

# LASER

**Light Amplification by Stimulated  
Emission of Radiation**

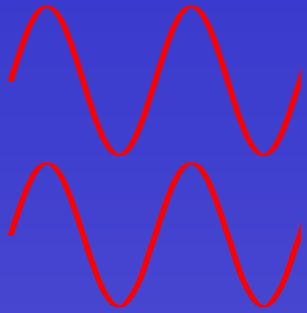
## La radiazione elettromagnetica

La luce è un'onda elettromagnetica, a cui è associata una **lunghezza d'onda** (distanza fra due picchi consecutivi) e un'**ampiezza** (altezza dei picchi)



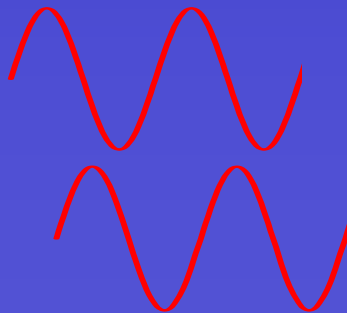
La luce trasporta un'energia che aumenta al diminuire della sua lunghezza d'onda

La luce può essere considerata come un insieme di corpuscoli, detti **fotoni**, ciascuno dei quali porta un “pacchetto d’onda”



### ONDE IN FASE

Due pacchetti d’onda sono in fase se la posizione dei loro picchi e delle loro valli coincide.

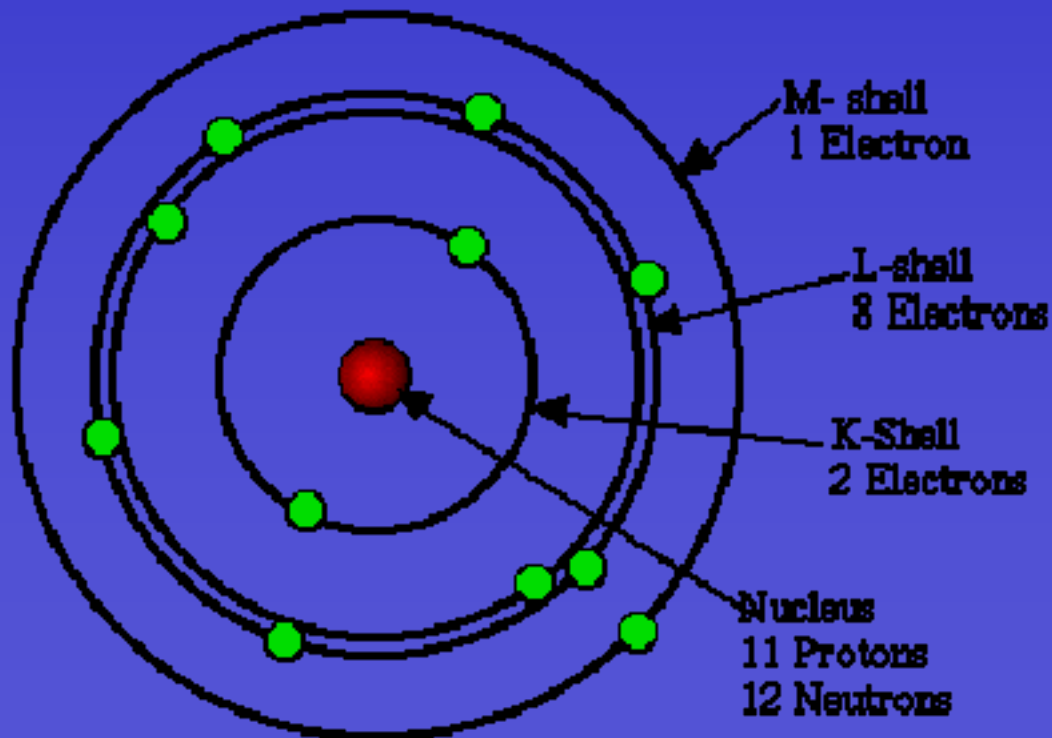


### ONDE FUORI FASE

Altrimenti essi sono *fuori fase*.

## Energia quantizzata

Gli atomi hanno livelli energetici quantizzati, cioè non possono assumere valori energetici continui ma solo valori discreti. Ciò corrisponde al fatto che gli elettroni orbitano intorno al nucleo su traiettorie a distanze fisse dal nucleo.



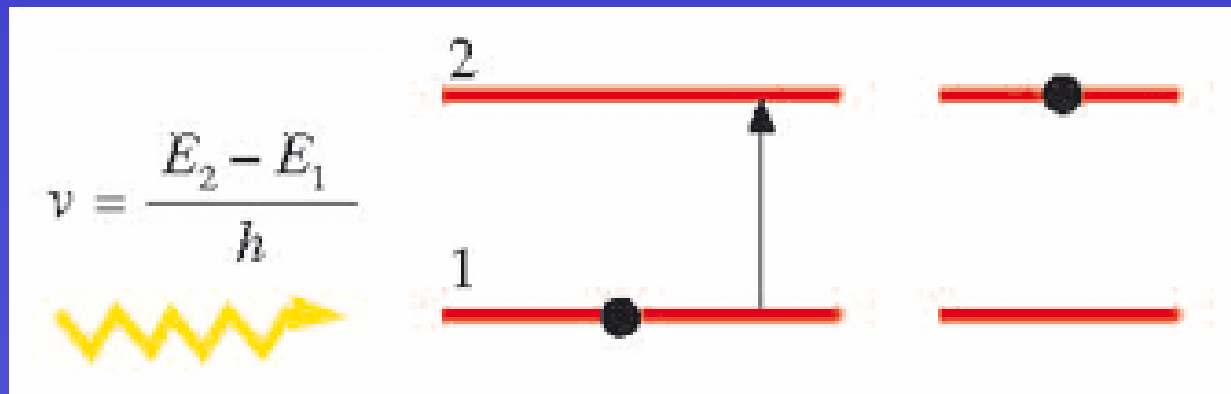
**The Bohr Picture of the Sodium (Na 11) Atom**

Il livello di energia più basso si chiama stato fondamentale ( $n=1$ ), i livelli superiori si indicano con  $n$  ( $n=1,2,\dots$ ) e rappresentano gli stati eccitati di un atomo.

## Sorgenti di luce: assorbimento ed eccitazione

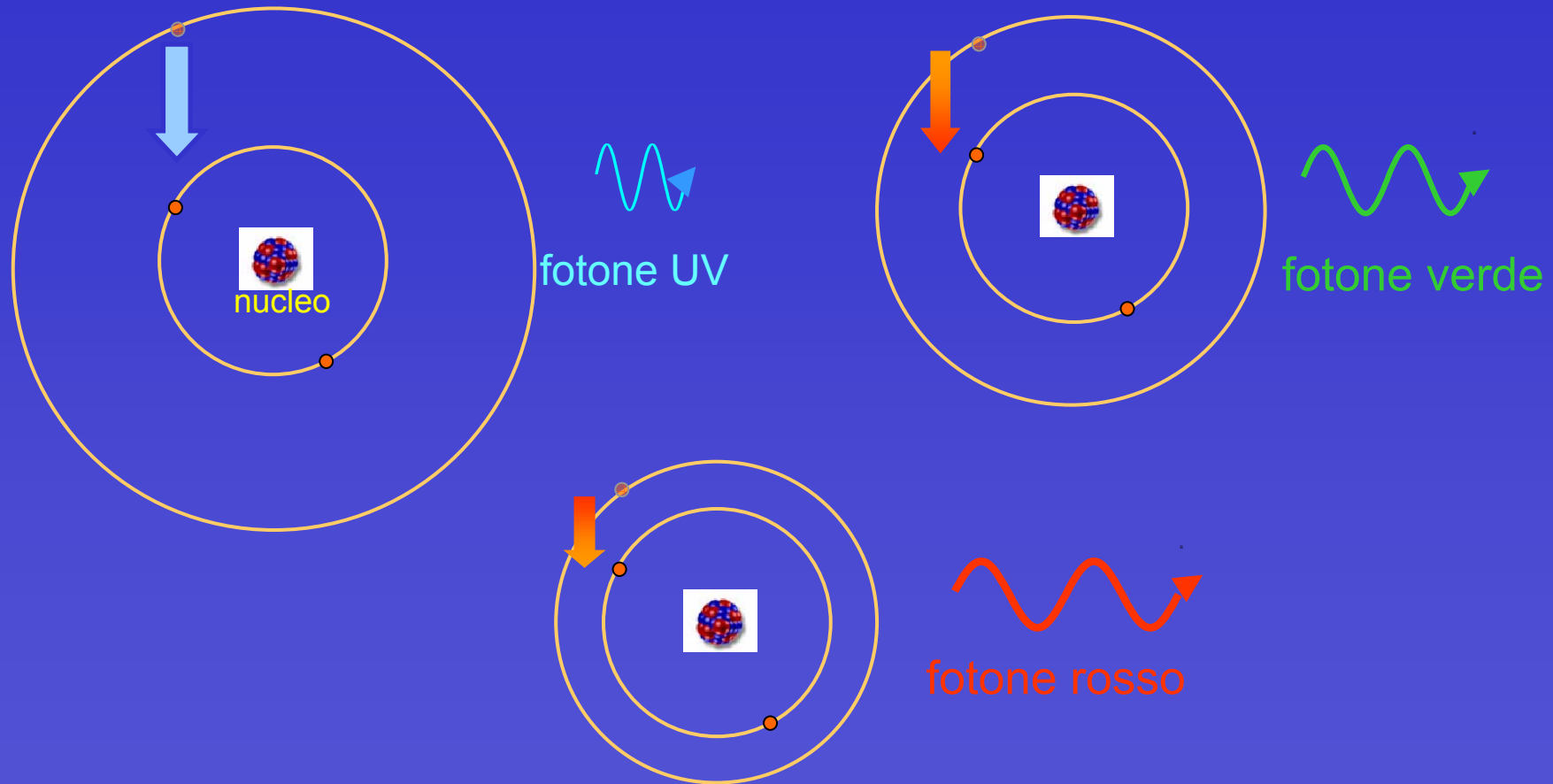
La produzione della luce visibile avviene all'interno degli atomi, che sono composti di un nucleo (di protoni e neutroni) e di elettroni che orbitano intorno ad esso.

L'assorbimento di un fotone eccita l'elettrone ad un livello di energia maggiore.



Se si fornisce energia all'atomo (assorbimento), un elettrone può "saltare" da un'orbita vicina al nucleo ad un'orbita più lontana. L'atomo diventa eccitato, ed ha più energia di prima.

# Emissione spontanea



Un atomo eccitato torna nello stato fondamentale *spontaneamente* dopo un certo tempo caratteristico, emettendo l'energia assorbita sotto forma di luce.

## Emissione spontanea

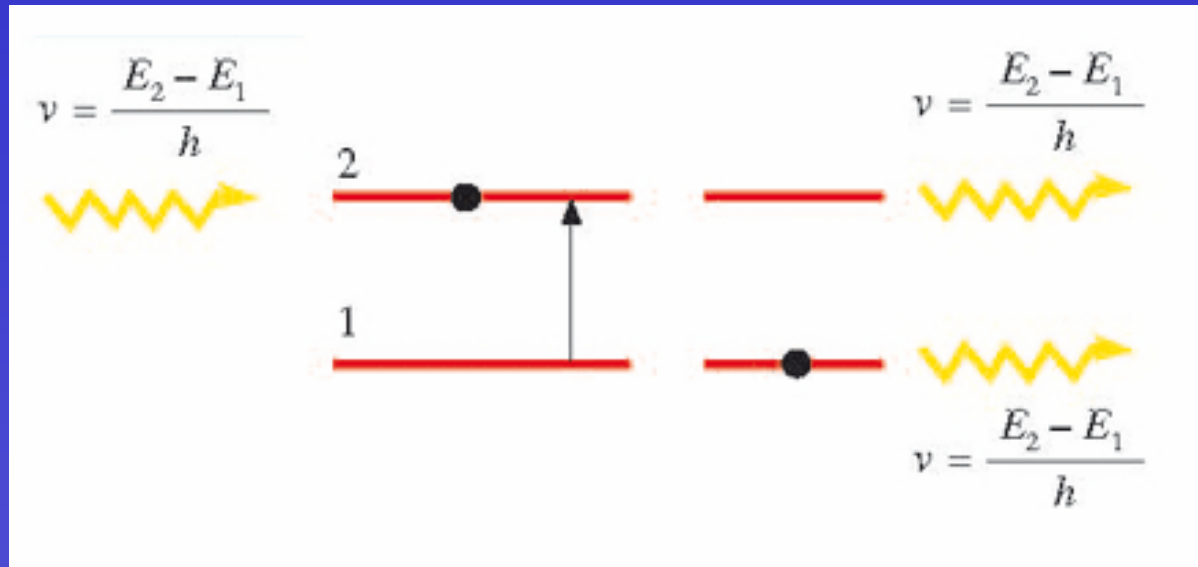
Questo processo avviene in maniera *casuale*: i fotoni vengono emessi *in tutte le direzioni* e le onde ad essi associate sono *sfasate* tra loro.

Ad esempio, in una lampadina la corrente scalda il filamento, portando i suoi atomi nello stato eccitato.

Successivamente essi si diseccitano emettendo luce.



## Emissione stimolata



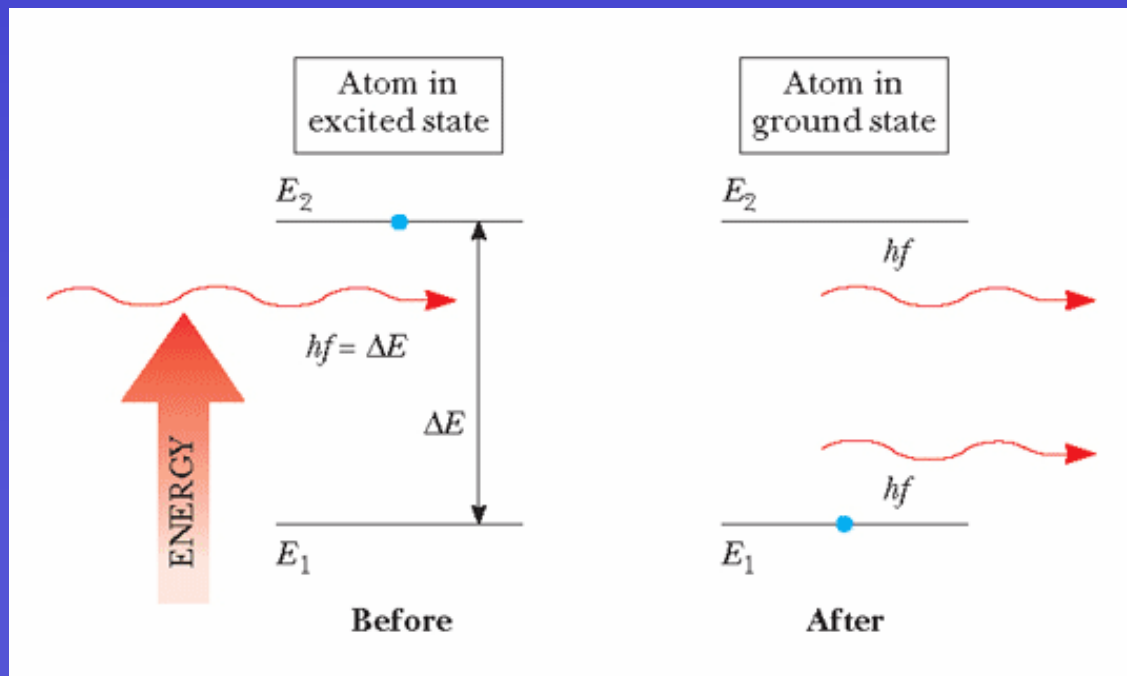
L'emissione stimolata consiste nella diseccitazione del livello eccitato mediante un fotone della stessa energia.

Si ottengono così due quanti di radiazione em identici, cioè coerenti (con la stessa fase) e con la stessa lunghezza d'onda e con la stessa direzione.

## Il laser

Il laser sfrutta il fenomeno dell'emissione stimolata, scoperto nel 1917 da Albert Einstein:

Se si ha una popolazione di atomi in uno stato eccitato ed essi vengono investiti da una radiazione di energia pari a quella di eccitazione, gli elettroni ricadranno immediatamente nell'orbita più bassa, emettendo un altro fotone della stessa energia, fase e direzione di quello incidente.



## Condizioni necessarie

Per far sì che l'emissione stimolata produca luce laser è necessario avere un'accumulazione di fotoni nello stato eccitato del sistema. Per ottenere questa accumulazione devono essere soddisfatte le 3 seguenti condizioni:

1. Inversione di popolazione;
2. Lo stato eccitato deve essere uno stato metastabile;
3. Il fotone emesso deve a sua volta stimolare altri fotoni del sistema e deve quindi essere confinato.

## 1. Inversione di popolazione

Gli atomi sono, di solito, nello stato fondamentale, quindi una radiazione incidente ha una probabilità maggiore di essere assorbita, piuttosto che di produrre emissione stimolata.

E' necessario, quindi, portare gran parte degli atomi in uno stato energetico superiore, lasciando quasi vuoto lo stato inferiore.

Questa condizione si chiama **INVERSIONE DI POPOLAZIONE**.

Un fotone incidente potrebbe provocare una “valanga” di elettroni stimolati, tutti perfettamente in accordo di fase. Tale onda stimolante continuerebbe ad aumentare di intensità mentre si propaga attraverso il **mezzo attivo**, purché possa essere mantenuta l'inversione di popolazione.

# 1. Inversione di popolazione

La condizione di inversione di popolazione si ha quando:

$$N_2 > N_1$$

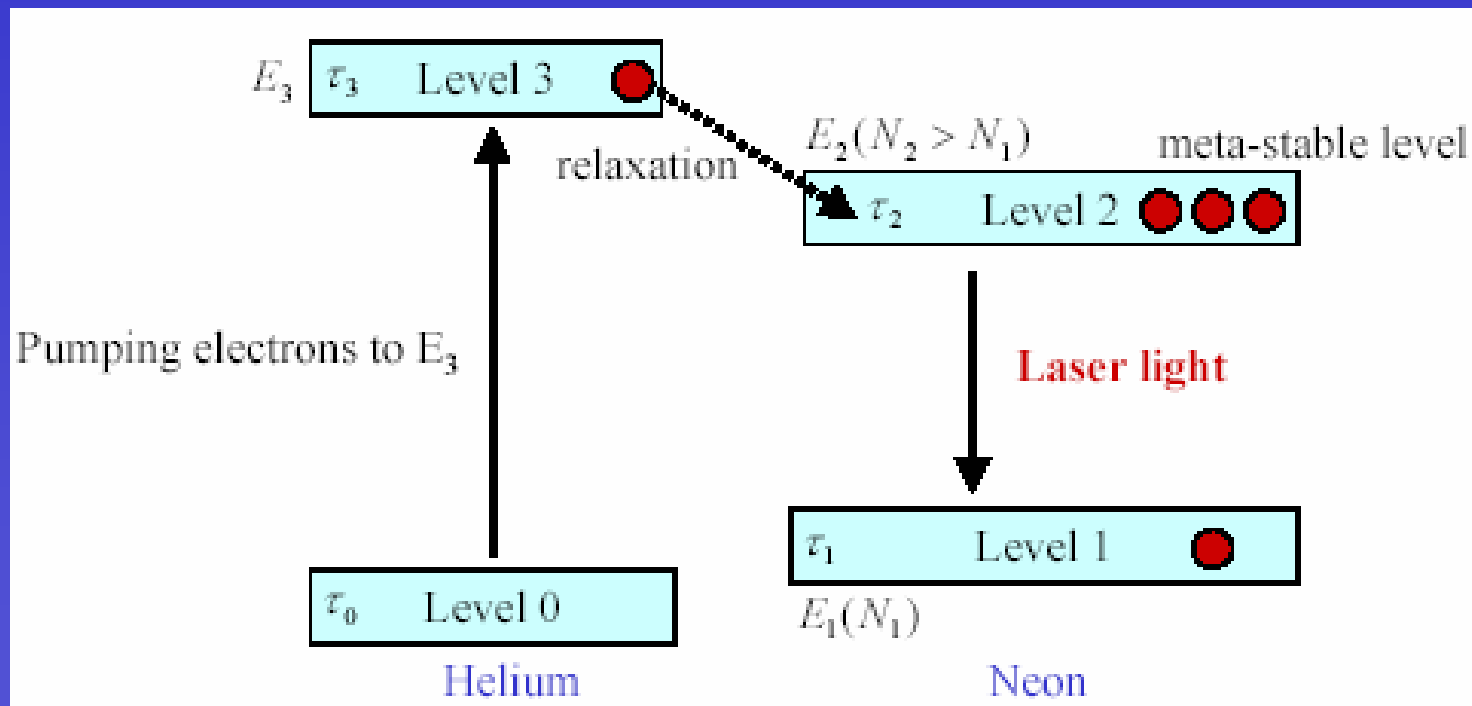
Cioè quando il n° di atomi nel mezzo attivo eccitati è maggiore del n° di atomi nello stato fondamentale.

In un laser a due livelli si può aver al più:  $N_2 = N_1$ , quindi non è un dispositivo vantaggioso.

Si realizzano allora laser a 3 o a 4 livelli.

## 2. Stato eccitato metastabile

Se lo stato eccitato è metastabile (cioè ha una vita media lunga paragonata all'usuale breve tempo degli stati eccitati che è  $\sim 10^{-8}$  s), allora l'emissione stimolata ha più probabilità di avvenire che l'emissione spontanea.



$T_2 > T_3$   
 $T_2$  lungo  
 $T_1$  breve

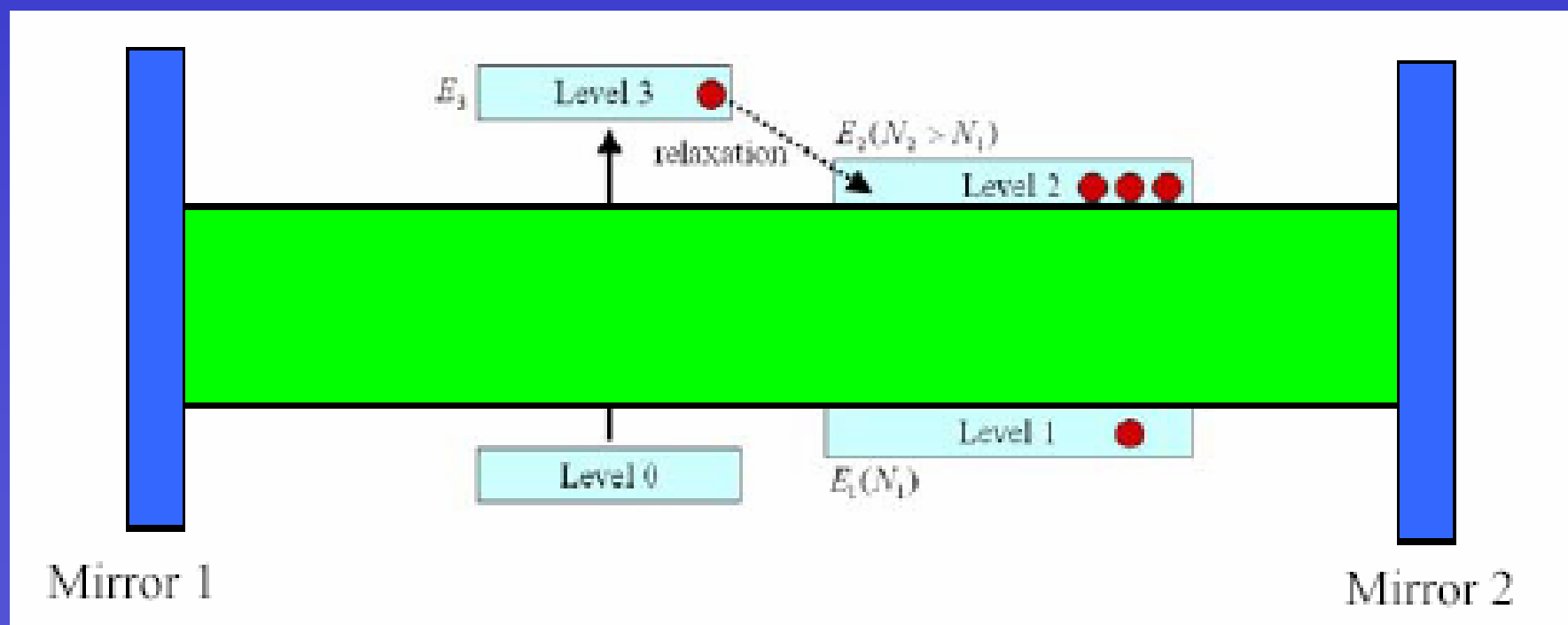


$N_2 > N_1$

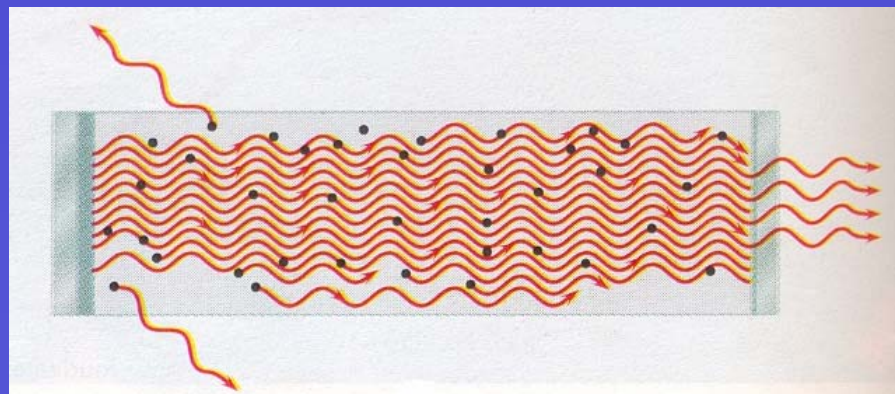
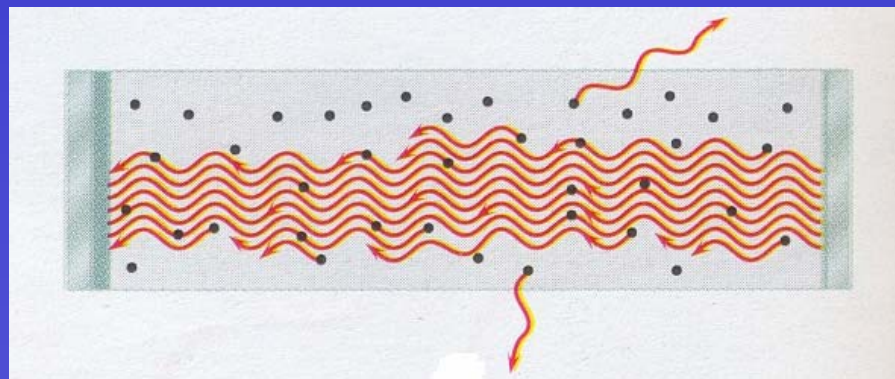
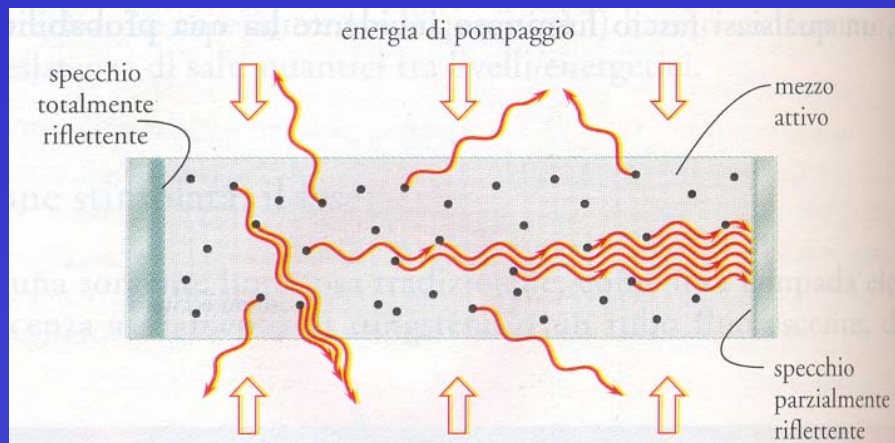
**inversione di popolazione**

### 3. Cavità risonante

Il processo si può promuovere ponendo il mezzo attivo tra due specchi, affinché l'onda luminosa, riflettendosi avanti e indietro, attraversi il mezzo più volte.



### 3. Cavità risonante

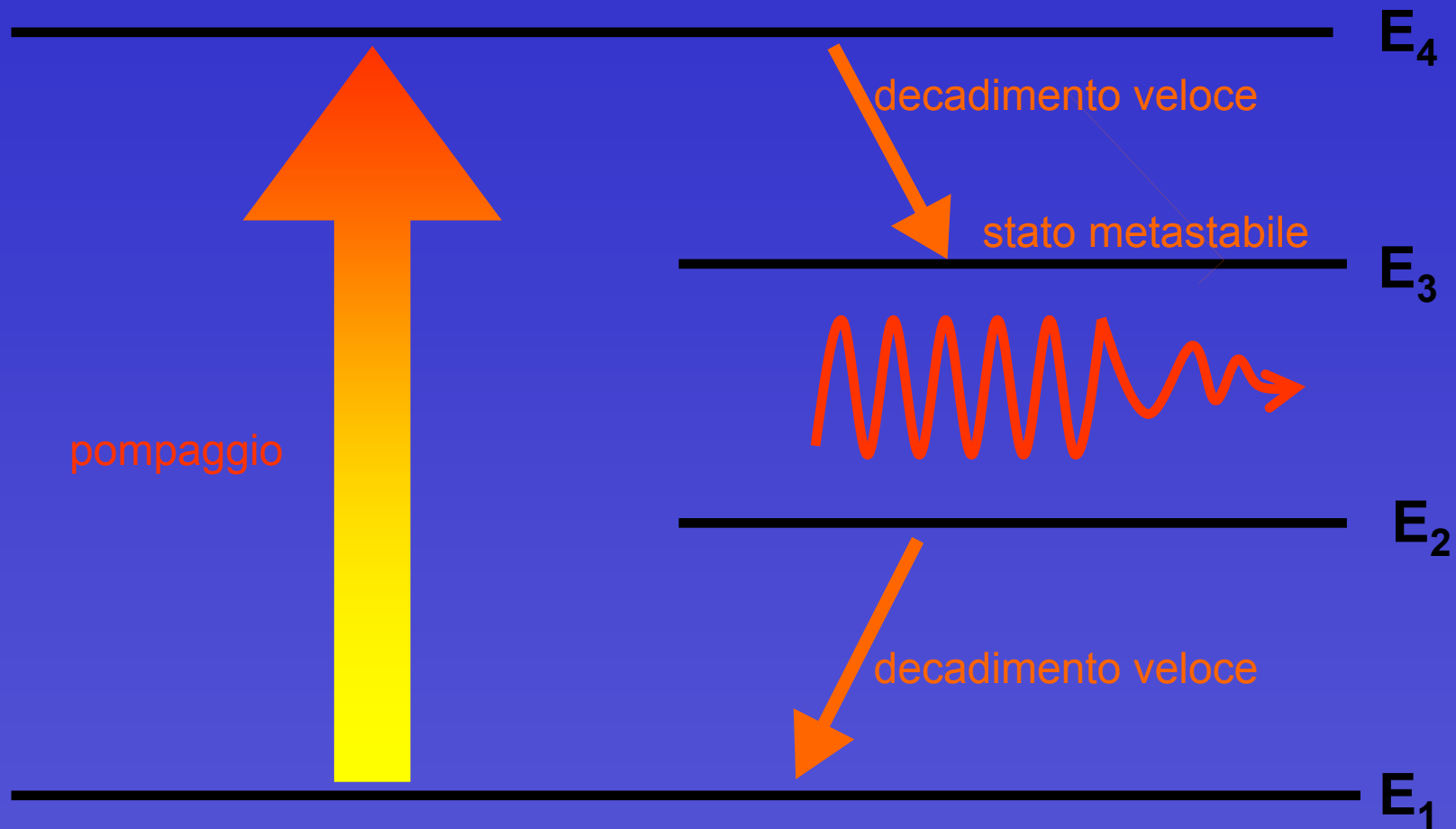


Uno degli specchi riflette la luce al 100%, l'altro al 99% per permettere alla luce di uscire, sotto forma di fascio laser.

I due specchi, che confinano i fotoni nella cavità, costituiscono una cavità risonante: si propagano solo quelle  $\lambda$  contenute esattamente nella cavità.

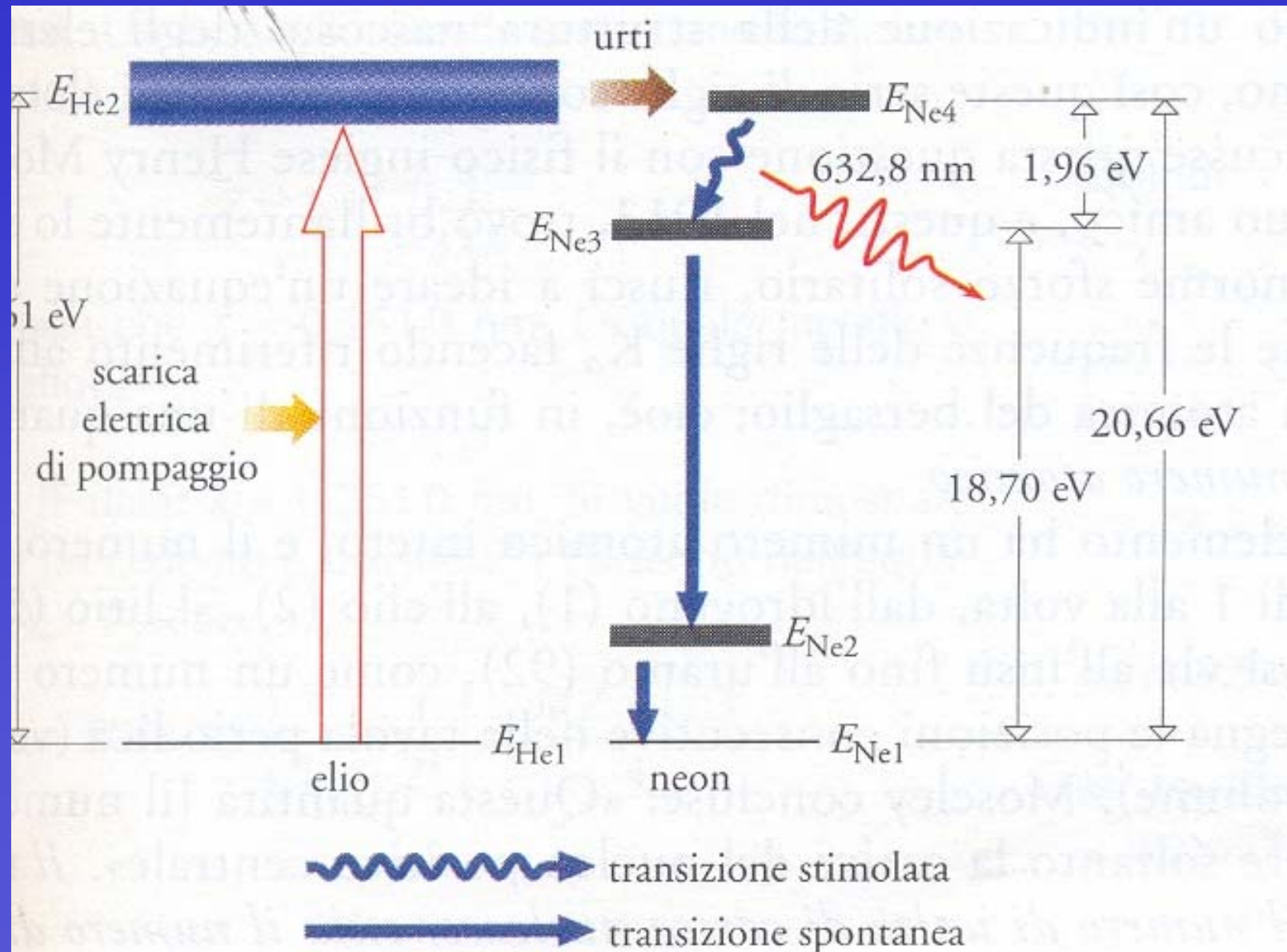
Inoltre, si propagano e si amplificano solo i fotoni diretti lungo l'asse della cavità.

## Laser a quattro livelli: schema generale



efficienza quantica: 
$$\frac{E_{3 \rightarrow 2}}{E_{1 \rightarrow 4}}$$

# Laser a quattro livelli: He-Ne



Il mezzo attivo è una miscela di gas costituita da Ne ed He racchiusa in un tubo di vetro chiuso agli estremi da specchi. Il pompaggio viene effettuato da una tensione applicata ai capi del tubo.

Tale corrente genera elettroni all'interno del tubo che urtano contro gli atomi di He, portandoli in uno stato eccitato  $E_{\text{He}2}$  da cui non sono permesse transizioni radiative.

Gli atomi di He eccitati urtano anelasticamente contro gli atomi di Ne allo stato fondamentale, e trasferiscono ad essi energia, trasportandoli in uno stato energetico  $E_{\text{Ne}4}$  longevo (metastabile).

Si ha quindi, nella popolazione di atomi di Ne, un'inversione di popolazione rispetto al livello  $E_{\text{Ne}3}$ .

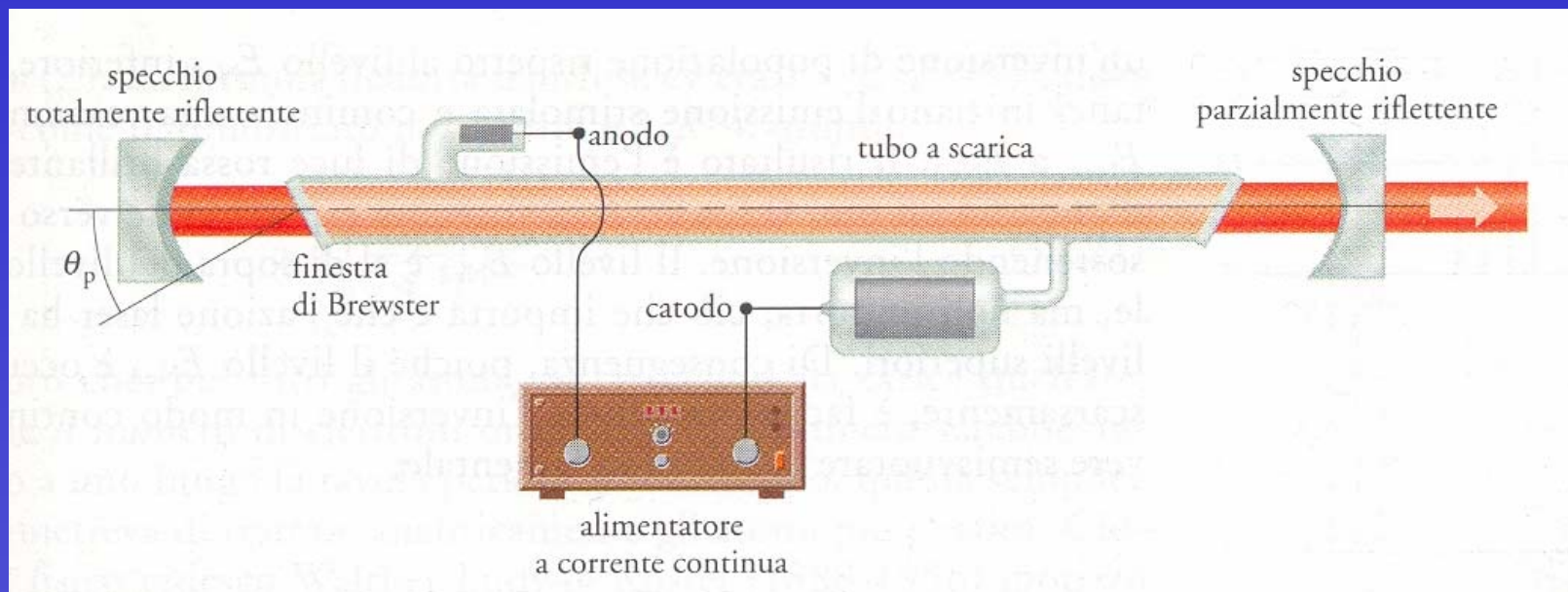
Fotoni spontanei iniziano allora il processo di emissione stimolata e comincia un processo di reazione a catena da  $E_{\text{Ne}4}$  a  $E_{\text{Ne}3}$ .

Il risultato è l'emissione di luce a 632.8 nm (rosso brillante).

Il livello  $E_{\text{Ne}3}$  si svuota rapidamente verso il livello  $E_{\text{Ne}2}$ , facendo così in modo che il livello 4 sia sempre più popolato del 3.

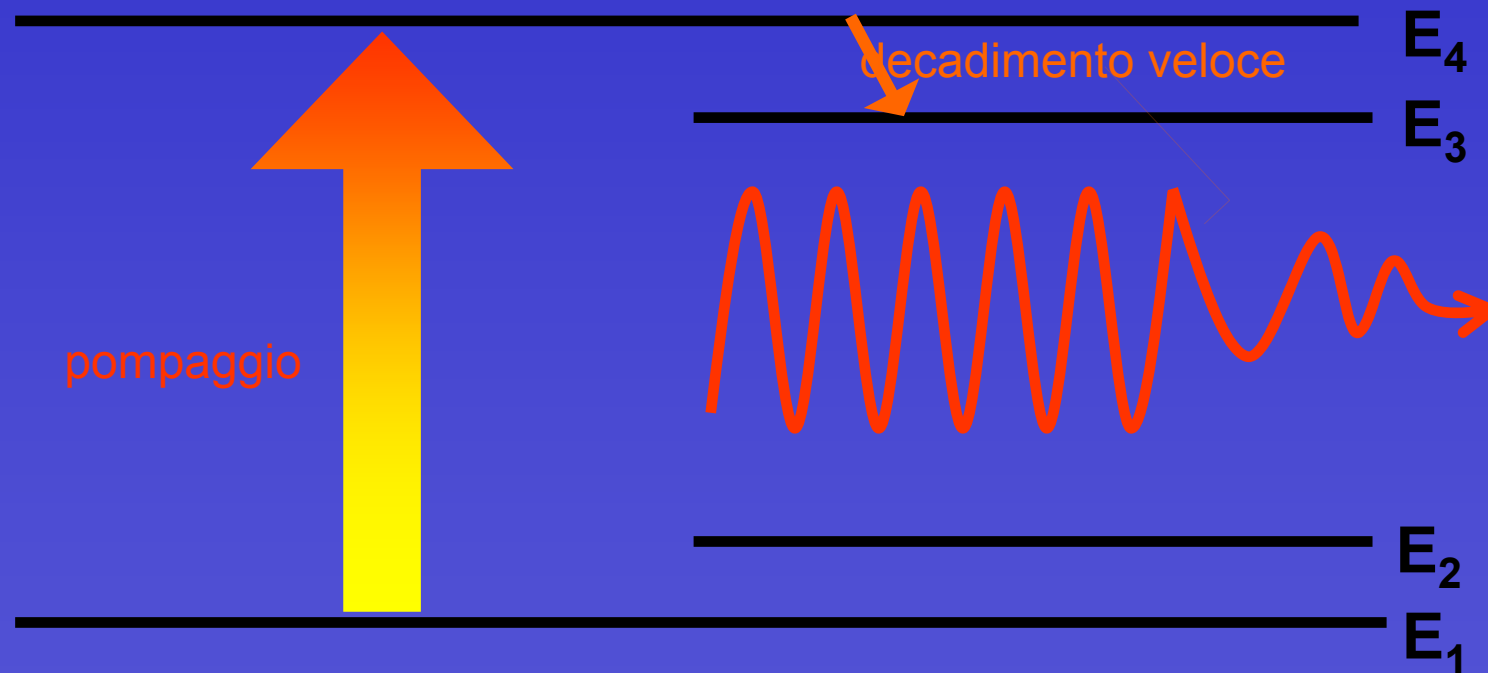


## Schema di un laser



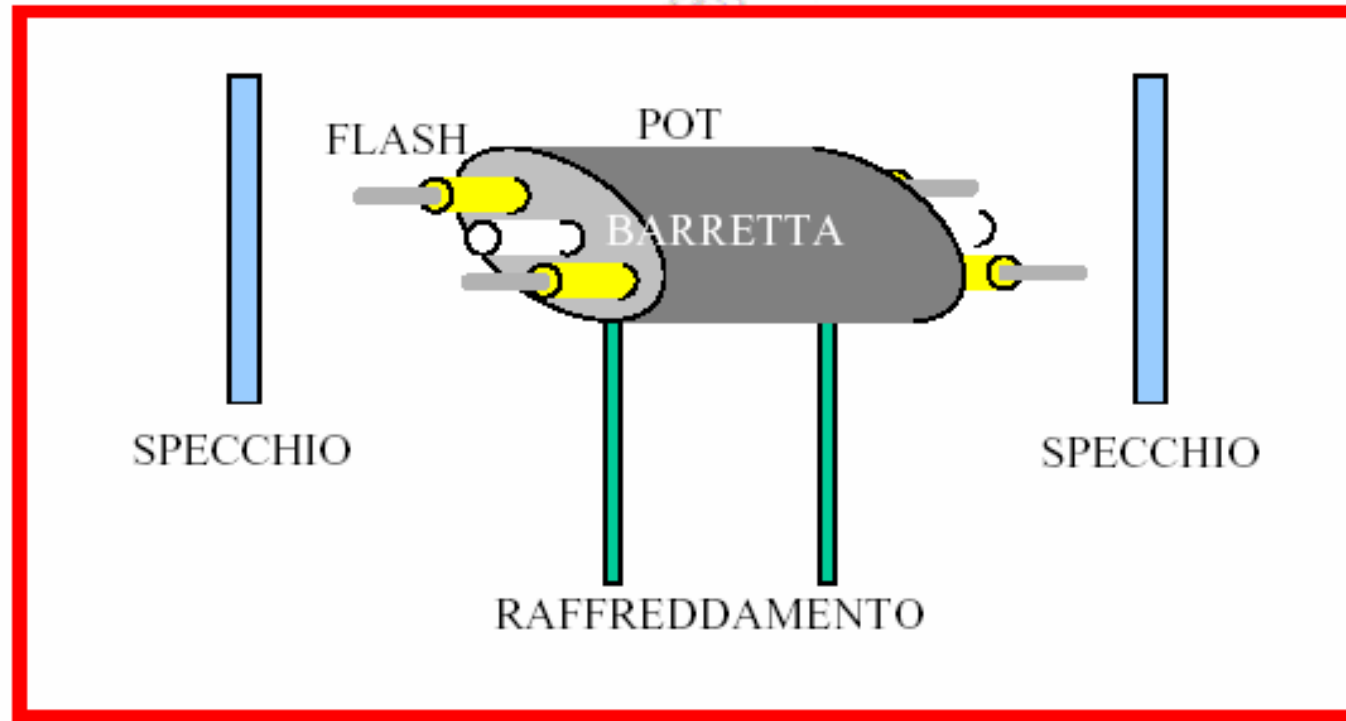
# 1. Laser a Stato Solido (es: Nd-YAG)

Il mezzo attivo è un cristallo (YAG) con delle impurità costituite da cristalli ( $\text{Nd}^{3+}$ ).









efficienza quantica:  $\frac{E_{3 \rightarrow 2}}{E_{1 \rightarrow 4}} \gg 1$  *molto efficiente*

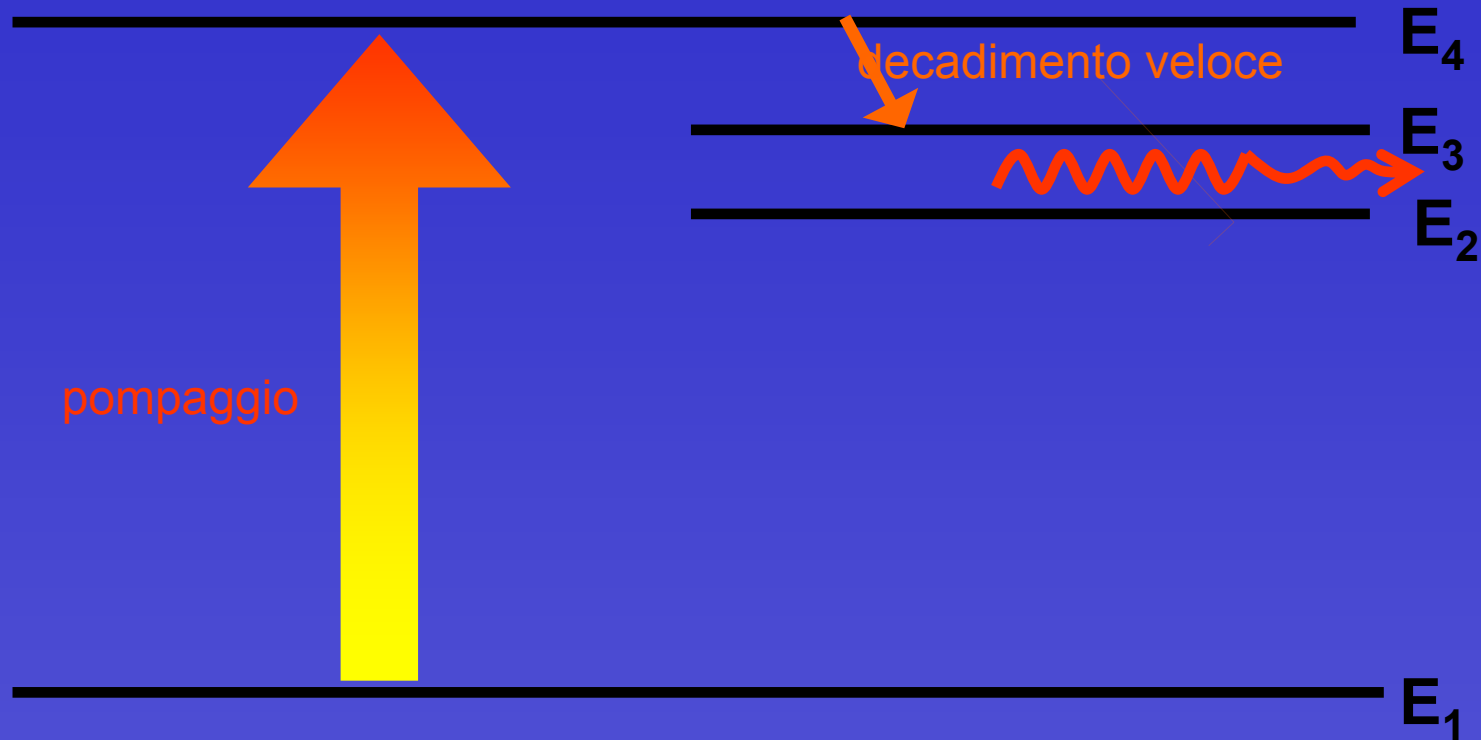
## ELEMENTI COSTITUTIVI DI UN LASER a STATO SOLIDO



## LASER A STATO SOLIDO

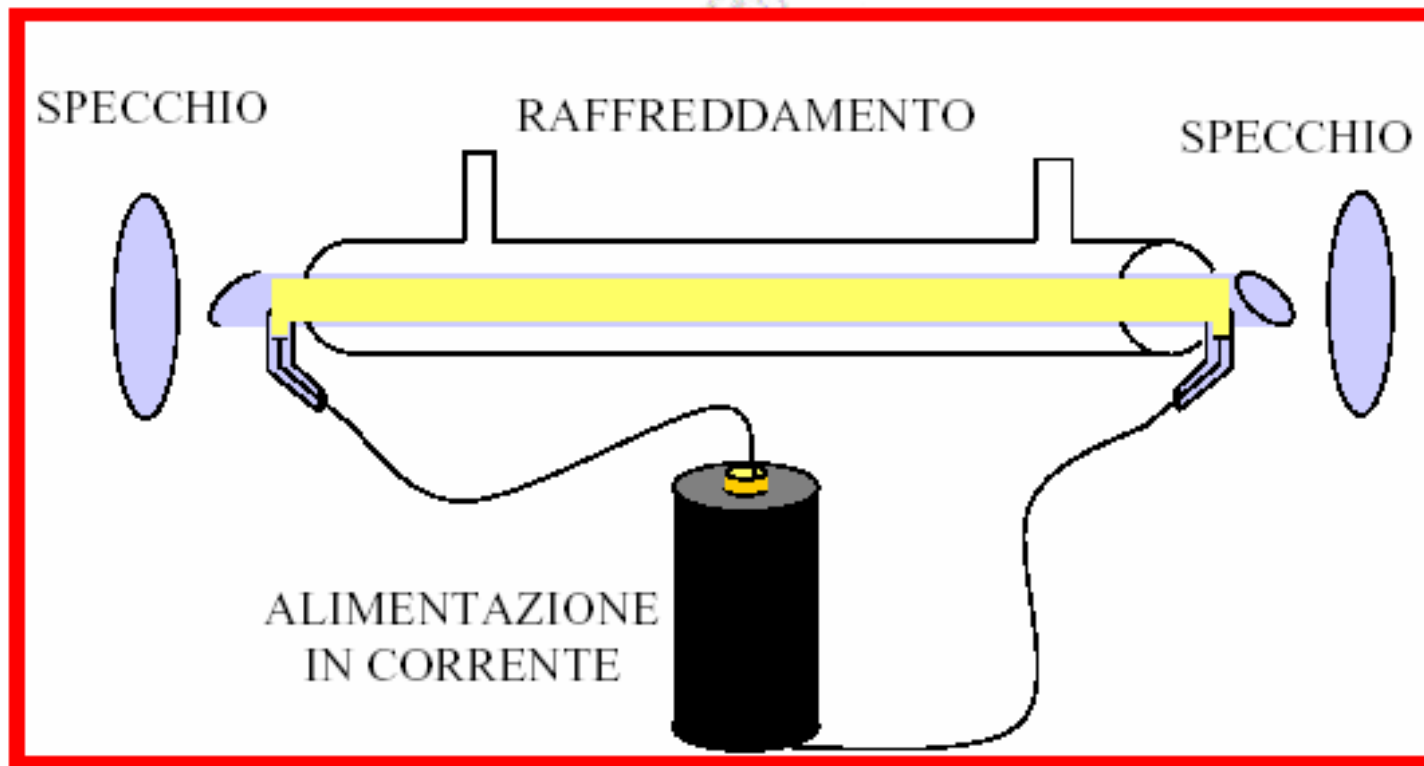
Cr <sup>3+</sup> in Rubino	emissione visibile: ROSSO ( $\lambda=692.8\text{nm}$ )	
Nd <sup>3+</sup> in Y.A.G. (Yttrium Aluminium Garnet)	emissione vicino IR: ( $\lambda=1064\text{ nm}$ )	
Nd in Vetro	emissione vicino IR: ( $\lambda=1064\text{ nm}$ )	
Cr <sup>4+</sup> in YAG	emissione vicino IR: ( $\lambda=1550\text{ nm}$ )	
Ti-ZAFFIRO	emissione vicino IR: ( $700<\lambda<1100\text{ nm}$ )	
<i>CENTRI DI COLORE</i>	emissione vicino IR: ( $1000<\lambda<1600\text{ nm}$ )	
<i>SEMICONDUTTORE</i>	emissione visibile-vicino IR: ( $\lambda= 670/785/1100/1300/1500\text{nm}$ )	

## 2. Laser ad Ar (gas inerte)









efficienza quantica:  $\frac{E_{3 \rightarrow 2}}{E_{1 \rightarrow 4}} \ll 1$  *poco efficiente*

## ELEMENTI COSTITUTIVI DI UN LASER a GAS



## LASER A STATO GASSOSO

He-Ne (Kr, Xe, ...)	emissioni selettive nel visibile/IR: ( $\lambda=632.8/1100$ nm)	
vapori di rame (Au, Pb, Ca, Sr, Mn)	emissione nel verde e nel giallo: ( $\lambda=510/578$ nm)	
Ar <sup>+</sup>	emissione visibile/UV: ( $\lambda=514.5/488/350$ nm)	
He-Cd (Sn, Pb, Zn, Se)	emissione visibile/UV: ( $\lambda=416/325$ nm)	
CO <sub>2</sub>	emissione lontano IR: ( $\lambda=10.64/9.6$ $\mu$ m)	
CO	emissione lontano IR: ( $\lambda=5.0$ $\mu$ m)	
N <sub>2</sub>	emissione UV: ( $\lambda=337$ nm)	
ECCIMERI (KrF, ArF, KrCl, XeC, XeF, ...)	emissione UV: ( $150<\lambda<400$ nm)	

eugenio.fazio@uniroma1.it

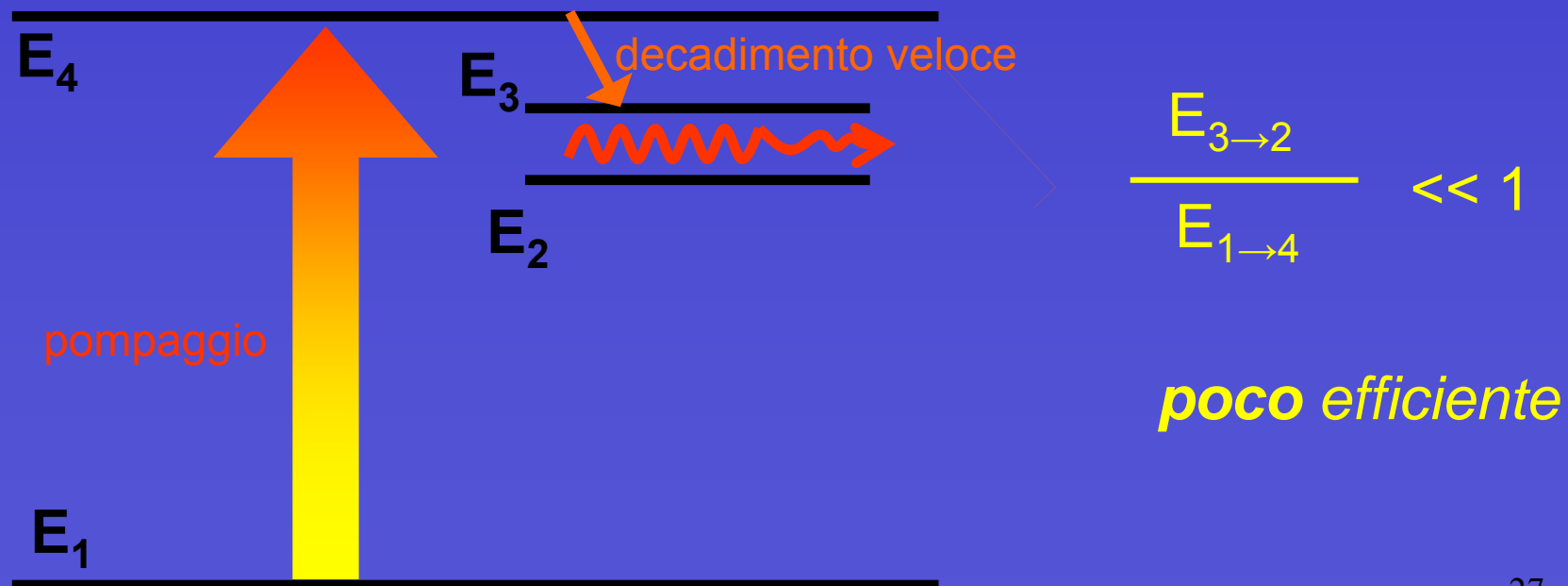
### 3. Laser a eccimeri (excited dymers)

Gli eccimeri sono molecole non esistenti in natura. Sono costituite da un atomo di un gas nobile eccitato più un atomo alogeno. Tali molecole esistono solo nello stato eccitato.

L'eccitazione viene prodotta da una scarica elettrica nel mezzo attivo (es: Xenon + fluoro).

Quando la molecola si diseccita emette radiazione laser.

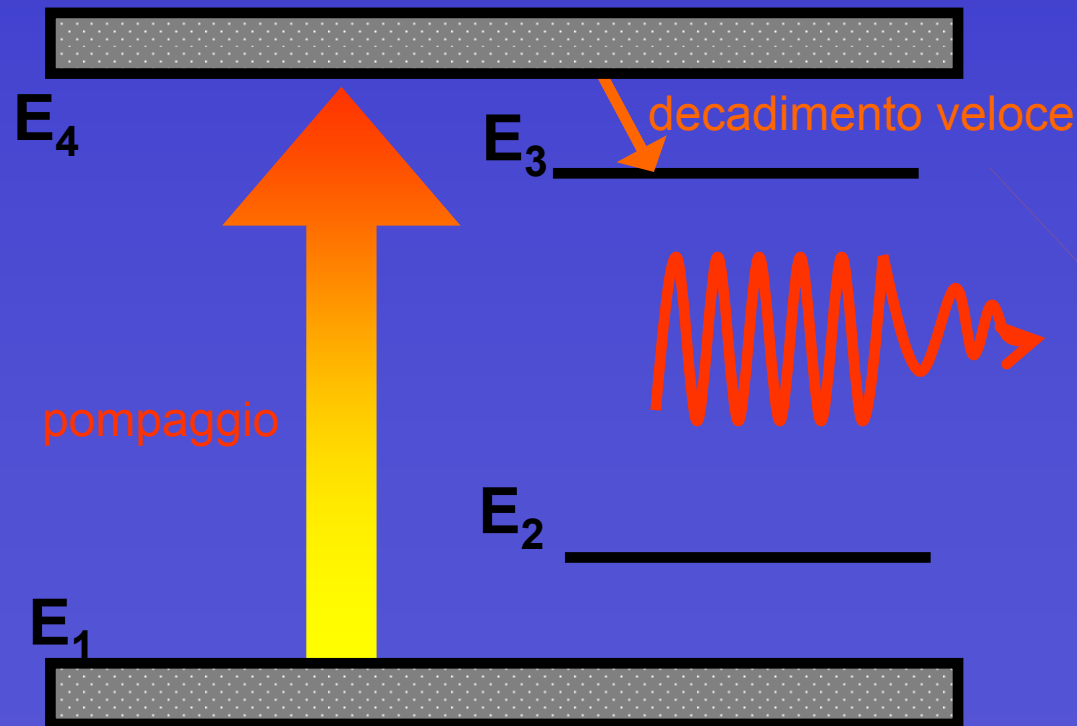
Vantaggio: emette radiazione a  $\lambda$  corte (150 – 300 nm).



## 4. Laser a diodi (excited dymers)

Sono caratterizzati da:

- Bande energetiche ( e non livelli);
- $\lambda$  da lontano IR ad UV
- pompaggio con corrente elettrica che attraversa la banda di conduzione

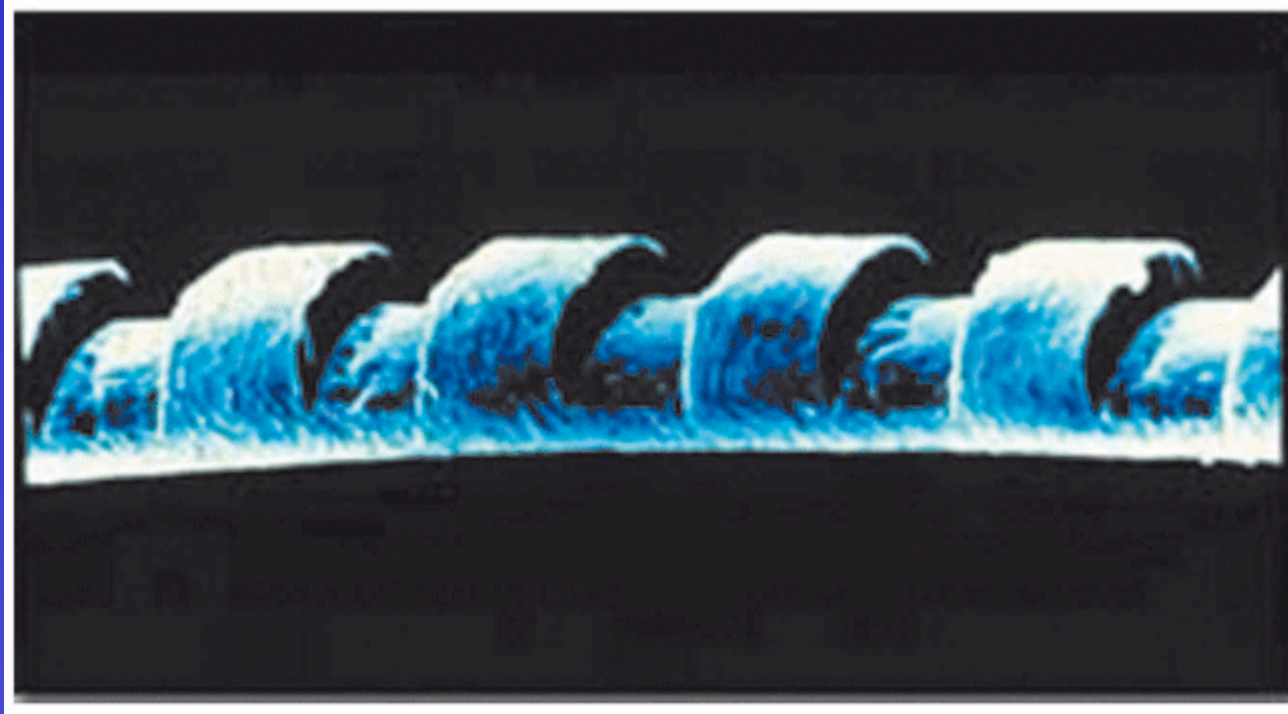


$$\frac{E_{3 \rightarrow 2}}{E_{1 \rightarrow 4}} \gg 1$$

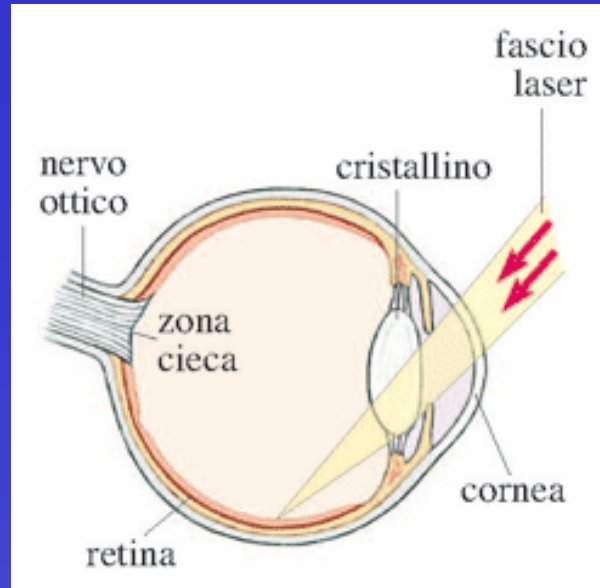
*molto efficiente*

## Tipi di luce laser

Tipi di laser	Mezzo attivo	$\lambda$ principale ( $\mu\text{m}$ )	Efficienza
Laser a Stato Solido	Rubino	0.6943	alta
	Nd <sup>3+</sup> :YAG	1.064	
	Fibre di silicio	1.55	
Laser a gas	He-Ne	0.6328	bassa
	Ar <sup>+</sup>	0.515	
Laser a eccimeri	KrF eccimeri	0.248	bassa
	ArF eccimeri	0.193	
Laser a stato solido		dall'IR all'UV	alta



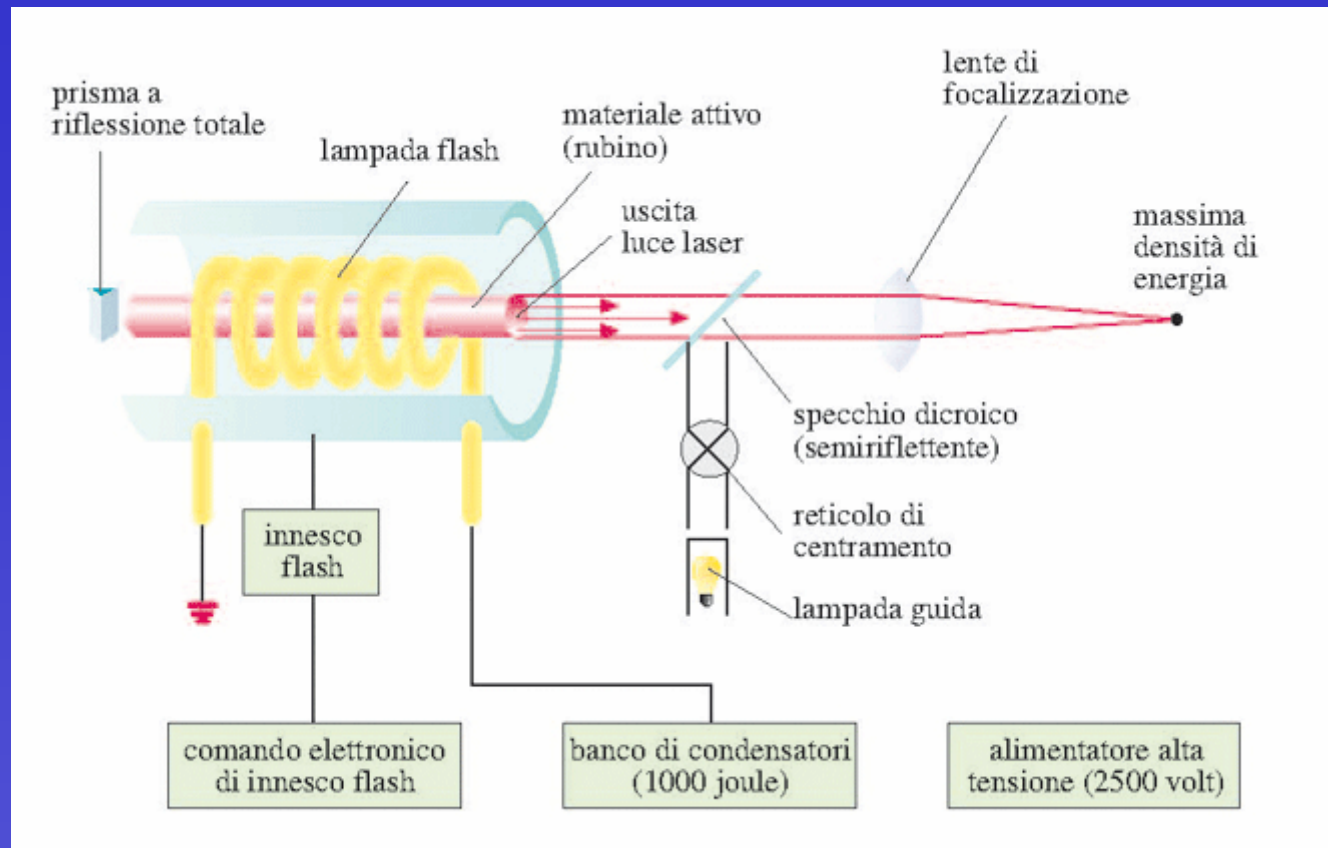
Con un laser ad eccimeri viene intagliato un capello umano.  
Osservare la precisione micrometrica delle ablazioni.



Un fascio laser è focalizzato sulla retina della cornea e dal cristallino in una piccola macchia luminosa dove fotocoagula un piccolo vaso o un capillare.

L'intervento deve essere eseguito con l'ausilio di un microscopio per l'operatore.

## Diagramma schematico di un dispositivo laser a rubino



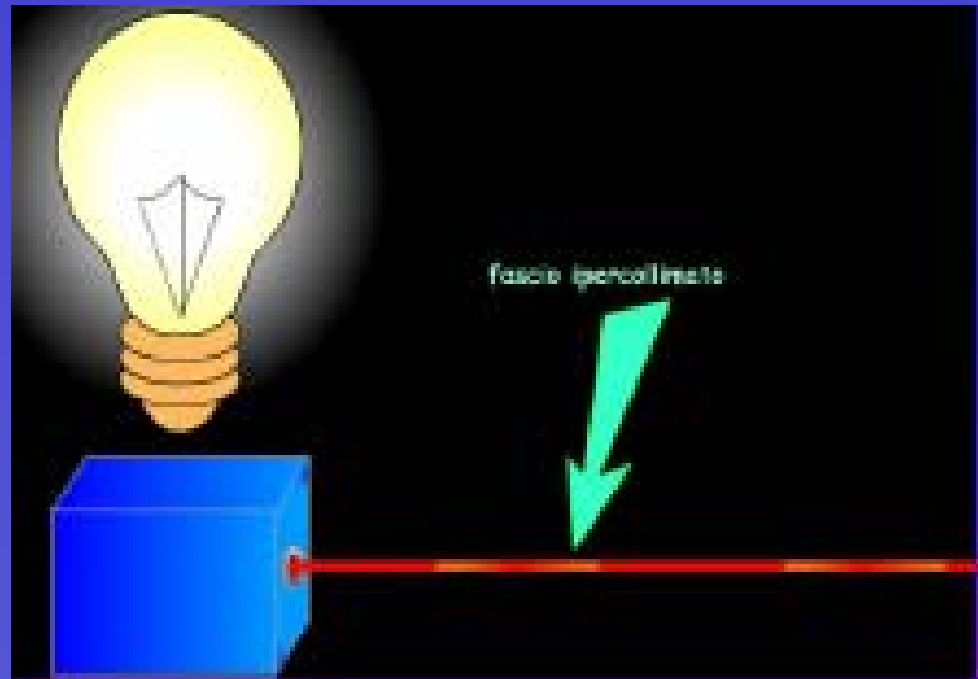
La lampada a flash, con inneschi successivi, eccita l'atomo di cromo nel cristallo di rubino e ne stimola l'emissione.

La riflessione tra il prisma e lo specchio semiriflettente ne amplificano l'emissione lungo l'asse del rubino.

## Proprietà della luce laser: Unidirezionalità

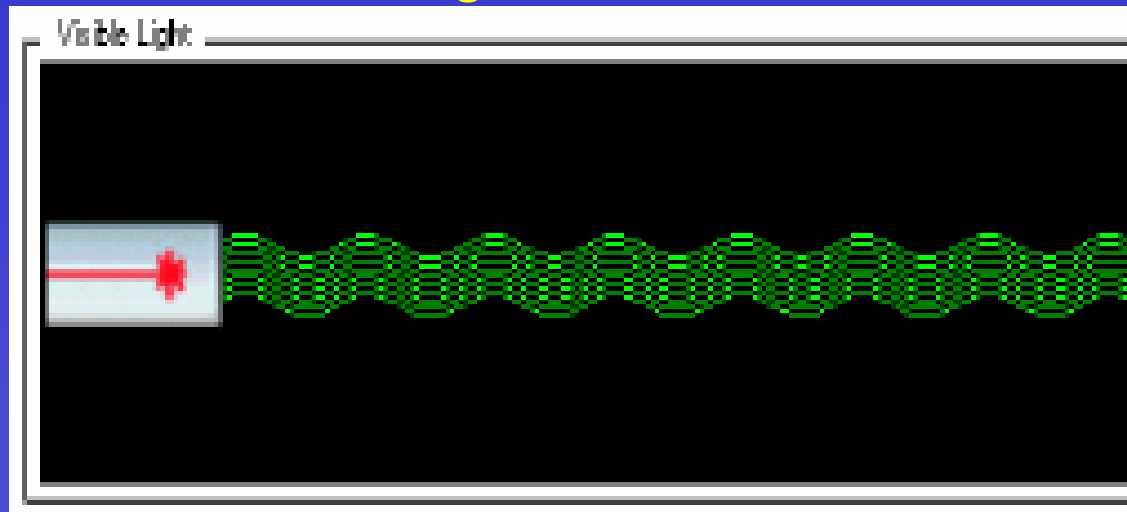
Un fascio laser a grande distanza diverge in maniera minima: un fascio verde di un laser ad Argo con sezione in partenza di un centimetro di diametro si allarga fino ad una sezione di tre centimetri di diametro dopo un percorso di 500 metri.

La luce Laser si propaga in una direzione ben definita, a differenza della luce di una normale lampadina a incandescenza che emette luce in tutte le direzioni.



## Proprietà della luce laser: Monocromaticità

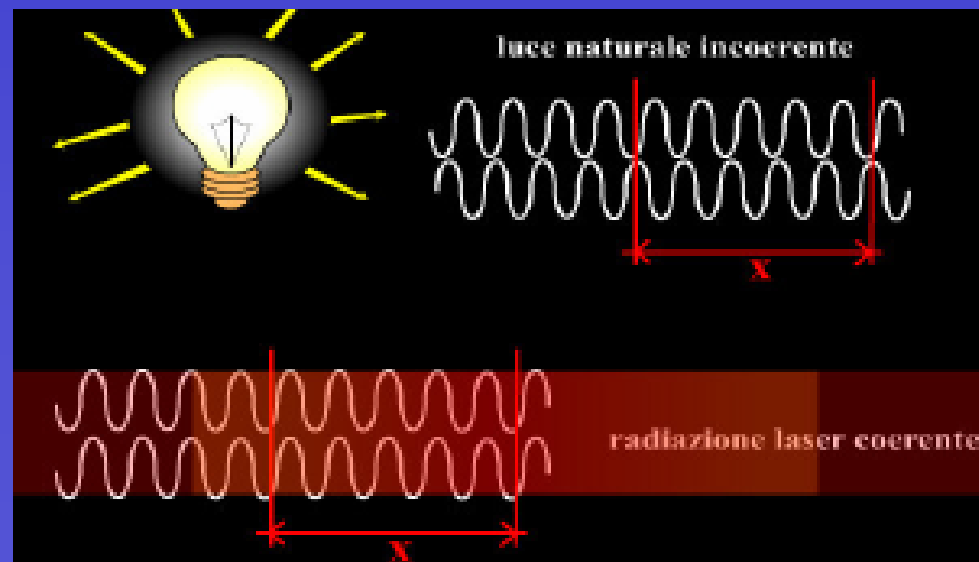
La radiazione laser presenta sempre una stessa frequenza mentre una lampadina a incandescenza emette radiazione composta da fotoni di energie differenti.



La monocromaticità è legata alla coerenza temporale ed è dovuta al meccanismo dell'emissione stimolata di radiazione da parte del materiale attivo che può essere solido (rubino, Nd-YAG, ecc.), gassoso (CO<sub>2</sub>, Argo) o liquido (laser a coloranti).

## Proprietà della luce laser: Coerenza

La proprietà di unidirezionalità dei fasci laser è legata alla coerenza spaziale ed è una conseguenza della struttura della cavità risonante del laser formata da due specchi paralleli che creano in uscita un fascio di fotoni con direzione esattamente perpendicolare alla loro superficie.





# Applicazioni dei laser

# Laser in oftalmologia

- Interazione **fotoablativa**: chirurgia refrattiva: laser ad eccimeri (ArFl,  $\lambda=193\text{nm}$ )
  - Interazione **fototermica**: trattamento del glaucoma cronico, retinopatia diabetica, profilassi del distacco retinico, malattie degenerative della macula: Ar ( $\lambda=514.4\text{nm}$ ), Kr ( $\lambda=647\text{nm}$ ), diodi ( $\lambda=780-840\text{nm}$ ), Nd:YAG 2w ( $\lambda=532\text{nm}$ )
- Interazione **fotomeccanica**: capsulotomia posteriore in cataratta secondaria; iridectomia in glaucoma ad angolo stretto: Q-switching Nd:YAG ( $\lambda=1064\text{nm}$ )
- Interazione **fotochimica**: trattamento delle membrane neovascolari nella degenerazione maculare legata all'età: diodi a emissione nel VIS con  $\lambda$  accoppiata ad uno specifico assorbitore.

# Interazione laser-tessuto

## **PROCESSO FOTOTERMICO:**

È DOVUTO ALL'AUMENTO DI TEMPERATURA CAUSATO DALL'ASSORBIMENTO DELLA RADIAZIONE. QUESTO È IL PROCESSO PIÙ FREQUENTE ED È IMPORTANTE SOPRATTUTTO PER ESPOSIZIONI DELL'ORDINE DEL MILLISECONDO O PIÙ LUNGHE. PER ESPOSIZIONI MOLTO LUNGHE E PER  $\lambda > 600$  nm (VERSO L'IR) È L'UNICO EFFETTO CHE DETERMINA IL DANNO.

## **PROCESSO FOTOCHIMICO:**

CONSISTE NELLA MODIFICAZIONE DELLE MOLECOLE DEL TESSUTO E/O NELLA PRODUZIONE DI NUOVE SOSTANZE A CAUSA DI REAZIONI CHIMICHE ATTIVATE DALLA RADIAZIONE. QUESTO PROCESSO È QUASI TOTALMENTE LIMITATO A  $\lambda < 600$  nm (verde-blu-UV) ED È IMPORTANTE SOPRATTUTTO PER ESPOSIZIONI DI ALCUNI SECONDI O PIÙ LUNGHE.

## **PROCESSO FOTOMECCANICO:**

È DOVUTO ALLA FORMAZIONE DI ONDE D'URTO CAUSATE DALLA RADIAZIONE E IN GRADO DI DANNEGGIARE IL TESSUTO. È IL PROCESSO PIÙ IMPORTANTE NEL CASO DI IMPULSI DI FORTE INTENSITÀ DI PICCO E DI BREVISSIMA DURATA (ps E fs).

## **PROCESSO FOTOABLATIVO:**

È UN PROCESSO MOLTO COMPLESSO CHE CAUSA LA RIMOZIONE ESPLOSIVA DI MATERIALE DAL TESSUTO IN SEGUITO ALL'IRRAGGIAMENTO. È IMPORTANTE SOPRATTUTTO NEL CASO DI IMPULSI DI ELEVATA POTENZA, SOPRATTUTTO NELL'UV. NELLA FOTOABLAZIONE LASER SONO PRESENTI IN VARIA MISURA PROCESSI FOTOTERMICI, FOTOCHIMICI E FOTOMECCANICI.

## **CHIRURGIA RIFRATTIVA**

AGISCE MODIFICANDO LA FORMA DELLA SUPERFICIE ANTERIORE DELL'OCCHIO IN MODO DA CORREGGERE IL DIFETTO DI FOCALIZZAZIONE (MIOPIA, IPERMETROPIA E/O ASTIGMATISMO).

USA IL LASER AD ECCIMERI (NELL'UV), CHE VAPORIZZA I TESSUTI ROMPENDONE I LEGAMI MOLECOLARI (**FOTOABLAZIONE**)

## **GLAUCOMA CRONICO (FOTOTERMICA)**

**ALT:** TRABECULOPLASTICA CON LASER AD ARGON, TRATTAMENTO DI ELEZIONE. SI USA DA 30 ANNI.

**SLT:** TECNICA PIÙ RECENTE. FORNISCE L'1% DELL'ENERGIA FORNITA DALLA ALT. SFRUTTA IL PRINCIPIO CHE **L'ENERGIA È ASSORBITA SOLO DALLE CELLULE PIGMENTATE, EVITANDO COSÌ IL DANNO TERMICO ALTRE CELLULE ADIACENTI.** TEORICAMENTE OFFRE I SEGUENTI VANTAGGI (DA CONFERMARE): PUÒ ESSERE EFFETTUATA PIÙ VOLTE (ANCHE DOPO FALLIMENTO DELLA ALT). OFFRE MAGGIOR SICUREZZA

## Laser ad Eccimeri - Tecnica LASIK

Il trattamento con il laser ad eccimeri (nell'UV) in questo caso non avviene sulla superficie della cornea, ma all'interno di essa. Perché ciò sia possibile è necessario praticare, prima del trattamento con il laser a eccimeri, una sottile incisione a lamella: a ciò provvede uno strumento meccanico, il microcheratomo.

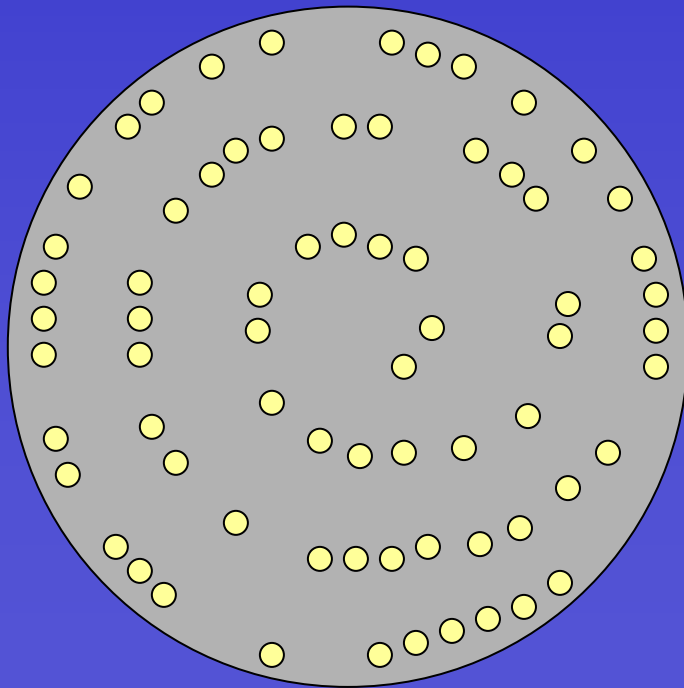
Si può paragonare questo intervento chirurgico alla apertura di un libro (azione di creazione della lamella corneale, o flap, da parte del microcheratomo), alla estrazione di alcuni fogli sottostanti alla copertina (azione del laser), e alla chiusura del libro (riposizionamento della lamella). In rari casi può rendersi necessario apporre alcuni punti di sutura temporanei.

Talvolta il taglio lamellare può essere ritenuto dal chirurgo qualitativamente non adeguato; in questo caso è universalmente ritenuto più opportuno riaprire la lamella e differire l'intervento di un tempo variabile a giudizio del chirurgo.



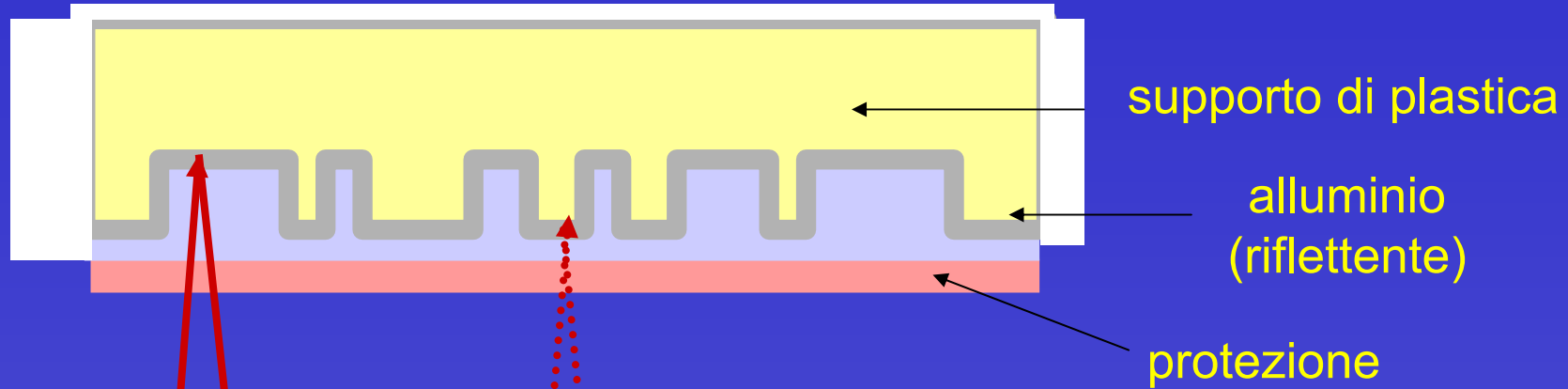
## Compact Disc e DVD

Un Compact Disc è formato da un materiale in cui, con un laser, vengono scavati dei minuscoli fori, disposti a spirale, che vengono poi ricoperti di un materiale riflettente.

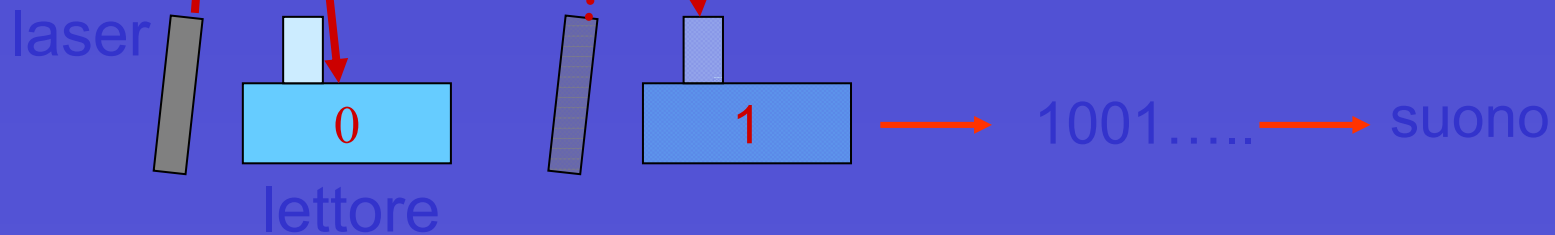


Si usa il laser perché può essere concentrato su dimensioni molto piccole (meno di un millesimo di millimetro), raggiungendo così energie molto elevate ed in grado di "bucare" il materiale

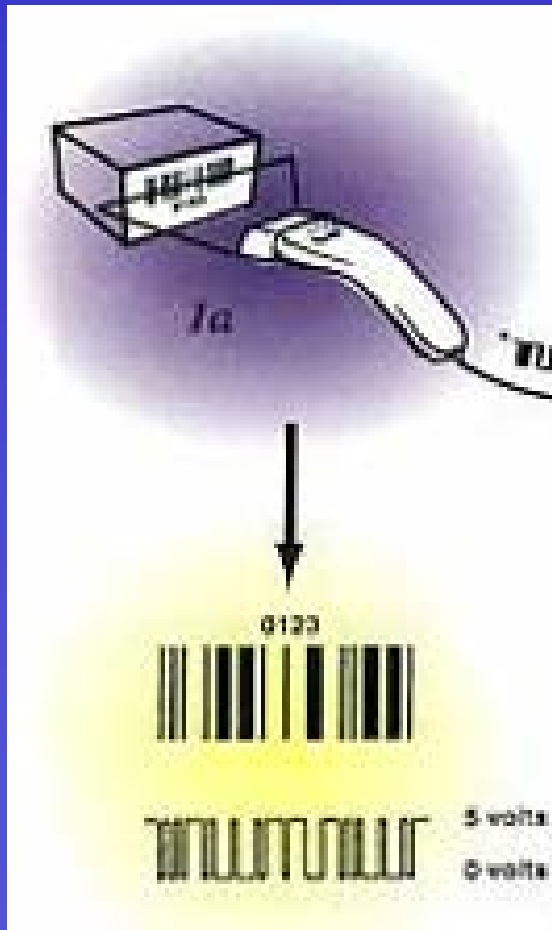
# Compact Disc e DVD



Un raggio laser colpisce il CD, e a seconda della zona che colpisce (buco o superficie) arriva o meno sul lettore



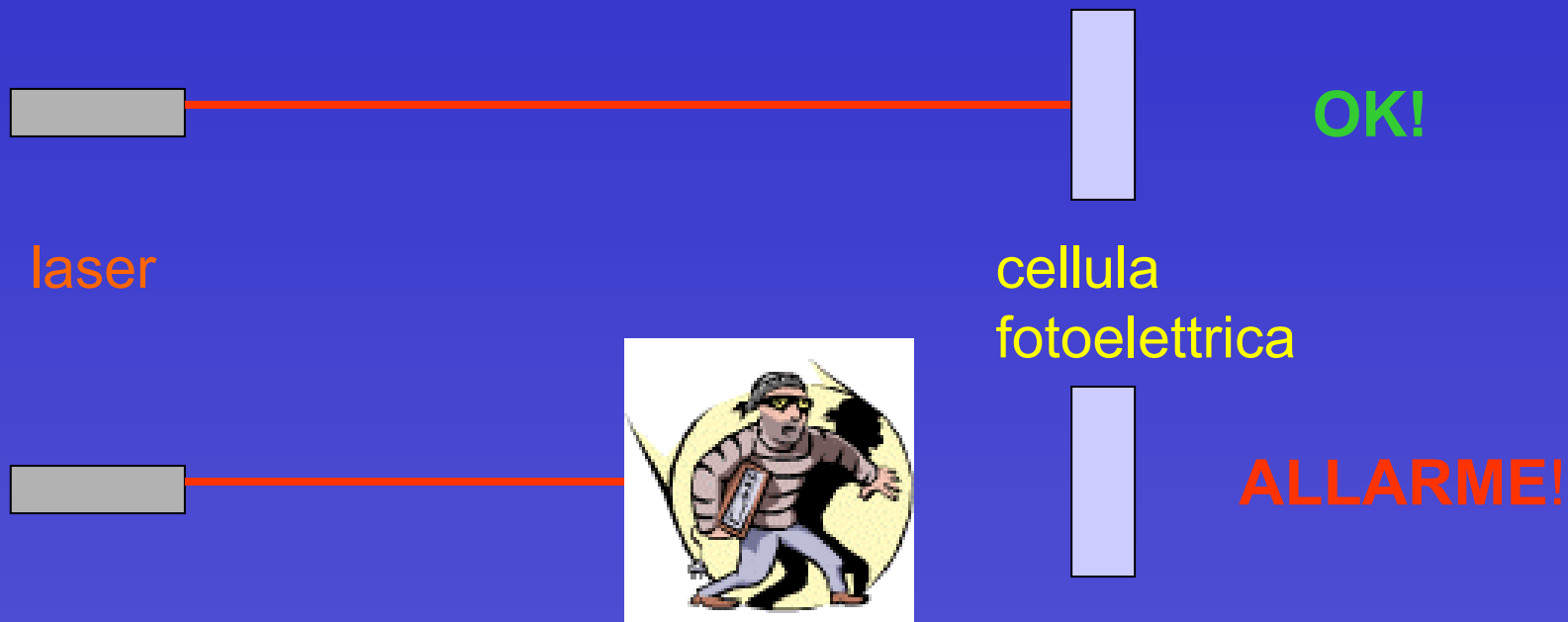
## Lettori di codici a barre



Funziona come il CD, solo che qui le parti non riflettenti e quelle riflettenti sono costituite dalle strisce nere e dallo sfondo bianco.

La sequenza di 1 e 0 corrisponde alle caratteristiche e al prezzo del prodotto.

## Cellule fotoelettriche



La cellula fotoelettrica rivela il fascio laser. Se il fascio viene interrotto da un intruso, scatta l'allarme

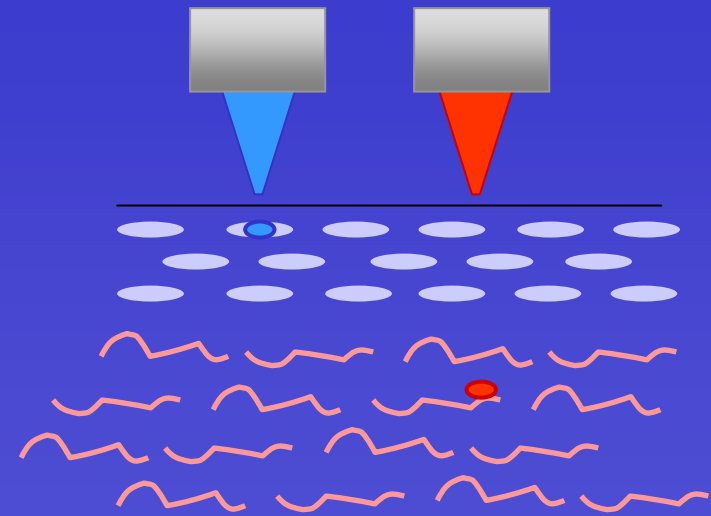
## Il laser in medicina

Può essere concentrato molto precisamente per colpire solo le zone d'interesse.

Trasmette calore alle cellule da cui la radiazione viene assorbita. Ad alta energia le vaporizza, e taglia i tessuti o distrugge le cellule. A bassa energia le fa coagulare.

Può essere trasportato con fibre ottiche e raggiungere zone interne senza tagliare i tessuti sovrastanti.

La radiazione laser agisce solo sul tipo di cellula che assorbe quella determinata lunghezza d'onda.



## Misurare le distanze con il laser

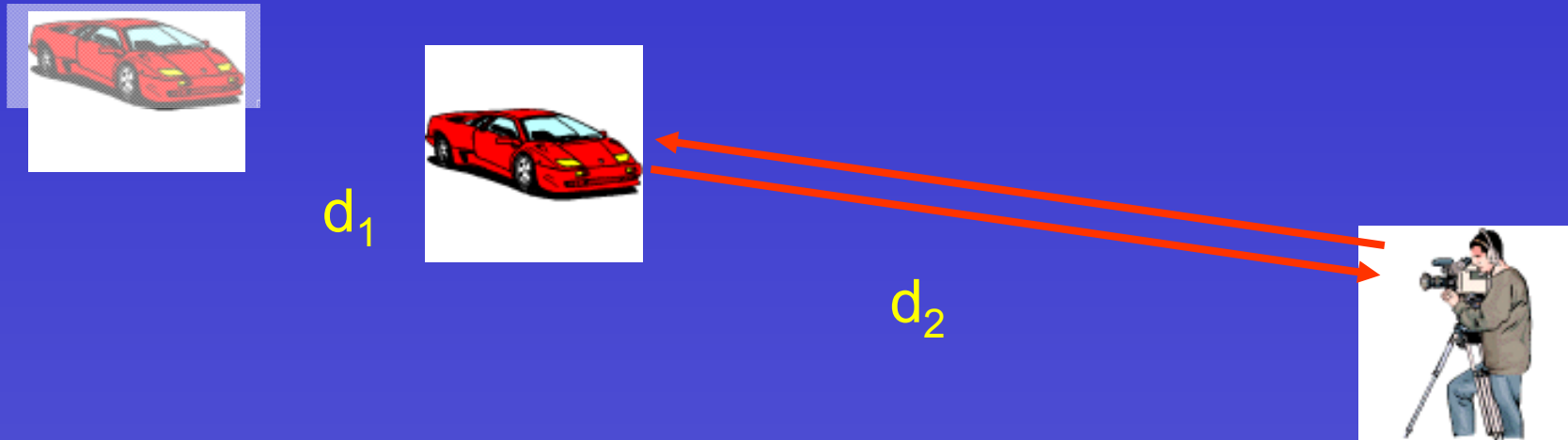
Un raggio laser viene inviato verso il bersaglio, da cui viene riflesso e rimandato indietro.



Misurando il tempo necessario a compiere il tragitto e conoscendo la velocità della luce, si calcola la distanza dell'oggetto.

## Misurare le distanze con il laser

L'autovelox misura la distanza di una macchina che si sta avvicinando in due istanti successivi



Se la distanza percorsa fra i due istanti è troppo elevata, cioè se la macchina sta andando troppo veloce, viene fatta una multa.rilevato l'eccesso di velocità.

## RIFERIMENTI:

1) PRINCIPI DI FISICA, Serwey e Jewett, Edises

2) FISICA 2, Hecht

Zanichelli

3) FISICA BIOMEDICA, Zingoni,

Zanichelli

4) FISICA BIOMEDICA, Scannicchio

Edises

5) Wikipedia