

Laseres

Luis Antonio Soto Ruiz

April 19, 2025

Abstract

Los láseres son dispositivos que generan luz coherente mediante la emisión estimulada de fotones, produciendo una luz monocromática, direccional y coherente. Su operación implica la estimulación de átomos o moléculas para liberar fotones idénticos, amplificando la luz al pasar por un medio activo. Este fenómeno tiene diversas aplicaciones en medicina, comunicación, investigación científica e industria, gracias a su capacidad para realizar tareas precisas como cirugías láser, transmisión de datos a través de fibra óptica, corte y soldadura en la industria, entre otras. Los láseres se clasifican según el medio activo utilizado y son fundamentales en una amplia gama de campos tecnológicos.

En los procesos cuánticos de emisión espontánea, absorción estimulada y emisión estimulada, un átomo experimenta transiciones entre estados de energía. En la emisión espontánea, el átomo decae de un estado superior a uno inferior emitiendo un fotón. La absorción estimulada ocurre cuando un fotón externo induce al átomo a pasar de un estado de baja a alta energía. En la emisión estimulada, un fotón externo estimula al átomo a realizar la transición inversa, emitiendo dos fotones en el proceso. Estos procesos se asemejan a la absorción y emisión estimulada de energía mecánica en sistemas clásicos resonantes. Sin embargo, la emisión espontánea es un fenómeno cuántico debido a fluctuaciones en el campo electromagnético, incluso en ausencia de un campo clásico. La interacción de la radiación con el átomo se cuantifica mediante la densidad espectral de la radiación aplicada ($\rho(\nu)$). La probabilidad de transición entre estados de energía se relaciona con la densidad de energía de la radiación a la frecuencia asociada con la diferencia de energía entre los estados.

Las razones de transición también dependen de las propiedades detalladas de los estados atómicos 1 y 2 a través del elemento de matriz del momento dipolar eléctrico por lo tanto, la probabilidad por unidad de tiempo para una transición del estado 1 al estado 2 se puede escribir como

$$R_{1 \rightarrow 2} = B_{12}\rho(\nu) \quad (1)$$

La probabilidad por unidad de tiempo de que un átomo en el estado 2 realice una transición al estado 1, es la suma de dos términos, la probabilidad por unidad de tiempo de emisión espontánea y la probabilidad por unidad de tiempo.

$$R_{2 \rightarrow 1} = A_{21} + B_{21}\rho(\nu) \quad (2)$$

Si ahora se consideran los átomos en los estados 1 y 2

$$n_1 R_{1 \rightarrow 2} = n_2 R_{2 \rightarrow 1} \quad (3)$$

Así pues

$$\rho(v) = \frac{\frac{A_{21}}{B_{21}}}{\frac{n_1}{n_2} \frac{B_{12}}{B_{21}} - 1} \quad (4)$$

utilizar el factor de Boltzmann

$$\frac{n_1}{n_2} = e^{(\epsilon_2 - \epsilon_1)/kT} = e^{hv/kT} \quad (5)$$

convirtiéndose en

$$\rho(v) = \frac{\frac{A_{21}}{B_{21}}}{e^{hv/kT} \frac{B_{12}}{B_{21}} - 1} \quad (6)$$

Sin embargo esto debe concoruar con el espectro del cuerpo negro de Planck

$$\rho_T(v) = \frac{8\pi hv^3}{c^3} \left(\frac{1}{e^{hv/kT} - 1} \right) \quad (7)$$

$$\frac{B_{12}}{B_{21}} = 1 \quad (8)$$

$$\frac{A_{21}}{B_{21}} = \frac{8\pi hv^3}{c^3} \quad (9)$$

$$\frac{A_{21}}{B_{21}\rho(v)} = \frac{8\pi hv^3}{c^3} \quad (10)$$

En 1917, Einstein formuló los coeficientes A, B que describen los procesos cuánticos de absorción estimulada, emisión estimulada y emisión espontánea. Estos coeficientes, inicialmente derivados sin valores específicos, revelan proporciones entre sí. La relación A_{21} , el coeficiente de emisión espontánea, se puede calcular cuánticamente, y así obtener los demás coeficientes. Se destaca que los coeficientes de absorción estimulada y emisión estimulada son iguales. Además, la relación A_{21}/B_{21} varía con la frecuencia, indicando que a medida que la diferencia de energía entre estados aumenta, la emisión espontánea es más probable en comparación con la emisión estimulada. Estos resultados subrayan aspectos fundamentales de la interacción entre la radiación y los átomos.

Cuando los átomos están en equilibrio térmico con la radiación, la emisión espontánea es mucho más probable que la emisión estimulada si la frecuencia del campo electromagnético (v) es mucho menor que el producto de la constante de Planck (h) y la temperatura (T), es decir, $v \ll kT$. Esta condición es aplicable a transiciones electrónicas en átomos y moléculas, lo que permite ignorar la emisión estimulada en esas situaciones. Sin embargo, la emisión estimulada puede volverse significativa si la frecuencia del campo es comparable a kT y dominante si la frecuencia es mucho menor que kT , una condición que se da a temperatura ambiente, especialmente en transiciones atómicas en la región de microondas del espectro

electromagnético.

En sistemas fuera de equilibrio térmico, la emisión espontánea es más probable que la emisión estimulada si la población normal de estados. Sin embargo, mediante un proceso llamado bombeo óptico, donde se invierte la población normal de estados para que la razón de emisión supera a la de absorción. Esto implica que la radiación aplicada es amplificada, ya que emerge más radiación de la que entra en la interacción. Para mantener esta inversión de población y sostener el proceso, se utilizan dispositivos llamados láser o maser, dependiendo de la región del espectro electromagnético en la que operan.

En un láser de estado sólido, como el basado en un cristal de rubí, los átomos de cromo incorporados al sistema actúan como "impurezas" causantes de la acción láser. El bombeo óptico induce la absorción de fotones por los átomos de cromo, cambiando las poblaciones de los estados de energía y logrando una inversión de población. La emisión estimulada prevalece sobre la absorción estimulada debido a la inversión de población, resultando en un haz monocromático, coherente e intenso de radiación láser.

En resumen, la teoría básica del láser se desarrolla al aplicar la distribución de Bose a los estados cuánticos de los fotones en lugar de la distribución de Boltzmann para los estados cuánticos de los átomos. La conclusión de que los bosones en un estado cuántico aumentarán la probabilidad de unirse por un factor de $(1 + n)$ es aplicable a los fotones en los estados cuánticos de la barra cilíndrica, dado que los fotones son bosones. La ecuación de densidad de energía $p(\nu)$ en el láser es similar a las ecuaciones utilizadas para derivar la distribución de Bose. En términos generales, un láser es un dispositivo que prepara un material de manera que el nivel de energía más alto tenga una mayor población que el nivel de energía más bajo, y produce radiación coherente a frecuencias comunes con el resonador y la diferencia de energía entre los niveles. Los láseres, presentes en diversas formas como láseres de gas, láseres de líquido y láseres de estado sólido, se utilizan en aplicaciones que van desde radioastronomía y biofísica hasta comunicaciones, gracias a la naturaleza coherente e intensa de la radiación que generan.