

CORSO PROGETTO LASER



30/09-02/10/2003

FISICA DEL LASER

Prof. Luca Salvini

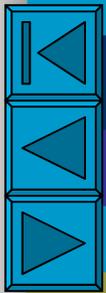
FISICA DEL LASER (1)

- OBIETTIVI DI QUESTI INCONTRI
- IL LASER
- PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO
- CARATTERISTICHE DELLA LUCE LASER
- TIPI DI LASER
- IL LASER A CO₂



FISICA DEL LASER (2)

- CONDIZIONI DI OSCILLAZIONE
- REGIME STAZIONARIO
 - STAZIONARIETÀ
 - INTENSITÀ
 - FASE
 - FREQUENZA DI OSCILLAZIONE
- NECESSITÀ DI UN'INVERSIONE DI POPOLAZIONE
- INVERSIONE DI POPOLAZIONE NEI SISTEMI A 4 LIVELLI



OBIETTIVI SPECIFICI DI QUESTI INCONTRI

- CONOSCERE IL PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO DEL LASER
- SAPER RICONOSCERE E RAPPRESENTARE GRAFICAMENTE PROCESSI DI EMISSIONE SPONTANEA, STIMOLATA, ASSORBIMENTO
- SAPER CLASSIFICARE UN LASER IN BASE AL MATERIALE ATTIVO
- SAPER INDIVIDUARE LE CONDIZIONI DI OSCILLAZIONE
- CONOSCERE LE CARATTERISTICHE DEL REGIME STAZIONARIO
- CONOSCERE LE PROBLEMATICHE DELL'INVERSIONE DI POPOLAZIONE E LE CARATTERISTICHE DEI SISTEMI A 4 LIVELLI

IL LASER

- COS'È LA LUCE?
- LO SPETTRO ELETTROMAGNETICO
- DEFINIZIONE di L.A.S.E.R.:

Light

Amplification by

Stimulated

Emission of

Radiation

Amplificazione
della Luce
mediante

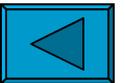
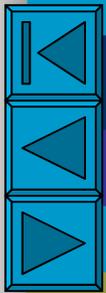
Emissione

Stimolata di

Radiazione

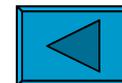
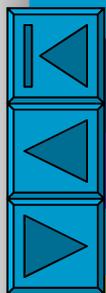
- APPLICAZIONI

LO SPETTRO ELETTRROMAGNETICO



APPLICAZIONI

- Operazioni chirurgiche
- Cure mediche
- Effetti di luce (discoteche, ...)
- Telecomunicazioni (fibre ottiche)
- Sistemi Informativi (LAN)
- Stampanti
- Lavorazione meccaniche di materiali
- CD
- Lettori nei supermercati
- Olografia
- Studio a distanza dell'atmosfera
- Spettroscopia
- Misura dei movimenti della crosta terrestre
- Telemetria
- armi "intelligenti"



PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO

- CENNI AL FORMALISMO MATEMATICO
- EMISSIONE SPONTANEA, STIMOLATA ED ASSORBIMENTO
- IL COEFFICIENTE DI GUADAGNO
- IL PARADIGMA DEL LASER

CENNI AL FORMALISMO MATEMATICO

- Dato un sistema quantistico descritto da una Hamiltoniana H_0 indipendente dal tempo, indicheremo con $|n\rangle$ e E_n gli **autovettori** ed **autovalori** di H_0
- La rappresentazione del sistema quantistico (funzione d'onda) all'istante iniziale $t=0$ è:
$$|\psi(0)\rangle = \sum_n \gamma_n |n\rangle$$

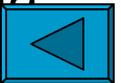
- Utilizzando l'equazione di Schrödinger si mostra che ad un istante successivo:
$$|\psi(t)\rangle = \sum_n \gamma_n e^{\frac{i \cdot E_n \cdot t}{\hbar}} |n\rangle$$

- La probabilità di trovare il sistema nello stato $|\varphi\rangle$ vale:
$$P_\varphi(t) = |\langle \varphi | \psi(t) \rangle|^2$$

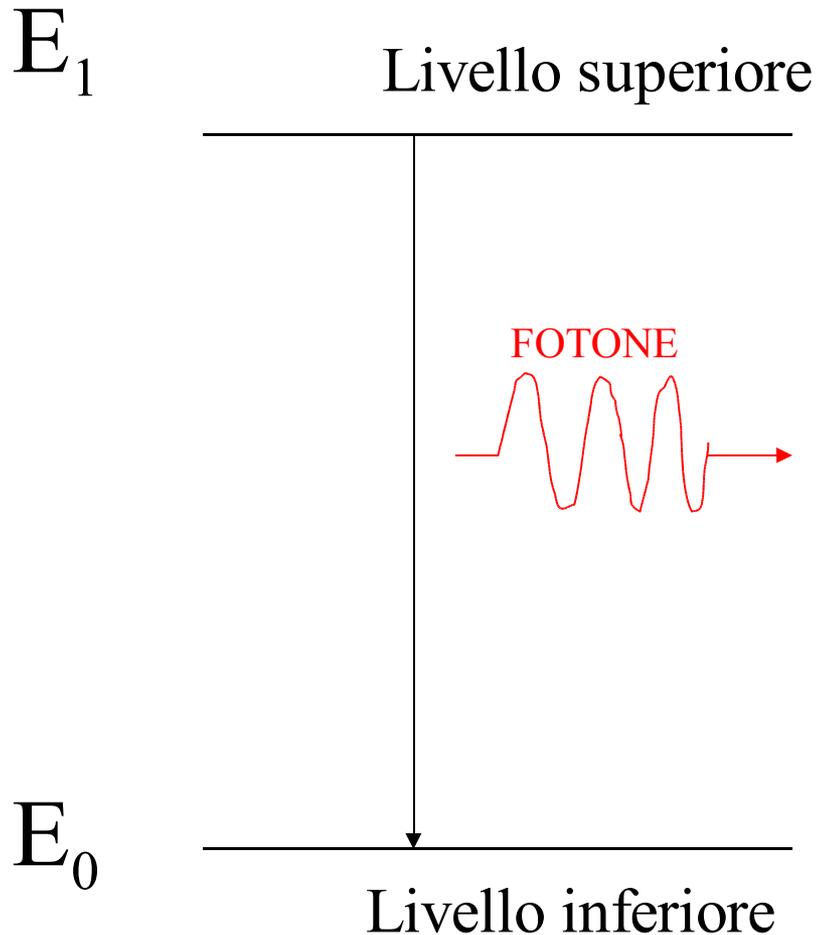
- Regola d'oro di Fermi: la probabilità di transizione Γ per unità di tempo tra il livello i (iniziale) e f (finale) è data da:

$$\Gamma = \frac{2 \cdot \pi}{\hbar} \cdot |W_{fi}|^2 \cdot \rho(E_f = E_i)$$

dove W_{fi} è l'elemento di matrice di accoppiamento e ρ la densità degli stati calcolata per questo stato.



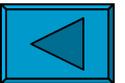
EMISSIONE SPONTANEA



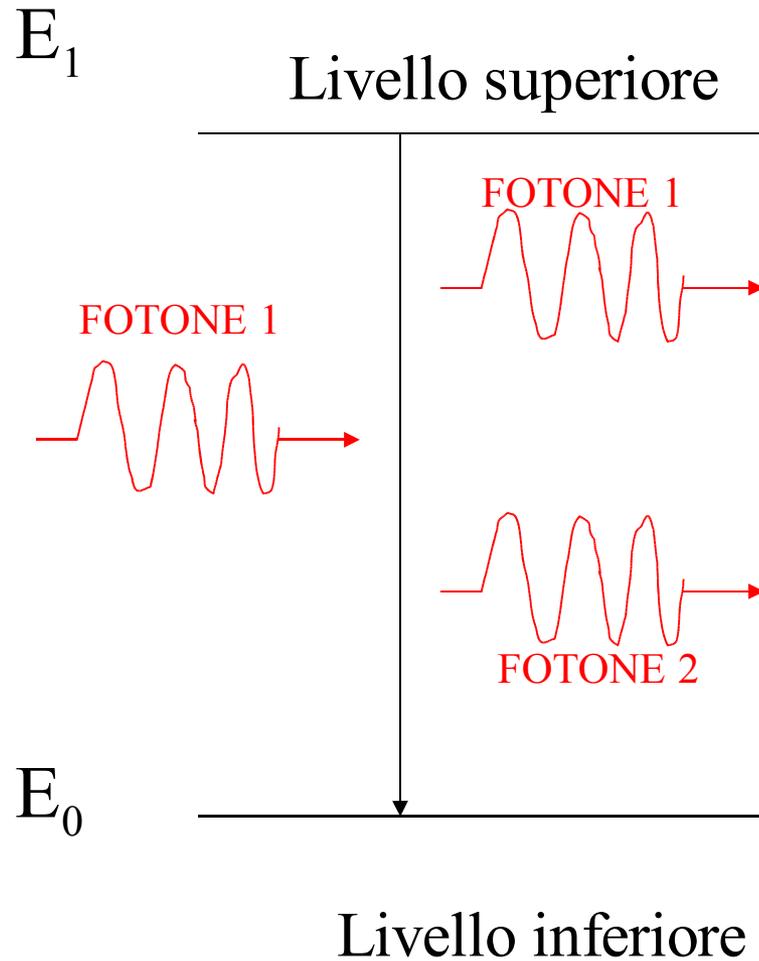
$$\nu = \frac{E_1 - E_0}{h}$$

Emissione spontanea

$$\frac{dN_1}{dt} = -A \cdot N_1$$

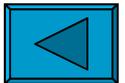
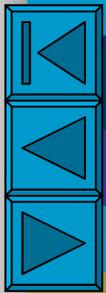


EMISSIONE STIMOLATA

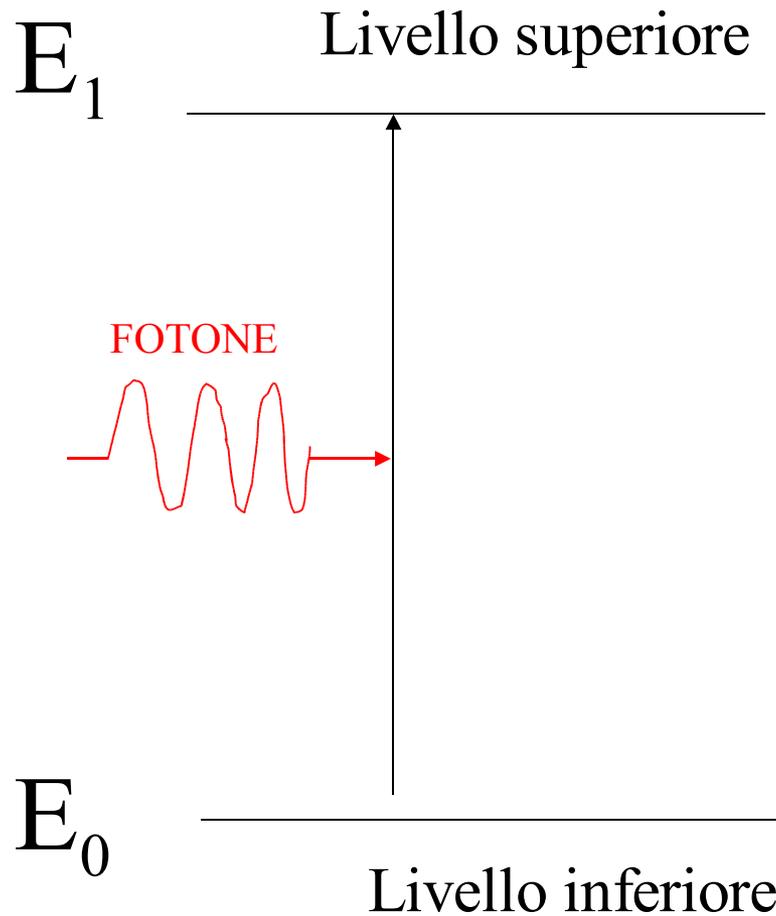


Emissione stimolata

$$\frac{dN_1}{dt} = -W_{10} \cdot N_1$$



ASSORBIMENTO

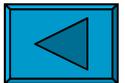


Assorbimento

$$\frac{dN_0}{dt} = -W_{01} \cdot N_0$$

$$W_{01} = \sigma_{01} \cdot F$$

$$\sigma_{01} = \sigma_{10} = \sigma$$

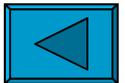


IL COEFFICIENTE DI GUADAGNO

- Il parametro fondamentale che caratterizza il mezzo attivo, come materiale laser, è il guadagno

$$G = e^{(\alpha - \beta) \cdot l} = e^{(\gamma_0 \cdot l)}$$

- Dove α è il coefficiente di guadagno (cm⁻¹), β il coefficiente di riassorbimento, l la lunghezza del materiale attivo nella direzione di amplificazione e γ_0 il coefficiente di guadagno netto.
- Il coefficiente α può essere espresso in termini di rapporto tra fotoni entranti ed uscenti dall'unità di lunghezza e può essere derivato in due modi:
 - Come processo di emissione stimolata (**trattamento di Einstein**)
 - Come **processo cooperativo**



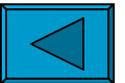
TRATTAMENTO DI EINSTEIN

- SI PUÒ SCRIVERE

$$\alpha = \frac{\gamma^* \Delta N / L}{1/T_d} =$$
$$= \frac{\gamma^* \cdot \Delta N}{c}$$

- Dove:

- ' $\Delta N = N_1 - N_0$ è l'inversione di popolazione (cm^{-3})
- ' γ^* è il coefficiente di emissione stimolata ($\text{s}^{-1} \text{cm}^{-3}$), dipendente dal materiale
 - $T_d = L/c$ è il tempo di decadimento del fotone nel materiale attivo
 - c è la velocità della luce



PROCESSI COOPERATIVI

- Si può scrivere:

$$\alpha = \frac{1}{\frac{\tau_R \cdot L}{T_2}}$$

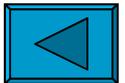
- Dove:

· τ_R è il tempo di decadimento collettivo (s⁻¹)

– T_2 è il tempo di decadimento degli elementi non diagonali della matrice densità

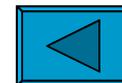
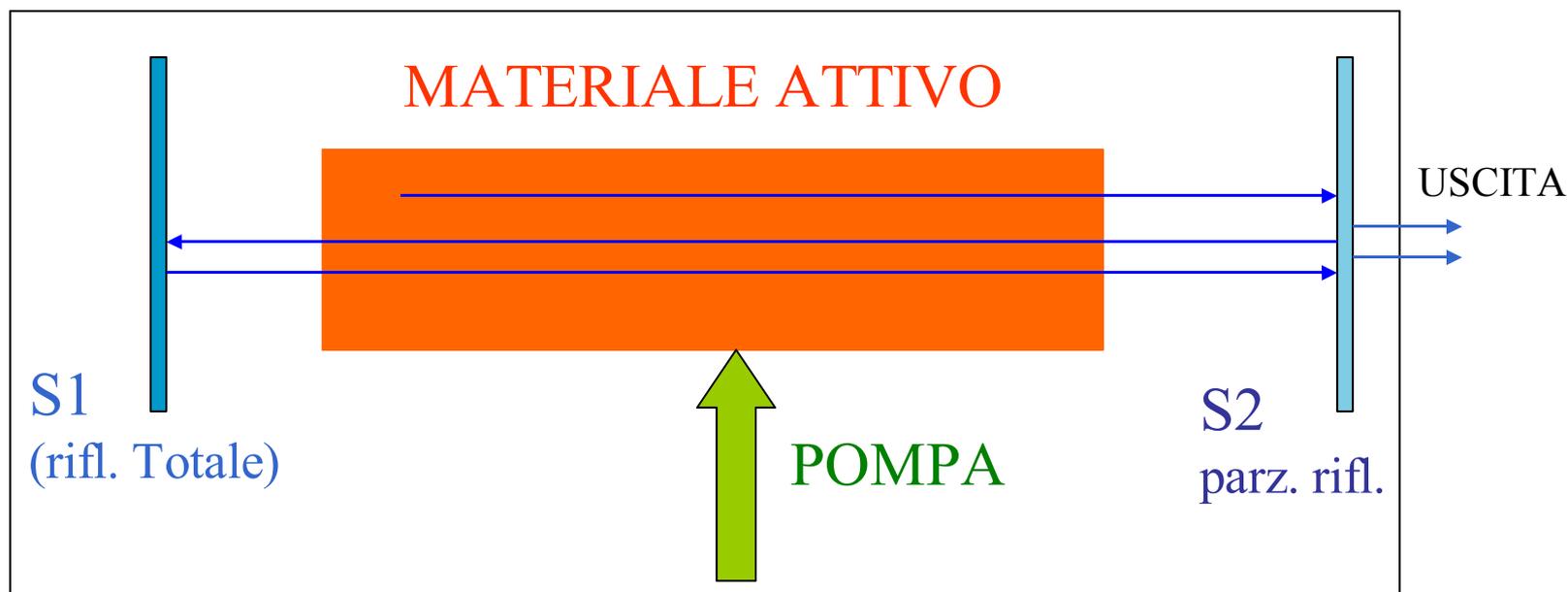
- Esprimendo τ_R e T_2 si ottiene di nuovo

$$\alpha = \frac{\gamma^* \cdot \Delta N}{c}$$



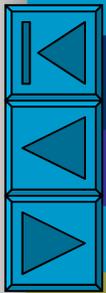
IL PARADIGMA DEL LASER

- MATERIALE ATTIVO (CRISTALLO, GAS, LIQUIDO) +
- CAVITÀ (SPECCHI S1 ed S2) +
- POMPA



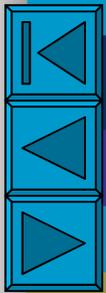
CARATTERISTICHE DELLA LUCE LASER

- ELEVATA DIREZIONALITÀ
- ELEVATA INTENSITÀ
- MONOCROMATICITÀ
- COERENZA SPAZIALE E TEMPORALE



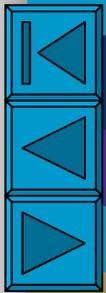
TIPI DI LASER

- A STATO SOLIDO (CRISTALLI DROGATI)
- A GAS (He-Ne, CO₂)
- A LIQUIDI (COLORANTI)
- A SEMICONDUCTORI
- A ELETTRONI LIBERI



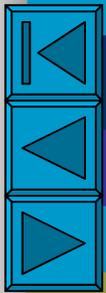
IL LASER A CO₂

- Il **MATERIALE ATTIVO** È UNA **MISCELA GASSOSA** (che fluisce in un circuito in cui è stato fatto preventivamente il vuoto):
 - He 82.0%
 - N₂ 13.5%
 - **CO₂ 4.5%**
- La **POMPA** è UNA **SCARICA ELETTRICA** che eccita le molecole di azoto, che a loro volta eccitano le molecole di CO₂
- L'emissione laser ha luogo dal livello eccitato della molecola di CO₂ a $\lambda=10.6 \mu\text{m}$
- Gli atomi di elio, con la loro elevata mobilità, favoriscono lo smaltimento di calore di tutta la miscela, poiché tendono a spopolare il livello laser inferiore (migliorano l'inversione di popolazione)

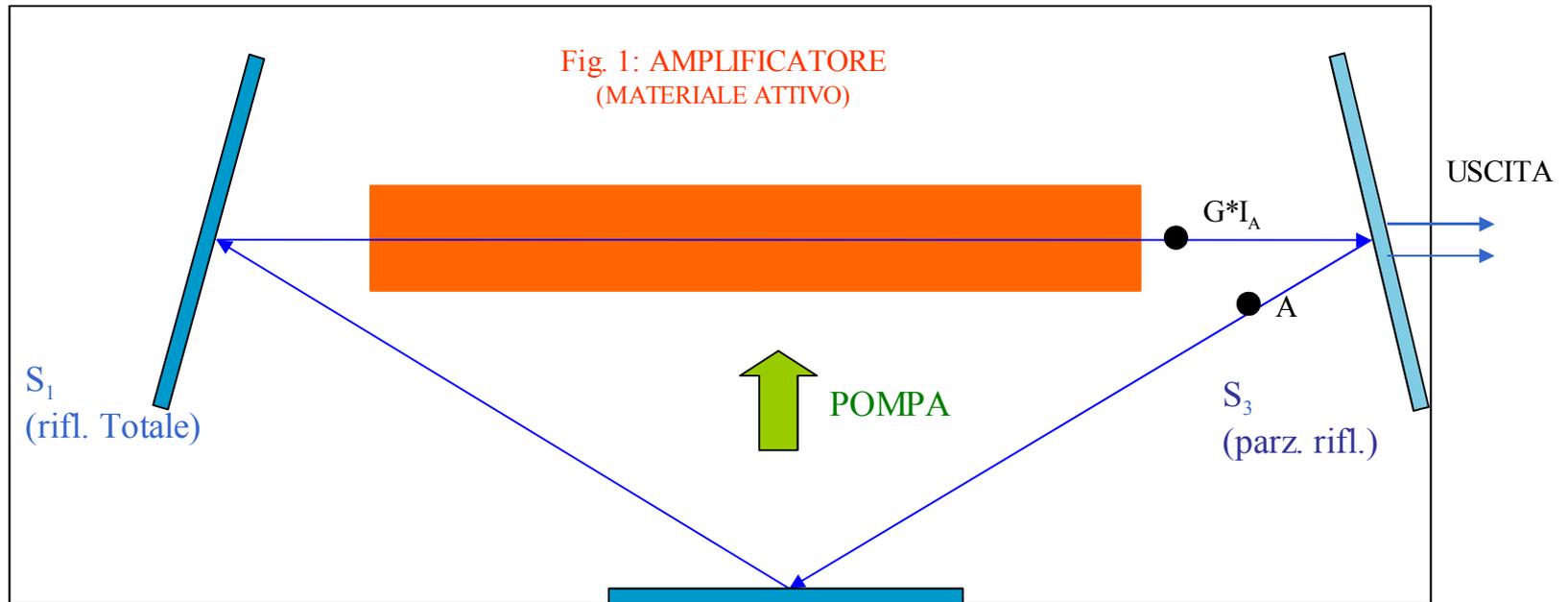


GLOSSARIO

- EMISSIONE STIMOLATA
- CAVITÀ
- MATERIALE ATTIVO
- POMPA
- LUNGHEZZA D'ONDA λ
- FREQUENZA ν
- POLARIZZAZIONE
- COERENZA
- QUANTIZZAZIONE



CONDIZIONI DI OSCILLAZIONE



$$G_0 = e^{g_0 l}$$

$$(1 - T) \cdot (1 - A) \cdot G_0 > 1$$

STAZIONARIETÀ

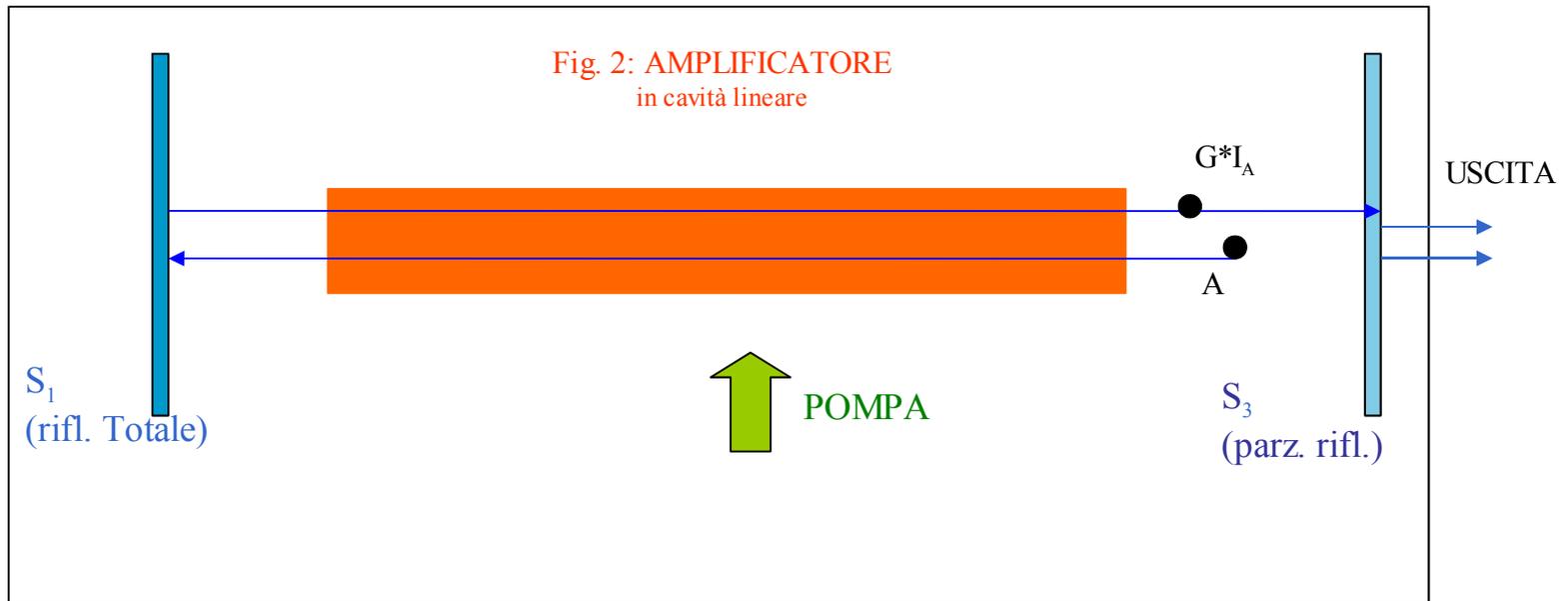
$$E_A(t) = E_0 \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi)$$

$$E'_A(t) = \sqrt{R \cdot (1 - A) \cdot G(I)} \cdot E_0 \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi - \psi)$$

$$\psi = 2 \cdot \pi \frac{L}{\lambda}$$

INTENSITÀ

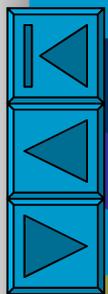
$$G(I) = \frac{1}{(1 - T) \cdot (1 - A)}$$



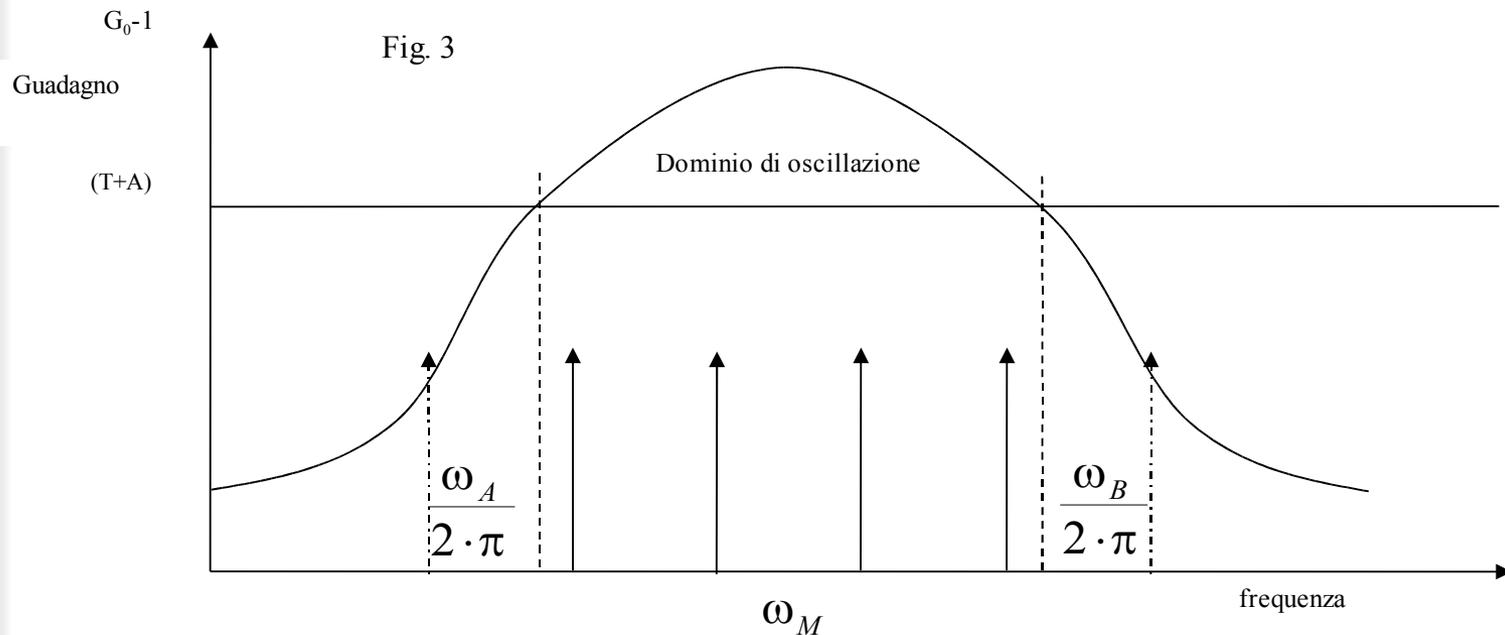
$$G^2(I) = \frac{1}{(1 - T) \cdot (1 - A_l)^2}$$

FASE

$$\psi = 2 \cdot \pi \cdot p$$



FREQUENZA DI OSCILLAZIONE



$$f \equiv \frac{\omega}{2 \cdot \pi} = p \cdot \frac{c}{L}$$

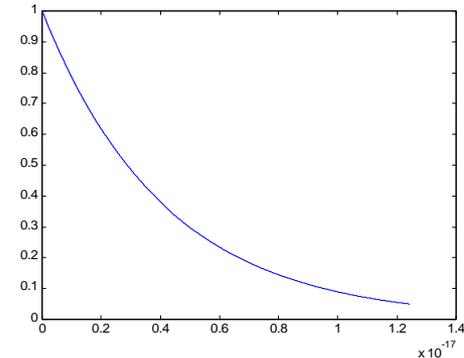
NECESSITÀ DI UN'INVERSIONE DI POPOLAZIONE

$$\frac{dI(z)}{dz} = -\frac{I(z)}{L''}$$

$$\frac{1}{L''} = \frac{(N_0 - N_1)}{V} \cdot \sigma_{abs}$$

$$I(z) = I(0) \cdot e^{\left(-\frac{z}{L''}\right)}$$

```
KB=1381e-23;h=6.626e-34;
c=2.998e8;lambda=10.6e-6;T=300;
E=linspace(0,3*KB*T,2000);
N1suN0=exp(-E/(KB*T));
plot(E,N1suN0)
```



$$N_1 > N_0$$

$$K_B = 1.381 \cdot 10^{-23} \text{ J } \text{ } ^\circ\text{K}^{-1}$$

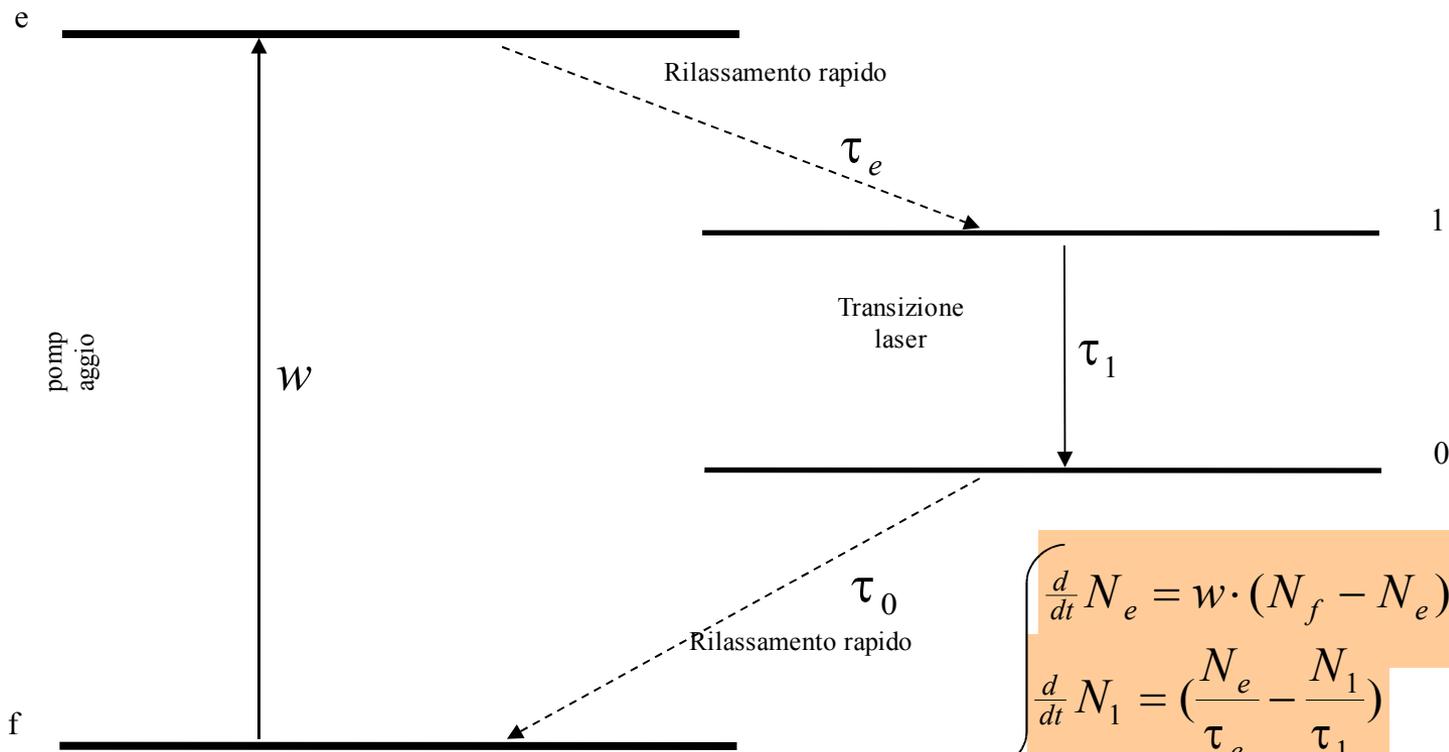
T in $^\circ\text{K}$

$$h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$$

$$c = 2.998 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$$

$$\left(\frac{N_1}{N_0}\right)_{eq.term.} = \exp\left(-\frac{E_1 - E_0}{k_B \cdot T}\right)$$

INVERSIONE DI POPOLAZIONE NEI SISTEMI A 4 LIVELLI



$$\begin{cases} \frac{d}{dt} N_e = w \cdot (N_f - N_e) - \frac{N_e}{\tau_e} \\ \frac{d}{dt} N_1 = \left(\frac{N_e}{\tau_e} - \frac{N_1}{\tau_1} \right) \\ \frac{d}{dt} N_0 = \left(\frac{N_1}{\tau_1} - \frac{N_0}{\tau_0} \right) \\ N_f + N_0 + N_1 + N_e = N \end{cases}$$

$$\frac{d}{dt} N_i = 0$$

$$\tau_e, \tau_0 \ll \tau_1$$

$$N_1 > N_0$$



BIBLIOGRAFIA

- P. Fabeni, G. P. Pazzi, L. Salvini, Phys. Chem. Solids **52**, No. 1, 299 (1991)
- Laser e Fotonica, Le Scienze quaderni n. 63, 1991
- M. Bertolotti, Storia del Laser, Bollati Boringhieri (1999)
- G. Grynberg, A. Aspect, C. Fabre, Introduction aux laser et à l'optique quantique, Ellipses, 1997

