

# El láser

*la luz de nuestro tiempo*

**BENJAMÍN ALONSO FERNÁNDEZ**  
**ROCÍO BORREGO VARILLAS**  
**CARLOS HERNÁNDEZ GARCÍA**  
**JOSÉ ANTONIO PÉREZ HERNÁNDEZ**  
**CAROLINA ROMERO VÁZQUEZ**

*(Editores)*



El láser,  
la luz de nuestro tiempo

---

Prohibida la reproducción total o parcial de este libro, por cualquier procedimiento, sin el permiso previo y por escrito de los titulares del Copyright.

© 2010. Isabel Arias Tobalina  
ISBN: 978-84-92997-10-7  
D. Legal: S.1657-2010

Editores (por orden alfabético):

---

Benjamín Alonso Fernández  
Rocío Borrego Varillas  
Carlos Hernández García  
José Antonio Pérez Hernández  
Carolina Romero Vázquez

Autores (por orden alfabético):

---

Benjamín Alonso Fernández  
Isabel Arias Tobalina  
Rocío Borrego Varillas  
Alexis Chacón Salazar  
Enrique Conejero Jarque  
Ana García González  
Carlos Hernández García  
Cruz Méndez Valverde  
José Antonio Pérez Hernández  
Luis Plaja Rustein  
Camilo Prieto Río  
Julio Ramos Pacho  
Javier Rodríguez Vázquez de Aldana  
Carolina Romero Vázquez  
Luis Roso Franco  
Camilo Ruiz Méndez  
Julio San Román Álvarez de Lara  
Javier Santamaría García  
Íñigo Juan Sola Larrañaga  
Ricardo Torres La Porte

Maquetación:

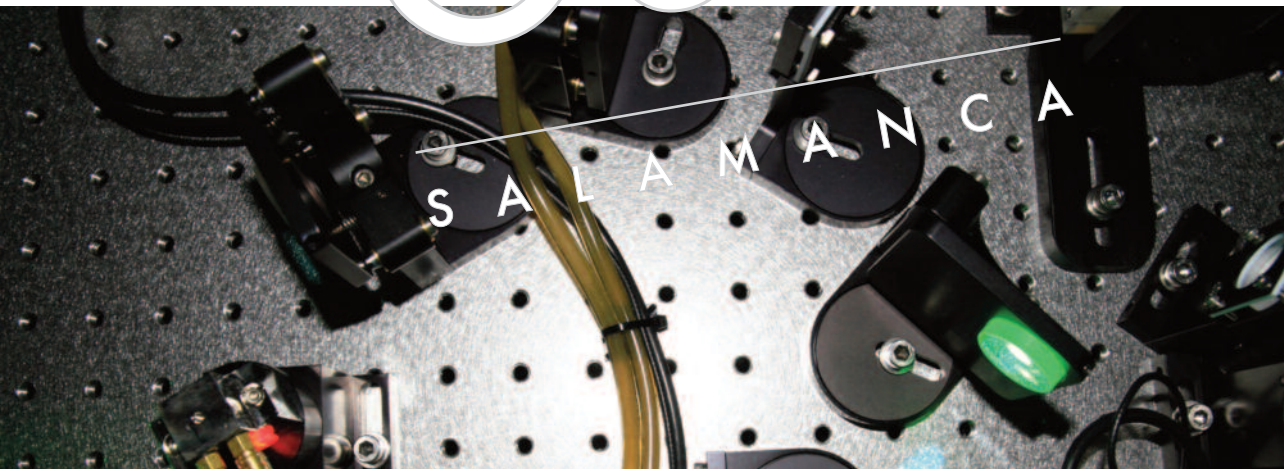
---

M. Javier Sastre Porcherie



# ÍNDICE

|      |  |     |
|------|--|-----|
| 1.   | Conceptos básicos de Óptica .....                | 9   |
| 2.   | ¿Qué es un láser? .....                          | 23  |
| 3.   | Historia, curiosidades y mitos .....             | 37  |
| 4.   | Tipos de láser .....                             | 51  |
| 5.   | Láseres pulsados .....                           | 67  |
| 6.   | Láseres en la vida cotidiana .....               | 79  |
| 7.   | Aplicaciones del láser en biomedicina .....      | 93  |
| 8.   | Aplicaciones industriales de los láseres .....   | 113 |
| 9.   | Aplicaciones científicas del láser .....         | 129 |
| 10.  | Física al límite .....                           | 143 |
| 11.  | Grandes instalaciones láser .....                | 169 |
| Al.  | Anexo I: seguridad láser .....                   | 179 |
| All. | Anexo II: experimentos caseros con láseres ..... | 189 |



*La luz, que nunca sufre, me guía bien.*

JORGE GUILLÉN, en *Cántico*

*...Después de todo, cuando estás enamorado, quieres contárselo a todo el mundo. Por eso, la idea de que los científicos no hablen al público de la ciencia me parece aberrante.*

CARL SAGAN

## Prólogo

Si la historia de la humanidad ha de relatarse a partir de sus hitos tecnológicos, es indudable que el desarrollo de las fuentes de emisión láser y sus aplicaciones desde los años 60 del pasado siglo es uno de ellos. Culturalmente, ha significado el dominio de la luz, uno de los fenómenos naturales más ininteligibles y, fruto de ello, evocadores para las mentes de nuestros antepasados y coetáneos. Durante milenios, el ser humano ha sido mero espectador de sus efectos, primordialmente hacer visible la naturaleza, transmitir calor a los objetos y producir caprichosos fenómenos al atravesar las gotas de lluvia o un cristal. El desarrollo de los láseres ha supuesto una verdadera revolución tecnológica, probablemente del calibre de la invención de la máquina de vapor o de los circuitos electrónicos integrados. Costaría encontrar un sector tecnológico en el que el láser no tenga o haya tenido una contribución resaltable.

Y, sin embargo, ha sido una revolución silenciosa, casi imperceptible y armoniosa, como la propia luz. A la mayoría de la gente le costaría decir algo más allá de que el láser es luz. Seguramente muy pocos podrían explicar qué principios hacen útiles a los láseres en telecomunicaciones, cómo se emplean en la corrección de la miopía de un paciente o cuáles son los fenómenos físicos que explican la capacidad de un láser para incluso llegar a producir la fusión nuclear.

Desde siempre, los científicos y tecnólogos han encontrado dificultades no sólo para explicar su trabajo sino incluso para justificarlo ante la sociedad. Hoy en día las actividades científicas y tecnológicas absorben una porción de recursos materiales, financieros y humanos como nunca antes en la historia del ser humano. De ahí que se haga perentorio encontrar el camino para informar a nuestros conciudadanos de cómo y en qué se emplean esos recursos y demostrar que el objetivo principal de la ciencia, la ampliación del conocimiento de la naturaleza, atañe a todos ellos y no solamente a los profesionales.

Si bien es cierto que la ciencia emplea unos códigos difícilmente describibles para los legos, también lo es que los propios científicos no siempre han empleado las mismas energías para divulgar el conocimiento que para desentrañar hasta lo más inextricable. Y eso que, como dijo Sagan, no es más que una cuestión de amor.

El esfuerzo y la ilusión que los editores y autores de este volumen han de-rochado para arrojar luz sobre la historia, los fundamentos, las aplicaciones pasadas y presentes del láser y las perspectivas futuras en el campo de la física y tecnología de los láseres, merecen el reconocimiento de todos. Del gran público al que se dirige la obra, por el coraje que supone intentar, exitosamente en mi opinión, transmitir ciencia y tecnología de alto nivel de una forma comprensible. De los profesionales que trabajamos con esta herramienta incorpórea, porque nos beneficiaremos sin duda de la visibilidad que este volumen proporcionará a la tecnología láser entre los estudiantes preuniversitarios y la población en general. Del mundo de la ciencia y la tecnología en general, pues la iniciativa partió de un grupo de jóvenes investigadores, aún predoctorales, demostrando que la divulgación no es un coto reservado para los investigadores maduros.

Antes o después, la tecnología láser, tal y como hoy la conocemos, será irreconocible o, quién sabe, quedará obsoleta ante nuevos hitos y cambios de paradigma tecnológico. En el entretanto, el futuro nos deparará nuevas aplicaciones del láser ahora insospechadas e, indudablemente, el avance impar-table del conocimiento nos permitirá desarrollar fuentes láser más intensas y comprender mejor lo que ahora solamente barruntamos acerca de su interacción con la materia.

La luz, incluso después de haber sido domada por el hombre, sigue siendo luz, ubicua, dócil e indolente. Ha guiado la génesis y ejecución de esta obra y, como señala el poeta, la ha guiado bien.

Salamanca, a 25 de noviembre de 2010

PABLO MORENO PEDRAZ

Departamento de Ingeniería Mecánica,  
Universidad de Salamanca

S A L A M A N C A



OSAL

SALAMANCA  
CONCEPTOS BÁSICOS DE ÓPTICA

OSAL  
SALAMANCA



La Óptica es la rama de la Física que se ocupa de estudiar la emisión y detección de la luz, así como de su propagación en los medios materiales. Puesto que un láser es una fuente de luz, antes de adentrarnos en el mundo de los láseres, es preciso explicar algunos conceptos básicos de la Óptica. De esta forma, seremos capaces de comprender la revolución tecnológica llevada a cabo durante los últimos 50 años en torno al láser.

### 1.1. ¿Qué es la luz?

Hay muchas formas de definir la luz, basta echar un vistazo a un diccionario para percatarse de ello. En el ámbito de la Física, la luz es radiación electromagnética, pero tampoco hay una descripción única de dicha radiación. Por fortuna, la gran mayoría de los fenómenos relacionados con la radiación electromagnética pueden explicarse perfectamente a partir de las ecuaciones de Maxwell del Electromagnetismo, que se verán más adelante.

En este contexto la luz es una onda, otro concepto de difícil definición si queremos ser rigurosos. Sin embargo, no vamos desencaminados si entendemos que una onda es una perturbación, o una variación de una magnitud física, que se propaga en el espacio y en el tiempo. Hay muchos tipos de ondas: sonoras, sísmicas, las olas del mar..., y las electromagnéticas, que son las que aquí nos ocupan. Todas ellas tienen naturaleza diferente, pero muchas características comunes.

Las ondas que nos resultan más familiares son las armónicas, aquellas cuya oscilación viene representada por una función seno o coseno. Si nos colocamos en un punto fijo del espacio y representamos su evolución en el tiempo, observamos que ésta pasa por un valor máximo, se hace cero, toma un valor mínimo, vuelve a cero, y comienza a repetirse el ciclo. El intervalo de tiempo mínimo transcurrido entre dos estados análogos de oscilación (por ejemplo, dos máximos o dos mínimos), se llama *periodo*, y su inversa es la *frecuencia*,  $f$ , que representa el número de oscilaciones por unidad de tiempo. Por ejemplo, las ondas de radio, cuya frecuencia es del orden de gigahertzios, realizan alrededor de  $10^9$  oscilaciones por segundo. Del mismo modo, si nos fijamos en un instante de tiempo y representamos la onda en función del espacio, constatamos que oscila de forma similar. En este caso, la distancia mínima entre dos puntos en el mismo estado de oscilación se denomina *longitud de onda* y suele denotarse con la letra griega  $\lambda$ . La relación entre  $\lambda$  y  $f$ , viene dada por  $v = \lambda f$ , siendo  $v$  la velocidad de propagación de la onda.

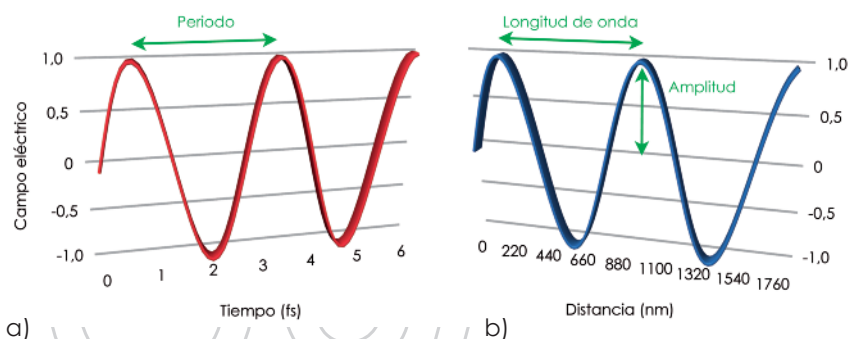


Figura 1.1. a) Representación de la evolución en el tiempo de una onda armónica en un punto fijo del espacio. El período es el intervalo que tarda la onda en volver al mismo estado de oscilación y su inversa es la frecuencia. b) En este caso se fija un instante de tiempo y se representa el estado de oscilación en los distintos puntos del espacio. La longitud de onda es la distancia entre dos puntos en el mismo estado de oscilación, mientras que la amplitud de la onda es su valor máximo.

Las ondas electromagnéticas, como su propio nombre indica, están compuestas por dos magnitudes físicas: un campo eléctrico y otro magnético, que se propagan de forma coordinada. De aquí en adelante y por sencillez nos referiremos sólo al campo eléctrico, ya que conocido éste y a partir de las ecuaciones de Maxwell se puede obtener el campo magnético.

### Ecuaciones de Maxwell

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad \text{Ley de Faraday}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J} \quad \text{Ley de Ampère generalizada}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad \text{Ley de Gauss}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad \text{Ley de Gauss para el campo magnético}$$

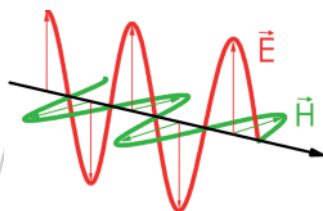


Figura 1.2. Las ecuaciones de Maxwell son la base del electromagnetismo. Relacionan la evolución de los campos eléctrico y magnético con las propiedades de los medios materiales.  $\mathbf{E}$  es el campo eléctrico,  $\mathbf{H}$  el campo magnético,  $\mathbf{D}$  el desplazamiento eléctrico,  $\mathbf{B}$  la inducción magnética,  $\rho$ , la densidad de carga eléctrica del medio y  $\mathbf{J}$  la densidad de corriente eléctrica. Los vectores  $\mathbf{E}$  y  $\mathbf{D}$  están relacionados a través de la permitividad eléctrica del medio  $\epsilon$ , mientras que los vectores  $\mathbf{B}$  y  $\mathbf{H}$  lo están a través de la permeabilidad magnética  $\mu$ .

A diferencia de otras ondas, como las sísmicas o las sonoras, las electromagnéticas no precisan de un medio material para propagarse. Además, se caracterizan porque en el vacío se propagan a la denominada velocidad de la luz,  $c$ . Si clasificamos las ondas electromagnéticas en función de su longitud de onda (o frecuencia), obtenemos lo que se conoce como espectro electromagnético. La luz visible es la parte del espectro electromagnético a la que es

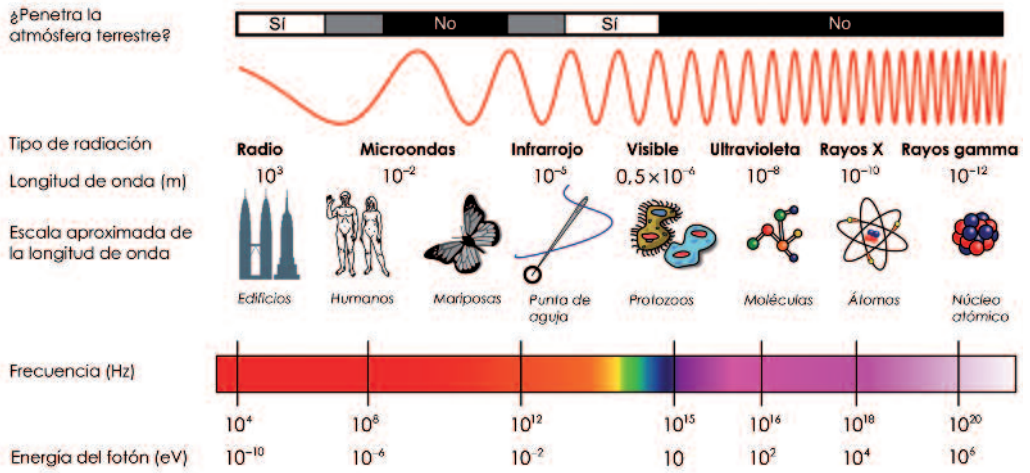


Figura 1.3. El espectro electromagnético engloba desde las ondas de radio con longitudes de onda de kilómetros a los rayos gamma, con longitudes de onda por debajo de 0,1 nm, tamaño típico de los átomos. La luz visible es una pequeña parte del espectro, con longitudes de onda entre 400 y 700 nm.

sensible el ojo humano, aproximadamente de 400 a 700 nm (1 nm =  $10^{-9}$  m, es decir, un metro tiene mil millones de nanómetros). Por debajo de 400 nm tenemos la radiación ultravioleta y por encima de 700 nm la radiación infrarroja. Por tradición, el término luz engloba no sólo el visible sino también zonas próximas

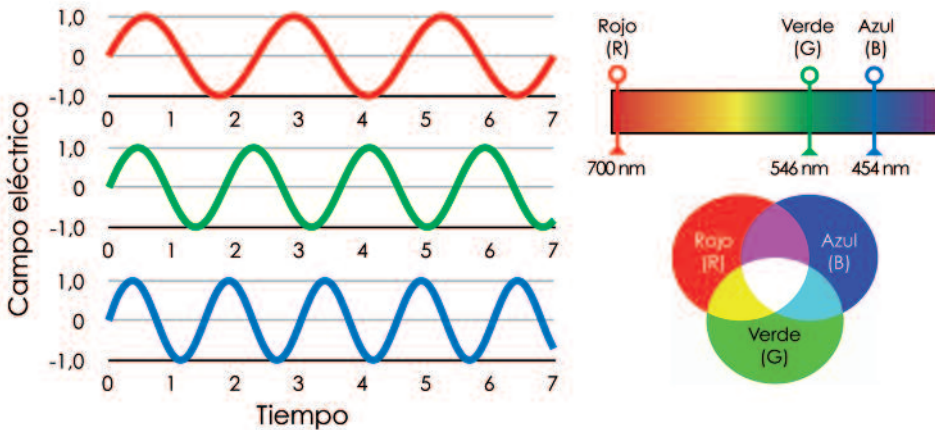


Figura 1.4. Cada longitud de onda del visible está relacionada con un color. La luz blanca es una mezcla de todas las longitudes de onda del visible. Cualquier color se puede poner como combinación de tres colores primarios R (700 nm), G (546,1 nm) y B (453,8 nm), lo que se conoce como 'Sistema RGB de especificación del color'.

del ultravioleta e infrarrojo, ya que tienen un comportamiento parecido. Por eso un LED (diodo emisor de luz) que emita a 940 nm se considera una fuente de luz, aunque nuestro ojo no lo vea.

Por otro lado, cada longitud de onda de la radiación visible se percibe como un color distinto. La luz que contiene una sola frecuencia (un solo color) se denomina monocromática, mientras que si contiene más de una es policromática. La expresión *luz blanca* se utiliza para designar la radiación que contiene todas las frecuencias del visible (por ejemplo la que proviene del sol o la de una bombilla).

### 1.1.1. Energía de una onda electromagnética

Las ondas casi siempre están relacionadas con la propagación de energía y las electromagnéticas no son una excepción. Su energía está asociada a la amplitud de oscilación de los campos eléctrico y magnético. En muchos casos es correcto asumir que dicha energía es proporcional al cuadrado de la amplitud del campo eléctrico.

Como las ondas electromagnéticas en el rango óptico tienen frecuencias tan altas, del orden de  $10^{14}$  oscilaciones por segundo, es casi imposible encontrar detectores que puedan seguir su oscilación en tiempo real, por lo cual lo que observamos y medimos son valores promediados a lo largo de muchas oscilaciones o ciclos. Así, en general, la potencia de un haz de luz es la energía promediada por unidad de tiempo. Una excepción son las fuentes de radiación que en lugar de emitir de forma continua lo hacen por medio de pulsos. En ese caso se habla de potencia instantánea o potencia de pico, que se refiere a la energía emitida en cada pulso dividida por su duración.

La magnitud que suele medirse en el laboratorio es la llamada irradiancia, que no es más que el valor promedio de la energía por unidad de área y de tiempo que recibe una superficie cuando se ilumina con un haz de luz. Esta magnitud, como decíamos, es proporcional a la amplitud del campo eléctrico al cuadrado y sus unidades son vatios por unidad de área ( $\text{W}/\text{m}^2$ ). En el contexto de los láseres, habitualmente a la irradiancia se le llama intensidad, y se mide en  $\text{W}/\text{cm}^2$ .

Cuando se quieren estudiar procesos de absorción y emisión de la luz por la materia, la teoría ondulatoria no es suficiente y hay que recurrir a la teoría cuántica de la radiación. En esta teoría, la energía se absorbe y se emite en forma de pequeños paquetes denominados *cuantos*. De esta manera, el campo electromagnético está formado por cuantos de luz: los fotones.

El concepto de fotón puede entenderse dentro del marco más amplio de la dualidad onda-partícula. La energía de un fotón está relacionada con su frecuencia —magnitud propia de una onda— a través de la expresión:  $E = hf = hc/\lambda$ , siendo  $h$  una constante llamada constante de Planck. Además, se define otra magnitud asociada al fotón denominada momento  $p = h/\lambda$ , que da idea del impulso que es capaz de transmitir. No hay diferencias fundamentales entre partí-

culas y ondas en el sentido de que las partículas pueden comportarse como ondas, y las ondas como partículas.

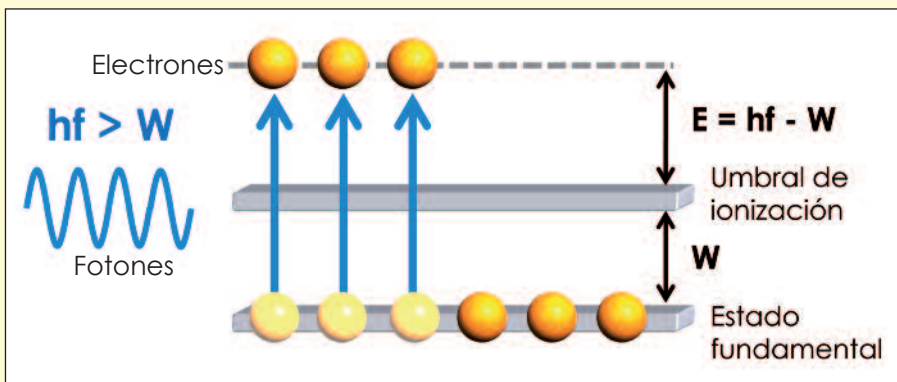
Por lo tanto podemos concluir que la luz tiene una naturaleza dual: onda y partícula. Esta doble identidad ha sido verificada experimentalmente mediante el experimento de la *doble rendija de Young* —para el caso ondulatorio— y mediante el efecto *fotoeléctrico*, para el caso de partícula.

## ¡esto te interesa!

### El efecto fotoeléctrico

El efecto fotoeléctrico, descubierto por Heinrich Hertz en 1887 (antes del desarrollo de la teoría cuántica), es la emisión de electrones por un material cuando éste es iluminado por una fuente de luz. Se observó que existía un umbral de frecuencias, conocido como función de trabajo  $W$ , que dependía del material y por debajo del cual no se producía emisión de electrones. Por encima del umbral de la función de trabajo la energía de los electrones era proporcional a la frecuencia de la luz. Este fenómeno parecía contradecir la teoría clásica, la cual predecía que la energía de los electrones sería proporcional a la intensidad de la radiación. Esta paradoja la resolvió Einstein describiendo la luz como formada por partículas, los fotones, cuya energía es proporcional a la frecuencia de la radiación ( $E = hf$ ). Un fotón por encima de la frecuencia umbral tendría la energía suficiente para extraer un electrón, dando lugar al efecto fotoeléctrico; el número de electrones emitidos sería proporcional al número de fotones (intensidad de la luz) y su energía igual a la energía del fotón menos la función de trabajo. Esta explicación fue el motivo del premio Nobel de Einstein en 1921.

El efecto fotoeléctrico es uno de los fenómenos que estimuló el desarrollo de la Mecánica Cuántica.



1.1.2. *Frentes de onda: Ondas esféricas y ondas planas*

Las ondas se pueden propagar en el espacio de distintas maneras dependiendo del tipo de fuente que las genera. De esta forma tenemos ondas planas, esféricas, cilíndricas, etc. Se denomina frente de onda a la superficie en la que, en un instante determinado, la onda tiene el mismo estado de oscilación.

Por ejemplo, si tenemos una fuente puntual que emite luz en todas las direcciones y el medio es homogéneo, es fácil intuir que los frentes de onda van a ser esferas con su centro en dicho punto. Se habla entonces de ondas esféricas.

Las lentes pueden modificar los frentes de onda. Si situamos una fuente puntual a una determinada distancia de una lente, en un punto que se denomina foco objeto, la lente transforma los frentes de onda esféricos en frentes de onda planos obteniendo de esta forma ondas planas. En estas ondas, todos los puntos de un plano están en el mismo estado de oscilación. La mayoría de las veces esos planos son perpendiculares a la dirección de propagación de la onda.

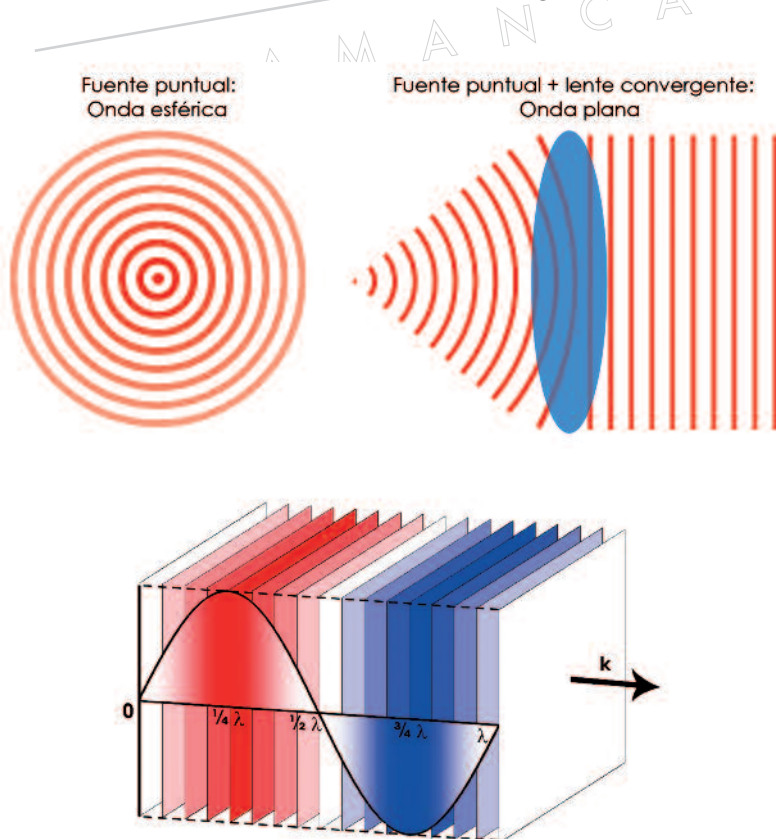


Figura 1.5. Una fuente puntual situada en un medio homogéneo emite ondas esféricas, las cuales pueden transformarse en planas con ayuda de una lente. En el caso de una onda plana que se propaga en dirección  $\mathbf{k}$ , en los planos perpendiculares a este vector el campo eléctrico se encuentra en el mismo estado de oscilación.

### 1.1.3. Polarización de la luz

Los campos eléctrico y magnético son vectores con una dirección determinada. La dirección de vibración del vector campo eléctrico es una magnitud muy importante que llamamos polarización.

La dirección de polarización puede ser fija o variar en el tiempo y en el espacio. Si el campo eléctrico vibra siempre en la misma dirección, decimos que la luz está polarizada linealmente, mientras que si vibra con amplitud constante y describiendo una circunferencia decimos que está polarizada circularmente. Por otra parte si el campo eléctrico vibra aleatoriamente en cualquier dirección, decimos que la luz no está polarizada. A la luz no polarizada se la llama muchas veces luz natural, pero ese nombre puede llevar a equívoco porque no toda la luz no polarizada tiene origen natural, ni toda la luz de origen natural es no polarizada.

La manipulación de la polarización es una de las bases de los *dispositivos fotónicos*, al igual que el control del flujo de electrones es la base de los *dispositivos electrónicos*.

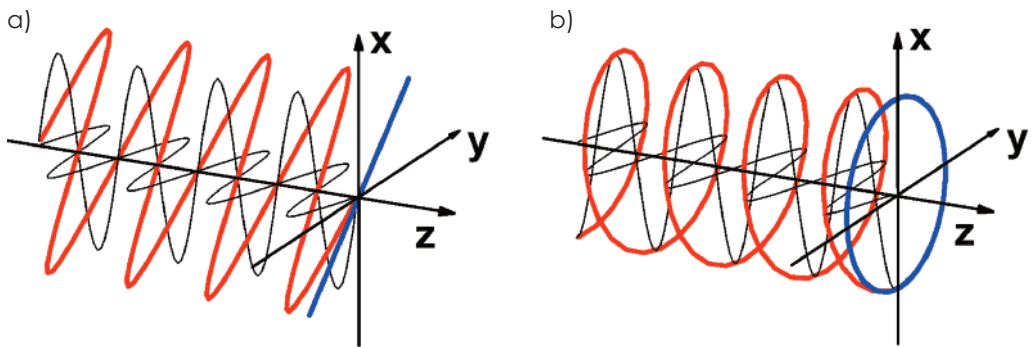


Figura 1.6. a) Luz polarizada lineal. El campo eléctrico vibra en un plano y se puede descomponer como superposición de dos oscilaciones en fase, componentes  $x$  e  $y$ . b) Luz polarizada circular. En este caso también se puede descomponer como superposición de dos oscilaciones perpendiculares, pero con un desfase de  $90^\circ$  o  $\pi/2$  radianes. El vector campo eléctrico describe una hélice, manteniendo su amplitud constante.

## 1.2. Propagación de la luz en los materiales

Previamente hemos mencionado que las ondas electromagnéticas se propagan en el vacío con la misma velocidad, situación que no sucede en los materiales. En algunos de ellos, comúnmente llamados opacos, la luz visible es absorbida y no se propaga. Por otro lado están los materiales transparentes, como el vidrio o la sílice, de la cual están hechas las fibras ópticas. En estos medios la luz se propaga con una velocidad menor que en el vacío.



El índice de refracción de un material se define como el cociente de la velocidad de la luz en el vacío y en el medio, es decir  $c/v$ . El índice de refracción no es constante, sino que depende de la frecuencia de la luz. Esa dependencia recibe el nombre de dispersión.

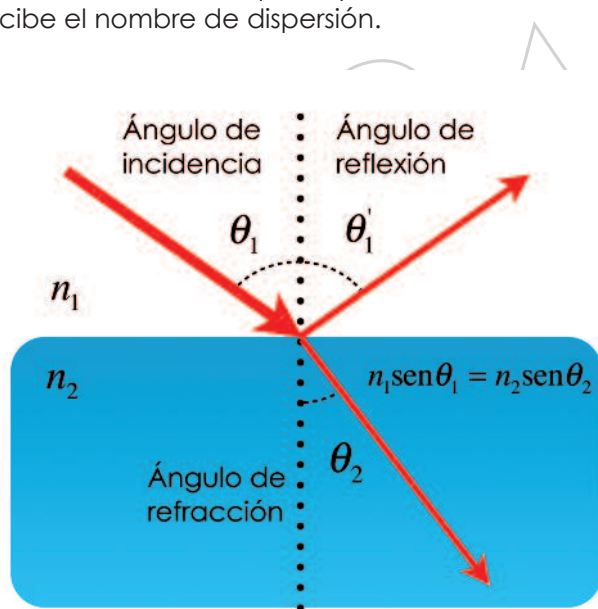


Figura 1.7. Direcciones de la onda reflejada y de la refractada. Ambas se encuentran contenidas en el plano de incidencia, que es el plano definido por la dirección de la onda incidente y la normal a la superficie de separación entre los dos medios de diferente índice de refracción.

Debido a la diferencia de velocidades de propagación, o de índices de refracción, aparecen los fenómenos de refracción y reflexión. Cuando la luz llega a la superficie de separación entre dos medios de diferente índice de refracción, parte de la radiación se refleja (reflexión) y otra parte pasa al segundo medio (refracción) donde se propaga con otra velocidad, cambiando su dirección. La dirección de la onda refractada viene dada por la conocida ley de Snell  $n_1 \text{sen} \theta_1 = n_2 \text{sen} \theta_2$ , siendo  $n_1$  y  $n_2$  los índices de refracción de los dos medios, y  $\theta_1$  y  $\theta_2$  los ángulos de incidencia y refracción respectivamente. El convenio en Óptica es que los ángulos se midan con respecto a la normal, la dirección perpendicular a la superficie de separación.

Si la luz incidente está formada por varias frecuencias y el medio es dispersivo, cada frecuencia viaja con una velocidad diferente y se refracta en una dirección distinta. Ejemplos conocidos de esta refracción dispersiva son la descomposición de la luz blanca en los distintos colores del espectro al atravesar un prisma de vidrio, o el arco iris.

Cuando la luz pasa de un medio con un índice de refracción mayor a otro con índice de refracción menor hay un ángulo, llamado ángulo límite o ángulo crítico, por encima del cual toda la luz se refleja. Este fenómeno es conocido como reflexión total interna, y, como veremos más adelante, es la base de las fibras ópticas.

## ¡esto te interesa!

### El arco iris

El arco iris se genera cuando la luz del sol se refracta en las gotas de agua. Puesto que el ángulo de refracción depende de la longitud de onda, la luz blanca se separa en los distintos colores que la forman. Por ello, para que aparezca el arco iris es necesario que haya sol mientras llueve.

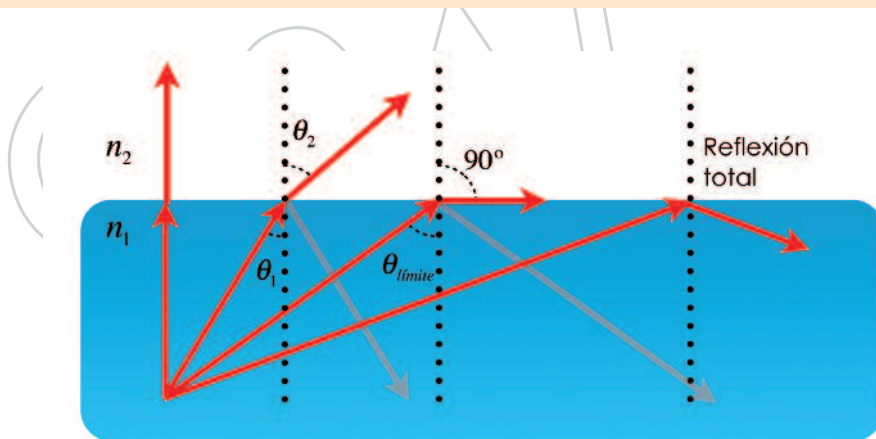


Figura 1.8. Al pasar la luz de un medio de índice de refracción mayor a otro de índice de refracción menor el ángulo de refracción es mayor que el de incidencia. Para el ángulo límite, el ángulo de refracción es de  $90^\circ$  y por encima de esta incidencia toda la luz se refleja.

## 1.3. Superposición de ondas electromagnéticas

### 1.3.1. Interferencias

Cuando en una región del espacio se superponen dos o más ondas de la misma frecuencia, la intensidad resultante no es siempre la suma de la intensidad de cada una. Este fenómeno es conocido como interferencia. Por ejemplo, si interfieren dos ondas de la misma amplitud que se superponen en fase (interferencia constructiva), la amplitud de la onda resultante será el doble. Sin em-

bargo, si se superponen en oposición de fase (interferencia destructiva), la amplitud de la onda resultante es nula.

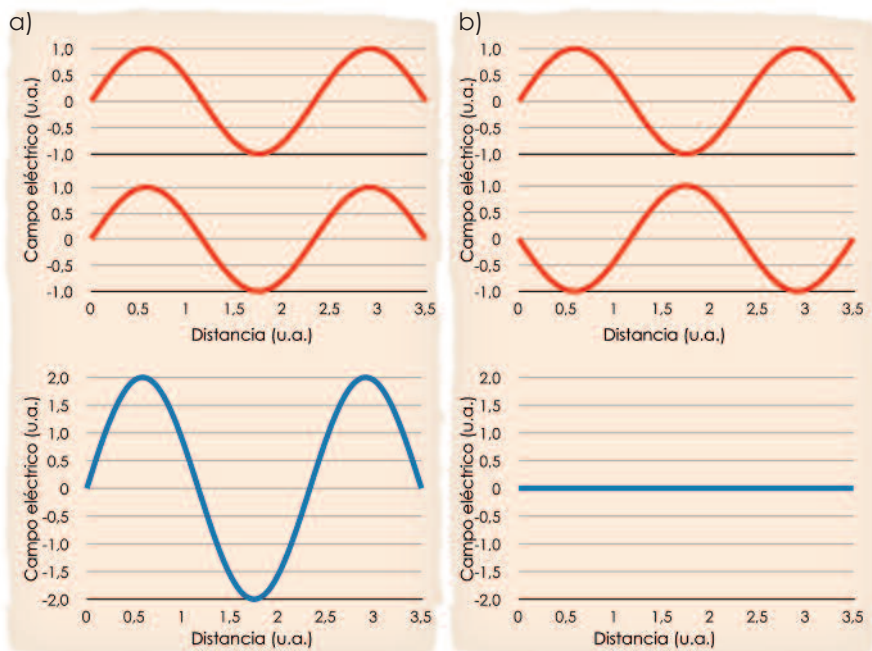


Figura 1.9. Dos ondas de la misma amplitud y frecuencia se superponen a) en fase y b) en contra-fase. Como se puede apreciar en el primer caso la amplitud resultante es el doble, mientras que en el segundo es cero.

Un experimento clásico para observar interferencias consiste en iluminar una doble rendija con una onda plana. Si recogemos la distribución de intensidad en una pantalla observamos unos máximos y mínimos equidistantes cuya separación (interfranja) depende de la longitud de onda  $\lambda$ , de la distancia entre rendijas  $d$  y de la distancia del plano que contiene las rendijas a la pantalla de observación,  $L$ , a través de la expresión:

$$i = \lambda \frac{L}{d}$$

En el punto equidistante de las dos rendijas ( $x=0$ ) las ondas están en fase y se produce un máximo (máximo central). De esta forma cuando se ilumina con luz blanca el resultado es una superposición de patrones de interferencia con distinto espaciado (ya que depende de  $\lambda$ ) pero con el mismo máximo central, lo que da lugar a una franja central blanca brillante y unos bordes coloreados. Este experimento confirmó el comportamiento ondulatorio de la luz.

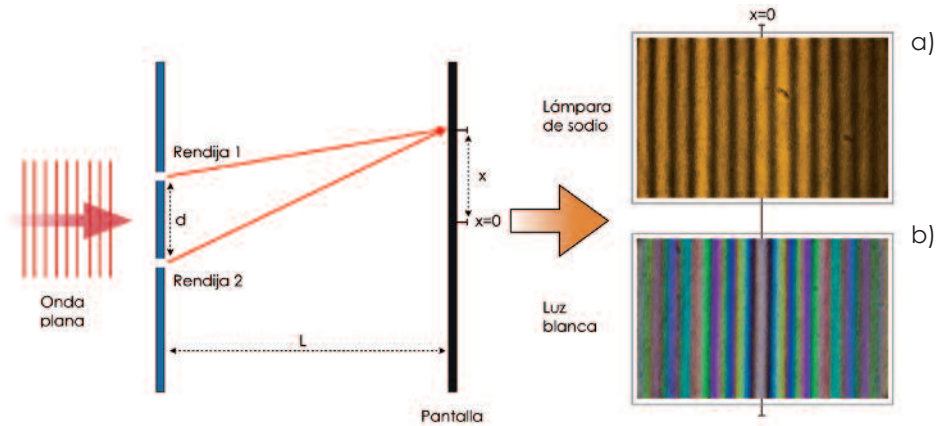


Figura 1.10. Experimento de interferencias conocido como experimento de Young. Una doble rendija se ilumina con una onda plana y las ondas que se generan al atravesarla se superponen en una pantalla que se coloca a distancia  $L$ , dando lugar a unas franjas brillantes intercaladas entre franjas oscuras. Para poder observar bien las franjas la distancia  $L$  ha de ser mucho mayor que  $d$ . En la fotografía a) se muestra el patrón de franjas iluminando con luz de una lámpara de sodio de baja presión (casi monocromática) y en b) el resultado de iluminar con luz blanca.

### 1.3.2. Difracción

Es otro fenómeno común a todas las ondas y se manifiesta cuando, en su propagación, se encuentran con obstáculos de tamaños no mucho mayores que su longitud de onda (decenas o centenas de longitudes de onda, pero no millones, por ejemplo). En el caso de la luz visible estos fenómenos se pueden observar muy bien con orificios de décimas de mm.

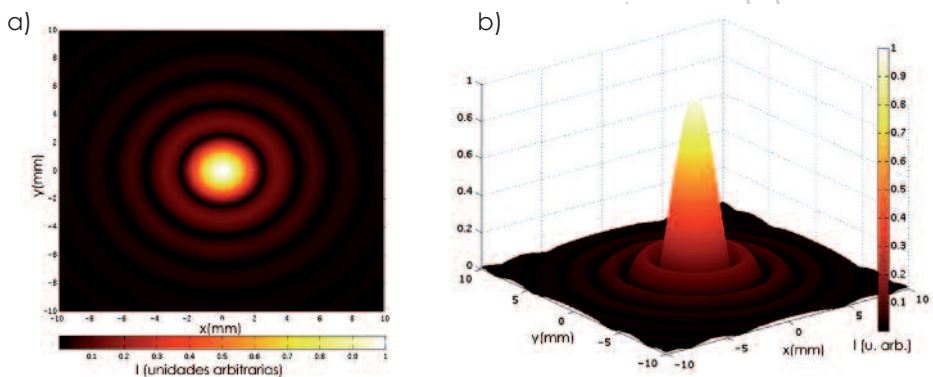


Figura 1.11. a) Patrón de difracción producido por una abertura circular. En la gráfica b) se aprecia mejor el máximo de intensidad en la parte central. El diámetro del disco central (disco de Airy) es directamente proporcional a la longitud de onda e inversamente proporcional al diámetro de la abertura.

Si se ilumina con una onda plana un iris (orificio circular de diámetro variable) y se observa en una pantalla situada a un metro de distancia, veremos una mancha circular brillante rodeada de unos anillos cuyo radio se va haciendo más grande a medida que cerramos el iris.

Una explicación sencilla de estos fenómenos se puede hacer a partir del Principio de Huygens-Fresnel. Este principio establece que cuando un frente de onda llega a una abertura, se considera que cada punto del mismo se convierte en emisor secundario de ondas esféricas, y la superposición de todas ellas en el plano de observación da lugar a la figura de difracción. Entendida de esta forma la difracción, no es más que la interferencia de un continuo de ondas.

Otro caso de difracción muy interesante es la red de difracción, que consiste en una serie de aberturas idénticas con forma de rendija y equidistantes. Cuando se ilumina una red con una onda plana, lo que se observa a grandes distancias, son una serie de máximos cuya posición depende de la longitud de onda,  $\lambda$ , y de la distancia entre dos rendijas consecutivas,  $d$ . La dirección de estos máximos viene dada por:  $d \sin\theta = m\lambda$ , donde  $m$  es un entero y nos referimos a él como *orden de difracción*.

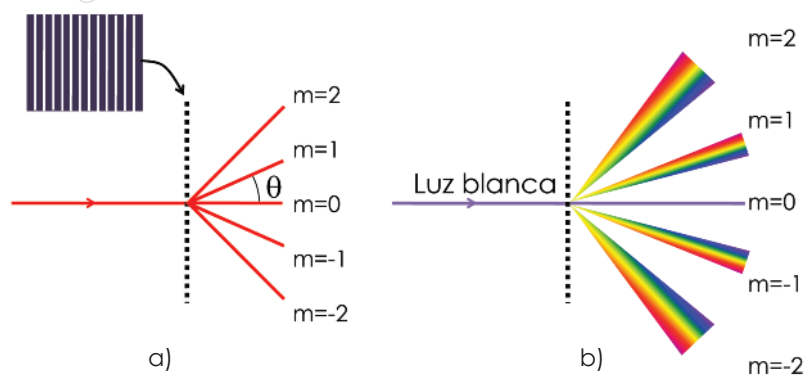


Figura 1.12. a) Red de difracción iluminada con una onda monocromática en incidencia normal. En determinadas direcciones la luz interfiere constructivamente y da lugar a lo que se conoce como máximos de difracción, caracterizados por un número entero,  $m$ , que se denomina 'orden de difracción'. b) La misma red iluminada con luz blanca. La dirección de los máximos de difracción para un mismo orden interferencial depende de la longitud de onda.

### Para saber más

Óptica. E. Hecht, Addison Wesley Iberoamericana, 2000

<http://micro.magnet.fsu.edu/primer/lightandcolor/index.html>

<http://www.physics.gatech.edu/gcuo/UltrafastOptics/index.html>

¿QUÉ ES UN LÁSER?

2

En la mayor parte de los libros de texto podemos encontrar una definición del láser similar a la siguiente: *dispositivo que utiliza la emisión estimulada de radiación en un medio apropiado, para generar un haz de luz cuyas características especiales de monocromaticidad, coherencia y direccionalidad se encuentran perfectamente controladas*. De hecho, la palabra láser es un acrónimo que proviene del inglés *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* (amplificación de luz por emisión estimulada de radiación).

Ahora bien, ¿qué es la emisión estimulada?, ¿qué entendemos por amplificación? En este capítulo trataremos de explicar todos estos conceptos y su funcionamiento. Finalmente, se presentarán las propiedades que hacen tan extraordinaria a la luz láser y que son la base de sus innumerables aplicaciones.

La clave de la amplificación de la luz en un láser reside en las leyes de la Naturaleza a escala atómica, la cual en muchos aspectos es diferente a nuestro mundo macroscópico. Por tanto, para entender el láser tendremos que emprender un viaje al interior del átomo.

## **2.1. Absorción y emisión de luz**

Un modelo sencillo para entender el átomo consiste en considerarlo como un núcleo alrededor del cual se mueven los electrones formando órbitas, algo muy similar al movimiento de los planetas alrededor del Sol. Los átomos son estables porque la energía que posee el electrón en cada una de estas órbitas se mantiene constante a lo largo de todo el movimiento. Una variación de órbita suele implicar un cambio de energía en el electrón, lo que se identifica como una transición entre niveles de energía.

Las leyes de la Física Cuántica no permiten que los electrones de un átomo puedan ocupar cualquier órbita. En consecuencia, no pueden ocupar cualquier nivel de energía, sino un conjunto muy restringido de ellos. Cuando el electrón ocupa el nivel de menor energía, se dice que el átomo está en el estado fundamental, mientras que si ocupa un nivel de energía superior tenemos un átomo excitado.

La luz es capaz de inducir transiciones entre los niveles de energía del átomo (es decir, cambios de energía de los electrones), mediante procesos de absorción y emisión. Como hemos visto en el capítulo anterior, desde el punto de vista cuántico, la luz se encuentra formada por partículas (fotones) cuya energía es proporcional a la frecuencia de la radiación. Así pues, la absorción

de luz es más eficiente cuando la energía de los fotones coincide con la diferencia entre dos niveles de energía del átomo, resultando en un mayor número de átomos excitados en el material. Si por el contrario, la energía de los fotones no es suficiente para excitar la transición, la luz apenas interacciona con el material y éste se vuelve transparente, es decir, la luz atraviesa el material sin ser absorbida.

El proceso inverso también existe en la naturaleza: un electrón en el estado de energía excitado es inestable y, tarde o temprano, decae a un nivel

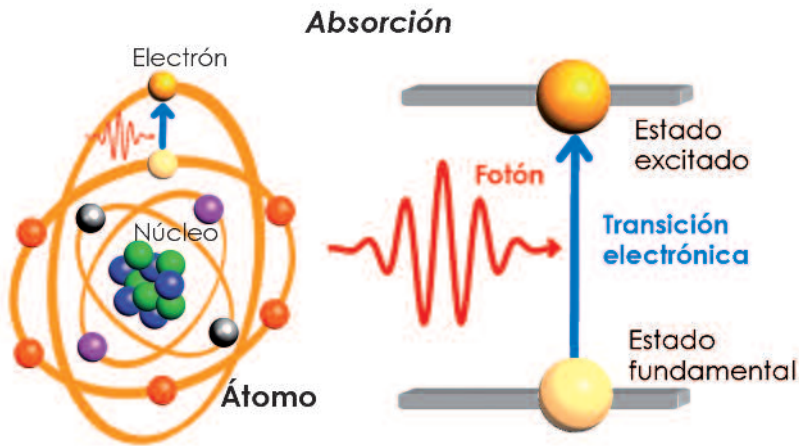


Figura 2.1. Absorción de un fotón en un átomo que pasa a estar excitado.

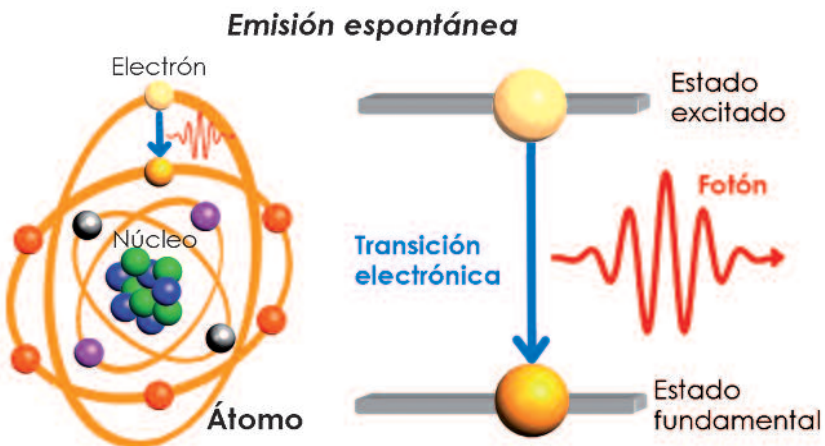


Figura 2.2. Emisión espontánea de un fotón por un átomo que se desexcita.



de energía inferior emitiendo un fotón cuya energía corresponde a la diferencia entre esos dos niveles. Dicho proceso se conoce como emisión espontánea, y es el fundamento de las fuentes de luz más habituales (bombillas, LEDs, etc).

## ¡esto te interesa!

### El color de las vidrieras

La absorción selectiva de los fotones de una determinada energía explica por qué vemos la luz de diferentes colores al atravesar las vidrieras de una catedral. En condiciones normales, el vidrio no dispone de transiciones electrónicas con energías correspondientes a fotones del espectro visible. Sin embargo, los vidrios de los ventanales de una catedral se fabrican introduciendo determinadas concentraciones de impurezas durante su fundido: óxido de cobre para el verde, cobalto para el azul, oro para el rojo... Las impurezas introducen nuevas transiciones electrónicas en el vidrio, posibilitando la absorción de una parte del espectro de la luz del Sol y permitiendo pasar el resto, que es percibido por nuestros ojos en forma de colores.



Figura 2.3. Vidriera de la iglesia de Cristo Rey (Zamora).

## 2.2. La clave del láser: la emisión estimulada

Tal y como se ha explicado en el apartado anterior, un electrón en un nivel de energía superior es capaz de decaer al estado fundamental por sí solo emitiendo un fotón en el proceso (emisión espontánea). Ahora bien, ¿qué sucede si dicho átomo excitado se encuentra ya en presencia de un campo electromagnético? Un fotón interaccionando con un átomo inicialmente excitado puede provocar que éste pase a su estado fundamental emitiendo un nuevo fotón que se suma al que provocó la transición. Este proceso, denominado *emisión estimulada*, se caracteriza además porque el fotón emitido por el átomo tiene propiedades idénticas al fotón inicial.

Originalmente, la idea surge en un trabajo de Albert Einstein en 1917 sobre la teoría cuántica de la radiación. En este artículo, plantea un sistema en equi-

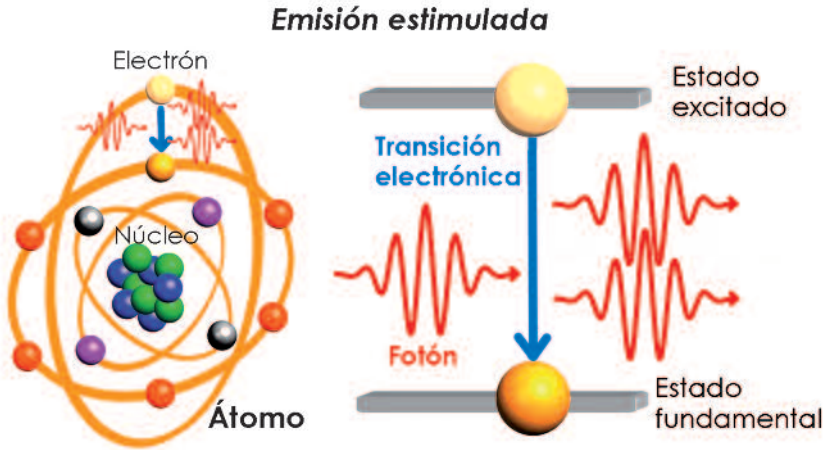


Figura 2.4. Emisión estimulada de radiación.

librio térmico que consiste en una cavidad llena de luz y un número igual de átomos en el estado fundamental y excitado, que pueden emitir y absorber radiación. Dicho equilibrio se consigue cuando la absorción de fotones es tan rápida como la emisión. La velocidad de absorción es proporcional al número de fotones y Einstein denominó a la constante de proporcionalidad coeficiente  $B$ . En situación de equilibrio, la velocidad de emisión debe ser idéntica a la de absorción. Por tanto la emisión debe venir descrita por el mismo coeficiente  $B$ , y será igualmente proporcional al número de fotones. De este modo, Einstein

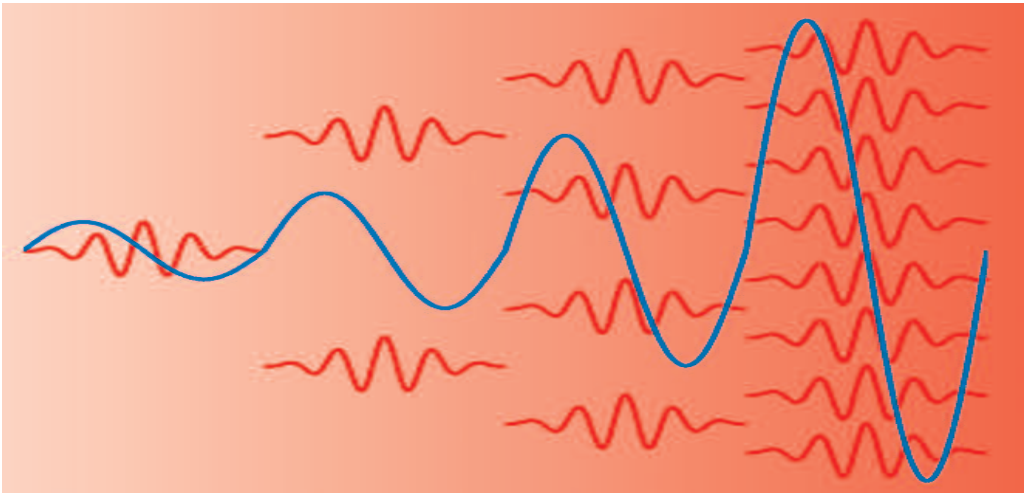


Figura 2.5. En la amplificación el número de fotones se multiplica mediante el proceso de emisión estimulada, incrementándose de este modo la intensidad de la luz.

plantea un nuevo tipo de emisión que sólo tiene lugar en presencia de un campo electromagnético, es decir, que es tanto más eficiente cuanto mayor sea el número de fotones. La emisión estimulada es, pues, completamente diferente a la emisión espontánea, que no necesita la presencia previa de fotones. Ambos tipos de emisión vienen descritos por sendos coeficientes, A y B, denominados coeficientes de Einstein para la emisión espontánea y estimulada, respectivamente.

La emisión estimulada por un fotón provocará que un átomo se desexcite, añadiendo un nuevo fotón al campo de radiación. Este fenómeno puede derivar en un proceso de avalancha, si pensamos que el aumento del número de fotones estimulará aún más la emisión en otros átomos excitados del medio. Precisamente, éste es el principio de la amplificación de la luz por emisión estimulada.

**¡esto te interesa!**

### **¿Amplificadores o fuentes de luz?**

La emisión estimulada es la base de la amplificación de la luz. Sin embargo, no funciona sin la presencia del propio campo electromagnético. Como en los amplificadores de música, se necesita una señal de entrada que pueda ser amplificada. Sin embargo, los láseres son capaces no sólo de amplificar una señal, sino también de crearla. Es decir, no son únicamente amplificadores, sino también fuentes de luz. El mecanismo por el que el propio medio activo crea un primer fotón es la emisión espontánea. Como hemos visto, es un proceso que no necesita la presencia previa de un campo electromagnético. El fotón emitido espontáneamente es posteriormente amplificado al estimular la emisión de nuevos fotones por parte de otros átomos excitados del material. ¡El láser es análogo a un amplificador de música que crea su propia música!

## **2.3. Inversión de población**

En general, cualquier medio está compuesto por una combinación de átomos en el estado fundamental y átomos excitados. Los átomos en el estado fundamental son absorbentes de la radiación mientras que, como se ha visto, los átomos excitados pueden amplificar la luz mediante la emisión estimulada. Debido a que ambos procesos se rigen por la misma constante, el balance global absorción/amplificación depende de la fracción relativa entre el número total de átomos en el estado fundamental y excitado, de manera que para lo-

grar una amplificación neta, este último debe superar al primero. Esta condición es lo que se conoce como inversión de población en el medio, y es precisamente esta situación la que posibilita el láser. Sin embargo, si repasamos el comportamiento de los materiales más comunes, plásticos, vidrio, etc., podemos concluir que, si bien todos tienen la capacidad de absorber en mayor o menor medida, ninguno amplifica la luz. Esto se debe a que la inversión de población no es una situación normal en la Naturaleza, ya que el estado estable y por ello más poblado es el fundamental.

## 2.4. Bombeo

Por ser una situación extraordinaria, es necesario recurrir a algún mecanismo artificial para producir la inversión de población. Esto no es necesariamente complicado, ya que por ejemplo es suficiente inyectar una corriente de electrones energéticos en un semiconductor. En cualquier caso, por sí sola la inversión de población no se sostiene en el tiempo. A medida que los átomos del material emiten radiación, la fracción de átomos excitados disminuye a favor del incremento del número de átomos en el estado fundamental, por lo que la inversión de población terminará por desaparecer. Así, el material inicialmente amplificador pasará tarde o temprano a ser absorbente. Para conservar el poder amplificador es necesario un agente externo que excite de nuevo los átomos, de modo que la inversión de población se mantenga en el tiempo. En cierta manera, la función del agente externo sobre los electrones atómicos es análoga a la de una bomba hidráulica encargada de extraer agua de un tanque inferior hacia otro de mayor altura. No es de extrañar, entonces, que el mecanismo encargado de mantener la inversión en los láseres se denomine *bombeo*. Existen muchos tipos de bombeo, ya que depende del tipo de material que queramos utilizar como medio amplificador. Sin embargo, todos ellos tienen un requisito en común: deben ser lo suficientemente eficientes como para poder compensar la pérdida de átomos excitados y mantener la inversión de población. En muchos casos, el bombeo puede realizarse utilizando luz, lo que se conoce como bombeo óptico. Se verán casos particulares del bombeo en el Cap. 4.

## 2.5. El láser de varios niveles

Hasta ahora hemos considerado únicamente dos niveles de energía: fundamental y excitado. Sin embargo en la práctica es habitual que el láser utilice hasta cuatro niveles, como se muestra en la Fig. 2.6. La transición electrónica que genera los fotones del láser ocurre entre los niveles de energía intermedia,

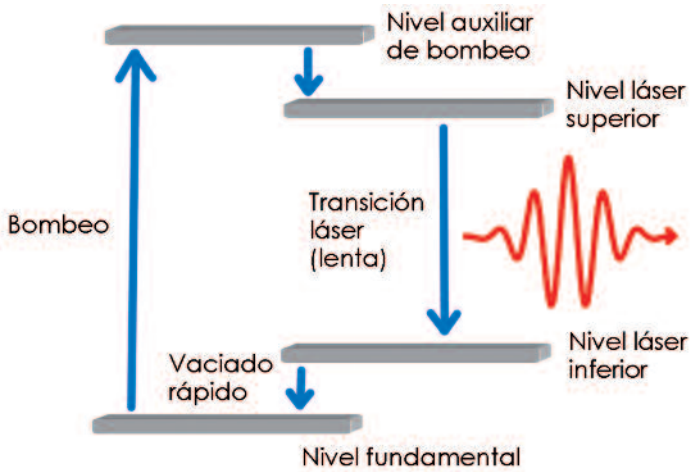


Figura 2.6. Esquema de un sistema láser de cuatro niveles.

mientras que el nivel superior e inferior son niveles auxiliares que se utilizan para facilitar la inversión de población. El bombeo se realiza excitando electrones desde el nivel fundamental hasta el nivel superior, desde el que decaen rápidamente al nivel intermedio de mayor energía. Una vez allí, el fotón láser se genera en una nueva transición al nivel intermedio de menor energía. Finalmente, el electrón decae desde este último al nivel fundamental, desde el cual será de nuevo bombeado al nivel superior. La utilidad de los niveles auxiliares radica en que ofrecen unas transiciones extremadamente rápidas. Por ello, los electrones inicialmente bombeados al nivel superior decaen rápidamente hacia el nivel intermedio de mayor energía. Puesto que la transición láser es lenta, los electrones se acumulan en este nivel. Por otro lado, los electrones que han realizado finalmente la transición láser decaen rápidamente hacia el estado fundamental. Así pues, la inversión de población de la transición láser está asegurada por la acumulación de electrones en el estado intermedio superior y el vaciamiento rápido del estado intermedio inferior. Las transiciones rápidas entre los niveles auxiliares y los niveles intermedios son, en general, *no radiativas* (no ópticas), es decir, no hay emisión de un fotón. Son posibles gracias a que la diferencia de energía entre los niveles implicados es suficientemente pequeña como para que ésta pueda ser cedida en forma de calor.

## 2.6. La cavidad láser

Aunque hemos revisado varios de los ingredientes de un láser, la combinación de un medio activo (es decir, el material amplificador) y un mecanismo

de bombeo no es suficiente para producir la luz láser. Esto se debe a que, en primer lugar, deseamos un control muy estricto de la longitud de onda y, en segundo lugar, requerimos una fuente de luz brillante, es decir mucho más intensa de lo que conseguiríamos amplificando el campo en una sola pasada a través del medio activo. Ambas condiciones se obtienen adoptando una solución extremadamente sencilla: colocar el medio activo en el interior de una cavidad formada por dos espejos. Por supuesto, uno de los espejos debe ser parcialmente reflectante, capturando la mayor parte de la radiación en el interior de la cavidad, pero al mismo tiempo dejando que una pequeña fracción pueda salir al exterior formando el haz láser.

La luz emitida y amplificada en el medio activo posee una cierta anchura espectral, en general, mucho mayor de la que deseamos que emita nuestro láser. Esto se debe a que, en la realidad, los niveles de energía de los átomos nunca se encuentran exactamente definidos. Por tanto, la emisión estimulada no se produce a una única frecuencia, sino en un pequeño rango en torno a la frecuencia de la transición ideal. En consecuencia, el poder amplificador del medio, conocido como curva de ganancia, tiene forma acampanada, siendo máximo para la frecuencia de la transición ideal y decreciendo a medida que nos alejamos de ella. Para muchas aplicaciones, la anchura espectral de la emisión del medio activo es demasiado grande para que la radiación amplificada pueda considerarse monocromática. Sin embargo, si introducimos el medio activo en una cavidad, ésta es capaz de seleccionar la radiación en un intervalo

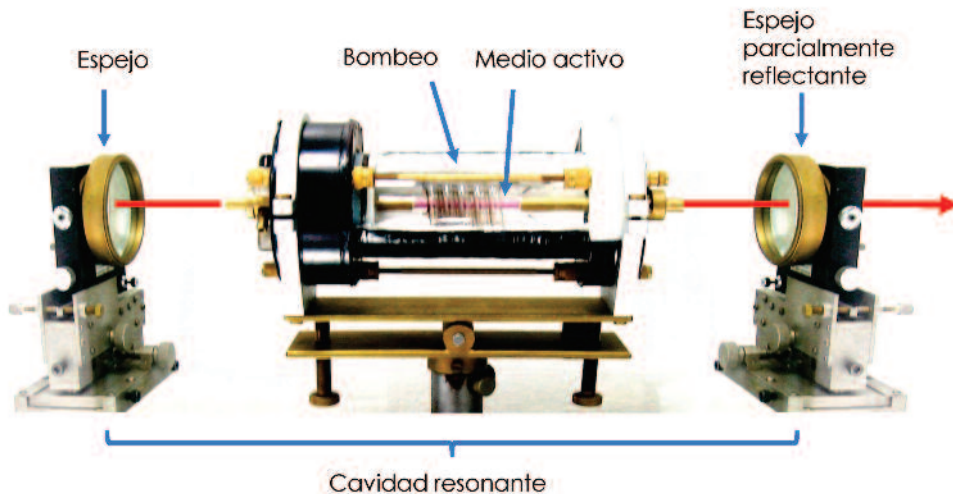


Figura 2.7. Elementos de un láser: medio activo (barra de rubí de color rosa), bombeo (lámpara de flash) y cavidad.

de longitudes de onda mucho mejor definido. El problema es parecido al de los instrumentos de música, en los que no se desea emitir cualquier sonido, sino una serie de frecuencias muy precisas que identificamos como notas musicales. Esto viene facilitado por la caja de resonancia, cuyo papel es potenciar las longitudes de onda particulares de las notas, extraídas del espectro más amplio del sonido generado, por ejemplo, por la percusión en una cuerda de piano. La forma y dimensiones de la caja están diseñadas milimétricamente para que sus paredes vibren en respuesta sólo a estas frecuencias, mientras que se mantienen prácticamente insensibles al resto. De hecho, el mismo fundamento explica por qué es tan popular cantar en la ducha. La mampara del baño impone unas condiciones estrictas a las ondas de sonido, de forma que aunque emitamos una desagradable distribución de frecuencias, se seleccionan únicamente un conjunto ordenado de longitudes de onda, que se traduce en una mejora sensible de la calidad de nuestra voz.

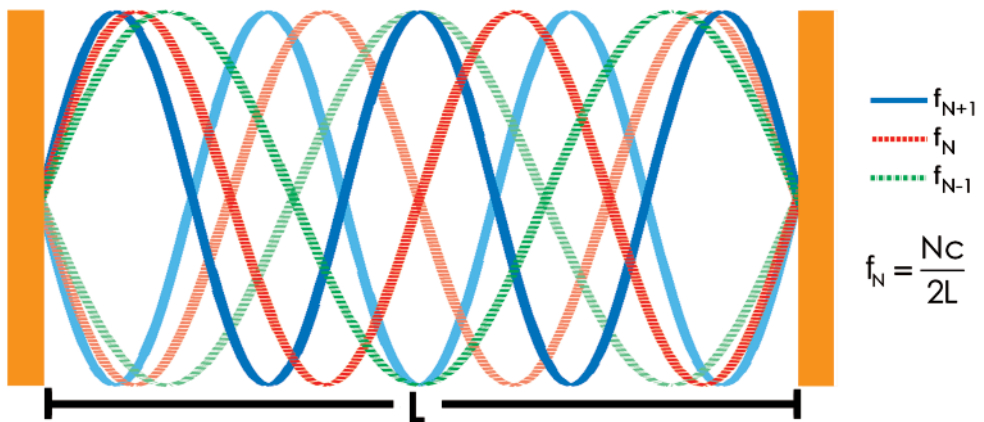


Figura 2.8. Modos longitudinales en una cavidad, donde se puede observar que el campo eléctrico es cero en los espejos.

En los láseres, la caja de resonancia corresponde a una cavidad cerrada por dos espejos enfrentados. El campo electromagnético debe anularse en un espejo perfecto. Esto implica que dentro de la cavidad sólo pueden existir ondas del campo electromagnético que se anulan en las paredes y, por tanto, establece una selección de longitudes de onda. La frecuencia  $f$  de la radiación resonante con la cavidad debe verificar la relación  $f=Nc/(2L)$ , donde  $N$  es un número entero,  $c$  es la velocidad de la luz y  $L$  es la longitud de la cavidad (distancia entre espejos). Las frecuencias que satisfacen dicha relación, para distintos valores de  $N$ , se conocen como *modos longitudinales* de la cavidad.

Cada modo es lo suficientemente estrecho para que pueda ser considerado prácticamente monocromático. Lo habitual es que estén suficientemente juntos (más aún si la cavidad es muy larga) como para que entren varios dentro de la curva de ganancia. En este caso, nuestro láser emitirá luz en varias frecuencias.

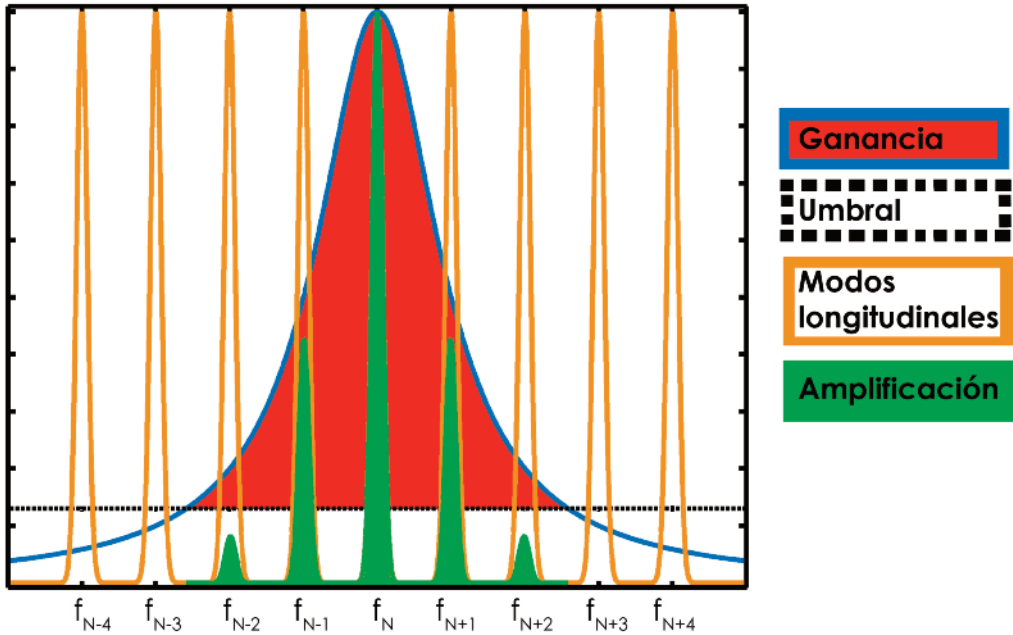


Figura 2.9. Curva de ganancia efectiva teniendo en cuenta los modos longitudinales. La línea de umbral representa la ganancia mínima para superar las posibles pérdidas en los espejos de la cavidad y, por tanto, para obtener una amplificación neta.

Por otra parte, la cavidad tiene también como efecto la mejora sustancial de la eficiencia de la emisión láser. La capacidad amplificadora del medio activo es pequeña si consideramos una única pasada de los fotones. Los espejos de la cavidad permiten retroalimentar el dispositivo, de forma que la luz amplificada en el medio activo se refleje y vuelva a pasar por éste, amplificándose nuevamente. De este modo, la retroalimentación sólo es posible para aquellos fotones que se propagan alineados con el eje de la cavidad. En caso contrario, la dirección del fotón no es perfectamente perpendicular a los espejos, las sucesivas reflexiones lo desplazarán fuera de eje y acabará siendo absorbido por los límites no espejados de la cavidad. Por tanto, la cavidad ejerce también una selección en la dirección de los fotones de forma que sólo se amplifica la radiación alineada con la cavidad, proporcionando a la emisión del láser una dirección muy definida.



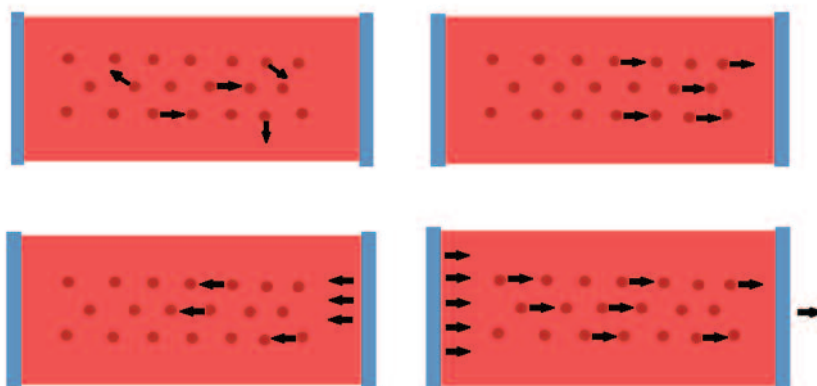


Figura 2.10. Selección de la dirección de los fotones en la cavidad. La emisión espontánea, que produce fotones en direcciones aleatorias, sólo se ve amplificada para aquellos que se propagan en la dirección que determina el eje de la cavidad.

## 2.7. Propiedades de la luz láser

La amplificación y la naturaleza propia de la emisión estimulada, proporcionando fotones idénticos a los que la estimulan, son las razones fundamentales de las propiedades de la luz láser: coherencia, direccionalidad y monocromaticidad. Veámoslas con detenimiento:

*Coherencia.* Se dice que una onda electromagnética es coherente cuando su fase no varía aleatoriamente a través del espacio o a lo largo del tiempo. Las fuentes de luz de la Naturaleza suelen emitir ondas cuya fase varía de forma desordenada, reflejo del carácter aleatorio de la emisión espontánea. Por tanto, lo habitual es que las fuentes de luz sean incoherentes. La coherencia del láser es resultado de la emisión estimulada, en la que cada nuevo fotón es emitido de forma idéntica a los anteriores y por tanto contribuyendo de igual forma a la fase del campo electromagnético. Se trata, sin duda, de una de las propiedades más sobresalientes en el láser, ya que explica muchas de sus características y es fundamental para muchas aplicaciones.

*Direccionalidad.* Se trata de una consecuencia directa de la cavidad, ya que sólo los fotones que viajan en dirección perpendicular a sus espejos contribuyen al proceso de amplificación. También es fundamental para muchas aplicaciones en las que interesa concentrar la energía en una zona determinada.

*Monocromaticidad.* Como se dijo en el capítulo anterior, la luz monocromática sólo contiene una longitud de onda. Aunque no es posible llegar a un campo monocromático ideal, los láseres emiten un intervalo de frecuencias lo suficientemente estrecho como para que, en la mayoría de los casos, su emisión pueda considerarse perfectamente monocromática. Se trata, de nuevo, de

una consecuencia de la emisión estimulada, ya que al ser los fotones iguales, tienen la misma longitud de onda. Sin embargo la monocromaticidad no es requisito imprescindible, ya que existen láseres cuyo espectro abarca una banda de longitudes de onda muy grande, condición necesaria para producir pulsos de luz.

Aunque no es una propiedad natural de la luz láser, es habitual que el haz se encuentre polarizado en una dirección, utilizando por ejemplo las propiedades polarizantes de la reflexión en las ventanas de la celda que contiene el medio activo. Por el contrario, estas propiedades no las posee la mayoría de las fuentes de luz convencionales. Por ejemplo, tanto una bombilla como la luz del sol, emiten luz blanca, incoherente, en todas las direcciones y no polarizada.

### Para saber más

*Fundamentals of Light Sources and Lasers*, Mark Csele, John Wiley & Sons, 2004.

Investigación y Ciencia. Temas 60: Física y aplicaciones del láser, PRENSA CIENTÍFICA S.A. 2º trimestre 2010.

El láser: principios básicos, Édgar González, ed. Universidad Santo Tomás, Colombia, 2003.

*Laser: light of a million uses*. J. Hecht, D. Teresi, Dover Publications, 1998.

<http://science.howstuffworks.com/laser.htm>

<http://www.fascination-of-light.net/campaign/exhibition/the-laser>

<http://www.colorado.edu/physics/2000/lasers/index.html>

<http://www.um.es/leq/laser/index.htm>

OSAL  
SALAMANCA

HISTORIA, CURIOSIDADES Y MITOS

3

El láser ha sido uno de los descubrimientos científicos que con mayor rapidez se ha introducido en la industria tecnológica en muy diversos ámbitos, lo que nos da una idea de la importancia del hallazgo. La primera vez que se consiguió amplificar luz visible por emisión estimulada fue en el año 1960, como veremos en detalle en este capítulo. Tan sólo un año más tarde se publicaron los primeros resultados sobre el uso del láser para coagular tejido de la retina, en contraste con el uso de lámparas de Xenón. En 1964, cuatro años después del descubrimiento del láser, se comenzó a investigar el uso del láser en odontología. Tan sólo nueve años después del descubrimiento del láser, en 1969, se construyó el primer prototipo de impresora láser Xerox, que comenzó a comercializarse en 1975. Como último ejemplo del impacto tecnológico que significó el descubrimiento del láser podemos mencionar que en 1971, once años después de la aparición del láser, se instaló en General Motors el primer escáner de códigos de barras basado en un láser de helio-neón, que había sido descubierto en 1961. Toda esta enorme influencia del láser en la industria tecnológica, y también en la investigación científica, e incluso en la misma vida cotidiana, es una de las razones por las que el láser se considera uno de los descubrimientos más importantes de la historia reciente.

Este capítulo, como indica su título, consta de dos partes bien diferenciadas: la primera de ellas se dedicará a desarrollar la historia del láser, mientras que la segunda parte se centrará en contar curiosidades y mitos relacionados con el láser, fundamentalmente en el ámbito cinematográfico.

### **3.1. Historia del láser**

Toda la historia relacionada con el láser, desde su descubrimiento hasta su posterior desarrollo y aplicación en otros campos, se puede definir como trepidante. Los años previos al descubrimiento del láser fueron muy intensos, llegando incluso a hablarse a finales de los años 50 de *la carrera por el láser*. Los años siguientes a su descubrimiento también fueron bastante agitados con la inmediata aparición de nuevos sistemas láser que dieron lugar a una gran cantidad de aplicaciones e investigaciones científicas. Esta vertiginosa evolución del láser aún no ha parado, manteniéndose en la actualidad con intensidad similar a la de los primeros años, especialmente en el contexto científico. Hoy en día se pueden reconocer dos importantes *carreras* relacionadas con el láser: la carrera por conseguir el pulso más corto y la carrera por conseguir el pulso con mayor potencia pico. La situación actual de la primera de ellas, probablemente

la más importante de las dos, es que en el año 2008 se llegaron a generar pulsos de 80 attosegundos, es decir, de menos de una centena de billonésima de microsegundo. Estos pulsos tan cortos están abriendo la puerta a innumerables investigaciones científicas en los campos de la Física, la Química y la Biología. En cuanto a la carrera por conseguir pulsos con potencias pico elevadas, cabe destacar la presencia en España del nuevo Centro de Láseres Pulsados (CLPU) ubicado en Salamanca, que albergará un láser con una potencia pico cercana al petavatio (mil billones de vatios).

Para poder presentar de manera ordenada los numerosos acontecimientos relacionados con el láser, hemos separado la historia del láser en dos partes: una primera dedicada a la historia previa al primer láser, que hemos titulado *La historia hasta el láser*, y la segunda, centrada en mostrar cómo el láser influyó en la investigación científica posterior, *El láser en la historia*.

### 3.1.1. *La historia hasta el láser (1916-1960)*

El descubrimiento del láser no fue fruto de una ocurrencia de una única persona, sino que, como suele ser habitual, fue un descubrimiento *cocinado a fuego lento*: fue el resultado de la suma de numerosas contribuciones realizadas a lo largo de la primera mitad del siglo XX. La idea del láser surgió de relacionar conceptos básicos, como el de la emisión estimulada, y diferentes técnicas desarrolladas en el laboratorio con anterioridad, como el bombeo óptico o el máser (el láser de microondas). Aunque el primer láser funcionando en un laboratorio apareció en el año 1960, fue mucho antes cuando se estudiaron la mayoría de los conceptos básicos en los que se basa. Comencemos entonces repasando cómo fueron apareciendo todos estos conceptos previos.

## 1916-1917 **Teoría de la emisión estimulada**

---

Partiendo de este concepto fundamental desarrollado por Einstein, y ya explicado en el capítulo anterior, aparecieron reflexiones que se acercaron mucho al concepto del láser. Richard Tolman afirmó en 1942, en un artículo sobre medios excitados gaseosos, que existía la posibilidad de que una molécula en el estado cuántico excitado decayera a su estado fundamental de tal manera que reforzara el haz de luz primaria por medio de una absorción negativa (que era como ellos denominaban entonces a la emisión estimulada), intuuyendo ya la posibilidad de que se pudiera producir una amplificación de la luz por medio de emisión estimulada. A pesar de la aparición de estas ideas, la amplificación de luz en medios naturales nunca se consideró posible, puesto que no se concebía un medio en el que la mayoría de sus átomos o moléculas estuvieran en un estado excitado.

### 1928 **Primeras observaciones que indicaban la existencia de la emisión estimulada**

---

Rudolf Ladenburg, junto con Hans Kopfermann, fueron los primeros que comprobaron que las predicciones de Einstein encajaban perfectamente con los datos experimentales. Estudiaron cómo se propagaba la luz a través de un gas de neón, previamente excitado mediante una descarga eléctrica, confirmando la necesidad de incluir la emisión estimulada para entender sus observaciones. En la misma línea que Tolman, Ladenburg y Kopfermann explicaban sus experimentos utilizando el concepto de absorción negativa, sin mencionar explícitamente el fenómeno de la emisión estimulada.

### 1934 **Experimentos en espectroscopía de microondas, los antecesores del máser**

---

La espectroscopía, disciplina dedicada a entender cómo la materia absorbe y emite luz, era una de las líneas de investigación más importantes en aquellos años, especialmente por la cantidad de información que se obtenía sobre la estructura de la materia. En 1934 Claude E. Cleeton y Neil H. Williams estudiaron la absorción de microondas en amoníaco, utilizando radiación con longitud de onda del orden del centímetro. Estos experimentos serán claves en el diseño del primer máser, propuesto y construido por Gordon, Zeiger y Townes en 1954, y en el que se utilizó amoníaco como medio activo al conocerse perfectamente su estructura de niveles.

### 1939 **Primeras reflexiones sobre la inversión de población**

---

Valentin A. Fabrikant, un modesto investigador ruso, fue el primero en plantearse realmente qué podía ocurrir si la mayoría de los átomos o moléculas de un medio se encontraban en un estado excitado. Hasta aquel momento nadie se había planteado esa posibilidad ya que la línea de pensamiento de entonces concebía la naturaleza siempre en equilibrio. Cuando la materia se encuentra en esta situación, en la que los electrones no ocupan el estado fundamental sino un estado excitado de mayor energía, se dice que está en inversión de población. Fabrikant dedicó toda su tesis doctoral a encontrar maneras de conseguir inversión de población en un medio. Usando este tipo de medios parecía claro que si se conseguía que la emisión estimulada fuese mayor que las pérdidas, tales como absorción por el medio activo o emisión en otras frecuencias, podría aumentar el número de fotones de la luz, es decir, se podría producir amplificación de la luz por emisión estimulada. Desgraciadamente Fabrikant nunca fue capaz de demostrar sus ideas experimentalmente, entre otras cosas, por la llegada de la Segunda Guerra Mundial, durante la cual se concentró en pasar

desapercibido. Fue después de la guerra, ya en los años 50, cuando Fabrikant volvió a retomar sus ideas sobre la amplificación junto con Fatima Butayeva, sin ser nunca capaces de presentar ningún experimento concluyente. En 1951 Fabrikant y Butayeva, junto con Michael Vudynskii, quien se unió al grupo tras oír una conferencia de Fabrikant, solicitaron una patente soviética describiendo cómo amplificar luz y ondas de radio, que fue rechazada en 1955, aunque admitida a finales de 1958.

---

#### 1947 **Segunda corroboración experimental de la emisión estimulada**

---

Fueron Willis E. Lamb Jr. y Robert C. Retherford los que, estudiando la estructura fina del átomo de hidrógeno, identificaron de nuevo la presencia de la emisión estimulada en sus observaciones. Lamb y Retherford identificaron situaciones en las que un estado excitado del hidrógeno estaba más poblado que el fundamental, sugiriendo la posibilidad de que este sistema pudiera producir emisión de luz, siempre relacionando dicho proceso con la absorción negativa (la emisión estimulada).

---

#### 1950 **Propuesta del bombeo óptico para lograr inversión de población**

---

Alfred Kastler, profesor de la École Normale Supérieure en París, comenzó a crear un grupo de investigación sobre la absorción de ondas de radio —o microondas— al iluminar diversos tipos de átomos, lo que se conoce como el estudio de las resonancias Hertzianas. Junto con un nutrido grupo de brillantes estudiantes, de entre los que destacó Jean Brossel, desarrollarían varios métodos para el estudio de dichas resonancias. Todos los métodos propuestos consistían en iluminar los átomos con distintos tipos de radiación, por los cuales Kastler acabaría siendo reconocido con el Premio Nobel en 1966. Uno de estos métodos fue el bombeo óptico, que consistía en excitar los electrones a ciertos estados de manera selectiva mediante un cuidadoso control de las propiedades de la luz utilizada, especialmente de su polarización y su frecuencia. Fue en 1952 cuando Jean Brossel, Alfred Kastler y Jacques Winter consiguen demostrar experimentalmente el bombeo óptico usando átomos de sodio. Esta misma técnica, que el grupo de Kastler utilizaba para conocer con detalle la estructura de la materia, sería utilizada unos años más tarde en el primer diseño del láser para preparar el medio activo y producir la amplificación.

### 1953 **Primera propuesta teórica publicada para amplificar radiación coherente de microondas**

---

La primera persona que presentó los principios básicos de un amplificador coherente de microondas basado en la emisión estimulada, es decir de un máser, fue Joseph Weber. Este profesor de la Universidad de Maryland describió de manera completa cómo lograr un máser con amoníaco en una conferencia en Ottawa en 1952. Un año más tarde, en 1953, su conferencia, que llevaba por título *Amplificación de radiación de microondas por sustancias fuera del equilibrio térmico*, apareció publicada.

### 1951-1955 **Hacia la presentación del primer máser (el láser de microondas)**

---

La Segunda Guerra Mundial había estimulado de manera especial el estudio de las propiedades de radiación de microondas por su uso como sistemas radar. En aquellos años Charles H. Townes estaba trabajando en los laboratorios Bell realizando precisamente este tipo de estudios. Durante ese tiempo Townes comenzó a interesarse por el tipo de experimentos realizados por Claude E. Cleeton y Neil H. Williams en los años 30, intentando extender estas medidas hacia la región de longitudes de onda del orden del milímetro o incluso inferiores. La Armada Estadounidense se interesó por esta investigación de fuentes de luz de longitud de onda *pequeña* y decidió hacer un seguimiento de la misma. Después de 18 meses de encuentros, discusiones y visitas a laboratorios, el avance había sido mínimo. Un frustrado Townes tenía que presentar un informe final ante el comité de seguimiento en Washington en la primavera de 1951, pero antes de ir a la reunión cayó en la cuenta de que un medio podía emitir mucha más luz si había más átomos o moléculas en estado excitado que en estado fundamental, es decir, si el medio estaba en inversión de población. Townes modificó su informe final y propuso utilizar un medio en inversión de población dentro de una cavidad para lograr nuevas fuentes de luz. La investigación no sólo continuó sino que se aumentaron los recursos con la incorporación al grupo de Townes de James Gordon y de Hebert Zeiger, un estudiante y un investigador post-doctoral, respectivamente. Finalmente fue en 1954, y después de haber superado bastantes dificultades, cuando Gordon, Zeiger y Townes confirmaron que el primer máser había nacido.

De manera simultánea e independiente, Nikolai Basov y Alexander Prokhorov, del Instituto Lebedev de Moscú, publicaron entre 1954 y 1955 otra propuesta de máser, también basado en amoníaco, que como ya se ha visto, era una molécula muy utilizada en el contexto de la espectroscopía. Townes, Basov y Prokhorov fueron finalmente reconocidos con el Premio Nobel en el año 1964.



Un año más tarde, en 1955, Townes disfrutó de un año sabático que dedicó a dar conferencias por todo el mundo, especialmente por Europa y Asia. Dos curiosidades caben destacar de este año: la primera es que en las conferencias organizadas por la Sociedad Faraday en Cambridge coincidieron Townes y Prokhorov, donde ambos fueron conscientes por primera vez de sus propuestas independientes de máser. La segunda es que también realizó una visita al grupo de Kastler en París, donde Townes conoció la técnica del bombeo óptico y comenzó a pensar en la posibilidad de utilizar este bombeo en nuevos diseños del máser.

---

### 1956-1958 **Primera propuesta de un máser de estado sólido con esquema de tres niveles**

---

Nicolaas Bloembergen propuso utilizar un sistema (en este caso un átomo de tres niveles) como medio activo para el máser. Con este tipo de medios se elimina de manera muy eficiente el ruido en la señal, haciendo que estos sistemas, al ser utilizados como detectores, fuesen mucho más sensibles que los máseres de amoníaco. Tan sólo dos años más tarde, en 1958, Makhov, Kituchi, Lambe y Terhune, de la Universidad de Michigan, lograron construir un máser basado en el cristal de rubí. Este nuevo dispositivo aprovechaba tres estados electrónicos del rubí tales que se conseguía amplificación en la región de las microondas, tal y como había pronosticado Bloembergen. Éste último fue reconocido con el Premio Nobel en 1981 por su contribución en el desarrollo de la espectroscopía láser.

---

### 1957 **Primer documento en el que aparece la palabra láser y el comienzo de la polémica**

---

Antes de comenzar el relato de los últimos tres años hasta que el láser se hiciera realidad en el laboratorio debemos remarcar, de nuevo, que es difícil, si no imposible, adjudicar a una única persona el descubrimiento de un dispositivo como el láser, sobre todo, cuando la disputa ocurre entre personas que han trabajado en la misma institución, como es el caso.

Gordon Gould era un estudiante del Profesor Polykarp Kusch, en el grupo de Isidor Isaac Rabi en la Universidad de Columbia. Allí coincidió con Townes, quien era, en aquel entonces, un reconocido investigador líder del grupo de espectroscopía de microondas. Gould se dedicó a perfeccionar una novedosa técnica llamada *bombeo óptico* y comenzó a plantearse la posibilidad de aplicarla a un máser, que acababa de ser propuesto por Gordon, Zeiger y Townes. Como es lógico discutió estas ideas con Townes, quien le aconsejó la manera

de solicitar una patente sobre sus ideas. Incluso discutieron juntos la posibilidad de que un máser pudiera emitir en el visible, estando ambos de acuerdo en que nada impedía que eso se pudiera lograr. Desde ese momento Townes y Gould intensificaron su investigación sobre la posibilidad de construir un máser emitiendo en el invisible por separado. A finales de 1957 Gould tenía los primeros cálculos sobre la posibilidad de construir, —lo que él ya denominó un láser,— un amplificador de luz por emisión estimulada, y todo quedó en su famosa libreta, que pasó por un notario con intención de asegurarse la patente. Antes de enviar la patente quiso concretar un poco más cómo hacerlo para lo que se incorporó a una empresa llamada Technical Research Group (TRG), abandonando la Universidad. Allí trabajó duramente para completar la solicitud de patente, enviándola definitivamente en abril de 1959. Dicha solicitud fue rechazada comenzando un largo periodo de reclamaciones, como veremos más adelante.

---

1958 **Primera publicación detallada que describe el láser (llamado un máser óptico)**

---

Por su parte Townes también se concentró en trabajar sobre la idea de construir un máser que emitiera en el visible. Para ello se puso en contacto con Arthur Leonard Schawlow, su cuñado, con quien había coincidido en la Universidad de Columbia y que ahora estaba en los Laboratorios Bell. El resultado de esta colaboración fue una publicación en *Physical Review*, una prestigiosa revista de investigación, en agosto de 1958 titulada *Infrared and Optical Masers*. En ella detallaron cómo extender la idea del máser para radiación infrarroja y visible, usando potasio vaporizado como medio activo. Además de esta publicación, Townes y Schawlow convencieron a los responsables de los Laboratorios Bell para que solicitaran la patente del láser.

---

1960 **Primera patente del láser (nº 2929922), aunque no será la definitiva**

---

La patente solicitada por Schawlow y Townes desde los Laboratorios Bell fue concedida en 1960, después de que le hubieran denegado a Gould su solicitud de patente por el láser alegando que había sido realizada con posterioridad a la detallada publicación del artículo de Schawlow y Townes. Gould, insatisfecho con dicha decisión, comenzó entonces su larga batalla para demostrar que la patente debía ser suya. Después de una larga pelea, y con muchos matices en los que no entramos en este capítulo, en 1988, casi treinta años después de su primera solicitud, Gould finalmente adquirió la patente principal del láser. Sin duda, todos ellos, Gould, Schawlow y Townes realizaron numerosas

contribuciones sobre un posible diseño de un láser, y fueron personajes importantes para que finalmente se construyera el primer láser en 1960. Sin embargo la historia tiende a simplificar y Townes, junto con Basov y Prokhorov, se llevaron el principal reconocimiento como los padres del láser. En nuestra opinión, no parece que esa paternidad se pueda asignar tan sólo a tres personas.

---

### 1960 **Primer láser funcionando en el laboratorio (Láser de Rubí)**

---

La publicación científica de Schawlow y Townes había reactivado enormemente el interés por construir el primer láser. Gould, desde TRG, convenció al Departamento de Defensa de los Estados Unidos de América para apoyar su proyecto de construir el primer láser. Por supuesto, Schawlow y Townes se habían propuesto exactamente el mismo objetivo, pero los tres estaban convencidos de que debía hacerse utilizando gases como medio activo. Curiosamente Schawlow mantuvo en la Primera Conferencia Internacional en Electrónica Cuántica, celebrada en Columbia en 1959, que el futuro láser debería utilizar gases como medio activo y que cristales como el rubí, muy utilizado como medio activo de los máseres, no eran válidos como medio activo para un láser por la estructura de niveles energéticos, que dificultaba que se produjera inversión de población en el mismo. Sin embargo, Theodore Howard Maiman, un joven físico que trabajaba en los Laboratorios Hughes Research en Malibú, California, no estaba en absoluto de acuerdo con esa idea. De hecho, su experiencia con el rubí, que había utilizado como medio activo de máseres, le permitió extender con relativa facilidad el montaje para que este medio emitiera en el visible, construyendo así el primer láser de la historia. El láser de Maiman consistió básicamente en un cristal de rubí rodeado por una lámpara de flash para bombear el cristal. Cuando la lámpara se ponía a funcionar aparecía luz láser de color rojo por uno de los extremos del cristal. La era del láser había nacido.

Es curioso descubrir que el propio Maiman tuvo problemas para hacer públicos sus resultados. Primero envió sus observaciones a otra prestigiosa revista estadounidense de investigación (Physical Review Letters) que rechazó el artículo alegando que se trataba *tan sólo de otro máser*. Una versión muy reducida de sus observaciones fueron finalmente publicadas en *Nature* (revista británica) en su famoso artículo de 1960 titulado *Stimulated optical radiation in ruby*.

#### 3.1.2. *El láser en la historia (1960-2010)*

El láser ha tenido una importante influencia en numerosos ámbitos de la vida, tanto a nivel cotidiano, como industrial, tecnológico, o científico. Esto hace que sea imposible presentar una descripción completa de la influencia del láser en la historia. A continuación nos centraremos en describir la influencia que ha tenido y tiene el láser en la investigación científica presentando todos los Pre-

mios Nobel que estén relacionados de alguna manera con el láser desde su descubrimiento en 1960 hasta 2010.

1964

---

Townes, Basov y Prokhorov comparten el Premio Nobel en Física por sus estudios fundamentales que llevaron a la construcción de osciladores y amplificadores basados en los estudios del máser y que fueron el fundamento de los láseres.

1971

---

Dennis Gabor obtuvo el Premio Nobel en Física como inventor principal de la holografía, una de las aplicaciones más espectaculares de la tecnología láser.

1981

---

Bloembergen y Schawlow reciben el Premio Nobel en Física por sus contribuciones a la espectroscopía láser. En particular, reciben el premio Nobel por su aportación al conocimiento más profundo de la óptica no lineal, que ya se empieza a proponer como parte de la tecnología que hoy en día se utilizan en las comunicaciones ópticas.

1997

---

Steven Chu, Claude Cohen-Tannoudji y William D. Phillips compartieron el Premio Nobel en Física por sus contribuciones en los métodos de enfriamiento y atrapamiento de átomos con luz láser. En ellos se utiliza el láser para hacer que un conjunto de átomos alcance temperaturas muy bajas, cercanas al cero absoluto, situación en la que la materia se comporta de una manera muy especial. Gracias a este tipo de técnicas, entre otras, se pudieron observar posteriormente los Condensados de Bose-Einstein en el laboratorio, demostrando así la existencia de un estado de la materia distinto del sólido, líquido y gaseoso.

1999

---

Ahmed H. Zewail recibe el Premio Nobel en Química por sus estudios de la transición entre estados que tiene lugar durante las reacciones químicas mediante espectroscopía láser ultrarrápida. Zewail demostró que utilizando pulsos láser extremadamente cortos, de unos cien femtosegundos, se pueden identificar los estados metaestables por los que pasa la molécula antes de crearse el producto final. Desde entonces Zewail es conocido como el padre de la femtoquímica.

2000

---

Zhores I. Alferov y Herbert Kroemer recibieron el Premio Nobel en Física por su contribución en el desarrollo de los semiconductores. En particular se destacaron sus estudios sobre heteroestructuras de semiconductor que ayudaron al desarrollo de los láseres de semiconductor. Este tipo de láseres son, con diferencia, los láseres más utilizados en la actualidad por sus reducidas dimensiones, peso y coste, y han impulsado notablemente el desarrollo de la comunicación óptica.

2001

---

Eric A. Cornell, Wolfgang Ketterle y Carl E. Wieman reciben el Premio Nobel en Física por conseguir Condensados de Bose-Einstein en el laboratorio y por el estudio de sus propiedades fundamentales. Para lograr observar estos Condensados utilizaron varias técnicas de enfriamiento, entre ellas las ya mencionadas técnicas de enfriamiento láser.

2005

---

Roy J. Glauber, por su contribución a la teoría cuántica de la coherencia óptica, y John L. Hall y Theodor W. Hänsch por su contribución en el desarrollo de nuevas técnicas de espectroscopía láser de precisión, reciben el Premio Nobel en Física.

2009

---

Charles K. Kao recibe el Premio Nobel en Física por sus logros en la transmisión de luz mediante fibra óptica. Actualmente la mayoría de la luz que se transmite por fibra óptica proviene de un láser y el propio Kao reconoció que la aparición del láser fue imprescindible para encontrar la solución a los problemas que tenía la comunicación óptica.

### 3.2. Curiosidades y mitos

Como curiosidad, en el contexto literario podemos comentar el *rayo de calor*, de propiedades casi idénticas a las del láser, que describió H. G. Wells en *La guerra de los mundos* en 1896. Valga como ejemplo el siguiente extracto de la novela: "Es todavía materia de asombro el modo rápido y silencioso con que pueden sembrar la muerte los marcianos. Piensan muchas personas que los hijos del planeta Marte han conseguido engendrar un calor intenso en una cámara de inconductibilidad prácticamente absoluta, y que por medio de un

espejo parabólico, de composición desconocida, proyectan ese calor intenso contra el objeto de su elección, como proyectan los faros un rayo de luz. Pero nadie ha logrado demostrar irrefutablemente estos detalles. Sea como fuere, es lo cierto que lo esencial consiste en un rayo de calor, calor invisible en vez de luz visible. Y cuantas cosas pueden arder se inflaman al contacto de ese rayo, el plomo se derrite como el hielo, se ablanda el hierro, se casca y funde el vidrio y el agua se evapora inmediatamente." Si se sustituye la palabra *calor* por *láser* en todo el extracto de la novela descubriremos que el párrafo tiene pleno sentido.

De entre las curiosidades cinematográficas, la más destacable en nuestra opinión es la que aparece en la película de la Bella Durmiente de Disney. En ella hay una escena en la que las tres hadas, Flora, Fauna y Primavera, rescatan al Príncipe Felipe de las mazmorras de Maléfica destrozando los grilletes con los que está esposado. Para ello las hadas hacen salir de sus varitas mágicas una intensa luz que rompe las cadenas, e incluso funde la cerradura de la puerta del calabozo. Nadie dudaría en afirmar que semejante haz de luz, bastante colimado e intenso, podría ser un haz láser. La curiosidad llega cuando averiguamos que esta película se estrenó en Estados Unidos un 29 de enero de 1959, un año antes del descubrimiento del láser. ¿Deberíamos añadir a Wells y a Disney en la lista de padres del láser?

Pasemos a los mitos cinematográficos, en los que queremos destacar esos fenómenos que aparecen en algunas películas y que no tienen ningún fundamento científico:

- Lo primero y más llamativo, es el hecho de ver los haces láser de cualquier arma láser como los que aparecen, por ejemplo, en la Guerra de las Galaxias. Cuando uno utiliza un puntero láser enseguida cae en la cuenta de que el haz láser no se ve durante su propagación, salvo cuando es reflejado o dispersado por algún objeto, bien sea una pantalla o las partículas suspendidas en el aire (humo, polvo, etc.). Esto es debido a que todos los fotones que emite el puntero láser se propagan en la dirección hacia la que apunta el puntero, de forma que ningún fotón se dirige hacia nuestros ojos, lo que imposibilita que veamos el rayo propagándose. Podríamos ver el haz si lo hacemos propagar por un medio que desvíe parte del haz, como polvo o humo suficientemente denso, consiguiendo que parte de la luz nos llegue al ojo haciéndose visible la propagación del láser. Por supuesto esto es imposible cuando se está en el espacio, ya que el vacío es precisamente la ausencia de cualquier materia que pudiera desviar la luz. En el espacio, el haz láser sólo se puede observar cuando es reflejado por algún objeto.
- Lo segundo es la velocidad de los rayos que salen de las armas láser. Existen infinidad de escenas en las que hay batallas con armas láser en las que se ve cómo avanza el disparo láser. Pocos números hay que hacer

para caer en la cuenta de que la luz en la atmósfera tarda en recorrer 50 metros, por poner una distancia típica de una batalla, menos de un microsegundo. En las películas un disparo puede tardar algo menos de un segundo, pongamos medio segundo, con lo que la velocidad de la luz en las películas es del orden de un millón de veces más lenta que en la realidad.

- Es también bastante espectacular el efecto que produce el rayo láser en las víctimas de la batalla. Lo normal es observar cómo un combatiente alcanzado por un rayo láser sale despedido varios metros. En primer lugar, el empuje que pueden ejercer los fotones del haz láser, o estrictamente hablando el momento que pueden transmitir los mismos, es despreciable, lo que significa que una víctima por un rayo láser no debería desplazarse un ápice de su posición por el impacto. En segundo lugar, si pasamos el punto anterior por alto, el principio de acción-reacción indica que el combatiente que disparó el láser debería sufrir una reacción idéntica a la que sufre la víctima, cosa que no suele ser habitual. Está claro que este punto, como muchos otros que aparecen en las películas, no tiene solución.

### Para saber más

*Beam. The Race to Make the Laser.* Jeff Hecht. Editorial Oxford University Press: New York, 2005.

*How the Laser Happened: Adventures of a scientist.* Charles H. Townes Editorial Oxford University Press: New York, 1999.

*Stimulated optical radiation in ruby.* T.H. Maiman Nature 187, 493-494, 1960.

Página web de los Premios Nobel (<http://nobelprize.org>).



TIPOS DE LÁSER

4



Hoy en día la variedad de láseres es tan grande que se necesitaría una enciclopedia entera para describirlos con cierta profundidad. De hecho, Arthur Schawlow, uno de los pioneros del láser, postuló que *cualquier cosa puede emitir radiación láser si la golpeas suficientemente fuerte*. Naturalmente no todos los láseres están igual de extendidos: mientras algunos no han pasado de la fase de prototipos, otros están plenamente asentados y se utilizan en multitud de aplicaciones. Aquí vamos a hacer un repaso por algunos de los más utilizados, hoy o en el pasado.

A la hora de clasificar los distintos tipos de láser se pueden seguir muchos criterios distintos: su longitud de onda, su potencia de emisión, su tamaño, su precio,... Nosotros utilizaremos la más habitual, que es también la más útil: el tipo de medio activo, que suele estar asociado también al mecanismo de excitación. De acuerdo con este criterio podemos dividir la mayoría de los láseres en tres grandes familias: de gas, de estado sólido y de semiconductor. Algunos láseres relevantes, como los de electrones libres, los de rayos X o los de colorante líquido no pertenecen a ninguna de ellas.

#### **4.1. Láseres de gas**

Hay muchos láseres que utilizan como medio activo un gas o una mezcla de gases. Tienen la ventaja de que el volumen del medio activo puede ser grande, a diferencia de los sólidos, limitados por el tamaño de los cristales. Además, los gases suelen ser relativamente baratos y no sufren daños. Otras ventajas son su homogeneidad y la facilidad para refrigerarlos, simplemente por transporte. Los láseres de gas suelen estar compuestos por una mezcla de gases. En los átomos, moléculas o iones de uno de ellos, generalmente a muy baja presión, se produce la inversión de población. El resto de componentes, que suelen ser mayoritarios, participan en el bombeo y la refrigeración del medio.

Los láseres de gas, debido a que sus partículas tienen libertad de movimiento, pueden excitarse de formas muy diversas. Una de las más habituales es aplicando una descarga eléctrica al gas o mezcla de gases; los electrones que se mueven en la corriente generada excitan los átomos o moléculas del gas, que a su vez colisionan entre ellos, lográndose así la inversión de población. En algunos láseres, en lugar de aplicar una descarga eléctrica se inyecta un haz de electrones o iones acelerados.

Otros mecanismos de excitación menos habituales en láseres de gas son, por ejemplo, la radiación electromagnética de baja frecuencia —radiofrecuen-

cia o microondas, que al ser absorbida por el medio colabora en lograr la inversión de población—, la excitación a partir de reacciones químicas exotérmicas, o el bombeo óptico.

Dentro de los láseres gaseosos podemos distinguir entre los de:

- Gas neutro, en los cuales el gas está compuesto de átomos neutros, como por ejemplo el láser de helio-neón,
- Gas ionizado, en el que los átomos del medio activo no están en estado neutro sino que han perdido uno o varios electrones, convirtiéndose en iones cargados positivamente (láser de argón),
- Gas molecular, en los que el gas está compuesto de moléculas ( $\text{CO}_2$ ),
- Excímero, basados en moléculas excitadas que no son estables en el estado fundamental,
- Vapor metálico, en los que el medio activo contiene algún metal calentado hasta estado de vapor (vapor de cobre, por ejemplo).

Algunos de estos láseres están entre los más utilizados en aplicaciones científicas e industriales.

#### 4.1.1. Láseres de gas neutro (He-Ne)

El láser de helio-neón fue uno de los primeros en inventarse y su uso está muy extendido, aunque poco a poco ha sido sustituido en algunas aplicaciones por láseres de semiconductor. Es un láser compacto, portátil y sencillo con multitud de aplicaciones que no requieran una potencia alta. Este tipo de láser suele operar en la longitud de onda de 632,8 nm, en el rojo, aunque también tiene otras líneas en el infrarrojo y el visible. Su emisión es en onda continua, con una buena calidad espacial y la potencia varía entre menos de 1 mW y unas

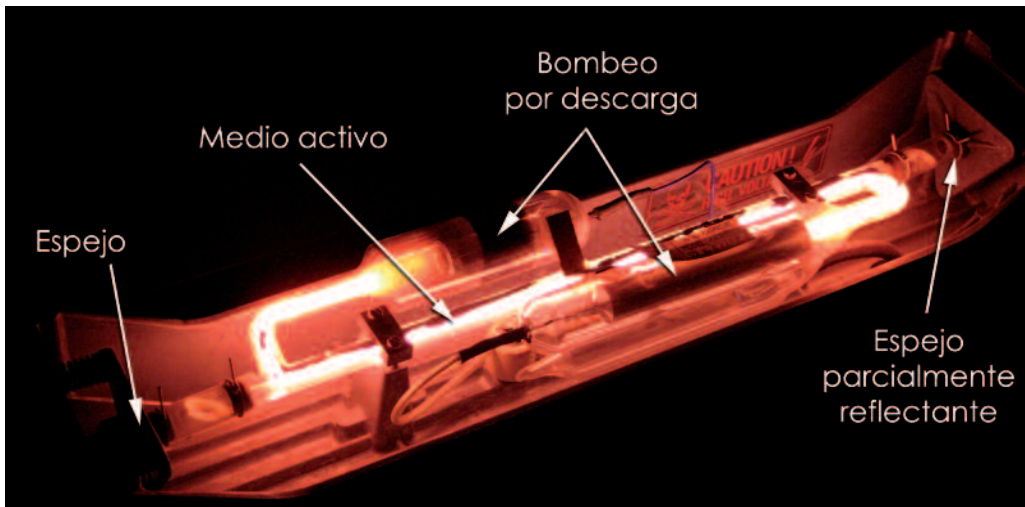


Figura 4.1. Láser de helio-neón.

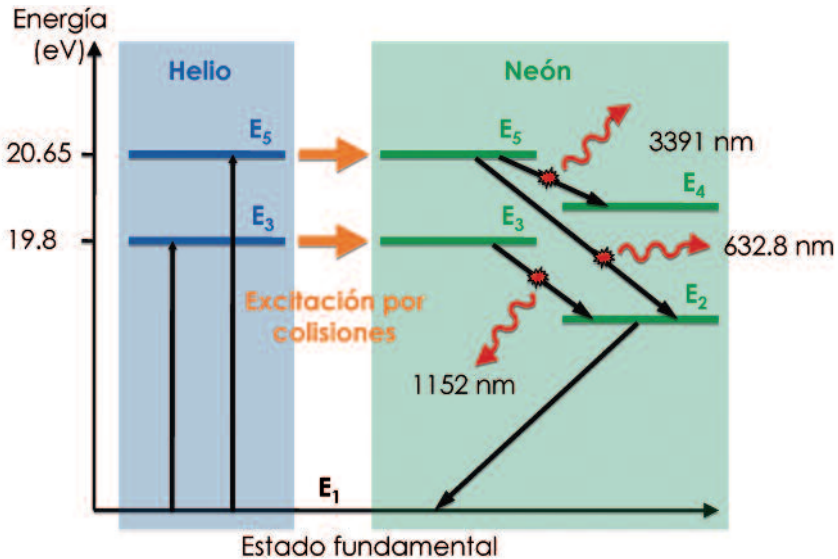


Figura 4.2. Esquema de niveles de un láser de helio-neón.

decenas de mW. Los láseres de He-Ne tienen una vida media que puede alcanzar decenas de miles de horas de funcionamiento.

El medio activo es una mezcla de helio (85%) y neón (15%) en una burbuja o tubo de vidrio. La presión es baja, de unos pocos Torr. La excitación se produce por medio de una descarga entre un cátodo y un ánodo. En la mezcla de gases, el helio actúa únicamente para conseguir el bombeo, transfiriendo energía por colisiones al neón, siendo entre dos niveles de este último entre los que se genera la inversión de población y la transición láser. El tamaño varía entre unos pocos centímetros y un par de metros, en función de la potencia de salida del láser.

Los láseres de helio-neón se han utilizado en interferometría, impresión láser, lectores de códigos de barras, alineamiento, metrología, etc.

#### 4.1.2. Láseres de gas ionizado (Argón)

El láser de argón es el más usado entre los láseres de gases nobles ionizados, aunque también existen los de criptón y xenón. Tiene varias líneas de emisión en el visible y en el ultravioleta. Las más intensas son la de 488 nm (azul) y la de 514,5 nm (verde). Es un láser que emite un onda continua y puede dar mucha más potencia que uno de He-Ne, hasta decenas de vatios, aunque su vida media es más corta, por debajo de 10.000 horas de uso.

El láser funciona con un gas noble que es ionizado mediante descargas de alta tensión, perdiendo uno o varios electrones. La inversión de población se produce entre estados excitados del ion y su estado fundamental. En el tubo se

alcanzan presiones y temperaturas muy altas por lo que la refrigeración es muy importante y a veces se hace con agua. La cavidad puede ser larga, alcanzando más de dos metros.

Las aplicaciones de los láseres de argón y de criptón están en el campo de la medicina, metrología, bombeo de otro tipo de láseres, impresoras, este-reolitografía, holografía, etc. Sin embargo, en muchas de estas aplicaciones han sido sustituidos por láseres de estado sólido.

#### 4.1.3. Láseres moleculares ( $\text{CO}_2$ )

Hasta ahora hemos visto láseres que funcionan por transiciones entre niveles atómicos. Existen otros que se basan en transiciones entre estados moleculares de vibración o rotación. Las moléculas, compuestas por varios átomos, tienen más grados de libertad que los átomos aislados. Pueden oscilar y girar, y esos movimientos corresponden a niveles de energía que también están cuantizados. Típicamente, las transiciones entre estados vibracionales y rotacionales se producen a energías más pequeñas que las atómicas, por lo que los láseres moleculares emitirán habitualmente longitudes de onda más largas, en el infrarrojo medio o lejano.

El láser molecular más importante es el de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). La molécula de  $\text{CO}_2$  tiene varios niveles vibracionales y rotacionales. Las transiciones entre algunos de estos niveles nos dan la emisión láser del  $\text{CO}_2$ , con líneas intensas a 9,6 y, sobre todo, 10,6 micras. Al igual que en el caso del He-Ne, el bombeo se produce con ayuda de otro gas, en este caso el nitrógeno, que transfiere la energía al  $\text{CO}_2$  por colisiones. A veces se le añade también helio,

que al tener gran movilidad transfiere rápidamente el calor a las paredes y permite alcanzar potencias aún mayores. Un láser de este tipo puede alcanzar potencias de decenas de kilovatios.

Los láseres de dióxido de carbono pueden ser sellados, con la mezcla de gases encerrada en un tubo, o de flujo, en los que el gas fluye y se va renovando. Con estos últimos se consiguen potencias mucho más altas, pero la instalación es más compleja y cara.

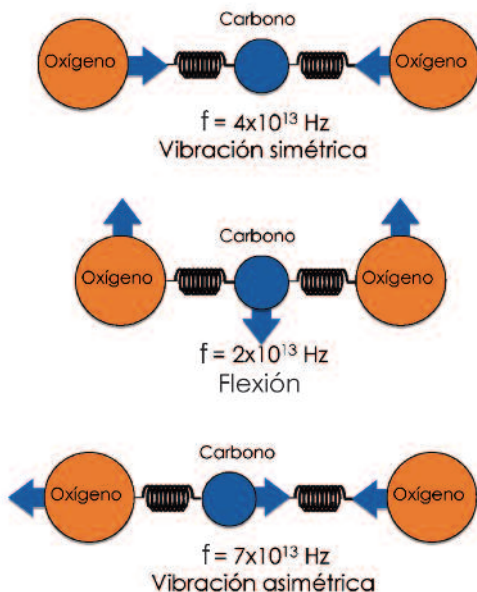


Figura 4.3. Modos vibracionales de la molécula de  $\text{CO}_2$ .

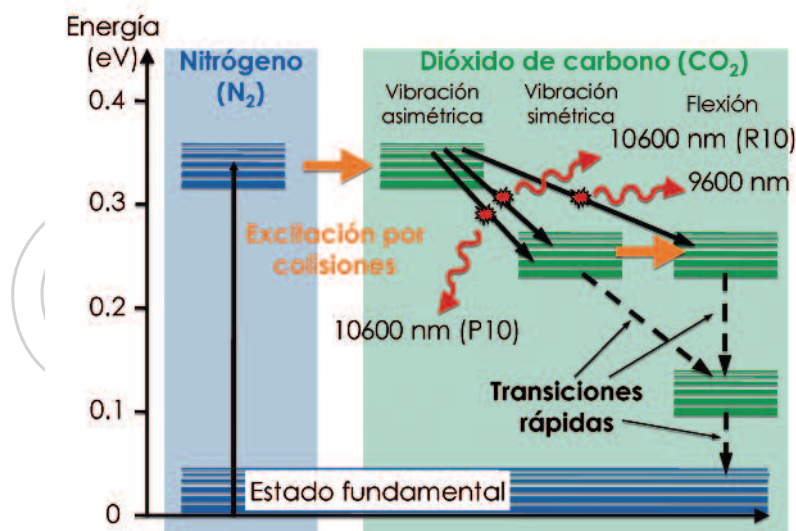


Figura 4.4. Esquema de niveles de un láser de  $\text{CO}_2$ .

Los láseres de  $\text{CO}_2$  pueden emitir en onda continua o en pulsos de duración variable, entre milisegundos y nanosegundos. La presión del gas también varía, pudiendo llegar al rango de la presión atmosférica en algunos láseres pulsados. Su calidad espacial suele ser muy buena, sobre todo a potencias bajas.

El rendimiento del láser de  $\text{CO}_2$  es muy alto, pudiendo convertir hasta un 30% de energía eléctrica a óptica, en contraste con la mayoría de láseres, que tienen eficiencias menores. La potencia del de  $\text{CO}_2$  aumenta con el tamaño del tubo, por lo que son frecuentes tubos de varios metros.

En cuanto a las aplicaciones, el láser de  $\text{CO}_2$  es el rey en aplicaciones industriales como el procesado de materiales: corte, soldadura, perforado,... Además de esto, tiene aplicaciones en medicina y cirugía.

#### 4.1.4. Láseres de excímero

El término excímero quiere decir dímero excitado. Son moléculas diatómicas cuyo estado fundamental no está ligado, pero que pueden tener estados excitados con una vida media apreciable, por lo que permiten conseguir inversión de población entre esos dos estados. Los láseres de excímero se basan en compuestos de un gas noble (Ar, Kr, Xe) y un halógeno (F, Cl, Br, I).

Un ejemplo de excímero es el fluoruro de criptón. Una mezcla de flúor y criptón se somete a una descarga eléctrica y, tras una cadena de reacciones en las que intervienen átomos excitados o ionizados se llega a la formación de un estado metaestable  $\text{KrF}^*$ . El estado metaestable, tras un cierto tiempo, se disocia emitiendo un fotón. En este caso la frecuencia del fotón emitido corresponde a 248 nm, en el ultravioleta. Los láseres de excímero funcionan en

régimen de pulsos en el rango de los nanosegundos. Su cualidad principal es la emisión en ultravioleta, siendo posiblemente los láseres más intensos en esa zona espectral.

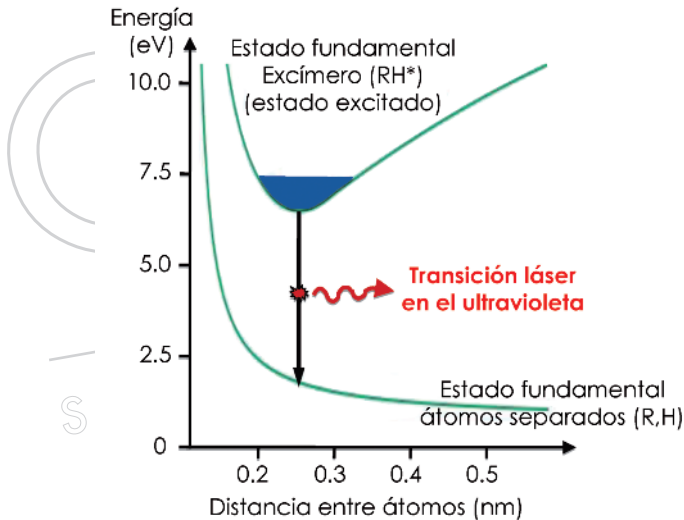


Figura 4.5. Esquema de niveles de un láser de excímero.

En los láseres de excímero la mezcla está muy diluida en otro gas que suele ser helio. La excitación puede producirse por descarga, que es el sistema más sencillo y barato, o por haz de electrones. En este último caso se consiguen potencias más altas pero los equipos son más complejos y caros.

Los principales problemas de este tipo de láseres son la corta vida de la mezcla de gases, su capacidad de corrosión y la vida de electrodos y de sistemas ópticos. La calidad del haz tampoco suele ser muy buena.

A pesar de estos problemas, que se han ido superando, los excímeros se usan mucho en el campo del microprocesado de materiales. También tienen aplicaciones en medicina, por ejemplo en cirugía de la córnea.

## 4.2. Láseres de estado sólido

Otra gran familia de láseres son los de estado sólido. Se consideran como tales los que tienen como medio activo un material sólido (cristal o vidrio) dopado con una pequeña proporción de iones (del orden del 1%) que emiten la radiación láser. El material base puede tener distintas formas: cilindro, prisma, disco,... En estos láseres el bombeo es habitualmente de tipo óptico, con lámpara, LEDs u otro tipo de láser. Los láseres de semiconductor, obviamente tam-

bién sólidos, se consideran en una familia diferente porque su funcionamiento es muy distinto.

Los iones utilizados son los de metales de transición (Cr, Ti,...) o de tierras raras (Nd, Er, Yb,...) Estos elementos tienen niveles de energía internos que permiten transiciones en el rango óptico, siendo relativamente fácil conseguir la inversión de población. El material base, o matriz, suele ser un cristal duro, algún vidrio, o incluso un material cerámico. Las características fundamentales de la matriz son su transparencia, facilidad de fabricación y buenas propiedades térmicas. El primer láser de estado sólido fue también el primero de todos, el de rubí. Uno de los más usados es el láser basado en iones de neodimio en distintas matrices sólidas, por ejemplo YAG (granate de itrio y aluminio).

En los láseres de estado sólido los niveles energéticos de los iones entre los que se producen las transiciones están ensanchados debido al efecto de la red cristalina circundante. A veces este ensanchamiento es muy grande y por ello algunos láseres de estado sólido pueden emitir en una amplia banda de longitudes de onda.

A continuación vemos las características de los láseres de estado sólido más interesantes.

#### 4.2.1. Láseres basados en iones de neodimio

El láser de neodimio en matriz de YAG ha sido el láser de estado sólido más empleado en muchos años. Puede emitir en continuo o pulsado a una longitud de onda de 1,06 micras que puede ser doblada a 532 nm o triplicada a 355 nm con ayuda de algún cristal no lineal. Su material base es el YAG

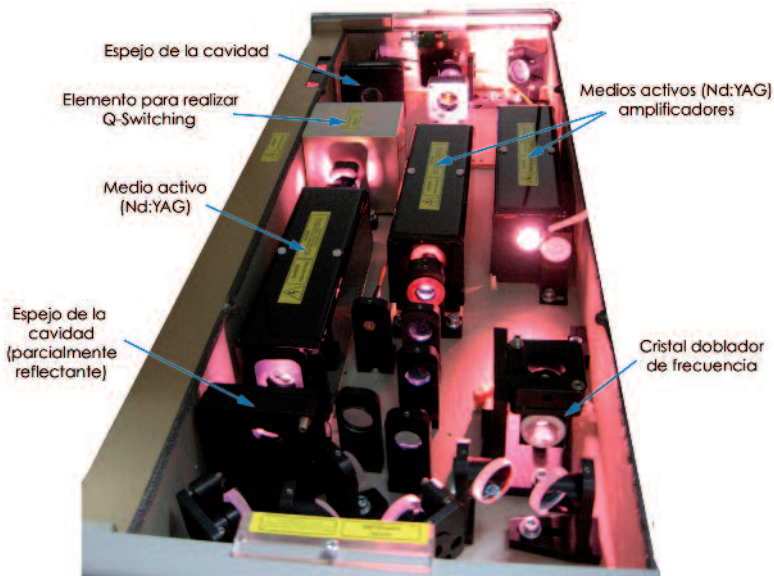


Figura 4.6. Vista de un láser de neodimio.

( $Y_3Al_5O_{12}$ ), estando el neodimio como impureza sustitucional del itrio en una proporción de aproximadamente un 2%. Las propiedades más relevantes del YAG son su dureza, estabilidad e isotropía. Pueden conseguirse cristales grandes de muy buena calidad y acabado. Su alta conductividad térmica hace que sea fácilmente refrigerable, lo que permite potencias muy altas. Por todo ello, es el cristal base más usado, aunque también hay modelos que usan otro tipo de cristales o vidrios.

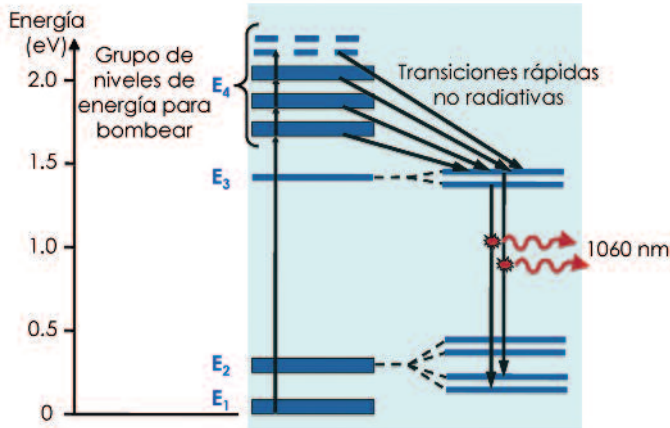


Figura 4.7. Esquema de niveles de un láser de neodimio.

El láser de neodimio sigue un esquema de cuatro niveles, produciéndose la emisión entre los dos centrales. La línea de emisión puede modificarse ligeramente dependiendo del tipo de matriz. La inversión de población se logra fácilmente bombeando con una lámpara o con un diodo.

Si el bombeo se hace con un láser de diodo la eficiencia es mucho mayor porque se puede ajustar la emisión del diodo a la absorción del neodimio casi perfectamente. Para una misma potencia de salida, un láser bombeado por diodo requiere mucha menor refrigeración que uno bombeado por lámpara. Por ello, en las últimas décadas, cuando se mejoraron mucho los láseres de diodo, han empezado a hacerse habituales como mecanismo de bombeo.

A pesar de que los láseres de neodimio emiten de forma natural en el infrarrojo, la salida de muchos de ellos es verde. Esto se debe a que pueden funcionar doblados en frecuencia gracias a un efecto óptico no lineal conocido como generación de segundo armónico. En este proceso un medio óptico no lineal convierte dos fotones de baja energía (1064 nm, infrarrojo) en uno de energía doble, es decir, longitud de onda mitad (532 nm, verde). Los láseres de neodimio también pueden funcionar triplicados en frecuencia (355 nm, ultravioleta).

Los láseres de neodimio tienen muchas aplicaciones: procesado de materiales, medicina, detección, bombeo de otro tipo de láseres, etc.



#### 4.2.2. Láser de rubí

Su importancia es sobre todo histórica, pues fue el primer láser construido. El rubí es un corindón ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) en el que un pequeño porcentaje de aluminio (sobre el 0,05%) está sustituido por cromo. La estructura energética del cromo es adecuada para obtener inversión en un esquema de tres niveles, aunque el umbral de ganancia es alto. Por ello requiere un bombeo intenso que hace que no sea posible obtener intensidades demasiado elevadas. Aunque es posible operar en continuo, lo más habitual son los láseres de rubí pulsados, con velocidades de repetición muy bajas, del orden del hercio. En la Fig. 2.7 se ve un láser de rubí.

#### 4.2.3. Láseres vibrónicos

Son láseres de matriz cristalina con impurezas de metales de transición. A diferencia de otros como el de Nd:YAG, en estos láseres la emisión se produce entre niveles electrónicos y vibracionales de la red cristalina (fonones). Esto hace que las líneas de emisión y absorción posibles se ensanchen, pudiendo sintonizarse la salida a la longitud de onda deseada. Además, la curva de absorción no coincide con la de emisión.

El láser vibrónico más usado para aplicaciones científicas es el de titanio:zafiro, en el que los iones de titanio dopan un zafiro o corindón. Tiene la curva de ganancia más ancha de todos los láseres de estado sólido, de 660 a 1.180 nm. Como pueden ser doblados en frecuencia, abarcan casi todo el rango visible e infrarrojo cercano. Pueden trabajar en régimen continuo o, más habitualmente, pulsado, pudiendo obtenerse pulsos de unos pocos femtosegundos con potencias de pico muy elevadas, lo que le convierte en el láser ultrarrápido más usado. El bombeo se realiza normalmente con otro láser de frecuencia en el rango de absorción (máximo a unos 500 nm).

Las aplicaciones del láser de titanio:zafiro se basan en sus pulsos intensos ultracortos y en su sintonizabilidad. Por la primera característica son los más usa-

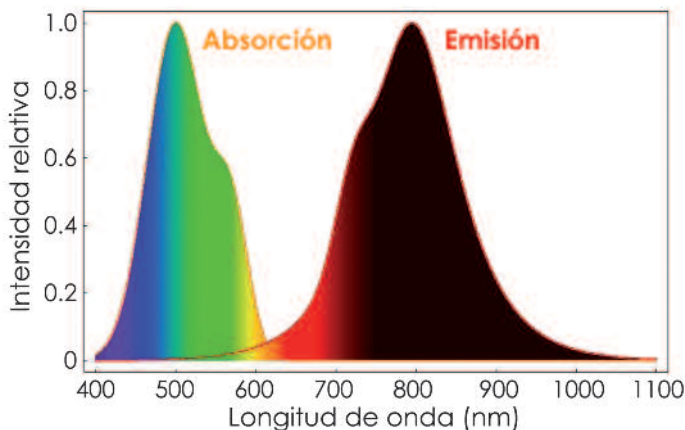


Figura 4.8. Espectro de absorción y emisión del láser de titanio:zafiro.

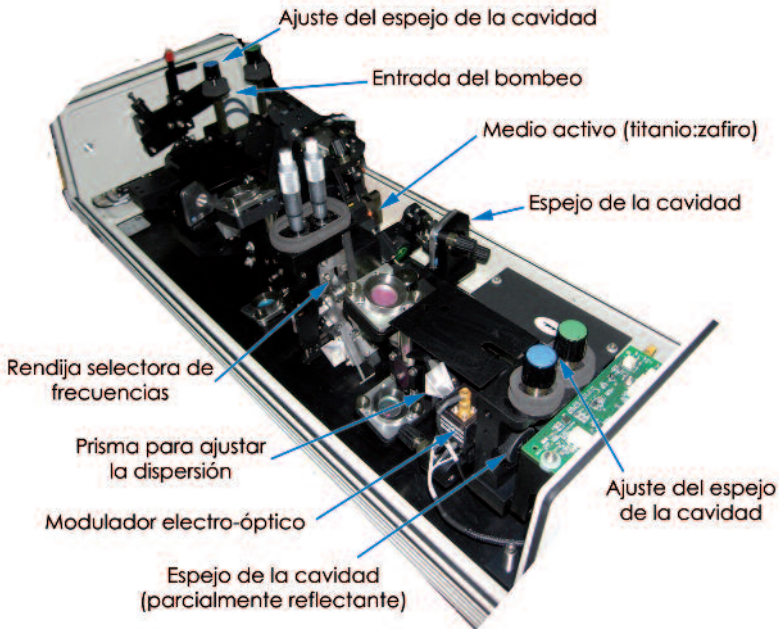


Figura 4.9. Vista de un láser de titanio:zafiro.

dos en aplicaciones que requieran gran potencia de pico (creación de plasmas, emisión de rayos X, generación de armónicos altos, etc.). Por la segunda son muy utilizados en técnicas de espectroscopía.

#### 4.2.4. Láseres de fibra

Aunque suelen considerarse una familia de láseres independiente, los láseres de fibra son láseres de estado sólido en los que la matriz no es una pieza de cristal o vidrio sino una fibra óptica, habitualmente fabricada con vidrio, y los iones que la dopan son de tierras raras. El bombeo es óptico, con diodos. El pequeño grosor de la fibra, la posibilidad de microestructurarla, o de utilizar ciertos tipos de no linealidades ópticas confieren a estos láseres algunas propiedades únicas.

Inicialmente este tipo de láseres se utilizaron en telecomunicaciones, aprovechando que de este modo podían integrarse los emisores y amplificadores en el propio medio por el que viaja la señal. En los últimos años se ha avanzado mucho en la tecnología de los láseres de fibra y sus aplicaciones son numerosas.

Son láseres muy versátiles, en los que pueden alcanzarse potencias muy elevadas que se transportan de forma muy fácil a través de la propia fibra, con buena calidad espacial, muy compactos (la fibra puede enrollarse, ocupando un espacio muy pequeño aunque tenga longitudes kilométricas) y fiables.

### 4.3. Láseres de semiconductor

Los láseres de semiconductor o láseres de diodo constituyen otra familia en el mundo de los láseres. Desde hace décadas, los láseres de semiconductor son los más vendidos, con gran diferencia sobre el resto de tipos de láser. Como su nombre indica, el medio activo lo constituye un material semiconductor o una unión de ellos.

Los semiconductores tienen un número modesto de portadores de corriente libres que pueden moverse a través de la red cristalina cuando se les aplica un campo externo. Si los portadores son electrones (cargas negativas) se habla de semiconductores de tipo  $n$ ; si son huecos (cargas positivas), semiconductores de tipo  $p$ . La unión de uno  $n$  y otro  $p$  se llama diodo. Los diodos se usan en aplicaciones electrónicas y como emisores de luz (LEDs). Estas uniones son también la base de los láseres semiconductores.

Los niveles de energía en un sólido en general, y en un semiconductor en particular, están ensanchados debido al efecto de los iones de la red cristalina situados muy próximos formando una estructura periódica. Por ello consisten en distintas bandas de energía. La llamada banda de valencia es la más alta ocupada con electrones y la de conducción la inmediatamente superior a esta. Entre ellas hay una banda prohibida, o gap. Los electrones no pueden ocupar los niveles de energía correspondientes al gap. En una unión  $p$ - $n$  las bandas de energía están desplazadas de forma que los electrones en la banda de conducción del lado  $n$  no puedan cruzar al  $p$  ni los huecos del  $p$  cruzar al  $n$ . Con la aplicación de un campo eléctrico esa estructura se modifica, cruzando portadores al lado contrario y favoreciendo la recombinación (transición desde la banda superior a la inferior), que en ciertos materiales, los llamados de gap di-

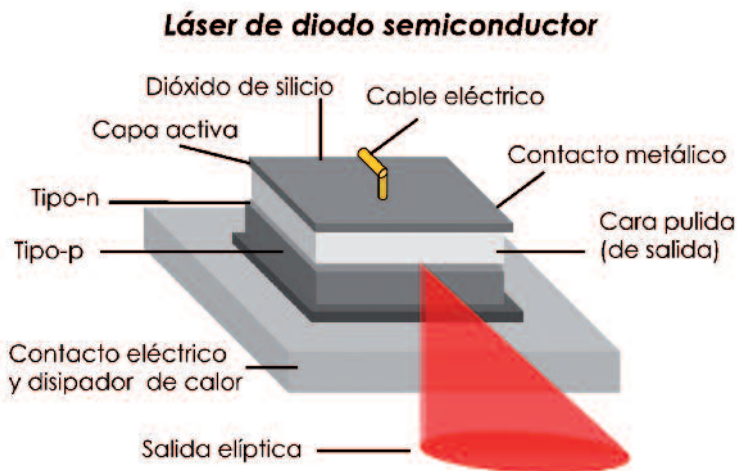


Figura 4.10. Diseño de un láser de diodo semiconductor.

recto, se produce emitiendo un fotón. Ese es el mecanismo de inversión de población de un láser semiconductor. Cuando la inversión es suficientemente alta tendremos emisión estimulada, que suele producirse en la dirección paralela a la unión. Si no se alcanza la condición de umbral la emisión no es coherente y tenemos un LED.

Las dimensiones de un láser de diodo son pequeñas, incluso menores que un milímetro. Dos de las superficies perpendiculares a la unión se mantienen rugosas para disminuir la reflexión y evitar la emisión en esas direcciones. Las otras dos se pulen y actúan como espejos, favoreciendo la amplificación. De esta manera, la propia estructura actúa como cavidad, sin necesidad de espejos externos. Esto es así porque los semiconductores tienen índices de refracción bastante altos que hacen que la reflectividad en la superficie medio-aire sea de un 30-40%.

La salida de un láser de diodo puede contener varias frecuencias debido al carácter de banda de los niveles de energía. Sin embargo, al ser la cavidad muy pequeña, esas frecuencias están muy separadas. Es posible seleccionar una de ellas por medio de varios mecanismos.

Otro de los factores que influyen en la respuesta del láser es la temperatura, puesto que afecta fuertemente a la población de los niveles. En general, un aumento de temperatura conlleva un crecimiento de la corriente umbral para que se produzca emisión. También influye en la longitud de onda de emisión, que tiende a aumentar.

El perfil espacial del haz no es gaussiano o redondeado sino más bien alargado, debido a la difracción en la dirección perpendicular a la unión. En esa dirección el haz se puede abrir en ángulos de decenas de grados. En la opuesta sólo lo hace unos  $10^\circ$ . Este tipo de haz es muy difícil de controlar y por ello poco útil y esa es una de las mayores desventajas de este tipo de láseres.

Entre las ventajas de estos láseres están su alta eficiencia, el pequeño tamaño y bajo peso, consumo escaso y la capacidad de ser excitados por fuentes de bajo voltaje. Todo ello hace que sean muy usados en aplicaciones como lectores de discos compactos, impresoras o telecomunicaciones. La posibilidad de usar conjuntos de láseres de diodo agrupados, a veces utilizando fibras ópticas, ha hecho que puedan conseguirse potencias muy altas con este tipo de láseres, lo que ha extendido sus aplicaciones a muchos campos de la industria y de la ciencia.

La longitud de onda de un láser semiconductor, salvo efectos térmicos, está definida por la anchura del gap. En los más comunes, como el de AlGaAs, el gap está en la frontera entre el rojo y el infrarrojo y la mayoría se mueven en esa zona. Sin embargo a día de hoy hay láseres de diodo comerciales desde el infrarrojo lejano hasta el ultravioleta.

Las estructuras de los láseres semiconductores pueden ser (y son) más complicadas que un simple diodo. Normalmente existen varias capas de materiales distintos (heterouniones). Estas heterouniones favorecen el confina-

miento de la luz por la diferencia de índices entre los materiales. Tampoco todos emiten por el borde de la unión sino que los hay de emisión superficial (emiten perpendicularmente a la unión), ventajosos puesto que se pueden empaquetar muchos en áreas muy pequeñas.

#### 4.4. Otros láseres

##### 4.4.1. Láseres de colorante

En los láseres de colorante clásicos el medio activo es una disolución líquida de compuestos orgánicos colorantes en líquidos como alcohol metílico. Son los únicos láseres líquidos que se han desarrollado hasta pasar al mercado, aunque hoy no se utilizan tanto. Su característica más destacada es la sintonizabilidad en un rango amplio de frecuencias. Actualmente, láseres de estado sólido como el titanio:zafiro o los osciladores paramétricos ópticos, basados en efectos ópticos no lineales, son opciones mucho mejores.

Los colorantes son moléculas orgánicas grandes. Uno de los más usados es la rodamina 6G, de fórmula  $C_{26}H_{27}N_2O_3Cl$  y con estructura en forma de varios anillos tipo benceno. La estructura de niveles de estas moléculas es complicada pues cada nivel electrónico se subdivide en una infinidad de niveles vibracionales y rotacionales. Por ello tienen bandas de absorción y emisión muy anchas y se puede seleccionar sus frecuencias.

La excitación se produce por bombeo y la emisión es en forma de pulso, pues hay una serie de procesos que limitan la inversión de población a tiempos largos. Puede conseguirse una salida en continuo si se hace circular el colorante a gran velocidad con una bomba. Para seleccionar la longitud de onda de emisión se utilizan una o varias cavidades internas. El rango de uso puede hacerse muy grande sin más que cambiar un recipiente de colorante por otro de tipo distinto.

##### 4.4.2. Láseres de electrones libres

Son un tipo de láser muy particular. Su medio activo no es ni sólido, ni líquido, ni gaseoso, sino un haz de electrones a velocidades cercanas a la de la luz que convierten su energía cinética en radiación. No hay por tanto inversión de población, a menos que la entendamos como transiciones entre estados del continuo. La coherencia en la emisión se logra haciendo pasar los electrones por un oscilador de campos magnéticos alternos, de forma que todos emitan en fase.

Un láser de electrones libres tiene muchas ventajas: es sintonizable en un rango amplísimo de frecuencias, desde las microondas hasta casi los rayos X, sin más que variar la velocidad de los electrones y el tamaño de los imanes del oscilador; una intensidad de salida muy elevada; no necesita refrigeración y no hay posibilidad de dañar el material; la calidad del haz puede ser muy grande.

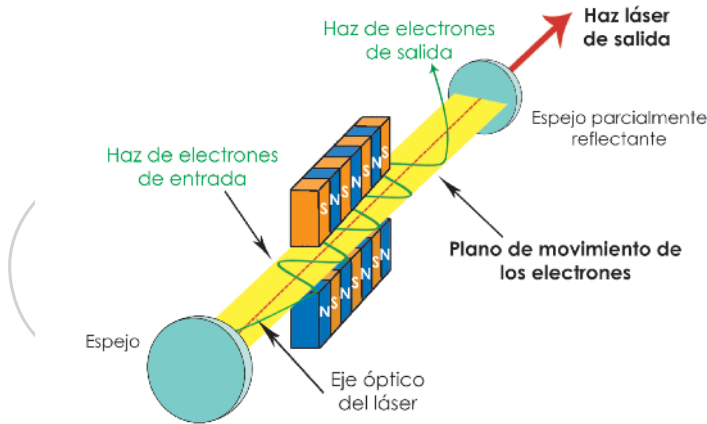


Figura 4.11. Esquema de un láser de electrones libres.

Por supuesto, también tiene inconvenientes, como por ejemplo ser una instalación muy complicada que incluye un acelerador de electrones, por lo que no es precisamente barato.

#### 4.4.3. Láseres de rayos X

En la búsqueda de láseres de frecuencias cada vez más altas, los rayos X son el límite deseable. Sin embargo, son muy difíciles de construir, aunque sólo sea por la imposibilidad de tener buenos espejos de rayos X.

Una posibilidad para tener láseres de frecuencia muy alta es usar transiciones atómicas entre niveles de energía muy distantes. Para ello pueden ionizarse átomos grandes, formando un plasma en el que esas transiciones pueden producirse. Otra opción es la generación de armónicos de orden alto con láseres muy intensos.

Entre las posibles aplicaciones de los láseres de rayos X están la holografía de materiales biológicos, fotolitografía, espectroscopía de rayos X, microscopía, caracterización de metales, etc.

#### Para saber más

*Laser Fundamentals*. W. T. Silfvast, Cambridge University Press, Cambridge, 2004.

*The Laser Guidebook*. J. Hecht, 2<sup>nd</sup> edition McGraw-Hill, 1992.

LÁSERES PULSADOS

5

Habitualmente, se piensa en un láser como una fuente de luz que emite de forma continua, es decir, de forma prolongada e ininterrumpida a lo largo del tiempo. Sin embargo, existen ciertos tipos de láseres que emiten sólo durante pequeños intervalos de tiempo, obteniendo los denominados pulsos láser. De hecho, los primeros láseres emitían en forma de trenes de pulsos, algo que fue anecdótico en un principio. Pero pronto adquirió una relevancia insospechada, hoy en día muy importante: la emisión de pulsos de luz con duraciones muy cortas.

Un pulso de luz se puede describir—obviando el campo magnético de la radiación— como un campo eléctrico que oscila a una frecuencia conocida como *portadora*, y cuya amplitud de oscilación varía temporalmente conforme a una función *envolvente*, que da forma al pulso. En el caso de pulsos cuya envolvente tenga una duración temporal de pocos ciclos (periodos de oscilación de la frecuencia portadora), la diferencia de fase entre la portadora y la envolvente adquiere relevancia. Esa diferencia de fase, conocida como CEP (*carrier envelope phase*, en inglés), da lugar a que la máxima amplitud del campo eléctrico varíe significativamente. Ello se puede observar en la Fig. 5.1, donde se representan dos pulsos con distinta CEP.

La utilización de pulsos cada vez más cortos está adquiriendo un creciente interés en la comunidad científica. Como se explicará en el Cap. 9, se pueden emplear destellos de luz muy cortos para observar procesos naturales muy rápidos (reacciones químicas, movimiento electrónico, etc.). Si cada destello es mucho más corto que los tiempos típicos de las dinámicas a estudiar,

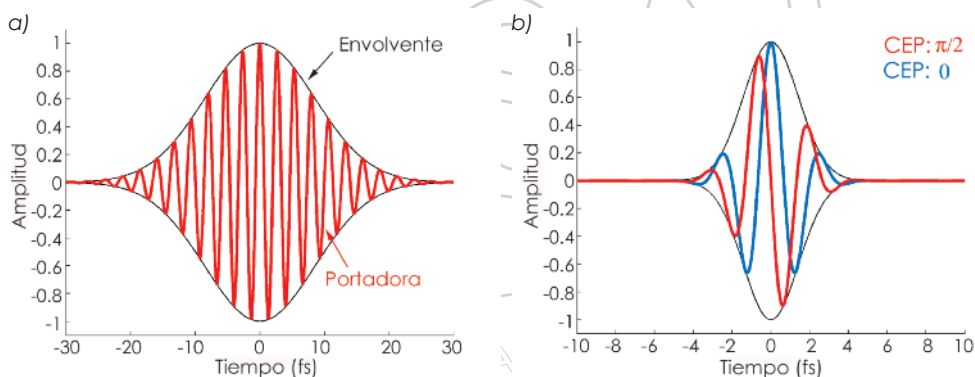


Figura 5.1. a) El campo eléctrico de un pulso óptico está formado por una componente envolvente (línea negra) y otra oscilante según la frecuencia portadora (línea roja). En la figura b) se muestran dos pulsos de pocos ciclos ópticos con la misma envolvente pero con distinta CEP.



es posible *congelar* diferentes escenas de la evolución observada. En la vida cotidiana algo parecido ocurre con fuentes estroboscópicas en las que rápidos destellos de luz iluminan la escena durante un corto intervalo de tiempo. Por otra parte, a través de pulsos cortos es posible aumentar la potencia del haz, lo que tiene aplicación directa en procesos industriales y de procesamiento de materiales.

En este capítulo se van a presentar de manera muy general algunos de los procesos de generación de pulsos de luz muy cortos. En primer lugar se comentarán los diferentes órdenes de magnitud de duración temporal, comparándolos con procesos naturales, para dar una idea clara de qué significa la palabra *corto* en el contexto de pulsos láser. A continuación se presentarán las dos técnicas que permiten la generación de pulsos cortos, conocidas por sus denominaciones en inglés: el *Q-switching* (conmutación Q) y el *mode-locking* (bloqueo o candado de modos). Como se verá, la primera técnica permite la generación de pulsos en el dominio de los nanosegundos, y la segunda en el de los femtosegundos. Por supuesto, para saber que se ha generado un pulso corto, se debe disponer de técnicas de medición de dichos pulsos, por lo que se efectuará una breve introducción a algunos de los principios de medición temporal de pulsos.

### 5.1. La escala temporal

Cada proceso de la naturaleza tiene un tiempo típico de evolución. Decir que un proceso tiene una duración *corta* o *larga* significa establecer una comparación con otros eventos. Por lo tanto, para comprender la importancia de los pulsos láser es necesario relacionarlos con otros acontecimientos en la naturaleza, lo que equivale a establecer una escala temporal. Si confeccionamos tal escala, en un extremo de ella situaríamos la edad del Universo, que en la actualidad está cifrada en algo más de 13 mil millones de años. Moviéndonos en la escala temporal hacia intervalos de tiempo más cortos, nos encontramos con que los restos más antiguos del hombre moderno datan de hace 195.000 años. Ya en el rango de la vida de un ser humano nos encontramos con procesos tales como los movimientos planetarios. Dentro del rango temporal en el que se situaría nuestra vida cotidiana, el ojo humano es capaz de resolver temporalmente eventos hasta el rango de los milisegundos ( $1\text{ ms} = 10^{-3}\text{ s}$ ). Más rápidos son los procesos de rotación molecular, por debajo de los microsegundos ( $1\text{ }\mu\text{s} = 10^{-6}\text{ s}$ ), siendo posible resolverlos gracias a la Electrónica.

De estos ejemplos se desprende que lo más corto parece tener relación con lo más pequeño: la dinámica molecular es muy rápida y más aún la de los electrones dentro de los átomos, estableciéndose en el rango comprendido entre los femtosegundos ( $1\text{ fs} = 10^{-15}\text{ s}$ ) y los attosegundos ( $1\text{ as} = 10^{-18}\text{ s}$ ).

Por lo tanto, la escala temporal se extiende a lo largo de unos 36 órdenes de magnitud, siendo los pulsos láser ultracortos la principal herramienta para llegar a dilucidar los procesos en el extremo más corto de la misma.

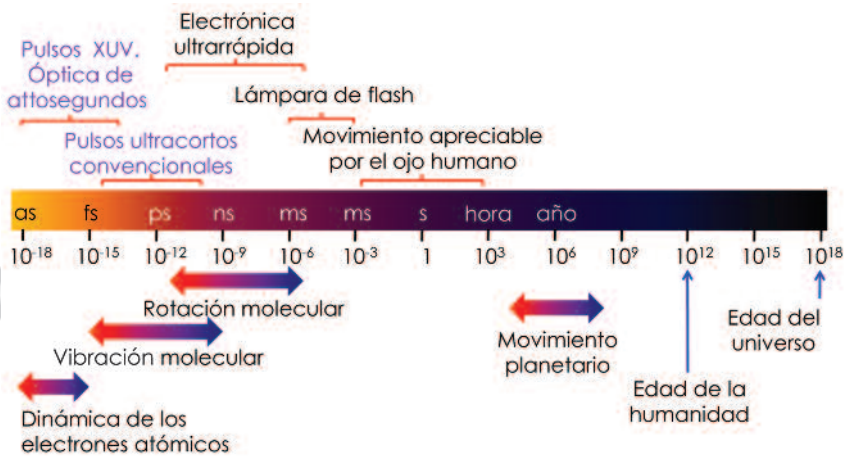


Figura 5.2. Escalas temporales y duración de procesos naturales

## 5.2. Generación de pulsos láser

Algunos láseres, cuando comienzan a ser bombeados, empiezan a emitir de forma natural trenes de pulsos de luz, presentando regímenes transitorios con picos de intensidad, antes de llegar a un régimen de emisión estacionaria. Estos son los ejemplos más sencillos de emisión pulsada. La duración típica de esos pulsos de luz se sitúa en el rango de los milisegundos y microsegundos. Esta forma de emisión es el resultado de la interrelación entre la inversión de población y los fotones emitidos cuando el bombeo es modificado (por ejemplo al activarlo). Se ha aprovechado esta predisposición natural de algunos sistemas láser de emitir de forma pulsada para desarrollar dos técnicas principales para la generación de pulsos con duraciones más cortas, denominadas *Q-switching* y *mode-locking*.

### 5.2.1. Q-switching

Apenas un año después de la invención del primer láser se puso en práctica un nuevo sistema de generación de pulsos de luz. La técnica de *Q-switching* se basa en acumular parte de la energía suministrada mediante el bombeo para liberarla de golpe. Introduciendo grandes pérdidas en la cavidad láser mientras se bombea el medio activo se impide la realimentación del sistema, y, en consecuencia, se inhibe la emisión láser. Ello implica que parte de la energía suministrada por el bombeo se invierte en excitar el medio activo, quedando acumulada en forma de inversión de población entre los estados fundamental y excitado.

A continuación se eliminan súbitamente las pérdidas dentro de la cavidad. En ese momento el sistema se encuentra en un alto grado de inversión de población, mayor que el necesario para compensar las pérdidas en la cavidad dándose ahora las condiciones ideales para la emisión láser. La emisión espontánea inicial será fuertemente amplificada, aumentando el número de fotones en la cavidad y provocando la emisión abrupta de la energía acumulada en forma de

un pulso intenso y temporalmente corto. El pulso decrece tan rápido como se generó debido a que, conforme se va emitiendo la radiación láser, la inversión de población decrece rápidamente hasta el punto en el que el medio activo presente bajas ganancias y el sistema deje de estar en condición de emisión láser.

Si se activan de nuevo las pérdidas de la cavidad se vuelve al inicio del ciclo: el medio activo comienza de nuevo a acumular la energía. Un símil de este fenómeno es el de un embalse en el que se acumulara agua hasta, repentinamente, abrir las compuertas y liberar su contenido en forma de una avenida violenta. Una vez vaciado el embalse, se cerrarían las compuertas hasta que volviese a llenarse, empezando de nuevo el proceso.

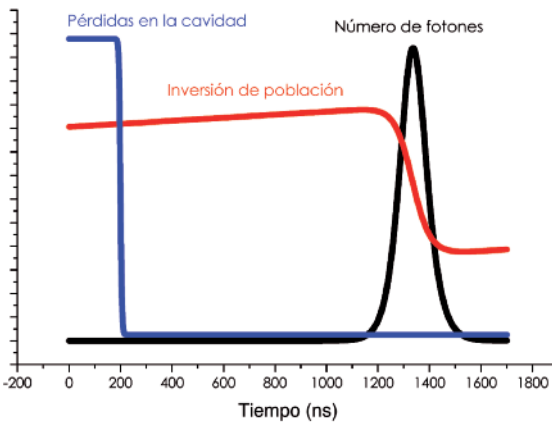


Figura 5.3. Mecanismo del Q-switching. La reducción de las pérdidas de la cavidad en situación de inversión de población provoca la emisión de un pulso láser.

La inversión de población comienza a disminuir, decreciendo la ganancia del medio activo. Llega un momento en el que el medio activo no es capaz de compensar las pérdidas del resto de la cavidad, con lo que acaba la emisión láser.

La duración de los pulsos obtenidos mediante esta técnica se sitúa en el orden de los nanosegundos ( $1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s}$ ). En la práctica, para lograrlo se actúa directamente sobre la transmisión global de la cavidad, lo que técnicamente se conoce como factor Q o de calidad de la cavidad (*quality* en inglés), de ahí el nombre de la técnica. La introducción de pérdidas en la cavidad actúa como interruptor o conmutador en el proceso de generación de pulsos. Existen varias formas de desencadenar el proceso de Q-switching, clasificadas en dos categorías, activas y pasivas.

#### 5.2.1.1. Técnicas activas para obtener Q-switching

Los métodos mediante los cuales se actúa sobre la cavidad se denominan activos, controlando externamente la frecuencia de generación de los pulsos láser y la repetición de los ciclos de acumulación-emisión. Una de las formas

Como se ve en la Fig. 5.3, mientras las pérdidas de la cavidad resonante son altas, la inversión de población aumenta debido al bombeo. Cuando se reducen repentinamente las pérdidas, en una primera fase los fotones emitidos por emisión espontánea son amplificados por el medio activo, que presenta una alta ganancia. El número de fotones en la cavidad —pequeño en un principio— comienza a crecer en un efecto en cascada hasta que se obtiene una emisión rápida de energía. Cuando el número de fotones aumenta de manera importante, la inversión de población

más comunes de generar pulsos mediante *Q-switching* activo consiste en incluir dentro de la cavidad resonante un modulador que permita la interrupción del haz aplicando una tensión eléctrica. Otra opción consiste en girar uno de los espejos de la cavidad para desalinearla. Todo ello se logra, por ejemplo, mediante moduladores acustoópticos, electroópticos o mecánicos.

#### 5.2.1.2. Técnicas pasivas para obtener *Q-switching*

En las técnicas pasivas, la conmutación no se controla externamente, sino que la propia dinámica del sistema marca el ritmo de la generación de los pulsos. Aunque son sencillas, no permiten modificar la frecuencia de repetición de los pulsos. El conmutador pasivo más habitual en *Q-switching* son los absorbentes saturables.

Este tipo de materiales presenta una absorción importante para bajas intensidades de luz pero, una vez superado un cierto nivel de intensidad, la transmisión aumenta debido a la saturación del medio. Es decir, el material es casi opaco para intensidades bajas y se convierte en casi transparente para intensidades altas.

Al introducir un material de este tipo en la cavidad, ésta presenta pérdidas elevadas que impiden la emisión láser mientras la ganancia sea baja. Al aumentar la inversión de población gracias al bombeo, la ganancia del medio activo se verá incrementada y será capaz de compensar las pérdidas dentro de la cavidad, por lo que el sistema comenzará a emitir como láser, haciendo que la intensidad aumente. Esto hace que el absorbente saturable pase a ser casi transparente, lo que reduce aún más las pérdidas de la cavidad, y potencia la emisión de luz láser.

No obstante, esta tendencia no puede sostenerse mucho en el tiempo, porque pronto se va a agotar la energía almacenada en forma de inversión de población. De hecho, el repentino aumento de la intensidad emitida tiene como consecuencia la rápida reducción de la inversión de población y de la ganancia. Al reducirse éstas, se elevan las pérdidas debidas al absorbente saturable, lo que imposibilita la emisión láser, cerrando así el ciclo. En este momento, comienza de nuevo la acumulación de energía del bombeo, reiniciando el proceso.

Una de las ventajas de los métodos pasivos radica en su simplicidad. Por ejemplo, en el caso de los absorbentes saturables, el comportamiento del material es suficiente para obtener los pulsos. Además, el *mode-locking* pasivo logra pulsos más cortos que el activo. Sin embargo, los métodos activos permiten un mayor control del fenómeno (por ejemplo, la tasa de repetición<sup>1</sup>).

#### 5.2.2. *Mode-locking*

El siguiente salto cualitativo llegó en 1964, cuando Hargrove, Fork y Pollack consiguen aplicar una nueva técnica de generación de pulsos, el *mode-locking*

1 Tasa de repetición: número de pulsos láser por unidad de tiempo.

activo en un láser de helio-neón. En el Cap. 2 se comentaron las características de una cavidad, en concreto cómo ésta presenta un conjunto finito de modos longitudinales resonantes en los que se puede distribuir la energía. El número de modos dependerá tanto de las características de la cavidad como de la anchura espectral que pueda ser amplificada por el medio activo, como se discutió en la Fig. 2.9.

En el caso de que cada modo evolucione de manera independiente al resto, es decir, que estén completamente desfasados, la superposición de todos ellos dará lugar a una emisión prácticamente continua aunque con ligeras fluctuaciones temporales. Sin embargo, si se consigue que los campos eléctricos de los modos longitudinales oscilen con sus fases bloqueadas, en ciertos momentos puede darse el caso de que lo hagan en fase, lo que dará lugar a que su suma sea un pico de intensidad o pulso de luz. Dicho pulso durará hasta que las oscilaciones vuelvan a desfasarse. Además, el tiempo entre dos de estos pulsos consecutivos se mantiene constante y está relacionado con la longitud de la cavidad.

La duración de los pulsos viene dada por el número de modos longitudinales de la cavidad que estén acoplados. Si aumenta el número de modos longitudinales en fase, su superposición temporal dará lugar a pulsos más cortos. Para una curva de ganancia con anchura espectral fijada (la cual dependerá del medio activo), el pulso más corto se obtendrá cuando todos los modos de la cavidad estén acoplados. Ahora bien, ese número de modos —y el espaciado entre ellos— viene dado por la longitud de la cavidad. Para obtener pulsos aún más cortos en la misma cavidad, se requerirán medios activos con mayor anchura espectral, ya que así habrá más modos dentro de la curva de amplificación.

El concepto fundamental que subyace en la obtención de pulsos muy cortos es que es necesario disponer de láseres que presenten espectros muy anchos. Esto contradice la idea bastante extendida de que todos los láseres son fuentes monocromáticas. Por ejemplo, algunos láseres de titanio:zafiro (cuya frecuencia central se corresponde con una longitud de onda de 800 nm) emiten pulsos cercanos a los 5 fs, con una anchura espectral de varios centenares de nanómetros, lo que significa que no sólo emiten en el infrarrojo cercano, sino también en gran parte del espectro visible. Esto se traduce en que el ojo humano los perciba blancos.

Una vez que se dispone de ancho de banda suficiente, el punto clave reside en bloquear la fase relativa de los múltiples modos longitudinales, es decir, acoplarlos o relacionarlos entre sí para que evolucionen en fase. En la Fig. 5.4, se representa la emisión láser en el caso de tener 2, 5 y 10 modos acoplados, frente a tener 10 modos desacoplados. Nótese que cuantos más modos se encuentren bloqueados, los pulsos emitidos serán más cortos. Aún en el caso de 10 modos pero con fases aleatorias (es decir, desacoplados), el láser emite de forma aleatoria, asemejándose a un régimen continuo.

En la Fig. 5.5 se compara la oscilación de 10 modos acoplados y 10 modos desacoplados. En el primer caso, los pulsos se emiten durante el tiempo en el que dichos modos oscilan en sincronía, limitado por su diferencia en frecuencia. La superposición o suma de los modos da lugar a un pulso corto (como en la Fig. 5.4.c). En el segundo caso, no se dará esa situación, ya que el resultado de

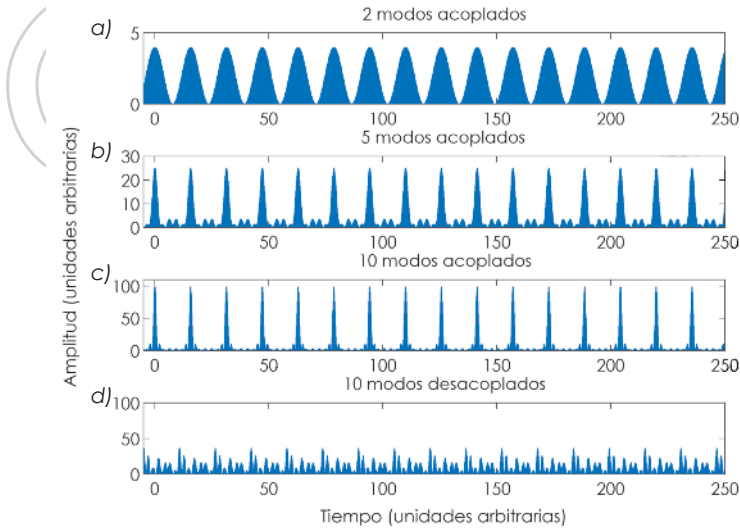


Figura 5.4. Evolución temporal de la emisión de un láser dependiendo del número de modos acoplados y comparación con el caso sin mode-locking.

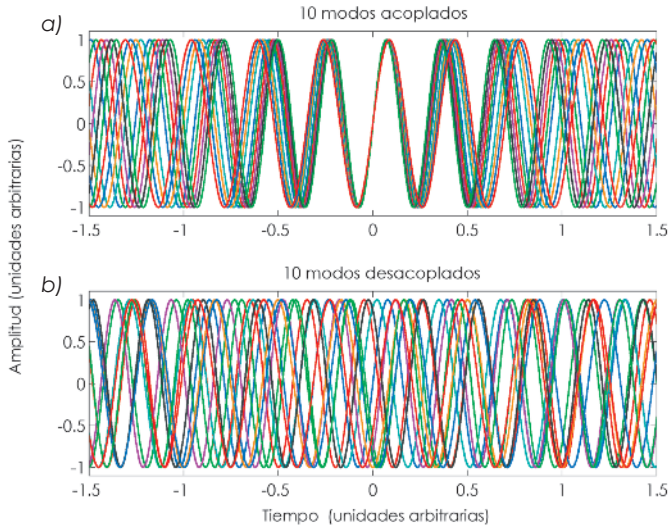


Figura 5.5. Oscilación de 10 modos longitudinales: acoplados y desacoplados.

la suma de los modos producirá una emisión aleatoria. Al igual que en el caso del *Q-switching*, existen dos tipos de técnicas en función de la forma de actuación: activas y pasivas.

#### 5.2.2.1. Técnicas activas para obtener *mode-locking*

Las técnicas activas de *mode-locking* consisten en introducir un sistema que permita modular la luz dentro de la cavidad resonante. A diferencia del *Q-switching*, aquí la modulación tiene que tener un período de repetición sincronizado con el tiempo que tarda la luz en dar una vuelta a la cavidad. Para ello se puede utilizar un modulador acustoóptico controlado externamente, que fuerza a que los modos oscilen en fase.

#### 5.2.2.2. Técnicas pasivas para obtener *mode-locking*

Análogamente al caso del *Q-switching*, los métodos pasivos también utilizan principalmente materiales absorbentes saturables, aunque hay otras técnicas basadas en efectos ópticos no lineales (Kerr). La inclusión de un absorbente saturable tiene como efecto la supresión de la emisión excepto cuando, de manera aleatoria, aparece un pico inicial de intensidad. A dicho pico se le permite la circulación por la cavidad y la consiguiente amplificación tras sus diversos pasos por el medio activo, mientras que la luz menos intensa seguirá siendo eliminada por el absorbente. El pico de intensidad será privilegiado una y otra vez tras sus pasos por el absorbente saturable y el medio activo. Cuando un láser oscila en régimen de *mode-locking* hay un solo pulso muy corto recorriendo la cavidad. En el momento en que ese pulso llegue al espejo de salida, una parte de él es emitida al exterior. Hasta que no vuelve a dar otra vuelta completa a la cavidad no vuelve a haber emisión. Tras múltiples vueltas por la cavidad se emite un tren de pulsos ultracortos cuya tasa de repetición viene dada por una vuelta completa a la cavidad.

Una vez que se tiene el pulso más corto posible mediante las técnicas mencionadas para un medio activo con una anchura espectral determinada, existen métodos adicionales para reducir aún más la duración de los pulsos conseguidos. Una primera técnica consiste en producir procesos no lineales de orden bajo que generan nuevas frecuencias y aumentan la anchura espectral, pudiendo acortar los pulsos. Otra técnica utiliza generación de armónicos de orden elevado —la cual se verá en el Cap. 10— para llegar al límite actual de un pulso de luz de aproximadamente 100 attosegundos de duración.

### 5.3. Medida de pulsos ultracortos

El desarrollo de técnicas de emisión de pulsos de luz cada vez más cortos lleva aparejado el problema de su caracterización. Hasta la invención del *Q-switching*, la Electrónica proveía de métodos de caracterización suficientemente rápidos. Los fotodetectores y osciloscopios pueden llegar a resoluciones

temporales en torno al nanosegundo o centenas de picosegundos. Estos sistemas electrónicos presentan la ventaja de su robustez y sencillez de manejo experimental. Sin embargo, la imparable reducción de las duraciones de los pulsos pronto franqueó esa frontera temporal, por lo que dichos sistemas no podían ser empleados para medir pulsos tan cortos. Una excepción la constituyen sistemas más complejos como la *streak-camera* (cámara de barrido, que aplica el concepto del osciloscopio para la medición de pulsos), que permiten la medición de pulsos en régimen de picosegundo, a cambio de mayor coste económico y de complejidad experimental.

Para medir algo hemos de compararlo con un patrón de magnitud similar. En realidad, hay pocos fenómenos tan rápidos como la emisión de pulsos de femtosegundo o, aún más, de centenares de attosegundos. La idea clave para solucionar el problema consistió en emplear los propios pulsos, compararlos consigo mismos y, mediante diversas técnicas, ser capaces de extraer de esa comparación la duración del pulso. Finalmente, la respuesta para la medida de pulsos ultracortos estaba en la Óptica.

Durante las últimas décadas se han desarrollado varios procedimientos y técnicas para la caracterización de pulsos ultracortos. El éxito ha sido tal que ha permitido conocer no sólo la duración, sino también la estructura de pulsos muy cortos.

Si bien intentar entrar en detalles de los métodos va mucho más allá de la pretensión de este libro, comentaremos algunos rasgos generales de la técnica conocida como autocorrelación, posiblemente la más básica de las desarrolladas para la medición de duraciones de pulsos ultracortos.

La idea general consiste en que el propio pulso se sondee a sí mismo. Un esquema clásico consta de una estructura típica de interferómetro, como se ilustra en la Fig. 5.7. En primer lugar, el pulso a analizar pasa por un divisor de haz, esto es, una lámina que refleja parte de la energía y transmite otra parte. Con ello se divide el pulso en dos réplicas que recorrerán caminos diferentes. El siguiente elemento necesario es una línea de retardo, que habitualmente consiste en un par de espejos móviles en uno de los dos caminos, permitiendo modificar la longitud de uno con respecto al otro. Así, se puede hacer que una

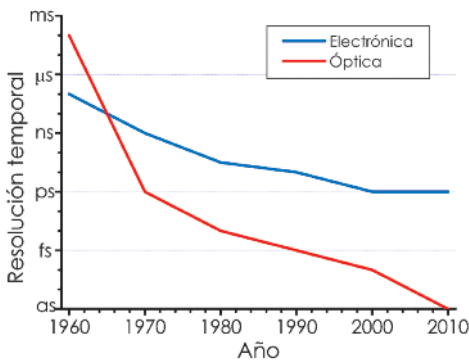


Figura 5.6. La resolución temporal lograda por métodos ópticos supera desde hace años a la que se puede alcanzar con dispositivos electrónicos.



de las dos réplicas se adelante o retrase respecto a la otra, ya que recorrerá un camino diferente a la misma velocidad, que es la de la luz.

Finalmente, se recombinan las dos réplicas sobre un sistema óptico —generalmente empleando efectos no lineales en un cristal— diseñado para dar una respuesta sólo en el caso en que haya una coincidencia temporal de las dos réplicas, es decir, que lleguen a la vez o con retardos inferiores a la duración del pulso. En cualquier otro caso no habrá señal. De esta forma se consigue saber en qué momentos se ven las dos réplicas, lo que da una idea de su duración: para pulsos largos habrá señal para un rango más amplio de retardos que en el caso de pulsos cortos.

Por lo tanto, se establece una correlación entre las dos réplicas del mismo pulso. Si bien ésta no da información acerca de todos los detalles del pulso (estructura temporal y espectral), sí que da una idea aproximada de su duración. En la actualidad existen múltiples refinamientos y técnicas más sofisticadas que permiten conocer los detalles del pulso.

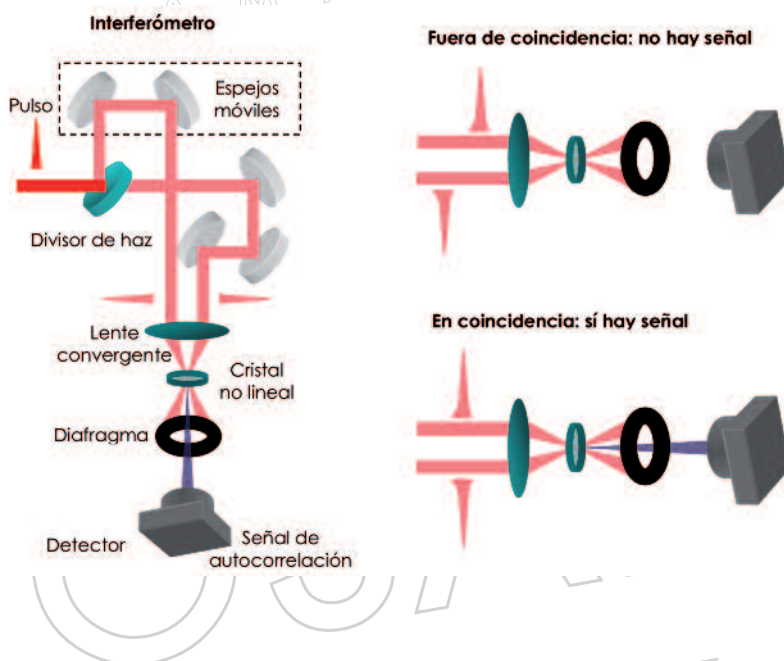


Figura 5.7. Esquema de medida de pulsos mediante autocorrelación. Se utiliza un interferómetro para combinar dos réplicas del pulso en un cristal no lineal. La señal de autocorrelación —analizada con un detector— depende de la coincidencia temporal de las réplicas.

### Para saber más

*Femtosecond Laser Pulses. Principles and Experiments.* Claude Rullière (editor). Springer-Verlag Berlin, Heidelberg. New York, 1998

*Lasers.* Anthony E. Siegman. University Science Books, Mill Valley, California (EE.UU.), 1986. (Sección "Laser dynamics and advanced topics")

*Principles of Lasers.* 5th edition. Orazio Svelto. Springer New York Dordrecht Heidelberg. London, 2010. (Capítulo 8: "Transient Laser Behavior")

# LÁSERES EN LA VIDA COTIDIANA



Desde que el primer láser fuera hecho realidad hace cincuenta años, los avances en su desarrollo tecnológico no han cesado de innovar y de sorprendernos con sus innumerables aplicaciones. En particular, los láseres invadieron desde muy pronto el ámbito más cotidiano de nuestras vidas, por ejemplo en el caso de los lectores de códigos de barras, la holografía o la impresora láser. Hoy en día, su uso está muy extendido y la probabilidad de tener cerca un láser es muy elevada. Nos los encontramos en los lectores y grabadores de discos ópticos (CD, DVD, Blu-Ray), en las telecomunicaciones por fibra óptica, en los punteros láser, etc. En este capítulo, presentaremos cómo estas aplicaciones han llegado a nuestras vidas.

### 6.1. Punteros láser

Los punteros láser son una de las aplicaciones del láser más conocidas. Hoy en día se pueden adquirir por un precio muy bajo, son pequeños y se pueden guardar en un bolsillo. En la mayoría de punteros se utiliza un láser de semiconductor, por su reducido tamaño. Además, como se pueden producir de manera industrial, al igual que los componentes electrónicos, los costes se reducen.

Un puntero es esencialmente un pequeño láser pensado para señalar o resaltar algo de interés, proyectando un punto luminoso muy brillante sobre el objeto al que estemos apuntando.

Seguramente todos los que hemos tenido un puntero láser en las manos hemos podido comprobar, —algo que ya se ha señalado en el Cap. 3,— que

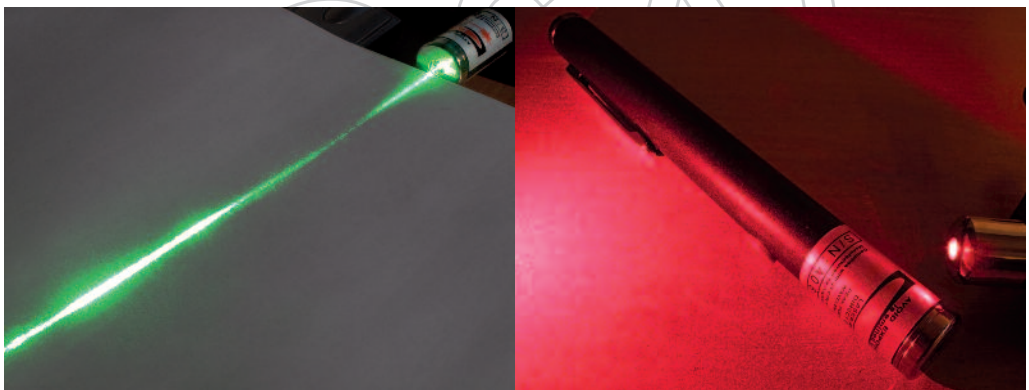


Figura 6.1. Ejemplos de punteros láser.

la radiación emitida por el puntero no se ve a no ser que ésta sea difundida en algún medio, cómo pueden ser las partículas de polvo suspendidas en el aire.

Los punteros láser rojos son los más baratos y emiten en una banda de 650-670 nm. Son además los más sencillos, ya que el conjunto no es más que un diodo láser acoplado a unas baterías (lo que comúnmente conocemos como pilas). Los primeros datan de 1980, aunque en la actualidad son mucho más pequeños. Los de color rojo-naranja emiten alrededor de 635 nm, son más caros puesto que la tecnología es diferente que en el caso anterior, pero se ven mejor debido a que el ojo humano posee una mayor sensibilidad a esa longitud de onda. Los verdes son los más comunes después de los rojos, y el ojo es todavía más sensible al verde que al rojo-naranja. Por eso, aun teniendo la misma potencia que alguno de los anteriores, nos parecerán más potentes porque los veremos mejor.

En el caso de los verdes, como es complicado obtener láseres de diodo emitiendo en esa longitud de onda, la tecnología es diferente y se basa en la conversión de frecuencias. Existen diodos láser que emiten en el infrarrojo, —808 nm—, y que bombean un cristal de  $\text{Nd:YV}_4$ . Este material emite radiación láser en el infrarrojo —1064 nm—, cuya frecuencia se dobla con ayuda de un cristal no lineal —la longitud de onda se divide por dos— y se obtiene la radiación verde, 532 nm. Con un filtro se elimina el infrarrojo restante. Esto hace más peligrosos a este tipo de punteros, porque este filtro puede no existir en los modelos baratos, o ser poco eficiente, permitiendo la emisión de radiación infrarroja.

Como se ha comentado, el uso principal de los punteros láser consiste en señalar detalles interesantes para la audiencia en presentaciones. Debido a su menor visibilidad, los punteros rojos se usan normalmente en interiores y en el exterior en condiciones de poca iluminación, mientras que los verdes tienen el mismo uso, pero su alcance es mayor y su visibilidad en el exterior también.

Los punteros láser también se usan acoplados a un arma para apuntar, y estos pueden ser visibles o infrarrojos, de manera que sólo son detectados por sistemas de detección infrarroja, pasando desapercibidos.

En salidas a la montaña, pueden ser útiles como herramienta de supervivencia, para señalar la posición de una persona herida o extraviada. Al tener suficiente potencia pueden ser vistos por los sistemas de rescate, por ejemplo desde el aire a gran distancia, tanto de día como de noche.

Otro uso muy extendido es en discotecas, o en conciertos en el exterior, como decoración, o complemento de espectáculos artísticos. El láser proyecta diferentes formas y figuras, que van cambiando al ritmo de la música, y esto con ayuda de lentes, espejos y humo, como elemento difusor, crea unos efectos muy llamativos.

Los punteros verdes se utilizan para señalar estrellas en clases de astronomía. Incluso pueden venir acoplados a telescopios para alinearlos con una determinada estrella o lugar en el espacio.

## 6.2. Lectores de códigos de barras

Una de las primeras aplicaciones del láser en la vida cotidiana fue en los lectores de códigos de barras. Hoy en día es una industria que mueve miles de millones de euros al año. Como curiosidad, la idea de un código que se pudiera escanear se le ocurrió al hijo de un mayorista de comestibles en Massachusetts, Estados Unidos. Dedicó su tesis, defendida en 1932, a la automatización de controles de salida en los supermercados, aunque en ese momento la tecnología de escaneado no se basaba en el láser. No fue hasta 1971, tan solo 11 años después de la invención del láser, cuando la compañía Computer Identics instaló el primer sistema de escaneado en una fábrica de General Motors, en Michigan, Estados Unidos. No es de extrañar que esta industria mueva tanto dinero, si pensamos en la cantidad de artículos que hoy en día llevan código de barras: comestibles, revistas, libros, incluso en algunos hospitales los pacientes son identificados mediante una pulsera con un código de barras.

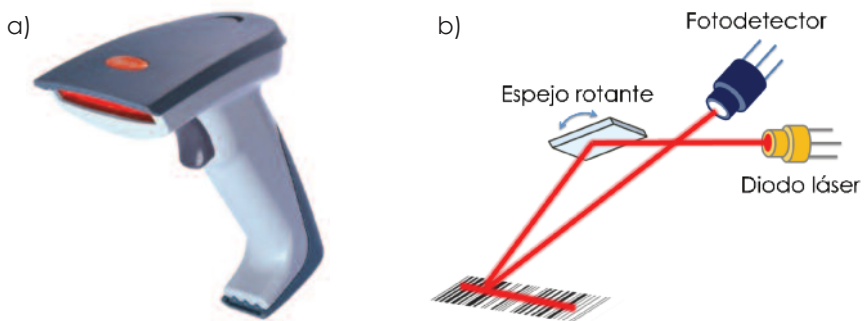


Figura 6.2. a) Lector de código de barras con láser (Fuente: Wikimedia commons). b) Esquema de su funcionamiento.

Existen esencialmente tres tipos de lectores de códigos de barras. Por un lado están las varillas con forma de lápiz, habituales en hospitales y bibliotecas. Se componen simplemente de un LED como fuente luminosa y un fotodiodo para la recepción de la señal. El usuario ha de arrastrar la punta de un lado a otro del código para realizar la lectura. El segundo tipo de lectores combina una cámara CCD para la recepción y una hilera de LEDs como fuente. La lectura ha de hacerse a unos quince o veinte centímetros del código, exteriormente son muy parecidos a los de láser. Finalmente, los escáneres de láser se apuntan sobre el código, como el que se presenta en la Fig. 6.2. Son los más usados, por ejemplo en los supermercados, aunque también son los más caros.

El funcionamiento de este tipo de lectores es el siguiente: el láser, normalmente de diodo, incide sobre el código, compuesto de rayas blancas y negras. La radiación del láser es absorbida por las rayas negras y reflejada por las blan-

cas, por lo tanto dependiendo de si incidimos en una zona blanca o negra la señal reflejada por el código será más o menos intensa. La luz que viaja de vuelta al lector, es enviada a un fotodetector que convierte la intensidad luminosa en impulsos eléctricos. De esta manera es descodificada la información que contiene la señal luminosa remitida por el código. Para hacer el barrido la luz del láser se lleva primero a un espejo que rota para ir recorriendo todo el código (escanear), a una velocidad tan rápida que el ojo humano ve una línea en lugar de puntos.

Los lectores iluminan los códigos con luz roja de 645 a 690 nm, y convierten la imagen de un código, señal luminosa, en una señal electrónica que, a través de un ordenador se transforma en números y/o letras conteniendo toda la información del producto.

Un lector láser típico puede leer un código desde 10-40 cm de distancia, e incluso existen modelos especiales que pueden leerlo a casi 10 metros de distancia.

### 6.3. Almacenamiento óptico: CD/DVD/Blu-Ray

Otra de las aplicaciones más extendidas del láser en la sociedad es la tecnología de almacenamiento óptico utilizada por los CD, DVD o Blu-Ray. La idea principal de esta técnica consiste en almacenar la mayor cantidad de información posible en un disco de plástico, de manera que pueda ser transportado y leído sin pérdida de información. Dicha información es almacenada en código binario —una sucesión de ceros y unos— que tras ser descodificados se transforman, por ejemplo, en palabras, sonido o imágenes. El método de almacenamiento consiste en modificar el índice de refracción de la superficie del disco para realizar una serie de marcas de manera organizada. Para ello la superficie se divide en circunferencias, cuya anchura es del orden de las micras, denominadas pistas, a lo largo de las cuales se realizan las marcas. De esta forma, si dividimos una pista en regiones iguales, aquellas que estén marcadas representarán un uno, mientras que las que no lo estén, un cero. Cuanto más pequeñas y precisas sean estas marcas, mayor número de ceros y unos podremos representar en un disco, y por tanto, mayor cantidad de información seremos capaces de almacenar.

El láser es el elemento más relevante del almacenamiento óptico, ya que es el dispositivo capaz de realizar las marcas de una manera precisa, eficaz, y sobre todo, con repetitividad. Además, la miniaturización de los láseres de diodo hace de éstos el dispositivo perfecto para su acoplamiento a los sistemas de grabación y lectura de discos.

Hasta ahora no hemos hecho distinción entre CD, DVD y Blu-Ray, pues todos ellos comparten la misma tecnología. La diferencia radica principalmente

en el tamaño de las marcas, que depende proporcionalmente de la longitud de onda del láser utilizado. En este sentido, al focalizar un haz láser cuya sección tiene un radio  $R_0$  con una lente de focal  $f$ , el radio del haz en el foco,  $R$ , y por tanto del agujero o marca que vamos a generar en el plástico viene dado por  $R = \lambda f / \pi R_0$ , siendo  $\lambda$  la longitud de onda del láser. De este análisis podemos extraer la conclusión de que cuanto más pequeña sea la longitud de onda, menor será la marca que se genere en el disco, y por tanto, mayor cantidad de datos se podrán almacenar.

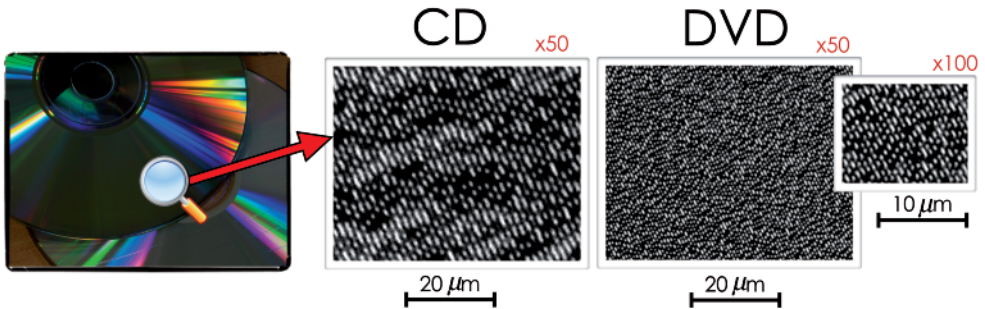



Figura 6.3. Superficie ampliada de un CD y un DVD. En ambos podemos ver las distintas marcas blancas que representan los unos, mientras que los espacios negros representan los ceros. Todas ellas están organizadas en pistas longitudinales. Además, podemos observar cómo las marcas de un DVD son más pequeñas que las de un CD.

La evolución a lo largo de los años de los sistemas de almacenamiento óptico ha estado íntimamente ligada al desarrollo de los láseres de diodo, en la carrera hacia obtener láseres comerciales de menor longitud de onda. De este modo, en 1982 apareció el primer disco compacto (CD), ideado para almacenar música con alta calidad, aunque posteriormente su uso se extendió al ámbito informático y al almacenamiento de datos. El láser empleado en el CD tiene una longitud de onda en el infrarrojo (780 nm), de manera que el tamaño de las marcas es de 0,8 micras y la capacidad de almacenamiento es de 700 megabytes. Posteriormente, en 1995 surgió el disco versátil digital, comúnmente conocido como DVD, que utiliza láseres rojos (650 nm). Al disminuir la longitud de onda el tamaño de las marcas desciende a las 0,4 micras, permitiendo de esta manera almacenar 4,7 gigabytes. Por último, en 2007, y tras una dura batalla comercial, el Blu-Ray propuesto por Sony se abrió camino en el mercado tecnológico al ser capaz de utilizar eficientemente un láser azul (405 nm) para grabar y leer datos. Gracias a los láseres de diodo azules, un Blu-Ray es capaz de realizar marcas de 0,15 micras que permiten almacenar un total de 25 GBytes, es decir, ¡la misma cantidad de información que 35 CDs!



| Dispositivo | Longitud de onda (nm) | Tamaño de la marca (micras) | Capacidad de almacenamiento (GBytes) |
|-------------|-----------------------|-----------------------------|--------------------------------------|
| CD          | 780                   | 0,8                         | 0,7                                  |
| DVD         | 650                   | 0,4                         | 4,7                                  |
| Blu-Ray     | 405                   | 0,15                        | 25,0                                 |

Tabla 6.1. Principales propiedades de los CD, DVD y Blu-Ray.

Por otro lado, el láser no sólo sirve para grabar información en un disco, sino que también se utiliza para leerla en los reproductores de CD, DVD o Blu-Ray. Para ello se proyecta un haz láser de menor intensidad sobre el disco, de forma que la luz reflejada varía en función de la presencia o ausencia de marcas en el sustrato, de forma similar al lector de códigos de barras. Un fotodetector traduce las variaciones de ceros y unos a formato digital, que finalmente es decodificado de manera electrónica para obtener la información almacenada.

#### 6.4. La fibra óptica en telecomunicaciones

Las distintas épocas de la historia se han caracterizado por los progresos del hombre, entre otros: las Edades de piedra y de los metales con el tallado de piedras y fundido y aleación de metales respectivamente; la Edad Media con la imprenta; o la revolución industrial con la máquina de vapor. Nuestra sociedad está viviendo la explosión tecnológica, con el desarrollo de la Electrónica, la Informática y las telecomunicaciones. Aunque las tres son muy importantes, posiblemente el desarrollo de las telecomunicaciones sea el más relevante de ellos para la humanidad. La transmisión de información en comunicaciones a corta y larga distancia está dominada actualmente por las fibras ópticas.

La función básica de una fibra óptica es atrapar la luz y a la vez conseguir que ésta se transmita (se guíe) con la menor cantidad de pérdidas posible. La fibra consiste en un cable de un material transparente que actúa como canal de luz. Ese material, que se conoce como núcleo de la fibra, está rodeado de otro material de menor índice de refracción que forma el revestimiento. Ambos están cubiertos por otra capa externa protectora. Como ya se comentó al hablar de la reflexión y refracción, la luz tiende a mantenerse dentro del material con mayor índice de refracción. En particular, siguiendo la ley de Snell, existe un ángulo de incidencia a partir del cual hay reflexión total,



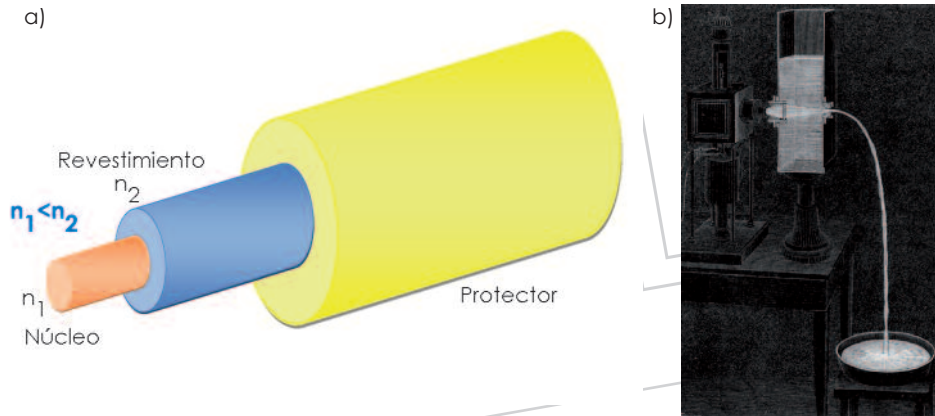


Figura 6.4. a) Partes de una fibra óptica. b) Experimento de la fuente de luz de Colladon (derecha).

es decir, toda la luz se mantiene en el medio inicial. Este fenómeno se usa en la fibra para ponerle *paredes ópticas* al núcleo, haciendo que guíe la luz por su interior durante largas distancias. Como curiosidad, Daniel Colladon ya en 1841 publicaba un experimento de guiado de luz por medio de un chorro de agua que caía de un tanque, gracias al mayor índice de refracción del agua frente al del aire. Esta propiedad de las fibras ópticas se aprovecha, entre otros muchos ejemplos, para endoscopios formados por manojos de muchas fibras utilizados en medicina para ver el interior del cuerpo humano.

Una de las principales ventajas de las telecomunicaciones por fibra óptica frente a los cables coaxiales de cobre que transmiten señales eléctricas de alta frecuencia, es que en las fibras puede viajar una cantidad muy elevada de información, haciendo que la transmisión pueda ser más rápida. Además, los pulsos se propagan a la velocidad de la luz en el medio de transmisión. Aunque en un principio se utilizaban diodos semiconductores como fuentes de luz, hoy esencialmente se utilizan láseres para transportar la información. Otra ventaja importante de las fibras ópticas y los láseres es que las pérdidas de señal a lo largo del cable son menores que con los antiguos cables de cobre, permitiendo mayores distancias entre los repetidores (dispositivos que amplifican la señal para que pueda seguir viajando a distancias largas). Por ello, las comunicaciones intercontinentales están dominadas por cables de fibra tendidos a lo ancho de los océanos. Cada cable contiene varias fibras para aumentar la capacidad de éstas.

Sin embargo, la luz se ve afectada por la dispersión modal durante su propagación en la fibra: dentro de la fibra se transmiten varios modos que recorren distintos caminos, por lo que unos se retrasan o adelantan respecto a otros, causando que el pulso se deteriore. Existen dos tipos de fibra, las de núcleo más ancho son multimodo y admiten más modos cuanto mayor sea su diámetro. Las

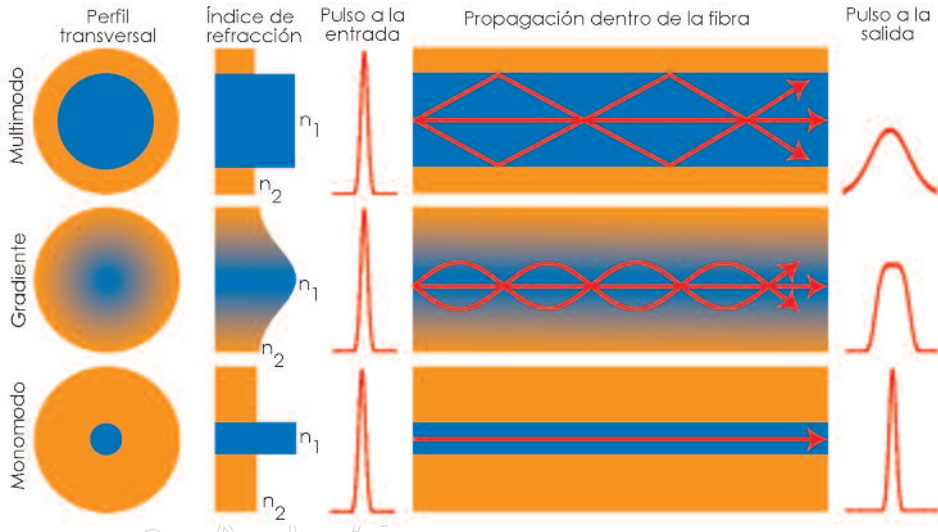


Figura 6.5. Perfil transversal del índice de refracción para distintos tipos de fibra óptica (multimodo de salto de índice, multimodo de gradiente de índice y monomodo) y su efecto en la propagación de los modos y en el pulso transmitido.

Las fibras monomodo tienen un núcleo de 8 micras, por lo que sólo admiten un modo —para la longitud de onda en el infrarrojo en su aplicación para telecomunicaciones— y no experimentan dispersión. Sin embargo, son más costosas de fabricar y más caras en el mercado, aunque su uso se hace imprescindible en comunicaciones a través del océano. No obstante, existen algunas técnicas en la fabricación de la fibra que disminuyen su dispersión modal, pudiendo alargar la distancia de la comunicación por una fibra multimodo. Por ejemplo, la fibra de gradiente de índice hace que el cambio de índice entre el núcleo y el revestimiento sea una transición continua en lugar de un salto, permitiendo que la reflexión interna de la luz que se propaga dentro sea más gradual y los pulsos de luz no se deformen tanto como en una multimodo normal.

### 6.5. La impresora láser

La impresora láser combina una técnica de impresión inventada por Chester Carlson en 1938, conocida como xerografía, con una fuente láser. Los tipos de láseres utilizados en los primeros prototipos fueron principalmente láseres de gas (helio-neón y argón) como ya se dijo en el Cap. 4, mientras que en los modelos actuales se usan láseres de semiconductor. En una impresora láser el componente principal es un rodillo o tambor que está revestido de una sustancia fotoconductor, que conduce la corriente eléctrica sólo cuando le llega luz. Este rodillo se encuentra inicialmente cargado negativamente.

El funcionamiento de una impresora láser es el siguiente: cuando desde el ordenador llega la orden de imprimir, los circuitos micro-electrónicos de la impresora dirigen la luz del haz láser, de intensidad variable, sobre un espejo y éste refleja la luz, que es infrarroja, hacia las zonas del rodillo o tambor. Las zonas que han sido iluminadas empiezan a conducir electricidad, y a consecuencia de esto se escapan las cargas. En el momento en que el láser deja de actuar el tambor se encuentra cargado negativamente en las zonas que no han recibido luz, y sin carga en las zonas que han recibido la luz láser, como se puede ver en la Fig. 6.6.a.

Ahora sobre el rodillo está marcada la imagen que queremos imprimir. Para revelarla, la impresora acerca el tambor del virador, lo que se conoce como tóner, compuesto de partículas negras cargadas negativamente. Como las cargas del mismo signo se repelen, el virador no se adherirá a las partes del rodillo que no fueron expuestas a la luz. Pero sí que lo hará en las zonas exentas de cargas. Así la imagen de cargas se convierte en una imagen de tinta.

En el siguiente paso la impresora comunica carga positiva a una hoja de papel y hace que el rodillo —al que ahora están adheridas las partículas del tóner— ruede sobre ella. Entonces el papel, que recordemos es ahora portador de carga positiva, atrae a las partículas del virador cargadas negativamente y las separa del tambor.

A medida que el papel sale de la impresora, un rodillo calefactor derrite el virador, que es de plástico, y lo funde permanentemente con el papel.

La principal ventaja de la impresora láser con respecto a las impresoras convencionales de tinta, es la velocidad, y por lo tanto el volumen de copias

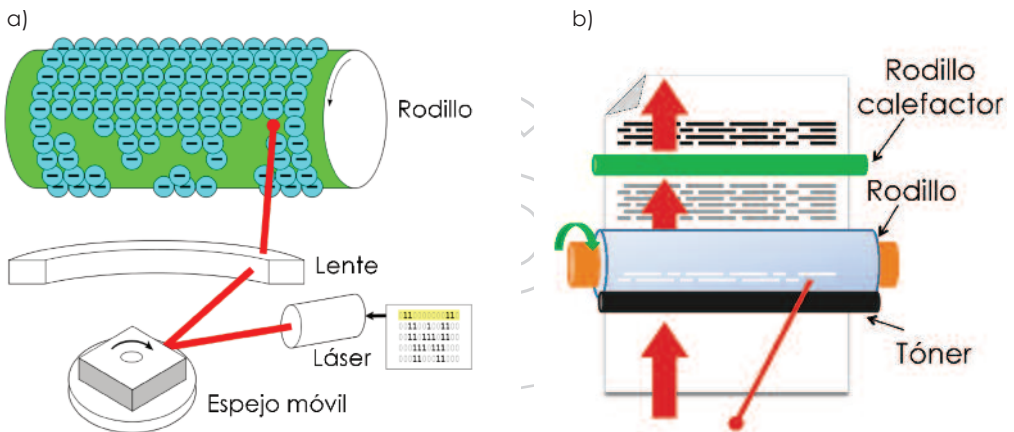


Figura 6.6. Esquemas sobre el funcionamiento de una impresora láser, compuesto por el rodillo cubierto de una sustancia fotoconductor, la orden del ordenador modula la intensidad del láser que se dirige al rodillo con la ayuda de un espejo y una lente.

por minuto. Sin embargo es más común encontrar las impresoras láser en empresas o instituciones donde se realicen gran número de copias diarias, en lugar de en nuestros hogares. El motivo es el elevado coste inicial de la impresora. Aunque el precio del tóner es más reducido que la tinta de las de inyección, sólo si se realizan muchas impresiones se amortiza la inversión inicial.

## 6.6. Los hologramas: imágenes tridimensionales

En la actualidad, los avances tecnológicos nos han llevado a familiarizarnos con las tres dimensiones, por ejemplo, en el cine. De hecho, la holografía está muy relacionada con ello. Pero, ¿qué es un holograma? Para explicarlo podemos compararlo con una fotografía: un holograma es una imagen almacenada en una placa de vidrio con una película fotosensible depositada en su superficie, de la misma forma que un negativo en la fotografía analógica o el sensor electrónico de la cámara digital son sensibles a la luz que procede del objeto que registramos. Sin embargo, en la fotografía sólo tenemos imágenes bidimensionales, mientras que en un holograma podemos percibir la tercera dimensión de la imagen: la profundidad. Este hecho es debido a que en la placa del holograma no sólo grabamos la intensidad de la luz que recibe de la escena como en la fotografía convencional, sino que también grabamos la fase de la luz (y no sólo la amplitud o intensidad), y es en este punto donde el láser entra en juego.

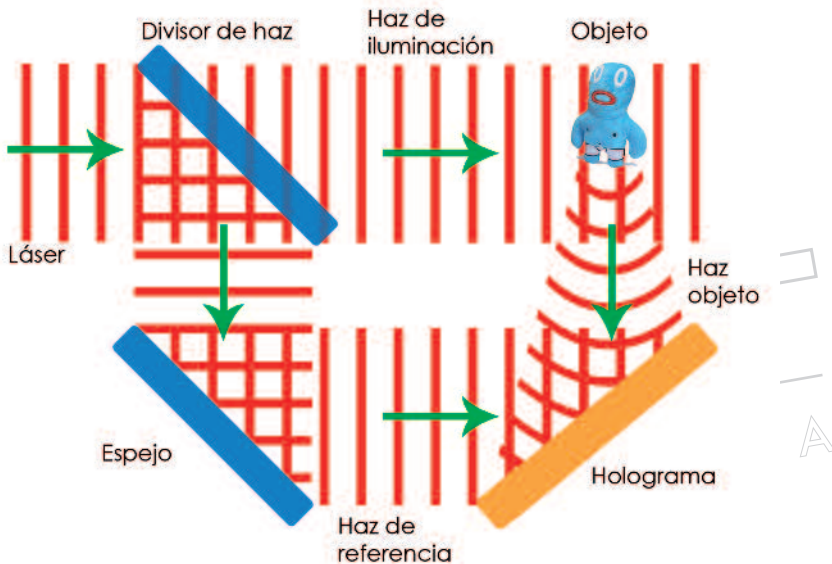


Figura 6.7. Esquema de grabado de un holograma.

Gracias a la propiedad de coherencia del láser, podemos registrar la fase del objeto en el holograma. Para la grabación, el haz láser se divide en dos, iluminando uno de ellos el objeto, cuya luz interfiere con el otro —haz de referencia— sobre la película sensible a la luz, que almacena dicha interferencia. Este esquema no es el único que existe, ya que se pueden registrar hologramas en reflexión, transmisión, etc.

Para poder recuperar el objeto grabado, hay que iluminar el holograma con el mismo haz utilizado como referencia. Entonces, debido al efecto del mapa de interferencia almacenado en el holograma, dicho haz produce otro nuevo, conocido como haz objeto reconstruido, que es precisamente el haz objeto que se tenía a la hora de grabar el holograma. Gracias a que el holograma almacena tanto amplitud como fase del objeto, podemos observarlo en tres dimensiones. En realidad, el objeto reconstruido es *virtual*, es decir, no está físicamente, sino que se trata de luz proveniente del holograma que parece que procede del objeto. Es similar a la imagen de un objeto en un espejo, que es virtual, ya que realmente no hay un objeto al otro lado.

Entonces, ¿por qué vemos el objeto en tres dimensiones? Los granos de plata de la película del holograma responden a la luz, almacenando la información de la interferencia de la luz del objeto con la luz del láser de referencia. Al iluminar de nuevo con el láser de referencia esa película, que tiene codificada toda la información del objeto, la luz se desvía en múltiples direcciones imitando a la luz que venía del objeto. Así, podemos ver distintas imágenes del objeto que nos darán la percepción de las tres dimensiones.

Pero, ¿tiene algo que ver con el cine en tres dimensiones? La respuesta es sí, en parte. En ambos casos se explica por la visión binocular o estereoscópica que poseemos los humanos y que es característica de depredadores que necesitan ver los objetos en profundidad, por ejemplo, para poder calcular su probabilidad de éxito al atacar a una presa. Este tipo de visión consiste en lo siguiente: cada ojo percibe una imagen (en su retina) un poco desplazada res-



Figura 6.8. Esquema de reconstrucción de un holograma.

pecto a la que percibe el otro ojo (se puede comprobar guiñando los ojos alternativamente) y estas dos imágenes son enviadas al cerebro que es capaz de construir la imagen tridimensional que vemos, de la misma forma que las partículas de un perfume son recogidas en la nariz y percibidas como olores por nuestro cerebro. Igualmente, para ver una película en tres dimensiones se tienen que grabar dos películas ligeramente desplazadas (por ejemplo con una cámara especial que tiene dos objetivos un poco separados). En el cine, esas dos películas se proyectan a la vez, y cada una es percibida por un ojo. ¿Dónde está la diferencia? Precisamente en el mecanismo de grabado y reproducción de la imagen tridimensional. En el caso del holograma, se utiliza un láser (luz coherente) para registrar la fase, mientras que en el cine se graban dos imágenes bidimensionales ligeramente distintas, para lo que no se utiliza el láser. Como curiosidad, en el cine hacen falta unas gafas especiales porque cada ojo tiene que ver sólo una de las dos películas, para lo que se utiliza por ejemplo la polarización de la luz (cada película se proyecta con una polarización diferente, y las gafas tienen polarizadores que seleccionan sólo una de ellas). Lo mismo utiliza Google® para poder ofrecer visiones a pie de calle en tres dimensiones mediante *Google Street View 3D*, sólo que en este caso se graban las imágenes con filtros de azul y rojo respectivamente, de forma que las gafas para poder ver al imagen también serán de filtros de color.

Por último, las aplicaciones más extendidas de los hologramas son como elementos de seguridad y de certificación de originalidad mediante etiquetas láser en tarjetas de crédito, certificados, billetes, elementos electrónicos (baterías, portátiles...), en la industria del automóvil y textil, etcétera.

### Para saber más

Revista Investigación y Ciencia 279, Sección Ideas Aplicadas, diciembre 1999.

Investigación y Ciencia. Temas 60: Física y aplicaciones del láser, PRENSA CIENTÍFICA S.A., 2º trimestre 2010.

*The Bar Code Book, Reading, Printing and Specification of Bar code symbols.* Roger C. Palmer, Helmers Publishing, 3ª Edition, november 1995.

<http://www.howstuffworks.com/>

<http://www.um.es/leq/laser/index.htm>

S A L A M A N C A

# APLICACIONES DEL LÁSER EN BIOMEDICINA



Uno de los primeros campos en los que se exploró la utilidad del láser fue la medicina. Desde principios de los años 60, el láser comenzó a vislumbrarse como una posible herramienta en oftalmología, debido a la transparencia de la córnea que permite al láser penetrar hasta el fondo del ojo. Posteriormente, se ha ido incorporando a los distintos campos de la medicina, siendo en la actualidad una tecnología que ofrece una alternativa a las terapias tradicionales, e incluso, en determinados casos, mejorando sus resultados.

El uso más extendido del láser en medicina es como bisturí, bien sea para eliminar tejidos superficiales, o bien, con ayuda de la fibra óptica, para realizar operaciones en órganos internos del cuerpo humano sin necesidad de intervenir quirúrgicamente al paciente. Como veremos, el láser también se puede emplear como herramienta de diagnóstico o para realizar ciertos tipos de terapia. Además, gracias a la miniaturización de los sistemas láser para cirugía, así como a la generación de radiación de alta frecuencia, se abrirá aún más el abanico de potenciales aplicaciones del mismo. En este sentido, el láser se plantea como la tecnología capaz de generar sistemas comerciales y estables de terapia de protones, el tratamiento más eficaz que existe actualmente en el mercado para la eliminación de tumores localizados.

## 7.1. Efecto del láser en los tejidos

La luz, al actuar sobre los tejidos biológicos, experimenta cuatro procesos fundamentales: reflexión, refracción, absorción y difusión o *scattering*.

En el Cap. 1 ya se describieron detalladamente la reflexión y la refracción. En este capítulo es fundamental hablar del fenómeno de absorción, que determina la profundidad de penetración de la luz en un tejido y la cantidad de energía que podemos depositar en el mismo. Dependiendo de la aplicación en la que se vaya a utilizar el láser, habrá casos en los que interese penetrar más para alcanzar un tejido profundo (es decir, tener poca absorción), mientras en otras ocasiones se requiere que una determinada región absorba gran cantidad de energía del láser para calentarla y, si es preciso, destruirla.

Para ilustrar lo anterior, pensemos en el sistema formado por la córnea y el cristalino del ojo humano. Ambos tejidos están formados principalmente por agua, de manera que observando el espectro de absorción del agua (Fig. 7.1) podemos ver cómo en la región visible (400-700 nm) ésta es prácticamente despreciable. Por otro lado, en el tejido epitelial abunda la melanina, un cromóforo cuyo espectro de absorción se muestra también, así como el de la hemoglo-



bina, proteína fundamental en la sangre y, por tanto, en el tejido vascular. Del análisis de estos espectros se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- La melanina y la hemoglobina absorben mayor cantidad de luz visible que el agua, por lo que podemos decir que la piel es opaca a la luz visible. Además, se observa la existencia de una región espectral entre los 600 y los 1200 nm en la que tanto el agua como la hemoglobina absorben menos radiación que la melanina. Esa región se conoce en medicina como *ventana terapéutica*, lográndose en ella los mayores niveles de penetración láser en el tejido humano
- Si queremos actuar sobre el tejido vascular —por ejemplo, para favorecer la coagulación de la sangre— se utilizan láseres con longitudes de onda de alrededor de 420 nm, 540 nm y 580 nm, donde la absorción de radiación por la hemoglobina es mayor.

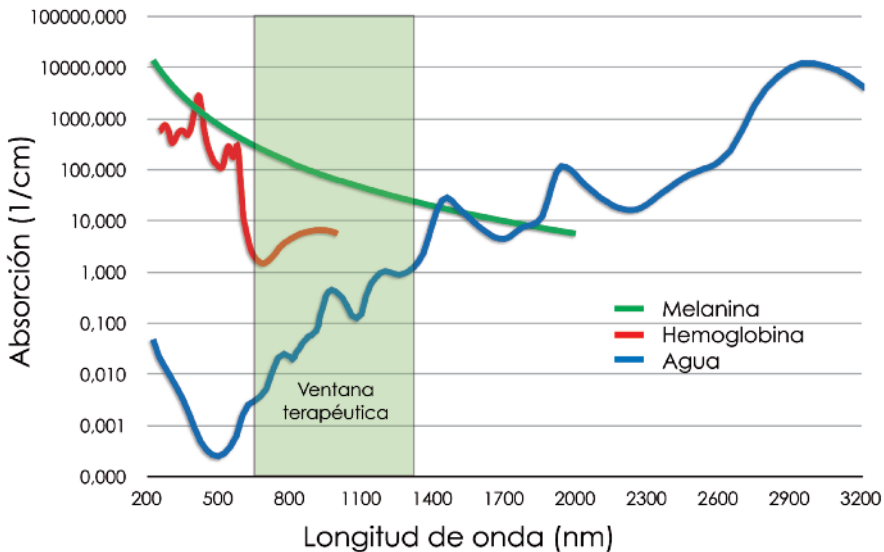


Figura 7.1. Espectro de absorción de la melanina en la piel (verde), la hemoglobina en la sangre (rojo) y del agua (azul). Datos obtenidos de Hale et al., W. B. Gratzner, Med. Res. Council Labs, Holly Hill, London, N. Kollias, Wellman Laboratories, Harvard Medical School, Boston and Steven Jacques, Oregon Medical Laser Center.

Más allá de la absorción, hemos de tener en cuenta la difusión (o *scattering*) de la luz en los tejidos biológicos, cuyo efecto es la reducción de la profundidad de penetración de la radiación láser.

Una vez que se ha caracterizado el comportamiento de los tejidos biológicos frente a estos fenómenos asociados a la propagación de la luz, seremos capaces de saber la cantidad de energía que podemos depositar en una región del tejido. Dependiendo tanto de la energía depositada como, sobre todo,

de la duración de la interacción, la irradiación con láser induce diferentes procesos físico-químicos en los tejidos que, a su vez, dan lugar a distintos efectos sobre los mismos: efectos fotoquímicos, efectos térmicos, fotoablación, ablación inducida por plasma y fotodisrupción.

### 7.1.1. Efectos fotoquímicos

Inducir reacciones químicas en determinadas moléculas o tejidos es muy sencillo. Para ello se utilizan láseres de baja intensidad ( $1 \text{ W/cm}^2$ ) y tiempos de interacción largos, del orden de segundos. Como interesa alcanzar profundidades de penetración grandes, las longitudes de onda que se emplean se encuentran en la región visible (láseres de rodamina,  $630 \text{ nm}$ ). El ejemplo más claro de este tipo de interacción fotoquímica es la conocida como *terapia fotodinámica*. En ella, un cromóforo —denominado fotosensibilizador— se inyecta en el cuerpo, de modo que tras un cierto tiempo (2, 3 días) se ha eliminado de todos los tejidos salvo de los tumores. En ese momento, se irradia el tejido con láser, de manera que el fotosensibilizador desencadena una serie de reacciones químicas que eliminan el tumor.

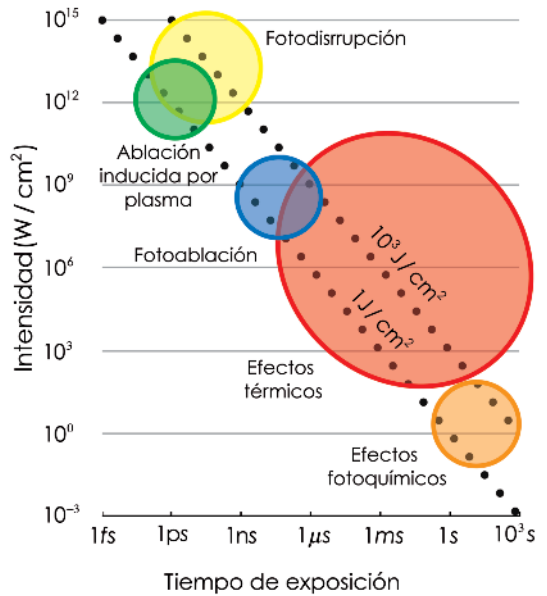


Figura 7.2. Fenomenología de la interacción láser-tejido biológico en función de la duración y de la intensidad del láser.

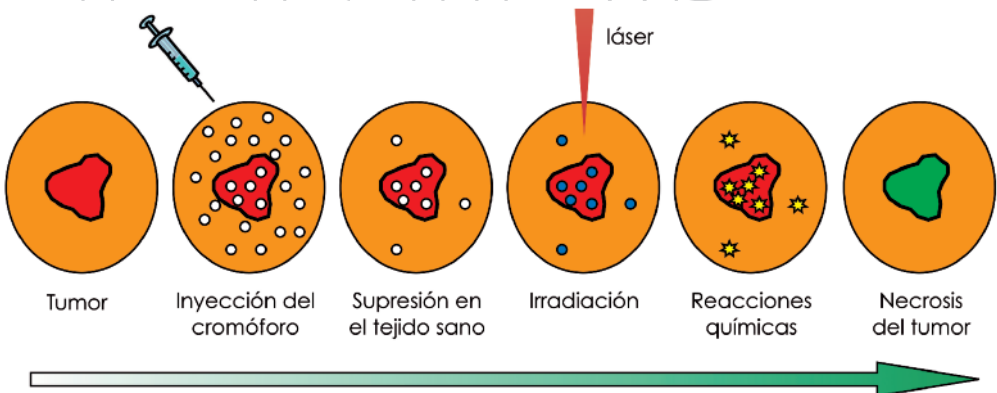


Figura 7.3. Evolución de un tejido con un tumor sobre el que se realiza la terapia fotodinámica.

### 7.1.2. Efectos térmicos

Los efectos térmicos están asociados a un incremento de la temperatura en el tejido debido a la absorción de la energía del láser. Para conseguir ese incremento térmico, se utilizan láseres de pulso largo o continuos, de tal manera que dependiendo de la duración y de la intensidad de los mismos, tendremos distintos efectos macroscópicos: coagulación, vaporización, carbonización y fusión. Para llegar a entender estos efectos, podemos analizar el proceso de interacción a través de tres etapas:

1. Generación de calor: es producida por la absorción de la energía del láser en el tejido. A nivel microscópico, podemos separar el proceso en dos etapas:
  - Absorción de fotones por parte de las moléculas, quedando éstas excitadas.
  - Desexcitación de las moléculas por colisiones, de forma que la energía absorbida se convierte en energía cinética, y, por tanto, en calor.
 En esta primera etapa el parámetro clave es la capacidad de absorción de la radiación por el tejido.
2. Transporte de calor: una vez que se ha elevado localmente la temperatura del tejido, el calor se difunde por las regiones adyacentes según las propiedades de conducción y difusión inherentes a cada tejido, disminuyendo la temperatura en la zona de irradiación y aumentando en las zonas que la circundan.
3. Efectos debidos al calor: dependiendo de la temperatura que se alcance en una determinada región del tejido, se producen distintos efectos, como coagulación, vaporización o ablación térmica, carbonización o fusión del tejido. En la siguiente tabla se resumen los aspectos más relevantes de cada efecto, así como la temperatura a la que se originan:

| Temperatura | Efecto biológico                                 | Observaciones   |
|-------------|--|---|
| 37°C        | Normal   | Temperatura media del cuerpo humano   |
| 45°C        | Hipertermia                                      | Destrucción de enlaces en las moléculas, y alteraciones en la membrana  |
| 60°C        | Coagulación del tejido y necrosis de las células | Desnaturalización de las proteínas y del colágeno   |
| 100°C       | Vaporización y ablación térmica                  | Debido al incremento del volumen, se observan burbujas de gas que inducen rupturas mecánicas en el tejido adyacente |
| >100°C      | Carbonización                                    | Se ennegrece el tejido, y aparece humo  |
| >300°C      | Fusión   |   |

Tabla 7.1. Efectos biológicos derivados del incremento de temperatura en los tejidos.

La generación de efectos térmicos de mayor o menor importancia depende fundamentalmente de la capacidad de absorción de la radiación por el tejido. Ésta, a su vez, depende tanto de las propiedades del propio tejido como de las del láser, de la manera que se señala a continuación:

- Longitud de onda del láser: observando la Fig. 7.1, podemos ver que el agua tiene un pico de absorción en 3 micras. Esto faculta a los láseres de longitudes de onda próximas como excelentes candidatos para generar efectos térmicos importantes sin necesidad de emplear intensidades exageradas dada la eficiencia de absorción en los tejidos. Por ejemplo, los láseres de estado sólido dopados con erbio: Er:YAG (2,94 micras), Er:YLF (2,8 micras) y Er:YSGG (2,79 micras).
- Intensidad del láser: la temperatura generada en la región de focalización es proporcional a la intensidad del láser.
- Duración de la interacción: a mayor tiempo de interacción del láser con el tejido, mayor es la cantidad de energía disponible para ser absorbida y generar incrementos de temperatura.
- Conductividad y difusividad térmica del tejido: estos parámetros determinan tanto la distancia como la velocidad a la que se propaga el calor en el entorno de la zona irradiada.

### 7.1.3. Fotoablación o ablación fotoquímica

La ablación con láser es un procedimiento mediante el cual se elimina material como consecuencia de la irradiación de una región espacialmente delimitada en una superficie a través de diferentes mecanismos de naturaleza térmica, fotoquímica o mecánica.

La fotoablación o ablación fotoquímica emplea luz ultravioleta que excita las moléculas del tejido hasta provocar la disociación de las mismas y la consecuente eyección de los productos de la disociación. Mediante este proceso se obtiene un corte muy preciso y limpio en el que los efectos térmicos son prácticamente despreciables.

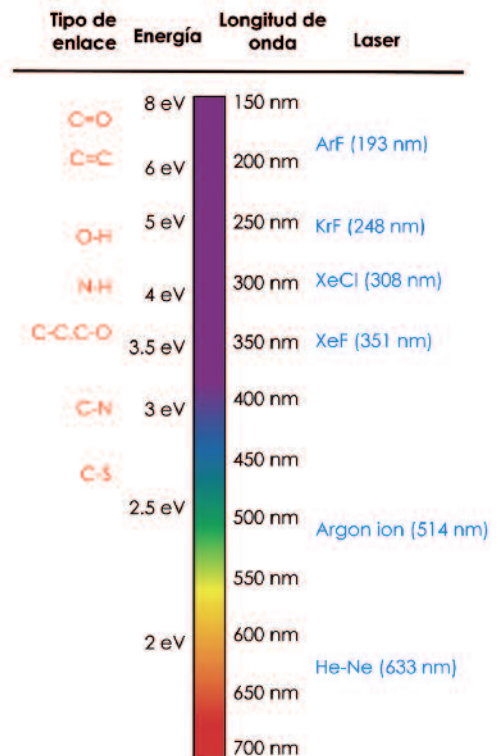


Figura 7.4. Espectro en el que se muestran las energías de ligadura de distintos enlaces moleculares, así como los láseres disponibles a esas longitudes de onda.

La razón para utilizar radiación láser en el ultravioleta es que a esas longitudes de onda los fotones son suficientemente energéticos como para superar la energía de disociación de las moléculas orgánicas. En la Fig. 7.4. podemos observar que sólo aquellos láseres que trabajan en la región del ultravioleta (en general, láseres de excímero) son capaces de generar este proceso.

Además de la longitud de onda, el otro parámetro determinante en este proceso es la intensidad del láser. Existe un límite inferior dado por el número mínimo de enlaces que hay que romper para disociar la molécula y un límite superior, a partir del cual el proceso de fotoablación se ve enmascarado por la aparición de un plasma<sup>2</sup> de electrones que absorbe la energía del láser. De este modo, el rango de intensidades típico con el que se suele trabajar es de  $10^7$ - $10^{10}$  W/cm<sup>2</sup>. Además, al trabajar con radiación ultravioleta se ha de tener cuidado con la dosis de radiación que administramos al paciente, para impedir la aparición de posibles efectos secundarios (ver Anexo I sobre Seguridad Láser).

## ¡esto te interesa!

### Diferencia entre ablación fotoquímica y ablación térmica

*En la ablación térmica, los electrones de átomos y moléculas absorben la energía del láser para, transcurrido un cierto tiempo, transferirla en forma de energía vibracional y rotacional a los iones y moléculas ionizadas circundantes. Esa energía se traduce en un incremento de la temperatura del material, de forma que se puede llegar a la fusión o vaporización del mismo. Por el contrario, en la fotoablación, los electrones de las moléculas orgánicas absorben fotones muy energéticos, de forma que la molécula adquiere una energía en la que su configuración ya no es estable y se disocia, sin que haya habido, hablando en términos generales, incremento de temperatura.*

#### 7.1.4. Ablación inducida por plasma o ablación ultrarrápida

No siempre que se irradia un tejido biológico con láser tenemos que asumir los efectos debidos a la generación y transmisión del calor, como hemos visto por ejemplo en la fotoablación con láseres en el ultravioleta. No obstante, incluso en otras regiones del espectro en las que no es posible la ablación fotoquímica, se puede eliminar material minimizando los efectos térmicos sobre las zonas adyacentes.

<sup>2</sup> Al hablar de un plasma en el contexto del láser y de la Física, nos referimos a un gas de partículas ionizadas: electrones, cargados negativamente, e iones, cargados positivamente.

La ablación inducida por plasma o ablación ultrarrápida es un proceso que tiene lugar cuando se emplean intensidades elevadas y el tiempo de interacción es extremadamente corto (por debajo de los picosegundos). El proceso se puede describir a través de una serie de etapas:

1. Ionización multifotónica o por efecto túnel: dada la elevada intensidad ( $10^{11}$ - $10^{13}$  W/cm<sup>2</sup>), se inducen procesos no lineales de ionización de los átomos y moléculas del tejido.
2. Los electrones liberados absorben a su vez radiación mediante un mecanismo conocido como *bremstrahlung inverso*, gracias al cual adquieren velocidad y, por tanto, energía cinética. Al ser acelerados, colisionan con electrones aún ligados a átomos o moléculas, de manera que éstos son liberados. La repetición de este proceso mientras dura la interacción láser produce un efecto de avalancha que genera un plasma denso de electrones.
3. Llegados a este punto y, dependiendo de la intensidad de la radiación a la que se haya sometido al tejido, se pueden producir dos fenómenos diferentes que conducen a la eliminación del material y que pueden coexistir. Cuando la intensidad no es excesivamente alta, se crea un campo cuasielectrostático muy intenso entre la carga negativa del plasma y la carga positiva de los iones. Cuando la intensidad de ese campo es lo suficientemente grande como para superar la energía de los enlaces iónicos o moleculares, se produce la rotura de los mismos y la eyección de material en el proceso conocido como *explosión de Coulomb*.
4. Si la intensidad es muy alta, la energía en exceso se emplea en provocar un incremento local de la temperatura muy rápido alcanzando órdenes de magnitud superiores a la temperatura de fusión o vaporización de los materiales, lo que conduce a una elevadísima presión en la zona irradiada y consecuentemente a la expansión adiabática de esa región, produciendo la eyección de material de forma explosiva. Este proceso se conoce como *explosión de fase*. A pesar de que este proceso es de naturaleza térmica, la rapidez con la que se produce es tal que la zona afectada térmicamente está limitada a escasas micras en el material irradiado.

Estos fenómenos se producen cuando el tiempo de interacción del láser con el material es inferior a las decenas o centenas de picosegundos, ya que ése es el tiempo en que los electrones transfieren su energía a los iones. Por ello, se utilizan láseres de pulsos de femtosegundos que, como vimos en el Cap. 4, operan tanto en el infrarrojo como en el visible o ultravioleta. En la Fig. 7.6 podemos ver un esquema en el que se aprecia la diferencia entre la ablación ultrarrápida y la ablación térmica.

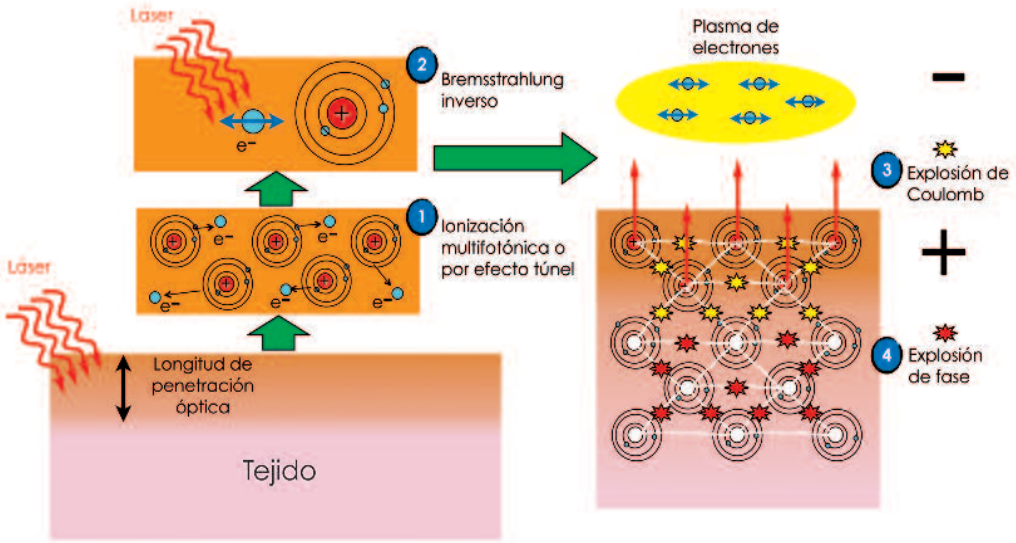


Figura 7.5. Proceso de ablación ultrarrápida.

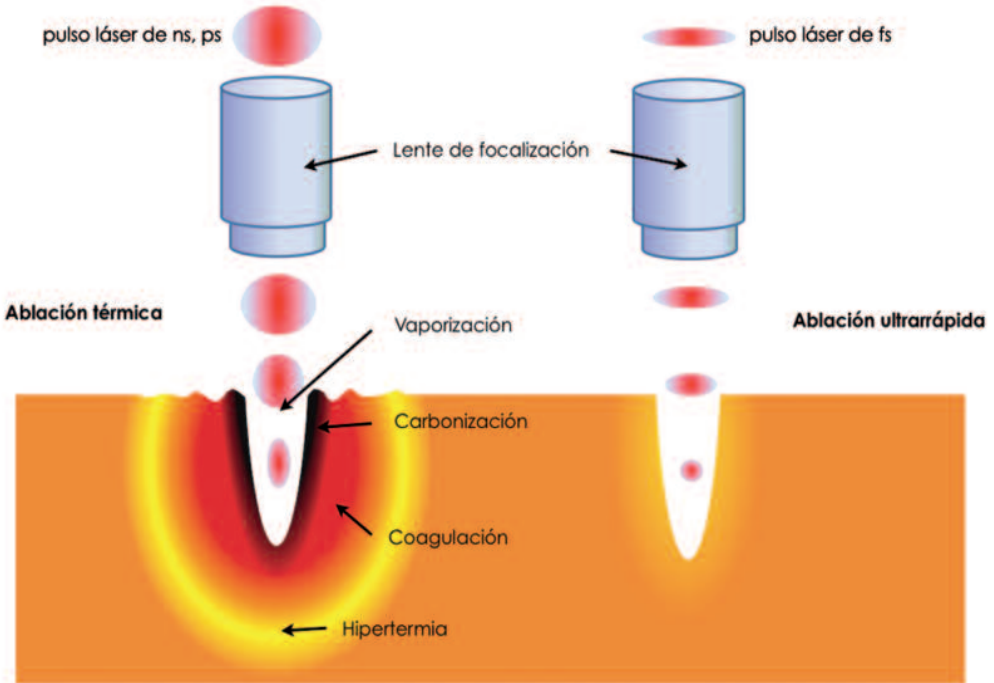


Figura 7.6. Comparación entre los efectos causados en el tejido por la ablación ultrarrápida y la ablación térmica.

### 7.1.5. Fotodisrupción

La fotodisrupción como tal es un efecto mecánico secundario tras la generación del plasma en el proceso de ablación ultrarrápida. Cuando la intensidad es muy elevada, la expansión del material debido a la explosión de fase genera una onda de choque que se propaga a lo largo del tejido más allá del foco del láser, dando lugar a modificaciones no deseadas, como cavitaciones, fisuración, formación de capilares, etc.

En la siguiente tabla se presentan las intensidades necesarias para producir ablación ultrarrápida y fotodisrupción en tejido corneal. En la Fig. 7.7 podemos observar cavidades generadas dentro del tejido corneal mediante un láser de 120 fs y  $10^{15}$  W/cm<sup>2</sup>.

| Duración del pulso | Umbral de ablación ultrarrápida (W/cm <sup>2</sup> ) | Umbral de fotodisrupción (W/cm <sup>2</sup> ) |
|--------------------|--|---|
| 100 fs             | $2,0 \times 10^{13}$                                 | $5,0 \times 10^{14}$                          |
| 1 ps               | $3,3 \times 10^{12}$                                 | $5,0 \times 10^{13}$                          |
| 10 ps              | $8,0 \times 10^{11}$                                 | $5,0 \times 10^{12}$                          |
| 100 ps             | $2,3 \times 10^{11}$                                 | $5,0 \times 10^{11}$                          |

Tabla 7.2. Umbrales de intensidad en los procesos de ablación ultrarrápida y fotodisrupción, en función de la duración del pulso láser.

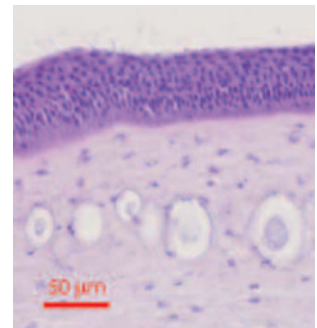


Figura 7.7. Generación de cavidades en el tejido corneal mediante fotodisrupción (muestra biológica de ave).

En general la fotodisrupción no es un mecanismo utilizado ya que genera cortes y estructuras no controladas en el tejido.

## 7.2. El láser en medicina

Como avanzamos en la introducción, sin duda el desarrollo del láser está íntimamente ligado a la medicina. Tradicionalmente el láser ha sido ideado como sustituto del bisturí. Sin embargo, como veremos más adelante, también tiene utilidad en otras aplicaciones en el campo de la medicina, como por ejemplo, el diagnóstico.

### EL LÁSER COMO BISTURÍ

Una de las aplicaciones más directas del láser es la conocida como cirugía láser, en la que se sustituye el tradicional bisturí por un láser.



El tratamiento de los tejidos con tecnología láser presenta una serie de ventajas e inconvenientes, todos ellos relacionados con el efecto térmico que podemos generar en el tejido. Sin embargo, los láseres han aparecido como una verdadera herramienta mucho más ventajosa respecto al tradicional bisturí a partir de la invención y comercialización de la fibra óptica. La facilidad con la que podemos llevar la luz láser por el interior del cuerpo humano gracias a una fibra óptica, hace de éste una herramienta única para la cirugía no invasiva.

En muchos tipos de cirugía y, en particular, en la cirugía oftálmica, se han empleado desde hace años diversos tipos de láser. Concretamente, es habitual utilizar láseres continuos para inducir fotocoagulación o láseres de pulsos largos y con longitud de onda ultravioleta para producir ablación en la superficie de la córnea. El problema principal de estos láseres convencionales aplicados a la cirugía es que afectan térmica y mecánicamente a una zona considerablemente grande: estos efectos indeseables limitan el abanico de aplicaciones, ya que pueden dañar irremediablemente tejidos próximos.

Los pulsos ultracortos (femtosegundos) suponen una revolución en este sentido porque permiten la eliminación selectiva de biomaterial con mínimos efectos en las zonas próximas. Asimismo, es posible enfocar en el interior de ciertos tejidos e inducir un corte en profundidad: tenemos un bisturí que permite cortar con precisión micrométrica y operar, en determinadas condiciones, a cierta profundidad sin dañar la superficie.

Tanto en oftalmología como en odontología, los láseres de pulsos ultracortos suponen una alternativa ventajosa frente a las técnicas quirúrgicas convencionales y, por tanto, se irán implantando progresivamente a medida que la técnica avance. No obstante, existe un campo de actuación donde los pulsos de femtosegundos ofrecen posibilidades únicas, inalcanzables para otras técnicas: la cirugía sub-celular o nanocirugía. Los mismos principios empleados en las anteriores aplicaciones de cirugía láser pueden llevarse al extremo: el láser puede concentrarse de tal forma que únicamente se elimine por ablación

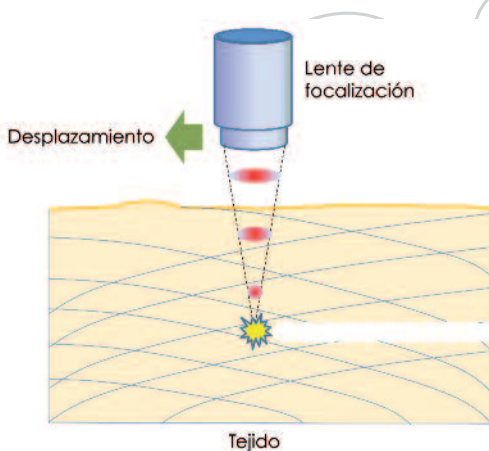


Figura 7.8. El láser de pulsos ultracortos puede ser enfocado en el interior de ciertos tejidos y materiales biológicos. Seleccionando la energía por pulso adecuada se logran pequeñas explosiones (de escala micrométrica), que al ser superpuestas unas a otras dan como resultado un corte de extraordinaria limpieza y precisión.

un orgánulo celular determinado del citoplasma, sin dañar la membrana ni el resto de orgánulos. Se ha demostrado también la posibilidad de realizar cortes o perforaciones a escala sub-micrométrica, por ejemplo en cromosomas, en conexiones neuronales, o en la membrana citoplasmática de determinadas células. Esta técnica constituye, por tanto, una herramienta única que ofrece la posibilidad de realizar intervenciones a escala celular antes impensables.

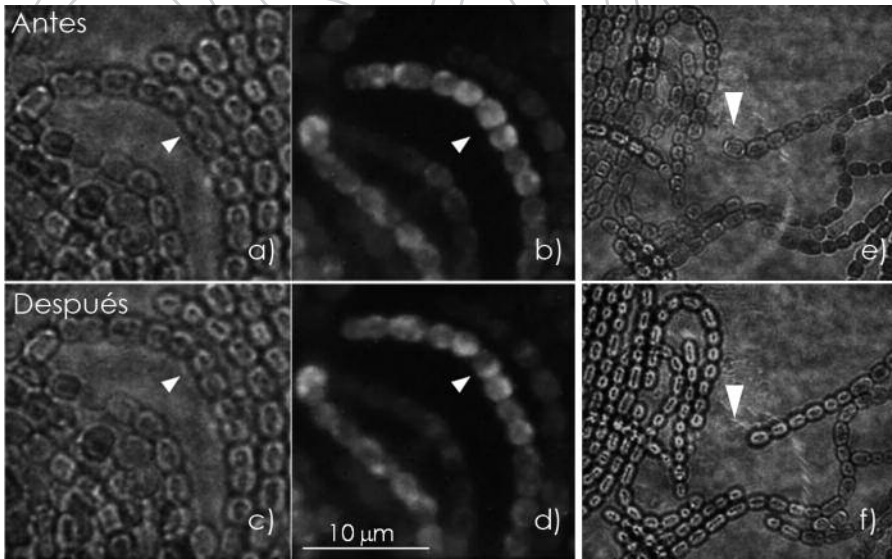


Figura 7.9. Experimento de cirugía subcelular con cianobacterias. En las imágenes, un láser de femtosegundos es enfocado en el interior de una célula de la cianobacteria (marcada con una flecha blanca). Después de la irradiación, la fluorescencia emitida por la mitad superior de la célula (punto en el que se enfocó el láser) prácticamente desaparece (d). Esto demuestra el daño inducido en el interior celular (membrana tilacoidal) sin daño aparente en la pared celular (imagen c). En las imágenes e y f se ha eliminado por ablación láser una célula completa de la cianobacteria sin dañar las células próximas.

Aparte de bisturí, el láser puede usarse para otro tipo de aplicaciones basadas en la modificación de las propiedades del tejido irradiado sin llegar a dañarlo. Además, el láser también se puede utilizar para inducir reacciones químicas en el tejido, como hemos visto anteriormente en la terapia fotodinámica.

#### EL LÁSER COMO HERRAMIENTA DE DIAGNÓSTICO

Otro campo en el que el láser se ha mostrado como una herramienta única es en el diagnóstico precoz de enfermedades. En general, podemos decir que el láser nos permite adentrarnos en órganos y tejidos a los que antes nunca se había podido acceder sin llegar a ser dañados. Uno de los ejemplos más conocidos es el uso de la fibra óptica en la endoscopia.

Otra de las técnicas es la tomografía de coherencia óptica (OCT), un proceso de diagnóstico basado en interferometría que permite obtener imágenes de tejidos de poco espesor (típicamente milímetros) con muy buena resolución.

Pero sin duda, uno de los campos en los que el láser ha significado una auténtica revolución es en la microscopía de alta resolución. El mayor atractivo de los láseres desde el punto de vista de la biomedicina es su capacidad para concentrar su energía en una superficie extremadamente pequeña. Gracias a la coherencia de la luz láser, el tamaño del punto de focalización que se forma al pasar el haz por una lente convergente está limitado tan sólo por la difracción del propio haz. Dicho límite depende del tamaño transversal del haz respecto a la distancia focal de la lente y de la longitud de onda del láser, de manera que cuanto más cortas son la distancia focal y la longitud de onda, más pequeño es el punto de focalización. Ésta es justamente la idea en que se basa la técnica llamada microscopía confocal de barrido láser, que permite obtener imágenes tridimensionales de tejidos biológicos con alta resolución.

Por otro lado, la incorporación de los láseres de pulsos ultracortos al terreno de la microscopía tiene su justificación en la capacidad de los pulsos de

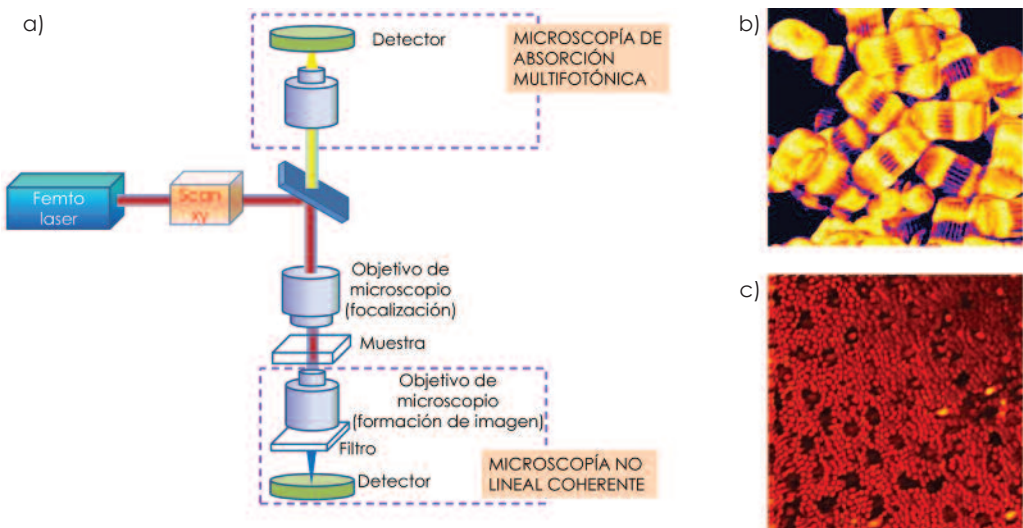


Figura 7.10. a) Esquema de dispositivos experimentales para microscopía óptica no lineal con pulsos ultracortos. El láser de femtosegundos es enfocado en la muestra a través de un objetivo de microscopio de gran apertura numérica. Previamente, un sistema (Scan xy en el esquema) deflcta el haz para realizar barridos en un plano de la muestra. La nueva longitud de onda generada por procesos no lineales en la muestra, es capturada de forma colineal al haz de excitación, bien a través de la muestra bien a través del propio objetivo de focalización. A la derecha tenemos dos imágenes tomadas mediante microscopía confocal. En primer lugar b), granos de polen, y en segundo lugar c), tejido de la retina donde se distinguen los conos y bastones que forman parte de la misma. Cortesía del Prof. Juan Manuel Bueno, (Universidad de Murcia).

femtosegundos para inducir efectos no lineales al interactuar con la materia y, en particular, con muestras biológicas, tejidos u otros tipos de materiales. Estos efectos no lineales consisten básicamente en la conversión de la longitud de onda del láser incidente en otras longitudes de onda que son detectadas con un sistema de formación de imagen convencional. Los distintos tipos de tejidos o estructuras de la muestra (a escala microscópica) responden de forma diferente al láser incidente: bien cambia la longitud de onda generada, bien la señal de esa nueva longitud de onda es más o menos intensa. Haciendo un muestreo (tanto en el plano como en profundidad) del tejido se logran imágenes tridimensionales de gran calidad y precisión.

De forma general, existen dos grandes grupos de técnicas de microscopía que emplean los pulsos ultracortos: microscopía de absorción multifotónica y microscopía óptica no lineal coherente.

### 7.2.1. El láser en oftalmología

El primer campo de la medicina en el que el láser comenzó a utilizarse fue la oftalmología, especialidad médica que estudia las patologías del ojo. Para entender mejor la acción del láser sobre el ojo, vamos a explicar brevemente su anatomía desde el punto de vista óptico.

A grandes rasgos, podemos distinguir dos partes en un ojo. En primer lugar, un sistema constituido por la córnea y el cristalino, cuya función es enfocar y concentrar la luz exterior en un plano donde se forma la imagen. Por otro lado está la retina, situada en la superficie interna del ojo, y encargada de desencadenar una serie de impulsos nerviosos que traducen la información recogida del exterior y la envían hacia el cerebro a través del nervio óptico. Para ello, la retina dispone de una serie de células denominadas conos y bastones, que podemos observar en detalle en la Fig. 7.10.c) La zona de la retina en la que se aglomeran mayor cantidad de conos y bastones y, por tanto, la zona más sensible a la luz, es denominada mácula.

Conocidas las dos partes principales del ojo, podemos afirmar de manera muy general que un ojo con visión perfecta es aquel que forma la imagen en la retina. Si el plano imagen es formado antes que la retina, se dice que el ojo es miope; por el contrario, si es formado tras la misma, se denomina hipermetrope. Además, hay que tener en cuenta otras deformaciones del ojo denominadas aberraciones que, por ejemplo, generan astigmatismo. Para corregir estos defectos, se utilizan lentes externas, bien gafas o las denominadas lentes de contacto.

Una vez conocida la anatomía del ojo, veamos la importancia que ha adquirido el láser en oftalmología. En primer lugar, y como ya adelantamos al principio de este capítulo, el ojo es el órgano al que podemos acceder con mayor facilidad mediante un láser, debido a su transparencia para la luz visible e infrarroja. Gracias a ello se han podido desarrollar técnicas de diagnóstico de

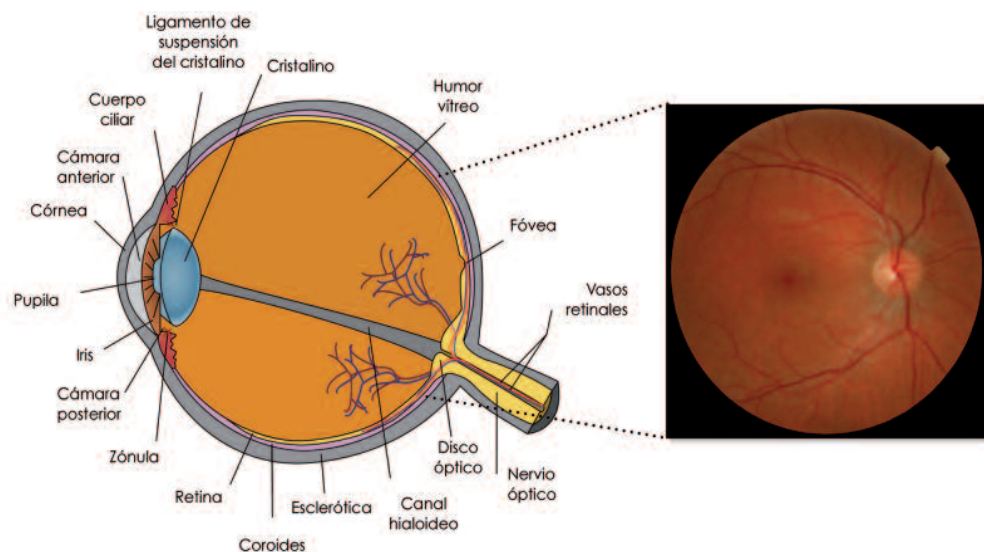


Figura 7.11. Anatomía del ojo humano, donde podemos distinguir las distintas partes del mismo. A la derecha podemos observar la imagen de la retina de un joven de 25 años. En la parte derecha de la imagen podemos distinguir el nervio óptico, mientras que en la parte izquierda podemos observar la mácula, como la región ensombrecida de la retina debido a la aglomeración de conos y bastones.

enfermedades oculares como la microscopía confocal. Mediante este método, que ya explicamos anteriormente, se pueden detectar alteraciones en la retina, así como etapas precoces de glaucoma.

Pero sin duda, el láser ha supuesto una revolución en oftalmología a la hora de tratar diversas enfermedades. Un haz de luz láser puede dar forma a la córnea para mejorar su foco, crear un canal a través del ojo para modificar la presión intraocular causante del glaucoma o detener pequeñas hemorragias en la retina.

En particular, en los últimos años se ha extendido la cirugía refractiva, que corrige la miopía, hipermetropía y astigmatismo del ojo, como alternativa a las lentes externas usadas comúnmente. El tipo más común de intervención se conoce como LASIK (*laser-assisted in situ keratomileusis*), que detallaremos a continuación.

En primer lugar, se aplanan la córnea y se hace un corte con una cuchilla micro-queratomo, permitiendo levantar el *flap* o epitelio de la córnea (la parte más superficial), que queda unido a la córnea por un pequeño extremo que permanece sin cortar. Posteriormente, se procede a hacer un tallado de la capa de la córnea conocida como estroma mediante ablación con un láser de excímero de longitud de onda ultravioleta (193 nm). De esta forma, se puede retirar parte del estroma a profundidades de varias micras para cambiar la potencia de focalización de la córnea y corregir la miopía o la hipermetropía,

según se retire material en el centro o en la periferia, respectivamente. El efecto es similar al de una lente convergente o divergente que corrige el exceso o defecto de convergencia de las lentes oculares.

Recientemente, se ha comenzado a sustituir la cuchilla metálica para crear el *flap* por la ablación con láseres de pulsos ultracortos de femtosegundos, que se focalizan por debajo del epitelio corneal para ir creando mediante un barrido pequeñas burbujas que facilitarán despegar el epitelio del estroma. Esta variante se conoce como IntraLASIK y tiene la ventaja de que el corte es más preciso y se reduce el daño en la córnea. Además, también es posible moldear otras capas de la córnea de forma que toda la cirugía refractiva se realice con este láser. Aunque la técnica LASIK es muy popular, hay que recordar que no todos los pacientes son susceptibles de ser tratados con ella y que puede haber efectos secundarios que impidan una visión tan perfecta como la esperada.

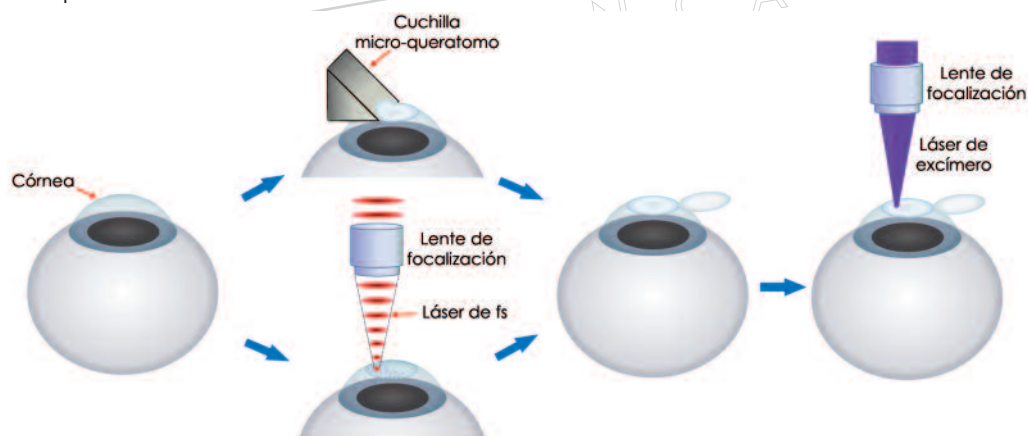


Figura 7.12. Proceso de operación de cirugía refractiva con láser, LASIK. De izquierda a derecha, podemos ver cómo en una primera etapa se retira la capa más externa de la córnea. Para ello existen dos técnicas: mediante una cuchilla micro-queratomo, o mediante un láser de femtosegundos. Una vez retirada la capa más externa de la córnea, mediante un láser de excímero se modifican las propiedades de la córnea según las necesidades del paciente.

### 7.2.2. El láser en odontología

La odontología ha sido otro de los campos de la medicina en los que progresivamente se ha ido implantando la tecnología láser. En determinadas aplicaciones, los procedimientos mecánicos convencionales han sido sustituidos por el tratamiento con láser, que ofrece diversas ventajas. Pese a ello, la aplicación en este campo no resultó ser tan eficaz como en la oftalmología, debido a que en diversos procedimientos los efectos térmicos y mecánicos derivados de la interacción láser-tejido resultan nefastos. Sin embargo, la utilización de láseres de femtosegundo, como veremos en este apartado, presenta una serie

de ventajas que pueden convertirla en la herramienta del futuro para la eliminación de caries o la perforación de piezas dentales.

En odontología, podemos dividir el tratamiento con láser en dos apartados, dependiendo de si el tejido a considerar es duro (esmalte, dentina, ...) o blando (encías, mucosas, ...).

#### 7.2.2.1. Tratamiento láser en tejido duro

Una de las afecciones dentales más comunes es la caries. Su tratamiento, cuando ha afectado a la dentina, consiste en la eliminación del tejido dental afectado. El instrumental médico habitual para realizar este proceso es la pieza de mano, contraángulo o turbina. Sin embargo, la fricción de estos elementos mecánicos con la pieza dental provoca un calentamiento que puede necrosar el tejido pulpar. Por ello se anestesia localmente al paciente y éstos instrumentos se utilizan con irrigación.

En el tratamiento láser, mediante un haz continuo o de pulso largo, obtenemos igualmente un incremento de temperatura. Sin embargo, mediante pulsos cortos (femtosegundos) se ha demostrado que se minimizan los efectos térmicos, hasta llegar a desaparecer prácticamente, planteándose realmente como una ventajosa alternativa a los procedimientos mecánicos convencionales, tanto por la precisión en el procesado como por la significativa reducción del dolor.

En el terreno de la odontología, la utilización de los láseres de femtosegundos también está siendo seriamente considerada. Existen ya numerosos estudios demostrando la idoneidad de estos láseres para la eliminación de caries, o la realización de cortes y perforaciones en piezas dentales.

Otro de los ámbitos en los que el láser se ha presentado como una herramienta alternativa es en el blanqueamiento dental.

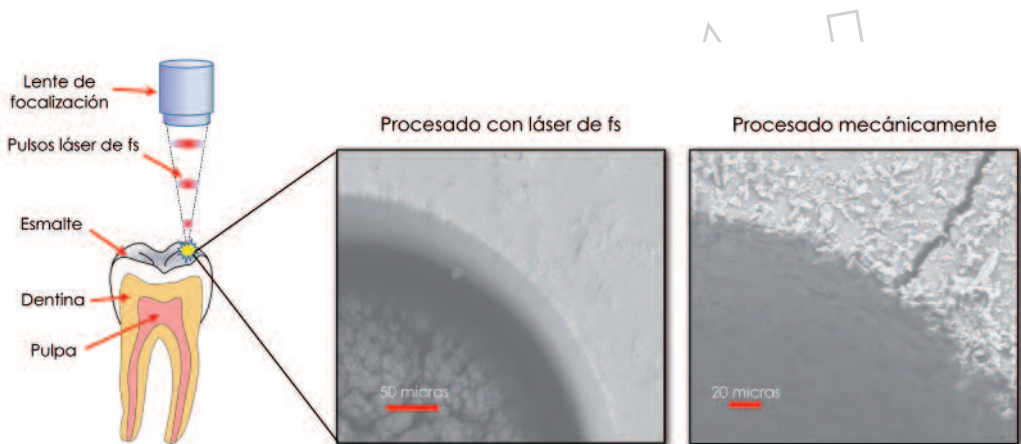


Figura 7.13. Anatomía de un diente, donde además se muestra la comparación entre el procesado mediante láser de femtosegundo, y el procesado convencional mecánico con una fresa.



Figura 7.14. Dentadura de un paciente antes y después de ser tratado con láser. Cortesía del Dr. Ángel Alonso.

### 7.2.2.2. Tratamiento láser en tejido blando

Por otro lado, en muchas ocasiones se necesita vaporizar o eliminar tejido mucoso de la boca. La eliminación con láser, aunque más costosa, a la postre presenta diversas ventajas, ya que se limpia totalmente la zona afectada y el procedimiento es menos doloroso para el paciente. Sin embargo, con la vaporización se necesita realizar una biopsia a posteriori para comprobar que se ha eliminado todo el tejido afectado. Debido a que la mucosa es muy húmeda, el láser más usado en estos casos es el  $\text{CO}_2$ , bien absorbido por el agua. Particularmente, es muy útil para pequeñas lesiones mucosas, en las que con potencias de 5 - 10 W, se consigue vaporizar o eliminar la lesión mediante láser.

La utilización del láser, frente a otras técnicas quirúrgicas tradicionales, ofrece un tratamiento totalmente estéril, sin sangrado (gracias a la coagulación de los vasos sanguíneos por la acción del láser) y con una sensación de dolor sensiblemente menor para el paciente. Además, no es necesario aplicar posteriormente puntos de sutura, ya que la herida cicatriza sola.

### 7.2.3. El láser en dermatología

Otra de las ramas de la medicina en la que el láser cada vez tiene más relevancia es la dermatología. Con ayuda de los efectos térmicos causados por el láser se pueden tratar distintas lesiones sobre la piel. La capa más externa de la piel, la epidermis, es muy rica en melanina y queratina. En función del espectro de absorción de estos componentes, se seleccionan los distintos láseres que se usan en dermatología.

Una de las aplicaciones más conocidas es la cirugía superficial, gracias a la cual se pueden eliminar con precisión distintas lesiones superficiales en la piel, como úlceras o verrugas. El láser comúnmente utilizado es el de  $\text{CO}_2$ , que comparado con el tradicional bisturí, ofrece la posibilidad de eliminar tejido (mediante vaporización) de una forma más precisa, reduciendo la sensación de dolor.



Además, el láser se ha convertido en la herramienta más eficaz a la hora de tratar lesiones vasculares, como hemangiomas superficiales (comúnmente conocidos como la mancha de vino de Oporto), en las que se utiliza el láser de argón o los láseres de colorante. Por otro lado, la microscopía confocal de barrido se utiliza en el diagnóstico del cáncer de piel.

Por último, el láser ha ganado muchos adeptos en la dermatología estética. El ejemplo más conocido es la depilación láser. Su principio físico consiste en la eliminación del pelo mediante la destrucción de su folículo. Dicho folículo es rico en melanina, por lo cual se buscan longitudes de onda que sean absorbidas por la melanina (ver Fig. 7.1). Otros tratamientos de estética en los que se emplean láseres son la eliminación de tatuajes y el *peeling* superficial, en el cual se trata de eliminar las arrugas mejorando la textura de la piel.

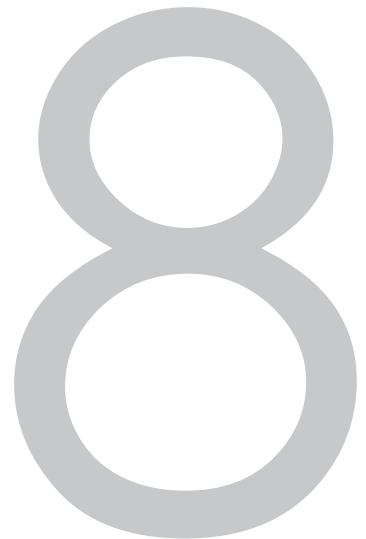
### Para saber más

*Laser-Tissue Interactions. Fundamentals and applications*, M.H. Niemz, Ed. Springer, 2007  
*Surgical applications of femtosecond lasers*, S. Chung y E. Mazur, *Journal of Biophotonics* 2, 557-572, 2009.

Microscopía no lineal: [http://biomicroscopy.bu.edu/r\\_nonlinear.htm](http://biomicroscopy.bu.edu/r_nonlinear.htm)

OSAL  
SALAMANCA

APLICACIONES INDUSTRIALES  
DE LOS LÁSERES



En sus 50 años de historia, el láser se ha incorporado definitivamente a muchos procesos de fabricación industrial, siendo el segundo sector de ventas de láseres a nivel mundial, sólo por detrás del de las telecomunicaciones. Desde sus inicios, la utilización del láser ha estado muy extendida en las aplicaciones de corte, soldadura y perforado en diferentes sectores, como el automovilístico, naval y aeroespacial. Otras aplicaciones como el marcado están presentes en numerosos procesos industriales de diversos sectores como el cerámico o el textil. Además, esta evolución no ha cesado y siguen surgiendo nuevas aplicaciones, de manera significativa, como pueden ser el tratamiento de superficies y el procesado de materiales no metálicos.

En este capítulo se presenta un catálogo resumido de estas aplicaciones y algunas de las líneas de investigación en el procesado de materiales con láser desde el punto de vista de su fundamento, sus ventajas e inconvenientes, así como las tecnologías y sistemas empleados. Sobre cada una de las aplicaciones aquí presentadas existen distintas variantes o estrategias de procesado, variedad de sistemas, componentes y multitud de ejemplos, aunque sólo los nombraremos brevemente ya que los detalles se escapan al propósito de este libro.

### **8.1. La interacción láser-materia en procesado**

Como sabemos, la luz láser se caracteriza por ser coherente, monocromática y direccional. Debido a estas propiedades, la energía del láser puede concentrarse —haciendo uso de los elementos ópticos adecuados— en áreas muy pequeñas de la superficie de un material, aspecto decisivo en muchas de sus aplicaciones industriales. Las principales características del láser que determinan la interacción láser-materia son: duración de la interacción, intensidad pico y longitud de onda. Los láseres más utilizados en el procesado de materiales son los de  $\text{CO}_2$  y Nd:YAG. Sin embargo, y debido a la cantidad y variedad de aplicaciones ya mencionadas, cada vez son más usados otros tipos de láser como los de fibra óptica, los de excímero, los de diodo y los de pulsos cortos y ultracortos (véase Cap. 4).

A la hora de estudiar la interacción láser-materia, también es importante conocer y estudiar cómo varían durante el procesado las propiedades del material, tanto ópticas (reflectividad, absorbancia) como térmicas (difusión y conductividad térmica, calor latente y de vaporización) o estructurales (cambios de fase cristalina, amorfización,...).

## 8.2. Corte, soldadura y perforado con láser

En este apartado se describen las aplicaciones de corte, soldadura y perforado. Este grupo de aplicaciones son las pioneras en su integración industrial, principalmente en el sector metalúrgico, a la vez que las más extendidas. En todas ellas se utilizan láseres de gran potencia, dadas las intensidades que hay que alcanzar en la zona de procesado y las altas velocidades de producción demandadas.

En la Fig. 8.1, se muestran esquemas simplificados de sistemas de procesado láser en aplicaciones de corte, soldadura y taladrado para su implementación industrial. Estos sistemas cuentan, de manera resumida, con los siguientes elementos:

1. La fuente de luz láser. Las propiedades del haz láser que influyen en el procesado con láser son el tamaño y forma del punto de enfoque, la potencia, la polarización, la longitud de onda y el perfil temporal del pulso. Normalmente, las fuentes empleadas son láseres de  $\text{CO}_2$  y Nd:YAG, teniendo estos últimos la ventaja de que pueden acoplarse a una fibra óptica.
2. Un mecanismo que permita la interrupción del haz. Por ejemplo, un espejo móvil puede realizar dicha función al interponerse en el camino del haz y enviarlo a un disipador, como se representa en la Fig. 8.1.
3. Un dispositivo de conducción del haz hasta la zona de interacción, como por ejemplo, un sistema de fibra óptica (normalmente manipulada mediante un robot) o un conjunto de espejos.
4. La óptica de focalización, que puede ser de transmisión (lentes) o reflexión (espejos).
5. Una tobera que proporciona el flujo de gas necesario para, entre otros motivos, proteger la óptica de desechos y refrigerar la zona de procesado.

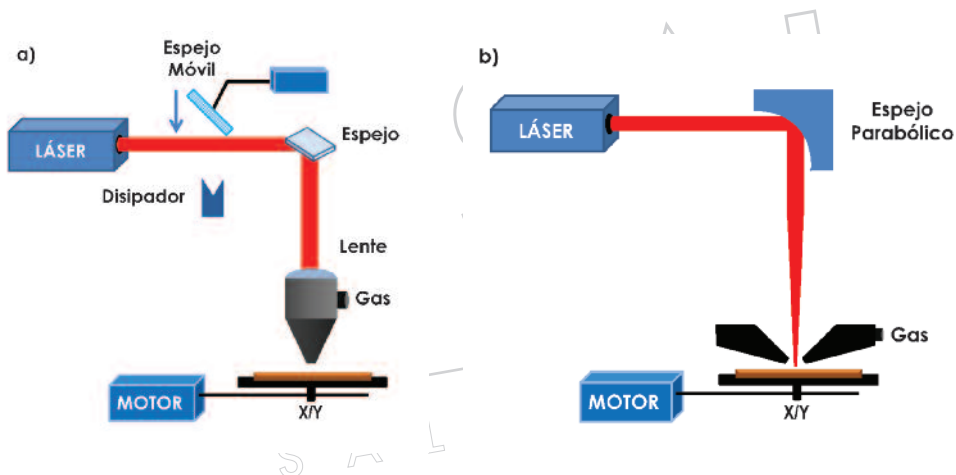


Figura 8.1. Esquemas simplificados de sistemas de procesado industrial con láser. a) Óptica de transmisión. b) Óptica de reflexión.

6. Un sistema de posicionamiento que desplace la pieza con respecto al haz láser o, en el caso de grandes piezas, el cabezal del láser sobre el material (pórticos robotizados).

### 8.2.1. Corte por láser

A nivel práctico, el corte por láser es un problema de múltiples parámetros operacionales que hay que optimizar para cada aplicación. Los fundamentales son: potencia del láser, velocidad de avance (velocidad relativa entre el cabezal que focaliza el láser y la pieza, que determina el tiempo de interacción del láser con el material), tamaño del punto de focalización y espesor del material.

Si se compara con otros procesos de fabricación, las principales ventajas del proceso de corte con láser en entornos productivos son, por un lado la alta velocidad de corte, por otro el hecho de que no se produce deterioro de la herramienta —al no haber contacto entre la pieza y el cabezal láser— y finalmente la flexibilidad del proceso, —no existen cambios de herramientas sino de programación—. Por todo ello, el proceso es relativamente fácil de automatizar e integrar en líneas de producción robotizadas.

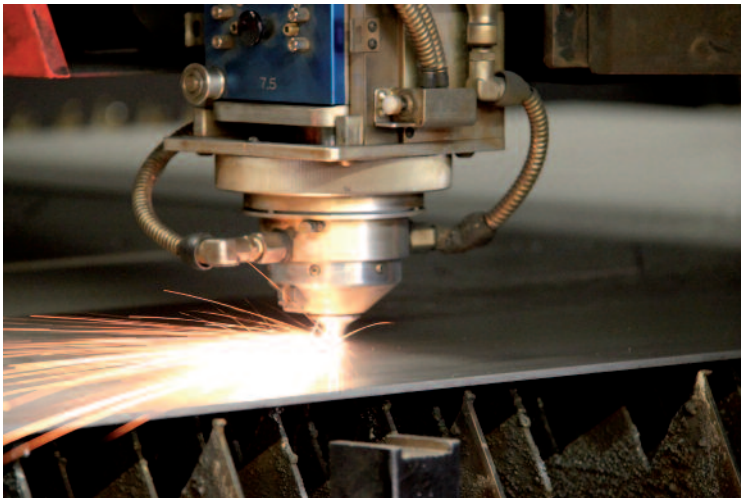


Figura 8.2. Cabezal de corte con láser. (Fuente: Wikimedia commons)

Dentro del corte por láser y atendiendo al mecanismo y a los procesos físicos que dan lugar a la separación de las piezas, suele hablarse de corte láser por vaporización, por fusión reactiva, por fusión controlada, por perforación, por gas estabilizado por láser o corte frío, siendo el corte por fusión el más extendido. En general, las ventajas cualitativas del corte por láser en comparación con otras técnicas se pueden resumir en:

- El tamaño del surco de corte puede ser muy estrecho, lo que implica ahorro de material.

- Los bordes pueden ser suaves y limpios, sin rebabas, de forma que no es preciso ningún tratamiento o limpieza posterior. De esta forma, las piezas pueden ser soldadas directamente sin preparación previa.
- La zona afectada térmicamente (HAZ, en inglés *Heat Affected Zone*) es muy pequeña. Normalmente hay una capa resolidificada de dimensiones microscópicas, por lo que no aparecen distorsiones.

Como principales restricciones del proceso están el alto coste de los equipos y la limitación en el espesor de material que se puede cortar. Aunque este valor depende de la potencia del láser y del material en cuestión, para corte de alta calidad el rango actual está entre 10 y 20 mm y, en el caso de chapa, el límite en el espesor de corte está en torno a 25 mm.

Por su rapidez, calidad y capacidad de flexibilidad y adaptabilidad a entornos de producción, las industrias que emplean esta tecnología son, principalmente, la industria del automóvil y la naval:

- Industria automovilística: El láser no sólo sirve para cortar las piezas sino que se usa de forma integral en todo el proceso, desde la creación de prototipos hasta la soldadura.
- Industria naval: Se cortan las planchas de gran espesor que se usan en la construcción de barcos.

Asimismo, por sus características, se aplica este proceso a otros materiales como los usados en la industria aeroespacial o textil. Veamos algunos ejemplos concretos de aplicaciones del corte con láser:

- Corte de materiales textiles: en general no merece la pena el corte con láser de tejidos para ropa por ser lento y existir el peligro de que se peguen por los bordes las piezas apiladas. Sin embargo, el láser es muy útil para cortar materiales gruesos como moquetas, cubiertas de asientos, etc.
- Corte de materiales para la industria aeroespacial: Las aleaciones de titanio también se cortan con gran rapidez y lo mismo ocurre con las de aluminio y acero inoxidable, que pueden ser luego soldadas directamente.
- Corte de fibra de vidrio: el láser reduce el polvo generado y la aparición de grietas en los bordes.
- Corte de Kevlar: el Kevlar es un polímero muy usado por su ligereza y resistencia, por ejemplo en los chalecos antibalas. El láser es una de las pocas técnicas que permiten su corte.

### 8.2.2. Soldadura por láser

La soldadura con láser es la segunda aplicación más extendida del láser en la industria después del corte, registrándose un aumento progresivo de sistemas instalados. El sistema de soldadura láser es similar al de corte (Fig. 8.1) necesitando asimismo aporte de gas, pero que en este caso actúa como atmósfera protectora del material fundido.

Hay esencialmente dos formas de soldar con láser, lo que se conoce como soldadura limitada por conducción y la soldadura de penetración (Fig. 8.3).

En la soldadura limitada por conducción el material se funde allá donde se alcanza la temperatura de fusión, manteniéndose la intensidad del láser siempre por debajo del límite para producir evaporación. El haz láser funde el material en el punto de focalización y, por conducción de calor a través de la pieza, se funde el material adyacente, consiguiéndose un cordón de perfil semicircular. Este método se emplea sobre todo para piezas de pequeño espesor lográndose muy buenos acabados superficiales.

En la soldadura de penetración, las altas intensidades producen evaporación de material, creándose un agujero con forma de ojo de cerradura (conocido como *keyhole*) que permite aumentar la absorción de radiación por las múltiples reflexiones en las paredes del mismo y la consiguiente fusión de material. Esto es muy importante en materiales de elevada reflectancia en las longitudes de onda de trabajo. El material en fase líquida va solidificando rápidamente a medida que se produce el avance del haz láser, formando así el cordón de soldadura. Mediante este método se consiguen profundidades de soldadura muy grandes y, por tanto, se pueden soldar piezas de mayor espesor.

El control de los parámetros del proceso tales como energías, focalización y las diferentes configuraciones geométricas de la unión, permiten obtener resultados óptimos. La soldadura láser se caracteriza por la alta calidad del cordón de manera que, en la mayoría de los casos, no es necesario post-procesado.

Al igual que el corte por láser, las principales razones de su implantación industrial a gran escala son:

- La rapidez del proceso.
- Se evita el cambio de herramientas, al no existir contacto.
- Se adapta muy bien a diversos materiales de diferentes espesores.
- Fácilmente integrable en líneas de producción robotizadas, como pueden ser las cadenas de montaje de la industria automovilística.

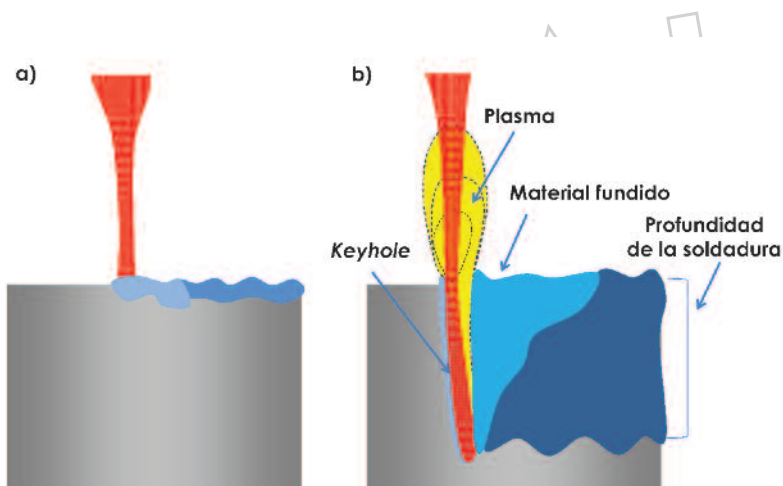


Figura 8.3. Tipos de soldadura láser. a) Limitada por conducción. b) Soldadura de penetración.

La soldadura láser posee una alta flexibilidad en términos de integración en procesos productivos y de posibles configuraciones geométricas. Las aplicaciones de la soldadura láser son diversas: extintores, tuberías gruesas, láminas metálicas de lavadoras, construcción de barcos, baterías de litio y especialmente, la soldadura láser es un proceso crucial en las líneas de ensamblaje de piezas de chasis de automóviles.

### 8.2.3. Perforado y taladrado por láser

Los sistemas empleados en el perforado y taladrado por láser son similares a los ya presentados en apartado 8.2, pero normalmente se usan fuentes láser pulsadas, concentrando gran cantidad de energía en un tiempo muy corto, produciendo así la evaporación del material. También la longitud de onda es un parámetro importante que determina el tamaño de los agujeros. La calidad espacial del haz es crucial para obtener perforaciones con geometrías correctas en sección y profundidad. La profundidad de la perforación depende de la energía de los pulsos y de su número y, por supuesto, del tipo y propiedades del material.

La principal limitación de la perforación por láser es la profundidad de penetración. Ésta podría aumentarse con más pulsos o con pulsos de mayor energía, pero dicha estrategia puede repercutir en su calidad debido a la absorción de energía en zonas adyacentes. En este caso, la solución consiste en utilizar láseres de longitudes de onda muy cortas o bien pulsos ultracortos, para evitar el transporte de calor.

Las ventajas del perforado con láser son análogas a las del corte y soldadura, con alguna característica singular:

- El operador tiene un control automático sobre el tamaño de los taladros y su cantidad.
- Controlando el perfil espacial del haz pueden obtenerse orificios de distintas geometrías.
- Los sistemas industriales incluyen separación de líneas de procesado, de modo que varias hileras de orificios pueden producirse simultáneamente, reduciendo los tiempos de procesado.

En cuanto a los resultados obtenidos, el perforado láser se caracteriza por la precisión y calidades alcanzadas, en especial, la ausencia de rebabas, siendo innecesario el post-procesado o tratamiento de acabado.

Además de las limitaciones impuestas por la profundidad de penetración, hay otras dificultades asociadas al tamaño y geometría de la sección de los taladros. Para obtener diámetros de agujero mayores que el tamaño del foco pueden emplearse estrategias de trepanado, consistentes en desplazar el haz del eje del sistema de focalización mediante un sistema optomecánico, como por ejemplo un sistema de cuñas ópticas (Fig. 8.4). Los taladros realizados con láser tienden a adoptar una forma de cono invertido con el vértice en la parte



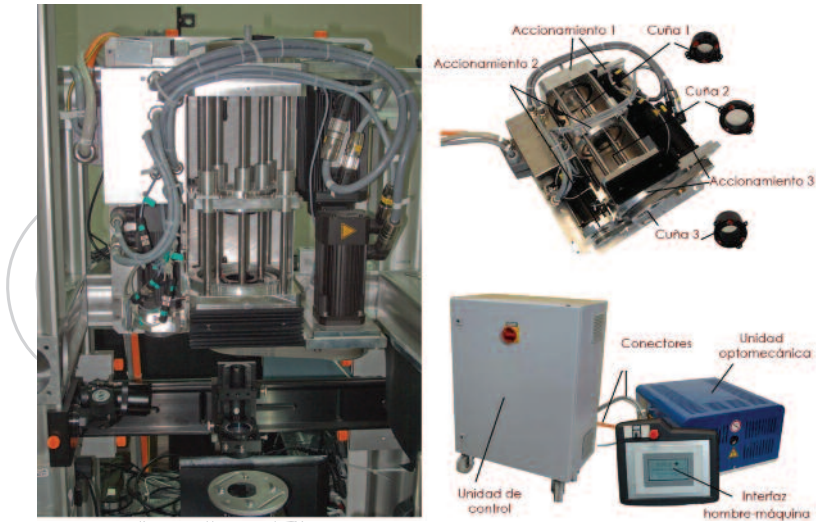


Figura 8.4. Sistema de trepanado óptico y posicionamiento de la muestra (conjunto completo y componentes). Fabricante TGSW-mbH (<http://tgsw-photonics.de/en>)

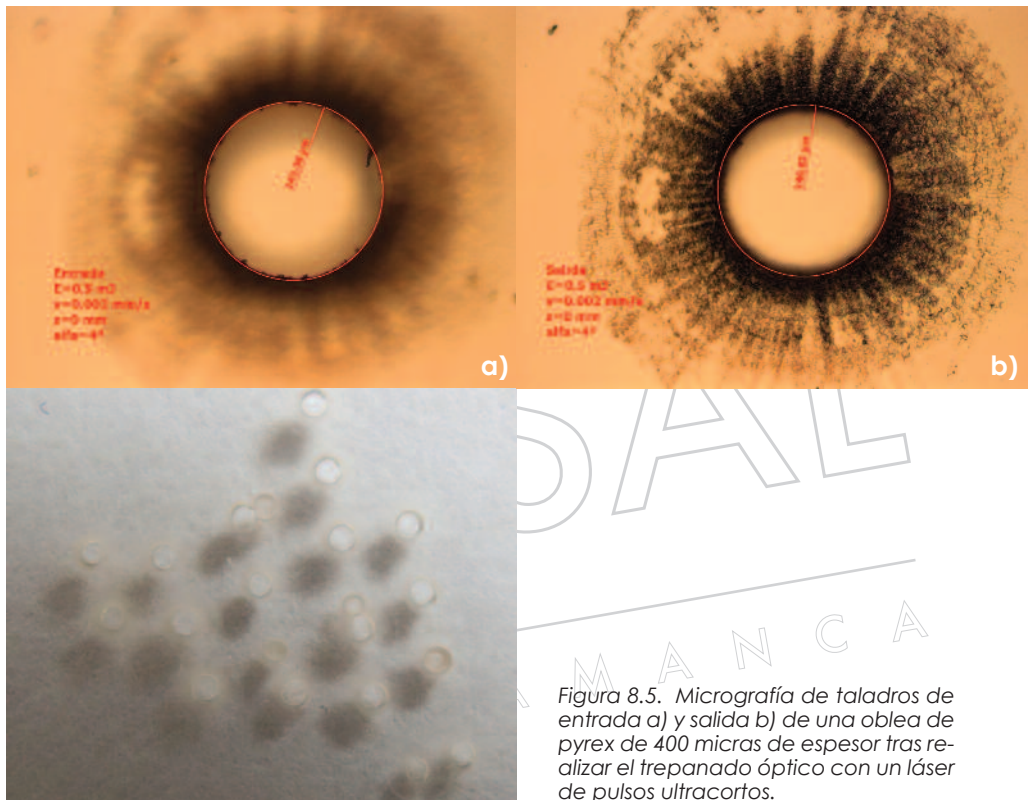


Figura 8.5. Micrografía de taladros de entrada a) y salida b) de una oblea de pyrex de 400 micras de espesor tras realizar el trepanado óptico con un láser de pulsos ultracortos.

más profunda. Sin embargo, es posible conseguir otras secciones e incluso variar la sección a lo largo del taladro mediante la combinación de elementos ópticos y mecánicos.

### 8.3. Marcado

Otra de las tecnologías láser fuertemente arraigada en la industria es el marcado, que consiste en grabar y codificar cualquier tipo de información en la superficie de un producto, como por ejemplo el logotipo de la marca que lo fabrica y lo vende o distribuye.

Existen distintas técnicas de marcado (Fig. 8.6), siendo las más habituales:

- *Marcado por matriz de puntos o grabado*: consiste en marcar una serie de puntos que trazan los caracteres o cifras deseados por medio de un sistema de barrido. Esto puede lograrse de dos formas, por medio de puntos o píxeles que crean una imagen binaria cuya calidad dependerá de la resolución, o por medio de líneas, con gráficos de carácter vectorial.
- *Marcado por imagen o por máscara*: consiste en marcar proyectando la imagen de una máscara sobre la pieza con ayuda de una lente. La marca puede obtenerse por diversos procesos: eliminación de una capa superficial de distinto color al de la pieza, cambio de color debido a alguna reacción termoquímica o fotoquímica, modificación de la reflectancia de la superficie de forma que se produzca un elevado contraste.

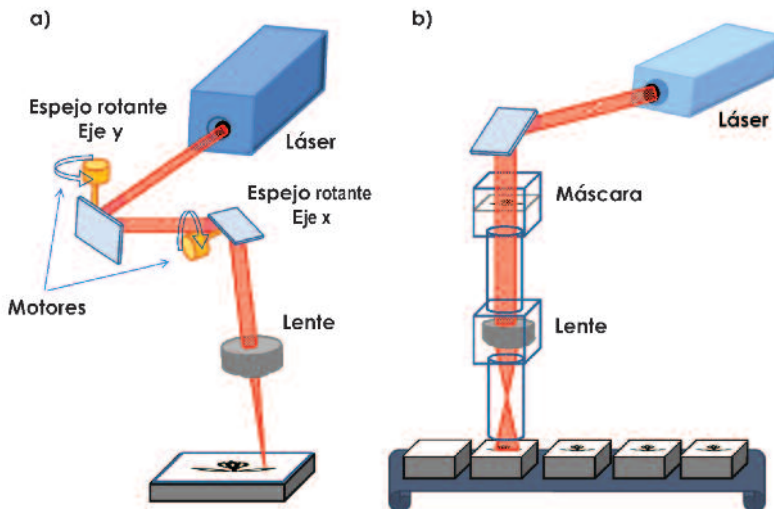


Figura 8.6. Esquemas simplificados de sistemas de marcado. a) Marcado por matriz de puntos. Los motores mueven los espejos para dirigir el haz sobre la pieza. b) Marcado por máscara. Las piezas, colocadas sobre una cinta transportadora, se desplazan y el sistema que conduce el haz permanece fijo.

En cuanto a los láseres empleados, tradicionalmente se han utilizado láseres de estado sólido (Nd:YAG) bombeados por lámparas, aunque en la actualidad, por su eficiencia y desarrollo, se utilizan mayoritariamente láseres de diodo.

En cualquier caso, el marcado láser es un tratamiento superficial en el que la luz absorbida permite modificar la superficie bien sea por fusión y resolidificación, reacción fotoquímica o por ablación. En general, se necesita una buena absorción de la luz en el material para que el proceso sea eficiente, rentable y también atractivo estéticamente. La profundidad de penetración de la luz debe ser suficiente pero no excesiva y por ello la elección de un láser adecuado para cada tipo de material es quizá el elemento clave. Normalmente, y dado que el procesado es menos agresivo, las fuentes láser empleadas son de menor potencia a las descritas anteriormente y, por tanto, el proceso es más económico.

Entre los materiales adecuados para el marcado láser se encuentran: plásticos, metales, cerámicos, semiconductores, vidrios y el papel. Esta versatilidad del marcado láser hace que se puedan identificar numerosos productos de consumo en el hogar o lugar de trabajo que han sido marcados con láser. En la siguiente tabla se puede ver un resumen de las distintas aplicaciones y materiales que se marcan con láser junto con los láseres más empleados.

| Láser           | Industria   | Aplicación  |
|-----------------|-------------|---|
| CO <sub>2</sub> | Electrónica | Circuitos integrados, transistores, condensadores, tubos de TV. |
|                 | Envases     | Latas de bebidas, etiquetas, cosméticos, farmacéuticos.         |
| Nd:YAG          | Electrónica | Circuitos integrados, teclados, paneles de control, etc.        |
|                 | Automóvil   | Partes metálicas, cuadros de mandos.                            |
|                 | Médica      | Piezas moldeadas, jeringuillas, envases.                        |
| Excímero        | Aerospacial | Piezas metálicas, monitores.                                    |
|                 | Electrónica | Condensadores, cables.  |

Tabla 8.1. Tabla resumen de las aplicaciones del marcado láser.

#### 8.4. Tratamientos superficiales

A diferencia de los procesos estudiados hasta este momento, en el caso de los tratamientos superficiales, se persigue sobre todo una distribución espacial adecuada de la energía sobre la superficie de los materiales, con el objeto de modificar alguna de sus propiedades, ya sean mecánicas, químicas, ópticas o estéticas, entre otras. En este grupo de aplicaciones destacan el temple, la aplicación de recubrimientos, el texturizado y el tratamiento por ondas de choque.

El temple superficial es un tratamiento térmico en el que se modifica la microestructura del material de las superficies con el fin de obtener una mejora en las propiedades mecánicas, como la dureza y resistencia a la fatiga, con respecto al material base. En esta aplicación, un haz láser no focalizado realiza un barrido sobre una superficie de un material a templar para elevar localmente su temperatura por encima de la temperatura de transformación de fase. Se emplea en un buen número de aceros y fundiciones, y tiene especial interés en componentes como pistones, cojinetes o asientos de válvulas. La profundidad y anchura del área templada pueden controlarse a través de los parámetros de proceso, entre los que se encuentran principalmente la distribución de intensidad del haz y la velocidad del barrido.

El proceso de recubrimiento superficial tiene como objeto fundir el material de aporte sobre la superficie de un sustrato, de manera que forme una capa sobre éste con una buena unión metalúrgica y la consiguiente mejora de las propiedades mecánicas y de resistencia frente al desgaste y corrosión. Esta técnica se ha empleado exitosamente en el recubrimiento de válvulas de motores de explosión, de herramientas para forja, de paletas de turbina, etc.

Otro de los tratamientos superficiales consiste en incrementar la rugosidad. La adhesión de pegamentos a superficies de acero galvanizado mejora notablemente si previamente se ha realizado este texturizado superficial con láser. Esta técnica se aplica, por ejemplo, en la industria del automóvil.

Desde el punto de vista de la investigación y puesta en marcha de nuevas aplicaciones de tratamiento superficial, y a modo de ejemplo, se trabaja en la utilización del láser para producir recubrimientos biocompatibles con unas propiedades físico-químicas y mecánicas mejoradas con respecto a los comerciales, de tal forma que puedan permitir una oseointegración de implantes ortopédicos o dentales mucho más rápida que con los dispositivos actuales.

Como ejemplo de tratamiento superficial en el que se emplea un haz láser focalizado está el endurecimiento láser por ondas de choque, conocido como *laser shock peening*, cuyo objetivo es eliminar las tensiones residuales de la superficie del material.

Por último, el láser juega un papel fundamental en los nuevos procesos de fabricación de los paneles solares, tanto mejorando las propiedades de absorción en las células de silicio amorfo, como en los procesos de fabricación y unión de circuitos en los paneles de película delgada. En esta última aplicación, ya se han implementado en la producción industrial líneas de procesado láser con pulsos cortos en el rango de nanosegundos y picosegundos.

### **8.5. Procesado láser en régimen de pulsos ultracortos**

En los últimos años se ha realizado una intensa labor investigadora sobre las potenciales aplicaciones de una nueva generación de láseres: *los láseres*

de pulsos ultracortos. Actualmente podemos decir que éstos se han convertido en herramientas de extraordinaria versatilidad en el ámbito del procesado de precisión y en el micro-estructurado de materiales. En comparación con las fuentes láser convencionales, además de la mejor calidad en los acabados y precisión, debemos destacar la posibilidad de procesar materiales transparentes y/o de muy alta dureza.

En este apartado, hacemos un breve repaso de los fundamentos y singularidades de operación, así como su interés en aplicaciones que se encuentran en una fase muy avanzada de investigación, o incluso se están ya utilizando fuera de los bancos de pruebas de los laboratorios.

La forma en la que los pulsos ultracortos interactúan con los sólidos y modifican sus propiedades los hacen muy adecuados para múltiples aplicaciones en procesado de materiales. Cuando un láser de pulsos de femtosegundos es enfocado sobre la superficie de un material (ya sea dieléctrico, metal o semiconductor) se produce un proceso denominado ablación ultrarrápida que tiene como efecto la eliminación del material de la zona focal del haz, como ya se vio en el Cap. 7 aplicado a tejidos biológicos. Controlando adecuadamente los parámetros de irradiación y enfoque, la zona de material eliminado puede tener espesores desde pocos nanómetros a varias micras. La ventaja

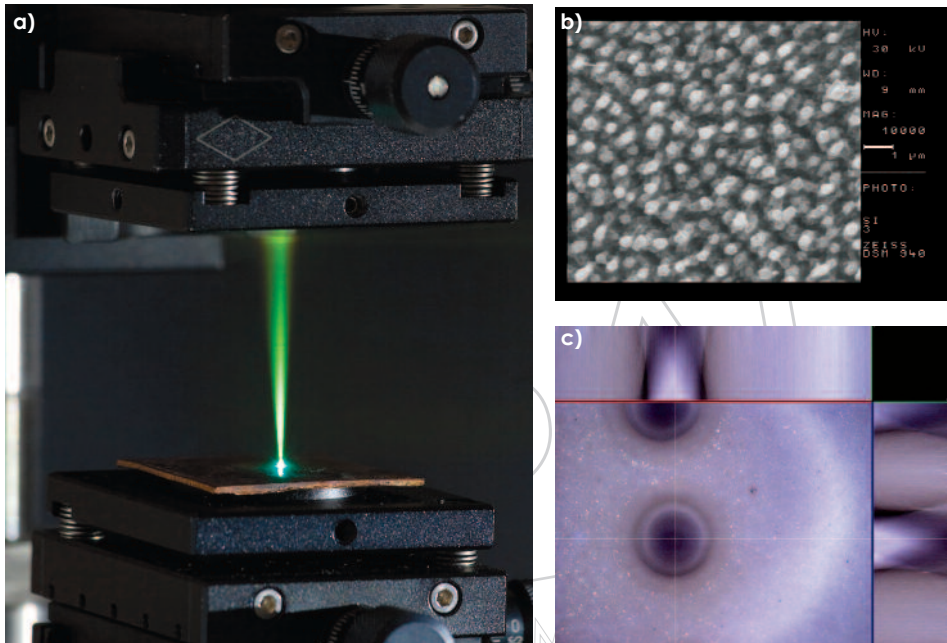


Figura 8.7. a) Láser de femtosegundos enfocado sobre una muestra de cobre, induciendo ablación ultrarrápida. La luz blanquecina emitida en la superficie del metal es la emisión del plasma generado por el propio láser. Diversos ejemplos de materiales microprocesados con láseres de femtosegundos. b) Nanoestructuras formadas en la superficie de silicio. c) Microporos formados en alúmina.

principal de este tipo de láser pulsado frente a otros de mayor duración temporal es que el material circundante a la zona donde enfocamos el haz permanece prácticamente inalterado y, por tanto, puede lograrse el procesado sin generar daños apreciables sobre el sustrato.

Las aplicaciones de la ablación ultrarrápida son el micro-procesado o micro-estructurado de alta precisión, ya que es posible realizar cortes, surcos o perforaciones de dimensiones micrométricas en cualquier tipo de material. Es habitual la utilización de estos láseres en aplicaciones de perforado en micro-electrónica o micro-fluidica, en estructurados de superficies (mejora de coeficientes de absorción de paneles solares de silicio o mejora de propiedades mecánicas como la resistencia al desgaste) y dada su alta resolución espacial, tiene gran interés para el procesado de materiales multicapa, como por ejemplo en el campo de la restauración del patrimonio artístico y cultural al ser una técnica mínimamente invasiva.

Por otra parte, los láseres de femtosegundos pueden ser enfocados en el interior de materiales transparentes (vidrios, cristales) y modificar sus propiedades ópticas y estructurales a escala sub-micrométrica. Esta posibilidad ha supuesto una revolución en el diseño y fabricación de circuitos ópticos integrados, ya que es posible *escribir* con el láser en el interior de cualquier cristal estructuras tipo guía de onda que confinen y propaguen la luz, así como todo tipo de dispositivos fotónicos tridimensionales (elementos difractivos, cristales fotónicos...). Para este tipo de aplicaciones resulta especialmente interesante la disponibilidad de sistemas láser de altas tasas de repetición (por encima de la decena de kilohertzios) ya que de otra forma los tiempos de procesado pueden ser extremadamente elevados.

No obstante, esta tecnología aún no se ha implantado masivamente en el sector productivo industrial. Existen diversas razones para ello, entre las que podemos destacar la elevada inversión en el equipo, la baja tasa de repetición o su mayor complejidad y necesidad de mantenimiento por personal altamente cualificado. Ciertamente son inconvenientes serios de cara a su incorporación en la industria, pero los avances tecnológicos que se experimentan de forma continua hacen pensar en la superación de estos problemas en un plazo razonablemente breve. Actualmente existen sistemas extraordinariamente robustos y compactos en los que la tasa de repetición se ha logrado incrementar hasta valores insospechados hasta hace unos pocos años. En este sentido están teniendo una gran relevancia los desarrollos hechos en láseres de fibra óptica.

## 8.6. Metrología, inspección y control

El láser también se utiliza en sistemas de diagnóstico y detección en diferentes sectores industriales, principalmente en la verificación de piezas. La implantación de estos sistemas se debe a su buena resolución y a la posibilidad de realizar muchas medidas de forma automatizada, garantizando el control

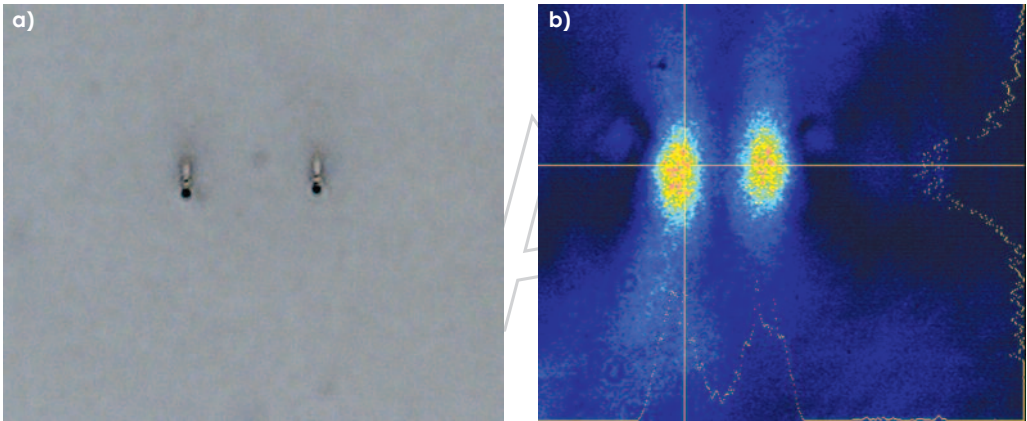


Figura 8.8. a) Sección transversal de un par de guías de onda inscritas en una muestra de vidrio (fused silica) con un láser de 120 fs (795 nm). El láser ha incidido desde la parte inferior de la imagen enfocándose según indica la figura. La separación entre ambas guías es de 20 micras. b) Luz de un láser de He-Ne acoplada a las guías de onda anteriores.

de calidad del proceso en línea. Por ejemplo, se utilizan láseres para el control de espesor de capas delgadas, en los procesos de ajuste de herramientas en las máquinas de mecanizado de control numérico o en la detección de defectos de piezas mediante interferometría holográfica.

Fuera de las líneas de fabricación, las propiedades de direccionalidad y coherencia del láser hacen que se utilice también en telémetros láser precisos para medición de distancia en equipos de topografía y obras públicas, en medición de velocidad de fluidos en túneles de viento o en tacómetros para determinar la velocidad de rotación de un eje.

### Para saber más

*Laser Material Processing*. William M. Steen. Springer-Verlag. 1991.

*LIA Handbook of Laser Materials Processing*, J.F. Ready, Laser Institute of America Magnolia Publishing, Inc. 2001.

*Ultrafast Lasers. Technology and applications*, editores M. Fermann, A. Galvanauskas y G. Succha, (New York, 2003).

Microprocesado: <http://www.physics.gatech.edu/frog/UFOBook/23-Micromachining-Cerami-Mazur-Nolte-n-Schaffer.pdf>

# APLICACIONES CIENTÍFICAS DEL LÁSER





La mayor parte de los experimentos en la ciencia contemporánea implican observar de forma controlada un evento particular. Si bien existen fenómenos como el *Big Bang* o el calentamiento global que no pueden repetirse en un laboratorio, en la mayor parte de los casos se busca simular el evento bajo observación y luego medir lo que sucede. La luz láser posee unas características únicas que han revolucionado muchas disciplinas científicas en las últimas décadas.

Por ejemplo, un láser puede servir para medir distancias y tiempos con gran precisión. Como ya se ha visto, la coherencia permite producir interferencias de dos haces láser dando lugar a una mayor o menor intensidad de luz dependiendo de su fase relativa. Como la luz visible corresponde a una longitud de onda del orden de 500 nm y un periodo de oscilación del orden de 1,67 fs, las medidas interferométricas poseen una precisión espacio-temporal extremadamente alta.

El láser también es útil para controlar las condiciones de un experimento. La energía de los fotones correspondientes a la luz visible es del mismo orden que las energías de los átomos y moléculas que la emiten, esto es, alrededor de 1 - 10 eV. Debido a la monocromaticidad de la luz láser, los fotones que la forman tienen una energía bien definida ( $E = hf$ , ver Cap. 1). Este hecho, unido a la direccionalidad de los haces, permite depositar energía en átomos y moléculas de manera muy precisa y controlada. Además, la longitud de onda de algunos láseres puede sintonizarse en ciertas regiones del espectro, por lo que es posible variar finamente la energía de los fotones.

Asimismo, es posible manipular, mover y atrapar partículas haciendo uso del momento bien definido de los fotones ( $p = h/\lambda$ ), como si los fotones del láser fueran bolas de billar manejadas por un jugador experto. Por ello, el láser es el instrumento idóneo para observar y manipular el mundo microscópico.

Además, la dinámica propia de los átomos y moléculas (por ejemplo los reajustes moleculares que ocurren durante una reacción química) tiene lugar en escalas de tiempo extremadamente cortas, del orden de femtosegundos. El desarrollo, desde hace apenas veinte años, de láseres pulsados en esta escala de tiempos, ha permitido por primera vez observar y controlar reacciones químicas en tiempo real.

Por otra parte, las altas intensidades de luz que pueden generar, han dado lugar a un sinnúmero de nuevos e interesantes fenómenos en la interacción de la luz con la materia, como los procesos no lineales. La intensidad de los láseres continúa aumentando cada año, y con cada nuevo hito se abre prácticamente una nueva rama de la física. La *Física al límite* que exploran los llamados láseres *ultraintensos* se verá en el Cap. 11.

En este capítulo detallaremos aquellas aplicaciones científicas donde el láser es la herramienta principal o cuyo uso ha significado un avance trascendental. A lo largo del capítulo mostraremos cómo el láser ayuda a estudiar los componentes elementales de la materia mediante la espectroscopía, y permite observar reacciones químicas en tiempo real a través de la femtoquímica. Veremos también cómo el láser puede utilizarse para enfriar y atrapar átomos, proporcionando una perspectiva única sobre el mundo cuántico, y cómo un láser puede convertirse en el reloj más preciso del mundo.

## 9.2. Óptica no lineal y generación de nuevas frecuencias

La luz es un campo electromagnético oscilante que ejerce una fuerza sobre una carga eléctrica. Cuando un haz de luz incide sobre un material transparente, los electrones que éste contiene responden a dicha fuerza desplazándose respecto a los núcleos, por lo que el átomo adquiere una distribución de carga asimétrica y se dice que el material se *polariza*. Esta polarización genera a su vez otro campo electromagnético que es precisamente el campo de la luz al transmitirse por el material. De manera general, la polarización del medio depende linealmente del campo eléctrico a través de una constante llamada susceptibilidad eléctrica<sup>3</sup>:

$$P \sim \chi E$$

La susceptibilidad eléctrica  $\chi$  es una cantidad muy importante ya que define las propiedades ópticas de un medio, tales como su índice de refracción. Sin embargo, cuando la intensidad de la luz es suficientemente alta, la susceptibilidad eléctrica, y con ella el índice de refracción, dejan de ser constantes y comienzan a depender de la intensidad. Entonces, la polarización del medio depende del campo eléctrico de una manera no lineal, es decir, con el cuadrado, el cubo, etc., del campo eléctrico:

$$P \sim \chi^{(1)} E + \chi^{(2)} E^2 + \chi^{(3)} E^3 + \dots$$

La respuesta no lineal de un medio da lugar a nuevas y fascinantes propiedades que han generado una nueva disciplina llamada óptica no lineal. Algunos de los fenómenos no lineales más interesantes son la generación de armónicos y la mezcla de dos o más ondas. La generación de armónicos produce luz cuya frecuencia es un múltiplo de la frecuencia incidente, y el mezclado de ondas da lugar a radiación cuya frecuencia es una combinación de las frecuencias de los haces incidentes. Debido a la alta intensidad de luz necesaria para observar estos fenómenos, el desarrollo de la óptica no lineal no ha sido posible hasta la introducción del láser en los laboratorios. Además, el

3 En materiales anisótropos, como ciertos cristales, las propiedades ópticas dependen de la dirección de propagación de la luz y la susceptibilidad se representa mediante un tensor. Esta anisotropía óptica da lugar a fenómenos como la birrefringencia.

descubrimiento de materiales con una alta respuesta no lineal, como el BBO ( $\text{BaB}_2\text{O}_4$ ) y el KDP ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ), ha hecho que estos fenómenos se apliquen rutinariamente en la creación de nuevas fuentes de luz láser, multiplicando así sus aplicaciones.

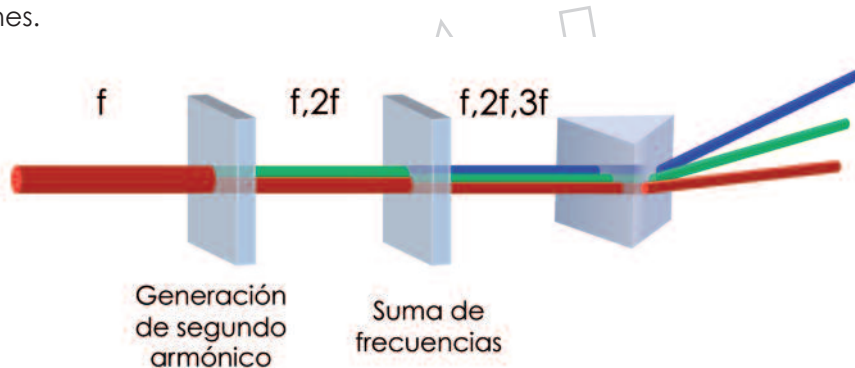


Figura 9.1. Generación del tercer armónico. Un primer cristal no lineal genera el segundo armónico de la frecuencia  $f$ , y un segundo cristal genera el tercer armónico por suma de frecuencias  $f + 2f$ . De esta manera, a partir de un solo láser infrarrojo puede obtenerse luz láser en el visible y el ultravioleta.

### 9.3. Cómo está formada la materia. Espectroscopía láser

Como vimos en el Cap. 1, cuando la luz emitida por una bombilla se dispersa en un prisma o en una red de difracción, se puede observar que la luz está compuesta por un continuo de colores. Sin embargo, el espectro de un gas incandescente consiste en un conjunto discreto de colores o líneas de emisión.

Una línea de emisión de frecuencia  $f$  se produce cuando un electrón realiza una transición entre dos estados con una diferencia de energía  $\Delta E = hf$ . Por tanto, el hecho de que los espectros de átomos y moléculas sean discretos es una manifestación de la naturaleza cuántica de la materia, es decir, se debe al hecho de que los electrones solamente pueden ocupar determinados niveles de energía, tal y como se explicó en el Cap. 2. Estos niveles de energía, y por consiguiente el espectro, son característicos de cada sustancia. Por ello, la espectroscopía es una poderosa herramienta analítica y es nuestro mejor instrumento para investigar cómo están formados los átomos y moléculas de nuestro universo.

La espectroscopía proporciona información sobre la estructura de los átomos y moléculas, la distribución de electrones en los mismos, el tiempo de vida de los estados excitados, y la interacción de los átomos y moléculas con otras partículas o con campos electromagnéticos externos. Por si esto fuera poco, nuestras teorías más precisas acerca de cómo está constituida la materia provienen de la necesidad de explicar esas observaciones. La increíble precisión de las medidas espectroscópicas actuales es la prueba última de la validez de

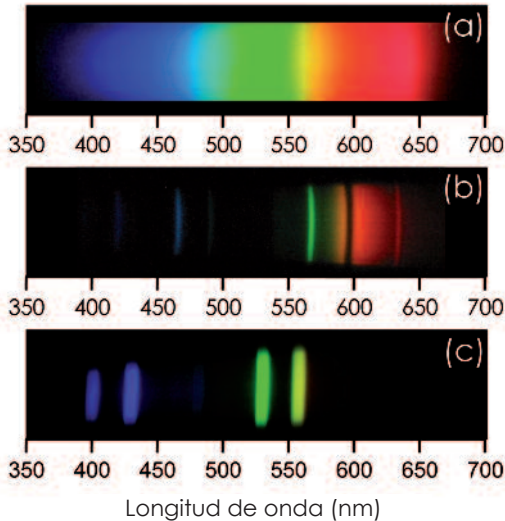


Figura 9.2. Espectros de emisión. (a) Bombilla de filamento incandescente; (b) Lámpara de sodio de alta presión; (c) Lámpara de mercurio. Estos espectros han sido tomados con el montaje casero que se describe en el Anexo II.

spectral, depende, entre otras cosas, de la temperatura del gas emisor a través del efecto Doppler.

En un gas a alta temperatura los átomos están en continuo movimiento, de modo que la emisión de los átomos que se mueven en dirección al observador se percibe a una frecuencia ligeramente superior a la de los que se mueven en la dirección opuesta, dando lugar a una línea espectral con una cierta anchura respecto a la frecuencia central o frecuencia de emisión del átomo en reposo. Este ensanchamiento Doppler puede enmascarar detalles del espectro que son importantes para comprender la estructura de la materia. Por tanto, al hacer medidas espectroscópicas resulta esencial distinguir los efectos que proceden de las condiciones del sistema, como la presión y la temperatura, de los que son propios de la estructura de los átomos y moléculas.

Los láseres sintonizables de colorante, introducidos en los años setenta, supusieron una gran revolución en la espectroscopía, ya que con una anchura de banda de emisión muy pequeña de apenas unas décimas de gigahertzio<sup>4</sup> permitieron acceder por primera vez a la estructura fina del espectro del hidrógeno que quedaba oculta bajo el ensanchamiento Doppler. La estructura fina

estas teorías y la fuente más precisa de los valores de constantes universales como la velocidad de la luz, la constante de Planck o la masa de los electrones y protones. Asimismo, la espectroscopía nos ayuda a averiguar de qué están hechas las estrellas y cómo ha evolucionado nuestro universo.

La espectroscopía ha sido además numerosas veces el motor en la búsqueda de teorías cada vez más completas de las interacciones básicas de la materia. El átomo de hidrógeno en particular ha sido el campo de prueba para desarrollar la Mecánica Cuántica.

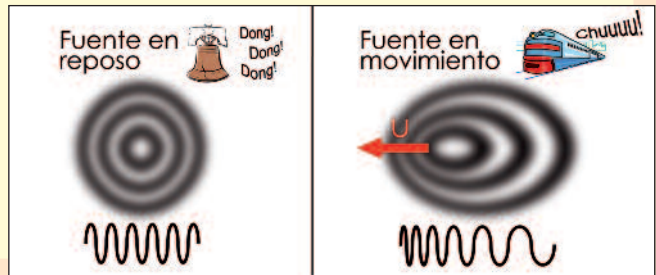
Cada línea de emisión atómica tiene por lo general una cierta anchura en frecuencias, es decir, no se emite en una única frecuencia  $f$  sino en un pequeño intervalo  $\Delta f$ . El tamaño de este intervalo, o anchura espectral,

4 El ensanchamiento Doppler correspondiente a un gas de hidrógeno a temperatura ambiente es de unos 8 gigahertzios.

## ¡esto te interesa!

### Efecto Doppler

Cuando una fuente emisora de ondas de una cierta frecuencia se mueve respecto a un observador, éste percibe las ondas con una frecuencia distinta. Si la fuente se mueve en dirección al observador, éste medirá una frecuencia más alta que si la fuente no se moviera, mientras que si la fuente se aleja del observador la frecuencia medida será más baja. Este es el llamado efecto Doppler, y es el motivo por el que la bocina de un coche que se acerca hacia nosotros nos parece más aguda que cuando se aleja. El mismo efecto ocurre con ondas luminosas. Cuando la velocidad relativa entre la fuente de emisión y el observador,  $v$ , es baja respecto a la velocidad de propagación de las ondas,  $c$ , la frecuencia percibida puede calcularse como  $f = f_0(1 + v/c)$ , donde  $f_0$  es la frecuencia de emisión de la fuente en reposo.



del espectro es esencial para comprobar teorías fundamentales de la física como la Electrodinámica Cuántica.

A continuación veremos otras técnicas espectroscópicas con las que el láser ha generado una auténtica revolución: la espectroscopía multifotónica y la espectroscopía Raman.

#### Espectroscopía multifotónica

En el Cap. 2 vimos que un sistema cuántico, como un átomo, con dos niveles energéticos (nivel 1 y nivel 2) separados por una cierta energía  $\Delta E$ , puede absorber fotones de frecuencia  $f$  cuando se cumple la igualdad  $\Delta E = hf$ , siendo  $h$  la constante de Planck. La absorción de un fotón produce una transición del nivel 1 al nivel 2, tras la cual el átomo excitado vuelve espontáneamente al nivel inferior emitiendo otro fotón de la misma frecuencia  $f$ . Si bien éste es el proceso *normal*, puede ocurrir también que el sistema absorba dos fotones con frecuencia  $f/2$ , excitándolo igualmente al nivel 2, del cual decaerá emitiendo un fotón de frecuencia  $f$  (ver Fig. 9.3.). Igualmente se puede producir la absorción de tres, cuatro o más fotones —siempre que su suma de energías sea  $hf$ — todos ellos dando lugar a la posterior emisión espontánea de un fotón de frecuencia  $f$ . Sin embargo, cuanto mayor es el número de fotones, más baja es la probabilidad de que ocurra el proceso. Por ejemplo, es como la probabilidad de en-

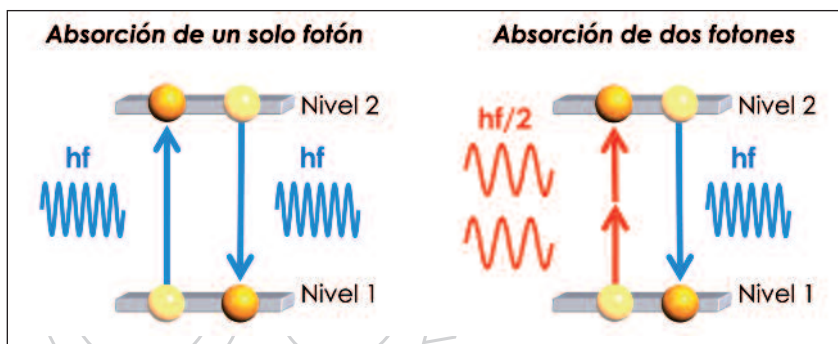


Figura 9.3. Absorción y emisión de fotones.

contrarse casualmente con un amigo por la calle. La probabilidad de encontrarse con dos amigos en el mismo día es más baja, y con tres, más baja todavía. Por ello, la única posibilidad de observar absorción multifotónica es poniendo muchos fotones, es decir, utilizando láseres de alta intensidad. Precisamente, la absorción de  $n$  fotones de baja frecuencia  $f$  seguida de la emisión de un fotón de frecuencia  $n \cdot f$ , es la generación de armónicos de la que hemos hablado antes. Los fenómenos de excitación e ionización multifotónica multiplican las aplicaciones de las técnicas de espectroscopía láser.

### Espectroscopía Raman

Un haz de luz suficientemente intenso puede inducir vibraciones en las moléculas del medio que ilumina. Las frecuencias de estas vibraciones también están cuantizadas, de modo que el espectro de la luz dispersada por el medio muestra, además de la frecuencia de la luz de excitación, una serie de líneas adicionales, desplazadas en frecuencia respecto a ésta, que corresponden a una transferencia de energía de la luz a los diversos modos de vibración del medio. Los modos de vibración son particulares de cada medio por lo que la medida de estas líneas desplazadas constituye una poderosa herramienta analítica llamada espectroscopía Raman. El efecto fue observado por primera vez por el físico indio Sir Chandrasekhara Venkata Raman en 1928 utilizando para ello luz convencional. Este descubrimiento le valió a Raman el Premio Nobel de Física en 1930. Sin embargo, la debilidad del efecto no permitió su desarrollo como técnica analítica hasta la introducción del láser en los laboratorios a mediados de los años sesenta. Actualmente la espectroscopía Raman se utiliza extensivamente en Química, Bioquímica y ciencia de materiales.

### 9.4. Femtoquímica

Como ya hemos dicho, los reajustes moleculares que tienen lugar durante una reacción química son extraordinariamente rápidos. Por ejemplo, el tiempo

que tarda una molécula en romperse tras absorber la cantidad suficiente de energía (disociación molecular) es típicamente del orden de decenas o centenares de femtosegundos. Ser capaces de observar y manipular la dinámica de las moléculas en tiempo real significa tener el control último sobre las reacciones que conforman la materia de nuestro entorno, incluyendo los seres vivos. Pero para ello es necesario disponer de instrumentos que sean tan rápidos como los procesos que se pretenden medir y controlar. Como vimos en el Cap. 5, la técnica de *mode-locking* permite generar pulsos láser con una duración de unos pocos femtosegundos, siendo por tanto la herramienta ideal para esta tarea.

La aplicación de los láseres de femtosegundos a la química ha dado lugar a una nueva disciplina llamada femtoquímica, que ha supuesto una revolución en la ciencia moderna.

En un experimento típico de femtoquímica se utilizan dos pulsos de femtosegundos en una configuración de bombeo y prueba, es decir, un primer pulso induce el proceso que se pretende medir y un segundo pulso, convenientemente retrasado respecto al primero, realiza la *medida*. El retraso entre los dos pulsos se puede controlar haciendo que recorran caminos distintos antes de incidir sobre la muestra. Teniendo en cuenta que la velocidad de la luz es de  $0,3 \mu\text{m}/\text{fs}$ , una diferencia de  $1 \mu\text{m}$  en la distancia recorrida da lugar a un retraso relativo de  $3,3 \text{ fs}$  entre ambos pulsos. El proceso a medir suele ser una fotodisociación molecular, es decir, la ruptura de los enlaces de una molécula por fotones de suficiente energía. En ese caso la *medida* que realiza el pulso de prueba

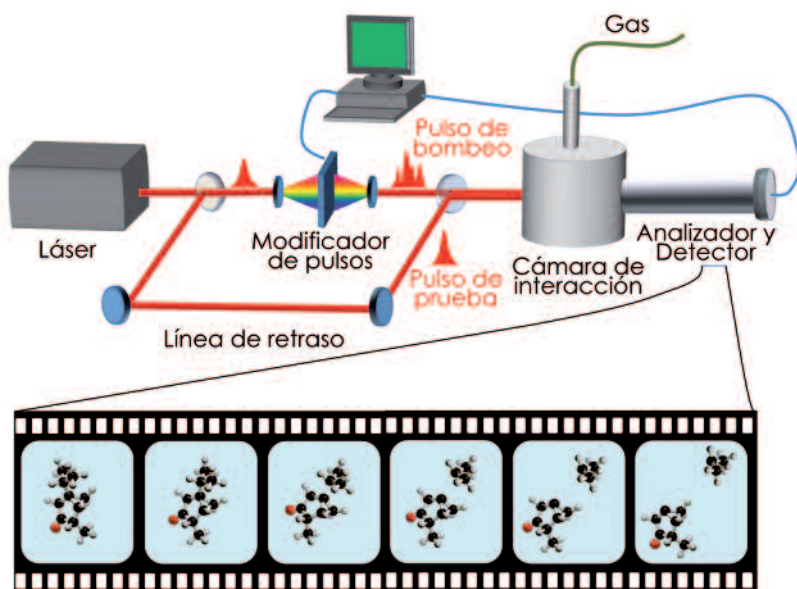


Figura 9.4. Montaje típico de un experimento de femtoquímica.

es la detección de los fragmentos de la molécula disociada. Así, observando la cantidad y naturaleza de los fragmentos en función del retraso entre los dos pulsos, se obtiene una película del proceso de fotodisociación, donde cada *fotograma* tiene una duración de unos pocos femtosegundos, determinada por la duración de los pulsos láser.

En sistemas complejos se pueden introducir pulsos láser adicionales, debidamente sincronizados, para controlar procesos intermedios en la excitación de la molécula como por ejemplo, para optimizar la producción de un determinado fragmento. Otra manera de controlar el resultado de las reacciones es modificando la propia estructura del pulso de bombeo. Ciertos dispositivos electro-ópticos y acusto-ópticos permiten variar la amplitud y la fase de cada componente espectral del pulso láser, lo que varía también su perfil de intensidad en función del tiempo. Acoplando estos dispositivos de control de pulsos con el detector de los productos de reacción se puede implementar un programa informático que, de manera cíclica, modifique los pulsos en función de los productos de reacción detectados. De este modo se puede llegar a la forma de pulso láser que optimice la producción de una determinada especie molecular.

### 9.5. Láseres para medir el tiempo. Peines de frecuencias

El láser también puede resultar una herramienta muy útil para medir tiempos y frecuencias. Puesto que la luz láser tiene una frecuencia muy bien definida, ésta puede utilizarse como un cronómetro para referenciar eventos. Esta es la idea en la que se basan los llamados peines de frecuencias ópticas, que permiten medir intervalos de tiempo con una precisión sin precedentes.

Los láseres que emiten una onda continua son monocromáticos, lo que significa que emiten básicamente a una sola frecuencia bien definida y las oscilaciones del campo eléctrico se suceden idénticas a un ritmo invariable. Por el contrario, los láseres pulsados emiten en una banda ancha de frecuencias centradas en la *frecuencia de la onda portadora*. La anchura espectral de un pulso aislado es inversamente proporcional a la duración del pulso. Los láseres que utilizan la técnica de *mode-locking* (ver el Cap. 5) generan trenes de pulsos de unos pocos femtosegundos con una tasa de repetición muy elevada (del orden de un gigahertzio). Su espectro de emisión consiste en una colección de líneas espectrales, denominada *peine de frecuencias*, cuya separación corresponde a la tasa de repetición del tren y que se extiende sobre el amplio rango espectral que determina la duración de cada pulso.

Todos los pulsos de los láseres en *mode-locking* tienen la misma envolvente, pero se diferencian en la posición de la onda portadora respecto a su envolvente (ver CEP en el Cap. 5). Esta fase cambia de pulso a pulso y determina la frecuencia absoluta de las *púas* del peine (la fase relativa viene dada por la tasa de repetición del tren de pulsos).



El peine de frecuencias es una referencia perfecta para medir frecuencias ópticas con gran precisión, es como tener una regla de medir con las marcas muy juntas, el único problema reside en establecer el origen de la regla. La variación de la fase relativa entre la envolvente y la portadora hace que el origen de la regla varíe constantemente, sin embargo actualmente se conocen métodos para medirla y estabilizarla.

Hoy en día los peines de frecuencias son ampliamente utilizados en metrología con una precisión comparable a

los relojes atómicos y es de esperar que, como suele ocurrir al medir fenómenos con mayor precisión, den lugar a nuevos descubrimientos.

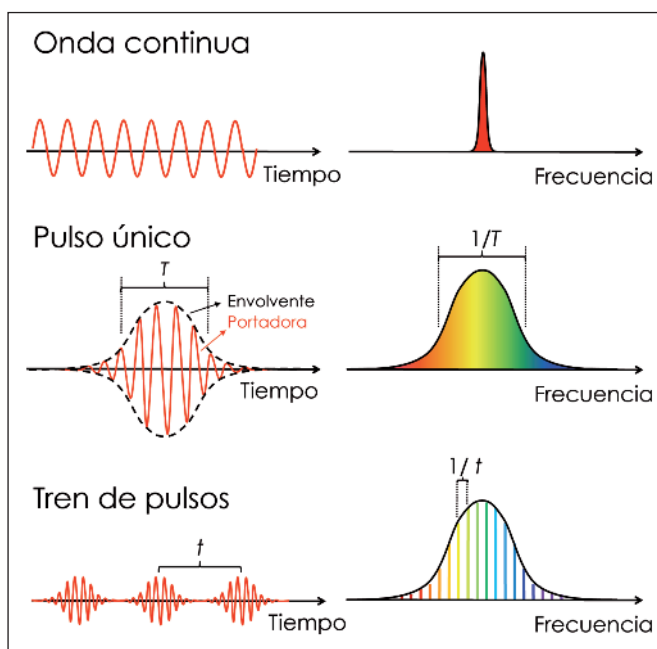


Figura 9.5. Peine de frecuencia generado por un tren de pulsos láser.

## 9.6. Láseres para enfriar

Puede parecer sorprendente que el láser, que es básicamente una concentración de energía luminosa capaz de calentar y vaporizar materiales, se pueda utilizar también para enfriar.

La temperatura de un material es directamente proporcional a la energía cinética de los átomos y moléculas que lo componen y, por tanto, a su masa y al cuadrado de su velocidad. Si fuéramos capaces de frenar estas partículas hasta dejarlas paradas estaríamos enfriando el material hasta la mínima temperatura posible que es el cero absoluto ( $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). A temperaturas cercanas al cero absoluto la materia se comporta de una manera sumamente extraña, mostrando su naturaleza cuántica de una manera sorprendente. Es por ello que la física de bajas temperaturas ha venido estimulando la curiosidad de los científicos desde el descubrimiento de la superconductividad por Kamerlingh Onnes en 1911.

Los iones y electrones pueden acelerarse y frenarse con gran precisión utilizando campos electromagnéticos ya que la carga eléctrica es sensible a estos campos. Sin embargo la manipulación de partículas neutras, como los átomos

de un gas, es mucho más difícil. Esto es justamente lo que ha conseguido la tecnología láser: frenando y atrapando los átomos de un gas, los láseres han permitido romper todos los récords de baja temperatura produciendo descubrimientos espectaculares.

La revolución del enfriamiento láser se produjo a través de una idea que propusieron Arthur L. Schawlow y Theodor W. Hänsch en 1975. Como ya hemos visto, los fotones además de energía poseen un momento capaz de ejercer un impulso sobre las partículas contra las que chocan y, gracias a la monocromaticidad del láser, el momento de sus fotones tiene un valor bien definido a través de la relación de de Broglie ( $p = h/\lambda$ ). Un átomo puede absorber y emitir fotones del láser, de manera que por cada fotón que el átomo absorbe debe emitir uno. Los fotones absorbidos *empujan* al átomo siempre en la dirección de propagación del láser, sin embargo los fotones emitidos no tienen direcciones preferentes por lo que en promedio no ejercen una fuerza sobre el átomo. El efecto neto es que el átomo siente una fuerza en la dirección en la que se propaga el láser pero, ¿cómo podemos lograr que el átomo se pare?

La solución se basa en el efecto Doppler, utilizando dos láseres contrapropagantes —se propagan en sentidos opuestos— con una frecuencia un poco por debajo de la de absorción (ver la Fig. 9.6). Si el átomo se mueve en dirección contraria al haz láser, debido al efecto Doppler, éste verá la luz con una frecuencia más alta, absorberá eficientemente el fotón y se detendrá. Si el átomo está en reposo o viaja en dirección contraria al haz verá una frecuencia insuficiente para la transición electrónica y no habrá absorción. El efecto combinado de los dos haces es una fuerza que se opone al movimiento del átomo. Al usar láseres contrapropagantes en los tres ejes, es posible frenar los átomos en el espacio hasta prácticamente pararlos. Esta fuerza es parecida a la viscosidad ya que depende de la velocidad de los átomos. Así, los átomos quedan atrapados en el punto de intersección de los haces láser como si fueran una mosca en un tarro de miel. Por este motivo a esta técnica se le llama *melaza óptica*.

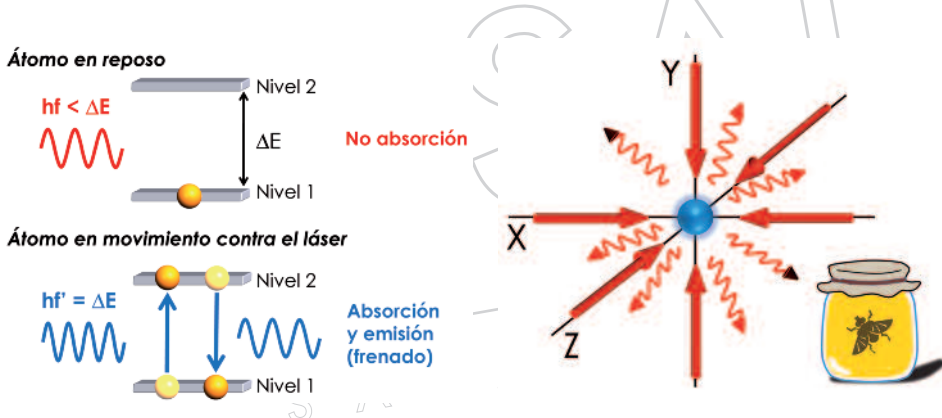


Figura 9.6. Enfriamiento láser por efecto Doppler y melaza óptica. Los láseres dejan un pequeño grupo de átomos atrapados como una mosca en un tarro de miel.

La *melaza óptica* proporcionó el primer paso para enfriar átomos de forma eficiente. Una de las grandes consecuencias de esta revolución fue la observación de los llamados condensados de Bose-Einstein, grupos de átomos tan fríos que se comportan de una forma muy especial como una sola onda coherente de materia.

### 9.7. Nuevas fronteras de la información cuántica con láseres

La Mecánica Cuántica que gobierna los átomos, moléculas y partículas subatómicas está llena de extrañas propiedades como el *entrelazamiento*<sup>5</sup> o la *coherencia cuántica*<sup>6</sup> (no confundir con la coherencia óptica que vimos en el Cap. 2). La posibilidad de controlar estas propiedades, lo que se llama *información cuántica*, ofrece unas perspectivas fascinantes para la tecnología como, por ejemplo, la construcción de computadores cuánticos, con una capacidad de proceso de datos mucho mayor que la de los ordenadores actuales, o el *teletransporte* de información.

Los láseres han abierto la posibilidad de investigar estas extrañas propiedades por su capacidad para controlar los sistemas a nivel cuántico. Por ejemplo, en una red de átomos inmovilizados por una trampa, cada átomo se encuentra en un estado de energía. Estos estados de energía actúan como bits de información cuántica o *qbits* de manera similar a los circuitos que, estando abiertos o cerrados, constituyen los bits de información en los ordenadores y calculadoras convencionales. Un láser puede manipular y *leer* el estado de energía de cada átomo, procesando así la información cuántica como en un ordenador. De esta manera se ha conseguido producir entrelazamiento y realizar sencillas operaciones lógicas en trampas de iones.

Aún queda mucho camino por recorrer hasta que veamos computadores cuánticos sobre nuestras mesas de trabajo, pero hoy en día se utiliza criptografía cuántica implementada mediante láseres para establecer canales de comunicación seguros, por ejemplo, entre bancos de distintas partes del mundo.

- 5 El entrelazamiento (*entanglement* en inglés) es una extraña propiedad que aparece únicamente en el mundo cuántico que impide que ciertos estados de un sistema de dos o más partículas pueda expresarse en términos de estados de las partículas individuales. En estos estados existe una conexión entre partículas que no está relacionada con ninguna fuerza y por tanto no está sujeta a la ley que impide la transmisión de información a velocidades mayores que la de la luz.
- 6 La coherencia cuántica es otra extraña propiedad de la Mecánica Cuántica por la que una partícula puede encontrarse a la vez en varios estados (de energía, momento angular, etc.) Estas superposiciones de estados se rompen cuando el sistema interacciona con el entorno, en un proceso llamado decoherencia. La decoherencia es el motivo por el que las superposiciones cuánticas no se observan en el mundo macroscópico o clásico.

## 9.8. Láseres en biología – Tijeras y pinzas láser

Las investigaciones biológicas tampoco han sido ajenas a la revolución iniciada por el láser. El mayor atractivo de los láseres desde el punto de vista de la Biología es su capacidad para concentrarse en un punto extremadamente pequeño, como hemos visto en capítulos anteriores.

Gracias a la capacidad de concentración de la luz láser, es posible manipular y alterar corpúsculos de hasta 0,25 micras de diámetro, es decir, unas 400 veces más pequeñas que el grosor de un pelo humano.

Así, utilizando pulsos cortos de alta intensidad se ha demostrado que es posible utilizar el haz láser como unas *microtijeras* para, por ejemplo, cortar cromosomas en el interior de una célula, activar o desactivar genes, o realizar incisiones en la membrana celular para introducir moléculas en su interior. Además de la gran precisión de los láseres, éstos tienen la ventaja de ser selectivos, es decir, pueden manipular orgánulos intracelulares sin afectar a su entorno.

Otra aplicación sorprendente de los láseres en microbiología es su uso como *pinzas* para sujetar y desplazar objetos. Un haz que opera en continuo y de baja potencia es capaz de atrapar ópticamente bacterias y protozoos uno a uno, así como células enteras y sus orgánulos. Esta aplicación se basa en el

momento, o impulso, que poseen los fotones del haz láser. Aunque este momento es minúsculo, es suficiente para ejercer una fuerza apreciable sobre objetos tan pequeños como las células, tirando de ellas en la dirección del láser incidente. Una vez sujeta la célula, tan solo hay que desplazar el haz para arrastrarla hasta el lugar deseado.

Combinando las pinzas y microtijeras con las técnicas de microscopía láser que se vieron en el Cap. 9, hoy en día es posible realizar *operaciones quirúrgicas* sobre una célula individual.

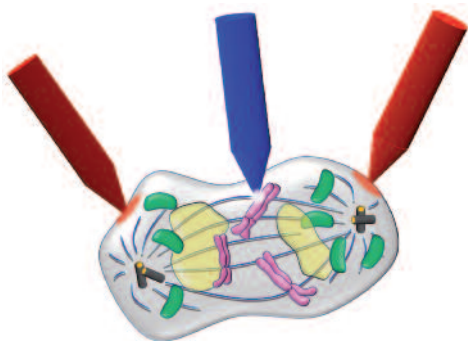


Figura 9.7. Pinzas y tijeras láser manipulando una célula viva.

### Para saber más

*Nonlinear optics*, Robert W. Boyd, Second edition, Academic press, 2003.

*Laser Spectroscopy*, W. Demtröder, 3<sup>rd</sup> Ed. Springer, 2003.

*Time Measurement at the Millennium*, James C. Bergquist, Steven R. Jefferts and David J. Wineland, *Physics Today* 54, 37-42, 2001.

*Ultrafast reaction dynamics*, Martin Gruebele and Ahmed H. Zewail, *Physics Today* 43, 24-33, 1990.

*New frontiers in quantum information with atoms and ions*, J. Ignacio Cirac and Peter Zoller, *Physics Today* 57, 38-44, 2004.

*Laser manipulation of atoms and particles*, Steven Chu, *Science* 253, 861-866, 1991.

FÍSICA AL LÍMITE

10

La idea de construir láseres cada vez más intensos ha sido una constante desde sus inicios. Se sabe que la interacción láser-materia depende de una serie de parámetros entre los que destacan la longitud de onda y la intensidad del láser.

Normalmente uno acostumbra a pensar en la fenomenología que sucede cuando un fotón incide sobre un átomo o una molécula desde el punto de vista einsteniano del efecto fotoeléctrico (ver Cap. 1). Eso es verdad a bajas intensidades. Sin embargo, cuando la intensidad es muy alta, ¿qué pasa si dos fotones inciden a la vez sobre un átomo? y, sobre todo, ¿qué pasa si miles de fotones inciden de golpe sobre ese mismo átomo? Seguramente, la fenomenología cambiará. Hoy en día es posible hacer que miles de fotones incidan sobre un átomo de golpe (de golpe quiere decir, en este contexto, en pocos femtosegundos).

Este nuevo marco de la física es lo que ahora se denomina óptica extrema y será el objeto del presente capítulo. Para esto lo hemos dividido en dos partes. La primera parte trata de cómo se pueden generar fuentes de luz tan intensas. La segunda parte trata de la nueva fenomenología que aparece cuando la materia interacciona con láseres muy intensos.

El objetivo de este capítulo es dar una idea de que los láseres intensos están abriendo nuevas fronteras de la física. Con las intensidades disponibles en la actualidad surgen aplicaciones que parecían imposibles hace poco más de una década. Desde que emergió la tecnología láser se ha intentado aumentar cada vez más la intensidad de los mismos. De esta manera se idearon los amplificadores láser, sistemas que a partir de un haz láser, ofrecen una salida de mayor potencia.

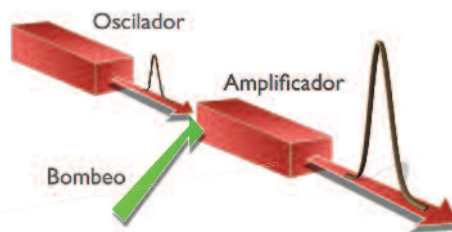
Para precisar un poco más, se suele llamar oscilador al láser que genera los pulsos. Así podemos diferenciarlo de lo que es propiamente el amplificador. En otras palabras, un oscilador amplifica por emisión estimulada un fotón inicial generado por emisión espontánea mientras que en un amplificador hay algo de radiación láser a la entrada que se amplifica por emisión estimulada. Por eso osciladores y amplificadores comparten muchos conceptos.

En la mayoría de láseres que nos interesan ahora, el bombeo procede de otro láser (de pulsos de nanosegundo o continuos). En resumen, un amplificador es semejante a un láser, ya que consiste en un medio activo habitualmente igual al que ha generado la luz inicial, el oscilador.

A base de poner más energía de bombeo, podríamos amplificar más y más, aparentemente sin límite. Pero eso no es así de sencillo. Si amplificamos por encima de una cierta densidad de energía (energía/volumen), sufrimos un deterioro del medio amplificador debido a que superamos su umbral de daño,

que para la mayoría de cristales amplificadores de interés está alrededor de los  $10 \text{ J/cm}^2$ . Este valor es una cifra orientativa que puede variar mucho de un material a otro, pero el umbral de daño es un parámetro intrínseco del material que difícilmente se puede modificar. Así se puede llegar a potencias del orden de gigavatio en muchos materiales. Pero llegar al teravatio exige algún truco para que no se dañe el amplificador.

Figura 10.1. Los elementos esenciales de todo amplificador láser son tres: un oscilador que es el que propiamente genera la luz coherente, un segundo medio que la amplifica por emisión estimulada de radiación y un sistema de bombeo de energía que es el que suministra la energía necesaria para lograr la inversión de población.



### 10.1. Cómo amplificar cada vez más, a base de sistemas gigantes

Los láseres habituales para estas intensidades son láseres de estado sólido. Conforme se tiene más y más intensidad que atraviesa ese cristal se corre el peligro de llegar a dañarlo. Si el umbral de daño del medio amplificador impide ir más lejos, hay una solución tecnológica muy obvia: conseguir un medio activo más grande de forma que la sección transversal del amplificador sea mucho mayor. Eso se hizo hace tres décadas de forma notable.

Habitualmente los cristales del oscilador tienen en torno a un centímetro de diámetro, pero en la búsqueda de pulsos más intensos se empezaron a construir amplificadores próximos al metro de diámetro (habitualmente vidrios dopados con neodimio) y a trabajar con ópticas enormes de acuerdo a estos tamaños. Así empezó la era de los megaláseres, de los cuales el ejemplo más notable probablemente fue el NOVA del Laboratorio Lawrence Livermore en California. NOVA entró en operación en 1985 y superaba ampliamente los 20 teravatios de potencia pico, funcionando en condiciones extremas.

NOVA buscaba la fusión nuclear por confinamiento inercial láser y para eso se necesita mucha energía por pulso, bastando con llegar a pulsos cuya duración sea de nanosegundos. Esta tecnología gigantesca ha evolucionado hacia el NIF (National Ignition Facility) de Livermore, recientemente abierto.

### 10.2. Cómo amplificar cada vez más de forma sencilla

Con NOVA se consideraba bien resuelta la frontera del teravatio, pero a un precio y a un tamaño que asociaba teravatio a gran laboratorio nacional. Así estaban las cosas cuando en el Laboratory for Laser Energetics de la Univer-

sidad de Rochester, en Nueva York, surgió una idea alternativa que iba a revolucionar los amplificadores láser. La idea era muy simple: para evitar el umbral de daño del amplificador, en lugar de abrir el haz en dirección transversal (es decir, pasar a un haz con mayor sección) se puede abrirlo en dirección longitudinal (es decir, pasar a un pulso de mayor duración temporal).

En vez de amplificar los pulsos ultracortos directamente, éstos fueron alargados mediante sistemas ópticos denominados estiradores de pulsos, obteniendo pulsos mucho más largos (100.000 veces o más que la duración original). Para estirar temporalmente un pulso ultracorto se recurre a la dispersión cromática. Como se ha visto anteriormente, los pulsos cortos necesitan de espectros amplios para poder ser producidos y, además, que todas las frecuencias estén en fase, es decir, que viajen a la vez. Cuando esta situación ocurre, el pulso es el menor posible para un cierto contenido espectral. Sin embargo, si las frecuencias no viajan a la vez, el pulso comienza a ser más largo, debido a la dispersión de sus diversas componentes cromáticas (lo que se conoce en inglés como *chirp*; una posible traducción al castellano sería *trino*, dado que la frecuencia de oscilación de la luz durante el pulso no sería constante, sino que variaría, a semejanza de lo que ocurre durante el canto de un ave).

El retardo de unas frecuencias del pulso frente a otras puede obtenerse de varias formas. Por un lado, todo material presenta un mayor o menor grado de dispersión cromática, es decir, la velocidad de la luz propagándose a través de él es diferente en función de su frecuencia. Así, consideremos un pulso ultracorto mínimo que atraviesa un material dispersivo. Contiene luz oscilando a frecuencias diferentes que llegan al material a la vez. Cuando atraviese el medio, comenzará a observarse un retardo entre la luz que oscila a diferentes frecuencias, debido a la diferente velocidad de propagación por el material. Ello provoca un estiramiento temporal del pulso. Otra posibilidad, empleando el mismo concepto de estiramiento por diferencias en la propagación de las diversas frecuencias contenidas en el pulso, consiste en diseñar sistemas ópticos en los que se separen espacialmente las frecuencias (por ejemplo con prismas o redes de difracción). Éstas efectúan recorridos diferentes y luego vuelven a ser recombinadas. El resultado final de estos sistemas siempre ha de ser un fuerte estiramiento del pulso debido al retraso (o adelanto) de sus diversas componentes espectrales

Al aumentar la duración temporal de un pulso inicial un cierto factor, la potencia pico del mismo disminuirá en la misma proporción. Así, se introducirá un ensanchamiento temporal suficiente para que la potencia pico se sitúe bastante por debajo de los umbrales de daño de los elementos del sistema. Estos pulsos estirados pasan entonces por los cristales amplificadores, aumentando su energía hasta los niveles requeridos. Finalmente se deshace el estiramiento de los pulsos mediante un sistema óptico conocido como compresor de pulsos, que en esencia es igual al estirador, con la salvedad de que su efecto es el contrario (las componentes espectrales antes retrasadas son ahora las que llegarían antes, y viceversa), compensando el estiramiento y obteniendo finalmente pul-



sos energéticos y temporalmente muy cortos, lo que lleva a una potencia muy alta. El resultado es una nueva tecnología conocida como *Chirped Pulse Amplification* (CPA) que ha revolucionado la amplificación de los láseres pulsados.

Los elementos clave de un sistema CPA son:

- Oscilador. Es el láser propiamente dicho que genera los pulsos ultracortos.
- Estirador. Es el dispositivo que expande el pulso un factor superior a mil.
- Amplificador/es. Su función es aumentar la energía del pulso, empleando habitualmente el mismo medio activo que el oscilador.
- Compresor. Es un sistema *simétrico* al estirador que recomprime el pulso hasta su duración inicial.

En la Fig. 10.2 se muestra el esquema de un posible estirador de pulsos. Tras el primer prisma, las diferentes frecuencias son separadas espacialmente. El prisma 2 permite que las diversas componentes espectrales se propaguen paralelamente. Los prismas 3 y 4 están dispuestos en forma simétrica a 1 y 2, para volver a recombinar las componentes espectrales. Como resultado global, las frecuencias bajas (rojos) recorren un camino óptico más largo (hay que tener en cuenta que también atraviesan más material de los prismas) que las altas (azules). Por lo tanto, el pulso final será más largo, con las frecuencias más bajas retrasadas con respecto a las más altas. Montajes similares pueden ser empleados para introducir el retardo contrario (compresor). Con redes de difracción se pueden tener efectos similares. Diseñar dos sistemas ópticos, estirador y compresor, con relaciones de dispersión que se compensen exactamente es complejo. Sin una compensación muy fina es imposible recomprimir el pulso a su duración inicial.

Con esta tecnología se puede llegar al teravatio en láseres que ocupan una habitación, posibilitando disponer de ellos en un laboratorio de Universidad o Centro de Investigación sin necesidad de una instalación de grandes dimensiones.

A esa tecnología se le denominó durante su primera década tecnología *Table Top Terawatt* (teravatio encima de una mesa óptica) para remarcar ese carácter de sistema compacto. Esa es una dirección fundamental de trabajo en la actualidad, buscándose continuamente alternativas para tener amplificadores cada vez más potentes y más compactos.

### 10.3. Tecnología CPA actual

Hoy en día la tecnología CPA está bien desarrollada. Los láseres CPA son relativamente compactos y baratos hasta potencias del orden del teravatio, y se considera que los problemas tecnológicos realmente serios empiezan al acercarse a la frontera del petavatio. Los elementos esenciales de un sistema CPA moderno capaz de llegar al petavatio son:

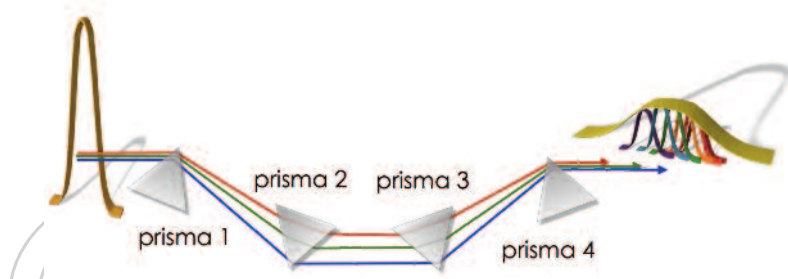


Figura 10.2. Esquema conceptual de un montaje óptico dispersivo que sirve como estirador de pulsos.

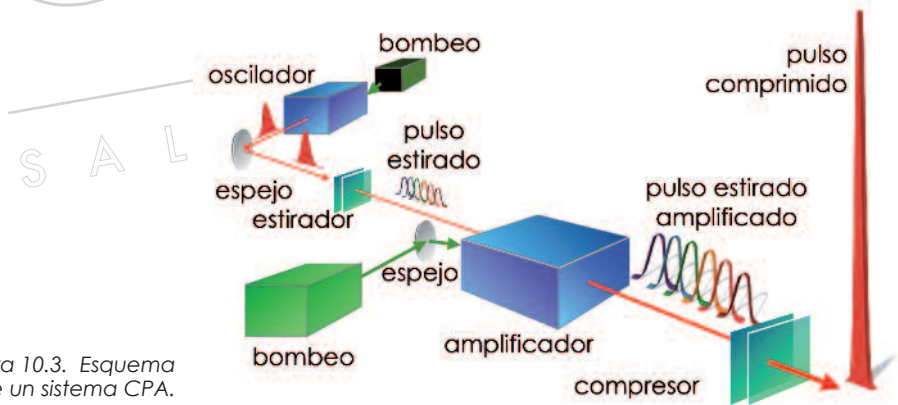


Figura 10.3. Esquema de un sistema CPA.

- **Oscilador.** El oscilador láser más habitual es el de titanio:zafiro con técnicas avanzadas de *mode-locking* (vistas en el Cap. 5). Este cristal permite llegar sin demasiados problemas a pulsos de 10 femtosegundos de duración. Los sistemas de Neodimio:YAG o similares siguen siendo válidos para pulsos de centenares de femtosegundo.
- **Estirador.** Es habitual estirar el pulso hasta una duración del orden del nanosegundo. Esto puede realizarse mediante unas redes de difracción, un sistema de prismas, o mediante sistemas combinados.
- **Amplificador regenerativo.** Al estirar el pulso nos alejamos del umbral de daño del cristal y tenemos margen para amplificarlo. Habitualmente el primer amplificador es del tipo denominado regenerativo. Un amplificador regenerativo es similar a un resonador en el sentido de que el pulso entra en una cavidad, da una serie de vueltas por la cavidad amplificándose poco a poco, y cuando se llega a la amplificación óptima se le hace salir de la cavidad. Evidentemente, dada la alta precisión que todo este proceso requiere, se hace mediante control electrónico.

- **Amplificador multipaso.** Típicamente, cuando se quiere amplificar todavía más se recurre a uno o varios amplificadores multipaso. En este tipo de amplificadores no se tiene una cavidad, sino un sistema de espejos fijos que hacen que el haz láser estirado pase varias veces por el cristal amplificador. Aquí el número de pasos está marcado por la geometría con la que se ha construido el sistema y no se puede ajustar como en el caso de los regenerativos.
- **Compresor.** Una vez inyectada toda la energía al pulso, queda la etapa final que es su recompresión. La única condición es que se emplee un sistema que proporcione una dispersión contraria a la del estirador. Y eso se ha de hacer con mucha precisión. Por ello lo más recomendable es emplear sistemas de redes de difracción complementarios, a fin de compensar la dispersión de la forma lo más precisa posible.

Una vez comprimido, el pulso es tan intenso que difícilmente puede ser manipulado. Aproximadamente, por encima del teravatio —dependiendo del diámetro del haz— el compresor ha de funcionar ya en vacío pues de propagarse en aire introduciría efectos no lineales, es decir el índice del aire dependería de su propia intensidad y alteraría la propagación convirtiéndose en un sistema incontrolable.

Hoy en día, los láseres de teravatio son relativamente compactos y asequibles para un laboratorio universitario. Los láseres de petavatio empiezan a ser considerados para grandes laboratorios nacionales. Algunos países estudian construir láseres de 10 PW y se estima que el techo de la tecnología estará en torno a los 200 PW. Eso serían números enormes si emitiesen en continuo, pero no olvidemos que son láseres pulsados. Para ver lo que representan debemos dar una idea de lo que significa un teravatio. Basta con decir que la potencia eléctrica producida por una central nuclear es del orden del gigavatio, y que el consumo eléctrico mundial es de pocos teravatios. ¿Quiere eso decir que cuando se conecta un láser de teravatio, se ha de parar la red eléctrica mundial para darle servicio? Evidentemente no. Estos láseres funcionan con tasa de repetición de disparo muy bajas, desde algunos disparos por segundo hasta un disparo cada varias horas. Lo que hacen es emitir la energía concentrada en un tiempo extraordinariamente corto, por eso se obtienen altos valores de potencia.

Lo más interesante de la tecnología CPA es que está abriendo paso a aplicaciones que hasta ahora parecían imposibles. La radiación láser está constituida por fotones de baja energía (recordemos que 800 nanómetros de longitud de onda corresponden aproximadamente a fotones de 1,5 eV de energía). Es por ello que procesos a escalas de keV implican energías mucho mayores y se han considerado tradicionalmente fuera del alcance de la tecnología láser. Sin embargo, con los láseres CPA, al alcanzarse densidades de fotones tan grandes es posible tener procesos a cientos, miles, millones de fotones y por ello es posible alcanzar energías de keVs, MeVs, GeVs y quizás TeVs con los láseres.

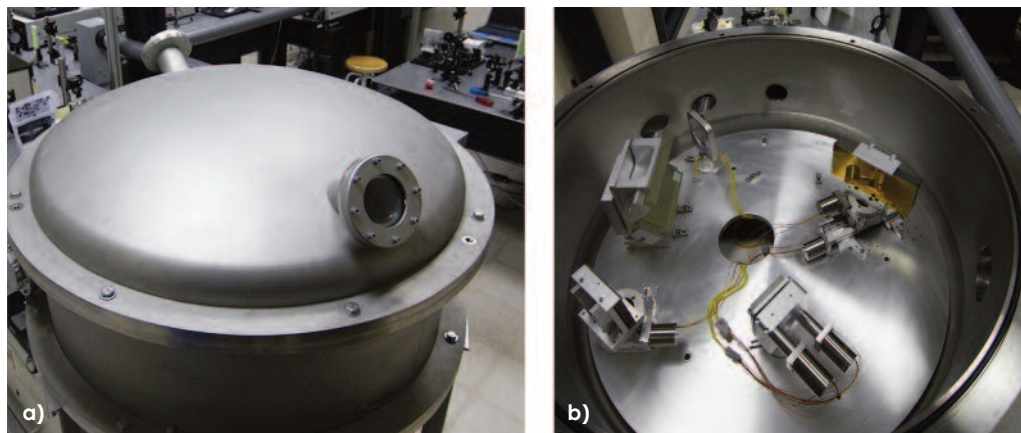


Figura 10.4. En a) se muestra una imagen del compresor de pulsos ubicado en las instalaciones de Salamanca. En b) se muestra el mismo compresor al que se le ha quitado la tapa superior después de suprimir el vacío y donde se pueden apreciar los elementos ópticos. En el ángulo superior derecho está situada la red de difracción (color dorado), alineada con otra red similar. Perpendicularmente están situados dos espejos para guiar el haz.

#### 10.4. Generación de armónicos y Rayos X: la ventana del agua

La forma usual de generar rayos X consiste en acelerar electrones aplicándoles voltajes elevados haciéndoles colisionar sobre una diana metálica, habitualmente de wolframio. El frenado de los electrones al chocar con la diana es tan brusco que, mediante un proceso conocido como *bremstrahlung* (ver Cap. 7, apartado 7.1.4), emiten radiación X con un amplio espectro de fotones (con energías inferiores a su propia energía cinética). Así operan los equipos de rayos X hospitalarios (radiografías, tomografías axiales computerizadas —TACs—) e industriales. Otra forma de obtener rayos X es a través de los sincrotrones, tales como ALBA, instalado recientemente en Barcelona, los cuales generan radiación acelerando partículas mediante campos de radiofrecuencia y magnéticos.

A día de hoy existe otra alternativa para generar rayos X basada en la generación de armónicos de orden alto. Básicamente, este proceso consiste en hacer incidir un pulso láser intenso (intensidad  $> 10^{13}$  W/cm<sup>2</sup>) sobre un gas de átomos (los más adecuados son los gases nobles como He, Ne, Ar) bajo unas condiciones de densidad y presión adecuadas. Este proceso se explica mediante el *modelo de tres pasos* (más conocido por su nombre en inglés *three step model*). En el primer paso los electrones —recordemos que son partículas cargadas— son arrancados del átomo por el campo electromagnético del láser. En un segundo paso, estos mismos electrones se alejan del átomo bajo el efecto del láser adquiriendo velocidad, y por tanto energía cinética, que será tanto más alta cuanto más intenso sea el láser. En la tercera y última etapa, los electrones, que siguen evolucionando bajo el efecto del láser, regresan de

|                |   |
|----------------|---|
| 2 GW           | Potencia pico producida por una central hidroeléctrica grande.  |
| 3 GW           | Aproximadamente es la potencia pico producida por los mayores reactores nucleares.  |
| 18,2 GW        | Potencia de la central hidroeléctrica de la presa de las Tres Gargantas, en China.  |
| 30 GW          | Valor aproximado de la demanda de energía eléctrica media en toda España (2010).  |
| 500 GW         | Aproximadamente la potencia eléctrica media consumida por todos los Estados Unidos (2010).  |
| 2 TW           | Consumo eléctrico total en promedio del mundo (2010).   |
| 4 TW           | Consumo total (gas, electricidad, etc.) de los Estados Unidos (2010).   |
| 15 TW          | Consumo energético total promedio mundial (2010).   |
| <b>20 TW</b>   | Potencia de la fase 1 del CLPU de Salamanca, ya operativo. (actualmente es el láser más potente de España).   |
| 44 TW          | Flujo de calor total procedente del interior de la Tierra.  |
| 50 - 200 TW    | Potencia liberada por un huracán.   |
| <b>200 TW</b>  | Potencia de la fase 2 del CLPU de Salamanca (será el láser más potente de España para el 2011).   |
| <b>1 PW</b>    | Potencia de la fase tres del CLPU de Salamanca (será, para el 2013 posiblemente, uno de los diez más potentes del mundo).   |
| <b>1,25 PW</b> | Potencia alcanzada por el láser del Lawrence Livermore National Laboratory, USA, primero en superar la barrera del PW. Este láser ahora está desmontado y sus componentes clave reutilizados. |
| 1,4 PW         | Potencia de la corriente submarina del Golfo.   |
| 4 PW           | Flujo de calor estimado que transportan la atmósfera terrestre y los océanos del Ecuador a los Polos.   |
| 10 PW          | Potencia esperada de los láseres más intensos en diseño en Francia y Reino Unido.   |
| 174 PW         | Potencia total recibida por la Tierra del Sol.  |
| <b>200 PW</b>  | Límite esperado de la tecnología CPA (posiblemente para el año 2020).   |

Tabla 10.1. Tabla de valores altos de potencia (que no siempre grandes energías) en tecnología láser y en otros campos. Al leer esa tabla no hay que olvidar que potencia es energía dividida por tiempo. Otros valores aquí expuestos, como la potencia recibida del Sol, son valores en continuo.

nuevo al átomo, recombinándose con él (ver Fig.10.5). Al recombinarse, la energía que han adquirido, es emitida en forma de radiación. Al repetirse este proceso dos veces en cada periodo de oscilación del láser, la emisión de radiación contiene frecuencias múltiplos de la frecuencia del láser incidente, llamados armónicos. Así, la radiación obtenida serán fotones que tendrán una frecuencia siempre mayor, y por tanto de mayor energía que los del láser incidente (recuerda que  $E_{\text{Fotón}} = h f_{\text{Láser}}$ ).

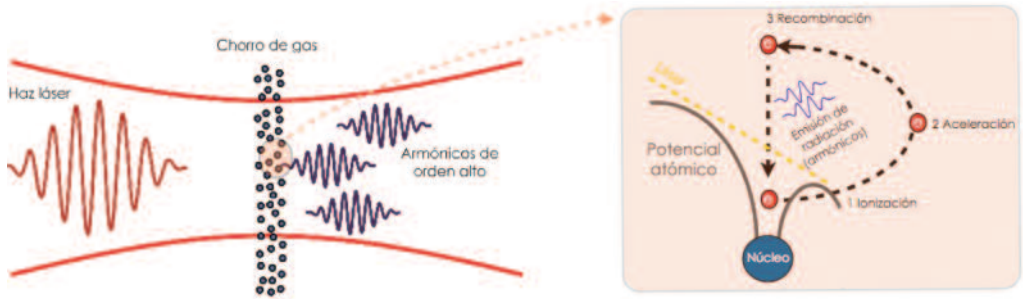


Figura 10.5. Representación esquemática del proceso de generación de armónicos obtenidos al focalizar convenientemente un láser intenso sobre un chorro de gas de átomos. En esta misma figura hemos magnificado la imagen para visualizar mejor la interacción del láser con un átomo individual. En la imagen ampliada se representan las tres etapas que sigue el electrón: ionización por efecto del láser, aceleración y posterior recombinación con el mismo átomo.

Por tanto, utilizando un láser de infrarrojo (típicamente un láser de 800 nm de titanio:zafiro), y vía el proceso explicado anteriormente, se pueden generar fotones en el ultravioleta, rayos X e incluso más energéticos.

La Fig.10.6 representa dos espectros de armónicos obtenidos mediante simulación numérica. En Fig. 10.6.a se muestra un espectro típico de armónicos generados en un gas de Argon. Los picos que se aprecian en esta figura corresponden a los armónicos de la radiación generada. Dependiendo de la naturaleza del gas (propiedades de simetría fundamentalmente) serán armónicos pares o impares. En este caso, como puede verse, son impares. La eficiencia (o intensidad relativa) de estos armónicos decae considerablemente en los primeros de ellos, manteniéndose más o menos constante en una zona denominada *plateau* hasta llegar a una frecuencia de corte donde la eficiencia decrece bruscamente, denominada *cut-off*, a partir de la cual puede considerarse des-

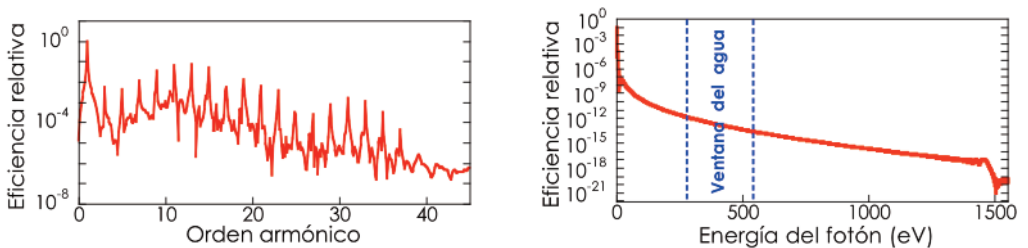


Figura 10.6. Simulaciones numéricas que muestran dos espectros de radiación. a) Espectro de armónicos generado en argon al incidir un láser cuya intensidad es  $1.6 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$ , 800 nm de longitud de onda y unos 15 femtosegundos de duración temporal. En b) hemos representado otro espectro a la misma longitud de onda que en a) pero para un láser mucho más intenso, de  $1,3 \times 10^{16} \text{ W/cm}^2$  y unos 5 femtosegundos de duración. En este segundo caso el espectro está en función de la energía del fotón (ya que,  $E_{\text{Fotón}} = n h f_{\text{Láser}}$ , siendo  $n$  el orden armónico). Los ejes verticales de las dos gráficas están en escala logarítmica, donde la eficiencia está normalizada.

preciable. Por tanto, desde el punto de vista práctico nos interesarán los armónicos situados dentro del *plateau*. En la Fig. 10.6.a la eficiencia se mantiene constante hasta aproximadamente el armónico número 33. La Fig. 10.6.b representa un espectro generado por un láser mucho más intenso y debido a esto, como puede apreciarse, se obtienen fotones de mucha más energía. Se aprecia la extensa zona del *plateau* donde la eficiencia de los armónicos se mantiene más o menos constante, o podríamos decir que decae muy levemente, hasta llegar a la zona de caída abrupta (*cut-off*) en torno a 1.450 eV. En este caso no parecen apreciarse picos en el espectro; debido a que la definición de los armónicos depende de la duración temporal del pulso láser incidente, y en este caso concreto, hemos utilizado un pulso temporalmente más corto (de unos 5 fs) comparado con el utilizado en la Fig. 10.6.a que es de unos 15 fs.

Una de las ventajas adicionales de obtener radiación mediante la generación de armónicos sobre el método convencional, es que esta radiación obtenida es altamente coherente. Además, las instalaciones requeridas, son de un coste considerablemente menor.

Es bien sabido que los rayos X son interesantes para ver en el interior de los objetos porque son capaces de atravesar ciertos espesores de materia. Si la transparencia de todos los materiales que constituyen el objeto a analizar fuese la misma, entonces tampoco servirían de nada. Lo ideal es tener materiales con transparencias muy diferentes, así mientras que uno de ellos es muy opaco, el otro es muy transparente y se tiene una imagen bien nítida (eso es el principio de una radiografía en la que un hueso es muy opaco a esa radiación mientras que el tejido blando es más transparente). A escala de rayos X muy blandos (de muy poca energía) está bien identificada una región en la que el oxígeno y el carbono se comportan de forma diferente, es la zona denominada como ventana del agua pues permite diferenciar las zonas de los tejidos que contienen agua (oxígeno) frente a las que contienen más carbono. Esta región, bien conocida por los investigadores en Biología, queda entre los 4,4 y los 2,3 nanómetros (o en términos energéticos entre 284 y 543 eV) y se caracteriza porque el

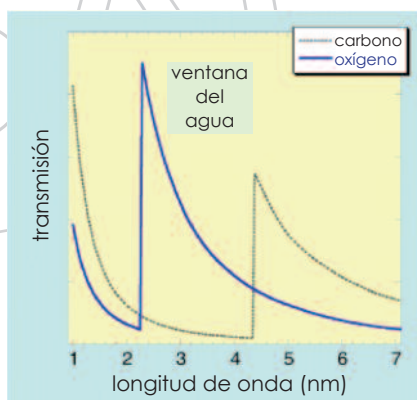


Figura 10.7. La transmisión de los rayos X blandos en la zona entre 2 y 4 nm de longitud de onda es muy diferente para oxígeno y para carbono. Esa banda, denominada ventana del agua, es bien conocida por su interés en Biología. Ahora se puede llegar a tener radiación láser en esa banda a partir de armónicos de orden muy alto.

## ¡esto te interesa!

Actualmente existe la posibilidad de generar pulsos extremadamente cortos del tamaño de attosegundos ( $1 \text{ as} = 10^{-18}$ ). Esto se consigue haciendo un filtrado adecuado del espectro de armónicos como el de la Fig.10.4.b. obteniendo así un pulso muchísimo más corto que el pulso incidente. Una de las posibles aplicaciones de este tipo de pulsos es que constituyen la cámara fotográfica más rápida jamás construida. Recordemos que para fotografiar un evento se necesita un dispositivo fotográfico que ha de ser más rápido que el evento que deseamos fotografiar. Extrapolando esta situación a escala atómica se puede calcular que el tiempo que tarda un electrón en recorrer la primera órbita de Bohr es aproximadamente de unos 150 attosegundos. Es decir si logramos pulsos de un tamaño temporal menor que esta cantidad (y ya se han obtenido en algunos laboratorios) podremos *visualizar* la estructura de átomos, moléculas y también la dinámica de ciertas reacciones químicas. Son innumerables las potenciales aplicaciones que puede tener esta técnica, no sólo en Física Atómica, sino también en Bioquímica, Biología Molecular,...

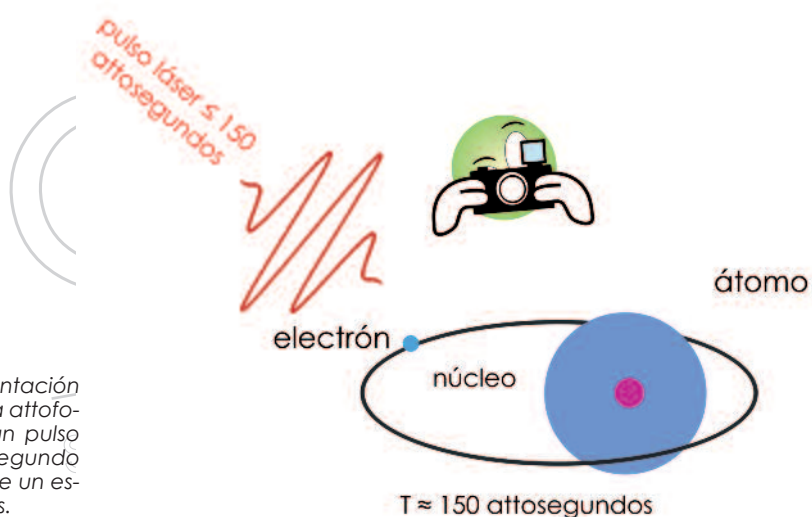


Figura 10.8. Representación esquemática de una attofotografía utilizando un pulso ultracorto de attosegundo sintetizado a partir de un espectro de armónicos.



oxígeno absorbe poco mientras que el carbono absorbe mucho. Así la parte con carbono de los tejidos biológicos será opaca y la parte con agua transparente, lo que explica su gran interés. Lo novedoso de los láseres es que actualmente es posible generar armónicos suficientemente altos como para llegar a tener radiación coherente en la ventana del agua (como se indica en la Fig. 10.6.b.).

### 10.5. Aceleración láser: Óptica relativista

La forma más sencilla de acelerar una partícula cargada es mediante una diferencia de potencial eléctrico. En electrostática se consiguen diferencias de potencial de un megavoltio sin grandes dificultades. Eso significa que una partícula cargada de carga unidad (un protón o un electrón) puede adquirir una energía de un MeV. Rebasar esa energía con medios electrostáticos es complicado y por ello se recurre a campos oscilantes en radiofrecuencia. La tecnología de los aceleradores consolidada, hoy en día, en un rango de energías muy amplio. Existen sistemas comerciales de decenas o centenares de keV, como los rayos X utilizados en medicina o en radiografía industrial, y existen sistemas muy sofisticados como los empleados en el CERN que llegan hasta los TeV. En los aceleradores actuales sólo se consiguen aceleraciones de hasta 100 MeV por metro. Por eso para llegar al GeV o al TeV se requieren aceleradores de grandes dimensiones. Actualmente los láseres están definiendo un nuevo paradigma en aceleración con potencialidad para superar el TeV por metro o, aún mejor para reducir el tamaño de los aceleradores. Los láseres permiten obtener campos eléctricos y magnéticos muy altos y eso está permitiendo una capacidad de aceleración nunca antes conseguida. Vamos a explicar cómo funciona.

Primero tenemos que entender cómo se acelera una carga aislada en presencia de una onda electromagnética. La dinámica de una partícula está gobernada por la segunda ley de Newton, que nos dice que la fuerza es igual a la masa por la aceleración,  $\mathbf{F} = m \mathbf{a}$ , donde  $\mathbf{F}$  es la fuerza,  $m$  es la masa de la partícula cargada y  $\mathbf{a}$  es su aceleración. Sin embargo, para llegar a altas velocidades se ha de pasar a la versión relativista de esta ecuación, que dice que la fuerza es igual a la variación temporal de la cantidad de movimiento y que se expresa así,

$$\mathbf{F} = \frac{d\mathbf{p}}{dt} \quad \text{y se traduce en} \quad q \left( \mathbf{E} + \frac{\mathbf{v}}{c} \times \mathbf{B} \right) = \frac{d(m\gamma\mathbf{v})}{dt}$$

Puesto que la fuerza es ahora la fuerza de Lorentz,  $\mathbf{F} = q (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B} / c)$  y la cantidad de movimiento es  $\mathbf{p} = m\gamma\mathbf{v}$  (observa que la cantidad de movimiento en relatividad es masa por velocidad como en mecánica clásica pero ha de ir multiplicado además por el coeficiente relativista  $\gamma$ ), siendo  $m$  la masa de la par-

| Intensidad (W/cm <sup>2</sup> ) | Amplitud de campo eléctrico (V/cm) | Amplitud de campo magnético (Tesla) |  |
|---------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|--|
| $5,3 \times 10^{-4}$            | 2                                  | $6,66 \times 10^{-7}$               | Valor aproximado del campo eléctrico atmosférico en Salamanca (800 m de altitud).                  |
| 11,47                           | 93                                 | $3,1 \times 10^{-5}$                | Valor aproximado del campo magnético terrestre en el Ecuador.                                      |
| 325                             | 495                                | $1,65 \times 10^{-4}$               | Intensidad típica de un láser utilizado en depilación.   |
| $2,7 \times 10^{10}$            | $4,5 \times 10^6$                  | 1.5                                 | Campo magnético de un equipo hospitalario de Resonancia Magnética Nuclear.                         |
| $1,9 \times 10^{11}$            | $1,2 \times 10^7$                  | 4                                   | Campo magnético creado en el detector CMS (Compact Muon Solenoid) del LHC.                         |
| $1,2 \times 10^{14}$            | $3 \times 10^8$                    | 100                                 | Campo magnético creado en una estrella enana blanca.   |
| $3,5 \times 10^{16}$            | $5,14 \times 10^9$                 | $1,71 \times 10^3$                  | Unidad atómica de campo eléctrico (campo creado por un protón a la distancia de un radio de Bohr). |
| $10^{23}$                       | $8,6 \times 10^{12}$               | $2,86 \times 10^6$                  | Máxima intensidad (focalizada) alcanzada con láseres actuales.                                     |
| $1,19 \times 10^{26}$           | $3 \times 10^{14}$                 | $10^8$                              | Campo magnético generado en la superficie de una estrella de neutrones.                            |
| $2,3 \times 10^{29}$            | $1,3 \times 10^{16}$               | $4,33 \times 10^9$                  | Campo crítico de la QED <sup>7</sup> (vacío inestable).  |

Tabla 10.2. Algunos valores comparativos de las amplitudes de los campos eléctrico y magnético y su correspondiente valor en intensidades láser.

tícula,  $\mathbf{v}$  su velocidad,  $q$  su carga y  $\mathbf{E}$  y  $\mathbf{B}$  el campo eléctrico y magnético respectivamente. Con la notación habitual,  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío y  $\gamma^2 = (1 - \beta^2)^{-1}$  es el coeficiente relativista, con  $\beta = v/c$ . Obsérvese que esta ecuación es no lineal ya que  $\gamma$  depende de la velocidad. Por ello la dinámica puede parecer muy compleja aunque en realidad no lo sea tanto<sup>8</sup>. Toda la física clásica de la aceleración está contenida en esta ecuación. Veámoslo para el caso de una onda polarizada linealmente. Para velocidades bajas,  $\beta \ll 1$ , la partícula se acelera exclusivamente en la dirección del campo eléctrico, que es lo que esperábamos. Si el campo no es demasiado intenso el movimiento será siempre

- 7 De las siglas en inglés Quantum Electrodynamics. Se explicará en este mismo capítulo más adelante.
- 8 Quizá la relatividad restringida parezca algo muy complejo, con sus diferentes implicaciones y con sus cambios de sistemas de referencia, y lo es. Pero calcular cosas como ésta sin movimientos del sistema de referencia del laboratorio es *relativamente* sencillo y recomendamos que como ejercicio se intente.

en esa dirección oscilado con un desfase respecto al campo eléctrico. Sin embargo si el campo es muy intenso el electrón adquirirá cada vez más velocidad en la dirección de  $\mathbf{E}$ . Esa velocidad entonces permitirá que el término  $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$  de la fuerza de Lorentz actúe. De ese término resulta un movimiento en la dirección de propagación del láser (tanto si la carga es positiva como si es negativa).

Los electrones al tener tan poca masa se aceleran muy rápidamente y se acoplan de forma muy efectiva con una onda electromagnética en el rango óptico del espectro. A título ilustrativo podemos mencionar un ejemplo típico del movimiento de un electrón en un láser intenso. La Fig. 10.9 corresponde a un pulso láser de titanio:zafiro (800 nm) con una intensidad muy elevada,  $2 \times 10^{19} \text{ W/cm}^2$ , pero perfectamente alcanzable hoy en día en muchos laboratorios como por ejemplo el CLPU, en Salamanca. Esta figura se ha obtenido mediante integración numérica de la ecuación anterior. La trayectoria es muy reveladora de la enorme aceleración que sufren los electrones. Puede parecer que para acercarse a la velocidad de la luz, el electrón necesitará mucho tiempo de aceleración, pero no es así. Con un láser de esa intensidad el electrón se acelera a velocidades relativistas<sup>9</sup> en tiempos de pocos femtosegundos y en distancias de pocas micras. Recordemos que 800 nm corresponden a 2,67 fs de período, aunque en este caso se necesitan algunos femtosegundos más debido al efecto Doppler que siente el electrón cuando se desplaza hacia delante por efecto del campo magnético. En pocos femtosegundos el electrón pasa del reposo a una velocidad cercana al 99 % de la velocidad de la luz. Normalmente se piensa que acelerar una partícula a velocidades relativistas va a requerir mucho tiempo. Esto es verdad sólo si se considerasen campos moderados.

No es difícil comprobar que, para láseres en el infrarrojo cercano, los electrones alcanzan velocidades relativistas para intensidades superiores a  $10^{18} \text{ W/cm}^2$ . Si la longitud de onda fuese mayor, entonces el campo oscilaría más lentamente y al estar apuntando el vector  $\mathbf{E}$  en un mismo sentido durante más tiempo se conseguirían aceleraciones más altas. Por ello hay laboratorios especializados en intentar acelerar con láseres del infrarrojo lejano (como el láser de  $\text{CO}_2$ , a  $10 \mu\text{m}$ ). Pero longitudes de onda tan largas plantean otros problemas técnicos ya que la difracción es más relevante. Por el otro lado del espectro, si empleásemos láseres ultravioleta el campo oscilaría en una fracción de femtosegundo y no tendría tiempo de acelerarse convenientemente. El resultado es que hoy por hoy la mejor opción de compromiso para acelerar son los láseres del infrarrojo cercano.

Hasta ahora hemos hablado de electrones, si intentamos acelerar protones (misma carga, de signo opuesto, pero con una masa 1.836 veces mayor) el resultado es que los efectos relativistas —cuando se trate de protones aislados— aparecerán a intensidades mucho mayores. Para el láser de titanio:zafiro los efectos relativistas de protones aislados aparecen por encima de los  $10^{22} \text{ W/cm}^2$ .

9 Cuando una partícula viaja con una velocidad cercana a la de la luz, surgen nuevos efectos no contenidos en la Física Clásica, que se explican mediante la Teoría de La Relatividad.

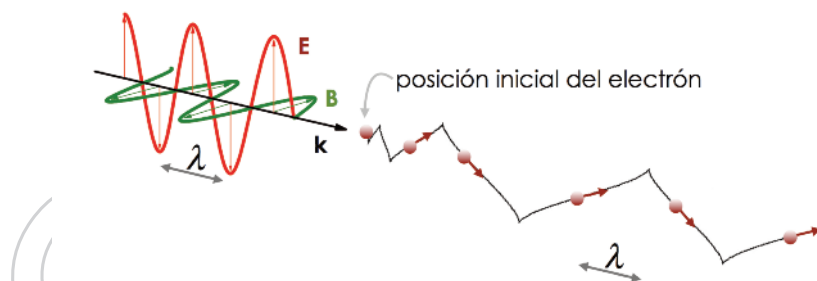


Figura 10.9. Trayectoria de un electrón en el seno del campo electromagnético de un láser linealmente polarizado con una intensidad de  $2 \times 10^{19} \text{ W/cm}^2$  y  $800 \text{ nm}$  de longitud de onda. A la izquierda se representa el campo eléctrico (en rojo) y el campo magnético (en verde) incidentes sobre el electrón (punto rojo). El láser se propaga en la dirección indicada por el vector  $\mathbf{k}$ , siendo  $k = 2\pi/\lambda$ , y  $\lambda$  la longitud de onda del láser (este vector se introdujo en la Fig. 1.5). La trayectoria del electrón está siempre contenida en el plano definido por los vectores  $\mathbf{E}$  y  $\mathbf{k}$ .

A estas intensidades, ya alcanzadas experimentalmente, la física es muy llamativa. Si hacemos interaccionar ese láser con un gas muy diluido, para evitar efectos colectivos, los electrones se ionizan inmediatamente en una oscilación del campo eléctrico y se aceleran a velocidades por encima de  $0,999 c$ , mientras que los iones resultantes se mueven a velocidades por encima de  $0,9 c$ . Conforme aumentamos la intensidad del láser los protones y electrones, por causa del coeficiente  $\gamma$  tan elevado, se comportan de manera parecida. A intensidad extrema, electrones y protones convergen en sus propiedades pues el factor relativista  $\gamma$  es mucho mayor que la unidad. Los iones pesados (partículas alfa, núcleos de carbono, etc.) tienen menor cociente carga/masa por lo que se acelerarán algo más lentamente, pero poco más. Con láseres disponibles o en construcción capaces de llegar a los  $10^{23}$  ó  $10^{24} \text{ W/cm}^2$ , se vislumbran aplicaciones muy interesantes.

## 10.6. Plasmas creados por láser

Una vez estudiada la aceleración de una partícula cargada aislada, el siguiente paso es analizar lo que sucederá si se tiene una densidad de átomos que se han ionizado formando un plasma, es decir, una serie de cargas negativas (los electrones) y positivas (los iones). Es evidente que los electrones se acelerarán de forma muy eficiente, por tener muy poca masa, mientras que los iones se moverán más lentamente. Si un láser de  $10^{18}$  ó  $10^{19} \text{ W/cm}^2$  incide sobre un blanco metálico, el campo eléctrico es tan intenso que los electrones son arrancados de sus orbitales atómicos, de forma que se ionizan y se aceleran en la dirección de propagación moviéndose a una velocidad próxima a la de la luz. El resultado es una nube de carga con densidad casi de sólido que se mueve hacia delante

dejando un rastro de cargas positivas casi quietas. Este plasma de electrones genera una especie de onda de choque de campo eléctrico que en condiciones adecuadas puede arrancar y acelerar considerablemente los protones absorbidos en la superficie posterior del blanco, como se indica en la Fig. 10.10. Esos efectos de plasma son la forma más eficiente que se tiene en la actualidad de acelerar protones con láser a energías de MeV. El resultado es que al incidir un láser por encima de los  $10^{18}$  W/cm<sup>2</sup> sobre un blanco metálico se genera un plasma electrónico que arranca los protones, genera nuevas frecuencias y tiene una dinámica que ahora se está empezando a comprender y a aprovechar para nuestro beneficio. Por otra parte, la posibilidad de tener plasmas tan densos y a tanta temperatura es muy interesante porque nos permite empezar a estudiar el interior de estrellas y está abriendo una nueva rama de la ciencia que se conoce bajo el nombre de astrofísica de laboratorio.

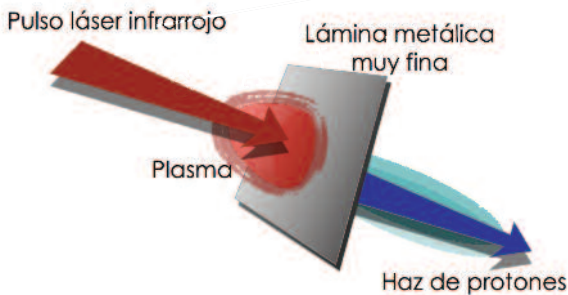


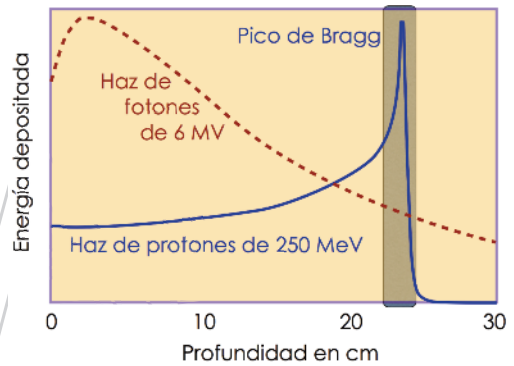
Figura 10.10. Representación esquemática de la creación de protones por un láser intenso. Cuando el pulso de femtosegundo incide sobre una lámina metálica de pocas micras de espesor la fotoionización genera, de golpe, un plasma de electrones (en rojo) que crea un campo eléctrico capaz de acelerar los protones que se encuentren en la cara posterior de la lámina metálica (en azul).

## 10.7. Terapia con protones

Un mecanismo para atacar tumores es la radioterapia, que consiste en hacer incidir sobre los mismos partículas con mucha energía, para destruirlos. Habitualmente se emplean fotones procedentes de un acelerador de algunos megavoltios. La terapia con fotones es eficiente pero plantea un problema importante, los efectos secundarios. Como se observa en la Fig. 10.11 los fotones conforme entran en el cuerpo van dejando su energía de forma gradual, por eso además de atacar la región donde se encuentra el tumor dañan todo el tejido que encuentran en su camino. Eso es uno de los orígenes principales de los denominados efectos secundarios de la radioterapia. Un haz de fotones se va absorbiendo gradualmente dentro del cuerpo humano y va dañando todo el tejido que encuentra en su camino, tanto el sano como el tumoral (indicado por la franja sombreada en la figura).

Mención aparte merecen nuevas aplicaciones médicas que se están considerando, como la terapia con protones. La terapia con protones de elevada energía (entre 150 y 300 MeV) se ha considerado desde hace mucho

Figura 10.11. Comparación entre la forma en la que depositan su energía conforme penetran en el cuerpo dos tipos diferentes de radiación, fotones (rojo) y protones (azul).



tiempo como una alternativa muy prometedora a otros sistemas de radioterapia (fotones) y está bien analizada<sup>10</sup> desde hace años. Su interés terapéutico se basa en la existencia del pico de Bragg, un pico muy pronunciado en la deposición de energía conforme los protones penetran el tejido. En la Fig 10.11 se muestra la comparación entre la forma en la que deposita su energía dos tipos diferentes de radiación. En rojo se observa la energía depositada en función de la profundidad por un haz de fotones generados en un acelerador de 6 megavoltios. Se observa que la energía se va depositando de forma gradual. En azul se indica la energía depositada por un haz de protones de 250 MeV. En el caso de protones la energía se deposita con un pico característico, el pico de Bragg, que se produce a una profundidad que depende directamente de la energía del haz de protones. Ajustando la energía de los protones incidentes se puede hacer que el pico de Bragg quede justo en la zona del tumor. Eso hace que se pueda controlar con mucha precisión a qué profundidad el haz de protones va a depositar su energía y, por lo tanto, destruir el tejido que se encuentre exclusivamente a esa profundidad. Como la profundidad a la que se encuentra el pico de Bragg depende de la energía de los protones incidentes, ajustando la energía se puede ajustar la profundidad al punto exacto donde se encuentra el tumor a destruir y se minimizan los efectos secundarios de la radiación.

Al emerger los mecanismos de aceleración de partículas cargadas con láseres, la terapia con protones láser empieza a verse como una alternativa muy prometedora. Hasta que la terapia con protones láser llegue a estar disponible para uso clínico, pasará más de un lustro, pero las bases de la aceleración adecuada de protones, de forma que se alcance la energía y la monocromaticidad conveniente, se están definiendo actualmente. Por ello la terapia con protones es una de las aplicaciones médicas de los láseres de multi-teravatio más prometedoras. Es cierto que antes de llegar a fase pre-clínica, son necesarios importantes desarrollos tecnológicos para hacer láseres de potencias del

10 Para profundizar más se puede consultar la siguiente referencia "Radiological uses of fast protons", R.R. Wilson, Radiology 47 (1946) 487.

orden de 200 TW con una calidad de haz y una cadencia de disparo convenientes. Existen diversas propuestas de hacer terapia con protones empleando aceleradores convencionales (tipo ciclotrón o similares), pero la elevada energía de los protones necesarios —centenares de MeV— con posibilidades de ajuste de energía hace estos sistemas extraordinariamente complejos y por ello su uso está muy restringido. De nuevo, los láseres pueden representar un sistema mucho más adecuado, ya que se controlan mejor y se fabrican en series más grandes. No podemos predecir el futuro, pero con los modernos ciclotrones superconductores todo parece indicar que la tecnología ha tocado techo en tamaño, en precio y en complejidad tecnológica. Los láseres, por el contrario, están evolucionando muy rápidamente y son cada vez más potentes y compactos, por lo que cabe considerarlos como una alternativa de futuro a los ciclotrones, aunque quedan muchos problemas por resolver.

### 10.8. Reacciones nucleares inducidas por láser

El cambio de siglo coincidió con una serie de experimentos que han demostrado la posibilidad de obtener reacciones de fusión nuclear con un láser *table-top* multi-teravatio. La reacción deuterio-deuterio (D-D) con una temperatura de ignición mayor que la de la reacción deuterio-tritio, ha sido por ello desestimada como fuente energética por el momento. Sin embargo, la fusión deuterio-deuterio se puede conseguir de una forma relativamente sencilla empleando plásticos deuterados o clusters de deuterio irradiados por láseres de 10 Teravatios bien focalizados.

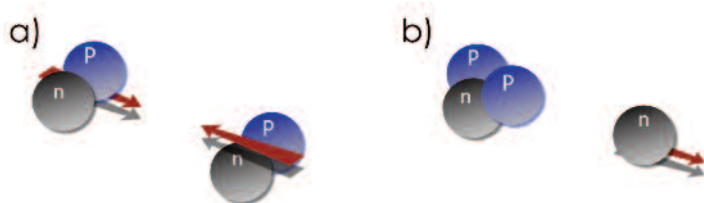


Figura 10.12. Esquema de la reacción de fusión D-D. Cuando dos núcleos de deuterio colisionan con la energía adecuada a), puede formarse un núcleo de  $\text{He}^3$  y liberarse un neutrón b).

En este caso, un sistema láser CPA permite fácilmente llegar a la fusión deuterio-deuterio (que tiene una temperatura de fusión mayor que la fusión deuterio-tritio comúnmente considerada para los reactores de energía). Desafortunadamente, este sistema es endoenergético, es decir el láser consume más energía que la que genera la fusión, por lo que no es una alternativa para la producción de energía. Para llegar a la producción neta de energía se tienen requerimientos mucho más estrictos ya que se trata de conseguir un plasma lo

bastante denso durante suficiente tiempo y que el sistema sea capaz de devolver la energía introducida. Para eso se necesitan tiempos entre pico y nanosegundo y por ello se requieren láseres increíblemente grandes.

Independientemente de la obtención de energía, la manipulación de núcleos es uno de los grandes sueños de la ciencia, y estos láseres están propiciando un notable avance. No hay que pensar que los láseres son la Piedra Filosofal, pero tampoco estamos tan lejos. Se ha comprobado ya que la irradiación con luz (a esas intensidades) de núcleos induce transmutaciones y abre nuevas vías de reacciones nucleares. La principal aplicación de la transmutación es la desactivación de residuos nucleares. Ken Ledingham<sup>11</sup>, empleando un láser de petavatio, probó hace unos años que la desactivación del yodo 129, un isótopo de vida larga que se produce en los reactores de fisión, era posible. Esto ha abierto una vía insospechada para el tratamiento de los residuos nucleares mediante láser. Esta aplicación está en fase de prueba pero con indicaciones muy esperanzadoras.

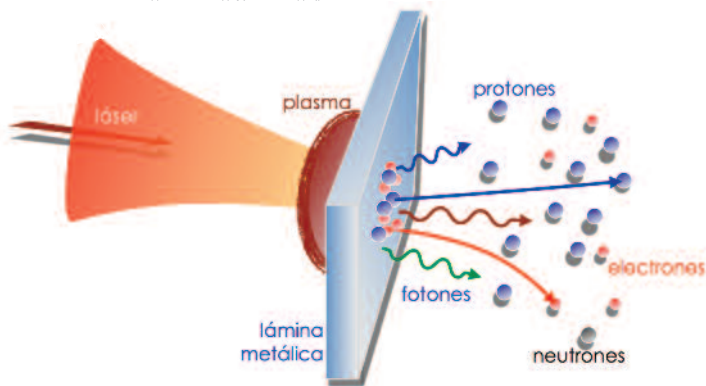


Figura 10.13. Ilustración esquemático de la fenomenología esperable con un pulso de Petavatio. Cuando el haz se focaliza sobre una lámina delgada, se forma un plasma y por el lado opuesto pueden aparecer, dependiendo de la intensidad y del blanco metálico, electrones, protones y neutrones acelerados. También aparecen fotones de rayos X de diversas energías. En casos extremos pueden aparecer otras partículas, como piones.

## 10.9. Luz tan densa como la materia

Estamos llegando al final de este capítulo y del libro, y es momento de revisar lo que se entiende por un láser. El láser es luz, es una onda y, por tanto, es algo etéreo y casi inmaterial, o ¿quizás no? Si nos piden que pensemos en algo

11 K.W.D. Ledingham et al, *Laser-driven photo-transmutation of 129-Iodine, a long lived nuclear waste product*, J. Phys. D, Applied Physics 36 (2003) L 79.



muy denso, contestaremos probablemente un metal (quizás plomo) o... quizás una estrella de neutrones. Pero, ¿qué tiene que ver todo eso con el láser?

El láser es energía electromagnética, pero la materia también es energía si consideramos la conocida fórmula de Einstein,  $E = mc^2$ , que indica que una masa  $m$  equivale a una energía  $E$  y que la proporcionalidad viene dada por la velocidad de la luz al cuadrado. Quizás los dos conceptos no estén tan alejados. Para entender mejor esto vamos a reescribir la ecuación de Einstein dividiendo ambos miembros por unidad de superficie y de tiempo; así se llega a que  $I = \rho c^3$  donde  $I$  es la intensidad del láser y  $\rho$  es la densidad a la que equivaldría si esa energía estuviese en forma de masa.

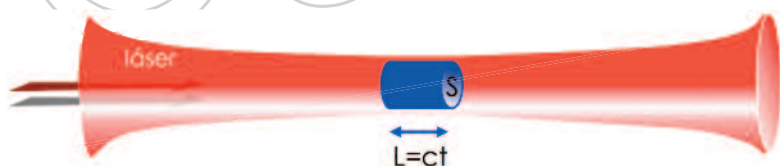


Figura 10.14. Cuando un pulso láser de duración temporal  $t$  se focaliza en una superficie  $S$ , entonces toda su energía está concentrada en un volumen  $V=S L$ , donde  $L=ct$  es la duración del pulso. Con un pulso ultracorto ultraintenso bien focalizado se pueden obtener elevadísimas concentraciones de energía.

Eso quiere decir que los pulsos láser pueden ser considerados como una concentración espacio-temporal de energía y además ahora se puede ya considerar que esa concentración de energía es comparable a la que corresponde a los restantes objetos que nos rodean.

Por ejemplo, un gramo de agua corresponde, por la relación  $E = mc^2$  a poco menos de  $10^{14}$  J de energía. Eso es una cantidad de energía muy relevante porque pensamos en un  $\text{cm}^3$  de agua. Si en lugar de ese volumen pensásemos en un volumen de un  $\mu\text{m}^3$  entonces nos daríamos cuenta de que al saber focalizar un julio en ese volumen, estamos llegando a densidades de energía muy relevantes para muchas aplicaciones.

Actualmente se considera que los  $10^{24}$  W/cm<sup>2</sup> son una intensidad que se alcanzará en breve, y por ello pronto sabremos concentrar energía electromagnética a densidades comparables a la del agua. ¿Qué significa eso? Quizás todos pondríamos la mano para parar un puntero láser, pero ¿alguien pondría la mano para parar una gota de agua que se acercase a la velocidad de la luz?

## 10.10. Aceleraciones extremas

Por dar una idea de que esto no acaba aquí, hay otro efecto interesante que se espera encontrar en unos años, relacionado con aceleración violenta más que con la velocidad. Al tratarse de láseres tan extremos un electrón en su

| Densidad (g/cm <sup>3</sup> ) | Densidad equivalente de energía (J/μm <sup>3</sup> ) | Intensidad equivalente (W/cm <sup>2</sup> ) |                     |
|-------------------------------|--|---|---------------------|
| 10 <sup>-3</sup>              | 9x10 <sup>-2</sup>                                   | 2,7x10 <sup>21</sup>                        | Aire                |
| 1                             | 90   | 2,43x10 <sup>24</sup>                       | Agua                |
| 1,5x10 <sup>2</sup>           | 1,35x10 <sup>4</sup>                                 | 4,05x10 <sup>26</sup>                       | Núcleo del Sol      |
| 3x10 <sup>4</sup>             | 2,7x10 <sup>6</sup>                                  | 8,1x10 <sup>28</sup>                        | Límite de Schwinger |
| 10 <sup>6</sup>               | 9x10 <sup>7</sup>                                    | 2,7x10 <sup>30</sup>                        | Enana blanca        |

Tabla 10.3. Algunos valores típicos de densidades (primera columna) y su equivalente en densidades de energía obtenidos a través de la ecuación de Einstein (segunda columna). En la tercera columna se muestran cada una de estas densidades traducidos a valores de intensidad láser.

interior va a tener —durante un tiempo muy corto— una aceleración enormemente grande, tal es así que podemos acercarnos a fenomenología de relatividad general y compararlo con otra situación extrema: la de una partícula que cae en un agujero negro. Un electrón sometido a una intensidad extrema, quizás 10<sup>28</sup> ó 10<sup>30</sup> W/cm<sup>2</sup> sufre una aceleración de tal magnitud que su dinámica se ha de describir mediante relatividad general y se espera que radie de forma similar a como lo haría al caer en un agujero negro. Esa radiación emitida por la partícula acelerada —la radiación de *Unruh*— está siendo estudiada teóricamente en la actualidad y se espera que en pocos años se podrán iniciar experimentos para medirla.

### 10.11. El límite de Schwinger, quizás la última frontera

Una pregunta básica es si existe algún límite fundamental para la intensidad máxima que podamos tener de un láser. ¿Cuál puede ser el origen de ese límite? Sabemos que se puede generar materia a partir de luz. Cuando tenemos un par de fotones de energía adecuada y que no se muevan paralelos, podemos generar un par partícula-antipartícula, lo más probable es que sea un par electrón-positrón, (el positrón es la antipartícula del electrón).

Desde incluso antes de la construcción del primer láser la ciencia había construido una herramienta muy precisa para describir la interacción de cargas con campos electromagnéticos: la Electrodinámica Cuántica, QED. Entre sus innumerables logros la QED cuenta el haber permitido la comprensión del proceso de creación de pares partícula-antipartícula. Cuando una partícula colisiona con su antipartícula se pueden aniquilar la una a la otra y convertirse en una pareja de fotones (con las correspondientes conservaciones de energía y de momento). De la misma forma dos fotones pueden generar un par partícula-antipartícula. En este caso, por razones de conservación del momento y de la energía, los dos fotones han de moverse en direcciones distintas. Hasta ahí todo

está bien entendido y corroborado experimentalmente con mucha precisión. Evidentemente si un electrón tiene una masa  $m$  (el positrón tiene la misma masa) necesitaremos una energía algo por encima de energía  $E = 2 mc^2 = 1,02 \text{ MeV}$  para producir el par, es decir, necesitaremos dos fotones de rayos X o de rayos gamma. ¿Por qué hablamos de todo eso cuando este libro trata de fotones ópticos, es decir de fotones de uno o de pocos eV?

En principio, aunque sea poco probable, se puede pensar en un proceso en el que algo más de un millón de fotones de un eV generen un par electrón-positrón, cuya energía es 1,02 MeV. Simplemente pasa que eso es altamente improbable en condiciones normales. En 1959 Julian Schwinger se dio cuenta de que este proceso era posible. Sin ser muy rigurosos podemos entender lo básico del proceso. La mecánica cuántica indica que continuamente se pueden crear pares partícula-antipartícula. Evidentemente esta generación no conserva la energía y por ello es un par virtual. Podemos violar la conservación de energía en un valor  $\delta E$  si consideramos un tiempo muy corto,  $t < \hbar / \delta E$ , y así nos mantenemos dentro de los límites indicados por el principio de incertidumbre, que marca los límites al producto entre la indeterminación de la energía y del tiempo. Para el caso de un par electrón-positrón, ese tiempo es aproximadamente  $10^{-25}$  segundos. Así podemos pensar que aunque aparecen continuamente pares virtuales, estos desaparecen instantáneamente sin dar ningún efecto. Sin embargo, en ese brevísimo tiempo permitido por el principio de incertidumbre un par electrón-positrón, que son dos partículas cargadas de signos opuestos, se verán aceleradas por el campo en direcciones opuestas. Si logramos separar espacialmente una de otra ya no se podrán aniquilar y habremos obtenido un par real. Para ello vamos a necesitar un láser realmente muy intenso.

Esta es la esencia de lo que actualmente se conoce como el límite de Schwinger y el campo eléctrico necesario es el denominado campo crítico de la QED,

$$E_{\text{crítico}} = m^2 c^3 / e\hbar$$

siendo  $m$  la masa del electrón y  $e$  su carga eléctrica, en valor absoluto ( $c$  es la velocidad de la luz en el vacío y  $\hbar$  la constante de Planck). Este campo es enorme,  $E_{\text{crítico}} = 1,3 \times 10^{16} \text{ V/cm}$  (Véase la tabla 10.2). Un campo eléctrico de ese orden permite la creación espontánea de pares puesto que puede separar en el tiempo disponible una carga de la otra y proporcionarles en un tiempo cortísimo la energía suficiente para ser reales.

Ese campo crítico de la QED corresponde aproximadamente a  $2,3 \times 10^{29} \text{ W/cm}^2$ . ¿Qué significa eso? Simplemente una magnífica previsión teórica un siglo por delante de su tiempo. Actualmente los láseres llegan hasta los  $10^{23} \text{ W/cm}^2$  como mucho por lo que no hay evidencias experimentales de lo que pasará. A la espera de experimentos que lo confirmen, se espera que cuando intentemos focalizar un láser lo suficientemente potente de forma tan extrema que rebasemos el valor crítico, ese efecto de creación de pares aparecerá. Por

encima de ese valor empezarán a aparecer pares electrón-positrón que irán absorbiendo la energía del haz y por ello alterando su propagación, de forma que el vacío se llena espontáneamente de pares y se convierte en un medio no lineal donde además la luz no se propaga a la velocidad de la luz en el vacío.

¿Quiere decir esto que  $2,3 \times 10^{29}$  W/cm<sup>2</sup> es la intensidad máxima que puede tener un láser? Aunque no está clara la respuesta, todo indica que la desintegración del vacío pone un techo a la intensidad máxima que podemos alcanzar con un láser. Estamos cerca de empezar a entrever los primeros efectos de esta desintegración del vacío pero el límite quizás no esté en  $2,3 \times 10^{29}$  W/cm<sup>2</sup>, donde se forman los primeros pares espontáneamente, sino unos cuantos órdenes de magnitud por encima, cuando la creación de pares sea tan intensa que impida la propagación. En todo caso es interesante saber generar un haz de luz que se propague en vacío a una velocidad diferente a la velocidad de la luz en el vacío.

Lo más interesante de estos nuevos sistemas es que los láseres se están convirtiendo en una herramienta esencial para nuestra comprensión fundamental de las leyes básicas de la Física, además de sus ya bien sabidas aplicaciones tecnológicas.

### Para saber más

*Compression of Amplified Chirped Optical Pulses.* D. Strickland and G. Mourou. Optics Communications, 56, pp. 219. 1985.

<http://www.physics.gatech.edu/gcuo/lectures/index.html>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Chirped\\_pulse\\_amplification](http://en.wikipedia.org/wiki/Chirped_pulse_amplification)

<http://www.lle.rochester.edu/>

<https://lasers.llnl.gov/>

<http://www-lmj.cea.fr/fr/lmj/index.htm>

<http://prl.aps.org/abstract/PRL/v91/i8/e085001>

<http://www.cell.es>

OSAL  
SALAMANCA

# GRANDES INSTALACIONES LÁSER

11

No es extraño que las fronteras de lo más pequeño impliquen grandes instalaciones, y los láseres no son una excepción. Aunque hay láseres de semiconductor diminutos en multitud de componentes electrónicas, también hay láseres gigantescos. Si se quiere llegar a intensidades y/o a energías extremas es preciso recurrir a grandes instalaciones láser. En este capítulo vamos a revisar algunas de las más significativas.

## 11.1. Sistemas láser de alta potencia

### 11.1.1. Instalaciones láser de teravatio

Aunque el teravatio es una potencia muy grande (recuérdese la tabla 10.1) al emitirse en un tiempo tan corto no es una cantidad de energía relevante. Los sistemas de decenas de teravatios ya pueden adquirirse comercialmente, siempre que se disponga del presupuesto adecuado (por encima del millón de euros). En Salamanca está operativo uno de esos sistemas desde el 2007. El sistema de Salamanca llega a los 20 TW con pulsos por debajo de 30 femtosegundos. Posiblemente existan más de cincuenta laboratorios en el mundo capaces de llegar a los 20 TW, con duraciones entre 5 femtosegundos —los más cortos— y picosegundos —los más largos—.



Figura 11.1.  
Sistema láser de  
20 TW ubicado en  
Salamanca.

### 11.1.2. Instalaciones láser de petavatio

Actualmente se considera el petavatio como el límite al que se puede llegar en un laboratorio nacional. Países como Estados Unidos, Francia, Reino Unido, Alemania o Japón ya han llegado al petavatio. Hay toda una serie de

posibilidades para llegar a esa potencia extrema. Una de ellas consiste en utilizar pulsos ultracortos, y otra, en incrementar su energía. Podemos hacer una tabla de lo que representa un petavatio en cuanto a energía dividido por tiempo en el contexto de los láseres.

Obsérvese que no se incluye nada por debajo de los 5 femtosegundos. Se considera que esa es la duración mínima que se puede alcanzar si queremos trabajar en infrarrojo a 800 nanómetros de longitud de onda (que corresponden a 2,67 femtosegundos de periodo). Por tanto, dicha duración corresponde aproximadamente a dos ciclos del campo. Bajar de eso hace complicado hablar de un pulso y nos recuerda más bien a un campo oscilatorio.

Veamos por separado cada una de las posibilidades para alcanzar potencias de petavatio, según la duración:

- **5 femtosegundos.** Actualmente esto es un reto tecnológico de primer nivel, ya que hay que llevar toda la tecnología al extremo ultracorto. Hay un petavatio de esas características en construcción en el Instituto Max Planck de Óptica Cuántica de Garching, cerca de Munich, en Alemania. Ese sistema, cuando esté finalizado, será un hito tecnológico porque va a abrir el camino a sistemas de petavatio relativamente compactos.
- **30 femtosegundos.** Esto es lo que se considera la zona más asequible, pues los pulsos de 30 femtosegundos se controlan relativamente bien en la actualidad y por otro lado son lo suficientemente cortos como para que no impliquen una cantidad de energía que plantee dificultades. En la tecnología de titanio:zafiro, ese compromiso energía/duración es posiblemente el óptimo.
- **100 femtosegundos.** Esta duración permite otras tecnologías alternativas a la del titanio:zafiro. La anchura de banda ya no es tan extrema y existen muchos cristales capaces de proveerla. Por otro lado, los 100 julios por disparo dificultan la obtención de una tasa de repetición elevada.
- **1.000 femtosegundos,** es decir, un picosegundo. Un pulso de picosegundo es muy sencillo de obtener, ahora el problema está en la cantidad de energía. Se necesitan amplificadores complejos y con elevada sección transversal para no rebasar los umbrales de daño típicos del orden del julio por centímetro cuadrado en la mayoría de materiales.
- **1.000.000 femtosegundos,** es decir, un nanosegundo. En la línea del anterior, estos son sistemas sencillos en cuanto a la duración y terriblemente complejos en cuanto a la energía por disparo. Los dos casos extremos de esa tecnología son la *National Ignition Facility* (NIF), de Livermore, USA, y el *Laser MegaJoule* (LMJ), de Burdeos, Francia.

#### 11.1.2.1. Fusión nuclear con láser

Obsérvese que después de haber hablado de pulsos ultracortos (de pocos femtosegundos) se vuelve a los pulsos de pico y de nanosegundo. Es importante recordar el interés de esos sistemas para la fusión nuclear.

La fusión nuclear —la combinación de dos núcleos pequeños para formar uno más grande— se puede tener a intensidades mucho más bajas (decenas de teravatios) como se ha comentado en el capítulo anterior. Sin embargo, si se quiere producir energía de forma neta se necesita que se cumplan una serie de criterios que impliquen que la energía aportada por el láser sea mucho menor que la obtenida de la fusión nuclear. Eso está bien estudiado. Se necesitan decenas de haces de láser que incidan simultáneamente para crear una implosión en una bola de combustible nuclear de tan sólo unos milímetros cúbicos de volumen. Esta bola de combustible se ha de comprimir de forma que su densidad aumente unas treinta veces para que la fusión comience y se ha de mantener un tiempo suficientemente largo para que sea rentable energéticamente. Por ello se necesitan pulsos de nanosegundo, aunque eso implique láseres mucho más complejos y terriblemente costosos.

El parque de láseres intensos está creciendo de forma muy notable. La tecnología del teravatio está siendo cada vez más fiable y está entrando en el tejido industrial, y actualmente la tecnología del petavatio está comenzando a estar bien controlada.

#### 11.1.2.2. Tasa de repetición en los láseres de alta potencia

Hasta ahora se ha hablado de energía por disparo. Evidentemente no es lo mismo hacer un disparo al día que un disparo por segundo. Muchos de los sistemas que se han obtenido funcionan a base de disparos únicos; de forma que se requieren varias horas para preparar cada disparo. Evidentemente es mejor eso que nada, pero hacer ciencia en esas condiciones es muy complicado ya que no hay posibilidad de estadísticas experimentales y la repetitividad entre tiro y tiro es muy cuestionable. Conforme la tecnología avanza se buscan sistemas con tasa de disparo más elevada. Hoy en día un petavatio a un disparo por segundo es todavía un reto importante.

#### 11.1.3. Instalaciones láser multipetavatio

Se considera que los sistemas de decenas de petavatio —todavía no hay ninguno en funcionamiento— requieren de esfuerzos internacionales. Hay diversas iniciativas en los Estados Unidos, el Reino Unido y Francia para planear sistemas entorno a los 10 PW. Esos sistemas requieren de desarrollos tecnológicos que no están bien resueltos todavía.

Hace unos años Europa lanzó la ESFRI<sup>12</sup> (*European Strategy Forum for Research Infrastructures*, el Foro Estratégico Europeo para Infraestructuras de Investigación) en el que se recogen una serie de instalaciones láser como

12 <http://ec.europa.eu/research/esfri>



estratégicas para el desarrollo europeo. Las dos más significativas para lo que nos ocupa son HiPER, y, sobre todo ELI.

HiPER<sup>13</sup> es un acrónimo de *High Power laser Energy Research facility*, instalación de investigación de energía con láseres de alta potencia. Esta instalación busca un sistema de pulsos más largos pero por encima del petavatio encaminados a demostrar la viabilidad de la fusión nuclear inducida por láser como una fuente de energía futura. HiPER espera ser la continuación europea del ya mencionado NIF, de Livermore, California. NIF es el mayor operativo en la actualidad, pero busca tiempos más largos que los aquí considerados, y es más un reto tecnológico que fundamental. Su objetivo es la fusión nuclear por confinamiento inercial y todo su desarrollo va encaminado a ello. Desde luego el NIF representará un avance extraordinario en tecnología, pero difícilmente extrapolable a menor escala, igualmente que el NOVA no presentó ningún avance conceptual.

ELI<sup>14</sup>, acrónimo de *Extreme Light Infrastructure*, o Infraestructura de Luz Extrema, es una instalación complementaria a HiPER. Busca forzar la tecnología para llegar al láser más intenso jamás construido. El reto de ELI es llegar a los 200 PW, algo que requiere una serie de avances importantes. Actualmente la fase preliminar ha concluido y está arrancando el consorcio para la construcción de los tres primeros pilares que desarrollarán la tecnología necesaria para alcanzar este reto. Esos tres pilares de ELI estarán uno en República Checa, otro en Hungría y un tercero en Rumanía. Con esos tres pilares se pondrá a prueba las posibilidades de los sistemas de algunas decenas de petavatio combinados con fuentes de attosegundos o con aceleradores convencionales de partículas. El principal objetivo de ELI es llegar a analizar qué sucede al aproximarnos al límite de Schwinger. En pocas palabras, ELI pretende resolver una duda que se tiene en la física actual: ¿hay una intensidad límite que no se pueda rebasar porque el vacío se hace inestable? Es una pregunta muy relevante con muchas implicaciones en Física Cuántica que nos permitirá entender mucho más algo que plantea muchas incógnitas, el vacío cuántico.

Además de sus aplicaciones específicas, estos dos láseres van a representar una frontera en la física fundamental y muy posiblemente abran nuevos horizontes en física de materiales, en aceleración de partículas, en estudio de plasmas similares a los de interés astrofísico y en muchas otras cosas que hoy ni tan siquiera imaginamos.

## 11.2. Los retos tecnológicos

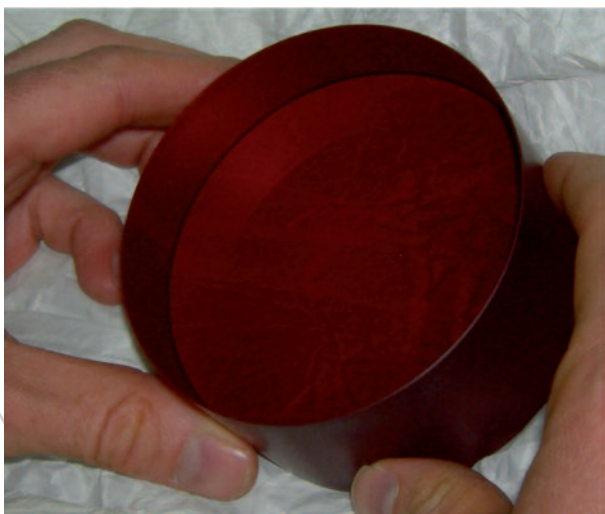
Todo ese esfuerzo de poner la tecnología al límite nos ha llevado a pensar que si bien la frontera actual está en torno al petavatio, es posible superar eso,

13 <http://www.hiper-laser.org/>

14 <http://www.extreme-light-infrastructure.eu/>

con gran dificultad. El petavatio es una frontera en la que empiezan a aparecer una serie de problemas tecnológicos que dificultan su construcción. Algunos de los más relevantes son:

*Cristales de titanio:zafiro.* En cuanto a los cristales amplificadores, el *titanio:zafiro* es el material estrella en este tipo de láseres porque tiene una banda de fluorescencia muy ancha, lo que nos permite ir a pulsos muy cortos. En principio, con este cristal se puede bajar de los 10 femtosegundos. Además, combina una serie de propiedades ópticas, térmicas y mecánicas que lo hacen especial. Pero no es perfecto ya que tiene problemas por la extrema complejidad de obtener cristales de la calidad necesaria con tamaños grandes (más de diez centímetros, como el mostrado en la Fig. 11.2) y, sobre todo, tiene un gran problema con su tiempo de fluorescencia. El tiempo de fluorescencia son 3,2 microsegundos, lo que implica que hay que bombear con un pulso de nanosegundos que este bien sincronizado con la llegada del pulso infrarrojo a amplificar. Se está invirtiendo un importante esfuerzo para desarrollar otros cristales con ancho de banda suficiente, con propiedades térmicas y ópticas adecuadas. También se está avanzando mucho en el desarrollo de vidrios y materiales cerámicos con propiedades convenientes.



*Figura 11.2. Uno de los grandes problemas de la tecnología necesaria para sistemas multi-petavatio es el gran tamaño de los cristales de titanio:zafiro. Para llegar o rebasar el petavatio se requieren cristales de gran calidad óptica y considerable tamaño, como el mostrado en la figura. Actualmente se fabrican buenos cristales de hasta 20 centímetros de diámetro.*

*Redes de difracción.* Una red de difracción no es más que una serie de rayas grabadas en un sustrato. A priori, su fabricación podría parecer sencilla, pero solo aparentemente. Por la misma razón por la que necesitamos cristales grandes, para repartir la energía del pulso en una superficie lo bastante extensa que no dañe el material, se necesita que las redes sean grandes. Es un problema de escalas: si se tienen redes de mil rayas por milímetro, y próximas al metro de anchura, estamos hablando de grabar un millón de rayas con precisión nanométrica sin desviarnos nada. Ése es el reto.

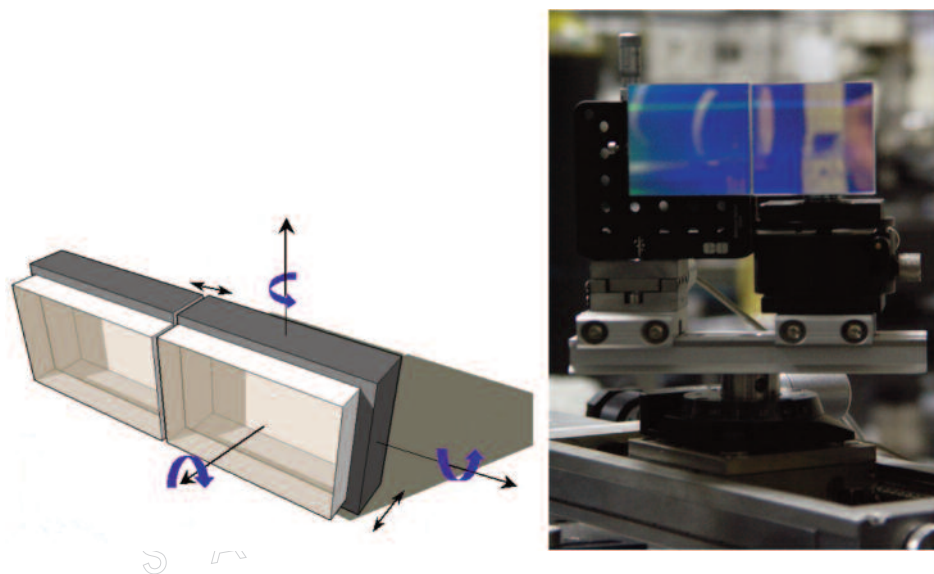


Figura 11.3. Uno de los problemas que presentan los láseres por encima del petavatio es la necesidad de fabricar redes de difracción enormes. Para evitar eso se está considerando una alternativa, entre otras, que consiste en las redes facetadas, como la mostrada en la figura. Una red facetada es una composición de dos redes iguales acopladas entre sí con una precisión de algunos nanómetros.

### 11.3. Láseres de longitudes de onda extremadamente cortas

Hasta ahora se ha hablado de láseres extremos en la región óptica del espectro (infrarrojo, visible, ultravioleta). ¿Es posible rebasar esa región y entrar en los rayos X? La búsqueda de láseres de rayos X ha sido una constante desde hace décadas, pero plantea una serie de problemas debido a que los procesos electrónicos que posibilitan la inversión de población y la emisión coherente no son escalables al caso de fotones de alta energía.

La mejor aproximación actual para llegar a longitudes de onda extremadamente cortas, por debajo del Ångström —diez Ångström equivalen a un nanómetro—, son los láseres de electrones libres. Dentro de ESFRI se está construyendo el XFEL<sup>15</sup>, acrónimo de *X-ray Free Electron Láser*, o Láser de Electrones Libres de rayos X. XFEL está en construcción en Hamburgo (Alemania) y consiste en un acelerador de electrones y un láser de electrones libres con una longitud total de 3,4 kilómetros que posiblemente lo conviertan cuando esté finalizado en el mayor láser del mundo. Con todo, lo relevante no es su tamaño, sino el hecho de que sea el láser de frontera en la región de los rayos X.

15 <http://xfel.desy.de/>

#### 11.4. El CLPU de Salamanca

Dentro de la ola de desarrollo de grandes instalaciones láser, en España se está construyendo el CLPU<sup>16</sup>, Centro de Láseres Pulsados Ultracortos Ultraintensos. El CLPU es una nueva infraestructura científica creada bajo la forma de un consorcio entre el Ministerio de Ciencia e Innovación, la Junta de Castilla y León y la Universidad de Salamanca y pertenece al mapa de infraestructuras científico técnicas singulares de España<sup>17</sup>. Los objetivos del consorcio del CLPU son:

- Construir un láser de petavatio.
- Desarrollar la tecnología de pulsos ultracortos en España.
- Avanzar significativamente en la tecnología de láseres intensos compactos.
- Promover su uso en diversos campos: Física, Ingeniería, Química, Biología.
- Abrir la instalación a la comunidad científica de usuarios nacional e internacional.

El CLPU tiene operativo actualmente un sistema láser de 20 teravatios (véase la Fig. 11.1) que es el láser más potente de España y un láser de primera división mundial. Este sistema está abierto a la comunidad de usuarios y se han realizado ya numerosas colaboraciones científicas con él.

El CLPU es una instalación abierta a usuarios que pondrá a disposición de la comunidad científica nacional e internacional una herramienta óptica extrema, un láser de petavatio, para aceleración, attofísica, física atómica, nuclear y de plasmas relativistas, y para experimentos básicos sobre electrodinámica cuántica no lineal. Además, el CLPU tiene la misión de potenciar la comunidad de usuarios de ELI, con el fin de introducir la tecnología láser en campos en los que el empleo de láseres parecía imposible. El sistema más relevante del CLPU es un láser de petavatio, en torno a 30 fs de duración, y a un disparo por segundo, que estará operativo en el 2013.

Al tratarse de una instalación para usuarios, el CLPU va a poner el máximo énfasis en abrir nuevos campos de aplicación de los láseres pulsados. Complementando al sistema de petavatio se están construyendo otras fuentes auxiliares de características singulares, entre las que destacan:

- Un sistema de alta tasa de repetición, a mil disparos por segundo, para aplicaciones industriales y de investigación que requieran menos potencia.
- Un sistema de pocos femtosegundos, para aplicaciones que requieran una duración extremadamente corta.

16 <http://www.clpu.es/>

17 <http://www.micinn.es/>

- Un sistema de ultravioleta lejano y rayos X blandos —en la ventana del agua— con pulsos de poca intensidad, pero coherentes, para aplicaciones biológicas, entre otros.

Además el láser de petavatio permitirá acelerar partículas cargadas, electrones y protones, a energías de MeV y se espera poder desarrollar fuentes compactas de partículas aceleradas con características singulares. Las aplicaciones de estas fuentes son muy variadas, desde investigación básica, a tecnología avanzada. Pero se va a poner un énfasis especial en desarrollar nuevas aplicaciones médicas, en concreto relacionadas con radiofármacos.

El emplazamiento definitivo del CLPU se está construyendo en el término municipal de Villamayor de la Armuña, muy cerca de la ciudad de Salamanca, en unos terrenos cedidos por la Universidad de Salamanca, muy cercanos al río Tormes. El proyecto del edificio puede verse en la Fig. 11.4. El láser de petavatio estará alojado en un búnker especial de 60 metros de largo con los requerimientos arquitectónicos indispensables para su correcto funcionamiento: estabilidad de temperatura y humedad y aislamiento radiológico.

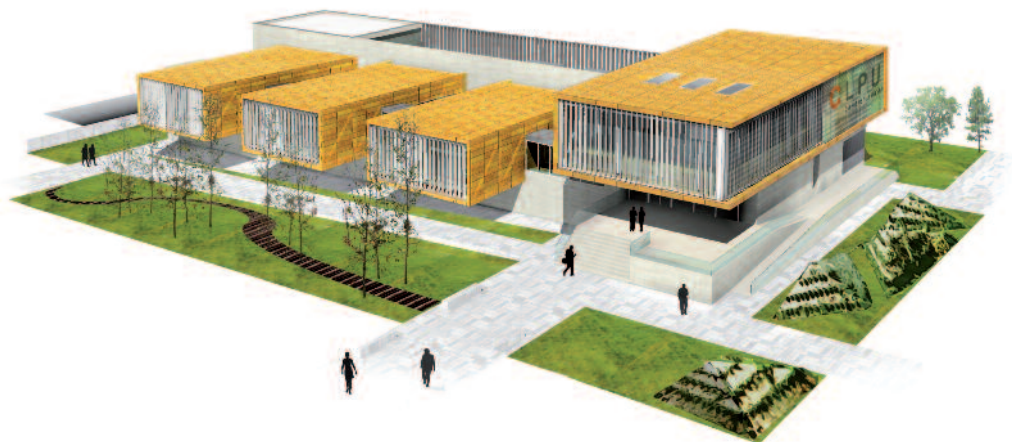


Figura 11.4. Representación del edificio del CLPU en construcción.

Evidentemente el CLPU es la gran instalación láser española. Está sirviendo para aglutinar la comunidad investigadora en el campo, para fomentar la creación de nueva tecnología y empresas y para dinamizar una serie de sectores tradicionalmente poco activos en España. Además el CLPU juega un importante papel en las relaciones de la comunidad de investigadores y usuarios de las grandes instalaciones láser europeas mencionadas.

# SEGURIDAD LÁSER

anexo



### Al.1. ¿Son peligrosos los láseres?

Hemos visto cómo las propiedades de la radiación láser permiten que ésta pueda ser enfocada de forma muy eficiente en pequeñas regiones. De esta forma, se consigue concentrar una gran cantidad de energía en áreas reducidas, permitiendo la utilización del láser para muchos tipos de aplicaciones.

Debemos recordar también que el ojo es nuestra propia lente, y que enfoca y concentra la radiación exterior en una zona llamada retina, situada en su superficie interna. En esta zona, la luz incidente desencadena una serie de impulsos que traducen la información recogida del exterior y la envían hacia el cerebro a través del nervio óptico.

Cuando un haz láser incide sobre nuestro ojo, pueden ocurrir varias cosas:

- Que el haz sea absorbido en las capas anteriores del ojo tales como el cristalino y la córnea (ver Cap. 7). Una gran absorción de radiación en estas zonas puede dar lugar a la pérdida de transparencia del cristalino provocando las conocidas cataratas. También puede inflamarse la córnea generando procesos de queratitis que a menudo resultan bastante dolorosos. El daño en estas zonas es importante porque son esenciales para poder seguir captando luz del exterior.
- También puede ocurrir que el haz atraviese las capas anteriores del ojo, y el cristalino enfoque la radiación sobre la retina causándole algún tipo de daño.

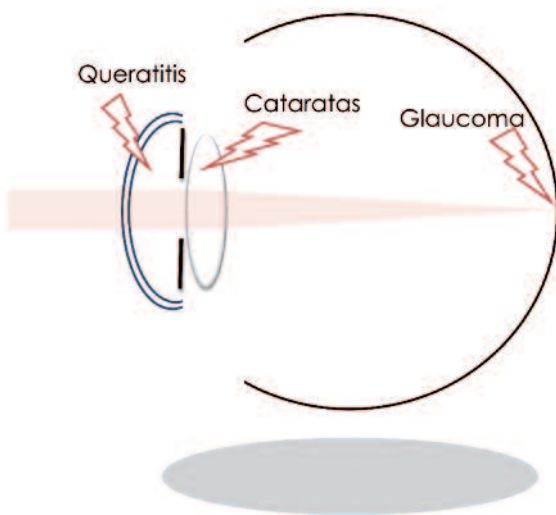


Figura Al.1. Daños en el globo ocular por la absorción de radiación.

Estas lesiones son normalmente muy graves y pueden causar la pérdida progresiva de fibras nerviosas (enfermedad conocida como glaucoma) e incluso la pérdida total de la visión.

## AI.2. ¿Cómo de peligrosos son?

Como se verá en la tabla AI.1, hay que tener en cuenta que incluso los láseres de potencia moderada pueden causar daños oculares permanentes, mientras que los de alta potencia también pueden dañar la piel sin necesidad de pasar previamente por ningún sistema de enfoque. Además, algunos láseres son tan potentes que incluso sus reflexiones difusas en ciertas superficies pueden ser peligrosas para el ojo.

Para responder a la pregunta que encabeza esta sección hay que señalar que no todos los láseres son igual de peligrosos para el ojo humano, ya que el ojo no responde de la misma forma ante los distintos tipos de radiación.

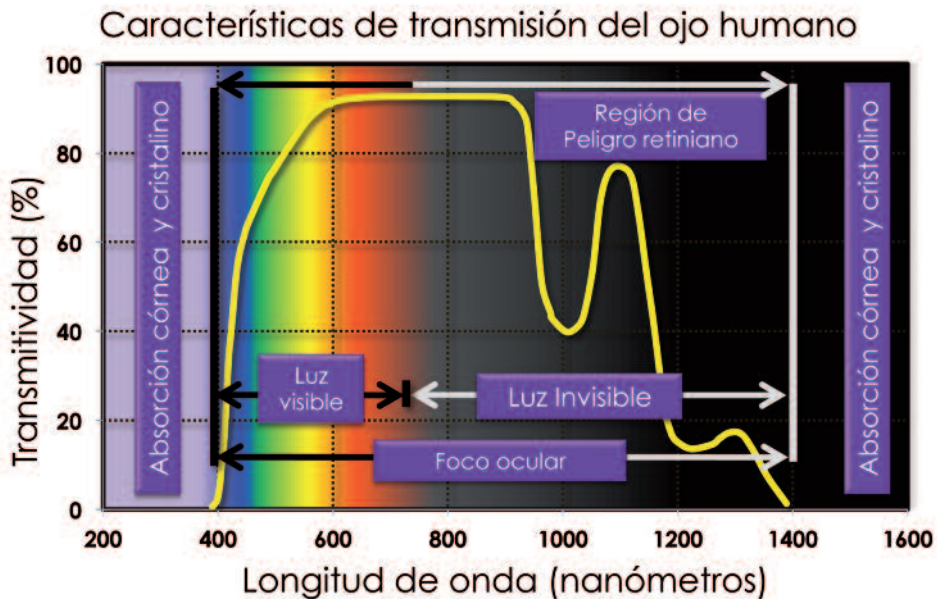


Figura AI.2. Características de transmisión del ojo humano.

El ojo humano es transparente para longitudes de onda que caen en la zona de las microondas (mayor que 1 mm) y la radiación ionizante (menor de 10 nm) (ver Cap. 1). Por el contrario, la córnea y el cristalino absorben la radiación por debajo de los 400 nm y por encima de los 1400 nm; estas longitudes de onda son las causantes de las cataratas y la queratitis como vimos en el apartado anterior.

Las longitudes de onda intermedias son enfocadas en la retina para enviar la información al cerebro. Estas longitudes intermedias incluyen radiaciones visibles para nosotros que constituyen el llamado *espectro visible* situado entre 400 y 700 nm; sin embargo, tal y como se ve en la Fig. AI.2, también in-



cluyen longitudes de onda *invisibles* para el ojo situadas entre 750 y 1.400 nm. Estas radiaciones son especialmente peligrosas porque aunque las células de la retina no son sensibles a ellas (no *las ven*), el cristalino sí que es capaz de enfocarlas y crear zonas de intensidad muy elevada en la retina. La Fig. A1.3 muestra un pequeño resumen del comportamiento ocular frente a distintos tipos de radiación.

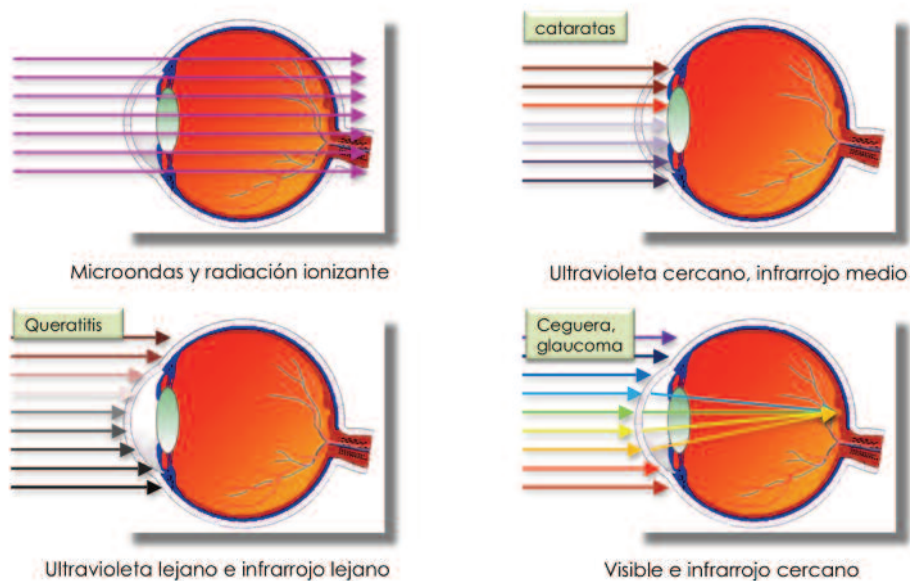


Figura A1.3. Respuesta del ojo a los distintos tipos de radiación.

### A1.2.1. Clasificación

La legislación vigente se ha preocupado de clasificar los láseres de acuerdo al riesgo asociado a su uso y de definir las medidas de seguridad que deben cumplir las personas que están expuestas a ellos.

En la Comunidad Europea toda esta información está reunida en una serie de normas (207, 208 y 60825). Estas normas son redactadas y publicadas por un organismo denominado IEC (Comisión Electrotécnica Internacional) y sus publicaciones sirven de referencia a la hora de utilizar tecnologías como los sistemas láser. Cualquier persona u organismo que necesite información para trabajar con equipos de esta naturaleza puede ponerse en contacto con la IEC y adquirir la norma correspondiente.

Estas normas incluyen una descripción de los peligros que pueden aparecer cuando una persona se expone a la radiación de un láser, cuáles son las medidas de control y prevención que hay que tomar y una serie de definiciones.

Todo ello permite clasificar los láseres en cuatro clases y unas cuantas subclases; los láseres menos peligrosos pertenecen a la clase 1 mientras que los más peligrosos se encuentran incluidos en la clase 4.

|                 |  |
|-----------------|--|
| <b>Clase 1</b>  | Seguros.   |
| <b>Clase 1M</b> | Seguros si no se miran a través de elementos ópticos (ej. Lentes).   |
| <b>Clase 2</b>  | Láseres visibles, seguros frente a exposición accidental (<0,25 seg).  |
| <b>Clase 2M</b> | Láseres visibles, seguros frente a exposición accidental (<0,25 seg) si no son observados a través de elementos ópticos. |
| <b>Clase 3R</b> | Láseres no seguros. Riesgo moderado.   |
| <b>Clase 3B</b> | Láseres peligrosos. Seguros si uno mira sus reflexiones difusas.   |
| <b>Clase 4</b>  | Láseres muy peligrosos. Ni siquiera resulta seguro mirar sus reflexiones difusas.  |

Tabla A1.1. Clasificación de los láseres atendiendo a la norma europea 60825-1.

### AI.2.2 ¿Cómo protegerse?

La legislación actual obliga a cada fabricante a especificar detalladamente las características del tipo de láser que ofrece, a señalar claramente la clase del mismo dentro de la norma europea y a advertir con señales la presencia de dicha radiación.



Figura AI.4. Señal de peligro que indica la presencia de radiación láser.

Estas advertencias deberán ser tenidas en cuenta por el usuario de un sistema láser, de forma que pueda delimitar la zona donde se encuentra la radiación potencialmente peligrosa evitando así estar en contacto con ella, o bien protegerse con gafas adecuadas a cada tipo de radiación dependiendo de la longitud de onda, energía de la misma, si es continua o pulsada, etc...

Incluso los fabricantes de láseres aparentemente inofensivos, como los conocidos punteros, están obligados a proporcionar esta información. Y los usua-



Figura A1.5. Ejemplo de gafas protectoras para distintos tipos de radiación láser.

rios debemos hacer caso de ella. Hoy en día no es difícil encontrar punteros láser de clase 3R que pueden dañar el ojo fácilmente. No sería la primera vez que se arresta a alguien por utilizar esta radiación para cegar a pilotos de aeronaves o a jugadores en campos de fútbol.

### A1.3. Otros peligros asociados a sistemas láser

Normalmente la radiación del propio láser resulta ser el peligro que debemos tener más en cuenta al acercarnos a estos equipos. Sin embargo, los sistemas láser pueden ser lo suficientemente complejos como para llevar asociados riesgos adicionales. Por ejemplo, no resulta difícil encontrar láseres con fuentes de alimentación de alto voltaje con las que conviene tener cierto cuidado.

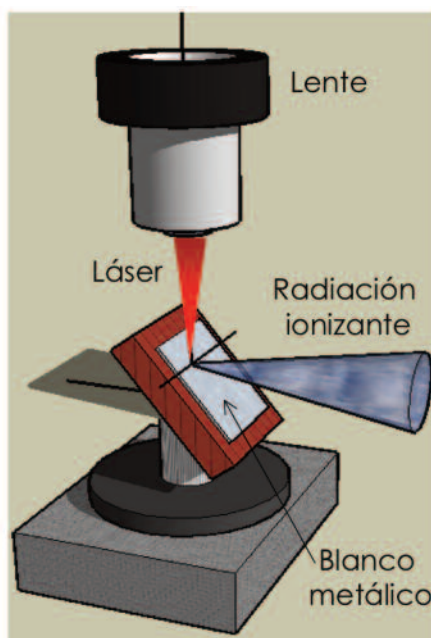
La existencia de gases presurizados también es común en sistemas de soldadura láser y laboratorios de investigación. Además de todo esto, las empresas que los utilizan para modificar materiales deben procurar poner los medios necesarios para la eliminación de las partículas que se generan en la interacción. Entre las medidas utilizadas para proteger a los trabajadores se encuentran las mascarillas protectoras y la instalación de sistemas de extracción que deben ser adecuados para el flujo y tamaño de las partículas generadas.

Además de estos riesgos más o menos fáciles de identificar, en los últimos años aparece otro riesgo asociado a equipos láser de muy alta potencia que se utilizan para generar radiación ionizante (ver Cap. 10). Este tipo de radiación puede provenir de sustancias radiactivas que la emiten de forma espontánea o bien de generadores artificiales como son dispositivos semejantes al mostrado en la Fig. A1.6.

Este tipo de radiación posee energía suficiente para arrancar electrones de los átomos y puede ser de dos tipos:



Figura A1.6. Esquema de generación de radiación ionizante con un láser intenso. El láser se enfoca de forma muy precisa sobre una pieza metálica. La ionización del material y la presencia del campo eléctrico del láser dan lugar a radiación que sale expelida de la muestra.



- Radiación electromagnética con energía suficiente para producir esta ionización (rayos X ó rayos gamma).
- Partículas subatómicas dotadas de gran velocidad. Este tipo incluye partículas alfa (núcleos de helio formadas por dos protones y dos neutrones), partículas beta (electrones) y neutrones.

La radiación será más o menos peligrosa dependiendo de si tiene más o menos poder de ionización. Esta capacidad de ionizar es directamente proporcional a la energía de la radiación e inversamente proporcional al tamaño de la partícula componente. Además de esto, hay que tener en cuenta que no todas las partes del cuerpo reaccionan igual cuando son expuestas. Los tejidos y órganos más sensibles resultan ser los menos diferenciados y los que exhiben alta actividad reproductiva:

- Tejidos altamente radiosensibles: epitelio intestinal, órganos reproductivos (ovarios, testículos), médula ósea, glándula tiroides.
- Tejidos medianamente radiosensibles: tejido conectivo.
- Tejidos poco radiosensibles: neuronas, hueso.

Los efectos de la radiación sobre la salud son complejos, pueden ser agudos y aparecer muy poco tiempo después de la exposición (quemaduras, caída del cabello, náuseas e incluso la muerte) o crónicos, manifestándose a menudo

muchos años después como puede ser la presencia de algunos tipos de cáncer. Algunas alteraciones pueden incluso afectar a células germinales y ser transmitidas a la descendencia de los individuos irradiados.

La aparición de estas alteraciones depende de la dosis de radiación absorbida por el organismo. Sin embargo, como no todas las radiaciones tienen la misma nocividad, se multiplica cada tipo por un coeficiente de ponderación. A esto se le llama dosis equivalente y se mide en sieverts (Sv), una unidad que da idea de la energía total de radiación recibida por unidad de masa corporal.

Los seres vivos estamos expuestos a niveles bajos de radiación ionizante procedente del sol, las rocas, el suelo etc. Se considera que la dosis que recibimos del medio ambiente de forma natural está cercana a 1mSv al año.

La dosis efectiva que se considera que comienza a producir efectos en el organismo es 100 mSv/año. Por este motivo, se fija una dosis de 100 mSv en 5 años como la máxima permitida para una persona que trabaje con radiaciones ionizantes.



Figura A1.7. Señal de peligro que indica la presencia de radiación ionizante.

Dado que los láseres de muy alta potencia empiezan a utilizarse para generar este tipo de radiación, las zonas en que se lleven a cabo estos experimentos deben de estar debidamente señalizadas. Además de ello, deberán tomarse ciertas precauciones adicionales para reducir la dosis recibida tales como:

- Reducción de tiempo de exposición a la radiación.
- Aumento del blindaje para reducir el número de partículas ionizantes y su energía.
- Aumento de la distancia a la fuente radiante de forma que la misma atmósfera funcione también como elemento de blindaje.

Como puede deducirse de este anexo, los láseres que nos acompañan hoy en día en cualquier sitio (desde los lectores de códigos de barras de los supermercados hasta los situados en grandes laboratorios), pueden utilizarse de forma segura siempre y cuando se tomen las precauciones adecuadas dependiendo del tipo de láser que estemos utilizando y el uso que vayamos a hacer del mismo.

### **Para saber más**

Seguridad láser en la wikipedia: [http://en.wikipedia.org/wiki/Laser\\_safety](http://en.wikipedia.org/wiki/Laser_safety)

Comisión Internacional Electrotécnica (IEC): [www.iec.ch](http://www.iec.ch)

Instituto de Láseres Americano (LIA)

Laser Safety Guide. Laser Institute of America. Tenth edition ISBN 0-912035-06-4

Safety of laser products. Part 1. Equipment classification and requirements (IEC60825:2001).

# EXPERIMENTOS CASEROS CON LÁSER

anexo



# OSAS

**Nota importante:** Se recomienda leer cuidadosamente las instrucciones y prestar mucha atención al realizar los experimentos, especialmente cuando se utilice un láser (ver Anexo I) o un dispositivo eléctrico.

## All.1. Refracción y reflexión de la luz

**Objetivo:** Estudiar la reflexión y refracción de la luz, así como el fenómeno de la reflexión total.

**Materiales:** Puntero láser, cubeta con agua y un poco de leche.

**Descripción:** Al incidir la luz sobre la superficie de separación entre dos medios se producen los fenómenos de reflexión y refracción, como se ha visto en el Cap. 1. Un experimento muy sencillo para observar ambos fenómenos consiste en hacer incidir el haz de un puntero láser sobre una cubeta transparente (como un acuario o terrario) con agua.

Para poder visualizar mejor el haz es conveniente realizar el experimento en una habitación a oscuras y añadir unas gotitas de leche a la cubeta. Esto hará que el agua esté más turbia produciéndose así difusión o *scattering* de la luz y que se observe mejor el haz, de la misma forma que en un concierto la luz de los focos se ve mejor gracias a la difusión en el humo.

Si se hace incidir el haz láser desde el aire de forma oblicua, se observa que el ángulo con el que se propaga en el agua, es diferente al de entrada. Es sencillo comprobar cómo, dependiendo del ángulo de incidencia, varía la dirección de propagación de acuerdo a la ley de Snell.

Es posible estudiar también la reflexión en el interior de la cubeta (es decir, haciendo incidir el haz desde el agua), tal y como se muestra en la Fig. All.1. Cuando la luz se propaga de un medio a otro con menor índice de refracción existe un ángulo crítico a partir del cual toda la luz se refleja: si se trabaja con diferentes inclinaciones de entrada, se observa que a partir de cierto ángulo no existe refracción (es decir, el haz de luz no sale del agua) y queda *atrapado* en el interior de la cubeta, momento en el que se habrá encontrado el ángulo de reflexión total.

Se puede recurrir a un segundo experimento para profundizar en el fenómeno de la reflexión total. Utilizando gelatina es posible guiar la luz de forma si-



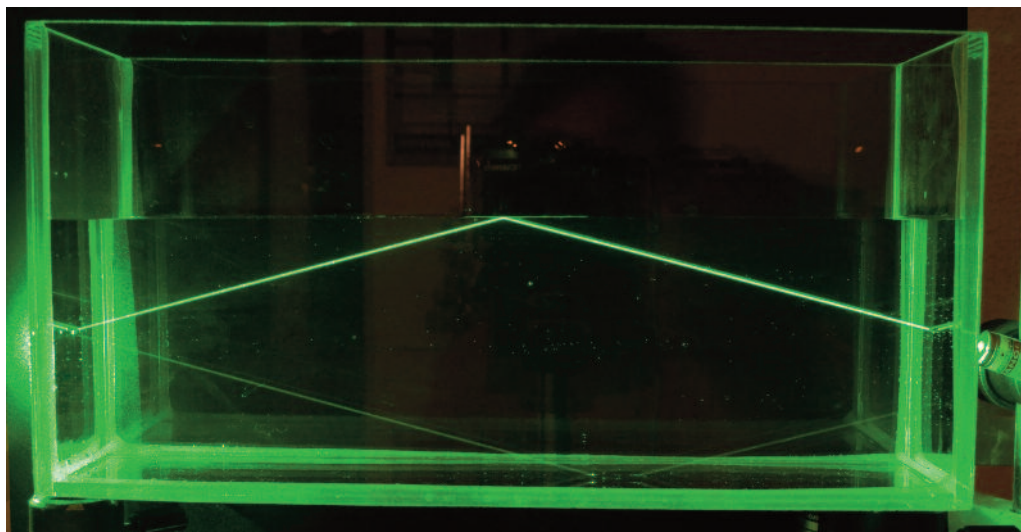


Figura All.1. Reflexión total en una cubeta

milar a las fibras ópticas (Cap. 6). Incluso, se podría observar que curvando la gelatina la luz se sigue propagando por su interior. Para este experimento se recomienda utilizar un color claro de gelatina, así como una cantidad de agua ligeramente inferior a la indicada en el envase.

## All.2. Difracción de la luz

*Objetivo:* Comprobar experimentalmente el fenómeno de la difracción de la luz a través de objetos cotidianos.

*Materiales:* Puntero láser, hilo, CD.

*Descripción:* Si se dispone de un puntero láser y se deja propagar libremente, se observa que la forma y el tamaño del punto apenas sufren variación. Sin embargo, cuando encuentra un obstáculo de magnitud comparable a su longitud de onda se produce el fenómeno conocido como difracción (Cap. 1).

Es posible observar la difracción de un láser de varias formas, todas ellas muy sencillas. La primera es utilizando un objeto muy delgado, como un hilo o un cabello. Si se sostiene con una mano y con la otra se dirige el láser hacia él, se observa una línea de puntos correspondientes al patrón de difracción. Otra opción consiste en hacer pasar el haz a través de un orificio muy pequeño. En este caso, se observarán una serie de anillos alrededor del punto central. Además, es posible generar patrones de difracción más complejos con ayuda de *redes de difracción*. Muchos punteros vienen con un juego de cabezales intercambiables que crean interesantes figuras.

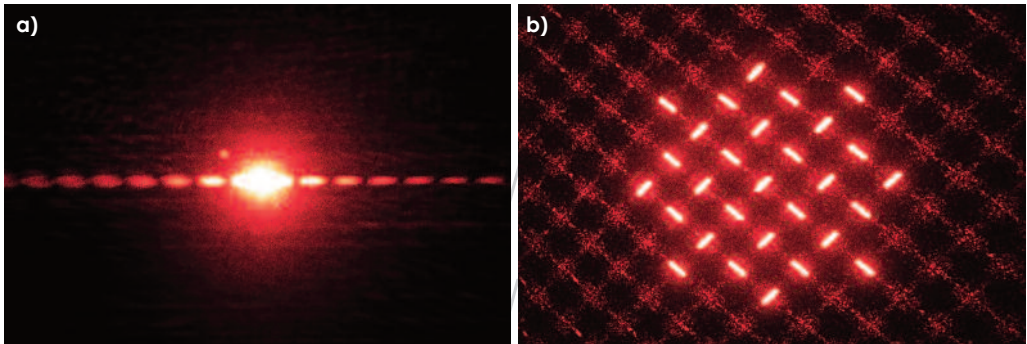


Figura All.2. a) Patrón de difracción generado por cabello.  
b) Patrón generado por una red de difracción.

Otra posibilidad para generar un patrón de difracción es mediante un CD: dado que se trata de una superficie sobre la que se han grabado marcas de tamaño del orden de micras (Cap. 6), se comporta como una red de difracción para un puntero láser visible. Por tanto, si se dirige el haz sobre la cara inferior (donde está grabada la pista de datos) –con cuidado de que la reflexión no alcance a los ojos– y se mueve el láser y el CD, se observa una línea de puntos generada a consecuencia de la difracción que experimenta el haz por el CD.

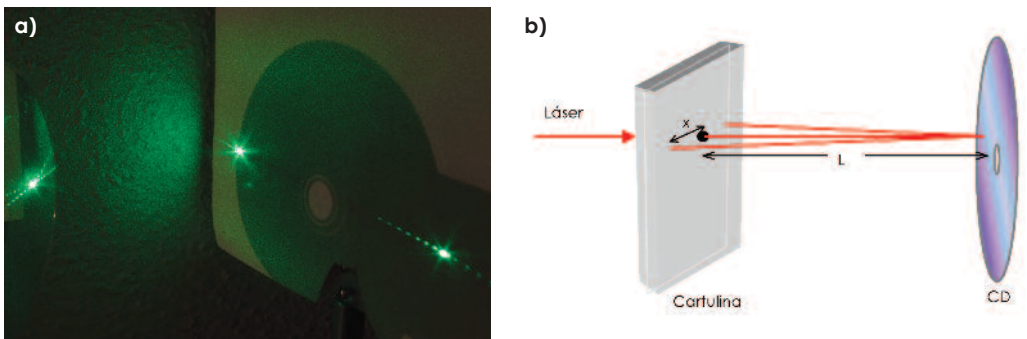


Figura All.3. a) Patrón de difracción generado por un CD y  
b) esquema del dispositivo experimental

A partir de la misma, se puede calcular el espaciado entre las pistas del CD sin más que aplicar la ecuación de la red de difracción (Cap. 1). Para ello, basta perforar un agujero –por el que pasará el haz– sobre una cartulina –que hará las veces de pantalla– y colocar el CD enfrente a ella, tal y como se muestra en la Fig. All.3. Si se alinea el láser de forma que la reflexión vuelva por el agujero y se mide la distancia de la pantalla al CD ( $L$ , en la figura) y la separación entre dos puntos,  $x$ , es posible calcular el espaciado como  $d = \lambda L / x$ , siendo  $\lambda$  la longitud de onda del láser.

### All.3. Espectrómetro casero

*Objetivo:* Construcción de un espectrómetro basado en un CD.

*Materiales:* Cámara digital y CD.

*Descripción:* Un CD puede utilizarse como un espectrómetro casero para observar el espectro de emisión de diversas fuentes de luz.

Los espectrómetros de laboratorio consisten simplemente en una red de difracción similar a la de un CD colocada en el interior de una caja. La luz penetra en la caja a través de una rendija estrecha, para asegurar que la luz incida sobre la red de difracción con una dirección bien determinada. Cuanto más estrecha es la rendija de entrada, mejor definida queda la dirección de incidencia y mejor es la resolución espectral, aunque la intensidad del espectro es más baja ya que penetra menos luz. En el espectrómetro casero que se propone en este experimento la caja es una habitación a oscuras, y es posible prescindir de la rendija de entrada utilizando una fuente de luz suficientemente lejana y potente, por ejemplo una farola de la calle.

El procedimiento para observar el espectro es el siguiente (Fig. All.4). En primer lugar, se sostiene el CD con un ángulo tal que veamos la luz de la farola reflejada en él; este reflejo es el llamado orden 0 de difracción. Si se gira entonces el disco, se empieza a ver luz de diferentes colores, primero roja, y después verde y azul; éste es el orden 1 de difracción y muestra el espectro de la luz incidente. Colocando una cámara digital sobre el CD en la posición adecuada puede hacerse una foto de este espectro, obteniéndose imágenes como las de la Fig. 9.2. La luz de una lámpara de sodio de alta presión (la típica luz anaranjada de las farolas de la calle) ofrece un buen ejemplo de espectro de emi-

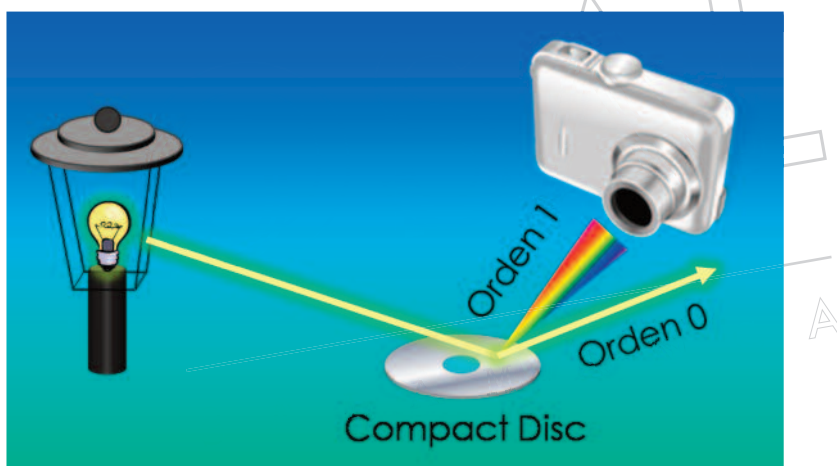


Figura All.4. Montaje de espectrómetro casero.

sión atómico, mostrando las líneas características del sodio. Así pues, este experimento tan sencillo es suficiente para demostrar la naturaleza cuántica de la materia.

#### All.4. Polarización de la luz

*Objetivo:* Comprobar el funcionamiento de unas gafas 3D polarizadas y utilizarlas para estudiar la polarización de un láser.

*Materiales:* Puntero láser, pantalla de ordenador, gafas 3D o gafas de sol polarizadas.

*Descripción:* El siguiente experimento pretende ilustrar de forma comprensible el fenómeno de la polarización a través de instrumentos que encontramos en la vida cotidiana, tales como unas gafas de sol polarizadas o unas gafas 3D.

Para comprobar la polarización de la luz, normalmente se utiliza un polarizador lineal, esto es, un material con una transmitancia sensible a la dirección de oscilación del campo eléctrico (Cap. 1). Si no se dispone de uno, se puede recurrir a unas gafas linealmente polarizadas como las que se utilizan para observar imágenes 3D, o unas gafas de sol polarizadas.

Por lo general, este tipo de gafas están constituidas por dos polarizadores lineales, uno con polarización perpendicular a la del otro. Sin embargo, en el primer caso, si se utilizan gafas de cine 3D es necesario trabajar con ellas dándoles la vuelta dado que no están formadas por polarizadores lineales, sino circulares (para el caso que nos va a ocupar en este experimento, puede decirse que éstos se comportan como polarizadores lineales al darles la vuelta).

En primer lugar, se comprobará cómo, efectivamente, este tipo de gafas están constituidas por dos polarizadores lineales. Para ello, utilizaremos el monitor de un ordenador<sup>18</sup>, puesto que éstos emiten luz polarizada en una sola dirección. Si se observa el mismo con unas gafas polarizadas, se comprueba que con un ojo se ve la imagen y con el otro no. Si se giran ahora  $90^\circ$ , se experimenta la sensación contraria: el ojo que ve ahora es el opuesto, pues en este caso el polarizador que transmite la luz de la pantalla es el contrario. Si se recurre a una situación intermedia, con las gafas a  $45^\circ$ , se ve pantalla con ambos ojos pero con menor intensidad, ya que ambos polarizadores atenúan parte de la luz.

Estas mismas gafas pueden utilizarse para estudiar la polarización de un láser, ya que ésta también suele estar polarizada linealmente. Para comprobarlo basta hacer pasar el láser a través de uno de los polarizadores de las gafas. Al

18 Dependiendo del monitor, el ángulo de polarización de la luz emitida puede ser distinto. En cualquier caso, rotando las gafas encontraremos las situaciones ilustradas en la Fig. All.5 pero con otras orientaciones.

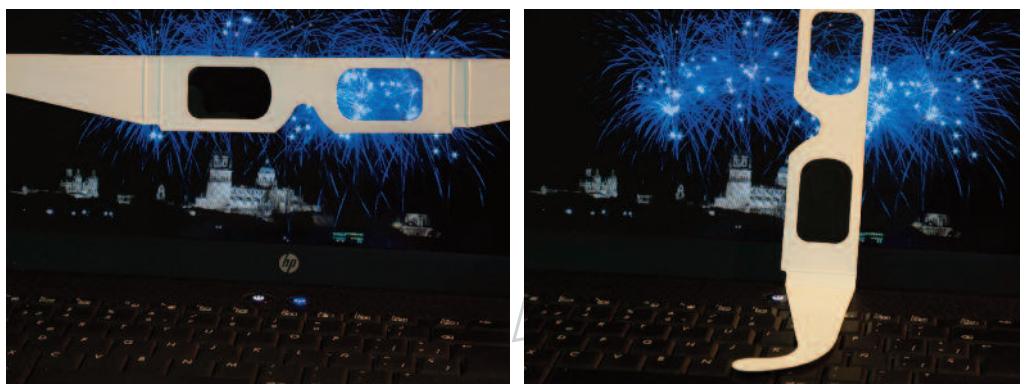


Figura AII.5. Estudio de la polarización de la luz emitida por un monitor con unas gafas 3D.

rotarlo, es posible encontrar un máximo de intensidad, que se corresponde con la polarización del láser y un mínimo, que estará desplazado  $90^\circ$ . Para observar dicho efecto, en ningún caso es necesario dirigir el láser directamente a los ojos.

### AII.5. Transmisión de señales mediante láser

*Objetivo:* Comprobar los principios de transmisión de información mediante señales ópticas.

*Materiales:* Puntero láser, transformador de tensión de relación 1:1 (puede servir un transformador que tenga dos bobinas independientes en el secundario), pequeña célula fotovoltaica, altavoces con amplificador (como los de un ordenador, es decir, con entrada de audio), conectores Jack de audio de 3.5 mm, reproductor de música con salida para auriculares, kit de cables, cocodrilos y tijeras.

*Descripción:* En este experimento se propone comprobar los principios de transmisión de información mediante señales ópticas. Para ello, se utilizará un puntero láser como un dispositivo de transmisión de música inalámbrico conectándolo a la salida de cualquier reproductor de audio (ordenador, mp3,...). De este modo, se crea un haz luminoso modulado, es decir, cuya intensidad varía acorde con la señal acústica. Haciendo incidir la luz del láser sobre una célula fotovoltaica conectada a unos altavoces, será posible escuchar el sonido transmitido por el láser.

El puntero láser crea un haz de luz que es función de la intensidad de la corriente con la que se alimenta. Las pilas que lleva incorporadas proporcionan una corriente continua, lo que genera un haz continuo.

La música en un reproductor musical es generada por una señal eléctrica; dicha señal es insuficiente para hacer lucir el puntero láser, por lo que es necesario amplificarla, lo cual hace necesario el uso de un transformador. La señal de música creará un campo magnético variable en una de las bobinas del transformador, induciendo una corriente análoga en la otra bobina por la cual circula una corriente continua suficiente para hacer funcionar el láser. Esto permite *sumar* (mezclar) las dos corrientes: la continua que alimenta el láser y la señal de la música. En sistemas de transmisión este proceso se denomina *modulación* de modo que la señal de la música se llama *onda moduladora*, y la continua, *portadora*.

Ahora el láser emitirá un haz de luz variable, aunque la variación es imperceptible para nuestros ojos. La célula fotovoltaica crea una tensión en función de la luz que recibe. Si se dirige el puntero sobre la célula, ésta es capaz de recrear la señal eléctrica de la música a partir de la luz del láser. Los altavoces amplifican la señal y finalmente se puede escuchar la música.

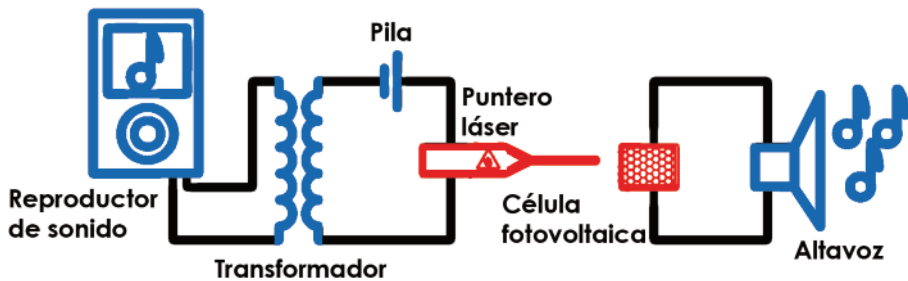


Figura All.6. Esquema experimental para la transmisión de señales mediante láser.

Para implementar el dispositivo, en primer lugar se conecta el extremo del conector Jack al aparato de música y los cables a una bobina del transformador. Si la señal de audio es estéreo, utiliza solo un canal (vivo) y masa. Otra opción más económica puede ser reutilizar el cable de unos viejos auriculares, micrófono, etc., pero en tal caso los cables estarán recubiertos de un barniz aislante que se deberá lijar.

A continuación, se desmonta el puntero láser, sacando dos cables para intercalar la segunda bobina del transformador entre la batería y el láser. Una opción más sencilla es dejar las pilas fuera del puntero y alimentarlo mediante corriente eléctrica. Si se han realizado correctamente las conexiones, el láser deberá lucir. Si se observa que brilla menos que antes, tal vez sea necesario añadir otra pila.

Posteriormente, se conectan los extremos de la célula fotovoltaica a la entrada de los altavoces (unas pinzas de cocodrilo con el cable de unos auriculares es suficiente).

Si se encienden ahora los altavoces y el reproductor (posiblemente sea necesario elevar el volumen al máximo), y se dirige el láser a la célula, se podrá escuchar la música.

Consejo: si se escucha un ruido grave en los altavoces probablemente se deba a la iluminación ambiental; se recomienda por tanto trabajar con la luz apagada.

### Para saber más

<http://theopticsblog.blogspot.com>

EU-HOU project (<http://www.euhou.net/>)

*Experiments using a helium-neon laser: a reference manual and experiment guide for use with industrial fiber optics helium-neon lasers and optics education sets*, H. Gottlieb, Industrial Fiber Optics, 2006. ([www.i-fiberoptics.com/pdf/45-700-manual.pdf](http://www.i-fiberoptics.com/pdf/45-700-manual.pdf))

## Agradecimientos

OSAL

Los editores quisiéramos dar las gracias a las entidades que han financiado este libro: el proyecto LaserFest, en el que colaboran APS Physics, OSA, SPIE e IEEE Photonics Society; y el Centro de Láseres Pulsados, CLPU, consorcio formado por el Ministerio de Ciencia e Innovación, la Junta de Castilla y León y la Universidad de Salamanca.

Por otro lado, nos gustaría agradecer la desinteresada labor de todos y cada uno de los autores, y la infinita paciencia de M. Javier Sastre, responsable del diseño y la maquetación de este libro.

Por último, nos gustaría dar las gracias a todas aquellas personas que, de una u otra manera, han contribuido en la elaboración de este libro. En especial, al profesor Juan Manuel Bueno, al profesor Sebastián Jarabo, al doctor Ángel Alonso, y al profesor Pablo Moreno.

OSAL

SALAMANCA



## Fe de erratas

---

| <i>PÁGINA</i>    | <i>DONDE DICE</i>                                   | <i>DEBE DECIR</i>                                     |
|------------------|---|---|
| 87               | $n_1 < n_2$   | $n_1 > n_2$   |
| 167              | <a href="http://www.cell.es">http://www.cell.es</a> | <a href="http://www.cells.es">http://www.cells.es</a> |
| página de Tablas | (eV)= $1,6 \times 10^{-16}$ julios                  | (eV)= $1,6 \times 10^{-19}$ julios                    |

# Tablas

## Constantes físicas

| Descripción                       | Símbolo                      | Valor  |
|-----------------------------------|------------------------------|--|
| Velocidad de la luz               | $c$                          | 299.792,456 m/s  |
| Constante de Planck               | $h$                          | $6,626 \times 10^{-34} \text{ J} \times \text{s}$                |
| Carga fundamental                 | $e$                          | $1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$                                |
| Masa del electrón                 | $m_e$                        | $9,109 \times 10^{-31} \text{ kg}$                               |
| Masa del protón                   | $m_p$                        | $1,673 \times 10^{-27} \text{ kg}$                               |
| Permeabilidad magnética del vacío | $\mu_0$                      | $4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$                              |
| Permitividad eléctrica del vacío  | $\epsilon_0 = 1/(\mu_0 c^2)$ | $8,854 \times 10^{-12} \text{ C}^2/(\text{N} \times \text{m}^2)$ |

## Unidades

1 electronvoltio (eV) =  $1,6 \times 10^{-16}$  julios (J)

1 angström (Å) =  $10^{-10}$  m

## Prefijos métricos

| Múltiplos |           | Divisores       |            |
|-----------|-----------|-----------------|------------|
| kilo (k)  | $10^3$    | mili (m)        | $10^{-3}$  |
| mega (M)  | $10^6$    | micro ( $\mu$ ) | $10^{-6}$  |
| giga (G)  | $10^9$    | nano (n)        | $10^{-9}$  |
| tera (T)  | $10^{12}$ | pico (p)        | $10^{-12}$ |
| peta (P)  | $10^{15}$ | femto (f)       | $10^{-15}$ |
| exa (E)   | $10^{18}$ | atto (a)        | $10^{-18}$ |
| zetta (Z) | $10^{21}$ | zepto (z)       | $10^{-21}$ |
| yotta (Y) | $10^{24}$ | yocto (y)       | $10^{-24}$ |