

Naturaleza de la luz

La teoría fundamental sobre la luz es publicada por James Clerk Maxwell en 1865, en el trabajo "Una teoría dinámica del campo electromagnético", que posteriormente completa con su tratado sobre electricidad y magnetismo en 1873. En él, Maxwell unifica la electricidad y el magnetismo en sus conocidas cuatro "Ecuaciones de Maxwell", que suponen la piedra angular del Electromagnetismo, del que deriva que la luz no es más que una sucesión de campos eléctricos y magnéticos que se propagan en el tiempo y en el espacio retroalimentándose en forma de onda, de acuerdo a dichas ecuaciones. Basándose en dichas ecuaciones, se puede establecer una longitud de referencia asociada a la propagación en el espacio de la onda electromagnética, definida como la distancia entre dos máximos consecutivos del campo electromagnético, a la que denominamos "**longitud de onda**". De acuerdo al valor de la longitud de onda, es posible encontrar un gran abanico de ondas electromagnéticas, tal y como se puede apreciar en la Figura 1, desde las ondas de radio, con longitudes de onda de metros y kilómetros, hasta los rayos X, con longitudes de onda de unos pocos Ångstrom, pasando por las microondas, ondas de infrarrojo, y las ondas ópticas (450 nm-750 nm), que es el único rango de longitudes de onda perceptible por el ojo humano, por lo que también es denominado ondas del visible. Se puede afirmar, sin exageración, que el desarrollo del Electromagnetismo, tanto en su faceta científica fundamental, como en su posterior desarrollo en la ingeniería aplicada, supuso una revolución tecnológica sin precedentes a partir del siglo XIX, gracias a la cual hoy se siguen desarrollando desde chips miniaturizados con corrientes eléctricas en la nanoescala, hasta señales de comunicación por fibra óptica que suponen la base de la transmisión de información en el mundo de comienzos del siglo XXI.

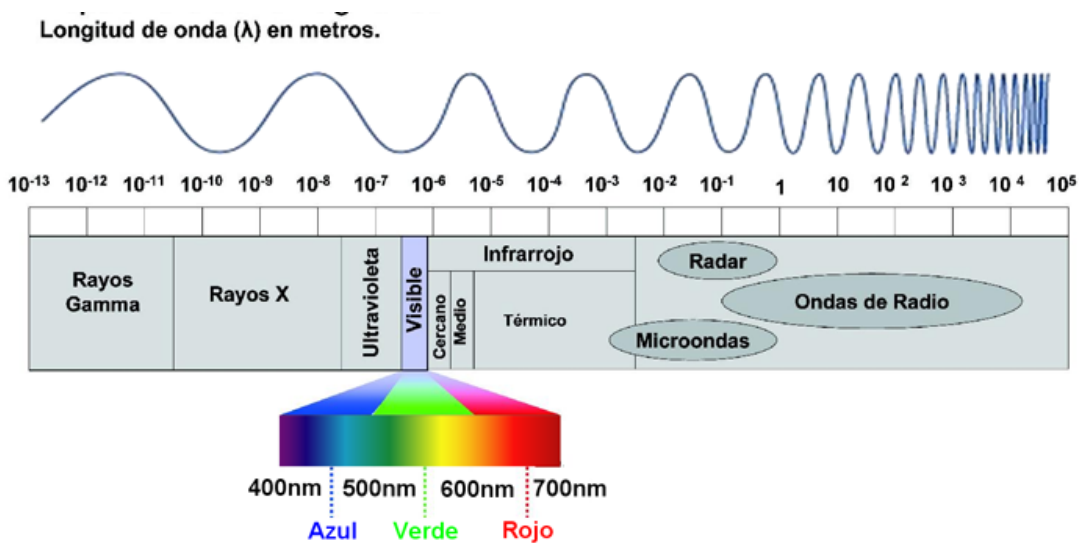


Figura 1: Espectro electromagnético. Las ondas electromagnéticas presentan diferentes longitudes de onda que van desde los metros y kilómetros de las ondas de radio, hasta las décimas de nanómetro de los rayos X. La luz, o radiación del visible presenta una longitud de onda entre los 400 nm (azul) y los 750 nm (rojo).

El gran éxito de la aplicación de las ecuaciones de Maxwell combina la belleza intrínseca de unas ecuaciones fundamentales, armoniosas, y relativamente simples, con la fuerza y la complejidad de los

dispositivos más sofisticados en cualquier industria, desde centrales eléctricas, hasta plantas de producción de dispositivos electrónicos.

Ya en el siglo XIX parecía que las ecuaciones de Maxwell daban respuesta a todos los interrogantes que planteaba la luz, sin embargo, en el año 1905, Albert Einstein propone una explicación radicalmente contraria sobre la naturaleza de la luz para explicar un fenómeno complejo en física de superficies, el efecto fotoeléctrico. Las propiedades de los electrones arrancados de una superficie metálica al incidir un haz de luz sobre ellos, no seguía las pautas del Electromagnetismo clásico, y de una manera rupturista, Einstein propone que la luz también contiene una naturaleza corpuscular, o en otras palabras, que la luz está compuesta de unos cuantos o paquetes de energía, llamados **fotones**, que consiguen explicar la interacción de luz con los electrones de un sólido. Este efecto, comprobado experimentalmente, otorga el premio nobel a Einstein, y supone la constatación de la dualidad onda-corpúsculo del mundo que nos rodea, postulada posteriormente por Louis de Broglie en 1924, que plantea que todo objeto tiene una naturaleza dual, como onda y como corpúsculo, según su velocidad. De esta manera, la luz se comporta en muchas ocasiones como una onda, sin embargo, en algunas circunstancias, los cuantos de energía o "fotones" de los que está constituida, adquieren relevancia en el comportamiento de la luz y gobiernan el intercambio de energía y velocidad con otros objetos, y con el entorno. Esta maravillosa dualidad, explica de manera compacta prácticamente todos los fenómenos que involucran la interacción de luz con la materia.

Límite de difracción

El electromagnetismo, a través de las ecuaciones de Maxwell, describe de manera muy rigurosa y exacta la propagación de la luz en un medio y su interacción con objetos de diverso tamaño y composición. El fenómeno de difracción, aludido anteriormente, producido en toda onda cuando ésta interacciona con un objeto, da lugar a un fenómeno peculiar propio de todas las ondas: un frente de ondas no puede ser localizado o atrapado sin límite. La onda, con su longitud de onda asociada característica (color), "se esparce" al interaccionar con la materia, y cualquier intento de localización por debajo de una distancia similar a la longitud de onda, resulta imposible, tal y como se describe esquemáticamente en la Figura 2. Descrito en lenguaje coloquial, la onda no se deja atrapar por debajo de su longitud de onda. Esta frontera de localización de una onda se denomina en Física "el límite de difracción". Dicho límite inherente a toda onda, establece una frontera por debajo de la cual, la onda no puede ser localizada, y por tanto resulta incapaz de resolver objetos de un tamaño inferior a una longitud D , que depende de la longitud de onda, según $D = \lambda / 2NA$, donde NA es la apertura numérica de un microscopio, tal y como estableció Ernst Abbe en 1873, como valor límite de la resolución óptica debido al límite de difracción.

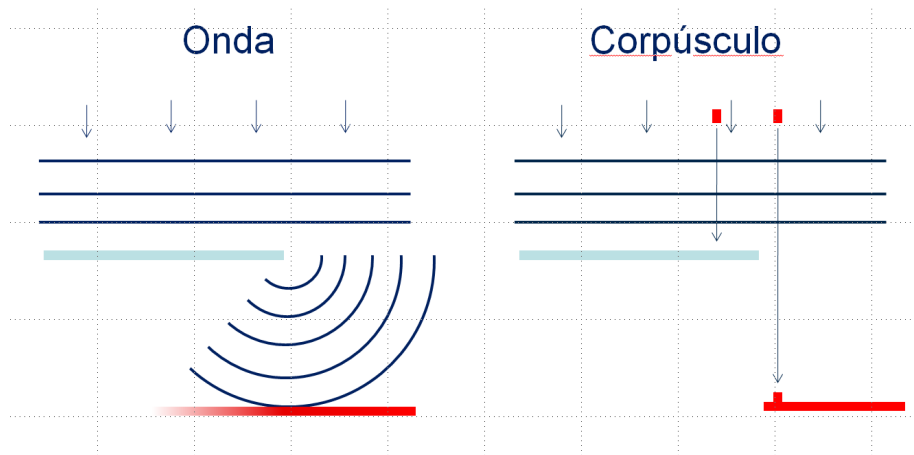


Figura 2: Diferencia de comportamiento entre ondas y objetos corpusculares. Izquierda: una onda se "difracta" al encontrar un obstáculo, esparciendo su frente de onda. Derecha: un corpúsculo choca contra el obstáculo, atravesándolo o no.

El límite de difracción establece un reto a la óptica: la longitud de onda del visible ($\lambda \approx 450 \text{ nm}-750 \text{ nm}$) establece como límite de difracción tamaños del orden de entre 200 nm a 400 nm, por lo que un haz óptico convencional es incapaz de identificar y discernir ópticamente objetos por debajo de dicho tamaño. Las lentes más potentes y las fibras ópticas más sofisticadas, pueden llegar a identificar y distinguir elementos de los constituyentes celulares, que presentan precisamente tamaños de varios micrómetros, pero un microscopio óptico, no consigue iluminar objetos con tamaño por debajo de la media micra. El mundo nano queda, por tanto, en esta situación de óptica convencional, fuera del alcance de la luz.

Nanoóptica

La Nanociencia y la Nanotecnología han revolucionado durante las últimas décadas el estatus tecnológico de la humanidad. La concepción, fabricación, y utilización de estructuras nanométricas, es decir, del orden de 10^{-9} metros de longitud, suponen un cambio radical en la concepción de muchas de las realidades tecnológicas a las que el ser humano se había acostumbrado durante el siglo XXI. La miniaturización de los chips de silicio con puertas en los transistores inferiores a 7 nm es un buen ejemplo del impacto de la nanotecnología en prácticamente todos los dispositivos electrónicos que gobiernan nuestra vida. El desarrollo de nuevos materiales y dispositivos en la nanoescala permite realizar procesos físicos, químicos y biológicos de una manera más eficiente, miniaturizada, y con gran ahorro energético, lo que los hace más fiables, y seguros. Además de la mejora de procesos y tecnologías ya establecidas, la nanotecnología permite alcanzar nuevas fronteras del conocimiento, abriendo la puerta del nanomundo, donde el sueño de "jugar" con átomos y moléculas ha quedado al alcance de los científicos y tecnólogos. La Óptica se ha beneficiado enormemente del desarrollo de la Nanociencia y la Nanotecnología. La fabricación de nanoestructuras metálicas que actúan como nanoantenas captadoras y emisoras de luz ha supuesto una revolución en las tecnologías con luz visible, ya que estas nanopartículas metálicas han conseguido lo que parecía imposible: atrapar la luz en la nanoescala. Gracias a unas excitaciones del plasma de electrones en la superficie de las nanopartículas

metálicas, denominadas "plasmones de superficie", la luz, que en condiciones normales no puede localizarse por debajo del límite de difracción, queda atrapada en las dimensiones de la nanopartícula, a pesar de que ésta sea mucho más pequeña que la longitud de onda (color) utilizado. Este fenómeno es posible únicamente por el movimiento y propiedades de estas excitaciones de los electrones que se "funden" con la luz, permitiéndole conectar con la nanoescala. De alguna manera, estas nanopartículas actúan como nanoantenas ópticas que permiten captar y emitir la luz en la nanoescala, actuando, por tanto, como "nanolinternas" que iluminan el nanomundo (ver Figura 3). Esta nueva posibilidad de atrapamiento de la luz por debajo del límite de difracción gracias a los plasmones de las nanopartículas permite desarrollar gran cantidad de aplicaciones tecnológicas, como se detalla a continuación.

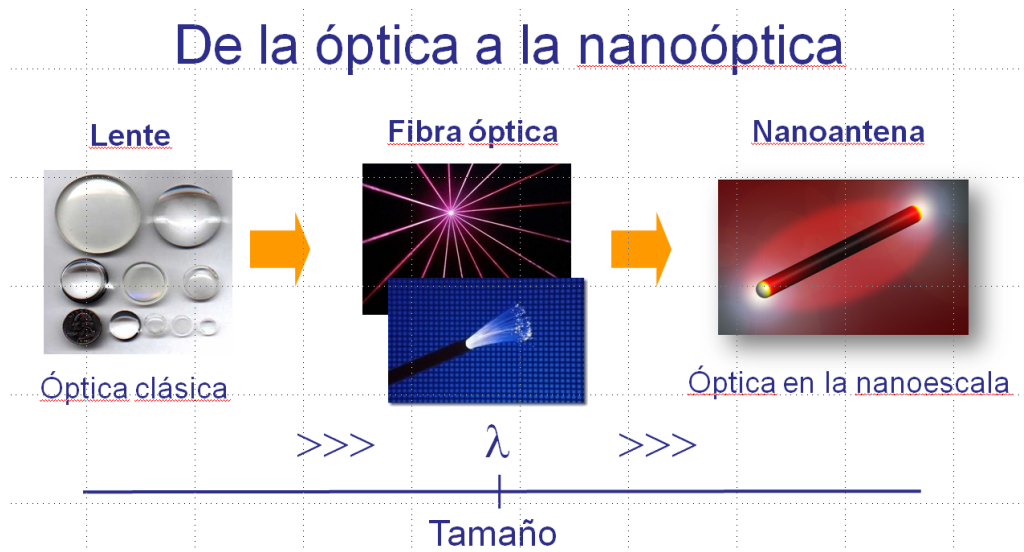


Figura 3: Esquema ilustrativo de la transición de la óptica convencional (lentes) a la Nanoóptica (nanoantenas), pasando por las fibras ópticas, gracias a la reducción del tamaño de las estructuras captadoras de luz, por debajo de la longitud de onda (λ).

Aplicaciones de la Nanoóptica

Sin ánimo de ser exhaustivo, y de una manera puramente ilustrativa, se pueden apuntar una serie de ámbitos en los que la Nanoóptica presenta un potencial de impacto tecnológico muy alto. Estos ámbitos presentan promesas muy sólidas para afrontar retos sociales fundamentales, y tienen como base la reciente consecución de unos hitos tecnológicos que suponen la presente realidad de la Nanoóptica. Entre los campos en los que la Nanoóptica ha desarrollado gran actividad y logros notables podemos destacar los siguientes:

- (i) Nanoscopía óptica (instrumentación y caracterización)
- (ii) Espectroscopía molecular (seguridad y salud)
- (iii) Termoterapia oncológica (salud)
- (iv) Almacenamiento de energía (sostenibilidad)
- (v) Materiales artificiales
- (vi) Tecnologías de la comunicación.

Se describen a continuación, de manera somera, algunos de estos ámbitos, con el objetivo de adquirir una idea general del potencial de la Nanoóptica.

Nanoscopía óptica

Tal y como se ha indicado en la introducción, el límite de difracción no permite distinguir objetos ni estructuras por debajo de media micra con luz visible, sin embargo, con la utilización de las nanoantenas ópticas, se puede construir una nanoestructura metálica que localice la luz en la nanoescala, y sirva como nanolinterna para iluminar y distinguir el nanomundo. Esta estructura puede ser una punta metálica, con forma cónica sobre la que incide la luz. Los electrones de la nanopunta metálica son capaces de atrapar la luz en dicha punta, permitiéndole actuar como nanolinterna. Esta punta es la base de los microscopios ópticos de barrido por dispersión (s-SNOM por sus siglas en inglés) que permiten "ver" y distinguir propiedades de materiales y entornos de superficies con resolución nanométrica. Un ejemplo de este potencial se muestra en la Figura 4, donde una de estas puntas de microscopio es iluminada por un haz láser de longitud de onda visible o infrarroja, y se observa cómo la luz queda atrapada en dicha punta, que actúa como nanoantena receptora y emisora. Además de localizar la luz, esta nanopunta emite la información de contraste óptico de un material según va barriendo el entorno del mismo, generando una imagen óptica con resolución nanométrica, tal y como se observa en la imagen óptica de la superficie superpuesta bajo la punta. En este sentido, la Nanoóptica con nanoantenas ha dado paso a la posibilidad de realizar nanoscopía de materiales en lugar de microscopía, ya que las imágenes ópticas obtenidas no presentan el límite de difracción. Este potencial permite desarrollar métodos ópticos de control de calidad en procesos de fabricación industrial, entre otras aplicaciones.

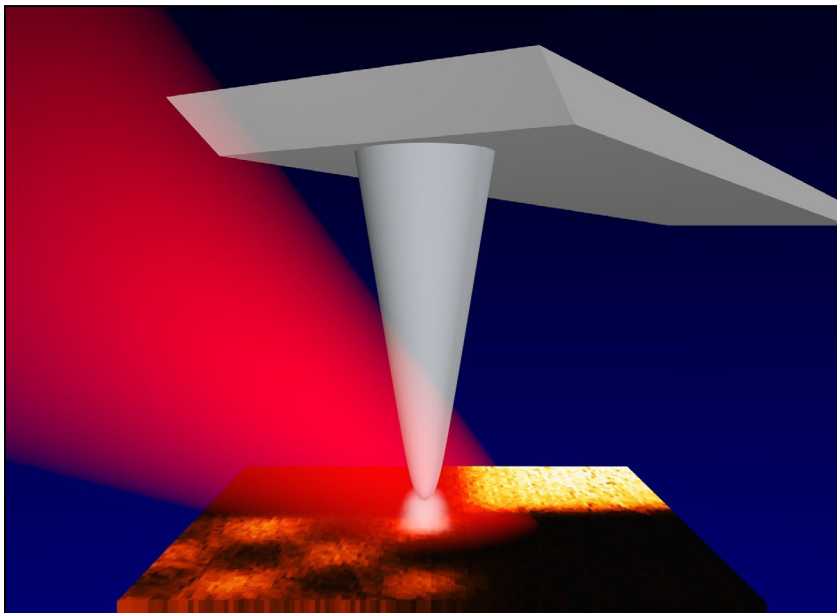


Figura 4: Nanoscopía óptica de una superficie. Una nanopunta metálica es capaz de atrapar la luz en el extremo de la misma cuando un haz de luz roja incide sobre la misma. Esta nanopunta actúa como una nanolinterna que permite, al barrer la misma sobre un material, obtener una imagen óptica de dicha muestra con resolución nanométrica.

Espectroscopía molecular

La posibilidad de obtener información óptica sobre un objeto en la nanoescala ha sido también aplicado en materiales orgánicos, tales como moléculas. En este caso, la información de la imagen óptica se ha combinado con información espectroscópica. La espectroscopía de una molécula o un material es la respuesta óptica que presenta ese material (luz devuelta por el material) ante diferentes longitudes de onda (colores), permitiendo identificar unas longitudes de onda específicas (picos espectroscópicos) del material que identifican de manera unívoca a dicha molécula o material. Gracias a la espectroscopía óptica en la nanoescala es posible no sólo ver una molécula sino identificarla sin ambigüedad gracias a sus huellas digitales espectroscópicas. Este tipo de tecnologías permite desarrollar la sensórica de cantidades ínfimas de una sustancia, lo cual tiene una repercusión fundamental en retos como la seguridad (explosivos, sustancias tóxicas), o la salud (detección de antígenos y sustancias nocivas).

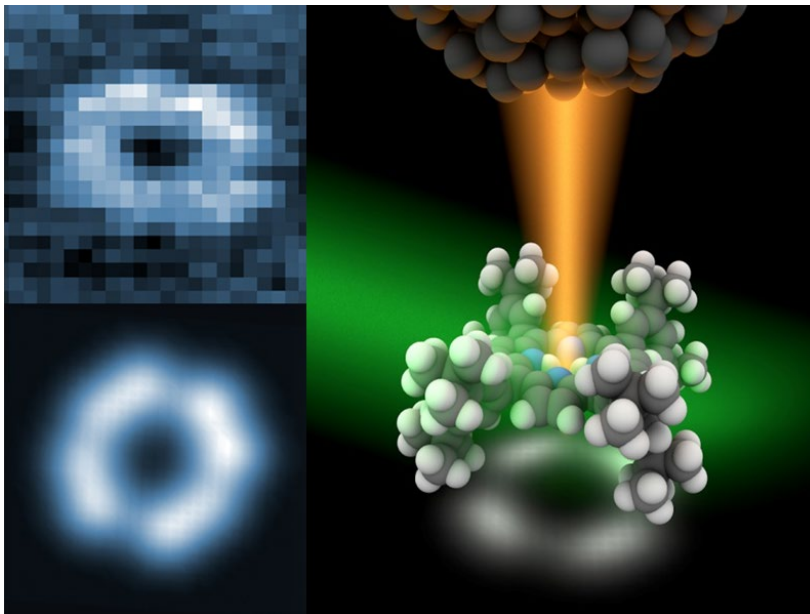


Figura 5: Arriba izquierda: Imagen óptica de una sola molécula. Abajo izquierda: Cálculo de la imagen según las condiciones de iluminación en un microscopio de efecto túnel. Imagen grande: Esquema de la molécula al ser iluminada con una nanoantena.

Termoterapia oncológica

Las nanopartículas o antenas ópticas no solo iluminan el nanomundo cuando atrapan la luz, sino que también suben su temperatura alrededor, como consecuencia de esa concentración de energía. Cuando una nanopartícula atrapa la luz, su entorno inmediato sube varios grados su temperatura. Este efecto puede ser utilizado como terapia térmica si las nanopartículas pudieran ser aproximadas cerca de células tumorales de manera eficiente. Precisamente, el hecho de que las nanopartículas sean tan pequeñas las hace fácilmente transportables por un organismo vivo a través del riego sanguíneo, ya que las membranas permiten el paso de objetos inferiores a unos 100 nm. Desde hace varios años, grupos punteros en Estados Unidos (Rice University en Houston) han conseguido diseñar nanopartículas de oro biocompatibles, que se adhieren por permeabilidad natural a las células oncológicas, que muestran

mayor esponjosidad, en un intervalo de unas pocas horas después de su inoculación sistémica. Las nanopartículas son diseñadas para resonar precisamente a una longitud de onda (color) situado en el infrarrojo, donde el cuerpo humano presenta una ventana de transparencia. Al incidir en la zona tumoral con un haz de luz totalmente inocuo, las nanopartículas reciben dicha luz y la localizan en su superficie, calentando todo su entorno inmediato. Las células tumorales próximas a las nanopartículas mueren por incremento de la temperatura local de una manera nada invasiva. Después de muchos años de monitorización de la toxicidad de las nanopartículas, se están dando resultados clínicos muy prometedores en la erradicación de cáncer de próstata, por ejemplo, cuando las nanopartículas son convenientemente localizadas en el área tumoral. Otros tipos de cáncer localizado, tales como el de pecho o el de cerebro están siendo tratados de la misma manera.



Figura 6: Nanopartículas de oro localizadas en una zona tumoral sobre las que incide luz visible, totalmente inocua, calentando la zona, y eliminando las células tumorales por acción térmica.

Almacenamiento de energía

Otro ámbito donde las nanoantenas metálicas podrían incidir de manera muy positiva es en el almacenamiento de energía solar. En un proceso fotovoltaico, un material semiconductor, o conductor orgánico recibe luz, que es convertida en energía eléctrica al producirse la separación de cargas positivas y negativas en el semiconductor. Este proceso suele ser muy poco eficiente, y tanto la industria fotovoltaica como grupos de investigación en todo el mundo dirigen sus esfuerzos a la mejora de la efectividad del proceso de conversión de energía solar. El potencial de las nanoantenas ópticas para

localizar la luz, permite que el proceso de separación de cargas de un semiconductor situado en su proximidad, se haga de manera más rápida y eficiente, por lo que esta línea de investigación está en el punto de mira de muchos de los programas de ciencia, tecnología e innovación como objetivo estratégico para dar respuesta al reto social de la sostenibilidad y el desarrollo de energías alternativas como motor de desarrollo económico.

Materiales artificiales

De la misma manera que los materiales naturales están constituidos por átomos cuya disposición en una red espacial dotan a dicho material de todas sus propiedades, incluidas las ópticas, existe igualmente la posibilidad de ordenar las nanopartículas metálicas en redes nanométricas formando materiales artificiales, o nanomateriales, cuyos constituyentes son precisamente las nanoantenas de diversas formas y tamaños. La conjunción del tipo de nanoantena óptica elegida, junto con su distribución en una red espacial, permite generar materiales artificiales o "metamateriales" que presentan nuevas propiedades ópticas, imposibles de obtener en materiales naturales. Mediante un diseño apropiado, se pueden obtener, por ejemplo, materiales artificiales que presenten un índice de refracción negativo, los cuales doblan la luz en sentido contrario al de los materiales naturales, permitiendo efectos ópticos inauditos. Pero es quizás el manto de la invisibilidad, formado por capas de estos metamateriales el logro más efectista y espectacular de las propiedades de estos materiales inusuales. Al cubrir un objeto con uno de estos metamateriales, el diseño particular del material puede deformar y guiar la luz de una manera que evite la formación de sombras o desvío de rayos, que es lo que permite ver un objeto, consiguiendo que el objeto cubierto se vuelva invisible de una manera efectiva (ver Figura 7). El sueño de la capa de invisibilidad total de Harry Potter todavía no está al alcance de la mano para objetos macroscópicos, y para cualquier color, pero algunos nanoobjetos ya han sido convertidos en invisibles al ser cubiertos por uno de estos mantos de metamaterial para un determinado color. El potencial de diseño de las propiedades ópticas de un material según las necesidades trasciende el mundo del camuflaje y las operaciones militares, y se adentra en el ámbito del confort en el hogar, la construcción y el arte.

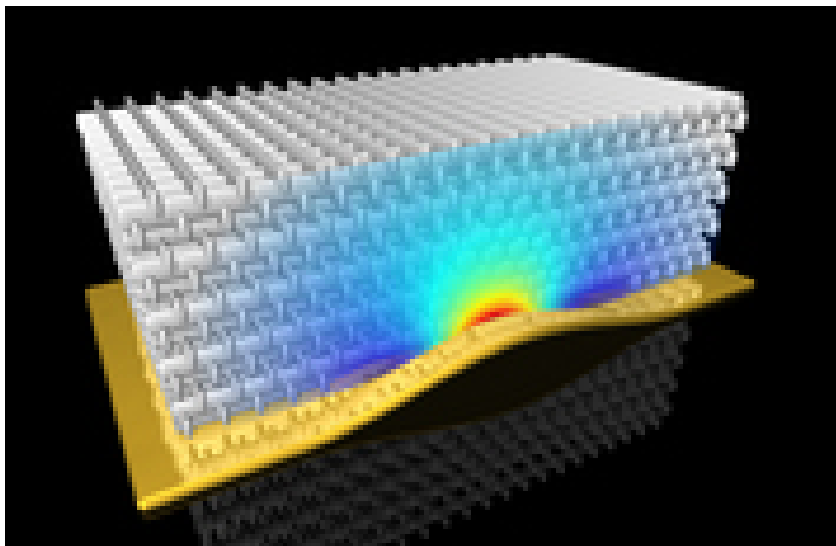


Figura 7: Capa de metamaterial que consigue crear un manto de invisibilidad y esconder un objeto debajo, gracias a las propiedades ópticas inusuales de la capa de material artificial formado por nanoantenas.

Tecnologías de la comunicación

Por último, merece una mención especial el impacto de la Nanoóptica en las comunicaciones. Actualmente, la ingente cantidad de información que se transmite a través de todo el mundo de una manera local o de larga distancia, adopta la forma de pulso óptico que contiene la información de ceros y unos (bits) que se transmiten a través de fibras ópticas. Esta manera de transmisión es muy efectiva y la más rápida posible, sin embargo, tanto al ser generada como al ser procesada, esta información requiere de una conversión entre el formato óptico y el electrónico, siendo éste último el formato natural de procesamiento de datos. La información procesada por los electrones es mucho más lenta y produce calentamiento de las estructuras que soportan dicho procesamiento (transistores y chips). Las nanoantenas ópticas plantean la posibilidad de actuar como interfaces alternativos rápidos y directos entre la información óptica de diversa naturaleza. Se trataría de evitar el lento procesamiento de los electrones, al desarrollar una computación puramente óptica donde los estados fotónicos podrían ser directamente generados, manipulados, procesados, emitidos y recibidos por nanoestructuras que ahorrarán velocidad, tamaño y pérdidas de energía. La computación cuántica con fotones es un campo en desarrollo que permitiría este sueño, y las nanoantenas ópticas jugarían un papel fundamental como transductores e interfaces de la misma.

Conclusión

La Nanoóptica brinda inmensas oportunidades en el panorama tecnológico actual. Supone una tecnología clave facilitadora para el desarrollo de ámbitos como la información, las comunicaciones, los materiales avanzados, la salud, o la seguridad, entre otros. Desde que los primeros filósofos comenzaran a cuestionarse sobre la naturaleza de la luz, hasta su localización en la nanoescala gracias al desarrollo de la Nanotecnología, la humanidad ha recorrido un camino apasionante, que cada vez nos ilumina con más fuerza y de manera más impactante. Cuando la luz se hace pequeña, el desarrollo tecnológico se hace grande y aporta un nuevo faro hacia el bienestar y la mejora de calidad de vida del ser humano.