

Láser: Fundamentos físicos



A. Guzmán

angela.guzman@creol.ucf.edu



CREOL | The College of Optics & Photonics
UNIVERSITY OF CENTRAL FLORIDA





UNIVERSITY OF CENTRAL FLORIDA

CREOL | The College of Optics & Photonics

CREOL@25
Celebrating 25 Years of Excellence in Optics and Photonics



Nicolaas Bloembergen

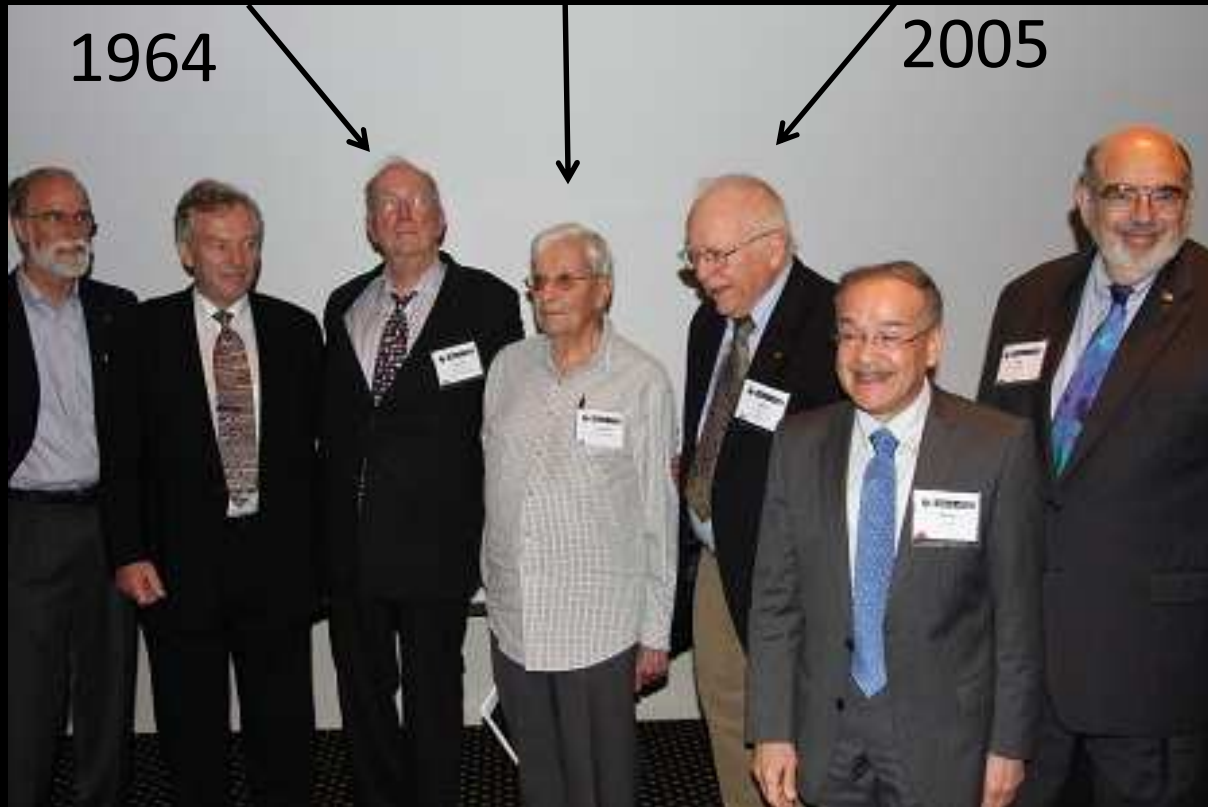
1981

Charles Townes

1964

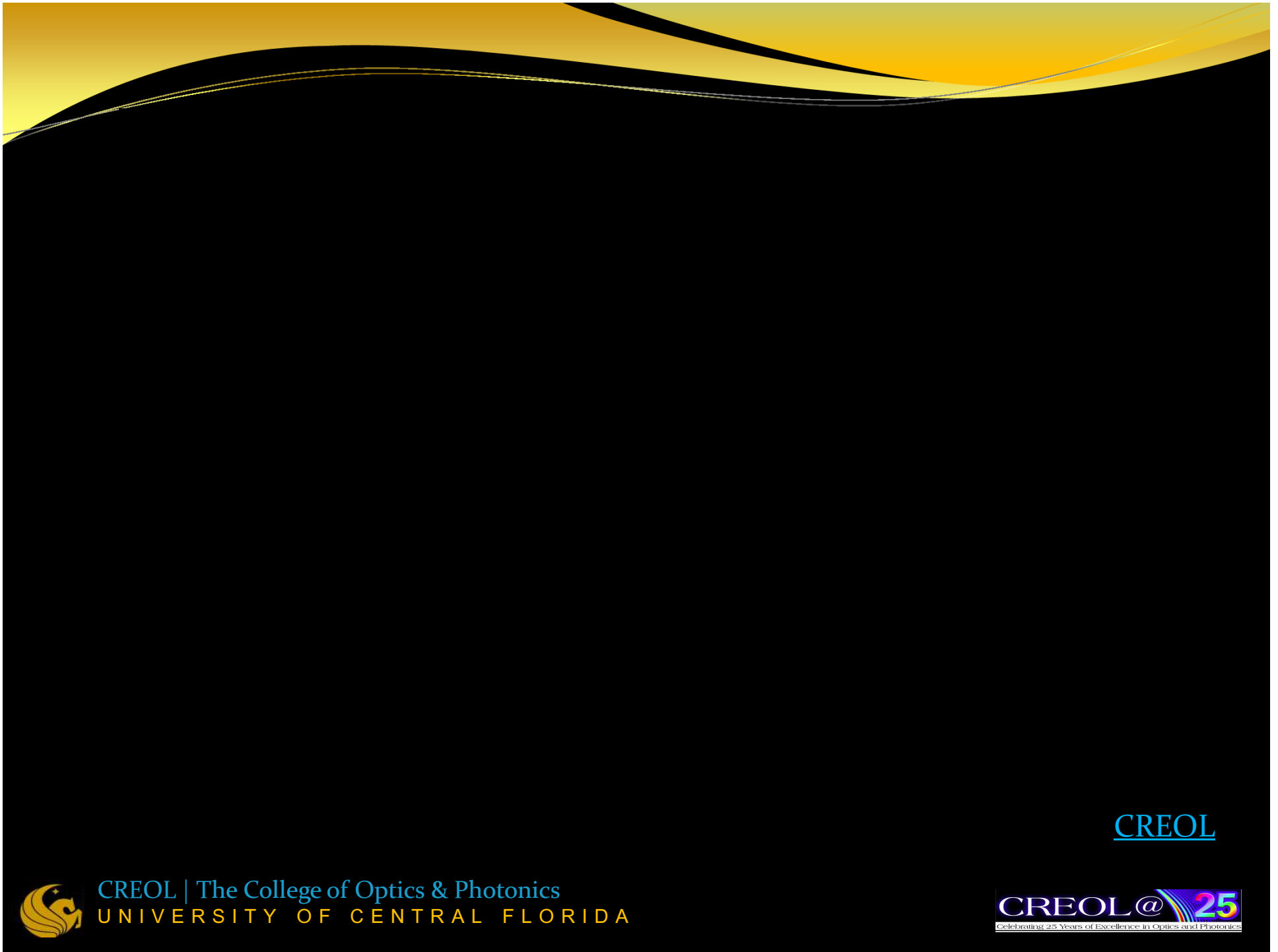
John L. Hall

2005



CREOL | The College of Optics & Photonics
UNIVERSITY OF CENTRAL FLORIDA

CREOL@25
Celebrating 25 Years of Excellence in Optics and Photonics



CREOL



CREOL | The College of Optics & Photonics
UNIVERSITY OF CENTRAL FLORIDA

CREOL@25
Celebrating 25 Years of Excellence in Optics and Photonics

Láser: Fundamentos físicos

- I- Introducción general
- II- Principios básicos
- III- Control de la luz láser
- IV- Tipos de láseres.



I- Introducción general

1. Breve reseña histórica
2. Partes de un láser
3. Características de la luz láser:
 - Monocromaticidad
 - Direccionalidad
 - Brillo
 - Polarización
 - Coherencia (Prof. María L. Calvo)



A. Siegman, ICO Newsletter 87, Oct. 2009



How the laser came to be...

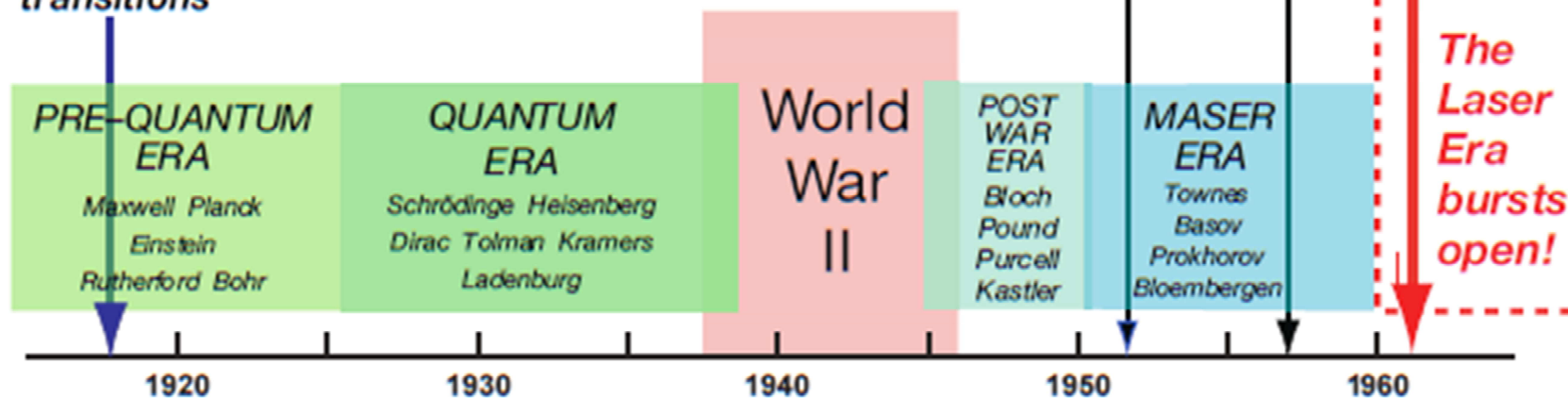
1916-17
Einstein
proposes
downward
transitions

First successful maser device: Townes
ammonia beam maser, 1951-54

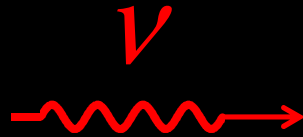
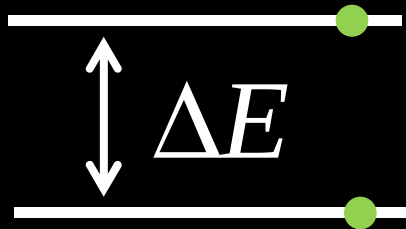
First **pumped** maser device: Bloembergen
microwave solid-state maser, 1956

May 1960
Ted Maiman
creates the
ruby laser

**The
Laser
Era
bursts
open!**



1900: Max Planck

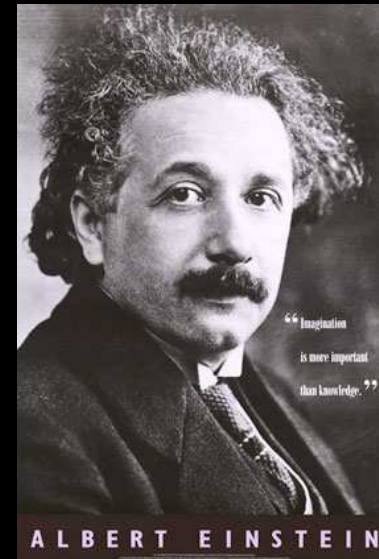


1916-1917

Einstein introduce la
emisión estimulada



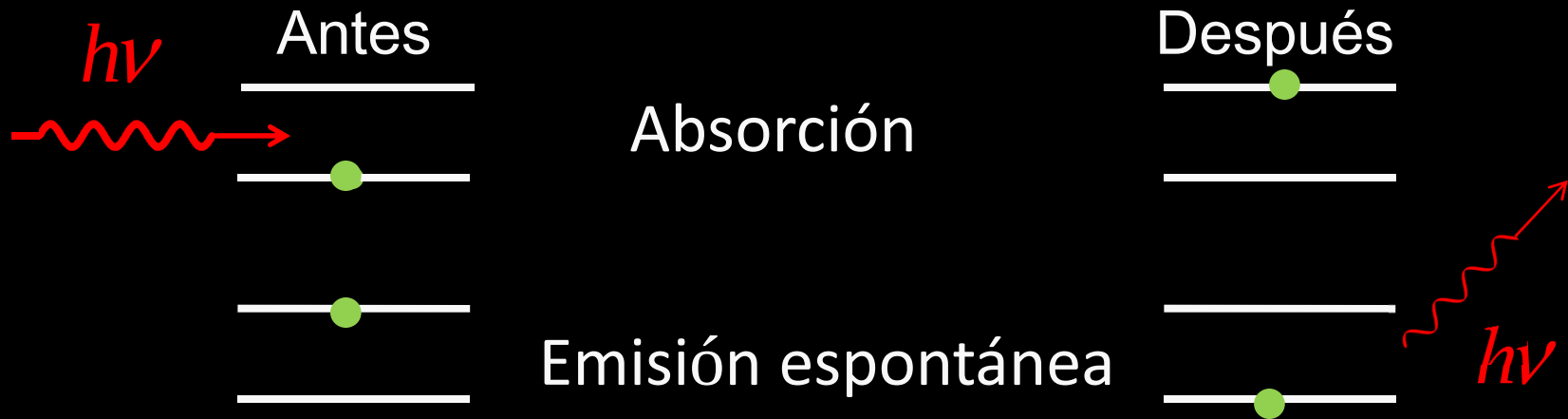
$$\Delta E = h\nu$$



CREOL | The College of Optics & Photonics
UNIVERSITY OF CENTRAL FLORIDA

CREOL@25
Celebrating 25 Years of Excellence in Optics and Photonics

Procesos de absorción y emisión



Emisión espontánea

Einstein



Amplificación por emisión estimulada

- **Emisión espontánea:** fotones emitidos en dirección aleatoria y sin relación de fase.
- **Emisión estimulada:** fotones emitidos en la dirección del campo incidente y en fase con el.

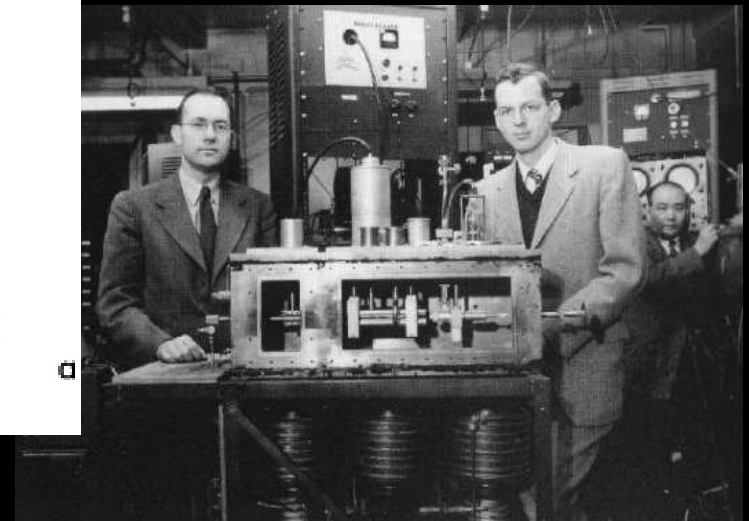
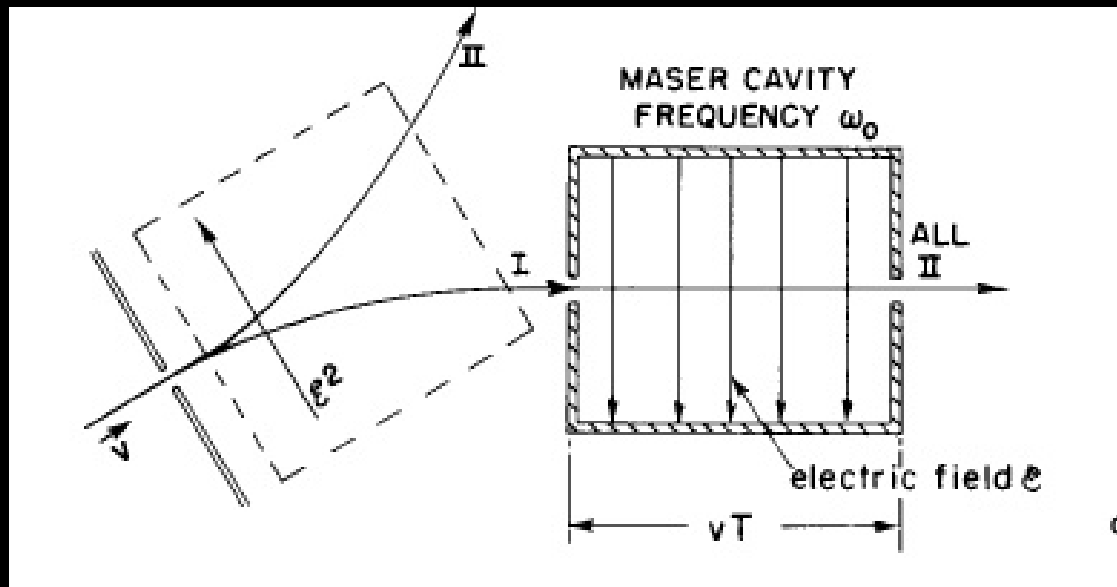
La amplitud del campo emitido se suma a la del campo incidente.



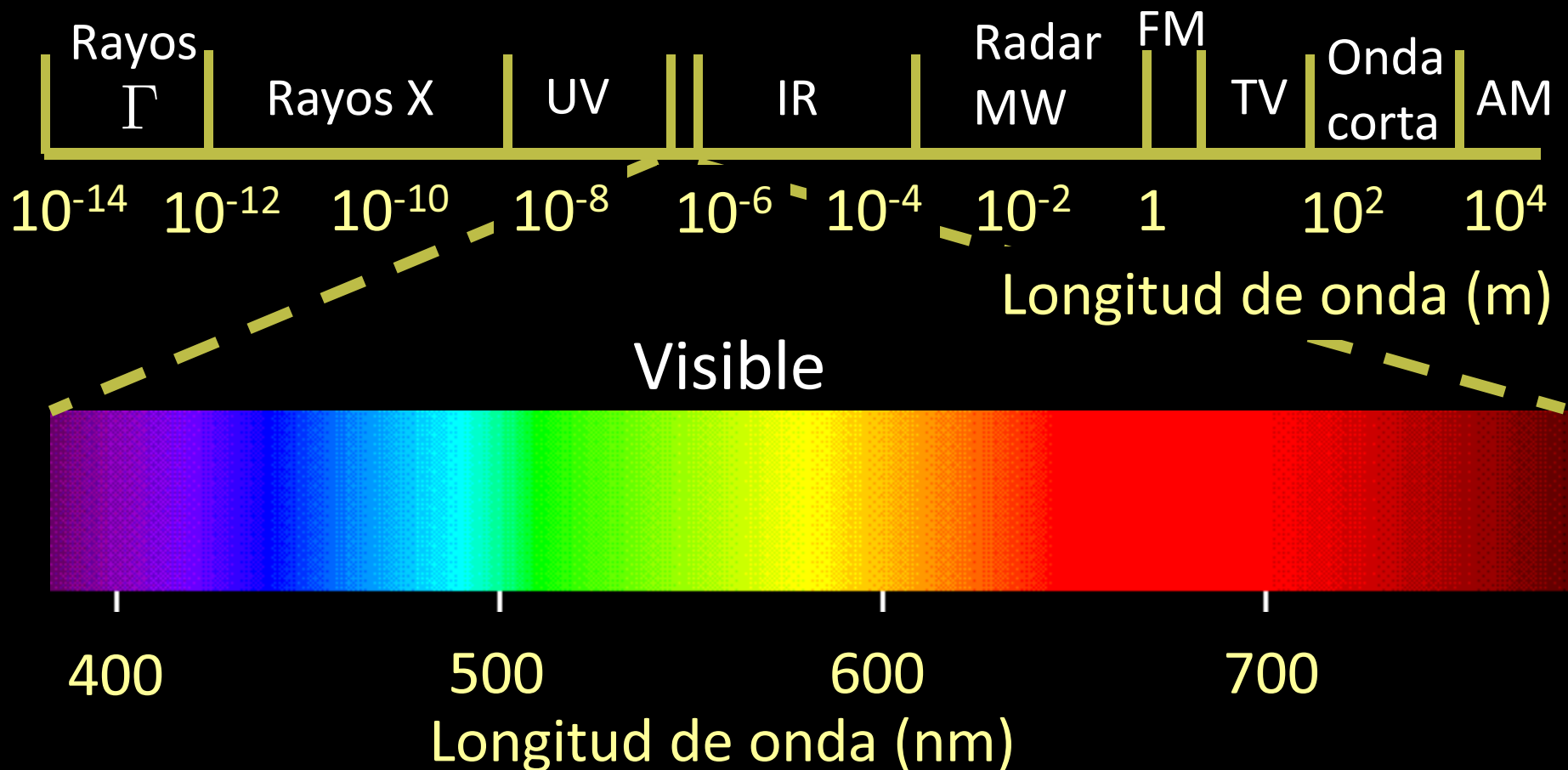
El máser de amoníaco: 1953

Charles H. Townes, J. P. Gordon, and H. J. Zeiger

Columbia University: moléculas de amoníaco NH_3 : 24 GHz.



Espectro electromagnético



La idea del láser: 1959

Charles H. Townes, A. Schawlow

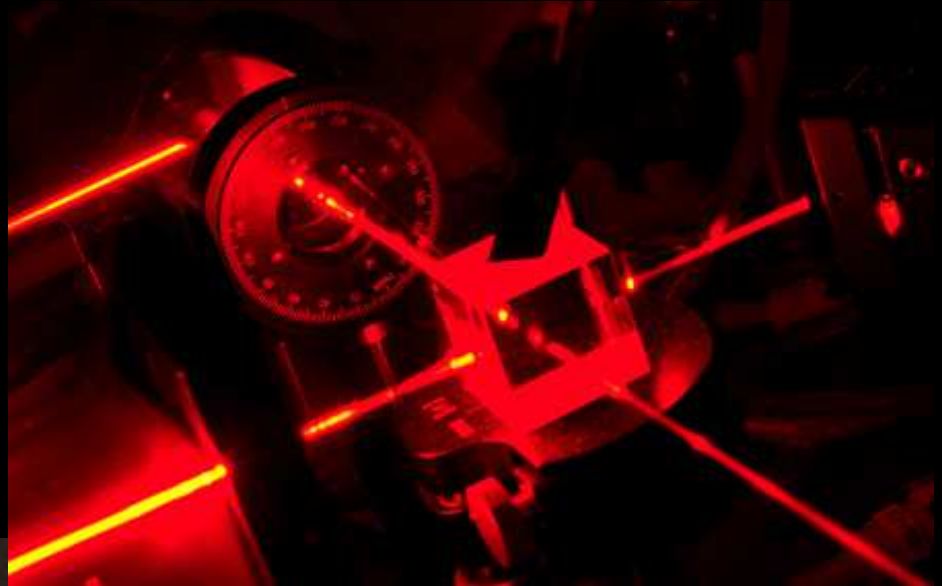


CREOL | The College of Optics & Photonics
UNIVERSITY OF CENTRAL FLORIDA

CREOL@25
Celebrating 25 Years of Excellence in Optics and Photonics

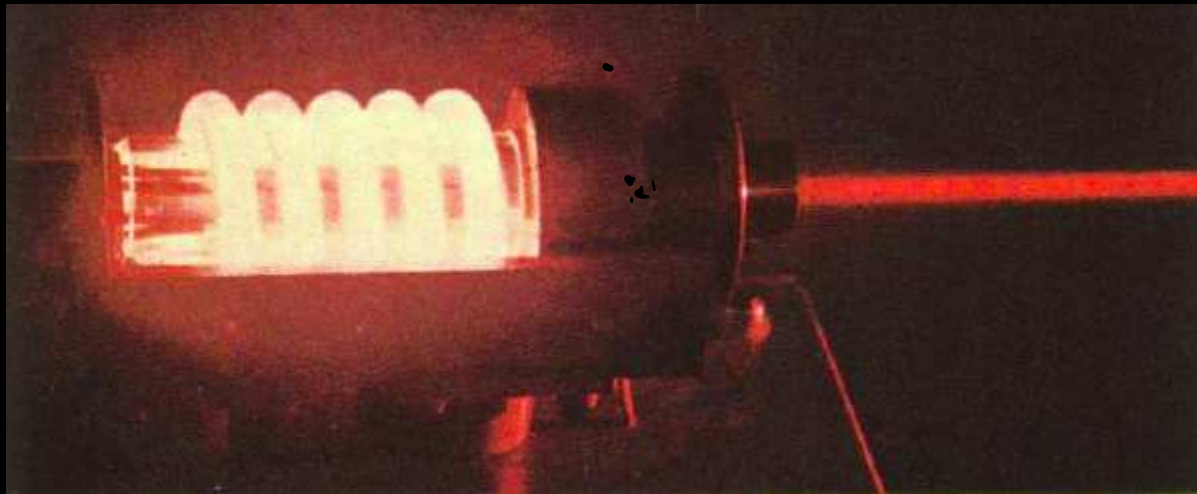
1960

Light
Amplification by
Stimulated
Emission of
Radiation

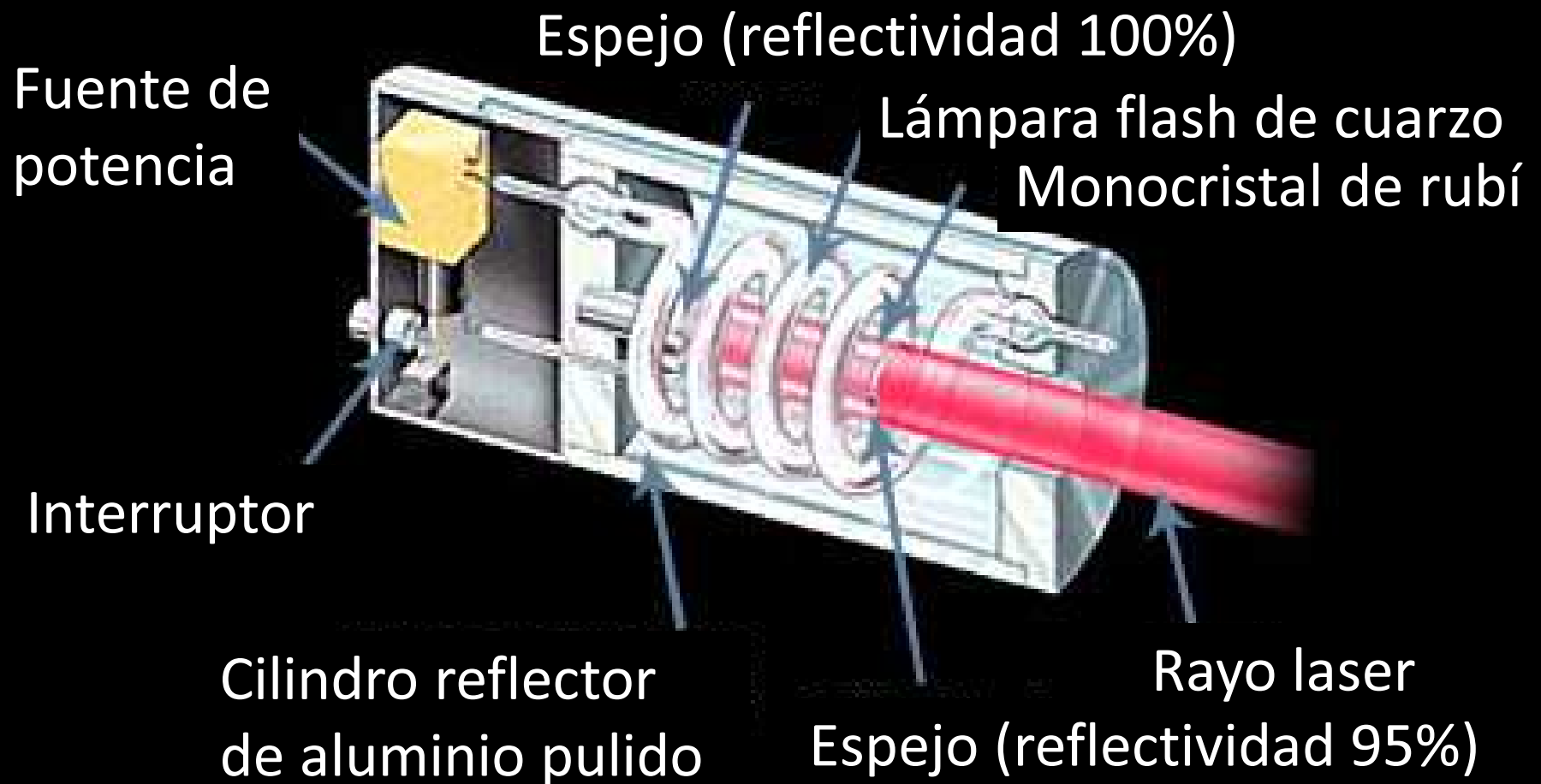


Mayo 17, 1960

Laser de Rubí: Ted Maiman

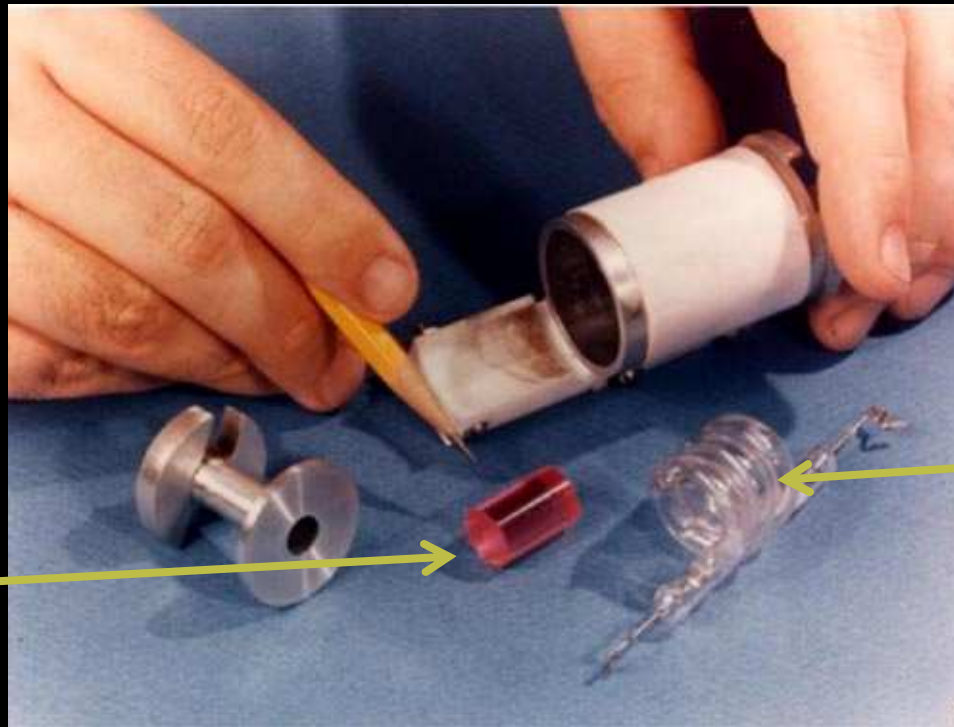


Componentes del primer laser de rubí



El láser de Rubí de Maiman desarmado

Rubí
($\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$)



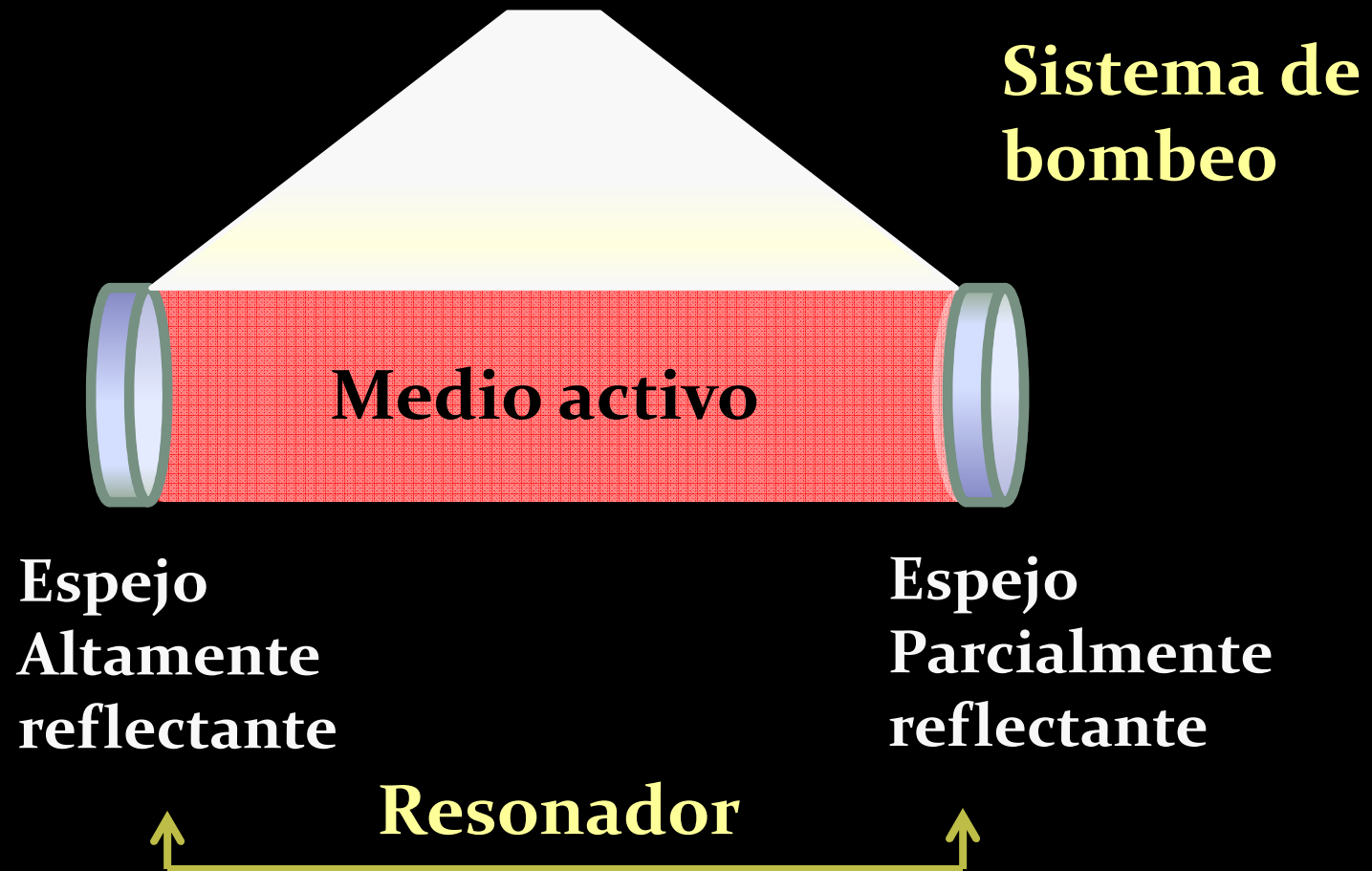
Lámpara
flash



CREOL | The College of Optics & Photonics
UNIVERSITY OF CENTRAL FLORIDA

CREOL@25
Celebrating 25 Years of Excellence in Optics and Photonics

Elementos básicos del láser



Luz Láser

- Viaja como onda electromagnética
- Es monocromática
- Es extraordinariamente direccional
- Es mas brillante que el sol!
- Es altamente coherente (Prof. M. L. Calvo)
- A menudo es fuertemente polarizada



Actividad:

- Observe la luz de la linterna a través del elemento difractivo
- Observe la luz de la lámpara LED a través del elemento difractivo
- Apunte el láser hacia el elemento difractivo y observe la luz proyectada en una pantalla.

No mire el láser a través del elemento difractivo!!!

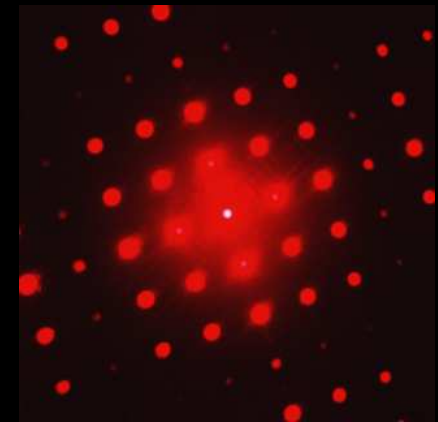


Actividad: Difracción y espectros

Mediante esquemas represente el espectro de las diferentes fuentes de luz: linterna, LED, y láser.

1. Qué fuente emite luz de espectro continuo?
2. Qué fuente emite luz monocromática?

Difracción: Cómo sería el patrón de difracción de un láser verde?



Características de la luz láser

- Monocromaticidad
- Direccionalidad
- Brillo
- Polarización



Monocromaticidad

- Ondas luminosas de una sola frecuencia (o longitud de onda) son ondas *monocromáticas*.
- Muchos láseres producen luz esencialmente monocromática (colores extremadamente puros) Sin embargo no hay luz láser absolutamente monocromática (frecuencia única). Aún el láser mas estabilizado en frecuencia produce luz con un ancho de banda del orden de kHz.



Monocromaticidad:

El ancho espectral de línea

- Puede ser medido en términos de frecuencia $\Delta\nu$, o de longitud de onda $\Delta\lambda$.

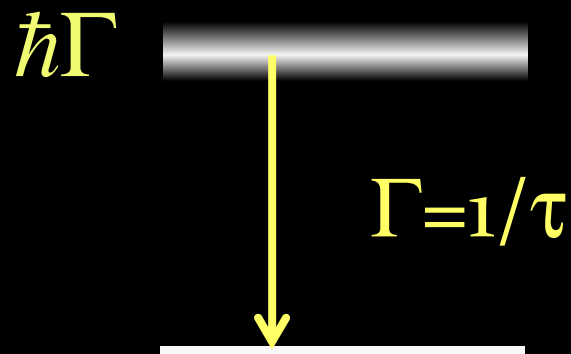
- El ancho de línea fraccional esta dado por

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} \approx \frac{\Delta\lambda}{\lambda},$$

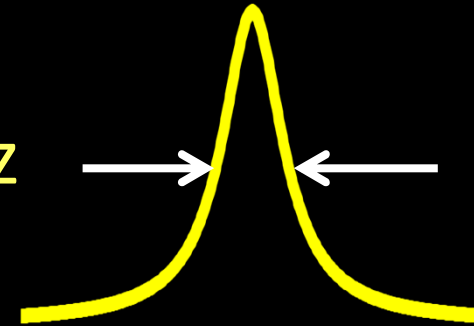
La aproximación es válida para anchos de línea fraccionales pequeños.

Causas del ancho de línea

Ancho natural: emisión espontánea



$\Gamma \sim 1\text{GHz}$



Lorentziana
Ancho homogéneo

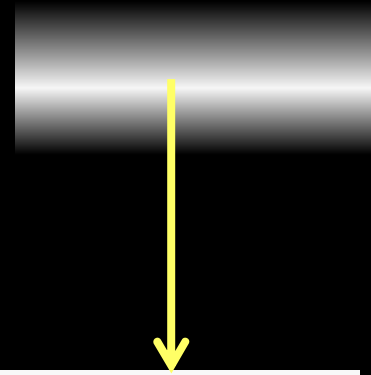
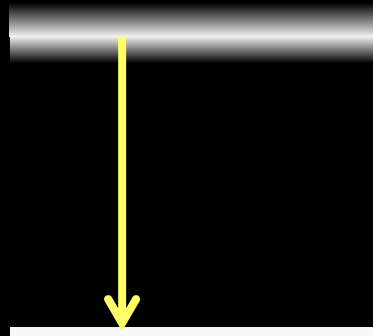
Mínimo ancho de línea compatible con el principio de incertidumbre.



Ancho homogéneo

Colisiones atómicas en gases. Todos los átomos son afectados en la misma forma en promedio.

ΔE



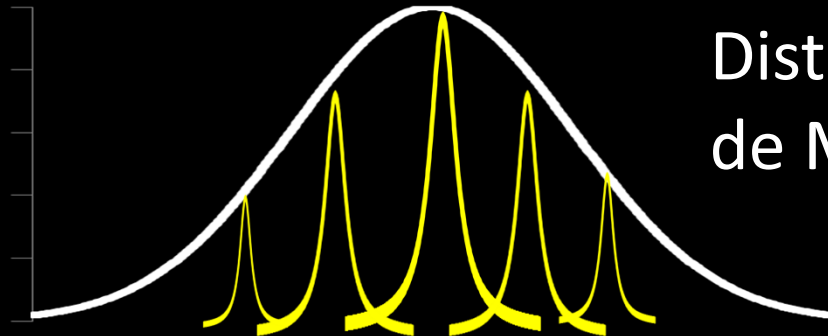
$$\tau_{\text{col}} \sim 10^{-11} \text{s}$$
$$\Gamma_{\text{col}} \sim 100 \text{GHz}$$

Depende de la
presión del gas



Ancho Doppler

La frecuencia de la luz emitida por un átomo en movimiento aumenta (o disminuye) por efecto Doppler. Es diferente para cada átomo.



Distribución de velocidades de Maxwell (función de T)

Ancho inhomogéneo

Gaussiana



Efecto del ancho de línea

- El ancho espectral de la línea de emisión determina el rango de frecuencias en que puede haber emisión láser.
- La frecuencia de salida del láser depende de la forma y ancho de línea de la transición atómica y de las frecuencias propias del resonador óptico.



Ancho homogéneo e inhomogéneo

- Hay diversos mecanismos de ensanchamiento de línea.
- Ancho *homogéneo* ocurre cuando todos los átomos tienen la misma función de forma de línea $g(\nu)$ y la misma frecuencia de resonancia para la transición láser.
- Si para cada emisor la transición tiene su propia frecuencia de resonancia o diferente forma de línea, el ancho de la línea del ensamble es *inhomogéneo* y es mayor que la de un emisor individual.
- El tipo de ancho de línea afecta las propiedades espectrales del láser.

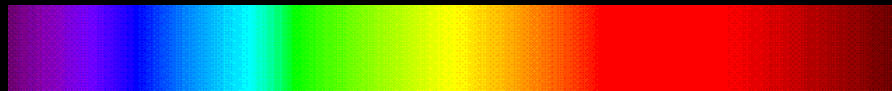
Anchos de línea de algunos láseres

Láser	λ	ν (THz)	$\Delta\nu$ (GHz)	Γ	τ
HeNe	633 nm	474	1.6	1.2 MHz	100 ns
CO ₂	10.6 μm	28	0.07-500	0.03 Hz	5s
Nd:YAG	1.06 μm	280	140	1 KHz	230 μs

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} \approx 10^{-6} - 10^{-4}$$

Ejemplos de valores de ancho de línea

- Luz blanca (visible)



$$\Delta\lambda \cong 350 \text{ nm}, \quad \lambda = 500 \text{ nm}, \quad \Delta\lambda / \lambda = 0.70$$

- Luz filtrada a la salida de una lámpara flash

$$\Delta\lambda \cong 0.01 \text{ nm}, \quad \lambda = 400 \text{ nm}, \quad \Delta\lambda / \lambda = 2.5 \times 10^{-5}$$

- Láser de gas estabilizado en frecuencia:

$$\Delta\lambda \cong 1.5 \times 10^{-9} \text{ nm}, \quad \lambda = 633 \text{ nm}, \quad \Delta\lambda / \lambda = 2.4 \times 10^{-12}$$

Ejemplos de valores de ancho de línea

- Láser de SC de frecuencia única: |
 $\Delta\nu \cong 10\text{kHz}, \nu = 200\text{THz}, \Delta\nu / \nu = 5 \times 10^{-11}$
- Láser estabilizado de vapor metálico (Cu) |
 $\lambda = 578\text{nm}, \Delta\nu \cong 1\text{Hz}, \nu = 578\text{THz}, \frac{\Delta\nu}{\nu} = 2 \times 10^{-16}$

Y. Y. Jiang et al. Making optical atomic clocks more stable with 10^{-16} -level laser stabilization, Nature Photonics 5, 158, 2011

Direccionalidad



Laser-show



Laser apuntando a una estrella

Por qué es el láser altamente direccional?
Cómo se mide la direccionalidad?

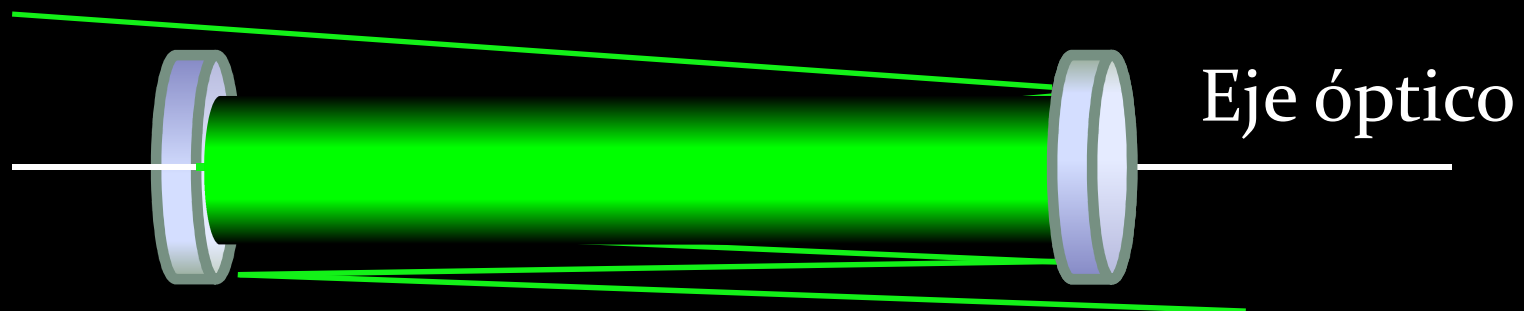
Características de la luz láser

- Monocromaticidad
- Direccionalidad
- Brillo
- Polarización



Direccionalidad

- Explicación simple: rayos no paralelos al eje óptico del resonador escapan del tubo después de algunas reflexiones. Solo la luz paralela al eje permanece suficiente para producir emisión estimulada

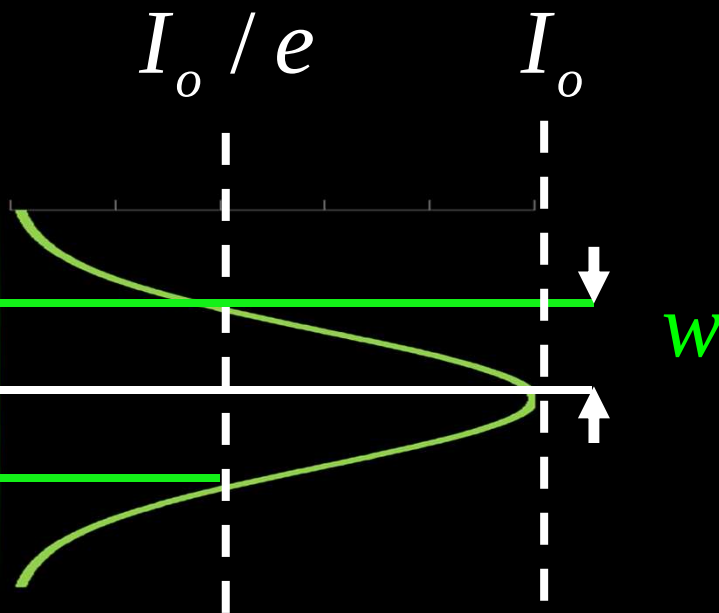


- La luz láser es producida en uno o varios modos longitudinales del resonador (Prof. Eric Rosas).

Ancho espacial del haz láser

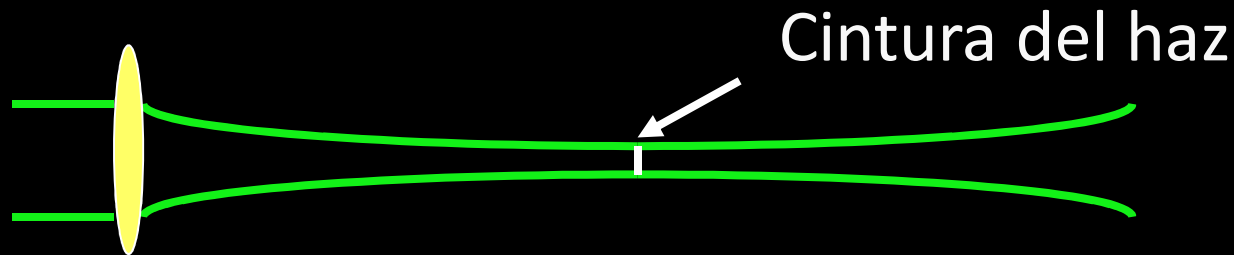
$$I(x) = I_o e^{-(x/w)^2}$$

Haz láser Gaussiano



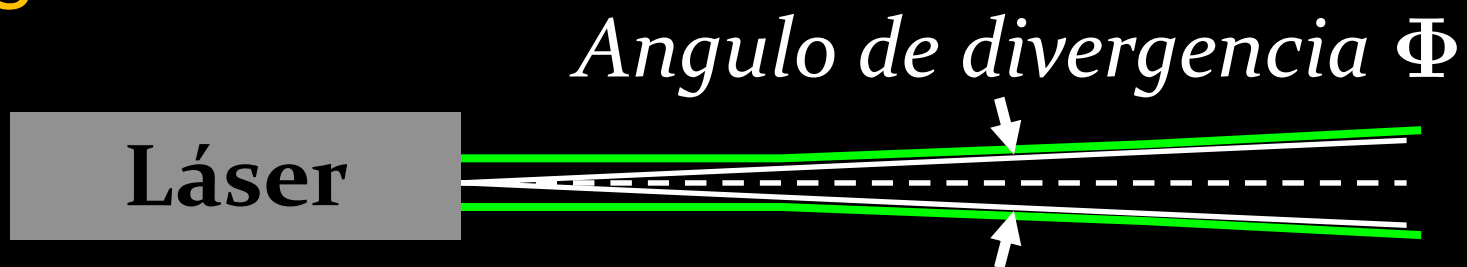
Cintura del haz láser

- Si el láser es focalizado, el ancho del haz es mínimo $w = w_0$ en la cintura del haz .



- En la cintura del haz el frente de onda es plano.
- Valor típico: 1 mm.
- La cintura del haz generalmente coincide con el espejo de salida de láser

Medida de la direccionalidad del haz: *Divergencia*



El perfil espacial de la mayoría de los rayos láser se ensancha lentamente a medida que el láser se propaga. El ángulo asociado con este ensanchamiento (medido a gran distancia de la fuente) se llama *ángulo de divergencia* del rayo láser.

Divergencia de un haz láser

- El ángulo de divergencia del haz es dos veces el ángulo que el borde exterior del haz forma con el centro del haz a gran distancia de la fuente láser.
- Usualmente se especifica en radianes ($360^\circ = 2\pi$ radianes), o en Arco-seg= $1/3600^\circ$.
- Divergencia típica del láser: 1 mrad

Relación entre divergencia y cintura del haz

Para un haz Gaussiano, el ángulo de divergencia esta dado por

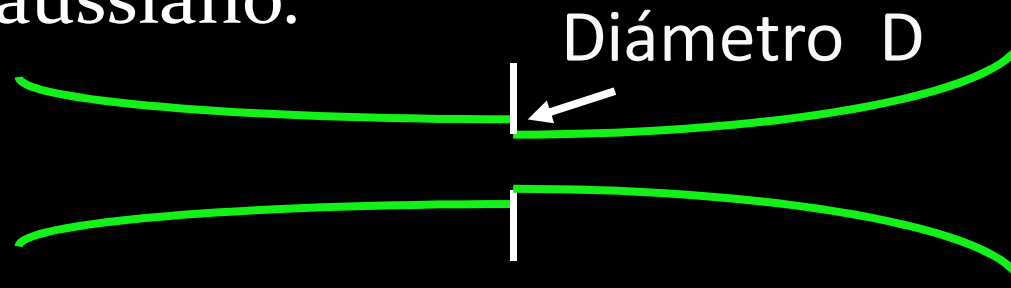
$$\Phi \cong 1.27 \frac{\lambda}{2w_o}$$

Note que la divergencia aumenta a medida que la cintura disminuye.



Efecto de la difracción

- El iluminar una apertura circular pequeña con un haz laser puede aumentar la divergencia del haz! La mejor focalización se obtiene con un haz de perfil Gaussiano.



- Nueva divergencia del haz: $\Phi = 2.44 \frac{\lambda}{D}$

Direccionalidad del láser

Un láser es tan direccional que puede ser reflejado desde la superficie lunar (**Lunar ranging**) . Distancia a la luna 382500 km.

Metrología: altura de satélites orbitando la Tierra, topografía de superficies y deformaciones de objetos en vibración del orden de 0.05nm



Laser ranging:

Medición de la órbita lunar

Precisión: 1 mm



Altímetro laser del Mars Global Surveyor MOLA: Mars Orbiter Laser Altimeter

Topografía de
Marte

Resolución
vertical
~30 cm

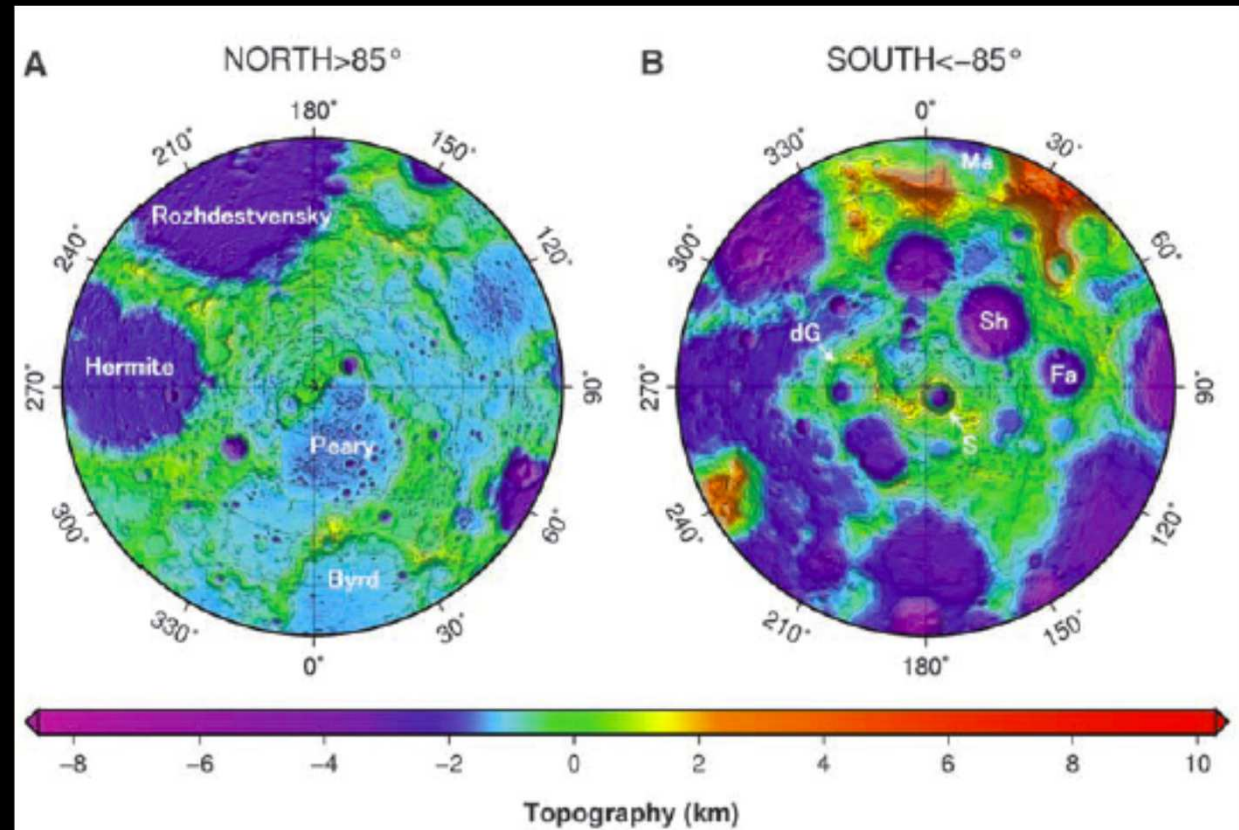


SCIENCE , VOL. 279 ,1686 (1998)

Altímetro laser LALT : Topografía lunar

Explorador
lunar japonés
SELENE

Resolución:
 $1/64^\circ$ (latitud)
 0.179° (longitud)



Science, VOL 323 , 900 (2009)

3D Laser scanner: example

0:15-039;3:00-3:39



CREOL | The College of Optics & Photonics
UNIVERSITY OF CENTRAL FLORIDA



Características de la luz láser

- Monocromaticidad
- Direccionalidad
- Brillo
- Polarización



Brillo



CREOL | The College of Optics & Photonics
UNIVERSITY OF CENTRAL FLORIDA

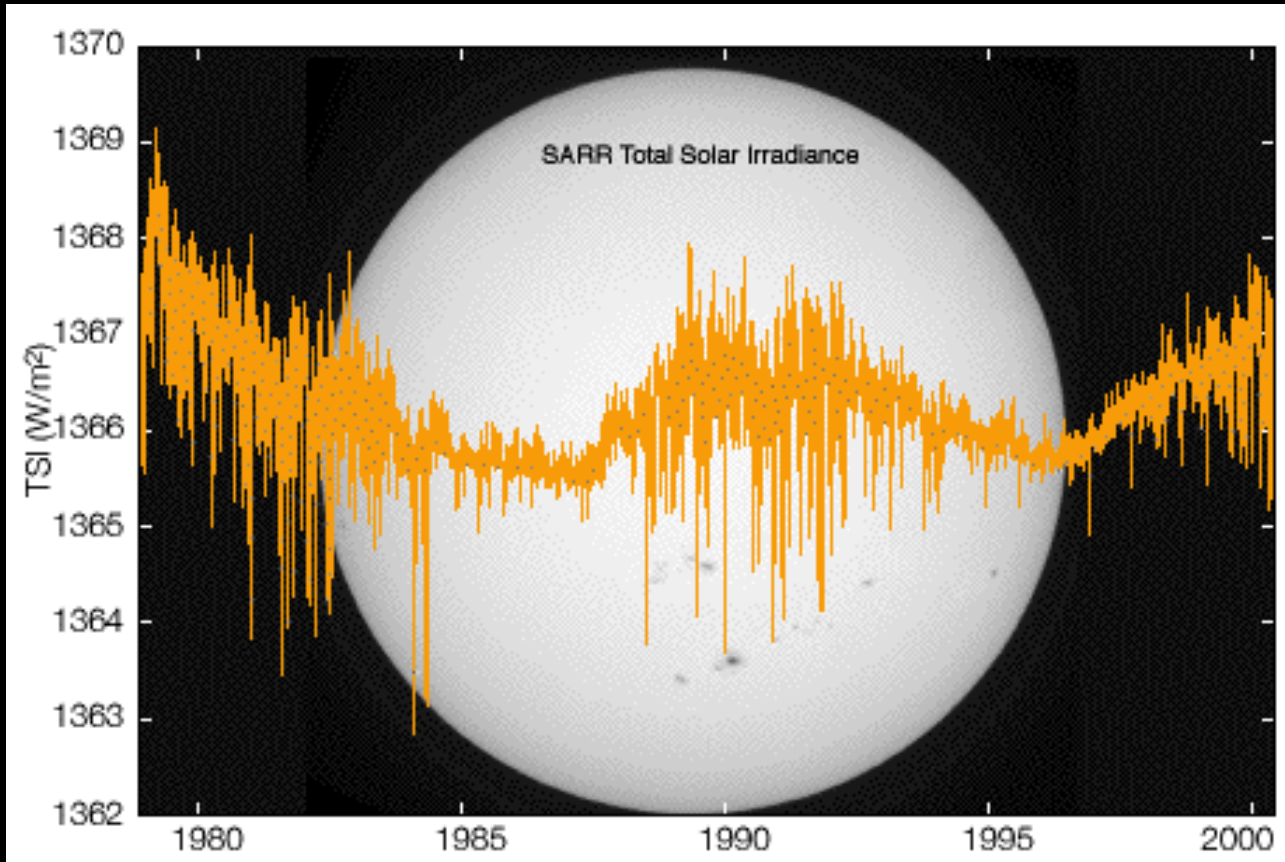
CREOL@25
Celebrating 25 Years of Excellence in Optics and Photonics

Radiación del cuerpo negro y ley de Stefan-Boltzman

Intensidad emitida por una fuente incandescente $\sim T^4$



Irradiancia solar total



http://science.nasa.gov/media/medialibrary/2003/01/14/17jan_solcon_resources/beat_lg.gif



CREOL | The College of Optics & Photonics
UNIVERSITY OF CENTRAL FLORIDA

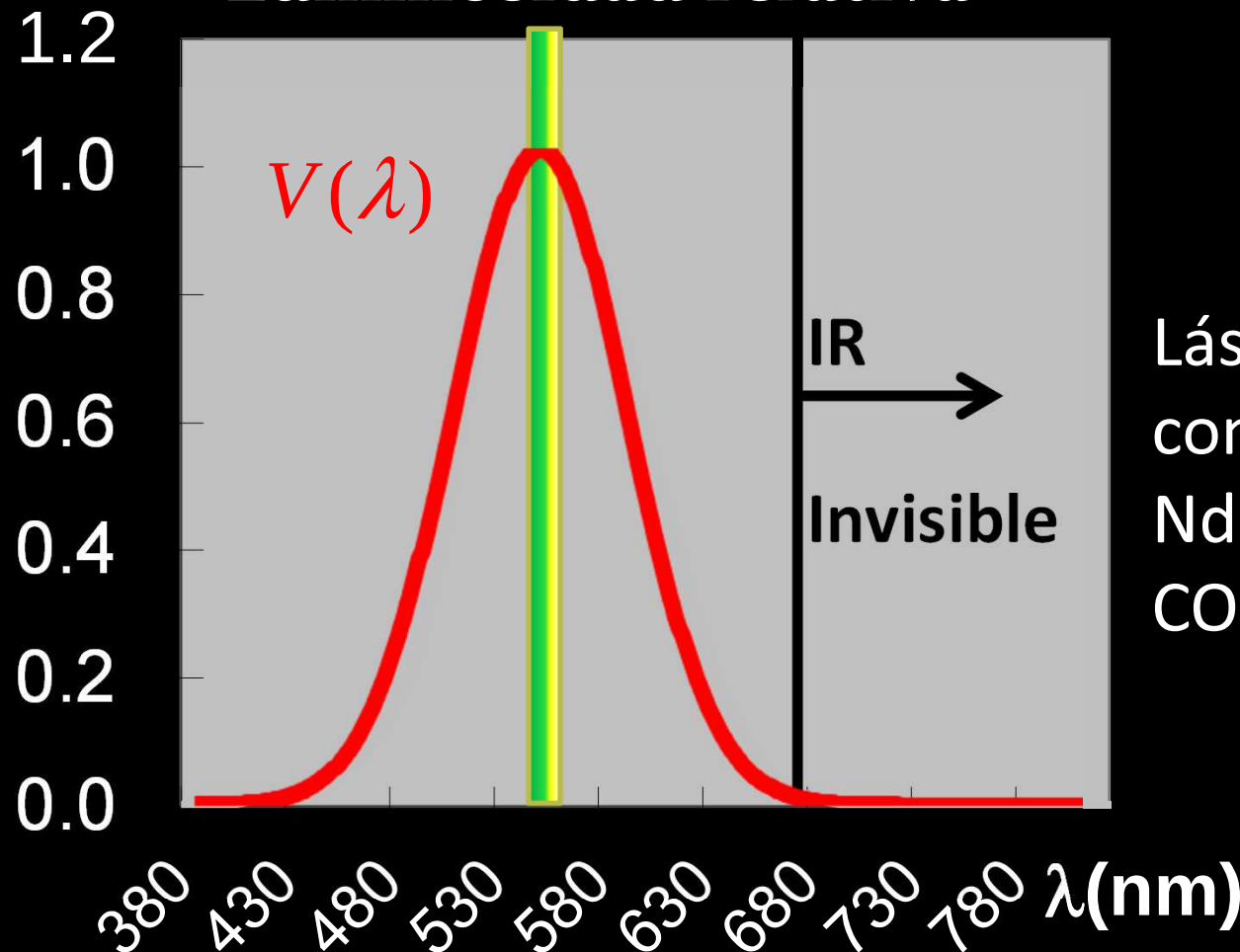
CREOL@25
Celebrating 25 Years of Excellence in Optics and Photonics

Flujo luminoso

- Nuestra habilidad de ver la luz láser depende de la sensibilidad del ojo a la longitud de onda de interés. El ojo es sensitivo a luz de longitud de onda en la banda 400 nm (violeta)-700 nm (rojo). La sensibilidad del ojo es dada por la función de sensibilidad luminosa.
- Recuerde que luz que no podemos ver (por ejemplo la luz de un láser de CO₂ a 10.6 μm) puede dañar el ojo y producir quemaduras!

Función de sensibilidad luminosa

Luminosidad relativa



Láseres de tele
comunicaciones
Nd:YAG
CO₂



Flujo luminoso

Es la potencia luminosa percibida. Se mide en lúmenes:

$$F = 683 \int d\lambda \Phi(\lambda) V(\lambda)$$

Máximo
a 555nm

Intensidad
espectral de
la fuente

Función de
sensibilidad
luminosa



Eficacia luminosa

- La eficacia luminosa mide la fracción de la energía electromagnética que es útil para la iluminación. Es obtenida dividiendo el flujo luminoso por flujo radiante.
- La eficacia luminosa tiene un valor posible máximo de 683 lm/W, para el caso de la luz monocromática en una longitud de onda de 555 nanómetro (verde).
- Si el flujo luminoso se especifica en las mismas unidades que flujo radiante, la eficacia luminosa (o coeficiente luminoso) se puede expresar en porcentaje.

Eficacia luminosa

Tipo	lm/W	%
Cuerpo negro ideal (7000 K)	95	14%
Sol (5800 K)	93	14%
Fuente de luz blanca ideal	242.5	35.5%
Vela	0.3	0.04%
Fluorescente compacto	45-60	6.6-8.8%
Fuente monocromática ideal de 555 nm (láser en el verde)	683	100%
Láser de HeNe	163	23.9%

Brillo

- Un láser de He-Ne de 1mW de potencia es mas brillante que el sol!
- El brillo se mide en lúmenes/m²-sr y aumenta con la direccionalidad de la fuente. Si miramos un láser de He-Ne (**no lo hagan por favor**) la fuente de diámetro aparente de 1mm envía más luz a la retina que el sol a través de una abertura del mismo diámetro debido a que el sol no es una fuente direccional.



Brillo espectral

Brillo a una longitud de onda por unidad de intervalo de longitud de onda.

Brillo *espectral* promedio del sol en el espectro visible :: 500 lúmenes/cm²-sr-nm.

Brillo del láser de HeNe: 10⁸ lúmenes/cm²-sr-nm.

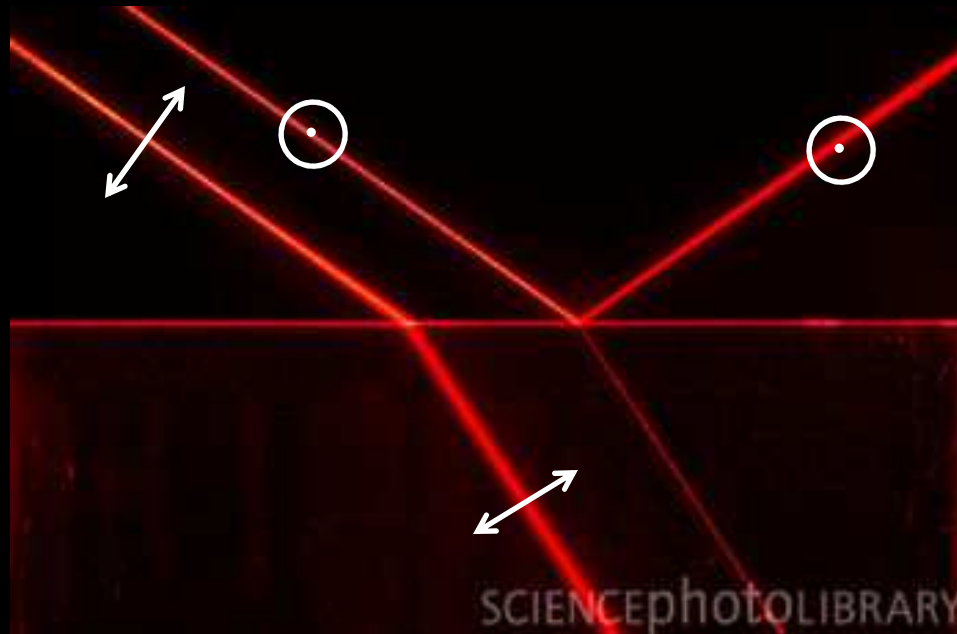
La luz del láser esta concentrada en una banda espectral muy angosta.

Características de la luz láser

- Monocromaticidad
- Direccionalidad
- Brillo
- Polarización



Polarización por reflexion



Ventanas de Brewster & Polarización

Ventanas transparentes colocadas formando un ángulo de Brewster con el eje del láser. Luz polarizada horizontalmente es reflejada fuera de la cavidad y no se amplifica, en tanto que la luz polarizada verticalmente sufre reflexiones sucesivas en los espejos y es amplificada.

