

Láser: Principios básicos



A. Guzmán

angela.guzman@creol.ucf.edu



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



II- Principios básicos

- Desarrollo histórico: Ecuaciones de Einstein
- Medio activo
- Modelo físico del láser: ganancia
- Esquemas de bombeo
- Resonador óptico

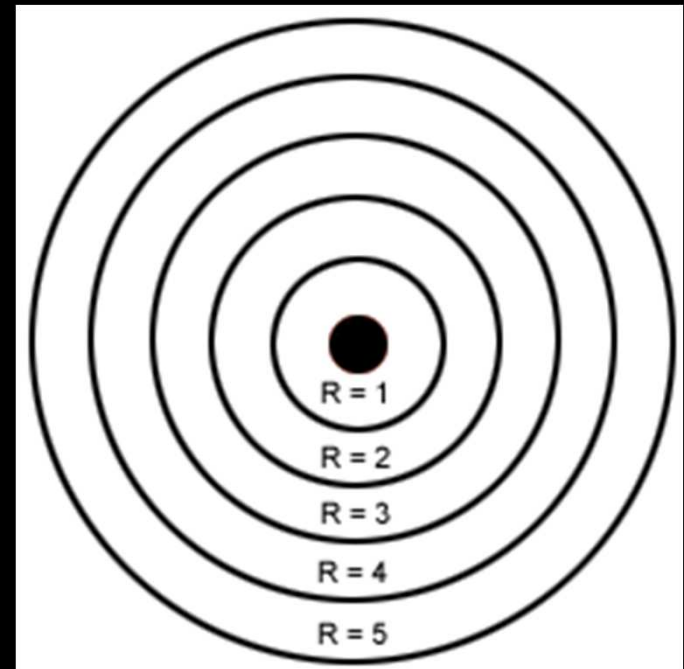


Era pre-cuántica

Estados estacionarios



Niels Bohr
1913



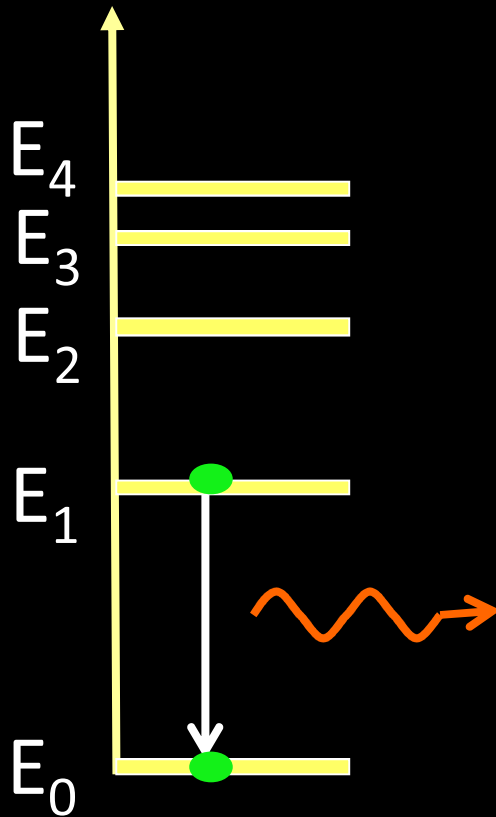
Premio Nobel 1922



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

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

Estados discretos de energía y transiciones



Max Planck



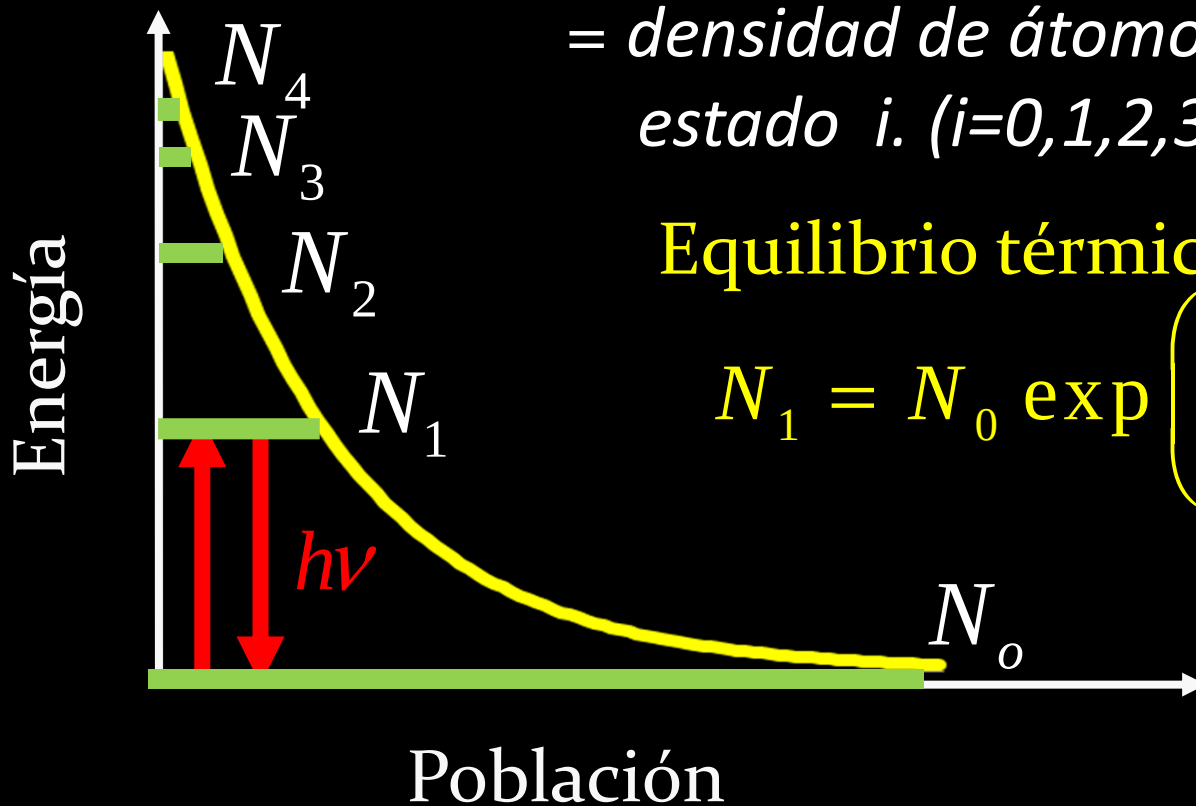
$$\Delta E = h\nu = hc / \lambda$$

$$h = 6.625 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$



Población de estados

N_i = Población en el estado i
= *densidad de átomos en el estado i . ($i=0,1,2,3,4....$)*



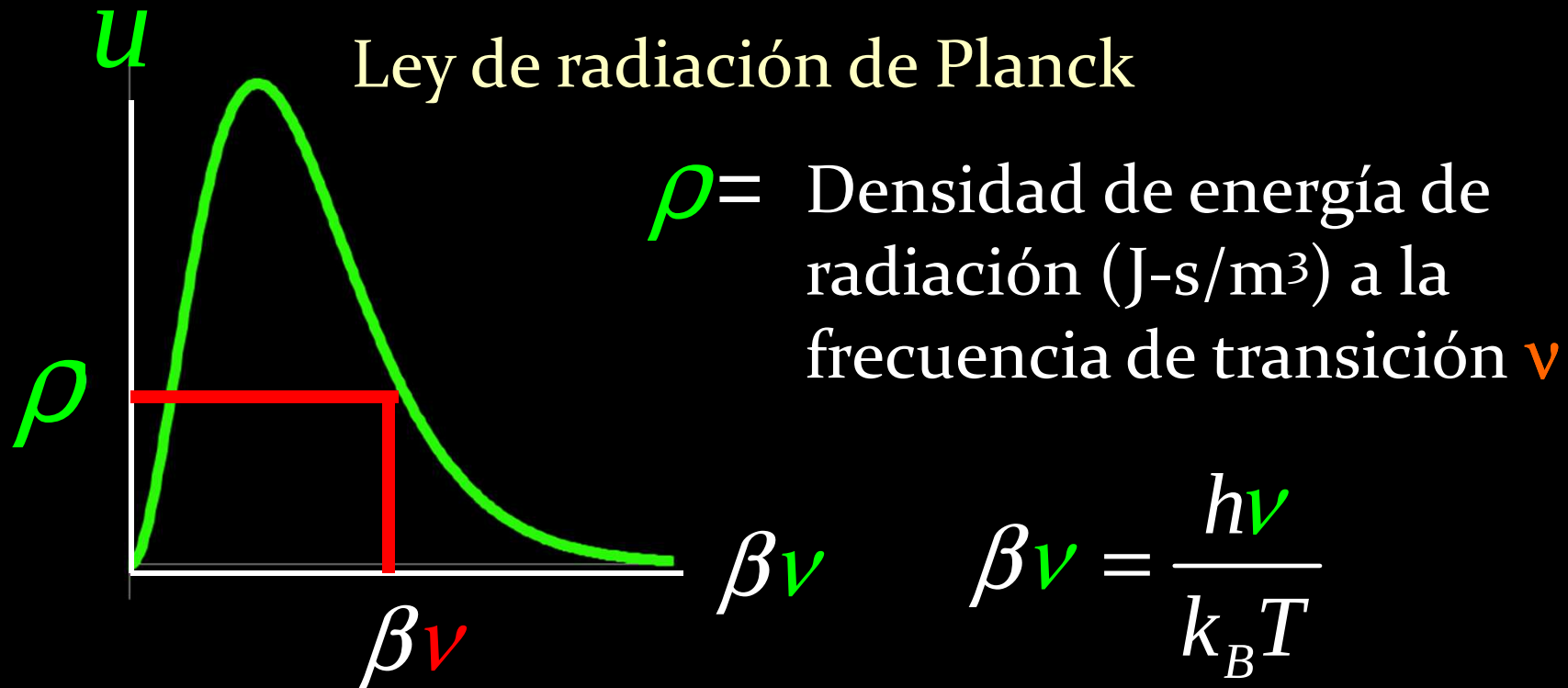
Equilibrio térmico: Boltzman

$$N_1 = N_0 \exp \left(- \frac{E_1 - E_0}{k_B T} \right)$$



Radiación térmica (Planck)

u = Densidad de energía de radiación (J-s/m³)

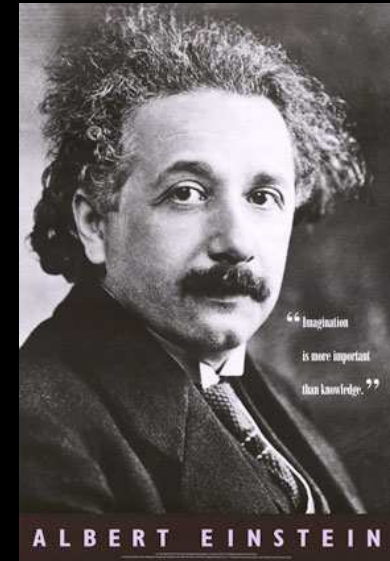
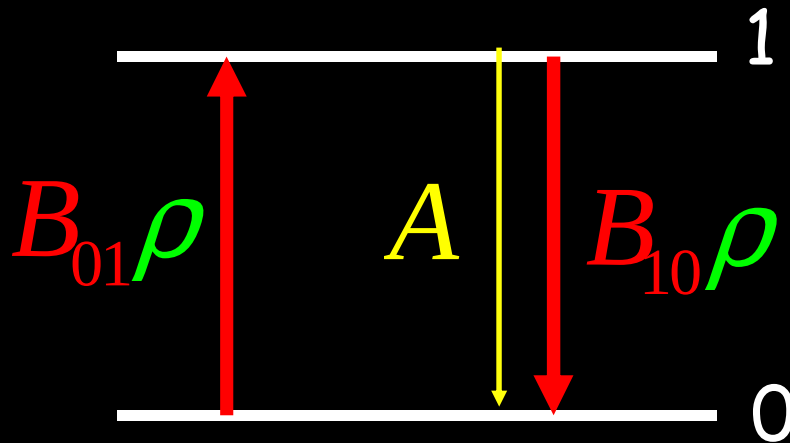


1916:

Einstein introduce la emisión estimulada

Interacción de un átomo con luz térmica
(espectro de banda ancha)

Probabilidades de transición:



Relaciones de Einstein:

- La emisión espontánea es independiente de la radiación incidente
- Tasas de transiciones estimuladas son proporcionales a la densidad de energía ρ de la radiación incidente.
- Las probabilidades de absorción y de emisión estimulada deben ser iguales

$$B_{01} = B_{10} = B \quad \text{No las tasas de transición!}$$



Coeficientes de Einstein

A = Probabilidad de emisión espontánea

B = Probabilidad de absorción y de emisión estimulada.

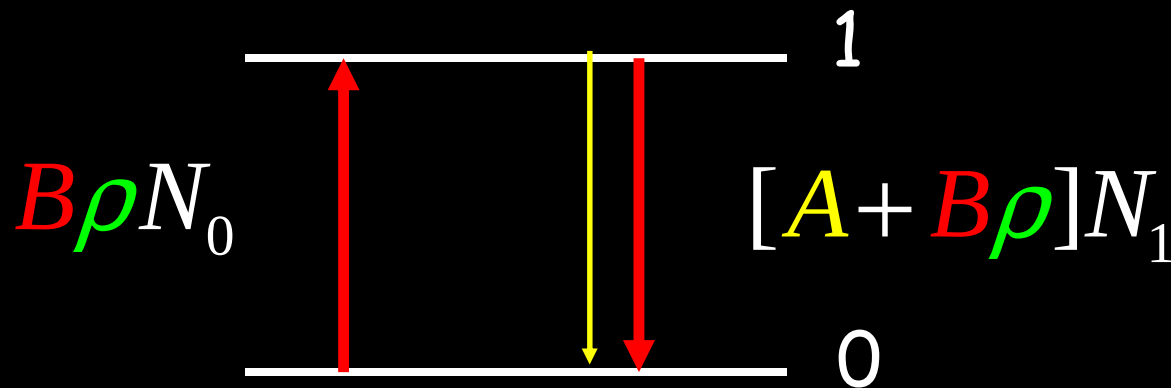
Tasas de transición:

Emisión espontánea $= N_1 A$

Absorción (estimulada) $= N_0 B \rho$

Emisión estimulada $= N_1 B \rho$

Ecuaciones de tasa de población



$$\dot{N}_1 = -AN_1 - B\rho(N_1 - N_0),$$

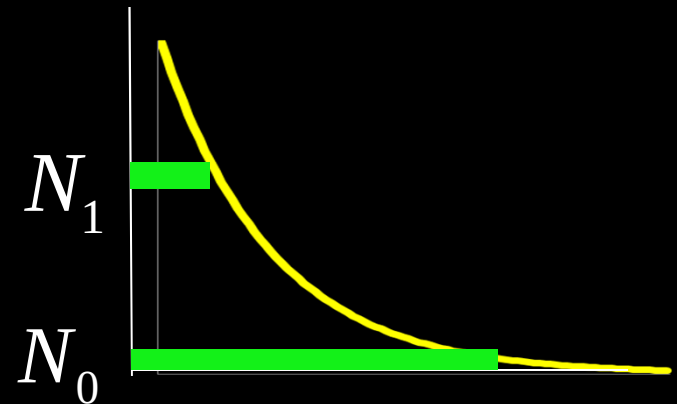
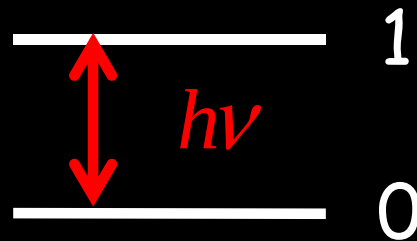
$$\dot{N}_0 = +AN_1 + B\rho(N_1 - N_0).$$



Estado estacionario

$$\dot{N}_1 = \dot{N}_0 = 0$$

Atomos en equilibrio con el campo de radiación
térmica a temperatura T



Distribución de Boltzmann

$$N_1 = N_0 \exp(-\beta h\nu)$$



En equilibrio:

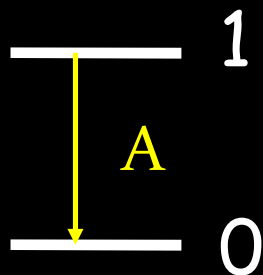
$$\dot{N}_1 = \dot{N}_0 = 0, \rightarrow [A + B\rho]N_1 = B\rho N_0$$

$$\rho = \frac{A}{B} \frac{1}{\exp(\beta\nu) - 1}$$

$$\frac{A}{B} = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3}$$

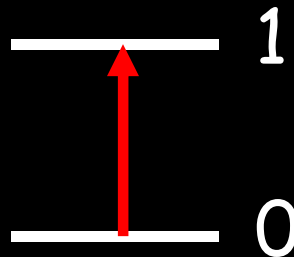


Procesos básicos de radiación

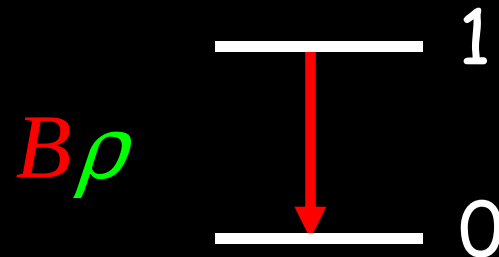


**Emisión
espontánea**

En el vacío y sin
causa aparente!



Absorción



Emisión estimulada

↓
**Máser 1954
Láser 1960**

Charles H. Townes.
Nikolai G. Basov
Alexander M. Prokhorov
Premio Nobel 1964

$A = ?$

→ Dirac 1927
↓
CQED 1980's



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

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

1960's: Se inicia era del Láser

He-Ne, (1.15 μ m)
Javan, Bennett & Herriott,
Bell Labs

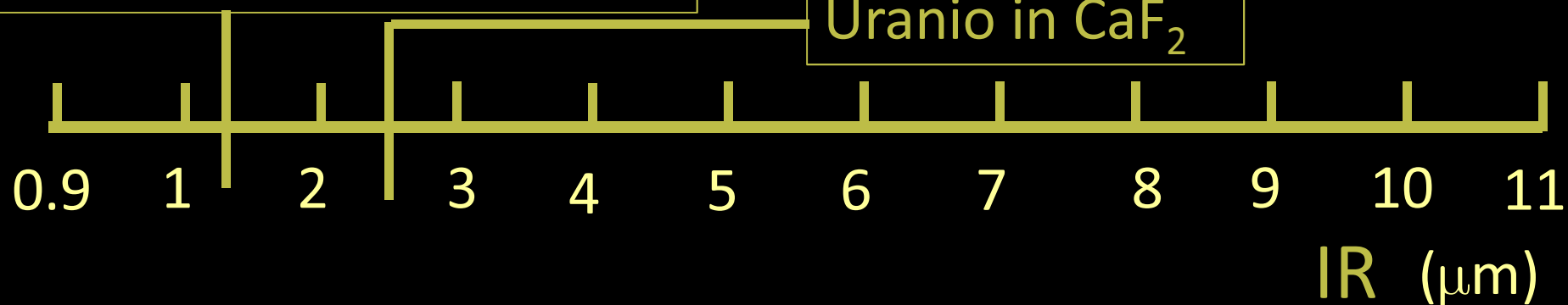
Rubí, Maiman,
Hughes Res Labs (Mayo)



600 700 (nm)

Samario in CaF_2
Sorokin & Stevenson, IBM

Uranio in CaF_2



1961-1962

Optica no lineal

He-Ne (632.8nm)

White & Rigden

SHG de Rubí
Franken

400

500

600 (nm)

Nd-Glass
Snitzer

Q-switching

0.7

0.8

0.9

1

2

3

4

5

6

7

8

9

GaAs – Diodo láser, GE, IBM, Lincoln Labs

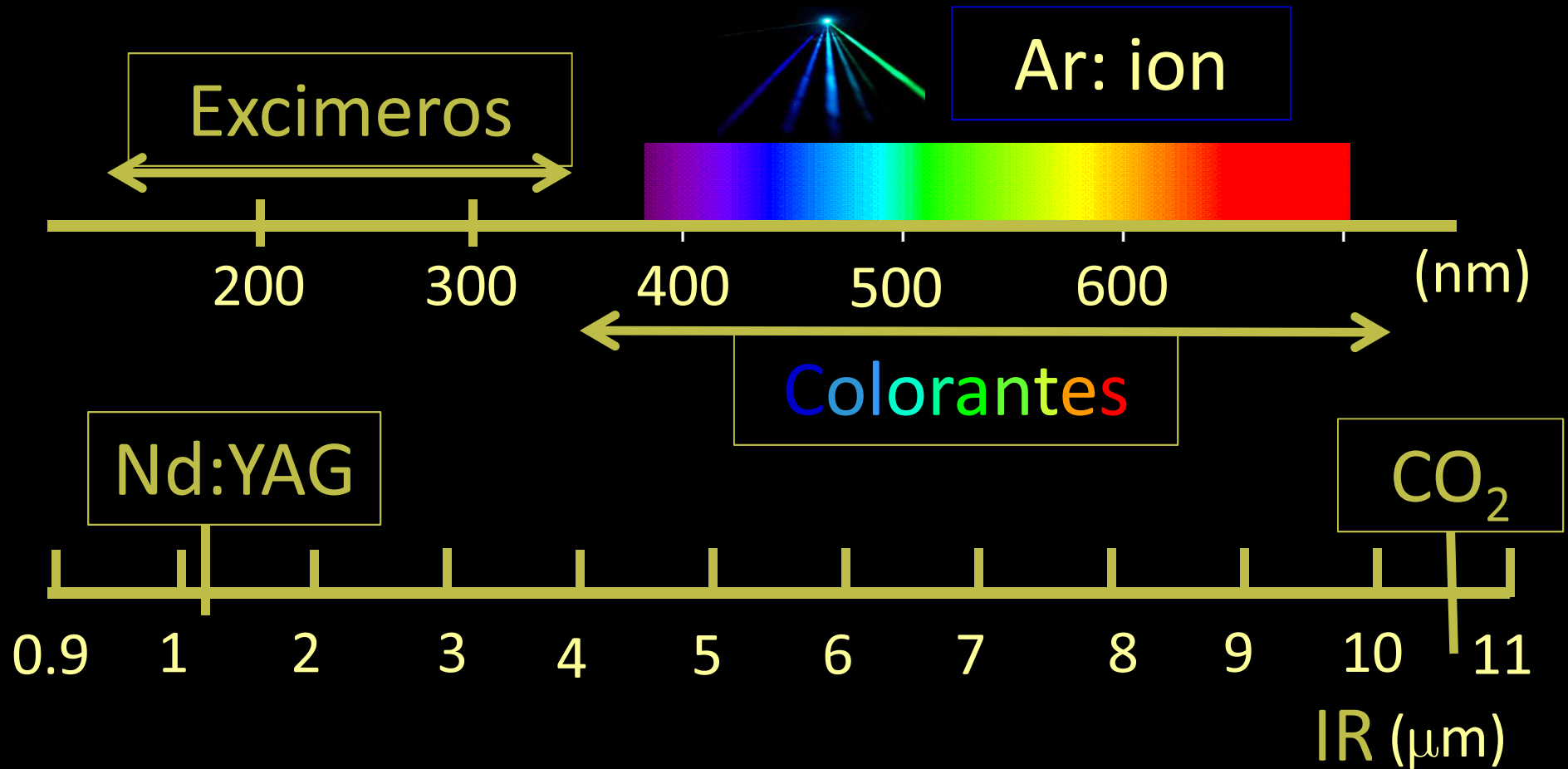
IR (μm)



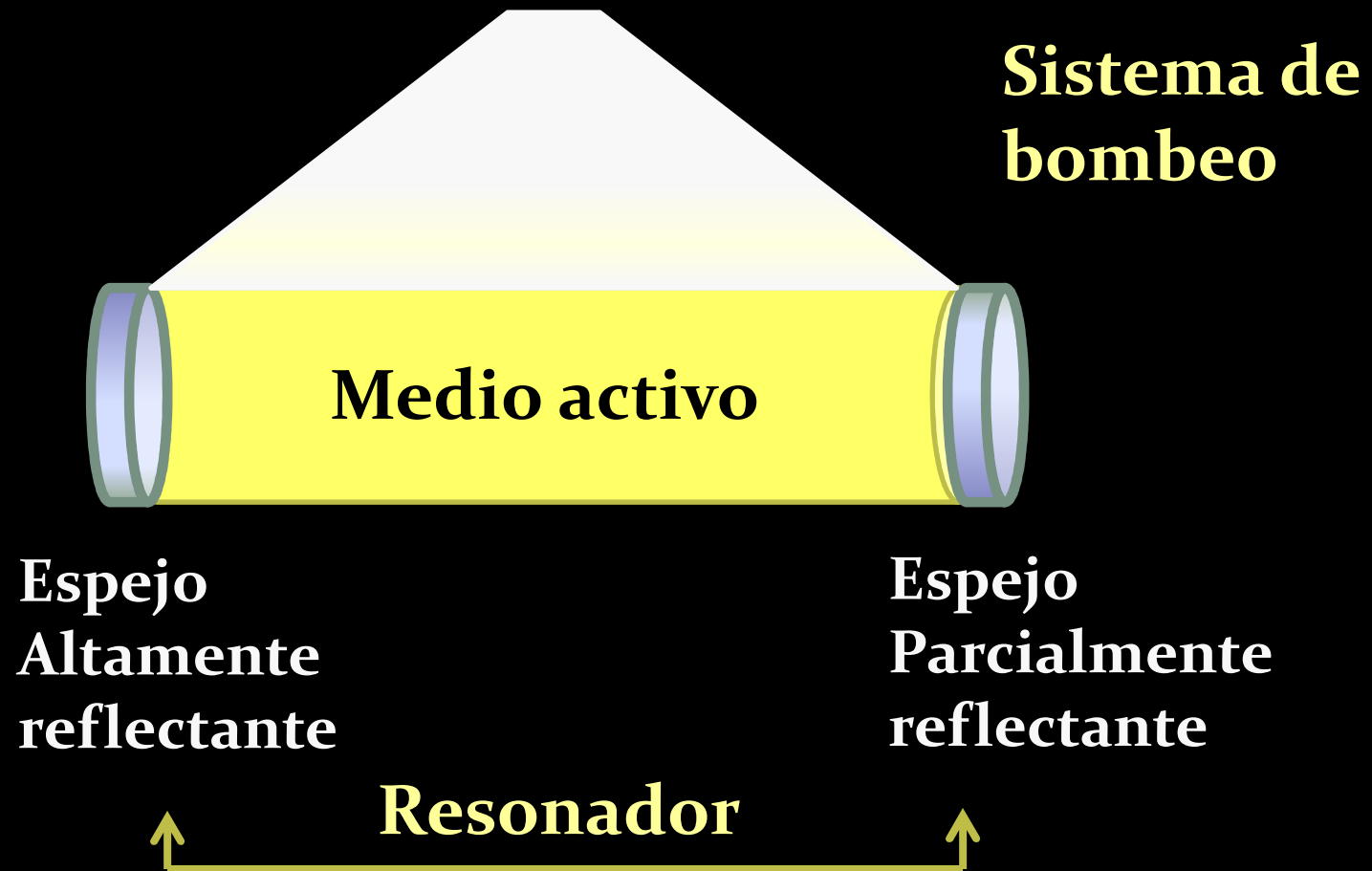
CREOL | The College of Optics & Photonics
UNIVERSITY OF CENTRAL FLORIDA

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

Mediados de los 60



Elementos básicos del láser



Medio activo

Ganancia de un láser



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

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

El medio activo

Origen de la transición láser

Transiciones entre niveles de energía discretos en:

- *Átomos (en gases, líquidos, fibras o en matrices sólidas): Electrónicas (UV y visible)*
- *Moléculas (en gases y líquidos): Electrónicas (UV y visible), vibracionales (IR) y rotacionales (FIR)*

Transiciones entre bandas de energía en sólidos:

- *Semiconductores (Diodo láser) (IR y visible)*

Procesos no-lineales

Emisión estimulada de electrones libres



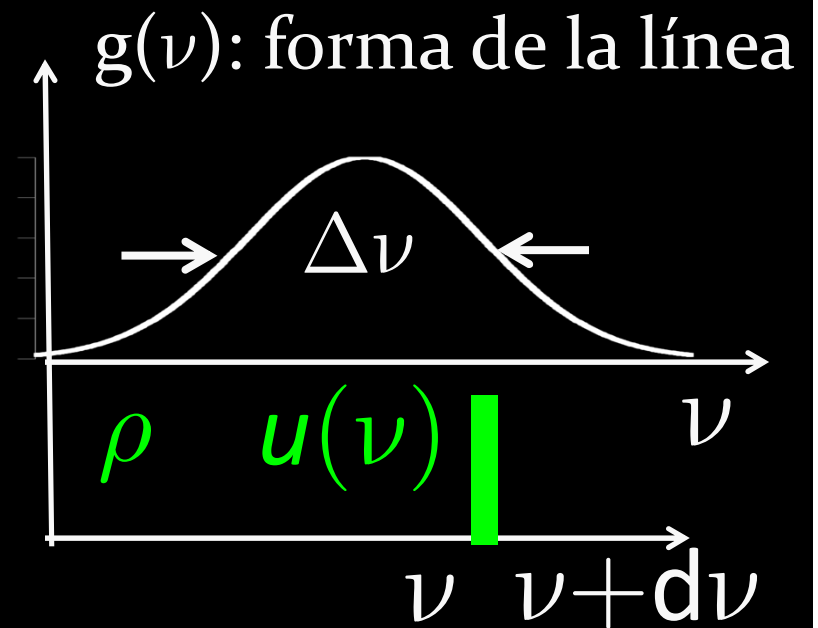
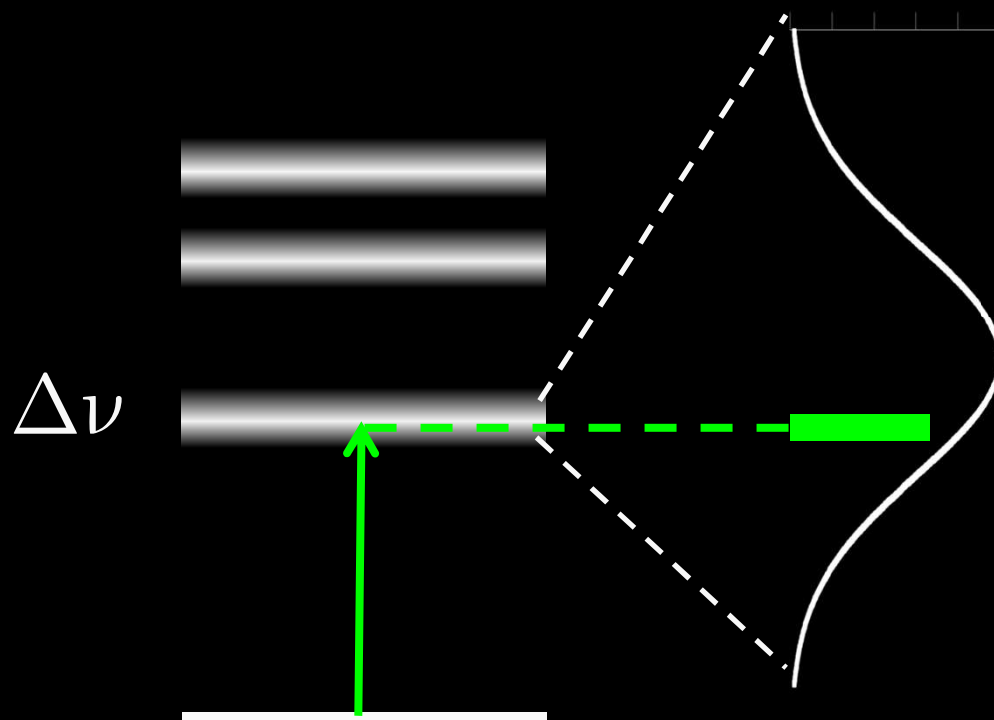
Modelo físico

Sistema de dos niveles + campo monocromático



Sistema de dos niveles

Interacción con radiación monocromática



$$u(\nu) = \rho(\nu) d\nu$$



Ecuaciones de tasas de población

(Ignorando la emisión espontánea)

$$\dot{N}_1 = -Bu(\nu)g(\nu)(N_1 - N_0)$$

$$\dot{N}_0 = Bu(\nu)g(\nu)(N_1 - N_0)$$

El cambio en la inversión de población $N_1 - N_0$ está asociado a un cambio en la densidad de radiación

$$\frac{du}{dt} = -(\dot{N}_1 - \dot{N}_0) \times h\nu = -2\dot{N}_1 \times h\nu$$

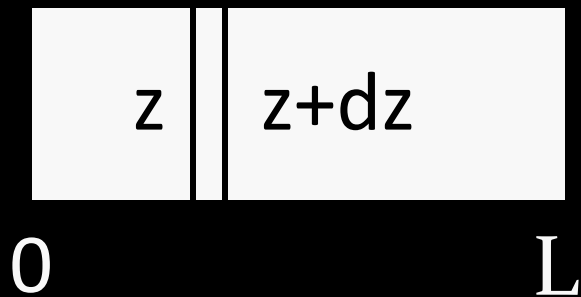


Ecuaciones de tasas de población

$$Z = u / h\nu \quad = \text{densidad de fotones}$$

$$\frac{dZ}{dt} = 2h\nu Bg(\nu)(N_1 - N_0)Z \quad \frac{c}{n} dt = dz$$

Cuando la luz atraviesa un medio



$$Z = Z(0) \exp(\alpha(\nu)z)$$

$$\alpha(\nu) = \frac{2h\nu}{c/n} Bg(\nu)(N_1 - N_0)$$



Absorción o ganancia?

$$\alpha(\nu) = \frac{2h\nu}{c/n} Bg(\nu)(N_1 - N_0)$$

$\alpha(\nu) < 0$ si $N_0 > N_1$ Absorción

$\alpha(\nu) > 0$ si $N_0 < N_1$ Ganancia!!



Poblaciones en equilibrio térmico

Distribución de Boltzmann

$$N_1 = N_0 \exp\left(-\frac{h\nu}{k_B T}\right)$$

$$N_1 < N_0$$

Alta T

$$h\nu \ll k_B T$$

$$\Rightarrow N_1 \sim N_0$$

Baja T

$$h\nu \gg k_B T$$

$$\Rightarrow N_1 \ll N_0$$

Absorción



A temperatura ambiente

La frecuencia que corresponde a $h\nu_{amb} = k_B T_{amb}$ es:

$$\nu_{amb} \approx 6 \times 10^{12} \text{ Hz} \Rightarrow \lambda_{amb} \approx 50 \mu\text{m} \quad \text{FIR}$$

Para ΔE en el IR y el visible, $h\nu \gg k_B T$

$$\Rightarrow N_1 \ll N_0$$

Prácticamente todos los átomos en el estado base.



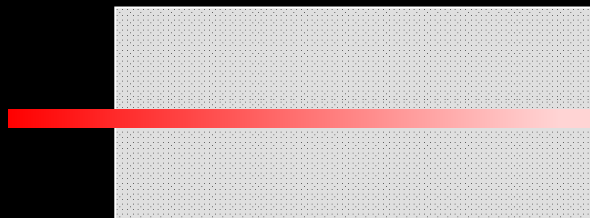
Absorción: Ley de Beer

Gas en equilibrio térmico: $N_1 < N_0 \Rightarrow \alpha < 0$

Medio absorbente: un haz de luz se atenúa de acuerdo con la *ley de Beer*:

$$Z(z) = Z(0)e^{-|\alpha|z}$$

$|\alpha|$: *coeficiente de absorción* del gas.



Ejemplo:

$$|\alpha| = 0.35 \text{ cm}^{-1}$$

$$z = 2 \text{ cm}$$

$$e^{-0.35 \times 2} = 0.5$$



Ganancia e inversión de población

Si se consigue llevar el medio fuera del equilibrio térmico y producir una *inversión de población* $N_0 < N_1$ (número de átomos en el estado superior de la transición mayor que en el inferior), el medio amplifica la radiación: $\alpha > 0$.

$$Z(z) = Z(0)e^{\alpha z}$$

Cómo se obtiene una inversión de población?

Bombeo!!!!



Amplificación: ganancia por paso

- Un haz luminoso puede ser amplificado pasando una sola vez a través de un medio activo de longitud L , **con inversión de población** (Por ejemplo EDFA).

$$Z = Z(0) \exp(\alpha(\nu)L)$$

- El factor de ganancia al atravesar una vez el medio es:

$$G_1 = \exp(\alpha(\nu)L)$$

- La ganancia en un solo paso es:

$$\frac{Z - Z(0)}{Z(0)} = \exp(\alpha(\nu)L) - 1 = G_1 - 1$$

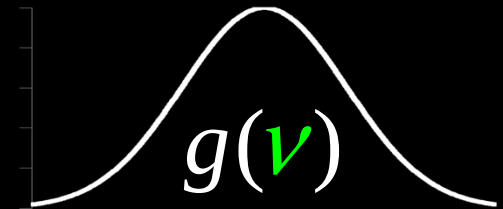


Ganancia para señal débil

- Se utiliza para caracterizar la ganancia de un medio con una señal de prueba.
- Si $\alpha(\nu)L \ll 1$ la ganancia para una señal débil en un solo paso es

$$\alpha(\nu)L$$

$$\alpha(\nu)L = \frac{2h\nu}{c/n} Bg(\nu)(N_1 - N_0)L$$



Esquemas de bombeo



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



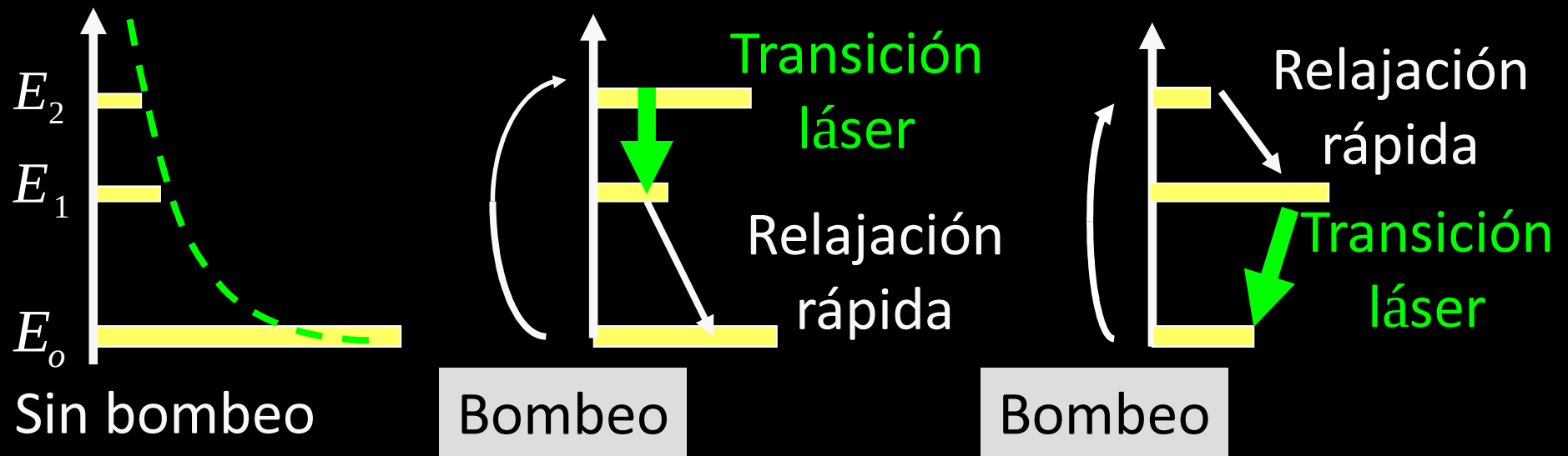
Sistema de bombeo:

Creando inversión de población

- Lámpara flash
- Descarga eléctrica
- Cañón de electrones
- Otro láser
- Corriente
- Acelerador y ondulator (Láser de electrones libres)



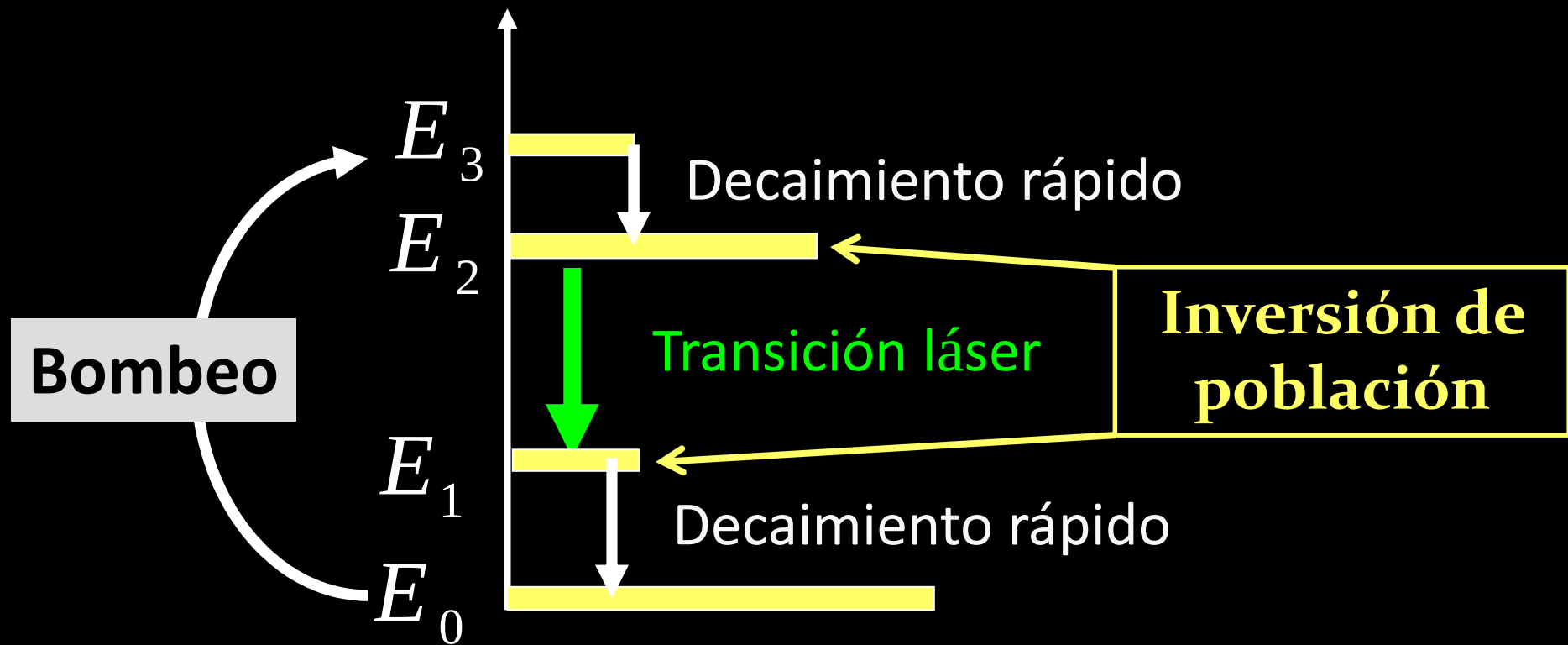
Bombeo: Sistema de tres niveles



Láser de Rubí

Mas de la mitad de los átomos deben ser bombeados a niveles excitados para obtener inversión de población

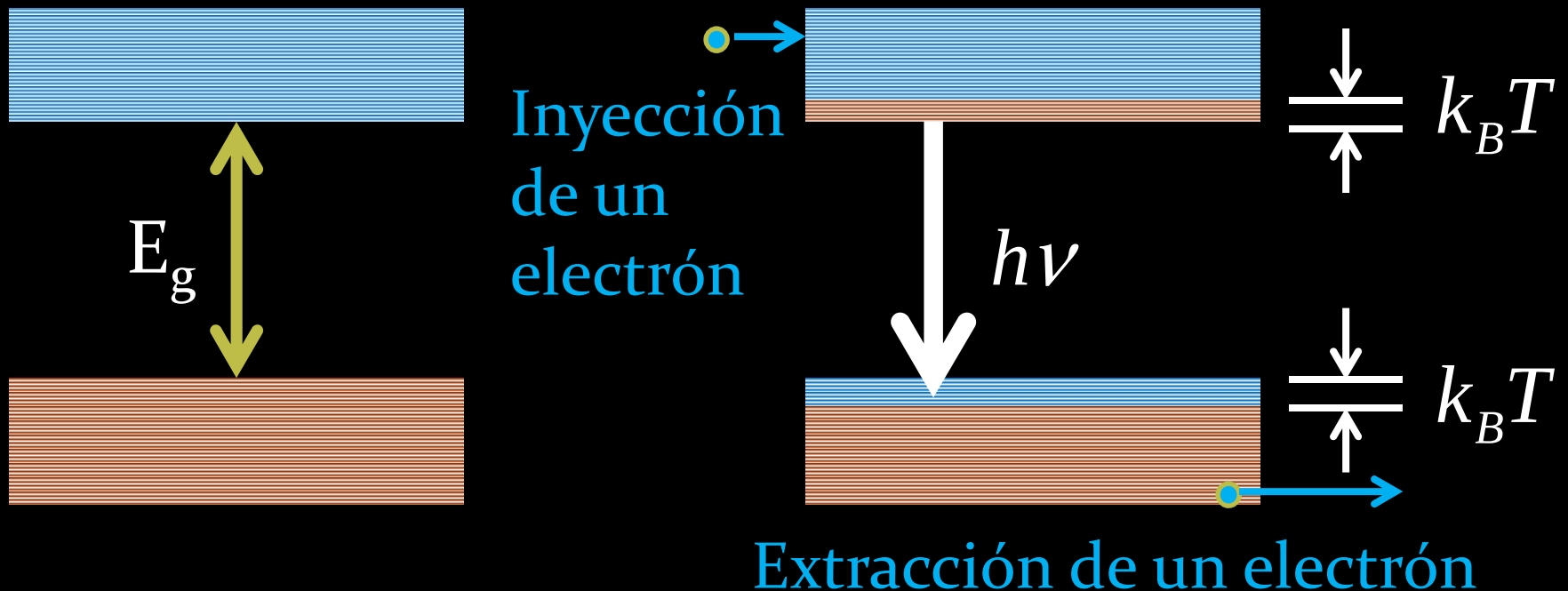
Bombeo: Sistema de cuatro niveles



Láseres de Nd:YAG y TiS



Láseres de dos bandas



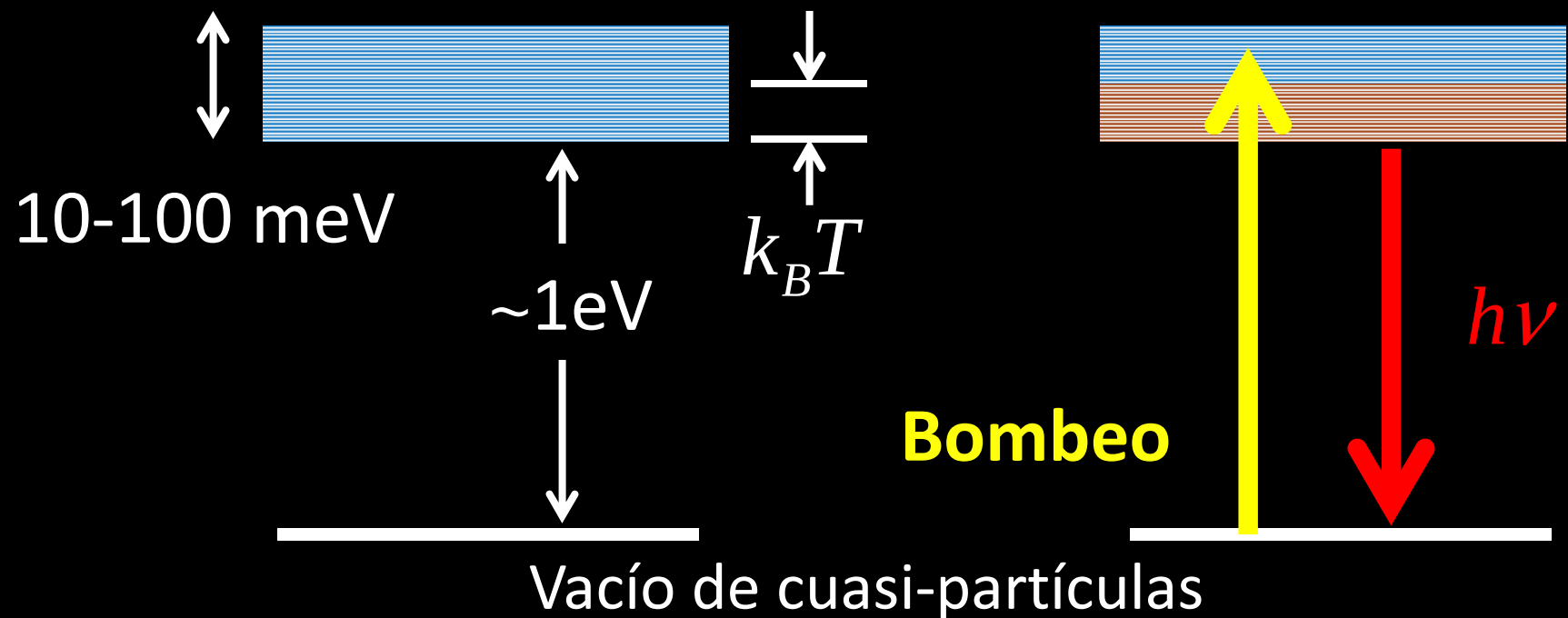
Todos los diodos láser de semiconductor

$$\lambda = 0.4 - 2\mu m$$



Láseres de cuasi-banda

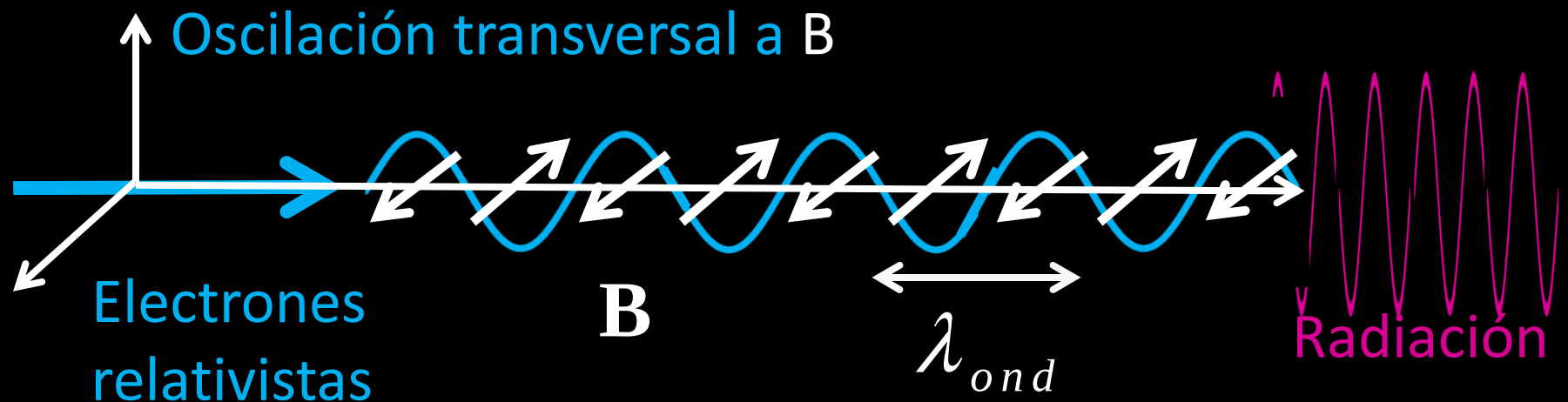
Vidrio dopado con una impureza: cuasi-partículas



Modelo para el láser de fibra dopada con Er



Láser de electrones libres

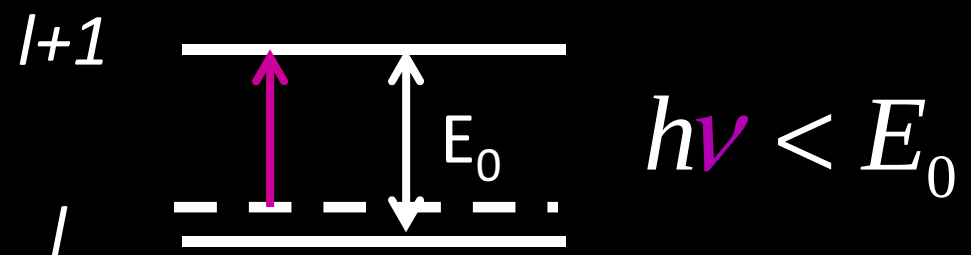
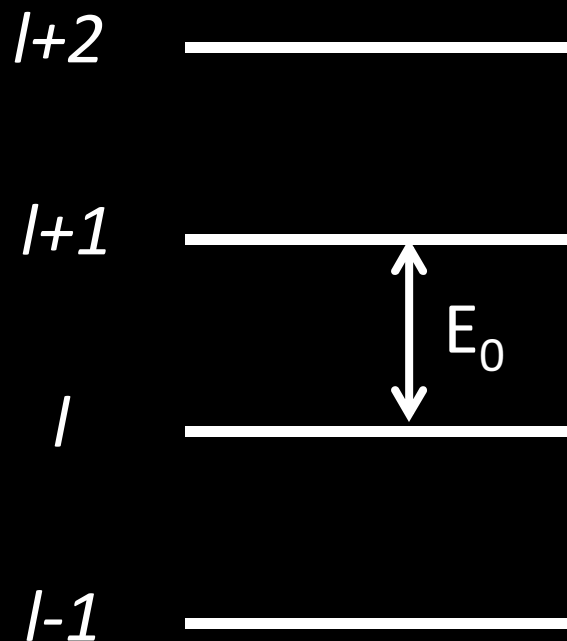


Emisión espontánea $\nu = \frac{2c\gamma^2}{\lambda_{ond}}$



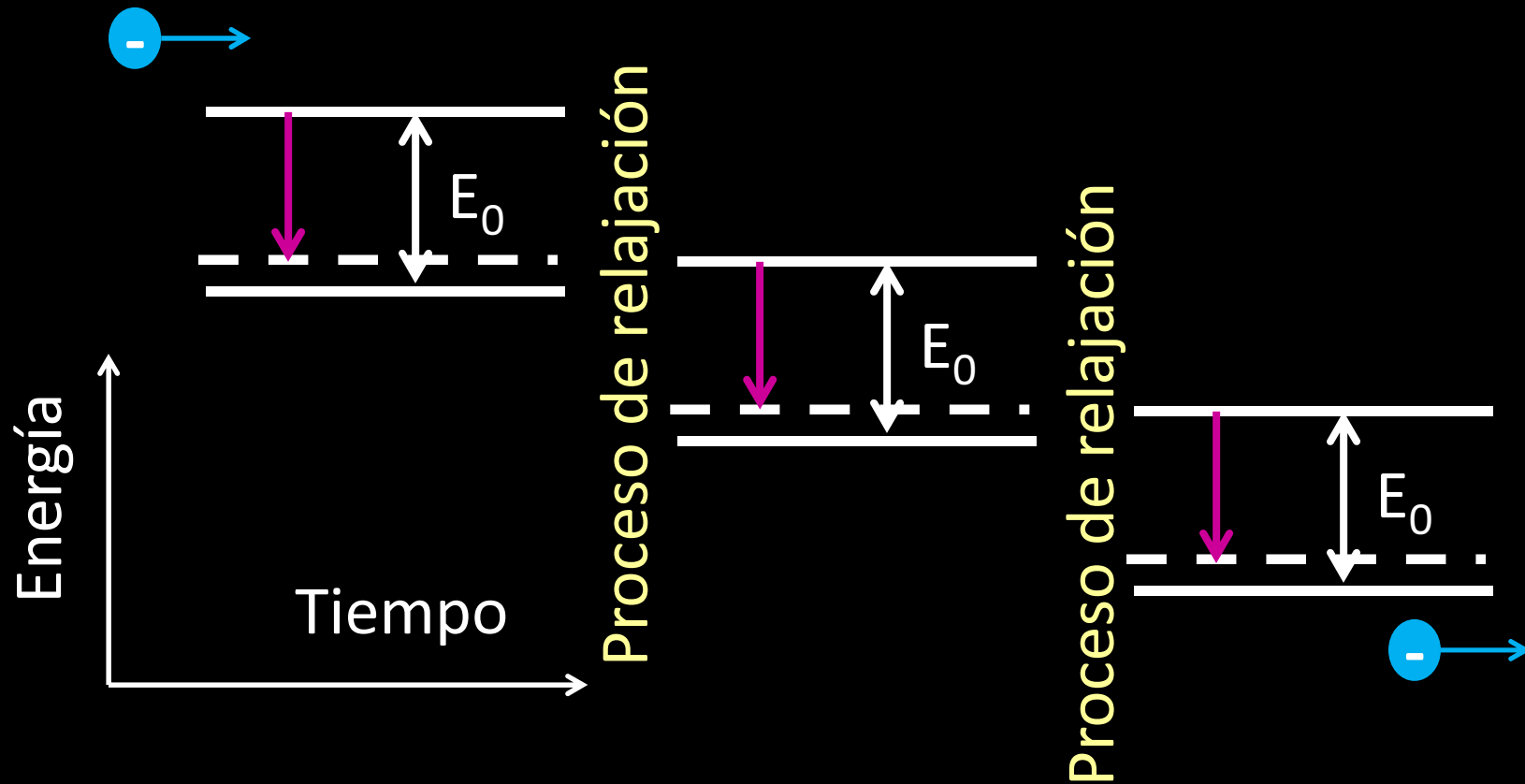
Escalera de niveles de energía

Electrón en un campo magnético periódico: oscilador



Emisión estimulada prevalece
para $h\nu < E_0$ y absorción
para $h\nu > E_0$

Láser de electrones libres



El resonador óptico



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

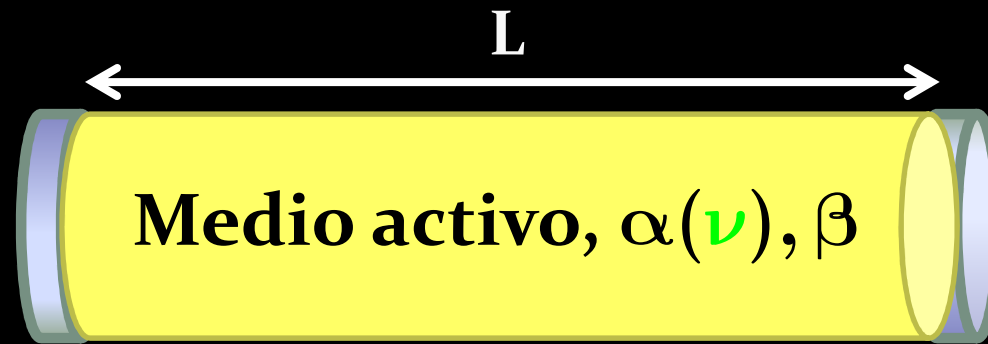
CREOL@25
Celebrating 25 Years of Excellence in Optics and Photonics

El resonador óptico

- La mayoría de los amplificadores de un solo paso proveen muy poca ganancia y son muy largos.
- La longitud efectiva del medio amplificador puede aumentarse reflejando la luz entre dos espejos.
- Un efecto adicional de los espejos es la introducción de una condición de resonancia (resonador óptico).
- La ganancia debe ser suficiente para sobrepasar las pérdidas debidas a absorción y dispersión en el medio, y las pérdidas en los espejos, incluyendo las “pérdidas” asociadas con la salida láser del resonador.



Resonador óptico*



Espejo R_1

Espejo R_2

La ganancia en un viaje de la luz de ida y vuelta es

$$G = R_1 R_2 \exp[2(\alpha(\nu) - \beta)L]$$

*Ver curso de Prof. Eric Rosas



Umbral del láser

- Para que la acción láser comience, la ganancia en un viaje de la luz de ida y vuelta debe ser $G > 1$.

$$G = R_1 R_2 \exp[2(\alpha(\nu) - \beta)L] > 1$$

$$\alpha_u(\nu)$$

- En el estado estacionario la ganancia debe equilibrar las pérdidas, incluyendo las de emisión láser.

$$G = 1$$

$$\alpha_0(\nu) = \beta + \frac{1}{2L} \ln \left(\frac{1}{R_1 R_2} \right) = \alpha_u(\nu)$$



Como funciona un láser?



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

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

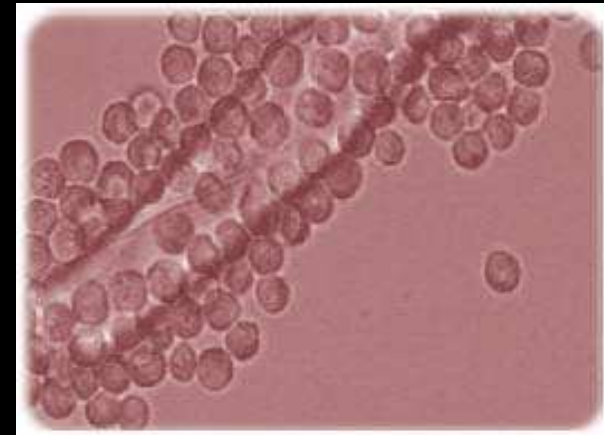
Dimensiones y factor de ganancia

Láser	λ	L(m)	Diámetro (ancho)	V (m ³)	G ₁
HeNe	633 nm	0.5	2mm	5 x 10 ⁻⁵	1.02
CO ₂	10.6 μ m	0.5	2cm	5 x 10 ⁻³	3
Nd:YAG	1.06 μ m	0.5	2cm	5 x 10 ⁻³	50
TiS	830 nm	0.5	2cm	5 x 10 ⁻³	50
Fibra	1.5 μ m	10	1mm	10 ⁻⁹	100
SC	810 nm	10 ⁻³	(1 μ m)	10 ⁻¹³	12
QCL	5 μ m	10 ⁻³	(10 μ m)	10 ⁻¹³	10



El láser: un instrumento excepcional

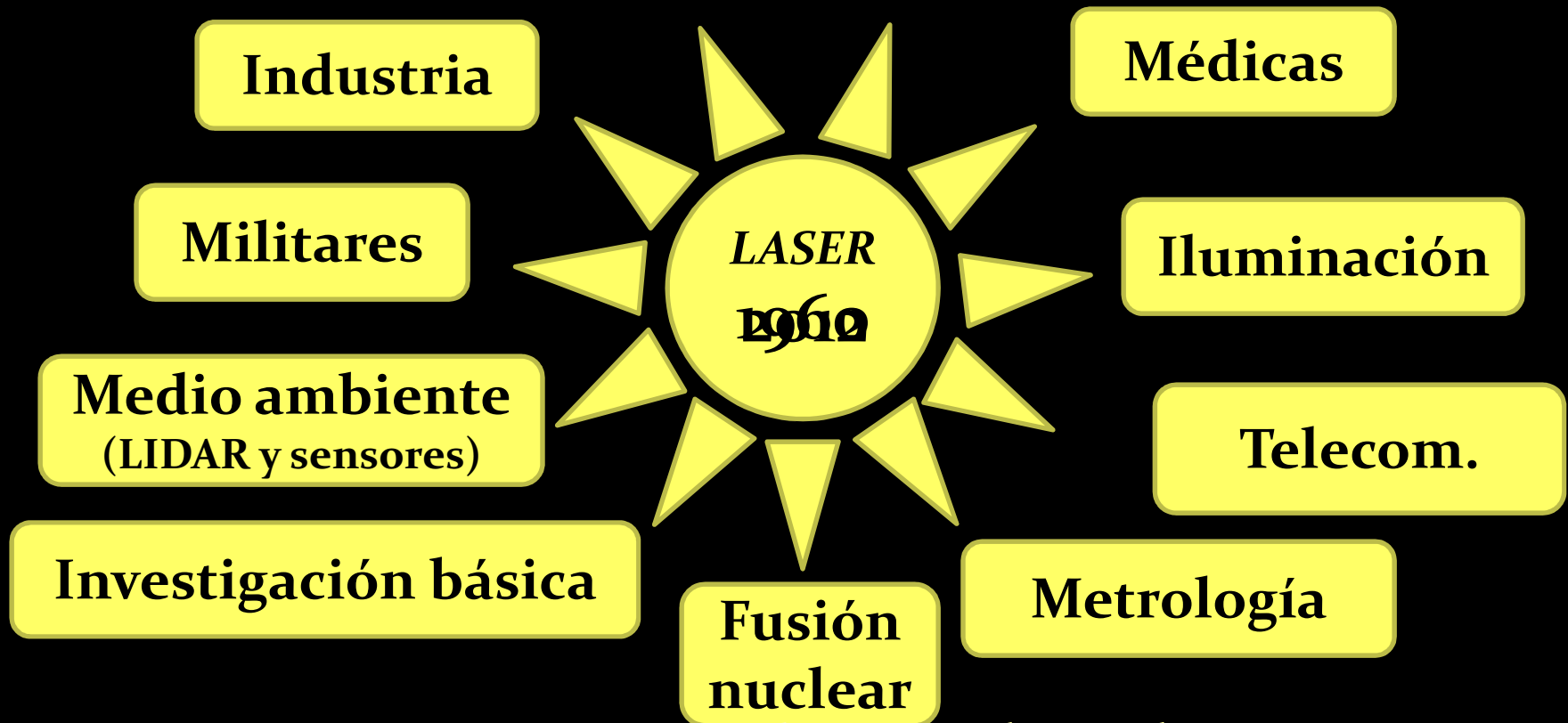
- Levitación
- Láseres focalizados a intensidades de Peta Watt para iniciar reacciones nucleares.
- Láseres industriales de varios kW de potencia en haces con el diámetro de un dedo.



Manipulación de
células
biológicas con
pinzas láser



Aplicaciones de los láseres



Un instrumento en busca de aplicaciones



Corte



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

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

Grabado



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

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

Grabado tridimensional



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

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

Múltiples aplicaciones



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

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