



## Refracción en superficies de doble capa

M. Gómez Martínez

División Académica de Ciencias Básicas, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, A.P. 24, C.P. 86690,  
Cunduacán, Tabasco, México  
[manegomezmtz@gmail.com](mailto:manegomezmtz@gmail.com)

-----  
Recibido: 02 diciembre 2014. Aceptado: 13 marzo 2015. Publicado: 01 mayo 2015.

### Resumen

*Presentamos el uso de micro-partículas huecas como elementos reflejantes individuales operando por reflexión total interna (RTI) en un arreglo convencional de pinzas ópticas con haz gaussiano y a una longitud de onda de 514nm. Tal efecto de reflexión se presenta cuando las micro-esferas, suspendidas en agua, son iluminadas fuera de eje, situación en la cual el tamaño finito del espesor de cáscara de dichas partículas juega un papel importante. Usando el mismo arreglo óptico, demostramos también que este tipo de esferas pueden ser atrapadas y manipuladas bidimensionalmente en el centro del haz de iluminación donde la intensidad es máxima, lo que indica que dicho espesor es lo suficientemente grande como para que no se comporte como partícula de bajo índice. El haz emergente, aproximadamente ortogonal a la dirección del haz incidente, es usado para empujar otras partículas u objetos que se encuentran alrededor de la micro-esfera hueca debido al efecto de presión de radiación. Estos micro-espejos pueden constituir una nueva micro-herramienta en el campo de los así llamados lab-on-a-chip.*

### 1. Introducción

Una continua tendencia hacia la miniaturización se ha elevado en las últimas décadas en diferentes áreas, tales como en óptica y electrónica. En óptica, esta tendencia está estrechamente conectada con el desarrollo de pinzas ópticas y con técnicas de micromanipulación láser. Hoy en día, un conjunto completo de micro-herramientas ópticas han sido implementadas, por ejemplo, llaves inglesas ópticas y motores [1, 2, 3], tijeras [4, 5], estiradores [6], seleccionadores por tamaños [7, 8], entre otros, que han encontrado un espectro muy amplio de aplicaciones. La incorporación de microespejos en este grupo de herramientas, que son elementos esenciales en muchos sistemas ópticos, puede abrir nuevas posibilidades y facilitar algunas tareas a nivel microscópico. Por ejemplo, la habilidad para redireccionar la luz dentro de una muestra puede ayudar a remover fácilmente residuos en microcirugías, o podrían usarse para el funcionamiento independiente de elementos de micromaquinaria óptica con diferentes orientaciones en el espacio [9,10].

### 2. Teoría y resultados experimentales

El principio de operación es basado en RTI. Esta surge cuando las microesferas huecas de silica (de 5-20  $\mu\text{m}$  de diámetro) suspendidas en agua, son iluminadas ligeramente fuera de centro por un haz gaussiano enfocado fuertemente con un objetivo de microscopio de 100x en un arreglo convencional de pinzas ópticas. Luego de ser refractado el haz en la superficie, este sufre RTI cuando alcanza la interface interna de la partícula (silica-aire), suponiendo que el interior de la esfera contiene aire ( $n_a \approx 1$ ). El índice de refracción de la silica es de 1.45 aproximadamente.

En la figura 1 se muestran simulaciones numéricas de una onda plana incidente en una microesfera hueca en agua, enfocada por un objetivo de microscopio de apertura numérica 1.25 (100x).

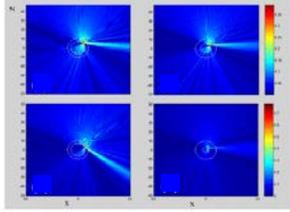


Fig. 1. Haz direccional reflejado en la interface silica-aire. (a)-(b) módulo cuadrado del campo eléctrico como función de la posición de incidencia del haz de luz para un espesor de cáscara fijo de 3  $\mu\text{m}$  y radio externo de 10  $\mu\text{m}$ . (c)-(d) módulo cuadrado del campo eléctrico como una función del espesor de cáscara para una posición de incidencia fija, definida por un ángulo de 45° y radio interno de 10 de  $\mu\text{m}$ .

Estas simulaciones están en total acuerdo con las observaciones experimentales, como se muestra a continuación. En la figura 2 se aprecia una serie de imágenes mostrando tal efecto de haz direccional, en este caso emergente de una microesfera hueca de 20  $\mu\text{m}$  de diámetro. Se observa además que el haz generado es bastante intenso tal que al ser dirigido hacia una partícula cercana esta es empujada y trasladada por el haz a otra posición por efecto de presión de radiación.

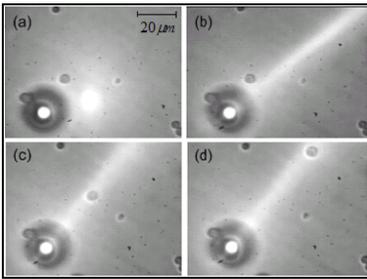


Fig. 2. Generación de un haz reflejado por una microesfera hueca de 20  $\mu\text{m}$  de diámetro iluminada fuera de eje. (a) Haz moviéndose hacia la esfera. (b) Generación del efecto de luz reflejada. (c)-(d) El haz es dirigido hacia una partícula vecina (que puede ser de forma irregular) la cual que es empujada por varias decenas de micras debido a la presión de radiación.

En la figura 3 se observa una secuencia de imágenes mostrando por primera vez el atrapamiento óptico bidimensional de una microesfera hueca (20  $\mu\text{m}$  de diámetro) con haz gaussiano, cuando se sabe que normalmente que las esferas huecas son repelidas de las regiones de máxima intensidad. El atrapamiento toma lugar cuando la cintura del haz esta localizada por abajo del centro de la esfera y centrada con respecto al eje de propagación. En este caso, el mecanismo de captura fue identificado con la fuerza de dispersión dirigida hacia el centro y hacia abajo para la región convergente del haz.

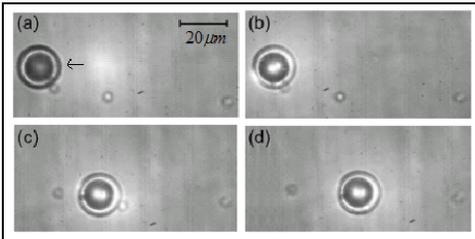


Fig. 3. Secuencia de imagines mostrando el atrapamiento óptico en 2D de una microesfera hueca de 20  $\mu\text{m}$  de diámetro. (a) El haz moviéndose hacia la esfera hueca. (b)-(d) la esfera es atrapada y desplazada de su posición original a otro sitio.

### 3. Conclusiones

Hemos presentado dos nuevos efectos. Por un lado, el atrapamiento en 2D de una partícula hueca con haz gaussiano. Por otro lado, la deflexión de un haz incidente en diferentes direcciones debido a una fuerte RTI en la interface interior de la esfera. Estos resultados nos permiten introducir el uso esferas huecas de vidrio como microespejos individuales movibles, que constituye un nuevo elemento de los llamados herramientas ópticas básicas. Esto puede encontrar aplicaciones en diversas áreas.

### Referencias

- [1]. N. B. Simpson, K. Dholakia, L. Allen, and M. J. Padgett, "Mechanical equivalence of spin and orbital angular momentum of light: an optical spanner," *Opt. Lett.* **22**, 52-54 (1997).
- [2]. M. E. J. Friese, T. A. Nieminen, N. R. Heckenberg, and H. Rubinsztein-Dunlop, "Optical alignment and spinning of laser-trapped microscopic particles," *Nature* **394**, 348-350 (1998).
- [3]. M. P. MacDonald, L. Paterson, K. Volke-Sepúlveda, J. Arlt, W. Sibbett, and K. Dholakia, "Creation and manipulation of three-dimensional optically trapped structures," *Science* **296**, 1101-1103 (2002).
- [4]. M. W. Berns, "Laser Scissors and tweezers," *Sci. Am.* **278**, 62-67 (1998).

- [5]. K. O. Greulich, *Micromanipulation by Light in Biology and Medicine*, Birkhäuser Verlag, Germany, 1999.
- [6]. J. Guck, R. Ananthakrishnan, H. Mahmood, T. J. Moon, C. C. Cunningham, and J. Käs, "The Optical Stretcher: A Novel Laser Tool to Micromanipulate Cells," *Biophys. J.* **81**, 767-784 (2001).
- [7]. M. P. MacDonald, G. C. Spalding, and K. Dholakia, "Microfluidic sorting in an optical lattice," *Nature* **426**, 421-424 (2003).
- [8]. K. Ladavac, K. Kasza, and D. G. Grier, "Sorting by periodic potential energy landscapes: Optical fractionation," *Phys. Rev. E* **70**: Art. No. 010901 (2004).
- [9]. M. E. J. Friese, H. Rubinsztein-Dunlop, J. Gold, P. Hagberg, and D. Hanstorp, "Optically driven micromachine elements," *Appl. Phys. Lett.* **78**, 547-549 (2001).
- [10]. P. Galajda and P. Ormos, "Complex micromachines produced and driven by light," *Appl. Phys. Lett.* **78**, 249-251 (2001).