

# EMISIÓN ESTIMULADA

Los diodos láser (LD) empleados como emisores en Comunicaciones Ópticas se basan en el fenómeno conocido como **emisión estimulada**. Esta emisión fue predicha teóricamente por Albert Einstein a principios del siglo pasado, y confirmada experimentalmente poco tiempo después.

## EL CUERPO NEGRO

La deducción de Einstein se deriva del **cuerpo negro**, un hipotético material capaz de absorber radiación de cualquier longitud de onda. A finales del siglo XIX se habían construido algunos dispositivos de laboratorio que imitaban con bastante exactitud un CN ideal (en realidad, cualquier cuerpo que esté suficientemente caliente lo reproduce razonablemente). La emisión característica de ese CN (Fig. 1) constituyó un auténtico quebradero de cabeza durante

muchos años, porque no se correspondía con las predicciones deducidas de simples argumentos termodinámicos. En 1900, aunando varias contribuciones anteriores de Wien, Stefan, Rayleigh y otros, Planck propuso para la densidad de energía emitida por el CN la fórmula siguiente:

$$S(\nu) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \cdot \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1} \quad \{1\}$$

que se diferenciaba de la fórmula propuesta anteriormente en el término  $(-1)$  del denominador. Este pequeño detalle, sin embargo, resultó de importancia trascendental, porque para llegar a la fórmula de Planck era necesario suponer que la energía se absorbía y emitía en forma de elementos discretos, no en cantidades arbitrarias. Se acababa de descubrir la **cuantización** de la energía, origen de la Mecánica Cuántica, uno de los dos pilares de toda la Física Moderna (el otro es la Teoría de la Relatividad).

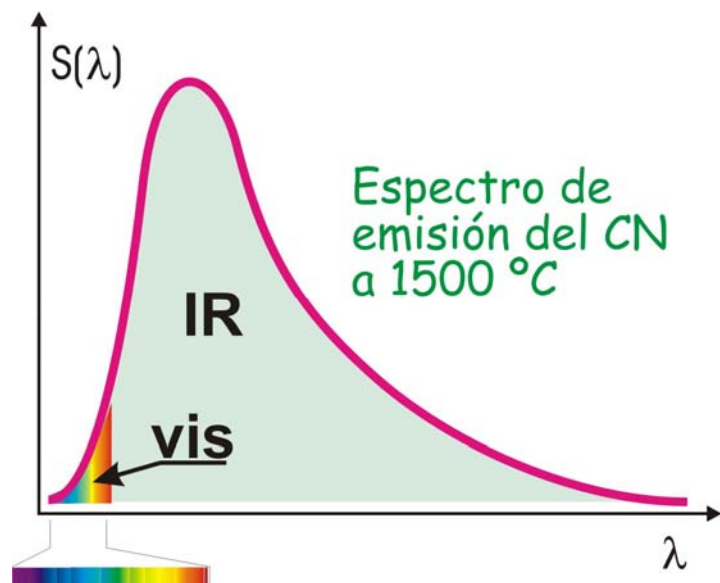


Figura 1. Curva de un cuerpo negro experimental. Su forma y posición solo depende de la temperatura.

## EL CN DE DOS NIVELES DE EINSTEIN

Einstein fue uno de los primeros que abrazó con todas las consecuencias la nueva teoría (incluso antes que Planck), y la utilizó poco tiempo después para explicar otro de los misterios de la época, el *efecto fotoeléctrico*, que fue el primer fenómeno justificado con argumentos cuánticos. Bastantes años más tarde, en 1917, volvió a apoyarse en los mismos para plantear el comportamiento de absorción y emisión de los materiales que interaccionan con una radiación incidente. Para simplificar al máximo el problema, Einstein supuso un CN con tan sólo dos niveles como el mostrado en la figura 2.

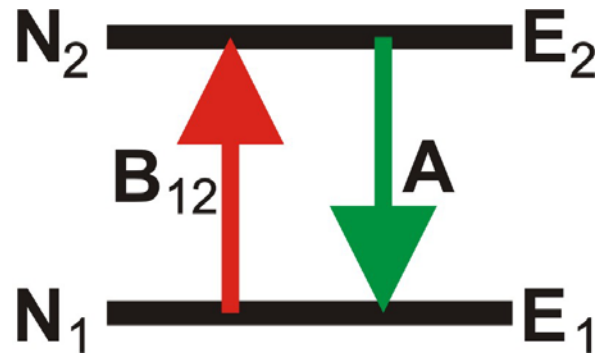


Figura 2. Planteamiento de un CN de dos niveles, sus poblaciones, energías y coeficientes de absorción y emisión.

Se supone el CN en equilibrio termodinámico con el exterior. Está emitiendo una densidad de fotones como la que aparece en {1}. Si se mantiene en equilibrio, entonces la energía absorbida y emitida han de ser idénticas. Las poblaciones  $N_1$  y  $N_2$  están relacionadas en el equilibrio por la distribución de Maxwell-Boltzmann:

$$\frac{N_2}{N_1} = \exp\left(-\frac{E_2 - E_1}{kT}\right) \quad \{2\}$$

El nivel  $N_2$  se descarga por emisión espontánea. Esta emisión depende exclusivamente de un coeficiente  $A$  de emisión y de la población existente en  $N_2$ :

$$\frac{dN_2}{dt} = -AN_2 \quad \{3\}$$

Por otra parte, el nivel  $N_2$  se carga desde  $N_1$  por absorción de fotones. La absorción depende de un coeficiente  $B_{12}$  de absorción, de la densidad de fotones y de la población de  $N_1$ :

$$\frac{dN_2}{dt} = B_{12}S(\nu)N_1 \quad \{4\}$$

En equilibrio, la población de  $N_2$  es constante. Por lo tanto

$$AN_2 = B_{12}S(\nu)N_1 \quad \{5\}$$

De ahí se puede deducir la densidad de fotones:

$$S(\nu) = \frac{A}{B_{12}} \frac{N_2}{N_1} = \frac{A}{B_{12}} \exp\left(-\frac{h\nu}{kT}\right) \quad \{6\}$$

Esta fórmula resulta **incompatible** con la fórmula de Planck indicada en {1}. Únicamente pueden igualarse si

$$h\nu \gg kT \quad \{7\}$$

en cuyo caso

$$\frac{A}{B_{12}} = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \quad \{8\}$$

## Emisión Estimulada

Para conseguir que el planteamiento encajara con el formulismo de Planck, Einstein **postuló** la existencia de un nuevo proceso de desactivación dependiente de la densidad de fotones, que recibió el nombre de **emisión estimulada**. Ese proceso (Fig. 3) consistiría en la emisión de dos fotones idénticos por incidencia de un fotón sobre un elemento de la población  $N_2$ :

$$\frac{dN_2}{dt} = -B_{21}S(\nu)N_2 \quad \{9\}$$

Tendríamos ahora tres procesos, cuyas dependencias se resumen en la Tabla.

Proceso	Depende de		
Absorción	$B_{12}$	$S(\nu)$	$N_1$
Emisión Espontánea	$A$	–	$N_2$
Emisión Estimulada	$B_{12}$	$S(\nu)$	$N_2$

En estas condiciones, para alcanzar el equilibrio se ha de igualar la tasa de absorción a las dos tasas de emisión, la espontánea y la estimulada,

$$B_{12}S(\nu)N_1 = AN_2 + B_{21}S(\nu)N_2 \quad \{10\}$$

agrupando

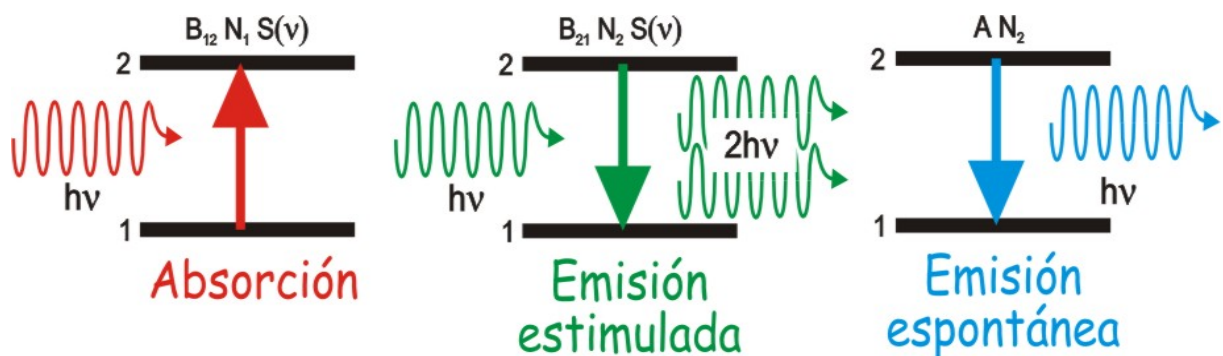


Figura 3. Procesos de absorción-emisión en un CN de dos niveles

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{A}{B_{12}S(\nu)} + \frac{B_{21}}{B_{12}} \quad \{11\}$$

y teniendo en cuenta {2} y {8}

$$\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} + \frac{B_{21}}{B_{12}} \quad \{12\}$$

con lo que la densidad de fotones queda:

$$S(\nu) = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - \frac{B_{21}}{B_{12}}} \quad \{13\}$$

que coincide con la fórmula de Planck siempre que

$$B_{21} = B_{12} \equiv B \quad \{14\}$$

El coeficiente de absorción y el de emisión estimulada son idénticos, y se llamarán simplemente **B**.

## **El Láser**

El proceso de emisión estimulada tiene varias consecuencias, la más notable de las cuales es la existencia del **láser** y el máser. En estos dispositivos, la luz se amplifica por medio del proceso (*LASER* equivale a *Light Amplified by Stimulated Emission of Radiation*).

Obsérvese que ambos procesos, absorción y emisión estimulada, coexisten en todo momento, son equiprobables y solo dependen de las poblaciones  $N_1$  y  $N_2$ . Para que un medio amplifique, se necesita que la población de  $N_2$  sea más abundante que la de  $N_1$ , a fin de que, en promedio, se produzcan más fotones que se pierden. Esta situación, denominada **inversión de población**, se consigue de distintas formas, sacando al sistema del equilibrio con un aporte externo de energía en forma, por ejemplo, de luz o de corriente eléctrica (como sucede en los LDs).

En cualquier caso, en un error común suponer que sólo existe emisión estimulada en situaciones de inversión de población. Lo cierto es que tanto la absorción como la emisión estimulada se dan en todas las circunstancias. Lo que determina la inversión de población es el **predominio** de la emisión estimulada sobre la absorción, dando lugar a medios con ganancia óptica.