

# **EL LÁSER: INSTRUMENTO CLAVE EN LA CIENCIA Y TECNOLOGÍA MODERNAS**

**Juan José Scala Estalella**  
Catedrático de Física Aplicada. ETSII  
Universidad Politécnica de Madrid



Todos los descubrimientos científicos ó inventos técnicos con los que se ha enriquecido la Humanidad desde la lejana aurora de la revolución del neolítico hasta el impresionante caudal de saber con que se cierra el segundo milenio de la Era Cristiana se pueden clasificar en dos grandes grupos. El primero lo constituyen todas aquellas aportaciones que permitieron a los hombres conocer mejor las leyes de la naturaleza; con ellos se aumentaron y perfeccionaron los conocimientos, se satisfizo de forma creciente el insaciable deseo de saber de los seres racionales. Se contestó con precisión creciente a ese permanente “por qué” que la inteligencia humana formula con insistencia al contemplar el mundo que le rodea. En el segundo se comprenden todos aquellos que permitieron a la Humanidad hacer lo que antes no podía hacer; cada desarrollo científico o tecnológico potenció la capacidad operativa del “homo faber” como Franklin denomina al hombre tecnológico, que busca con ansia descubrir el “cómo” realizar su noble aspiración de adaptar el medio que le rodea para lograr sus ideales de vida, a diferencia de los brutos, que se adaptan a ese mismo medio.

No siempre los primeros precedieron a los segundos; es más, rara vez ocurrió así. La historia de la tecnología está plagada de ejemplos en que resulta patente que se hizo verdad aquello de “primum vivere, deinde filosofare”.

Pues bien, el láser, tema que nos ocupará de esta jornada es un claro ejemplo del segundo grupo. Desde el primer momento cientí-

ficos e ingenieros fueron conscientes de que una poderosa herramienta había caído en sus manos, la investigación no cesó de perfeccionar la herramienta, al mismo tiempo que se perfeccionaba con el uso de la misma herramienta. Nuevas aplicaciones hacían que un número creciente de profesionales la utilizaran en un trabajo y, a pesar de su mayor juventud, camino lleva de ponerse al nivel a que ha llegado actualmente el tratamiento automático a la información, que en este año de 1.996 cumple su medio siglo de existencia, desde aquel 1.946 en que apareció el ENIAC, el primer computador electrónico. El láser, que está en las fábricas, en los hospitales, en los supermercados, en los hogares domésticos, en la banca y en las telecomunicaciones, es lanzado al espacio en busca de lejanos satélites y actúa con la pequeñez del más diminuto ser vivo, que es la célula.

Pero frenemos nuestro entusiasmo y empecemos por el principio. No es bueno que en torno a algo que todos tenemos tan cercano haya un halo de misterio. "Nihil volitur, nisi precognitur", no se quiere nada si antes no se conoce. Pues bien, vale la pena conocer que es el láser, porque está llamado a ser nuestro compañero en muchos momentos, por no decir nuestro compañero cotidiano. Algunos dirán que para ello es necesario dominar los conocimientos de la física cuántica; y tienen razón. Pero romper el misterio no exige tanto. El hombre de nuestro siglo ha entendido cómo llegó a la luna sin conocer las leyes de la mecánica celeste, cómo funciona el computador personal sin el álgebra de Boole y los circuitos lógicos; cómo anda el motor del automóvil, sin profundizar en las leyes de la termodinámica ¿Por qué el láser no ha de correr igual suerte en el seno de las inteligencias, cuando está llamado a integrarse tan estrechamente en el ámbito de nuestras vidas? Intentémoslo.

Algo nos dice su propio nombre, que es un aexónimo de la expresión inglesa Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. (Amplificación de la luz por emisión estimulada de ra-

diación). El láser es, pues, luz. Parece natural formular la segunda pregunta: ¿qué es la luz?

La luz es una onda electromagnética. Como tal posee la misma naturaleza que las ondas de radio, las microondas, los rayos infrarrojos, los ultravioletas, los X, los  $\gamma$ , o los cósmicos. Unos de otros se diferencian sólo por su longitud de onda  $\lambda$ , o lo que es lo mismo, por su frecuencia  $\nu$ . Ambas cantidades están relacionadas por la velocidad de la luz en el vacío  $c=2.99742458 \times 10^8$  m exactamente y decimos “exactamente” por que ahora se define el metro en base al camino recorrido por la luz en el vacío durante 1 segundo. La velocidad de la luz tiene pues el anterior valor por definición. A pesar de la comodidad que las calculadoras han introducido en las operaciones asimétricas seguimos considerando que la velocidad de la luz es  $3 \times 10^8$  ms<sup>-1</sup> o, si se prefiere, 300.000 Km/s. La relación entre frecuencia  $\nu$  y longitud de onda  $\lambda$  es

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad \text{o bien} \quad \nu = \frac{c}{\lambda}$$

No está de más volver a mirar el espectro electromagnético. Quizá nos lo hayan presentado muchas veces. Mis oyentes me excusarán que lo haga una vez más. Desde las ondas de radio de muy baja frecuencia, las ondas VLF (very low frequency), también llamadas ondas miriámétricas, por que su longitud alcanza las decenas de kilómetros y a los que corresponde una frecuencia de  $10^4$  Hz, hasta las ondas que constituyen los rayos cósmicos, de longitud  $10^{16}$  m. (décimas de picómetro) y frecuencia de  $10^{24}$  Hz hay un recorrido de 20 órdenes de magnitud o, si se prefiere, 20 ceros.

Para hacernos mejor idea de lo que esto supone, pensemos en el mundo musical. En el piano las teclas de la izquierda producen los sonidos más graves (baja frecuencia y onda larga). Los de la derecha corresponden a los agudos (o mayor frecuencia y onda corta). Las ondas son, por supuesto, mecánicas. De un “do” al siguiente le corresponde una frecuencia doble: cada vez que se dobla la fre-

cuencia, se sube una octava. Pues bien, el espectro con frecuencias electromagnéticas corresponde, aproximadamente, a 66 octavas, aunque no sea ésta la nomenclatura que para él se emplea. Un piano con este recorrido tendría unas 800 teclas. Imaginemos, uno a continuación de otro, más de 9 pianos de los normales. El instrumentista que intentara tocar tan formidable instrumento debería poseer cien manos como los hetaconkym de la mitología griega. Este es el espectro electromagnético.

Siendo esto así, y siendo la luz una onda electromagnética que es lo que define esa fuente del espectro que llamamos luz. La respuesta hay que buscarla, no en el mundo de la física, sino en el de la anatomía humana. El sensor con que el Creador dotó al hombre para percibir las ondas electromagnéticas es el ojo. Algunos animales detectan alguna parte de los rayos ultravioletas. El ojo es un sensor bastante selectivo. El espectro visible va, aproximadamente, desde los 3900 Å de longitud de onda para el violeta, a los 7800 Å para el rojo. El angström es una unidad de longitud equivalente a  $10^{-10}$  m., de tal manera que las longitudes de onda visibles van desde  $3.9 \times 10^{-7}$  m. hasta  $7.8 \times 10^{-10}$  m. Con nomenclatura más moderna, diríamos que la longitud de onda oscila entre 390nm hasta 780 nm. (nm= nanometros=  $10^{-9}$  metros). En frecuencia corresponde a un margen entre  $3.84 \times 10^{14}$  Hz. hasta  $7.64 \times 10^{14}$  Hz. De aquel formidable macropiano de 800 teclas sólo nos es dado “escuchar” los sonidos emitidos por las 12 teclas de la escala musical llamada cromática. Así es de selectivo el ojo humano y, sin embargo, se afirma con razón que no hay don como la vista. Con esa octava de colores, si se me permite aplicar a la cromatografía el lenguaje musical percibimos todas las maravillas del universo. Con esa octava tuvieron que crear su obra todos los artistas del pincel. La sensibilidad auditiva para el sonido va , aproximadamente de 20 Hz. a 20000 Hz., es decir , los órdenes de magnitud equivalentes a unas 10 octavas. De ellas dispusieron los creadores de la música para

deleitar nuestro oído. He aquí una razón para que los pintores sientan por los músicos una noble envidia, pero estoy convencido que ni los unos ni los otros se preocupan por estas sutilezas.

Dicho ya lo que es la luz, recordaremos brevemente cómo se genera. Nos basta el átomo de Bohr: un núcleo muy reducido, del orden de  $10^{-15}$  m. está constituido por protones y neutrones: los primeros son positivos y los segundos neutros; la carga total es, pues, positiva. Allá en la lejanía, a unos  $10^{-10}$  m. (100000 veces el tamaño del núcleo) giran los electrones, partículas negativas. Estas se organizan en órbitas de distinto radio, bien determinado para cada una. Un electrón concreto tiene que situarse en una determinada órbita: no se admiten posiciones intermedias. Tampoco se admiten posiciones intermedias para la planta de nuestro pie al subir una escalera, en esto se diferencia una escalera de una rampa. A cada órbita corresponde una energía bien definida, tanto mayor cuanto mayor es la órbita. Consecuentemente, cada electrón se encuentra en un determinado nivel energético que, a su vez, admite sólo un cierto número de electrones, distinto para cada uno de ellos.

Si por algún medio mecánico, eléctrico, químico, óptico, calorífico, etc., le aporta energía al átomo, éste puede excitarse. Quiérese decir que ese átomo, enriquecido en energía, pasa a uno de sus electrones a un nivel superior al que tenía. Naturalmente que allí no hay sitio para él, pero se le admite como un huésped por un cierto tiempo muy breve ( $10^{-8}$  segundos=una cienmillonésima de segundo, aproximadamente) al cabo del cual tiene que retornar a su domicilio habitual, devolviendo, claro está, la energía que le habían permitido cambiar de "status". Así lo hará, emitiendo un fotón, curiosa partícula sin masa, pero que tiene energía. Si resulta más grata la imagen ondulatoria, podemos imaginar que el electrón emite un tren de vida electromagnética de unos 3 metros de longitud, que es el camino que la luz recorre en los  $10^{-8}$  segundos que ha durado

la aventura. Ese tren de ondas viaja a la velocidad de la luz, porque él es la luz.

Buscando una imagen instructiva para los adolescentes, algunos libros elementales cuando explican esto, presentan una fotografía de un mar agitado, con las olas cabalgando una tras otra. La imagen, perfectamente justificable, es peligrosa. La ola supone un movimiento ordenado, que transporta energía hasta la roca o la playa contra la cual se estrella. Las partículas de agua que, dicho sea de paso, no viajan con la ola, suben y bajan ordenadamente, como si obedeciera la invisible batuta de un director de orquesta que marcara el ritmo. En un periodo de tiempo, todos suben y bajan un mismo número de veces y la distancia entre las crestas de las olas se mantienen las mismas, mientras no cambian las condiciones del mar. Pues bien, no es así, la luz o, al menos, la luz ordinaria.

Puestos a buscar una imagen, les incitaría a evocar cómo agitan las tranquilas aguas de un estanque cuando sube él caen las gotas de lluvia. Se forman ondas, pero no olas. Donde cae una gota se generan unas ondas circulares, cuyo radio aumenta.

Se extinguen enseguida y ha sido una serie de ellos, cuyo centro recuerde el lugar en que la gota cayó. Pero, pronto se pierden confundidas y entrecruzadas con otras y otras que generaron diversas gotas. Las aguas cíclicamente están rizadas pero si se toman dos puntos distintos de la superficie, no bajan y suben al unísono. La propagación de estas onditas no determina una dirección. Pues bien, estas aguas rizadas dan una imagen más cercana a lo que es la luz. Cada átomo excitado que vuelve a su estado primitivo emite un fotón o un tren de onditas y esto ocurre en distintos momentos y en distintas direcciones.

Algo parecido ocurre cuando sube el mar o un lago de aguas tranquilas aparece un fuerte viento. Al principio no hay olas. Las aguas se rizan y las pequeñas onditas rompen a poco de formarse. En el mar aparecen muchos puntos blancos, como borreguillos, que

son pequeñas onditas que se extinguen “in situ”, sin capacidad de llevar su energía hasta la costa. Cuando todo se organiza, la ola es claramente visible; su dirección de avance, bien determinada; su energía se transporta, con pequeñas pérdidas hasta el acantilado en que recaba con fuerza....eso es más bien la imagen del láser.

Volviendo a la luz, hemos hablado del tiempo brevísimo durante el cual el átomo está excitado,  $10^{-8}$  seg. Se suele decir que es una situación muy inestable. Sin embargo, haciendo un cálculo muy elemental, siempre basado en el modelo de Bohr igualando la fuerza centrífuga del electrón a la atracción coulombiana del núcleo.

$$m\omega^2 r = 9 \times 10^9 \frac{e^2}{r^2} \Rightarrow \omega^2 = 9 \times 10^9 \frac{e^2}{mr^3} \Rightarrow$$

$$\omega = \sqrt{\frac{9 \times 10^9 e^2}{mr^3}} \Rightarrow \frac{2\pi v}{F} = \sqrt{\frac{9 \times 10^9 e^2}{mr^3}} \Rightarrow$$

$$v = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{9 \times 10^9 \times (1.6021 \times 10^{-19})^2}{9.1091 \times 10^{-31} \times (10^{-10})^3}} = 2.53 \times 10^{15}$$

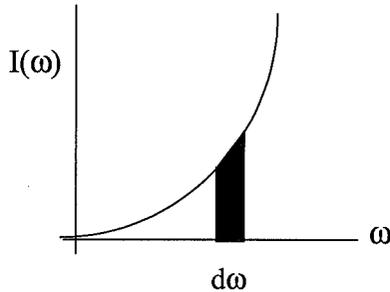
se ve que durante ese tiempo el electrón ha dado en torno al núcleo muchas más vueltas que la Tierra ha dado alrededor del Sol desde su existencia y, sin embargo, éste es considerado como uno de los movimientos más estables que se conocen.

Los modelos clásicos sirven en algunas ocasiones, como ésta, para dar una cierta idea de las órdenes de magnitud, pero no lo explican todo o, al menos, no lo representan todo con la debida fidelidad y para cualesquiera valores. Esto es lo que le sucedió a Lord Rayleigh cuando buscó la ley de radiación del cuerpo negro. Supuesta una cavidad de paredes negras a una temperatura absoluta  $T$  y que la radiación era emitida por osciladores clásicos con una cierta energía media, los osciladores tenían que irradiar y tenían que absorber radiación dentro de la cavidad hasta acumular suficiente

radiación para la absorción y la emisión. A partir de esta hipótesis se calculó la ley de radiación del cuerpo negro

$$I(\omega) = \frac{\omega^2 KT}{\pi^2 c^2} = \frac{4\nu^2 KT}{c^2}$$

donde K es la constante de Boltzmann, relacionada con la energía de un oscilador por grado Kelvin; la frecuencia angular  $\omega$  está seleccionada con la frecuencia ordinaria  $\nu$  por  $\omega=2\pi\nu$ ; y  $c$  es la velocidad de la luz. El resultado es una ley de distribución de la energía realizada por frecuencias, de manera que  $I(\omega) d\omega$  significa los vatios que por unidad de superficie emite el cuerpo negro para una radiación de frecuencias entre  $\omega$  y  $\omega+d\omega$ . La curva anterior es una parábola y, consecuentemente, el cuerpo negro debía emitir más energía en forma de radiaciones de alta frecuencia.



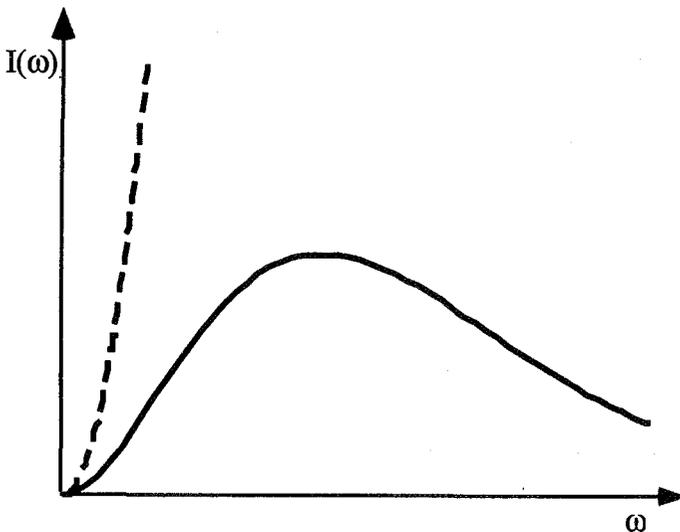
La experiencia era totalmente contraria a este resultado, pues al abrir la boca de un horno con sus paredes calientes salía de él gran energía en forma de calor (rayos infrarrojos), eventualmente algo de luz si la temperatura era suficientemente elevada, pero desde luego no eran mayoritarios, ni mucho menos, los rayos X.

Se revisaron las hipótesis clásicas y se supuso que los osciladores que estaban generando la radiación tenían niveles de energía definidos igualmente espaciados, de manera que no podrían captar

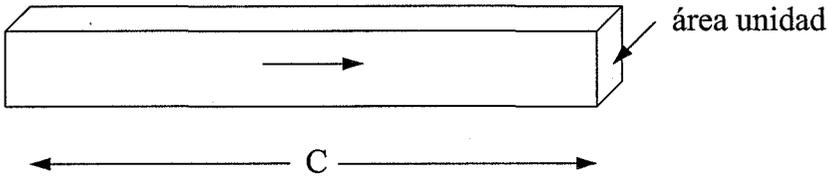
cualquier cantidad de energía sino que tenían que hacerlo de forma discreta. De la misma manera se emitía en forma de luz como múltiplos una cantidad  $\hbar\omega = hv$ , llamada cuantos de luz. No obstante, conviene recordar que la idea original de Planck era que la materia estaba cuantizada, pero no la luz. Se llegó así a una nueva expresión para la intensidad de radiación de frecuencia  $\omega$ .

$$I(\omega) = \frac{\hbar\omega^3}{\pi^2 c^2 (e^{\hbar\omega/KT} - 1)}$$

Puede observarse que para bajas frecuencias  $\hbar\omega/KT$  es pequeño y, desarrollando en serie la exponencial, esta fórmula coincide con lo anterior. En la figura se representa por la curva de puntos, donde se pone de manifiesto el efecto de la exponencial para valores importantes de  $\omega$  (o de  $\nu$ ). Evidentemente para valores crecientes de  $T$ , el máximo se desplaza a la derecha.



Imagínese ahora una cavidad, cuyas paredes reflejan las ondas. Estas van y vienen por la cavidad, llenándola de radiación, de tal manera que en su interior existe una cantidad de energía radiante que, referida a la unidad de volumen para una radiación con frecuencia entre  $\nu$  y  $\nu+d\nu$  es  $E(\nu)d\nu$ .



La cantidad de energía que “pasa” por una superficie unidad en la unidad de tiempo es  $I(\omega) d\omega$ . Si se toma un prisma de base unidad y altura  $c$ , toda la energía contenida en él en un momento determinado, si la onda se propaga según la dirección dada por  $c$ , pasará por él área unidad, de manera que:

velocidad de la luz  $\times$  densidad de energía = flujo de energía por unidad de área y por unidad de tiempo

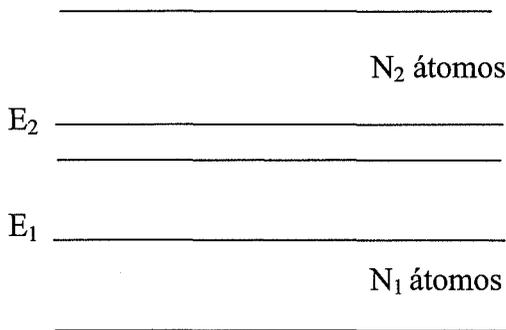
$$cE(\nu)d\nu = I(\omega)d\omega \Rightarrow cE(\nu)d\nu = \frac{K\omega^3 d\omega}{\pi^2 c^2 \left( e^{h\omega/KT} - 1 \right)} \Rightarrow$$

$$E(\nu) = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{h\nu/KT} - 1}$$

que es la expresión de la distribución de densidad de energía en la cavidad. Esta es la célebre ley de radiación de Planck, que, por tanto el problema de la radiación del cuerpo negro el que llevó a Planck a suponer en la interacción con la materia la energía es absorbida o emitida en múltiples de la cantidad  $h\nu$ , o cuanto de energía. Es verdaderamente sorprendente que la ley de Planck fuera co-

recta, a pesar de los errores cometidos en su deducción, entre otros, suponer que el gas de fotones obedecía a la estadística clásica de Maxwell-Boltzmann y no a la de Bose-Einstein.

Poco a poco se fue avanzando hasta llegar a un resultado correcto cerrando el tema la definición de las leyes de la mecánica cuántica en 1.972. Pero entre tanto Einstein intentaba generalizar el punto de vista de Planck sobre la cuantización de la materia a la cuantización de la luz, suponiéndola constituida por fotones con una energía  $h\nu = h\omega$



Sean  $E_1$  y  $E_2$  dos niveles de energía de los muchos que puede tener un átomo. Estos niveles están ocupados por  $N_1$  y  $N_2$  átomos respectivamente. Cuando el átomo recibe luz de la frecuencia correcta puede absorber su fotón de luz y efectuar una transición del nivel inferior  $E_1$  al superior  $E_2$ , de manera que  $h\nu = E_2 - E_1$ . Einstein supuso que el número de átomos que en la unidad de tiempo pasan de  $E_1$  a  $E_2$  es proporcional a la densidad de energía radiante en la cavidad y al número de átomos que se encuentran en el nivel  $N_1$ . Llamando  $B_{12}$  a la constante de proporcionalidad, resulta que el número de transiciones que se efectúan en la unidad de tiempo será

$$R_{12} = B_{12}E(\nu)N_1$$

La constante  $B_{12}$  no es universal, sino que depende del par de niveles elegidos. Si se trata de dos niveles entre los cuales la transmisión es fácil la constante  $B_{12}$  es mayor y si dicha transmisión es más difícil se tiene una constante de menor valor. Esto en lo referente a la absorción de la luz.

En cuanto a la emisión, Einstein supuso un doble efecto. En primer lugar tiene que haber alguna probabilidad de que un átomo excitado caiga al nivel inferior, emitiendo un fotón, de manera espontánea, dando lugar así a la emisión espontánea. Así ocurre, en la figura clásica cuando un oscilador pierde energía. Esta emisión espontánea debe ser proporcional al número de átomos que se encuentran en el nivel superior  $N_2$ , e independiente de la densidad de radiación existente en la cavidad. Llamando  $A_{21}$  al coeficiente de proporcionalidad se tendría el número de transmisión por este efecto en la unidad de tiempo

$$R_{21}(\text{espontánea})=A_{21} N_2$$

El paso importante de Einstein fue suponer que la presencia de la luz puede también estimular la caída de un átomo desde el nivel superior al inferior, haciéndole emitir un fotón. Esta emisión estimulada, como la absorción, será proporcional al número de átomos existentes en el nivel superior y a la densidad de energía luminosa existente en la cavidad. Llamando  $B_{21}$  al coeficiente de proporcionalidad, el número de átomos que producen emisión estimulada por unidad de tiempo será:

$$R_{21}(\text{estimulada})=B_{21} E(\nu) N_2$$

y el número total de emisiones por uno y dos conceptos es

$$R_{21}=[A_{21} + B_{21} E(\nu)]N_2$$

Haciendo un balance de las absorciones (entradas en el nivel superior) y las emisiones (espontáneas y estimuladas) (salidas del

nivel superior), se tendrán la variación del número de átomos en el nivel superior por unidad de tiempo

$$\frac{dN_2}{dt} = B_{12}E(\nu)N_1 - [A_{21} + B_{21}E(\nu)]N_2$$

La variación en el nivel inferior será esta misma cantidad cambiada de signo

$$\frac{dN_1}{dt} = [A_{21} + B_{21}E(\nu)]N_2 - B_{12}E(\nu)N_1$$

Si  $dN_2/dt > 0 \Rightarrow dN_1/dt < 0$ , se está poblando el nivel superior y despoplándose el inferior. Si  $dN_2/dt < 0 \Rightarrow dN_1/dt > 0$ , ocurre al contrario. Si cualquiera de estas dos situaciones persiste, llegaría a despoplarse totalmente uno de los niveles y el proceso terminaría. Si se desea mantener un régimen permanente, es necesario que

$$\frac{dN_1}{dt} = \frac{dN_2}{dt} = 0 \Rightarrow B_{12}E(\nu)N_1 = [A_{21} + B_{21}E(\nu)]N_2$$

A las cantidades  $A_{21}$ ,  $B_{21}$  y  $B_{12}$  se les llama coeficientes de Einstein.

Si se supone que el número de átomos en cada nivel obedece a la estadística de Maxwell-Boltzmann, debe cumplirse

$$N_2 = N_1 e^{-(E_2 - E_1)/KT} = N_1 e^{-h\nu/KT} \Rightarrow \frac{N_1}{N_2} = e^{h\nu/KT}$$

Vale la pena notar aquí, por consideraciones que luego se harán, que la exponencial del segundo miembro es siempre mayor que 1, para cualquier valor del exponente, por lo que  $N_1 > N_2$ , es decir, el número de átomos en el nivel superior es siempre menor que el que existe en el nivel inferior. Antes se ha obtenido.

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{A_{21} + B_{21}E(\nu)}{R.E(\nu)}$$

e igualando

$$\frac{A_{21} + B_{21}E(\nu)}{B_{12}E(\nu)} = e^{h\nu/KT} \Rightarrow \frac{A_{21}}{B_{12}E(\nu)} + \frac{B_{21}}{B_{12}} = e^{h\nu/KT} \Rightarrow$$

$$\frac{A_{21}}{B_{12}E(\nu)} = e^{h\nu/KT} - \frac{B_{21}}{B_{12}} \Rightarrow E(\nu) = \frac{A_{121}/B_{12}}{e^{h\nu/KT} - B_{21}/B_{12}}$$

Einstein supuso que la ley de distribución de Planck era buena y, por tanto, se tenía que cumplir

$$E(\nu) = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{h\nu/KT} - 1}$$

e identificando ambas expresiones

$$\frac{A_{21}}{B_{12}} = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \frac{B_{21}}{B_{12}} = 1$$

Einstein obtuvo este resultado, por primera vez, en 1917. La segunda de estas igualdades expresa que los coeficientes de Einstein de absorción y de emisión estimulada son iguales, es decir, dada una densidad de energía luminosa y un número de átomos en el nivel de partida, la probabilidad de que un átomo realice una transición por absorción de energía o por emisión estimulada es la misma. La primera igualdad

$$\frac{A_{21}}{B_{12}} = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \Rightarrow \frac{A_{21}}{B_{21}} = \frac{8\pi h}{c^3} \nu^3$$

manifiesta que la relación entre los coeficientes de emisión espontánea y de emisión estimulada crece con el cubo de la frecuencia. Por tanto, a bajas frecuencias la emisión estimulada puede ser

grande respecto a la espontánea pero a altas frecuencias la emisión espontánea es mucho más probable que la estimulada.

Será oportuno señalar ya, en este momento de nuestro análisis, que las transmisiones espontáneas se producen al azar, es decir, en cualquier momento, por lo que las fases o, si se quiere, las crestas y los valles de los trenes de ondas emitidos por el átomo en este mecanismo, no son coincidentes. Por ello la emisión espontánea es incoherente. Pero con la emisión estimulada o inducida los distintos átomos emiten en el mismo momento; los trenes de onda están en fase, por lo que la emisión estimulada es coherente.

Anteriormente se ha visto que la velocidad con que se producen las transiciones por emisión y absorción son respectivamente

$$R_{21} = [A_{21} + B_{21}E(\nu)]N_2 \quad R_{12} = B_{12}E(\nu)N_1$$

Por tanto,

$$\frac{\text{caudal de emisión}}{\text{caudal de absorción}} = \frac{[A_{21} + B_{21}E(\nu)]N_2}{B_{12}E(\nu)N_1} =$$

$$\frac{[B_{12}E(\nu) + A_{21}]N_2}{B_{12}E(\nu)N_1} = \left[ 1 + \frac{A_{21}}{B_{12}E(\nu)} \right] \frac{N_2}{N_1}$$

Anteriormente se ha obtenido

$$\frac{A_{21} + B_{21}E(\nu)}{B_{12}E(\nu)} = \frac{B_{12}E(\nu) + A_{21}}{B_{12}E(\nu)} = 1 + \frac{A_{21}}{B_{12}E(\nu)} = e^{h\nu/KT}$$

A bajas frecuencias el exponente es pequeño, la exponencial ligeramente superior a 1, por lo que puede escribirse aproximadamente

$$\frac{\text{caudal de emisión}}{\text{caudal de absorción}} \approx \frac{N_2}{N_1}$$

Se ha dicho anteriormente que, según la estadística de Maxwell-Boltzmann siempre ha de ser  $N_2 < N_1$ , igualándose ambas al tender la temperatura a infinito. Pero si se lograra hacer  $N_2 > N_1$  lo que se llama “inversión de la población”, se conseguirá un caudal de emisión mayor que el de absorción, con otras palabras, el número de fotones emitidos sería superior al de fotones incidentes, pero aquellos, a su vez, producirían más y más emisiones estimuladas, llegando a obtener una radicación muy intensa con trenes de onda en fase. Es como una reacción en cadena, que amplifica la radiación absorbida para dar una mayor radiación emitida que, además, es coherente. Es una amplificación de la luz por emisión estimulada de la radiación. Es un láser.

Esta situación no puede ser explicada por la estadística de Maxwell-Boltzmann.

$$N_2 = N_1 e^{-h\nu / KT}$$

que siempre conduce a  $N_2 < N_1$ . La inversión de población  $N_2 > N_1$  requeriría un exponente positivo, o sea  $T < 0$ . Por eso, a veces, se alude a esta situación como estado de temperatura negativa, lo que no pasa de ser una forma de hablar, que salva la expresión analítica de una estadística inutilizable en el caso descrito, por encontrarse lejos del equilibrio que supone la anterior distribución de Maxwell-Boltzmann.

La fórmula antes obtenida

$$\frac{A_{21}}{B_{21}} = \frac{8\pi h}{c^3} \nu^3$$

hace ver que el predominio de la emisión estimulada (coeficiente  $B_{21}$ ) frente a la espontánea (coeficiente  $A_{21}$ ), comporta valores pequeños de los miembros de la anterior igualdad, es decir, bajas frecuencias.

Esta es la razón natural de que primero se descubriera el máser (microwave amplification by stimulated emission of radiation), que es lo mismo que el láser, pero en la región de las microondas. En 1.954 Townes, Gordon y Zeiger desarrollaron el máser. En 1.957 el estadounidense Bloembergen y los rusos Barov y Prokhorow construyeron el primer amplificador maser y en 1960 Maiman construyó el primer láser de rubí emitiendo luz en forma pulsada.. Javan, Bennet y Herriot diseñaron el primer láser He-Ne. Charles H. Townes, Nicolai G. Basov y Aleksander Prokhorov recibieron el Premio Nobel de Física en 1.964.

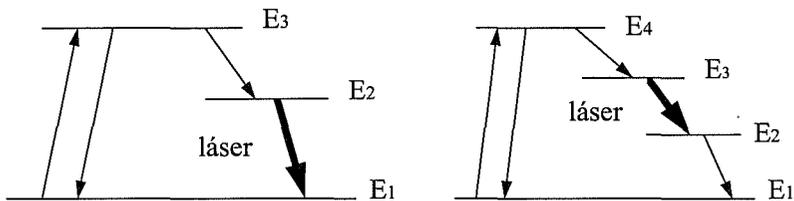
Es evidente que si el proceso en que predomina la emisión estimulada sobre la absorción continua llegará a despoblarse el o los niveles de más alta energía y el proceso se interrumpirá. Se hace preciso que una apuntación de energía pulsada o continúa contribuya a repoblar el nivel superior. El sistema de corregirlo se llama “bombeo” por la imagen hidráulica de aportar líquido a una altura superior tomándolo desde un nivel inferior.

Conviene recordar que la intensidad de una onda es proporcional al cuadrado de su amplitud. Cuando un conjunto de fuentes incoherentes emiten luz, se suman sus intensidades, es decir, los cuadrados de sus amplitudes. Pero cuando el conjunto es de fuentes coherentes, se suman sus amplitudes y la intensidad resultante es proporcional al cuadrado de dicha suma. Se sabe que el cuadrado de una suma de números es siempre mayor que la suma de sus cuadrados. Por ello un conjunto de fuentes emitiendo de forma estimulada producen un haz mucho más energético que si esos mismas fuentes emitieran de forma espontánea.

Un sistema láser tiene un rendimiento acusadamente bajo, que puede llegar al 0,1%. Pero no debe olvidarse que la cualidad de la energía de salida es totalmente distinta a la de la energía de entrada. Y es esa cualidad la que ha abierto la puerta a un sin número de aplicaciones. La sorpresa por tan bajo rendimiento estaría tan injus-

tificada como si se juzgara la destilación como un proceso químico poco rentable porque los productos de la misma tienen una masa muy inferior a las de partida. Lo que se persigue, evidentemente, es lograr un producto con muy distintas propiedades.

Hasta ahora nos hemos referido a dos niveles energéticos  $E_1$  y  $E_2$  por simplificar la presentación. Las cosas suelen ser algo más complicadas y los átomos presentan más niveles energéticos. En las figuras:



se representa el esquema para 3 y 4 niveles destacando la emisión estimulada. El tiempo que el átomo permanece excitado en los otros niveles puede ser breve y caer espontáneamente al nivel superior de emisión estimulada. En todo caso, entre los dos niveles láser debe mantenerse la inversión de la población y en un régimen continuo el número de átomos en cada nivel debe permanecer sensiblemente constante.

Después de estas ideas sobre qué es el láser parece lógico preguntarse cómo se consigue este tipo peculiar de luz. Para ello permítanme regresar al mundo musical. ¿Qué elementos esenciales encontramos en todo instrumento de música?

En primer lugar es necesario un órgano vibrante que agite el aire y genere las ondas sonoras. Tal órgano estará constituido por una cuerda, como en el violín o el piano; una lengüeta en los instrumentos de viento que la poseen, o los propios labios del instrumentista

para los que carecen de ella; una membrana como en los timbales o una placa vibrante en los platillos, etc...

La intensidad sonora que se lograría con estos elementos vibrantes será extremadamente débil. Se hace preciso potenciarla y modularla, para lo que la onda sonora pasa a una caja de resonancia. En su interior la onda sonora se refleja repetidamente en sus paredes y se refuerza. La caja de resonancia se encuentra en toda la familia de los instrumentos de cuerdas frotados o pulsados, y en el piano. Los instrumentos de viento poseen tubos sonoros y los tambores disponen de una caja de resonancia. La cavidad resonante sólo está ausente en algunos instrumentos de percusión con los platillos, el triángulo o el xilófono.

Ningún instrumento musical produce sonido sin el aporte de una energía. Será ésta el impulso que el martillo de una tecla descarga sobre una cuerda el pulsado de la misma o el frotamiento con otra cuerda tendida en su arco, el aire que se insufla, el batido con un palillo, etc...

En todo sistema láser se encuentran estos elementos esenciales: el medio activo, el cual le genera la radiación láser; la cavidad resonante, donde ésta se concentra; el sistema de bombeo, por el cual se aporta la energía que mantiene la emisión.

El medio activo parece ser muy variado, pero en una primera clasificación se pueden distinguir los láseres sólidos, líquidos y gaseosos según el estado en que dicho medio activo se encuentre. Entre los láseres de estado sólido están los de rubí y neodimio. En el primero, el medio activo son los iones  $\text{Cr}^{3+}$  con una matriz de alúmina. En el segundo, el medio activo es el ion  $\text{Nd}^{3+}$  integrado en un medio cristalino de aluminado de ytrio (YAG=ytrio, aluminio, granate). Entre los láseres líquidos hay que citar los láseres de colorante, cuyo medio activo son moléculas aromáticas fluorescentes disueltas en líquido apropiados. Entre los láseres de gas se encuentran el de anhídrido carbónico  $\text{CO}_2$  y el de vapor de yodo.

En los máseres la cavidad resonante es una caja metálica y en los láseres suele estar constituida por dos espejos entre los cuales la luz se refleja sucesivamente. Estos dos espejos pueden ser planos, si bien éstos se utilizan poco por la dificultad que supone montarlos absolutamente paralelos. Generalmente se utilizan dos espejos esféricos, cuyos centros de curvatura coinciden (resonador concéntrico) o su forma (resonador confocal). También se combinan un espejo cóncavo en un extremo con uno plano en el otro, pudiendo éste situarse en el centro de curvatura del otro (resonador hemisférico) o en su foco (resonador hemiconfocal). Es evidente que el resonador no pueda ser absolutamente estanco, pues hay que dar la posibilidad de que el haz láser salga de la cavidad. Por ello, uno de los espejos suele ser semitransparente para dejar escapar el haz.

Un valor característico para cualquier oscilador, incluso mecánico es su factor de calidad  $Q$ .

$$Q = 2\pi \frac{\text{energía que posee el oscilador}}{\text{energía perdida en una oscilación}}$$

Como

$$\text{energía perdida en una oscilación} = \frac{\text{energía perdida en un segundo}}{\nu}$$

es

$$Q = 2\pi\nu = \frac{\text{energía que posee el oscilador}}{\text{energía perdida en un segundo}} = \omega \frac{U}{dU/dt}$$

Este concepto se aplica también a un resonador. A veces, se produce que el factor  $Q$  sea muy pequeño, hasta impedir la oscilación. Cuando el valor de  $Q$  aumenta durante un breve espacio de tiempo, la energía acumulada en el medio activo genera un potente impulso láser. A esta técnica se le llama  $Q$ -switching, que podemos traducir por “conmutación del factor de calidad”.

De la misma manera que en la orquesta hemos encontrado algunos instrumentos -pocos- que no necesitan caja de resonancia porque el medio vibrante produce ya un sonido suficientemente potente, hay también algunos láseres que no necesitan cavidad resonante, porque su medio activo parece una ganancia muy elevada. Son los láseres super-radiantes como el de  $N_2$  y de  $H_2$ . Los láseres de colorantes bombeados pueden también emitir en forma super-radiante.

Después de considerar el medio activo y el resonador queda el tercer elemento de un láser: el sistema de bombeo o, si se prefiere, de aportación de energía. El bombeo óptico consiste en aportar esta energía en forma de luz, bien de forma continua o por destellos. La luz puede ser ordinaria o proceder de otro láser. El bombeo óptico consiste en aportar esta energía en forma de luz, bien de forma continua o por destellos. La luz puede ser ordinaria o proceder de otro láser. El bombeo puede también consistir en una descarga eléctrica en un choque térmico. Los láseres químicos utilizan la energía desprendida en una reacción química. Incluso puede utilizarse una reacción nuclear, como en los láseres de He.Hg, o el campo magnético engendrado por un haz de electrones libres.

Después de este recorrido en cuanto a la forma de generar un haz láser fijemos la atención en sus propiedades características, que le distinguen netamente de la luz ordinaria y son el fundamento de sus amplias aplicaciones.

Estas propiedades son tres: monocromaticidad, coherencia y direccionalidad.

Quizá en algún momento se nos dijo que en el espectro visible había seis (o siete colores): rojo, anaranjado, amarillo, verde, azul y violeta. O quizá se nos dijo que había tres fundamentales rojo, amarillo y azul, pues el naranja, el verde y el violeta se pueden obtener por mezcla del rojo y amarillo, amarillo y azul, y de rojo y violeta, respectivamente. Pero basta contemplar un paisaje al atardecer para descubrir una gran cantidad de verdes, amarillos o azules.

Si se quiere, se pueden fijar unas fronteras físicas arbitrarias entre los colores, como ésta

Rojo	7800-6220 Å	$3.846 \times 10^{14}$ - $4.823 \times 10^{14}$ Hz	0.098
Anaranjado	6220-5970 Å	$4.823 \times 10^{14}$ - $5.025 \times 10^{14}$ Hz	0.018
Amarillo	5970-5770 Å	$5.025 \times 10^{14}$ - $5.199 \times 10^{14}$ Hz	0.015
Verde	5770-4920 Å	$5.199 \times 10^{14}$ - $6.098 \times 10^{14}$ Hz	0.009
Azul	4920-4550 Å	$6.098 \times 10^{14}$ - $6.593 \times 10^{14}$ Hz	0.034
Violeta	4550-3900 Å	$6.593 \times 10^{14}$ - $7.692 \times 10^{14}$ Hz	0.067
			0.301

en donde se han recogido los intervalos en Angströms (si se desea en nm=nanómetros, divídase por 10), las frecuencias en hertz y el recorrido de cada intervalo en órdenes de magnitud. Ninguno de ellos llega a 1/10 de ondas de magnitud. Recordamos que el orden de magnitud se obtiene tomando el logaritmo decimal del cociente entre el mayor y el menor valor del intervalo. La suma 0.301 corresponde, como ya dijimos a una octava, en lenguaje musical. En efecto  $\log 2 = 0.301030$

La tabla anterior podrá satisfacernos más o menos, pero cualquiera podría discutir en los límites o introducir nuevos colores como un verde amarillento, un amarillo verdoso, un azul celeste o con azul ultramar. La discusión quedaría zanjada definiendo un color por una longitud de onda. Eso sería una luz monocromática. Pero el monocromatismo en física es una de estas idealizaciones que no se cumplan nunca, como cuando se habla del punto material, el sólido homogéneo, el líquido no viscoso, o el gas perfecto. Sencillamente nos acercaremos más o menos a ellos, pero no existen tampoco existe la luz monocromática.

La informática, con estas preciosísimas tecnologías, a que nos tiene acostumbrados ofrece una paleta de colores que codifica con 15 bits (o más). Se pueden pues elegir hasta 32768 colores. No dudamos que la electrónica lo puede engendrar, pero el ojo no los

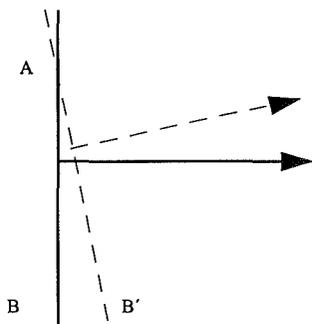
puede distinguir. Aún así, aceptaríamos que se trata de 32.000 colores primos, es decir, monocromáticos. Pues bien, un haz láser puede presentar una anchura de banda de  $1 \text{ Mhz}=10^6 \text{ Hz}$ . Si se divide la anchura del espectro entre este valor, se concluye que en él cabrían 384 millones de luces láser distintos. ¡Todavía no se han obtenido todos! Dicho que no hay teóricamente una luz monocromática, es evidente que nadie discutirá el derecho del haz láser a ser calificado como tal.

Pasemos a hablar de la coherencia. Suele afirmarse que los rayos de luz procedente de dos fuentes distintas nunca pueden interferir. Más bien debería decirse que la eventual interferencia no es observable. En efecto, ya se ha explicado que en la emisión espontánea de distintos átomos, estos emiten trenes de ondas durante un tiempo del orden de  $10^{-8}$  segundos. La fase no puede, pues, mantenerse un tiempo superior a este y solamente con fotocélulas de muy alta capacidad de detección es posible obtener interferencias que aparecen aquí y allí durante  $10^{-8}$  segundos. Con los detectores corrientes es imposible observar estas interferencias. Pero en el láser la emisión del tren de ondas, debido a la emisión estimulada, dura centésimas o décimas de segundo llegando a algunos segundos, lo que permite ajustar las frecuencias entre los láseres diferentes. Nuevamente la imagen musical. Todos hemos oído afinar una orquesta instantes antes del concierto, con esa “la normal” emitiendo de forma prolongada por los distintos instrumentos, que permite las oportunas correcciones si es necesario en alguno de ellos. Imaginemos que en una orquesta los profesores emitieron esa nota brevemente en una fracción de segundo, cada uno cuando quisiera. La afinación sería imposible.

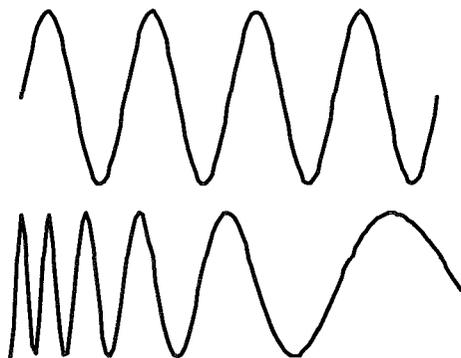
Se suele distinguir entre coherencia espacial y temporal. La ecuación de la onda plana

$$E = E_0 \text{sen} 2\pi \left( \frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T} \right)$$

de las situaciones del campo eléctrico  $E$  de una onda plana de amplitud  $E_0$  en un punto a distancia se da la fuente y en el instante  $t$ . Fijado un frente de onda a distancia  $X_0$ , todos los puntos deben oscilar al unísono al variar  $t$ . Si dos puntos  $A$  y  $B$  de este teórico frente de onda no estuvieran en fase,  $A$  estaría en fase con otro punto  $B'$  y el frente de onda no sería  $AB$  sino  $AB'$ , lo que afectaría a la dirección de haz, perpendicular siempre al frente de la onda plana.



Por consiguiente, la coherencia espacial afecta a la direccionalidad del haz.

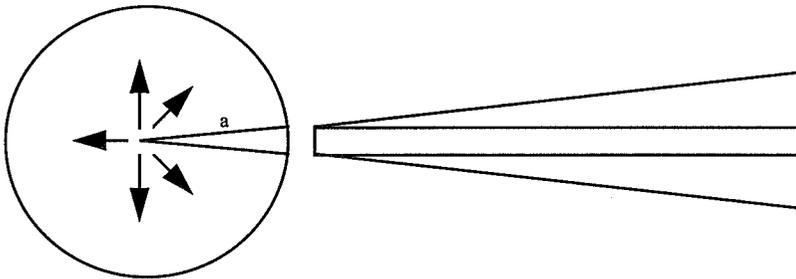


Si en la ecuación de onda se fija un instante  $t_0$  la coherencia temporal exige que  $E(x)$  sea una senoide perfecta. Si esto no es así habrá otros armónicos, que matemáticamente pueden estudiarse con un desarrollo en serie de Fourier y como es natural, esos a co-

respondería a luces de distintos colores. Por tanto, la coherencia temporal afecta a la monocromaticidad del haz.

La tercera propiedad es la direccionalidad del haz láser. Como luz que es, su dirección puede quedar alterada por la falta de homogeneidad del medio en que se propaga, pero en el vacío su desviación respecto al camino ideal de la línea recta es menos de una parte en mil. La divergencia del haz se puede reducir haciéndolo pasar a su regreso por un telescopio. Por eso los láseres se han utilizado para alinear grandes construcciones como túneles, carreteras, ferrocarriles, oleoductos, como en calibres para construir grandes aviones.

Una fuente ordinaria de luz emite ésta en todas direcciones, por lo que la energía se dispersa en el espacio, alcanzando en una esfera.



Por ello, la energía que recibe una parte de superficie a distancia  $a$  de la fuente decrece con el cuadrado de  $a$ , pues la esfera iluminada crece en una misma proporción. No ocurre así con el láser pues su direccionalidad hace que la superficie iluminada reciba prácticamente toda la energía que la fuente ha emitido.

## I. PRINCIPALES TIPOS DE LÁSERES

### 1) Láseres de cristales

Son láseres sólidos bombeados ópticamente. Entre ellos se encuentra el que fue construido en primer lugar por Maiman en 1.960. Era un láser de tres niveles de cristal de rubí rosa. La excitación tiene lugar por la descarga en un tubo neon enrollado en hélice alrededor del cristal. Este puede tener una longitud de algunos centímetros y sus caras extremas, cuyo diámetro es de algunos milímetros, son planas, paralelas y recubiertos de capas muy reflectivas. La luz emitida corresponde al rojo extremo a la temperatura ambiente.

Otro cristal particularmente interesante es el granate de ytrio y de aluminio ( $Y_3 Al_5 O_{12}$ ), abreviada. Y. A. G. contaminado con una pequeña cantidad de neodimio, que es el átomo activo. Es un láser de cuatro niveles que requiere menos potencia de bombeo que el de rubí y cuyo rendimiento puede ser diez veces mayor que éste, alcanzando el 3%. El neodimio emite en el infrarrojo cercano, aproximadamente a  $1 \mu m$ .

Por lo demás la constitución de los láseres de rubí y de Nd: YAG es análogo hasta tal punto que en algunos sistemas son intercambiables la barra de rubí con la de neodimio, con un ligero ajuste de los espejos.

Las energías máximas emitidas son proporcionales al volumen de las barras pudiendo alcanzar 100 J para cada destello del bombeo en los rubíes más grandes (20 cm. de largo por 2 cm. de diámetro) y con 50 J para los mayores de Y.A. G. (10 cm de largo por 2 cm de diámetro).

Por supuesto es necesario que la energía emitida por la fuente de luz de bombeo sea suficiente. La duración de emisión del láser de-

pende de la de bombeo y se puede situar en el orden de algunos milisegundos. Durante este tiempo la intensidad emitida no es uniforme sino que ofrece una serie de pulsos irregulares.

El láser de Nd: Y.A.G. puede funcionar de forma continua gracias a su rendimiento de bombeo relativamente alto. Para ello el bombeo tiene que ser continuo y debe proporcionarse un eficaz sistema de refrigeración tanto para el cristal como para la lámpara. Con grandes cristales se ha podido emitir hasta más cerca de 1 kw en forma continua.

Debe indicarse que los láseres de funcionamiento continuo no emiten, en general, más que una potencia relativamente débil, lo que no es más que una pequeña fracción de la potencia suministrada por el dispositivo de bombeo. La mayor parte de la energía se transforma en calor en el medio activo. Para evitar el calentamiento de éste y sobre todo para obtener durante un tiempo muy corto una potencia liberada más grande, se actúa por impulsos produciendo el bombeo óptico por destellos sucesivos; o mejor, se suprime temporalmente una de las reflexiones, luego se la restablece bruscamente cuando el bombeo ha acumulado una población muy elevada de átomos excitados. Un medio para corregirlo consiste en utilizar un dispositivo electroóptico (una célula Kerr) para impedir o permitir el paso de la luz polarizada. Así se ha podido con láseres de neodimio producir emisiones de más de  $10^{10}$  W (10GW) durante algunos nanosegundos ( $10^{-9}$ s)

Una emisión de este tipo lleva consigo N componentes de modos próximos ciertos dispositivos permiten acoplarlos, lo que transformará N vibraciones independientes de amplitud A (energía  $A^2$ ) en una vibración de duración N veces menor, pero de amplitud NA, y por tanto de energía  $N^2A^2$ . Se consigna así  $10^{13}$  W (10 TW) durante  $10^{-12}$  s. Son los láseres con modos sincronizados o bloqueados (mode locking)

## **2) Láseres de sólidos no cristalizados**

Aunque los medios cristalinos son los más adecuados para corregir materiales amplificadores, presentan el inconveniente de ser difíciles de fabricar en grandes dimensiones. Esto ha conducido a buscar medios no cristalinos, algunos de los cuales han resultado ser buenos medios amplificadores. Uno de ellos es el vidrio con una pequeña cantidad de neodimio. Aunque los umbrales de funcionamiento son, para un tamaño determinado, mucho más elevados que en el Y.A.G., en contrapartida se sabe fabricar con el vidrio láseres de gran volumen (barras de varios metros de largo por 1 m de diámetro). Con estos láseres se obtienen las mayores potencias que la Humanidad sabe producir.

## **3) Láseres de gas**

Aunque no difieren en su esencia de los otros tipos los láseres de gas poseen un cierto número de características que les dan un especial interés. Gracias a la misma naturaleza del estado gaseoso, la excitación se puede obtener por una gran variedad de procedimientos de excitación, que se emplean aislado o combinadamente: descargas eléctricas, expansión, bombeo óptico, reacciones químicas, etc...

La posibilidad de una inversión de la población entre dos niveles cuánticos dependen en gran medida de las velocidades de transferencia de las poblaciones moleculares o atómicas en el conjunto de los niveles del sistema. Estas velocidades están relacionadas, en parte con las interacciones moleculares que, en el caso de los gases depende esencialmente de la frecuencia de los choques y de la naturaleza de las especies moleculares o atómicas. Estos parámetros están en manos del experimentador que puede elegir dentro de grandes límites la temperatura, la presión y la compresión del gas.

La excitación conduce al gas fuera del estado de equilibrio termodinámico, y si se eligen convenientemente los parámetros se produce la inversión de la población entre algunos de los numerosos niveles cuánticos de las especies que constituyen el gas. De hecho se dispone de más de sesenta vapores capaces de emitir varios niveles de rayos espectrales que van del violeta al infrarrojo lejano.

En los gases a baja presión los rayos de emisión tienen un ancho muy reducido, es decir, son muy monocromáticos, y es posible estabilizar la frecuencia de emisión láser dentro de estos rayos con una exactitud inigualada por lo que estos láseres han adquirido mucha importancia en metrología y análisis químico espectroscópico.

La renovación rápida del gas y su homogeneidad permiten obtener, en ciertos casos potencias continuas mucho más importantes que con otros tipos de láseres por lo que tienen abundantes aplicaciones industriales en corte de chapa, fusión de materiales refractarios, microsoldadura, etc.

En resumen, los láseres de gas se caracterizan por el elevado número de frecuencias disponibles, su potencia en funcionamiento continuo y su estabilidad de frecuencia. El efecto láser se obtiene entre los niveles cuánticos de las moléculas de los átomos, o de los iones constituyentes del gas, o del vapor, colocado entre los dos espejos del resonador óptico. Las transiciones entre niveles electrónicos, en estos tres tipos de especies, darán lugar a emisión láser situados generalmente en el ultravioleta y el visible, aunque también alcancen el infrarrojo cercano. Las transiciones entre niveles de vibración y rotación de las moléculas darán lugar a emisiones en el infrarrojo medio y lejano entre los 3  $\mu\text{m}$  y los 300  $\mu\text{m}$ .

Entre los láseres de gas se encontraron los que funcionan por transmisiones electrónicas, que se obtienen por tres medios principales: descarga eléctrica en el gas; iluminación por radiación ultravioleta, dada por una lámpara de destellos; y haz de electrones por

impulsos breves. Los mecanismos de emisión de estos láseres son muy variados y no siempre bien conocidos. El primer láser de gas, descubierto por Javan, y también el primer láser de funcionamiento continuo es el de helio-neón, que emite numerosos rayos situados en el visible y en el infrarrojo cercano, por transiciones electrónicas del Ne excitado por una transferencia de energía a partir del He. Las dos transiciones láser más importantes se sitúan la una en el rojo y la otra en el infrarrojo.

En los láseres de He-Ne (que se construyen actualmente, la tensión de alimentación del tubo es de 1500-2000 V y la constante de algunos decenas de mA. Para evitar contaminación del tubo hay que desgaseificarlo en vacío cuidadosamente). La cavidad óptica está formada por espejos cóncavos ajustables y el tubo termina en ventanas con el ángulo de Brewster para eliminar pérdidas por reflexión. En estas condiciones la luz emitida está polarizada linealmente. Los espejos han de ser de gran reflectividad puesto que se trata de un medio de ganancia relativamente baja (2% por metro). Para los láseres de baja potencia se usa un método más simple; los espejos cierran la cavidad y la ajustan para el tiempo de vida del tubo dando lugar a la luz no polarizada y con potencia de algunos mW.

Otro tipo de láseres gaseosos que funcionan por transiciones electrónicas son los láseres de excímero. La palabra “excímero” es una contracción de las palabras inglesas “excited dimer”, y con ella se designa a una molécula que no es estable más que en un estado electrónico excitado. Un ejemplo lo constituyen los halógenos de gases nobles como el fluoruro de Kriptón KrF o de xenon XeF. La excitación se realiza por una descarga eléctrica o por un haz de electrones en una mezcla de gas noble y de halógeno, como el fluor. El fluor se descompone en átomos, que reaccionan con los átomos de gas noble excitados para formar la molécula de excímero. El efecto láser tiene lugar por las transiciones entre el estado excitado estable y el estado base disociado. Por lo tanto se realiza

muy fácilmente la inversión de población ya que el estado de partida de la transición se despuebla muy rápidamente por disociación de la molécula del halógeno. Esta circunstancia permite a este tipo de láser alcanzar rendimientos de hasta el 10%.

Los láseres de excímero emiten pulsos muy potentes que duran nano-segundos o decenas de nanosegundos en la zona del ultravioleta o cercanos a la misma. Los láseres de excímero comerciales pueden, en general, operar con distintas mezclas de gases para obtener diferentes longitudes de onda.

Dentro de la definición de excímeros tienen cavidad muchos tipos de moléculas, además de los haluros de gas noble como los diversos de gases nobles ( $Xe_2$ ), óxidos de gas noble ( $XeO$ ), algunos estados excitados de moléculas de diatómicas de halógenos ( $I_2$ ), vapores metálicos ( $Mg_2$ ,  $Cd-Hg$ ) y sistemas triatómicos de halógeno y gas noble ( $Xe_2 Cl$ ). De todos ellos los más importantes son los haluros de gas noble y los dímeros de gas noble.

Los láseres de excímero se excitan básicamente por tres métodos: excitación directa con haces de electrones, descargas eléctricas controladas por haces de electrones y descargas eléctricas de pulsos rápidos. La excitación con haces de electrones se utiliza para producir grandes energías del orden de 100 mJ a 300 J por pulso con una duración de pulsos de 20 ns a 1  $\mu s$  ( $2 \times 10^{-8}$  -  $10^{-6}$ ). El rendimiento de este método de bombeo es de un 6%. Las descargas eléctricas controladas por haces de electrones permiten mayores frecuencias de repetición de pulsos. Las descargas eléctricas simples son usadas, generalmente, en los modelos de laboratorio. Van acompañadas siempre de algún tipo de preionización para acondicionar la descarga. Con ellos se producen pulsos de hasta 1 J con una duración de 10-100 ns y un rendimiento del orden del 1%.

Otro tipo de láser de gas que funciona por transiciones electrónicas es el láser de atómico, capaz de proporcionar pulsos de energía importantes. Los ioduros orgánicos del tipo R-I, donde R es un

radical alifático completamente fluorado se descomponen por la radiación ultravioleta de una lámpara de xenón a destellos dando átomos de iodo en un estado electrónico excitado. Estos átomos vuelven al estado base por una transición óptica muy lenta cuando es espontánea pero que da lugar a una emisión láser muy intensa en el infrarrojo cercano. Con este tipo de láser se pueden obtener impulsos que llevan una energía de 60 J en 1ns.

Un grupo importante, diríamos el más importante desde el punto de vista de las aplicaciones industriales, de láseres de gas son aquellos que funcionan por transiciones vibracionales o rotacionales de sus moléculas. No cabe duda que el ejemplo más importante de este tipo es el de  $\text{CO}_2$ , cuyo volumen de ventas es muy destacado por sus aplicaciones industriales. Este láser funciona en base a los niveles vibracionales de la molécula de  $\text{CO}_2$ . En primera aproximación se puede considerar la estructura de la molécula lineal, con el átomo de carbono en el centro y los otros dos simétricamente colocados. La molécula puede vibrar solamente de tres maneras. El primer modo consiste en un movimiento sincrónico de los dos átomos de oxígeno, alejándose o acercándose al átomo central de carbono y manteniendo la simetría respecto al mismo. Se designa por  $v_1$  y se llama vibración de tensión simétrica. En el segundo modo la molécula pierde su estructura lineal plegándose en un ángulo cuyo vértice ocupa el carbono. Se designa por  $v_2$  y se llama vibración de flexión. En el tercer modo se conserva la estructura lineal y los oxígenos se acercan y se alejan al carbono de forma alternada o, lo que es equivalente el carbono oscila entre los dos oxígenos considerados fijos. Es el modo  $v_3$  de tensión asimétrica.

La molécula de nitrógeno  $\text{N}_2$  no posee evidentemente más que un modo de vibración y su primer nivel está muy próximo al primer nivel del modo  $v_3$  del  $\text{CO}_2$ . Una descarga eléctrica en la mezcla gaseosa genera electrones de las moléculas de  $\text{CO}_2$  y  $\text{N}_2$ , que, al volver, excitan sus niveles de vibración. Ahora bien, los modos  $v_1$

y  $v_2$  del  $\text{CO}_2$  se desexcitan por choque mucho más rápidamente que el modo  $v_3$  y el del  $\text{N}_2$ . Por ello tiene lugar una inversión de la población entre niveles del modo  $v_3$  y los de los modos  $v_1$  y  $v_2$ , lo que da lugar a numerosos rayos láser, hacia las  $10\mu\text{m}(=10^{-6}\text{m}=10^4\text{ \AA})$ . La potencia de este tipo de láser se aumenta notablemente si se añade He a la mezcla. El helio tiene un doble papel: desexcita por choque molecular los niveles de los modos  $v_1$  y  $v_2$  y favorece la evacuación del calor hacia las paredes del tubo gracias a su gran conductibilidad térmica. Este tipo de láser tiene un excelente rendimiento, alrededor del 20% y su potencia de emisión puede alcanzar corrientemente 20kW en modo continuo. Se han alcanzado potencias del orden de 500kW por expansión del gas previamente calentado a alta temperatura. La expansión en una tobera “congela” la excitación vibracional, mientras que la temperatura de traslación baja mucho. Se obtiene así un considerable desequilibrio termodinámico. A estos láseres se les llama láseres dinámicos de gas.

En el interior de cada rayo del láser de  $\text{CO}_2$  la zona de sintonización de la emisión láser es pequeña, del orden de unos  $10^7$  Hz, pues la presión del gas no es bastante fuerte para ampliar las rayas por colisiones moleculares. Para ciertas aplicaciones, especialmente en espectroscopia es útil ampliar esta zona de sintonía aumentando la presión del gas. Sin embargo, en régimen continuo, una descarga eléctrica en un gas con presión elevada desprende mucho calor que destruye las condiciones necesarias para establecer una inversión de población. No obstante, la evacuación de este calor se puede realizar por las paredes del tubo láser de sección muy estrecha, del orden del milímetro cuadrado. Estos láseres se llaman láseres capilares o láseres guías de onda. Los láseres guías de onda han permitido una banda de sintonía que va hasta  $10^9$  en cada raya.

La excitación puede obtenerse por descargas eléctricas muy breves y muy intensas en el gas a presión atmosférica, entre electrodos distantes algunos centímetros y colocados longitudinalmente en el

tubo. Este tipo de láser, el láser T.E.A. (Transversely excited atmospheric láser) es capaz de proporcionar impulsos de algunos nanosegundos con una potencia de varios vatios, alcanzando la potencia punta de  $10^{10}$  vatios. Estas características compiten con los de los láseres sólidos de neodimio.

Como consecuencia de la presión elevada utilizada en el láser TEA, la zona de sintonía en frecuencia puede alcanzar  $10^{10}$  Hz en cada raya. Incluso ha sido posible utilizar presiones que van hasta 20 atmósferas. En estas condiciones, las diversas transiciones de vibración-rotación son suficientemente anchas para que se solapen completamente y la emisión láser pueda ser sintonizada en cualquier longitud de onda entre 9 y 13  $\mu\text{m}$ .

Ciertos láseres moleculares de agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ) o de ácido cianhídrico (HCN) emiten en el infrarrojo lejano. Son excitadas igualmente por descargas eléctricas. Su tecnología y sus principios de funcionamiento son parecidos a los de  $\text{CO}_2$ . No obstante, su potencia es muy inferior.

#### 4) Láseres químicos

Los láseres químicos constituyen una categoría de láseres cuyo estudio ha sido objeto de un gran número de trabajos. La energía necesaria para el funcionamiento del láser es proporcionada por una reacción química que tiene lugar en el seno de una mezcla gaseosa en el tubo láser. Los productos de la reacción son excitados por encima de sus niveles de vibración y pueden dar lugar al efecto láser, bien directamente, bien por intermedio de otra molécula como la de  $\text{CO}_2$ . Con frecuencia es necesaria la aportación de una energía eléctrica para preparar la reacción, por ejemplo para formar átomos de oxígeno a partir del oxígeno molecular. Un ejemplo de láser químico es el láser de ácido fluorhídrico (HF), cuyo principio es el siguiente:

Por medio de una descarga eléctrica o de un destello luminoso, se desencadena la reacción en una mezcla de hidrógeno y flúor a baja presión, por disociación de los átomos de flúor e hidrógeno. Estos son comúnmente refrigerados por las reacciones :



Las moléculas de ácido fluorhídrico se forman en estados vibracionales excitados y dan lugar al efecto láser entre dos niveles de vibración.

También se ha podido hacer funcionar láseres con moléculas de ácido clorhídrico HCl y de Fluoruro de Denterio (DF), por una reacción puramente química, sin aportación de energía eléctrica. Se han alcanzado así potencias de 2MW.

## 5) Láseres de colorantes

Por diversas razones los líquidos no han resultado ser buenos amplificadores láser, con la notable excepción de los colorantes orgánicos. Estos presentan, además el gran interés de ser sintonizables, de manera que se puede, a diferencia de la mayor parte de los otros láseres, ajustar la longitud de onda de emisión en una amplia zona. Descubiertos en 1966, estos láseres han revolucionado los métodos de espectroscopia, tanto por sus características como por las nuevas técnicas que han permitido implantar.

Los colorantes vienen disueltos en disolventes líquidos donde se excitan por emisión de luz. Con frecuencia, las moléculas de colorantes tienen un gran número de átomos lo que hace que su espectro de emisión o de absorción sea enormemente complejo. Esencialmente, constituye un láser a cuatro niveles si bien entre los dos superiores y los dos inferiores existe un espectro casi continuo de niveles de energía. El efecto láser se produce entre los dos niveles centrales ; la vida de las moléculas en el superior es extremadamente corta, del orden de los picosegundos ( $10^{-12}$  s) y en el inferior de

algunas decenas de nanosegundos ( $10^{-9}$  s). Como promedio la emisión corresponde a diferencias de energía más pequeña que para la absorción y por consiguiente la emisión se encuentra desplazada respecto a la absorción, hacia mayores longitudes de onda. Así la emisión láser no se obtiene más que para longitudes de onda que no son reabsorbidas por las moléculas.

Como en los demás láseres la oscilación se obtiene encerrando el medio amplificador en una cavidad óptica resonante. Como la emisión puede tener lugar en un intervalo espectral bastante grande, de hecho se sintoniza la frecuencia óptica para la que la curva de ganancia presenta un máximo. La anchura de frecuencia de la curva de fluorescencia es de naturaleza esencialmente homogénea, lo que se traduce por una tendencia de las moléculas emisoras a cooperar y, por consiguiente, conduce a que la mayor parte de la energía de excitación almacenada sea restituida en una raya de emisión única. Para desplazar esta frecuencia basta modificar la curva de ganancia utilizando, por ejemplo, elementos dispersivos en el interior de la cavidad, como prismas o redes, o también filtros birrefringentes.

Estos osciladores láser funcionan unos por impulsos y otros por régimen continuo. Los primeros son excitados bien por lámparas de destellos, bien por láseres pulsados de rubí, de neodimio, de nitrógeno, de excímero, los segundos son bombeados por láseres continuos de gas ionizado, agua o kriptón.

La mejora continua de las características de estos láseres ha conducido a un desarrollo tecnológico reciente de láser de colorante continuo en anillo, en el que se tiene sólo ondas estacionarias, pero con una onda progresiva a la que se obliga a seguir un sentido de propagación. Los desarrollos más prometedores se refieren a la investigación de colorantes nuevos que permitan ampliar la gama de longitudes de onda ya disponible y que se extiende continuamente desde el ultravioleta cercano (340nm) hasta el infrarrojo cercano (1000nm).

Las familias de colorantes son muy numerosas y sus potencias luminosas son muy variables según los tipos de láseres, los colorantes, los disolventes, las disoluciones, las intensidades de bombeo, etc. Se ha podido obtener con los colorantes más eficaces, como la rodamina 6G hasta un 30% de conversión de la energía de bombeo.

Una variedad particularmente interesante de láseres de colorantes funcionando por impulsos es la constituida por láseres de modo acoplados que proporcionan trenes de impulsos separados por el tiempo de ida y vuelta en la cavidad, en los que cada impulso tiene una duración del orden del picosegundo ( $10^{-12}$ s). Tales láseres de picosegundos de colorantes funcionando en régimen continuo así como en excitación periódica se adaptan particularmente a las experiencias de espectroscopia resuelta en tiempo y, de manera general, a los estudios de fenómenos en relajación muy rápida. Con láseres de este tipo y cavidad en anillo se han obtenido impulsos de 70 femtosegundos ( $=10^{-15}$ s)

## 6) Láseres con centros de calor

Aunque los principios que presiden la obtención de una inversión de población sean muy específicos en el caso de cristales que presentan centros brillantes, se pueden encontrar numerosas analogías con las moléculas de colorantes orgánicos. Se trata, en concreto, de sistemas a cuatro niveles ; además, la naturaleza del ensanchamiento de la banda de emisión (luminiscencia) es esencialmente homogénea. Las potencias luminosas necesarias para el bombeo de estos láseres son relativamente modestas, alrededor de treinta veces menos que las exigidas para los colorantes más eficaces, teniendo en cuenta las pérdidas en el resonador, se ha llegado a tasas de conversión de onda del 2 o 3 %.

Los centros brillantes (o centros F, del alemán Farbzentrum), que dan lugar a una oscilación láser continua y sintonizable en una

amplia banda espectral, se crean en los cristales de halogenuros alcalinos, dopados por iones extraños constituidos por otro metal alcalino. Los ejemplos más típicos vienen dados por cristales de cloruro de potasio dopado con litrio o con sodio, o incluso por cristales de cloruro de rubidio dopado con litrio o con sodio. Los centros F, de los que se trata provienen todos del hueco de un anión en el cristal, hueco en el que se atrapa un electrón. El electrón así fijado se puede excitar ópticamente por absorción de un fotón. No obstante, el sistema en este estado excitado es frecuentemente inestable y se relaja muy rápidamente (en algunos picosegundos) hacia un estado de energía inferior, que corresponde a una redistribución geométrica de los iones alrededor del hueco, por tanto sin emisión luminosa; en configuración relajada, emite un fotón que le desexcita y provoca de nuevo una redistribución de los iones en torno al hueco que le conduce de forma no radiante al estado fundamental.

Según la naturaleza del centro F es posible o no observar una inversión de población eficaz entre los niveles de configuración relajada y obtener una ganancia sobre esta transición. Hay centros con dos huecos que son las únicas que dan efecto láser. Se distinguen centros Fa y Fb según que uno o dos de los seis iones metálicos que rodean el hueco sea extraño. Se obtienen centros tipo B dopando más frecuentemente el cristal.

Con carácter general, la tecnología de estos láseres es muy parecida a la utilizada para los láseres de colorantes. Cubren la zona de 2 ó 3  $\mu\text{m}$  en el infrarrojo cercano pero se espera amplificarla desde 0.9 a 4  $\mu\text{m}$ .

## **7) Los diodos láseres de semiconductor**

Los semiconductores se distinguen de otros medios activos en que presentan transiciones entre los estados ligados (banda de valencia) y los estados libres (banda de conducción).

Se han utilizado numerosos métodos de bombeo para obtener una excitación estimulada a partir de semiconductores, bien se trate de una excitación óptica o de un bombeo electrónico, o incluso de una excitación por inyección de una corriente en una unión P-N polarizada eléctricamente, etc. En un semiconductor existe la banda de valencia y la banda de conducción, separadas por una banda prohibida de valor  $E_g$ . En el equilibrio sólo la banda de valencia está poblada de electrones, estando vacía la banda de conducción. Bajo el efecto de una excitación cualquiera, un cierto número de electrones pasan a la banda de conducción. A una temperatura no nula, el reparto de portadores de cargas (agujeros y electrones) tienen tendencia a diluirse en el material, pero es posible, suponiendo que los portadores de cargas de una banda determinada, estén en equilibrio térmico unos con otros, encontrar conductores para los que sea posible la emisión estimulada.

Consideremos, por ejemplo, una unión p-n. Si se aplica al sistema una tensión de polarización conveniente  $V_0$ , se reduce la barrera de potencial: electrones de la zona n pueden pasar a la zona p, donde efectúan una transición hacia un nivel vacío de la banda de valencia emitiendo un fotón de energía próxima a  $E_g$  (o inferior debido a las impurezas). Se puede tener así una emigración de los agujeros hacia la región n y una recombinación con los electrones, estando determinado el proceso predominante por las densidades relativas de impurezas, por la duración de vida de los portadores y por sus movilidades.

Pero en uno u otro caso se pueden encontrar, para un potencial de polarización  $V_0$  bastante grande una región activa en la proximidad de la unión que presenta una inversión de población. Como esta región es generalmente muy delgada, se obtendrá una ganancia luminosa máxima en un recorrido razonable, en el plano de la unión propiamente dicha. De ahí la estructura geométrica de la cavidad láser correspondiente a un diodo láser; las caras del cristal están pulimentadas y forman los espejos de la cavidad. En general,

las dimensiones de la cavidad son tan pequeños (algunas centenas de  $\mu\text{m}$ ) que no pueden oscilar más que un modo. El ámbito de oscilación está fijado "grosso modo" por la composición del cristal ; el barrido continuo y fino de la frecuencia queda asegurado generalmente, sea por variación de la corriente de polarización, sea por variación de la temperatura. Estos sistemas funcionan tanto en régimen pulsado como en régimen continuo.

Actualmente permiten cubrir la región del rojo (unos 0.7  $\mu\text{m}$ ) hasta el infrarrojo medio (unos 35  $\mu\text{m}$ ) pero no proporcionan más que potencias luminosas relativamente bajas, desde algunas decenas a algunas centenas de mW solamente.

Para terminar esta breve presentación, que no pretende su exhaustiva de los principales tipos de láseres, citemos los láseres de electrones libres y los láseres de rayos X. En los primeros es el medio átomo un haz a electrones que son frenados por la acción de un campo mayoritario alternativo. Se produce así un frenado de los electrones, con lo que estos se excitan y emiten la clásica radiación de frenado (Bremsstrahlung). Con ellos se consigue hacer láser de de kilovatios, que se han empleado ampliamente con fines militares.

Los láseres de rayos X son actualmente objeto de importantes investigaciones. Ya se ha comentado la dificultad creciente que se encuentra para lograr la inversión de población cuando se pretende generar radiaciones de elevada frecuencia, como es el caso de los rayos X. Estos láseres se caracterizan por su buena capacidad para interactuar con la materia, por lo que son utilizados en el campo de la energía nuclear, como medio para lograr la función nuclear por confinamiento inercial.

Detenemos aquí nuestro recorrido por los distintos tipos de láseres que pueda pecar de poco sistemático, pero habrá que esperar que se calme la carrera de una investigación galopante en busca de

menos medios activos, nuevos métodos de bombeo nuevas características, nuevas capacidades, etc.. Será entonces cuando se perfile una metodología para el estudio de los láseres, y una tipología bien estructurada.

Entre tanto, se puede hacer un estudio de síntesis de sus principales aplicaciones. Como se ha visto, la luz producida por los láseres es, en general mucho más monocromática, direccional, potente y coherente que la procedente de cualquier otra fuente humana. No obstante, los tipos particulares de láseres se diferencian muchísimo en estas propiedades, así como en su longitud de onda, tamaño y rendimiento. No hay un único láser adecuado para todos los fines, pero combinando sus propiedades se puedan lograr cosas que crean difíciles o imprescindibles de corregir antes que los láseres se desarrollaran.

Un haz visible continuo precedente de un láser que utilice un gas tal como la combinación He-Ne, proporciona una línea recta casi ideal, para todo tipo de aplicaciones de alineamiento. El haz procedente de dicho láser diverge menos de una parte en mil. Esta propiedad se ha utilizado para alinear grandes construcciones, guiar máquinas perforadoras de túneles y para colocar oleoductos. Se usa también el láser para alinear calibres en la construcción de grandes aviones a reacción.

Un haz pulsante se puede utilizar como radar luminoso, a veces llamado LIDAR y la estrechez de su haz permite una definición exacta del objetivo. De la misma manera que con el RADAR se mide la distancia a un objeto por el tiempo empleado en ir y volver al mismo, ya que se conoce la velocidad de la luz. Los ecos del LIDAR han vuelto desde la luna, facilitando por un reflector multi-prisma colocado por los primeros astronautas. Ahora se pueden medir las distancias desde un observatorio terrestre al espejo lunar con una incertidumbre de Grauw. Por medidas simultáneas de la distancia y dirección entre dos observatorios en diferentes partes de

la Tierra, se puede obtener un valor exacto de la distancia entre los dos observatorios. Una serie de tales medidas puede dar información sobre la velocidad a que un continente se desplaza con respecto a otro.

Un radar de láser dirigido verticalmente desde un avión hacia abajo puede servir como instrumento rápido para determinar la altura del avión o para representar pequeños detalles, como los bordes de los grados de un campo de fútbol o el tejado de una casa.

Con un radar de láser pulsado se pueden obtener ecos producidos por partículas de polvo o por moléculas de aire a grandes alturas. Se pueden medir las densidades del aire e incluso se consigue dibujar sus corrientes. Un sencillo LIDAR puede servir para medir la altura de la carga de nubes sobre los aeropuertos.

La alta coherencia de una salida láser es muy útil para medir y otras aplicaciones que impliquen interferencias de haces de luz. Si un haz se divide en dos partes, éstas pueden recorrer caminos diferentes y cuando los haces se reúnen de nuevo pueden encontrarse en fase o en oposición, dando lugar a interferencias constructivas o destructivas. Así, el resultado de los nodos combinados para dar luz o sombra cuando la diferencia de los caminos recorridos cambia en media longitud de onda, permite gran precisión en la medida de longitudes. Tales dispositivos se llaman interferómetros de láser. Se pueden detectar desplazamientos muy pequeños y se pueden medir con precisión grandes distancias. Los interferómetros láser se están utilizando para monitorizar pequeños desplazamientos de la corteza terrestre a través de fallos geológicos. En fabricación los interferómetros láser se están utilizando para calibrar finos alambres, monitorizar los productos de las máquinas herramientas automáticas y ensayar componentes ópticos.

Los láseres pueden ser tan monocromáticos que se puede detectar un pequeño desplazamiento en la frecuencia de la luz. La luz reflejada por un objeto que se mueve respecto a la fuente es au-

mentada o disminuida según que la velocidad del objeto sea de acercamiento o alejamiento (efecto Doppler). Para un objeto que se aleja, la frecuencia desciende. En todo caso, la luz original y la reflejada en un fotodetector se observa una señal a frecuencia diferente, es decir, la diferencia de frecuencias entre la luz original y la reflejada. Con ello se pueden medir pequeñas velocidades.

Se puede construir un láser cuya luz viaje alrededor de un anillo cuadrado o triangular. Las ondas se generan para que recorra el anillo en ambos sentidos. Si el anillo está en reposo, las ondas tienen la misma frecuencia, pero si gira, la diferencia de frecuencias es proporcional a su velocidad de giro. Así el anillo láser puede funcionar como los giróscopos para detectar rotaciones, a pesar de no tener partes mecánicas.

El brillo y la coherencia de la luz láser la hacen especialmente adecuada para efectos visuales y fotografía, que simula la tercera dimensión en profundidad, por ejemplo, en holografía.

La luz de muchos láseres es relativamente potente y se puede enfocar pro un sistema de lentes convencional en una pequeña zona de gran intensidad. Así con láser pulsado moderadamente intenso, puede vaporizar una pequeña cantidad de cualquier sustancia y perforar estrechos agujeros en los más duros materiales. Por ejemplo, láseres de rubí se utilizan para perforar diamantes para matrices de estirado de alambre y un zafiro para conjuntos de relojes. En investigación biológica, un haz finamente enfocado puede vaporizar partes de una determinada célula, permitiendo así microcirugía de cromosomas. Pequeñas manchas, a muy poca distancia, pueden crearse una película opaca para recoger información para grandes memorias de computador o para registros musicales como los discos compactos.

Los efectos de calentamiento producidos por un haz láser pulsado son altamente selectivos y extremadamente rápidos. Así, se puede quitar la tinta de papel, haciendo posible un borrador láser.

La tinta absorbe la luz láser, se vaporiza y quema, mientras que el papel no queda afectado.

Se puede lograr un fuerte calentamiento con láser en un lugar donde no sea posible ningún contacto mecánico. Así, una de las primeras aplicaciones de los láseres fue para corregir de la retina del ojo. Se están investigando otras aplicaciones quirúrgicas con el uso de grandes láseres.

Los láseres se usan también para corte y soldadura en gran escala. Pueden ajustar resistencias a valores exactos, eliminado material, y pueden alterar las conexiones dentro de conjuntos integrados de elementos de microcircuitos.

Un pulso de luz de un láser puede vaporizar una muestra de una sustancia para su análisis por instrumentos adecuados. Por este método se puede analizar una muestra extremadamente pequeña, sin introducir contaminantes.

El elevado brillo, pureza de color y direccionalidad de la luz láser la hacen idealmente adecuada para experimentos sobre dispersión de la luz. Incluso pequeñas cantidades de luz que sea dispersada con un cambio de longitud de onda o dirección, se puede identificar con precisión. En particular, un tipo de dispersión conocido como efecto Raman, produce un desplazamiento característico de la longitud de onda, por lo que se puede identificar la presencia de especies moleculares. Con fuentes láser y espectrografía sensible, se pueden analizar pequeñas muestras de líquidos, gases o sólidos transparentes. Es incluso posible medir contaminantes en la atmósfera a considerable distancia por dispersión Raman de la luz de un haz láser.

Los haces láser se pueden usar para telecomunicaciones. Como la frecuencia de la luz es tan elevada, la intensidad se puede alterar rápidamente para codificar señales muy complejas. En principio un haz láser puede llevar miles de canales de radio y decenas de cana-

les de televisión. No obstante, la luz láser puede quedar interrumpida por lluvia, niebla o nieve, de manera que para tener en la Tierra comunicación fiable, hay que encerrar el haz láser en tubos protectores. Entretanto, los láseres son útiles para comunicaciones de fines específicos. Para comunicaciones a largas distancias, a través del espacio exterior, la gran direccionabilidad del haz láser utiliza con eficacia pequeñas cantidades de potencia.

Algunos láseres, sobre todo los de elevada potencia de dióxido de carbono y de estado sólido, producen haces tan potentes, que pueden provocar daños graves, incluso a gran distancia. Estos tienen que funcionar sólo cuando no encuentren en su camino materiales inflamables y cuando no haya posibilidad de que alguien sea alcanzado por el haz.

No obstante, la mayor parte de los láseres en uso son tipos de baja potencia, tales como los láseres de He-Ne, ampliamente usados para alineación y medida. La intensidad de la luz láser no es suficientemente elevada para causar daños directamente, pero como es un haz altamente direccional, su luz se puede concentrar por enfoque sobre un punto reducido. En concreto, el cristalino con la colaboración de las gafas, pueden enfocar la luz láser sobre una parte de la retina fuertemente iluminada y puede dañar en ella al tejido sensible. Los láseres pulsados son más traicioneros debido a su elevada intensidad de punta y por que no hay oportunidad de reaccionar ante un fognazo repentino.

El riesgo es menor cuando la luz de un láser de funcionamiento continuo se usa para iluminar una superficie difusa. La luz dispersada por el objeto se reparte en todas direcciones y a distancia razonable puede recoger sólo una pequeña fracción de la luz.

El uso del láser, como el de cualquier otra herramienta, tiene sus riesgos que pueden y deben minimizarse mediante adecuadas medidas de seguridad y sistemas de funcionamiento. Los láseres de potencia están reglamentados en muchos campos.

Volviendo la vista hacia atrás, cabe formularse una pregunta en busca de una síntesis: ¿qué nos ofrece el láser para ser tan útil? La respuesta puede ser muy concisa: una geometría muy precisa y una potencia muy concentrada. Uno y otro objetivo les ha perseguido la Humanidad desde la revolución del Neolítico, 7000 años antes de nuestra Era. Basta recorrer las salas de cualquier museo para descubrir que, tanto en objetos de adorno como en aquéllos de uso práctico las sucesivas civilizaciones han buscado una mayor finura en la construcción.

La vuelta a la tosquedad se ha considerado siempre como un retroceso cultural, mientras que la precisión en el diseño y en la construcción son exponentes de la maestría con que el hombre ejecuta su propia obra. Para conseguirlo, se buscó la dureza de los útiles. Se partía del principio que lo constante tenía que ser más duro que lo cortado. Se inició el proceso con la piedra, que resultó adecuada para cortar la madera. Para tallar la piedra, se utilizó la propia piedra. Sacando ventaja de la fractura natural que llevaba consigo los materiales exfoliables. El cobre, el oro, la plata y el estaño resultaron ser demasiado blandos. Sin embargo, el descubrimiento del bronce, supuso un avance notable; le siguió el hierro y, mucho después, el acero. Piedras duras y conglomerados de carburos metálicos se pusieron en cabeza de este empeño para conseguir un corte preciso y minucioso.

Pronto se percibió que lo que costa no es la materia, sino la energía, siempre que ésta esté suficientemente concentrada. Y el esfuerzo por concentrar la energía es también tan antiguo como la Humanidad. ¿Qué perseguían, si no, las delicadas puntas de flecha del paleolítico? Se sabía muy bien, por experiencia directa, y siglos antes de que los conceptos físicos de fuerza y precisión, estuvieran distinguidos, que un palo no penetraba en el cuerpo del animal a cazar, aún con un esfuerzo notable. Pero al dotarlo de una punta de flecha hecha de piedra, el golpe era penetrante y por tanto eficaz. Y

en este esfuerzo se llega al microlitismo. Hachas y espadas con sus agudos filos persiguieron el mismo objetivo: penetrar y partir.

Pues bien, hoy se ha conseguido un nivel de concentración energética impensable, superior al que existe en la superficie solar:  $10^{16}$  W/cm<sup>2</sup>. Y esto se ha logrado con la realidad física más dulce, más amable, más acariciante, más inocente, menos violenta, que es la luz. No es la potencia incontrolada de la bomba que estalla, sino la potencia dirigida, canalizada, enfocada, orientada, de lo que fue un primer exponente el arma de fuego, cuyo cañón dirigía los efectos de una explosión relativamente modesta y que, de otro modo, hubiera resultado muy ineficaz.

Se ha hablado con frecuencia de la impresionante cantidad de energía generada por ese gran reactor nuclear, que es el Sol. Si su misión fuera sólo calentar a los habitantes y los seres vivos de la Tierra ¡qué despilfarro! Basta imaginar la superficie de una esfera de 150 millones de kilómetros de radio recibiendo ese caudal de energía, que sólo aprovecha una bolita de algo más de 6000 km de radio. Pero si esa energía se convirtiera en un haz láser direccionado hacia nosotros, la Tierra desaparecería en una fracción de segundo.

Cuando se reflexiona sobre esta realidad surge inevitablemente la pregunta ¿qué se ha hecho con la luz para transformarla de esta manera? Si se piensa que solamente concentrarla, se está en un error conceptual básico. Una lupa concentra la luz y, por ello puede quemarse un papel situado en su foco, bajo la luz del sol. Es mucho más lo que se ha hecho. La ciencia ha sido capaz de poner orden en la luz. Es un paso muy parecido al que se dio al inventar las máquinas térmicas, es decir las que permitieron convertir el calor en movimiento. Pero el calor es movimiento; movimiento de agitación desordenada de las moléculas. El reto consistía en poner orden, en conseguir que las moléculas cooperaran en su movimiento para que éste se manifestara macroscopicamente. Y así fue cuando todas las

moléculas de la tapa de la marmita se levantaron conjuntamente. Ese fue el primer paso, si dejamos aparcado el artilugio de los griegos. El avance fue rápido y Watt consiguió sacar del caos de la agitación molecular del vapor de agua, el giro ordenado de las moléculas que constituían el volante de su máquina.

Algo parecido se ha hecho en nuestro siglo con el gas de fotones: se les ha impuesto un orden, se les ha obligado a cooperar. Si los fotones pudieran pensar quizá serían felices al descubrir que la unión hace la fuerza y que esas partículas sin masa, pero portadoras de energía, hayan llegado a ser las grandes protagonistas en el esfuerzo por canalizar y dirigir la energía.

Dixitque Deus: Quiat lux. Et facta est lux

Y digo Dios: hágase la luz. Y la luz fue hecha.

Era el primer día. Las grandes luminarias del cielo no estaban todavía encendidas. Quizá aquella bola primitiva del big bang era sólo luz.

Et vidit Deus lucen quod esset bona

Y vio Dios que la luz era buena...y los hombres también lo hemos visto