

Emisión estimulada versus espontánea

Planteamiento del problema

Sólo hay una interacción radiación materia, que por tanto debe dar cuenta de ambos procesos de emisión (estimulada y espontánea) como casos particulares aunque muy disimilares.

La emisión espontánea se puede entender como emisión estimulada inducida por las fluctuaciones del campo eléctrico del estado de vacío (no confundir el vacío con la nada).

En condiciones normales de iluminación y en el rango visible la probabilidad de emisión espontánea es mucho mayor que la probabilidad de emisión estimulada.

¿Conclusión paradójica de lo anterior?

Parece que las fluctuaciones de vacío tienen mayor efecto sobre la materia que la luz ordinaria.

Resolución de la paradoja:

Lo que afirma la presunta paradoja es cierto: las fuentes de luz convencionales producen luz que difiere muy poco del vacío, por lo que el vacío tiene mayores efectos ópticos que la propia luz (entendida como la parte que difiere del vacío), al menos en lo relativo a la emisión de luz.

Consideremos una única frecuencia ν . Muy frecuentemente, en luz generada por fuentes convencionales los fotones están distribuidos aproximadamente de acuerdo a la estadística de Maxwell-Boltzmann (luz térmica), de modo que la probabilidad de que tengamos n fotones es

$$p_n = \left(1 - e^{-\frac{h\nu}{K_B T}} \right) e^{-n \frac{h\nu}{K_B T}},$$

siendo $K_B = 1.4 \times 10^{-23}$ J/K la constante de Boltzmann, T la temperatura absoluta y $h = 6.6 \times 10^{-34}$ Js la constante de Planck. El número medio de fotones es

$$\langle n \rangle = \sum_{n=0}^{\infty} n p_n = \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{K_B T}} - 1}.$$

Para frecuencias típicas del visible (del orden de $\nu \approx 5 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}$) resulta que $h\nu$ suele ser mucho más grande que $K_B T$. Incluso para temperaturas del orden de la solar $T \approx 6000 \text{ K}$ tenemos que $\langle n \rangle \approx 0.01$. A esta misma temperatura la probabilidad del vacío $n = 0$ y de un fotón $n = 1$ son

$$p_0 = 0.988, \quad p_1 = 0.012.$$

Es decir que el vacío tiene una probabilidad de casi el 99%, mientras que la probabilidad de que haya un fotón es de apenas 1%. Por tanto, es natural que la emisión espontánea (inducida por el vacío) sea mucha más probable que la estimulada (inducida por un fotón).

El valor de $\langle n \rangle$ se ha obtenido en un cálculo mono-modo. Esta aproximación es correcta dentro del volumen de coherencia, en el que la luz se puede describir como una onda (un único modo) en lugar de cómo una mezcla incoherente de ondas (muchos modos).

Podemos comprobar la validez del resultado calculando la potencia luminosa que llegaría a la tierra procedente del sol. La energía de un fotón en el visible es del orden de $E = 3 \times 10^{-19}$ J. La superficie de coherencia en la tierra de la luz solar es del orden de $S = 3 \times 10^{-9}$ m² (región de 0.05 mm de diámetro). El tiempo de coherencia de luz blanca viene a ser del orden de $\tau = 10^{-15}$ s (todo el espectro visible). Con lo anterior podemos calcular la potencia solar que llega a la tierra por unidad de superficie

$$P = \frac{\langle n \rangle E}{S \tau} = 1 \text{ kW/m}^2 ,$$

que coincide aproximadamente con el valor real.

Hay que tener en cuenta que estamos comparando el efecto del vacío y de la “luz” sobre un átomo excitado. La mayoría de los detectores incluyendo nuestro ojo funcionan por absorción, es decir, que se parte de átomos en el estado fundamental, en cuyo caso sólo la “luz “ puede producir un efecto (no hay absorción espontánea).

Para luz láser $\langle n \rangle$ puede ser fácilmente 13 órdenes de magnitud mayor que el de la luz térmica (Mandel y Wolf, *Coherence and Quantum Optics*).

Este cálculo también ilustra por qué apareció antes el máser que el láser. Cuanto menor sea la frecuencia ν menor es la probabilidad del estado de vacío.

Alfredo Luis Aina
Madrid, junio y octubre 2011
Departamento de Óptica, Universidad Complutense

Esta paradoja fue propuesta por los alumnos del grupo C de Óptica del grado en Física, en especial Alfonso Rodil. Se agradecen valiosos comentarios de Isabel Gonzalo.