

# CORSO DI FORMAZIONE PER TECNICO SICUREZZA LASER (TSL) E ADDETTO SICUREZZA LASER (ASL) PRINCIPI DI FUNZIONAMENTO DEL LASER

LUISA BIAZZI e ALESSANDRA TOMASELLI (in ricordo)
Milano, febbraio 2023



## Risultati della ricerca di maggiore impatto sulla società tecnologica e dell'informazione dal 1950 ad oggi:

• dispositivi a semiconduttore (fine anni 1940)

LASER
 (inizio anni 1960)

#### Cos'è un LASER?

Un laser è una sorgente di luce speciale che non esiste in natura!

L ight

A mplification by

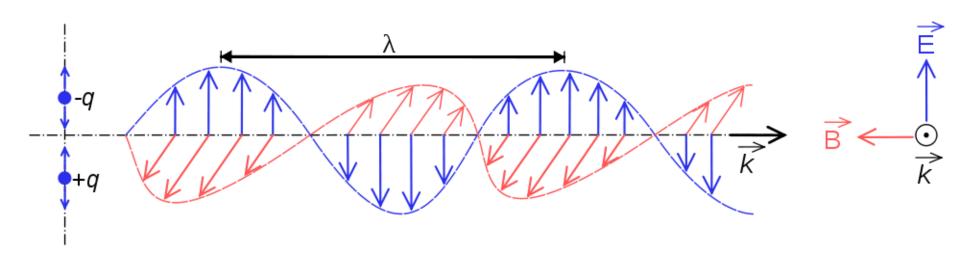
**S** timulated

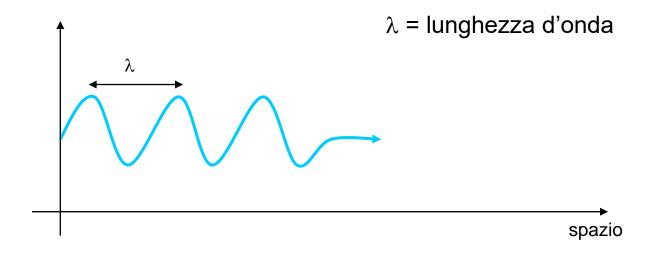
E mission of

R adiation

La luce LASER è un'onda elettromagnetica

Le onde elettromagnetiche sono generate da cariche elettriche in accelerazione (decelerazione) e sono formate da un campo elettrico (E) e un campo magnetico (B) che oscillano sincronizzati nello spazio e nel tempo

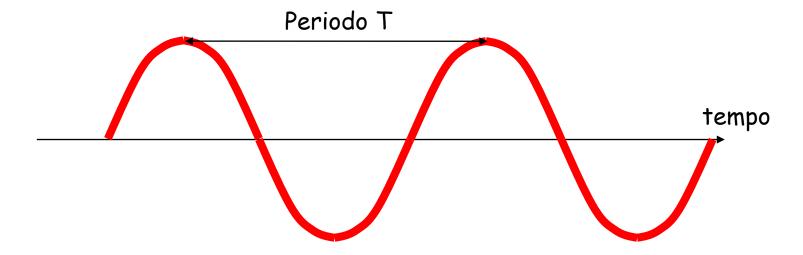




unità di misura di  $\lambda$  m, in ottica nm

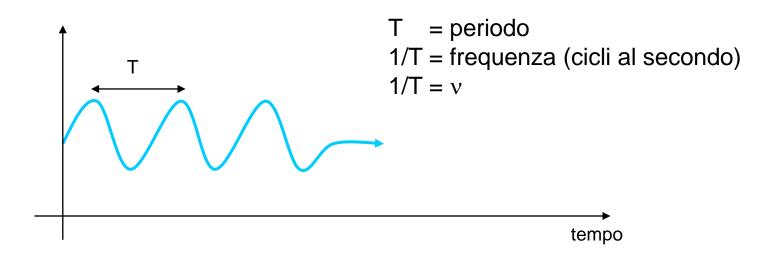
micro = $10^{-6}$ nano = $10^{-9}$ pico = $10^{-12}$ 

Ora fermo lo spazio (osservo un punto fisso)



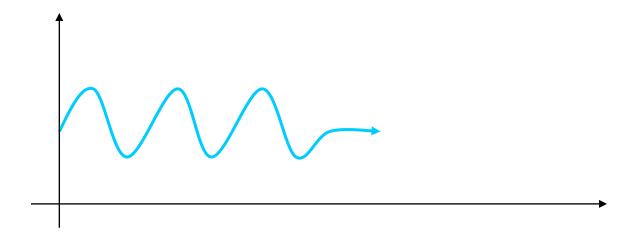
La frequenza dell'onda è il numero di oscillazioni che l'onda compie in 1 secondo

f = 1 /T si misura in Hertz (Hz)



unità di misura di v Hz, in ottica THz

Mega =  $10^6$ Giga =  $10^9$ Tera =  $10^{12}$ 

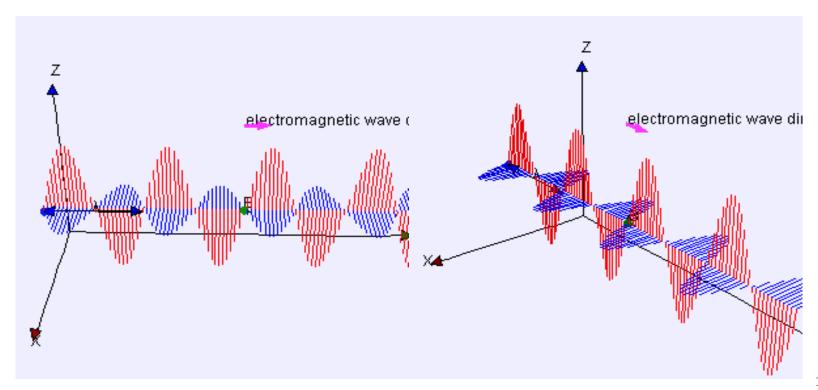


```
velocità = spazio/tempo
velocità onda e.m. = \lambda/T = \lambda v
```

velocità onda e.m. = c = 300000 Km/s c = velocità della luce

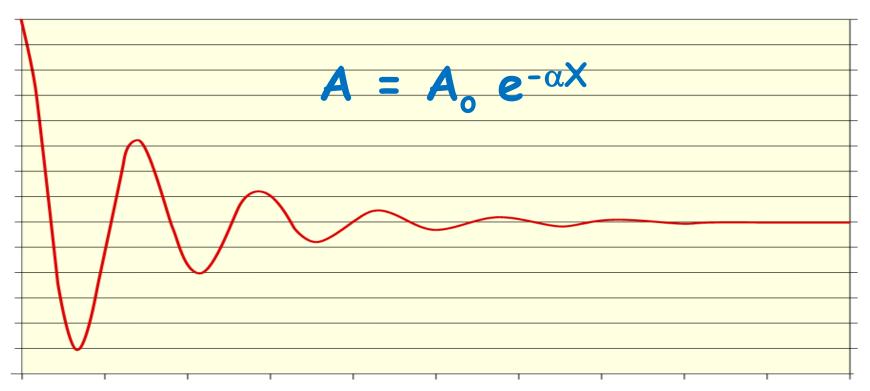
#### **Equazione delle onde**

$$E = E_0 \sin(2\pi f + 2\pi y/\lambda)$$



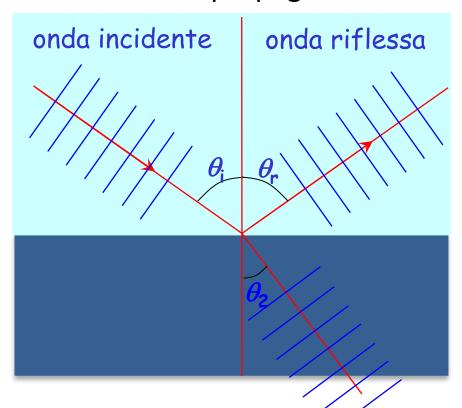
#### **Attenuazione**

quando le onde vengono assorbite (perdono energia) e la loro ampiezza diminuisce secondo una legge esponenziale



#### Riflessione

L'onda cambia direzione quando le caratteristiche del mezzo in cui si propaga cambiano



Legge di Snell n1 sin  $\theta_i$  = n2 sin $\theta_2$ 

#### quanto di energia luminosa

- l'onda e.m. trasporta energia
- l'energia è trasportata in pacchetti
- il pacchetto più piccolo è detto quanto
- il quanto di energia luminosa è detto

#### **FOTONE**

## energia di un fotone

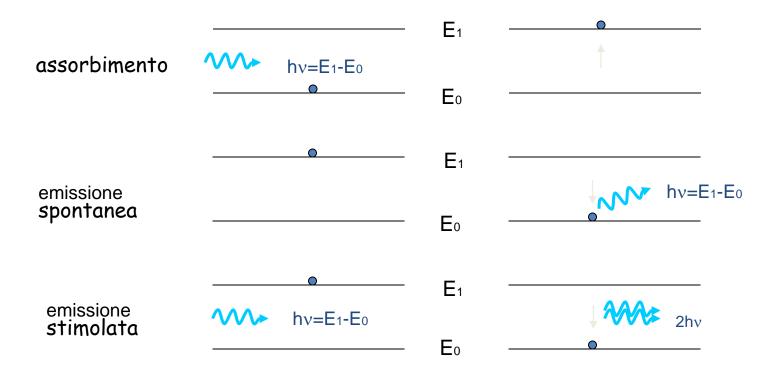
$$E = hv$$

 $h = costante di Plank = 6.6 10^{-34} Js$ 

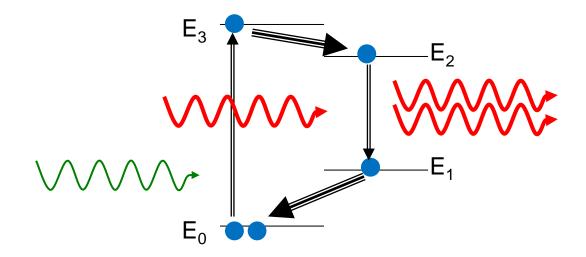
nel visibile E= qualche elettronVolt

- L ight
- A mplification by
  - **S** timulated
    - E mission of
      - **R** adiation

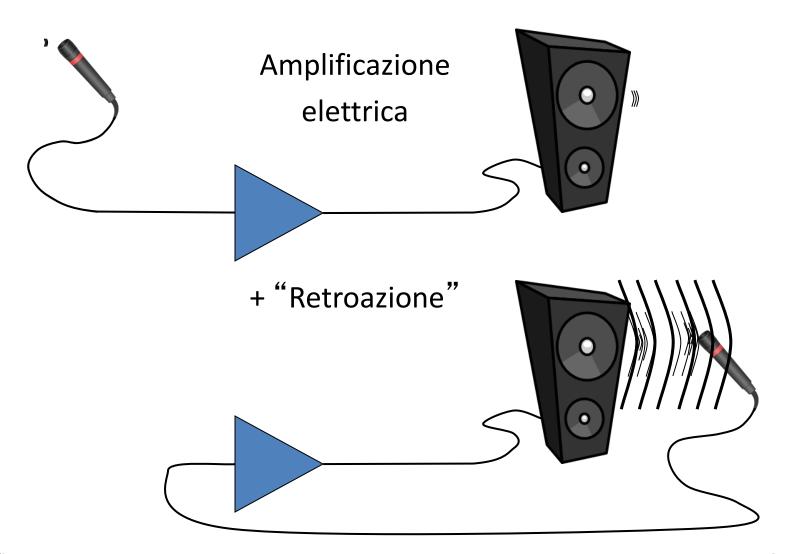
#### interazione radiazione-materia



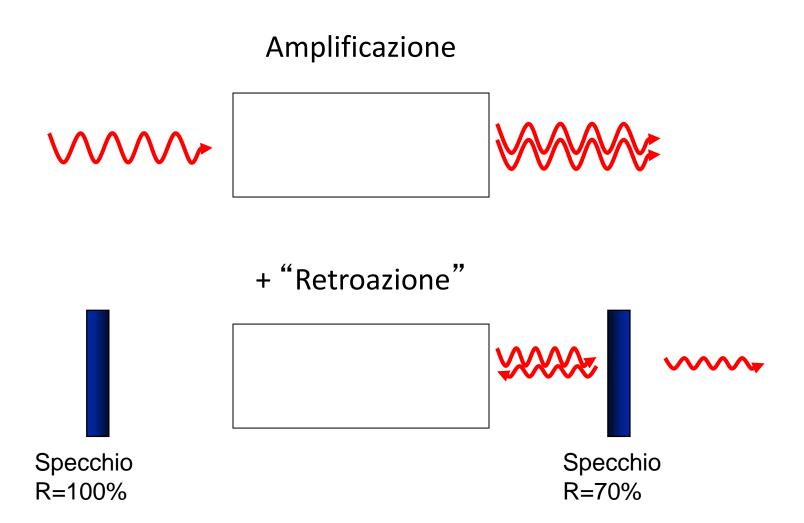
Amplificazione ottica efficiente



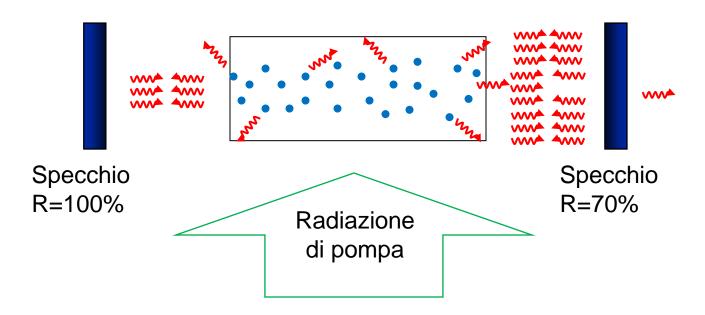
Schema a 4 livelli per ottenere L'INVERSIONE DI POPOLAZIONE ovvero la maggior parte degli atomi allo stato eccitato



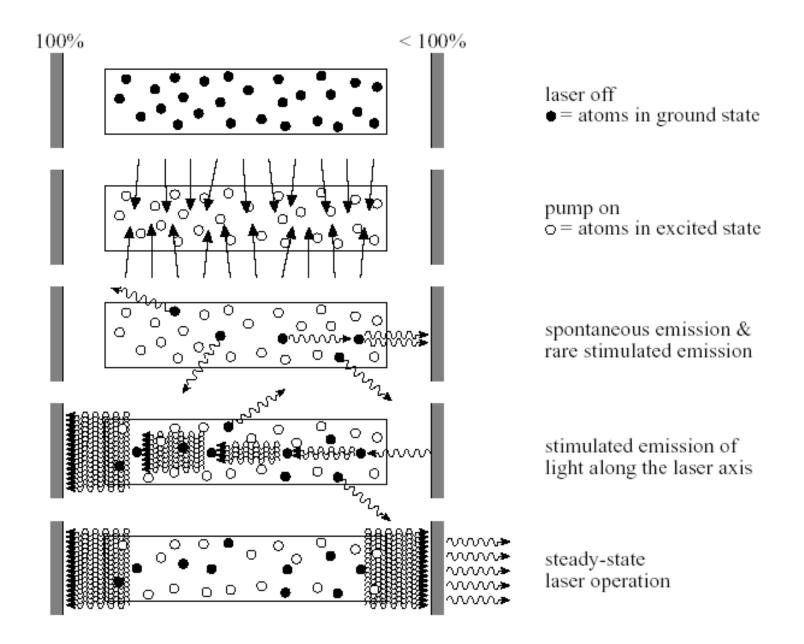
A.Tomaselli

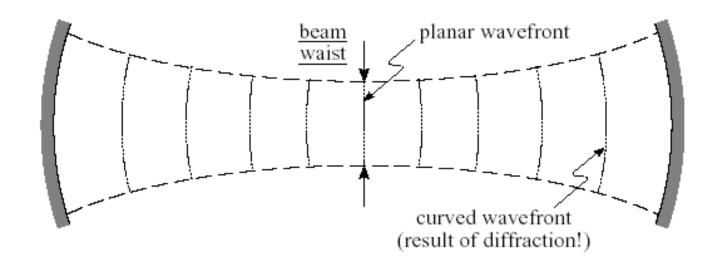


#### Amplificazione ottica

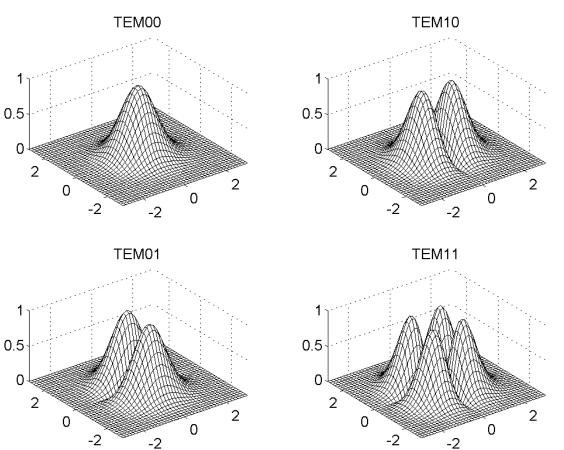


L'oscillazione laser viene innescata dall'emissione spontanea di fotoni lungo l'asse della cavità.





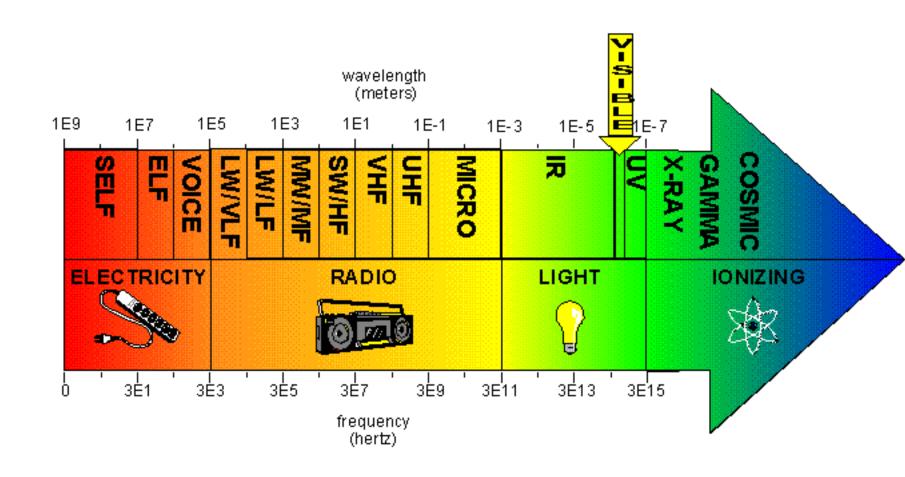
#### Emissione su modi gaussiani



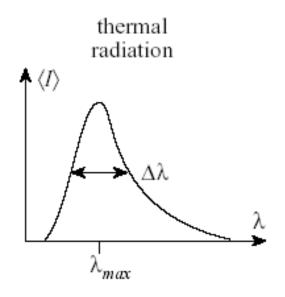
#### Caratteristiche del laser

- Lunghezza d'onda
- Coerenza
- Direzionalità Divergenza
- Brillanza
- Grande intensità

## Lunghezza d'onda

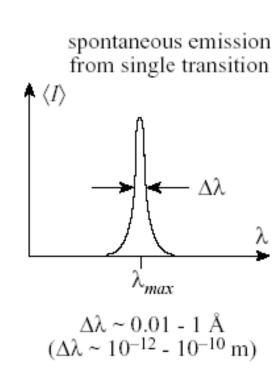


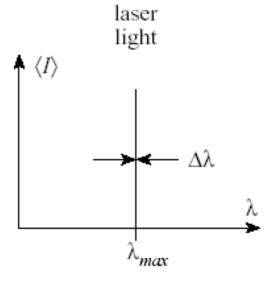
#### Monocromaticità



 $\Delta \lambda \sim 100$ 's - 1000's nm

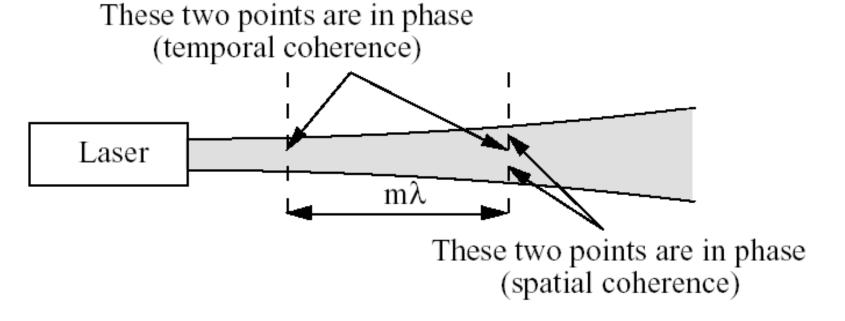
 $(\Delta \lambda \sim 10^{-7} - 10^{-6} \text{ m})$ 



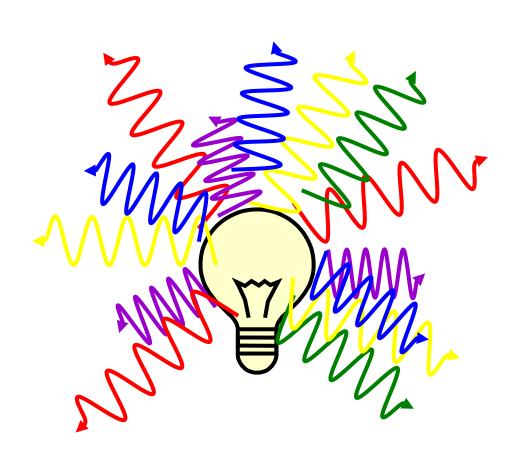


$$\Delta\lambda \sim 10^{-20}$$
 -  $10^{-12}$  m !

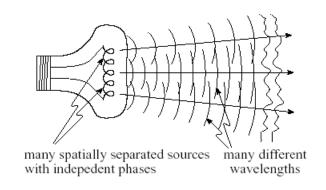
#### Coerenza spaziale e temporale

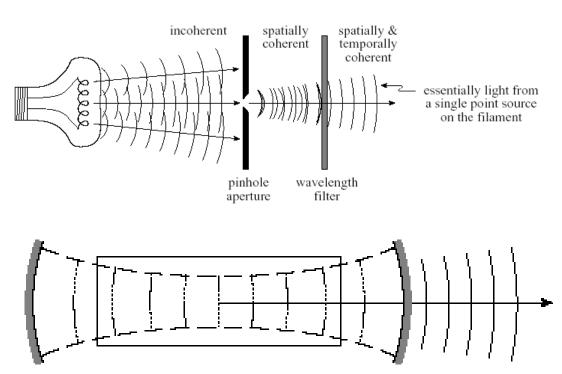


## Caratteristiche principali

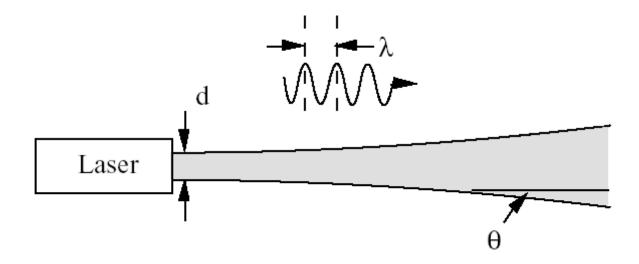








### Direzionalità e Divergenza

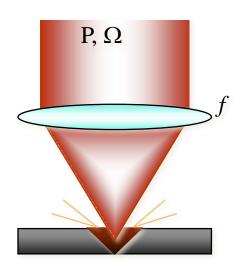


 $\theta \approx \lambda/d$  divergenza in campo lontano proporzionale alla lunghezza d'onda

#### Brillanza

$$B = \frac{Potenza}{Area \quad Ang.solido} = \frac{P}{\lambda^2 M^2}$$

#### Grande intensità



$$I_{max} = \frac{2P}{f^2 \Omega}$$

I LASER possono essere divisi secondo diversi schemi:

#### Mezzo Attivo (amplificatore):

- a stato solido (cristalli/vetri)

- a gas

- a semiconduttore

#### Durata della luce :

- onda continua
- impulsi lunghi ( $t > 10^{-9}$ s)
- impulsi corti  $(t < 10^{-9}s)$
- impulsi ultracorti  $(t < 10^{-12}s)$

#### Classe di pericolosità:

- 1 (non pericoloso)
- 2 (rischio basso, P<1mW, VIS)</li>
- 3R (rischio medio, P<5mW, VIS)
- 3B (rischio alto, P<500 mW
- 4 (richio alto anche x fasci diffusi possibilità di incendi)

#### Applicazioni (e potenza!):

- sensoristica (bassa)
- comunicazioni (media)
- lavorazioni di materiali (alta)

a stato solido: il materiale è un cristallo o vetro con diffusione di atomi attivi

Pompaggio ottico (lampade, diodi laser, altre sorgenti laser):

Rubino (potenza)  $\lambda$  = 694 nm Neodimio (potenza, cw e impulsato)  $\lambda$  = 0.9, 1, 1.3 e 1.4 um ... Vibronici (mode-locking) larga banda In fibra (telecom, potenza)  $\lambda$  = 1, 1.3 e 1.55 um  $\lambda$  = 0.55, 1.55 e 2.9 um

a gas: il mezzo attivo è costituito da un gas di ioni, atomi o molecole, in tubo sigillato o in flusso

#### Pompaggio a scarica elettrica (kV):

He-Ne (metrologia)  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ 

CO2 (potenza, cw e impulsato)  $\lambda = 10.6$  um

Eccimeri (potenza) varie UV (400-200 nm)

Ionici Kr, Ar (potenza)  $\lambda = 514,488,674 \text{ nm}$ 

Vapori di Cu (potenza)  $\lambda = 510 \text{ nm}$ 

a colorante (dye): coloranti in flusso o a stato solido (rodammina 6G, fluorescina, cumarina, stilbene, umbelliferone, tetracene, verde malachite).

Pompaggio ottico (lampade, diodi laser, altre sorgenti laser)

Rodamina 6G (Mode locking)  $\lambda = da 580 a 650 nm$ 

Rodamina 6G + cicloottatetraene → 1.4 kilowatt a 585 nm

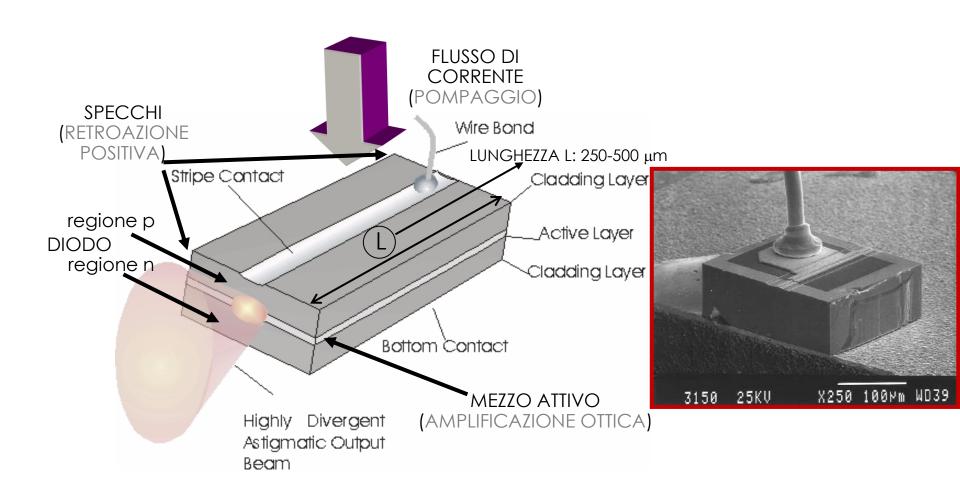
### Tipi di laser

a semiconduttore (diodi laser): luce generata dalla ricombinazione elettrone-lacuna in una complicata struttura a eterogiunzione (i diodi laser rappresentano la fascia più ampia di laser sul mercato).

#### Pompaggio elettrico

AlGaAs, ZnSe, GaN, InP  $\lambda$  = da 420 nm a 2 um (Telecomunicazioni, metrologia, potenza)

## Tipi di laser



## Quali tipi

In base alla durata di emissione, vengono classificati in:

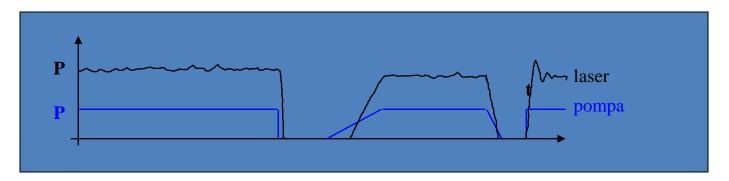
Laser continui Laser impulsati

- -impulsi giganti (QS) ns
- -impulsi ultracorti (ML) ps, fs

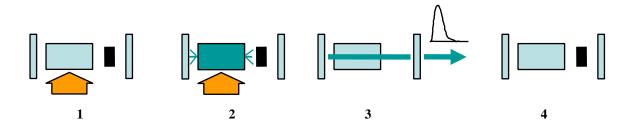
# Regimi di funzionamento

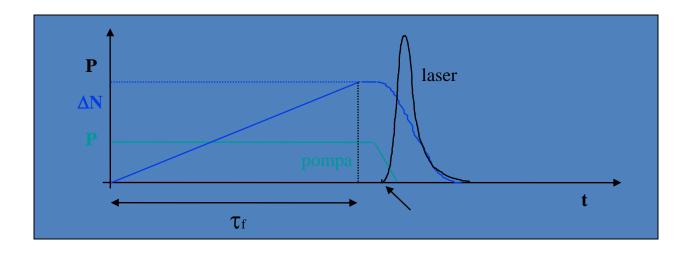
#### Free running

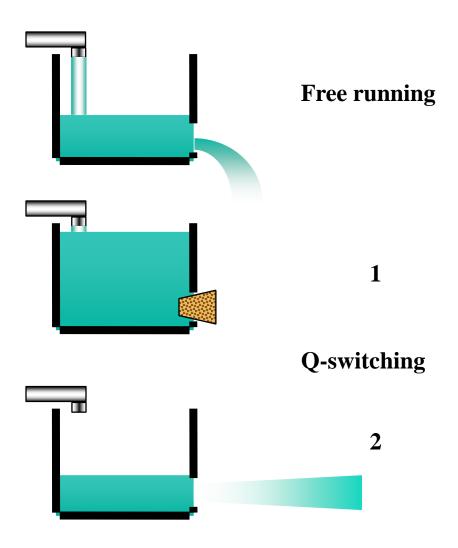
L'oscillatore genera azione laser in risposta al pompaggio liberamente.



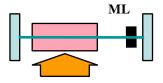
#### Q-switching: alta energia, ns

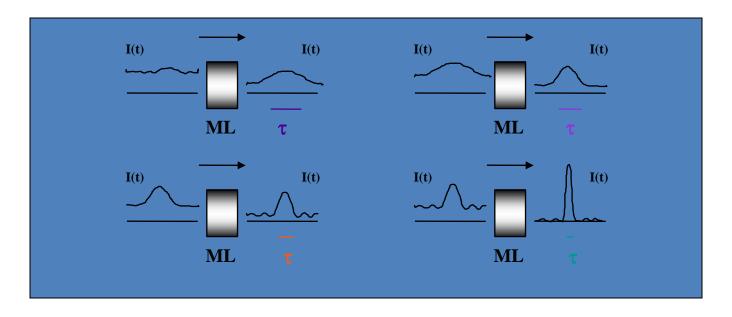




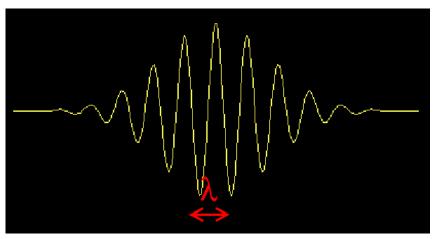


#### mode-locking: alta intensità, ps e fs





## Impulsi ultracorti (fs)



#### Ordini di grandezza:

1 femtosecondo=10<sup>-15</sup>s

Alla velocità della luce: in 1 s, 300000 km, 11 190 fs, 30  $\mu m$ 

Alla velocità del suono: in 1 s, 300 m; in 100 fs, 0.3 A



0

## Le tre qualità degli impulsi al fs:

durata ultracorta

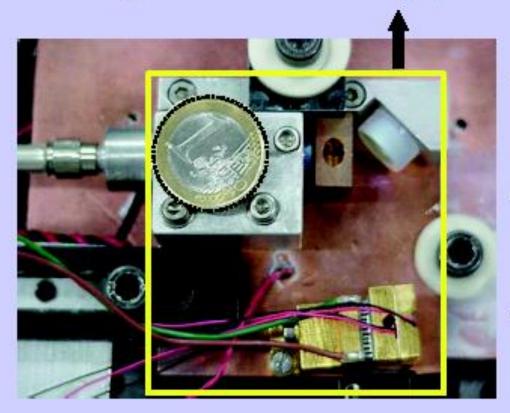
studio dei fenomeni ultrarapidi

 (Energia/durata)=Potenza elevata fisica delle alte intensità

 effetti nonlineari importanti generazione di nuove lunghezze d'onda, processi multifotonici

#### sorgenti continue

Sorgenti miniaturizzate a Nd: YVO4 duplicate intracavità



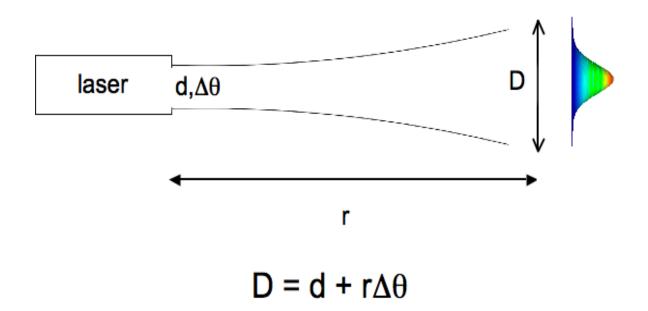
- Emissione 532 nm
  - Pmax=10W
  - Utilizzo diretto o come pompa di Ti:zaffiro
- Emissione 671 nm
  - Pmax= 5W
  - Utilizzo diretto o come pompa di Cr:Lisaf
- Emissione 456 nm
  - Pmax= 200 mW
  - Utilizzo diretto

A.Tomaselli 46

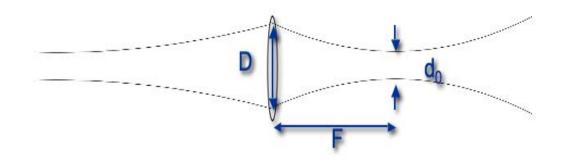
#### Come si propagano

- 1-Propagazione diretta
- 2-Dopo un sistema ottico
- 3-Da fibra
- 4-Dopo riflessione fissa o mobile
- 5-Dopo diffusione

## 1-propagazione diretta

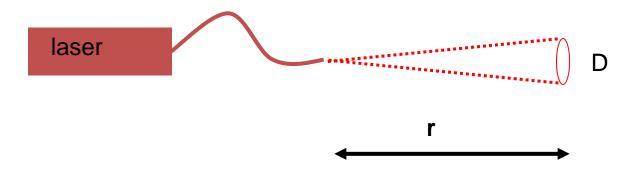


## 2-dopo un sistema ottico



 $d_0 \approx F\lambda/D$ F = focale della lente

#### 3-da fibra



Fibra multi-modo

D=2r(AN)/1.7

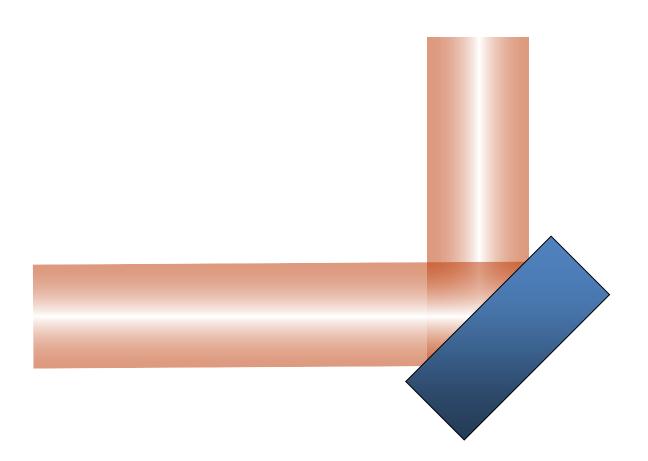
 $AN = \sin(\varphi/2)$ 

Fibra mono-modo

 $D = 2\sqrt{2r}\lambda/a$ 

a = diametro del campo modale

# 4-dopo riflessione fissa o mobile



# 5-dopo diffusione



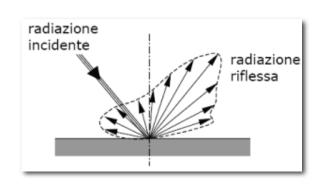
#### riflessione diffusione

• Riflessione speculare



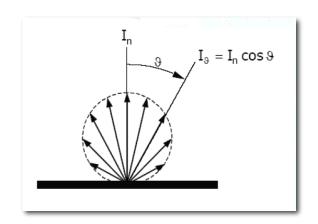
- $\theta_r = \theta_i$
- raggi e normale sullo stesso piano

Riflessione mista



Sovrapposizione componente speculare e diffusa

 Diffusione Lambertiana



- Intensità radiante che varia con il coseno
- Radianza costante

#### riflessione diffusione

#### Dipendenza dalla rugosità superficiale e dalla λ:

 Riflessione speculare rugosità superficiale < λ</li>

Riflessione diffusa
 rugosità superficiale > λ

#### L'occhio e il laser

 Differenza tra sorgente estesa e sorgente puntiforme

Concetto di sorgente apparente

### Sorgente puntiforme-1

una sorgente altamente collimata genera un'immagine puntiforme sulla retina (20-25 µm).

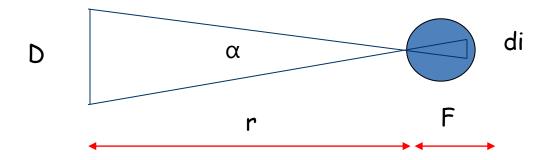


## Sorgente puntiforme-2

una sorgente <u>divergente</u> genera un' immagine puntiforme sulla retina se il diametro apparente α è minore di α<sub>min</sub>.

#### Sorgente estesa

se l'immagine non è puntiforme la sorgente è estesa



• grazie