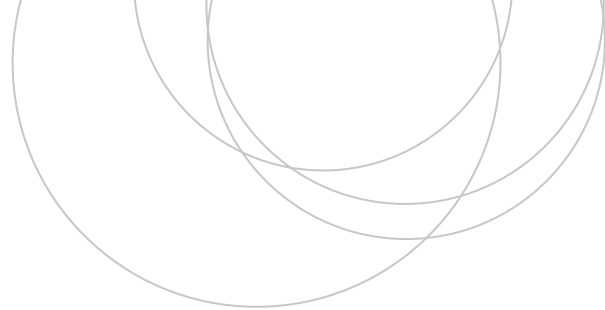




Universidad  
del País Vasco

Euskal Herriko  
Unibertsitatea

ZIENTZIA  
ETA TEKNOLOGIA  
FAKULTATEA  
FACULTAD  
DE CIENCIA  
Y TECNOLOGÍA



Trabajo Fin de Grado  
Grado en Física

# 60 aniversario del láser: fundamentos físicos y aplicaciones

Autora:

**Nerea Saiz Baz**

Directora:

**Miren Nerea Zabala Unzalu**

© 2021, Nerea Saiz Baz

Leioa, 18 de junio de 2021

# Índice

<b>1. Introducción y Objetivos</b>	<b>3</b>
1.1. Historia del láser . . . . .	4
<b>2. Fundamentos y características del láser</b>	<b>7</b>
2.1. Teoría electromagnética . . . . .	7
2.1.1. Ondas electromagnéticas . . . . .	8
2.1.2. Carácter corpuscular y ondulatorio de la luz . . . . .	11
2.1.3. Presión de radiación . . . . .	12
2.2. Absorción y emisión de luz . . . . .	14
2.3. Fuentes de luz artificial . . . . .	15
2.4. Funcionamiento del láser . . . . .	16
2.5. Características del láser . . . . .	19
<b>3. Aplicaciones del láser</b>	<b>21</b>
3.1. Investigación . . . . .	21
3.2. Biología . . . . .	28
3.3. Medicina . . . . .	29
3.4. Industria . . . . .	30
3.5. Vida cotidiana . . . . .	33
<b>4. Resumen y Conclusiones</b>	<b>33</b>
<b>Referencias</b>	<b>35</b>

# 1. Introducción y Objetivos

Uno de los hechos que demuestran el reconocimiento e importancia del láser es que la UNESCO decidiera en 2018 declarar el 16 de mayo “El día Internacional de la luz”, coincidiendo con el aniversario de la invención del láser, creado por Theodore Maiman en 1960.

Es fascinante cómo a partir de una teoría como la emisión de luz estimulada, planteada por Albert Einstein en 1916, se han desarrollado tantos estudios que desembocan en la creación del láser y sobre todo en sus valiosas aplicaciones.

Poco después de su desarrollo, películas de ciencia ficción que hoy son clásicos, como “Star Trek”, lo incorporaban a sus escenas, a modo de armas capaces de mover y destruir objetos. Pero lo que en principio era ciencia ficción, con los años se ha convertido en realidad.

Desde que se puso en funcionamiento el primer láser, éste se ha ido incorporando a distintos ámbitos de la sociedad. Su éxito se debe a que el láser es mucho más que luz, podemos decir que es una herramienta hecha de luz. Uno de los ámbitos en los que se utiliza rutinariamente es la industria, en la que se usa para soldar y cortar materiales. La medicina también ha avanzado notablemente gracias al láser, ya que permite cortar tejidos, realizar cirugías oculares o mejorar muchas otras operaciones quirúrgicas, acortando y simplificando los periodos posoperatorios. Se ha afianzado incluso en la vida cotidiana, esto lo podemos ver en el uso del láser en los lectores de códigos de barras, impresoras 3D o incluso en el ocio nocturno. A pesar de sus beneficiosas aplicaciones, el láser también puede considerarse un arma debido a la gran potencia que puede alcanzar, produciendo quemaduras o creando así daños en la visión, por ejemplo.

Además de que sus aplicaciones están muy presentes hoy en día, existen múltiples investigaciones que están en proceso de desarrollo para explotar al máximo las facetas de esta fuente de luz artificial, por lo que todavía le queda un gran recorrido a este invento que el año pasado celebró su 60 aniversario.

El estudio que se ha desarrollado en este TFG tiene un objetivo definido: abordar algunas de las aplicaciones prácticas del láser, estableciendo antes conceptos teóricos que ayudarán a su mejor entendimiento. Entendiendo su base teórica y algunas de sus aplicaciones se podrá apreciar de una manera más profunda su funcionamiento y valorar este descubrimiento. Se pondrán en valor las importantes aplicaciones que se han desarrollado y que han sido determinantes para mejorar la forma de trabajar y la calidad de vida de las personas.

En el inicio de este trabajo se tratará la polémica atribución del invento y patentado, para posteriormente establecer unas primeras bases con la teoría electromagnética, pasando después a exponer su funcionamiento junto a sus especiales características, concluyendo con distintas aplicaciones en investigación, biología, medicina, industria y vida cotidiana. Más allá de la labor de documentación y explicación técnica, el trabajo tiene una vocación didáctica que surge de la vocación de la autora por la educación, así como de la innegable participación del láser de la vida cotidiana en nuestra sociedad.

## 1.1. Historia del láser

Antes de empezar a explicar los fundamentos del láser conviene hacer una breve historia del mismo. La base del láser se establece en 1916 gracias a la teoría de la emisión estimulada que propuso el físico alemán Albert Einstein (Figura 1). El proceso de emisión estimulada se basaba en la incidencia de un fotón sobre un átomo excitado, que produce la emisión de este mismo fotón junto a otro idéntico. Explicaremos el concepto en profundidad en el apartado 2.2, ‘absorción y emisión de luz’. Desde ese momento en adelante, muchos científicos trabajaron sobre esta idea desde diferentes puntos de vista. En este apartado se tendrán en cuenta algunos de los hechos más significativos que desembocan en la invención del láser. Al margen de los logros científicos, veremos que la historia que envuelve al láser no está exenta de polémica.

A partir de la idea de Einstein, el alemán Rudolf Ladenburg y el soviético Valentin A. Fabrikant son dos de los primeros nombres que resuenan en torno al láser. El primero de ellos, confirmó la existencia del fenómeno de la emisión estimulada en 1928, o como algunos científicos denotaban “absorción negativa”, publicando el artículo “Experimental Proof of ‘Negative Dispersion’” en la revista *Nature* [1]. El segundo, el científico Fabrikant, sugirió en 1940 que la emisión estimulada en una descarga de gas era capaz de amplificar la luz y once años más tarde, solicitó la patente sobre un método de amplificación de luz en las regiones del ultravioleta, infrarrojo y ondas de radio.

Posteriormente, en 1954, los estadounidenses Charles H. Townes y James P. Gordon producen por primera vez un MASER (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation), un dispositivo que, mediante la emisión estimulada, generaba radiación en la región del espectro de las microondas.

Es desde ese momento en adelante, a partir de 1957, que se plantea fabricar un máser óptico, que estaría basado en el mismo concepto que el máser, pero emitiría radiación en las regiones de luz visible, infrarrojo o ultravioleta. Debido a que el potencial de un máser óptico era enorme, importantes laboratorios y universidades comenzaron una carrera muy competitiva para lograr este dispositivo, que se denominó “guerra por la patente del láser”. Es por ello que ese mismo año, el doctorando y soviético Gordon Gould (Figura 2b) y el profesor Charles H. Townes (Figura 2c) de la universidad de Columbia, discuten sobre la construcción del láser y el “bombeo óptico” que, como veremos más adelante, formará parte del láser. La Figura 2a ilustra una de las páginas del cuaderno de notas de Gould donde sugiere el nombre “láser” (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) por primera vez. Para dejar constancia de su idea se lo hizo firmar a un notario que ejercía en una tienda de caramelos, aunque uno de sus grandes errores fue no ser perspicaz en pedir la patente en ese momento. Finalmente, Gould y Townes tomaron caminos separados para conseguir el objetivo de construir el láser, centrándose en la emisión de radiación visible.

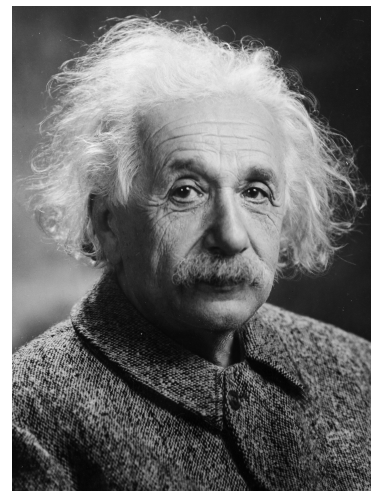
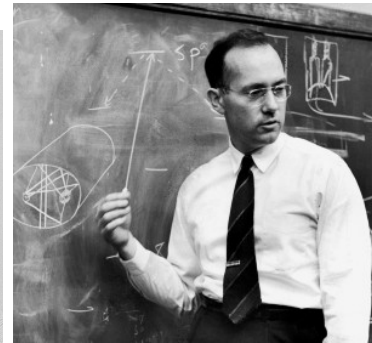
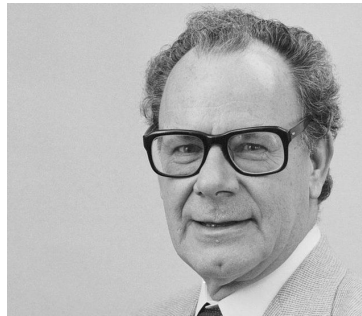
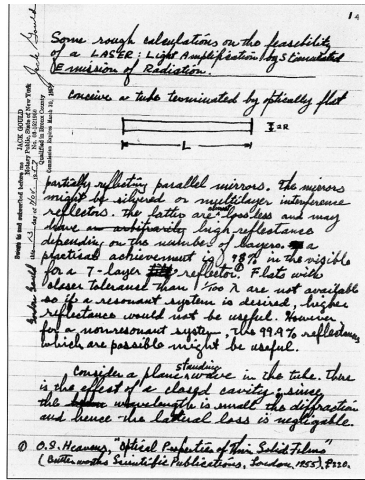


Figura 1: Albert Einstein.

(Fuente: División de Impresiones y Fotografías de la Biblioteca del Congreso de los Estados Unidos, código digital cph.3b46036.)



(a) Una de las páginas del cuaderno de Gordon Gould.

(b) Gordon Gould.

(c) Charles H. Townes.

Figura 2: Tres imágenes relacionadas con la historia del láser.

(Fuente: a) Wikipedia, b) y c) Getty Images.)

Gould, por su parte, contó con la ayuda de la Technical Research Group, TGR, una compañía de investigación junto con la que consiguió una beca del gobierno estadounidense para desarrollar el proyecto. Desgraciadamente el proyecto duró poco para Gould, ya que Estados Unidos se encontraba en plena guerra fría con la URSS y no podían arriesgarse a tener a un soviético como Gould inmerso en un proyecto tan importante, por lo que decidieron apartarle de la investigación.

Por otro lado, su conocido Townes junto al estadounidense Arthur L. Schawlow y respaldados por la Bell Telephone Company, presentaron una propuesta del máser óptico en la revista Physical Review [2].

En 1959 Gould junto a la TGR por una parte y Townes, Schawlow y la compañía Bell por otra, quisieron optar a la patente, pero los únicos que lo lograron fueron estos últimos. Para más exasperación de Gould, cinco años más tarde, en 1964 Townes junto a dos rusos más consiguió el Premio Nobel de Física por la investigación que condujo al láser. Durante los años posteriores Gordon Gould confió en la justicia para demostrar que la patente le pertenecía a él, pero no lo consiguió hasta casi 30 años más tarde y, después de una intensa y larga batalla judicial. En ese momento, a pesar del dinero invertido en los juzgados, se convirtió en multimillonario.

A pesar de todo, ninguno de ellos consiguió el éxito absoluto, sino que lo hizo Theodore Maiman el 16 de mayo de 1960, construyendo un láser de rubí en los laboratorios de Hughes Research en California. A diferencia de Gould y Townes que planteaban un láser de gas, él lo hizo de estado sólido. Esta serie de hechos desencadenaron la fabricación de todo tipo de láseres con distintas composiciones. En base a esta historia existen muchas opiniones sobre quién inventó el láser, alguna de ellas sugiere que no fue un acto, sino una serie de contribuciones que dieron lugar a ello [3] [4] [5].

## El láser y los premios Nobel: una relación de éxito

Para ver el alcance de este invento se muestra a continuación un listado de Premios Nobel de Física (y química) relacionados con el láser [6]:

Año	Motivo	Galardonados
1964	Investigación fundamental que conduce al máser y al láser	Charles Townes, Nikolái Bášov, Alexander Prokhorov
1971	Invencción de la holografía	Dennis Gabor
1981	Desarrollo de espectroscopia láser	Nicolaas Bloembergen, Arthur Schawlow
1997	Atrapamiento láser y enfriamiento de átomos	Steven Chu, Claude Cohen-Tannoudji, William Phillips
1999	Estudio de la dinámica de las reacciones químicas en escalas de tiempo de femtosegundos (Nobel en química)	Ahmed Zewail
2000	Invencción de heteroestructuras, esencial para optoelectrónica de alta velocidad	Zhores Alferov, Herbert Kroemer
2001	El condensado Bose-Einstein, llamado “láseres de átomos”	Eric Cornell, Carl Wieman, Wolfgang Ketterle
2005	Teoría cuántica de la coherencia óptica	Roy Glauber
2005	Espectroscopia de láser ultrapreciso y generador de peine de frecuencias	John Hall, Theodor Hänsch
2009	Transmisión de luz en fibras ópticas para telecomunicaciones	Charles Kao
2018	Pinzas ópticas y generación de pulsos ópticos ultracortos de alta intensidad	Arthur Ashkin, Gérard Mourou y <b>Donna Strickland</b>

Cabe destacar que en la larga historia de los Premios Nobel sólo cuatro mujeres han sido premiadas y sólo una de ellas relacionada con el láser, Donna Strickland [7]. Marie Curie lo recibió por las investigaciones sobre la radiactividad [8], Maria Goeppert Mayer por el descubrimiento de la estructura de capas nucleares [9], y el año pasado Andrea Ghez [10] por las investigaciones de los agujeros negros (Figura 3).



Figura 3: Mujeres premiadas con el Nobel de Física, de izquierda a derecha: **Marie Curie** en 1903, **Maria Goeppert Mayer** en 1963, **Donna Strickland** en 2018 y **Andrea Ghez** en 2020.

(Fuente: Las tres primeras imágenes del archivo de la Fundación Nobel. <https://www.nobelprize.org/> y la última del periódico The New York Times.)

## 2. Fundamentos y características del láser

Es indispensable viajar hasta el siglo XIX para poder entender de raíz el funcionamiento del láser, ya que en ese siglo ocurrieron ciertos hechos que derivaron, entre otros, en la famosa y trascendente “síntesis de Maxwell”. En ella, el científico escocés logró unificar la electricidad y el magnetismo y desarrollar la teoría de las ondas electromagnéticas, en las cuales estaba incluida la luz visible. Estas ondas electromagnéticas son las que están presentes en la radiación láser y por tanto, debemos estudiar su funcionamiento.

### 2.1. Teoría electromagnética

El fundamento de la “síntesis de Maxwell” tuvo origen en la invención de la pila eléctrica, en la que se basó el físico y químico Hans Christian Oersted en 1820 para llegar a la conclusión de que el movimiento de carga a través de un conductor producía un campo magnético. Lo observó al acercar una aguja imantada a un conductor y ver que producía una fuerza sobre ella. Este hecho fue muy importante, ya que se observó que la electricidad y el magnetismo no eran hechos independientes.

El francés André-Marie Ampère, siguió la estela de Oersted repitiendo su experimento y deduciendo que una corriente eléctrica podía ejercer fuerza sobre otra, a través del campo magnético que cada una de ellas generaba. Concluyó que “el magnetismo es electricidad en movimiento”. En 1831 Michael Faraday estableció otra de las bases del electromagnetismo, consiguió producir una corriente eléctrica a partir de una acción magnética, lo cual se conoce como inducción electromagnética y, creó los conceptos “líneas de fuerza” y “campo”. Por último, James Clerk Maxwell, se basó en estas dos últimas ideas de Faraday, además del trabajo de Oersted, para realizar una formulación matemática, cuyo desenlace fueron cuatro ecuaciones, las conocidas como ecuaciones de Maxwell:

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3)$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0(\vec{j} + \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}). \quad (4)$$

Estas ecuaciones son la ley de Gauss del campo eléctrico  $\vec{E}$  (1), la ley de Gauss del campo magnético  $\vec{B}$  (2), la ley de Faraday-Henry de la inducción electromagnética (3) y la ley de Ampère-Maxwell (4), las cuales establecen una base para tratar los fenómenos electromagnéticos. Maxwell propuso la existencia de ondas electromagnéticas (Figura 4) que debían satisfacer los vectores de campo electromagnético [11] [12]. En estas ecuaciones  $\rho$  y  $\vec{j}$  son las fuentes del campo, la densidad de carga y corriente, respectivamente, y  $\varepsilon_0$  y  $\mu_0$  son la permitividad y la permeabilidad magnética en el vacío. El producto de estas dos magnitudes conduce a la velocidad de las ondas electromagnéticas en el vacío,  $c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}$ .

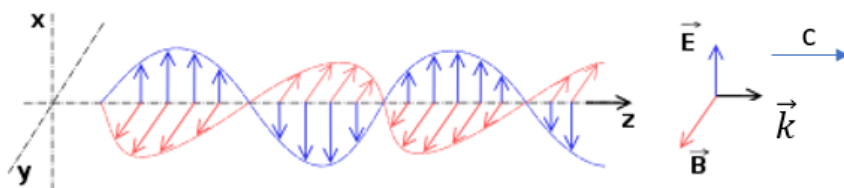


Figura 4: Esquema de una onda electromagnética plana que se propaga en la dirección z.  
(Adaptada de [https://meteoglosario.aemet.es/es/termino/933\\_radiacion-electromagnetica](https://meteoglosario.aemet.es/es/termino/933_radiacion-electromagnetica))

### 2.1.1. Ondas electromagnéticas

Las ondas electromagnéticas constan de un campo eléctrico y otro magnético que oscilan perpendiculares entre sí y a la dirección de propagación, y se propagan en el espacio transportando energía y momento (Figura 4). Éstas pueden ser de diversos tipos, luz visible, microondas, ondas de radio... A pesar de las diferencias que existen entre ellas, el hecho de ser ondas les atribuye ciertas características en común: amplitud (A), periodo (T), frecuencia ( $\nu$ ) y longitud de onda ( $\lambda$ ) (Figura 5).



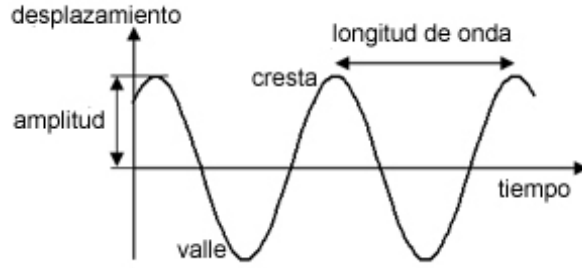


Figura 5: Características de una onda.

(Fuente: <http://ondasguiadasdiana.blogspot.com/2016/08/caracteristicas-de-las-ondas-senoidales.html>)

Otra de las características más importantes es la velocidad a la que se propagan estas ondas:

$$v = \sqrt{\frac{1}{\mu\epsilon}}, \quad (5)$$

donde  $\mu$  y  $\epsilon$  son la permeabilidad magnética y la permitividad eléctrica del medio, respectivamente. Si sustituyésemos estos dos valores para el caso del vacío ( $\epsilon = \epsilon_0$ ,  $\mu = \mu_0$ ), obtendríamos que la velocidad a la que se propaga una onda electromagnética en el vacío es  $c$ , la velocidad de la luz,  $c = 3 \times 10^8 \frac{m}{s}$ . Por otra parte, la velocidad tiene una expresión relacionada con dos características importantes de las ondas, su longitud de onda y frecuencia:

$$v = \lambda\nu. \quad (6)$$

El espectro electromagnético nos proporciona la clasificación de las ondas electromagnéticas en función de su frecuencia, tal y como muestra la Figura 6. La luz visible, la que conocemos comúnmente como luz, se sitúa casi en el centro del espectro, mientras que las ondas de radio y los rayos gamma ocupan los extremos. Estos últimos son los más dañinos para la salud, ya que su frecuencia implica energía muy alta [13].

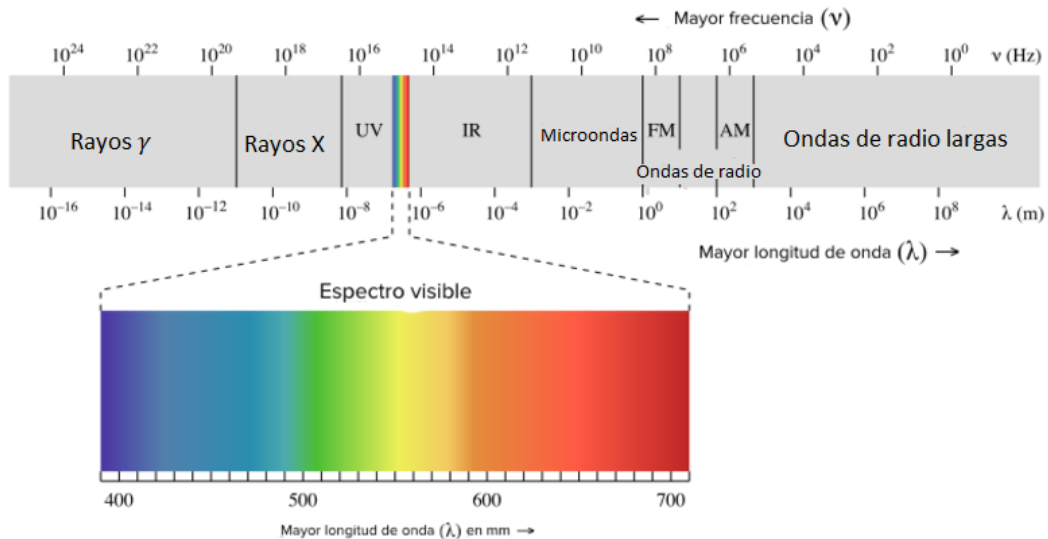


Figura 6: Espectro electromagnético.

(Adaptado de ChemWiki de la Universidad de California en Davis.)

Otro concepto a tener en cuenta al introducir el láser es la reflexión y refracción de estas ondas electromagnéticas en la superficie que separa dos medios. Una de las características del medio es el índice de refracción, el cual proporciona una medida de cuánto disminuye la velocidad de la luz en un medio. La luz dentro de un medio viaja más lentamente que en el vacío de forma que su velocidad es:

$$v = \frac{c}{n}, \quad (7)$$

donde  $v$  es el índice de refracción del medio.

Para explicar los fenómenos de reflexión y refracción se representará la onda de luz mediante un rayo, el cual recorrerá su misma trayectoria y llevará la dirección de propagación de la onda. Cuando la onda o rayo cruza de forma oblicua una superficie que separa dos medios con diferentes índices de refracción, puede que parte de ella se refleje y la otra se transmita. Esto podemos visualizarlo mejor con la ayuda de la Figura 7.

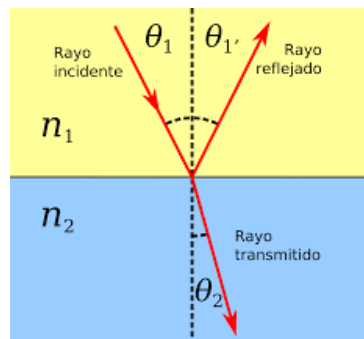


Figura 7: Rayo de cruzando una superficie que separa dos medios.

(Fuente: [https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Ley\\_de\\_Snell\(es\).svg](https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Ley_de_Snell(es).svg))

Estos parámetros están relacionados mediante la Ley de Snell:

$$\frac{n_1}{\sin\theta_1} = \frac{n_2}{\sin\theta_2}, \quad (8)$$

donde  $\theta_1$ ,  $\theta_1'$  y  $\theta_2$  son los ángulos de incidencia, reflexión y transmisión, respectivamente, y  $n_1$  y  $n_2$  los índices de refracción de los distintos medios.

### 2.1.2. Carácter corpuscular y ondulatorio de la luz

Hasta ahora, hemos tratado la luz como una onda electromagnética apoyándonos en la teoría electromagnética de Maxwell y por ello, analizado sus características como onda. Pero existen dos hechos científicos que aportaron un punto de vista corpuscular de la luz, cuyos protagonistas fueron Max Planck y Albert Einstein.

Todo comenzó con el estudio de la radiación del cuerpo negro, que es un emisor y absorbente perfecto de radiación. Lord Rayleigh, James Jeans y Wilhelm Wien, entre otros científicos, estuvieron involucrados en el estudio de la distribución espectral de energía de este cuerpo, es decir, la energía radiante que se emite a diferentes frecuencias para una temperatura concreta del cuerpo negro. En 1896, Wien trató de obtener una expresión para la densidad de energía que debería satisfacer la emisión observada del cuerpo negro, la cual mostraba evidencias de fallar a bajas frecuencias:

$$\varepsilon(\nu, T) = \nu^3 f\left(\frac{\nu}{T}\right), \quad (9)$$

siendo  $f\left(\frac{\nu}{T}\right)$  una función con dependencia exponencial y  $T$  la temperatura. Por otra parte, en 1900 Rayleigh y Jeans lograron obtener una expresión para su distribución, aunque no del todo correcta, ya que para longitudes de onda bajas fallaba. A este defecto se le denominó catástrofe ultravioleta:

$$\varepsilon(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^3}{c^2} kT, \quad (10)$$

donde  $k$  es la constante de Boltzmann,  $k = 1,38 \times 10^{-23} \frac{J}{K}$ .

Después de esto Max Planck unió estas dos ideas previas de la luz como onda y corpúsculo para lograr la solución a la distribución de la energía en función de la temperatura y frecuencia, proponiendo lo que se conoce como la ley de radiación de Planck. Propuso que la energía no se emitía de forma continua sino en discretos paquetes de energía denominados *quanta*, dados por:

$$E = h\nu, \quad (11)$$

donde  $h$  es la constante de Planck,  $h = 6,62610^{-34} Js$ .

Es en este momento, con estas propuestas y conclusiones encima de la mesa, cuando entró en juego Albert Einstein. Después de revisarlas quiso entender la emisión y la absorción de radiación por la materia. Para ello, se basó en el efecto fotoeléctrico y explicó lo que la teoría ondulatoria no podía explicar, recibiendo por eso el premio Nobel en 1921. Para

explicar el efecto fotoeléctrico colocaron dos superficies metálicas paralelas conectadas a un amperímetro y una batería con un potenciómetro (Figura 8). Al iluminar una de ellas con un haz de luz de una cierta frecuencia se observaba una corriente eléctrica, lo que indicaba que se estaban emitiendo electrones del material metálico. Se observó que un quantum o fotón cedía su energía,  $E = h\nu = h\frac{c}{\lambda}$  (Planck), a un electrón y lo arrancaba del material. Eso sí, la energía con la que incidía el fotón debía ser la suficiente para poder arrancar de un átomo un electrón, ya que con una energía baja no se lograría. Esta energía se distribuía en la energía cinética del electrón saliente ( $E_c$ ) y en el trabajo realizado para extraerlo ( $w$ ):  $E_c = h\nu - w$ . Por otra parte, se dedujo que la energía cinética de los electrones no dependía de la intensidad del haz luminoso incidente, lo único que podía generar un haz muy intenso era solamente una cantidad mayor de electrones. Resumiendo, la energía de los electrones emitidos no dependía de la intensidad de la onda que le llegaba sino de su frecuencia [14].

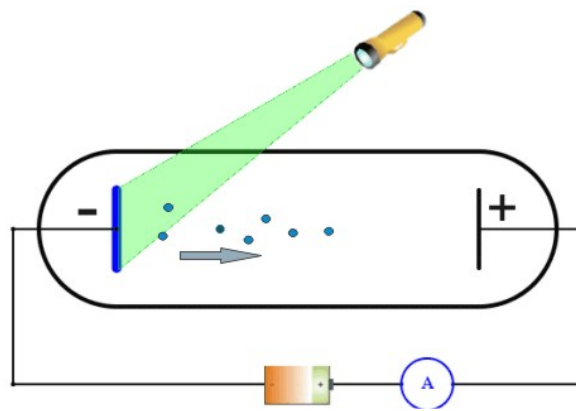


Figura 8: Efecto fotoeléctrico.  
(Fuente: <http://recursostic.educacion.es>)

### 2.1.3. Presión de radiación

En 1619 el astrónomo alemán Johannes Kepler observó que la luz solar ejercía una presión de radiación sobre los cometas próximos al sol. Esta presión de radiación junto al viento solar, causaba el desprendimiento de una estela de gas y polvo del cometa (Figura 9). Fue la primera hipótesis de que la luz ejerce un momento y puede realizar fuerza sobre los objetos.



Figura 9: Cometa sometido a la presión de radiación del sol. La cola blanca es la estela de polvo y gas.

(Fuente: <https://www.xatakaciencia.com/astronomia/las-dos-colas-de-un-cometa>)

El concepto de presión de radiación es fundamental para entender diversas aplicaciones del láser que analizaremos más adelante. Las ondas electromagnéticas, además de transportar energía, llevan asociado un momento, es decir, ejercen una fuerza o presión de radiación al incidir sobre una superficie. A priori podríamos pensar que no es posible, ya que los fotones no tienen masa y por lo tanto tampoco momento, lo que implicaría no poder realizar una fuerza. Pero lo cierto es que no es así, sí que tiene momento y esto se consigue dejando a un lado la mecánica clásica y empleando la relatividad especial. Esta nos dice que el momento de un fotón es  $p = \frac{E}{c}$ , siendo  $E$  la energía de la onda electromagnética y  $c$  la velocidad de la luz.

Mediante la presión de radiación la luz láser podría por ejemplo mover objetos. Es por ello, que el Sol también ejerce una fuerza sobre la Tierra debido a la presión de radiación. Calculemosla teniendo en cuenta que la intensidad de la luz solar en la órbita terrestre es de  $1,37 \frac{kW}{m^2}$  [15]. Se tendrán en cuenta las relaciones:

$$P_{radiación} = \frac{I}{c}, \quad (12)$$

siendo  $I$  y  $c$  la intensidad y la velocidad de la luz respectivamente.

$$F_r = P_{radiación}A, \quad (13)$$

donde  $F_r$  es la fuerza ejercida sobre el área  $A$  debido a la  $P_{radiación}$ . Sustituyendo la ecuación (12) en (13) se obtiene,

$$F_r = P_{radiación}A = \frac{I\pi R_T^2}{c}, \quad (14)$$

donde  $R_T$  es el radio de la Tierra. Sustituyendo los valores numéricos,  $c = 3 \times 10^8 \frac{m}{s}$ ,  $R_T = 6370 km$ ,  $1,37 \frac{kW}{m^2}$ , se obtiene:

$$F_r = 5,82 \times 10^8 N. \quad (15)$$

Se comparará esta fuerza con la fuerza de atracción gravitatoria para poder sacar conclusiones.

$$F_{gravitatoria} = \frac{GM_S M_T}{R_{TS}^2}, \quad (16)$$

siendo  $G$  la constante de gravitación universal,  $M_S$  y  $M_T$  las masas del sol y la tierra respectivamente y  $R_{TS}$  la distancia entre la tierra y el sol.

Sustituyendo en la ecuación (16) los valores:  $G = 6,67 \times 10^{-11} \frac{Nm^2}{kg^2}$ ,  $M_S = 1,99 \times 10^{30} kg$ ,  $M_T = 5,98 \times 10^{24} kg$ ,  $R_{TS} = 1,5 \times 10^{11} m$ , se obtiene,  $F_g = 3,53 \times 10^{22} N$ , que si se compara con el resultado de la ecuación (15):

$$\frac{F_r}{F_g} = 1,65 \cdot 10^{-14}. \quad (17)$$

De esta relación se puede concluir que la fuerza gravitatoria es 14 órdenes mayor que la fuerza debida a la presión de radiación y por ello, esta última resulta en parte insignificante. A pesar de este resultado es importante tener en cuenta que esta fuerza existe, aunque los humanos no podamos apreciarla ni sentirla cuando nos exponemos al sol.

## 2.2. Absorción y emisión de luz

El principio fundamental en el que está basado el láser es la absorción y emisión de fotones por un átomo, concretamente la emisión estimulada. Para poder explicarlo nos basaremos en el modelo del átomo de Bohr y visualizaremos los electrones de un átomo distribuidos en niveles energéticos discretos. Además, tendremos en cuenta que el nivel energético más estable y de menor energía para un átomo será el estado fundamental. En dicho estado un electrón se encontrará en el nivel que denominaremos  $E_1$  (ver figura 10).

**Absorción:** Si un átomo se encuentra en el nivel fundamental e incide sobre él un fotón con energía  $E = h\nu$ , podrá ser excitado a un nivel de energía superior. La energía del fotón debe ser la diferencia de energía entre el estado fundamental y otro estado excitado del átomo, por ejemplo  $E_2 - E_1 = h\nu$  (Figuras 10a y 10b).

**Emisión espontánea:** Cuando el átomo esté excitado y haya transcurrido el tiempo de vida media tenderá a decaer a un estado de energía menor, al nivel menos energético  $E_1$ . En ese cambio de nivel, el electrón emitirá un fotón cuya energía será la diferencia de energías de los niveles:  $E_2 - E_1 = h\nu$ . A esta emisión la llamaremos incoherente, ya que es un proceso espontáneo y no está asociado a una radiación incidente. Un ejemplo de emisión espontánea puede ser la luz solar (Figura 10c).

**Emisión estimulada:** Sobre el átomo excitado incide un fotón de energía  $E_2 - E_1 = h\nu$ . El átomo pasa al estado fundamental, emitiendo un fotón de la misma energía que el fotón incidente, obteniendo así dos fotones salientes. A esta emisión, sin embargo, la llamaremos coherente debido a que la fase del fotón emitido coincide con la del fotón incidente (Figuras 10d y 10e) [16][17].

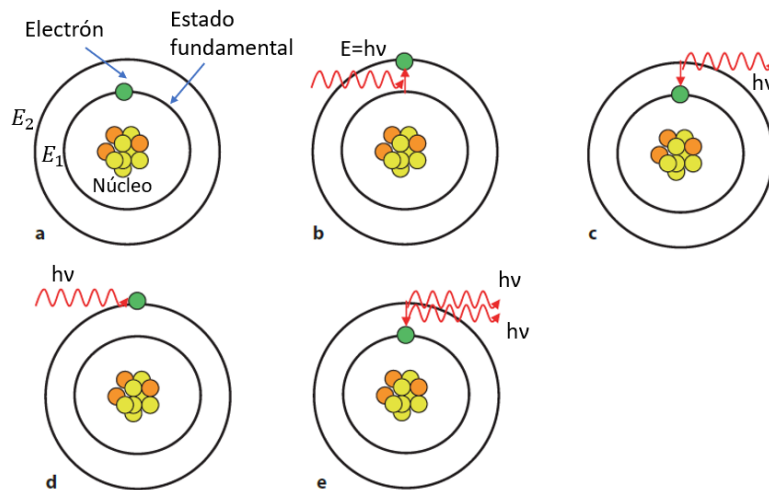


Figura 10: Absorción, emisión espontánea y estimulada. **a)** El electrón se encuentra en el nivel fundamental con energía  $E_1$ . **b)** Incide un fotón sobre él y lo excita al estado con  $E_2$ . **c)** El electrón decae de forma espontánea emitiendo un fotón. **d)** Sobre el electrón excitado incide un fotón. **e)** Decae al estado fundamental emitiendo dos fotones de la misma energía.

(Adaptada de Inja B. Allemann y Joely Kaufman, "Laser Principles", *Basics in Dermatological Laser Applications*, pág. 8, 2011.)

## 2.3. Fuentes de luz artificial

Para poner la luz láser en contexto temporal la Figura 11 ilustra algunas de las diferentes fuentes de luz artificial creadas por el hombre hasta la fecha.

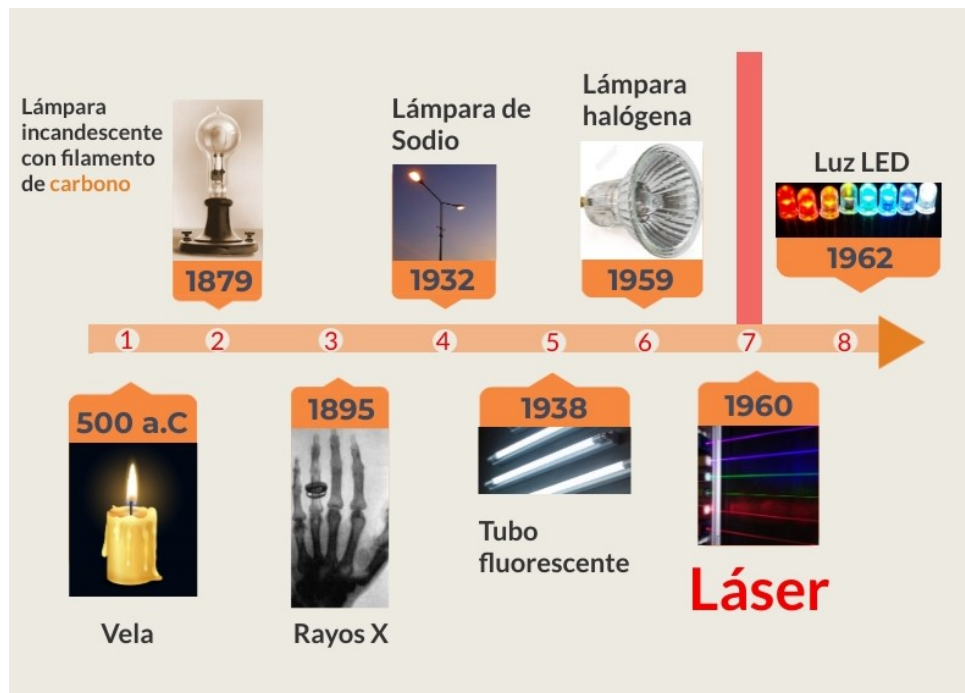


Figura 11: Evolución de las fuentes de luz artificial.  
(Fuente: Composición propia.)

La luz más básica, como la de la vela, se forma por una reacción de combustión, en la que la cera reacciona con el oxígeno y da como producto dióxido de carbono y vapor de agua. Es decir, los átomos de los compuestos emitidos por la reacción se excitan debido al calor producido y al desexcitarse emiten luz. A diferencia de las próximas fuentes de luz que mencionaremos a continuación, ésta tiene una reacción química.

Tuvieron que pasar más de dos mil años hasta que Thomas Alva Edison creara la primera bombilla con filamento de carbono en 1879. El efecto por el que funcionaba es el efecto Joule y constaba de un filamento recubierto por un vidrio que generaba vacío en el interior. Posteriormente, 16 años después de la invención de Edison, Wilhem Conrad Röntgen descubrió los rayos X, una radiación electromagnética muy penetrante de alta frecuencia. Se genera cuando un chorro de electrones muy energético se deceleran al chocar contra un metal. Una característica muy importante de esta radiación es su capacidad de atravesar los cuerpos opacos.

El tubo fluorescente, que apareció en 1938, contiene vapor de mercurio a baja presión junto a otro gas inerte, los cuales se excitan cuando entre dos electrodos se genera una descarga eléctrica. Al excitarse emiten luz ultravioleta y ésta se convierte en luz visible por el recubrimiento interior del tubo.

La lámpara de sodio tiene un funcionamiento similar al tubo fluorescente, aunque en este caso interviene el vapor de sodio. Una de las diferencias es que la luz emitida por la excitación de los gases se encuentra en el rango de luz visible, es una luz amarillenta típicamente observada en las luces que iluminan la carretera [18].

El modelo de Edison se fue mejorando en 1904 intercambiando el carbono, que se evapora

rápido, por metales como el wolframio, que tienen un punto de fusión alto y la tasa más baja de evaporización [19]. Otra lámpara parecida a las anteriores es la lámpara halógena de 1959, en la que el wolframio que se evapora en el interior se combina con el gas de halógeno que contiene la cavidad, haciendo que aumente la eficiencia [20].

Por último, las luces LED funcionan a base del principio de electroluminiscencia y están formadas por un semiconductor y un diodo con unión p-n. Son luces muy ventajosas, entre otras razones, porque son de muy bajo consumo [21].

## 2.4. Funcionamiento del láser

Después de haber introducido en la sección 2.2 la absorción y emisión estimulada, a continuación plantearemos la probabilidad de que ocurra cada una de ellas. Para ello, nos basaremos en un sistema de dos niveles de energía, siendo  $N_1$  y  $N_2$  la población de cada nivel, es decir, el número de átomos por unidad de volumen. Plantearemos estas probabilidades, además del concepto de flujo de fotones (Figura 12), para finalmente entender el concepto de inversión de población necesaria para el láser.

En la emisión estimulada la variación de  $N_2$  respecto al tiempo, en el que ocurren las transiciones del nivel 2 al 1, viene dada por:

$$\frac{dN_2}{dt} = -W_{21}N_2, \quad (18)$$

donde  $W_{12}$  es el ratio de emisión estimulada, con unidades de *tiempo*<sup>-1</sup>.

Lo mismo ocurre con la absorción estimulada:

$$\frac{dN_1}{dt} = -W_{12}N_1, \quad (19)$$

donde  $W_{12}$  es el ratio de absorción estimulada.

Los ratios de absorción y emisión estimulada dependen de la transición en particular y de la intensidad de la onda electromagnética. Sus expresiones vienen dadas por:

$$W_{21} = \sigma_{21}F, \quad (20)$$

$$W_{12} = \sigma_{12}F, \quad (21)$$

donde  $F$  es el flujo de fotones de la onda, es decir, el número de fotones por segundo y unidad de área, y  $\sigma_{21}$  y  $\sigma_{12}$  son las secciones de área eficaces de la emisión y absorción estimulada, respectivamente.

Ambas ecuaciones están relacionadas mediante la degeneración de cada nivel,  $g_1$  y  $g_2$  :

$$g_2W_{21} = g_1W_{12}. \quad (22)$$

Estas ecuaciones son útiles para poder calcular la variación de flujo,  $dF$ , que se da en una región con longitud  $dz$ . Esta variación es debida a los procesos de absorción y emisión estimulada que son responsables de que la cantidad de fotones entrantes y salientes de la región sombreada de la Figura 12 varíen.



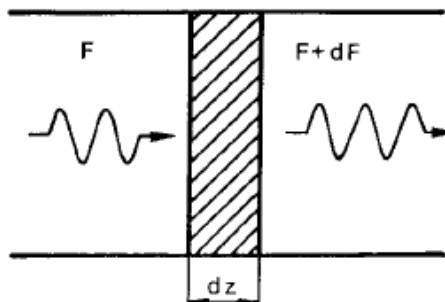


Figura 12: Cambio del flujo de fotones a lo largo de  $dz$ .  
(Fuente: Orazio Svelto, "Principles of Lasers", pág. 4, 2010.)

Haciendo uso de las ecuaciones (20) y (22) llegamos a que la variación de flujo es:

$$dF = \sigma_{21}F(N_2 - \frac{g_2N_1}{g_1})dz. \quad (23)$$

Esto indica que si  $N_2 > \frac{g_2N_1}{g_1}$  el material se comporta como un amplificador, aumenta el flujo de fotones, y es exactamente este el comportamiento que nos interesa para un correcto funcionamiento del láser. El nivel  $N_2$  debe estar más poblado de electrones que el  $N_1$ , aunque esto contradice al equilibrio termodinámico de la distribución de Boltzmann, y lo llamaremos **inversión de población** [22].

Una vez explicado este concepto, pasemos a analizar qué estructura tiene un láser. Está compuesto de tres partes fundamentales: la **fuentes de energía** o bombeo, el **medio activo** y el **sistema de retroalimentación**, como se representa en la Figura 13. Estos dos últimos forman la cavidad óptica.

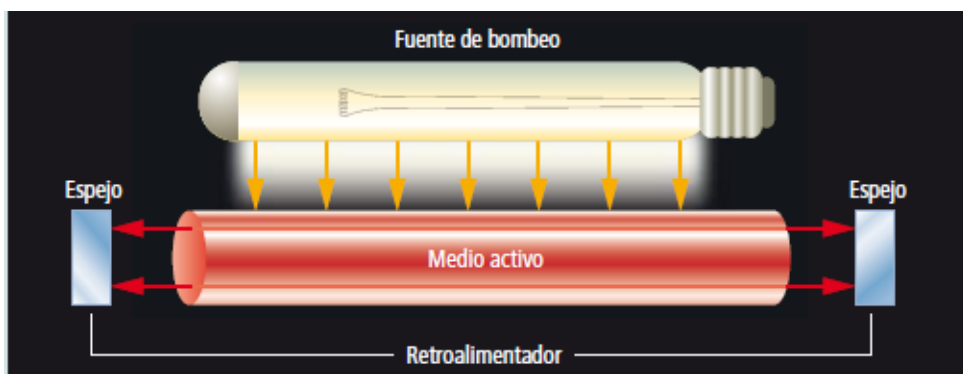


Figura 13: Componentes y estructura de láser con bombeo óptico.

(Fuente: Alexander Müller, "¿Qué es un láser?", *Temas Investigación y Ciencia*, pág. 4, 2010.)

En primer lugar, es imprescindible disponer de un **sistema de bombeo** para poder transferir energía a los átomos del medio activo para que sean excitados, y así poder generar la emisión estimulada necesaria para el funcionamiento del láser. Además, es importante que el bombeo tenga potencia suficiente para mantener la inversión de población en el medio activo. Existen diferentes fuentes de energía para generar el bombeo [23]:

- **Bombeo óptico:** Se utiliza una fuente luminosa, como una lámpara de flash de xenón u otro láser, un ejemplo de medio activo podría ser el rubí (Figura 13).

- **Bombeo químico:** Se basa en los enlaces químicos, de los que se obtiene energía cuando se crean o se rompen. Un ejemplo es el de flúor-hidrógeno.
- **Bombeo eléctrico:** Consiste en pasar una corriente eléctrica por el material activo. Habitualmente el medio suele ser un gas, por ejemplo el  $CO_2$  (Figura 14).

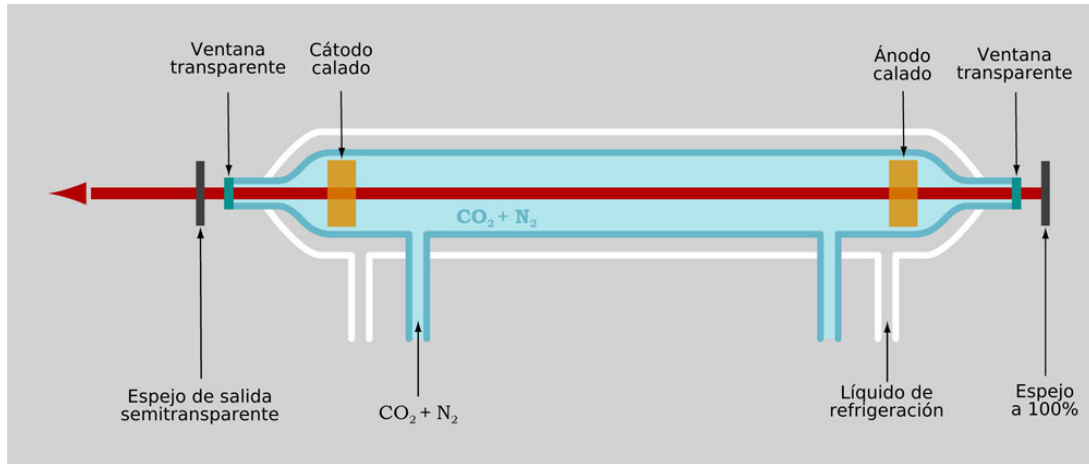


Figura 14: Componentes y estructura del láser con bombeo eléctrico y medio activo  $CO_2$ .  
(Fuente: Wikipedia.)

Es en el **medio activo** donde ocurre la emisión estimulada, los átomos que allí se encuentran absorben la energía de la fuente de bombeo, como se representa en la Figura 15. Los fotones generados mediante la emisión oscilan en una cavidad óptica cilíndrica entre dos espejos, como se puede ver en la Figura 13. Además, es este medio el que define la longitud de onda de la luz que emite el láser. Esto es muy importante, ya que en cada tipo de láser los átomos implicados en el proceso tienen unas diferencias de niveles de energía que corresponden a una longitud de onda del fotón emitido característica y esto influye decisivamente en su aplicación práctica. El material activo puede estar compuesto de un gas (por ejemplo  $CO_2$ ), un sólido (rubí, alejandrita, Er:YAG, Nd:YAG) o un líquido (por ejemplo rodamina 6G). Esto es muy importante, ya que es la composición del medio activo la que le otorga el nombre al láser [17].

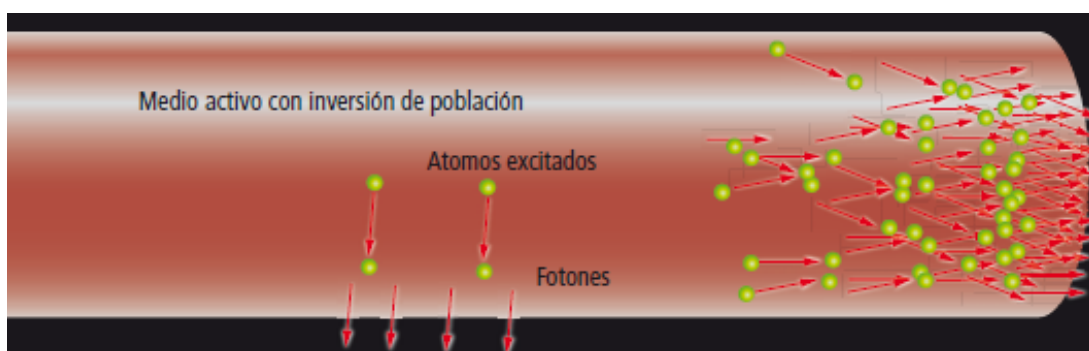


Figura 15: Interior del medio activo.

(Fuente: Alexander Müller, "¿Qué es un láser?", *Temas Investigación y Ciencia*, pág. 6, 2010.)

La oscilación de los fotones en la cavidad no sería posible sin el **sistema de retroalimentación** formado por dos espejos paralelos coaxiales (Figura 13). Uno de ellos es totalmente reflectante, mientras que el otro deja pasar una pequeña porción de fotones fuera de la

cavidad en forma de haz de luz continua o pulsada. Los fotones que se mantienen dentro, se reflejan de un espejo a otro estimulando así a más átomos. Cuantos más átomos excitados haya, más fotones se producirán [17] [24]. La expresión que refleja el factor de amplificación en cada viaje de ida y vuelta de un espejo a otro viene dada por:

$$G = R_1 R_2 e^{2(k-\gamma)L}, \quad (24)$$

donde  $R_1$  y  $R_2$  son las reflectividades de los espejos,  $k$  y  $\gamma$  son las ganancias y pérdidas totales de la cavidad, respectivamente, y  $L$  la longitud de la cavidad o resonador óptico. En cuanto a la puesta en marcha del láser para obtener el haz de luz, hay que tener en cuenta una condición umbral láser: la diferencia entre las densidades de niveles  $N_1$  y  $N_2$  deberá tener un valor en concreto. Esta condición indica que las pérdidas de radiación producidas por las emisiones espontáneas han de ser compensadas para que el láser empiece a funcionar [16].

## Tipos de láser

Teniendo en cuenta el medio activo, a continuación se enumeran los láseres más comunes y en qué año se inventaron.

**Láser de gas** (1964): Están compuestos por gases como el  $CO_2$ , que emite en el infrarrojo o el He-Ne que tiene una longitud de onda  $\lambda = 632,8$  nm, asociada al color rojo, y son excitados por medio del *bombeo eléctrico*.

**Láser de estado sólido** (1960): Entre sus materiales activos destacan los antes mencionados rubí y Nd:YAG, los cuales se excitan mediante *bombeo óptico*.

**Láser líquido** (1980): Su material activo es un colorante líquido como la rodamina 6G, que tiene una longitud de onda  $\lambda = 570 - 610$  nm y emite un color amarillo [25]. Se utiliza el *bombeo óptico* (láser de argón o lámparas de flash) para excitar sus átomos.

**Láser de diodo** (1962): Son pequeños láseres que contienen materiales semiconductores y que se excitan mediante *bombeo eléctrico*. Un ejemplo es el de As Ga, que emite luz infrarroja. El desarrollo de este tipo de láser supuso un gran cambio en nuestra vida cotidiana, dando lugar a los discos compactos, impresoras láser, lectores de código de barras, depilación corporal, punteros láser etc...[26]

## 2.5. Características del láser

El láser tiene ciertas características que le diferencian de forma determinante frente a otras fuentes de luz, y que se enumeran a continuación.

- **Monocromaticidad**

La luz emitida por el láser tiene una única longitud de onda o una banda de valores de  $\lambda$  muy estrecha, fijada por el medio activo. Esto se contrapone, por ejemplo, con la luz del sol, la cual es una combinación de distintos valores de  $\lambda$ .

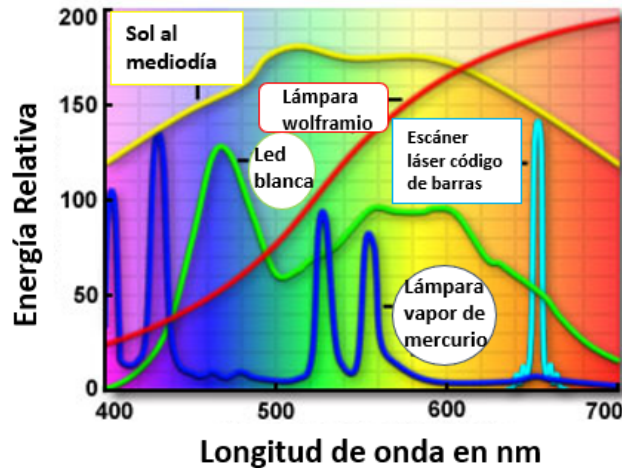


Figura 16: Diferencias entre los espectros de emisión de la luz del sol al mediodía, una lámpara de wolframio y de vapor de mercurio, luz led blanca y la luz de un escáner de código de barras.

(Adaptada de

<https://www.olympus-lifescience.com/en/microscope-resource/primer/lightandcolor/lightsourcesintro/>)

La Figura 16 da una idea de las diferencias entre un láser de código de barras, que sólo emite luz roja con una longitud de onda de 650 nm y el espectro de emisión del sol al mediodía, el cual emite en muchas longitudes de onda, y por tanto, en varios colores. La longitud de onda del láser, a diferencia de la del sol, está restringida a un valor muy concreto.

#### ■ Coherencia

Las ondas de luz emitidas por un láser poseen una gran coherencia espacial y temporal. La coherencia temporal hace que la onda conserve la propiedad de monocromaticidad de forma casi perfecta. Consecuencia de esto es que, al viajar a la velocidad de la luz se puede determinar con exactitud la posición del tren de ondas en cada momento exacto, así como la intensidad de los campos eléctricos y magnéticos de los que consta en cualquier momento y posición a partir de un origen. En cuanto a la coherencia espacial, es la propiedad que tiene la luz láser en cuanto a que la deriva direccional que puede tener, además de ser muy pequeña en relación a otras fuentes de luz, permanece constante en todas las zonas circundantes del eje axial de propagación de la onda láser. Esta característica permite la perfecta colimación del haz láser por medio de los sistemas ópticos adecuados, lográndose con ello un haz perfectamente cilíndrico y de prácticamente nula dispersión.

#### ■ Direccionalidad

Las ondas de luz emitidas por el láser son paralelas, esto hace que la luz se concentre en un haz con un cierto diámetro y que pueda orientarse (colimación) para que no diverja incluso a largas distancias. Esto es beneficioso, ya que al ser una luz de largo alcance hace que mantenga la energía a pesar de la distancia recorrida. Esto deriva en que el haz láser sea muy manejable. Además, esta característica es consecuencia de la alta coherencia espacial que tiene la luz láser.

- **Alta intensidad**

La coherencia espacial permite dirigir el haz a través de lentes y concentrarlo en un punto muy pequeño sin que se esparza la luz, mucho más pequeño de lo que una luz de otras características permitiría. Esto hace que tenga una alta potencia por unidad de superficie.

### 3. Aplicaciones del láser

A raíz de su descubrimiento, el láser ha ido evolucionando y con él, también sus aplicaciones. En esta sección trataremos en qué campos se han desarrollado algunas de ellas.

#### 3.1. Investigación

En este apartado analizaremos algunas de las herramientas utilizadas para muchas aplicaciones del láser: las pinzas ópticas y los pulsos ultracortos e intensos. Estas son las protagonistas del Premio Nobel de Física de 2018. Las primeras atribuidas a Arthur Ashkin y las segundas a Gérard Mourou y Donna Strickland.

##### Pinzas ópticas

La invención de las pinzas ópticas comienza con el estadounidense Arthur Ashkin en 1970. Trabajando con láseres en los AT&T Bell Laboratories observó que el láser movía partículas de polvo, por lo que supuso sería una buena herramienta para mover pequeños objetos. Experimentando con pequeñas esferas, estudió que la presión de radiación de un haz láser colimado e intenso podía ejercer fuerza sobre partículas dieléctricas en el aire o agua. La luz láser desplazaba las partículas hacia adelante y si éstas tenían un índice de refracción mayor que su entorno las atraía hacia el centro del haz [27]. En la Figura 17 se describe esquemáticamente este comportamiento.

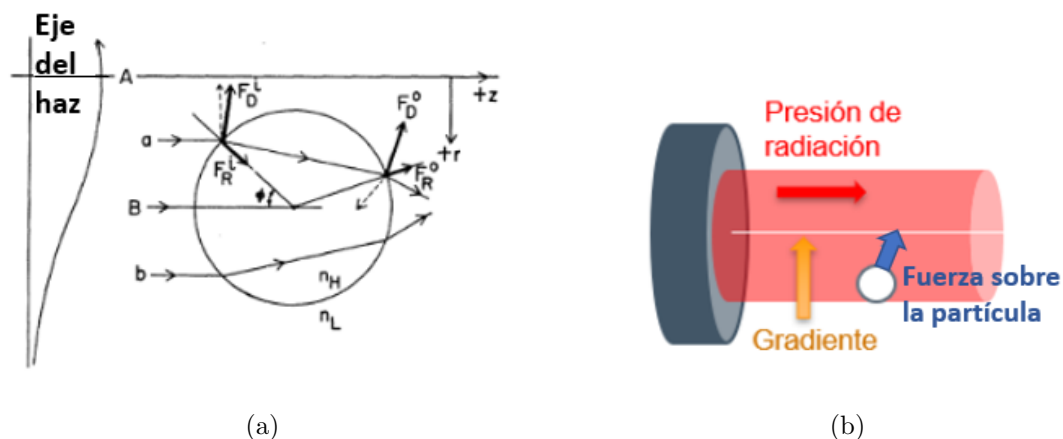


Figura 17: Dos formas de entender la presión de radiación y el gradiente de intensidad que percibe una partícula iluminada por un láser. **a)** Partícula dieléctrica esférica de índice de refracción  $n_H$  en un medio de índice de refracción  $n_L$  iluminada por un haz de luz láser. **b)** Esquema de una partícula al percibir la presión de radiación y el gradiente de intensidad de un haz de luz láser.

(Fuente: a) Adaptada de Arthur Ashkin, “Acceleration and trapping of particles by radiation pressure”, *Physical Review Letters*, vol. 24, pág. 157, 1970 y b) Composición propia.)

La partícula de la Figura 17a tiene un índice de refracción  $n_H = 1,58$ , mayor que el de su entorno  $n_L = 1,33$ . Además, los rayos de luz que inciden sobre ella (a, B, b) al adentrarse en un entorno diferente sufren ciertas fuerzas de reflexión y refracción:  $F_D^i, F_R^0, F_D^0, F_R^i$ . La suma de estas fuerzas hace que el movimiento de la partícula sea hacia adelante y hacia el centro del haz. La fuerza que atrae a la partícula al centro es una fuerza transversal en la dirección del gradiente de intensidad de luz del haz, es decir, sería atraída a la zona de máxima intensidad del eje central del haz [28].

Esto conduce al estudio de “la trampa de levitación óptica en el aire”, que construyó Ashkin. Si el haz se dirige verticalmente hacia arriba, las partículas quedan atrapadas en un punto debido a que la presión de radiación del haz láser compensa la fuerza de la gravedad [29], como se muestra en la Figura 18.

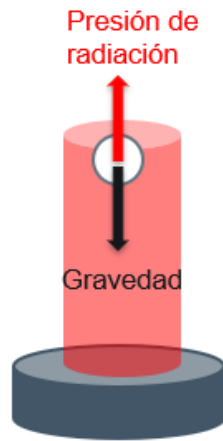


Figura 18: Esquema de la trampa de levitación óptica.  
(Fuente: Composición propia.)

Para hacerse una idea de las intensidades o potencias del láser que se manejarían en esta situación, plantearé el siguiente ejercicio [30]: ¿De qué intensidad y potencia hay que dotar a un láser con el objetivo de hacer levitar una esfera de diámetro  $d = 20 \mu\text{m}$  en contra de la fuerza de la gravedad?

En primer lugar supondré que se trata de una esfera de plástico a la que le asignaré la densidad del agua,  $\rho = 0,997 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ . La igualdad que debería plantearse, entonces sería la fuerza del láser igual al peso de la esfera:

$$F_{\text{láser}} = mg. \quad (25)$$

Hay que tener en cuenta que, a su vez,

$$F_{\text{láser}} = P_{\text{radiación}} A, \quad (26)$$

siendo  $A$  el área en la que incide la luz en la esfera y  $d$  el diámetro que abarca,  $A = \pi \frac{d^2}{4}$ . Como ya hemos visto, la presión de radiación se define como la intensidad del haz,  $I$ , entre la velocidad de la luz  $c$ :

$$P_{\text{radiación}} = \frac{I}{c}. \quad (27)$$

Insertando la ecuación (27) en (26) y, esta última en (25), se obtiene:

$$\frac{I\pi d^2}{4c} = mg, \quad (28)$$

siendo  $m = \rho V = \frac{\rho\pi d^3}{6}$ . Aplicando esto a (28) y, despejando la intensidad  $I$ :

$$I = \frac{2\rho dgc}{3} \quad (29)$$

que sustituyendo los datos mencionados anteriormente, se obtiene  $I = 3,9 \times 10^7 \frac{W}{m^2}$ . Por otra parte, la potencia del láser es,  $P = IA$ :

$$P = \frac{1}{4}I\pi d^2, \quad (30)$$

que sustituyendo los datos da  $P = 7,53 \text{ mW}$ .

Aparentemente es poca potencia, pero aplicada a una pequeña superficie como es la esfera considerada, entonces la densidad de potencia resultante es alta.

En 1986 Ashkin junto a su equipo crean las **pinzas ópticas**. En ellas, se hace pasar el haz láser a través de una lente, esto genera una fuerza de gradiente opuesta a la dirección de propagación del haz, que se contrapone a la presión de radiación, lo cual permite mantener confinada la partícula [27] [31].

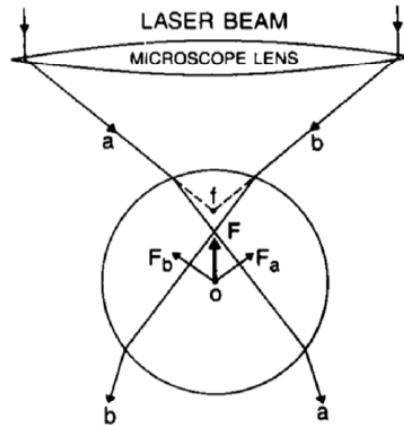


Figura 19: Los rayos láser **a** y **b** atraviesan la lente y acaban penetrando en la esfera dieléctrica, generando así una fuerza de gradiente opuesta a la dirección de propagación. (Fuente: A. Ashkin y J. M. Dziedzic, “Optical Trapping and Manipulation of Single Living Cells Using Infra-Red Laser Beams”, *Berichte der Bunsengesellschaft für physikalische Chemie*, pág.256, 1989.)

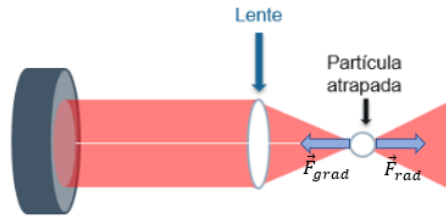


Figura 20: Esquema simple de las pinzas ópticas.  
(Fuente: Composición propia.)

### Pulsos ultracortos y ultraintensos

Dentro de las aplicaciones del láser se ha tenido como objetivo conseguir pulsos ultracortos y muy intensos. Entre los años 1960 y 1985 se logró aumentar en varios órdenes la intensidad de los haces, como se representa en la Figura 21. Parecía que esa situación se estancaba, ya que uno de los inconvenientes era que el aumento en la intensidad generaba daños en el material de amplificación. Fue gracias a Donna Strickland y Gérard Mourou y la técnica CPA (Chirped Pulse Amplification o Amplificación de pulso gorjeado) que desarrollaron, inspirada en las largas ondas de radio, que se solucionó este problema.

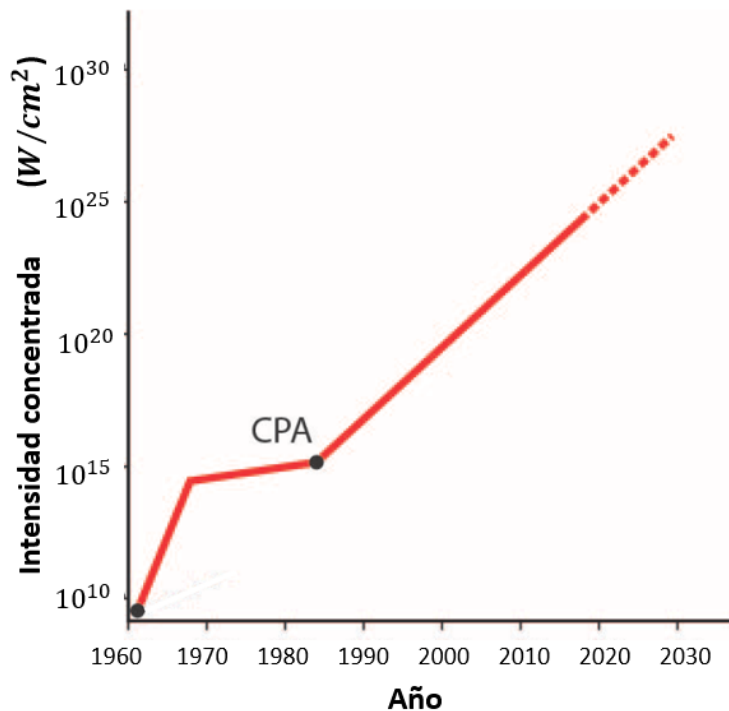


Figura 21: Órdenes de intensidad logrados a lo largo de los años. La técnica CPA llegó en 1985.

(Adaptada de The Nobel Committee for Physics, “Groundbreaking inventions in laser physics”, *Scientific Background on the Nobel Prize in Physics 2018*, pág. 6.)



La técnica CPA se basa en tres pasos que se describen en la Figura 22:

- **1-Alargar un pulso corto.** Se parte de un pulso corto que se estira, reduciendo así su potencia máxima.
- **2-Amplificar el pulso.** El pulso previamente estirado se amplifica en un material amplificador sin dañar este material.
- **3-Comprimir el pulso.** Finalmente, se comprime el pulso amplificado consiguiendo así un pico altísimo de potencia.

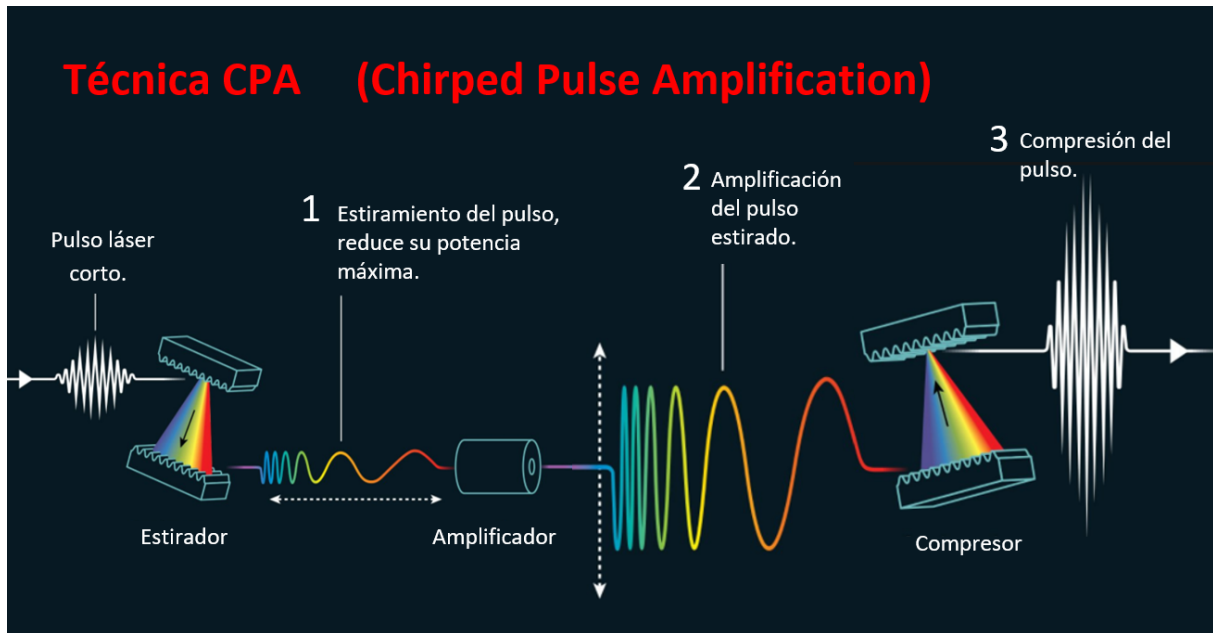


Figura 22: Técnica CPA.

(Adaptada de The Royal Swedish Academy of Sciences, The Nobel Prize in Physics 2018. Popular Science Background, pág. 4.)

La expresión que nos proporciona la potencia del pulso viene dada por:

$$P = \frac{E}{\Delta t} \quad (31)$$

siendo  $E$  la energía del pulso y  $\Delta t$  la duración del mismo.

Por lo tanto un pulso con una  $E = 1J$  y una duración de un femtosegundo ( $1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$ ),  $\Delta t = 10^{-15} \text{ s}$ , proporciona una potencia de  $P = 10^{15}W$ , es decir, 1PW (petavatio). Para darnos cuenta de la gran potencia que es, podemos compararlo con la potencia de una bombilla, un petavatio nos proporciona una potencia 100 billones de veces mayor que la de una bombilla.

Actualmente se está trabajando para obtener pulsos aún más cortos. Este proyecto se llama ELI (Extreme Light Infrastructure) (Figura 23) y tiene tres sedes en Europa: una

en Hungría, donde están trabajando con pulsos de attosegundos ( $1 \text{ as} = 10^{-18} \text{ s}$ ), otra en la República Checa, con haces de partículas de alta energía, y en Rumanía con física nuclear.

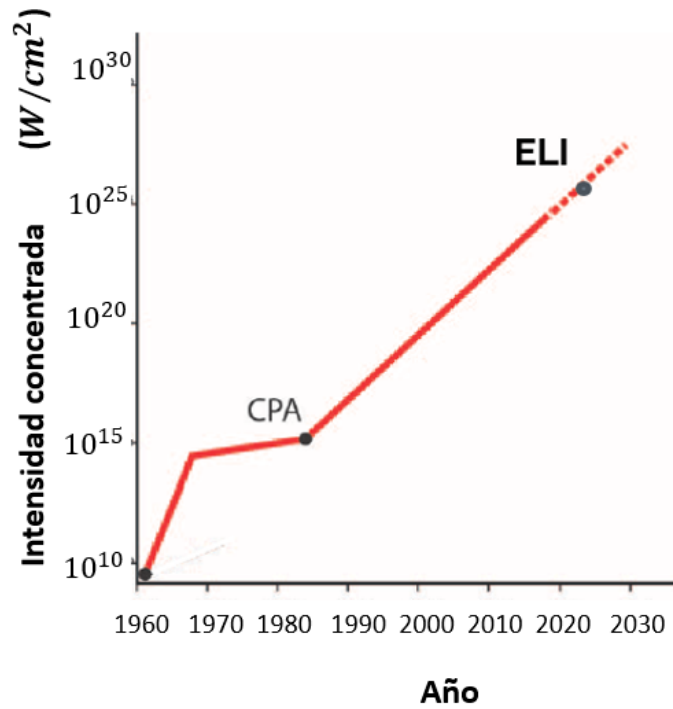


Figura 23: Órdenes de intensidad logrados a lo largo de los años. Actualmente está en marcha el proyecto ELI con el que se quiere lograr pulsos aún más intensos.

(Adaptada de The Royal Swedish Academy of Sciences, The Nobel Prize in Physics 2018. Popular Science Background, pág. 6.)

Los pulsos ultracortos e intensos tienen innumerables aplicaciones. Con pulsos de femtosegundos se puede llegar a ver qué sucede en las moléculas o átomos y seguir los procesos moleculares o atómicos que suceden en tiempos tan cortos. Un attosegundo es lo que tardaría la luz en atravesar una molécula de agua. Otro ejemplo de aplicación de estos pulsos es la fabricación de “stents”, que se usan en medicina para agrandar los vasos sanguíneos, o la ahora tan común cirugía ocular. El láser es una herramienta que también permite cortar objetos o taladrar agujeros (Figura 24). Un pulso más rápido como el de femtosegundos de la Figura 24b es más preciso y provoca un daño menor en el material en el que incide que el de nanosegundos (Figura 24a).

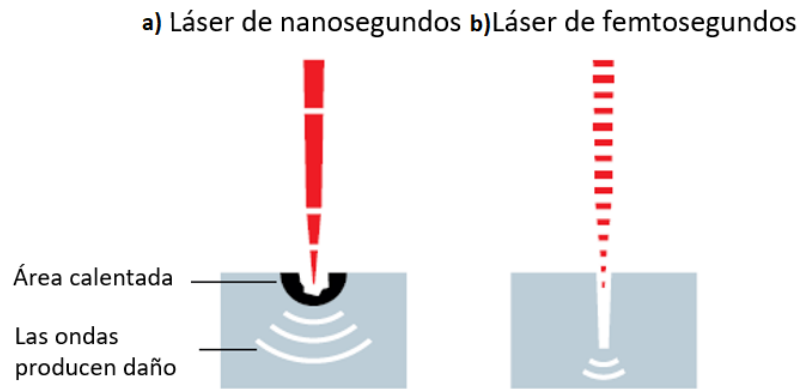


Figura 24: Comparación de los efectos de a) un láser de nanosegundos y un láser b) de femtosegundos.

(Adaptada de The Royal Swedish Academy of Sciences, The Nobel Prize in Physics 2018. Popular Science Background, pág. 5.)

En cuanto al mundo de la física, los pulsos ultracortos de attosegundos han permitido analizar electrones, hecho hasta ahora muy complicado debido a los tiempos tan cortos en los que suceden sus movimientos y cambios. La Figura 25 muestra diferentes tiempos requeridos para distintos procesos, nos da una visión de lo rápidos que pueden llegar a ser los pulsos para analizar átomos. El cronómetro proporciona una resolución de 1s que el cerebro humano es capaz de discernir y cuantificar. El obturador típico de una cámara de fotos está compuesto por un sistema mecánico programable mediante mecanismos para que la abertura sea hasta de una milésima de segundo. Los tiempos en los que ocurren reacciones químicas son más cortos. En el mundo de la electrónica, en el que por ejemplo una señal actúa en un elemento semiconductor, como un transistor, la respuesta de éste es de  $10^{-9}$  s.

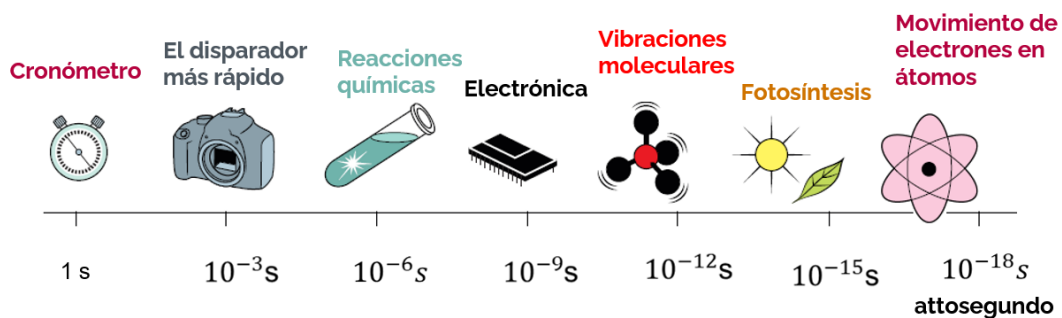


Figura 25: Tiempos involucrados en distintos procesos.

(Adaptada de The Royal Swedish Academy of Sciences, The Nobel Prize in Physics 2018. Popular Science Background, pág. 5.)

### 3.2. Biología

Uno de los ámbitos en los que las pinzas ópticas han sido de gran utilidad ha sido la biología. Con ellas se han podido manipular objetos menores de  $10\ \mu\text{m}$  así como virus, células, bacterias, o proteínas y analizar sus comportamientos o características. Además, se han empleado para estudiar motores moleculares como la kinesina y analizar la vida interior de las células.

En el campo de la biología celular las pinzas ópticas se han convertido en herramientas que son capaces de agarrar, observar, girar, atraer, empujar o cortar como si de unas “tijeras” se tratara, y realizar una cirugía de gran precisión. Con estos láseres podrían cortarse enlaces moleculares o calentar algunas zonas concretas de las células. Así mismo, son capaces de manipular células y cromosomas sin causar daños a su estructura. En la Figura 26 se muestra una representación de estas aplicaciones. [32].

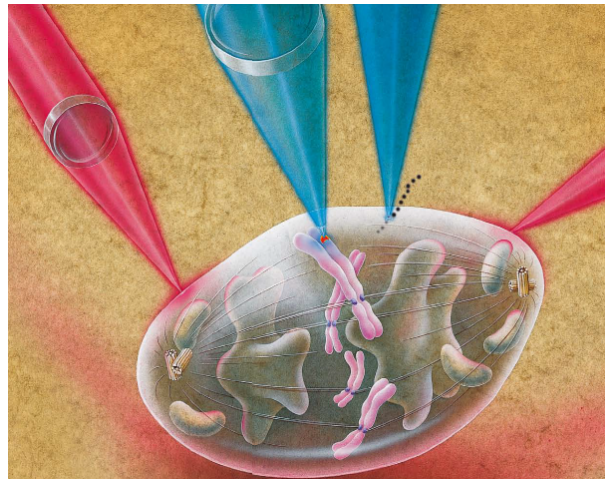


Figura 26: **Tijeras y pinzas de láser.** Las pinzas rosas sujetan la célula dejándola fija, mientras que la pinza azul clara la atraviesa para extraer un gen defectuoso. El haz azul oscuro abre un pasillo en la membrana celular para obtener una secuencia genética (puntos negros).

(Fuente: Michael W. Berns, “Tijeras y pinzas láser”, *Temas Investigación y Ciencia*, pág. 66, 2010.)

En cuanto al tamaño, las incisiones en la membrana pueden ser de hasta un micrómetro y se sellarían muy rápidamente. A esto se le llama optoporación, y se está estudiando aplicarlo a las plantas, cuya membrana es bastante rígida comparada con la animal, con el fin de manipularlas genéticamente. Por otra parte, mediante microscopia se ha comprobado que la mancha focal de un láser sería algo menor que su longitud de onda y el punto efectivo donde haría efecto menor que el diámetro de dicha mancha. Esto se debe a que la energía del láser tiene una distribución gaussiana y sólo el pico máximo de energía podría afectar al orgánulo.

Otra aplicación posible mediante las tijeras de láser es la manipulación de gametos humanos en el proceso de implantación asistida. Este método no provocaría ningún daño al embrión al no estar involucrados productos tóxicos.

Otra de las innumerables aplicaciones es la holografía óptica en la que se usan miles de pinzas ópticas para separar células sanas de infectadas, algo que podría ser muy útil contra ciertas enfermedades como la malaria [33].

### 3.3. Medicina

La incorporación del láser a la medicina ha supuesto una gran mejora para este campo, ya que ha permitido llevar a cabo procedimientos que eran imposibles de practicar mediante otros métodos. En la actualidad es posible cortar, coagular o vaporizar mediante el láser; esto ha permitido trabajar con tejidos sin tener que manipularlos en exceso, acceder a zonas infectadas sin dañarlas o a distintas cavidades del cuerpo, todo ello reduciendo el tiempo operatorio.

Uno de los láseres más usados en medicina y cirugía es el láser de luz verde formado por argón, el cual tiene una longitud de onda de 514.5 nm y una potencia de 4 a 20 vatios. Es válido para cortar, coagular y volatilizar. Es adecuado para el proceso de fotocoagulación, el cual aumenta la temperatura local de un tejido de 37°C a 65°C. Es útil también para tratar lesiones dermatológicas (destrucción de melanomas o tatuajes). Además, es habitual en oftalmología, debido a que permite la fotocoagulación de la retina [34] [35]. Debido a que la melanina de la retina tiene un color marrón oscuro, absorbe la luz verde del láser del argón dejando los tejidos de alrededor inalterados, debido a que sus características no absorben la luz de esta longitud de onda [36].

El método más extendido para las cirugías oculares es el Lasik, que modifica la forma de la córnea extrayendo una delgada capa de la misma con el fin de que las imágenes se enfoquen en la retina, Figura 27, [37] [38].

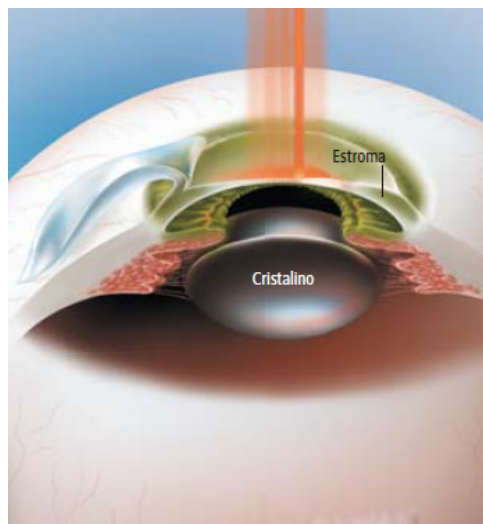


Figura 27: **Cirugía Lasik.** Se procede a hacer un corte en la córnea, dejando destapado el estroma. Se incide con luz láser para vaporizar células remodelando así la córnea, haciéndola más plana o dotándole de inclinación dependiendo de cuál sea el problema.

(Fuente: Mark Fischetti, "Buena Vista", *Temas Investigación y Ciencia*, pág. 92, 2004.)

En la cirugía ocular también es habitual el láser de fluoruro de argón, que con su radiación en la región del ultravioleta permite eliminar mediante pulsos material de la córnea y corregir miopías, astigmatismos o hipermetropías.

Por otra parte, el láser de  $CO_2$  es utilizado para cortar y vaporizar tejido con una longitud de onda de 10.600 nm y una potencia de 5 a 50 vatios. Se fotovaporiza el agua del tejido donde incide la luz láser y puede incrementar la temperatura del tejido de  $37^\circ C$  a  $400^\circ C$ . Es apropiado para los procesos de gran potencia como la fotodisrupción, donde se hace estallar la célula llegando a  $20.000^\circ C$  y pudiendo destruir lesiones tumorales y malignas. Se utiliza también para destruir lesiones que puedan dar lugar al cáncer del cuello uterino.

Asimismo, el láser de Nd:YAG es útil para llegar a cavidades mediante un endoscopio, ya que es apropiado para viajar a través de fibras ópticas, permitiendo así solucionar lesiones de estómago o esófago, de tráquea o problemas urinarios. Tiene una potencia de 20 a 120 vatios

Los láseres de baja potencia se utilizan en procesos de fotoradiación donde se eleva la temperatura en sólo  $2^\circ C$  y permite acelerar procesos fisiológicos [34] [35].

### 3.4. Industria

Las aplicaciones del láser hace años que llegaron a la industria, se utilizan sobre todo en los campos de corte de materiales y soldadura de metales, además de en procesos de mecanizado como el SLM (Selective Laser Melting) o en mediciones de precisión.

#### Corte y Soldadura

Debido a las diversas características que puede tener la luz láser dependiendo de su longitud de onda, hay materiales susceptibles de ser modificados con algunas concretas. En este ámbito las características de los materiales y la longitud de onda del láser juegan un papel importante.

Ciñéndonos al corte, los materiales que absorben la radiación más fácilmente, y por ello donde más se puede aplicar el láser, son los no conductores como la madera, el plástico, el caucho... Estos materiales absorben la energía de la luz láser consiguiendo el efecto que deseamos, vaporizarlo. La reflectividad de los materiales es importante en este proceso y está relacionada con la conductividad eléctrica. A más baja conductividad eléctrica, menos reflectivos son los materiales, por lo que absorben mejor la energía y se hace más sencillo cortarlos. Este sería el caso de los mencionados aislantes eléctricos, que podrían ser cortados con una longitud de onda larga como la del láser de  $CO_2$  de  $10.6 \mu m$ .

Los metales son más problemáticos, ya que tienen una reflectividad más elevada. Hay diversos tipos, los que tienen una conductividad eléctrica más alta y por tanto más reflectividad como el cobre, aluminio, oro o la plata, los cuales son más difíciles de cortar con longitudes de onda larga como la del  $CO_2$ . En la Figura 28 observamos este comportamiento. En cambio, si se incide sobre estos con láseres de longitud de onda más cercana

a la región visible, como el láser de Nd:YAG de  $1.06 \mu\text{m}$ , serían más fáciles de cortar. Esto es debido a que, incidiendo con una longitud de onda menor, son menos reflectivos y absorben más energía, como se puede ver en la Figura 28. Al dotar al láser con picos de pulsos más energéticos, es más fácil la penetración en el material [39].

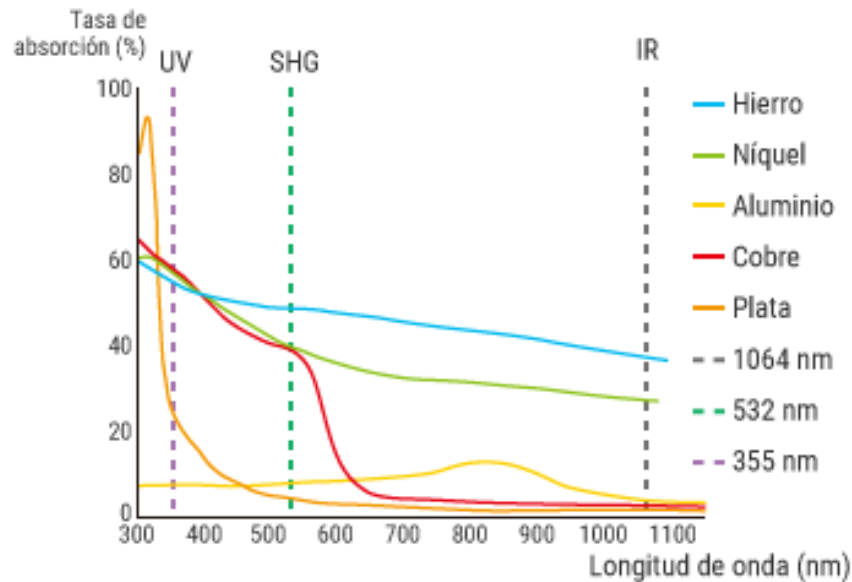


Figura 28: Tasa de absorción de metales en función de la longitud de onda del láser. (Fuente: <https://www.keyence.com.mx/ss/products/marketing/lasermarker/knowledge/variety.jsp>)

El hierro, al tener una conductividad eléctrica relativamente baja, se podría cortar con un láser que abarque una amplia región de longitud de onda, como se puede entender del comportamiento de la Figura 28.

A continuación, se muestra una tabla con los láseres más utilizados en corte o perforación [36]:

Láser	Longitud de onda ( $\lambda$ )	Potencia (W)	Pulsos/segundo
<b>Cromo-rubí</b>	690 nm	40	1
<b>Neodimio-vidrio</b>	1.060 nm	40	0.5
<b>Neodimio-YAG</b>	1.060 nm	400	400
<b>Dióxido de carbono</b>	10.600 nm	50-1.500	5000

En el ámbito de la soldadura de materiales se emplean láseres continuos. En esta práctica es importante tener en cuenta el punto de fusión del material, para poder fundirlo y finalmente unir las distintas partes [39]. Es importante ajustar la potencia del láser para que funda los materiales en vez de volatilizarlos. Algunas de las ventajas que tiene frente al método tradicional de soldadura, es que se pueden soldar diferentes materiales y no usar varillas fundentes, las grietas se reducen y es más fácil soldar zonas con difícil acceso.

## Medición

Otra de las aplicaciones del láser no sólo en la industria, sino también en la vida doméstica son los medidores láser, capaces de medir distancias con una alta precisión (Figura 29).



Figura 29: Medidor de distancia láser.

(Fuente: <https://blog.bextok.com/medidor-laser-una-ayuda-medir-sin-esfuerzo/> )

## SLM: Selective Laser Melting

Una de las técnicas novedosas es el SLM (Selective Laser Melting) [40]. Esta técnica convierte un polvo metálico en un objeto sólido, creando piezas y figuras muy complicadas, imposibles de hacer mediante métodos convencionales (Figura 30).

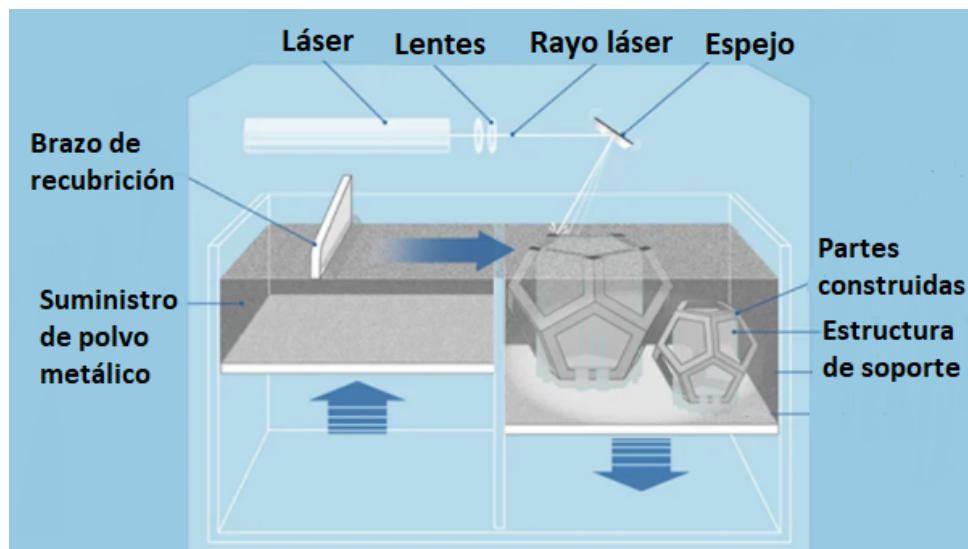


Figura 30: Técnica SLM. La placa de la izquierda añade una fina capa de polvo metálico que luego el láser se encarga de fundir con una forma concreta. Después, la plataforma donde se crea la figura desciende para que el proceso pueda continuar.

(Adaptada de Additively.com )

Este concepto de construcción de la pieza es utilizado en algunas impresoras 3D que utilizan resinas o plásticos como material de construcción. Son útiles para hacer piezas sin mucha resistencia, a diferencia de algunas hechas mediante SLM para la aeronáutica. El método de construcción es el mismo, pero crean piezas con fines muy distintos.



### 3.5. Vida cotidiana

El láser está presente en nuestro día a día, y prueba de ello son por ejemplo, los lectores de código de barras de las tiendas. Estos dispositivos suelen iluminar el código de barras con una luz de 645 nm a 690 nm de longitud de onda, es decir, con luz roja. Unos espejos situados dentro del aparato permiten que la luz láser analice el código, y se convierta en forma de onda, que después un decodificador convierte a números y letras para enviarlos a un terminal.

Los punteros láser son muy habituales en presentaciones para destacar algo de interés. No son dañinos para los ojos, ya que su potencia es de 1 mW o menos, muy baja. Además, hay otra clase de punteros con más potencia dedicados a la astronomía con los que se apuntan a estrellas, su potencia oscila entre 1 mW y 5 mW. Actualmente la venta de láseres está regulada, ya que además de poder causar daño en los ojos, han existido quejas de pilotos de avión que han sido cegados por estos dispositivos, también se han eliminado de los ámbitos de juego de los niños, ya que más que juguetes pueden ser armas que les dañen la visión.

El láser también está presente en la lectura de los discos Blu-ray de los ordenadores, en el ocio nocturno, etc...

## 4. Resumen y Conclusiones

La primera conclusión que se puede extraer del trabajo realizado, son las múltiples aplicaciones que tiene el láser y el cambio que ha supuesto en la forma de vida, tras su creación en 1960. Seguramente estas aplicaciones eran impensables para la comunidad científica y la humanidad. Asimismo, no es arriesgado pensar que las aplicaciones futuras serán igualmente numerosas e importantes, tal vez incluso inimaginables para la comunidad científica actual.

Uno de los pilares para explicar el funcionamiento del láser ha sido la teoría de la emisión estimulada. Sobre este fenómeno, que en sus inicios quizá fue considerada una teoría importante, creo que no se pudo llegar a imaginar el alcance que hoy en día tendría. Desde su descubrimiento se han realizado múltiples trabajos y desarrollos, los cuales a su vez se han ramificado para generar otros, y a su vez serán los cimientos para muchos futuros. Este hecho nos hace pensar sobre lo que queda por descubrir y no podemos ni sospechar. Posibles descubrimientos realizados en la actualidad, a priori sin alguna aplicación trascendental aparente, explotándolos y desarrollándolos a fondo se podrían lograr cosas hasta ahora inimaginables.

Las aplicaciones tratadas muestran una evidencia de lo importante y revolucionario que ha sido el láser en muchos ámbitos diferentes, haciendo evolucionar la forma de trabajar en muchos entornos como en la industria o en la medicina.

Una de las primordiales preocupaciones para los seres humanos es la salud y se ha visto

mejorada gracias al láser. Por ejemplo, algunas de las herramientas para realizar operaciones delicadas se han visto sustituidas por esta invención, haciendo el posoperatorio más corto y la recuperación más rápida al causar menos daño en los tejidos, mejorando así la calidad de vida de las personas.

El mundo de la industria y la fabricación y manipulación de materiales es otro claro ejemplo de las derivaciones del láser, y se ha visto muy influenciada por él. La forma de trabajar ha dado un giro notable, estando así el láser presente en los procesos de corte o soldadura que antes ocupaban herramientas menos precisas. Ha permitido entre otras muchas cosas crear piezas imposibles de fabricar hace relativamente pocos años, lo que ha sido una gran aportación y mejora para este ámbito de la fabricación. Uno de estos ejemplos son las impresoras 3D.

No menos importante es el campo de la biología, influenciada también por esta valiosa herramienta capaz de mejorar la vida de las personas ayudando a problemas comunes como la implantación asistida, con el fin de ayudar a las mujeres a quedarse embarazadas.

El éxito del láser en comparación con otras invenciones, ha sido también el poder que ha tenido de asentarse en la vida cotidiana de las personas. Es habitual el conocimiento del láser, incluso en niños, ya que muchos juguetes lo han incorporado como herramienta de juego. Al ser empleado en películas, en conciertos o en hologramas ha tenido también más presencia en el ámbito popular.

En contraposición a estas apreciables aplicaciones, diría que el láser tiene una cara b. El mundo militar se ha beneficiado de ciertas aplicaciones útiles, por ejemplo para lanzamientos guiados de misiles, en mi opinión moralmente cuestionables.

Sus aplicaciones por tanto han sido, y están siendo, de gran utilidad para mejorar el modo de trabajar y la vida de las personas.

Por la limitación y el formato de este trabajo ha sido inviable abarcar toda la extensión de sus aplicaciones. Por ello, me he limitado a explicar las que en mi opinión son las más significativas y llamativas.

Además de las aplicaciones, este estudio ha tenido como objetivo explicar el funcionamiento intrínseco del láser a partir de la emisión estimulada y la teoría electromagnética. De esto se derivan las cuatro características del láser que le hacen diferente a otras muchas fuentes de luz y en las cuales radica su singularidad, que más allá de una fuente de luz lo convierte en una herramienta hecha de luz, potente y versátil.

Considero que muchos de los logros y éxitos alcanzados por el láser han convertido lo que pudiera parecer ciencia ficción en realidad, y tan sólo en 60 años de vida, por lo que presupongo que aún hay muchas aplicaciones y desarrollos basados en el láser por aparecer en un futuro.

## Referencias

- [1] H. K. y R. Ladenburg, “Experimental Proof of ‘Negative Dispersion’,” *Nature*, vol. 122, págs. 438-439, 1928. DOI: <https://doi.org/10.1038/122438a0>.
- [2] A. L. Schawlow y C. H. Townes, “Infrared and Optical Masers,” *Physical Review*, vol. 112, págs. 1940-1949, 6 1958. DOI: [10.1103/PhysRev.112.1940](https://doi.org/10.1103/PhysRev.112.1940). dirección: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.112.1940>.
- [3] J. Hecht, “A short history of laser development,” *Applied Optics*, vol. 49, n.º 25, págs. 99-122, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1364/AO.49.000F99>.
- [4] M. Gallardo, “Una nueva historia del láser,” *Charla-seminario “Hacia una nueva historia del láser”*, 2019.
- [5] F. M. P. Granados, “Desarrollo tecnológico en la historia de la humanidad: inventores e inventos. Gould y el láser.,” 2009.
- [6] J. Hecht, “A short history of laser development,” *Applied Optics*, vol. 49, n.º 25, págs. 117-119, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1364/AO.49.000F99>.
- [7] “The Nobel Prize in Physics 2018,” 2021. dirección: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2018/summary/>.
- [8] “The Nobel Prize in Physics 1903,” 2021. dirección: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1903/summary/>.
- [9] “The Nobel Prize in Physics 1963,” 2021. dirección: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1963/summary/>.
- [10] “The Nobel Prize in Physics 2020,” 2021. dirección: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2020/summary/>.
- [11] A. Beléndez, “La unificación de luz, electricidad y magnetismo: la “síntesis electromagnética” de Maxwell,” *Revista Brasileira de Ensino de Física*, vol. 30, n.º 2, 2008.
- [12] O. S. Niebles. (2003). “Electromagnetismo,” dirección: <https://www.monografias.com/trabajos13/electmag/electmag.shtml>.
- [13] “La luz: ondas electromagnéticas, espectro electromagnético y fotones,” dirección: <https://es.khanacademy.org/science/ap-chemistry/electronic-structure-of-atoms-ap/bohr-model-hydrogen-ap/a/light-and-the-electromagnetic-spectrum>.
- [14] M. A. R.-M. y J. L. Cervantes-Cota, “El efecto fotoeléctrico,” *Ciencia Ergo Sum*, vol. 13, n.º 3, págs. 303-311, 2006.
- [15] Z. O. of Magnitude (ZOoM). Proyecto de innovación docente, “Ecuaciones de Maxwell y ondas electromagnéticas,” *Universidad de Granada*, pág. 4, dirección: <http://www.ugr.es/~zoom/estimacion/EcuacionesdeMaxwellyondaselectromagneticas.pdf>.
- [16] A. Müller, “¿Qué es un láser?” *Temas 60. Investigación y Ciencia*, págs. 4-5, 2010.
- [17] I. B. A. y Joely Kaufman, “Laser Principles,” *Basics in Dermatological Laser Applications*, vol. 42, págs. 7-23, 2011.

- [18] A. y L.E.Vrenken, "Fluorescent lamps and low pressure sodium lamps," vol. 127, n.º 3, págs. 149-157, 1980. DOI: [10.1049/ip-a-1.1980.0025](https://doi.org/10.1049/ip-a-1.1980.0025).
- [19] G. K. y G. A. Dan MacIsaac, "Basic physics of the incandescent lamp (lightbulb)," *American Association of Physics Teachers*, vol. 37, 1999. DOI: <http://dx.doi.org/10.1119/1.880392>.
- [20] "Lámpara halógena," dirección: [https://es.wikipedia.org/wiki/L%C3%A1mpara\\_hal%C3%B3gena](https://es.wikipedia.org/wiki/L%C3%A1mpara_hal%C3%B3gena).
- [21] "Led," dirección: <https://es.wikipedia.org/wiki/Led>.
- [22] O. Svelto, *Principles of Lasers*. 2010, págs. 2-3, ISBN: 978-1-4419-1302-9.
- [23] M. M. M. y F. Sendra Portero, "LASER," *Manual de Medicina Física. Capítulo 20*, págs. 244-253, 1998.
- [24] F. S. C. y S. M. M. Gustavo Rodríguez Morales, "Ingeniería de haces láser: Propiedades, manipulación y aplicaciones," *Ingenierías*, vol. 12, n.º 44, 2009.
- [25] K. Shankarling Ganapati y Jarag, "Laser Dyes," *Resonance*, vol. 15, págs. 804-818, 2010. DOI: [10.1007/s12045-010-0090-9](https://doi.org/10.1007/s12045-010-0090-9).
- [26] D. P. M. P. A. Martínez. I. Angulo, "Principales tipos de láser y sus características," *Colegio oficial de médicos de Barcelona*,
- [27] T. N. C. for Physics, "Scientific Background on the Nobel Prize in Physics 2018. Groundbreaking inventions in laser physics. Optical tweezers and generation of high-intensity, ultra-short optical pulses," *The royal swedish academy of science*, 2018.
- [28] A. Ashkin, "Acceleration and trapping of particles by radiation pressure," *Physical Review Letters*, vol. 24, n.º 4, págs. 156-159, 1970. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.24.156>. dirección: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.24.156>.
- [29] A. A. y J. M. Dziedzic, "Optical Levitation by Radiation Pressure," *Applied Physics Letters*, vol. 19, n.º 8, págs. 283-285, 1971. DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.1653919>.
- [30] Z. O. of Magnitude (ZOoM). Proyecto de innovación docente, "Ecuaciones de Maxwell y ondas electromagnéticas," *Universidad de Granada*, pág. 1, dirección: <http://www.ugr.es/~zoom/estimacion/EcuacionesdeMaxwellyondaselectromagneticas.pdf>.
- [31] A. A. y J. M. Dziedzic, "Optical Trapping and Manipulation of Single Living Cells Using Infra-Red Laser Beams," *Berichte der Bunsengesellschaft für physikalische Chemie*, vol. 330, págs. 769-771, 1989. DOI: <https://doi.org/10.1038/330769a0>.
- [32] M. W. Berns, "Tijeras y pinzas de láser," *Herramientas de luz. Investigación y Ciencia*, págs. 4-11, 1998.
- [33] T. R. S. A. of Sciences, "The Nobel Prize in Physics 2018. Popular Science Background," 2018.
- [34] J. G. G. y Edwin Ruíz Alarcón, "Láser en medicina y cirugía," *Revista Medicina*, vol. 7, n.º 3, págs. 41-43, 1985. dirección: <https://revistamedicina.net/ojsanm/index.php/Medicina/article/view/12-7>.
- [35] J. C. Cárdenas, "Láser en medicina," *Iatreia*, vol. 5, n.º 3, pág. 215, 1993. dirección: <https://revistas.udea.edu.co/index.php/iatreia/article/view/3500>.

- [36] M.-L. Casalderrey., *Láseres. Emisores de luz especial*. Celeste Ediciones, 1995, ISBN: 8482110128.
- [37] MedlinePlus, “Cirugía ocular LASIK,” dirección: <https://medlineplus.gov/spanish/ency/article/007018.htm>.
- [38] M. Fischetti, “Buena vista,” *Investigación y Ciencia*, pág. 92, 2004.
- [39] J. y. N. C. L. Bachs, *Aplicaciones industriales del láser*. 1988, págs. 89-91, 111, ISBN: 9780198520115.
- [40] Z. L. D. C. Y. Yap C. K. Chua, “Review of selective laser melting: Materials and applications,” *Applied Physics Reviews*, vol. 2, págs. 2-4, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4935926>.