



Elementos de confinamiento múltiple en sistemas continuos

J. A. Hernández Nolasco

División Académica de Informática y Sistemas, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, A.P. 24, C.P. 86690, Cunduacán, Tabasco, México
adan.nolasco@ujat.mx

Recibido: 14 noviembre 2014. Aceptado: 20 abril 2015. Publicado: 01 mayo 2015.

Resumen

En este trabajo se presenta el principio básico de operación de una de las técnicas de manipulación óptica de micropartículas que más auge ha tenido desde su invención, nos referimos a las pinzas ópticas. La descripción involucra tanto los aspectos teóricos como los experimentales. La esencia física del confinamiento se basa en el efecto de la presión de radiación, misma que se hace muy evidente en los resultados experimentales. En la parte experimental se describe el funcionamiento de la trampa óptica como dispositivo óptico para la captura de micropartículas sólidas.

I. Introducción

El hecho de que la luz ejerce presión sobre la materia en que es proyectada se conoce desde el siglo XVII cuando Kepler supuso que la dirección que tomaba cola de los cometas -apuntado siempre en sentido contrario a la posición del sol-, era debido al empuje de las radiaciones solares. Fue hasta 1873 en que la teoría electromagnética de Maxwell demostró teóricamente que la luz por sí misma podía ejercer fuerzas ópticas, denominadas *presión de radiación*. Ya en el marco de la mecánica cuántica, desarrollada posteriormente, se pudo explicar, con base en los trabajos de Plank y Einstein, que la luz también se comporta como un flujo de partículas llamadas *fotones*, que al igual que las partículas materiales ejercen presión sobre los objetos [1]. Sin embargo, debido al orden de magnitud de estas fuerzas (pN), hubo que esperar hasta 1970 en que Arthur Ashkin diseñó un experimento para medir la presión de radiación de un láser. Utilizó microesferas transparentes de látex. No sólo observó que efectivamente la luz era capaz de empujar las partículas, sino que además podían

atraparse. Este descubrimiento marcó el inicio de una de las áreas de la óptica que más impacto ha tenido debido a sus múltiples aplicaciones en diversas ramas de la ciencia, principalmente en ciencias biológicas. Esta técnica de micromanipulación es conocida como *pinzas ópticas* [2].

II. Principio físico de las pinzas ópticas

La teoría acerca del principio básico de operación de las pinzas ópticas depende del tamaño de las partículas. Si el diámetro de éstas es mucho menor que la longitud de onda de la luz láser, estamos en el régimen de campos ópticos o régimen de Rayleigh. Si por el contrario, el diámetro es mucho mayor que la longitud de onda, nos encontramos en el régimen de rayos ópticos o régimen de Mie. Puesto que el rango estándar de las dimensiones de las partículas en pinzas ópticas está comprendida en el régimen de Mie, aquí empleamos entonces este contexto para explicar el atrapamiento [3,4].

Para ello, consideremos un par de rayos de luz a y b provenientes de un haz láser (con distribución de intensidad gaussiana) fuertemente enfocado por medio de una lente convergente, como se muestra en la figura 1.

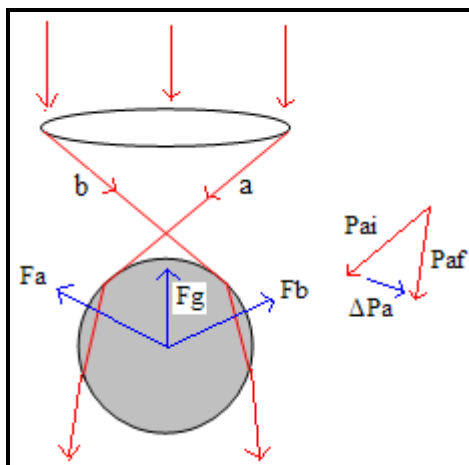


Fig. 1. Trazo de rayos mostrando las fuerzas de atrapamiento. El diagrama de vectores indica el cambio de momento de la luz debido a la refracción.

Los rayos inciden sobre una esfera transparente de alto índice de refracción, es decir, con índice mayor al medio que la rodea. Por lo general el medio que la rodea es agua. Analizando el cambio en el momento lineal de la luz cuando es refractada por la partícula, se encuentra que las fuerzas correspondientes ejercidas sobre la partícula por los rayos *a* y *b* son **F_a** y **F_b**, respectivamente. Esto debido a la conservación del momento lineal. Si ambas fuerzas están equilibradas, el resultado es una fuerza que mueve la partícula hacia el centro de la trampa permitiendo que quede atrapada de forma estable. Esta fuerza es conocida como *fuerza de gradiente* (**F_g**) debido a que apunta hacia la dirección de máxima intensidad del haz (gaussiano). Una desviación de la posición estable del centro de la trampa provoca una fuerza opuesta que la conduce de nueva a su posición de equilibrio.

En un análisis completo existen en realidad dos fuerzas. Una es la fuerza de gradiente, descrita anteriormente, y la otra surge debido a la reflexión de la luz. Esta última provoca una fuerza en la dirección de propagación del haz, es decir, en sentido contrario a la fuerza de gradiente, conocida como *fuerza de scattering* (**F_s**). Pero debido a que la luz es altamente transmitida, la fuerza de scattering es menor a la fuerza de gradiente (**F_s** < **F_g**), condición que debe cumplirse para el confinamiento.

III. Experimento

En esta sección se describe el experimento que permite el atrapamiento y manipulación de

microesferas dieléctricas transparentes de silica (vidrio muy resistente). El arreglo óptico se muestra en la figura 2.

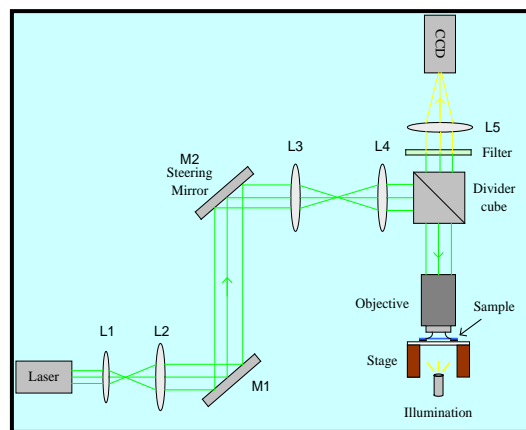


Fig. 2. Sistema óptico para el atrapamiento y manipulación de microesferas de silica.

El haz proveniente de un láser de Argón a una longitud de onda de 514nm, es expandido con el sistema de lentes L1 y L2. Esto con el fin de que el haz llene completamente la apertura de entrada del objetivo de microscopio y aumentar así la eficiencia de la trampa puesto que se alcanza un buen atrapamiento axial, es decir, en dirección vertical. Luego de pasar el haz por los espejos M1 y M2 que sirven para controlar su dirección, este atraviesa por el otro sistema de lentes L3 y L4. Este par de lentes forman planos conjugados entre el espejo móvil M2 y el plano focal anterior del objetivo de microscopio. Posteriormente el haz es desviado hacia el objetivo de microscopio de 100x (de inmersión en aceite) mediante un cubo divisor. Entonces el haz es fuertemente enfocado e incide sobre la muestra que reposa en una montura con libertad en los tres ejes. La muestra consiste de las microesferas sólidas de silica suspendidas en agua. La observación del atrapamiento se realiza mediante una cámara CCD que detecta la iluminación de la muestra. La muestra es iluminada con una lámpara convencional de luz blanca, como se observa en la figura. El filtro colocado sobre el cubo divisor sirve para bloquear la luz reflejada verticalmente por el cubo y que satura a la CCD. La lente L5 sirve para conducir la imagen de la muestra a la CCD.

Cuando la muestra es colocada, esta es llevada al foco del haz mediante desplazamientos verticales con la montura ya que el objetivo permanece estático. Las microesferas son entonces atrapadas en 3D, justo como se indica en

la teoría. Con este arreglo se han atrapado partículas del orden de 2 a 20 micras de diámetro.

IV. Resultados

En la siguiente figura se muestra una secuencia de imágenes mostrando el atrapamiento y manipulación de una microesfera de silica de 5 μm de diámetro.

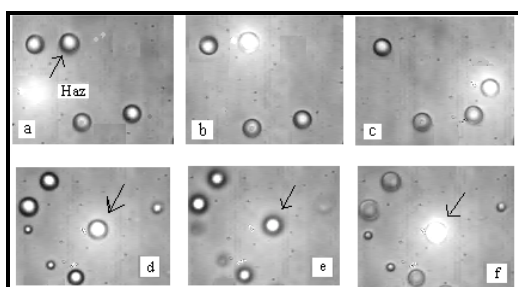


Fig. 3. De (a-c) se muestra el atrapamiento y movimiento de la esfera. De (d-f) se observa el atrapamiento en 3D.

En la serie de figuras (a-c) se observa como la partícula es atrapada. En (a) se mira el haz proyectado sobre la muestra, normalmente llamado *spot*, cuyo diámetro es del orden de 0.5 μm . El spot es dirigido hacia la partícula, mismo que la succiona y la desplaza como se muestra en (b) y (c), respectivamente.

En las imágenes (d-f) vemos el atrapamiento tridimensional de la microesfera. En (d) se indica que la partícula está atrapada. Después la muestra es desplazada verticalmente hacia abajo manteniéndose sujeta la partícula. Vemos entonces que las otras partículas se desenfocan respecto a la que está atrapada, lo que prueba que efectivamente se logra capturar en 3D.

Las potencias necesarias para asegurar un buen atrapamiento oscilan alrededor de los 10 mW. Es obvio que para mejores atrapamientos se sugiere aumentar la potencia.

V. Conclusiones

Se ha presentado el fundamento básico de las pinzas ópticas tanto teórica como experimental. Mediante esta técnica se hace evidente el fenómeno de la presión de la luz. También es importante mencionar que con este mismo sistema óptico se trabaja actualmente en el control de microesferas huecas de silica, cuyo radio interno juega un papel importante en las observaciones.

Dentro de la teoría del atrapamiento también es posible capturar micropartículas de bajo índice (aquellas cuyo índice de refracción es menor al

medio que la rodea), sólo que la explicación es un tanto diferente, pero de la misma manera bajo el régimen de rayos ópticos.

El rango de operación de las pinzas ópticas oscila entre partículas de 100 nm y 100 μm de diámetro. Partículas menores de 100 nm es aún difícil manipular debido a su reducido tamaño, y actualmente se trabaja en lograr esto, en tanto que para mayores de 100 μm puede lograrse sin problema con las técnicas mecánicas sin necesidad de técnicas ópticas.

Las pinzas ópticas tienen amplias aplicaciones en ciencias biológicas para la manipulación de células. También se utiliza para el desarrollo de micromáquinas, entre otras áreas. En el caso de material biológico se utilizan láseres que emiten en el infrarrojo puesto que estos no dañan la materia.

VI. Agradecimientos

El autor le agradece al CONACyT el apoyo otorgado a través de la Beca para Estudios de Doctorado # 157246.

VII. Referencias

- [1] Hecht, Eugene, “*Óptica*”, Addison-Wesley Latinoamericana, 3a Edición, Madrid, (2000), pp.2-10, 55-57.
- [2] Volke Sepúlveda, Karen, “*Light beams with angular momentum and applications in optical tweezers*”, Tesis de Doctorado INAOE, (2003).
- [3] Ashkin A., “*Acceleration and trapping of particles by radiation pressure*”, Phys. Rev. Lett. **24**, 156-159.
- [4] Ashkin A., J. M. Dziedzic, and T. Llamane, 1987, “*Optical trapping and manipulation of single cells using infrared laser beams*”, Nature (Lond.) **330**, 769-771.

Página web recomendada:

<http://www.st-andrews.ac.uk/~atomtrap/>