

Esquema Mecánico del Láser

MARIO GARAVAGLIA

*Departamento de Física, Universidad Nacional de La Plata, 115 y 49, cc 67, La Plata, Argentina
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Argentina*

Recebido em 25 de Julho de 1975

The present paper is mainly devoted to teach the basic principles of lasers to nonspecialists. It describes a laser mechanical model. The processes of generation of stimulated emission and the amplification of radiation are explained by using such a model. The superradiant emitter is described as well as the laser device itself. The mechanical model permits a qualitative description of conspicuous characteristics of laser radiations: directionality, coherence, monochromaticity, degree of polarization, and intensity. Finally, a discussion, related to the quantum mechanical description of basic statements of laser physics compared with the mechanical model, is given

O presente trabalho, em que se descreve um modelo mecânico dos *Zasers*, tem por objetivo maior o de ensinar os princípios básicos dos *Zasers* a não especialistas. O modelo permite uma descrição qualitativa das características principais das radiações emitidas por *Zasers*, vale dizer, dirigibilidade, coerência, monocromaticidade, grau de polarização e intensidade. Finalmente, comparam-se aspectos da descrição quântica dos *Zasers* com aquelas propiciadas pelo modelo.

1. INTRODUCCION

El propósito del presente trabajo es el de dar una imagen simple del proceso de amplificación de radiación producido en un láser y de las

características de la luz por él emitida. Dicha imagen será provista por un esquema mecánico cuya fundamentación se halla en experiencias de la vida diaria.

El esquema mecánico propuesto resulta ser el equivalente del modelo atómico. La equivalencia planteada, a pesar de sus limitaciones, permite visualizar los distintos pasos por los que se obtiene una radiación coherente. Por dicha razón, si bien se describirá detalladamente el esquema mecánico, se hará permanentemente referencia al modelo microscópico del átomo y de su interacción con la radiación.

2. EL LASER

El láser es un emisor de radiación coherente que consiste de un medio activo convenientemente excitado y confinado en una cavidad resonante. La radiación coherente se produce por el proceso de emisión estimulada de radiación. Esta forma particular de emisión fue introducida por A. Einstein ¹ en su esfuerzo genial por interpretar la radiación del cuerpo negro.

Cuando un átomo es excitado, uno de sus electrones exteriores responsable de su actividad fisicoquímica incorpora la energía de excitación pasando de su estado inicial de energía E_1 a otro de energía E_2 . Después de un cierto lapso, el átomo emite ese exceso de energía en forma de radiación, cumpliéndose la relación de Bohr. La figura 1 ilustra ese proceso. La diferencia de energía entre ambos estados energéticos es igual al producto de la frecuencia de la radiación emitida por la constante de Planck:

$$E_2 - E_1 = h\nu_{21} \cdot$$

La relación entre la frecuencia y la longitud de onda de la radiación está dada por $\lambda\nu = c$, donde c es la velocidad de la luz. Esta forma de emisión de radiación fue denominada, por Einstein, emisión espontánea.

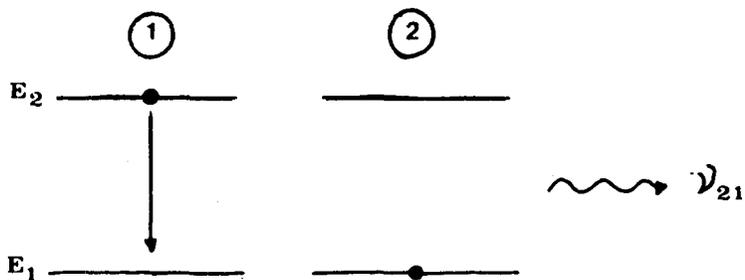


Fig. 1 - Emisión espontánea.

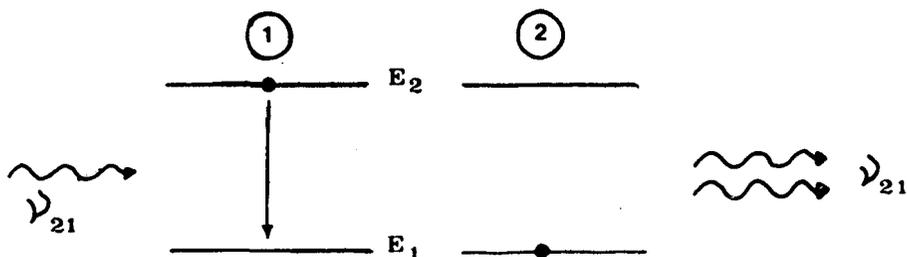


Fig. 2 - Emisión estimulada.

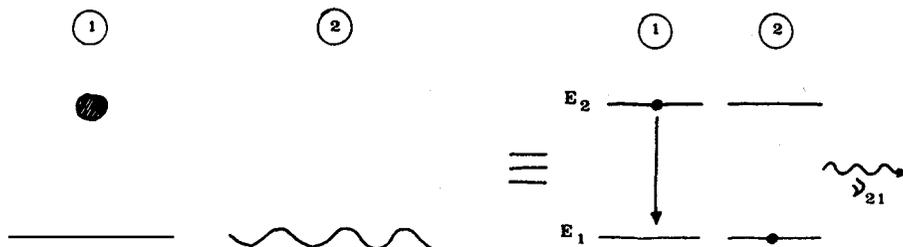


Fig. 3 - Similitud entre la caída de una piedra sobre la superficie del agua y la transición de un electrón entre niveles de energía. Ambos generan procesos ondulatorios.

Puede ocurrir que la radiación emitida espontáneamente por dicho átomo alcance a otro átomo excitado cuyo electrón se encuentra en el estado de energía E . En tales condiciones, Einstein postuló que podría producirse la emisión de radiación debido a la interacción entre la radiación emitida por el primer átomo y el segundo átomo, como muestra la figura 2. A este tipo de emisión de radiación Einstein la denominó emisión inducida o estimulada. En este proceso también se cumple estrictamente la relación de Bohr, de modo que la frecuencia de la radiación emitida es exactamente igual a la frecuencia de la radiación estimulante. En esta acción microscópica radica el efecto cooperativo conocido como amplificación de la radiación. En el caso expuesto, la amplificación produjo una duplicación de la amplitud de la radiación.

Esta brevísima descripción resulta suficiente para justificar el nombre LÁSER; es una sigla formada con las iniciales de las palabras de la frase que, en inglés, describe el proceso: "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation".

3. ESQUEMA MECANICO DEL LASER

El simple hecho de una piedra arrojada a un estanque de agua será la base empleada para describir el esquema mecánico del láser. Cuando la piedra golpea la tranquila superficie del agua, provoca una perturbación que se propaga según un movimiento ondulatorio con velocidad constante en todas direcciones. Esta transformación de la energía potencial que poseía la piedra en energía transportada por la onda formada en la superficie del agua será el equivalente al proceso de emisión de radiación por un átomo excitado. Las figuras 3 y 4 ilustran convenientemente lo expresado.

Si se arrojan al estanque muchas piedras al mismo tiempo, cada una de ellas producirá una perturbación particular y las ondas generadas se superpondrán, propagándose, sin embargo, independientemente, como ilustra la figura 5. Esto mismo es lo que ocurre en los tubos de descar-

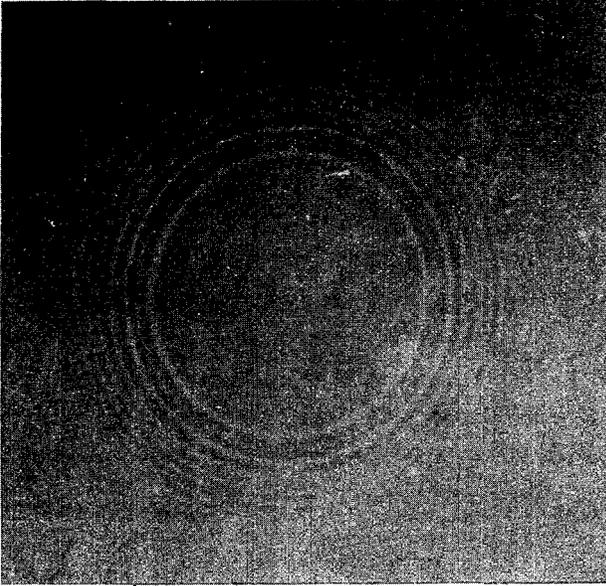


Fig. 4 - Onda producida en la superficie del agua por una piedra.

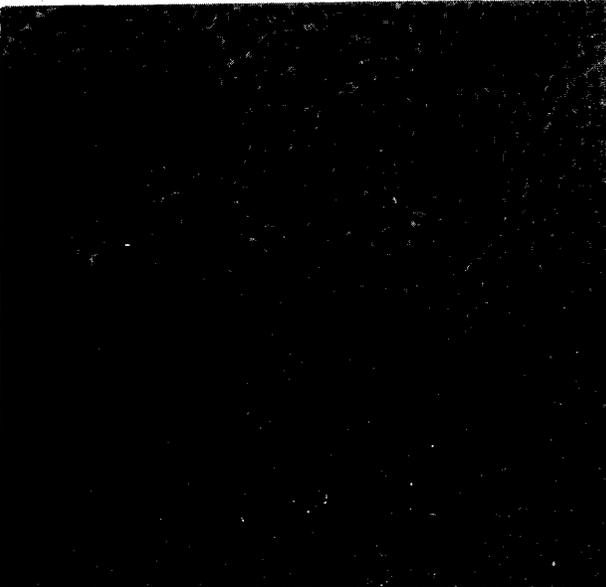


Fig. 5 - Ondas producidas por muchas piedras al caer sobre el agua

ga gaseosos de los carteles de propaganda, por ejemplo. Los átomos **excitados** emiten **independientemente** la **energía** que almacenaron, **haciéndolo según el** proceso de **emisión** espontánea. La radiación emitida, como ocurre con la multitud de ondas en el estanque de agua, es **desordenada** y no tiene **dirección preferencial** de **propagación**.

Para visualizar el proceso de **estimulación** y **amplificación** se **recurri- rá** a la figura 6. Con el esquema allí mostrado se pretende: 1) Ayudar a entender el **fenómeno** cooperativo entre los átomos excitados de un medio material, 2) Interpretar la **emisión** estimulada de radiación y 3) Comprender las características de la **radiación** emitida. En el esquema de la figura 6, cada átomo está idealizado por un balancín, de modo que un extremo está conectado **mecánicamente** con la superficie del agua del estanque mediante un flotador, mientras que el otro extremo sirve para colocar la piedra que juega el papel del electrón excitado en el nivel de energía E_2 . Si se deja caer una piedra en el estanque, se generará como indica la figura 3 una onda. Ella podrá alcanzar la posición del flotador de uno de los balancines y, en caso de que dicho balancín tenga una piedra, al elevarse el flotador por acción de la onda, la hará caer provocando una nueva onda. La figura 7 muestra con detalle este proceso de estimulación por el cual la onda que llega perturba y estimula al balancín para que se produzca la caída de la piedra. Una vez que la piedra choca con la superficie del agua, producirá una nueva perturbación, originando una nueva onda que se superpondrá a la anterior. La figura 8 a) muestra la superposición de las ondas un tiempo después de haber caído la piedra. Conviene indicar aquí que dicha representación gráfica es posible, porque se ha considerado que el tiempo que tarda en caer la piedra y formar la primera cresta de la onda es igual al tiempo que tarda el frente de la onda estimulante desde producirse la perturbación del balancín hasta encontrarse e interferir con la primera cresta de la segunda onda. Esta restricción permite generar ondas en fase, es decir, coherentes. Además, la superposición de las dos ondas da lugar a los conocidos fenómenos de interferencia, los que también se han representado en la figura 8 b). En aquellos lugares donde se produce la superposición de los **máximos** de amplitud de una onda con los **máximos** de amplitud de la otra, se obtiene interferencia constructiva y la amplitud de la perturbación

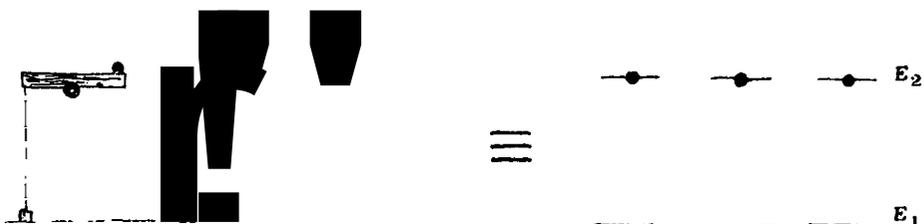


Fig. 6 - Similitud entre el dispositivo mecánico descrito y los átomos excitados.

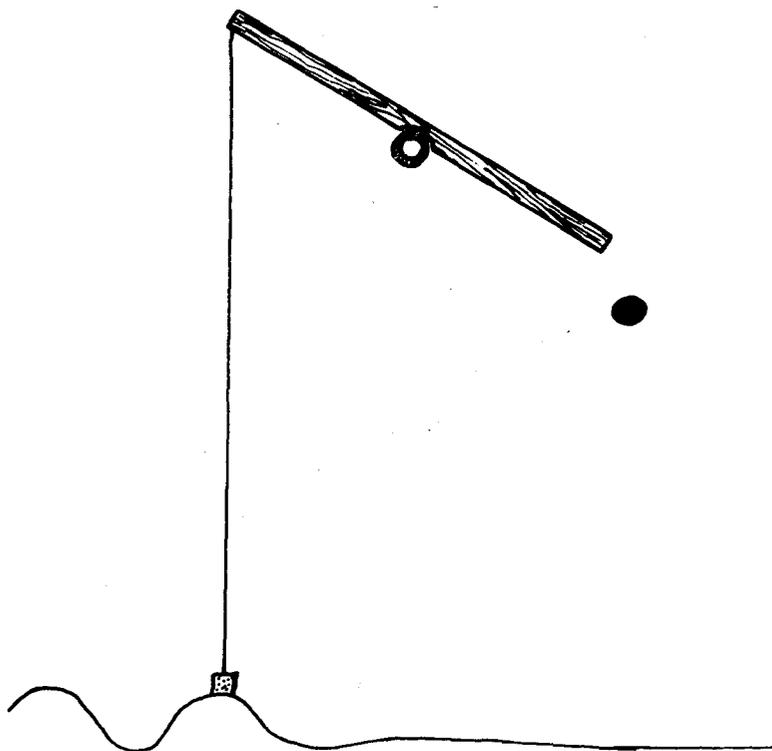


Fig. 7 - Detalle de la estimulación mecánica

que afecta la superficie del agua será igual a la suma de las amplitudes. Por otro lado, en aquellos otros lugares donde se produce la superposición de los máximos de una onda con los mínimos de la otra, ocurre el fenómeno de interferencia destructiva y la amplitud de la perturbación que afecta la superficie del agua será igual a la diferencia de las amplitudes de las ondas individuales. El resultado final de lo ocurrido está representado en la figura 8 c). Se ha producido como consecuencia de los procesos de interferencia, una onda resultante que avanza según sectores angulares o lóbulos bien determinados y cuyas amplitudes son las sumas de las amplitudes de la onda estimulante y de la onda provocada en el proceso de estimulación.

Esta nueva onda al avanzar por la superficie del agua alcanzará un segundo balancín, actuando como onda estimulante. Se producirá otra vez el fenómeno descrito antes, con la diferencia de que ahora se superpondrán dos ondas de características bien diferentes, tal como se muestra en la figura 9 a). Sólo el lóbulo central de la onda estimulante que progresa como proviniendo del punto 0, se superpondrá con la onda generada por la caída de la piedra en el punto 0'. Los otros lóbulos no se superponen, por lo que no afectan a la onda resultante. En la figura 9 b) se ha representado parte de la onda resultante; la onda generada en 0' refuerza el lóbulo central de la onda estimulante, mientras que el resto de ella se desvanecerá al propagarse. Dicho lóbulo, ahora de mayor amplitud, podrá llegar hasta otro balancín cargado con una piedra, de manera que se reproducirá el proceso de estimulación y amplificación, incrementando aun más la amplitud de la onda resultante.

Continuando con este proceso, se llegará hasta el borde del recipiente. La onda resultante de las sucesivas amplificaciones poseerá una curvatura menor. Es decir, cada vez se parece más a una onda de frente plano. Las representaciones gráficas de las figuras 8 y 9, tratan de realzar esta característica esencial. Sin embargo, el frente de la onda seguirá siendo circular. Para evitar que el lóbulo de la onda se ensanche, se construye el borde del recipiente también curvo y del mismo radio de curvatura que la onda incidente. La figura 10, en sus par-

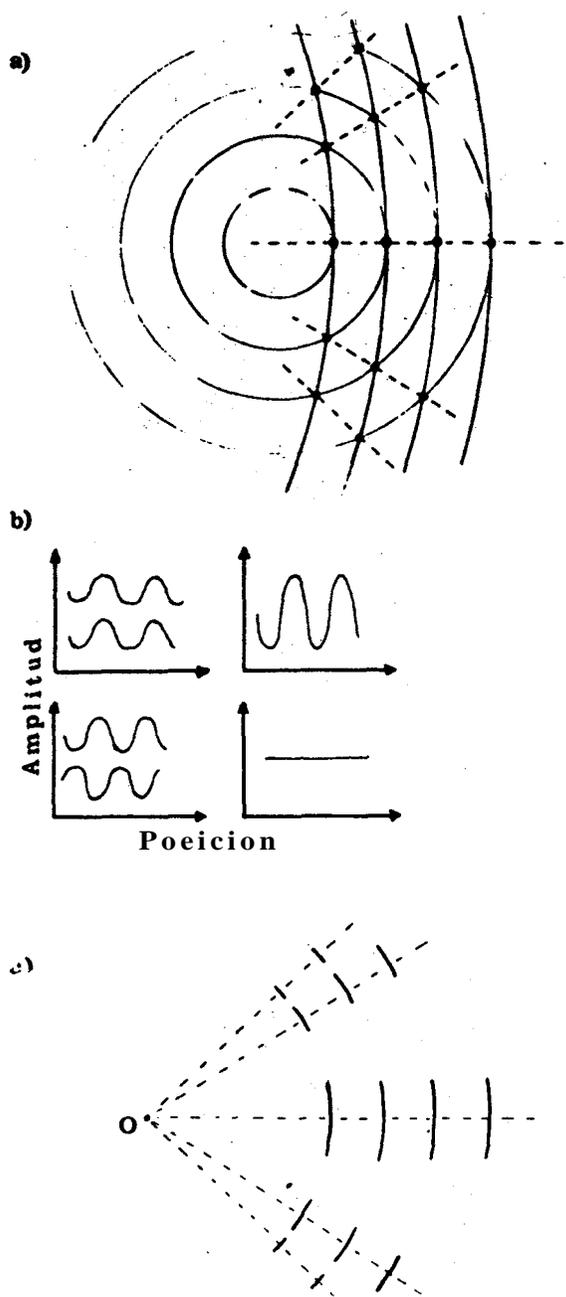


Fig. 8 - a) Superposición de dos ondas circulares originadas en distintos centros. b) Interferencia destructiva y constructiva. c) Lóbulos resultantes. Amplificación.

tes a) y b), muestra la reflexión de la onda en el borde del recipiente.

La onda reflejada **retornará** a la **región** donde se encuentran los balancines. Se se **los** volvió a cargar con las piedras, la onda continuará amplificándose de la misma manera que se **describió** antes. Cuando la onda haya atravesado el estanque y **llegue** al otro extremo, **deberá** encontrarse con un borde de características **semejantes** al anterior. Nuevamente **la** onda se **reflejará**, siendo reinyectada en la región de los balancines. **Si** ellos **han** sido recargados con las piedras, volverá a producirse el **fenómeno** de estimulación y amplificación, hasta que la superficie de **agua** alcanza a sustentar una onda de gran amplitud. Al arribar dicha onda a uno de los bordes, se abrirá una compuerta que le permitir: **salir** al exterior, como indica la secuencia a) - b) de la figura 11. La característica de esta onda es que progresa formando un haz direccional.

4. ALGO MAS SOBRE EL ESQUEMA MECANICO DEL LASER

Los bordes reflectores del estanque no son más que los espejos del **láser**. Sirven efectivamente para que la radiación emitida por los átomos del medio material y **amplificada** por el proceso de **emisión** estimulada, se propague a través del mismo un número indefinido de veces. **Com** los espejos nunca resultan **totales**, parte de la luz que incide en ellos es transmitida. En el caso del **esquema mecánico**, fue necesario proveer a uno de los bordes reflectores de una compuerta para permitir la **salida** de la radiación amplificada en forma de haz concentrado.

Sin embargo, los espejos juegan, además de **éste**, otro papel importante que se **describirá** más adelante.

El **esquema mecánico**, tal como fue expuesto, permite **formase** una idea de dos procesos íntimamente ligados. Por un **lado**, el de la **emisión** estimulada de radiación y, por el otro, el de la **amplificación** de la radiación. En **ningún** momento **resultó** imprescindible la **introducción**

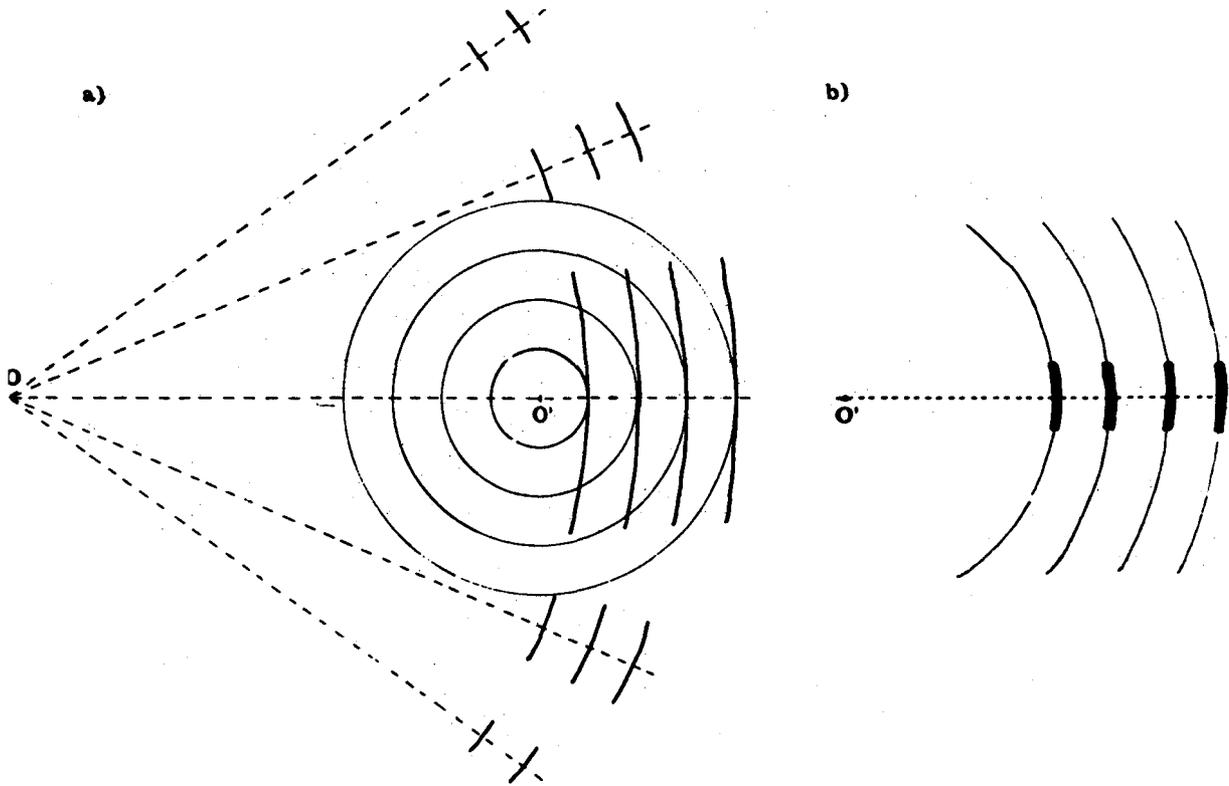
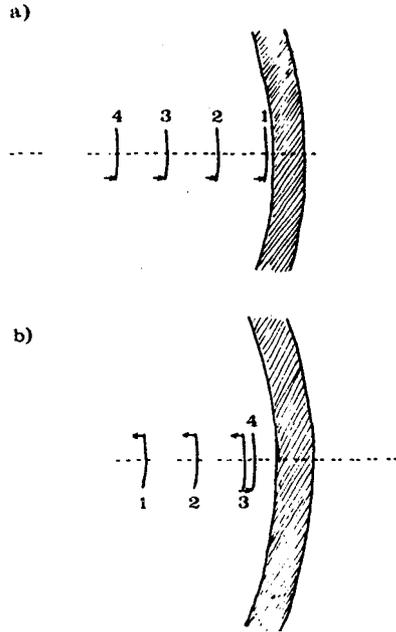


Fig. 9 - a) Superposición de los lóbulos con una onda circular.
b) Resultado de la superposición.

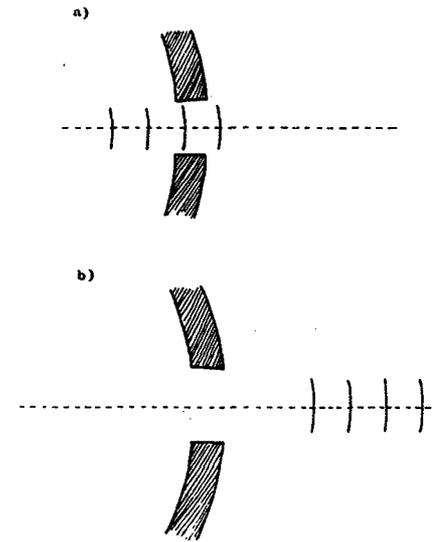
de los bordes reflectores o espejos, para explicar el efecto de **amplificación**. Es que, si el medio material activo, y haciendo ahora referencia a algunos **medios** experimentados en laboratorio, resulta por sus características **físicas** poseer elevada ganancia, el proceso de **amplificación** de la radiación puede **lograrse** en **sólo un** pasaje de la radiación a través de **él**. O sea, que la luz emitida por **los** átomos en un extremo **del** medio activo es **amplificada** en tal magnitud, que **al** llegar **al** otro extremo ya posee las características propias de **un** haz **perfectamente** definido. Esta radiación producida sin el requerimiento de espejos, se la ha denominado superradiancia. Existen varios ejemplos notables de casos de superradiancia; dos ejemplos típicos son **los** siguientes, la **emisión del** Ne en la **longitud** de onda de **3,39** μm en el infrarrojo y la de la molécula N_2 en **337,1** nm en el ultravioleta.

En la **explicación** previa **del** esquema **mecánico del láser** se consideró **sólo** una onda que progresa a través **del** medio activo y que, **reflejándose** en **los** espejos es reinyectada nuevamente en **él**. Sin embargo, muchas son las ondas que pueden propagarse simultáneamente y en sentidos opuestos a través **del** medio activo. Como todas ellas poseen la misma longitud de onda, se sustentan entre **los** espejos ondas estacionarias. La condición de resonancia entre las ondas y la cavidad formada por **los** espejos estipula que la distancia entre ellos debe ser igual a un múltiplo de medias longitudes de onda. La figura 12 representa este hecho en un caso típico. No obstante, como la longitud de onda de la radiación es muy **pequeña** (1 μm , por ejemplo) y la distancia entre **los** espejos muy grande (1 m, por ejemplo), la cantidad de medias longitudes de onda es **del** orden **del** millón. Es decir, como $D = p \lambda / 2$, resulta $p = 2D/\lambda$; de modo que reemplazando por **los** valores **típicos** dados, se encuentra que $p = 2 \times 10^6$.

En general, a pesar de que un **láser** amplifique una dada radiación de longitud de onda perfectamente determinada, son numerosas las ondas estacionarias que se sustentan simultáneamente. Esto se debe a que **los** estados energéticos de **los** átomos no **están** perfectamente determinados en **razón** de la **validez** del Principio de Incerteza y a la **movilidad** de **los** átomos en el medio activo, como **así** también a otras perturbaciones que **ellos** puedan sufrir, como **acción** de campos **eléctricos** o



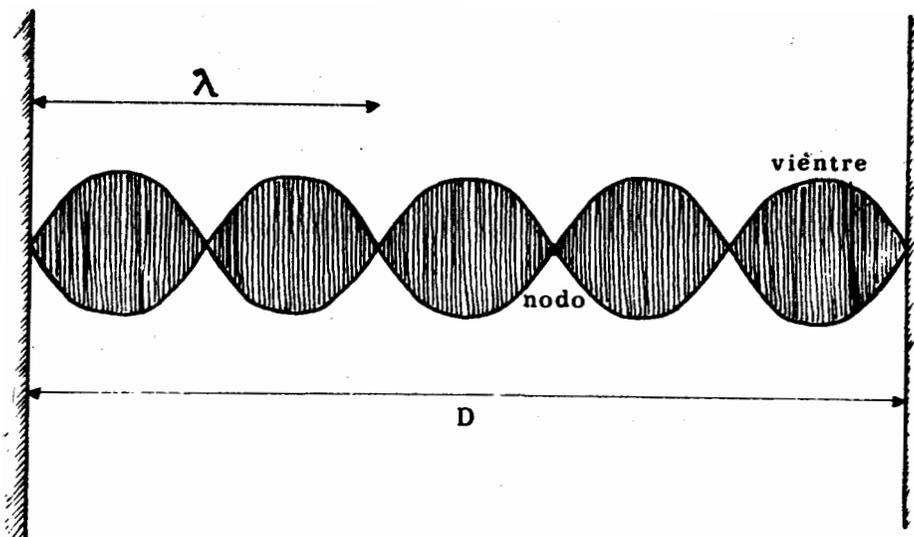
10 - a) Lóbulo antes de reflejarse.
 b) Lóbulo reflejándose.



11 - a) Onda amplificada al atravesar la compuerta o espejo.
 b) Onda propagándose fuera del estanque.

magnéticos. En razón de lo dicho, la longitud de onda o la frecuencia de la radiación emitida por los átomos podrá expresarse según el valor medio de las determinaciones experimentales realizadas y el ancho medio de los valores individuales. La figura 13 ilustra el caso de la línea espectral del Ne de longitud de onda $\lambda = 632,8$ nm. El ancho medio de dicha línea espectral es del orden de los 0,0006 nm, en condiciones habituales de excitación. Para un láser de 30 cm de distancia entre los espejos, se sustentarán simultáneamente tres ondas estacionarias, cuyas longitudes de onda se encontrarán ubicadas debajo del perfil de la línea espectral. La diferencia de longitud de onda entre esas tres componentes es de aproximadamente 0,0006 nm. En este caso, se dice que el láser está amplificando radiación en sólo tres modos longitudinales y, efectivamente, su emisión constará de tres componentes muy cercanas.

Para verificar que realmente son tres los modos de oscilación de la cavidad resonante para un láser de He - Ne de 30 cm de longitud que emite en $\lambda = 632,8$ nm, debe realizarse el siguiente cálculo. La condición de resonancia es, como se dijo antes, $p = 2D/\lambda$. Entonces para el valor central de la longitud de onda, resulta $p' = 2 \times 30 \text{ cm} / 632,8 \text{ nm} = 948\ 142,904$. Como la condición resonante sólo se cumple para valores enteros de p , debe adoptarse el número entero más cercano al calculado, esto es $p = 948\ 143$. Para calcular los otros posibles modos longitudinales, se suma y se resta al modo central una unidad y se determinan luego las longitudes de onda respectivas. Esto lleva a los siguientes valores: $\lambda_{p-1} \approx 632,8166$ nm y $\lambda_{p+1} = 632,8153$ nm. Queda comprobado así, que debajo del perfil de la línea espectral del Ne quedan sustentados tres modos longitudinales de oscilación, por cuanto la diferencia entre las longitudes de onda extremas correspondientes a $p+1$ y $p-1$, es menor que el ancho total de la línea espectral. En la figura 13 se han incluido, para mayor claridad, los modos longitudinales $p-2$ y $p+2$, cuyas longitudes de onda obviamente caen fuera del perfil de línea. Un láser de He - Ne de mayor longitud oscilará en un número mayor de modos longitudinales, mientras que uno de sólo 10 cm de longitud, oscilará en un modo.



$$D = 5 \frac{\lambda}{2}$$

Fig. 12 - Onda estacionaria.

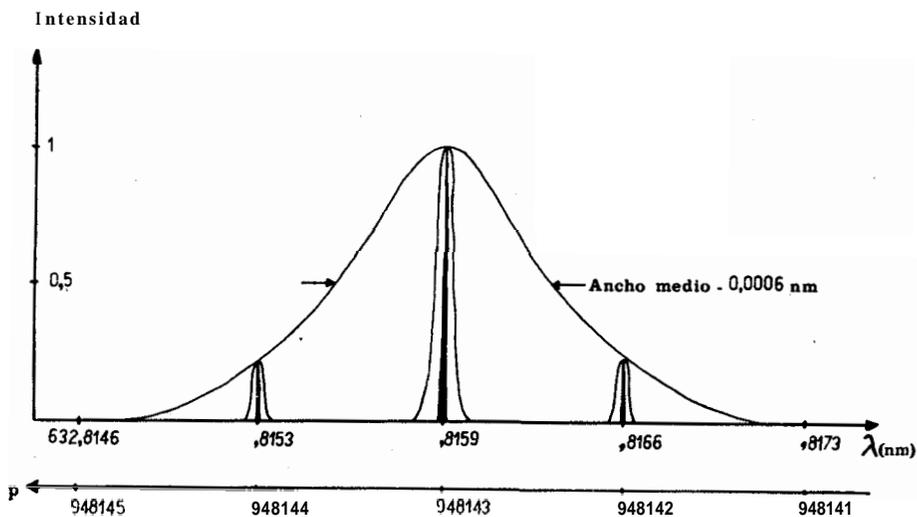


Fig. 13 - Modos longitudinales bajo el perfil de línea espectral.

5. CARACTERISTICAS DE LA LUZ EMITIDA POR UN LASER²

Como se definió al comienzo de la Sección 2, el láser es un emisor de luz coherente. El proceso descrito en las Secciones 3 y 4 mediante el empleo del esquema mecánico, permitió arribar a la conclusión de que las ondas se amplifican ordenadamente, guardando una estricta relación de fase entre ellas.

Este hecho por el cual la onda final resulta de fase bien definida se expresa diciendo que se trata de una radiación coherente. Además, por la misma razón, puede explicarse la tremenda direccionalidad del haz de luz emitido por un láser.

La acción cooperativa de todos los emisores verificada a través del proceso de emisión estimulada de radiación, permite explicar la elevada intensidad que posee el haz emitido por un láser.

La interpretación de la acción de los espejos como cavidad resonante, permite caracterizar la emisión de un láser como monocromática.

El esquema mecánico, por último, permite explicar el hecho de que los láseres constituidos por medios activos que poseen algún grado de simetría, emitan luz polarizada. El plano de polarización de la onda amplificada en el esquema mecánico del láser es perpendicular al plano de la superficie del agua. En los láseres gaseosos, la emisión de luz linealmente polarizada se obtiene por la acción de las ventanas que cierran los extremos del tubo de descarga según el ángulo de Brewster.

Todas las características enunciadas para la radiación emitida por los láseres, pueden asignarse a la superradiancia, excepto la de poseer modos de resonancia. Obviamente, como un emisor superradiante no requiere de cavidad resonante para funcionar, la emisión superradiante no posee estructura de modos.

6. LIMITACIONES DEL ESQUEMA MECANICO DEL LASER

En la Sección 3, la figura 3 trata de mostrar la equivalencia existente entre dos procesos de conversión de energía. Por un lado, parte de la energía potencial gravitatoria almacenada por la piedra se transforma dando lugar a una onda en la superficie del agua; por el otro, la energía potencial eléctrica que posee el electrón en el nivel E_2 , se transforma al producirse la transición al nivel de energía E_1 , en una onda de frecuencia ν_{21} , definida por la relación de Bohr: $\nu_{21} = (E_2 - E_1)/h$. Una definición semejante de la frecuencia es imposible de realizar para el esquema mecánico. La frecuencia de la onda generada por la caída de la piedra es independiente de la altura desde la cuál se la arroja. Dicha frecuencia depende de varios factores, entre los que se pueden enumerar la profundidad del líquido y su viscosidad.

En la misma Sección 3, la figura 7 muestra un instante de la caída de la piedra provocada por la perturbación del balancín por la onda estimulante. Este efecto es netamente clásico, es decir, habitual en toda descripción macroscópica y, por lo mismo, imposible de homologar para la descripción microscópica o cuántica. Dicha figura 7 ha sido incluida para visualizar el proceso íntimo de perturbación del balancín por la onda estimulante y de caída de la piedra.

Al final de la misma Sección 3, cuando se explica la reinyección de la onda reflejada por los bordes del estanque en el medio activo formado por los balancines cargados con piedras, se continúa con la explicación del proceso amplificador sin indicar que deben darse vuelta los balancines. En realidad, se supone que el número de balancines es muy grande y que sus orientaciones están distribuidas convenientemente como para que el resultado final resulte feliz.

Por último, el esquema mecánico no permite dar cuenta de la existencia de modos transversales de oscilación. La aparición de modos transversales hace perder direccionalidad a la emisión de los láseres, al tiempo que la radiación incrementa el número de componentes de diferentes longitudes de onda. Sin embargo, estas nuevas componentes están también ubicadas debajo del perfil de línea y agrupadas apretadamente en los entornos de los modos longitudinales de oscilación.

El autor agradece muy especialmente el auspicio de la Organización de los Estados Americanos, la que a través del Programa Multinacional de Física auspició este trabajo.

BIBLIOGRAFIA

1. A. Einstein, Z. Phys., 18, 121 (1917).
2. M. Garavaglia, M. Gallardo e C. A. Massone, Informes 12, (1974).
Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires, Argentina.