

**PINZAS ÓPTICAS Y PULSOS ÓPTICOS
ULTRACORTOS: UN NOBEL BIEN MERECIDO**

**OPTICAL CLIPS AND OPTICAL ULTRA SHORT
PULSES: A WELL DESERVED NOBEL**

(Diciembre de 2018)

Este año, como varias veces en los últimos 20 años (1997, 2001, 2005, 2009, por citar algunos¹), el Premio Nobel de Física fue concedido a investigadores cuyo trabajo ha estado directa o indirectamente relacionado con la óptica. El 2 de octubre, la Academia Sueca anunció que se otorgó “por inventos pioneros en el campo de la física láser”. La mitad a Arthur Ashkin “por las pinzas ópticas y su aplicación a los sistemas biológicos” y la otra mitad conjuntamente a Gérard Mourou y Donna Strickland “por su método de generar pulsos ópticos ultra cortos de alta intensidad”. Pero ¿qué son las pinzas ópticas y que son los pulsos ópticos ultracortos?, ¿Por qué trabajos en estas áreas son merecedores de un Premio Nobel?

LAS PINZAS ÓPTICAS son dispositivos que utilizando luz láser son capaces de desplazar, atrapar y separar, sin necesidad de contacto físico, partículas de tamaño muy pequeño, del orden de micrómetro. Su funcionamiento se basa en el principio de conservación del momento, uno de los principios básicos de la mecánica clásica. Todos los jugadores de billar saben que, bajo ciertas condiciones, si una bola viaja con una determinada velocidad, y choca de frente con otra, inicialmente en reposo, esta última adquirirá el momento y la dirección de la primera. A comienzos del siglo XX, los trabajos de Einstein[1] y Planck[2] sobre el efecto fotoeléctrico, llevaron a asociarle a la luz, un

¹1997- Steven Chu- Claude Cohen Tannoudjii, William Phillips ‘por el desarrollo de métodos para enfriar y atrapar átomos con luz láser’. 2001- Eric Allin Cornell, Wolfgang Ketterle ‘por conseguir la condensación de Bose-Einstein en gases diluidos de átomos alcalinos y por sus tempranos y fundamentales estudios de la coherencia óptica’. 2005- Roy J. Glauber ‘por su contribución a la teoría cuántica de la coherencia óptica’ y John L. Hall, Theodor W. Hänsch ‘por sus contribuciones al desarrollo de espectroscopia de precisión basadas en láseres, incluyendo la técnica del peine de frecuencias ópticas’. 2009- Charles K. Kao ‘por sus logros pioneros sobre la transmisión de la luz a través de fibras para comunicación óptica’.

comportamiento corpuscular similar al de las partículas materiales: en su interacción con ellas, la luz ejerce lo que se conoce como presión de radiación y puede entonces transferirles su momento. Esta capacidad de la luz, de mover objetos materiales, no fue posible observarla sino con la invención del láser en 1960, gracias a que una de sus características principales es concentrar en un área muy pequeña una gran intensidad de luz. A mediados de los años 80, el hoy ganador del Premio Nobel y su colaborador Steven Chu (premio Nobel 1997) desarrollaron lo que conocemos como pinzas ópticas, una “trampa óptica” muy estable, que permite atrapar firmemente una partícula utilizando un solo haz de luz[3]. Con la ayuda de un lente objetivo de microscopio, un haz de luz láser se concentra en una región muy pequeña produciendo una variación muy alta de intensidad en la dirección de propagación del láser. Como consecuencia se produce una fuerza que atrae a las partículas hacia el centro del haz, donde la intensidad es máxima. Esta fuerza tiene magnitud suficiente como para equilibrar el peso de la partícula de modo que las partículas pueden ser atrapadas aun cuando el haz se dirija verticalmente hacia abajo. Una vez que la partícula está atrapada se puede manipular con mucha precisión, ya sea moviendo el haz de luz o la propia muestra que contiene a la partícula.

Según Volke, Ricárdez y Ramos[4], “la posibilidad de manipular muestras biológicas es sin duda una de las grandes aplicaciones de las pinzas ópticas que se convierten en herramienta clave en áreas como biofísica, biotecnología, medicina reproductiva y biología celular y molecular..Aseguran los autores que “también se usan en investigaciones básicas en óptica, para determinar las propiedades físicas de 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 de las aplicaciones más interesante, según los mismos autores, es el uso combinado 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.”

La lista de aplicaciones en que se utilizan las pinzas ópticas podría ser interminable. Sin embargo, no podría dejar de enumerar su utilización en el estudio del plegamiento de macromoléculas[5], de los motores moleculares[6] y de las propiedades mecánicas de diversos modelos de biomembranas así como de membranas celulares in vivo[7].

LOS PULSOS ÓPTICOS ULTRACORTOS: para producir pulsos de luz no se necesita, en principio, mucho más que superponer ondas continuas de diferentes frecuencias, garantizando que la relación de fase entre ellas sea constante. Para esto se utilizan láseres cuya cavidad resonante pueda soportar ondas de muchas frecuencias diferentes y la relación de fase constante se asegura mediante las técnicas de mode-locking. La duración del pulso es inversamente proporcional al rango de frecuencias superpuestas, entre más frecuencias diferentes se sumen, más corto será el pulso obtenido y su intensidad aumentará al ser más corto, pues se concentrará toda en un área menor. Los pulsos con duración de picosegundos ($1\text{ps} = 10^{-12}\text{s}$) o menos, se conocen como pulsos ultracortos y son de gran utilidad para estudiar fenómenos que se producen en esa misma escala de tiempo como por ejemplo el movimiento de electrones en sólidos y semiconductores, la fusión o vaporización de metales y algunas reacciones químicas y procesos

en plasmas. Adicionalmente, su propagación en medios materiales produce fenómenos no lineales tales como la dispersión cromática, el efecto Kerr y la dispersión Raman.

Lograr pulsos láser cada vez más cortos y por lo tanto más intensos fue todo un reto para los investigadores de los años 80. Uno de los principales problemas radicaba en que al alcanzar una cierta intensidad los pulsos de luz pueden dañar, por ablación, los elementos ópticos y los cristales del amplificador, destruyendo la cavidad donde se produce el láser. Una posible solución era aumentar el área del haz, manteniendo la potencia pero reduciendo la intensidad, pero esto implicaba aumentar el tamaño de toda la óptica (cristales, lentes, espejos). Esta técnica fue la utilizada en la construcción del láser NOVA[8], un láser de gran tamaño construido a comienzo de los años 80, que generaba pulsos de más de 20 teravatios con duración menor a 1 picosegundo.

En 1983, el Instituto de Óptica de la Universidad de Rochester, contaba con láseres de colorante de 100fs y láseres Nd: YAG de 30ps. Los láseres de colorante producían pulsos más cortos, pero el YAG podría dar más energía. En ese momento, la hoy galardonada Donna Strickland inició sus estudios doctorales con interés marcado por el fenómeno no lineal conocido como generación de armónicos para lo cual requería fuentes de luz ultra intensas. Como narra la doctora Strickland[9] “En la Conferencia de Fenómenos Ultrarápidos en 1984, se informó la compresión de pulsos de 100ps desde un oscilador Nd: YAG hasta 2ps. Se utilizó fibra óptica como medio no lineal. La fibra tenía un par de ventajas. La principal fue que la fibra era monomodal, por lo que todo el haz experimentó el mismo proceso no lineal de modulación de fase para aumentar el ancho de banda espectral de los pulsos. Las fibras resultaron tener una ventaja adicional, ya que la dispersión de velocidad de grupo aumenta la duración del pulso, de modo que las frecuencias varían casi linealmente en el tiempo a lo largo del pulso. Esto permite una buena compresión utilizando un par de rejillas paralelas. Después de la conferencia, el profesor Mourou me dijo que mi proyecto debería cambiar, pues si bien el camino correcto para obtener pulsos ultracortos era el reportado

en la conferencia, deberíamos colocar un amplificador antes de la rejilla compresora”.

Strickland y Mourou [10] crearon en 1985 una técnica para producción de pulsos ultracortos basada en la compresión y amplificación de pulsos ópticos. Con ella fue posible producir pulsos de picosegundos con energías del orden del milijulio. Esta técnica, llamada CPA (chirped pulse amplification), no destruía el material que actúa como amplificador de la señal láser, como técnicas anteriores. La técnica CPA fue desarrollada en la tesis doctoral de Strickland; la figura 1 [11] muestra un esquema de su funcionamiento. En primer lugar se producen pulsos láser ultracortos, que son ensanchados separando las diferentes frecuencias mediante un prisma para que recorran caminos diversos lo que produce un retraso temporal entre ellas (chirp). Luego el pulso así ensanchado se amplifica en un material adecuado hasta lograr potencias que no estropeen los sistemas ópticos para finalmente comprimirlo de nuevo recuperando el ancho inicial del pulso y manteniendo su potencia.

Poco después del desarrollo de CPA fue posible generar pulsos de picosegundos con potencias de teravatios. Actualmente se producen pulsos de femtosegundos y potencias de petavatios (10^{15} vatios) y ha

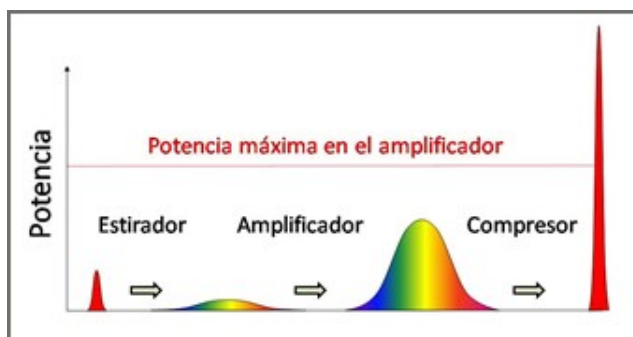


FIGURA 1. Esquema de CPA. [Crédito: Karan Jani / Georgia Tech] (tomada de 12. <https://www.catalunyavanguardista.com/las-herramientas-de-luz-se-llevaran-el-nobel-de-fisica-2018/>)

sido posible producir pulsos de attosegundos (10^{-18} s).

En la actualidad los pulsos ultracortos tienen múltiples aplicaciones: Además de utilizarse en cirugías que han permitido operar a millones de personas que sufrían miopía o cataratas. es posible, por ejemplo, la producción de nanopartículas, que se logra como resultado del impacto de estos pulsos sobre determinados materiales. Las de plata, se utilizan en diferentes productos por sus propiedades antibacterianas. También se utilizan en la fabricación de microchips, pues permiten controlan finamente el espesor del metal y de las capas de semiconductor durante el proceso mismo de producción. Igualmente el estudio de la dinámica de los electrones en los superconductores permite diseñar mejores circuitos optoelectrónicos para el procesamiento ultrarápido de señales y su utilización en veloces computadores. Su utilización se extiende a campos tan disímiles como el procesamiento de desechos nucleares, el desarrollo de nuevas técnicas para imagenología médica, el tratamiento de tumores, la limpieza de los millones de minúsculos desechos en la órbita terrestre y varias aplicaciones en arqueología.

Referencias

- [1] A. Einstein, *Annalen der Physik*, **17** (1905), 132. Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt (Sobre un punto de vista heurístico concerniente a la producción y transformación de la luz).
- [2] M. Planck, *Annalen der Physik*, **4** (1901), 561. On the law of distribution of energy in the normal spectrum.
- [3] A. Ashkin, J.M. Dziedzic, J.E. Bjorkholm, Steven C. *Optics Letters*, **11** (1986), 288. Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles.
- [4] <https://www.amc.edu.mx/revistaciencia/images/revista/58.4/PDF/05-465-18-25.pdf>
- [5] C. Bustamante, Z. Bryant, S.B. Smith, *Nature*, **421** (2003), 423. Ten years of tension: single-molecule DNA mechanics.
- [6] F.M. Fazal and S.M. Block, *Nat. Photonics*, **5** (2011), 318. Optical tweezers study life under tension.
- [7] S. Wurlitzer, C. Lautz, M. Liley, C. Duschl, Th.M. Fischer, *J. Phys.*

Chem. B, **105** (2001), 182. Micromanipulation of langmuir monolayers with optical tweezers.

- [8] [https://en.wikipedia.org/wiki/Nova_\(laser\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Nova_(laser))
- [9] D. Strickland, *ICO Newsletter*, **85** (2010). Chirped pulse amplification turns 25.
- [10] D. Strickland and G. Mourou, *Optics Communications*, **56** (1985), 219. Compression of amplified chirped optical pulses.
- [11] <https://www.catalunyavanguardista.com/las-herramientas-de-luz-se-llevan-el-nobel-de-fisica-2018/>

Catalina Ramírez G.

*Profesora pensionada
Universidad Nacional de Colombia
Departamento de Física*