

TEMAS 60

INVESTIGACION
Y CIENCIA

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

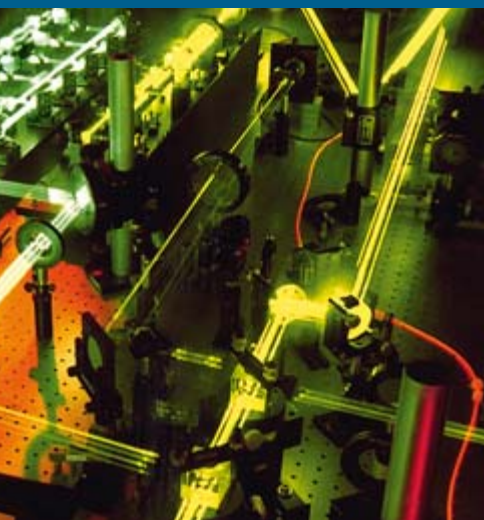
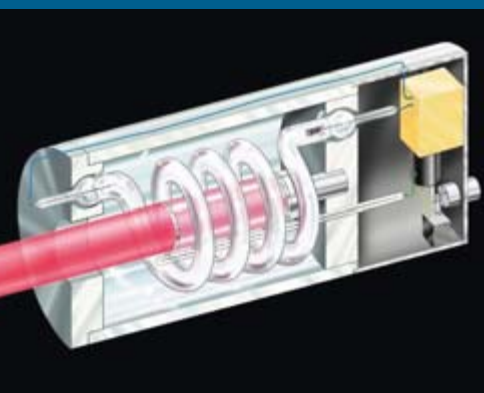
www.investigacionyciencia.es

6,50 EUROS

FISICA Y APLICACIONES DEL LASER



2º TRIMESTRE 2010



3 PRESENTACION

- 4 INTRODUCCION
¿Qué es un láser?
Alexander Müller

INVESTIGACION BASICA

- 10 **El espectro del hidrógeno atómico**
Theodor W. Hänsch, Arthur L. Schawlow y George W. Series
- 26 **Interacción de la radiación láser con los materiales**
Carmen Ortiz
- 34 **Trampa de láser para partículas neutras**
Steven Chu
- 42 **Luz extrema**
Gérard A. Mourou y Donald Umstadter
- 48 **Reglas de luz**
Steven Cundiff, Jun Ye y John Hall

APLICACIONES TECNICAS

- 56 **La técnica de los discos compactos**
Alan D. Bell, Robert L. Gunshor y Arto V. Nurmikko
- 66 **Tijeras y pinzas de láser**
Michael W. Berns
- 72 **Láseres de silicio**
Bahram Jalali
- 80 **Láseres ultralargos**
Juan Diego Ania Castañón

IDEAS APLICADAS

- | | |
|----------------------------------|---------------------|
| 88 Lectores de códigos de barras | 94 Fibras ópticas |
| 90 Vídeos de alta definición | 95 Impresoras láser |
| 92 Cirugía ocular con láser | 96 Hologramas |

Los orígenes del láser: una solución en busca de un problema

Hace cincuenta años, el 16 de mayo de 1960, Theodore Maiman, de los Laboratorios de Investigación Hughes, consiguió fabricar el primer láser operativo. El logro ponía fin a una carrera que había ocupado a investigadores y laboratorios durante varios años. Si bien es cierto que la aparición del láser marcó el inicio de una nueva era científica y técnica, sus orígenes, al igual que los de tantos otros hitos científicos, no se dejan circunscribir a una fecha concreta o a un único protagonista.

Según la versión de los Laboratorios Bell, el acontecimiento clave se remonta a 1958. En diciembre de ese año aparecía en *Physical Review Letters* un artículo en el que Arthur L. Schawlow y Charles H. Townes (investigador y asesor de los Laboratorios Bell, respectivamente) sentaban los principios de un hipotético amplificador de luz basado en el fenómeno de emisión estimulada de radiación. Los autores solicitaron entonces la patente del dispositivo, al cual bautizaron como “máser óptico” (el nombre se debía a una técnica previa para la amplificación de microondas). La licencia, sin embargo, no les sería adjudicada hasta 1960.

Por aquel entonces, Gordon Gould, estudiante de doctorado de la Universidad de Columbia, en Nueva York, ya había desarrollado sus propias ideas para la fabricación de un láser. Su trabajo data de 1957, como demuestra el registro notarial que hizo de sus apuntes, donde acuñaba el término “láser” como acrónimo de *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*. En un principio Gould no solicitó la patente, convencido de que antes debía fabricar un modelo experimental. Cuando lo hizo, en 1959, la Oficina de Patentes estadounidense ya se hallaba deliberando sobre la solicitud de los Laboratorios Bell. Habrían de transcurrir veinte años de amargas disputas hasta que Gould lograra la adjudicación de varias licencias relacionadas con el invento.

En su artículo, Schawlow y Townes proponían la idea de disponer espejos en los extremos de una cavidad en la que un medio óptico previamente excitado emitiría luz. La radiación se reflejaría sucesivamente en los espejos, con lo que todos los fotones se alinearían en una misma dirección. Además, el tamaño de los espejos y de la cavidad podría ajustarse para seleccionar una única frecuencia de emisión.

Theodore Maiman fue uno de los lectores del artículo que decidió comprobar la viabilidad de la idea. Eligió un cristal de rubí como medio óptico y lo emplazó entre dos espejos de plata. Para conseguir la excitación en el cristal, dispuso a su alrededor una potente lámpara de destellos. El dispositivo funcionó. Por fin, el láser se había convertido en algo más que un proyecto teórico basado en un postulado sugerido por Albert Einstein en 1917.

Decepcionados, los Laboratorios Bell no tardarían en ponerse manos a la obra. Al poco tiempo mejoraron el prototipo de Maiman con la fabricación de un láser que operaba de manera continua en vez de pulsada.

Con independencia de su polémico origen, la aparición del láser desencadenó una avalancha de patentes e innovaciones que aún continúa a día de hoy. Su importancia no pasó desapercibida: en 1964, el premio Nobel de Física fue a parar a manos del mismo Townes y de Nicolay G. Basov y Aleksandr M. Prokhorov, del Instituto Lebedev de Moscú, por sus contribuciones al máser y el subsiguiente desarrollo del láser.

El énfasis del Nobel de 1964 recayó en el trabajo fundamental en el campo de la electrónica cuántica y en las nuevas posibilidades que ofrecía el láser para el estudio de la interacción entre radiación y materia. Algo muy cierto, como demostrarían los posteriores galardones concedidos a Schawlow en 1981 por sus aportaciones al desarrollo de la espectroscopía láser [véase “El espectro del átomo de hidrógeno”, por T. W. Hänsch, A. L. Schawlow y G. W. Series, en *este mismo número*], a Steven Chu en 1997 por el desarrollo de métodos para enfriar y atrapar átomos con luz láser [“Trampa de láser para partículas neutras”, por S. Chu] y, en 2005, a Theodor W. Hänsch y John L. Hall por sus contribuciones a la teoría cuántica de coherencia óptica y al desarrollo de la espectroscopía de precisión basada en láser, incluyendo la técnica de peines de frecuencia óptica [“Reglas de luz”, por S. Cundiff, J. Ye y J. L. Hall].

Sin embargo, lo que la Comisión Nobel no llegó a intuir en 1964 fue el enorme potencial práctico del láser, cuyo logro llegó a describirse en 1960 como “una solución en busca de un problema”.

A día de hoy, los láseres, ya sean semiconductores del tamaño de un grano de arena o construcciones del tamaño de un edificio, se emplean en cientos de aplicaciones: desde cortar y soldar metales hasta sanar el tejido ocular, leer códigos de barras o grabar y reproducir discos compactos [véase “Tijeras y pinzas de láser”, por M. W. Berns; “La próxima generación de discos compactos”, por A. D. Bell, y “Lectores de códigos de barras”, por M. Fischetti, *entre otros*]. La transmisión con láser de datos por fibra óptica ha revolucionado las telecomunicaciones [“Fibras ópticas”, por J. MacChesney, y “Láseres ultralargos”, por J. D. Ania Castañón] y es probable que no tarde en llegar el día en que los láseres semiconductores transformen radicalmente el mundo de la computación [“Láseres de silicio”, por B. Jalili].

Sirva esta compilación de artículos publicados en *Investigación y Ciencia* para celebrar el quincuagésimo aniversario de tan revolucionario invento.



¿Qué es un láser?

El primer láser operativo se construyó en 1960. Desde entonces, se han desarrollado una infinidad de láseres diferentes con miras a las más diversas aplicaciones. A pesar del enorme progreso técnico, los principios básicos de estos amplificadores de luz siguen siendo los mismos

Alexander Müller

En los años cincuenta del siglo xx, disciplinas como la física nuclear o la electrónica habían experimentado avances espectaculares. En comparación, la óptica seguía siendo una rama clásica y poco excitante de la física. En ocasiones, empero, el desarrollo de una aplicación técnica concreta consigue revivir una disciplina científica anquilosada. Sin embargo, lo que la implementación del láser como fuente y amplificador de luz supuso para la óptica en 1960 bien podríamos llamarlo revolución.

El láser trajo consigo el desarrollo de nuevos campos de la física, como la electrónica cuántica o la óptica no lineal, convertidas en objeto de estudio de congresos internacionales con miles de participantes y en tema recurrente de numerosas publicaciones científicas. Además, la invención del láser ha repercutido enormemente en muchos ámbitos de las ciencias naturales, la tecnología y la vida cotidiana.

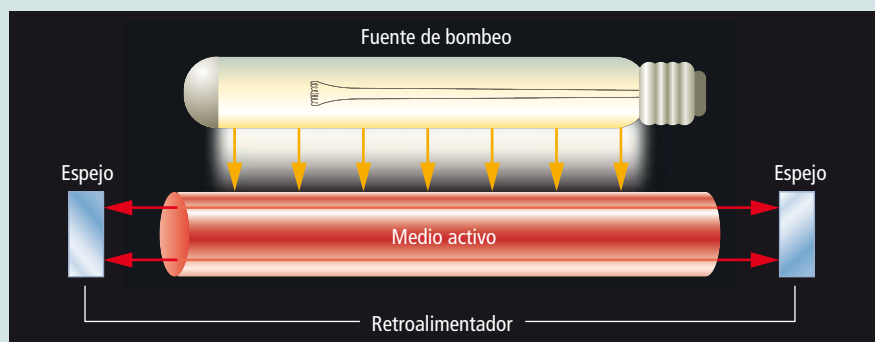
Emisión espontánea y emisión estimulada

El fundamento teórico del láser se basa en un postulado introducido por Albert Einstein en 1917 con el objetivo de derivar la ley de radiación de Planck. Einstein propuso que, en la interacción entre luz y materia, además de la absorción de un fotón por parte de un átomo, habían de darse *dos* procesos diferentes para la emisión de luz: la *emisión espontánea* (ya conocida entonces) y la *emisión estimulada*. Esta última se desencadenaría a partir de la interacción entre un cuanto de luz y un átomo excitado.

Según la teoría cuántica, los niveles de energía atómicos (los diferentes estados de excitación de los electrones en el átomo) son discretos. En condiciones normales, un átomo se encuentra en su estado fundamental; es decir, en el estado de energía más baja posible. En dicho estado, un átomo puede absorber radiación cuando la energía de un fotón incidente coincide con la diferencia de energía entre el nivel fundamental y alguno de los niveles de energía superior. La energía de un fotón viene dada por $E = h\nu$, donde h representa la constante de Planck ($h \approx 6,62 \times 10^{-34}$ joule \times segundo) y ν la frecuencia de la radiación electromagnética. Tal proceso de absorción puede observarse en la figura *a* del recuadro “Emisión espontánea y emisión estimulada”, donde se muestra el caso de un átomo con sólo dos niveles energéticos, E_1 y E_2 .

Tras absorber el fotón, el átomo pasa a un estado excitado de energía superior. Sin embargo, no permanecerá así indefinidamente: transcurrido cierto tiempo característico del sistema (su “vida media”), volverá al estado fundamental, emitiendo un fotón de energía $E = h\nu = E_2 - E_1$ (véase la figura *b* del recuadro “Emisión espontánea y emisión estimulada”). Dada la naturaleza espontánea del fenómeno y su ausencia de correlación con cualquier radiación incidente, decimos que dicha emisión es *incoherente*.

Ahora bien, según Einstein, también es posible una emisión estimulada (o “inducida”) cuando un fotón adicional de energía $E = E_2 - E_1$ interacciona con el átomo excitado. Tal interacción reduce el tiempo medio de transición al estado fundamental (véase la figura *c* del recuadro “Emisión espontánea y emisión estimulada”). En este caso, la energía almacenada



1. LAS TRES PARTES FUNDAMENTALES DE UN LASER. El medio activo puede estar constituido por un gas atómico o molecular, una disolución de material colorante o un cuerpo sólido. La fuente de bombeo (en el ejemplo, una lámpara de destellos) transfiere energía electromagnética o química al medio activo para producir la excitación. El dispositivo de retroalimentación (aquí representado por dos espejos altamente reflectantes) conforma una cavidad resonante donde aparece la oscilación láser.

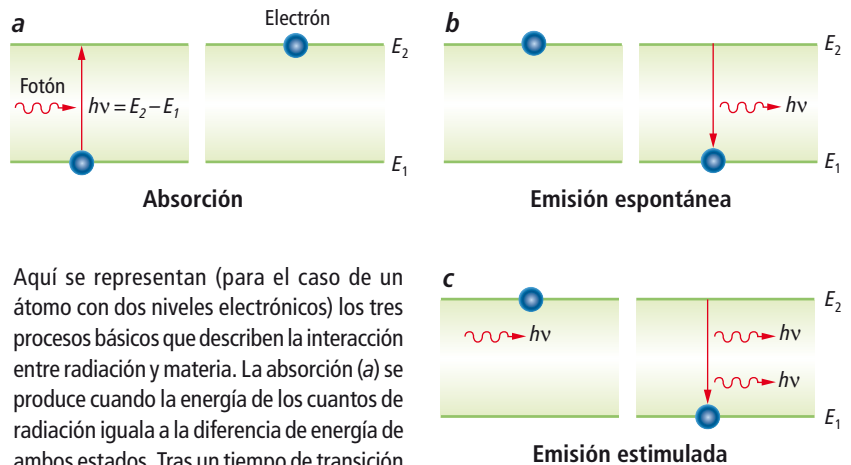
en el átomo también se libera en forma de un fotón de energía $E = h\nu = E_2 - E_1$. Conforme a la dualidad onda-partícula de la teoría cuántica, el fotón emitido admite una descripción equivalente en términos de una onda electromagnética de frecuencia ν . En el caso de la emisión estimulada, la onda emitida posee la misma fase que la del fotón incidente. Por este motivo, hablaremos de un proceso *coherente*.

Si bien su implementación experimental puede entrañar dificultades, vemos aquí que la emisión estimulada es un proceso que permite la amplificación de la intensidad de una señal luminosa: al irradiar un medio óptico excitado, éste responde con una emisión adicional de fotones (o, de forma equivalente, con la emisión de una onda de igual fase, lo que da lugar a una interferencia constructiva). Este es el principio físico en el que se basan todos los láseres.

En condiciones normales, la emisión estimulada es un proceso altamente improbable. Si calentamos a 1000 grados Celsius una cavidad (una bola de hierro hueca, pongamos por caso), su interior se llenará de radiación de varias frecuencias que alcanzará un estado de equilibrio térmico con la materia de la cavidad. La teoría nos dice que, en estas condiciones, la relación entre los procesos de radiación estimulada y espontánea es de $1:10^{10}$ para la luz visible. En el caso de los rayos X, dicha proporción disminuye en varios órdenes de magnitud (lo que explica en parte la gran complejidad con que topan los técnicos a la hora de construir láseres de rayos X). De esta observación se deduce que, para la construcción de un láser, es indispensable llevar la materia a un estado térmico anómalo: uno que favorezca los procesos de emisión estimulada.

En 1928, R. Landenburg y sus colaboradores, del Instituto Kaiser Wilhelm de Química Física y Electroquímica de Berlín-Dahlem, confirmaron experimentalmente el fenómeno de emisión estimulada en un tubo lleno de neón gaseoso y sometido a una elevada descarga eléctrica. Sin embargo, habría de transcurrir largo tiempo hasta que se lograra una amplificación de radiación electromagnética. Debido a la mencionada dependencia de los procesos de emisión estimulada con la frecuencia de la radiación, la amplificación se logró por primera vez en el rango de las microondas (de frecuencia inferior a la de la luz visible). En 1954,

EMISION ESPONTANEA Y EMISION ESTIMULADA



Aquí se representan (para el caso de un átomo con dos niveles electrónicos) los tres procesos básicos que describen la interacción entre radiación y materia. La absorción (a) se produce cuando la energía de los cuantos de radiación iguala a la diferencia de energía de ambos estados. Tras un tiempo de transición determinado, el átomo excitado regresa a su estado base mediante la emisión espontánea de un fotón (b). A través de la interacción entre un fotón y un átomo excitado se produce la emisión estimulada (c); el átomo emite otro fotón y regresa al estado fundamental.

C. H. Townes y sus estudiantes, de la Universidad de Columbia en Nueva York, construyeron el primer MASER de amoníaco; las siglas respondían a *Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation* (“amplificación de microondas por emisión estimulada de radiación”).

A pesar de una intensa búsqueda tanto experimental como teórica, se tardaría seis años en llevar a la práctica el mismo fenómeno con luz visible. En 1960, Theodore H. Maiman, de los Laboratorios de Investigación Hughes, consiguió generar radiación láser roja a partir de la emisión estimulada en una barra de cristal de rubí sintético: había nacido el “MASER óptico”. Más tarde se impondrían las siglas LASER (como consecuencia de sustituir “*Microwave*” por “*Light*”), que acabarían dando origen a la voz *láser* que hoy forma parte del lenguaje común.

Componentes de un láser

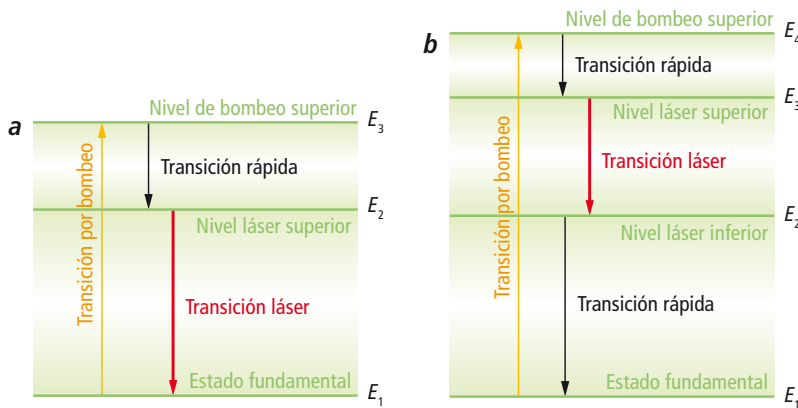
Todo láser consta de tres partes fundamentales (véase la figura 1): un medio activo (en el que tiene lugar la emisión estimulada), una fuente de energía (que suministra energía al medio activo para conseguir la excitación atómica) y un sistema de retroalimentación (que permite mantener en equilibrio las oscilaciones en el medio activo).

En principio, el medio activo ha de poseer al menos dos niveles de energía. Así, se logrará una amplificación por emisión estimulada si se consigue una mayor población electrónica en el nivel de energía superior que en el inferior. Una *inversión de población* de tales características (opuesta a la función de distribución de Boltzmann, que rige en condiciones normales el equilibrio térmico y, según la cual, el nivel fundamental se halla más poblado que los niveles excitados) puede lograrse con diferentes métodos. Entre ellos podemos mencionar el de bombeo óptico, consistente en irradiar el medio activo con fotones que puedan ser absorbidos por éste, empleando para ello una lámpara potente (por lo general, una lámpara de destellos).

Sin embargo, en un sistema con sólo dos niveles de energía no puede lograrse una inversión de población por bombeo. Como demostraría Einstein, para un átomo individual los procesos de absorción y emisión estimulada ocurren con igual probabilidad. Ello implica que la población del nivel excitado se satura cuando ambos niveles se hallan ocupados al 50 por ciento, ya que, en ese momento, la tasa de transiciones del nivel fundamental al excitado iguala a la del proceso inverso.

INVERSION DE POBLACION

El medio activo debe contar, al menos, con tres niveles de energía para lograr una inversión de población por bombeo. El nivel de bombeo superior suele exhibir un tiempo de transición muy corto, por lo que se halla prácticamente vacío (a). Un sistema de cuatro niveles (b) es más eficiente, ya que puede escogerse de modo que el nivel láser inferior también posea un tiempo de transición medio muy breve, con lo que se desocupa rápidamente.



Para alcanzar una sobrepoblación en el estado de mayor energía, el medio activo debe contar, al menos, con tres niveles. Los fotones de bombeo promocionan electrones al nivel superior (E_3). Este suele tener una vida media muy corta, por lo que se encuentra prácticamente vacío y la transición láser ha de tener lugar entre los niveles E_2 y E_1 (véase la figura a del recuadro “Inversión de población”). En consecuencia, para conseguir una inversión de población, más de un 50 por ciento de los electrones habrán de estar excitados, algo que no resulta muy eficiente (el nivel fundamental siempre tiende a llenarse muy deprisa).

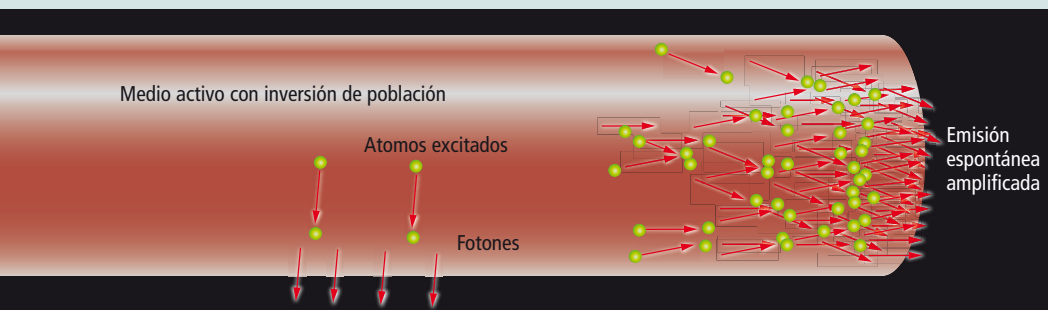
Mucho más óptima resulta una distribución con cuatro niveles de energía (véase la figura b del recuadro “Inversión de población”). De nuevo, los fotones de bombeo promocionan electrones al nivel de energía superior (E_4). Pero si las transiciones entre los niveles E_4 y E_3 y entre los niveles E_2 y E_1 son muy rápidas, resulta fácil conseguir un nivel E_3 más poblado que E_2 , con la correspondiente transición láser entre los mismos. Desde 1960 hasta hoy se han desarrollado numerosos sistemas que satisfacen estas condiciones.

¿Qué ocurre después de lograr la inversión de población en el medio activo?

En primer lugar, se origina una emisión espontánea en todas direcciones que, a su vez, induce más transiciones atómicas. No obstante, si el medio activo adopta la forma de un cilindro alargado, se generarán muchas más transiciones por emisión estimulada a lo largo del eje del cilindro que en la dirección perpendicular (dado que, a lo largo del eje, es mayor el número de átomos que participan en el proceso). Esto da lugar a un “alud” de radiación a lo largo de la dirección axial. Si el proceso de bombeo tiene lugar en pulsos de corta duración, la inversión de población se extinguirá rápidamente y se generará sólo un pequeño pulso de luz. Hablando con propiedad, aún no nos encontramos ante radiación láser, sino ante un proceso de “superluminiscencia” o “emisión espontánea amplificada”.

No obstante, puede emplazarse el medio activo en un sistema de retroalimentación óptica. El caso más simple consiste en un resonador: en esencia, dos espejos enfrentados y situados en los extremos del cilindro. Así, los fotones emitidos por radiación estimulada completan trayectorias de ida y vuelta entre los espejos y permanecen más tiempo en el medio activo, con lo que inducen, a su vez, más emisiones. Por último, para poder estudiar o emplear la radiación láser fuera del resonador, uno de los dos espejos debe poseer una reflectancia inferior al 100 por ciento; esto es, debe dejar pasar parte de la luz incidente.

Una característica intrínseca desde el punto de vista operacional es la existencia de un umbral de funcionamiento para el



2. AL LOGRAR LA INVERSION DE POBLACION en el medio activo, las primeras emisiones espontáneas desencadenan el proceso de “emisión espontánea amplificada”: una avalancha de transiciones por emisión estimulada (flechas horizontales). Si el medio adopta una forma alargada, la mayor parte de la radiación se emite a lo largo de la dirección axial.

3. RESONADOR OPTICO compuesto por dos espejos planos. Las ondas de luz que viajan paralelas al eje del resonador se superponen para formar una onda estacionaria. Ya que la onda ha de anularse en la superficie de los espejos, las únicas ondas estables son aquellas para las que la longitud del resonador L coincide con un múltiplo entero de la semilongitud de onda ($\lambda/2$).



bombeo. Nada más iniciar la excitación del medio activo, aparecen procesos de emisión espontánea, lo que implica pérdidas considerables de radiación. Pero, al ir aumentando la potencia de bombeo, se favorece la sobrepoblación de los niveles más energéticos, aparecen los procesos de emisión estimulada y se compensan así las pérdidas por emisión espontánea. Es justamente en ese momento cuando comienza la amplificación láser.

Dado que la densidad de la radiación aumenta y provoca más emisiones estimuladas (más transiciones al nivel energético inferior), la inversión de población debe ser rápidamente repuesta. Si la fuente de bombeo no dispone de la potencia requerida para mantener la sobrepoblación del nivel láser superior, la oscilación acabará interrumpiéndose. Pero si se continúa transmitiendo energía, el umbral puede volver a sobrepasarse y, con ello, comienza una nueva oscilación. Este comportamiento se caracteriza por una serie de cortos pulsos incontrolados de radiación. A lo largo del tiempo se han desarrollado fuentes de bombeo potentes, así como otra serie de métodos, que permiten generar una emisión láser continua o bien pulsos de duración controlada.

Modos longitudinales y modos transversales

Desde el punto de vista de la onda asociada a los fotones emitidos por el medio activo, el proceso de amplificación se explica mediante la posibilidad de crear una onda estacionaria y de intensidad creciente entre las paredes del resonador. Para ello, la distancia que separa los espejos habrá de coincidir con un múltiplo entero de la semilongitud de onda (véase la figura 3).

Esas ondas estacionarias se denominan *modos longitudinales del resonador*. Para un resonador de longitud L , las frecuencias de los modos posibles vienen dadas por $\nu_N = Nc/2L$, donde N es cualquier número entero y c la velocidad de la luz. Por ejemplo, en el caso de un resonador de un metro, la diferencia entre las frecuencias de dos modos consecutivos es $\Delta\nu = 1,5 \cdot 10^8$ Hz.

Por su parte, el medio activo sólo puede emitir luz con la frecuencia que dictan las transiciones atómicas permitidas. En la práctica, las frecuencias de emisión no son exactamente discretas, sino que vienen dadas por una distribución “pi-

cada” y con una cierta anchura. Así, el espectro de un láser se caracteriza por una serie de líneas muy próximas entre sí (los modos longitudinales de resonador) y por la banda de emisión del medio (véase la figura 4a). Los modos longitudinales próximos al máximo de emisión se generan con mayor intensidad, mientras que en los extremos de la banda la intensidad de esas ondas estacionarias decae drásticamente (véase la figura 4b).

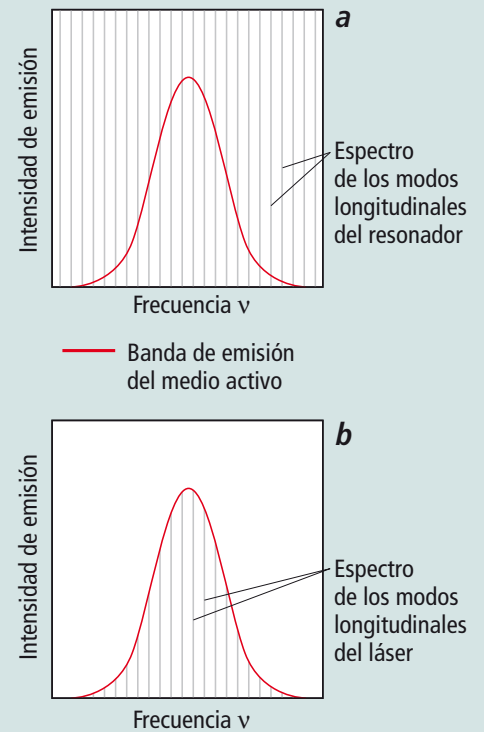
En realidad, en un resonador óptico no existen sólo ondas estacionarias exactamente paralelas al eje del resonador; se generan también ondas en un ángulo ligeramente desplazado de la perpendicular a los espejos. De esta manera, la intensidad de los modos longitudinales adquiere una distribución espacial en el plano perpendicular al haz; ésta viene dada por los *modos transversales*.

Si se dispone una lente a la salida del haz y una pantalla o una placa fotográfica en su plano focal, se obtiene una imagen de la distribución transversal de intensidad del haz láser, la cual puede exhibir una estructura muy compleja (véase la figura 5). En ausencia de un dispositivo experimental para seleccionarlos, todos estos modos transversales compiten unos con otros, oscilan al unísono o desordenadamente y se superponen. Esta forma de operar sólo es interesante cuando la pureza del haz no desempeña ninguna función y lo único que se requiere es radiación láser de una gran intensidad, como es el caso de los procesos industriales de soldadura por láser.

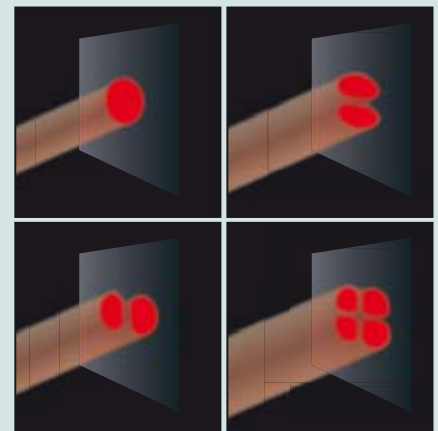
Para algunas aplicaciones es de gran importancia el *modo transversal fundamental*. En el plano perpendicular al haz, la intensidad de este modo decae según el cuadrado de una curva gaussiana. Existen métodos experimentales para seleccionar este modo de entre todos los demás. Además, también existen técnicas para limitar el número de los modos longitudinales del resonador.

Propiedades de la luz láser

Tras conocer cómo funciona un láser, podemos preguntarnos cuáles son las características que hacen del láser una fuente lumínica tan notable y con tantas aplicaciones. Por emplear una metáfora sonora, podríamos decir que una fuente de luz ordinaria es análoga a un instrumento musical que desafina, cuyo sonido se propaga en todas direcciones y que casi no se oye. En comparación, la luz láser



4. LOS MODOS LONGITUDINALES de un resonador óptico son equidistantes en frecuencia (a). La banda de emisión del medio activo tiene una anchura característica (muy fina en gases, más ancha en las disoluciones de colorantes orgánicos). La emisión láser está formada por los modos resonantes que se hallan dentro de la banda de emisión del medio (b). Un dispositivo experimental adecuado puede lograr la selección de un único modo.

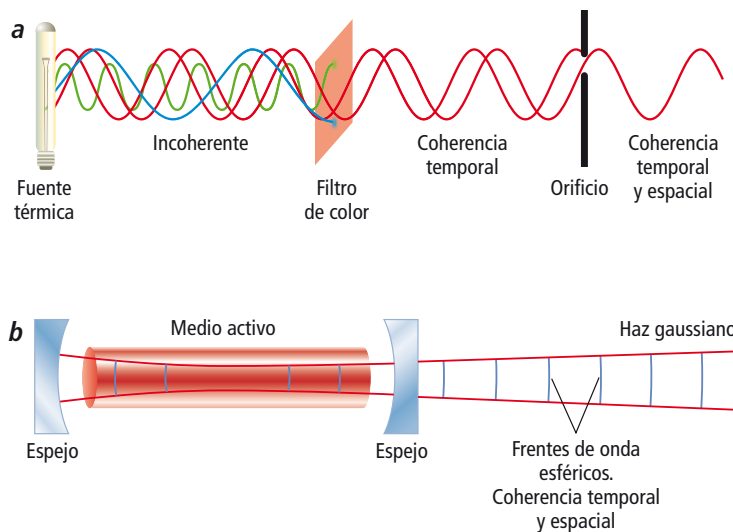


5. EL PERFIL DE INTENSIDAD de los modos transversales (en el plano perpendicular al haz) puede adquirir geometrías muy complejas. Para la mayoría de las aplicaciones, el modo transversal fundamental (*arriba, izquierda*) es el que reviste mayor interés. La intensidad de este modo decae en la dirección radial de acuerdo con el cuadrado de una curva gaussiana.

MONOCROMATICIDAD Y COHERENCIA

Con fuentes de luz ordinarias, sólo es posible obtener luz coherente asumiendo enormes pérdidas en intensidad. La emisión espontánea genera trenes de onda cortos y en un rango espectral relativamente amplio, por lo que son necesarios un filtro de banda estrecha y una placa con un orificio para obtener buenos resultados (a).

Por el contrario, la emisión estimulada de un láser produce una luz intensa y de alta coherencia temporal. Si se escoge adecuadamente el resonador óptico, se obtiene un haz gaussiano de gran coherencia espacial (b). Un haz con estas características se caracteriza por poseer un pequeño ángulo de dispersión, frentes de onda esféricos y una distribución de intensidad radial dada por el cuadrado de una curva gaussiana. Para el observador, el resultado es el típico "rayo láser", que hace aparecer una mancha de luz monocromática, muy nítida y relativamente pequeña sobre una pantalla a gran distancia del dispositivo.



vendría a ser una nota musical muy clara y definida, emitida prácticamente en una sola dirección y que suena, además, a un alto volumen. Las principales propiedades de la luz láser pueden resumirse como sigue:

■ **Alta coherencia.** La onda guarda unas relaciones de fase constantes en el espacio y en el tiempo. En las fuentes luminosas ordinarias, la luz coherente se obtiene sólo mediante la interposición al paso del haz de un filtro de color de banda estrecha y una placa con un pequeño orificio. De entre todas las longitudes de onda emitidas por la fuente, el filtro selecciona un estrecho rango espectral; el orificio se encarga de seleccionar los frentes de onda esféricos. Tal proceso conlleva, sin embargo, grandes pérdidas de intensidad.

La luz láser presenta una elevada *coherencia temporal*. Ello significa que, conocida la fase de la onda en cierto punto e instante, la fase en ese punto aún puede predecirse largo tiempo después. Tal propiedad se relaciona directamente con la "longitud de coherencia" (básicamente, la longitud de un tren de ondas sinusoidal). Mientras que la luz de las lámparas espectrales posee longitudes de coherencia del orden de metros, con un láser de helio-neón estabilizado puede obtenerse una longitud de coherencia de más de cien kilómetros.

Una gran longitud de coherencia implica que la anchura espectral de la radiación emitida es muy pequeña (ambas

magnitudes son inversamente proporcionales); es decir, la luz láser cuenta con una frecuencia (color) muy bien definida. Por eso, láseres altamente estabilizados constituyen perfectos estándares de frecuencias y son extremadamente útiles en metrología y espectroscopía.

Que la luz láser posea *coherencia espacial* significa que, en un mismo instante, existen correlaciones de fase entre los puntos del plano perpendicular al haz. A menudo, la radiación láser adopta la forma de un haz gaussiano: es decir, los frentes de onda del haz adoptan una geometría casi esférica y, además, la intensidad es máxima en el eje y disminuye en la dirección perpendicular según el perfil del cuadrado de una campana de Gauss. Aquí reside el fundamento de la buena colimación en un láser; esto es, la posibilidad de conseguir un rayo casi perfecto y con una dispersión mínima. Puede lograrse que la dispersión angular de un haz láser sea de apenas unos centímetros tras recorrer una distancia de 1000 metros.

■ **Pulsos cortos.** La emisión de luz láser puede modularse en pulsos controlados de brevísima duración. En función de la técnica usada, pueden llegar a durar femtosegundos (10^{-15} s) o incluso attosegundos (10^{-18} s). Los pulsos de láser ultracortos constituyen el fenómeno más breve que se haya logrado medir en la naturaleza. La operación en pulsos permite también aumentar la intensidad de la emisión.

■ **Potencias extraordinariamente elevadas.** Con un láser de dióxido de carbono en modo de operación continua, logran obtenerse potencias de unos 100 kilowatt. Un láser de estado sólido puede emitir pulsos extremadamente cortos de potencias del orden de los gigawatt (10^9 W); ampliaciones reiteradas permiten alcanzar potencias del orden de los picowatt (10^{15} W). Como es fácil de suponer, una luz tan intensa focalizada sobre pequeños volúmenes induce efectos extraordinarios en la materia. Entre otras aplicaciones, estos láseres de alta potencia desempeñan una función clave en el campo de la fusión nuclear.

■ **Modulación de la longitud de onda.** Prácticamente todos los láseres permiten pequeños ajustes en la longitud de onda de la luz emitida. Si bien para ello existen varias técnicas, los láseres que emplean colorantes orgánicos como medio activo son los que permiten un ajuste continuo mayor. Con una emisión que, en función del colorante, abarca desde el ultravioleta hasta el infrarrojo cercano, la luz puede posteriormente afinarse en un rango de decenas de nanómetros. Esta selectividad presenta grandes ventajas en espectroscopía y en la estimulación selectiva de moléculas en fotoquímica.

Por lo general, es imposible operar al mismo tiempo con todas las propiedades descritas. Sin embargo, la mayoría de las aplicaciones permite el diseño de un equipo con las características óptimas exigidas en cada caso.