

Microesferas, átomos fotónicos y la física de la nada

La luz puede quedar atrapada dentro de diminutas esferas transparentes. Las sorprendentes propiedades que adquiere entonces quizá conviertan la fotónica de microesferas en una nueva rama de la técnica

Stephen Arnold

La transferencia de energía entre moléculas próximas desempeña una función fundamental en la naturaleza. Si las plantas pueden alimentar su metabolismo y crecimiento con la luz del sol gracias a la fotosíntesis, es gracias a un curioso fenómeno físico que lleva energía de una molécula de clorofila a otra aunque estén separadas medio nanómetro. Unos centenares de moléculas de clorofila pasan de esa manera la energía que toman del Sol a un único centro de reacción, punto de partida de reacciones químicas posteriores. Sin este mecanismo de transferencia, la fotosíntesis se detendría.

Hará unos 15 años empecé a preguntarme si no actuarían formas similares de transferencia de energía en los procesos fotoquímicos que tienen lugar en las partículas de los aerosoles. En particular, quería saber si no encerraría detalles sutiles la transferencia de energía entre las moléculas de una gota aislada de unas 10 micras de diámetro. Debí de parecerles una idea descabellada a la mayoría de los físicos. El mayor alcance de un intercambio de este tipo, descubierto por el premio Nobel Jean Perrin y descri-

to en términos mecanocuánticos hace docenas de años, es de sólo 5 nanómetros. Los contenedores que yo me proponía usar eran 2000 veces mayores. Por lo tanto, no había razones claras para esperar que la pequeñez ejerciera la menor influencia. Con todo, en las investigaciones de algunos grupos había visos de fenómenos físicos interesantes. Apremié a Lorcan Folan, uno de mis estudiantes de doctorado, para que los investigara. No me podía imaginar que los resultados que tanto nosotros como otros grupos íbamos pronto a conseguir dirigirían la atención de la técnica de vanguardia hacia las diminutas partículas de los aerosoles.

Emulación de las partículas

Parecerá que la tarea de sondear algo tan delicado como la transferencia de energía entre moléculas debería amedrentar; el procedimiento no resulta tan complicado, sin embargo. Primero se excita una molécula de un determinado tipo, el donante, iluminándola con la luz de un láser, sintonizado como corresponde, que llevará los electrones desde el estado fundamental a un nivel de energía más alto. Para com-

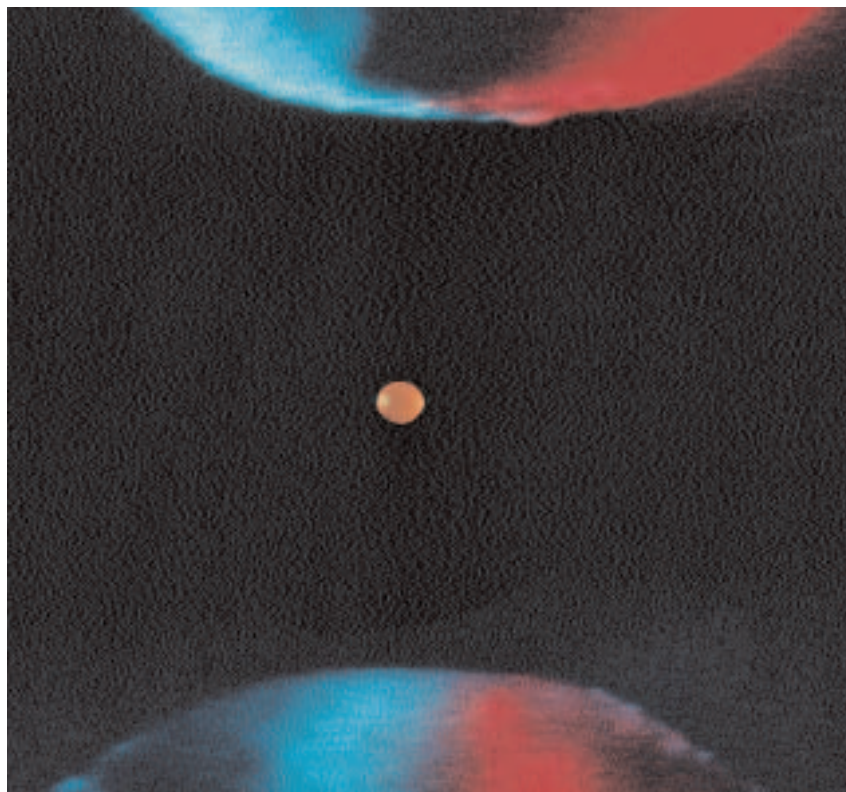
probar si se ha producido la transferencia de esta energía a una molécula de otro tipo, el aceptor, se estudia el color característico de la luz que se emite cuando los electrones excitados caen a un estado de energía más bajo (se trata de un proceso bien conocido, la fluorescencia). Si no se transfiere energía entre donantes y aceptores, sólo las moléculas donantes darán lugar a la fluorescencia, que manifestará el color que les sea propio. Por tanto, el cociente entre la fluorescencia del aceptor y la del donante ofrece una buena manera de medir la cantidad de energía transferida.

Para llevar a cabo una medición así en una gota microscópica, se mezclan donantes y aceptores apropiados y se observa el espectro de fluorescencia inducido por el láser. Se tropieza con una complicación de cierto calibre: cuesta mantener una esfera líquida de 10 micras quieta en un punto el tiempo suficiente para estudiarla. Lorcan y yo resolvimos este problema construyendo un aparato que confinaba y hacía levitar por un tiempo indefinido una partícula cargada eléctricamente; la fuerza electrostática compensaba la gravedad, como muchos años atrás en el famoso experimento de Robert Mi-

llickan de la gota de aceite. Pero el método de Millikan por sí mismo no proporciona una “trampa”; deja que la partícula se mueva libremente. Para impedir la deriva, el aparato de Lorcan añadía un campo eléctrico oscilante al campo de levitación constante, siguiendo el ejemplo de Wolfgang Paul, que había demostrado, en las investigaciones de los años cincuenta que le valdrían el premio Nobel, que un campo dinámico puede atrapar un ion atómico. Con un campo oscilante diseñado de manera adecuada una gota microscópica se mantiene fija en el aire; es entonces un blanco fácil para el láser y para el microscopio.

El primer espectro que obtuvo Lorcan a partir de una gota en levitación nos dejó sorprendidos. Tenía pensada una serie de experimentos para concentraciones variables, comenzando por las más diluidas, en las que la distancia media entre donantes y aceptores multiplicaba por veinte el alcance máximo del intercambio de Förster, el mecanismo de transferencia de la energía que conocíamos. Por tanto, no esperábamos que apareciese transferencia alguna. Sin embargo, el cociente entre las fluorescencias del aceptor y del donante superó el 10%.

A medida que Lorcan aumentaba en las gotas la concentración de moléculasceptoras, el desconcierto fue creciendo. Si el mecanismo de Förster hubiese estado actuando, la cantidad de energía transferida debería haber sido proporcional a la concentración de los aceptores. Pero indagamos una amplia variedad de concentraciones, en un intervalo de unos dos órdenes de magnitud, y vimos que apenas cambiaba la cantidad de energía transportada entre las moléculas. Más aún, en los espectros ópticos, tanto para los donantes como para los aceptores, observamos picos perfectamente definidos. Propiedades tan características nunca habían aparecido en los experimentos que sondeaban esas mismas moléculas en tubos de ensayo con dimensiones del orden de los centímetros. Aunque la explicación no saltaba a la vista, al final estos resultados nos llevaron a remozar las ideas acerca de la transferencia de energía entre las moléculas.



1. UNA GOTTA DE GLICEROL cargada eléctricamente flota inmóvil entre dos electrodos metálicos mientras se la irradia por la izquierda con luz láser. El autor y sus alumnos estudiaron con este dispositivo experimental las transferencias de energía entre dos tipos diferentes de moléculas de colorante mezcladas en la gota. Su descubrimiento de que la energía óptica pasa de un tipo de molécula a la otra con sorprendente eficiencia les llevó a investigar la física de la luz que circula por el interior de esferas microscópicas líquidas, de plástico o vidrio. Las novedosas propiedades ópticas así descubiertas llevan a pensar que las microesferas valdrán para múltiples aplicaciones, del procesamiento de señales a los sensores biológicos.

En un principio pensamos sondear las sutilezas del mecanismo de transferencia de Förster. En él, la energía de un electrón excitado se transfiere a otra molécula sin que durante el proceso se genere ningún fotón. ¿Cómo es posible? Una molécula excitada se comporta como una antena emisora de radio. Cerca de esa fuente de tamaño nanoscópico, el campo eléctrico oscilante es particularmente intenso (aunque decae muy deprisa, con el cubo de la distancia), tanto, que puede llegar a inducir la oscilación de la nube electrónica de una molécula cercana; este acoplamiento transfiere energía si el aceptor reside tan cerca como para que la probabilidad de transferencia sea muy superior a la probabilidad natural de que el donante experimente fluorescencia. No hay fotones implicados en este inter-

cambio; en otras palabras, los donantes no tienen que emitir radiación electromagnética. El proceso de Förster se asemeja a cuando alguien oye dentro de sí un programa de radio porque el campo eléctrico de un radiotransmisor cercano es tan potente que induce corrientes en sus empastes metálicos.

Los radiotransmisores no se han construido para que energicen las bocas de personas cercanas. Sus antenas emiten ondas electromagnéticas hacia lejanos receptores. Lo mismo ocurre con las moléculas excitadas. Si el donante no tiene vecinos cercanos que apresen esta energía, la molécula excitada emitirá un fotón hacia la lejanía (al menos a una distancia de una longitud de onda). Para un aceptor alejado del donante, esa distancia resultará tan grande, que la proba-

El autor

STEPHEN ARNOLD es el director del Laboratorio de Fotofísica de Micropartículas de la Universidad Politécnica de Nueva York, cuya cátedra Thomas Potts de Física ocupa. (Este artículo se publicó en *American Scientist*, volumen 89, págs. 414-421.)

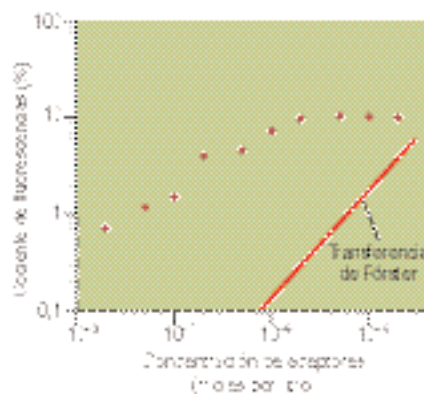
bilidad de que reciba el fotón y absorba su energía será insignificante. Y sin embargo, de esa magnitud era la escala de la separación entre donantes y aceptores en el primer experimento de Lorcan.

¿Qué estaba ocurriendo? Sabíamos que, con una concentración tan baja de moléculas donantes y aceptores dentro de la gota, el mecanismo de transferencia de Förster no actuaba. Tenían que estar escapando fotones de los donantes y golpeando en los aceptores, y con una eficiencia inesperada. La única explicación razonable era que cada uno de los fotones emitidos retornaba muchas veces a la misma región y de esa forma tenía una gran probabilidad de chocar con un aceptor. Los picos que vimos en el espectro nos dieron una buena pista sobre el mecanismo.

Esos picos eran picos de resonancia, que corresponden a *modos* electromagnéticos especiales de la partícula en su integridad. La situación recuerda a una cuerda de un violín, que admite modos de vibración sólo para frecuencias tales que las correspondientes semilongitudes de onda quepan un número entero de veces a lo largo de la cuerda. Los modos electromagnéticos de una partícula pequeña —o resonancias de Mie— no difieren de los de la cuerda vibrante. También se los describe por su carácter ondulatorio, de una manera que tiene en cuenta complicaciones como la polarización y la difracción. Con todo, hay una descripción más intuitiva de estos modos que subraya la propensión del fotón a volver repetidas veces a una cierta región. H. M. Nussenzveig, de la Universidad Federal de Río de Janeiro, comprendió que si la esfera (la partícula) es mucho mayor que la longitud de onda de la luz en cuestión, las resonancias de Mie

pueden representarse como órbitas geométricas. Si no se toma en cuenta la difracción, cabe pensar que los fotones rebotan, describiendo órbitas bien definidas, por el interior de la partícula, donde las encierra la reflexión interna total; se trata del mismo fenómeno por el que la superficie de una piscina parece un espejo cuando alguien mira hacia un lado y arriba bajo el agua.

Ese efecto especular en la piscina se debe a que los rayos procedentes del interior que inciden en la superficie con un ángulo pequeño se reflejan totalmente y vuelven al agua. En buena medida, lo mismo vale en el interior de una partícula transparente, siempre que sea mucho mayor que la longitud de onda. Cuando un rayo de luz incide en la superficie esférica con un pequeño ángulo, rebota hacia adentro. El fotón, rebote a rebote, queda así en el interior de la partícula por un tiempo mucho mayor. En último término, limita el tiempo de vida del fotón la difracción, que quita precisión a las trayectorias de los fotones y permite que vaya escapando energía con el tiempo. Los efectos de la difracción crecen cuando mengua la partícula; cuando



2. LA TRANSFERENCIA DE ENERGÍA entre moléculas de colorante donantes y aceptores (medida mediante el cociente de sus fluorescencias) resultó ser mucho mayor (círculos) que lo predicho por la teoría de Förster (línea recta). Esta discrepancia, y la débil dependencia con respecto a la concentración en la mayor parte del intervalo considerado, llevó al autor y a sus alumnos a pensar que la energía debía de transferirse de forma distinta de una molécula a otra en el interior de una gota en levitación.

su radio se aproxima a la longitud de onda de la luz que circula por su interior, las resonancias desaparecen por completo.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, nuestras observaciones fueron cobrando sentido. Nos percatamos de la importancia de los modos electromagnéticos especiales de una gota microscópica. Los llamamos modos de átomo fotónico, porque las trayectorias de los fotones recuerdan a las órbitas de los electrones en los átomos. En los modos de más larga vida, los fotones trazan polígonos sencillos, mientras que para los de vida más corta las trayectorias se van cerrando tras la primera revolución por el interior de la partícula. Con nuestros datos y el modelo del átomo fotónico, calculamos que antes de ser absorbidos, o de que se fuguen, los fotones que circulan dentro de una gota de 10 micras de radio, sin aceptores, cubren una distancia total de unos 0,16 metros, es decir, 30.000 veces el diámetro de la esfera.

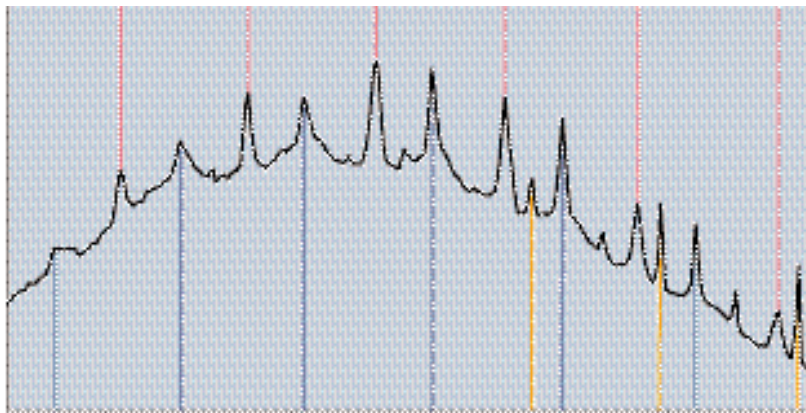
Al igual que un electrón en el átomo de Bohr, el fotón tiene en una microsfera, o “átomo fotónico”, un momento angular orbital cuantificado. Einstein demostró que un fotón tiene un momento proporcional a su energía, la cual por otra parte es proporcional a la frecuencia óptica. El momento angular orbital de un fotón en un átomo fotónico es su momento de Einstein multiplicado por el radio interior del polígono, que para fotones rasantes viene a ser el radio de la partícula. Por tanto, el tener modos separados por un incremento constante del momento angular equivale a que sus frecuencias se espacien regularmente (los picos de verja que Lorcan había descubierto).

Podemos imaginar un modo concreto como una onda que circunda el interior de una esfera diminuta y retorna en fase con las oscilaciones del punto de partida. El modo con el valor de momento angular inmediatamente más alto tiene una frecuencia aumentada justo en la cantidad precisa para encajar una longitud de onda extra en este circuito. Tales propiedades de los átomos fotónicos parecían explicar de una manera nítida lo que estábamos viendo en nuestros experimentos.

Steve Holler, estudiante de licenciatura de quien yo era tutor en ese tiempo, quiso comprobar la hipótesis tomando fotografías de una microgota brillante. Empleó filtros de color que bloqueaban la luz de las emisiones de donantes y aceptores por separado. La imagen correspondiente a los aceptores aumentó muchísimo nuestra confianza, ya que la luz se concentraba cerca de la superficie, por donde circulan los fotones en un átomo fotónico. La imagen correspondiente a los donantes era menos interesante. Se iluminaba casi todo el interior. Mostraba, eso sí, una asimetría característica: la gota esférica enfocaba gran parte de la luz láser incidente sobre su parte trasera. Para nuestra sorpresa, la imagen correspondiente a los aceptores no presentaba diferencias entre las partes trasera y delantera. En cambio, aparecían dos curiosos puntos brillantes diametralmente opuestos.

Entendimos estos fenómenos cuando caímos en la cuenta de que las moléculas donantes excitadas en la parte de atrás de la gota lanzan fotones a cada “azimut”. Imaginemos un aeropuerto del que parten aviones en todas las direcciones. A cada piloto se le ha ordenado que siga un círculo máximo. Los aviones confluirán en los antípodas, en el otro lado del globo. A menos que choquen en el aire, volverán al punto de partida, y así una y otra vez. De manera semejante, la concentración de la emisión de los donantes en la parte trasera de una microesfera envía fotones a lo largo de círculos máximos que se cortan en dos puntos antípodas, los dos puntos brillantes en la imagen de fluorescencia del aceptor. Ya que nuestra imagen promediaba muchas revoluciones de los fotones de un lado a otro de la esfera, la fotografía era totalmente simétrica, como si hubiésemos tomado una exposición fotográfica larga de un péndulo oscilante durante un intervalo de tiempo mucho más largo que una oscilación.

Le medimos a la transferencia de energía en la esfera una eficiencia global de alrededor de un 10%. Pero la imagen correspondiente al aceptor demostró que la transferencia sólo tiene lugar en una fina capa cercana a la superficie; la mayor parte de



3. EL ESPECTRO DE LA LUZ emitida por las moléculasceptoras dentro de una gota muestra una serie de picos, que corresponden a los distintos modos electromagnéticos resonantes. Los picos que se muestran aquí representan los modos de tres familias (rosa, azul y amarilla). Para cada familia, los picos se espacian regularmente, reflejo de la cuantificación del momento angular de los fotones que circulan dentro de la gota.

las moléculas donantes no participan. Sólo una de cada cinco transferían; para ellas la eficiencia se acercaba al 50%. Noel Goddard, estudiante de maestría que trabajaba en mi laboratorio, elevó el rendimiento global hasta ese 50%; confinó todas los donantes justo bajo la superficie de la gota. Pero incluso con los donantes en el sitio adecuado, debe aún aclararse por qué emiten fotones con tanta eficiencia en las direcciones especiales necesarias para que se den los modos de átomo fotónico. La respuesta necesita una breve disquisición previa acerca de la razón por la cual un átomo o molécula excitados emiten luz.

El papel del vacío

Recuerdo que cuando estudiaba mecánica cuántica, en el doctorado, el profesor explicó que los estados excitados del hidrógeno son estacionarios desde un punto de vista matemático. Pero el átomo tenía que emitir un fotón si estaba excitado. Le pregunté: “Que sean estacionarios, ¿significa que si me guardo un átomo de hidrógeno excitado en el bolsillo, me voy a casa y vuelvo mañana, el átomo seguirá todavía excitado?” El profesor me confirmó que no, mostrando cierta incomodidad por el rumbo que tomaba la discusión. Insistí: “Entonces, ¿cuánto tiempo seguirá así?” Me respondió

que unos nanosegundos. “¿Y eso es estacionario?”, le repliqué. El profesor no tenía mucho más que añadir, excepto recordarme que ya habíamos hecho cálculos sobre la emisión estimulada.

En la emisión estimulada el paso de un fotón cercano induce el retorno al estado fundamental de un electrón excitado. La energía del fotón inductor debe ser igual a la diferencia de energía entre esos dos niveles. La emisión produce un segundo fotón de características idénticas a las del primero. Es el proceso que posibilita los láseres, pero me resulta mucho menos interesante que la emisión espontánea, que proporciona casi toda la luz que vemos. El Sol, las lámparas de incandescencia, las lámparas fluorescentes, incluso las libélulas brillan sin que necesiten fotones externos que disparen la emisión. Einstein se valió de argumentos termodinámicos para demostrar la necesidad de ambas emisiones, la estimulada y la espontánea, pero no fue capaz de ofrecer una explicación de la segunda. Su mecanismo tampoco puede obtenerse a partir de la mecánica cuántica de los átomos. La respuesta se logró solamente después de 1948, cuando se tuvo de verdad en cuenta que el campo electromagnético del espacio vacío está cuantificado.

En el bachillerato se nos enseñó que si sacásemos todos los átomos,

moléculas y fotones de un recipiente, éste no contendría nada. Es una idea incorrecta. Incluso en un recipiente frío, mantenido cerca del cero absoluto, un átomo excitado estará bañado por fluctuaciones electromagnéticas, particularmente intensas cuando la longitud de onda de las líneas de emisión del átomo coincide con la de un modo resonante. Estas fluctuaciones derivan de un principio de incertidumbre de Heisenberg electromagnético: el producto de los campos eléctrico y magnético de un modo tiene un mínimo fijo, es decir, ambos campos no pueden anularse a la vez. Incluso en un contenedor vacío y completamente oscuro, cada modo electromagnético tendrá una "energía del punto cero" residual, igual a su frecuencia multiplicada por una constante.

Los campos variables con el tiempo asociados a la energía del punto cero disparan la emisión espontánea, que en este sentido es bastante similar a la estimulada, si bien, en su caso, el origen del estímulo resulta bastante sutil. El físico holandés H. B. G. Casimir arguyó hace décadas que esas fluctuaciones cuánticas originan además presiones. Dos placas metálicas neutras se atraen con una fuerza que aumenta a medida que su separación disminuye. Una explicación sencilla es que el espacio limitado entre las placas permite menos modos electromagnéticos que las regiones de alrededor, lo que da lugar a un empuje neto hacia adentro.

Se piensa que el universo tiene un número infinito de modos electromagnéticos y una densidad de energía del punto cero que aumenta continuamente con la frecuencia. Dentro de un volumen cerrado, el espectro de la densidad de energía se concentra en torno a frecuencias discretas, cada una asociada con un modo particular. A medida que el tamaño del recipiente se reduce, un modo con una frecuencia dada ocupa un volumen menor y en consecuencia tiene una densidad de energía de punto cero más alta. Si el recipiente mide sólo unas pocas longitudes de onda, las densidades de energía del punto cero para un modo pueden exceder en varios órdenes de magnitud a las densidades de energía del espacio vacío. Como resultado,

no cuesta inducir a una molécula excitada, que en otras circunstancias emitiría radiación en una ancha banda de frecuencias, a que emita fotones en el modo de que se trate, a condición de que la banda de emisión contenga la frecuencia correspondiente.

Aunque las gotas diminutas que investigué con mis alumnos no son cavidades vacías, confinan a los fotones dentro de ciertos modos en una pequeña región; vienen a actuar como las cavidades vacías. Por tanto, no es sorprendente que valga para ellas la física de la nada. Los cálculos detallados confirman que las fluctuaciones cuánticas reforzadas de los modos de átomo fotónico explican los rendimientos observados de la transferencia de energía. De manera coherente con este resultado, encontramos experimentalmente que la eficiencia de la transferencia de energía aumenta aún más cuando el tamaño de la partícula se reduce a un diámetro de 5 micras. Se debe a un fenómeno de la electrodinámica cuántica, el efecto de cavidades.

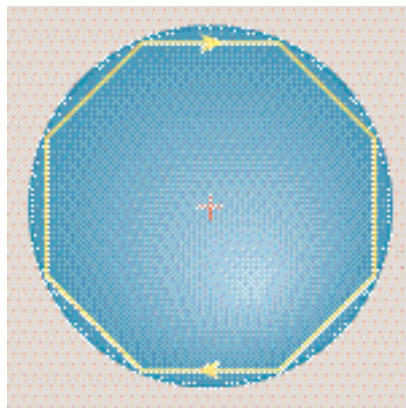
Una aplicación importante de este efecto es el láser miniaturizado, dispositivo semiconductor presente en los punteros e impresoras láser y en los reproductores de discos com-

pactos. Abundan hoy tanto, que no es difícil que se olvide el significado de la palabra *láser*: amplificación de luz por emisión estimulada de radiación. Una fracción substancial de la potencia comunicada a un láser de semiconductor se desaprovecha porque existe una corriente mínima sin la cual no se establece el proceso láser. Las pérdidas de potencia asociadas con este umbral pueden disminuirse mucho aprovechando el efecto de cavidades. Para ello hay que reducir aún más los láseres.

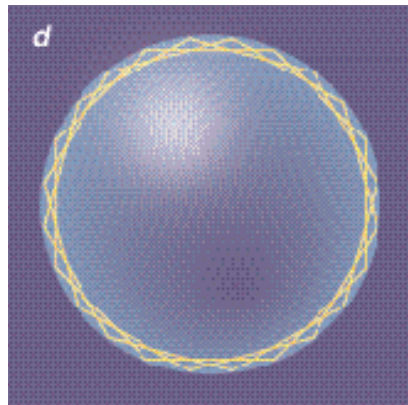
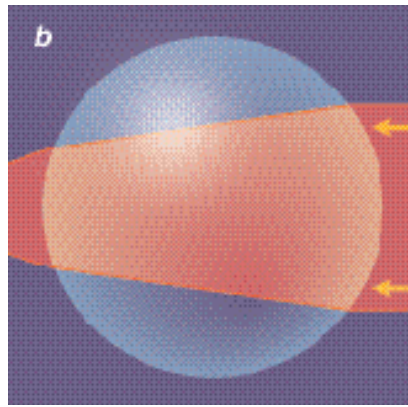
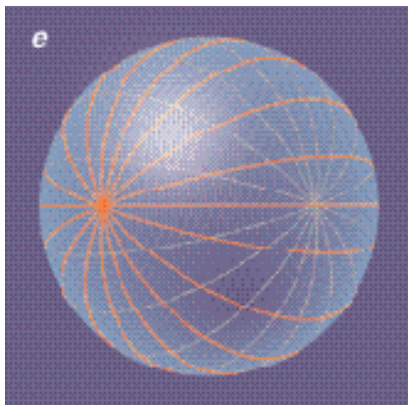
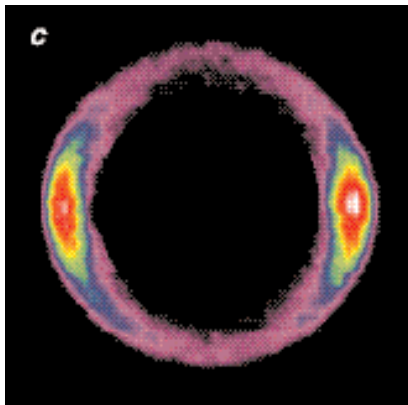
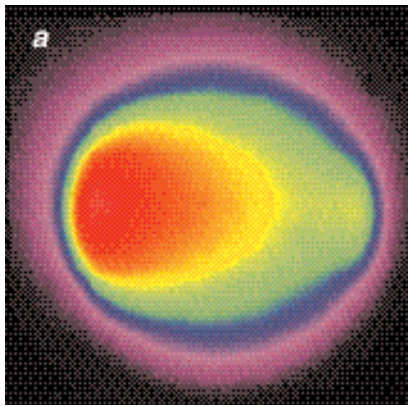
El proceso láser parte siempre de la emisión espontánea. Pero en los dispositivos ordinarios sólo una diminuta fracción de los fotones generados espontáneamente (menos del uno por mil) opera en el modo láser. Por tanto, se necesita una potencia considerable para conseguir un número de estos fotones suficiente para que el láser arranque. En este punto es donde las dimensiones menguantes y el efecto de cavidades nos ayudan. Cuando se reduce el tamaño de la cavidad láser se limita el número de modos disponibles. En principio, puede construirse una cavidad tan pequeña que el espectro de emisión del material emisor sólo coincida con un modo. La pequeñez de la cavidad da lugar entonces a un reforzamiento de las fluctuaciones cuánticas y a una rápida emisión en ese modo.

No hace mucho, varios laboratorios se han valido del confinamiento de los fotones en pequeñas partículas esféricas para fabricar láseres de umbral bajo. Este elegante procedimiento tiene, sin embargo, sus límites, ya que el confinamiento de modos se pierde cuando el tamaño de la esfera se aproxima a la longitud de onda de la luz. Por lo tanto, puede que no sea posible eliminar del todo la corriente umbral. A pesar de ello, se obtienen con las microesferas láseres de rendimiento muy alto.

Las microesferas también dan lugar a filtros ópticos de excepcional pureza espectral, ya que mantienen la energía de un fotón durante un tiempo, largo en comparación con el período de una oscilación de la correspondiente onda luminosa. Una esfera diminuta es como una delicada copa de vino que, golpeada con



4. LOS RAYOS DE LUZ QUE REBOTAN en la cara interna de la superficie de una gota esférica tras incidir en ella con ángulos pequeños experimentan reflexión total. En el ejemplo que aquí se muestra, un fotón completa una revolución por la esfera después de ocho rebotes; describe una trayectoria octogonal. Un fotón medio recorrerá esta órbita muchas veces dentro de la gota microscópica antes de que sea absorbido o escape.



5. LA LUZ EMITIDA por los donantes dentro de una gota muestra una clara asimetría (a) porque el rayo láser que los excita se enfoca hacia la izquierda. (b). La luz emitida por los aceptores muestra un patrón de anillos (c); demuestra que sólo se excitan los que están cerca de la superficie de la gota. La mayor parte de la luz emitida por los donantes escapa antes de encontrarse con un aceptor. Solamente los fotones en un modo resonante, que circulan justo por debajo de la superficie (d), permanecen dentro de la gota el tiempo suficiente para que sea apreciable la probabilidad de que choque con los aceptores. Son posibles muchas órbitas anulares, pero todas se juntan en dos puntos antípodas (e), dos manchas brillantes, diametralmente opuestas, en la imagen correspondiente a los aceptores (c).

momento angular) una resonancia concreta en la esfera. Para una esfera de unas 10 micras de radio, esos modos están separados por unos 3000 gigahertz. Así pues, en principio cabría distinguir $(3 \cdot 10^{12}) / (5 \cdot 10^7)$ canales diferentes, es decir, 60.000. En la práctica, la distorsión de las esferas reduciría seguramente el número de canales a unos 10.000, lo que todavía constituiría un logro técnico asombroso.

En 1995, dos miembros de mi grupo de investigación, Ali Serpenguzel y Giora Griffel, y yo informamos de un procedimiento que separaba las señales ópticas de esa manera. Depende de otro principio de la mecánica cuántica, el efecto túnel. Si se coloca una microesfera de vidrio, digamos, o de plástico, a una longitud de onda de distancia del núcleo —el alma— de una fibra óptica, habrá una probabilidad razonable de que un fotón que viaje por la fibra excite un modo de átomo fotónico en la esfera, a condición de que la frecuencia de ese fotón coincida con la del modo. Se dice entonces que el fotón atraviesa la zona prohibida que le separa de la esfera gracias al efecto túnel resonante.

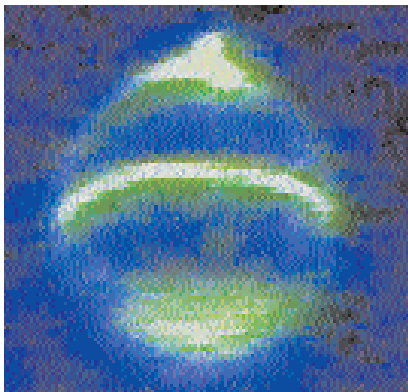
Los fotones que circulan por la esfera también pueden pasar por efecto túnel a la fibra, si antes no se fugan. Aunque las fugas pudieran parecer dañinas, son sin embargo muy convenientes, ya que pro-

una cuchara, emita una nota prolongada pese a que cada oscilación acústica no dure más de un milisegundo. Guarda relación con esta propiedad el que la copa sólo responda a la estimulación externa de un estrecho intervalo de frecuencias; sólo una nota precisa la romperá. Las microesferas también responden a la excitación de un intervalo de frecuencias muy estrecho.

Para los sistemas ópticos cuánticos, esta noción física fundamental se encierra en otro principio de indeterminación de Heisenberg: para un modo dado, el producto del an-

cho de frecuencia y la vida media de un fotón tiene un valor mínimo de $p/2$. A partir de nuestros experimentos de transferencia de energía, determinamos que un fotón rebota por el interior de una microesfera de 10 micras durante unos 3 nanosegundos antes de que lo absorba el material o escape. En consecuencia, el mínimo de la anchura de frecuencia es de unos 50 megahertz. Aunque a un ingeniero de telecomunicaciones pueda parecerle un ancho de banda muy grande, en realidad resulta muy pequeño para la comunicación óptica. Para entender lo angostos que son 50 megahertz en este contexto, pensemos en cómo separarían por medio de esferas de esa naturaleza las señales que la luz transporta a lo largo de una fibra óptica.

Lo ideal sería usar múltiples microesferas de tamaños un poco diferentes, de modo que cada una sirviese para seleccionar una banda particular de información. El número de canales distintos disponibles depende de que se distinga de los modos adyacentes (aquellos que tienen los valores siguiente o anterior del



6. EN LA MICROESFERA LASER brilla un anillo por el que circula la mayoría de los fotones. Esta geometría se debe a que una fibra óptica, tendida en el plano del anillo, toca la esfera en un punto del ecuador. Los fotones que circulan por la fibra pasan a la esfera y excitan la acción láser para ese modo electromagnético particular.

porcionan información sobre lo que ocurre dentro de la microesfera. Así, investigamos primero el efecto túnel observando la luz que se fugaba de una microesfera de poliestireno. La colocamos encima de una fibra óptica que había sido pulida para eliminar casi todo el recubrimiento, excepto una fina película. Iluminamos la fibra con un láser sintonizable, cuya frecuencia variamos a la vez que observábamos la microesfera perpendicularmente. Para la mayoría de las frecuencias, no había, aparte de unos tenues brillos de luz dispersados por la superficie pulida de la fibra, más que oscuridad; pero cuando la frecuencia del láser coincidió con un modo de átomo fotónico, la esfera se iluminó gracias a los fotones que se fugaban.

Sólo un mes después de que publicásemos un artículo sobre nuestro trabajo, encontraron en la Escuela Normal Superior de París una prueba distinta del efecto túnel fotónico entre una fibra óptica y una microesfera. Cuando la frecuencia se ajustaba a la de un modo de átomo fotónico, observaron una disminución de la luz transmitida a lo largo de la fibra. Esa disminución en la transmisión surge en parte porque las fugas y la absorción en la esfera reducen la probabilidad de que los fotones vuelvan a la fibra. Pero

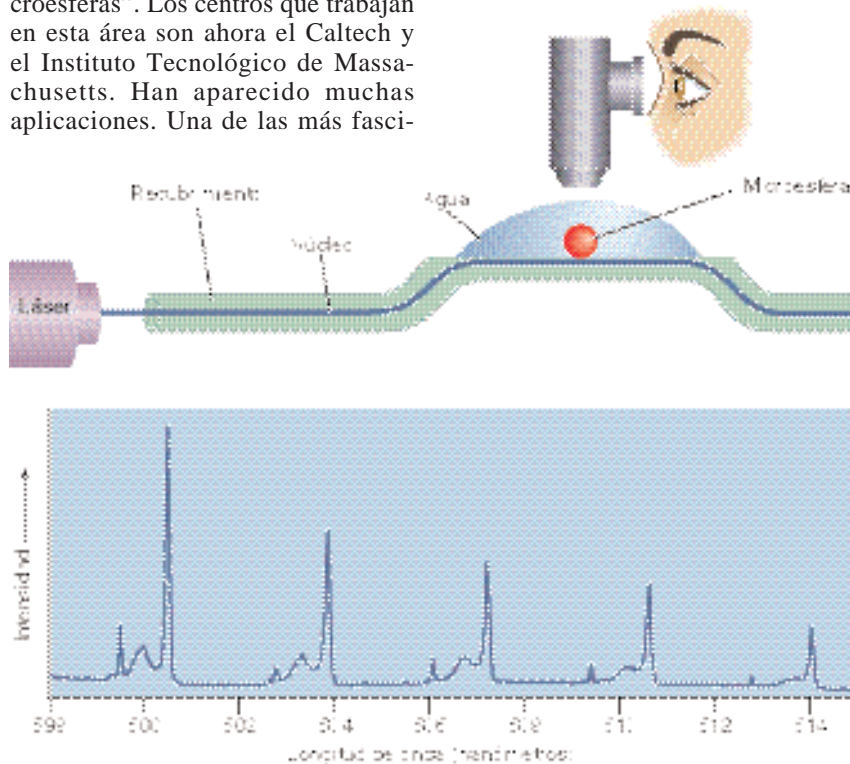
la simple imagen de unos fotones que saltan entre la esfera y la fibra olvida el carácter ondulatorio de la luz y pierde así un efecto físico importante: la interferencia destructiva que puede tener lugar cuando la luz entra de nuevo en la fibra tras una permanencia larga en la esfera. Griffel y yo describimos este fenómeno en 1996. Después, otro grupo, dirigido por Kerry Vahala, del Instituto Tecnológico de California (Caltech), obtuvo una eficiencia cercana al 100 por cien para el acoplamiento de la luz entre una fibra óptica y una microesfera. Con su dispositivo experimental, apenas si hay en el régimen resonante transmisión a lo largo de la fibra.

Muchos puntos de luz

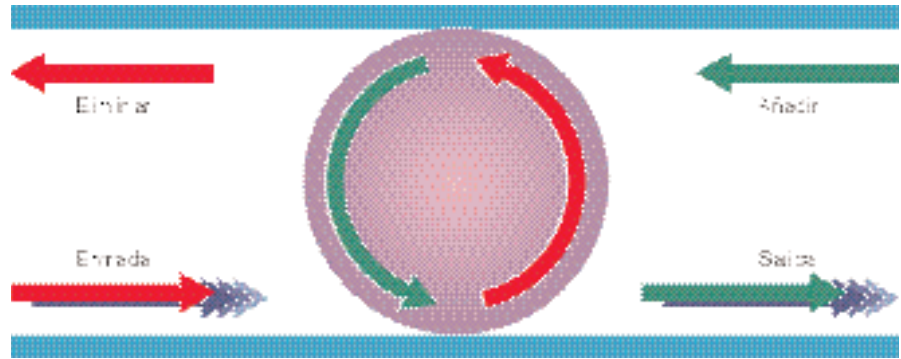
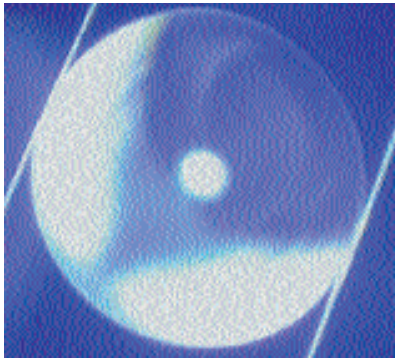
Nuestros experimentos con esferas de plástico diminutas y fibras ópticas contribuyeron a que se abriera un nuevo campo de investigación. No cabe mejor denominación para él que “fotónica de microesferas”. Los centros que trabajan en esta área son ahora el Caltech y el Instituto Tecnológico de Massachusetts. Han aparecido muchas aplicaciones. Una de las más fasci-

nantes se ha ideado en el laboratorio de Vahala. Allí se induce a los fotones de una frecuencia específica a pasar por efecto túnel resonante a una esfera y después a una segunda fibra. Este dispositivo fotónico constituye un *filtro de adición y eliminación*. Bien añade, bien elimina la señal que se transmite a través de un canal óptico dado; así se enruta información de unas fibras ópticas a otras a frecuencias seleccionadas sin tener que emplear circuitos electrónicos en absoluto.

Las microesferas de plástico valen también como sensores: sus modos de átomo fotónico cambian de frecuencia cuando la temperatura varía o cuando están en contacto con un material con propiedades ópticas similares, por ejemplo con moléculas de ADN pegadas a su superficie, posibilidad que ahora estoy investigando con mi compañero Iwao Teraoka y con Frank Vollmer, de la Universidad Rockefeller. La idea consiste en pegar a



7. UNA MICROESFERA SITUADA A UNA DISTANCIA de sólo una longitud de onda del núcleo de una fibra óptica absorbe fácilmente fotones de ésta cuando la frecuencia de la luz que pasa por la fibra coincide con un modo resonante de la esfera (arriba). En condiciones de resonancia, los fotones entran en la esfera y con el tiempo escapan en todas las direcciones; se generan así picos bien definidos cuando se representa la intensidad de la luz emitida por la esfera en función de la longitud de onda de la excitación láser (abajo).



una microesfera muchas hebras de ADN con una secuencia de bases particular. El material genético con la secuencia complementaria se adherirá a la superficie de esta esfera. Cuando ocurre tal cosa, el recubrimiento añadido (como la dilatación que acompaña al calentamiento) modifica el radio efectivo de la partícula, lo que fuerza el cambio de la frecuencia resonante para un modo determinado. Otros tipos de osciladores también son sensibles a los cambios de tamaño. Por ejemplo, la frecuencia de un péndulo cambia cuando la barra que conecta la bola al eje se expande térmicamente. Pero los péndulos no dan lugar a buenos termómetros. Sorprenderá que las microesferas tengan, en cambio, una sensibilidad alta; no obstante, al menos en principio, la tienen.

Que el momento angular para un modo particular sea constante implica que la disminución fraccional de la frecuencia debe ser igual al aumento fraccional de la dimensión, y viceversa. El cambio mínimo de tamaño que puede detectarse es igual al mínimo cambio fraccional mensurable de la frecuencia multiplicada por el radio de la esfera. No cuesta observar un cambio de frecuencia coincidente con la anchura de línea, unos 50 megahertz, que para una frecuencia óptica típica corresponde a un cambio fraccional en tamaño de una parte en 10 millones. Por lo tanto, cabe discernir en principio un cambio de 10^{-12} metros para una esfera de 10 micrometros de radio, lo que equivale a una centésima parte de un diámetro atómico. Esta sensibilidad abre la puerta a una serie de aplicaciones, desde la termometría a los sensores biológicos; gracias a esferas de distintos ta-

8. UNA MICROESFERA ACOPLADA a dos fibras ópticas (izquierda) constituye un filtro de adición y eliminación. Una señal óptica enviada hacia la esfera a lo largo de una fibra (flecha verde, arriba a la derecha) se suma a las muchas señales que viajan por la otra fibra (flechas azules). Este dispositivo vale también para eliminar una señal (flecha roja, arriba a la izquierda) que viaja por una fibra junto con muchas otras.

maños, cabría consultar por medio de una sola fibra múltiples sondas que contaran con especificidad suficiente para detectar la actividad de genes particulares.

Da sus frutos tratar a las esferas diminutas como átomos fotónicos. Pero se puede dar un paso más y extender la analogía hasta el entorno molecular. El equipo de Makoto Kuwata-Gonokami ha construido hace poco en la Universidad de Tokio el equivalente fotónico de una molécula de hidrógeno. En el H_2 , dos protones comparten dos electrones en un enlace covalente. Los estados electrónicos se desdoblan. Pusieron en contacto un par de microesferas fluorescentes casi idénticas y registraron un desdoblamiento similar en los modos de átomo fotónico. De manera muy apropiada, die-

ron a su creación el nombre de molécula fotónica.

Se siguen investigando maneras ingeniosas de sacar partido de las propiedades ópticas de las esferas diminutas. Cabe imaginar, por ejemplo, que el agrupamiento de más de dos esferas dará lugar a modos ópticos todavía más interesantes o útiles. En el futuro podrían formarse incluso "polímeros" fotónicos. Cualesquiera que sean los avances posteriores, siento una gran satisfacción recordando los experimentos de los años ochenta que me condujeron al campo de la fotónica de microesferas, aquel empeño por sondear la transferencia, sin fotones, de energía entre las moléculas. Aunque fallé en el intento, ahora comprendo que no habría podido esperar nada mejor.

Bibliografía complementaria

- ENHANCED ENERGY TRANSFER WITHIN A MICROPARTICLE. L. M. Folan, S. Arnold y S. D. Druger, en *Chemical Physics Letters*, vol. 118, págs. 322-327; 1985.
- ENERGY TRANSFER AND THE PHOTON LIFETIME WITHIN AN AEROSOL PARTICLE. S. Arnold y L. M. Folan, en *Optics Letters*, vol. 14, págs. 387-389; 1989.
- ELECTRODINÁMICA CUÁNTICA EN CAVIDADES. Serge Haroche y Jean-Michel Raimond, en *Investigación y Ciencia*, págs. 51-59; junio, 1993.
- EXCITATION OF MORPHOLOGICAL RESONANCES FROM INDIVIDUAL MICROPARTICLES AND CLUSTERS IN CONTACT WITH AN OPTICAL FIBER. A. Serpenguzel, S. Arnold y G. Griffel, en *Optics Letters*, vol. 20, págs. 654-656; 1995.
- IMAGING ENHANCED ENERGY TRANSFER IN A LEVITATED AEROSOL PARTICLE. S. Arnold, S. Holler y S. D. Druger, en *Journal of Chemical Physics*, vol. 104, pág. 7741-7748; 1996.
- TIGHT BINDING PHOTONIC-MOLECULE MODES OF RESONANT BISPHERES. T. Mukaiyama, K. Takeda, H. Miyazaki, Y. Jimba y M. Kuwata-Gonokami, en *Physical Review Letters*, vol. 82, pág. 4623-4625; 1999.