

Pinzas y trampas ópticas: el fenómeno del atrapamiento óptico

Optical Tweezers and Optical Traps: The Optical Entrapment Phenomenon

Edgar Tonatiuh Santiago Lobato, Héctor Hugo Cerecedo Núñez y
Patricia Padilla Sosa

Resumen

La *presión de radiación* consiste en el intercambio de energía de la luz al interactuar con la materia. Si bien esto produce una fuerza sumamente débil, a escalas muy pequeñas aún se perciben. Las pinzas y trampas ópticas usan este principio para poder llevar a cabo el fenómeno conocido como *atrapamiento óptico* y así manipular partículas. Una pinza óptica no es lo mismo que una trampa óptica, se diferencian en que las pinzas se pueden mover con el objeto y las trampas sólo lo capturan, por lo que tienen diferentes aplicaciones en la investigación científica; en este artículo conoceremos acerca de estos instrumentos.

Palabras clave: pinzas ópticas, trampas ópticas, atrapamiento óptico, presión de radiación, óptica aplicada.

CÓMO CITAR ESTE TEXTO

Santiago Lobato, Edgar Tonatiuh, Cerecedo Núñez, Héctor Hugo y Padilla Sosa, Patricia. (2022, julio-agosto). Pinzas y trampas ópticas: el fenómeno del atrapamiento óptico. *Revista Digital Universitaria (RDU)*, 23(4). <http://doi.org/10.22201/cuaieed.16076079e.2022.23.4.9>



Edgar Tonatiuh Santiago Lobato

Universidad Veracruzana

Actualmente estudia la Licenciatura en Física en la Universidad Veracruzana; también desarrolla investigación en el laboratorio de óptica de la facultad de física, así como diversos trabajos de divulgación para el grupo Feria de la Luz.

 toslobato@hotmail.com

 orcid.org/0000-0002-7900-1764

Héctor Hugo Cerecedo Núñez

Universidad Veracruzana

Licenciatura en Física (Facultad de Física, Universidad Veracruzana), Posdoctorado en el Instituto Tecnológico de Virginia (Blacksburg, VA, USA). Actualmente es investigador y profesor en la Facultad de Física de la Universidad Veracruzana. Desarrolla actividades en el área de óptica aplicada, en diversos proyectos relacionados con fotónica, biofotónica, sensores y monitoreo de parámetros físicos con luz. Cofundador del Laboratorio de Óptica Aplicada de la misma entidad de adscripción. Ha participado en varios proyectos de investigación y académicos, en los cuales se ha logrado obtener recursos económicos para infraestructura de laboratorios de enseñanza e investigación. Ha publicado artículos en revistas indizadas, en memorias en extenso y capítulos en libros (arbitrados y relacionados con física y óptica aplicada).

 orcid.org/0000-0001-8132-7272

 [ResearchGate/H_Cerecedo-Nunez](https://www.researchgate.net/profile/Hector-Hugo-Cerecedo-Nunez)



H. H. Cerecedo-Núñez



Laboratorio de Óptica Aplicada

Patricia Padilla Sosa

Universidad Veracruzana

Licenciada en Física, con doctorado en Ciencias con especialidad en Óptica, actualmente es académica de la Universidad Veracruzana, Facultad de Física. Coordinadora y colaboradora del cuerpo académico de óptica aplicada y materia condensada blanda. Cofundadora del Laboratorio de Óptica Aplicada de la misma entidad de adscripción.

 [ResearchGate Patricia_Padilla-Sosa](https://www.researchgate.net/profile/Patricia-Padilla-Sosa)

 Patricia Padilla Sosa



Laboratorio de Óptica Aplicada

Introducción

Actualmente tal vez sea demasiado tarde para aventurarse a explorar nuestro mundo, pero también demasiado temprano para explorar otros mundos. Sin embargo, con los conocimientos científicos existentes se ha podido experimentar y manipular los componentes más fundamentales del universo, llevándolos a límites nunca imaginados.

La tecnología actual nos ha permitido estudiar y controlar propiedades sumamente interesantes de la luz; por ejemplo, podemos manipular su trayectoria, usarla como medio de transporte de información e incluso se ha logrado la fusión termonuclear. Entre otras aplicaciones, la luz se ha podido usar para manipular la materia a escalas diminutas. Esto se puede llevar a cabo mediante las trampas y pinzas ópticas, pero ¿cómo esto es posible?, ¿cuál es la diferencia entre ellas?, ¿es una mejor que la otra?

La presión de radiación

La luz es algo que se ha venido estudiando desde hace siglos. Existió cierta discusión en cuanto a si está formada por partículas o si es una onda. Grandes científicos defendieron ambas posturas, pero si había algo en lo que coincidían era en que la luz transmitía energía. En la actualidad se sabe que la luz tiene las siguientes propiedades: presenta un comportamiento dual de onda y partícula, transmite energía y está formada por fotones (partículas o paquetes minúsculos de luz).

Los fotones son un caso muy interesante, pues carecen de masa, ya que son pura energía; sin embargo, sí cuentan con momento P , que es una cantidad física que indica la cantidad de movimiento de un objeto. Mientras más momento tenga un objeto, más difícil será detenerlo. El que los fotones cuenten con momento parece imposible si lo vemos desde el punto de vista de la mecánica clásica, a velocidades cotidianas, pues es bien conocido que el momento lineal o cantidad de movimiento de un objeto, se calcula con el producto de la masa con la velocidad ($P = mv$) (Serway, Jewett y Cervantes, 2015). Pero a velocidades muy altas, cercanas a la velocidad de la luz c (aproximadamente igual a 300 mil kilómetros por segundo), es necesario usar la teoría de la relatividad especial. Bajo esta teoría, el momento lineal obtiene un término relacionado a la energía del objeto y su ecuación se presenta de la siguiente manera:

$$P^2 = \frac{E^2}{c^2} - m^2 c^2$$

Considerando que los fotones no cuentan con masa (Ford, Fredman y Young, 2018), el momento para una partícula de luz se representa por $P = E / c$, donde E es la energía del fotón y c la velocidad de la luz. Como se mencionó, la velocidad de la luz es aproximadamente 300 mil kilómetros por segundo, lo cual provoca que el momento de los fotones sea muy pequeño.

Así, cuando la luz interactúa con la materia, existe un intercambio de momento lineal, porque se refleja en el objeto en cuestión; entonces se experimenta una fuerza que podría

desplazar el objeto en la dirección opuesta a la del impulso que recibe el haz; esto simplemente se refiere a la tercera ley de Newton, que indica que a toda acción le corresponde una reacción, y sucede cuando los fotones chocan y rebotan en alguna superficie. A este efecto de intercambio de momento por parte de la luz se le conoce como *presión de radiación*. Debido a la diminuta magnitud del momento, la presión de radiación también lo será. Un ejemplo de ello, pero a tamaño macroscópico, son las velas solares en el espacio exterior, que consisten en gigantescas superficies super ligeras, capaces de reflejar la mayor parte de la luz del sol y así moverse en el espacio (Cubillos, 2014). A tamaños extremadamente pequeños resulta que la presión de radiación es capaz de manipular los objetos, a través de lo que se conoce como el atrapamiento óptico.

conceptos: la *fuerza de esparcimiento* y la fuerza gradiente. La primera hace referencia a la fuerza que actúa en la dirección de propagación de la luz y su magnitud es proporcional a la intensidad del haz incidente. La *fuerza gradiente* se presenta en la dirección de mayor intensidad de la luz, por lo que su magnitud es proporcional al gradiente de la intensidad, es decir, es proporcional a los cambios de la intensidad de la luz, correspondientes a la sección transversal del haz láser (Ritort, 2018; ver figura 1). Un solo láser no puede realizar el atrapamiento óptico porque la fuerza neta es muy débil y esparce las partículas a capturar. Para mejorar esto, se necesita focalizar un haz, así que se suele colocar un objetivo de microscopio, ya que mediante este sistema se consigue tener una serie de lentes capaces de generar el efecto deseado. Cabe destacar que el sistema debe poseer una apertura numérica¹ útil para el trabajo. Así, el espécimen a mover debe colocarse a una distancia de separación de la lente, alrededor de la distancia focal². El evento no termina ahí, el espécimen a mover

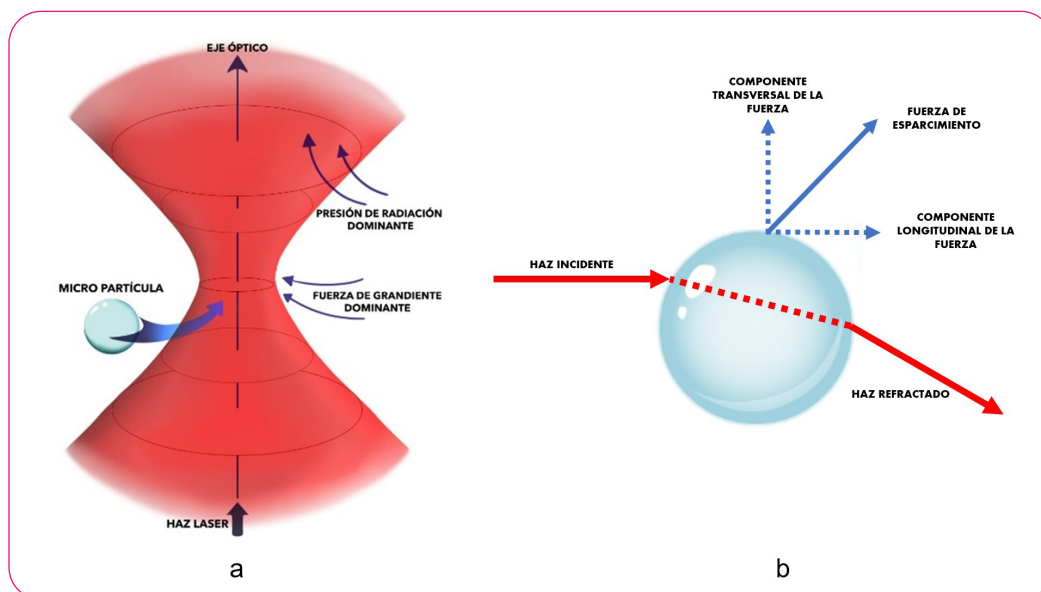
El atrapamiento óptico

Para comprender el atrapamiento óptico primero hay que entender dos

Figura 1. Fuerzas involucradas en el atrapamiento óptico.
a) Esquema óptico de atrapamiento; se muestra el haz láser enfocado y las regiones donde operan la fuerza de gradiente y la presión de radiación. Todo ello permite atraer y atrapar a cierto tipo de partículas hacia la región de mayor intensidad. **b)** Esquema de la fuerza de esparcimiento. Crédito: elaboración propia.

¹ La apertura numérica equivale a la razón entre la distancia focal del sistema y el diámetro equivalente de las lentes del objetivo de microscopio.

² La distancia focal es el punto donde se encuentra el foco de la lente. Este lugar es muy importante porque concentra todos los rayos que pasan por la lente en un único punto.



con la fuerza de la luz necesita poseer un índice de refracción³ adecuado, este debe ser mayor al del medio en el que se encuentran.

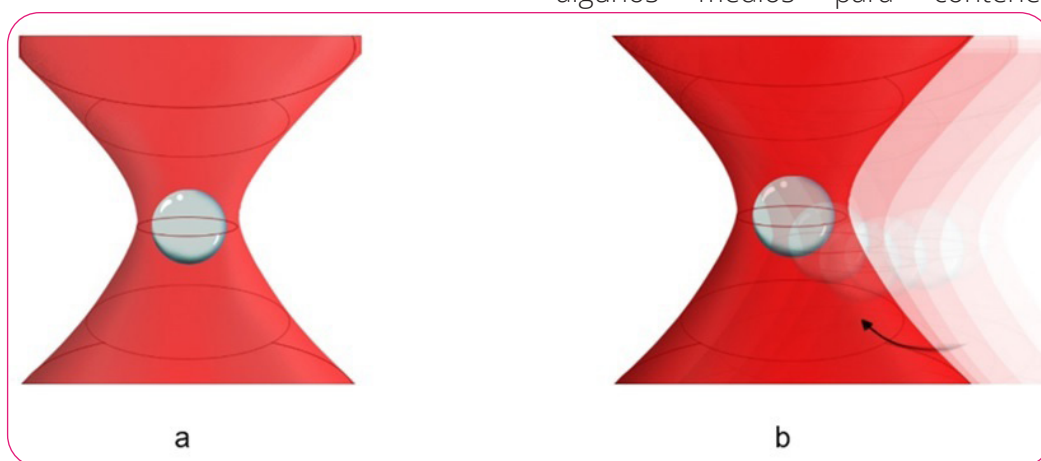
La variación de la intensidad de la luz en el foco produce la fuerza gradiente y permite compensar la fuerza de esparcimiento, de tal manera que se logra “agarrar” o atrapar a las partículas con luz (ver figura 2a). Sin embargo, la fuerza de gradiente puede ser muy débil y ahí es donde juega un papel importante el índice de refracción; ya que este nos indica qué tanto se puede desviar (refractar) la luz en diferentes medios; por lo cual, si el índice de refracción del espécimen es mayor al del medio donde se encuentra la luz que pasa por él, la luz se desviará más y eso aumentará la fuerza de esparcimiento (ver figura 1b).

de todo el mundo han contribuido al desarrollo de aparatos y técnicas con las cuales lograrlo. El resultado son las actuales pinzas y trampas ópticas, que aunque se sustentan en el mismo principio y en muchas ocasiones se usan como sinónimos, tienen sutiles diferencias.

Trampas ópticas

Las trampas ópticas se crearon primero, incluso en los primeros experimentos realizados por Arthur Ashkin —ganador de parte del premio Nobel de Física, 2018, precisamente por sus estudios en este campo— él ya las usaba (Ashkin, 2006). Los elementos esenciales para las trampas ópticas son: un láser de captura, un sistema para dirigir y expandir el láser, un objetivo de microscopio, una cámara digital y algunos medios para contener

Figura 2. Un objeto atrapado exitosamente. **a)** Concepto de la trampa óptica. Esquema óptico de atrapamiento óptico de micropartículas. En este concepto, tanto el haz como la partícula se encuentran confinadas en una región del espacio. **b)** Concepto de la pinza óptica. Esquema óptico del movimiento de las micropartículas al mover el láser que las mantiene atrapadas. En el concepto de pinza óptica, al mover el haz láser, se mueve también la micropartícula. Crédito: elaboración propia.



Trampas y pinzas ópticas

En los años 70, Arthur Ashkin, en los Bell Labs (New Jersey), demostró experimentalmente la posibilidad de atrapar ópticamente partículas dieléctricas en aire o agua mediante los principios ya mencionados (Chu, 2020). Desde entonces, científicos

micropartículas (ver figuras 3 y 2a). Las trampas ópticas se construyen con mayor frecuencia modificando un microscopio invertido (ver figura 3), para que en él se pueda introducir un haz láser en la trayectoria óptica, por abajo del objetivo de microscopio. Aunque este es la manera más común de hacerlas, puede haber

³El índice de refracción se define como $n=c/v$, donde c es la velocidad de la luz en el vacío y v la velocidad de la luz en un medio distinto. Indica que tanto la luz puede ser desviada y ralentizada al cruzar de un medio a otro. Un video rápido que explica lo anterior es [éste](#).

modificaciones dependiendo de lo que se espere estudiar con ellas (Neuman y Block, 2004).

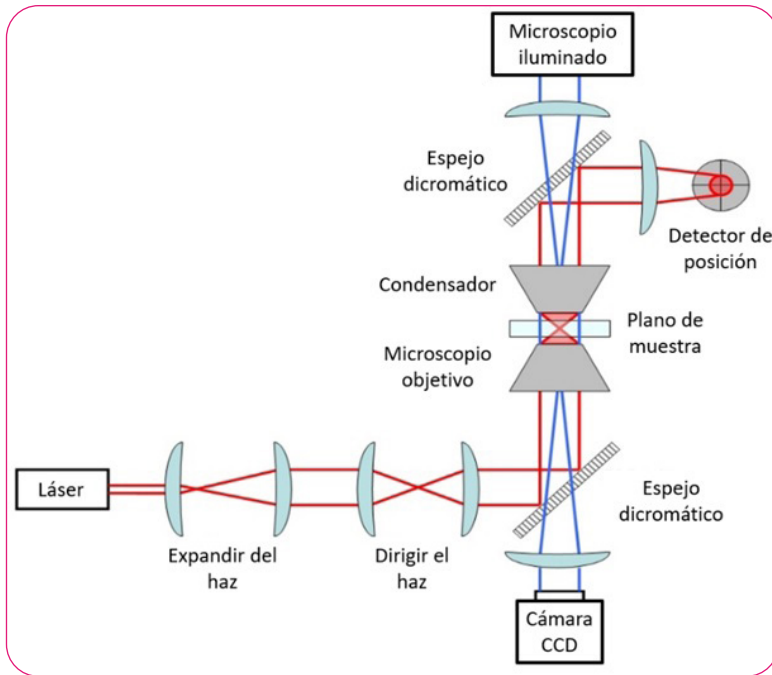


Figura 3. Esquema de una trampa óptica. Crédito: adaptado al español de Ququ, 2007.

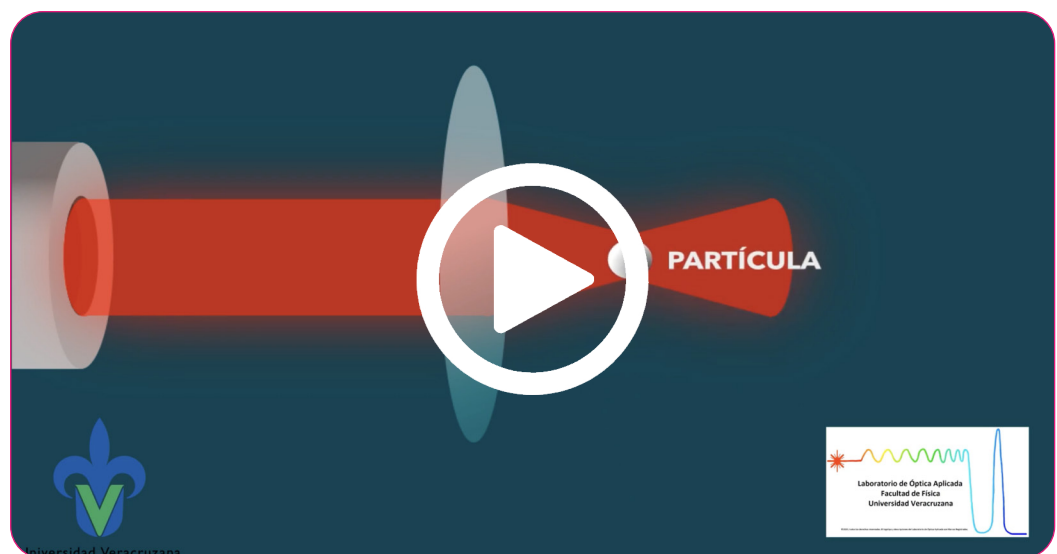
Video 1. En los primeros segundos, se muestran los elementos básicos (láser, lente y micropartícula), para lograr el atrapamiento de una micropartícula. Se observa como al acercar una partícula hacia el haz enfocado, ésta queda atrapada por unos instantes (la trampa óptica). Inmediatamente después se mueve el sistema (laser-lente) por el espacio, y con ello nos encontramos con el concepto de pinza óptica; lo cual implica el movimiento de la micropartícula, en una región del espacio. Al final del video se detiene el movimiento del sistema, con lo cual regresamos al concepto de trampa óptica; y finalmente “apagamos el láser”; con lo cual vemos que la trampa óptica deja de operar y la micropartícula cae por gravedad (Lab. de Óptica Aplicada, Facultad de Física, uv, 2021).

En el concepto de trampa óptica, el sistema óptico que se elabora es fijo, el haz con el que se atrapan las micropartículas está fijo, no se mueve; ahí, las partículas propiamente caen o son llevadas a

esa “trampa de luz” (ver figura 2a). En muchos aspectos, esta configuración es muy útil, pues se pueden estudiar especímenes confinados en una región determinada.

Pinzas ópticas

Si lo que se busca es manipular o mover a una partícula, más que sólo confinarla en una región determinada, entonces, se recurre a las pinzas ópticas. Para esto se necesitan piezas adicionales como un control dinámico de la posición y dirección del láser. Con esto es posible transportar la partícula atrapada, de un punto a otro, lo cual es la diferencia sutil con una trampa óptica: la capacidad de mover un objeto en el espacio. El principio de operación de la pinza óptica se explica gráficamente en la figura 2b, lo cual se puede comparar con el principio de operación de una trampa óptica. Como ejemplo animado para comprender la diferencia de operación entre una trampa y una pinza óptica, se presenta el video 1.

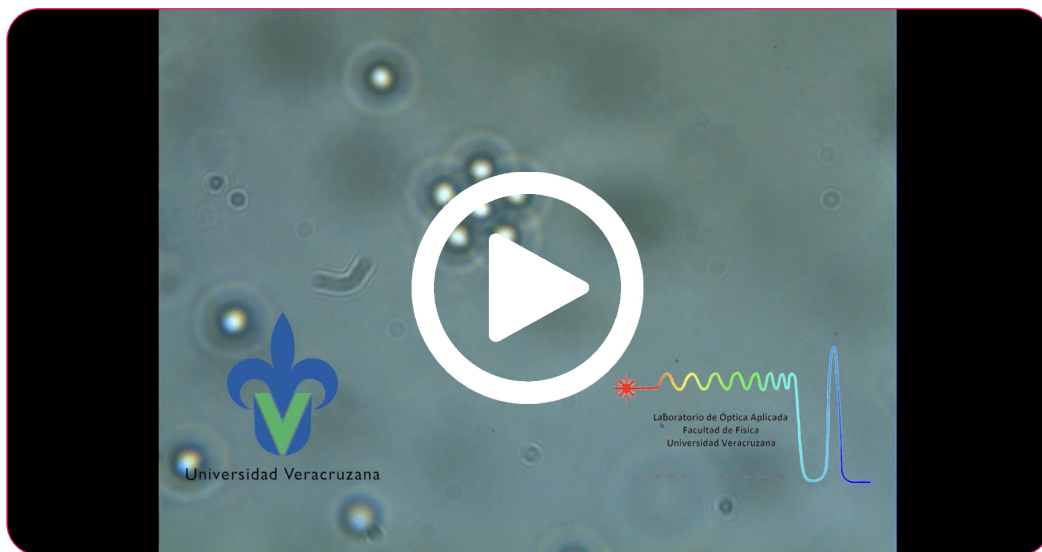


Análisis de diferencias

A primera vista las pinzas ópticas parecen ser la mejor de las trampas ópticas, debido a su capacidad para moverse con lo atrapado. Pero en el campo de batalla de la investigación científica, se suelen usar ambas. Como un ejemplo real, logrado en laboratorio, sobre una aplicación simultánea de una trampa y una pinza, se presenta el video 2.

con luz, para llevarlos a otra zona, donde al descongelarse obtenían más energía y así se podían estudiar el cambio en sus estados (López, et al., 2001). También se han construido trampas ópticas mediante técnicas de holografía computarizada, logrando actuar como un conjunto de trampa tridimensionales para objetos pequeños. Esto es muy útil para modelar la cristalización de partículas coloidales y, en general, para modificar las transiciones de fase y la

Video 2. Experimento en laboratorio de atrapamiento óptico y pinzas ópticas. Al inicio se muestran a seis micropartículas de sílice (óxido de silicio) previamente atrapadas, empleando simultáneamente seis trampas individuales, bajo una configuración pentagonal, y con una de ellas en el centro. Alrededor de esa configuración se observan otras micropartículas que no se encuentran atrapadas, incluso se observa una de ellas muy cerca de la configuración. Después de ese inicio, en segundos posteriores, el conjunto de trampas se mueve simultáneamente en el espacio, incluso lo alejamos de aquella micropartícula no atrapada, con lo cual ahora nos encontramos con el concepto de pinza óptica, ya que estamos moviendo espacialmente a las seis micropartículas. Casi al final de esta breve demostración, se detiene el movimiento de traslación del conjunto de micropartículas, con lo cual dejamos el concepto de pinza óptica y volvemos al concepto de trampa óptica, en el cual, las micropartículas están “ancladas” de nuevo en el espacio.



Las trampas ópticas permiten retener tanto a partículas inorgánicas (por ejemplo, microesferas de sílice), como a partículas orgánicas (por ejemplo, células y bacterias). En 1994 se logró demostrar que se podían atrapar nanopartículas metálicas con un láser especial. Pero también son útiles en situaciones en las que se busque el atrapamiento de átomos, esto porque con la pura presión de radiación ya es suficiente para desplazarlos. En este último caso, el experimento consistió en detectar átomos de Cesio-133, usando una trampa óptica para mantenerlos en una zona de enfriamiento (hasta congelarlos); después se hacían levitar

dinámica de dichas dispersiones (Grier y Roichman, 2006).

En cambio, las pinzas ópticas han brillado en el campo de la biofísica. La manipulación de micromoléculas individuales con pinzas ópticas permite estudiar sus propiedades físicas y químicas, así como la función biológica en células. Se ha logrado manipular un motor molecular, y hasta desdoblar una cadena de ADN (Ritort, 2018). Experimentos como los mencionados requieren de una extrema precisión. Solo la luz aplicada como herramienta para manipular objetos es capaz de realizar tal hazaña.

No se puede decir que un mecanismo es mejor que otro, que sea emplee una trampa o una pinza dependerá de la aplicación o estudio. El desarrollo de ambos conceptos ha logrado llevarnos a manipular moléculas, medir fuerzas y distancias en la escala nanométrica, entre muchas otras aplicaciones microscópicas. Aumentar la precisión que se tiene, al estudiar lo más fundamental de la naturaleza, nos permite ampliar nuestro conocimiento.

Referencias

- ❖ Ashkin, A. (2006). *Optical Trapping and Manipulation of Neutral Particles Using Lasers. A Reprint Volume with Commentaries*. World Scientific Publishing Company. <https://doi.org/10.1142/4208>
- ❖ Chu, S. (2020). *Arthur Ashkin (1922–2020)*. *Nature*, 588, 29. <https://doi.org/10.1038/d41586-020-03380-4>
- ❖ Cubillos, X. C. M. (2014). *Velas solares, el futuro de la navegación espacial* [Conferencia]. III Congreso Argentino de Ingeniería Aeronáutica (CAIA 3), La Plata. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/55550>
- ❖ Ford, A. L., Fredman, R., y Young, H. D. (2018). *Física universitaria con física moderna 1*. Pearson Educación.
- ❖ Grier, D. G., y Roichman, Y. (2006). Holographic optical trapping. *Applied optics*, 45(5), 880-887. <https://doi.org/10.1364/AO.45.000880>
- ❖ Lab. de Óptica Aplicada, Facultad de Física, uv. (2021). *Simulación de Trampa y Pinza Óptica* [Video]. YouTube. <https://youtu.be/D7GxBNIRsgs>
- ❖ López, M., Domínguez, I., López, S., Eduardo de Carlos, L., y Reyes, H. R. (2001). Manipulación de átomos con luz y sus aplicaciones en Metrología. *Superficies y vacío*, (13), 97-104. <https://www.redalyc.org/pdf/942/94201324.pdf>
- ❖ Neuman, K., y Block, S. (2004). Optical trapping. *Review of Scientific Instruments*, 75(9), 2787-2809. <https://doi.org/10.1063/1.1785844>
- ❖ Ququ. (2007). *Generic Optical Tweezer Diagram* [Imagen]. Wikimedia Commons. <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2434867>
- ❖ Ritort, F. (2018). Pinzas ópticas y su aplicación a sistemas biológicos. *Revista Española de Física*, 32(4), 39-42. <https://cutt.ly/7KZdjcb>
- ❖ Serway, R. A. Jewett, J. W., y Cervantes González, S. R. (Eds.). (2015). *Física para ciencias e ingeniería* (9.ª ed., vol. 2). Cengage Learning.

Material de interés

- ❖ Ashkin, A. (1970). Acceleration and Trapping of Particles by Radiation Pressure. *Physical Review Letters*, 24(4), 156-159. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.24.156>
- ❖ Bhattacharya, M., y Vamivakas, N. (2018). *Optical Tweezers Give Scientists a Tool to Test the Laws of Quantum Mechanics*. Smithsonian Magazine. <https://cutt.ly/fKZkrji>
- ❖ Cervantes, A. (2003). *Pinzas Ópticas: Teoría y Aplicaciones* [Tesis de licenciatura, Universidad de Sonora]. CRIS-UNISON. Sistema de Gestión de la Investigación. <http://148.225.114.121/handle/unison/3141>

- ❖ Ditmire, T., Zweiback, J., Yanovsky, V., Cowan, T. E., Hays, G., y Wharton, K. B. (1999). Nuclear fusion from explosions of femtosecond laser-heated deuterium clusters. *Nature*, 398, 489-492. <https://doi.org/10.1038/19037>
- ❖ McMahan, D. (2006). *Relativity Demystified*. McGraw-Hill.
- ❖ Urban, A. S., Carretero-Palacios, S., Lutich, A. A., Lohmüller, T., Feldmann, J., y Jäckel, F. (2014). Optical trapping and manipulation of plasmonic nanoparticles: fundamentals, applications, and perspectives. *Nanoscale*, 6(9), 4458-4474. <https://doi.org/10.1039/C3NR06617G>
- ❖ Yavuz, D. D., Kulatunga, P. B., Urban, E., Johnson, T. A., Proite, N., Henage, T., y Saffman, M. (2006). Fast Ground State Manipulation of Neutral Atoms in Microscopic Artículo “Optical Traps”. *Physical Review Letters*, 96, 063001 <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.96.063001>