

# Pinzas ópticas: las delicadas manos de la luz

Karen Volke Sepúlveda, Ibis Ricárdez Vargas  
y Rubén Ramos García

Uno de los elementos más socorridos en las historias de ciencia ficción en las últimas décadas ha sido el láser. Y su fama es bastante bien merecida, ya que gracias a este dispositivo tan atractivo y estimulante para la imaginación de escritores y guionistas, la ciencia ha expandido sus fronteras, y las aplicaciones reales del láser se parecen cada vez más a las historias de ficción. Específicamente, una de sus aplicaciones más sorprendentes en los últimos años es la captura y manipulación de partículas microscópicas por medio de luz. Para entender en qué consiste esto, comencemos haciendo un breve recorrido histórico.

## Los inicios de la captura óptica de partículas

Los primeros antecedentes que permitieron reconocer que la luz ejerce presión sobre los objetos

materiales datan del siglo XVII, cuando Johannes Kepler (1571-1630) sugirió que la cola de los cometas podía deberse a la presión de los rayos solares, ya que siempre apuntaba en sentido contrario al Sol sin importar la dirección de movimiento del cometa (aunque en realidad esto se debe al viento solar, ya que la presión de radiación de la luz solar no es lo suficientemente fuerte como para desviar la cola de los cometas). Más de dos siglos después James Clerk Maxwell (1831-1879) desarrolló su teoría electromagnética, con la cual demostró que la luz está constituida por ondas electromagnéticas que efectivamente ejercen presión al propagarse.

Algunas décadas más tarde se observaron fenómenos que no podían explicarse con la teoría ondulatoria de Maxwell, lo cual dio lugar a los inicios de una de las grandes teorías del siglo XX: la mecánica cuántica. En este contexto, los trabajos principalmente de Albert Einstein (1879-1955) y Max Planck (1858-1947) llevaron a la conclusión de que, bajo ciertas circunstan-



cias, la luz también se comporta como si estuviera formada por un flujo de partículas, actualmente llamadas fotones. A cada fotón se le asocia una propiedad llamada *momento lineal* (que en física clásica se define como el producto de la masa por la velocidad de un cuerpo, aunque según la teoría de la relatividad, aun una partícula sin masa, como el fotón, puede tener momento lineal, cuya magnitud es igual a su energía dividida por la velocidad de la luz). Esto se traduce en el hecho de que el flujo de fotones en su conjunto ejerce presión al incidir sobre la materia. Es decir, independientemente del comportamiento específico de la luz (ondulatorio o corpuscular), se reconoce que ésta es portadora tanto de energía como de momento lineal, y ambas cantidades se conservan en cualquier proceso de interacción entre radiación y materia.

Como es natural, hubo muchos intentos en el siglo XX de medir la presión ejercida por la luz, pero ésta es en general demasiado débil (por ejemplo, la presión de la radiación solar en la superficie terrestre equivale aproximadamente a  $10^{-11}$  de la presión atmosférica —es decir, es 0.00000000001 veces menor que la presión atmosférica). Se requería de un extraordinario refinamiento en las técnicas y equipos experimentales, así como fuentes luminosas adecuadas, para detectarla.

La historia cambió radicalmente cuando el láser apareció en escena, en los años sesenta. ¿Qué hace del láser una fuente de radiación tan especial? Por una parte, el hecho de que la radiación que emite es casi *monocromática* y *coherente*. Esto quiere decir que está formada por un conjunto de ondas electromagnéticas que tienen casi todas la misma longitud de onda (es luz de un solo color) y que viajan de manera ordenada y sincronizada. Por otra parte, la luz del láser concentra una gran potencia, y se propaga a lo largo de una dirección bien definida (como rayo). En óptica nos referimos a este tipo de propagación como un *haz de luz*. Por ejemplo, si enfocamos un haz de luz láser de 1 watt de potencia a una superficie de unos 10 micrómetros (milésimas de milímetro) de diámetro, la cantidad de fotones que atravesarán esa superficie por unidad de tiempo será más de nueve millones de veces mayor que la cantidad de fotones que la atravesarían si la misma superficie estuviera iluminada por el Sol en el exterior

de la atmósfera terrestre. En este caso, la presión de radiación sigue siendo insignificante para objetos macroscópicos, pero llega a ser muy importante al actuar sobre objetos suficientemente pequeños.

Con base en este tipo de argumentos, en 1970 Arthur Ashkin, científico norteamericano que trabajaba en los laboratorios Bell en Estados Unidos, diseñó un experimento para medir la presión de radiación ejercida por un láser continuo. Para evitar efectos de calentamiento debidos a la absorción de la luz, Ashkin utilizó microesferas transparentes de látex suspendidas en agua, cuyos diámetros iban desde fracciones de micrómetro hasta varios micrómetros (como comparación, el grosor de un cabello humano es aproximadamente de 50 a 150 micrómetros). Para su grata sorpresa, no sólo encontró que la presión de radiación efectivamente era capaz de empujar a las partículas en la dirección de propagación del haz láser, sino que también observó que, simultáneamente, las partículas eran atraídas hacia el centro del haz, en la dirección transversal. Partiendo de estos resultados Ashkin decidió colocar dos haces de luz propagándose en direcciones opuestas a lo largo de un eje horizontal, de modo que las fuerzas ejercidas por cada uno de los láseres se equilibraran entre sí en algún punto intermedio, donde la partícula quedaría atrapada por la luz. Estos descubrimientos marcaron el inicio de lo que hoy en día se ha convertido en una de las áreas de mayor impacto en la ciencia y la tecnología: la micromanipulación óptica.

### El origen de las fuerzas de captura óptica

Para entender el fenómeno observado por Ashkin recurriremos a la Figura 1, donde el proceso de interacción entre la luz y una partícula esférica se ilustra mediante un trazo de rayos. Cuando un haz de luz incide sobre la superficie de un objeto transparente, una parte de la luz es reflejada; otra parte es transmitida (pasa a través del objeto), pero sufre refracción (se desvía), y puede haber también una pequeña parte que se absorba, transformándose en calor. Los cambios en la rapidez o dirección de propagación de la luz debidos a la reflexión y refracción implican un cambio en el momento lineal de los fotones, lo cual a su vez genera

fuerzas que actúan sobre la partícula; esto se debe a que el momento lineal se debe conservar, y ocasiona la presión de radiación.

Pero hay un ingrediente adicional que permite la captura óptica observada por Ashkin, y es el hecho de que existe un *gradiente de intensidad* en la sección transversal del haz de luz: la intensidad es máxima en el centro y disminuye rápidamente hacia las orillas, como se ilustra en la Figura 1a y en la curva roja de las Figuras 1b y c (por lo cual el rayo *a* se representa un poco más grueso que el rayo *b*). La refracción del rayo *a* en la figura 1b provoca la fuerza  $F_a$  sobre la esfera, y el rayo *b*, simétricamente ubicado, causa una fuerza análoga  $F_b$ , pero  $F_a$  es mayor que  $F_b$ . El resultado es que la fuerza total (flecha azul) tiene dos contribuciones; una perpendicular al eje de propagación (*z*) que conduce las partículas hacia las regiones de máxima intensidad; y la otra que las empuja hacia adelante a lo largo del eje. La primera se conoce como *fuerza de gradiente*, mientras que la segunda se ha llamado *fuerza de esparcimiento o dispersión*.

En el caso de la luz reflejada (Figura 1c), la fuerza ejercida en cada punto del objeto es siempre perpendicular a su superficie (debido a la ley de reflexión de la luz), de manera que la fuerza resultante tiene el efecto principal de empujar al objeto en la dirección de propagación (flecha azul). Sin embargo, el gradiente de intensidad también juega un papel en este caso. De hecho, su efecto es exactamente opuesto al de la fuerza gradiente para la luz transmitida, es decir, tiende a empujar al objeto fuera de las regiones de intensidad máxima, aunque su magnitud es mucho menor (aproximadamente diez veces) que la fuerza gradiente asociada a la luz transmitida. En general, podemos decir que la fuerza de esparcimiento es aquella cuya dirección coincide siempre con la dirección de propagación del haz de luz, mientras que la fuerza gradiente es perpendicular a esta dirección.

En la década de los setenta y principios de los ochenta, tanto Ashkin y su equipo de colaboradores como otros grupos científicos alrededor del mundo centraron su atención en comprender mejor los fundamentos físicos del fenómeno y en desarrollar nuevas técnicas de captura óptica. Por ejemplo, se realizaron diversos experimentos de “levitación óptica” con par-

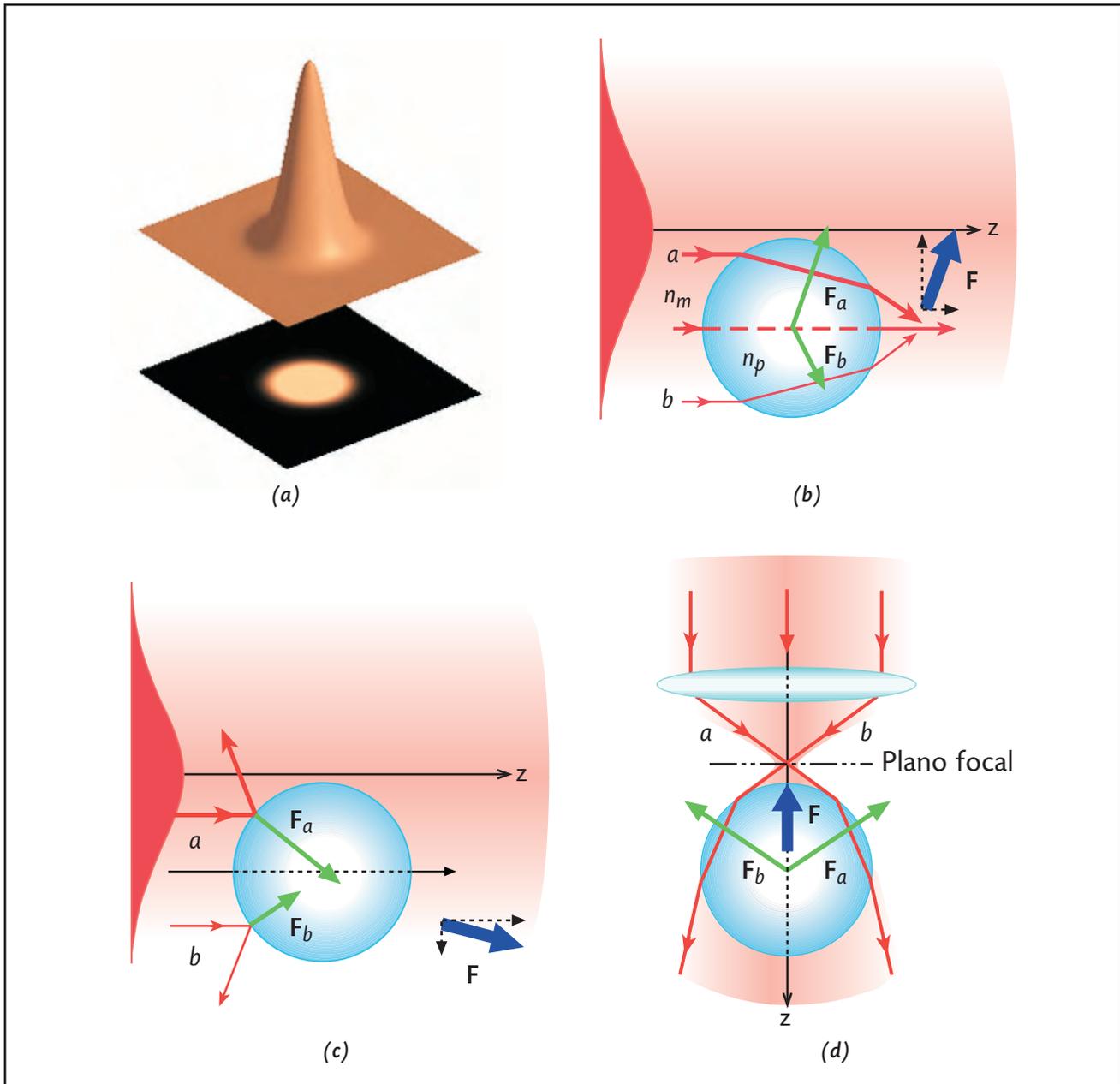
tículas micrométricas de diferentes materiales y propiedades ópticas (partículas transparentes de alto y bajo índice de refracción, partículas metálicas, etcétera). La levitación se obtiene cuando la presión de radiación ejercida por un haz de luz que se propaga verticalmente hacia arriba, equilibra a la fuerza de gravedad de tal manera que la partícula queda suspendida.

A pesar de estos avances, las aplicaciones de las técnicas de captura óptica aún se veían bastante limitadas. Sin embargo, en 1986 se obtuvo otro gran avance en el área, nuevamente debido a Ashkin y a sus colaboradores, entre los que destaca Steven Chu, premio Nobel de física 1997 por sus contribuciones al enfriamiento y captura de átomos con luz. Esta vez desarrollaron una “trampa óptica” muy estable, que permitía atrapar firmemente a una partícula utilizando un solo haz de luz. Para lograr esto, el haz se debe enfocar en un área extremadamente pequeña utilizando una lente objetivo de microscopio (de manera análoga a como se enfoca la luz del Sol mediante una lupa). Con ello se genera un considerable gradiente de intensidad en la dirección de propagación, además del transversal. Como consecuencia, la fuerza de gradiente atrae a las partículas hacia la región focal, donde la intensidad es máxima. Lo sorprendente es que esta fuerza tiene magnitud suficiente como para equilibrar el peso de la partícula y la fuerza de esparcimiento, de modo que las partículas pueden ser atrapadas aun cuando el haz se dirija verticalmente hacia abajo. Este tipo de trampa se conoce hoy en día como “pinzas ópticas”, y su eficacia se ha comprobado con partículas cuyos tamaños van desde decenas de nanómetros (millonésimas de milímetro) hasta decenas de micrómetros (milésimas de milímetro). El principio de operación en este caso se ilustra en la Figura 1d. Las fuerzas ejercidas por los rayos *a* y *b* sobre la esfera corresponden a  $F_a$  y  $F_b$ , respectivamente, y la fuerza total apunta en dirección del plano focal (flecha azul).

El método ilustrado en las figuras 1b-d describe satisfactoriamente las fuerzas ópticas sólo cuando el tamaño de las partículas es varias veces mayor que la longitud de onda de la luz que se está utilizando. También se pueden atrapar partículas más pequeñas, pero los procesos físicos involucrados y su descripción son más complejos. En general, las fuerzas ópticas son directa-

mente proporcionales a la potencia del haz de luz. Aunque la potencia mínima necesaria para atrapar una partícula depende de su tamaño, de sus propiedades ópticas y, por supuesto, de las demás fuerzas involucradas en el sistema, generalmente unos cuantos miliwatts pueden ser suficientes.

Una vez que una partícula está atrapada se puede desplazar con respecto a su entorno, ya sea moviendo el haz de luz o la propia muestra que contiene a la partícula; en este caso se habla de “manipulación óptica”. Otro punto importante es que estas técnicas no están restringidas a partículas esféricas: funcionan igualmen-



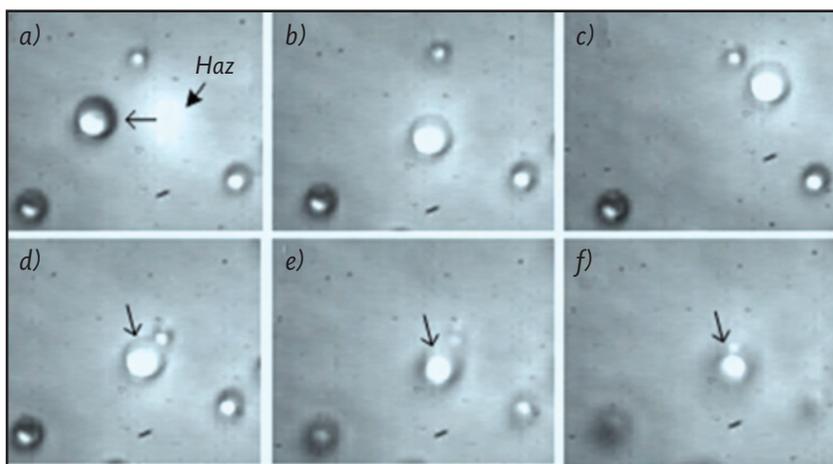
**Figura 1.** (a) Gradiente de intensidad transversal de un haz de luz láser y su proyección en una pantalla. (b-d) Procesos de interacción entre un haz de luz y una partícula: (b) El gradiente de intensidad provoca una fuerza neta que atrae a la partícula hacia la región más intensa, al tiempo que la empuja en la dirección de propagación. (c) La fuerza asociada a la luz reflejada se dirige principalmente en la dirección de propagación. (d) Si el haz de luz está muy enfocado, se genera un gradiente de intensidad a lo largo del eje del haz que provoca que la partícula sea atraída hacia el plano focal, que es la región de mayor intensidad.

te con objetos de diferentes geometrías, e incluso de formas irregulares, aunque en esos casos puede haber efectos adicionales de alineación o rotación. En la Figura 2 se muestra una secuencia de imágenes que permite apreciar la manipulación de una pequeña esfera de vidrio en las tres direcciones espaciales.

El impacto de las pinzas ópticas fue determinante en el desarrollo posterior de las técnicas de manipulación con luz, y los resultados más emocionantes aún estaban por venir. Hasta 1986 los experimentos se habían realizado con luz visible (con longitud de onda aproximadamente de 0.40 a 0.70 micrómetros). El grupo de Ashkin había utilizado un láser de luz verde con una longitud de onda de 0.514 micrómetros. En 1987, una afortunada casualidad y su gran ingenio los condujeron a otro descubrimiento fundamental. Al realizar un experimento en el que pretendían manipular cierto tipo de virus, de pronto observaron que algunos especímenes que no eran virus caían en la trampa óptica, se movían frenéticamente por unos momentos y después quedaban inmóviles, capturados por la luz. Al analizarlos se dieron cuenta de que la muestra había sido contaminada por bacterias que, al ser atrapadas, morían rápidamente a causa de la fuerte absorción de radiación.

Entonces se les ocurrió reemplazar la luz verde por un láser infrarrojo (con longitud de onda de 1.064 micrómetros), ya que la radiación infrarroja prácticamente no es absorbida por la materia biológica y por lo tanto no le causa daño. Los resultados fueron extraordinarios; no sólo lograron atrapar y manipular bacterias, levaduras (hongos microscópicos) y diferentes tipos de células vivas, sino que además las pudieron mantener en la trampa el tiempo suficiente como para observar la reproducción celular sin que sufrieran daño. Incluso se logró la manipulación de organelos celulares *dentro* de algunos tipos de células *in vivo*, lo que permitió estudiar la estructura interna de la célula en cuestión.

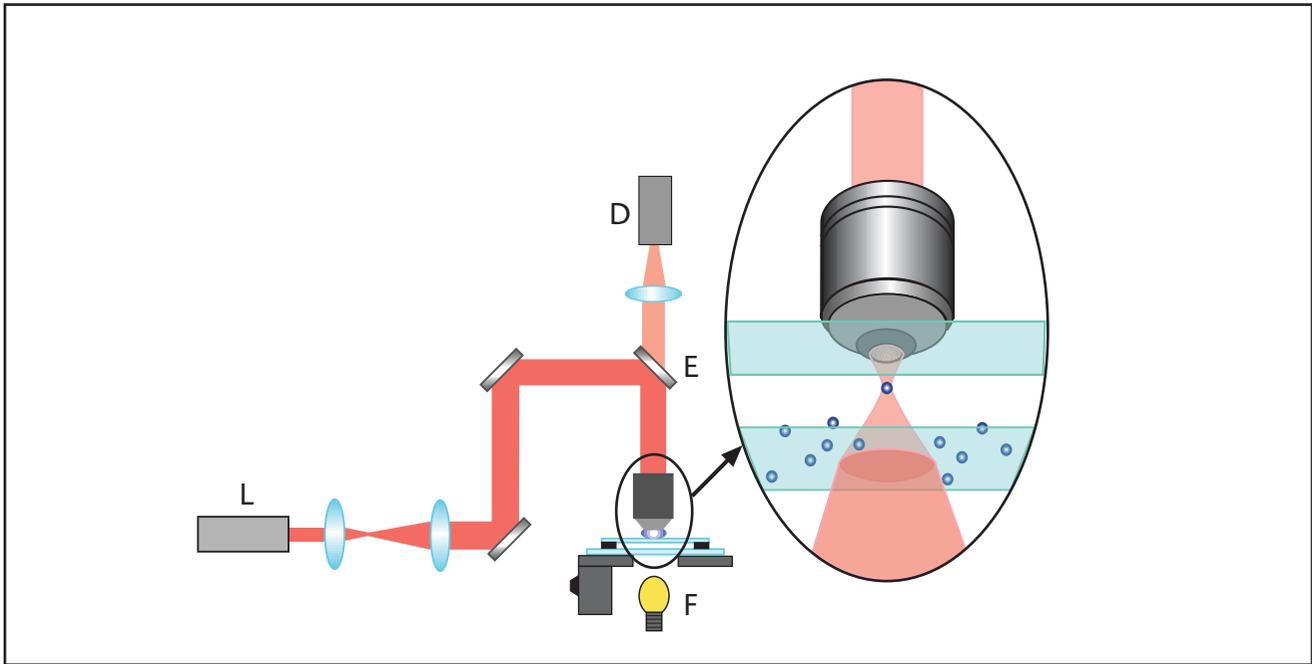
Por otra parte, hasta ese momento se habían utilizado dos microscopios en el montaje experimental; uno para enfocar el haz láser y otro para observar las partículas atrapadas. Pero en el mismo trabajo de 1987 se reporta por primera vez la combinación del sistema de focalización con el sistema de observación en un solo objetivo de microscopio, que desempeñaba ambas funciones. Una configuración experimental muy simple pero típica de estas pinzas ópticas modernas se describe en la Figura 3, aunque hoy en día se utilizan muchas configuraciones diferentes, dependiendo de la aplicación; inclusive se pueden realizar introduciendo el láser directamente a un microscopio óptico.



**Figura 2.** Manipulación en tres dimensiones de una esfera de vidrio de 5 micrómetros suspendida en agua. (a) Se observa la imagen transversal del haz de luz proyectada en el plano de la muestra; (b) el haz se ha dirigido hacia una partícula atrapándola; en (c) se puede ver cómo ésta se ha desplazado lateralmente a otra posición respecto a sus vecinas. En las imágenes (d-f) la partícula señalada con la flecha es la que está atrapada y el resto de las microesferas se desenfocan, lo cual indica que la partícula atrapada se está desplazando en la dirección vertical.

### Aplicaciones sobresalientes y nuevos avances

La manipulación de muestras biológicas y la simplificación del sistema experimental abrieron de manera definitiva la gama de aplicaciones de las pinzas ópticas. Actualmente se han convertido en una herramienta fundamental en disciplinas como biofísica, biotecnología, medicina reproductiva y biología celular y molecular, donde han hecho posible la manipulación incluso de una sola molécula. También se usan en investigaciones básicas en óptica, para determinar las propiedades físicas de



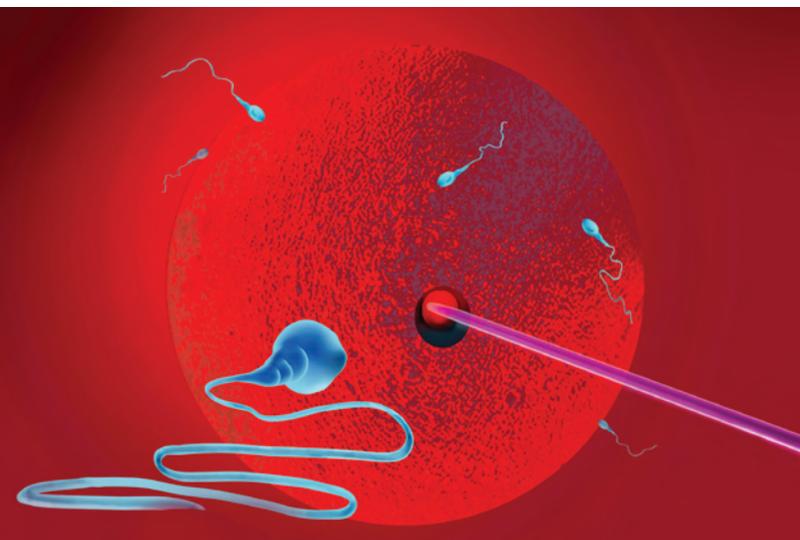
**Figura 3.** Un arreglo experimental simple de pinzas ópticas. El láser (L) se dirige mediante un conjunto de espejos hacia el objetivo de microscopio que se utilizará para enfocarlo. El último espejo (E) es selectivo, de manera que refleja la luz del láser pero permite observar la muestra a través de la iluminación de fondo (F) y un sistema de detección (D), que típicamente consiste de una cámara. La muestra se encuentra sobre una base de traslación que permite su movimiento relativo al haz de luz.

diferentes tipos de haces de luz, así como en estudios de física de coloides (materiales de tipo gelatinoso) y sistemas complejos. Por si eso fuera poco, las nuevas técnicas de manipulación óptica permiten la operación de máquinas en miniatura, que, dicho sea de paso, son también desarrolladas con tecnología óptica.

Un ejemplo de gran interés en el terreno de las aplicaciones biológicas es el estiramiento de una sola molécula de ácido desoxirribonucleico (ADN, que normalmente se mantiene en una configuración enrollada), lo cual ha sido fundamental para entender sus propiedades mecánicas y por tanto sus funciones en la operación de la maquinaria celular. Una manera de lograr esto es adherir uno de los extremos de la molécula (previamente marcada con un material fluorescente y detectada mediante microscopía de fluorescencia) a una esfera de látex que es atrapada con pinzas ópticas. Posteriormente se utiliza la fuerza hidrodinámica de un líquido que fluye para estirar la molécula de ADN (¡hasta una longitud de 64.5 micrómetros!). Cuando el flujo se detiene, la molécula se relaja volviendo a su forma original.

También se ha combinado el uso de las pinzas ópticas con lo que se conoce como “escalpelo óptico” para realizar fertilización *in vitro*. El escalpelo óptico consiste básicamente en enviar un pulso corto y controlado de luz láser de muy alta energía y longitud de onda ultravioleta (menor de 0.40 micrómetros) que “taladra” un agujero en la zona pelúcida de un óvulo (la capa protectora que lo rodea) con gran precisión, para facilitar la llegada del espermatozoide, el cual a su vez es arrastrado hasta el óvulo utilizando pinzas ópticas. El escalpelo óptico es también una herramienta muy poderosa, que permite entre muchas otras cosas, aislar células individuales de un tejido sano o enfermo para estudiar las diferencias a nivel molecular.

Otro ejemplo impresionante es el estudio de los procesos de transporte por *motores moleculares* (enzimas especiales, como la kinesina, que catalizan algunas reacciones químicas en el interior de la célula y utilizan la energía liberada para realizar trabajo mecánico, como el transporte de cromosomas a través del citoplasma, que los arrastra a lo largo de los filamentos proteicos llamados microtúbulos). La molécula de



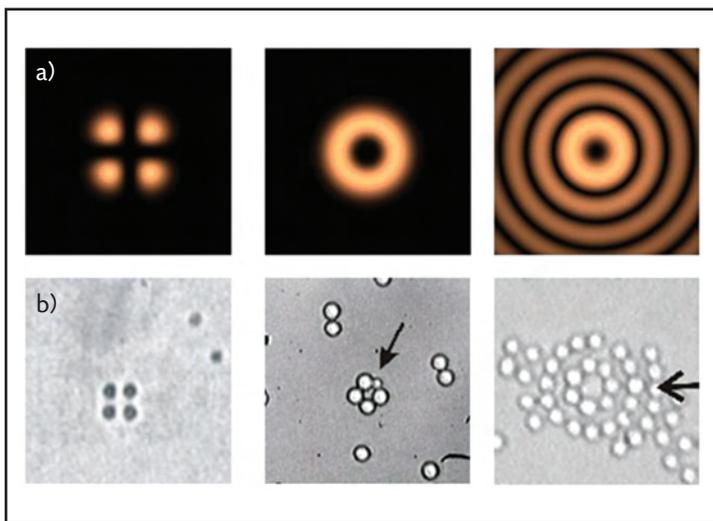
kinesina se compone de dos cadenas pesadas entrelazadas, lo que le da una forma alargada, y uno de sus extremos funciona como un par de “piernas” con las que recorre su camino. En este caso, un extremo de la kinesina se adhiere a una esfera transparente atrapada con luz; conforme la kinesina se empieza a desplazar a lo largo de un microtúbulo, es capaz de arrastrar consigo a la esfera. Caracterizando el desplazamiento de la esfera respecto a su posición inicial de equilibrio en la trampa óptica se logra caracterizar el movimiento

de la kinesina. Con estas investigaciones se han comenzado a develar los misterios de la kinesina, concluyendo que ésta se mueve con pasos regulares de aproximadamente 8 nanómetros de longitud.

Los ejemplos anteriores involucran el uso de las formas más simples de las pinzas ópticas. Pero las posibilidades de manipulación óptica son cada vez más amplias, y hoy se cuenta con nuevas técnicas desarrolladas en la última década. Tal es el caso de las trampas ópticas que involucran el uso de haces con distribuciones controladas de luz, como arreglos de regiones brillantes y oscuras que actúan como trampas individuales, permitiendo la manipulación de múltiples objetos a la vez. En las imágenes a-c de la Figura 4 se muestran simulaciones numéricas de algunas distribuciones de intensidad que se han utilizado para manipulación, mientras que en los cuadros d-f se muestran imágenes de los experimentos correspondientes.

Una manera de cambiar y controlar la distribución transversal de intensidad de un haz de luz es utilizando técnicas de interferencia; es decir, dividiendo un haz de luz en dos y recombinándolo más adelante de modo que la energía se redistribuya formando regiones brillantes y oscuras.

Otra forma de moldear un haz de luz es utilizando hologramas generados por computadora. Los hologramas son básicamente rejillas de difracción (formadas, por ejemplo, por variaciones espaciales de absorción, de espesor o de índice de refracción, con escalas de longitud semejantes a la longitud de onda de la luz) con ciertas deformaciones en su estructura que codifican la información necesaria para lograr que la luz que las atraviesa se redistribuya de acuerdo a una configuración deseada. Más aún, en la actualidad existen ciertos dispositivos llamados *moduladores espaciales de luz*, que podríamos describir como pequeñas pantallas de cristal líquido que se conectan directamente a una computadora, en las cuales se despliega la configuración gráfica correspondiente al holograma (como una copia a escala de lo que se ve en el monitor de la computadora). Así, un modulador espacial al ser atravesado por la luz actúa del mismo modo en que lo hace un holograma convencional, pero con la gran ventaja de que puede reconfigurarse de manera interactiva, lo cual se conoce como *holografía dinámica*.



**Figura 4.** (a) Algunas distribuciones transversales de intensidad generadas con diferentes técnicas ópticas y (b) su correspondiente aplicación en la captura óptica de micropartículas, donde se puede observar que las partículas se acomodan de acuerdo con la distribución de intensidad de cada haz.

En el terreno de las pinzas ópticas, las posibilidades de controlar la distribución transversal de intensidad del láser permiten manipular varias partículas simultáneamente, de acuerdo con secuencias específicas (en algunas de las páginas *web* recomendadas al final de este artículo se pueden ver videos de este tipo de trampas dinámicas). Esto ha dado un nuevo y brillante potencial a las aplicaciones de las pinzas ópticas. Por ejemplo, además de la traslación en cualquier dirección, se ha logrado también la rotación controlada de los objetos microscópicos atrapados, lo cual ya se está aplicando como mecanismo para manejar elementos de micromáquinas.

Es tan amplio el espectro de aplicaciones de las pinzas ópticas que resulta imposible resumirlo. Nuestro propósito aquí ha sido simplemente motivar al lector interesado en el tema, tratando de dar un panorama muy general.

#### Agradecimientos

Los autores agradecen sus valiosos comentarios a Shahen Hacyan y a Eugenio Ley Koo. K. V. S. agradece a la DGAPA-UNAM por su apoyo a través del proyecto IN103103.

**Karen Volke Sepúlveda** estudió la licenciatura en física en la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Obtuvo la maestría y doctorado en ciencias en el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE), en la especialidad de óptica. Su tesis doctoral fue galardonada con el premio Weizmann a la mejor tesis doctoral en el área de ciencias exactas en 2003. También en 2003 recibió el Premio Europeo de Óptica por una de sus publicaciones. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores y es investigadora titular del Instituto de Física de la UNAM en el tema de micromanipulación óptica y propiedades dinámicas de haces de luz.

karen@fisica.unam.mx

**Ibis Ricárdez Vargas** es físico por la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Obtuvo una maestría en ciencias con especialidad en óptica en el INAOE, en donde actualmente es estudiante de doctorado en el tema de pinzas ópticas.

irvargas@inaoep.mx

#### Bibliografía

- Ashkin, A. (1999), "Optical trapping and manipulation of neutral particles using lasers", *Optics and Photonics News*, 10, 41-46.
- Bustamante, C., Z. Bryant y S. B. Smith (2003), "Ten years of tension: single molecule DNA mechanics," *Nature*, 423-427.
- Dholakia, K., G. Spalding y M. P. MacDonald (2002), "Optical tweezers: the next generation", *Physics World*, 15, 31-35.
- Hecht, Eugene (2000), *Óptica*, 3ª edición, Madrid, Addison-Wesley, pp. 2-10, 55-57.
- Molloy, J. E. y M. J. Padgett (2002), "Lights, action: optical tweezers", *Contemporary physics*, 43, 241-258.
- Prasad, Paras (2003), *Introduction to Biophotonics*, Wiley Interscience, pp. 482-519.
- Rubinsztein-Dunlop, H., y M. Friese (2002), "Light-driven micromachines", *Optics and Photonics News*, 13, 22-26.

#### Algunas páginas web recomendadas

- Grupo de atrapamiento óptico de la Universidad de St. Andrews, [www.st-andrews.ac.uk/~atomtrap/](http://www.st-andrews.ac.uk/~atomtrap/);
- Grupo de Óptica de la Universidad de Glasgow, [www.physics.gla.ac.uk/Optics/](http://www.physics.gla.ac.uk/Optics/);
- Micromáquinas complejas producidas e impulsadas por luz, [www.szbk.uszeged.hu/%7Egpeteter/micromachine/micromachine.htm](http://www.szbk.uszeged.hu/%7Egpeteter/micromachine/micromachine.htm);
- Estudios de manipulación de moléculas individuales, Universidad de California en Berkeley, <http://alice.berkeley.edu/>;
- Óptica de fase programable, Laboratorio Nacional Risø, Dinamarca, [www.risoe.dk/ofd/ppo/PPOG\\_mbot.htm](http://www.risoe.dk/ofd/ppo/PPOG_mbot.htm);
- Atrapamiento óptico holográfico, Universidad de Nueva York, <http://physics.nyu.edu/grierlab/hot/index.shtml>;
- Laboratorio BLOCK, Universidad de Stanford, [www.stanford.edu/group/blocklab/](http://www.stanford.edu/group/blocklab/).

**Rubén Ramos García** obtuvo el doctorado en física en el Imperial College of Science, Technology and Medicine de Londres. Es investigador titular del INAOE y miembro del Sistema Nacional de Investigadores. Sus áreas de interés son materiales fotorrefractivos (polímeros, pozos cuánticos y cristales en volúmenes), materiales orgánicos no lineales, aplicaciones de materiales fotorrefractivos y micromanipulación óptica.

rgarcia@inaoep.mx