

---

## El Nobel de Física 2018: premio para el Láser

**Diego A. Roa Romero**

dieroa@uan.edu.co

Departamento de Física  
Universidad Antonio Nariño

### Resumen

**E**l premio Nobel de Física ha premiado la invención de dos técnicas basadas en láser que han sido utilizadas en muchas aplicaciones en ciencia, medicina e industria. Por un lado, las pinzas ópticas por Arthur Ashkin y por el otro

el método de Amplificación de Pulso Gorjeado por Gérard Mourou y Donna Strickland. No es la primera vez que un premio Nobel de Física es otorgado a un trabajo relacionado con el láser. El propio invento del láser fue en su momento un premio Nobel y hay al menos cinco premios Nobel que se relacionan directamente con este invento. En este texto se intenta explicar de manera conceptual cuál es la física alrededor del láser y las técnicas que fueron premiadas este año por la Academia Sueca de Ciencias.

Este año el premio Nobel de Física ha sido otorgado a tres ganadores. Las ideas que motivaron estos premios son muestra de un gran ingenio y giran alrededor de uno de los inventos de mayor impacto en el último siglo: el rayo láser.

La tecnología de los rayos láser fue desarrollada hacia la década de los años 1960, como una evolución del máser (Gordon, 1955), un dispositivo de micro-ondas que era descendiente de los aparatos de radio-frecuencia para radares. La idea del láser era conseguir ondas de luz con una única frecuencia, como ya era el caso de las ondas de radio. Desde esa época hasta nuestros días, los láseres han pasado de ser grandes montajes de laboratorio a pequeños dispositivos con múltiples aplicaciones en industria, medicina y la vida cotidiana. Por otro lado, cinco premios Nobel han sido otorgados por trabajos con una relación directa con el láser, sin contar muchos otros que han resultado de investigaciones que requieren de su aplicación.

El láser es una de esas ideas que aunque sencilla en su concepto, solo pudo ser concebida con el desarrollo de la óptica cuántica y requirió de cuidadosos experimentos para ser concretada (Schawlow, 1961). Demos pues un vistazo para saber en qué consiste y cómo se hace la luz láser.

### ¿Cómo funciona el láser?

Para entender un poco más a profundidad en qué consiste un láser, es necesario comprender algo de la naturaleza de la luz y su interacción con la materia. En ese caso se empiezan a pisar los terrenos de la mecánica cuántica, pero las ideas básicas son suficientes para comprender el concepto principal del fenómeno.

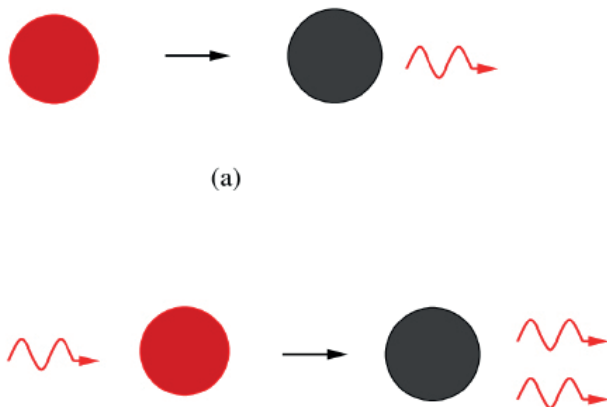
Desde el punto de vista de la física clásica, la luz es una onda electromagnética. Es decir, una perturbación que puede viajar en el espacio vacío y como a cualquier onda, a la luz se le pueden asociar propiedades como intensidad y frecuencia. En el caso de la luz visible cada frecuencia corresponde a un color en el espectro desde el rojo hasta el violeta (el mismo espectro

del arco-iris). Desde el punto de vista cuántico, la luz se puede imaginar como un flujo de partículas llamadas fotones. Estas partículas de luz, viajan por supuesto a la velocidad de la luz ( $c = 300.000$  kilómetros en un segundo) y su energía depende de la frecuencia de la onda asociada. En este momento puede surgir la pregunta “bueno, pero ¿acaso no estaba diciendo que la luz es una onda y ahora dice que es una partícula?”. La respuesta que se puede dar para intentar explicarlo es que los entes cuánticos poseen la dualidad de mostrar aspectos de onda en unos casos y de partícula en otros. Una forma de producir fotones es tomar los átomos y agregarles energía. Estos pueden almacenar esta energía y liberarla emitiendo un fotón. Los bombillos y cualquier dispositivo usado para iluminación utilizan este principio, tomando la energía eléctrica para excitar los átomos de un filamento en el caso de bombillas incandescentes, un gas en el caso de los bombillos de neón o un un semi-conductor en el caso de los LEDs. Estos átomos luego se encargan de producir la luz requerida.

Sin embargo, la luz que emiten estas fuentes es de alguna forma, “desorganizada”. Los fotones son emitidos en todas direcciones y en un

rango amplio de frecuencias. Al fin y al cabo la idea de las lámparas es iluminar un espacio amplio con luz blanca, la cual es la mezcla de todos los colores (frecuencias). Sin embargo, en muchas aplicaciones es deseable un haz de luz, donde todos los fotones tengan la misma energía (frecuencia) y viajen perfectamente organizados en la misma dirección. Ese es el concepto detrás del láser.

Para lograr ese grado de disciplina en objetos tan poco tangibles, tenemos que ir a la fuente y ver como hacer que un conjunto de átomos emitan fotones organizadamente. En los casos de las fuentes de luz ya mencionadas, se les proporciona energía a los átomos, estos se excitan y emiten luz cada uno de manera independiente y aleatoria. A este fenómeno se le conoce como emisión espontánea (ver Figura 1).

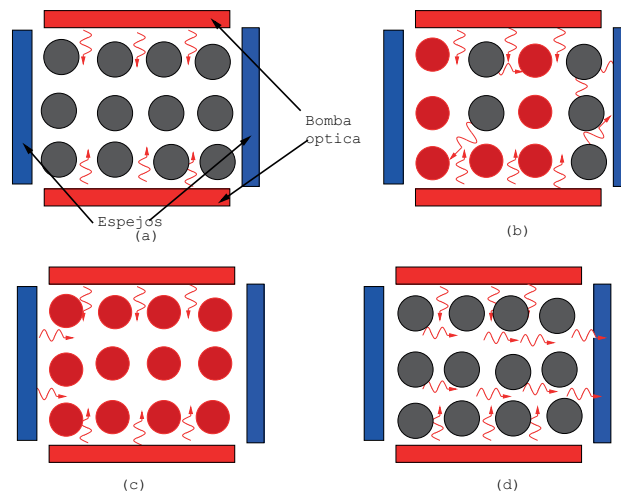


**Figura 1:** a) En la emisión espontánea, un átomo excitado emite un fotón, que puede ir en cualquier dirección. b) En la emisión inducida, el fotón es emitido por la presencia de otro fotón idéntico que bombardea al átomo excitado.

En el caso del láser ocurre un fenómeno paralelo a la emisión espontánea conocido como emisión estimulada (Figura 1). Cuando un átomo es excitado y luego se bombardea con un fotón de cierta energía particular, emite un fotón igual al fotón incidente. Entonces, si se tiene un conjunto grande de átomos, todos excitados de manera uniforme y se les aplica luz de cierta frecuencia, va a ocurrir la emisión del

mismo tipo de luz por parte de ellos. La buena noticia es que los fotones emitidos tendrán la misma frecuencia, dirección y demás características de aquellos que incidieron inicialmente. Por medio de un sistema de espejos se puede lograr que la luz emitida vuelva a incidir sobre los átomos y reforzar el efecto. Al final se tendrá un haz de luz de una única frecuencia que viaja en una dirección bien definida. Esto es un láser.

La palabra láser viene de la sigla en inglés para *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*. Entonces el sistema que produce el rayo láser consistirá de un material que contiene los átomos a excitar, conocido como “medio activo”, una “bomba óptica” o sistema que proporcione la energía para mantener los átomos excitados y conjunto de espejos para reforzar el efecto (Ver Figura 2). Actualmente los láseres se basan en este principio, cambiando las características de los componentes dependiendo de las necesidades de potencia y frecuencia de la luz. Existen así, gran variedad de láseres que permiten múltiples aplicaciones. El desarrollo de versiones distintas de láseres ha sido y es aún, un campo de investigación muy importante en física y que este año ha sido reconocido por el comité que otorga el Nobel. A continuación exploraremos estas ideas.



**Figura 2:** Emisión inducida en el láser: a) un medio activo se coloca en presencia de una bomba óptica. b) Los átomos del medio activo empiezan a emitir espontáneamente y parte de la luz se refleja en los espejos para inducir de nuevo sobre el medio activo. c) La luz reflejada incide sobre los átomos uniformemente excitados del medio activo. d) Esto induce una emisión inducida en conjunto.

### Abducción microbiana

La idea de que no estamos solos en el universo y que constantemente somos visitados por patrullas de naves provenientes de otros planetas ha tomado mucha fuerza en la cultura popular. Dentro de la narrativa asociada se encuentran los reportes de casos en los que animales y seres humanos son secuestrados por seres del espacio exterior para ser estudiados, con historias de terribles experimentos que incluyen incluso el uso de cuerpos humanos como huéspedes para procrear los seres de otros mundos. Alimentado por estas historias, el cine de ciencia-ficción ha hecho recurrente la escena de abducción. Es posible que para el lector sea familiar en que consiste. Una persona, quien va a ser secuestrada, se encuentra en el campo durante la noche. Aparece un platillo volador, el cual se detiene sobre la víctima, emite una luz enceguecedora, que es capaz de elevarla e introducirla dentro de la nave, es decir, un rayo que es capaz de atrapar cosas.

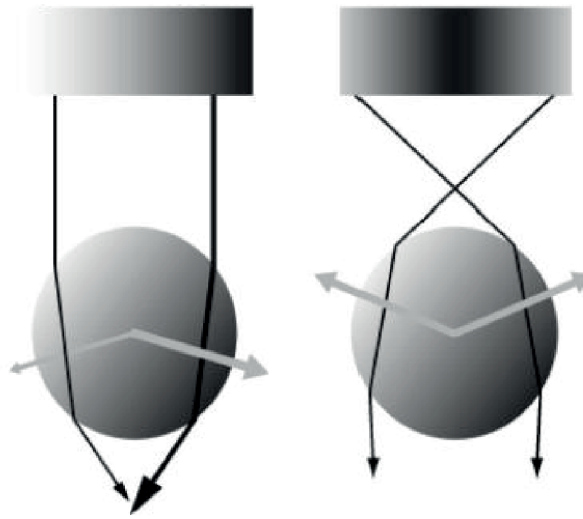
El profesor Arthur Ashkin, de los laboratorio Bell, fue el pionero en el uso de luz láser para atrapar objetos pequeños. Actualmente se conocen como trampas ópticas o pinzas ópticas. El principio básico es relativamente sencillo pero para ello hay que volver a la idea de la luz como un flujo de fotones. Se puede hacer entonces la analogía entre el flujo de fotones de un láser y el chorro de agua que sale de una manguera. Si usted se atraviesa al chorro de agua de una manguera de bomberos, éste imprime tal fuerza que incluso lo puede lanzar por el aire (esto método también es utilizado por los cuerpos anti-motines para interactuar con algunos grupos sociales inconformes, durante cierto tipo de protestas). De una manera similar la luz es capaz de transmitir presión, pero se necesitan otras escalas para que el efecto sea apreciable. Por ejemplo, hace ya tiempo, las agencias espaciales vienen trabajando en proyectos de propulsión de naves espaciales usando “velas solares”. Al igual que los barcos de vela, las estas naves, abrirían velas para ser propulsadas por la luz y viento solar y así surcar el espacio. Sin embargo, se necesitan superficies inmensas, con una relación de 1 m<sup>2</sup> para mover cada gramo de masa de la nave (Leipold, 1999).



En el ejemplo de las velas solares, la luz del sol cumple un papel análogo al viento sobre una cometa común. Las partículas de aire al golpear la cometa le transmiten una fuerza perpendicular a la superficie. Pero el viento puede ejercer fuerzas en otras formas, como por ejemplo en el caso del ala de un avión. La Figura 3 presenta el perfil del ala de un avión en movimiento al momento del despegue, cuando se necesita una mayor fuerza de sustentación (Dommath, 1961). La forma del ala causa un cambio sustancial en la trayectoria del viento. El viento en este caso es forzado a ir hacia abajo y esto, por ley de acción y reacción causa una fuerza adicional hacia arriba sobre el ala, la cual eleva más fácilmente el avión. En el caso de las pinzas ópticas, se utiliza un principio parecido, donde desviando la trayectoria de la luz, esta genera una fuerza en dirección contraria.



**Figura 3:** Perfiles del ala de un avión: a) Ala en posición de vuelo normal. b) En el momento del despegue, es necesario mayor fuerza ascensional, por lo que el perfil se deforma con el uso de los llamados flaps. En este caso, el ala desvía mayor cantidad de viento hacia abajo, aumentando la fuerza ascensional. Fuente: Ivao-mx (2010).



**Figura 4:** a) Un objeto transparente es colocado en presencia de un haz cuyo perfil es mostrado en la parte superior, siendo la parte más intensa la que corresponde al color más oscuro. Las flechas negras indican la trayectoria de la luz en el objeto y las grises pálidas las fuerzas inducidas sobre el objeto. b) El haz es enfocado para atrapar el objeto. Fuente: Neuman (2004).

Piense entonces en un objeto transparente que se introduce parcialmente en un haz de luz y actúa como una lente que la desvía, como se muestra en la Figura 4. La fuerza causada por esta desviación va a ser mayor en puntos donde la luz sea más intensa (donde el viento de fotones es más intenso). Entonces como muestra la figura, si se coloca una lente en presencia de un haz de luz que es más intenso en uno de sus lados, aparecerá una fuerza que apunta hacia ese lado. De esta forma el objeto es llevado en esa dirección, siendo atrapado.

Para tomar el objeto a modo de pinzas, se usa un haz de luz que sea enfocado hacia el centro del objeto, como se muestra en la parte derecha figura 4. La desviación de los rayos es hacia el centro de la lente (objeto a tomar por las pinzas) por lo que las fuerzas toman direcciones hacia arriba y hacia afuera, como se muestra en la figura, creando así, una verdadera trampa para el objeto.

**Gracias a este sencillo pero ingenioso invento, se ha podido atrapar con luz láser objetos muy pequeños.**

En algunos casos, aunque el principio es un poco diferente, se han utilizado para atrapar átomos y reducir su energía (enfriarlos). Esto ha abierto la posibilidad de utilizar esta técnica en el desarrollo de computadores cuánticos (Stuart, 2014).

Al final, el Dr. Ashkin optó por tomar con sus pinzas otro tipo de objetos: los sistemas biológicos. Con esto pudo manipular virus, bacterias y células humanas, llevando a la realidad la idea de los rayos que atrapan seres vivos para experimentar: abducción microbiana. La técnica ha tenido tanto éxito que incluso ha servido para medir magnitudes dinámicas como fuerzas y torques en organelos celulares. Y no solo ha tenido éxito a nivel científico. Actualmente existen empresas dedicadas a diseñar y fabricar este tipo de equipos para aplicaciones en investigación y en la industria.

A pesar de ser una idea sencilla en su principio, tiene mucha física detrás, por esta razón y por sus tantas aplicaciones,

el Dr. Ashkin, a sus 96 años, terminó siendo el hombre más viejo galardonado con el Premio Nobel de Física.

La otra mitad del Nobel se otorgó por el desarrollo de una técnica para lograr rayos láser de muy alta intensidad, como veremos a continuación.

### Estirando la luz

En la década de 1960-1970 se descubrió la forma de utilizar el fenómeno de emisión estimulada para producir láseres (Piña, 2015). Las aplicaciones que se podrían encontrar para esta tecnología eran muy diversas, pero para algunas de ellas eran necesarios láseres de luz muy intensa (actualmente se utilizan, por ejemplo, láseres para cortar láminas de metal y soldarlas). En el caso de la industria aeroespacial, se requiere de mucha precisión para cortar y soldar las láminas para las piezas de aviones y naves espaciales.

Además se necesita que el calor liberado en el proceso sea relativamente poco ya que esto puede afectar la pieza. Los láseres son herramientas apropiadas para este tipo de requerimientos, pero para lograrlo se ameritan potencias del orden de los kilowatts, la potencia concentrada de cientos de bombillos.

Si lo que se requiere es aumentar la intensidad de la luz, en este caso de la luz láser, es necesario producir más fotones y agregarlos en un solo haz. Un camino es producir emisión estimulada sobre un material, machacar el proceso una y otra vez hasta lograr la intensidad requerida (Ganiel, 1975). Esto suena más bien sencillo pero tiene un límite. La energía acumulada puede llegar a ser tan grande que puede calentar el medio activo y dañar el dispositivo. Gran problema.

La buena noticia es que se pueden aprovechar las propiedades de la luz en su faceta de onda para el propósito de lograr láseres más intensos. Las ondas tienen la propiedad de superposición, es decir dos o más de ellas pueden co-existir al mismo tiempo en el mismo punto, agrupándose en una onda que podemos llamar onda resultante. Es tan sencillo como el hecho que si el lector no alcanza a leer este artículo por que la habitación es mas bien oscura (suponiendo que éste esta impreso en papel), puede encender “otra luz”, para que la onda de la nueva fuente se superponga a la luz ya existente y se aumente la intensidad. Esto nos ilustra el comportamiento de la superposición, sin embargo, en el caso de los láseres es un tanto mas complejo.

Si se superponen ondas de diferentes frecuencias, se puede jugar con su forma, como se muestra en la Figura

**En los pulsos, cada componente contribuye con su intensidad a la intensidad total del pulso.**

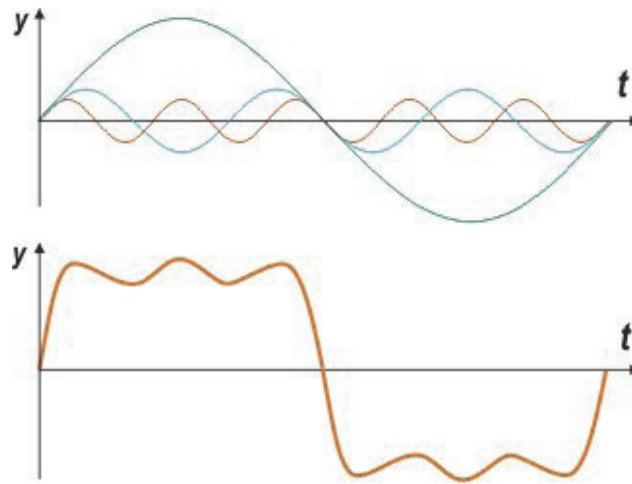


Figura 5. La superposición de ondas de distinta amplitud y frecuencia permite manipular la forma de la onda resultante. Fuente Cabrera (s.f.).

5. Si se combinan muchas ondas de diferentes frecuencias se pueden lograr pulsos, es decir, emisiones de luz de corta duración. El proceso inverso también es posible, generando pulsos de luz sin necesidad de inicialmente superponer otras ondas, estos se comportarán como la superposición de sus ondas componentes.

En los pulsos, cada componente contribuye con su intensidad a la intensidad total del pulso. Si la superposición agrupa mas componentes, o se le aumenta la intensidad a éstas, la intensidad del pulso resultante también aumentará.

Siguiendo este orden de ideas, se puede tomar un pulso, des-componerlo, aumentar la intensidad de cada parte para luego recomponerlo y así lograr una mayor intensidad. Esta es el concepto mas básico de la técnica descubierta por Gérard Mourou y Donna Strickland en la década de los ochenta y conocida actualmente como *amplificación de pulso gorjeado* -Chirped Pulse Amplification, CPA- (Tish, 2000).

Queda el problema de cómo descomponer el pulso. Para este propósito se aplica un principio que se conoce como dispersión, el cual es más bien cotidiano. Cuando la luz blanca pasa por un prisma de cristal, cada frecuencia (color) que la compone adquiere una velocidad distinta. En el caso del prisma, esto obliga a que la luz de cada color tome un camino distinto, descomponiéndola. En el caso del CPA se utiliza una fibra óptica de un material dispersivo, que genera el retraso de algunas componentes del pulso con respecto de otras. El efecto final de este proceso es *estirar* el pulso. Se tiene un pulso más largo en el tiempo pero menos intenso y listo para ser amplificado utilizando los métodos comunes.

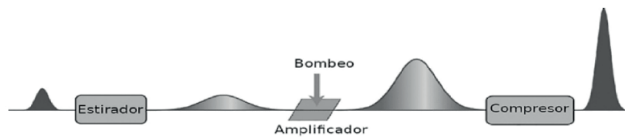


Figura 6. Esquema del proceso realizado en el CPA. Un pulso original pasa por un sistema basado en dispersión que lo estira. Posteriormente se hace pasar por un medio activo que sirve de amplificador, lo cual aumenta en conjunto su intensidad. Finalmente pasa por un sistema compresor que enfoca y crea un pulso más intenso que el pulso inicial. En el montaje de Mourou y Strickland, el estirador era una fibra óptica de 1.5 km y el compresor una serie rejillas. Fuente: Ramírez y Mochán (2018).

Después de amplificarlo es necesario recomponer el pulso para lo cual Mourou y Strickland usan una serie de rejillas que enfocan toda la luz en un mismo punto. Al final se obtiene un pulso mil millones de veces más intenso que el pulso inicial. En la Figura 6 se ilustra el proceso usado por Mourou y Strickland (Maine, 1988).

La técnica de CPA ha sido ampliamente recibida por abrir la posibilidad de tener láseres de mucho potencia a un costo razonable, además de las posibilidades que brindan los láseres pulsados de alta potencia. Un caso es el uso de CPA en el campo de investigación conocido como *atofísica* (Dresher, 2002), que estudia fenómenos de muy corta duración, del orden de los atto-segundos (la millonésima parte de la billonésima parte de un segundo). Por ejemplo el comportamiento de los electrones en las moléculas, se estudia actualmente con láseres que aplican la tecnología CPA.

Existen otras aplicaciones más cercanas, en particular en medicina. Los láseres intensos y de corta duración se utilizan en las cirugías refractivas para tratar miopía y astigmatismo, debido a que los cortos tiempos de exposición implican una baja transmisión de calor y por lo tanto un menor daño de la cornea, lo cual ha permitido esculpirla para cambiar su forma y así tratar estas patologías. Actualmente el Doctor Mourou y la doctora Strickland continúan trabajando en el campo de la óptica de láseres pulsados y de alta potencia.



El láser es un dispositivo que causa fascinación al verlo. En él, las leyes físicas son aplicadas para producir un fenómeno que no se daría de manera natural y por tanto es uno de los mejores ejemplos de la imaginación e inventiva del hombre. Lo mas probable es que en los próximos años se sigan viendo premios de esta índole otorgados a investigadores que emplean el láser para hacer ciencia.

## Referencias

- Cabrera, R. (s.f.). Superposición de ondas I. Ley de Fourier. Disponible en: [[https://ricuti.com.ar/no\\_me\\_salen/ondas/Ap\\_ond\\_13.html](https://ricuti.com.ar/no_me_salen/ondas/Ap_ond_13.html)].
- Dresher M., Hentschel M., Kienberger R. Uiberacker M., Yakovlev V., Scrinzi A. Westerwalbeslo Th., Kleineberg U. (2002). Time-resolved atomic inner-shell spectroscopy. *Nature* 419. 803.
- Dommath, D. O., Sherby, S. S. y Connoll, T. F. (1961). *Airplane Aereodynamics*. New York: Pitman Pub.
- Ganiel, U., Hardy, A., Neumann G. y Treves, D. (1975). Amplified Spontaneous Emission and Signal Amplification in Dye-Laser Systems. *IEEE Journal of Quantum Electronics*. QE-11. 11. 881.
- Gordon, J. P., Zeiger H. J. y Townes, C. H. (1955). The Maser – New tipe of microwave amplifier, frequency standard and spectrometer, *Phys. Rev.* 99. 1264.
- Ivao-mx (2010). Tipos de Flaps. Revista ivao-mx. Disponible en: [<https://ivaomx.wordpress.com/2010/10/19/tipos-de-flaps/>].
- Leipold, M., Kassing, D., Eiden M. y Herbeck, L. (1999). Solar Sails for Space Exploration – The Development and Demonstration of Critical Technologies in Partnership. *European Space Agency Bulletin*. 98.
- Maine, P., Strickland, D., Bado, P., Pessot, M., Mourou G. (1988). Generation of Ultrahigh Peak Power Pulses by Chirped y Pulse Amplification. *IEEE Journal of Quantum Electronics*. 24. 2. 398.
- Neuman, K.C. y Block, S. M. (2004) Optical Trapping. *Rev. Sci. Instrum.* 75. 9. 2787.
- Ramírez Solís, A. y Mochán Backal, W. (2018). Los premios Nobel de Física 2018: Pinzas de luz y pulsos luminosos. Academia de ciencia de Morelos. Disponible en: [[http://www.acmor.org.mx/descargas/18\\_oct\\_15\\_nobel.pdf](http://www.acmor.org.mx/descargas/18_oct_15_nobel.pdf)].
- Schawlow, A. L. (1961). Optical Masers, *Scientific American*, 204 , 6, 52.
- Piña Blancas, C. A. (2015). *Aplicación de soldadura láser para la fabricación de componentes en la industria aeroespacial*. Congreso de Manufactura Avanzada para alumnos de Posgrado CIATEQ. Querétaro, Mexico.
- Tish, J. y Knight, P. (2000). High Intensity Lasers. *Visions*. Institute of Physics.
- Stuart, D. (2014) Manipulating Single Atoms with Optical Tweezers. Tesis para optar al título de doctor. Universidad de Oxford.