

El láser

Fundamentos y aplicaciones

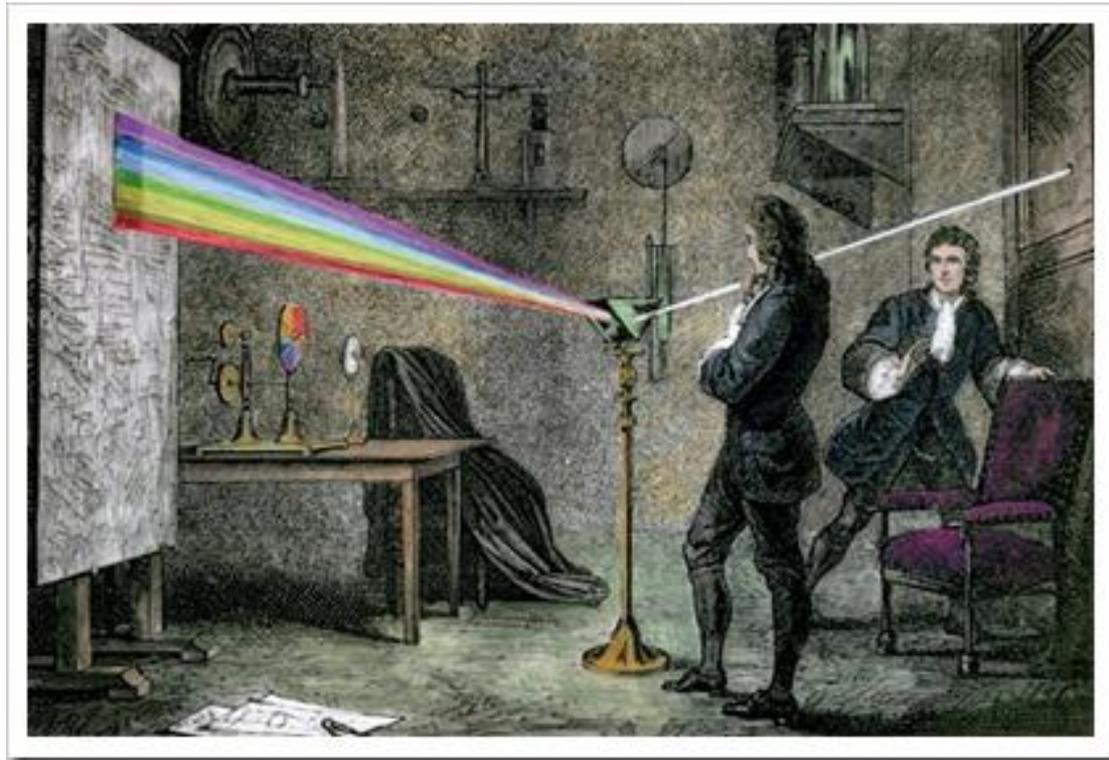
Zacarías Malacara Hernández
Centro de Investigaciones en Óptica, A. C.

Bosquejo

- El espectro electromagnético.
- Teoría cuántica de la luz.
- Absorción y emisión atómica.
- Emisión espontánea y emisión estimulada.
- Fluorescencia y fosforescencia.
- Bombeo óptico e inversión de población.
- Amplificadores y osciladores.
- El máser y el láser.
- Qué tiene de singular la luz del láser (Coherencia espacial y coherencia temporal).
- Aplicaciones del láser.

Composición de la luz

- Newton en 1670 hace pasar la luz blanca del sol por un prisma de vidrio y descubre el espectro de la luz



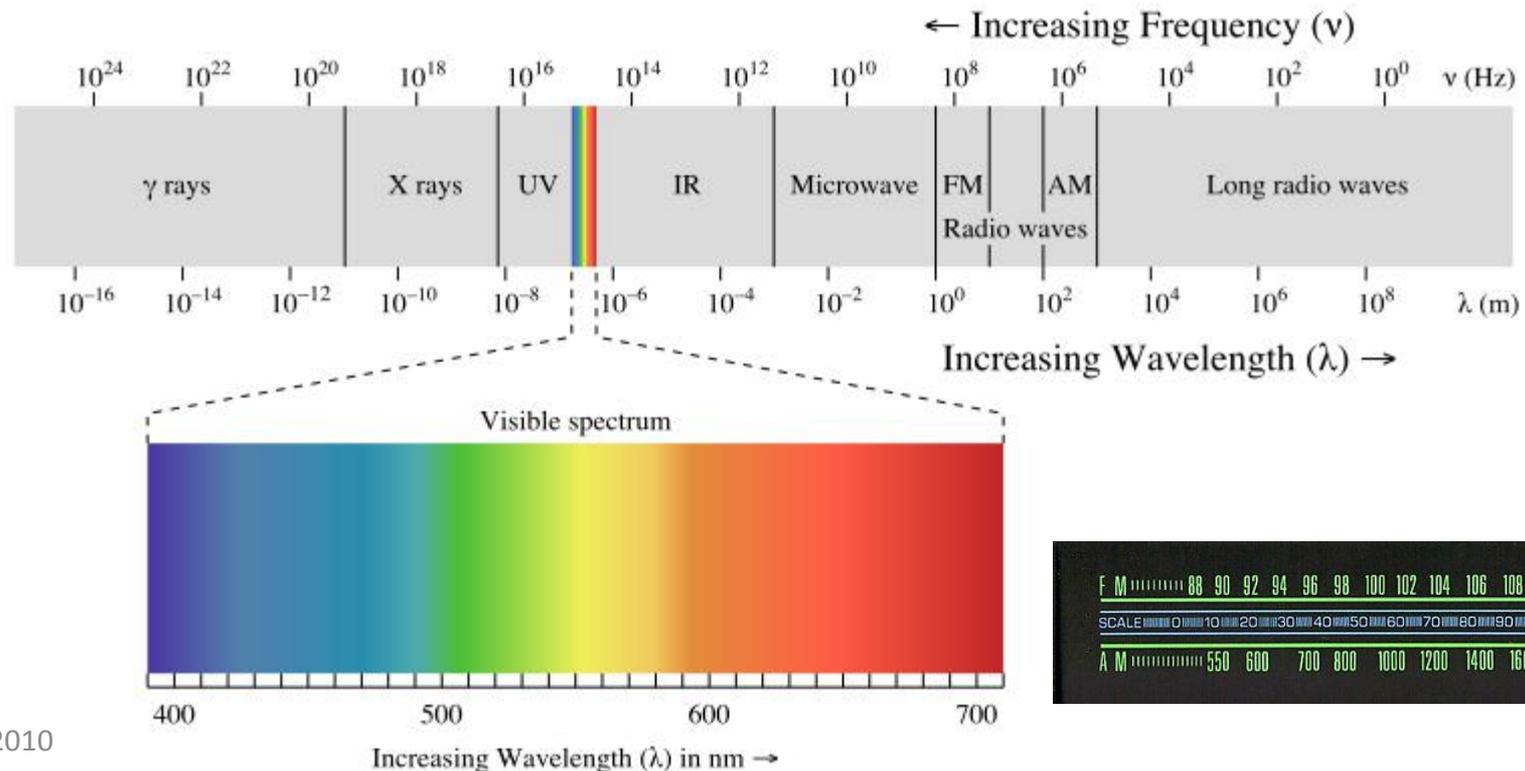
Espectro de Fraunhofer

- En 1814 Joseph Von Fraunhofer descubre en el espectro solar las líneas oscuras que llevan su nombre.
- Estas líneas se deben a los elementos químicos presentes en la atmósfera solar.



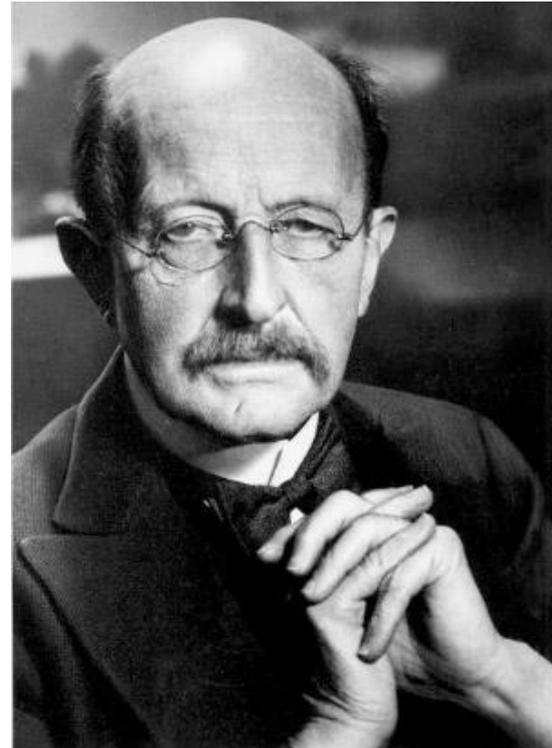
El espectro electromagnético

- El espectro de Fraunhofer es una vista detallada de un espectro más amplio que es el espectro de radiación electromagnética.



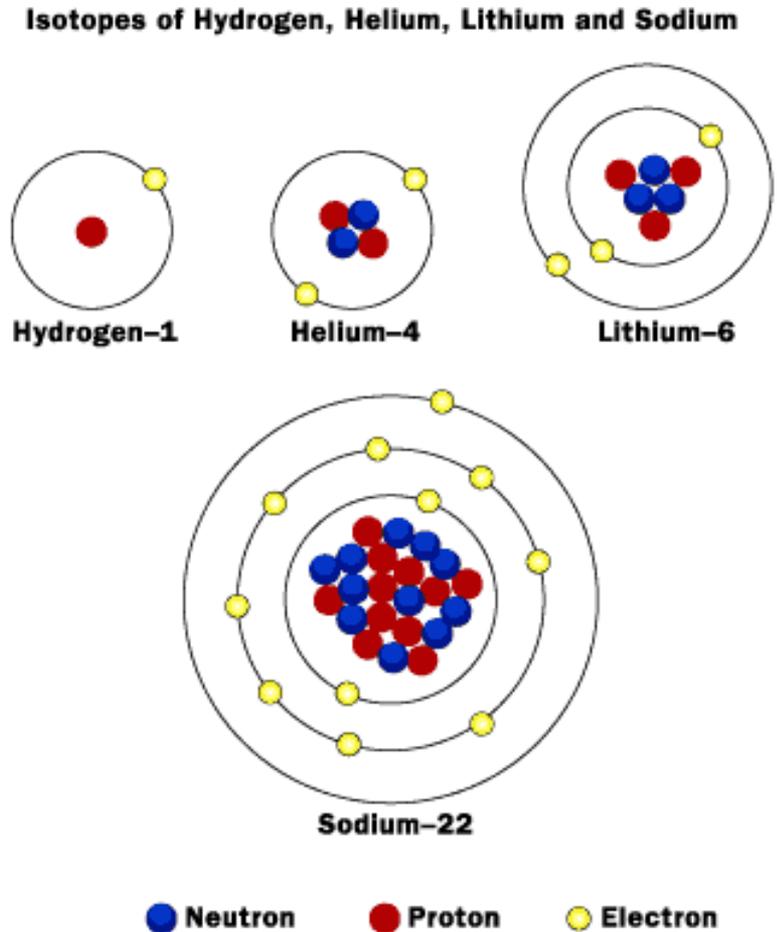
Teoría cuántica de la luz

- En 1904, Max Planck propuso que la energía luminosa se presenta en cantidades múltiples de una energía elemental:
- $E = n h \nu$
- Nace la teoría cuántica.



Átomo de Bohr

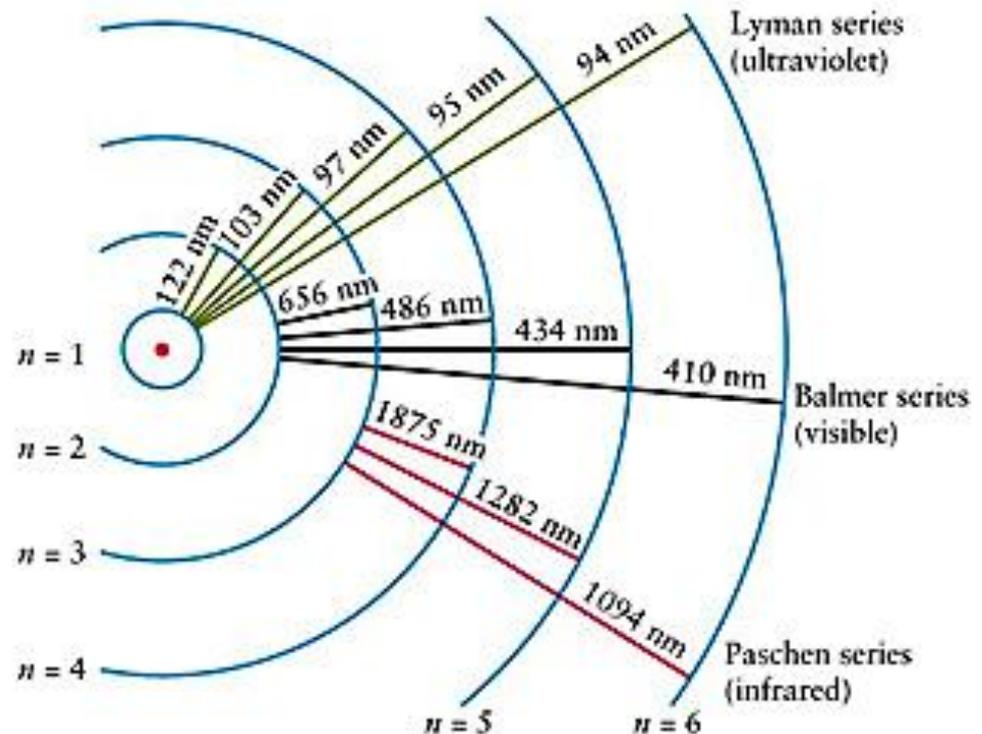
- Niels Bohr propuso su modelo del átomo.
 - Los electrones se encuentran en órbitas precisas definidas por las energías.
 - A cada órbita le corresponde una energía diferente. La órbita más interior tiene menor energía y se llama nivel base pues a donde el electrón tiende a estar.
 - La energía está cuantizada



©2001 How Stuff Works

El átomo de hidrógeno

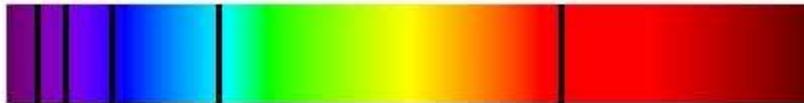
- El átomo de hidrógeno tiene una serie de órbitas posibles donde el electrón se puede encontrar.
- Para que el electrón suba una órbita se requiere una cantidad discreta de energía.
- El electrón no se puede encontrar en puntos intermedios a las órbitas.



El espectro del átomo de hidrógeno

- El átomo de hidrógeno muestra en un espectroscopio un espectro característico con líneas que se pueden expresar como una serie.

Hydrogen Absorption Spectrum



Hydrogen Emission Spectrum



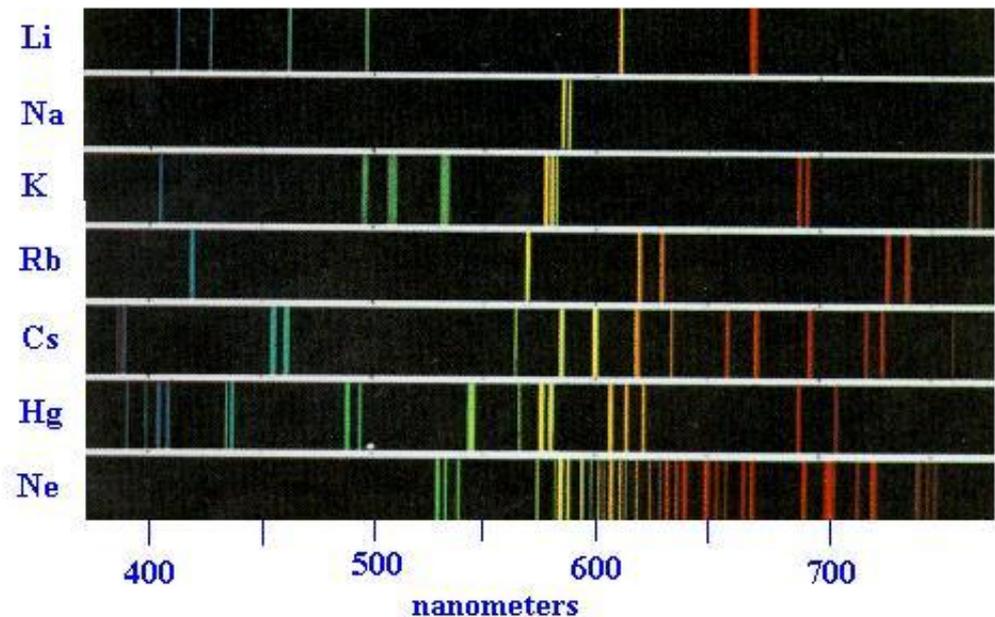
$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad n = 3, 4, 5, \dots$$

Otros átomos

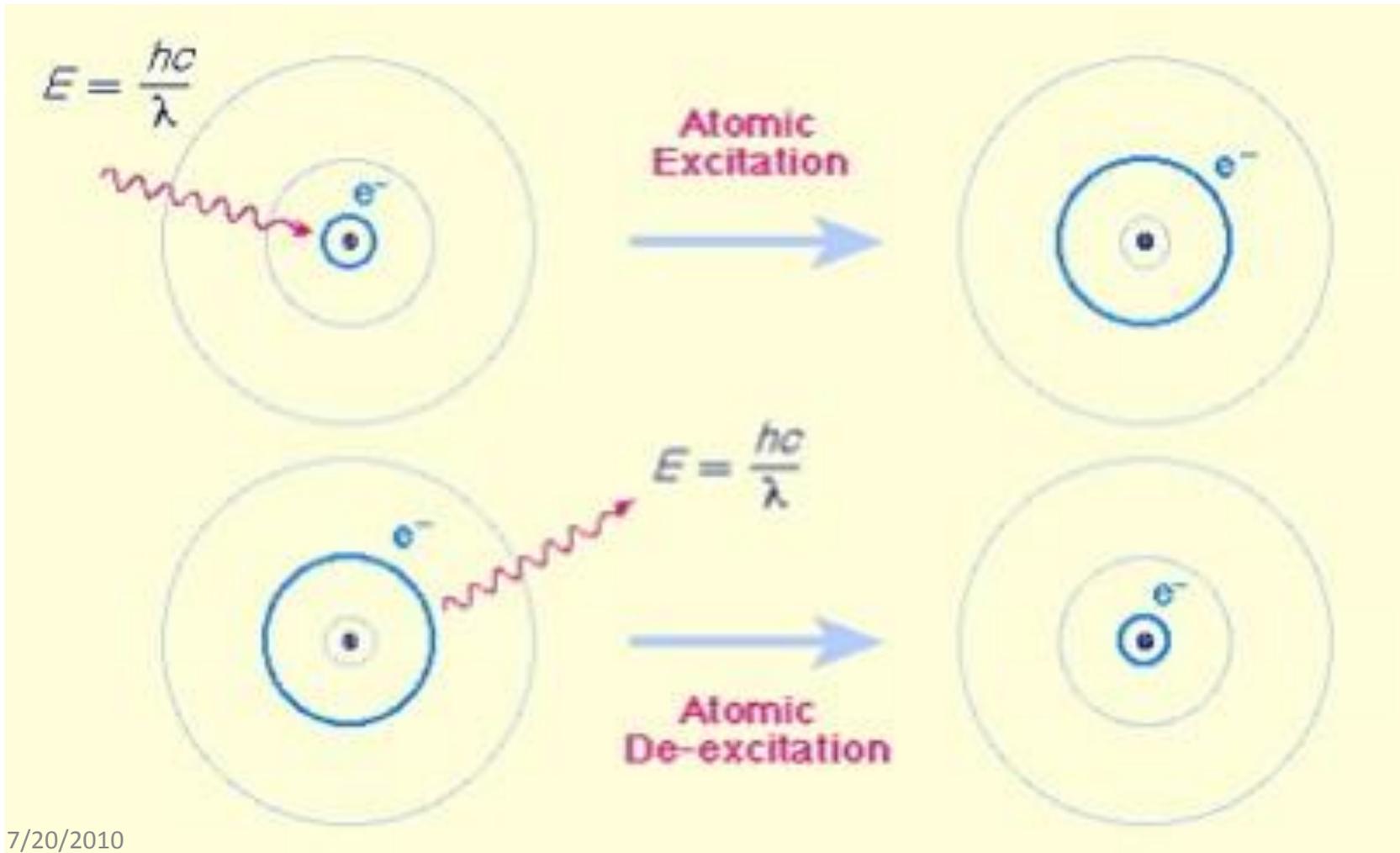
- El espectro de cada átomo depende del número de electrones, el número atómico y su configuración.
- Cada elemento tiene un espectro característico.

Black Body and Line Spectra

Black Body



Excitación y desexcitación atómica

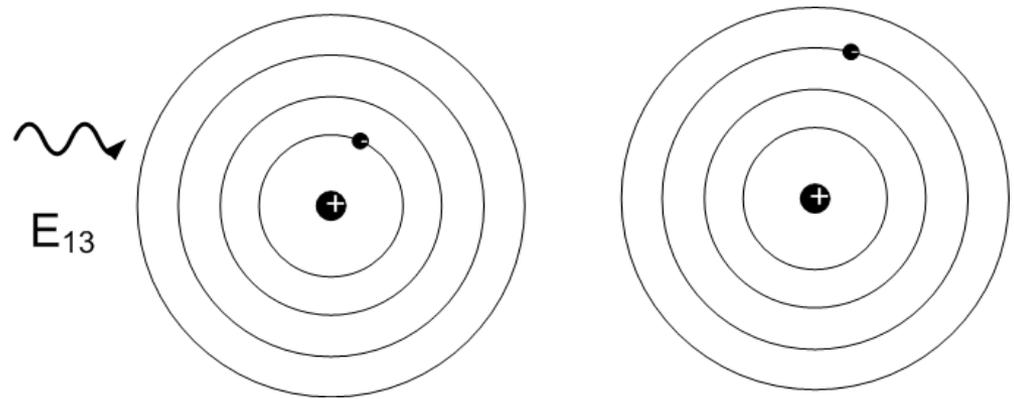


Procesos de absorción y emisión

- En 1916, Einstein propuso tres mecanismos para la absorción y emisión de luz en un átomo:
 - Absorción.
 - Emisión.
 - Emisión estimulada

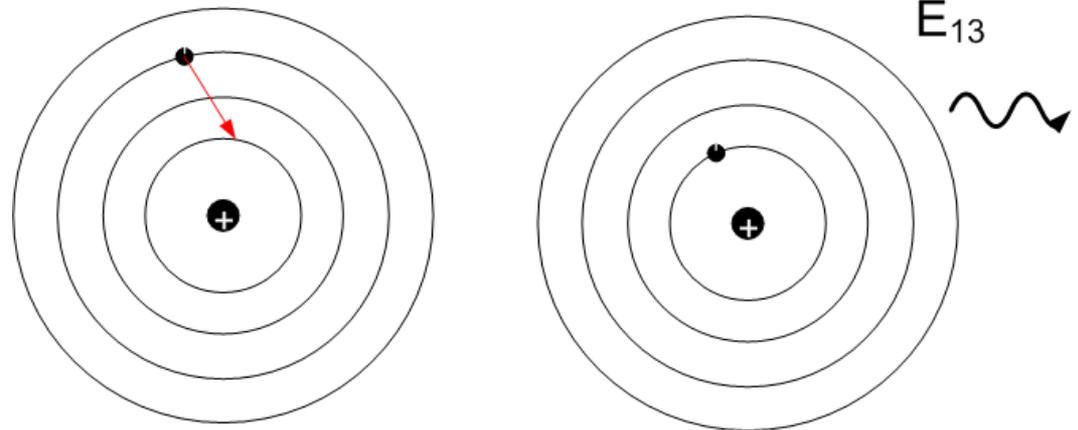
Absorción

- La absorción de energía por parte de un átomo ocurre cuando la energía recibida es igual o muy cercana a la energía entre dos niveles atómicos.



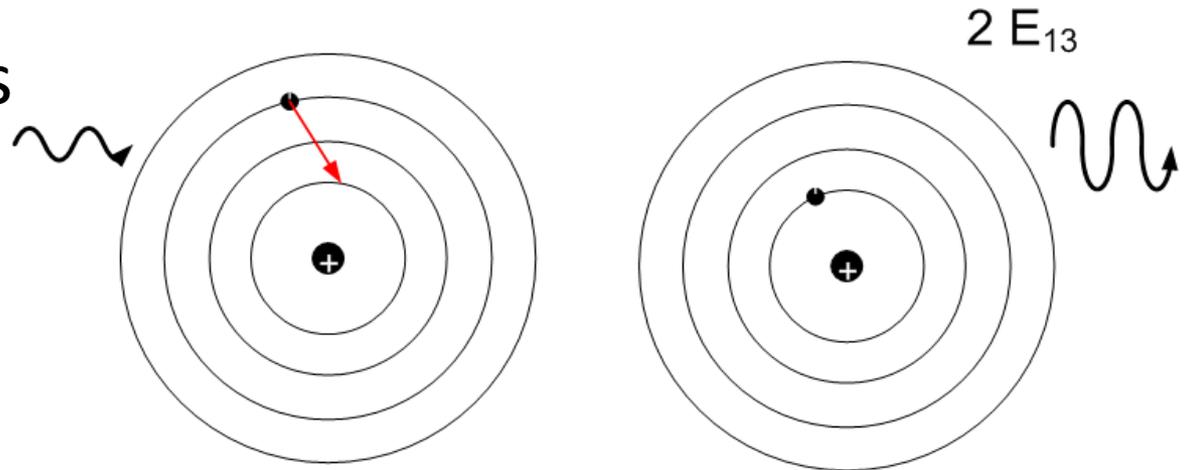
Emisión espontánea

- La emisión resulta un cierto tiempo después. La energía del fotón emitido es la misma que tenía el fotón incidente



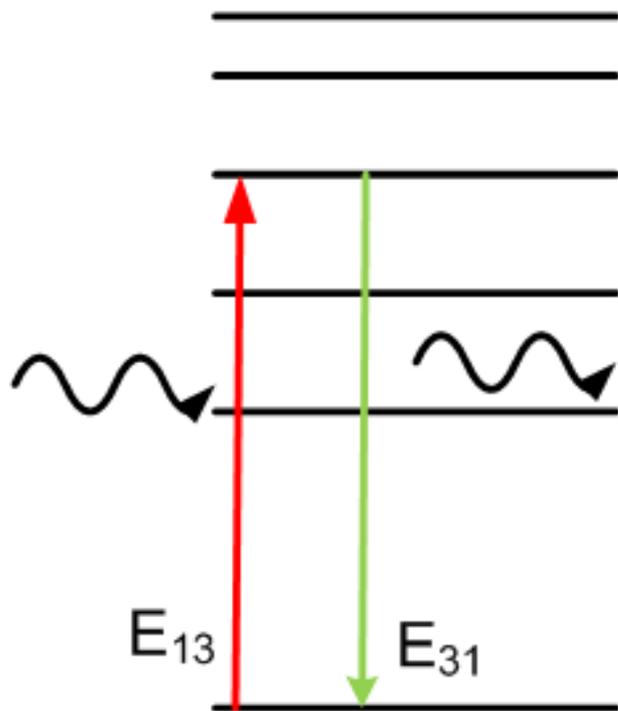
Emisión estimulada

- La presencia de un fotón con la misma energía que la energía entre los niveles atómicos, estimula la emisión del fotón, que se suma al incidente.

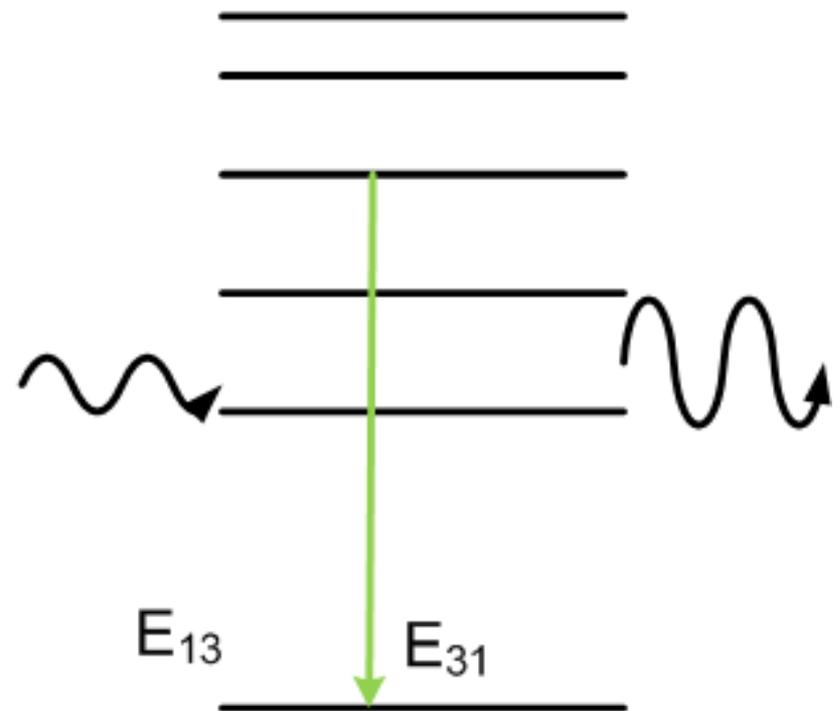


Diagramas de energía

Absorción y
Emisión espontánea



Emisión
estimulada



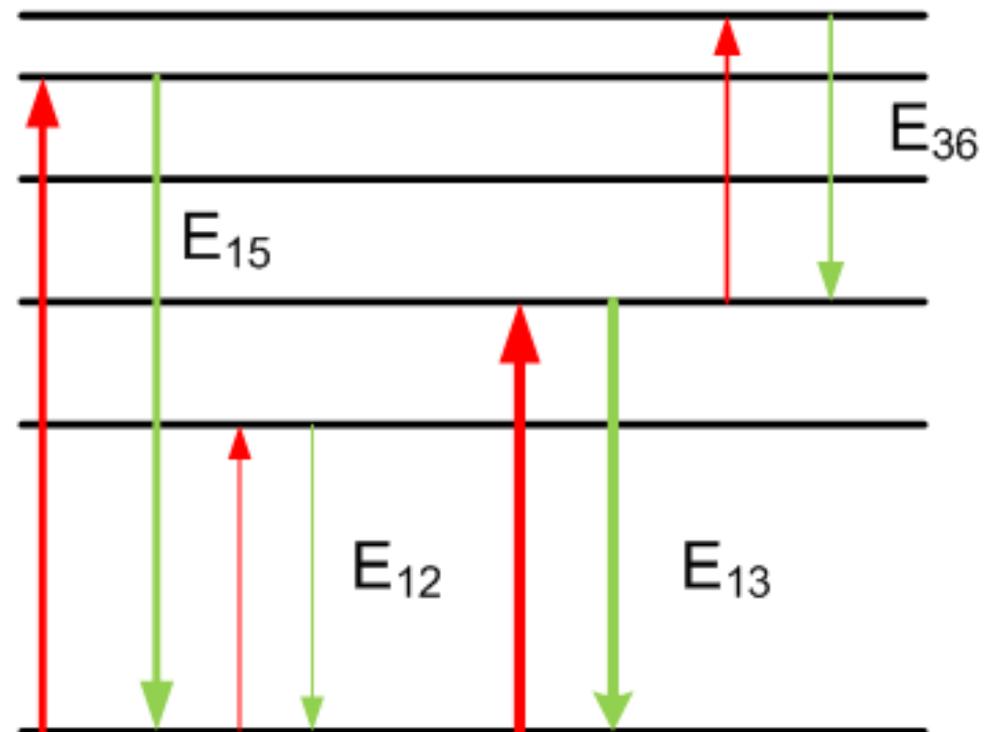
Probabilidades de transición (Coeficientes de Einstein)

- En 1916, Cuando Einstein propone los mecanismos de emisión, explica por qué unas líneas espectrales son más intensas que otras: Toda transición atómica tiene una probabilidad de emitir o absorber luz. A estas probabilidades se les llaman los coeficientes de Einstein.

Probabilidades de transición (Coeficientes de Einstein)

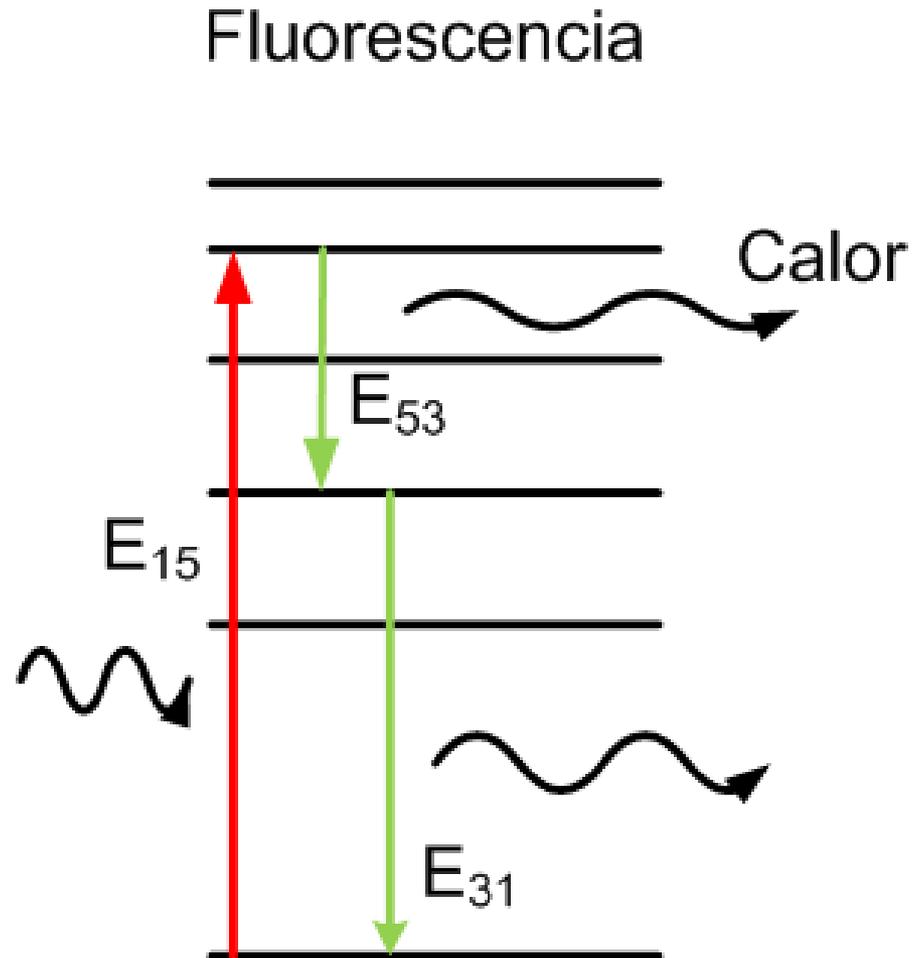
- Las probabilidades de una transición dada es la misma para la absorción que para la emisión.

Coeficientes de Einstein



Fluorescencia

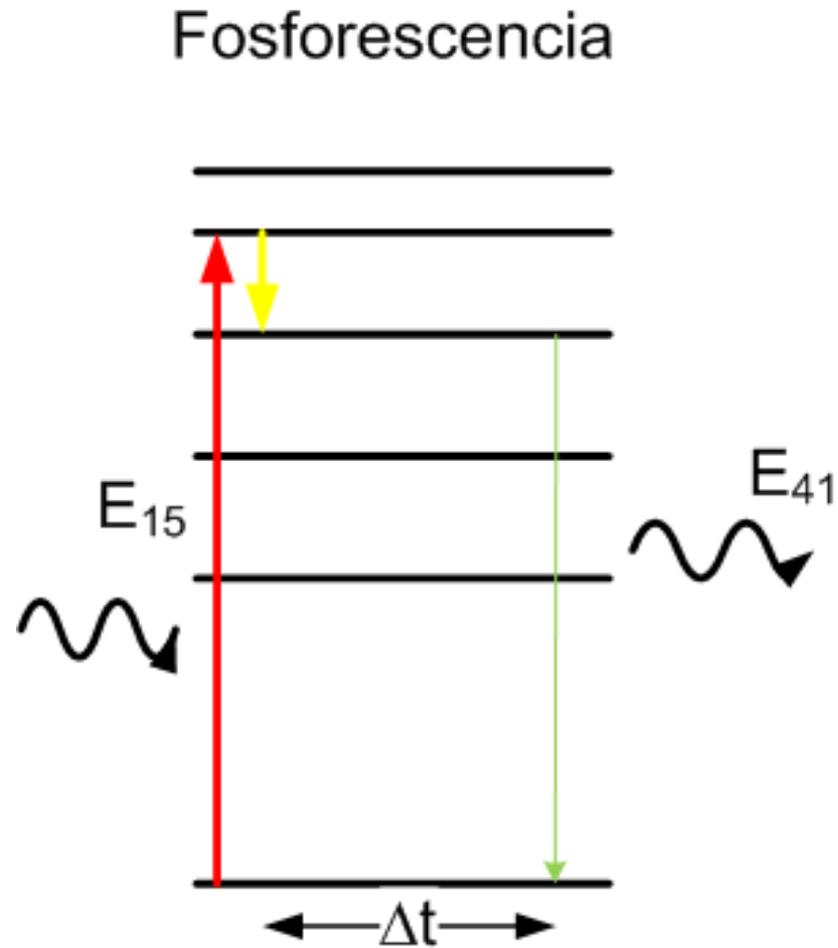
- La fluorescencia es la propiedad de ciertos materiales (especialmente el flúor) de absorber fotones con una cierta energía y emitirlos a una energía más baja. La diferencia de energía se emite en forma de calor. La emisión se produce casi de inmediato.



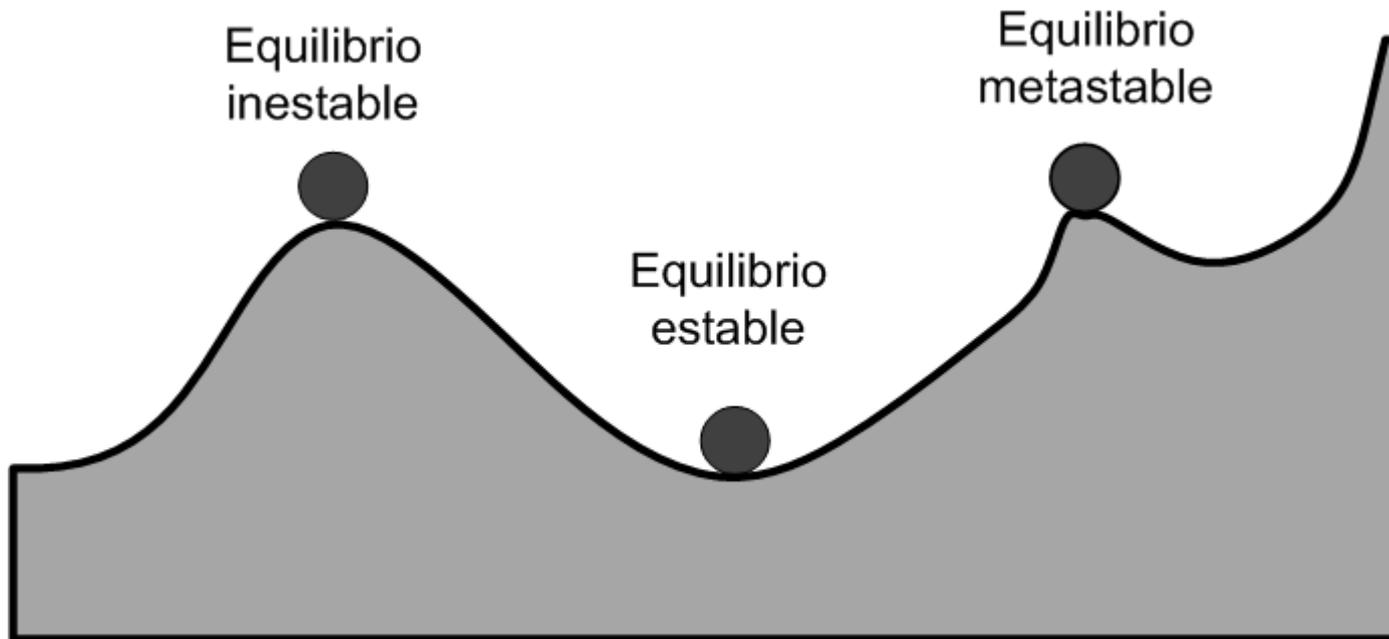
Fosforescencia

- La fosforescencia, descubierta primero en el fósforo, es la propiedad de algunos materiales tales que absorben energía a un nivel con alta probabilidad de ser absorbido, enseguida bajan a un nivel cercano emitiendo un fotón de muy baja energía hasta un nivel con muy baja probabilidad de emitir. De allí se emitirá un fotón un cierto tiempo después que se puede extender hasta horas.

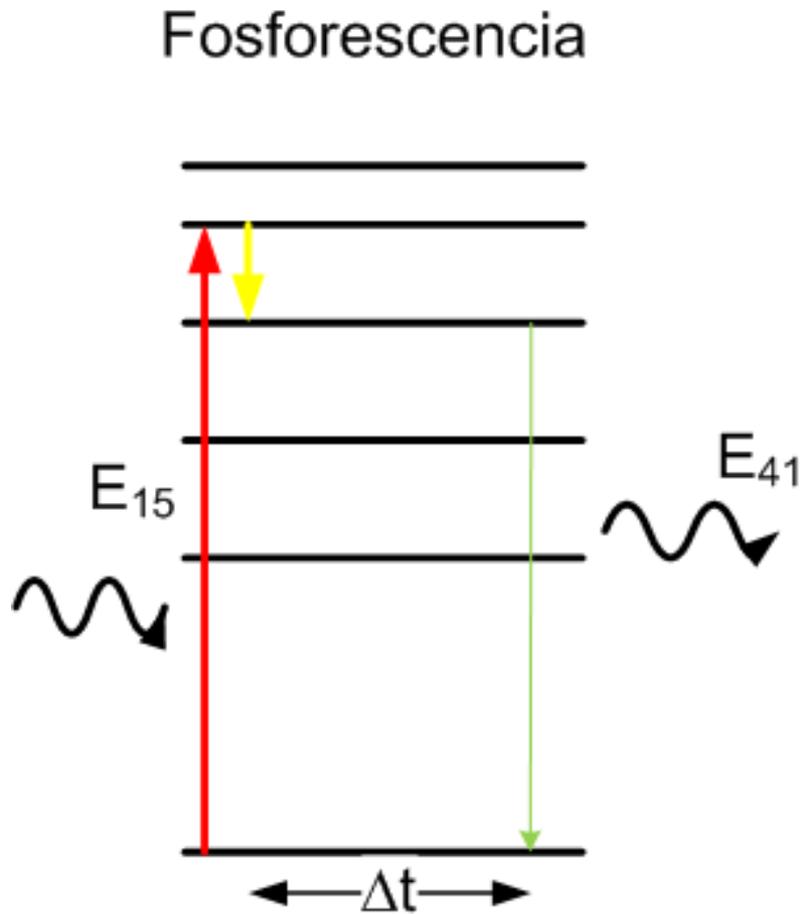
Fosforescencia



Estabilidad (Mecánicamente hablando)



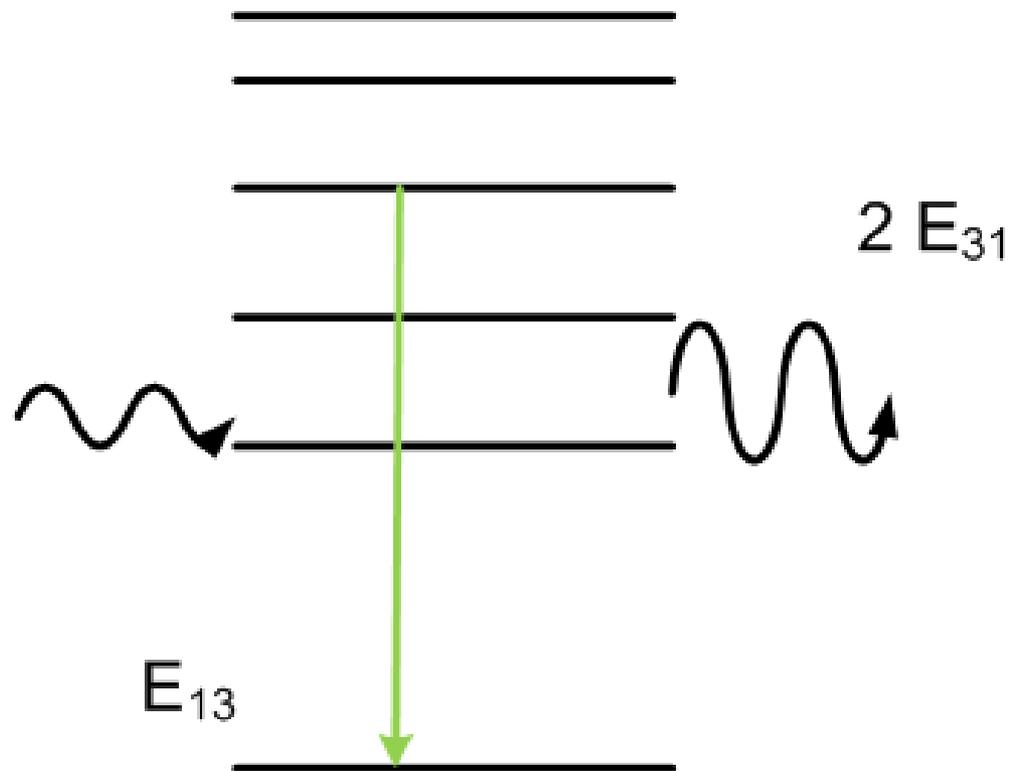
Estado atómico metastable



Emisión estimulada

- Un electrón en estado metastable puede tomar un tiempo largo en ser emitido dado que su probabilidad de emisión (Coeficientes de Einstein) es muy baja.
- Sin embargo, la presencia de un fotón con la energía igual a la transición, estimula la emisión del fotón aumentando la probabilidad de emisión.

Emisión estimulada



Bombeo óptico

- Bajo condiciones normales, los electrones de un átomo se encuentran en el nivel más bajo de energía o nivel base. Solo unos pocos electrones estarán excitados pero buscarán el nivel base a la brevedad.
- El proceso de llevar los electrones a un nivel de energía excitado mediante la inyección de alguna forma de energía se llama **Bombeo óptico**.

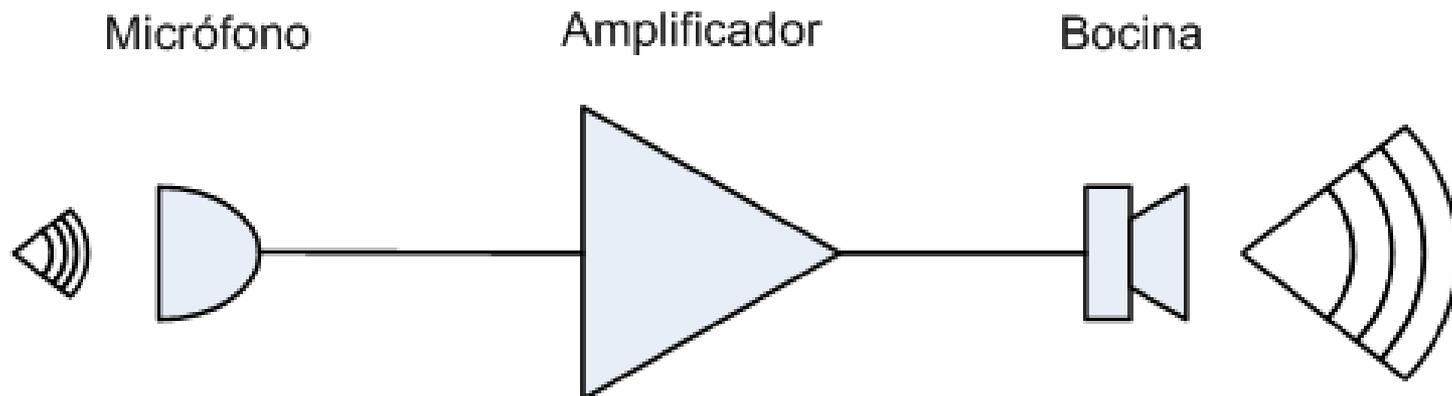
Inversión de población

- Cuando en un medio óptico (cristal, plasma, semiconductor, gas...) la mayoría de los átomos se encuentran excitados, se dice que el medio tiene una **Inversión de población**.

La amplificación de señales

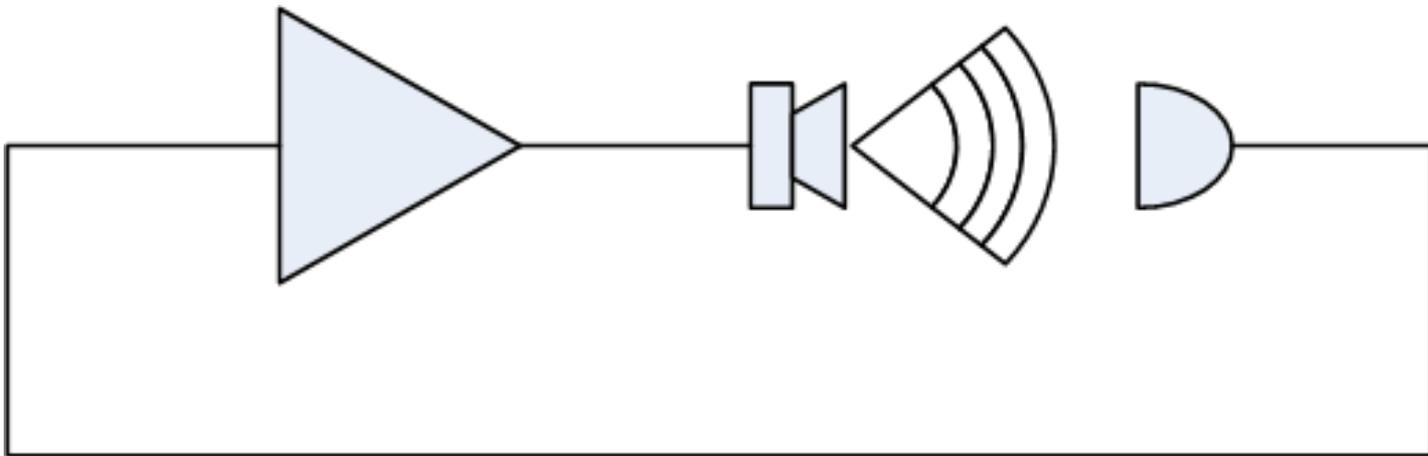
- En electrónica, un amplificador recibe una señal en la entrada. Cuando la señal de la salida es mayor, decimos que la señal está amplificada.
- Definimos la amplificación de un sistema electrónico como:

$$A = V_{\text{salida}} / V_{\text{entrada}}$$



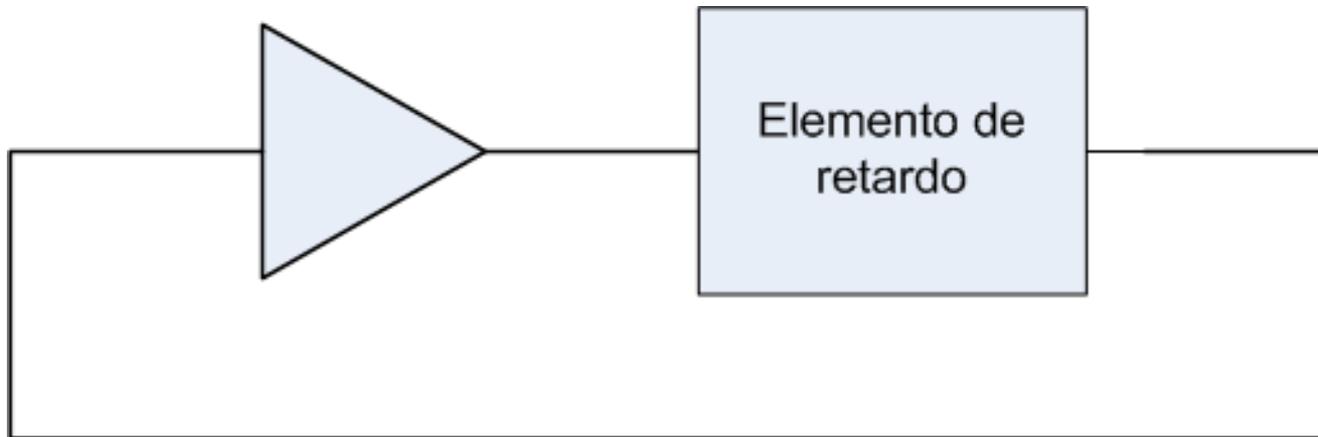
Un oscilador

- Las condiciones para una oscilación son:
 - Que la amplificación del sistema sea mayor que uno en circuito cerrado
 - Que entre la entrada y salida del sistema haya una diferencia de fase múltiplo de 2π .



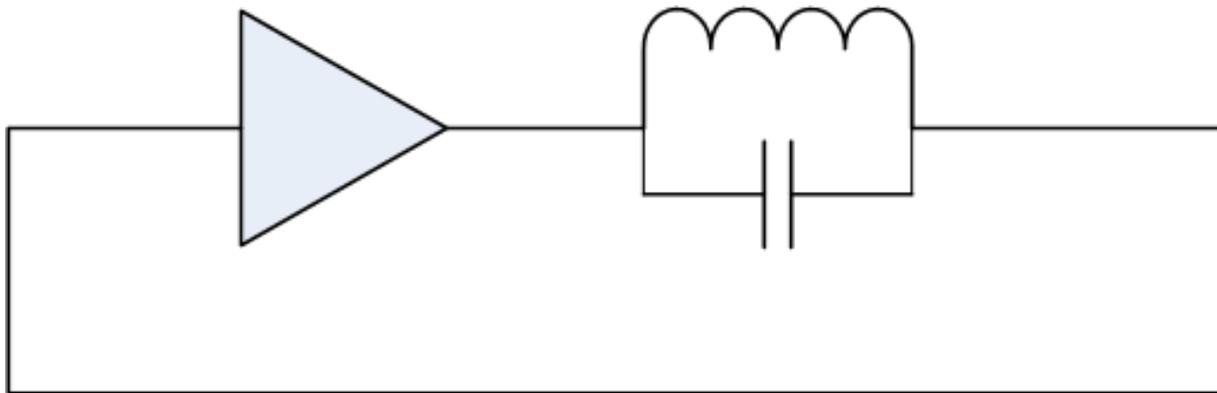
Osciladores

- Podemos mejorar la oscilación si eliminamos el micrófono y la bocina y cuidamos que se cumplan las condiciones de oscilación.



Osciladores

- El oscilador oscilará a la frecuencia que queremos si en un punto ponemos un filtro tal que la condición de amplificación unitaria se cumpla solamente a la frecuencia deseada..

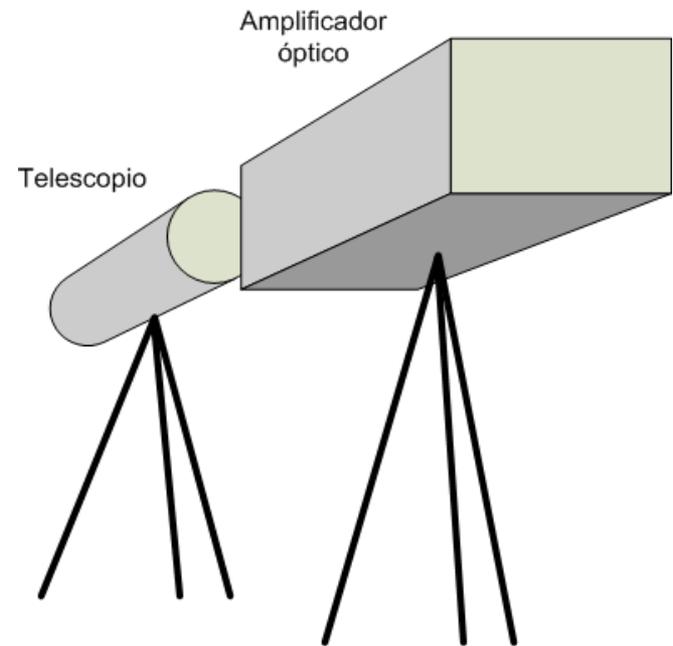


Amplificación óptica

- El procedimiento usual para amplificar una señal acústica es primero convertir esa señal en señal eléctrica (Micrófono) enseguida amplificar la señal eléctrica para convertirla nuevamente en señal acústica (bocina).
- Si queremos amplificar una señal óptica, también tenemos que convertirla a una señal eléctrica (o fotográfica), amplificarla y después convertirla a señal óptica de regreso (Televisión).

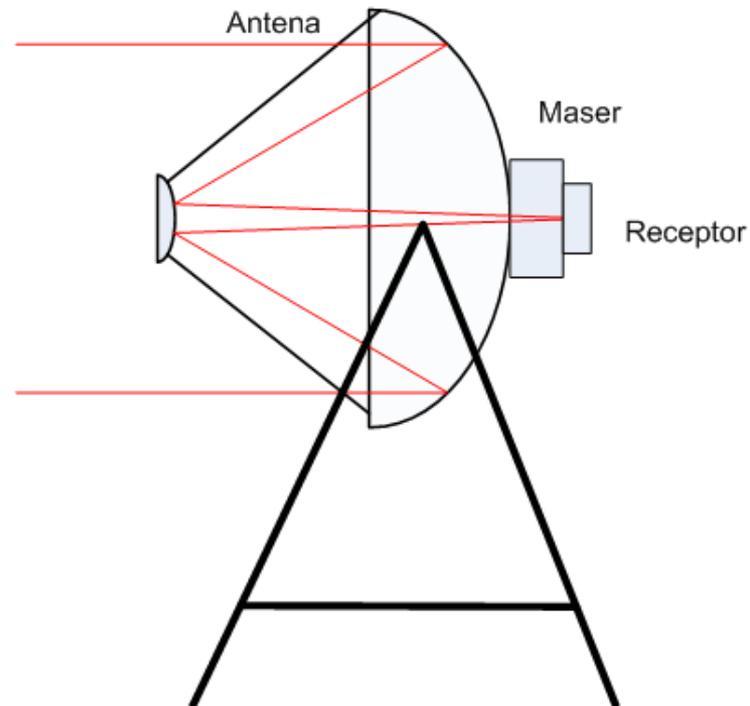
Problema en astronomía

- Las señales astronómicas, tanto en telescopios ópticos como radiotelescopios son muy débiles. En el proceso de conversión a señal eléctrica se introduce una gran cantidad de ruido.
- Propuesta: ¿Es posible construir un amplificador de señales electromagnéticas sin necesidad de convertirlas en otro tipo de señales?



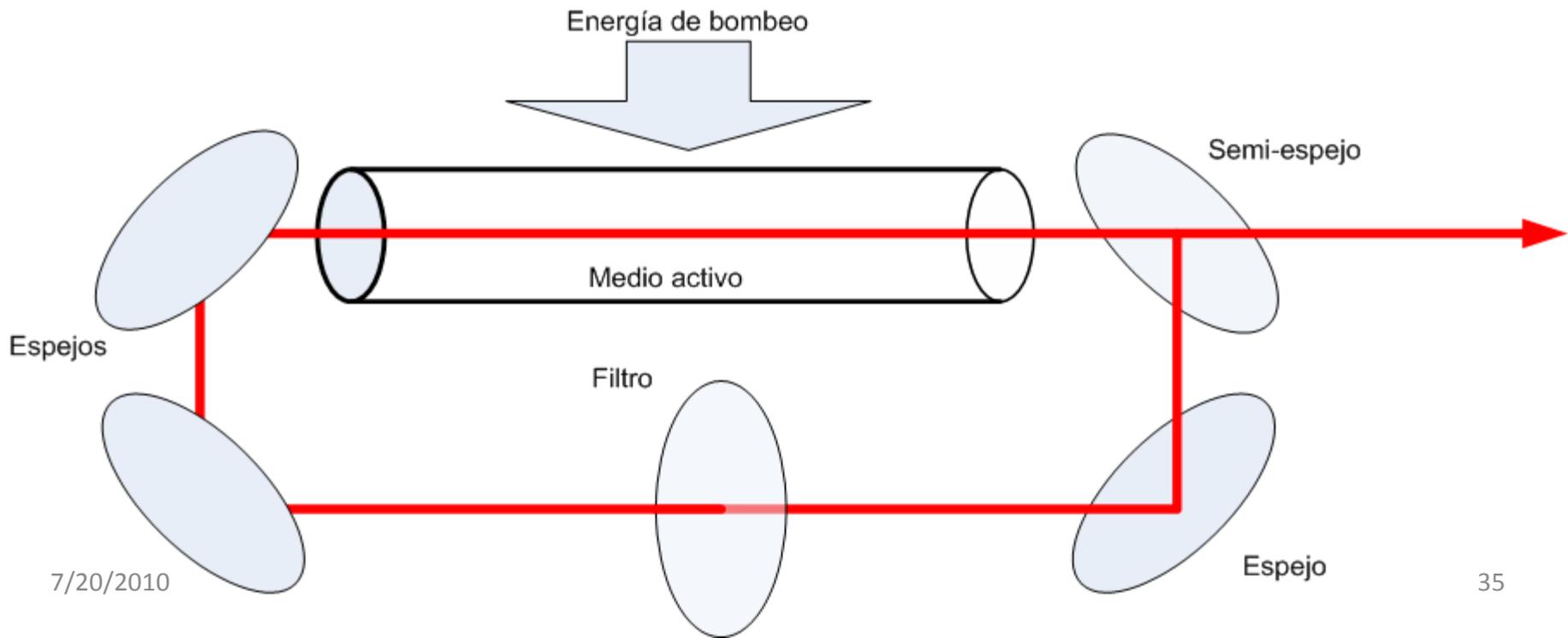
El Maser

- La respuesta a los radioastrónomos fue el **MASER** (**M**icrowave **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation).



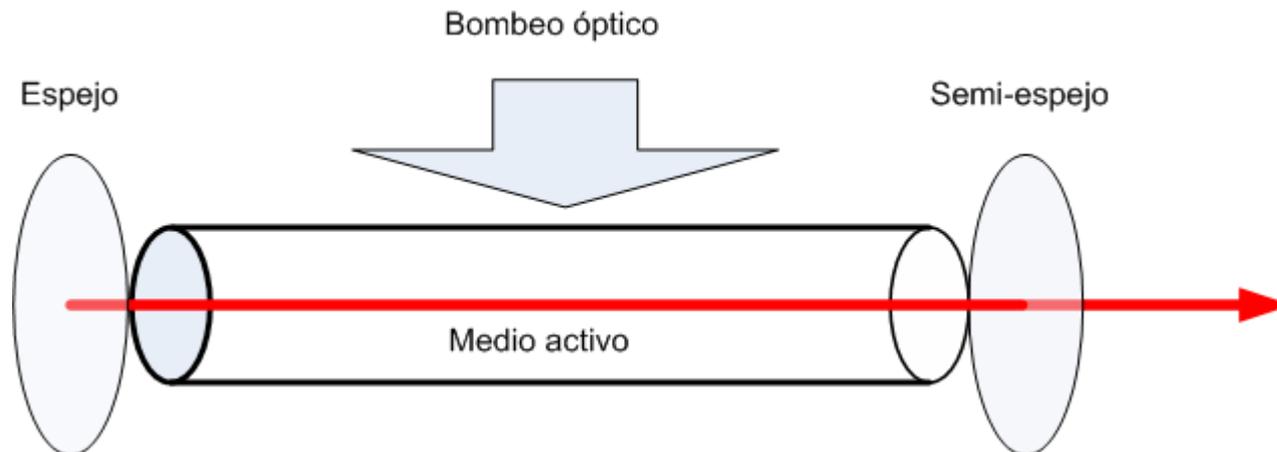
Propuesta para el Láser

- Una idea para un oscilador óptico sería construir un recipiente con un material donde mediante un bombeo óptico se alcanzara la inversión de población para que en un sistema retroalimentado se mantuviera la oscilación



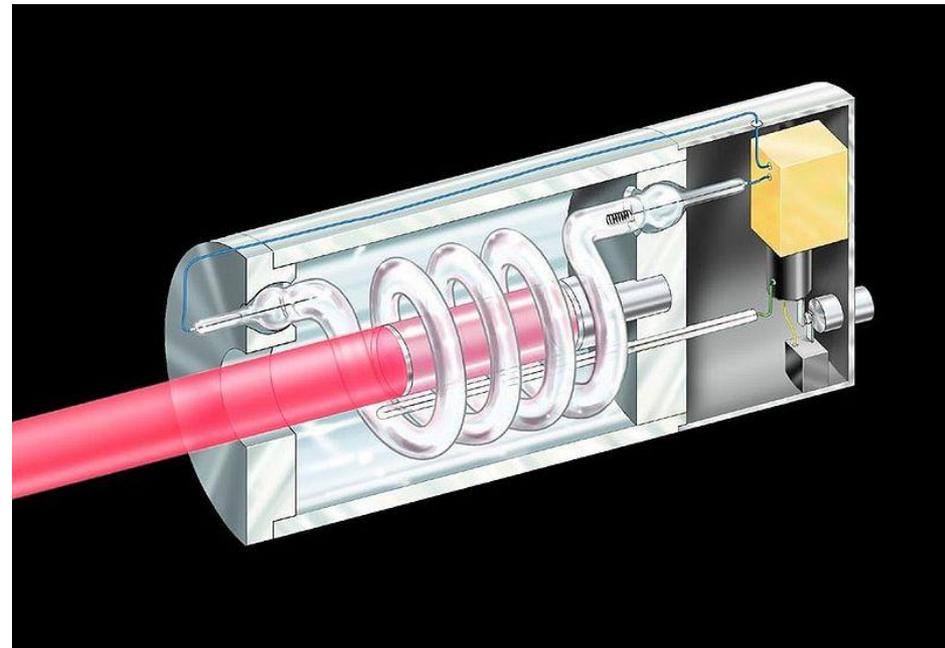
Láser

- Nos podemos ahorrar los espejos usando filtros que además funcionan como espejos.
- Este elemento se conoce como cavidad resonante tal que mediante el fenómeno de la interferencia permite la reflexión de una longitud de onda específica con muy baja tolerancia.



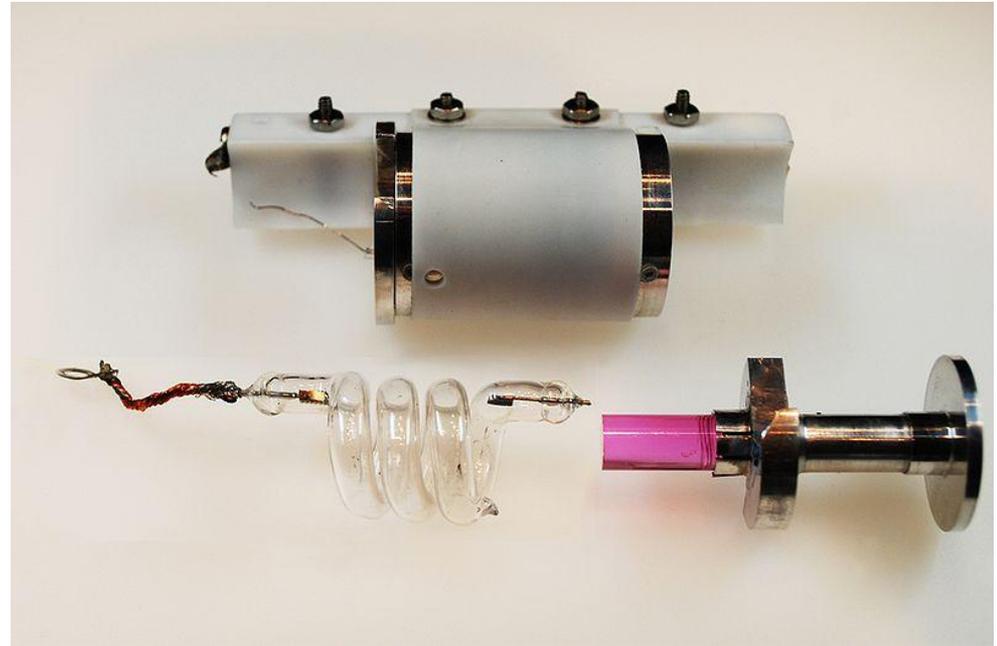
El láser de Rubí

- La primera versión de un láser la construyó Theodore Maiman en los laboratorios Hughes.
- El medio activo era una barra de rubí sintético y el bombeo se hizo con una lámpara de flash fotográfico.
- La emisión de luz ocurrió por pulsos cortos de luz.



El láser de Rubí

- El primer láser funcionó el 16 de mayo de 1960.
- Originalmente Maiman le llamó el Máser óptico. Después se adoptó el nombre de **LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)**.



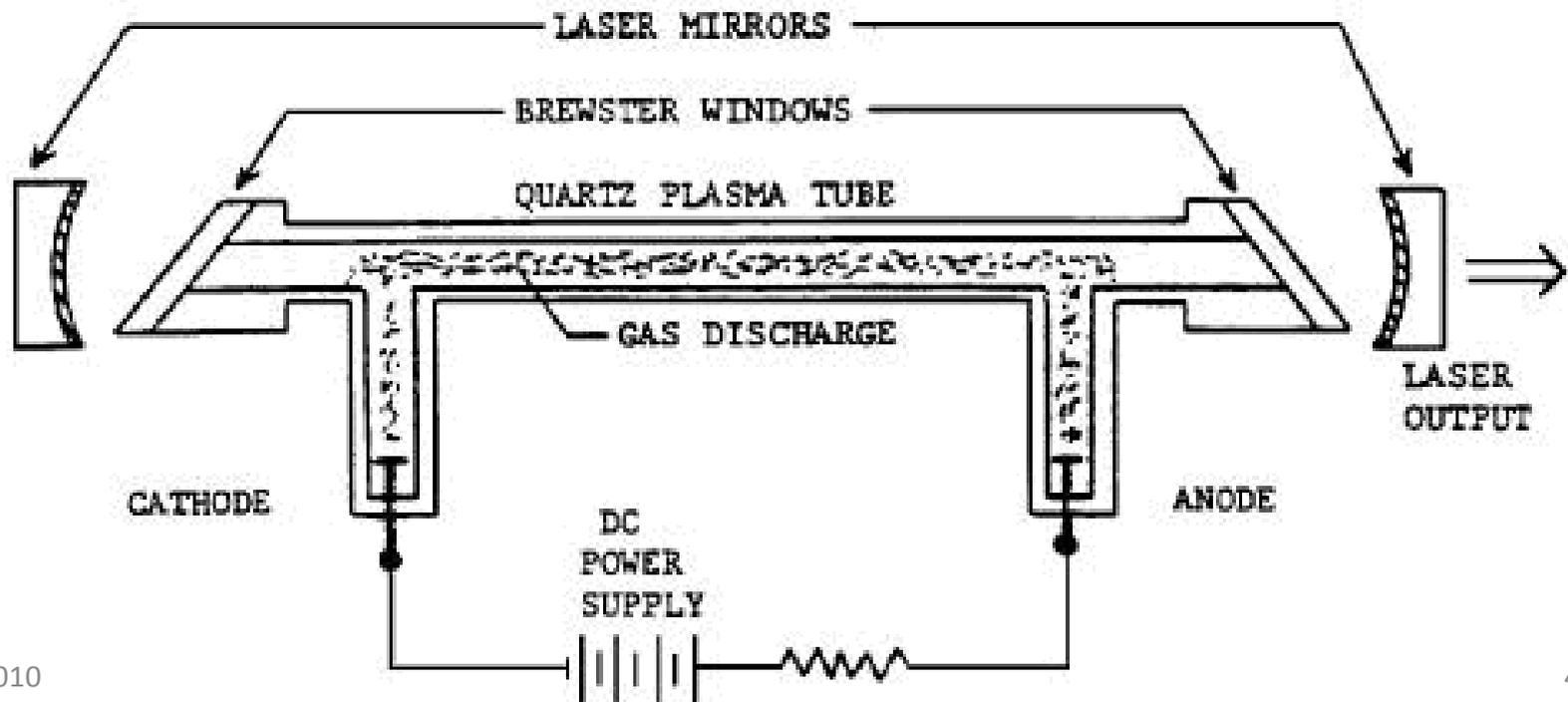
El láser de helio-neón

- Muy poco tiempo después, Ali-Javan, William R. Bennet y Donald Herriot construyeron el láser de helio-neón de operación continua.

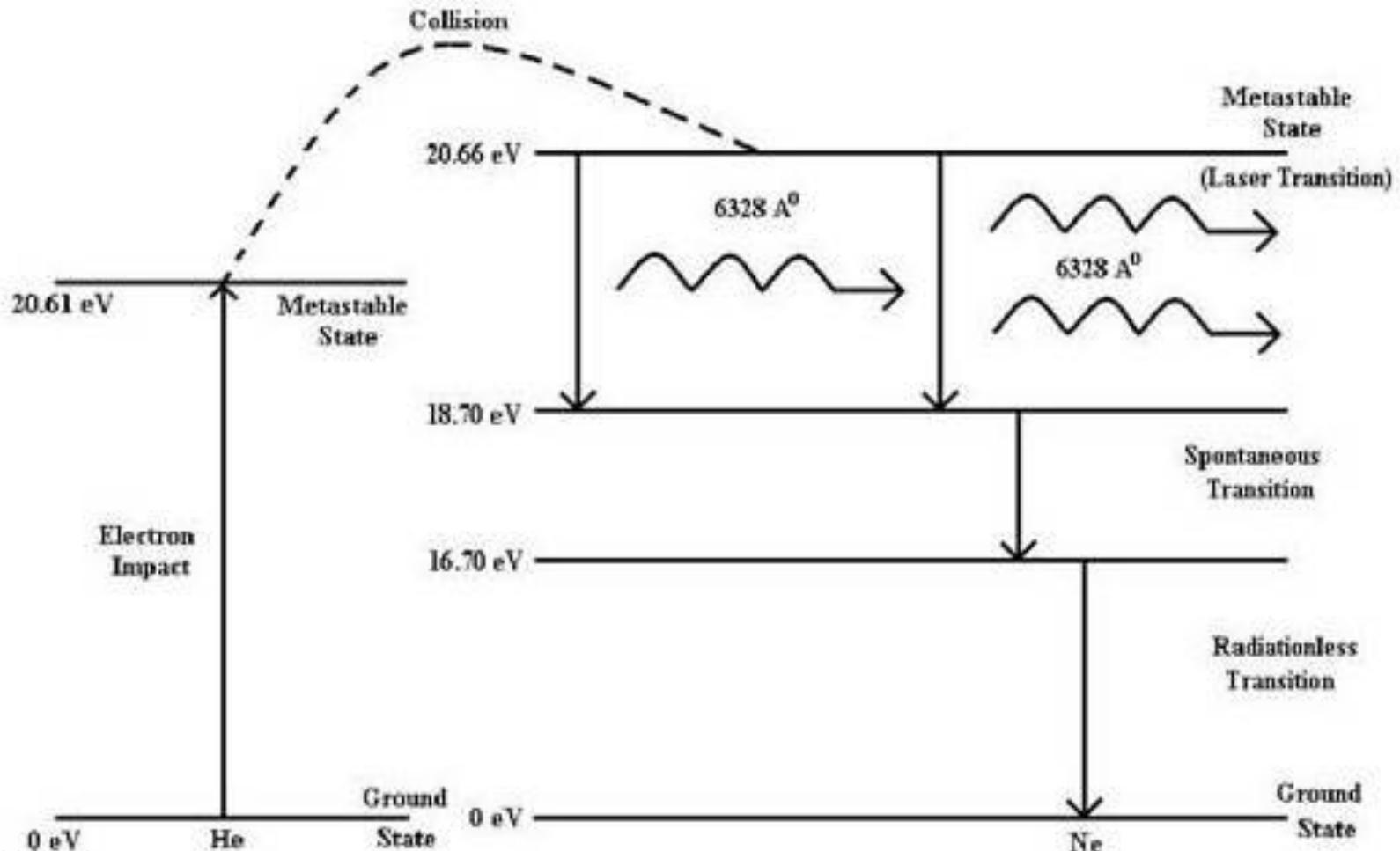


El láser de helio-neón

- El láser de helio-neón usa una mezcla de gases como en los anuncios luminosos.



Transiciones en el helio-neón



Otros Láseres

- En muy poco tiempo, aparecieron otros tipos de láseres en dos categorías principales, entre los que citaremos:
- Pulsados: Rubí, Semiconductor, Ytrio, aluminio-granate; YAG; NdYAG.
- Continuos: Helio-Neón, Argón, CO₂, Colorantes, Láseres de iones metálicos: HeAg, NeCu, TEA,

Otros Láseres

- En la actualidad, hay gran variedad de láseres, los más pequeños los encontramos en los lectores de compact disc o DVD y apuntadores para presentaciones. Estos láseres tienen una potencia de 1 mW. (un miliwatt)



Otros Láseres

- En el otro extremo, se han construido grandes instalaciones de láser que ocupan edificios completos. Su objetivo es encontrar la fusión mediante la implosión laser con una potencia de 2 Gw (2 000 000 000 W)



¿Qué hace singular la luz del
láser?

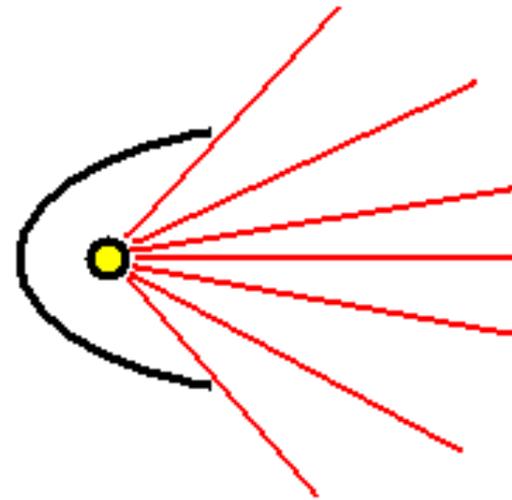
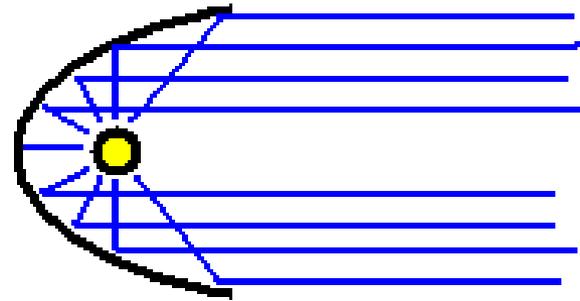
Coherencia espacial

- En muchas aplicaciones, es conveniente dirigir la energía luminosa en una sola dirección. Tal como ocurre en faros, proyectores y sistemas de comunicación.



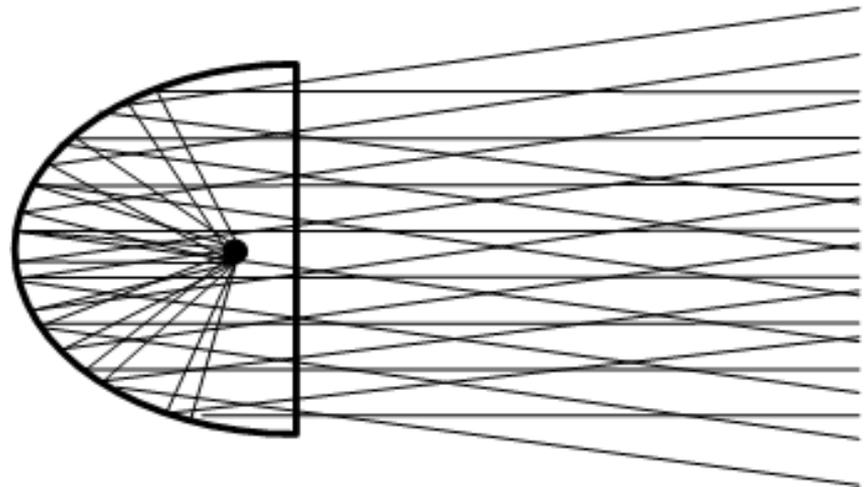
Coherencia espacial

- Una manera simple de dirigir la mayor parte de la energía en una dirección es usando un reflector parabólico y una fuente luminosa muy pequeña. La condición se cumple para fuentes de luz puntuales y solamente para la luz que incide en el reflector. Estos sistemas tienen una eficiencia muy baja.



Coherencia espacial

- Para que la luz salga perfectamente paralela, se requiere que toda la energía salga de un solo punto. De otra manera, el haz de luz se abrirá más entre mayor sea la fuente de luz.
- Una fuente de luz infinitamente pequeña debe dar una densidad de energía infinita.

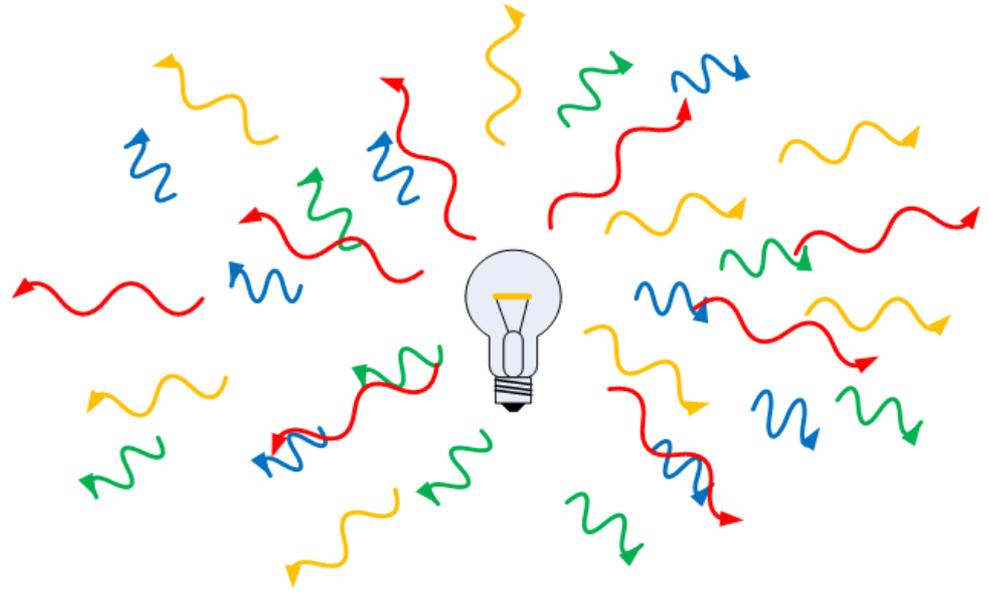


Coherencia espacial

- Asociamos la idea de coherencia espacial con el tamaño de la fuente de luz. Una luz altamente coherente espacialmente o es muy pequeña o está a una distancia infinita.

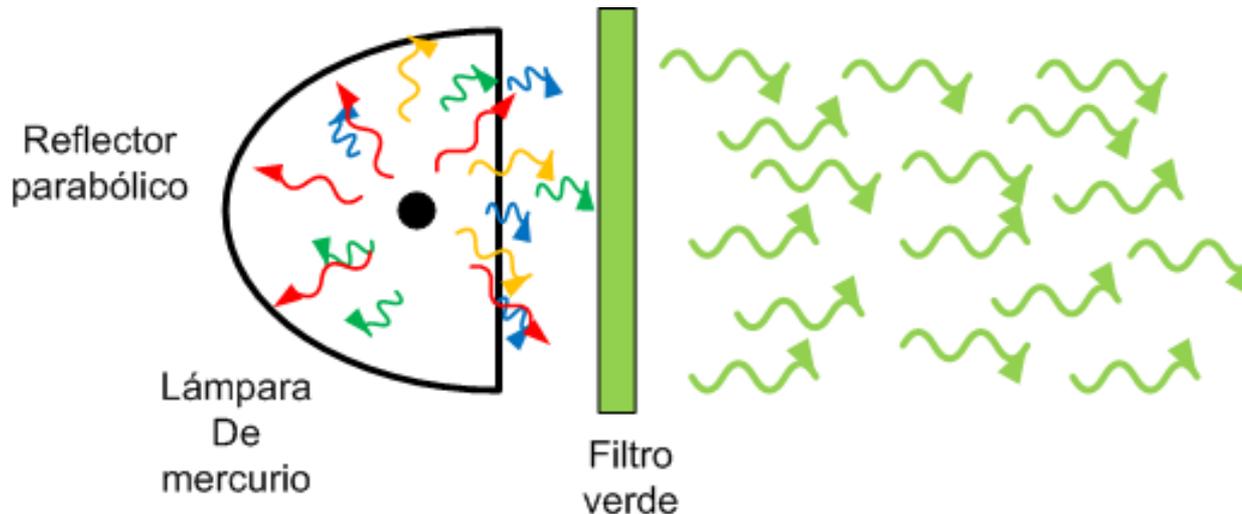
Coherencia temporal

- Una fuente de luz común, como un foco emite luz de manera completamente al azar, tanto en su dirección como en su longitud de onda (color). Como los fotones son emitidos en cualquier momento, no existe una relación de fase entre un fotón y otro, aunque sean del mismo color.



Coherencia temporal

- Algunas lámparas como las lámparas espectrales (como las lámparas de mercurio o de sodio) emiten luz en unos pocos colores. Si colocamos un filtro, podemos seleccionar un color específico. Sin embargo, la lámpara emitirá fotones que no guardan relación de fase alguna entre sí.

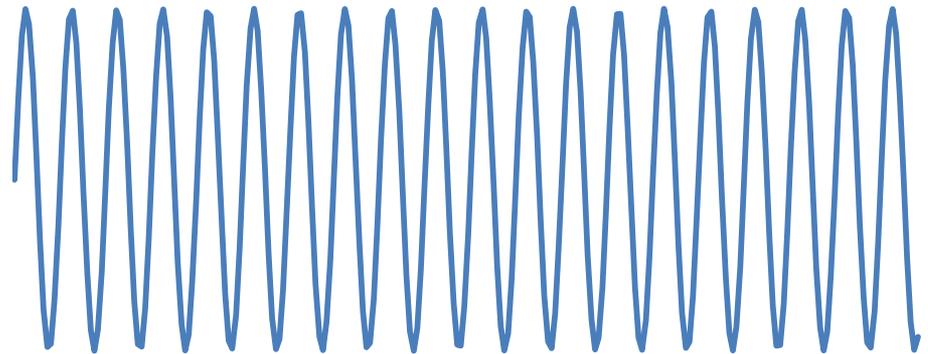


Síntesis de ondas

- Supongamos una onda electromagnética (luz) que tiene una frecuencia única del tipo:

$$E(x, t) = E_0 \cos(kx - \omega t)$$

- de duración infinita, sería una onda de amplitud constante en todo el tiempo.



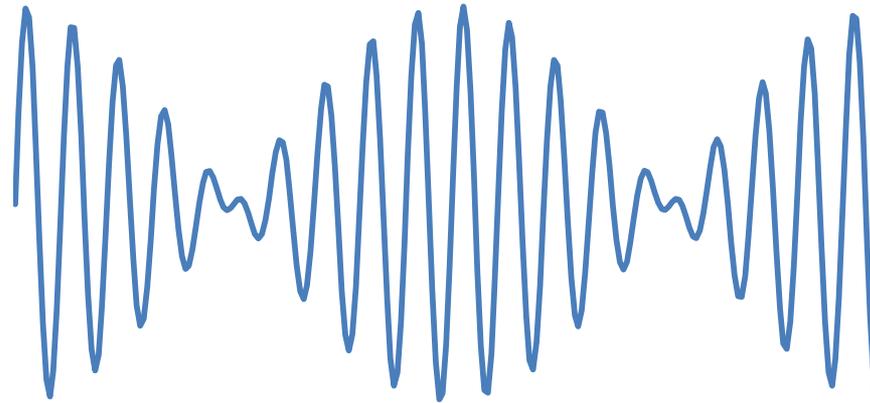
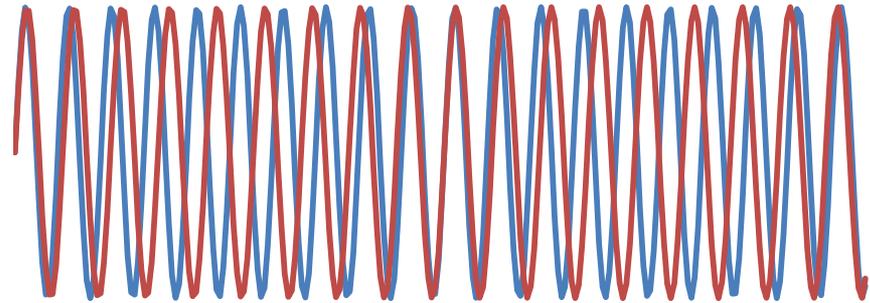
Síntesis de ondas

- Supongamos ahora dos ondas de diferente frecuencia del tipo:

$$E_1(x,t) = E_0 \cos(kx - \omega t)$$

$$E_2(x,t) = E_0 \cos(kx - 0.9\omega t)$$

- Si sumamos ambas ondas, obtendremos una onda formada de grupos de ondas.



Síntesis de ondas

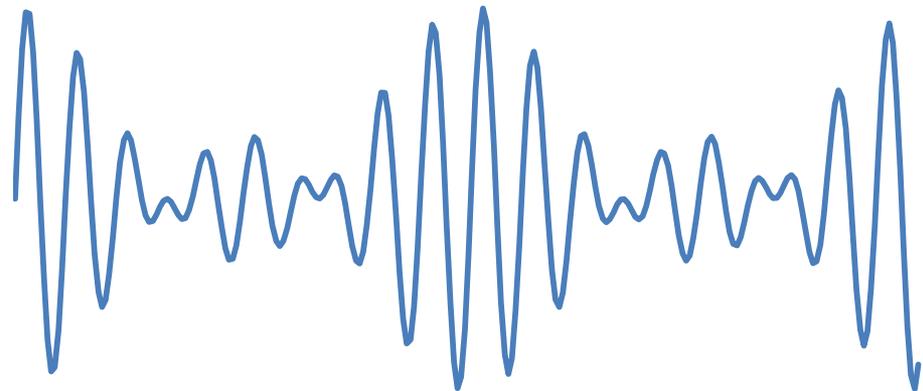
- Si ahora sumamos una tercera onda de diferente frecuencia:

$$E_1(x,t) = E_0 \cos(kx - \omega t)$$

$$E_2(x,t) = E_0 \cos(kx - 0.9\omega t)$$

$$E_3(x,t) = E_0 \cos(kx - 0.8\omega t)$$

- Tendremos ahora una onda de grupos muy angostos.



Síntesis de ondas

- Una cuarta frecuencia hará los pulsos más cortos:

$$E_1(x,t) = E_0 \cos(kx - \omega t)$$

$$E_2(x,t) = E_0 \cos(kx - 0.9\omega t)$$

$$E_3(x,t) = E_0 \cos(kx - 0.8\omega t)$$

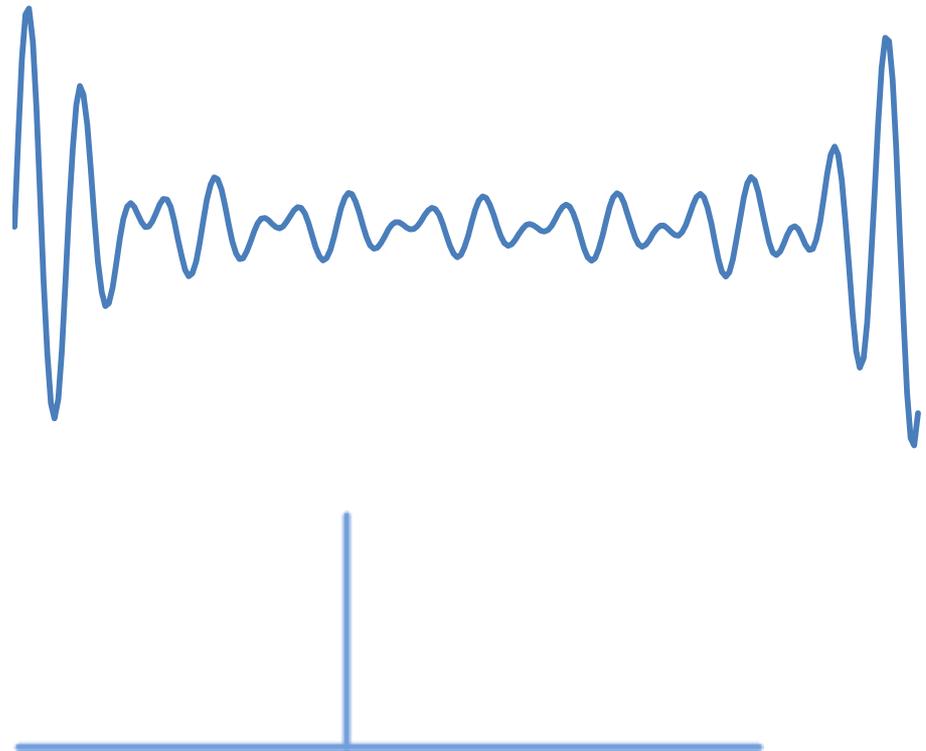
$$E_4(x,t) = E_0 \cos(kx - 0.7\omega t)$$

- Conclusión: Entre más frecuencias diversas tengamos, más cortos son los pulsos y recíprocamente, entre menos frecuencias tengamos más anchos serán los pulsos.



Síntesis de ondas

- En la figura, se han sumado siete frecuencias y ahora los grupos son más cortos.
- Si llegáramos a sumar un número infinito de ondas, obtendríamos un pulso muy corto llamado en física una *Delta de Dirac*



Coherencia temporal

- La longitud del grupo de ondas de una fuente luminosa indica qué tan pura es la fuente de luz.
- Una fuente de luz monocromática tiene una longitud de coherencia muy larga, mientras que las fuentes con gran contenido de colores, tienen longitud de coherencia muy corta

Fuente	Ancho de banda (nm)
Sol	1.0×10^{12} (300)
Lámpara tungsteno	1.0×10^6 (300)
LED	25
Lámpara de sodio	0.5
Diodo Láser (apuntador)	5
Láser de Helio-Neón	0.002 nm
Láser de argón	0.001 6
Láser estabilizado	0.000 02nm

Aplicaciones

Aplicaciones del láser

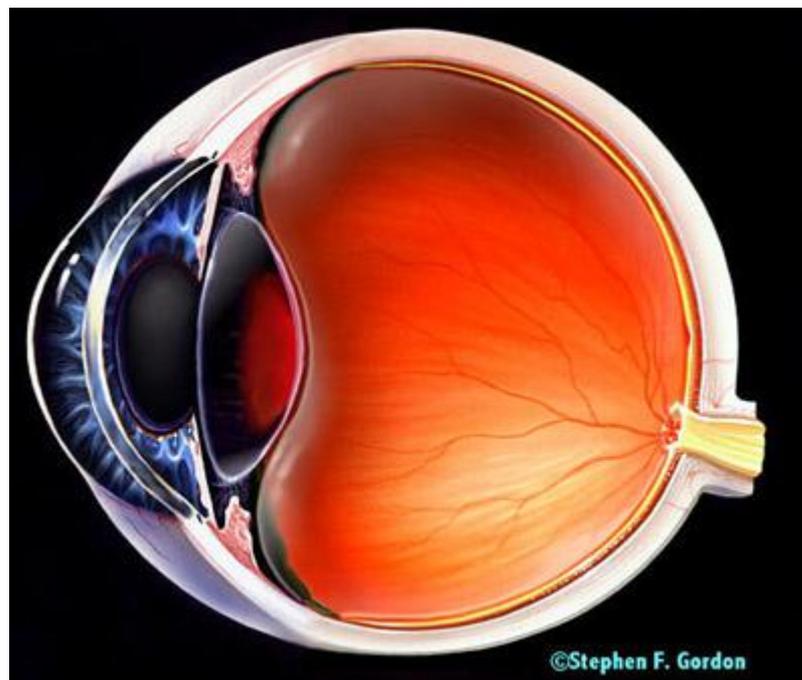
- La invención del láser fue el resultado de un proceso de investigación sobre la naturaleza de la luz.
- En realidad no se buscaba una solución de un problema específico.
- Un poco en broma, sus inventores aseguraban que el láser era una solución en busca de problemas.

Aplicaciones del láser

- En un plazo menor a un año, el láser encontró un sinnúmero de aplicaciones científicas, técnicas, médicas y en aparatos electrodomésticos.
- Enseguida haremos una revisión de las más importantes aplicaciones del láser

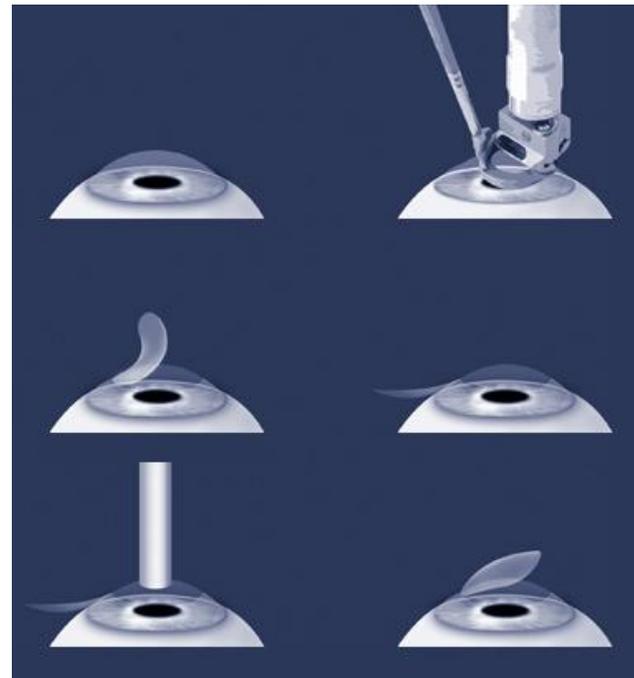
Aplicaciones del láser

- La primera aplicación médica del láser fue en la corrección de la retina desprendida. Anteriormente, la retina desprendida se trataba mediante cirugía.



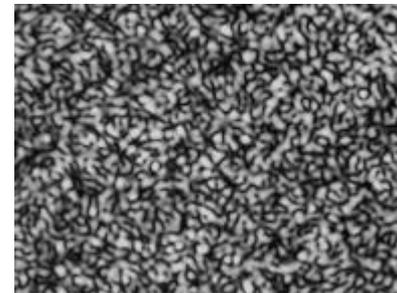
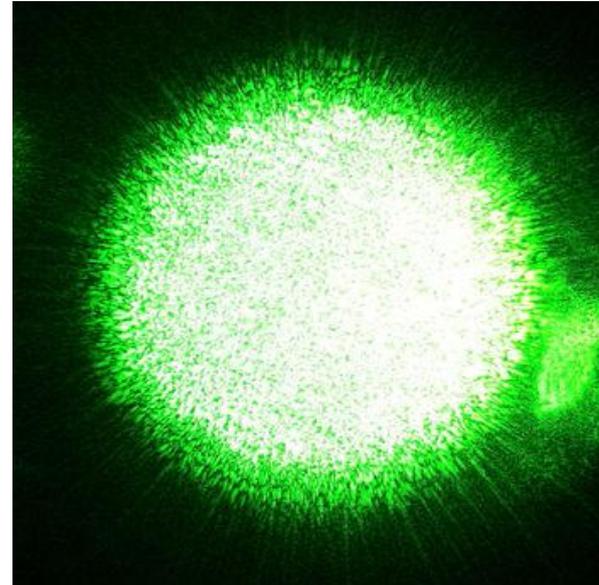
Aplicaciones del láser

- Ablación láser Tratamiento para remover defectos en la visión de manera permanente.



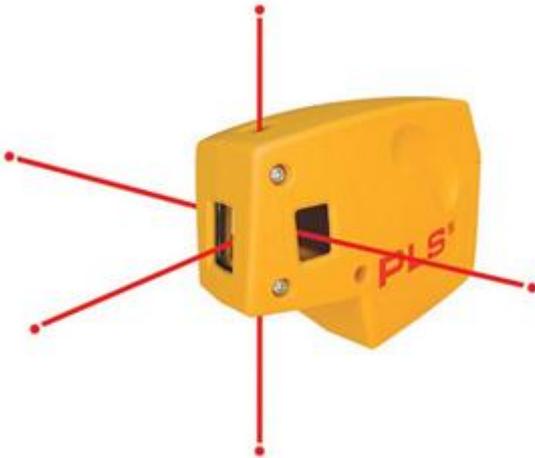
Aplicaciones del láser

- ¿Prueba de la vista con láser?
- La mancha de luz del láser muestra una estructura granular llamado Patrón de *Speckle* (Pecas).
- Ese patrón está en el ojo, no en la pantalla.
- Se ha sugerido usar estas manchas para diagnosticar errores de refracción en el ojo.



Aplicaciones del láser

- En ingeniería, alineación de terrenos y para dirigir máquinas excavadoras.



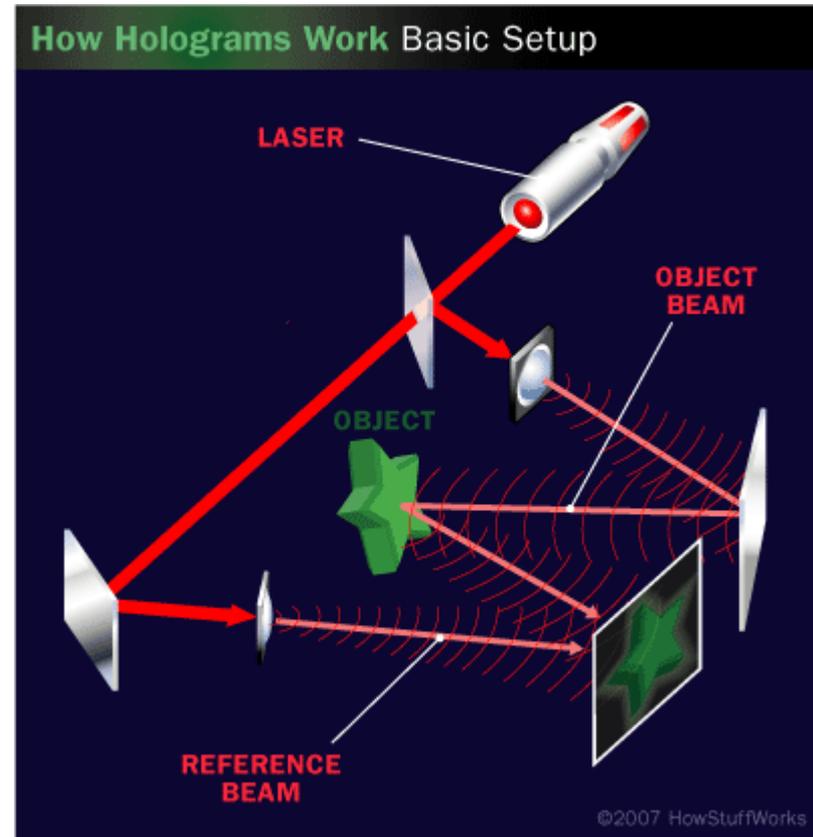
Aplicaciones del láser

- Telemetría láser



Aplicaciones del láser

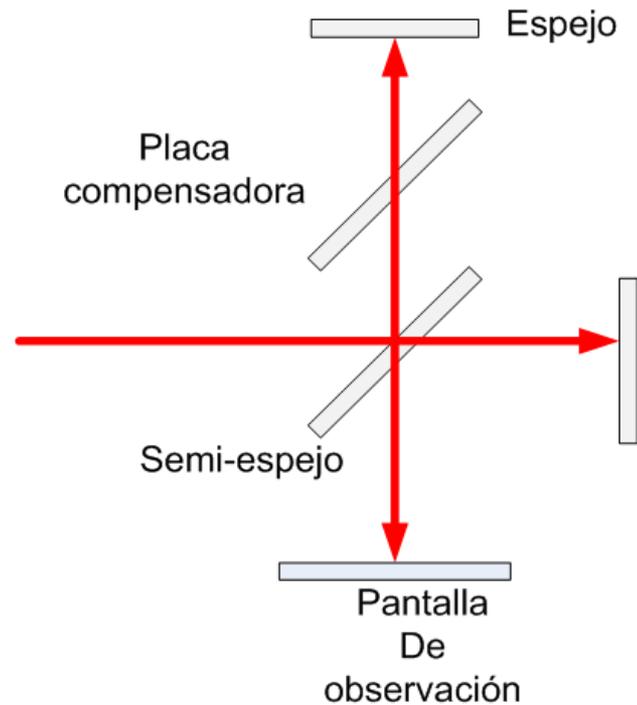
- Holografía:
- En 1948, Dennis Gabor en Inglaterra propuso un método para registrar fotográficamente las ondas de luz en una ventana. Esto permite registrar las imágenes en perspectiva de una imagen. Esta técnica se conoce como holografía.
- Originalmente fue muy difícil demostrar la holografía ya que las fuentes existentes no tenían las características necesarias: Coherencia espacial y coherencia temporal



Aplicaciones del láser

- El fenómeno de la interferencia es muy simple de mostrar con un láser gracias a la alta coherencia espacial y temporal del láser.
- Cuarenta y cinco años antes de la invención del láser, Albert A. Michelson sugirió usar una lámpara de kriptón 86 para definir el metro patrón. Encontró que la luz naranja de kriptón tiene 1 650 763.73 longitudes de onda.

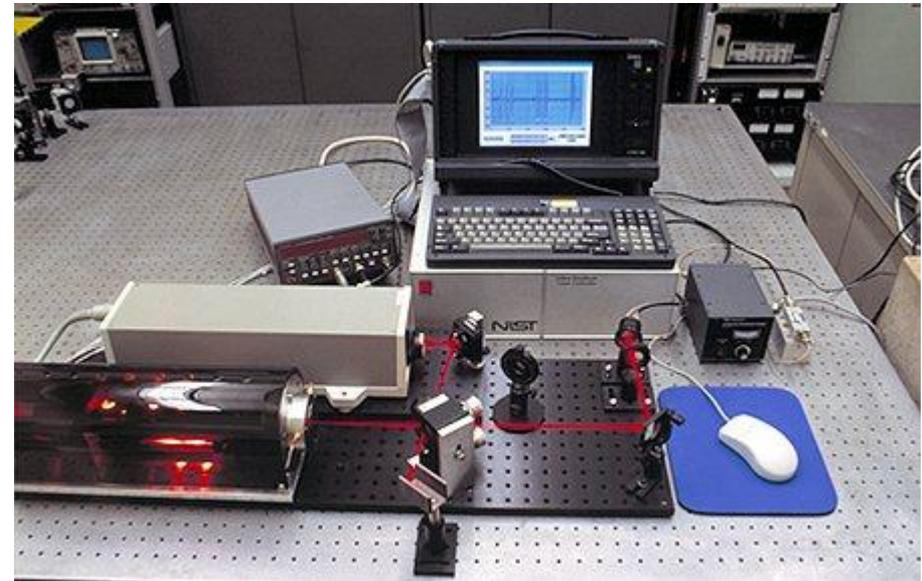
Aplicaciones del láser



- Lámpara de Kr86 e Interferómetro de Michelson

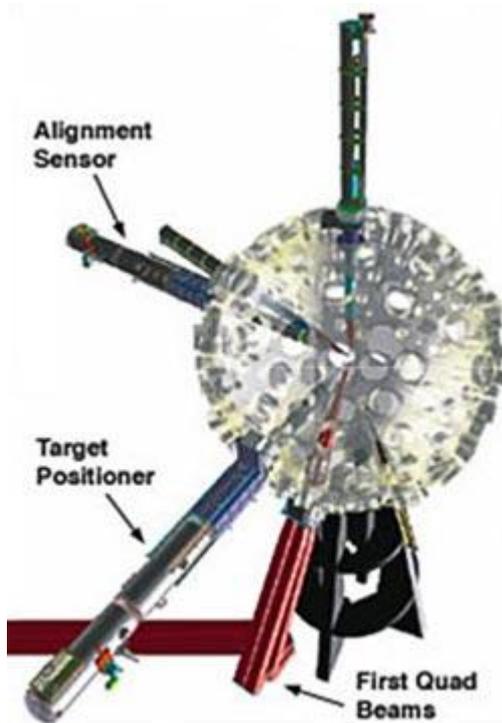
Aplicaciones del láser

- En 1983, el metro se definió como la distancia recorrida por la luz en $1/299\,792\,458$ de segundo.
- Actualmente, en laboratorios de patrones se utilizan láseres estabilizados para la medición del metro patrón.

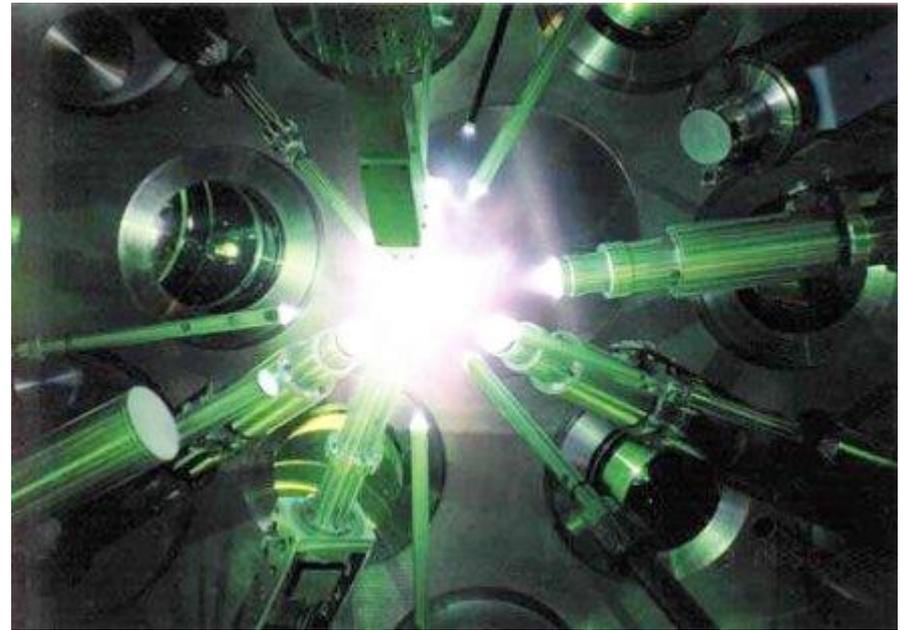
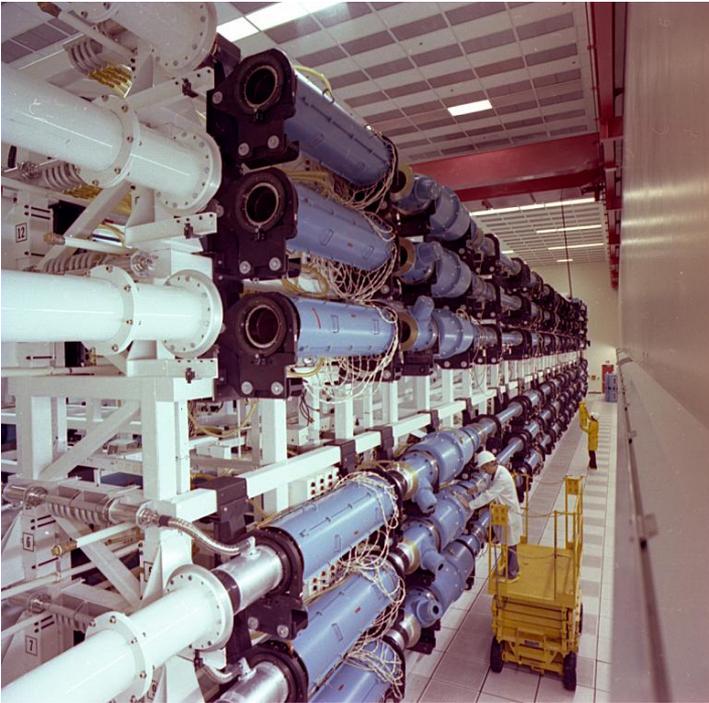


Aplicaciones del láser

- ¿Fusión láser?

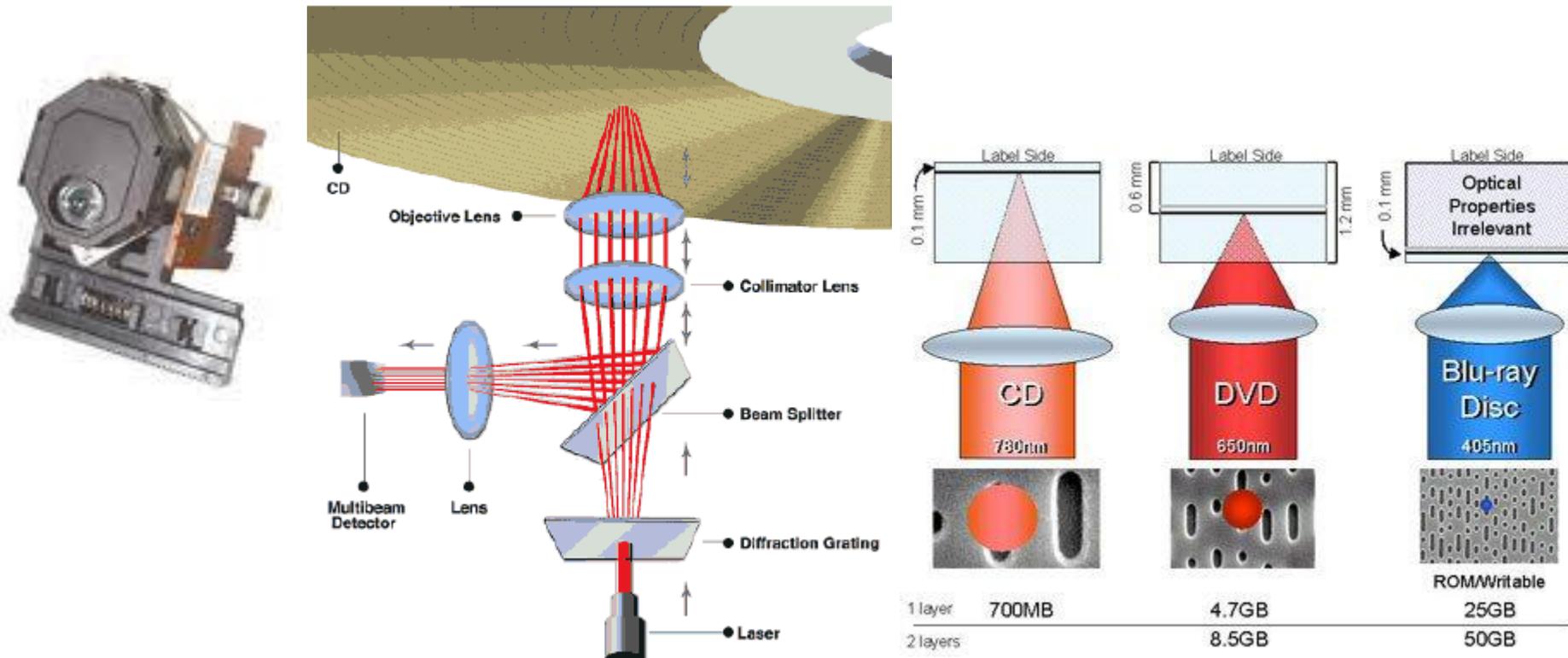


Aplicaciones del láser



Aplicaciones del láser

- Compact Disc; DVD; Blu ray...



Aplicaciones del láser

- El cable telegráfico transatlántico (1866)

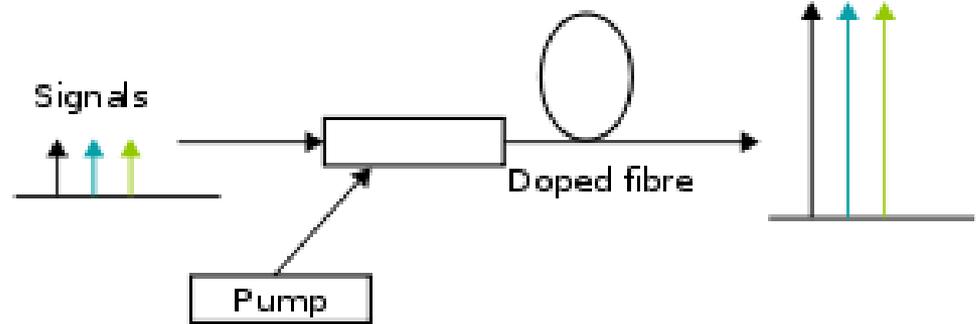


Aplicaciones del láser

- TAT-1: El primer cable telefónico (1955-1956) entre Escocia y la península de Labrador en Canadá.
- 36 canales telefónicos.
- 2800 km de longitud, 51 repetidores (¡De bulbos!) cada 70 km.
- Un barco de uso exclusivo recorría toda la longitud del cable cambiando bulbos periódicamente.

Aplicaciones del láser

- Láser de fibra óptica
- Un tramo de fibra óptica se puede construir con medio activo para amplificar las señales entrantes.
- Un conjunto de LEDs bombean el material para hacer la inversión de población.



Released under public domain by <http://en.wikipedia.org/wiki/User:Wyk/s>

Fin

Gracias