

# Los premios Nobel de Física 2018: Pinzas de luz y pulsos lumino

Alejandro Ramírez Solís y W. Luis Mochán Backal

**E** Dr. Alejandro Ramírez Solís del Centro de Investigación en Ciencias-ICBA de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos y el Dr. W. Luis Mochán Backal del Instituto de Ciencias Físicas de la UNAM son miembros de la Academia de Ciencias de Morelos (ACMor). Esta publicación ha sido revisada por el comité editorial de la ACMor.

Como cada año, la Real Academia de Ciencias de Suecia ha anunciado a los ganadores del Premio Nobel por contribuciones en diferentes áreas de ciencias y humanidades. El martes 2 de octubre el galardón en el área de física fue otorgado a Donna Strickland de Canadá, Arthur Ashkin de los Estados Unidos de América y a Gérard Mourou de Francia por "desarrollos extraordinarios en el uso del LÁSER" (ver referencia [1]). Los trabajos por los cuales se les otorga el premio Nobel este año han revolucionado la física de los láseres. Gracias a éstos es posible observar con mucha precisión objetos extremadamente pequeños y también seguir procesos extraordinariamente rápidos, lo que ha generado una nueva perspectiva de la realidad. Gracias a estos avances, ahora contamos con instrumentos muy avanzados de precisión, los cuales abren una multitud de áreas de investigación básica, así como de aplicaciones tecnológicas industriales y médicas.

## ¿Qué es y cómo funciona un láser?

LASER son las siglas en inglés de "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation" que significa "amplificación de luz por emisión estimulada de radiación" y que ha sido castellanizado como láser, término aprobado por la Real Academia de la Lengua Española. Los láseres típicamente están formados por un medio activo muchos de cuyos electrones se hallan excitados tras haber absorbido energía mediante procesos eléctricos u ópticos. Cuando alguno de dichos electrones regresa a su estado base, no excitado, emiten un cuanto de luz, un fotón, con un color y una frecuencia que corresponden a su energía de excitación. Éste es el fenómeno de *emisión espontánea*. Algunos de estos fotones son atrapados en una cavidad formada por un par de espejos, uno frente al otro, en los cuales rebotan, una y otra vez, pasando repetidamente a través del medio activo entre una y otra reflexión. Estos fotones interactúan con los electrones excita-

dos y estimulan su subsecuente decaimiento al estado base, con la consecuente emisión de más fotones idénticos a los iniciales y que también quedan atrapados entre los dos espejos. Este es el fenómeno de *emisión estimulada*, que da origen al acrónimo *láser*. El proceso se repite, acumulándose en la cavidad abundante energía luminosa. Si uno de los espejos permite que una pequeña fracción de la luz escape, por el mismo emerge un haz de luz láser con propiedades únicas: extremadamente *coherente*, colimado, brillante, etc. Entre sus aplicaciones se hallan los modestos *apuntadores* que podemos comprar en una papelería, la formación de *hologramas*, que son una especie de fotografías que capturan imágenes tridimensionales, se usan en las impresoras para nuestras computadoras y para transmitir nuestras conversaciones telefónicas, los datos de nuestras computadoras y las imágenes que despliegan las pantallas de nuestras televisiones. En algunos láseres los espejos de la cavidad son totalmente reflectantes hasta que la intensidad se vuelve tan grande que uno de ellos sufre un cambio dramático y se vuelve transparente, dejando escapar un corto pulso de luz antes de volver a reflejante de nuevo. La potencia en estos pulsos (su energía dividida entre su duración) es tan alta que pueden ser usados en microcirugías y para cortar placas de acero.

El premio Nobel de física 2018 reconoció un trabajo de investigación que permitió emplear luz para manipular remotamente pequeños objetos, lo cual ha sido de mucha utilidad en biología, al permitir el manejo de células, virus, proteínas, y moléculas de ADN sin dañarlas. También honró una serie de trabajos que permitieron amplificar y compactar pulsos láser hasta volverlos ultracortos y ultraintensos.

## Pinzas ópticas: moviendo objetos y atrapando bacterias con luz

Arthur Ashkin, uno de los científicos premiados, inventó las primeras *pinzas ópticas* que permiten sujetar y manipular átomos, moléculas, virus y células con dedos de luz láser. Esta nueva herramienta permitió a Ashkin realizar el viejo sueño de la ciencia ficción: usar la *presión de radiación* de la luz para mover objetos físicos. En 1961, Ashkin fue el primero en darse cuenta que un láser sería la herramienta perfecta para mover partículas pequeñas, así que iluminó esferas transparentes de pocas micras (milésimas de un milímetro) e inmediatamente logró moverlas a su antojo. Se

sorprendió al ver que las esferas eran atraídas hacia el centro del haz del láser, justo donde es más intenso, y que enfocando el haz podía tanto empujar como jalar a las esferas.

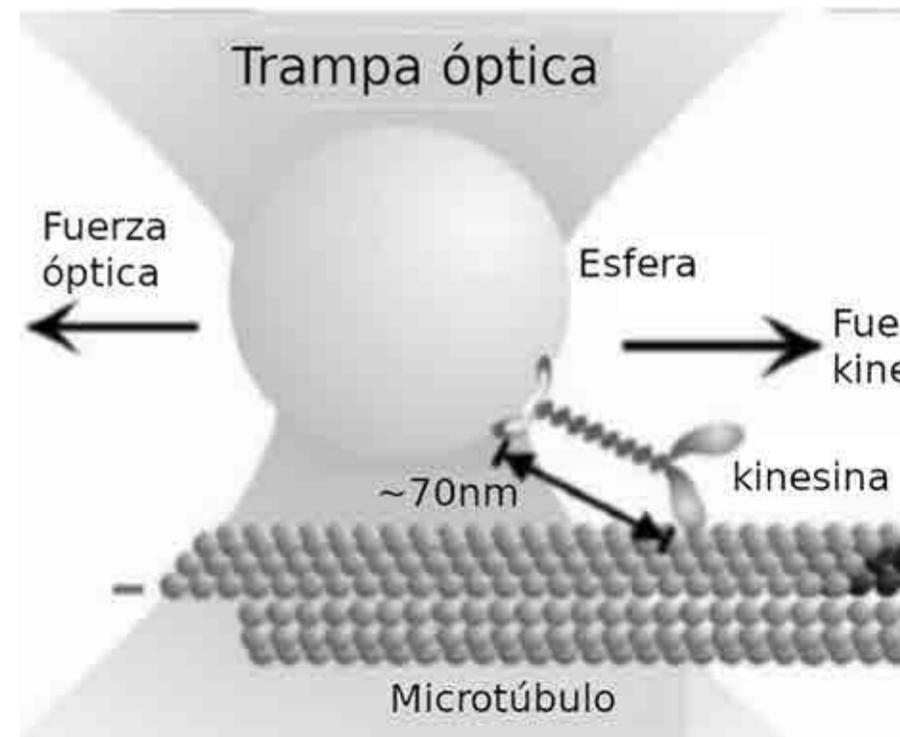
Para entender esta atracción, observe la Figura 1, la cual ilustra cómo un haz de luz formado por muchos rayos, incide sobre una esfera transparente y se refracta al atravesarla. Dado que el centro del haz incidente es más intenso que su periferia, la figura muestra una mayor concentración de rayos ahí. Al entrar a la esfera y al salir de ella cada rayo es desviado de acuerdo a la *ley de la refracción*, acercándose a la dirección normal a la superficie al entrar y alejándose de la misma al salir. Notamos que, si el centro del haz apunta hacia el centro de la esfera, hay el mismo número de rayos desviados hacia arriba que hacia abajo, y por la misma cantidad. Si ahora la esfera se desplazara ligeramente hacia abajo, habría más rayos desviados hacia abajo que hacia arriba. La ley de conservación del ímpetu implica que, si la luz adquiere *ímpetu* hacia abajo, la esfera, responsable de desviar la luz, debe adquirir un ímpetu hacia arriba, proporcionado por una fuerza correspondiente. Por tanto, una esfera que se desvíe hacia abajo sentirá una fuerza hacia arriba y, análogamente, una esfera que se desvíe hacia arriba sentirá una fuerza hacia abajo. El resultado es que no importando hacia dónde se mueva, habrá una fuerza que la regrese hacia el centro del haz.

los vendedores de electrodomésticos para presumir la capacidad de sus aspiradoras. Posteriormente en 1987, Ashkin logró capturar bacterias con sus pinzas ópticas y mantenerlas atrapadas y vivas por largos

de microtúbulos en una célula [3].

## Pulsos de luz

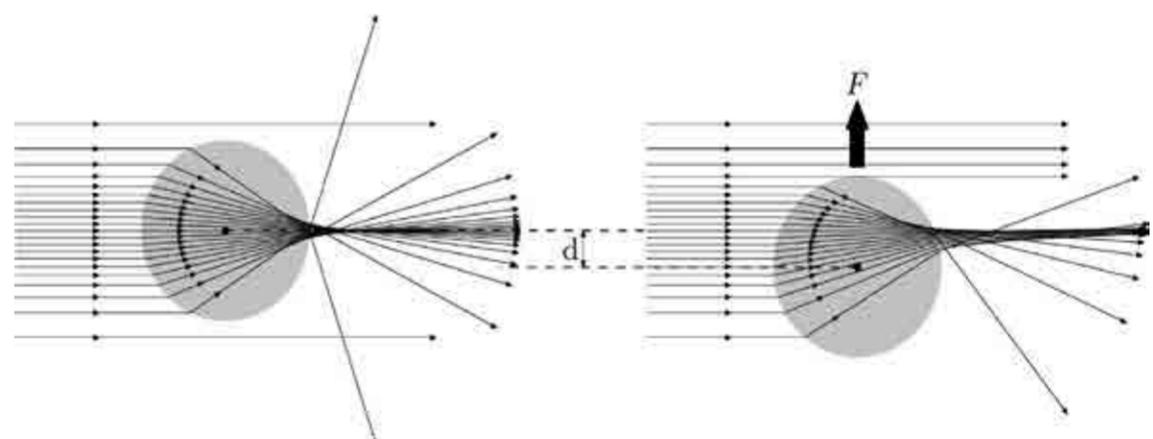
Por otro lado, Gérard Mourou y Donna Strickland realizaron las primeras investigaciones básicas



**Figura 2: Ejemplo de una aplicación de las pinzas ópticas. Una molécula de kinesina "camina" sobre un microtúbulo jalando a una pequeña esfera. Un haz luminoso enfocado cerca del centro de la esfera la jala en la dirección opuesta. Esto permite medir la fuerza con que cada molécula de kinesina contribuye al transporte de materiales a lo largo de microtúbulos en el interior de las células. Tomado de <http://bit.ly/2RzWMx>.**

periodos. Inmediatamente empezó a usar sus pinzas ópticas para estudiar una variedad de sistemas biológicos, con lo cual abrió la puerta a un nuevo mun-

do que posteriormente dieron lugar a los láseres pulsados amplificados. Estos láseres han permitido producir los pulsos de luz más cortos e intensos jamás creados



**Figura 1: Esfera transparente (con índice de refracción  $n=1.7$ ) iluminada por un haz gaussiano más intenso, y por tanto con mayor densidad de rayos, en su centro que en su orilla. Cada rayo se desvía al entrar y al salir de la esfera de acuerdo a la ley de la refracción. Del lado izquierdo el eje del haz incidente pasa por el centro de la esfera. Del lado derecho, el eje del haz incidente se halla a una distancia  $d$  por arriba del centro de la esfera, produciendo una fuerza  $F$  hacia arriba.**

Otra manera de explicar este resultado es recurriendo al concepto de *presión de radiación*, la cual es mayor en el centro del haz que en su periferia [2]. De esta forma, el haz mantiene a las partículas en el centro del haz láser de la misma forma que se puede hacer flotar un balón en el centro de un potente chorro de aire, como muestran en algunas tiendas

microscópico. Hoy en día, su invento es usado en todo el mundo para investigar a detalle tanto a microorganismos como a varias de las moléculas que los conforman. Por ejemplo, la Figura 2 ilustra una aplicación de las pinzas ópticas de Ashkin para medir la pequeñísima fuerza empleada por una molécula de la proteína kinesina para transportar material a lo largo

por el ser humano. Su artículo seminal fue publicado en 1985 y fue la base de la tesis doctoral de Donna Strickland bajo la dirección de su tutor, Gérard Mourou. Después de años de esfuerzos, usando un procedimiento complejo y muy ingenioso, lograron crear pulsos ultra-cortos y ultra-intensos sin saturar ni destruir al amplificador. Primero, Strickland y Mourou lograron estirar los

## Los ultracortos

pulsos láser en el tiempo para reducir su potencia pico y así amplificarlos, para posteriormente comprimirlos de vuelta.

Es importante destacar que Donna Strickland es apenas la tercera mujer que es reconocida con el Premio Nobel de Física, antecedida sólo por Marie Curie (Maria Sklodowska) en 1903 y Maria Goeppert-Mayer en 1963.

Cuando un pulso de luz es comprimido, su duración y longitud se hacen más cortos. Entonces más energía luminosa es empaquetada por unidad de tiempo y distancia y su intensidad crece dramáticamente. Parecía imposible poder amplificar estos pulsos sin saturar y quemar al amplificador con pulsos extremadamente intensos. Strickland y Mourou desarrollaron una técnica denominada Amplificación de Pulsos Gorjeados (o CPA por las siglas en inglés: *Chirped Pulse Amplification*) y que rápidamente se volvió el estándar para el desarrollo de todos los láseres de alta (109-1018 Watts/cm<sup>2</sup>) y ultra-alta intensidad (hasta 1025 Watts/cm<sup>2</sup>) [3]. Las aplicaciones industriales y médicas son muy numerosas. Entre ellas destacan las aplicaciones quirúrgicas y su uso en millones de cirugías correctivas de la visión en todo el planeta cada año.

### Carreras de relevos con fotones

Podemos entender el método CPA recurriendo a una analogía. Imagine una carrera de relevos normal en la que cada vez que un corredor da una vuelta completa a la pista, es reemplazado por un compañero que toma su lugar. Ahora imagine una carrera de relevos modificada, en la que cada vez que un corredor alcanza la meta intermedia, un compañero de su equipo se suma a la carrera, pero el corredor original sigue *corriendo*. En esta curiosa carrera, cada vez habría más corredores en la pista y el grupo de corredores sería *amplificado* cada vuelta, multiplicando su número por dos. Imagine ahora que, en lugar de entrar un corredor nuevo, cada vuelta entran nueve corredores nuevos. En este caso, la amplificación sería mayor y el número de corredores se multiplicaría por diez en cada vuelta. Imagine ahora que, casualmente, la velocidad con que corre cada competidor es exactamente la misma. En este caso, el grupo de corredores se mantendría tan compacto como al inicio de la competencia, todos terminarían cada vuelta casi al mismo tiempo y sería necesario incorporar a la pista casi simultáneamente a un enorme y creciente número de atletas, lo cual sería muy difícil pues no habría cómo introducir en tan corto tiempo un número

tan grande de nuevos competidores. Quizás esta carrera suena descabellada, pero si cambia *corredores* por *fotones*, lo descrito arriba corresponde al funcionamiento de un *amplificador óptico*, al que se bombea energía que se convierte en fotones que multiplican a los fotones que atraviesan al dispositivo, todos los cuales viajan juntos a la velocidad de la luz en el vacío  $c$  (alrededor

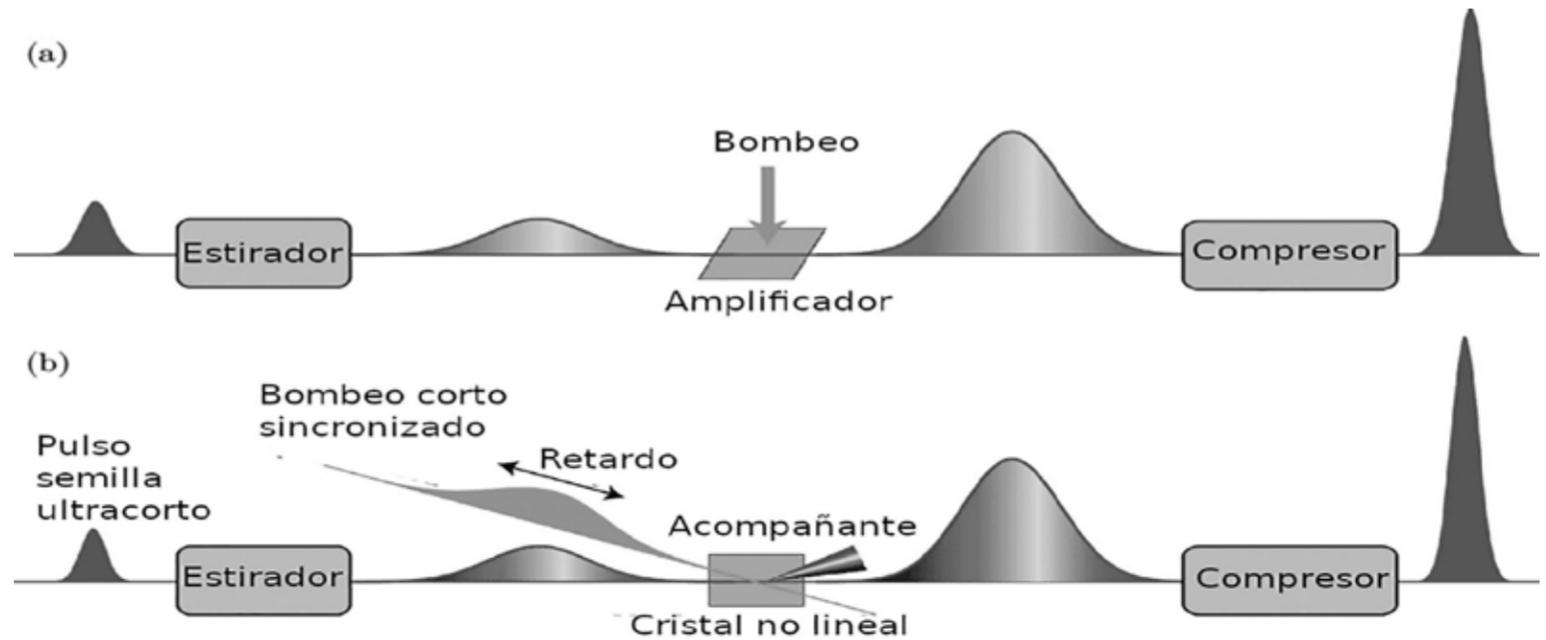
no sería difícil, pues gracias a su larga duración, no requeriría una gran *intensidad*).

### De pulsos de luz y canto de aves

La luz es una onda *electromagnética* cuya frecuencia corresponde al color, así como la frecuencia de una onda de sonido corresponde a su tono. Al color rojo corresponde una frecuencia relativamente

drio, sus componentes de distintos colores emergen en distintas direcciones, siendo la luz roja la que menos se desvía de su dirección original y la luz azul la que más. Esta separación permite enviar la luz de distintos colores a lo largo de distintos recorridos, los cuales pueden reunirse de nuevo con un prisma similar colocado al revés. Algo similar puede hacerse con *rejillas de difracción*. Este

glas en inglés), técnica que usa choques entre fotones en un medio no lineal para aumentar el rango de frecuencias presente en el pulso expandido, lo cual permite comprimirlo aún más que el pulso original. Con estas técnicas es ahora posible usar láseres pulsados de ultra-alta potencia que tienen aplicaciones tanto civiles como, desafortunadamente, militares.



**Figura 3: (a) Principio de la Amplificación de Pulsos Gorjeados (*chirped pulse amplification*, CPA): para evitar daños al amplificador los pulsos semilla obtenidos de un láser son primero estirados hasta centenas de picosegundos desde unos cuantos femtosegundos, luego son amplificados y finalmente son comprimidos. (b) Principio de amplificación mediante oscilador paramétrico de pulsos gorjeados (*optical parametric chirped pulse amplification*, OPCPA): un pulso ultracorto proveniente de un láser se estira hasta que su duración coincide con la de un potente pulso de bombeo (corto, pero no ultracorto) con el que se mezcla, produciendo un haz muy intenso con un ancho de banda mucho mayor que el pulso ultracorto original y emitiendo fotones acompañantes en otras direcciones. Luego, este haz se comprime dando origen a un pulso mucho más intenso y corto que el pulso original. Tomado de <http://bit.ly/2y4DrSz>.**

de 300,000km/s). La multiplicación de un pulso ultra-corto no podría ser muy grande pues no tendríamos un mecanismo capaz de bombear la energía necesaria en el poco tiempo que tardaría en pasar el pulso por el amplificador, además de que una alta intensidad luminosa podría quemar al mismo.

Sin embargo, regresando a nuestra analogía, imagine que cada equipo de competidores usa un uniforme de otro color y que los que usan pantaloncillo rojo son los más rápidos, seguidos por los de pantaloncillo naranja, que le ganan a los amarillos, éstos a los verdes, y los más lentos son los azules. Mientras más rojos, más rápidos y mientras más azules, más lentos. En este caso, el contingente de corredores formaría un grupo cada vez más largo y *diluido*, con unos cuantos rojos a la cabeza y unos pocos azules en la retaguardia, por lo que sería muy fácil multiplicarlo. Regresando a la óptica, resulta que cuando la luz atraviesa un pedazo de vidrio, disminuye su velocidad, pero la luz azul la disminuye más que la luz roja. De esta forma, si propagamos un pulso ultra-corto de luz a lo largo de una larga fibra óptica, se convertirá en un pulso largo en cuyo frente habrá luz roja y en cuya retaguardia habrá luz azul. Amplificar este pulso

baja, como a los sonidos graves, y al color azul corresponde una frecuencia relativamente alta, como a los sonidos *agudos*. Un pulso luminoso que pasa del rojo al azul es análogo a una onda de sonido que pasa de grave a agudo, como los gorjeos de muchos pájaros. Por eso, esta clase de pulsos que son análogos a los cantos de las aves se denominan *pulsos gorjeados* (*chirped pulses* en inglés).

Como vimos arriba, la energía de un pulso ultracorto puede amplificarse mucho, siempre y cuando primero lo convirtamos en un pulso gorjeado. El problema es que el pulso gorjeado deja de ser ultracorto y aunque lleva mucha energía, no es muy intenso, pues al dispersarse en sus componentes de color, se alarga. Regresando a la analogía de la carrera, el contingente de corredores forma un grupo extendido con el equipo de corredores rápidos (los rojos) a la cabeza, y el de los lentos (los azules) atrás. ¿Cómo podríamos compactarlo de nuevo? Hay una forma simple, si a los que van al frente los forzamos a recorrer un camino largo y a los que van atrás los enviamos por una ruta más corta, de forma que todos los corredores lleguen simultáneamente al entronque en que los caminos se vuelvan a juntar. Recordemos que cuando la luz blanca atraviesa un prisma de vi-

dispositivo formado por algunos espejos y rejillas o prismas es llamado un compresor óptico.

### Implementación y aplicaciones

En un sistema CPA se generan pulsos láser "semilla" en un oscilador ultrarrápido de un tipo llamado en inglés *Kerr mode-locked*, los cuales tienen una duración de algunos femtosegundos ( $1\text{fs}=0.000000000000001\text{s}$  = una milésima de millonésima de millonésima de segundo). Luego se estira miles de veces hasta formar un pulso gorjeado con una duración de algunas decenas o centenas de picosegundos ( $1\text{ps}=1000\text{fs}=0.000000000001\text{s}$  = una millonésima de millonésima de segundo) reduciendo su intensidad en la proporción inversa. A continuación, se amplifican entre 5000 y 10000 veces en un cristal que ha almacenado la energía con que ha sido bombeado y que, al ser estimulado por otros fotones que lo atraviesan, la convierte en luz. Finalmente, los pulsos amplificados se vuelven a comprimir a su longitud original dando origen a un pulso ultracorto y ultra-intenso. La Figura 3 muestra esquemáticamente este proceso, así como el de Amplificación Óptica Paramétrica de Pulsos Gorjeados (OPCPA por sus si-

Las aplicaciones de la técnica CPA permiten analizar con detalles sin precedentes procesos moleculares que ocurren en tiempos ultracortos, del orden de femtosegundos como son las reacciones químicas, colisiones átomo-átomo, átomo-molécula y molécula-molécula. De esta forma tenemos ahora herramientas que nos permiten literalmente ver la ruptura y formación de enlaces químicos [6]. Se recomienda al lector acceder al video del Prof. Ahmed Zewail, ganador del Premio Nobel de Química 1999 por sus estudios de reacciones químicas usando los láseres CPA con resolución de femtosegundos [7].

### Referencias

- [1] <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2018/press-release/>
- [2] <https://www.nobelprize.org/uploads/2018/10/popular-physicsprize2018.pdf>
- [3] [https://es.wikipedia.org/wiki/Pinza\\_%C3%B3ptica](https://es.wikipedia.org/wiki/Pinza_%C3%B3ptica)
- [4] [https://en.wikipedia.org/wiki/Chirped\\_pulse\\_amplification](https://en.wikipedia.org/wiki/Chirped_pulse_amplification)
- [5] [https://www.youtube.com/watch?v=n\\_uJxSzhInc](https://www.youtube.com/watch?v=n_uJxSzhInc)
- [6] <https://en.wikipedia.org/wiki/Femtochemistry>
- [7] <https://www.youtube.com/watch?v=6KJxlf-HI3E>