

La importancia de la Luz en nuestras vidas¹

Un repaso por la apasionante historia y relevancia
actual de la Óptica y la Fotónica

Apuntes de la Asignatura

Jesús Mirapeix Serrano

Grupo de Ingeniería Fotónica
Universidad de Cantabria



¹Asignatura enmarcada en el Programa Sénior de la Universidad de Cantabria.



Figura 1. Fotograma de la película Goldfinger, de la saga de James Bond. Fuente: Tor.com <https://www.tor.com/2014/09/17/james-bond-goldfinger-science-fiction/>

Queda prohibida, salvo excepción prevista por en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra sin contar con autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual (arts. 270 y sgts. Código Penal).

La importancia de la Luz en nuestras vidas

Mirapeix Serrano, Jesús

© 2020 Jesús Mirapeix Serrano

Universidad de Cantabria

39005 Santander

LA IMPORTANCIA DE LA LUZ EN NUESTRAS VIDAS

Estructura del Curso

Este curso se ha dividido en un total de **8 capítulos** en los que se pretende introducir al alumno los conceptos principales de la óptica y la fotónica: desde el uso de las primeras lentes de aumento hasta el uso del láser en infinidad de dispositivos y aplicaciones hoy en día.

▶ **Capítulo 1: Evolución histórica de la Óptica y la Fotónica**

Por medio de personajes clave como Arquímedes, Newton o Einstein, recorreremos la apasionante historia de la evolución de la Óptica hasta llegar a la Fotónica, con la invención de los omnipresentes láser y fibra óptica.

▶ **Capítulo 2: ¿Qué es la luz? Ondas y Partículas**

De una manera sencilla y amigable trataremos de acercarnos a uno de los “misterios” que más han preocupado y ocupado a cientos de científicos de los últimos siglos: ¿Qué es la Luz? ¿Es la luz una onda o una partícula?

▶ **Capítulo 3: Sol, Luz y Vida: comprendiendo el funcionamiento del Sol y la fotosíntesis**

La vida en nuestro planeta no existiría de no ser por el Sol y la energía que nos brinda cada segundo. De igual manera, la fotosíntesis, o lo que es lo mismo, la conversión que realizan las plantas de materia inorgánica a compuestos orgánicos gracias a la energía de la luz.

▶ **Capítulo 4: Láser, fibra óptica y su importancia en la sociedad actual: internet**

Nuestra sociedad no sería la misma si, allá por 1958, no se hubiese inventado el láser y, posteriormente, la fibra óptica. Internet, el gran fenómeno de las comunicaciones que ha revolucionado nuestra vida, no es más que luz (láser) que viaja a través del mundo por fibra óptica. Revisaremos brevemente la invención del láser, de la fibra óptica y sus fundamentos básicos.

▶ **Capítulo 5: Midiendo el mundo a través de los fotones: de la biomedicina a la ingeniería civil**

La luz no sirve sólo para comunicarnos a gran velocidad por medio de internet. También puede valernos para aplicaciones de lo más variado: desde delimitar de manera precisa células cancerígenas hasta evaluar en tiempo real el estado de un puente o una presa. En este capítulo mostraremos brevemente algunos ejemplos significativos que nos ayuden a comprender mejor esta faceta “oculta” de la luz.

▶ **Capítulo 6: El fenómeno de la visión: funcionamiento del ojo humano y animal**

Este acercamiento al mundo de la luz no sería completo si no somos capaces de comprender como funciona uno de los elementos más increíbles del cuerpo humano: el ojo y el sentido de la visión. Además, veremos las diferencias existentes con el sentido de la visión de otros miembros del reino animal.

▶ **Capítulo 7: Últimos avances de la fotónica y perspectivas de futuro**

En este capítulo final revisaremos algunos de los avances más recientes en el mundo de la óptica y la fotónica. Del mismo modo, veremos cuáles son las perspectivas de futuro de un campo de conocimiento fundamental en la actualidad y, sin duda, en las próximas décadas.

► **Capítulo 8: Experimentos en casa**

Por último, se propondrán a los alumnos una serie de sencillos experimentos que permitirán interiorizar los conceptos explicados a lo largo del curso.

Índice general

Índice general	1
4. La luz que revolucionó la era digital: el láser y la fibra óptica	2
4.1. El nacimiento de la Fotónica: la invención del láser	2
4.2. Einstein y los fundamentos del láser	3
4.2.1. Emisión espontánea de luz	4
4.2.2. Absorción	5
4.2.3. Emisión estimulada de luz	7
4.3. Breve historia de la invención del láser	9
4.4. Funcionamiento del láser	11
4.5. Evolución del láser	12
4.5.1. ¡Más pequeño!	12
4.5.2. ¡Más colores!	14
4.5.3. ¡Más rápido!	15
4.6. La invención del láser: conclusiones	16
4.7. La fibra óptica: la luz que viaja a través del vidrio	17
4.7.1. La reflexión interna total	17
4.7.2. Evolución hacia la fibra óptica	18
4.7.3. Estructura de una fibra óptica	20
4.7.4. Comunicaciones por fibra óptica	20
Índice de figuras	24

CAPÍTULO 4

La luz que revolucionó la era digital: el láser y la fibra óptica

El presente capítulo está dedicado a dos inventos fundamentales que, casi sin ser conscientes, condicionan nuestra vida actual en gran medida: el **láser** y la **fibra óptica**. Sirva como ejemplo el hecho de que **Internet**, la gran revolución en las comunicaciones de finales del siglo XX, es básicamente luz (generada por láseres) que viaja alrededor del mundo por fibra óptica.

El láser, su invención, fundamentos y aplicaciones será el tema central de la primera parte de este capítulo para, posteriormente, hablar brevemente de la fibra óptica como elemento clave en las comunicaciones ópticas.

4.1. El nacimiento de la Fotónica: la invención del láser

Con la invención del láser a finales de los años 1950s nace una nueva rama de conocimiento, la fotónica, que surge como rama de la óptica y se puede definir como la disciplina de conocimiento dedicada al ámbito en el que se solapan la óptica y la electrónica.

Importante 1.1: El rayo de la muerte

Cuando el láser es inventado alrededor de 1960, los medios de comunicación (con un evidente afán sensacionalista) lo bautizan como “**el rayo de la muerte**”. El cine enseguida se hace eco de este artilugio que da mucho juego en películas de acción como la de la imagen. ¿Reconocéis la película en la Figura 4.1?

Se trata de “Goldfinger”, de la saga de James Bond.

¿Cuándo surge el concepto del láser? Es difícil saberlo con exactitud. Desde el punto de vista de la idea de un “rayo de luz”, con capacidad de transportar energía y por lo tanto ser usado

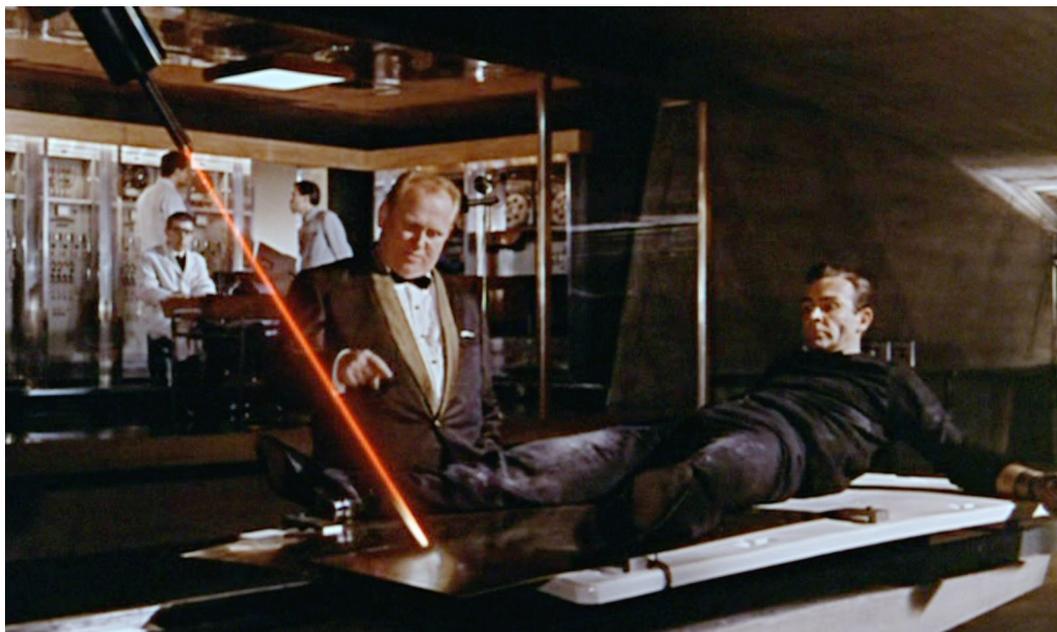


Figura 4.1. Fotograma de la película Goldfinger, de la saga de James Bond. Fuente: Tor.com <https://www.tor.com/2014/09/17/james-bond-goldfinger-science-fiction/>

como arma, tenemos el ejemplo de la novela **“La Guerra de los Mundos”** de H.G. Wells, donde no aparece sólo la idea (anticipada) del láser, sino también de otros conceptos, como relata **Miguel Uceda**¹ en su estudio:

“La guerra de los mundos” no fue la primera vez que se abordó en literatura la existencia de seres extraterrestres, pero sí desde un nuevo punto de vista, pues anteriormente el tema era tratado por los escritores de la arrogante era industrial como encuentros con otras civilizaciones más primitivas. Pues para muchos era impensable otra tecnología más avanzada que la disponible por la sociedad finisecular, así por ejemplo el director de la oficina de patentes de Nueva York solicitó en 1899 la clausura del servicio que dirigía, aduciendo la sencilla razón de que ya estaba inventado todo lo que podía inventarse”.

Evidentemente esta no era la opinión de una persona de la imaginación de Wells, no solo para idear premoniciones como las vertidas en esta novela -como las naves espaciales, el rayo láser, la guerra química o la organización de ayuda internacional ante desastres en gran escala-, sino que utiliza la fantasía para plasmar su concepción del colonialismo.

4.2. Einstein y los fundamentos del láser

La base teórica para el desarrollo del láser la aportó Einstein en su famoso artículo “Sobre la teoría cuántica de la radiación”², explicando el fenómeno conocido como **emisión estimulada** que veremos a continuación.

¹<https://pendientedemigracion.ucm.es/info/especulo/numero8/wells.htm>

²El título original del artículo era *Zur Quantentheorie der Strahlung*.

Importante 2.1: LASER

Láser es, por cierto, el acrónimo de *Light Amplification by Stimulated Emission Radiation* (luz amplificada por emisión estimulada de radiación.)

4.2.1. Emisión espontánea de luz

La luz “normal” que apreciamos habitualmente, por ejemplo la luz del Sol, se produce mediante lo que se conoce como **emisión espontánea**.

La emisión espontánea se produce cuando un átomo pierde energía. En realidad son los electrones del átomo los que pierden esa energía. Recordemos que un átomo está formado por un núcleo (protones, neutrones) y uno o varios electrones que pueden ocupar diferentes “órbitas” alrededor del núcleo. Si un electrón que está en una órbita más alejada del núcleo “salta” a una órbita inferior (ver Figura 4.2), ese electrón ha perdido energía en el proceso¹. Como sabemos que la energía no puede “desaparecer” por arte de magia, sino que se transforma, esa energía que pierde el electrón se tiene que convertir o usar en otro proceso. Lo que ocurre es que se convierte en un **fotón**; esto es, en luz.

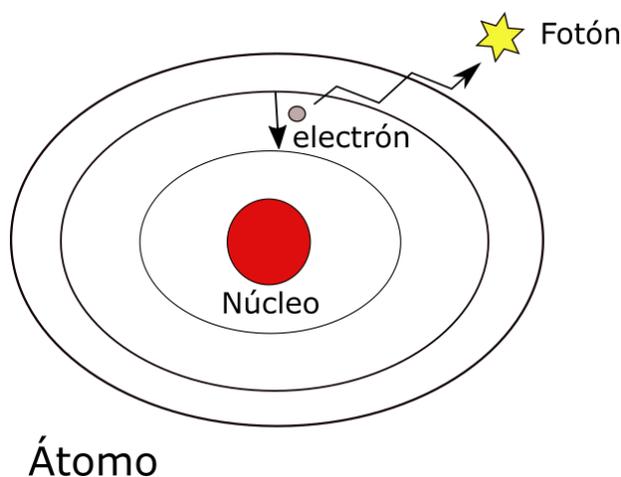


Figura 4.2. Representación esquemática del proceso de emisión espontánea de luz. Fuente: elaboración propia.

En la Figura 4.2 se puede ver la representación típica de un átomo con su núcleo (rojo, en el centro) y los electrones. Éstos pueden ocupar diferentes niveles u orbitales. Un electrón perderá energía cuando “caiga” de un nivel superior a uno inferior.

Importante 2.2: Color y λ

El color (longitud de onda λ) del fotón que se emitirá en esa emisión espontánea dependerá precisamente de la energía de ese salto entre niveles “electrónicos”.

Esto nos lleva a diferentes formas de generar la luz por radiación espontánea. Tenemos el ejemplo de la clásica **incandescencia**, donde la energía necesaria para provocar que los electrones

¹Tendrá menor energía cuando más cerca del núcleo esté.

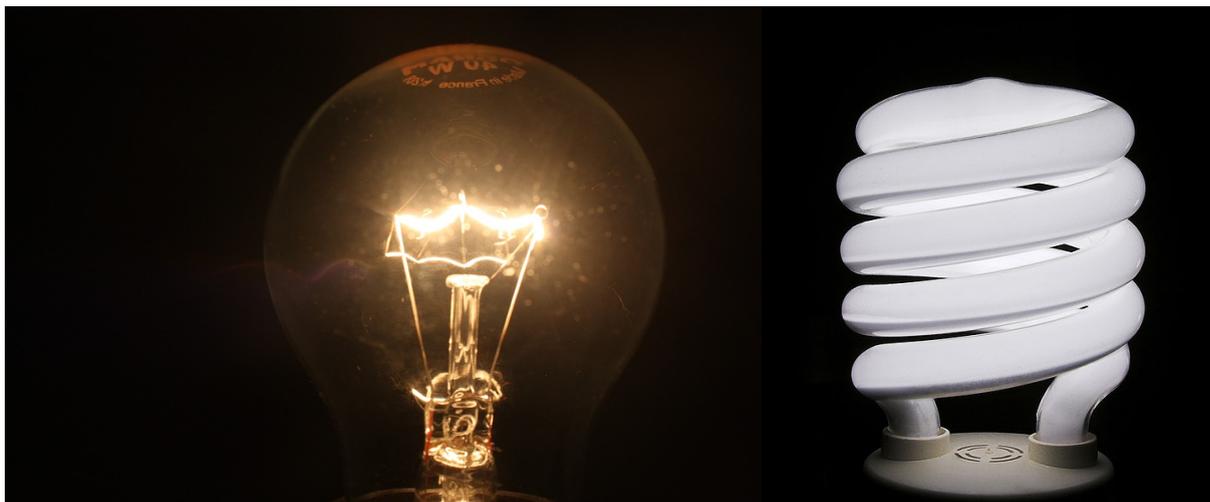


Figura 4.3. Ejemplos de fuentes de luz incandescente (izquierda) y luminiscente (derecha). Fuente: Pixabay (CC0 Creative Commons) y Wikimedia (CC-BY-SA 3.0).

suban de nivel y luego puedan generar la radiación es aportada con calor, dependiendo la radiación sólo de la temperatura alcanzada. Por otro lado tenemos la **luminiscencia**, donde la energía se puede aportar con luz, reacciones químicas, electricidad. Un ejemplo del primer tipo de radiación lo constituyen las clásicas bombillas de filamento, mientras que en el segundo caso se tiene por ejemplo las lámparas de tipo fluorescente (ver Figura 4.3).

Cuestión 2.1: Lámpara fluorescente

Busca información sobre cómo se genera la luz en un tubo fluorescente. ¿Se genera luz UV en algún momento? ¿Es peligroso que se rompa un tubo fluorescente en casa? ¿Por qué? ¿Se podría adaptar la luz generada por el fluorescente a diferentes usos, por ejemplo para un invernadero?

4.2.2. Absorción

Al igual que acabamos de comentar que los átomos pueden emitir luz si un electrón pierde energía, de la misma forma puede darse el fenómeno opuesto: **Un átomo puede absorber un fotón que choque con él.** ¿Qué ocurre con la energía de ese fotón? Pues de manera inversa que en la emisión, esa energía servirá para que un electrón pase de una órbita o nivel inferior a una superior, como se ha representado en la Figura 4.4.

Importante 2.3: Absorción de luz (I)

Como sabemos, el negro es un color que absorbe toda la radiación incidente. Sin embargo es curioso que, dependiendo del tipo de luz que empleemos, la forma de comportarse de los materiales puede cambiar. En la Figura 4.5 se presenta una imagen de un hombre con una bolsa de plástico negro en su mano, representada con luz “visible” (izquierda) e infrarroja (derecha). Mientras que la bolsa negra es completamente opaca a la radiación visible (absorbe toda la luz en ese rango de longitudes de onda), ésta deja pasar la luz infrarroja.

De hecho, podemos apreciar como con las gafas ocurre lo contrario, siendo transparentes en el visible, pero opacas en el infrarrojo.

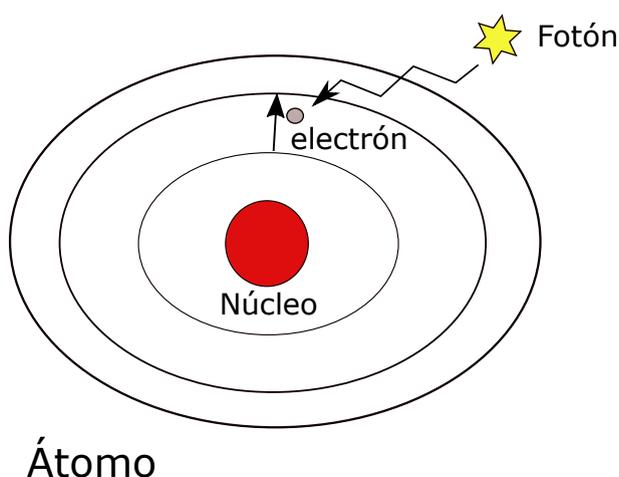


Figura 4.4. Representación esquemática de absorción de luz. Fuente: elaboración propia.

Importante 2.4: Absorción de luz (II)

El siguiente vídeo muestra el material que más luz absorbe del mundo: curioso ¿no?

<http://cnn.it/2oEk7o4>



Figura 4.5. Imagen de una persona con una bolsa de plástico negro en el visible y el infrarrojo. Fuente: NASA/Caltech.

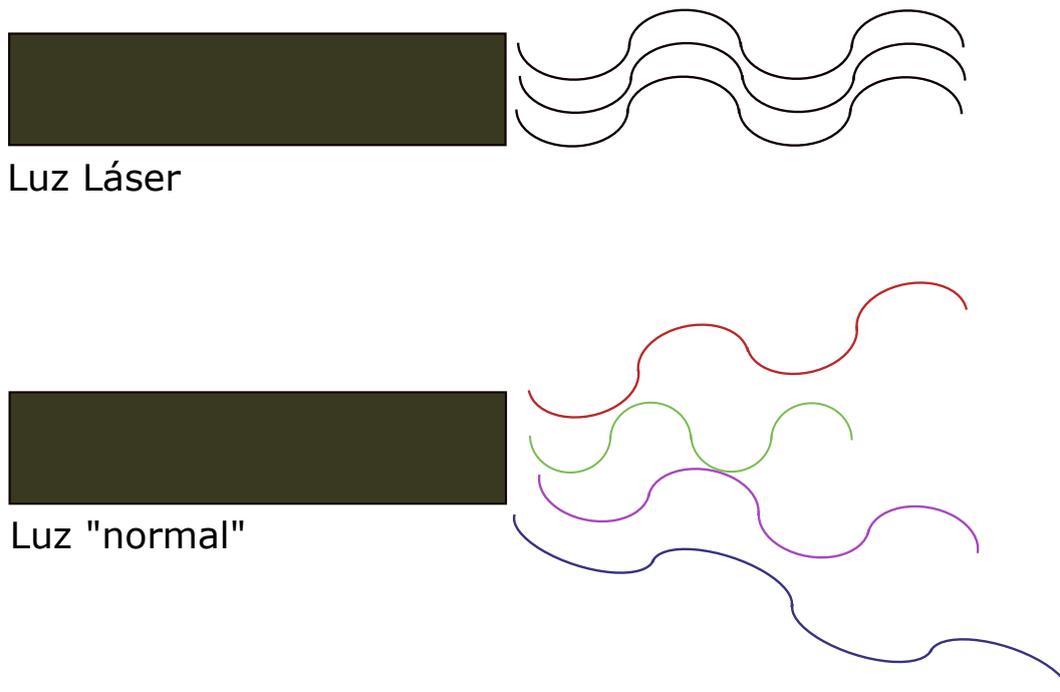


Figura 4.7. Luz láser vs. luz normal. Fuente: Elaboración propia.

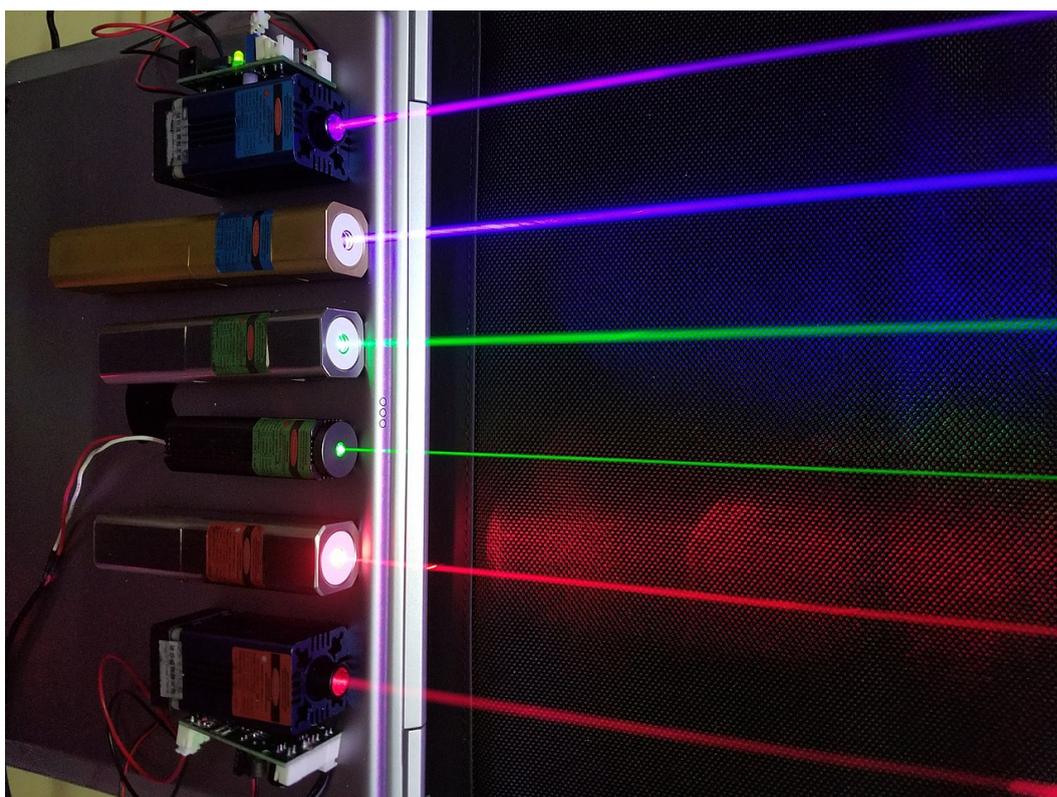


Figura 4.8. Láseres emitiendo a diferentes longitudes de onda. Fuente: Wikimedia. Licencia: CC BY 2.5 <http://bit.ly/2yzM9uF>

4.3. Breve historia de la invención del láser

La historia de la **invención del láser** es apasionante, tanto por la relevancia del hecho, como por la lucha entre diferentes equipos de investigación y el reconocimiento posterior (y pleitos asociados) de esos trabajos.

Historia del láser



Figura 4.9. Equipos involucrados en la invención del láser a finales de la década de los 50. Fuente: Elaboración propia.

Como ya se ha comentado, Einstein sienta las bases teóricas para la invención del láser en 1916 con su idea de la emisión estimulada. En los años 50 varios equipos (Townes y Schawlow de los laboratorios Bell, Gould de la Columbia University y Prokhorov y Basov de la Unión Soviética (Lebedev Physics Institute) trabajan hacia la invención del láser por separado pero de manera aproximadamente simultánea. De hecho, llegan a existir contactos entre Gould y Townes, mientras que el diseño de los rusos Prokhorov y Basov y Gould es muy similar.

Sin embargo el reconocimiento se lo llevan fundamentalmente los laboratorios Bell (Townes) y Prokhorov y Basov¹, quedando Gould despreciado en este sentido. Precisamente Gould se embarcaría en un pleito contra Townes y la oficina de patentes estadounidense que, tras nada menos que 28 años, acabaría por concederle la razón con respecto a dos patentes relacionadas con el descubrimiento del láser. Irónicamente, Gould usaría los derechos de la finalmente concedida patente para pagar los costes de los pleitos, aunque su objetivo era conseguir el reconocimiento negado durante tantos años.

¹Estos 3 científicos recibirían el Premio Nobel de Física en 1964 por sus estudios sobre el láser.

Importante 3.1: Gould y el término LASER

El término LASER fue acuñado por Gould. En la Figura 4.10 se presenta un extracto de las notas de Gould donde se recoge dicho término.

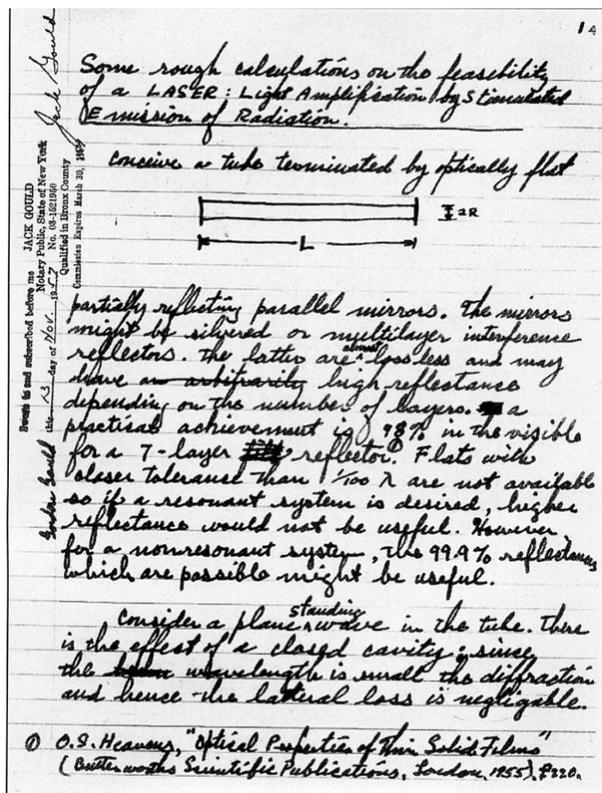


Figura 4.10. Extracto del cuaderno de notas de Gould donde aparece el término LASER. Fuente: Photonics.com.

Otra figura clave en la carrera por la invención del láser es **Theodore Maiman** que, tras colaborar con Gould, **en 1960 demuestra experimentalmente por primera vez un láser** basado en un rubí rosa y una lámpara de flash. Curiosamente la revista Physical Review Letters rechazó en un primer momento publicar los resultados que, tras una segunda rueda de prensa, se publicarían en la prestigiosa Nature. El hecho de que sus resultados se publicaran con algún retraso dio tiempo a la puesta en marcha de otros desarrollos paralelos. Por este motivo, Townes y Arthur Leonard Schawlow también son considerados inventores del láser, el cual patentaron en 1960. Dos años después, Robert Hall inventa el láser generado por semiconductor. En 1969 se encuentra la primera aplicación industrial del láser al ser utilizado en las soldaduras de los elementos de chapa en la fabricación de vehículos y, al año siguiente Gordon Gould patenta otras muchas aplicaciones prácticas para el láser.

El gran mérito de Maiman fue demostrar la relativa sencillez con que podían construirse los láseres, abriendo así las puertas a su aplicación en multitud de aplicaciones.

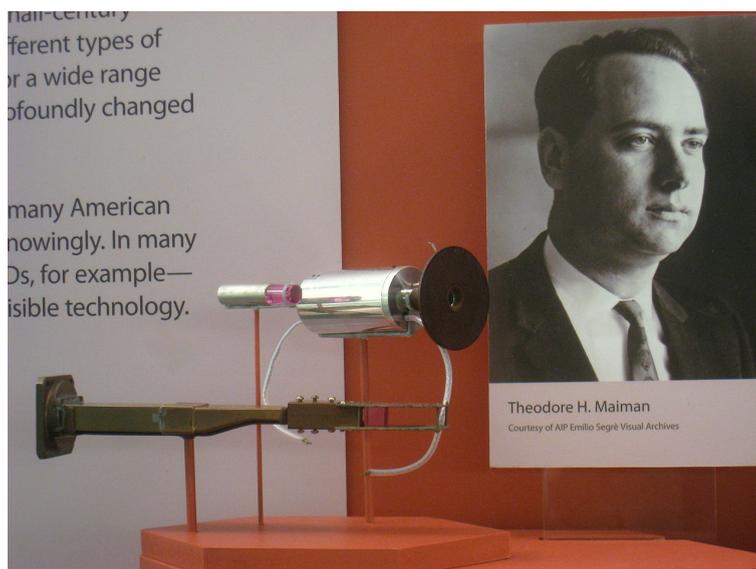


Figura 4.11. Imagen de Maiman y el primer láser demostrado el 16 de mayo de 1960 expuestos en el Museo Nacional de Historia Americana en Washington. Licencia: Dominio Público.

4.4. Funcionamiento del láser

El funcionamiento básico de un láser es sencillo y se basa en la denominada “cavidad resonante” (1 en la Figura 4.12), que básicamente es un medio con los átomos del elemento que queremos usar (y que determinará la longitud de onda (color) de la luz emitida) limitado por sendos espejos (3 y 4) que harán rebotar los fotones múltiples veces antes de salir y generar la luz deseada. Para poder provocar la emisión estimulada, lo primero que hay que hacer es aportar energía (2) a los átomos que están en 1 (denominado también medio activo) para que sus electrones suban de nivel y después puedan emitir los fotones necesarios.

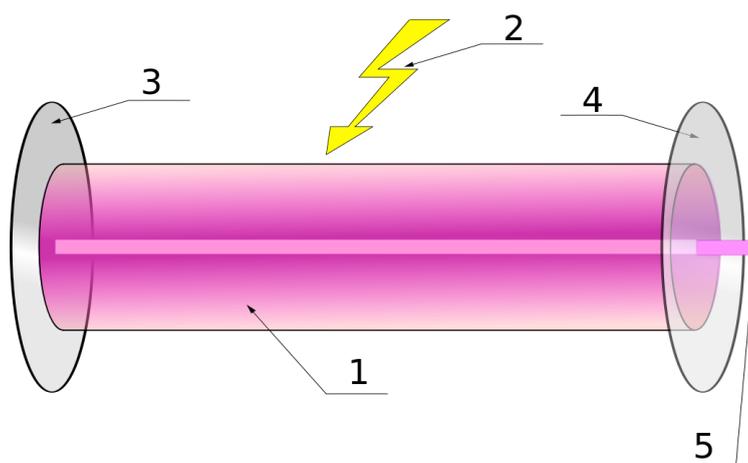


Figura 4.12. Esquema del funcionamiento de una fuente de luz láser. Fuente: Wikipedia. Licencia: CC-BY-SA 3.0. <http://bit.ly/2hLvycE>

Importante 4.1: Funcionamiento Láser

En YouTube hay muchos vídeos que muestran el funcionamiento básico de un láser. En el siguiente enlace tienes un ejemplo: <https://youtu.be/vgbBPaoR3bw>

Importante 4.2: El profesor Martín Pereda

Si tienes curiosidad por conocer los comienzos del láser y la fotónica en España, es muy recomendable la lectura de esta entrevista al profesor Martín Pereda: <http://bit.ly/21ZxrqE>.

4.5. Evolución del láser

Tras su invención, el láser fue definido como:

“Una solución en busca de un problema”

Efectivamente, el láser surge como consecuencia de los estudios teóricos de Einstein pero, en sus inicios, no estaba muy claro para qué podía ser utilizado. Con el paso de los años el láser se extenderá a multitud de aplicaciones en una gran variedad de campos de aplicación: medicina, entornos industriales, electrónica de consumo, etc.

Una vez inventado, surgirá una carrera por mejorar sus prestaciones, en concreto conseguir láseres más potentes, pequeños, que emitan en una mayor variedad de colores, más rápidos, etc. Veamos algunas de estas mejoras en detalle:

4.5.1. ¡Más pequeño!

¿Cuál es el tamaño mínimo de un láser? En la Figura 4.13 se presenta un ejemplo llamativo, donde se ha implantado un láser en la cabeza de una hormiga. Pero lo más llamativo en este sentido es que hay investigadores que ya han conseguido hacer láseres con ¡¡nuestras propias células!!¹

La miniaturización del láser es posible gracias a la invención del denominado **láser semiconductor**, desarrollado alrededor de 1962 por varios grupos (General Electric, IBM, MIT), y que permitiría la conversión de electricidad directamente en luz láser, habilitando así por ejemplo la modulación de la luz (transmisión de la información por luz).

El **diodo láser**², dispositivo fundamental hoy en día en infinidad de dispositivos de la vida cotidiana (p.ej. lectores CD, DVD, etc.) y en las comunicaciones ópticas, tiene como punto de partida el trabajo de **Herbert Kroemer** a mediados de los años 50 sobre semiconductores y, particularmente sobre heterouniones. La primera demostración de emisión de luz coherente por un diodo semiconductor (arseniuro de galio) tuvo lugar en 1962 por el científico **Robert N. Hall**, del

¹Para más información puedes consultar el siguiente artículo en Nature (en inglés): <http://www.nature.com/news/2011/110612/full/news.2011.365.html>

²Otra manera de denominar al láser semiconductor.



Figura 4.13. Láser implantado en la cabeza de una mosca. Fuente:

Láser semiconductor

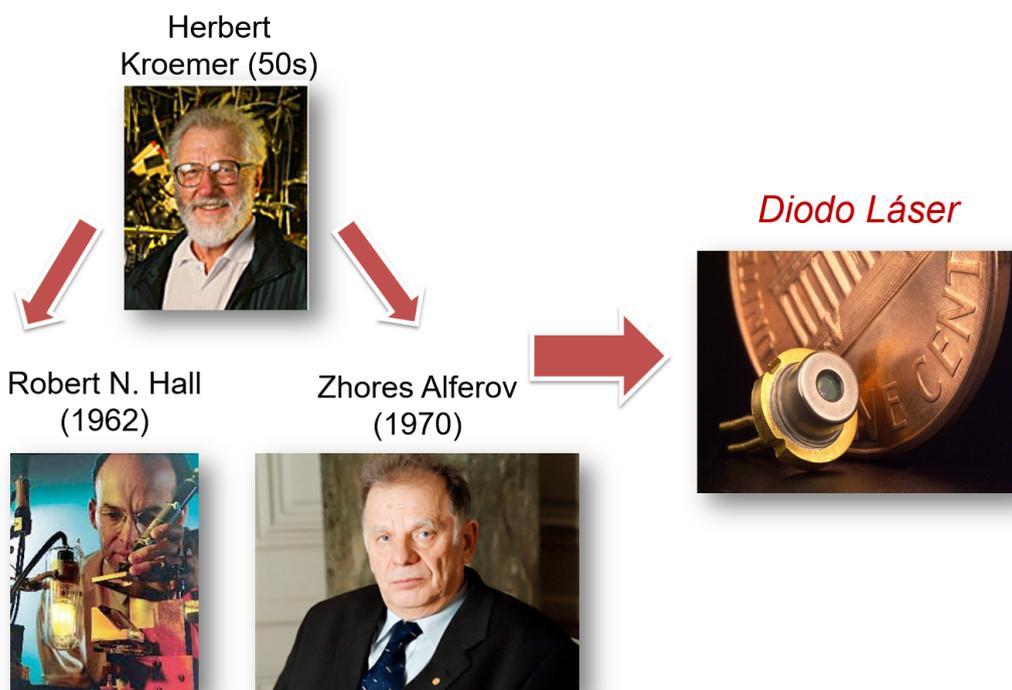


Figura 4.14. Científicos implicados en el desarrollo del diodo láser. Fuente: Elaboración propia.

centro de investigación de la General Electric. El primer diodo láser en conseguir emisión en modo continuo de operación fue propuesto en 1970 por **Zhores Alferov**.

Alferov y Kroemer compartieron el **Nobel de Física en el año 2000**.

¿A dónde nos lleva el láser semiconductor? Por ejemplo al desarrollo de los medios de soporte de información de las últimas décadas, como el **CD**, el **DVD** y, **más recientemente, el Blu-ray**. El aumento de capacidad de almacenamiento ha sido posible gracias a que, usando cada vez láseres más sofisticados, ha sido posible disminuir el tamaño de la información que se graba en estos

soportes.

En la Figura 4.15 aparece el primer CD, que data de 1982. En la Figura 4.16 se muestran los soportes de información CD, DVD, HD DVD y Blu-ray con la paulatina disminución del tamaño de la información grabada, de la mano del aumento en la “precisión” de los láseres empleados.

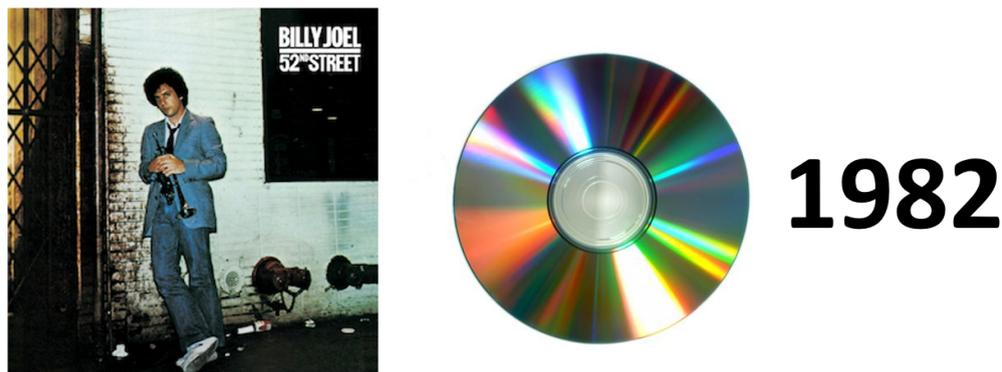


Figura 4.15. Primer CD (Compact Disc) lanzado en 1982. Fuente: Elaboración propia (ultimateclassicrock.com).

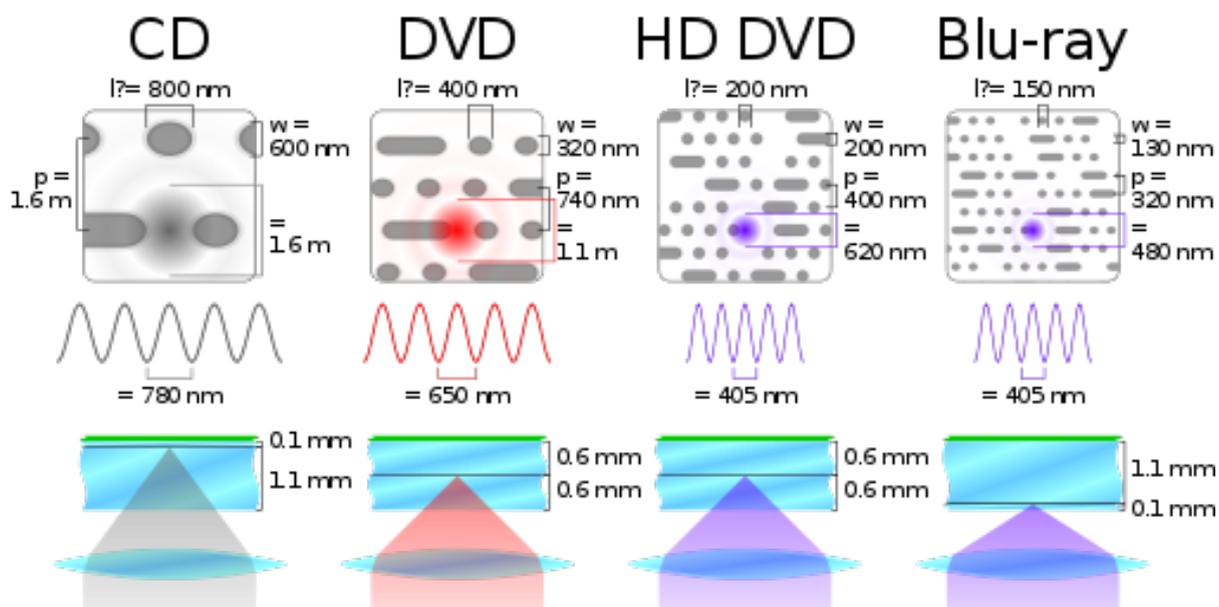


Figura 4.16. Comparativa entre los soportes de información CD, DVD, HD DVD y Blu-ray. Fuente: Wikimedia. Licencia: CC BY-SA 3.0. <http://bit.ly/2zkFw77>

4.5.2. ¡Más colores!

También ha sido muy importante el poder extender el rango de **colores o longitudes de onda** con los que se pueden fabricar láseres, para poder realizar diferentes aplicaciones. Un ejemplo muy interesante es la muy reciente invención de los **láseres de rayos-X**, que entre otras ventajas permiten radiografías de elementos pequeños con gran resolución, como podemos ver a continuación.

Las diferencias de la generación de rayos-X mediante interacción láser-materia con respecto a las técnicas habituales (tubos de rayos-X o radiación sincrotrón) se basan fundamentalmente en disponer de una fuente puntual de radiación. El foco de la imagen que se obtiene es lo suficientemente pequeño (del orden de 200 micras) como para producir radiografías de una alta resolución. En la Figura 4.17 se puede apreciar la radiografía realizada con este sistema a un abejorro carpintero europeo¹.



Figura 4.17. Radiografía realizada mediante un sistema láser a un abejorro. Fuente: desayunoconfotones.org.

Para poder realizar láseres de diferentes colores es muy importante el encontrar nuevos materiales. Se ha demostrado emisión láser en gases, líquidos, sólidos, plasmas, electrones libres ... pero: ¡no es tan fácil como parece!

4.5.3. ¡Más rápido!

¿Por qué nos interesa hacer láseres más rápidos? Porque cuanto más rápido sea el láser, más cortos son los pulsos de luz que puede generar ... y mayor será la potencia asociada a dichos pulsos de luz. Tal y como se ha representado en la Figura 4.18, un pulso de luz láser (de la misma energía) que dure 1 nanosegundo² tendrá mucha menos potencia que un pulso de femtosegundos³.

Al margen de la potencia, una de las ventajas fundamentales de los láseres que trabajan con duraciones de pulsos muy cortas, de femtosegundos, es que la interacción entre la luz y la materia ocurre tan rápido que no da tiempo a que se produzcan efectos de difusión térmica (transferencia de calor) a los tejidos circundantes. Esto es fundamental por ejemplo en la cirugía de cataratas, donde interesa dañar lo mínimo posible el tejido que rodea al punto donde el láser realizará el corte necesario. Este efecto se aprecia muy bien en la Figura 4.19, donde se ha representado

¹Fuente: Fuente: <http://desayunoconfotones.org/2015/09/07/rayos-x-generados-laser/>

²1 nanosegundo = 0,000000001 segundos

³1 femtosegundo = 0,000000000000001 segundos

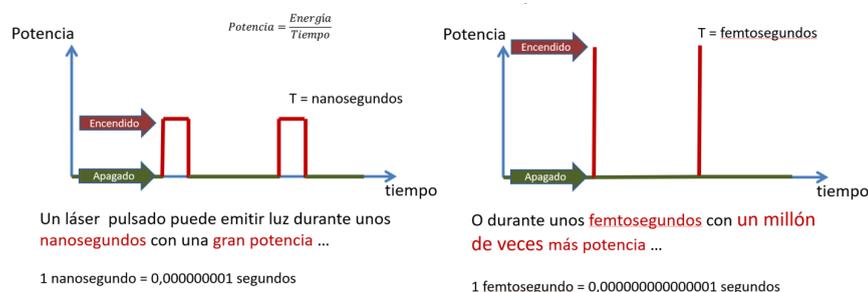
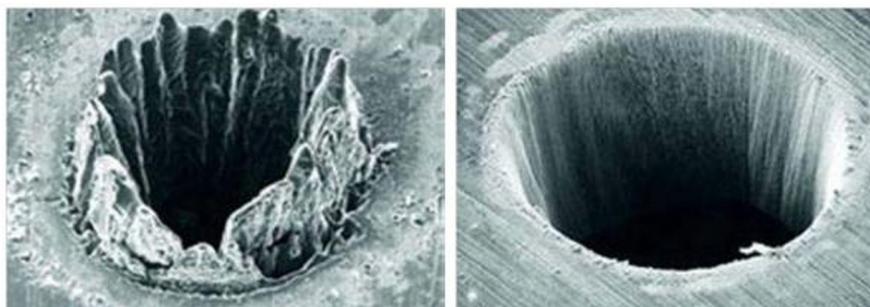


Figura 4.18. Emisión de pulsos con láseres nano o femto-segundo. Fuente: Elaboración propia.

la diferencia entre mecanizar un material con un láser de nanosegundos (a la izquierda) o de femtosegundos (a la derecha).

Diferencia entre el micro-mecanizado por láser con pulso *ns* (izq.) y *fs* (der.).



*Crédito foto: Prof. Dr. Stefan Nolte
Cortesía: FSU Jena*

Figura 4.19. Diferencia entre el micro-mecanizado de un material con un láser de nanosegundos (a la izquierda) o de femtosegundos (a la derecha). Fuente: Prof. Stefan Nolte / FSU Jena <http://bit.ly/2hish7U>

4.6. La invención del láser: conclusiones

En esta sección del curso se ha hecho un breve repaso por la fascinante historia de la invención del láser, un dispositivo cuya relevancia es indudable (como hemos visto hay varios Premios Nobel de Física asociados), a tenor de las innumerables aplicaciones en las que una fuente de luz láser es indispensable a día de hoy. Precisamente en el siguiente capítulo realizaremos una revisión de aplicaciones donde la luz en general y el láser en particular juegan un papel clave. Antes dedicaremos unas líneas a otro desarrollo clave para la sociedad actual: la fibra óptica.

4.7. La fibra óptica: la luz que viaja a través del vidrio

A todos nos resulta familiar hoy en día el concepto de **fibra óptica**, ya que muchos operadores llegan ya con sus fibras hasta nuestras casas para ofrecernos servicios como internet de alta velocidad. Ya se comentó anteriormente que internet, desde un punto de vista físico, puede entenderse como luz (láser) que viaja alrededor del mundo guiada por fibra óptica.

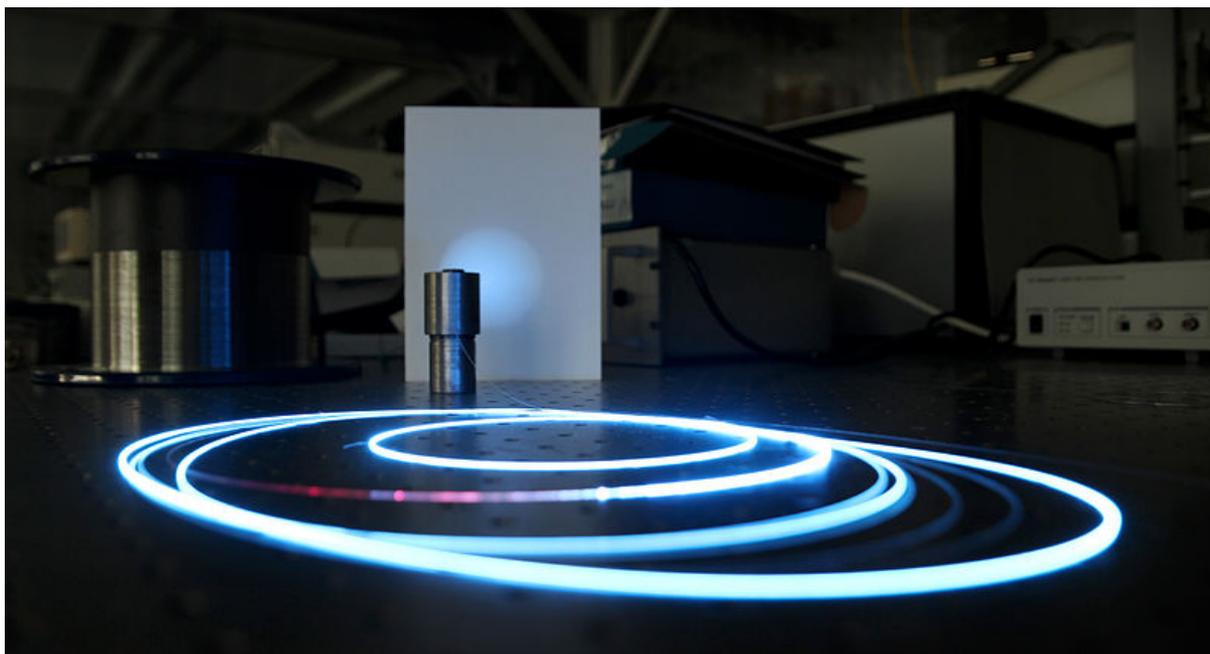


Figura 4.20. Fibra óptica en la que se ha inyectado luz infrarroja pero que emite luz azul debido al fenómeno de fluorescencia. Fuente: Wikimedia. Licencia: CC-BY-SA 2.0 <http://bit.ly/2hQ6JfT>

La fibra óptica es, por lo tanto, **un medio de transmisión que permite confinar y guiar la luz**. Si bien el concepto puede parecer moderno, los orígenes de la fibra óptica pueden remontarse a la década de 1840, cuando Daniel Colladon y Jacques Babinet demuestran la posibilidad de confinamiento de luz por refracción¹. En la Figura 4.21 se muestra la “fuente de luz” descrita por Colladon en su artículo de 1842, en la que la luz es confinada en líquido.

Posteriormente, John Tyndall (1870) investigó la propagación de la luz en otros materiales (agua, cristal), descubriendo que se curvaba por la denominada **reflexión interna**. Siguiendo con esta resumida evolución de la fibra óptica, en 1956 el endoscopio médico es patentado por la Universidad de Michigan.

4.7.1. La reflexión interna total

El proceso físico que permite que la luz sea guiada por un tubo muy pequeño de vidrio² es la **reflexión interna total**. Para explicar este fenómeno es necesario recurrir a la **Ley de Snell**, ya vista en el primer capítulo, que explica los fenómenos de refracción y reflexión (en concreto permite determinar el ángulo refractado conociendo el ángulo de la luz incidente y los índices de refracción de los medios implicados).

¹Si no recuerdas bien el fenómeno de refracción, no dudes en revisarlo en el primer capítulo de este curso.

²Podría ser una definición informal de fibra óptica

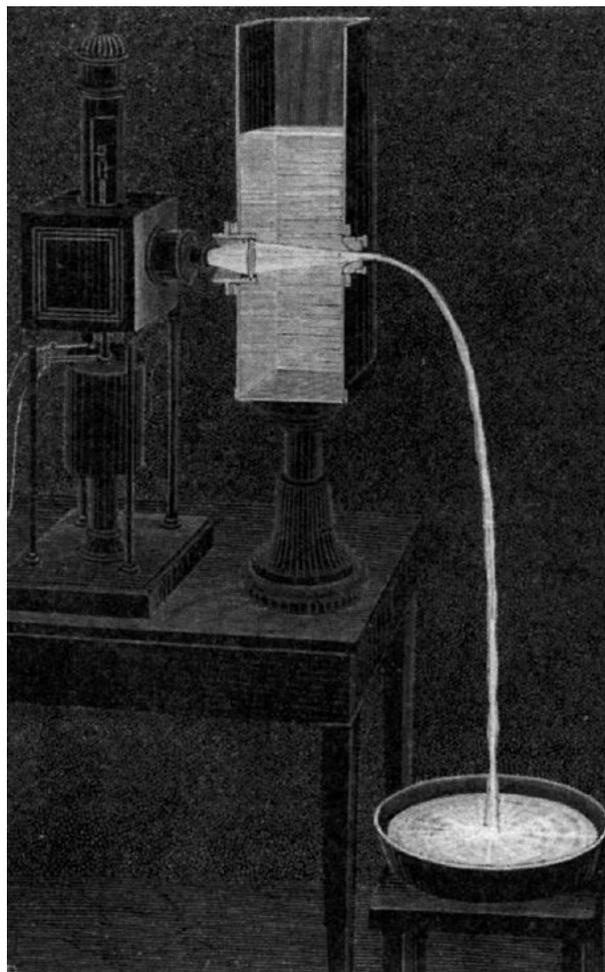


Figura 4.21. Fuente de luz descrita por Colladon en 1842, demostrando el principio de guiado de luz en una fibra óptica. Fuente: Wikimedia. Licencia: Dominio público. <http://bit.ly/2hbNxbu>

Tal y como se ha representado en la Figura 4.19, si el índice de refracción del medio 1 (n_1) es mayor que el asociado al medio 2 (n_2) (la densidad del medio 1 es mayor que la del 2), el ángulo del rayo refractado θ_r será mayor que el del rayo incidente θ_i . De hecho, puede darse la situación en la que $\theta_r = 90^\circ$. El ángulo del rayo incidente para el que $\theta_r = 90^\circ$ se denomina ángulo crítico θ_c . Para ángulos del rayo incidente mayores que θ_c , no existirá rayo refractado y toda la luz del rayo incidente será reflejada, dando lugar al fenómeno de reflexión interna total. Esta situación también se ha representado en la Figura 4.23 para mayor claridad.

Importante 7.1: Reflexión interna total

En este vídeo puedes ver una demostración práctica del fenómeno de reflexión interna total:
<https://youtu.be/AT3oa7ER9zE>

4.7.2. Evolución hacia la fibra óptica

Si bien la reflexión interna total y sus posibilidades eran conocidas, el desarrollo de fibras ópticas viables para la transmisión de luz fue muy complicado en un primer momento. La fibra óptica

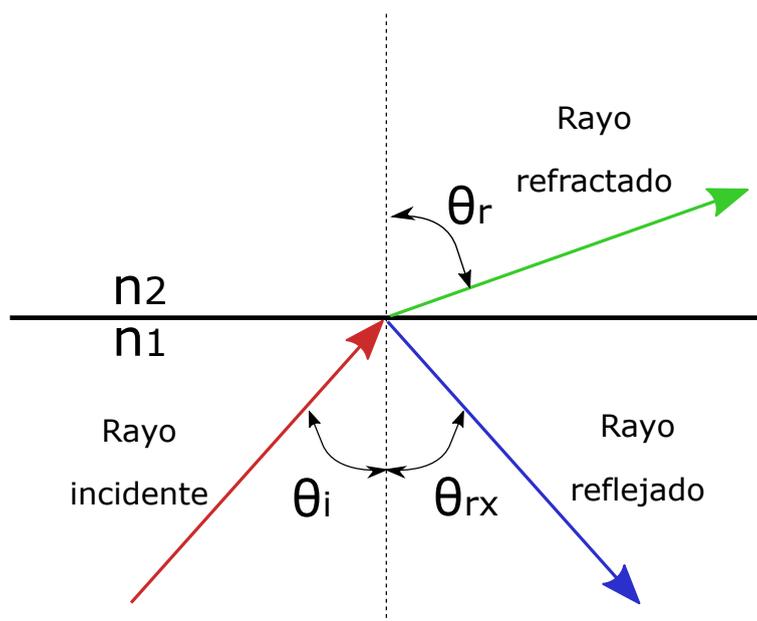


Figura 4.22. Representación de la Ley de Snell. Fuente: Elaboración propia.

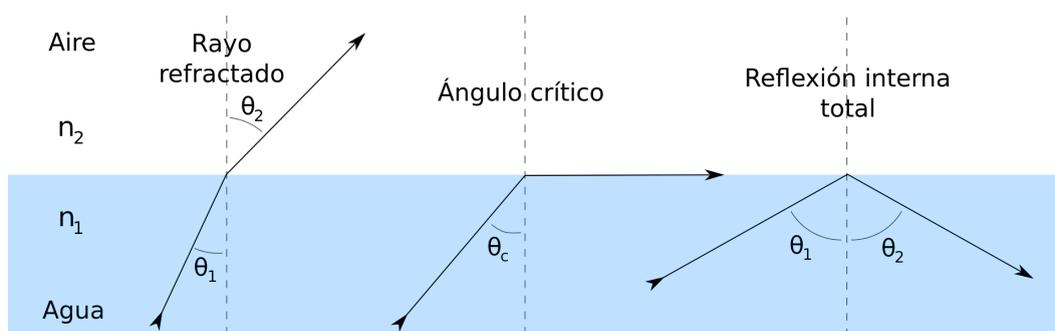


Figura 4.23. Fenómeno de reflexión interna total. Fuente: Wikimedia. Licencia: CC BY-SA 4.0. <http://bit.ly/2zmgLg1>

está compuesta de vidrio (sílice) un material muy común en la tierra. Sin embargo, las primeras fibras ópticas tenían unas “pérdidas” muy altas: esto es, la mayor parte de la luz introducida por un extremo no era capaz de llegar al otro extremo tras unos pocos metros.

La persona clave en la mejora de las fibras ópticas es Charles K. Kao, que realiza su tesis doctoral en esta temática en la década de los 60 mejorando de manera sustancial los procesos de fabricación para disminuir las impurezas dentro del núcleo de la fibra, responsables de las grandes pérdidas ya comentadas¹.

En 1970 Maurer, Keck, Schultz y Zimar fabrican una fibra óptica con impurezas de titanio en sílice: las pérdidas bajan de 100 a 17 dB por kilómetro². A finales de los 70 las pérdidas ya rondaban los 0.5 dB por kilómetro, y el 22 de abril de 1977 se produce la primera transmisión telefónica a través de fibra óptica en California.

¹En 1966 Kao y Hockham publican un artículo donde asocian las pérdidas de las FO a impurezas muy pequeñas intrínsecas al cristal.

²Las pérdidas en fibra óptica se suelen expresar en dB o decibelios, unidad de medida comúnmente empleada en acústica: <https://es.wikipedia.org/wiki/Decibelio>



Figura 4.24. Charles Kao en el año 2003. Fuente: Wikimedia. Licencia: CC BY-SA 3.0. <http://bit.ly/2hjW9kf>

La relevancia de los trabajos de Kao en los años 60 fue tal que fue merecedor del Premio Nobel de Física en el año 2009.

4.7.3. Estructura de una fibra óptica

Una fibra óptica “estándar” (la que se usa normalmente para comunicaciones como internet) es una fibra compuesta por dos partes: un núcleo interno de unas 9 micras¹ de diámetro y una cubierta que lo rodea con un núcleo de 125 micras. Como ya se ha comentado, el núcleo está fabricado con sílice (SiO_2) al que se le añaden unos “dopantes” (boro, germanio, fósforo) para modificar el índice de refracción de tal manera que se pueda cumplir la condición de reflexión interna total; esto es, el índice de refracción del núcleo será ligeramente superior al de la cubierta.

Además, la fibra lleva también un recubrimiento exterior para protegerla, al margen de que en aplicaciones reales se les dotará de más elementos protectores, como fibras de kevlar, tubos plásticos, etc. En la Figura 4.26 se ha representado (izquierda) la estructura básica de una fibra óptica, con el núcleo y la cubierta (revestimiento). En la parte derecha se muestra como se suele realizar el despliegue de fibra en comunicaciones, donde en realidad múltiples fibras (como se puede ver en el extremo derecho de la imagen) son guiadas por diferentes tubos alrededor de un elemento central (alma) que aporta rigidez y protección al conjunto.

4.7.4. Comunicaciones por fibra óptica

La fibra óptica está presente en infinidad de emplazamientos a día de hoy: no sólo ya llega hasta nuestras casas con el concepto “fibra hasta el hogar”² sino que comunica continentes y se encuentra en tendidos eléctricos aéreos o soterrados o en las catenarias de las redes ferroviarias,

¹1 micra = 0,000001 metros.

²FTTH: *Fiber To The Home* en inglés.

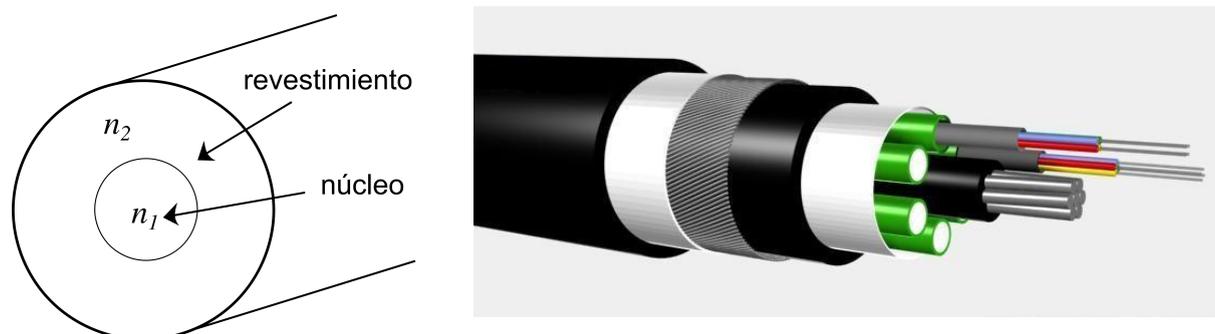


Figura 4.25. Estructura y detalle de una fibra óptica. Fuente: Wikimedia. Licencia: CC BY-SA 3.0. <http://bit.ly/2hk4DHP>

por mencionar algunos ejemplos.

En la actualidad existen miles de kilómetros de fibra óptica desplegada tanto en tierra como en instalaciones submarinas. En la Figura 4.10 se muestra, a modo de ejemplo, los enlaces submarinos dispuestos alrededor del continente africano.

Otro buen ejemplo lo constituye el enlace FLAG (Fiber-Optic Link Around the Globe / Enlace de fibra óptica alrededor del mundo), con 28000 kilómetros de fibra óptica que comunica el Reino Unido, Japón, India y muchos otros enclaves intermedios¹.

Importante 7.2: Fibra óptica submarina

En este vídeo puedes consultar cómo se realiza el despliegue de fibra óptica submarina, en este caso para Chile:

<https://youtu.be/4NzzYjsXzHY>

Cuestión 7.1: FTTH vs. ADSL

Como ya se ha comentado en este capítulo, la fibra óptica ha llegado hasta muchos de nuestros hogares de la mano de los operadores de internet, ofreciéndonos cada vez mayores velocidades de acceso.

Busca información sobre las velocidades que pueden ofrecerse con fibra óptica (FTTH) y la antigua ADSL (que usa el cable telefónico). Investiga también sobre las actuales cuotas de mercado de ambas tecnologías.

¹Más información en inglés: https://en.wikipedia.org/wiki/Fiber-Optic_Link_Around_the_Globe.

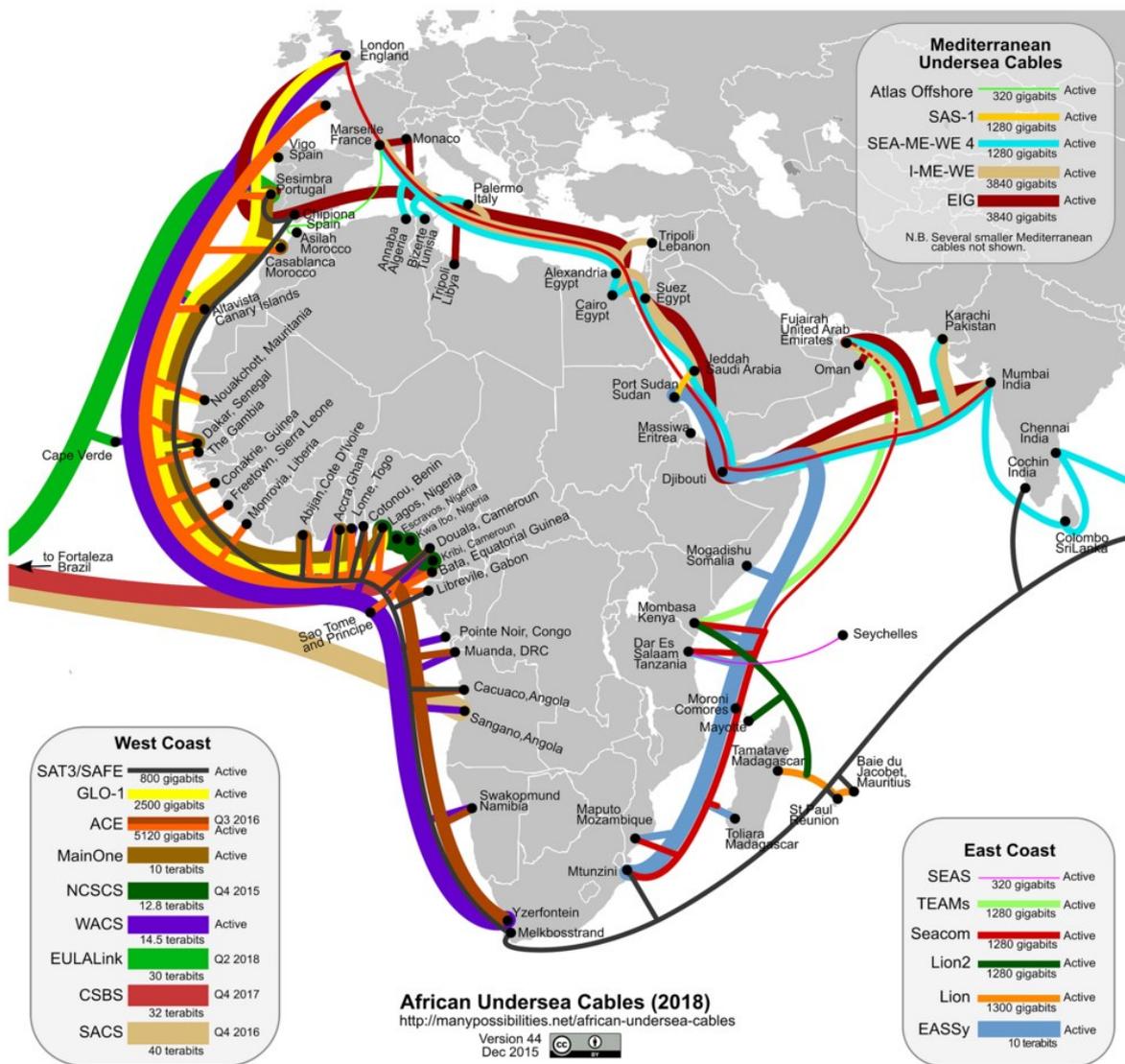


Figura 4.26. Mapa con los enlaces por fibra óptica (Existentes y previstos para 2018) alrededor de África. Fuente: Wikimedia. Licencia: CC BY 2.0. <http://bit.ly/2zkRhCg>

Índice de figuras

1.	Fotograma de la película Goldfinger, de la saga de James Bond. Fuente: Tor.com https://www.tor.com/2014/09/17/james-bond-goldfinger-science-fiction/	II
4.1.	Fotograma de la película Goldfinger, de la saga de James Bond. Fuente: Tor.com https://www.tor.com/2014/09/17/james-bond-goldfinger-science-fiction/	3
4.2.	Representación esquemática del proceso de emisión espontánea de luz. Fuente: elaboración propia.	4
4.3.	Ejemplos de fuentes de luz incandescente (izquierda) y luminiscente (derecha). Fuente: Pixabay (CC0 Creative Commons) y Wikimedia (CC-BY-SA 3.0).	5
4.4.	Representación esquemática de absorción de luz. Fuente: elaboración propia.	6
4.5.	Imagen de una persona con una bolsa de plástico negro en el visible y el infrarrojo. Fuente: NASA/Caltech.	6
4.6.	Representación esquemática de los procesos de emisión espontánea y estimulada. Fuente: Elaboración propia.	7
4.7.	Luz láser vs. luz normal. Fuente: Elaboración propia.	8
4.8.	Láseres emitiendo a diferentes longitudes de onda. Fuente: Wikimedia. Licencia: CC BY 2.5 http://bit.ly/2yzM9uF	8
4.9.	Equipos involucrados en la invención del láser a finales de la década de los 50. Fuente: Elaboración propia.	9
4.10.	Extracto del cuaderno de notas de Gould donde aparece el término LASER. Fuente: Photonics.com.	10
4.11.	Imagen de Maiman y el primer láser demostrado el 16 de mayo de 1960 expuestos en el Museo Nacional de Historia Americana en Washington. Licencia: Dominio Público.	11
4.12.	Esquema del funcionamiento de una fuente de luz láser. Fuente: Wikipedia. Licencia: CC-BY-SA 3.0. http://bit.ly/2hLvycE	11
4.13.	Láser implantado en la cabeza de una mosca. Fuente:	13
4.14.	Científicos implicados en el desarrollo del diodo láser. Fuente: Elaboración propia.	13
4.15.	Primer CD (Compact Disc) lanzado en 1982. Fuente: Elaboración propia (ultimate-classicrock.com).	14

4.16. Comparativa entre los soportes de información CD, DVD, HD DVD y Blu-ray. Fuente: Wikimedia. Licencia: CC BY-SA 3.0. http://bit.ly/2zkFwf7	14
4.17. Radiografía realizada mediante un sistema láser a un abejorro. Fuente: desayuno-confotones.org.	15
4.18. Emisión de pulsos con láseres nano o femto-segundo. Fuente: Elaboración propia.	16
4.19. Diferencia entre el micro-mecanizado de un material con un láser de nanosegundos (a la izquierda) o de femtosegundos (a la derecha). Fuente: Prof. Stefan Nolte / FSU Jena http://bit.ly/2hish7U	16
4.20. Fibra óptica en la que se ha inyectado luz infrarroja pero que emite luz azul debido al fenómeno de fluorescencia. Fuente: Wikimedia. Licencia: CC-BY-SA 2.0 http://bit.ly/2hQ6JfT	17
4.21. Fuente de luz descrita por Collandon en 1842, demostrando el principio de guiado de luz en una fibra óptica. Fuente: Wikimedia. Licencia: Dominio público. http://bit.ly/2hbNxbu	18
4.22. Representación de la Ley de Snell. Fuente: Elaboración propia.	19
4.23. Fenómeno de reflexión interna total. Fuente: Wikimedia. Licencia: CC BY-SA 4.0. http://bit.ly/2zmgLg1	19
4.24. Charles Kao en el año 2003. Fuente: Wikimedia. Licencia: CC BY-SA 3.0. http://bit.ly/2hjW9kf	20
4.25. Estructura y detalle de una fibra óptica. Fuente: Wikimedia. Licencia: CC BY-SA 3.0. http://bit.ly/2hk4DHP	21
4.26. Mapa con los enlaces por fibra óptica (Existentes y previstos para 2018) alrededor de África. Fuente: Wikimedia. Licencia: CC BY 2.0. http://bit.ly/2zkRhCg	22