



UNIVERSITA' DI NAPOLI
"FEDERICO II"

INTRODUZIONE AI LASER

Carlo Altucci

LASER

Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

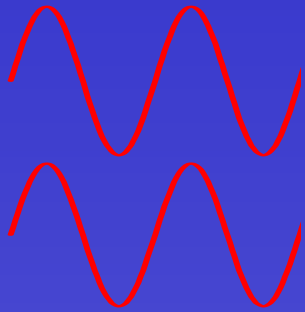
La radiazione elettromagnetica

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)



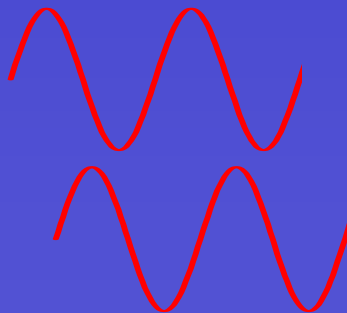
La luce trasporta un'energia che
aumenta al diminuire della sua lunghezza d'onda

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.

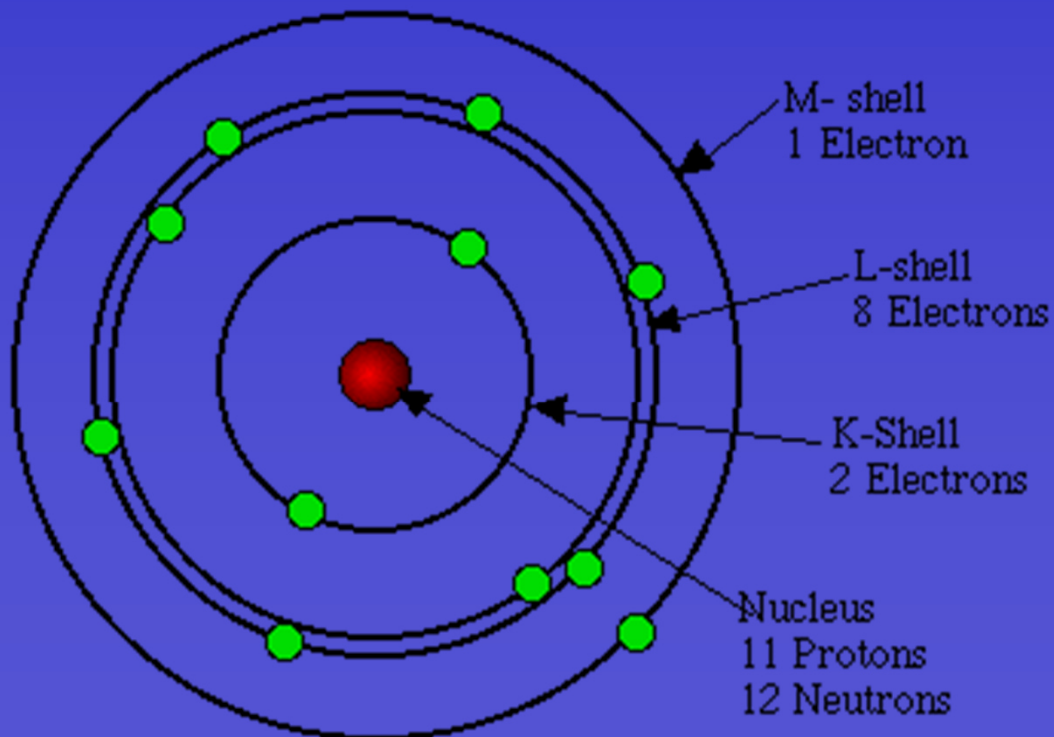


ONDE FUORI FASE

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.

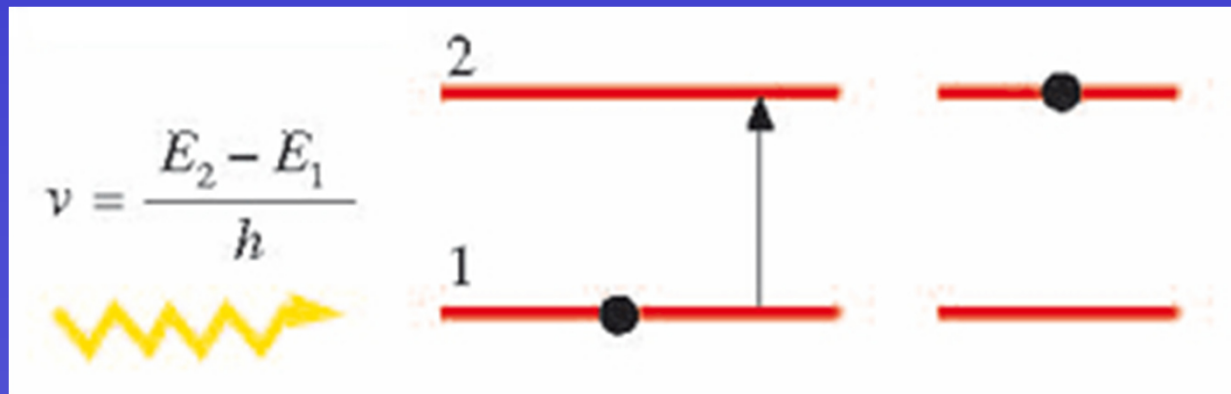


Il livello di energia più basso si chiama stato fondamentale ($n=1$), i livelli superiori si indicano con n ($n=1,2,\dots$) e rappresentano gli stati eccitati di un atomo.

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.

Legge di Lambert-Beer

$$\begin{aligned} I(x + dx) &= I(x) + \gamma I(x) dx \\ &= I(x) + dI \end{aligned}$$

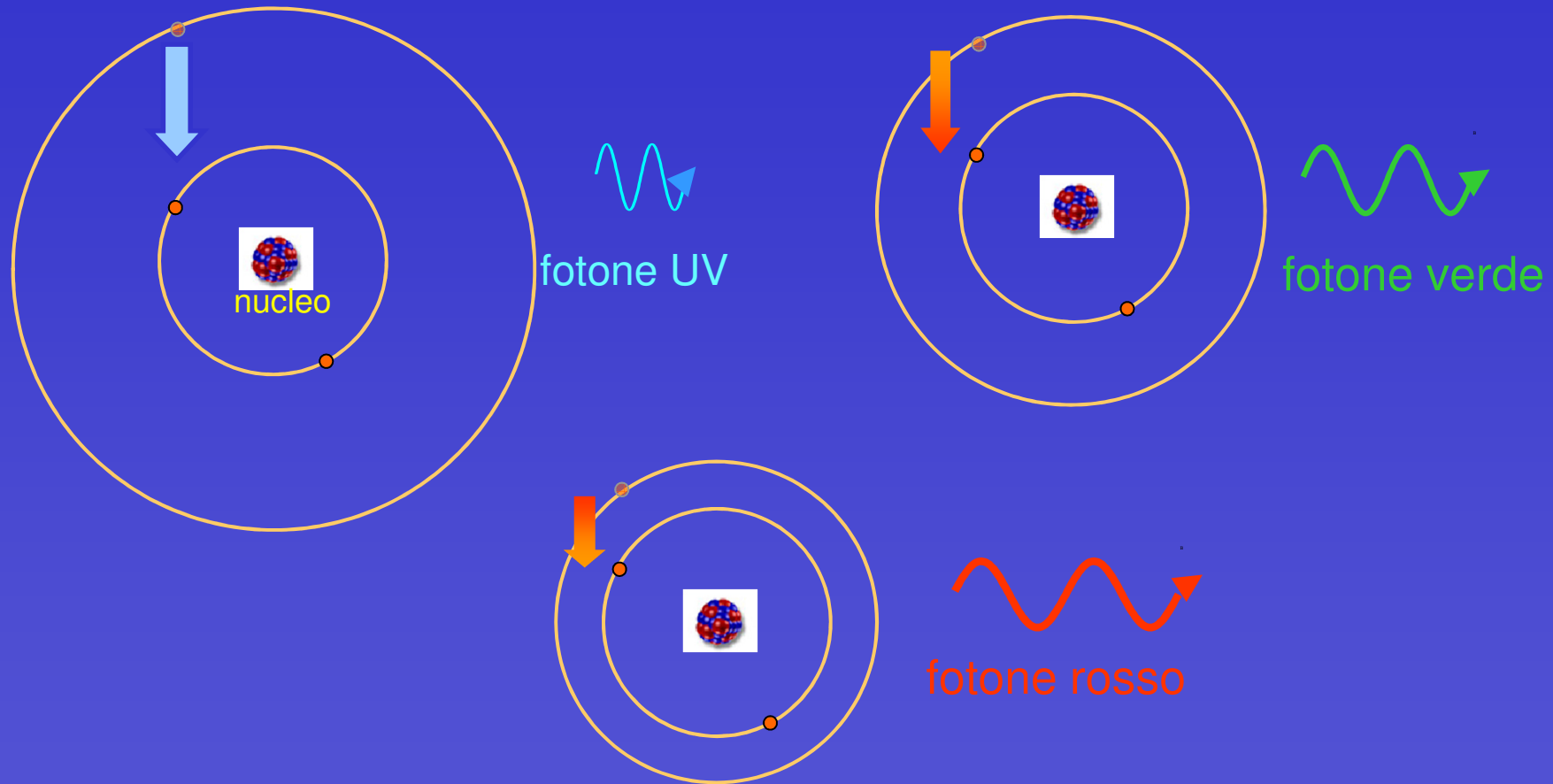
$$dI = \gamma I dx$$

$$\frac{dI}{dx} = \gamma I$$

$$I(x) = I(0) e^{\gamma x}$$

γ è in genere <0 . Per un mezzo otticamente attivo invece diventa positivo e si ha amplificazione della luce

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

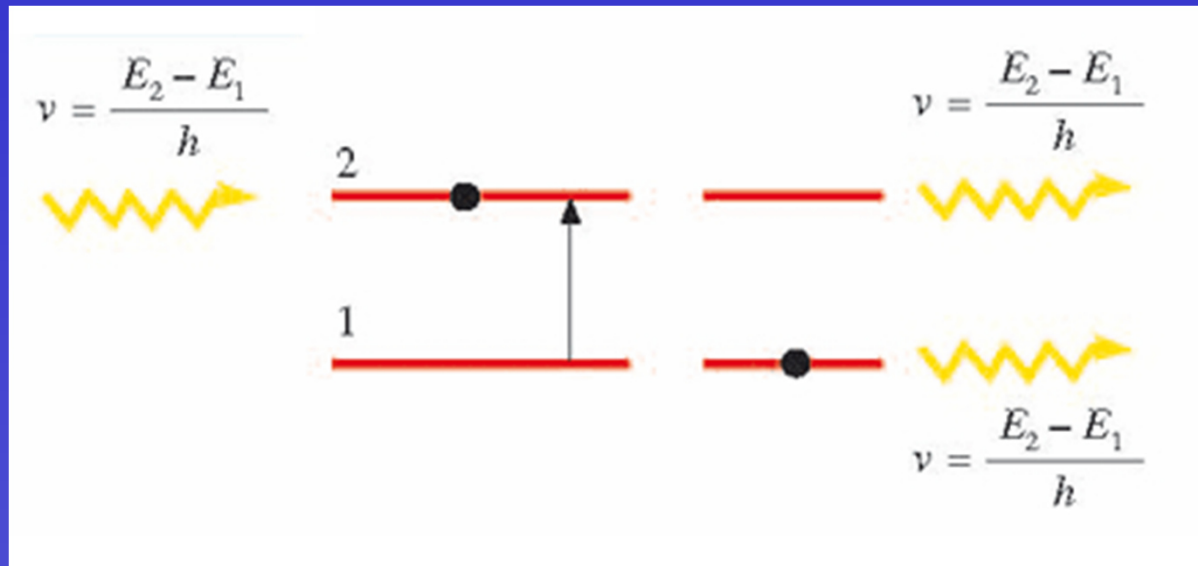
Questo processo avviene in maniera *casuale*: i fotoni vengono emessi *in tutte le direzioni* e le onde ad essi associate sono *sfasate* tra loro.

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

Successivamente essi si diseccitano emettendo luce.



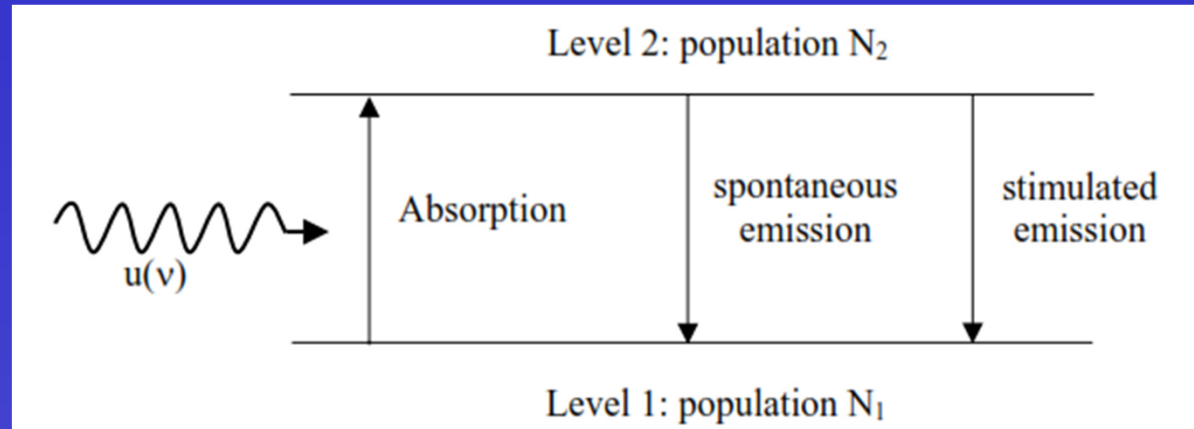
Emissione stimolata



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.

Coefficienti di Einstein



Spontaneous emission	(2→1)	$dN_2/dt = -dN_1/dt = -A_{21} N_2$
Stimulated emission	(2→1)	$dN_2/dt = -dN_1/dt = -B_{21} N_2 u(\nu)$
Absorption	(1→2)	$dN_1/dt = -dN_2/dt = -B_{12} N_1 u(\nu)$

These are effectively the definitions of the Einstein A and B coefficients.

All'equilibrio, in condizioni stazionarie

$$B_{12}N_1u(\nu) = A_{21}N_2 + B_{21}N_2u(\nu)$$

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{g_2}{g_1} \exp\left(-\frac{h\nu}{kT}\right)$$

Statistica di Boltzmann con g_1 e g_2 degenerazione dei livelli 1 e 2

$$h\nu = (E_2 - E_1)$$

$$u(\nu) = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \frac{1}{\exp(h\nu/kT) - 1}$$

Dalla formula di Planck per la densità spettrale di energia di un corpo nero

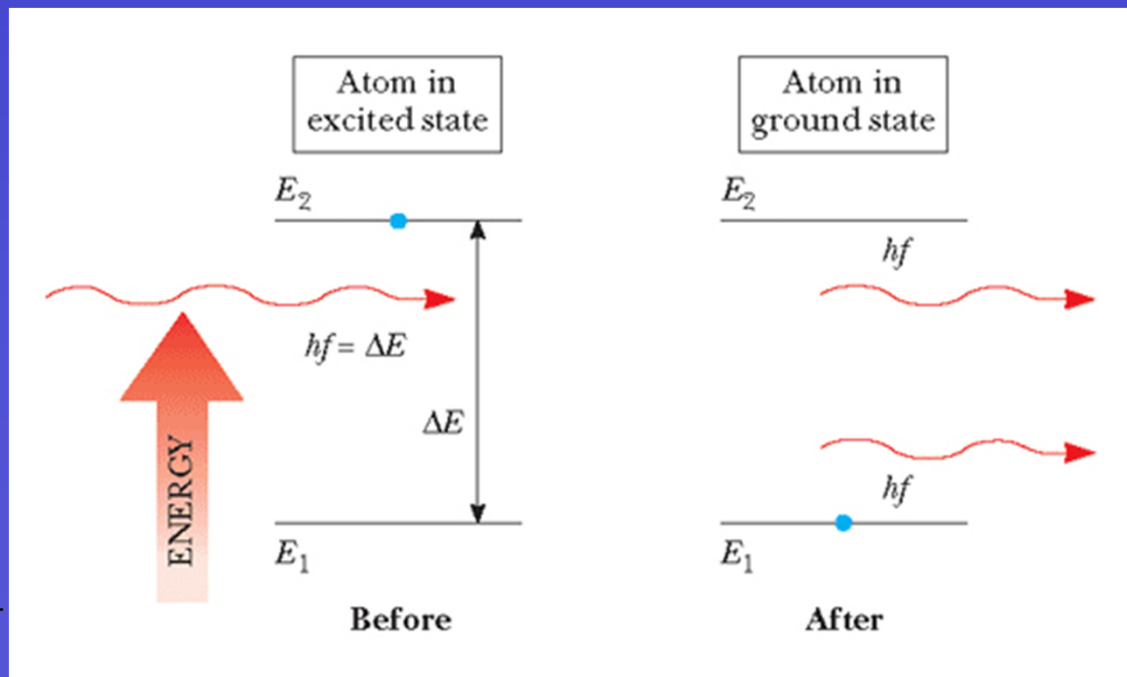
L'unico modo per cui la condizione di equilibrio per valere per qualunque T è che si abbia contemporaneamente

$$g_1 B_{12} = g_2 B_{21}$$
$$\frac{A_{21}}{B_{21}} = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3}$$

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.



27/08/2014

Condizioni necessarie

light amplification + positive optical feedback

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 fotoni 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:

$$N_2 > N_1$$

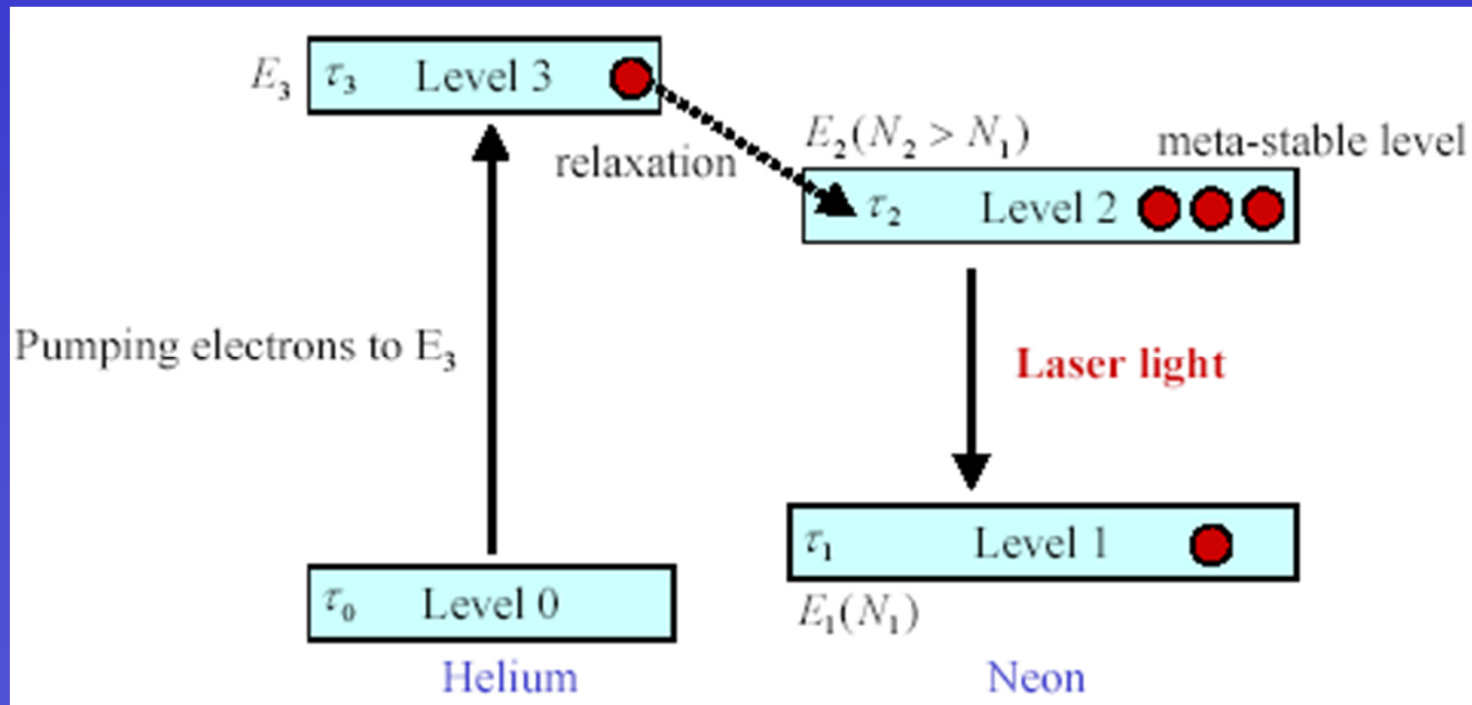
Cioè quando il n° di atomi eccitati nel mezzo attivo è maggiore del n° di atomi nello stato fondamentale.

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 con sistemi 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



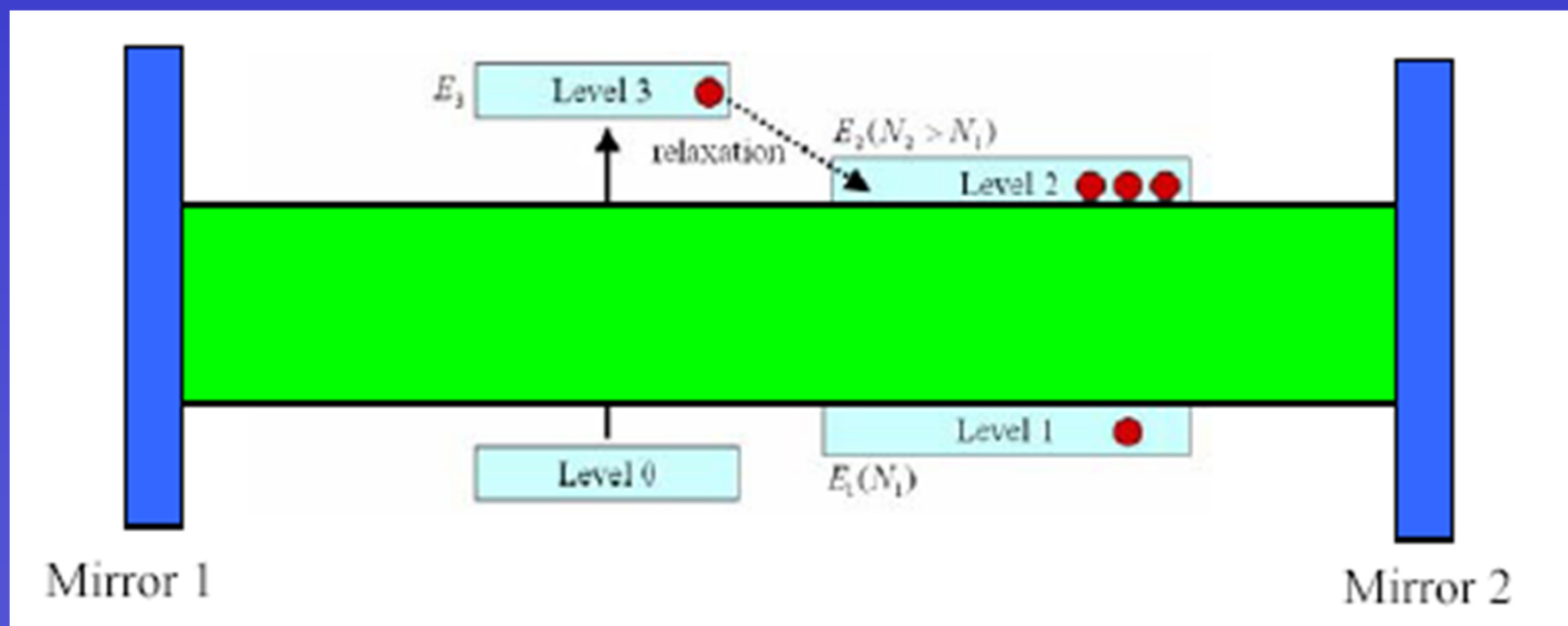
$$N_2 > N_1$$

**inversione di
popolazione**

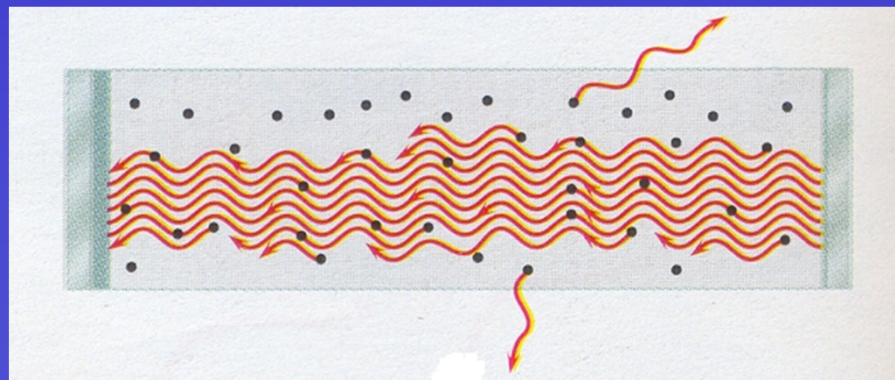
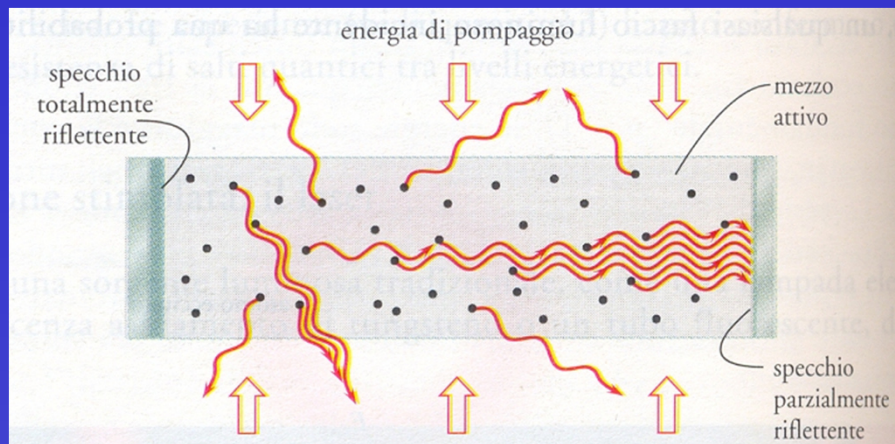
27/08/2014

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 λ contenute esattamente nella cavità.

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

3. Cavità risonante, guadagno, perdite

La probabilità per unità di tempo e di volume (rate) di assorbire ed emettere per emissione stimolata nell'ipotesi in cui lo spettro della radiazione stimolante è molto più stretto del profilo di riga $g(\nu)$ del mezzo si scrive:

$$W_{12} = B_{12} N_1 u_\nu g(\nu)$$

$$W_{21} = B_{21} N_2 u_\nu g(\nu)$$

$u_\nu = I \cdot n / c$ è la densità di energia e.m. a frequenza ν . n è l'indice di rifrazione del mezzo mentre I è l'intensità (W/m^2 nel SI).

Il guadagno probabilistico netto nell'unità di tempo e di volume è perciò $W_{21} - W_{12}$

$$W_{21}^{net} = (N_2 - N_1) B_{21} g(\nu) \frac{n}{c} I$$

L'intensità guadagnata nell'attraversare uno spessore dx di mezzo è allora:

$$\begin{aligned}dI &= W_{21}^{net} h\nu dx \\ &= (N_2 - N_1) B_{21} g(\nu) \frac{n}{c} h\nu I dx\end{aligned}$$

Poichè $\frac{dI}{dx} = \gamma I$

Allora per γ vale:

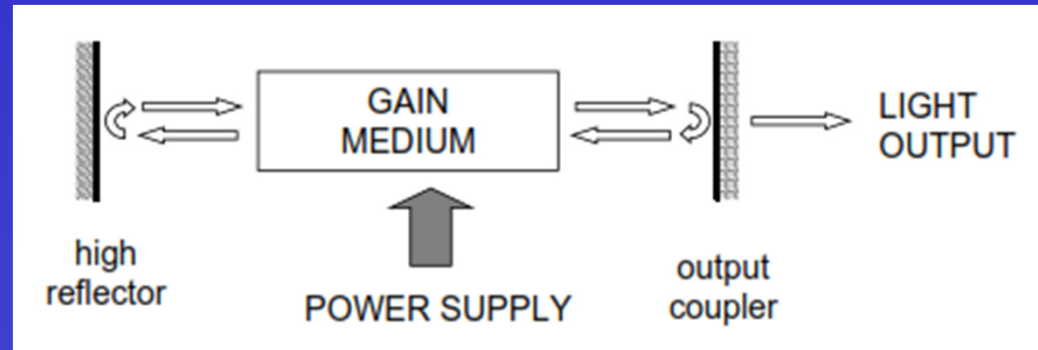
$$\gamma(\nu) = (N_2 - N_1) B_{21} g(\nu) \frac{n}{c} h\nu$$

Sostituendo l'espressione trovata per i coefficienti di Einstein e ponendo la vita media dello stato eccitato, 2, pari a $\tau = 1/A_{21}$

$$\gamma(\nu) = (N_2 - N_1) \frac{\lambda^2}{8\pi n^2 \tau} g(\nu)$$

Vedere anche A.M. Fox «Laser_Notes»

Bilancio guadagno-perdite in cavità



$$\text{round-trip gain} = \text{round-trip loss}$$

Considerando che in un «round-trip» (andata e ritorno) la luce passa 2 volte per il mezzo attivo, la condizione che il guadagno eguagli almeno le perdite si scrive:

$$e^{2\gamma l} \cdot R_{OC} \cdot R_{HR} \cdot e^{-2\alpha l} = 1$$

Dove il coefficiente di perdita α tiene conto sia dello scattering che dell'assorbimento.

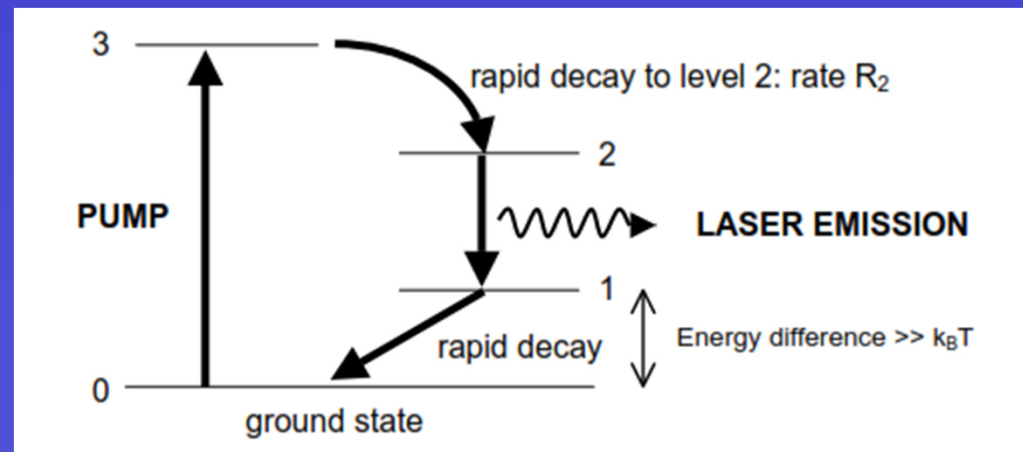
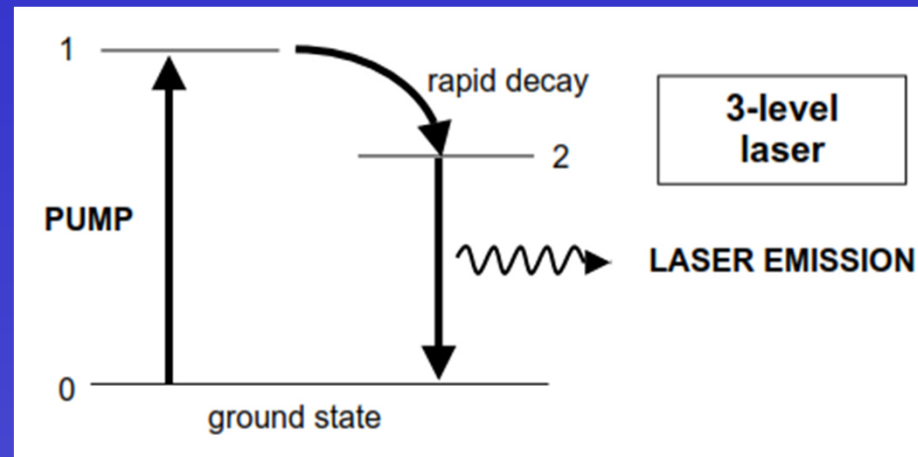
Esplicitando scattering e dell'assorbimento si ha:

$$2\gamma l = (1 - R_{OC}) + (1 - R_{HR}) + \text{scattering losses} + \text{absorption losses}$$

dove l è la lunghezza del mezzo attivo.

Pertanto esiste un guadagno minimo (soglia) perché l'oscillazione della radiazione e.m. si sostenga in cavità e ciò implica anche l'esistenza di una potenza di pompa minima perché si abbia azione laser.

Laser a tre e quattro livelli: schema generale



$E_{\text{transiz. laser}}$
 efficienza quantica: $\frac{E_{\text{transiz. laser}}}{E_{\text{pompaggio}}}$

Piccola storia dei laser:

- 17:** EINSTEIN formula la teoria dell'emissione stimolata per spiegare la legge di corpo nero di Planck
- 39:** V.Fabrikant (URSS) prevede l'uso dell'emissione stimolata per amplificare onde "corte"
- 50:** messa a punto del pomappgio ottico (inversione di popolazione grazie all'energia luminosa) da parte di A.KASTLER e J.BROSSEL
- 51:** C.TOWNES (USA) N.BASOV, A.PROKHROV (URSS) teoria dell'emissione stimolata per l'amplificazione
- 54:** GORDON mette a punto il MASER (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation)
- 58:** TOWNES e A.SCHAWLOW, e BASOV, indicano che il principio del MASER può essere applicato alla luce
- 60:** BASOV, O.KROKHIN e Yu.POPOV sviluppano la teoria del laser
- 60:** primo laser a rubino realizzato da T.MAIMAN negli USA
- 61:** primo laser a gas sviluppato da A.JAVAN, W.BENNET e D.HERRIOT (He-Ne). E' il laser più usato nel mondo
- 63:** messa a punto del laser ad anidride carbonica da parte di C.PATEL
- 63:** Premio Nobel in Fisica per l'invenzione del laser a BASOV, TOWNES e PROKHROV
- 69:** funzionamento a temperatura ambiente dei laser a semiconduttori (diodi laser)

Evoluzione prestazioni laser:

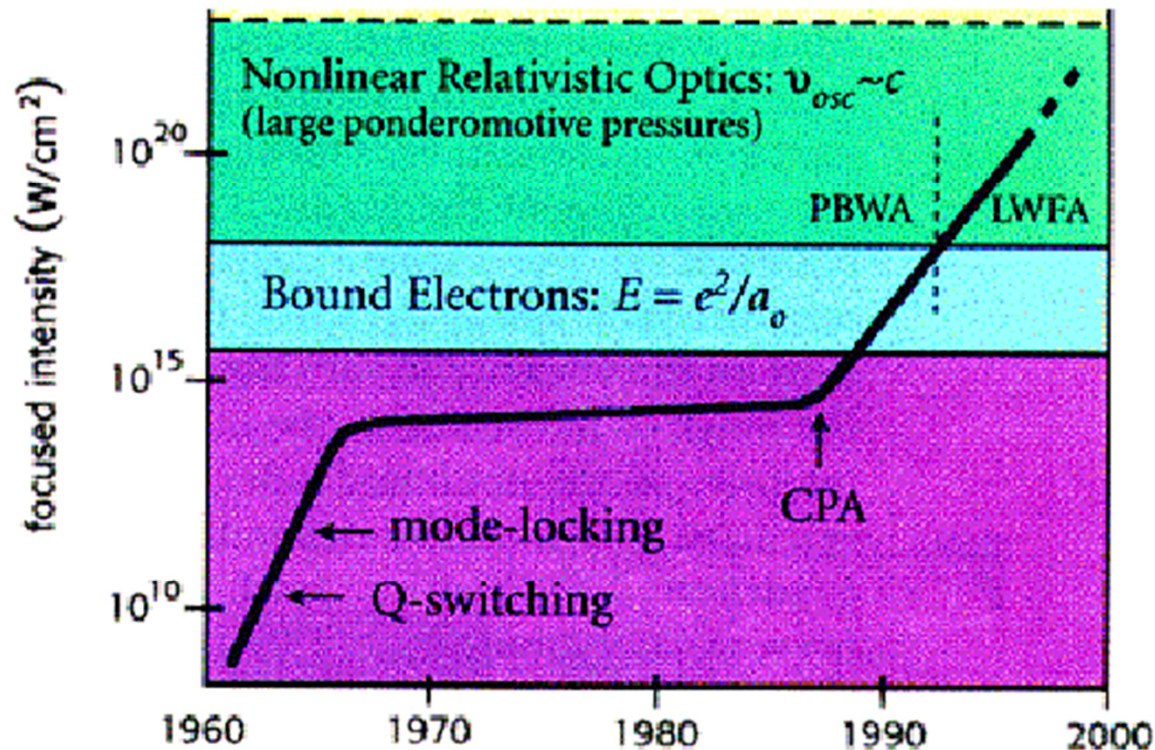
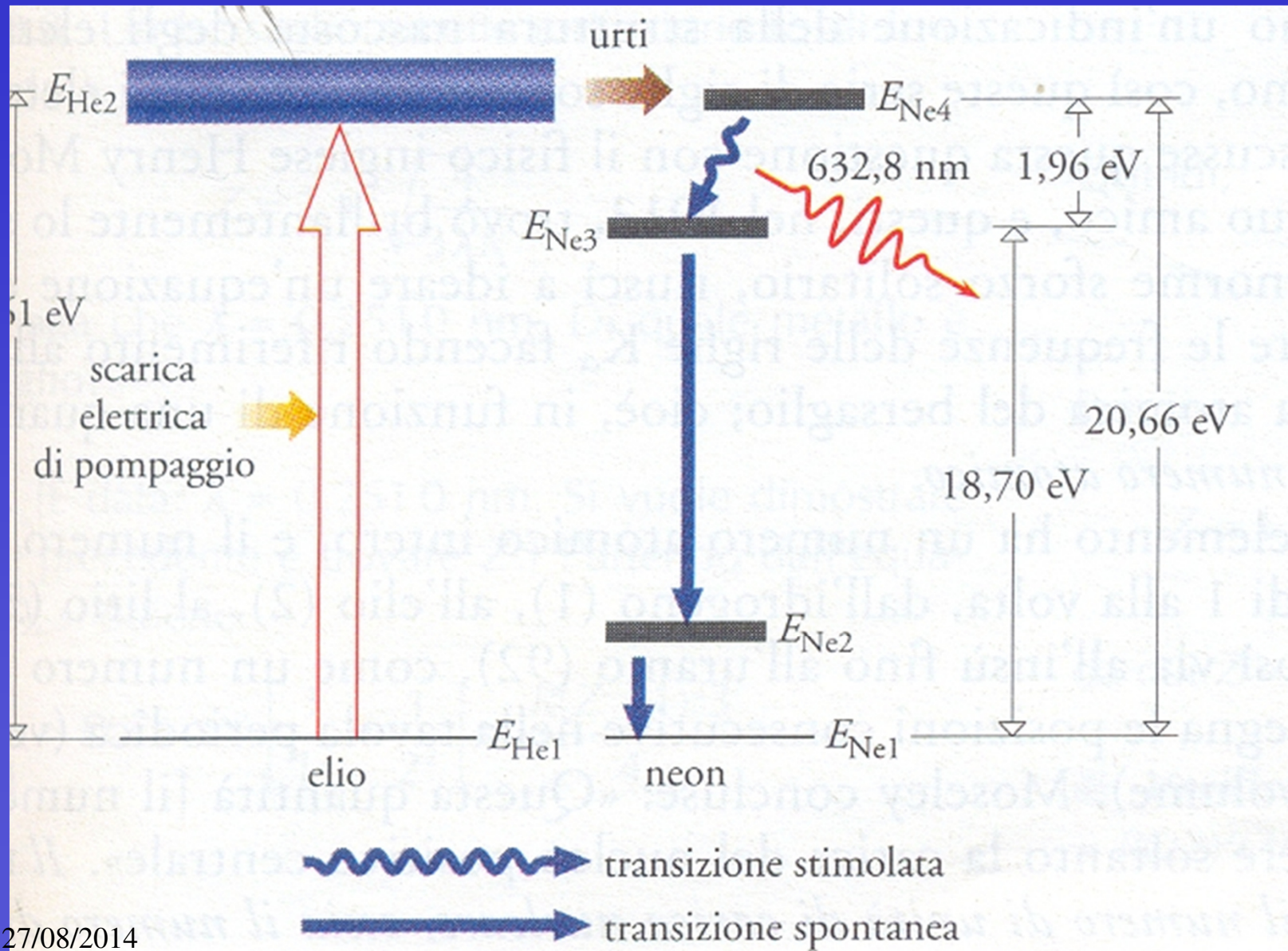


Figure 1. Laser intensity as a function of year, showing the impact of the CPA concept and the different thresholds of physical regimes. The sharp increase in intensity since the advent of CPA is comparable to the sharp increase after the invention of the laser in the 1960's.

Laser a quattro livelli: He-Ne



27/08/2014

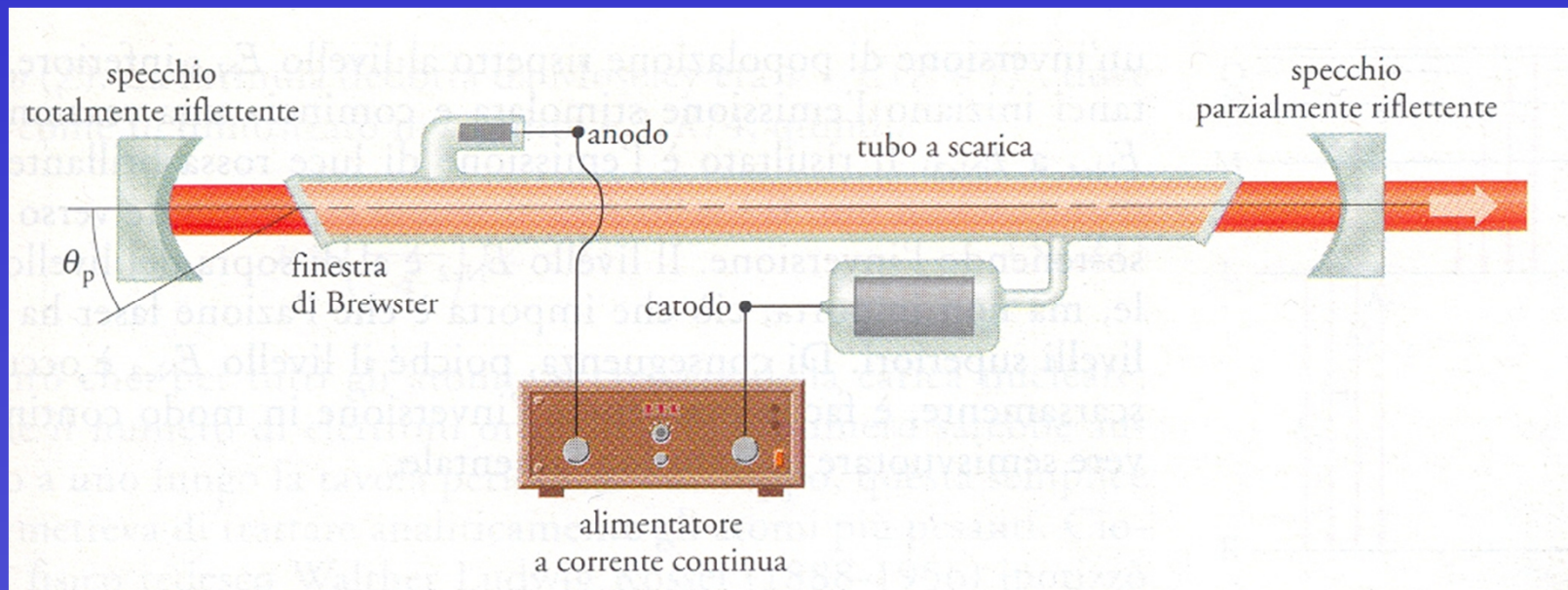
Il mezzo attivo è una miscela di gas costituita da Ne ed He racchiusa in un tubo di vetro chiuso agli estremi da specchi. Il pompaggio viene effettuato da una tensione applicata ai capi del tubo.

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).

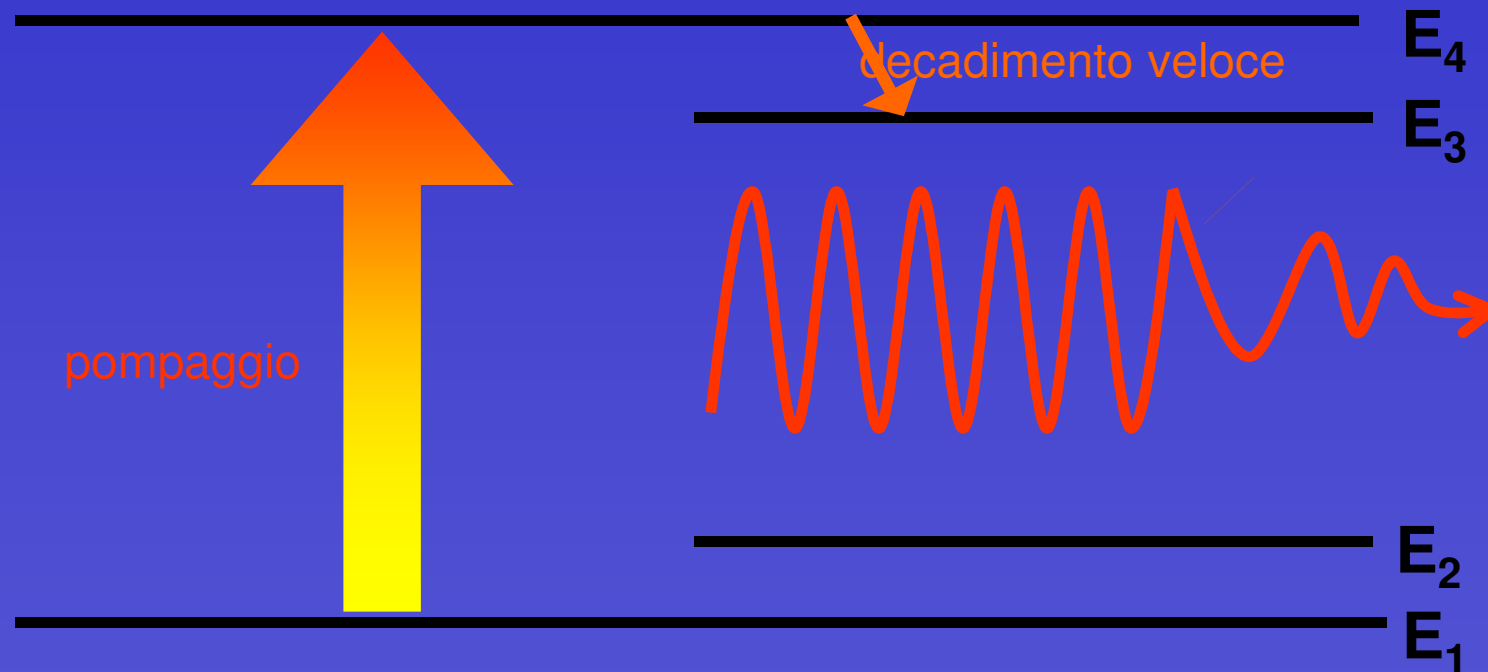
Si ha quindi, nella popolazione di atomi di Ne, un'inversione di popolazione rispetto al livello $E_{\text{Ne}3}$.

Schema di un laser



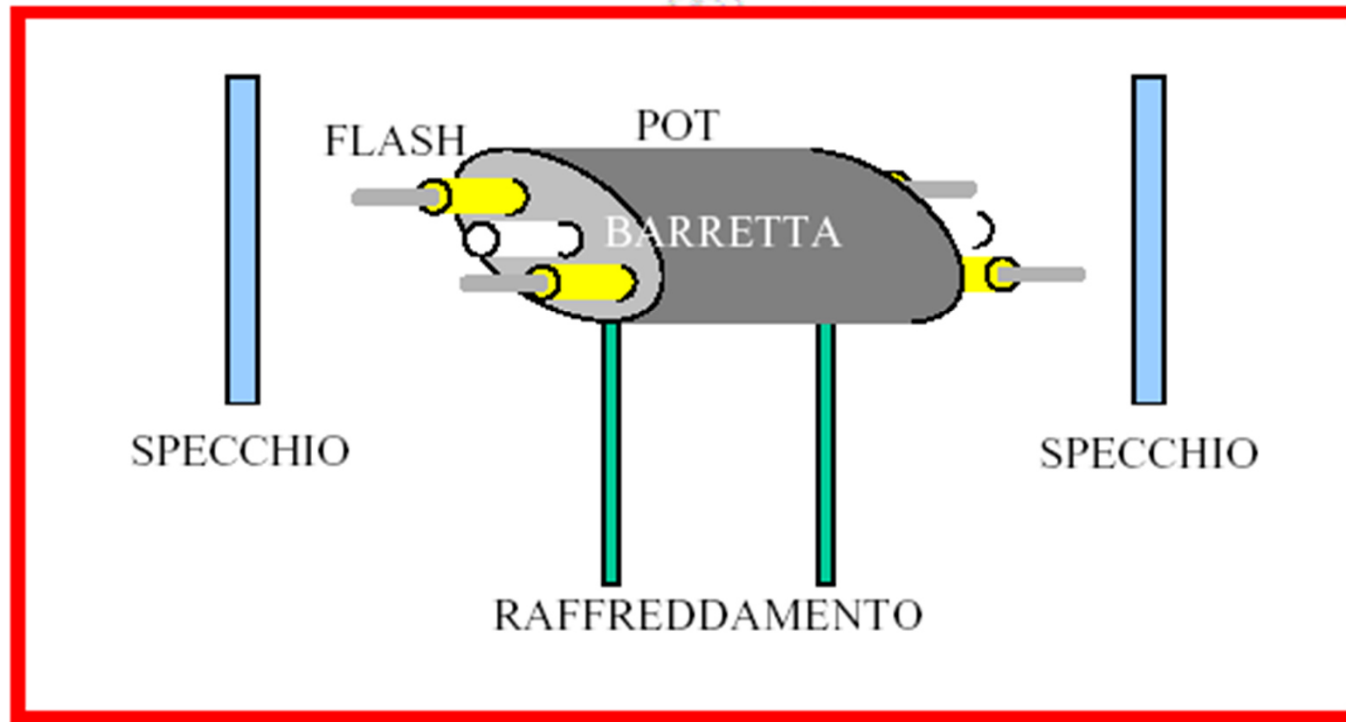
1. Laser a Stato Solido (es: Nd-YAG)

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









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

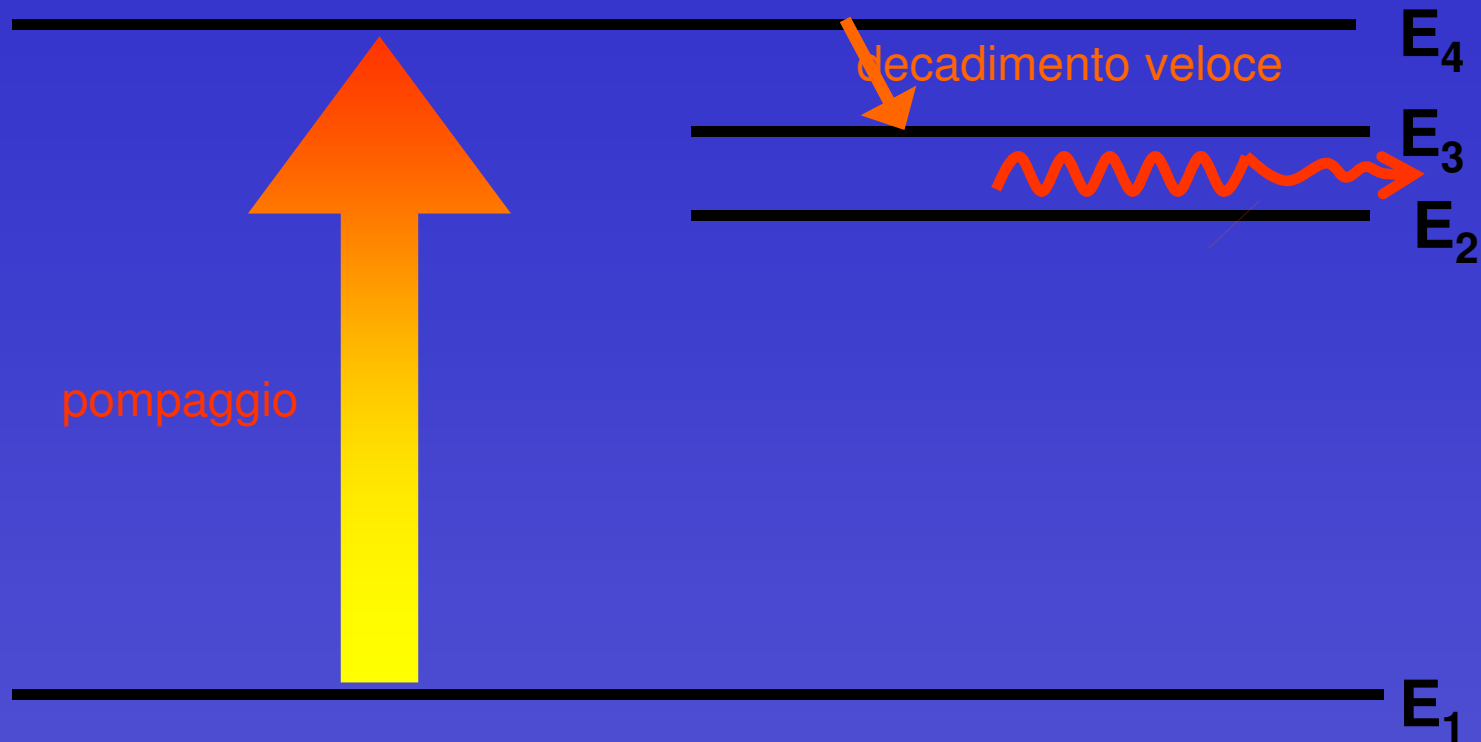
ELEMENTI COSTITUTIVI DI UN LASER a STATO SOLIDO



LASER A STATO SOLIDO

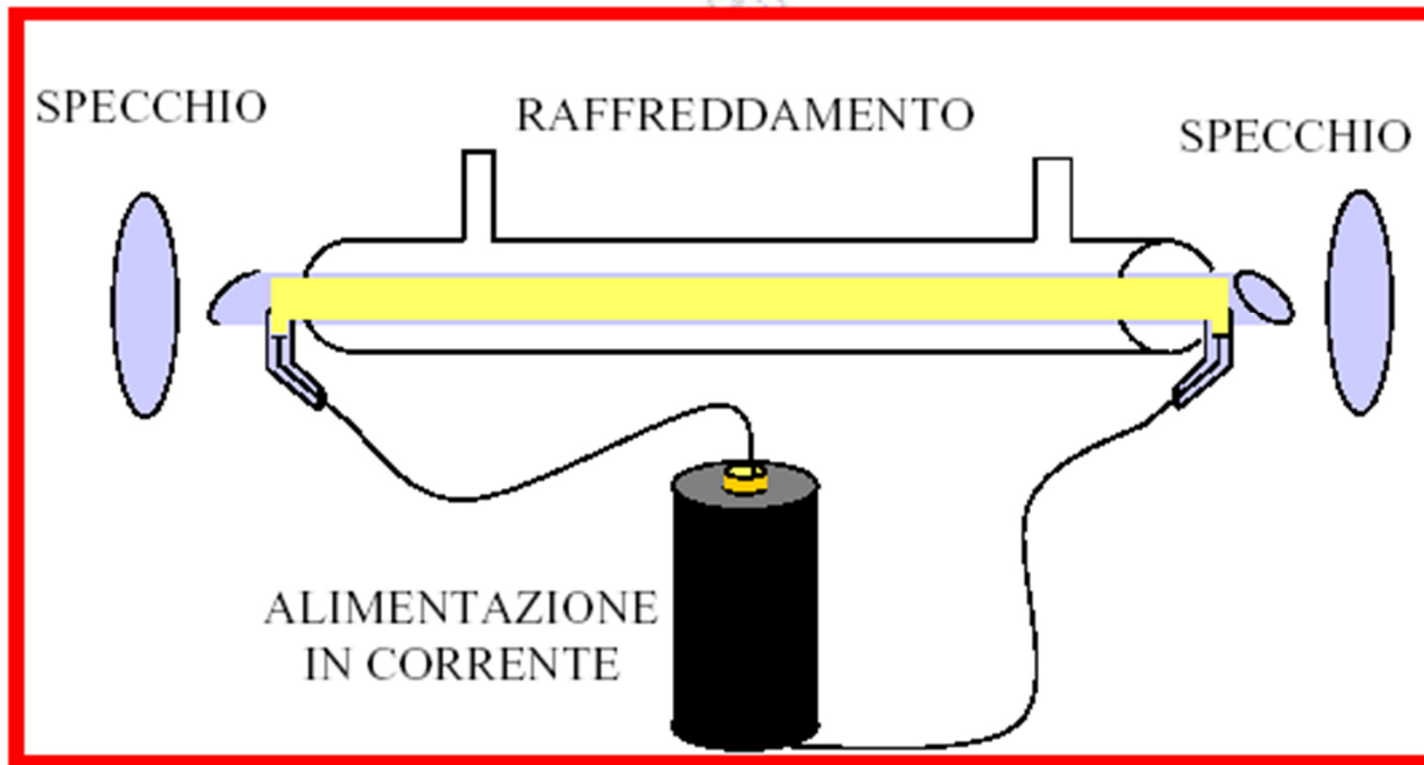
Cr ³⁺ in Rubino	emissione visibile: ROSSO ($\lambda=692.8\text{nm}$)	
Nd ³⁺ in Y.A.G. (Yttrium Aluminium Garnet)	emissione vicino IR: ($\lambda=1064\text{ nm}$)	
Nd in Vetro	emissione vicino IR: ($\lambda=1064\text{ nm}$)	
Cr ⁴⁺ in YAG	emissione vicino IR: ($\lambda=1550\text{ nm}$)	
Ti-ZAFFIRO	emissione 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 ⁺	emissione visibile/UV: ($\lambda=514.5/488/350$ nm)	
He-Cd (Sn, Pb, Zn, Se)	emissione visibile/UV: ($\lambda=416/325$ nm)	
CO ₂	emissione lontano IR: ($\lambda=10.64/9.6$ μ m)	
CO	emissione lontano IR: ($\lambda=5.0$ μ m)	
N ₂	emissione UV: ($\lambda=337$ nm)	
ECCIMERI (KrF, ArF, KrCl, XeC, XeF, ...)	emissione UV: ($150 < \lambda < 400$ nm)	

eugenio.fazio@uniroma1.it

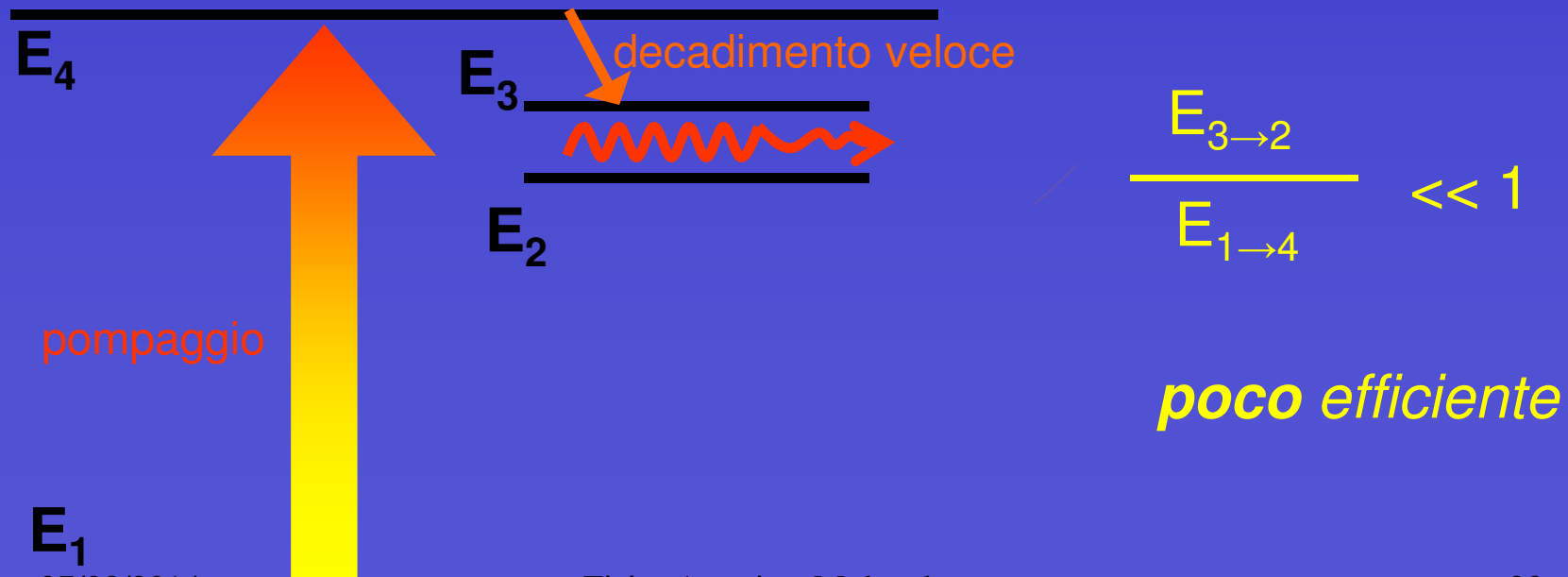
3. Laser a eccimeri (excited dymers)

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.

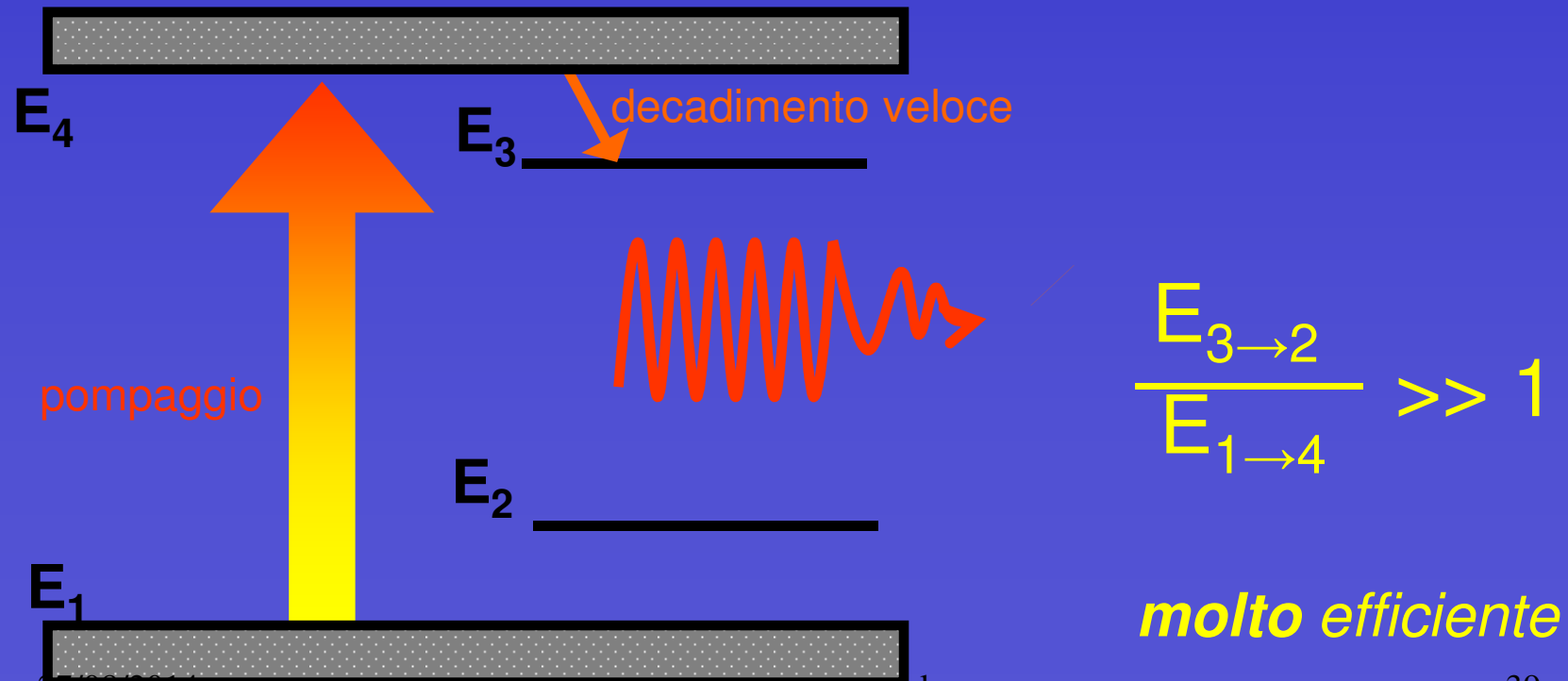
Vantaggio: emette radiazione a λ corte (150 – 300 nm).



4. Laser a diodi (excited dymers)

Sono caratterizzati da:

- Bande energetiche (e non livelli);
- λ da lontano IR a vicino UV
- pompaggio con corrente elettrica che attraversa la banda di conduzione



Tipi di luce laser

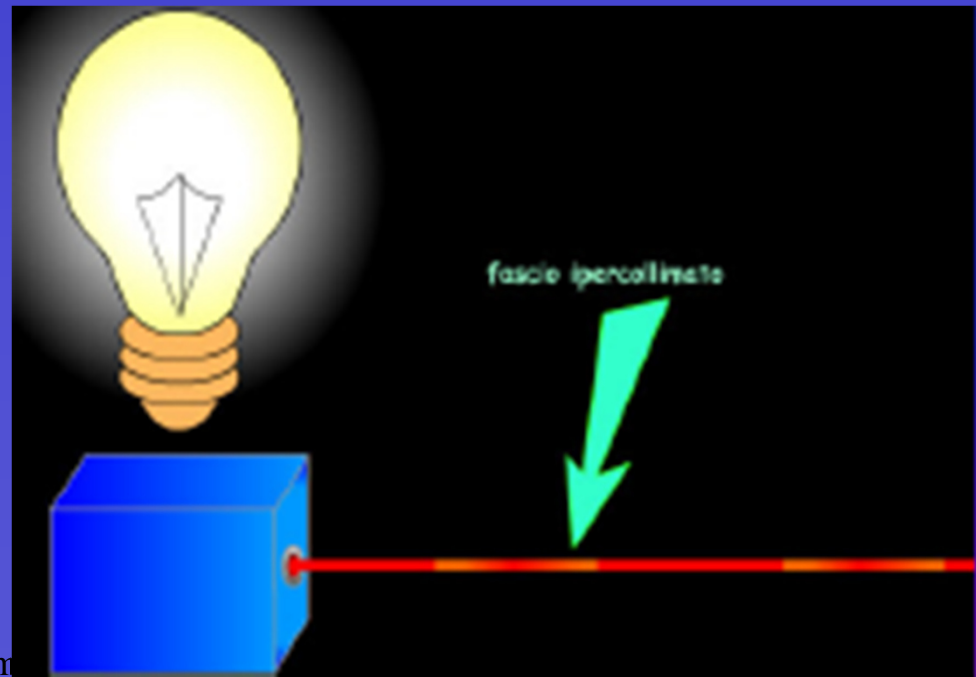
Tipi di laser	Mezzo attivo	λ principale (μm)	Efficienza
Laser a Stato Solido	Rubino	0.6943	alta
	Nd ³⁺ :YAG (Nd ³⁺ :glass)	1.064	
	Fibre di silicio	1.55	
Laser a Stato solido recenti	Titanio-Zaffiro (Ti:Sa)	0.8	alta
	Yb:KGW (PHAROS)	1.03	
Laser a gas	He-Ne	0.6328	bassa
	Ar ⁺	0.515	
Laser a eccimeri	KrF eccimeri	0.248	bassa
	ArF eccimeri	0.193	

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.

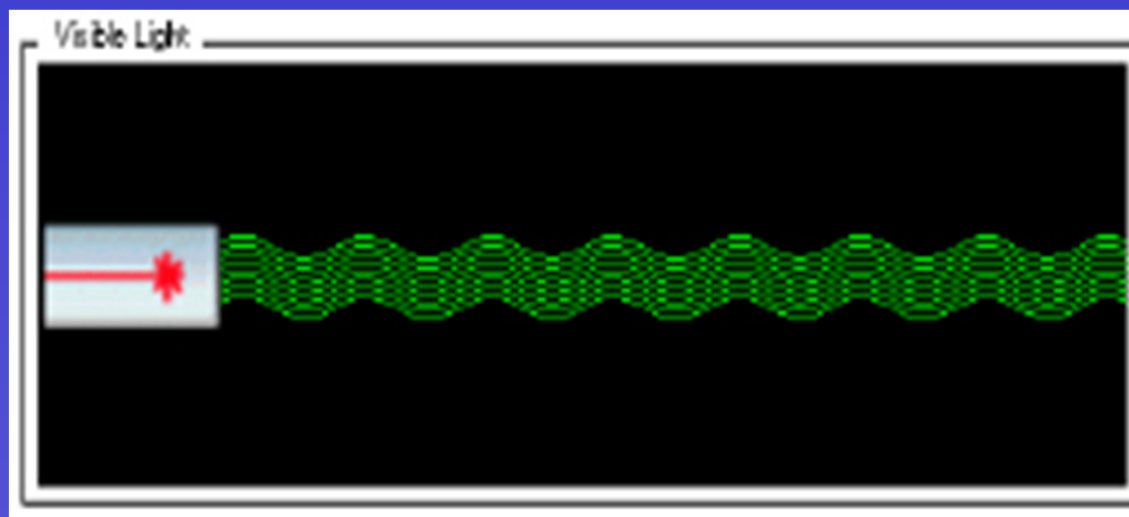
La direzionalità è conseguenza della selezione nella direzione di propagazione dei fotoni generati, operata dalla cavità risonante.

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.



Proprietà della luce laser: Coerenza temporale

La coerenza temporale definisce l'intervallo di tempo durante il quale la fase del fascio laser è «ben definita». In generale il tempo di coerenza, t_c , è il reciproco della larghezza della linea spettrale relativa alla transizione laser, $\Delta\nu$, ossia di fatto è la vita media «efficace» dello stato eccitato della transizione laser.

La lunghezza di coerenza, l_c , (detta anche di coerenza longitudinale) è definita come:

$$l_c = c t_c = c \frac{1}{\Delta\nu}$$

Proprietà della luce laser: Coerenza temporale (II)

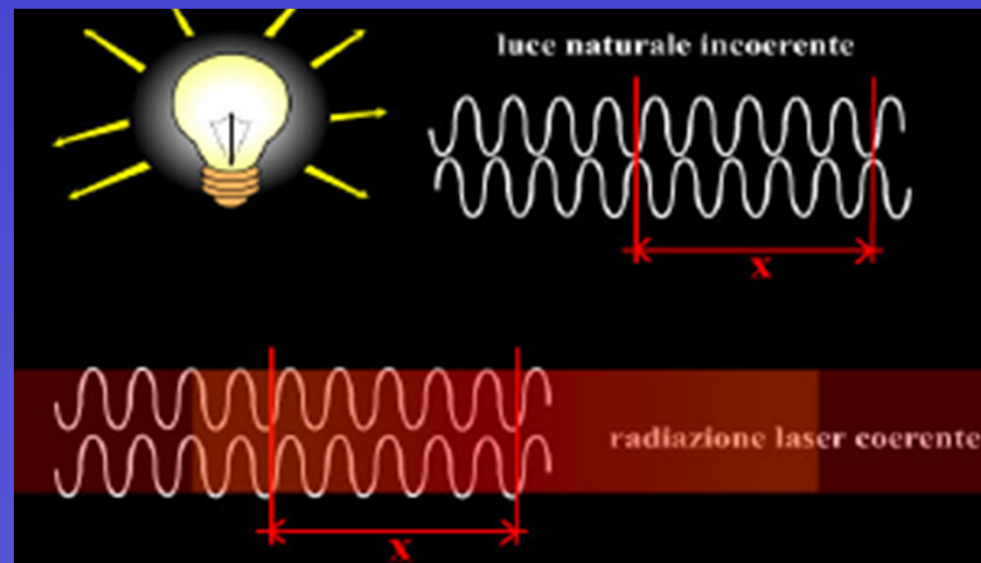
Tipici valori della lunghezza di coerenza per vari tipi di sorgenti di radiazione.

SOURCE	Spectral line width $\Delta\nu$ (Hz)	Coherence time t_c (s)	Coherence length l_c
Sodium discharge lamp (D-lines at 589nm)	5×10^{11}	2×10^{-12}	0.6 mm
Multi-mode HeNe laser 632.8nm line	1.5×10^9	6×10^{-10}	20 cm
Single-mode HeNe laser 632.8nm line	1×10^6	1×10^{-6}	300 m

La coerenza temporale è quindi legata al grado di monocromaticità.

Proprietà della luce laser: Coerenza spaziale

La proprietà di coerenza spaziale si riferisce a quanto sia regolare la fase della radiazione lungo una sezione trasversa del fascio. Per questo a volte si definisce anche una lunghezza di coerenza trasversa, legata alla coerenza spaziale, come la lunghezza lungo la sezione trasversa per la quale la differenza di fase raggiunge un valore di π .

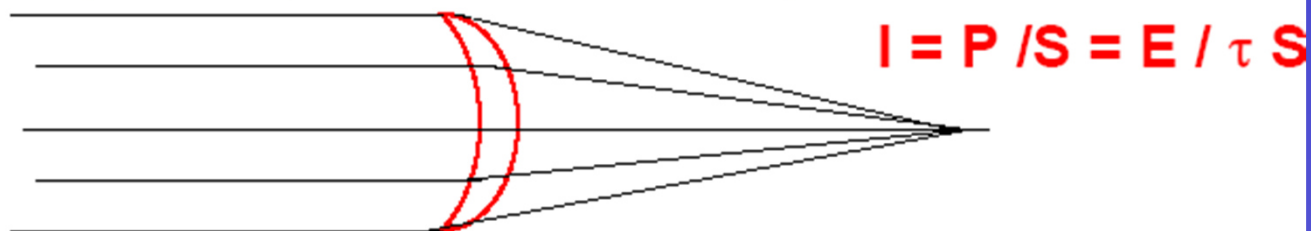


Proprietà della luce laser: Coerenza spaziale (II)

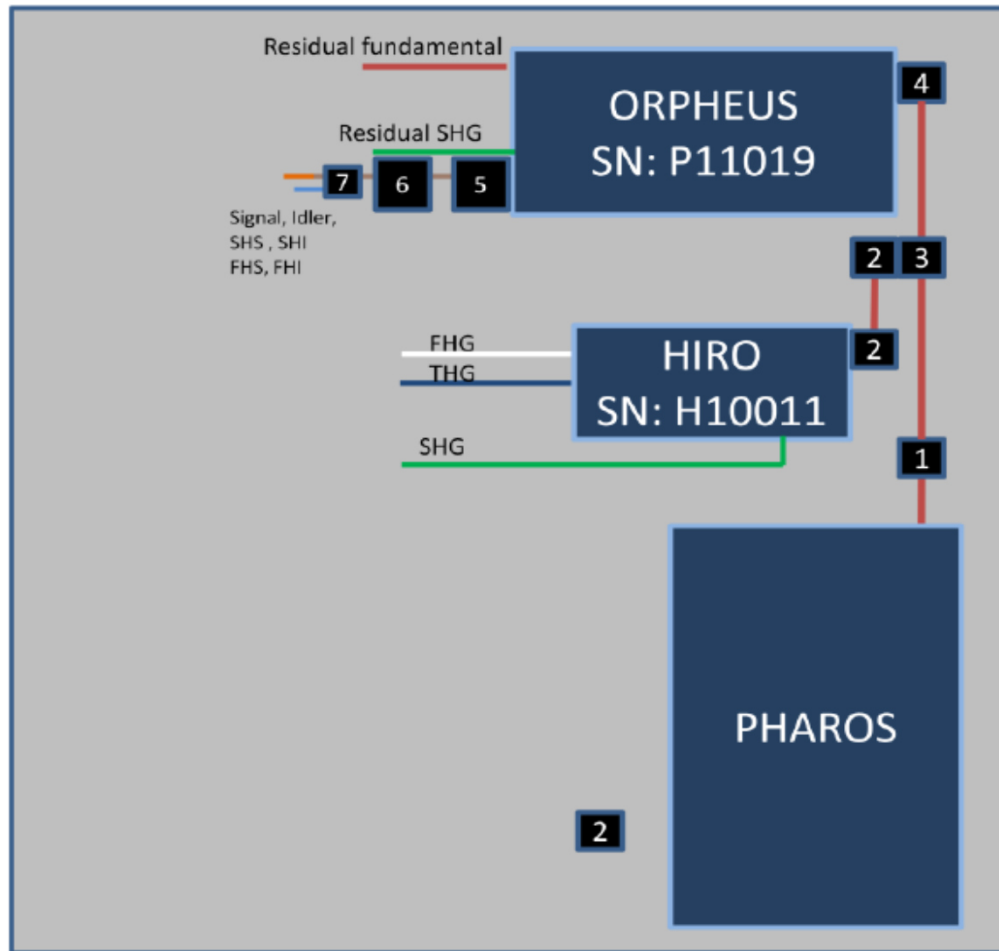
In termini semplici possiamo pensare ad una sorta di “ordine” dei fotoni



In pratica una coerenza elevata implica una elevata focalizzabilità del laser (macchia focale molto piccola, intensità elevata)

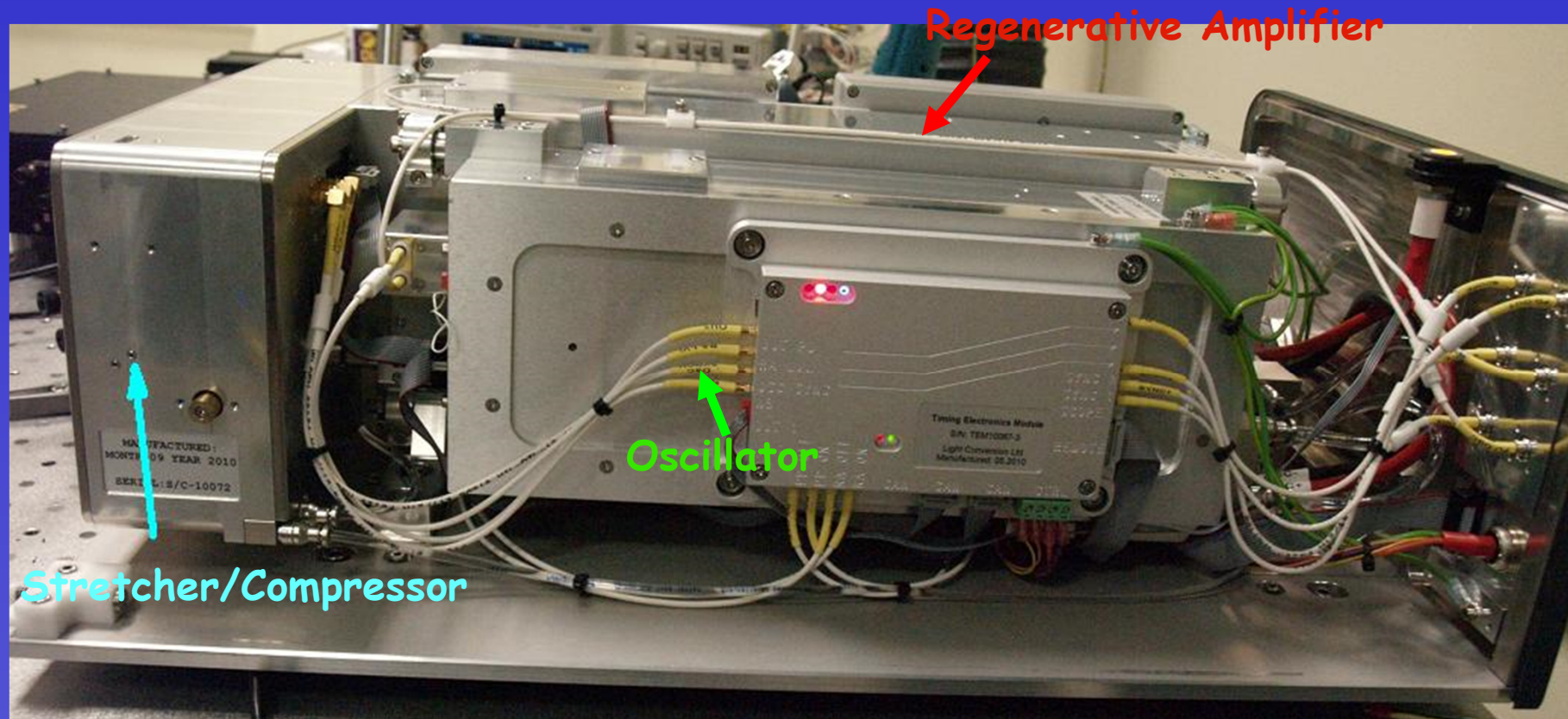


Schema di una sorgente laser ultracorta accordabile molto avanzata (PHAROS+HIRO+ORPHEUS)

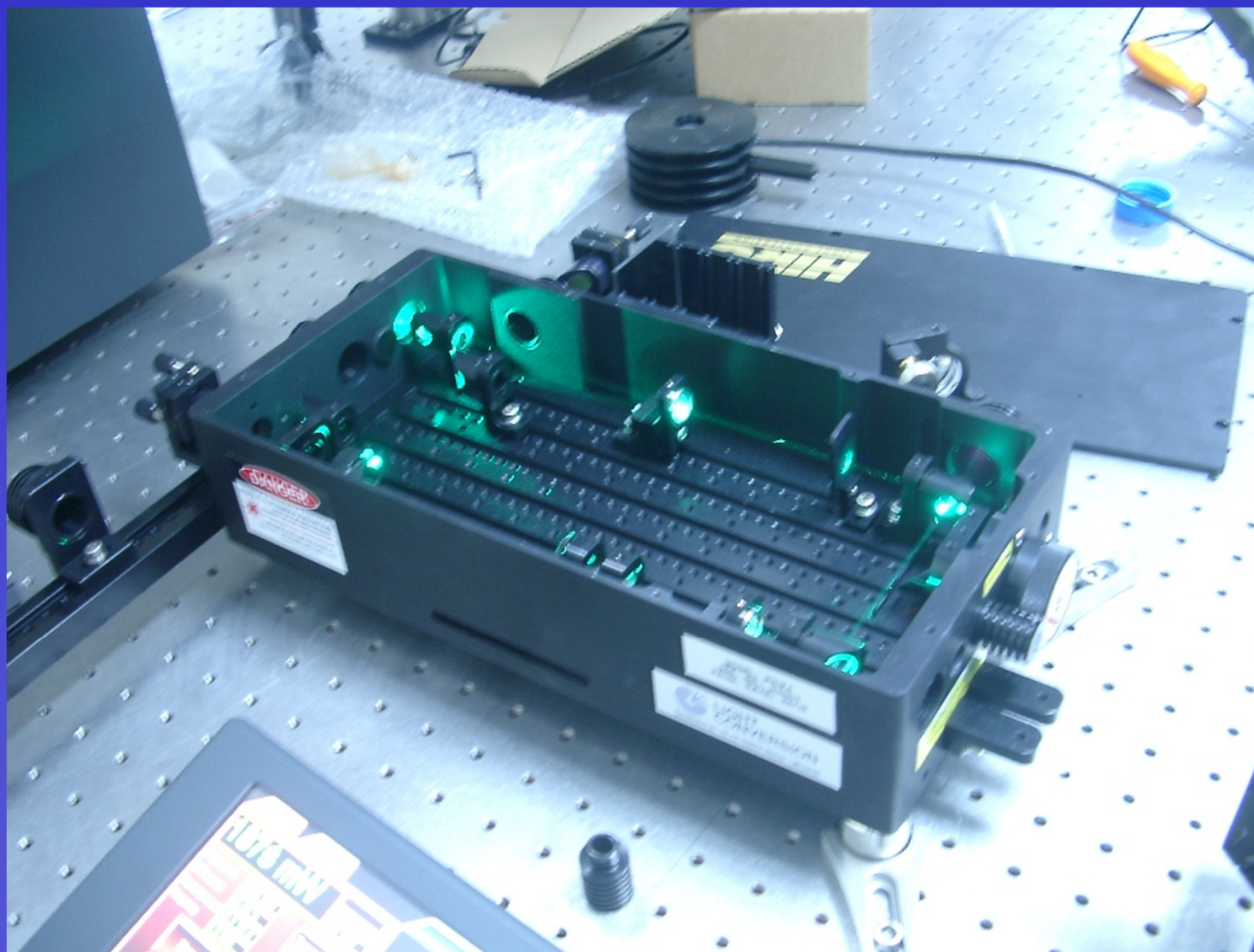


- 1 – Periscope (70mm->125mm)
- 2 – Beam routing mirror
- 3 – Beam splitter (50%)
- 4 – Beam routing mirror with shutter
- 5 – Mixer 1 (external frequency mixing stage)
- 6 – Mixer 2
- 7 – Wavelength separator

Schema del PHAROS



Schema del generatore di armoniche HIRO



27/08/2014

Fisica Atomica, Molecolare e
Spettroscopia - a.a. 2013-2014

49

PHAROS + HIRO



27/08/2014

Fisica Atomica, Molecolare e
Spettroscopia - a.a. 2013-2014

50

ORPHEUS: una sorgente ultracorta accordabile

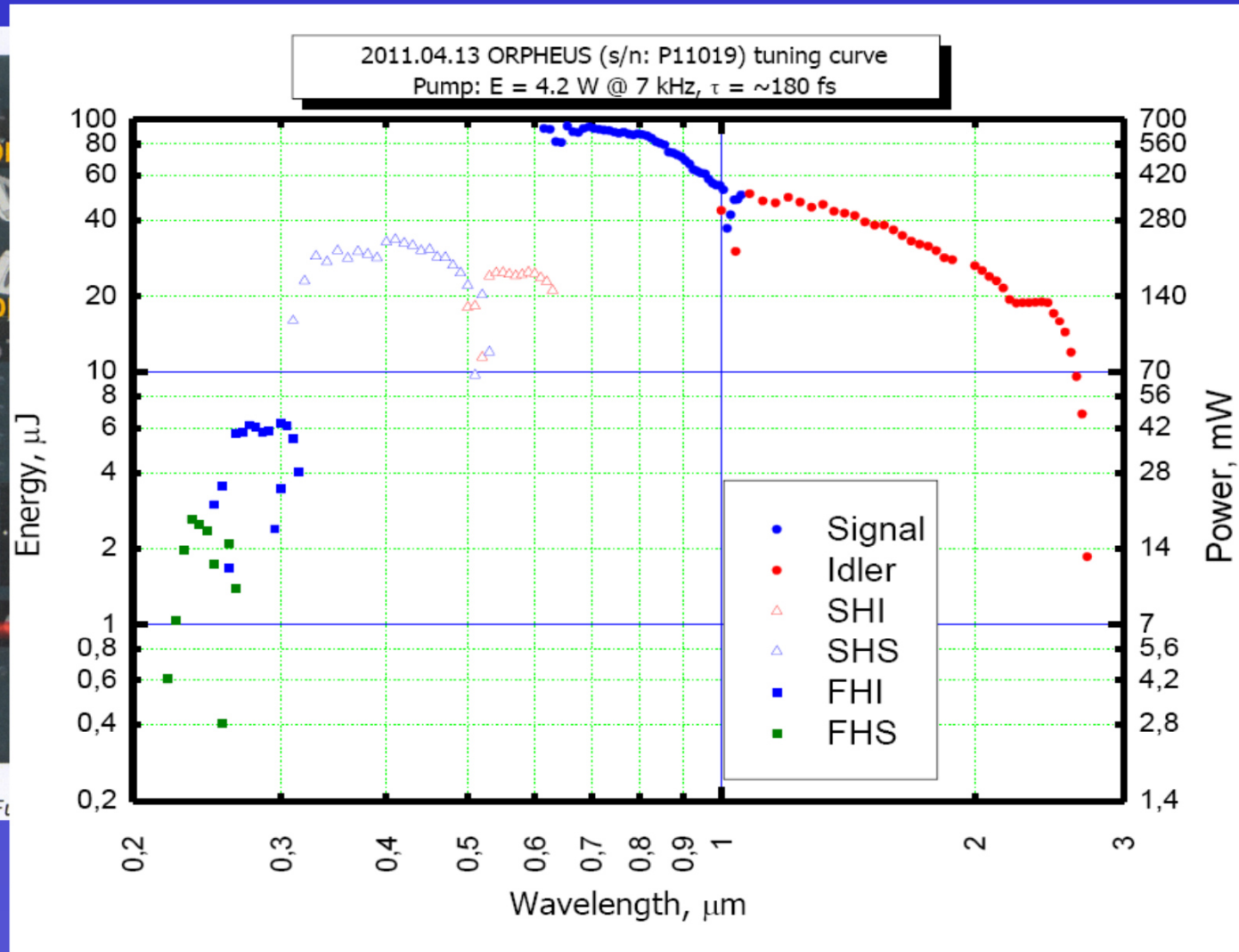


Figure 9. F...