

# LASER

ovvero

Light Amplification

by

Stimulated Emission of Radiation

# L'energia degli elettroni è quantizzata e i valori di energia permessi si dicono

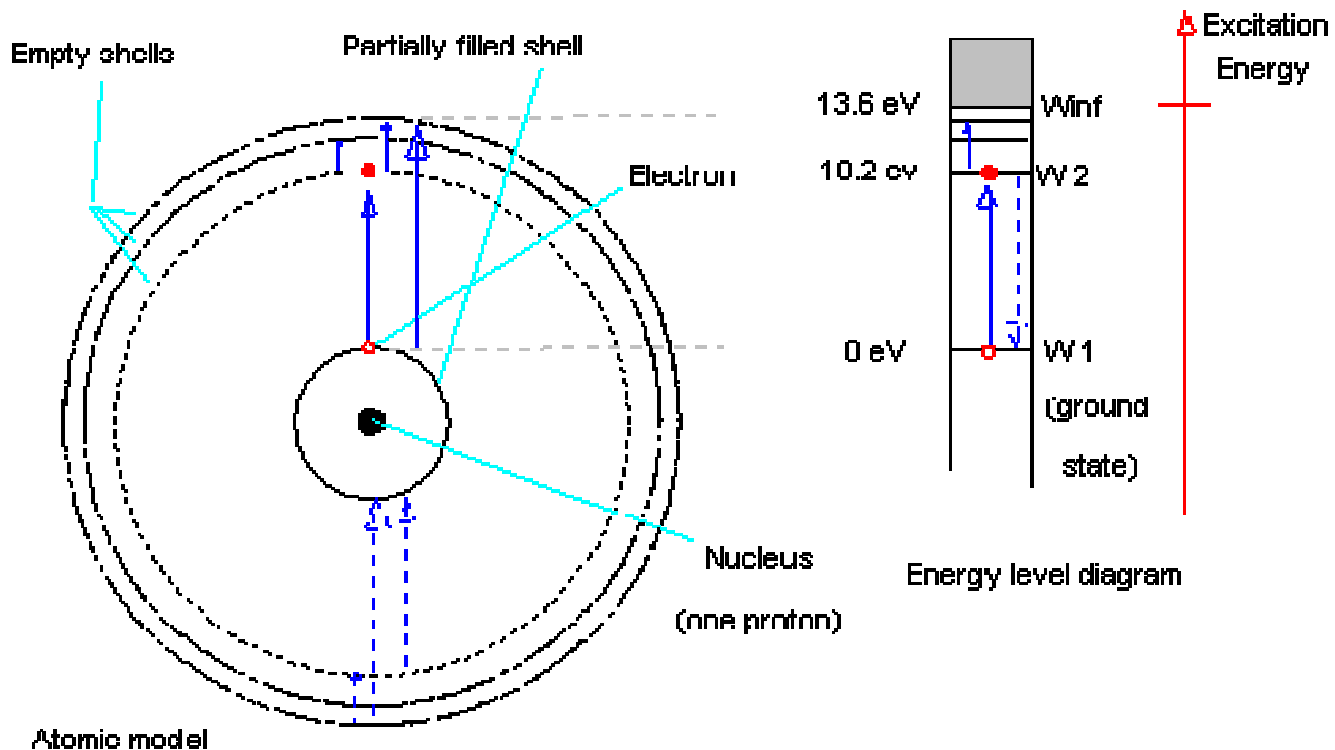
## “livelli di energia”

Niels Bohr (1913):

### Livelli discreti

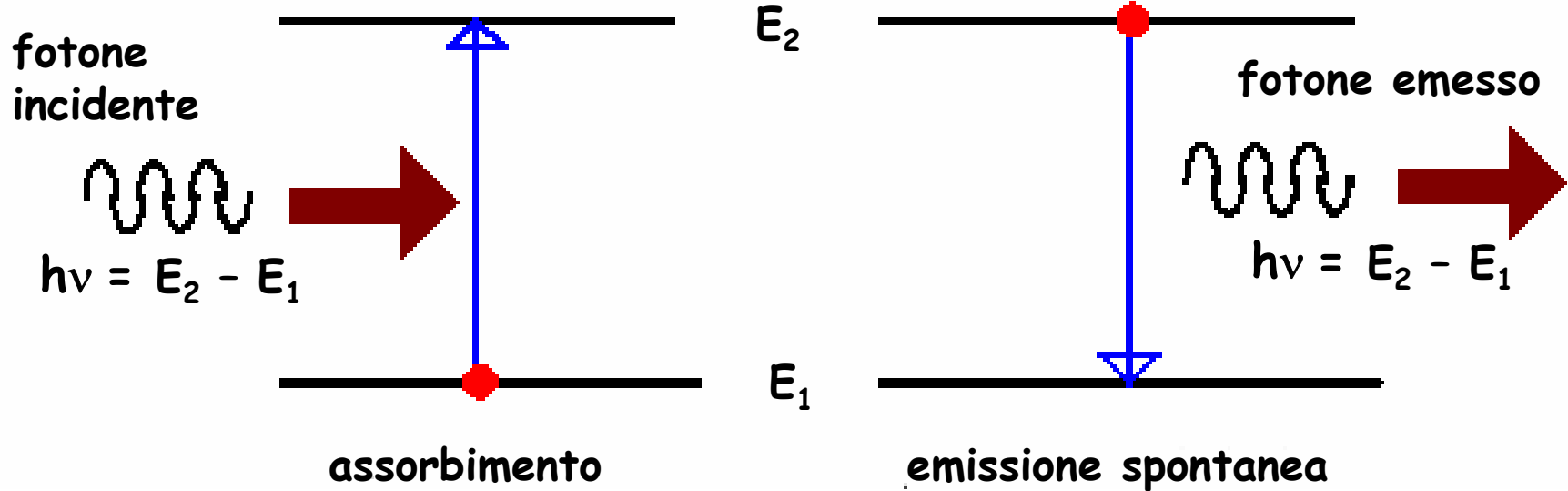
Transizioni accompagnate da assorbimento o emissione di  
quanti di energia

$$h\nu = E_1 - E_2$$

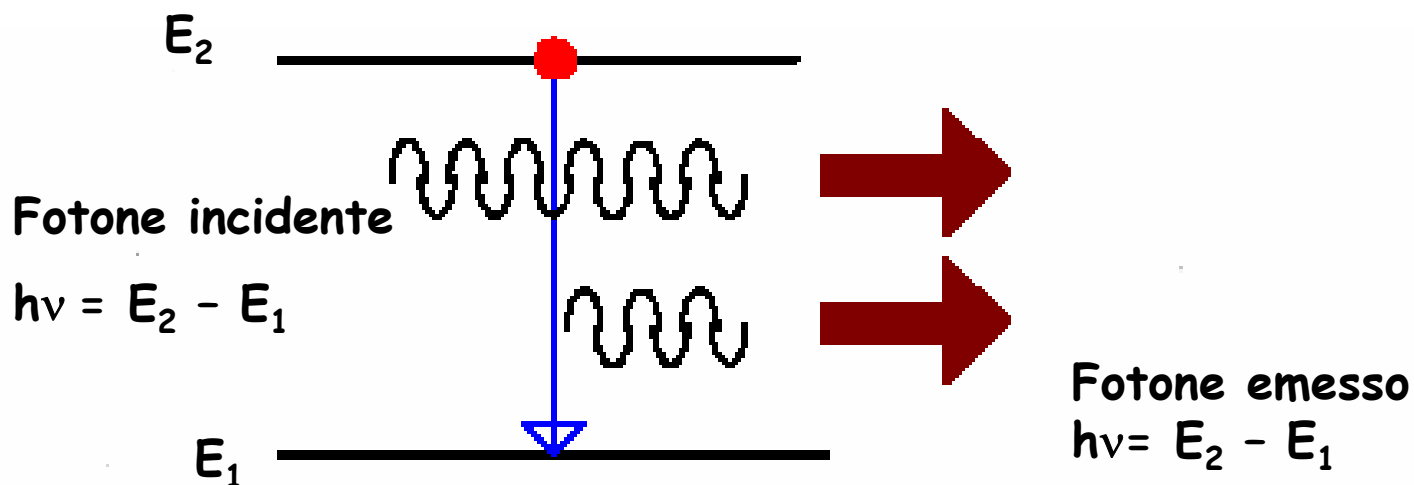


EXCITATION & DE-EXCITATION OF A HYDROGEN ATOM

## Assorbimento ed emissione spontanea



## Emissione stimolata

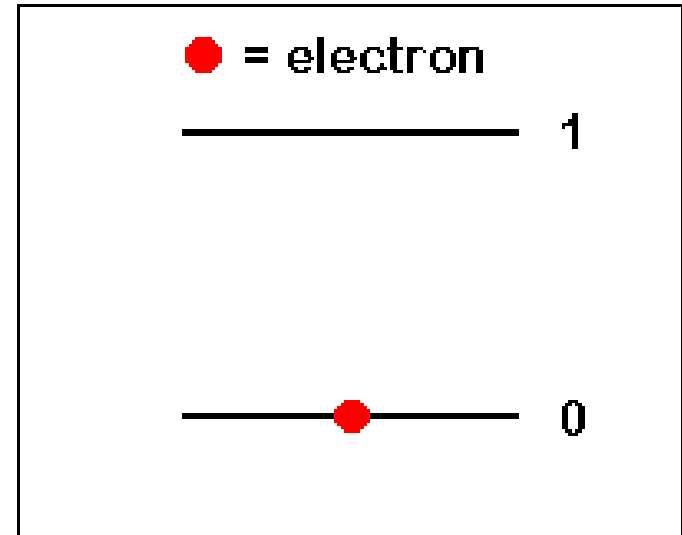


# Assorbimento ed emissione della luce

(animazione)

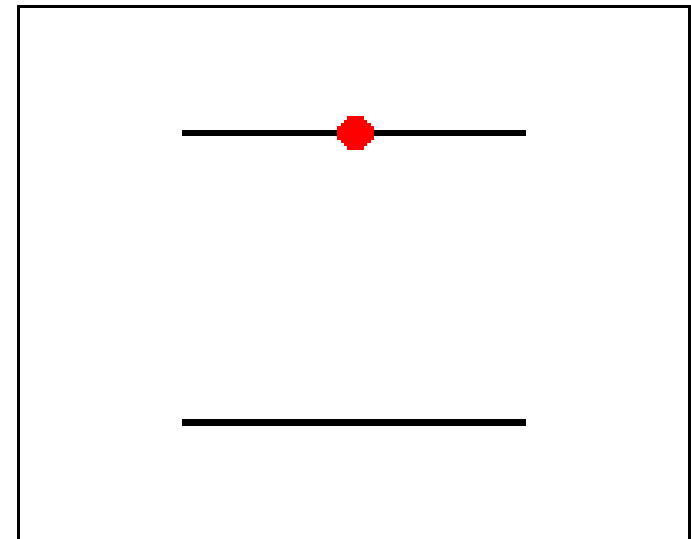
1) Assorbimento

2) Emissione spontanea

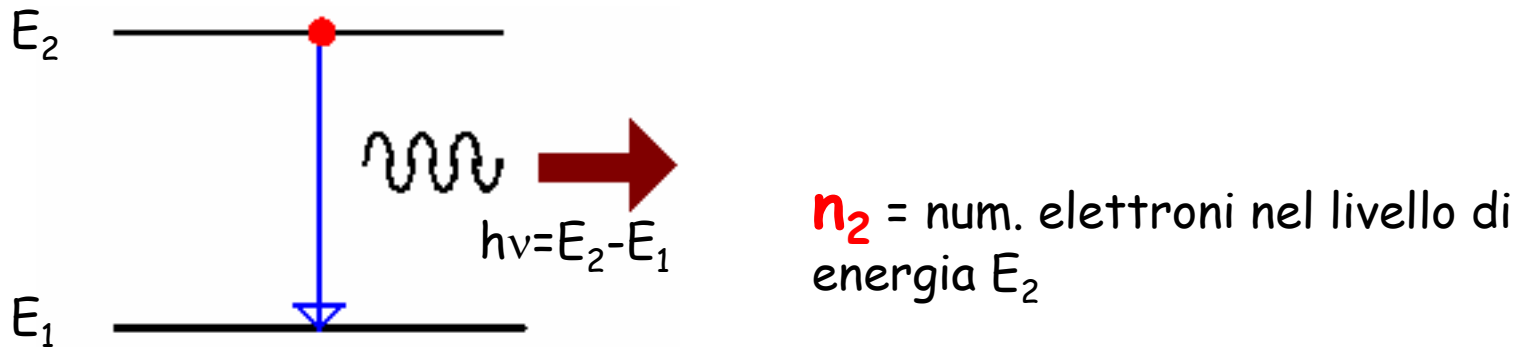


1) Assorbimento

2) Emissione stimolata



## Emissione spontanea



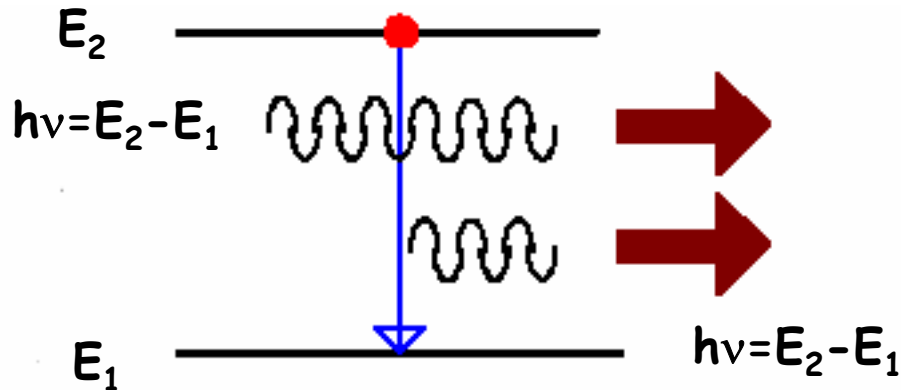
La variazione (diminuzione), nell'unità di tempo, del numero di elettroni presenti nel livello  $E_2$  per effetto dell'emissione spontanea è:

$$\frac{dn_2}{dt} = - A n_2$$

**A = probabilità di emissione spontanea** (funzione del materiale)

In un sistema contenente vari elettroni nel livello metastabile  $E_2$ , poiché per definizione di emissione spontanea le varie onde (fotoni) vengono emesse in modo casuale, esse non hanno nessuna relazione di fase fra di loro (luce incoerente)

## Emissione stimolata



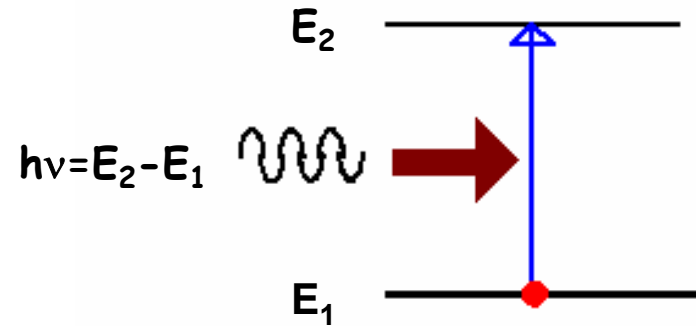
La variazione (diminuzione) , nell'unità di tempo, del numero di elettroni presenti nel livello  $E_2$  per effetto dell'emissione stimolata è:

$$\frac{dn_2}{dt} = - W_{21} n_2$$

$W_{21}$  = probabilità di emissione stimolata (funzione del materiale e dell'intensità dell'onda stimolante)

L'onda (fotone) emessa per emissione stimolata risulta in fase (coerente) con l'onda stimolante

## Assorbimento



$n_1$  = num. elettroni nel livello di energia  $E_1$

La variazione (diminuzione) , nell'unità di tempo, del numero di elettroni presenti nel livello  $E_1$  per effetto dell'assorbimento è:

$$\frac{dn_1}{dt} = - W_{12} n_1$$

$W_{12}$  = probabilità di assorbimento (funzione del materiale e dell'intensità dell'onda stimolante)



Per:

- Stesso materiale
- Stessa intensità dell'onda incidente

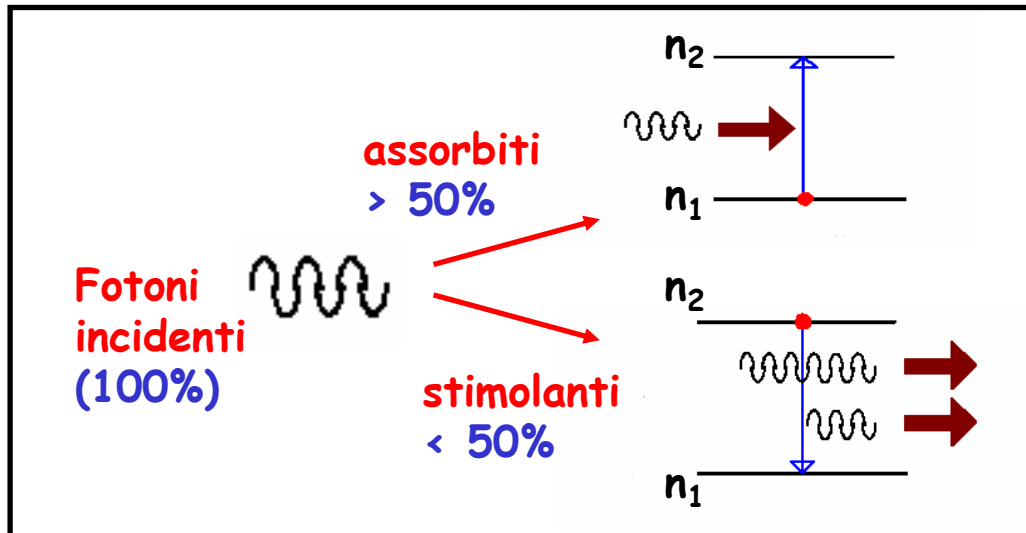
**Probabilità emissione stimolata = Probabilità assorbimento**

$$W_{21} = W_{12}$$

Quindi:

1) se:  $n_1 > n_2$   $\Rightarrow$   $|dn_1/dt| > |dn_2/dt|$

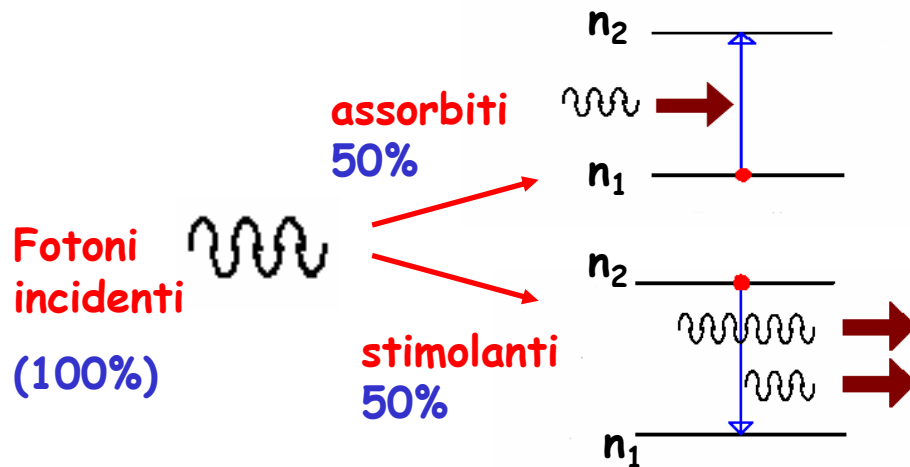
l'assorbimento **prevale** sull'emissione



Il materiale complessivamente **assorbe**: normali condizioni di equilibrio

2) se:  $n_1 = n_2 \longrightarrow |dn_1/dt| = |dn_2/dt|$

l'assorbimento è pari all'emissione



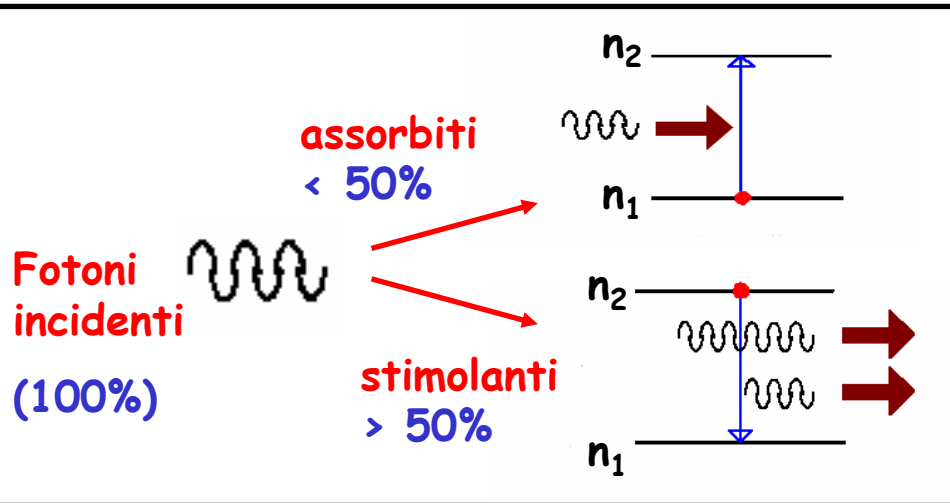
Il materiale risulta  
**trasparente** alla  
radiazione incidente

Se:  $n_1 < n_2$  

inversione di popolazione

$$|dn_1/dt| < |dn_2/dt|$$

l' emissione **prevale** sull' assorbimento



Il materiale complessivamente **emette** luce (amplifica l'onda incidente)



# Inversione di popolazione

## In un sistema a 2 livelli di energia non può ottenersi inversione di popolazione

Infatti, consideriamo un sistema a 2 livelli nel quale (essendo in condizioni di normale equilibrio termico) la popolazione del livello  $E_1$  sia maggiore di quella del livello  $E_2$ . Cioè si abbia:

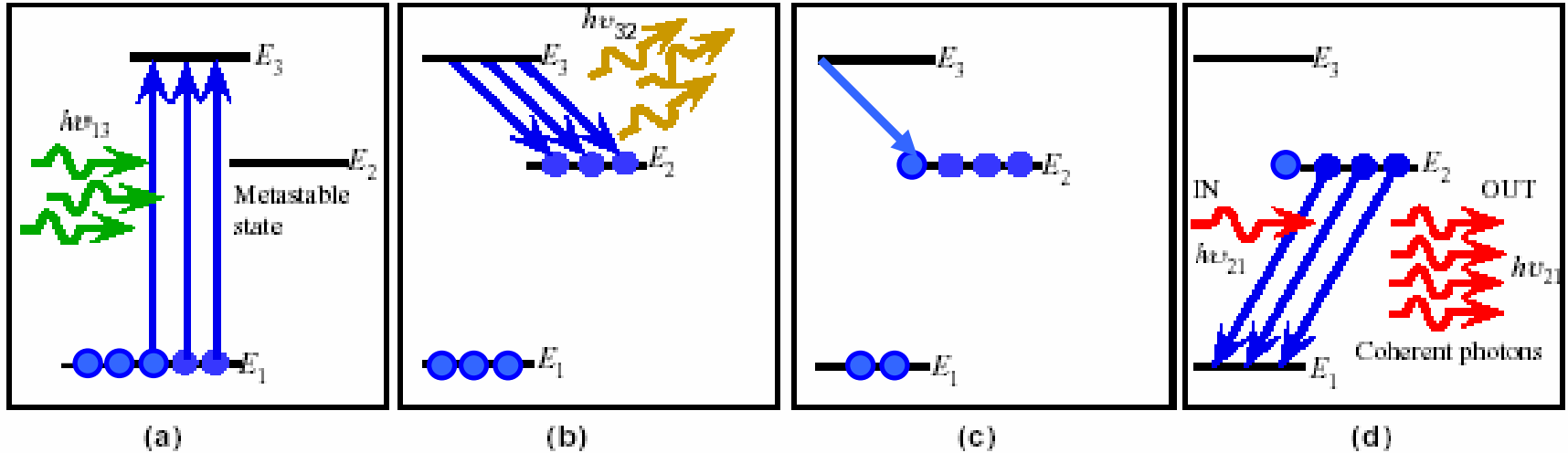
$n_1 > n_2 \implies$  in tal caso, se si fornisce energia dall'esterno, **l'assorbimento prevale sull'emissione** ( $dn_1/dt > dn_2/dt$ ), quindi gli atomi cominciano a portarsi dal livello di energia  $E_1$  al livello  $E_2$ .

Quando si raggiunge l'uguaglianza fra le popolazioni dei 2 livelli, si ha:

$n_1 = n_2 \implies$  in tal caso, **l'assorbimento eguaglia l'emissione** ( $dn_1/dt = dn_2/dt$ ). Ciò significa che il numero di atomi che si portano da  $E_1$  a  $E_2$ , eguaglia il numero di atomi che si portano da  $E_2$  a  $E_1$ . Si raggiunge, quindi, una **condizione di bilanciamento che fa sì che non si possa mai raggiungere la condizione di inversione di popolazione** (cioè la condizione per cui  $n_2 > n_1$ ).

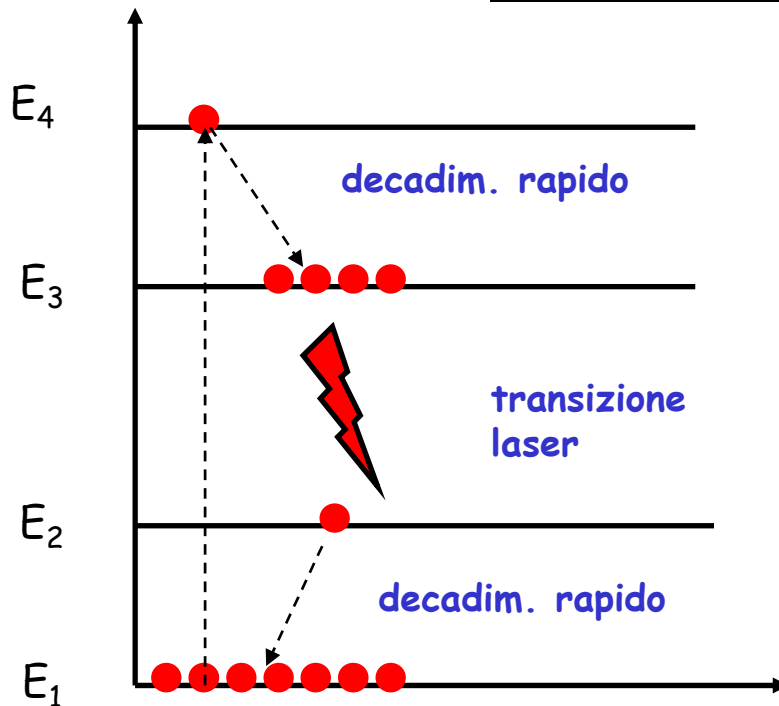
# Funzionamento del laser

## Sistema a 3 livelli di energia



- gli atomi nel livello base  $E_1$  sono pompati al livello eccitato  $E_3$
- il decadimento fra  $E_3$  e  $E_2$  è un **decadimento rapido** e "non radiativo" (es: energia emessa come calore o come vibrazioni reticolari). Poichè il livello  $E_2$  è metastabile, si crea un accumulo di atomi in tale livello. Per tale accumulo, **si raggiunge l'uguaglianza nelle popolazioni del livello  $E_2$  e  $E_1$**
- da questo momento in poi **comincia a crearsi un'inversione di popolazione** fra  $E_2$  e  $E_1$  (il numero di atomi su  $E_2$  è maggiore del numero di atomi su  $E_1$ )
- emissione stimolata

# Sistema a 4 livelli



$E_3$  = livello metastabile

Poichè il livello  $E_2$  è sempre vuoto (per il decadimento rapido fra  $E_2$  e  $E_1$ ).  
**occorre un solo atomo nel livello  $E_3$  per avere inversione di popolazione fra  $E_3$  e  $E_2$**  (non occorre creare preventivamente l'uguaglianza nelle popolazioni dei 2 livelli)

maggiore rendimento

# Elementi che costituiscono un laser

## 1) **Mezzo attivo**

materiale nel quale i livelli di energia degli atomi sono tali da poter realizzare un'inversione di popolazione e ottenere l'azione laser

## 2) **Sorgente di energia di pompa**

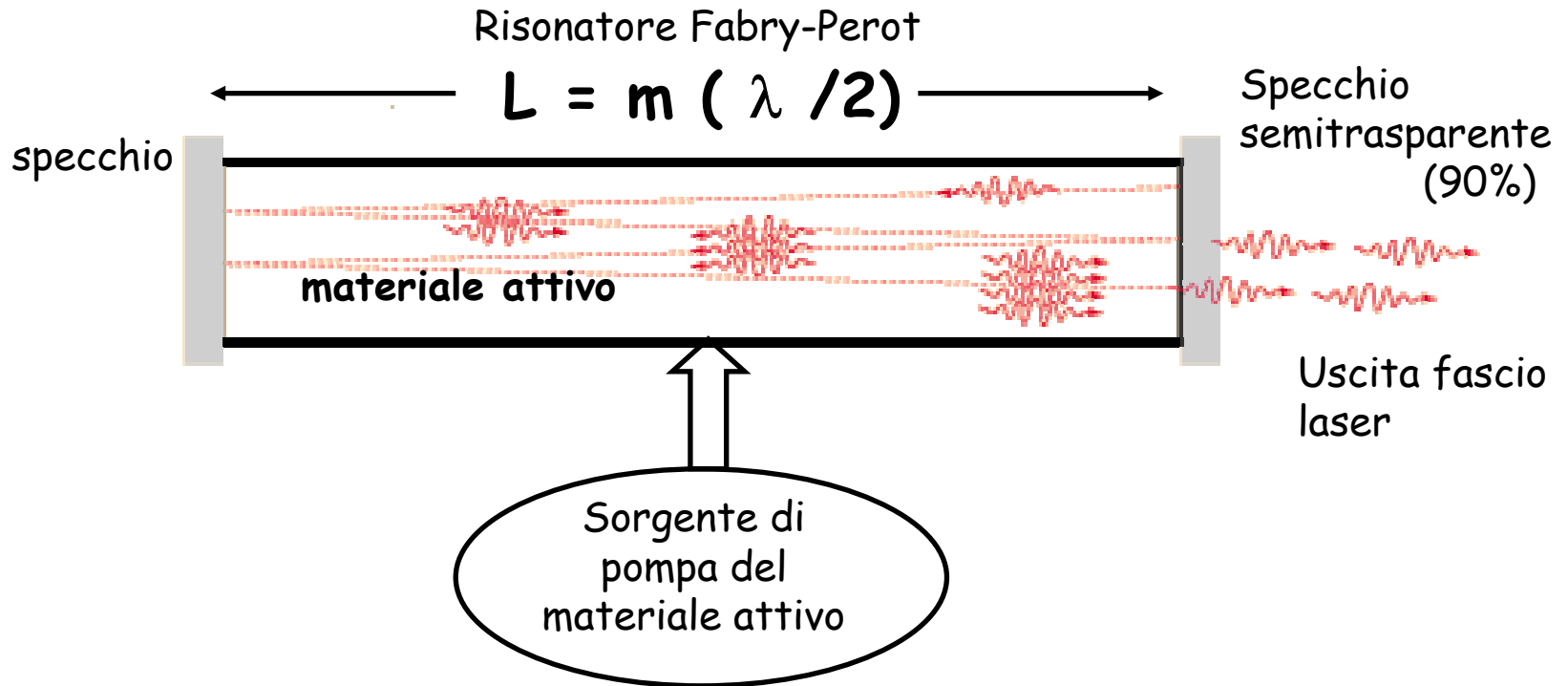
fornisce l'energia che realizza l'inversione di popolazione nel mezzo attivo

## 3) **Cavità ottica**

costituisce un oscillatore ottico che mantiene il guadagno del sistema al di sopra delle perdite



# Schema di un laser



- Materiale attivo: materiale in cui è possibile effettuare un'inversione di popolazione
- Pompaggio del materiale attivo: l'inversione di popolazione si ottiene per assorbimento di energia fornita da un'opportuna sorgente di pompa

# Spettro di un laser

Lo spettro della radiazione emessa da un laser è costituita normalmente da uno spettro di lunghezze d'onda centrate intorno ad un picco.

Ciò è dovuto alla sovrapposizione di 2 effetti:

a) nella cavità possono sussistere m modi ciascuno con frequenza data da:

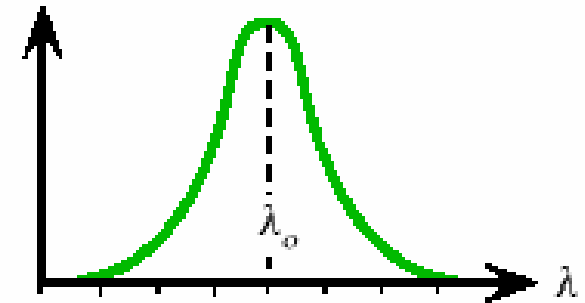
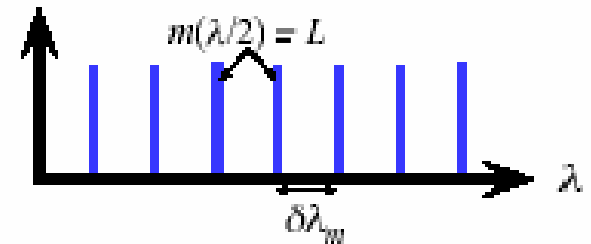
$$\nu = m (c/2L)$$

b) il guadagno ottico del materiale presenta un picco

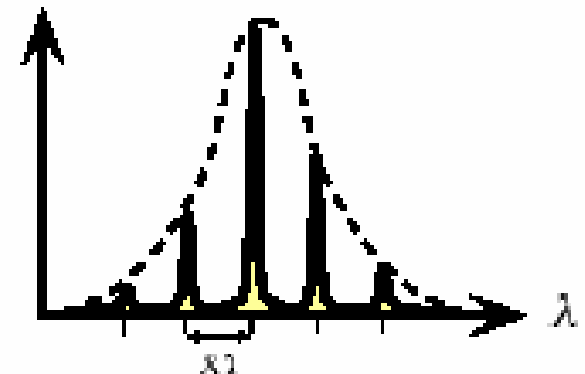
Lo spettro di uscita (intensità vs. lung. d'onda) è determinato dalla sovrapposizione dei due effetti

Nota: con particolari accorgimenti è tuttavia possibile realizzare laser monomodo (un solo picco)

Allowed Oscillations (Cavity Modes)



Relative intensity



# Tipi di laser

Classificazione in base al mezzo attivo:

- Laser a gas (es: HeNe, Ar, CO<sub>2</sub>)
- Laser a stato solido (doped insulator laser)  
(es: Rubino, NdYAG)
- Laser a semiconduttore (es: GaAs)

Classificazione in base al tipo di emissione:

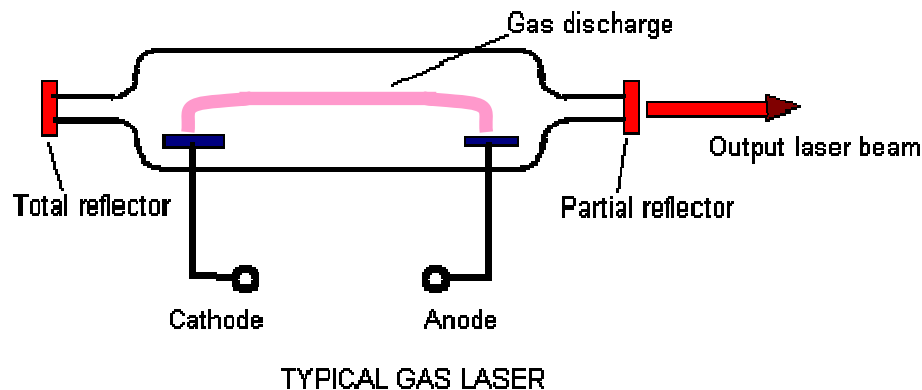
- laser in continua
- laser a impulsi

# Pompaggio del materiale attivo (1)

Il tipo di pompaggio dipende dal tipo di materiale attivo:

- Pompaggio mediante scarica elettrica

utilizzato nei laser a gas



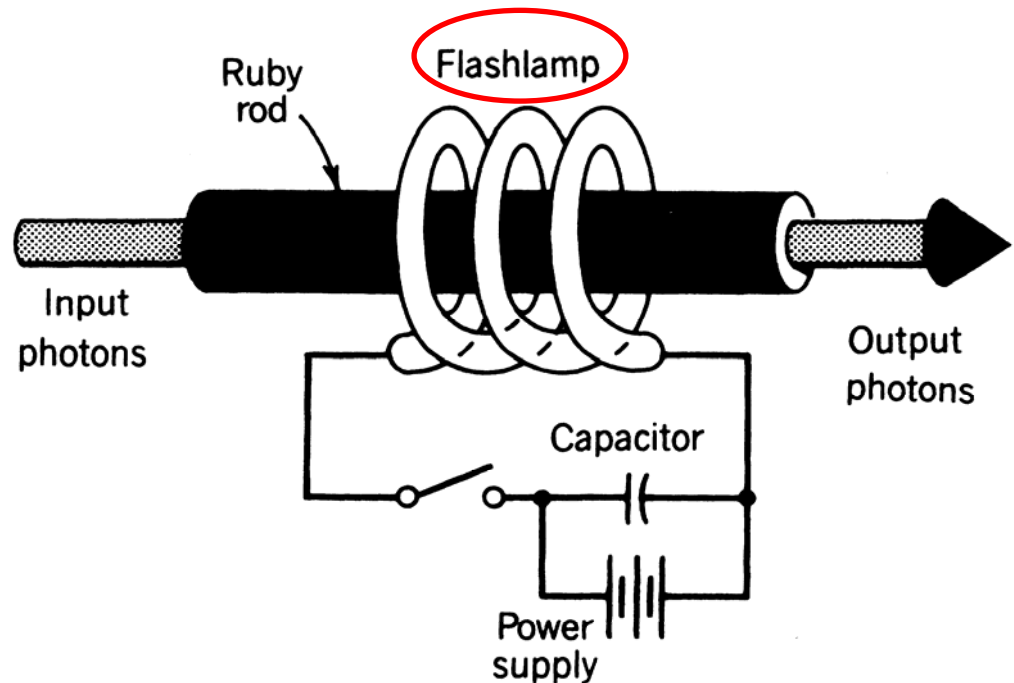
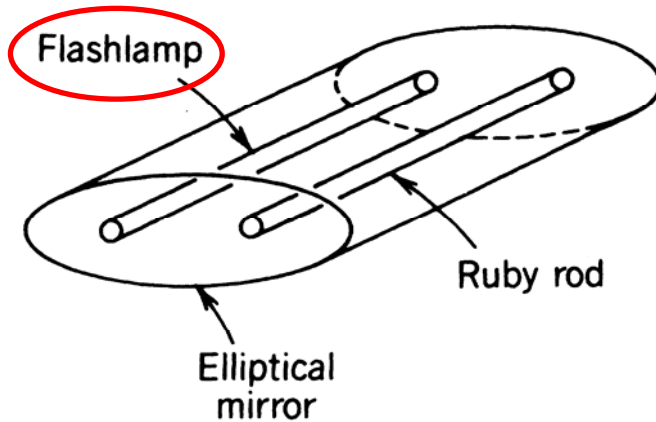
il gas è racchiuso in un tubo di quarzo sigillato agli estremi dagli specchi che costituiscono la cavità risonante

Una scarica elettrica che attraversa il gas viene creata fra gli elettrodi

# Pompaggio del materiale attivo (2)

## • Pompaggio mediante lampade flash

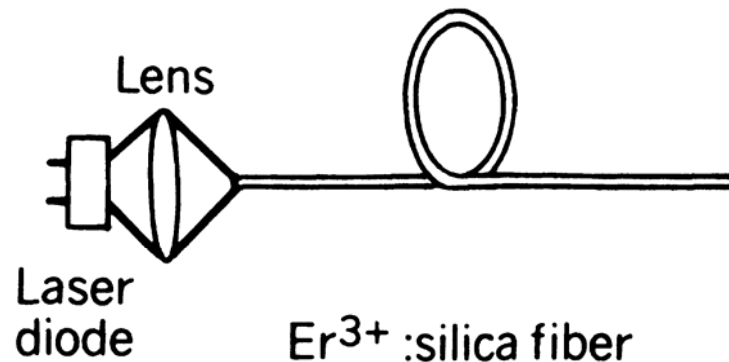
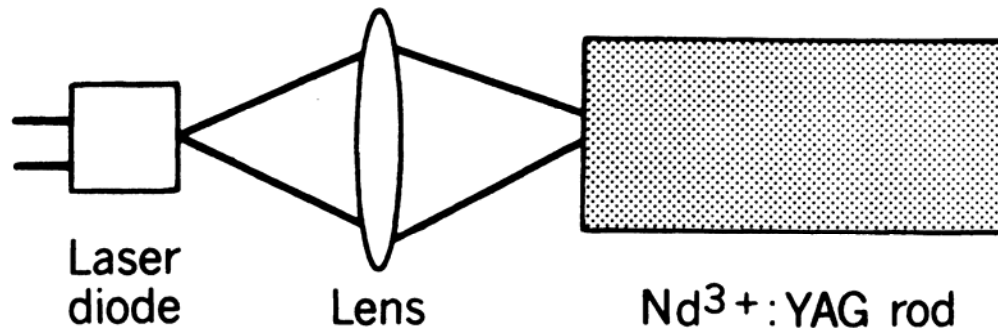
usato nei laser a stato solido



# Pompaggio del materiale attivo (3)

## • Pompaggio a diodi

Un diodo laser a semiconduttore (o un array di diodi laser) può essere usato per il pompaggio ottico nei laser a stato solido (NdYAG) oppure nei laser in fibra



# Caratteristiche della luce laser

## 1) Monocromatica

Una sola lunghezza d'onda

Ciò perchè l'emissione stimolata avviene fra due definiti livelli di energia degli atomi [  $\nu = (E_2 - E_1) / \lambda$  ]

## 2) Collimata

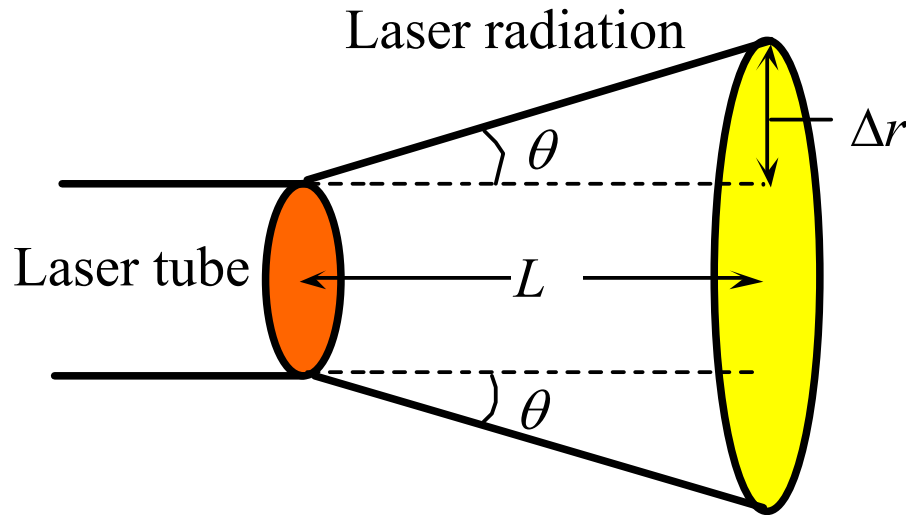
Il fascio laser è molto sottile e non si allarga apprezzabilmente (bassa divergenza)

Ciò perchè la cavità risonante amplifica solo quei fotoni che rimbalzano avanti e indietro fra gli specchi. I fotoni che si muovono in direzioni non perpendicolare agli specchi fuoriescono e non danno luogo ad amplificazione.

## 3) Coerente

Esiste una relazione di fase fra i differenti punti del fascio laser. Tale relazione si conserva nel tempo (coerenza temporale) e nello spazio (coerenza spaziale).

# Divergenza di un fascio laser



The output laser beam has a divergence characterized by the angle  $2\theta$  (highly exaggerated in the figure)

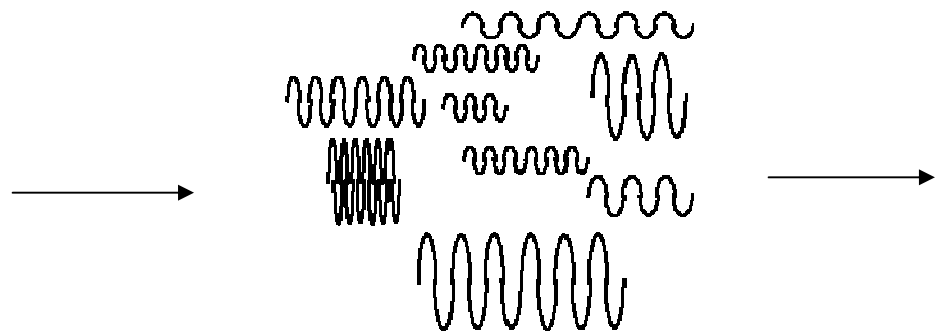


# Luce incoerente e coerente

## emissione incoerente

i vari fotoni del fascio luminoso vengono emessi casualmente, in tempi diversi e con fasi diverse

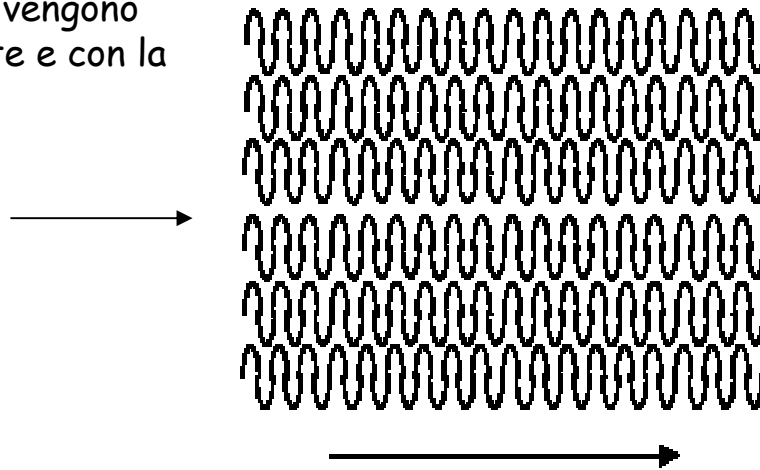
es: emissione di una lampada ad incandescenza o di un tubo fluorescente



A TRAIN OF INCOHERENT PHOTONS

## emissione coerente

i vari fotoni del fascio vengono emessi simultaneamente e con la stessa fase



**coerenza spaziale:** le onde hanno la stessa fase in tutti i punti della sezione del fascio

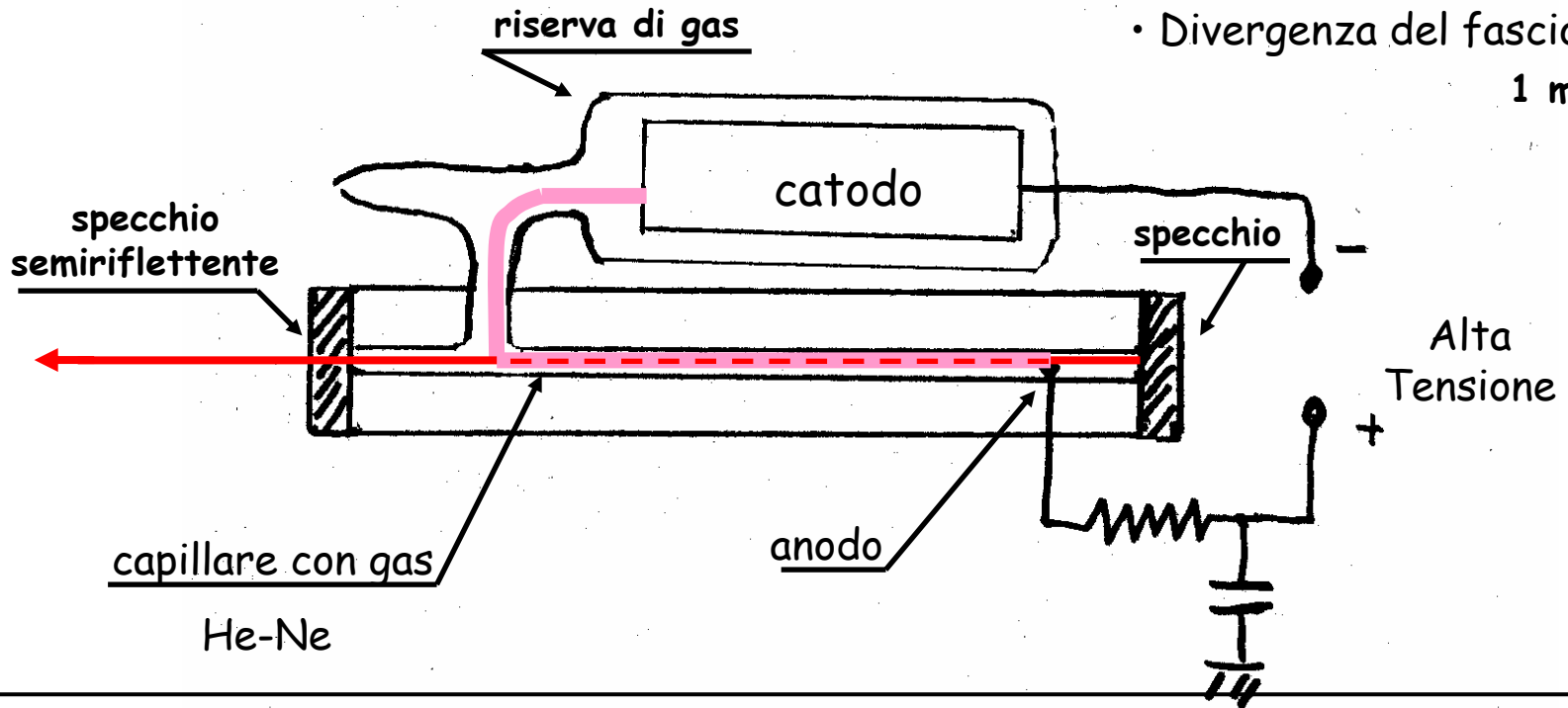
**coerenza temporale:** le onde conservano la stessa fase nel tempo

# Caratteristiche tipiche dei principali laser

tipo laser	HeNe	Ar	Rubino	NdYAG	CO <sub>2</sub>	AlGaAs InGaAs
materiale attivo	gas	gas	solido	solido (granato)	gas	semiconduttore
lunghezza d'onda (nm)	632,8	488-514,5	694,3	1064	10600	800-1500
durata impulso	cw	cw	350 µs	cw	cw	cw
potenza ottica	5 mW	20 W	1 J	100 W	100-1000 W	100 mW
divergenza del fascio	1 mrad	1 mrad	5 mrad	5 mrad	5 mrad	20°
rendimento $\eta = \text{pot.ottica}/\text{pot. elettrica}$	0,05%	0.05%	0,1%	0,5%	10%	60%
tipo pompa	scarica elettrica	scarica elettrica	flash	flash	scarica elettrica	corrente nella giunzione
COSTO (euro)	1500	50000	30000	70000	100000	500

# Laser He-Ne

- $\lambda = 632,8 \text{ nm}$  (rosso)
- Potenza  $\approx 0,5 - 50 \text{ mW}$
- Divergenza del fascio  $\cong 1 \text{ mrad}$



Il gas è racchiuso dentro un tubo di quarzo, sigillato agli estremi da 2 specchi (cavità ottica).

Un impulso elettrico di 10 KV , applicato fra gli elettrodi, dà luogo ad una scarica elettrica attraverso il gas (pompaggio del mezzo attivo). Una corrente di 3-10 mA (dc) è sufficiente per mantenere la scarica.

Gli atomi di He (leggeri) sono eccitati per collisione dagli elettroni della scarica e trasferiscono la loro energia agli atomi di Ne. Questi si portano nello stato metastabile dando luogo ad inversione di popolazione e all'effetto laser.

