



# Materia luminosa

En poco más de cinco décadas después de su invención, el láser se ha convertido en una herramienta indispensable en casi todos los ámbitos de nuestra sociedad, incluido el de la divulgación científica

**E**n una noche de primavera, un grupo de personas permanece a la intemperie; desafían las condiciones ambientales junto a un tubo blanco montado sobre un sofisticado soporte mecánico. Alguien señala al cielo y explica suculentos detalles sobre la dinámica de los cuerpos celestes. Se ayuda para ello de un rayo verde que emerge de sus manos como por arte de magia. Es un láser, un puntero que emite un rayo de luz prácticamente lineal que se pierde, absorbido por la atmósfera, en la lejanía.

El puntero láser ofrece una maravillosa metáfora del control que tenemos hoy sobre la luz. Y son tantísimas las áreas científicas y técnicas que lo emplean, que la UNESCO ha declarado el 2015 Año Internacional de la Luz y sus Aplicaciones.

La ciencia que ahonda en la generación, el control y la detección de la luz es la fotónica. Se centra en el estudio de las propiedades y aplicaciones de un fragmento del espectro electromagnético que ofrece una gran variedad de comportamientos: el que incluye las radiaciones infrarroja, visible y ultravioleta.

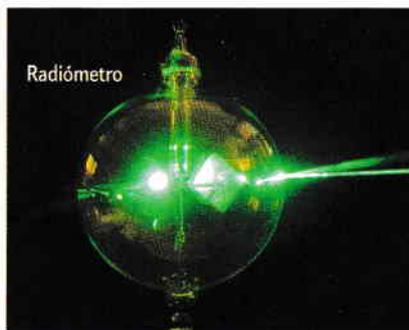


Bombillas de luz infrarroja, visible y ultravioleta

Quizás es por esa diversidad de fenómenos que las mentes más despiertas de todos los tiempos han tratado de comprender qué es exactamente la luz. En esta colaboración seguimos sus pasos con siete experimentos de facilísima reproducción.

Antes que nada, necesitamos encontrar un puntero láser. Por pocos euros podemos conseguir una extraordinaria fuente de luz de color verde, algo inexistente hace solo diez años. Se convertirá en una herramienta fundamental para interrogar la naturaleza, descubrir las sutilidades de la luz y —atención— para demostrar todo ello de forma visual ante nuestros alumnos y audiencias. Manos a la obra.

**1 Luz para empujar.** Apuntemos con nuestro rayo verde a las aspas de un radiómetro (un instrumento que se utiliza para medir la intensidad de la energía térmica radiante y que puede encontrarse en las tiendas de los museos de ciencia). Para sorpresa de todos, empezarán a girar.



Sí, la luz es información, pero también energía, algo que todos tenemos claro porque a menudo la percibimos asociada al calor. Pero el radiómetro nos ofrece una visión más impactante de esa energía, ya que convierte la radiación en movimiento mecánico. Algo interesante de esta demostración es que podemos imaginar la luz como un conjunto de misteriosas partículas invisibles que chocan contra las aspas del molinete, transfiriendo su energía [véase «El molinete de luz», por Wolfgang Bürger; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, junio de 2001; «Empuje lumínico», por Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo de 2010].

**2 Luz que produce luz.** Centrémonos ahora en otro experimento esclarecedor y fácil. Sabemos que la luz es una excelente aliada a la hora de analizar compuestos químicos, ya que cada elemento emite un espectro característico cuando tiene la energía suficiente. Si esparcimos sal común sobre una llama poco luminosa, esta se tornará de un vivo color amarillo. Sabremos así que en la sal de mesa se esconde un metal, el sodio. Y si quemamos compuestos de diversos elementos químicos obtendremos espectros característicos.

Pero la propia luz puede forzar la aparición de firmas lumínicas. Armados con nuestro puntero láser, podemos detectar (científicamente) la calidad de un aceite de oliva sin abrir la botella. Al iluminar el aceite de oliva virgen, y solo este, veremos cómo el intenso rayo verde muta mágicamente para tornarse rojo. Hemos estimulado la aparición de una radiación secundaria, menos intensa que la primaria. De alguna forma, la luz verde procedente del láser ha sido absorbida por moléculas que solo se hallan presentes en los aceites obtenidos en frío.



Cápsula con aceite de oliva

De nuevo, resulta práctico imaginar la luz como paquetes de energía capaces de ser absorbidos por una molécula específica, un pigmento en este caso, la clorofila. Cuando esta absorbe energía, los elec-

TODAS LAS ILUSTRACIONES SON CORTESÍA DE MARC BOADA FERRER

trones de algunos de sus átomos pasan a un estado más energético; cuando estos «caen» a un nivel más estable, emiten un nuevo paquete de energía (un fotón, o un cuanto) que percibimos en forma de luz roja. ¡También el láser verde que tenemos en las manos funciona de forma parecida! En su interior se esconde una fuente primaria, un diodo láser de infrarrojos, que, al atravesar un cristal adecuado, produce una emisión secundaria en el visible de color verde y, por supuesto, calor. He aquí el motivo por el cual estos dispositivos son tan baratos: los fabricantes se aprovechan de una argucia fotónica para simplificar su producción.

3 **Luz absorbida.** Podemos también experimentar con otro aspecto, más ruidoso, de la absorción selectiva. Sabemos que un filtro de color absorbe todas las radiaciones y deja pasar solo algunas, las que vemos. Si situamos un filtro rojo ante una fuente de luz blanca, vemos la lámpara perfectamente roja; ha absorbido todos los otros colores. Por tanto, si colocamos este mismo filtro ante el haz verde de nuestro láser, este no puede pasar. Aunque refleja buena parte de la luz, el filtro deberá pagar un precio energético por absorber la energía e impedir su paso.



Mirémoslo con atención. Si es de plástico delgado, podremos observar una pequeña quemadura: la energía se ha disipado en forma de calor. Pero nuestra audiencia se merece mejores demostraciones. Pongamos un globo rojo bien inflado en el trayecto del rayo verde. Fijemos el globo y el láser de forma que este apunte siempre exactamente en el mismo punto. El globo explotará al instante, para sorpresa del público y nuestro regocijo. Si el láser hace esto con un globo, ¿cuán peligroso puede llegar a ser para los glóbulos oculares de los astros del balompié o de los propios experimentadores?

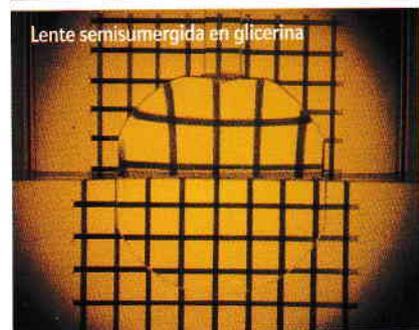
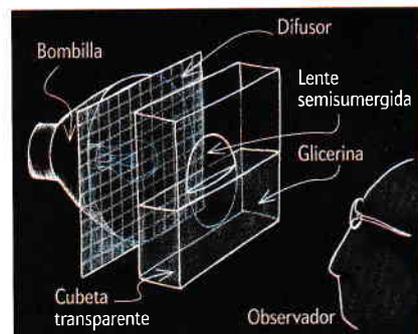
A estas alturas habremos descubierto que el láser se refleja y refracta continuamente, tomando direcciones imprevistas. Vayamos por partes y recordemos las lecciones de la clase de óptica. Allí se nos explicó que, cuando atraviesa una sustancia o un medio denso, la luz viaja a menor velocidad que en el vacío. A la razón entre la velocidad de la luz en el vacío y en el seno del material a examen lo llamamos índice de refracción. Por otro lado, si la incidencia en el medio es perpendicular a la interfase, la trayectoria no sufre desviación alguna y continúa en línea recta; eso sí, a menor velocidad. Pero si la incidencia se realiza en cierto ángulo, sufre una desviación característica.

Llevamos unos 2500 años dedicados a la óptica, aprovechando estas propiedades y construyendo elementos capaces de desviar la luz de forma controlada, con el objetivo de formar imágenes o concentrar la radiación. Las primitivas lentes talladas en cristal de roca, piedras preciosas o vidrio más o menos transparente han sido sustituidas por materiales ópticos extraordinarios. Fabricamos lentes a partir de monocristales de silicio, germanio, cloruro sódico o fluorita, capaces de focalizar desde el infrarrojo hasta el ultravioleta. Fundimos fibras del grosor de un cabello y kilómetros de longitud con un grado de transparencia tal que la luz viaja en su interior con atenuaciones mínimas. Y los polímeros también se han unido al selecto grupo de los materiales ópticos, al que solo acceden compuestos de pureza perfectamente controlada, fruto, a su vez, del uso de la fotónica en las ciencias químicas.

Por todo ello, es hoy muy fácil demostrar, mediante otro sencillo y fascinante experimento, el comportamiento refractivo de los medios y superficies.

4 **Luz que se refracta.** Busquemos una lente de metacrilato —tanto da que sea positiva o negativa—. Si decidimos fabricarla nosotros, podemos obtener una lente cilíndrica a partir de una barra de metacrilato, que seccionaremos por la mitad y luego puliremos. Construyamos una fuente de luz extensa con una bombilla mate y un difusor. Pongamos ante este una cubeta llena hasta la mitad con glicerina (una placa de cultivo a la que se ha recortado el cuello resulta óptima). Sobre el difusor y con un rotulador negro, trazaremos un retículo. Si ante este ponemos la lente, la veremos deformada; si ahora la sumergimos en la glicerina, desaparecerá, convirtiéndose literalmente en invisible.

Abusando del lenguaje, podríamos decir que a la luz no le importa si algo es sólido o líquido, lo único que tiene en cuenta son los cambios en el índice de refracción. Dado que glicerina y metacrilato presentan un índice de refracción idéntico, una vez sumergida la lente, el conjunto se convierte ópticamente en un solo cuerpo, con todas las superficies perpendiculares a la luz, y el retículo se observa sin deformaciones. Hemos conseguido la invisibilidad de la lente.



En esas observaciones, el modelo mental que usamos para trabajar no necesita ni partículas ni ondas; solo rayos, unas entidades que definen la dirección en la que se propaga un flujo de energía o un estrecho haz de partículas. Por eso a una fuente de luz láser la llamamos rayo láser.

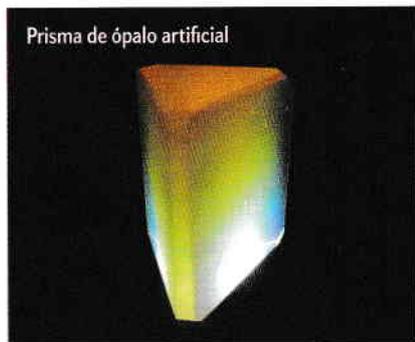
Podemos fabricar fácilmente lentes de todo tipo en metacrilato o espejos en aluminio macizo. Cualquier tornero podrá mecanizarlas y pulirlas. El resultado será patético desde el punto de vista del óptico, pero, junto con el láser, será perfecto para mostrar a todos cómo lentes con diversos perfiles modifican el trayecto óptico y también cómo estas lentes sumadas permiten ampliar imágenes, tal y como hacen microscopios y telescopios.

La luz no solo se refracta; también se refleja. Tras el vidrio del espejo del baño hay una capa de aluminio purísimo. Un metal barato que refleja con igual intensidad todos los colores del espectro visible, de ahí su aspecto «plateado». Una capa

de unos pocos centenares de átomos es ya totalmente opaca y, por tanto, refleja toda la luz posible (sin embargo, la reflexión no es perfecta; una parte de la radiación incidente se absorbe y, por tanto, el reflector se calienta). Para el experimentador, una de las muchas diferencias prácticas entre refracción y reflexión es que esta última es idéntica para todos los colores; es decir, en un espejo todos los rayos, sean de la frecuencia que sean, van a parar al mismo foco.

Esa ausencia de aberración cromática se aprovecha para construir con espejos cocinas solares y objetivos para grandes telescopios; también para microscopios, aparatos donde las condiciones de calidad óptica sí son extremas. Por suerte, nuestro pequeño láser es una fuente prácticamente monocromática en la que todos los paquetes de energía o todas las ondas tienen exactamente las mismas características. Ello nos permite acceder a los límites de la óptica de forma sencilla y sin lentes carísimas. ¿Dónde están esos límites? Pues en el mundo de la física ondulatoria. Expliquémonos. Tal y como hicieron grandes pensadores, ha llegado el momento en que debemos abandonar, al menos temporalmente, nuestra concepción corpuscular de la luz. Sale más a cuenta abrazar una visión ondulatoria porque, en caso contrario, lo que observaremos será inexplicable. Visualicemos algunos fenómenos.

**5 Luz que se dispersa.** Antes no lo hemos dicho, pero la refracción en un medio transparente también depende de la longitud de onda de la luz y de las propiedades intrínsecas del medio —es por ello por lo que Newton pudo descomponer la luz blanca con un prisma de vidrio al plomo mejor que con cualquier otra cosa de la época—. Hoy los vidrios densos han sido superados por los materiales fotónicos o no lineales que imitan y mejoran el comportamiento y fulgor de ciertos minerales, como los ópalo.



Buscando un poco —o mucho— en tiendas de minerales y esoterismo quizás encontremos alguna pequeña figurilla realizada en ópalo artificial de las que se utilizan para «abrir los chacras». Nosotros le podemos dedicar una buena sesión de pulido óptico para convertirla en un prisma de propiedades fascinantes [véase «La máquina de Draper», por Marc Boada Ferrer; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, junio de 2008].

En la masa vítrea de un material fotónico hay redes simétricas de defectos [véase «Ópalo y cristales fotónicos», por Francisco J. Meseguer y otros; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, febrero de 1999]. Imaginemos estructuras diminutas que se repiten una y otra vez o agrupaciones de tamaño equiparable a las ondas luminosas; su interacción con la luz hace que la respuesta sea sensible a la longitud de onda.

Un vidrio fotónico presenta un comportamiento similar al de la atmósfera durante una puesta de sol. Los rayos azules procedentes del astro rey son fuertemente dispersados, de ahí el color azul del cielo. Los rayos rojos, en cambio, no son dispersados y pueden alcanzar al observador; por ello nuestra estrella se torna rojiza. Los cristales fotónicos pueden ser de color azul cuando se observan por reflexión y rojos cuando se observan por transmisión. Jugando un poco, comprobamos que también la reflexión total interna solo es posible para el rojo; vendría a ser la suma de un prisma y un filtro selectivo.

Aquí, la visión ondulatoria resulta adecuada para explicar el fenómeno, pero es más útil todavía para comprender lo que sigue.

Todo observador astronómico sabe que, al aumentar mucho la imagen de un astro, este deja de ser puntual para convertirse en una bonita y estrellada figura de difracción. El motivo es simple: el frente de luz proveniente de una luz muy lejana es una onda plana. Al atravesar la atmósfera y luego el sistema óptico, incorpora retrasos diferenciales que, al superponerse en el foco, interfieren entre sí. Lo mismo sufre el microscopista, por muy bueno que sea el microscopio; llegado a determinado aumento, los microorganismos aparecen rodeados por anillos luminosos que se alternan con otros oscuros creando ruido e inutilizando la imagen. Precisamente una óptica de calidad es aquella que es capaz de minimizarlos.

Nuestro láser proporciona un frente de onda prácticamente plano, continuo y, además, colimado: un haz de luz que

permite construir un microscopio donde la interferencia aparece con enorme facilidad, mostrándonos imágenes muy interesantes, similares a las que ofrecen los instrumentos ópticos más potentes cuando trabajan a su máximo rendimiento.

**6 Luz para observar el microcosmos.** Fijemos el láser a un soporte de madera y, con una escuadra y algún ingenio, coloquemos ante él y en posición vertical una jeringuilla llena de agua, de la que cuelga una sola gota. Ajustemos el láser para que incida sobre la gota y proyectemos la mancha de luz sobre una pantalla situada a algunos decímetros de distancia.

Enfoquemos acercando el láser a la gota y aparecerá ante nosotros un bello espectáculo. En la proyección de la gota bailan sin descanso objetos diminutos rodeados por intensas auras verdes; si hay pocos, podemos usar agua impura o soplar un poco.

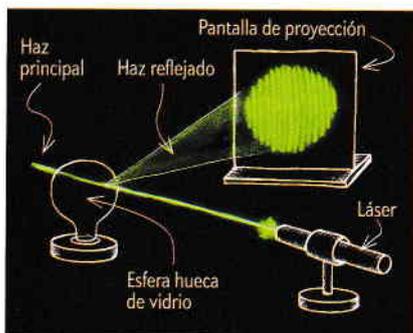


Trabajemos en un soporte estable y libre de toda vibración. Comprobaremos que el baile de las partículas no cesa; lo que ocurre es que el agua se evapora porque parte de la energía del haz láser es absorbida, calentándolo todo y formando corrientes de convección.

Parte de la fotónica trabaja precisamente en esos dominios, intentando eliminar esas auras verdes, es decir, el ruido inherente al trabajo con ondas que interfieren continuamente entre sí. Pero a veces son los propios fenómenos de interferencia los que nos permiten investigar la materia a escala submicroscópica. La interferometría es una herramienta extraordinaria que se aplica también en los más dispares ámbitos de conocimiento; para nuestra fortuna, observar elegantes franjas de interferencia puede ser muy sencillo.

**7 Luz que interfiere.** Solo necesitaremos un pequeño vidrio de reloj (sirven una esfera hueca de vidrio o la pared del propio radiómetro). Montemos el láser de forma estable y proyectemos el rayo verde

contra él, vidrio o esfera. Observemos que, en su mayor parte, atraviesa el material; este haz principal no nos interesa. Si giramos la pieza de vidrio hasta formar un ángulo de unos  $20^\circ$  o  $30^\circ$ , observaremos un haz secundario, más débil: el haz reflejado. Ahora, a uno o dos metros, situemos una cartulina blanca que lo intercepte.

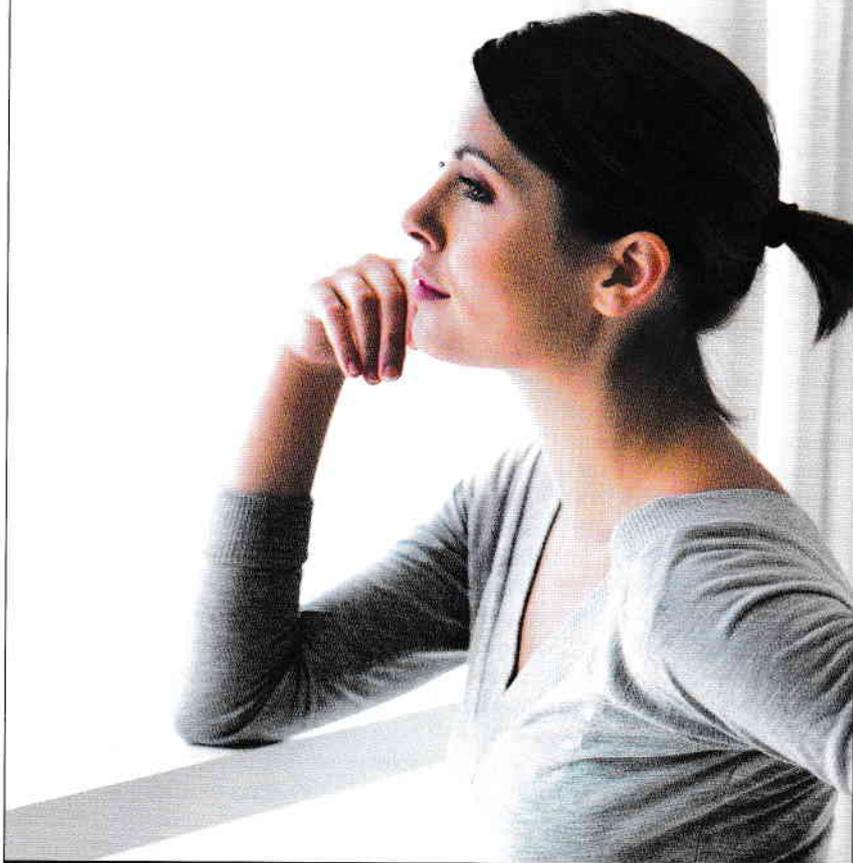


La imagen que observaremos será muy curiosa: un patrón regular de franjas brillantes y oscuras. Su origen radica en que el haz láser se ha convertido en dos al impactar contra las dos superficies del vidrio, pero solo uno ha sufrido el retraso impuesto por el tránsito por su interior; el otro se ha reflejado en la cara externa y, por tanto, le ha adelantado un poco. Los dos trenes de ondas ligeramente desfasadas se superponen, interfiriendo y generando un patrón de luz y oscuridad.

El fenómeno es ultrasensible a todo: un ligero incremento en el espesor del medio, algún defecto en la composición, incluso minúsculos cambios superficiales se hacen perceptibles en el patrón de franjas; por supuesto, también es adecuado para detectar las diferencias de recorrido óptico.

Con instrumentos delicadísimos se ha conseguido topografiar la superficie de elementos ópticos a escala casi atómica. ¿Alguien puede superar esto? Y es que solo la luz, ese misterioso fenómeno ora corpuscular ora ondulatorio, es nuestra aliada desde la dimensión cósmica a la nanométrica, pasando por la tecnológica y la divulgativa.

¿Buscas empleo en el sector de la ciencia y la tecnología?



**naturejobs**

La mayor bolsa de empleo científico del mundo, ahora también en

[www.investigacionyciencia.es](http://www.investigacionyciencia.es)

nature publishing group