luz. Los vemos porque la luz se refleja en ellos y llega a nuestros ojos. La reflexión permite que veamos las cosas sin que éstas desprendan luz por sí mismas.

Pero no toda la luz que llega a un objeto se refleja. Una parte puede penetrar en él, y al hacerlo se desvía: es lo que se llama refracción. Este fenómeno es más difícil de apreciar en la mayoría de los sólidos, pues el enorme número de átomos de su interior forma una rígida estructura que hace de muro, impidiendo que la luz penetre en el objeto. Decimos que éste es

## Superlentes

Cuando una onda encuentra un obstáculo del tamaño de su longitud de onda se produce un fenómeno de interferencia llamado difracción. En el caso de la luz, la difracción provoca una mancha difusa que limita la calidad de las imágenes de los microscopios y otros instrumentos ópticos. Por muy potente que sea el microscopio que utilices, llegará un momento en el que no podrás examinar con mayor detalle los objetos, pues sus imágenes se superpondrán unas con otras. Ése es el llamado límite de difracción: la distancia más pequeña a la que se puede observar dos puntos en una imagen. Este límite depende de la longitud de onda de la luz que utilicemos; en el caso de la luz visible, sería insuficiente para ver, por ejemplo, un virus o una molécula de ADN.

Los físicos saben que para superar el límite de difracción habría que atrapar las llamadas ondas evanescentes que se crean en la superficie de los objetos. Estas ondas transportan los detalles del objeto para escalas muy pequeñas, menores incluso que su longitud de onda. El problema es que decaen rápidamente en cuanto se alejan de la superficie —se desvanecen, de ahí su nombre— y las lentes normales no pueden captarlas.

En el año 2000, el físico inglés John Pendry propuso un tipo de lente que sería capaz de superar la barrera de la difracción. Para ello sólo tenía que cumplir una condición: que su índice de refracción fuese negativo. Una lente de este tipo sí podría atrapar las ondas evanescentes, obteniendo así hasta el más mínimo detalle de un objeto. El resultado sería una imagen con una resolución jamás conseguida hasta ahora.

Hoy sabemos que el planteamiento de Pendry se puede llevar a cabo mediante metamateriales. De hecho, ya se han fabricado las primeras superlentes con una resolución de 40 nanómetros, mejorando notablemente las prestaciones de las lentes convencionales. Y esto es sólo el principio.

opaco. En cambio, en muchos líquidos y gases los átomos están más espaciados y se mueven con mayor libertad, de forma que la luz sí puede pasar entre ellos. Estas sustancias son transparentes, como el agua y el aire. (También hay algunos sólidos transparentes, como los cristales).

En un medio transparente se puede comprobar claramente el fenómeno de la refracción. Por ejemplo, cuando introducimos lentamente un popote en un vaso de agua y observamos que el trozo sumergido parece doblarse. En realidad al popote no le ha pasado nada, son los rayos de luz los que se desvían al pasar del agua al aire —se refractan— y nos hacen creer que el popote está torcido.

### La refracción negativa

Para describir cómo se desvía la luz al atravesar un material existe una magnitud física llamada índice de refracción, que se define como el cociente entre la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de la luz en ese material. Cuando la luz atraviesa cualquier material transparente choca con millones y millones de átomos que,

aunque no consigan detenerla, sí la frenan. Sin embargo, en el vacío puro no existe ni un solo átomo que dificulte su viaje. Por eso la velocidad de la luz en cualquier otro medio siempre será menor que en el vacío, y el índice de refracción de ese medio será positivo y mayor que la unidad. Por ejemplo, el índice de refracción del aire es 1.0003; el del agua, 1.3 y el del diamante, 2.4 (en el vacío, como se deduce de la definición, el índice de refracción es igual a 1). En general, cuanto más denso es un medio, más se frena la luz y mayor es el índice de refracción.

¿Qué ocurriría si el índice de refracción de un material fuese negativo? En condiciones normales, cuando la luz pasa de un medio a otro con distinto índice de refracción, se desvía hacia el lado opuesto de la normal (la línea imaginaria perpendicular a la superficie que separa ambos medios). En cambio, si la luz viajase de un medio con índice de refracción positivo a otro que lo tuviese negativo (o viceversa), se desviaría hacia el mismo lado de la

normal por el que llegó. Esta diferencia puede parecer insignificante, pero afectaría considerablemente nuestra visión de las cosas. Si el agua tuviese un índice de refracción negativo, el popote parecería doblarse hacia el exterior, no hacia el fondo del vaso. Y de la misma manera, un pez que estuviese en el fondo de un lago parecería estar flotando ¡por encima de su superficie! La refracción negativa chocaría de lleno con nuestro sentido común.

El físico ruso Victor Veselago vislumbró la posibilidad de hacer materiales con índice de refracción negativo hace más de tres décadas, pero en aquel momento era algo tan extraño y sorprendente que su propuesta cayó en el olvido. Sin embargo, los avances científicos de la última década han resucitado la idea de Veselago, en especial gracias a los llamados *metama-*



## Espejismos

Una de las consecuencias más sorprendentes de la refracción de la luz es lo que coloquialmente llamamos espejismos. Quizá hayas notado, al ir por una carretera en pleno verano, que en el asfalto aparecen a lo lejos zonas en las que la luz se refleja igual que si hubiese una superficie líquida, como agua. Pero cuanto más se avanza hacia la zona “mojada”, ésta parece alejarse al mismo tiempo.

po. Y cuando finalmente logramos alcanzarla, desaparece.

Este efecto se debe a que en días muy calurosos, el aire está más caliente cerca del suelo y se vuelve gradualmente más frío con la altura. (Si hace muchísimo calor incluso se puede apreciar a simple vista cómo sube el aire caliente desde el suelo debido a la diferencia de temperatura). Como la densidad de una sustancia depende de su temperatura, resulta que el aire cercano al asfalto es menos denso que el que está por encima, porque se halla más caliente. Al variar la densidad del aire, también lo hace su índice de refracción. En esta situación, la luz que proviene de los objetos lejanos se refracta de forma continua al atravesar las distintas capas de aire y se curva: un rayo que se aproxime al suelo con poca inclinación no llega a tocarlo nunca, sino que se dobla hacia arriba. Estos rayos llegan al observador, quien ve en el suelo una imagen borrosa del objeto. Pero al mismo tiempo hay otros rayos que también proceden del propio objeto y que llegan directamente al ojo del observador. Éste tiene la impresión de ver a la vez el objeto y, al pie del mismo, una segunda imagen invertida, como si ésta fuese el reflejo de aquella. Imagínate por un momento que estás en medio del desierto y ves a lo lejos una palmera y su imagen reflejada en el suelo. ¿Quién podría pensar entonces que no es debido a una capa de agua? Claro que al acercarte descubrirías que la refracción de la luz te ha jugado una mala pasada. Lo mismo ocurre en el caso del charco en la carretera: lo que parece agua no es otra cosa que un trozo de cielo “reflejado” hacia el observador.

un átomo es del orden del nanómetro, la milmillonésima parte de un metro). La nanotecnología es una de las ramas de la ciencia que más ha progresado en los últimos años.

Existe una diferencia esencial entre los materiales ordinarios y los metamateriales. Las propiedades ópticas de casi todos los materiales que se encuentran en la naturaleza derivan de las características de los átomos y moléculas que los forman. El comportamiento de un trozo de cobre ante la luz proviene, en última instancia, de la respuesta de cada átomo individual de cobre. Por eso se dice que dichas propiedades dependen de la composición. El caso de los metamateriales es distinto, porque las propiedades ópticas se definen

a partir de su estructura. Es decir, según la forma exacta y la distribución concreta de sus elementos, se puede conseguir que la luz tenga un comportamiento anómalo al atravesar estos materiales. Por ejemplo, esos mismos átomos de cobre colocados de la manera apropiada, son capaces de guiar a la luz por caminos que no seguiría espontáneamente. Así se consigue que el índice de refracción del metamaterial sea negativo.

El desarrollo de los metamateriales ha supuesto un punto de inflexión en la historia de la óptica. Los científicos disponen ahora de una herramienta para manejar a su antojo el comportamiento de la luz. Por ejemplo, podrían intentar modificar el índice de refracción en el interior de un metamaterial de tal manera que la luz lo rodease, en vez de atravesarlo o reflejarse. La idea es similar a lo que hace el agua de un río cuando se encuentra una roca: la rodea y luego se vuelve a juntar, sin que quede ninguna huella de la presencia del obstáculo.

Imagínate ahora que envuelves con este metamaterial un objeto cualquiera. Como el metamaterial impediría que la luz llegase a iluminarlo, entonces no podrías verlo, ni siquiera el más mínimo reflejo o sombra. Y lo que es mejor, podrías ver los objetos que se encuentran a su espalda, ya que la luz lo rodearía. Si no puedes ver un objeto y sí lo que hay detrás, ¿entonces es que el objeto se ha vuelto invisible! El metamaterial en cuestión funcionaría como una auténtica capa de invisibilidad.

## Primeros resultados

En 2006 se anunció que un equipo de investigadores estadounidenses e ingleses, encabezado por John Pendry, del Imperial College en Londres, había conseguido que un pequeño anillo de cobre se hiciera invisible a las microondas usando metamateriales. El objetivo de la invisibilidad se había conseguido, aunque sólo en parte. Las microondas son un tipo de ondas electromagnéticas que nuestros ojos no ven. También son ondas electromagnéticas los rayos gamma, los rayos X, la radiación ultravioleta, la luz visible, la radiación infrarroja y las ondas de radio. Todas ellas viajan a la velocidad de la luz, pero tienen longitudes de onda distintas. La luz visible, que es la que captan nuestros ojos, se limita a la estrecha franja de longitudes de

teriales, unos materiales con propiedades extrañas, nunca vistas en la naturaleza.

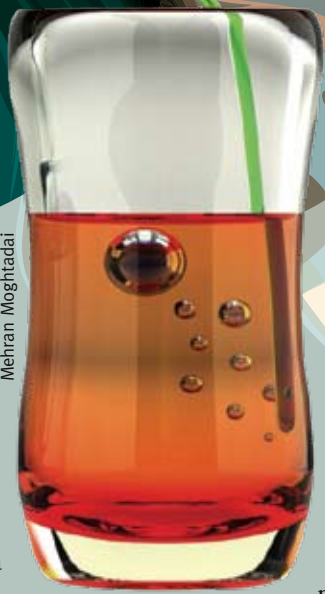
## Esquivar la luz

Los metamateriales son estructuras creadas de forma artificial a partir de sustancias naturales como metales (cobre, plata, etc.) o semiconductores, como el silicio. Los científicos disponen estos elementos de manera minuciosa a escalas minúsculas, cientos de veces más pequeñas que el grosor de un pelo. Esta habilidad para manipular estructuras atómicas se conoce como nanotecnología (el tamaño típico de



Mehran Moghtadai

onda comprendida entre los 380 y los 780 nanómetros. El ojo percibe cada una de estas longitudes de onda como un color diferente, desde violeta hasta rojo.



Podríamos pensar que si se ha conseguido la invisibilidad para las microondas, debería ser igual de sencillo hacerlo para otra longitud de onda cualquiera. Pero no es así. Para que un metamaterial tenga refracción negativa, los detalles de su estructura deben ser de tamaños menores que la longitud de onda de la luz utilizada. En el caso de las microondas, la longitud de onda es de unos tres centímetros, por lo que el metamaterial debe tener estructuras que sean menores que esos tres centímetros. Eso es relativamente sencillo para la tecnología actual. La cosa se complica si queremos hacer lo mismo con la luz visible, por ejemplo, luz azul, pues su longitud de onda es de sólo 450 nanómetros.

En apenas un año se consiguió superar este obstáculo. A principios de 2007 se dio a conocer el primer metamaterial que operaba en el rango visible de la luz. El metamaterial fue creado por el grupo de investigación de Costas Soukoulis, del Laboratorio Ames del Departamento de Energía de Estados Unidos y sus colegas

### Más información

- [www.universia.es/portada/actualidad/noticia\\_actualidad.jsp?noticia=87480](http://www.universia.es/portada/actualidad/noticia_actualidad.jsp?noticia=87480)
- [www.divulgauned.es/spip.php?article51](http://www.divulgauned.es/spip.php?article51)

Stefan Linden y Martin Wegener de la Universidad de Karlsruhe, en Alemania. Las pruebas demostraron que este nuevo metamaterial, formado por capas alternas de plata y fluoruro de magnesio separadas apenas 100 nanómetros, tenía un índice de refracción de  $-0.6$ . Esto no significa que ya se haya logrado la invisibilidad para la luz visible, pero un requisito previo para hacerlo es que el material tenga un índice de refracción negativo. Ya lo tenemos y en un tiempo récord.

### Los retos

Cuando se alcance la invisibilidad para cualquier longitud de onda, el siguiente paso sería crear un metamaterial que sea invisible no sólo a una longitud de onda, sino a muchas. Todos los objetos que nos rodean están constantemente reflejando parte de la luz que les llega, de forma que nuestro ojo recibe un amplio abanico de longitudes de onda, tantas como colores distintos somos capaces de percibir. Hacer que desaparezcan todas ellas es probablemente el mayor reto al que se tengan que enfrentar los científicos. Pero no es el único.

La capa de Harry Potter era “más suave que la seda, ligera como el aire”. Ahora bien, para que una capa así funcione, el índice de refracción dentro del metamaterial debería ajustarse constantemente a los movimientos de la capa. Hoy por hoy, eso es inviable. Más realista es pensar que la primera capa de invisibilidad sea una estructura sólida —un cilindro, por ejemplo— hecha de metamateriales. De esa manera, podría darse un valor fijo al índice de refracción en su interior. Además, los metamateriales con los que se construya

serán extremadamente delicados: un pequeño golpe y la capa de invisibilidad podría hacerse añicos. En vez de suave y ligera como la de Harry Potter, la capa sería más bien “rígida como una barra de hierro, frágil como el cristal”. Confiamos en que las versiones más avanzadas puedan incorporar metamateriales flexibles. Si no, quien esté dentro de la capa tendría una mínima capacidad de movimiento. También es de esperar que los científicos sean capaces de encontrar metamateriales más resistentes. En caso contrario, sería comprometido hasta estornudar con la capa puesta.

Otro problema de la capa de invisibilidad es que si hace invisible al que está dentro, el efecto también se aplica en el sentido contrario: todo lo de fuera se vuelve invisible para el que está en su interior. Es decir, si te cubre una capa de invisibilidad no podrías ver nada de lo que pasa en el exterior. ¡El hombre invisible sería también ciego! Por suerte, un grupo de científicos chinos propuso el año pasado una solución para este problema. Según las investigaciones de Huanyang Chen y sus colegas de la Universidad de Jiao Tong de Shanghai, ciertos materiales puestos en contacto con la capa invisible permitirían que entrara en ella la luz. Si se acoplasen dos pequeños trozos de uno de estos materiales a la altura de los ojos, sería suficiente para poder ver desde dentro sin llamar la atención.

A pesar de estos detalles que quedan por pulir, debemos ser optimistas. Puede que pasen años o incluso décadas antes de alcanzar la invisibilidad completa, pero vamos por el buen camino. La frenética actividad investigadora de los últimos tiempos y los continuos avances y descubrimientos así lo confirman. Lo que ayer parecía imposible puede que mañana deje de serlo. 👁



#### Para nuestros suscriptores

La presente edición va acompañada por una guía didáctica, en forma de separata, para abordar en el salón de clases el tema de este artículo.

Daniel Martín Reina, frecuente colaborador de *¿Cómo ves?*, es físico, egresado de Ciencias Físicas de la Universidad de Sevilla.