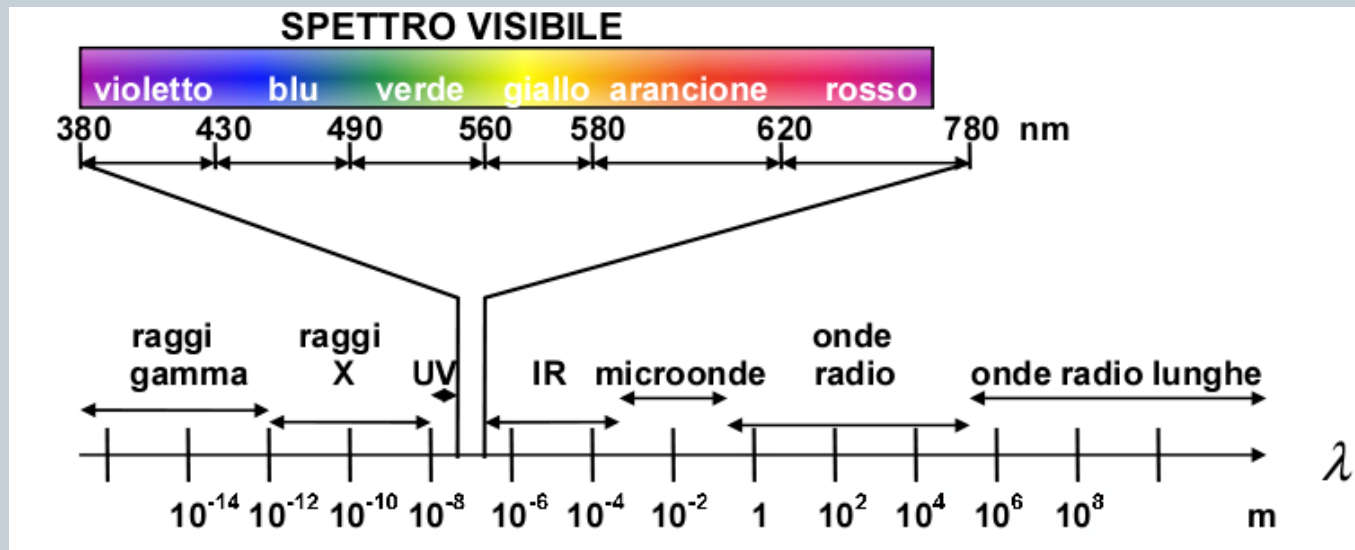


# Il Laser e le sue applicazioni

**LASER** — Light **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation



Prof. Paolo Lenisa - Università di Ferrara

# Introduzione

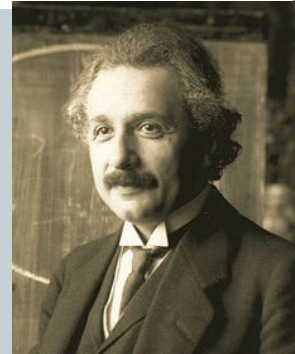
2

- Storia
- Proprietà della radiazione laser

# Evoluzione storica

3

1917: Einstein – emissione ed assorbimento stimolato



1954: Townes and Schawlow - maser  
- predizione del laser ottico – Premio Nobel (1964)

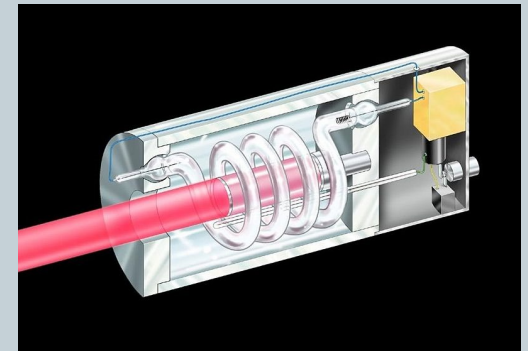
1960: Maiman – prima realizzazione di un laser: laser a rubinio

Rapido sviluppo anni 1960:

1961: primo laser a gas, primo Nd laser

1962: primo laser a semiconduttore

1963: CO<sub>2</sub> laser (IR)

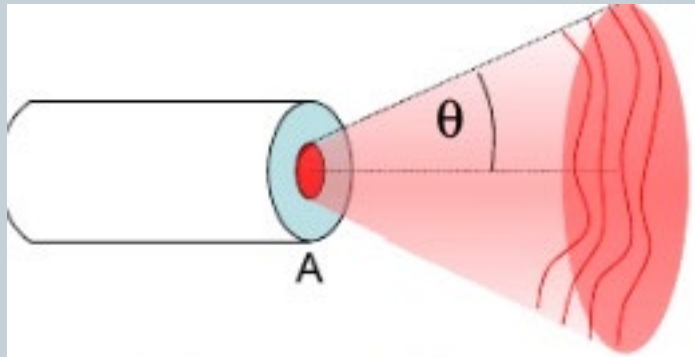


# Perchè i laser sono „speciali“?

4

Proprietà generali sorgenti ottiche:

- spaziali;
- temporali;
- spettrali.

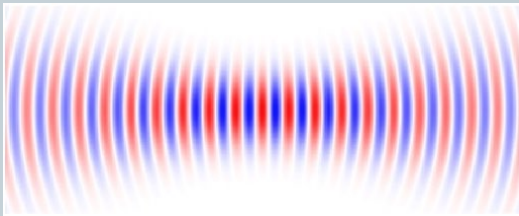


I laser offrono le migliori specifiche per tutte tre le proprietà.

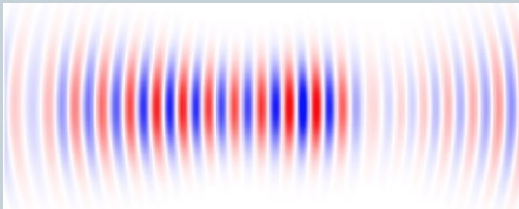
# Proprietà della luce laser: coerenza

5

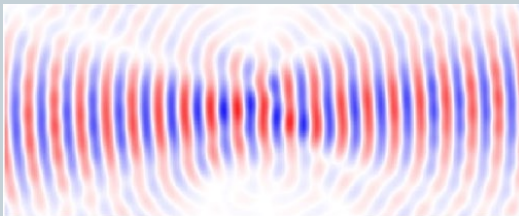
Un fascio di luce è detto **coerente** se esiste una determinata **relazione di fase** per il campo elettrico in **posizioni diverse per tempi diversi**.



1. Fascio “gaussiano”
  - buona coerenza spaziale
  - buona coerenza temporale.



2. Fascio “gaussiano”
  - buona coerenza spaziale
  - non buona coerenza temporale



3. Fascio “gaussiano”
  - non buona coerenza spaziale
  - buona coerenza temporale

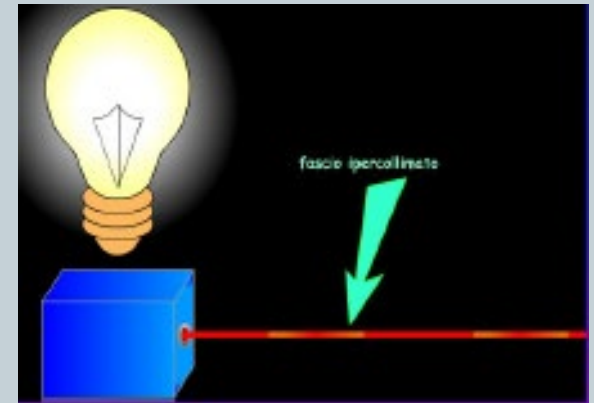
*Laser:*

- *Coerenza spaziale fino a centinaia di Km;*
- *Coerenza temporale fino a ms*

# Proprietà della luce laser: unidirezionalità

6

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

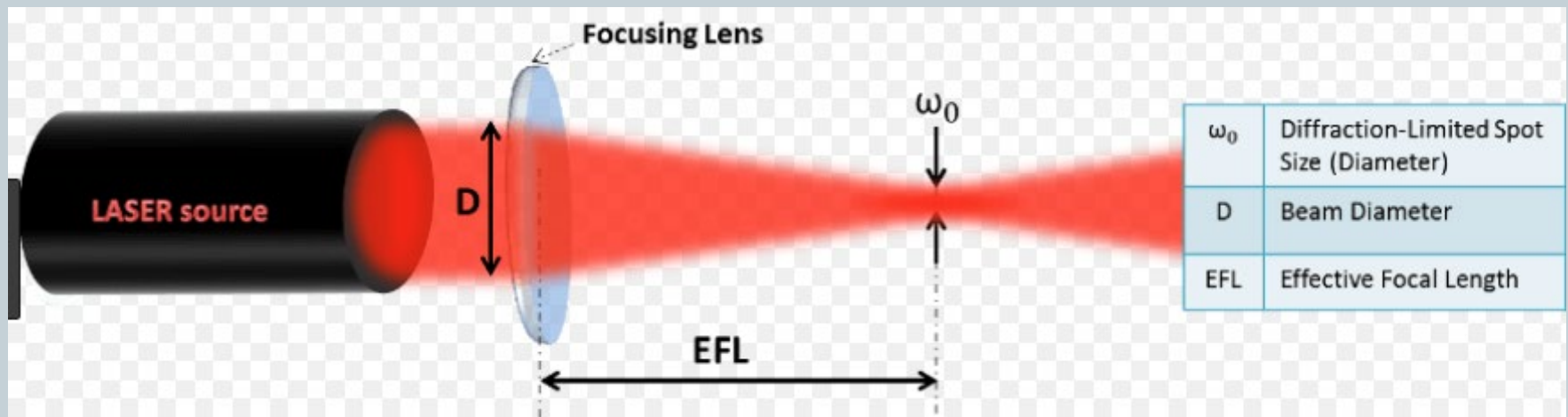


La proprietà di **unidirezionalità** dei fasci laser è legata alla **coerenza spaziale** ed è una conseguenza **dell'emissione stimolata** e della **cavità risonante** del laser.

*Il fascio verde di un laser ad Argon con diametro iniziale di 1 cm di diametro si allarga fino a 3 cm dopo un percorso di 500 metri.*

# Proprietà della luce laser: focalizzabilità

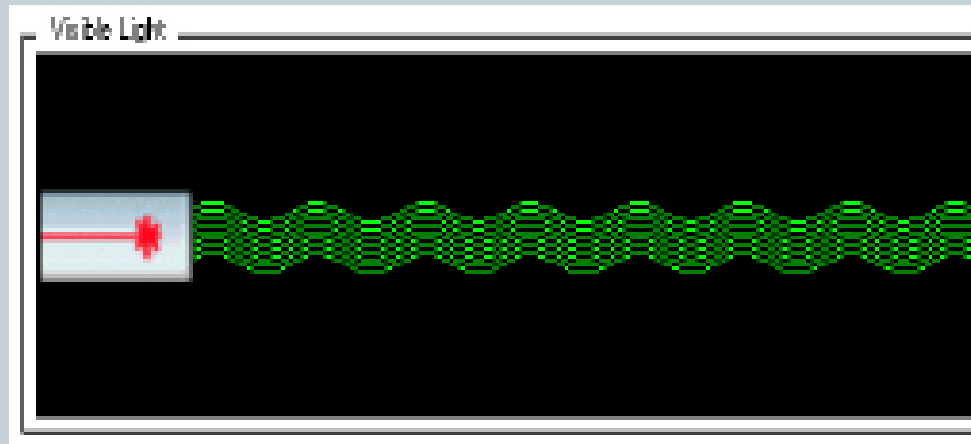
7



Un'altra conseguenza della **coerenza spaziale** è la focalizzabilità del fascio laser (piccola macchia focale, elevata intensità).

# Proprietà della luce laser: monocromaticità

8



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.

*Luce ricavata da un tubo a scarica selezionata con uno spettrometro può raggiungere una monocromaticità di  $10^{-6}$ . Con il laser si fa meglio di  $10^{-9}$ .*



# Applicazione: l'esperimento Lunar Laser Ranging

9



- Sulla superficie della Luna, il raggio è di circa 6,5 chilometri
- Su  $10^{17}$  fotoni puntati verso il riflettore, solo uno viene ricevuto sulla Terra.
- Identificati perché il laser è altamente monocromatico.
- Precisione equivalente a misura distanza tra L.A. e N. Y. con errore di 0.25 mm

# Funzionamento

10

- Componenti di un laser
- La fisica del laser: emissione spontanea e stimolata
- Risonatore

# Laser: componenti principali

11

Il *mezzo attivo* è il materiale nel quale avviene il processo di emissione stimolata.

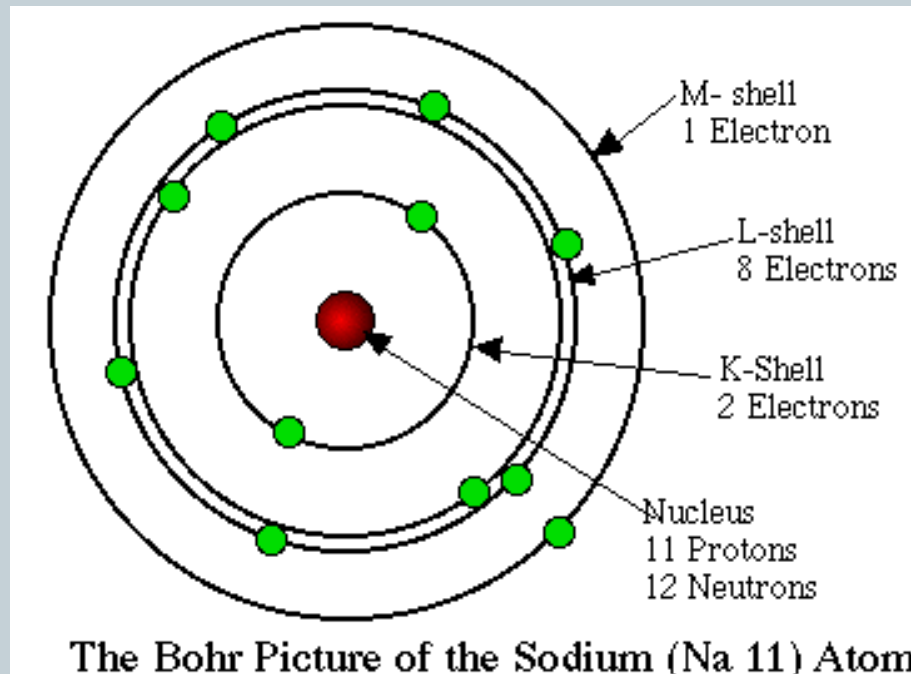
Il *pompaggio* è il meccanismo che permette di immagazzinare energia nel mezzo attivo e di rendere possibile l'inversione di popolazione.

Il *risonatore* è una cavità aperta a superfici riflettenti. Il risonatore accoppia il campo elettromagnetico della luce a frequenza  $\nu$  con il materiale attivo.

# Quantizzazione energia

12

- Gli atomi hanno livelli energetici quantizzati.
- Ciò corrisponde al fatto che gli elettroni orbitano intorno al nucleo su traiettorie a distanze fisse dal nucleo.



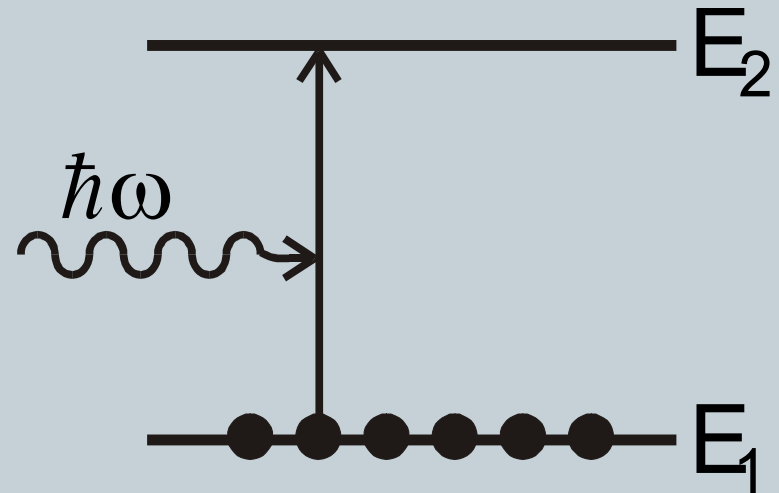
# Sistema a due livelli

## Assorbimento ed emissione spontanea e stimolata

13

Assorbimento:

$$\frac{dN_{1 \rightarrow 2}^{Abs}}{dt} = B_{12} \cdot N_1 \cdot u(\omega)$$



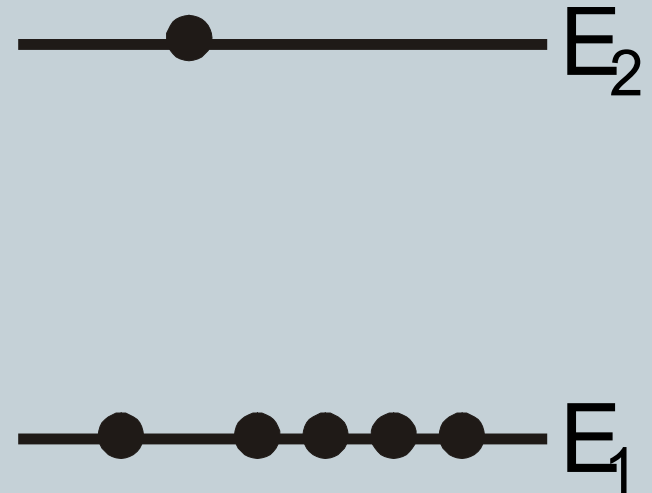
# Sistema a due livelli

## Assorbimento ed emissione spontanea e stimolata

14

Assorbimento:

$$\frac{dN_{1 \rightarrow 2}^{Abs}}{dt} = B_{12} \cdot N_1 \cdot u(\omega)$$



# Sistema a due livelli

## Assorbimento ed emissione spontanea e stimolata

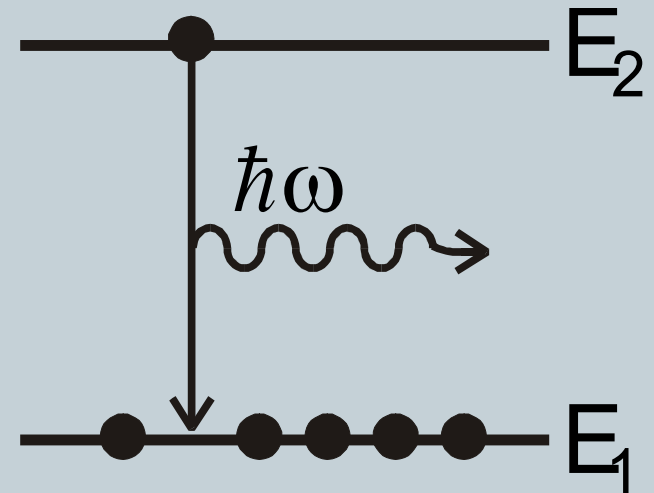
15

Assorbimento:

$$\frac{dN_{1 \rightarrow 2}^{Abs}}{dt} = B_{12} \cdot N_1 \cdot u(\omega)$$

Emissione spontanea:

$$\frac{dN_{2 \rightarrow 1}^{spontan}}{dt} = A_{21} \cdot N_2$$



# Sistema a due livelli

## Assorbimento ed emissione spontanea e stimolata

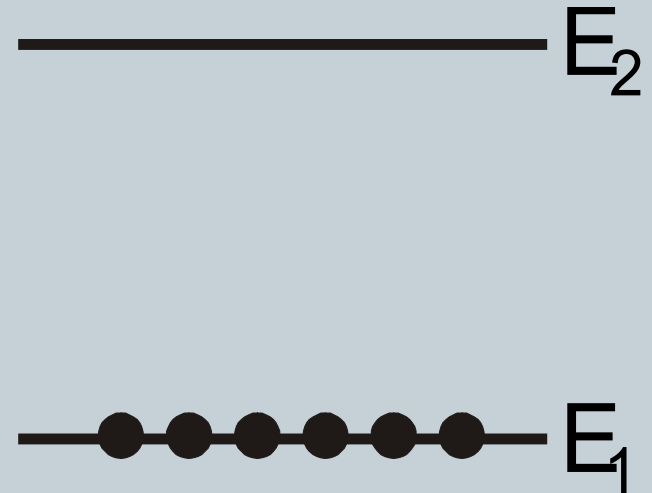
16

Assorbimento:

$$\frac{dN_{1 \rightarrow 2}^{Abs}}{dt} = B_{12} \cdot N_1 \cdot u(\omega)$$

Emissione spontanea:

$$\frac{dN_{2 \rightarrow 1}^{spontan}}{dt} = A_{21} \cdot N_2$$





# Sistema a due livelli

## Assorbimento ed emissione spontanea e stimolata

17

Assorbimento:

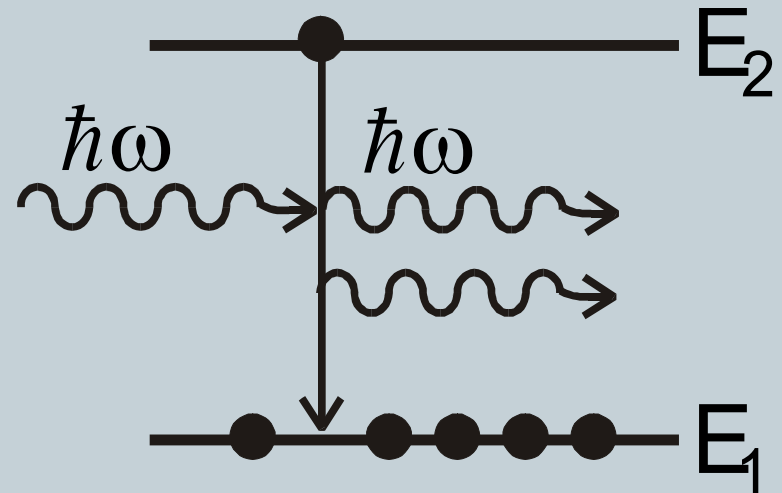
$$\frac{dN_{1 \rightarrow 2}^{Abs}}{dt} = B_{12} \cdot N_1 \cdot u(\omega)$$

Emissione spontanea:

$$\frac{dN_{2 \rightarrow 1}^{spontan}}{dt} = A_{21} \cdot N_2$$

Emissione stimolata:

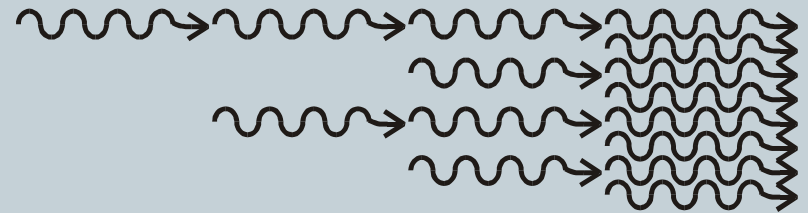
$$\frac{dN_{2 \rightarrow 1}^{stimuliert}}{dt} = B_{21} \cdot N_2 \cdot u(\omega)$$



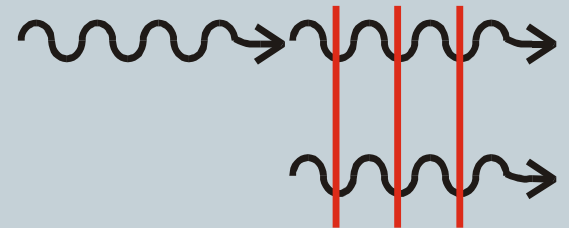
# Emissione stimolata

18

- Conduce ad una moltiplicazione dei fotoni (**amplificazione**)

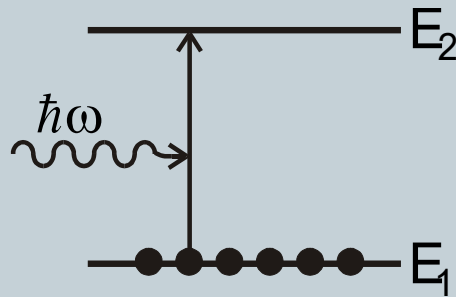


- Il fotone emesso possiede stessa frequenza, fase e direzione del fotone stimolante (**coerenza**)



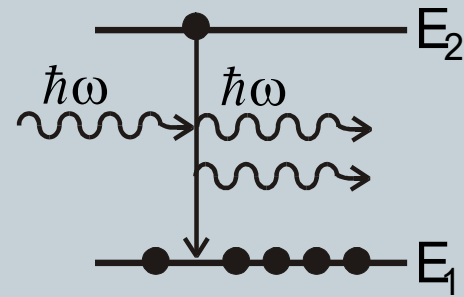
# Assorbimento vs emissione stimolata

19



Assorbimento

Emissione stimolata



$\sim N_1$

$\sim N_2$

Emissione dominante quando  $N_2 > N_1$

**E' necessario creare un'inversione di popolazione!**

# Si può amplificare la luce?

20

## Amplificazione:

Richiede più elettroni nel livello energetico superiore di quelli al livello inferiore ( $N_2 > N_1$ ).



**Nessun riteneva che ciò fosse possibile!**

L'emissione stimolata è rimasta una curiosità teorica per oltre 30 anni.

## Sistema a due livelli:

- Assorbimento ed emissione stimolata si compensano a vicenda.
- Il mezzo diventa trasparente
- Amplificazione impossibile

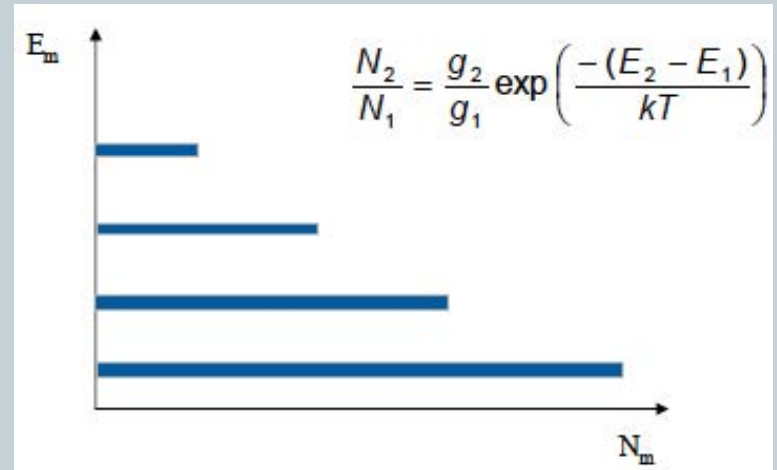
# Inversione di popolazione

21

Occupazione degli stati all'equilibrio:  
**distribuzione di Boltzmann:**

$$N_2 / N_1 \propto e^{-(E_2 - E_1) / kT}$$

$E_2 > E_1$ : in equilibrio termico inversione di popolazione impossibile



*Esempio:  $\Delta E = 2.07 \text{ eV}$  (energia media fotone visibile)*

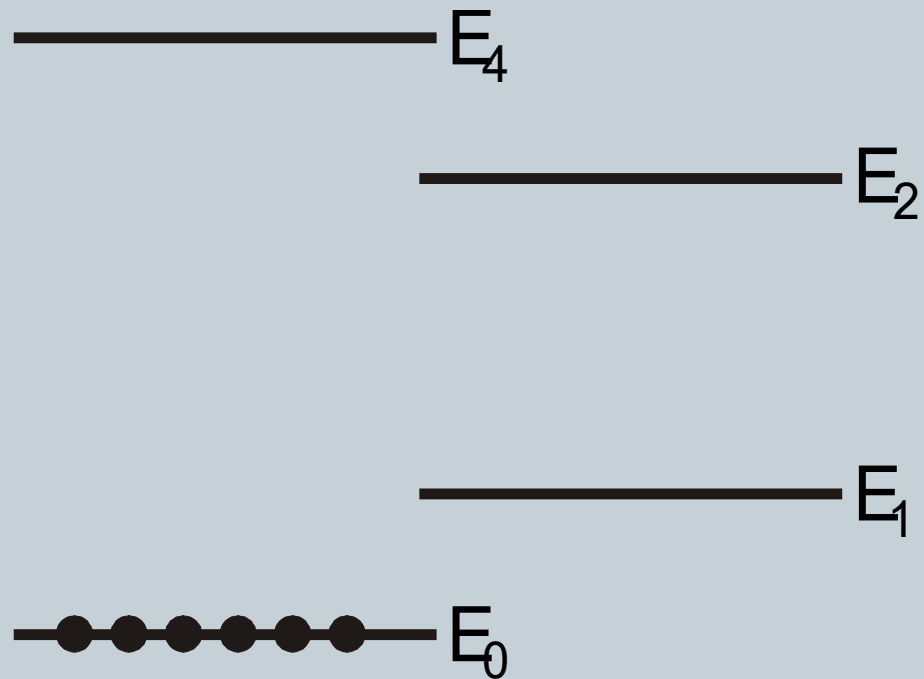
- $T = 300 \text{ K}$  ( $n^\circ$  atomi eccitati  $= 1.8 \times 10^{-38}$ )*
- $T = 4000 \text{ K}$  ( $n^\circ$  atomi eccitati  $= 1.8 \times 10^{-4}$ )*

**E' impossibile ottenere un'inversione di popolazione a temperatura ambiente senza alterare l'equilibrio termodinamico con una fonte di energia esterna**

# Sistema a 4 livelli

22

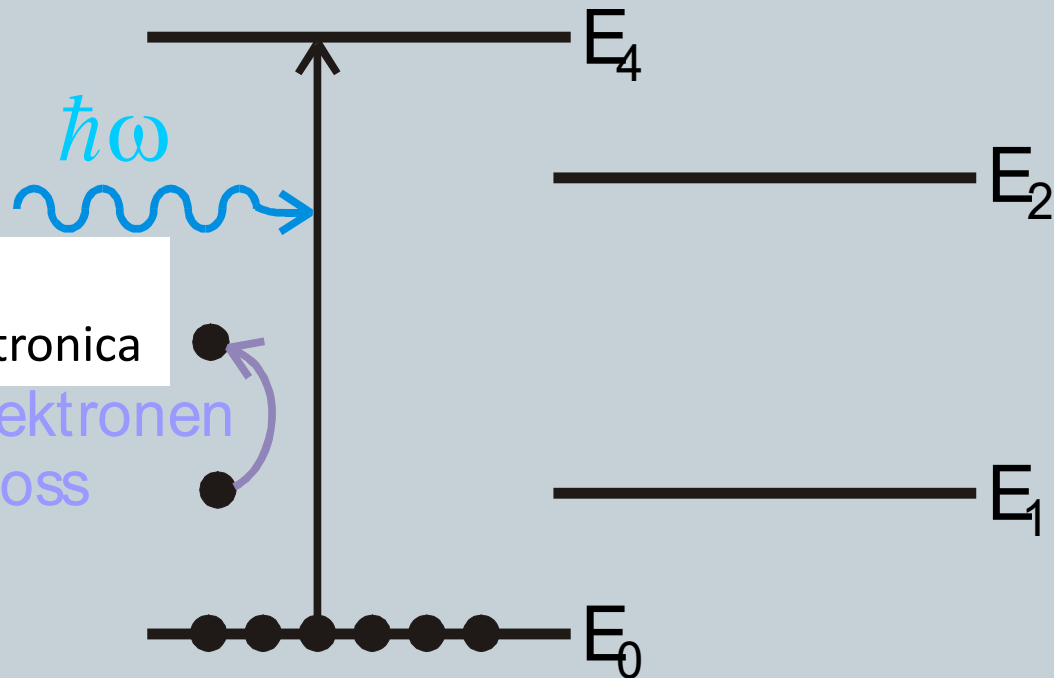
Sistema a 4 livelli



# Sistema a 4 livelli

23

## Sistema a 4 livelli

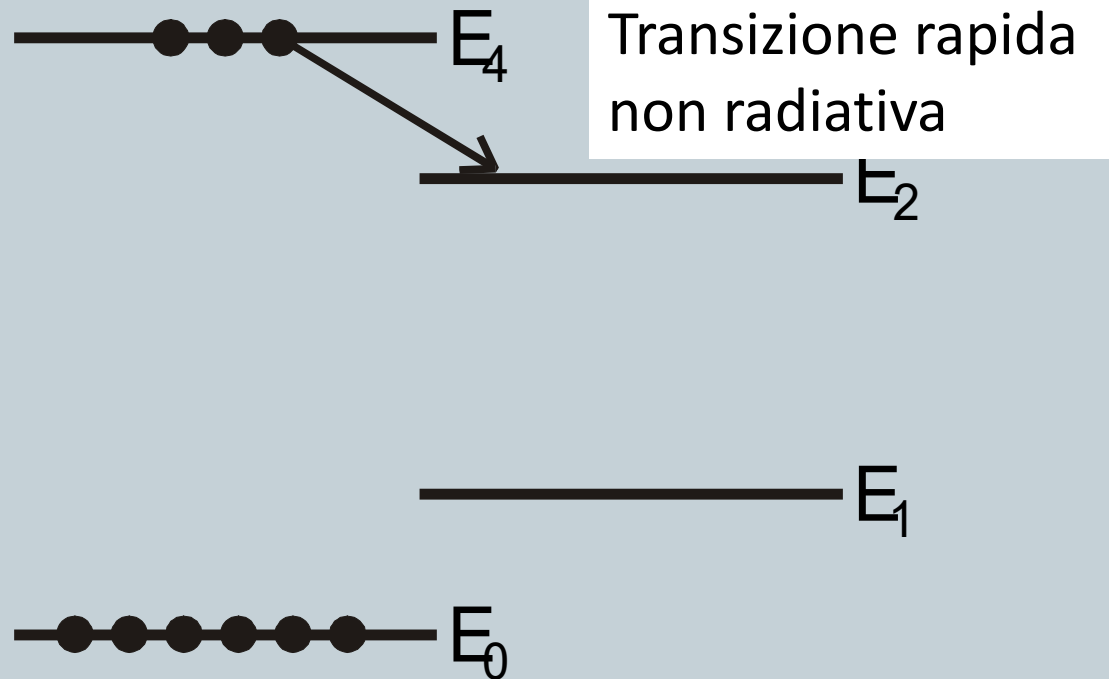


Eccitazione ottica  
o per collisione elettronica

# Sistema a 4 livelli

24

Sistema a 4 livelli

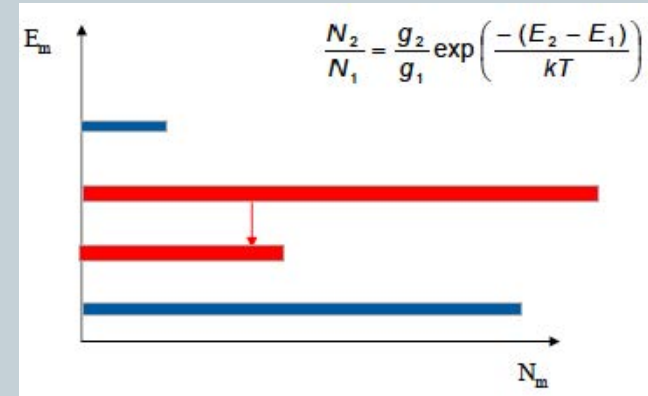




# Sistema a 4 livelli

25

Sistema a 4 livelli

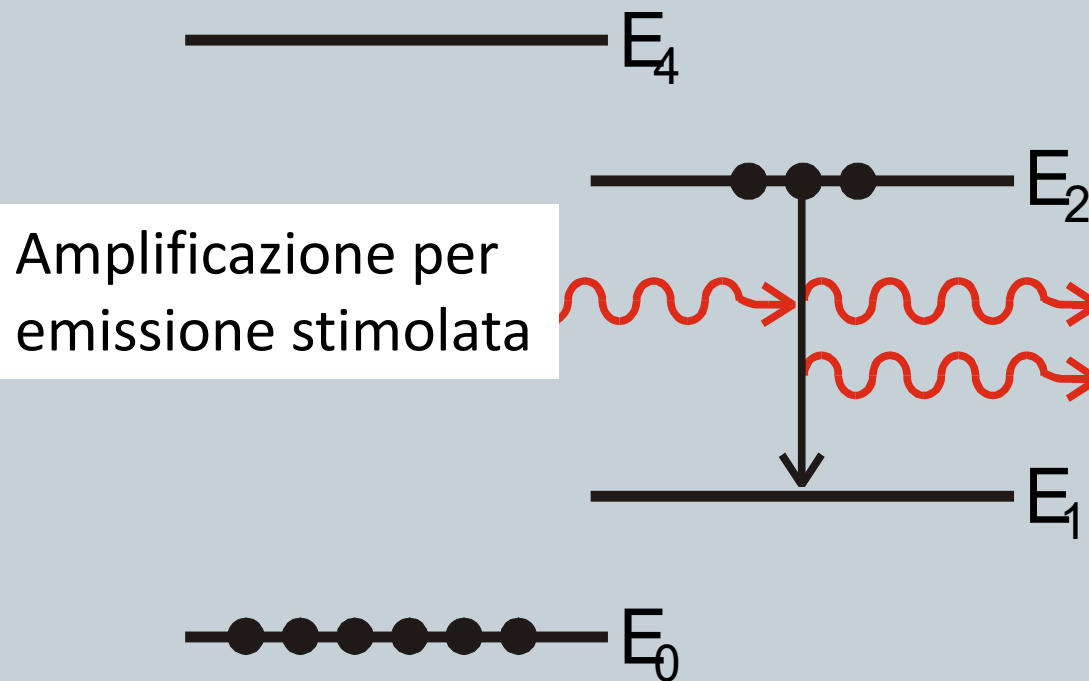


Inversione di popolazione

# Sistema a 4 livelli

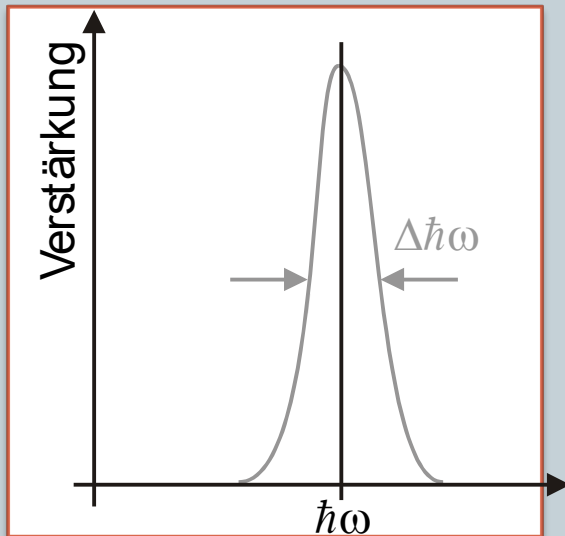
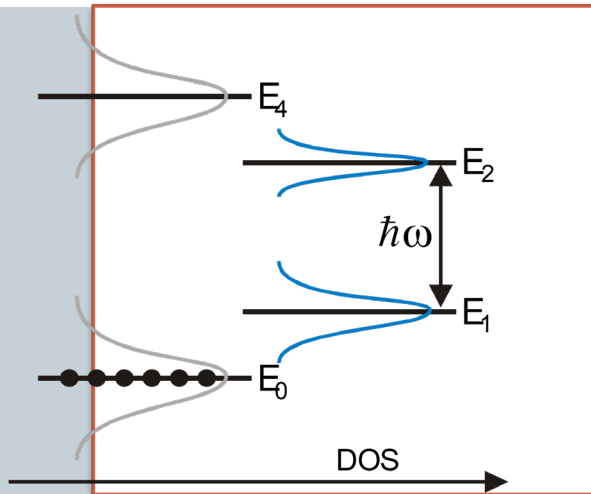
26

Sistema a 4 livelli



# Profilo di amplificazione

27

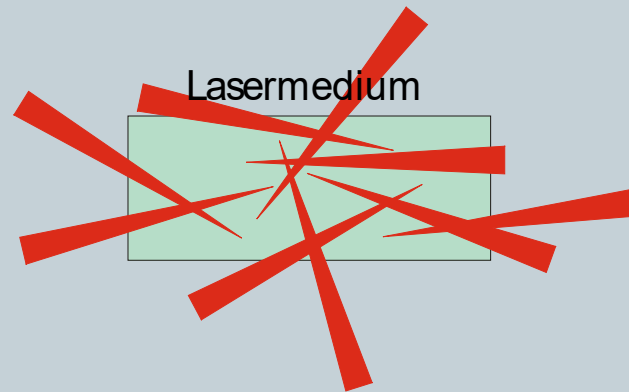


Ampiezze tipiche:  $\Delta\nu_0 (= \Delta\hbar\omega / 2\pi)$

<u>Mezzo</u>	<u><math>\Delta\nu_0</math> (Hz)</u>
Ioni-Argon	$1,1 \cdot 10^8$
Helium-Neon	$1,5 \cdot 10^9$
Nd:YAG	$2,1 \cdot 10^{11}$
Rhodamin 6G (Dye)	$1,0 \cdot 10^{14}$

# Solo mezzo attivo: superradiazione

28



Mezzo attivo (con inversione) → „Superradiazione“

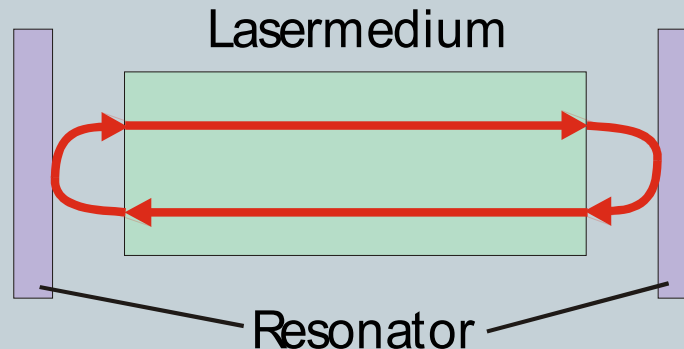
- Un fotone emesso spontaneamente viene amplificato
- Emissione isotropa
- Amplificazione indefinita e molte onde non correlate

# Sistema di feedback: il risonatore

29

Condizione per oscillazione laser stabile: **Feedback**

→ La superradiation viene „reazionata“ nel mezzo attivo



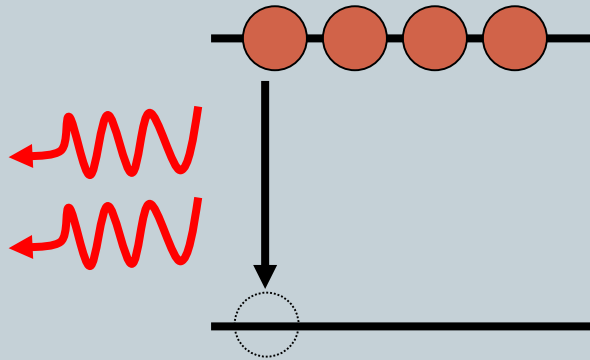
# Sistema di feedback: il risonatore

30

Emissione stimolata

Specchio

Specchio



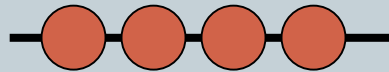
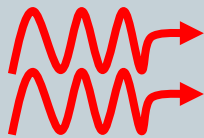
# Sistema di feedback: il risonatore

31

## Feedback della cavità

Specchio

Specchio



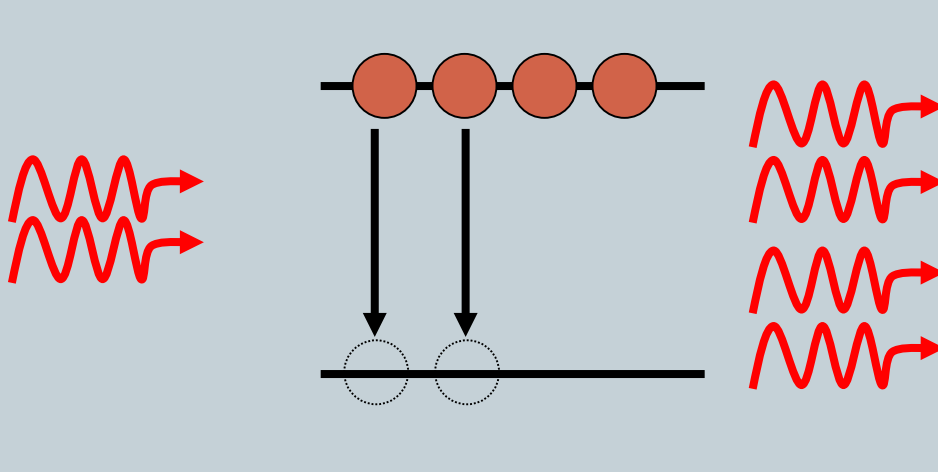
# Sistema di feedback: il risonatore

32

## Emissione stimolata

Specchio

Specchio



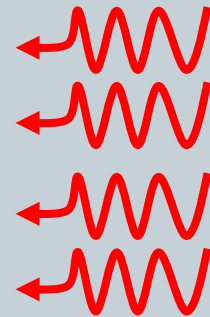
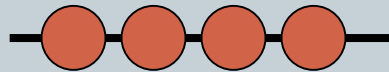


# Sistema di feedback: il risonatore

33

## Feedback della cavità

Specchio



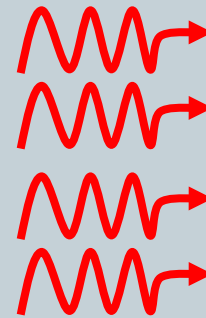
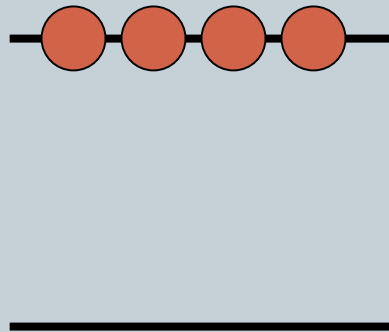
Specchio



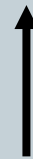
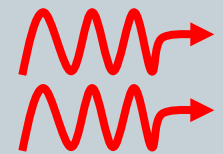
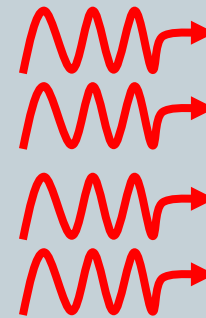
# Dopo varie „andate e ritorni“

34

Specchio



Specchio



Fascio laser

Fotoni con:

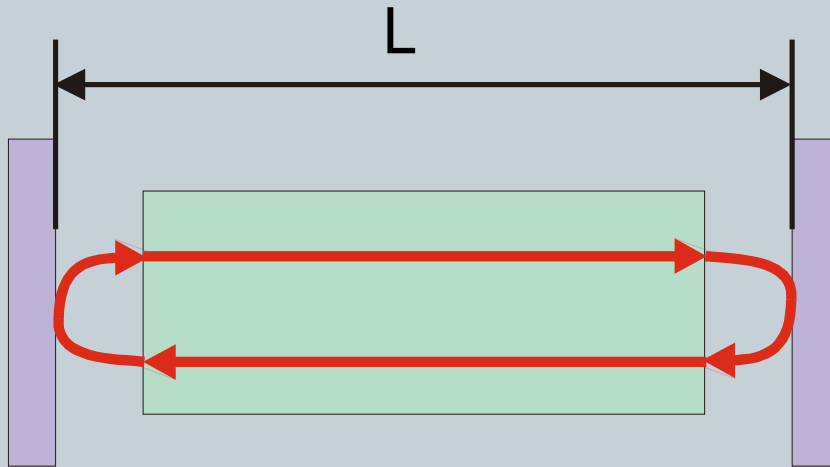
- stessa energia: **monocromaticità**
- stessa direzione : **coerenza spaziale**
- sincronizzati: **coerenza temporale**

# „Modi“ di un risonatore

35

Riflessione sugli specchi → generazione di onde stazionarie

Condizione per interferenza costruttiva:



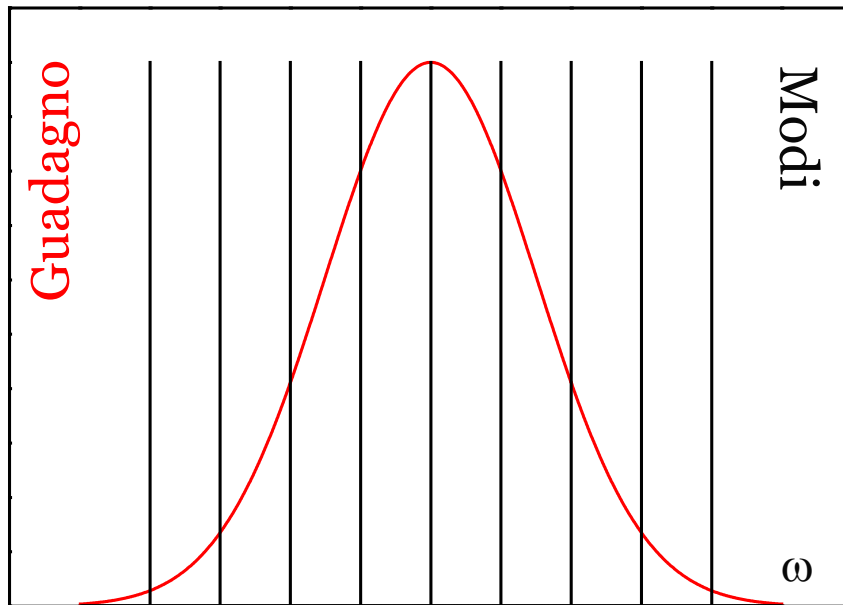
$$L = m \frac{\lambda}{2} = m \frac{c}{2\omega}$$

$$\Rightarrow \omega = m \frac{c}{2L} \quad ; \quad \Delta\omega = \frac{c}{2L}$$

# Risonatore: modi longitudinali

36

I modi del risonatore si devono adattare al **profilo di guadagno** del mezzo attivo



$$\Delta\omega_{\text{mode}} = \frac{c}{2L}$$

↓

$$\Delta\omega_{\text{mode}} \sim 1,5 \cdot 10^8 \text{ Hz}$$

(mit  $L = 1\text{m}$ )

Per confronto:

$$\Delta\omega_{\text{gain}} \sim 10^8 - 10^{14} \text{ Hz}$$

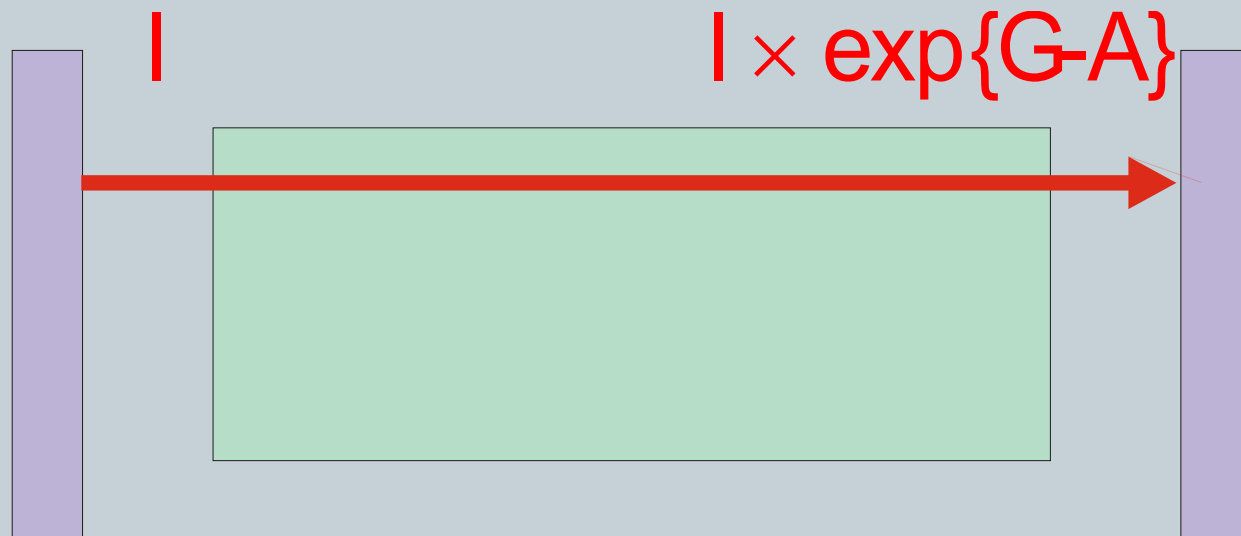
# „Circolazione“ nel risonatore

37



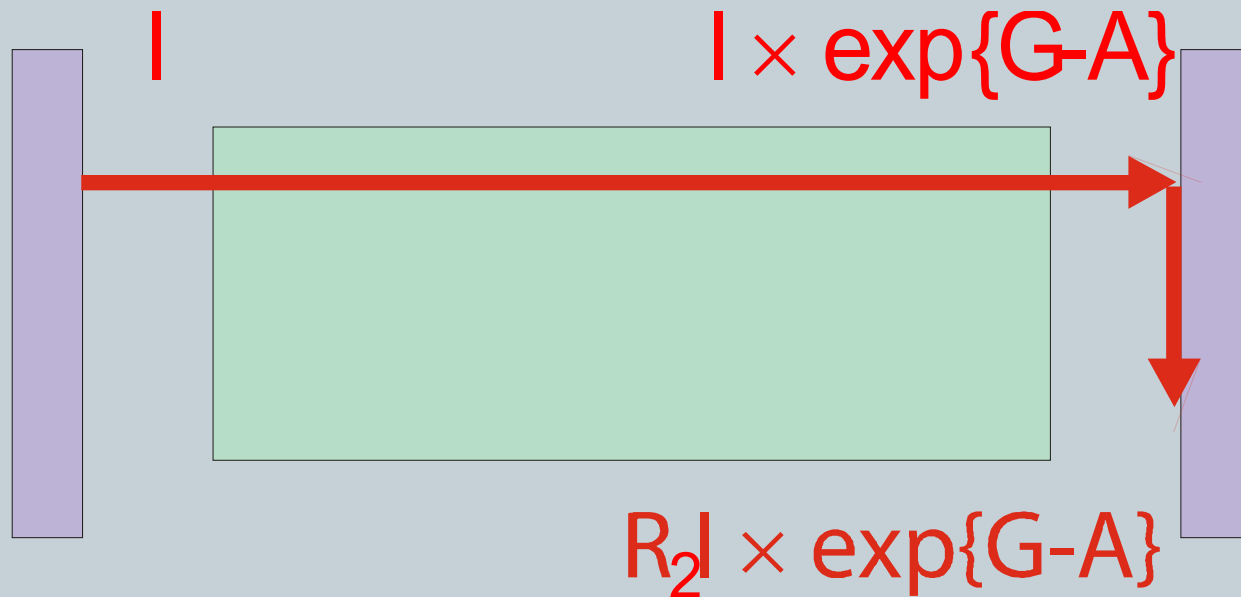
# „Circolazione“ nel risonatore

38



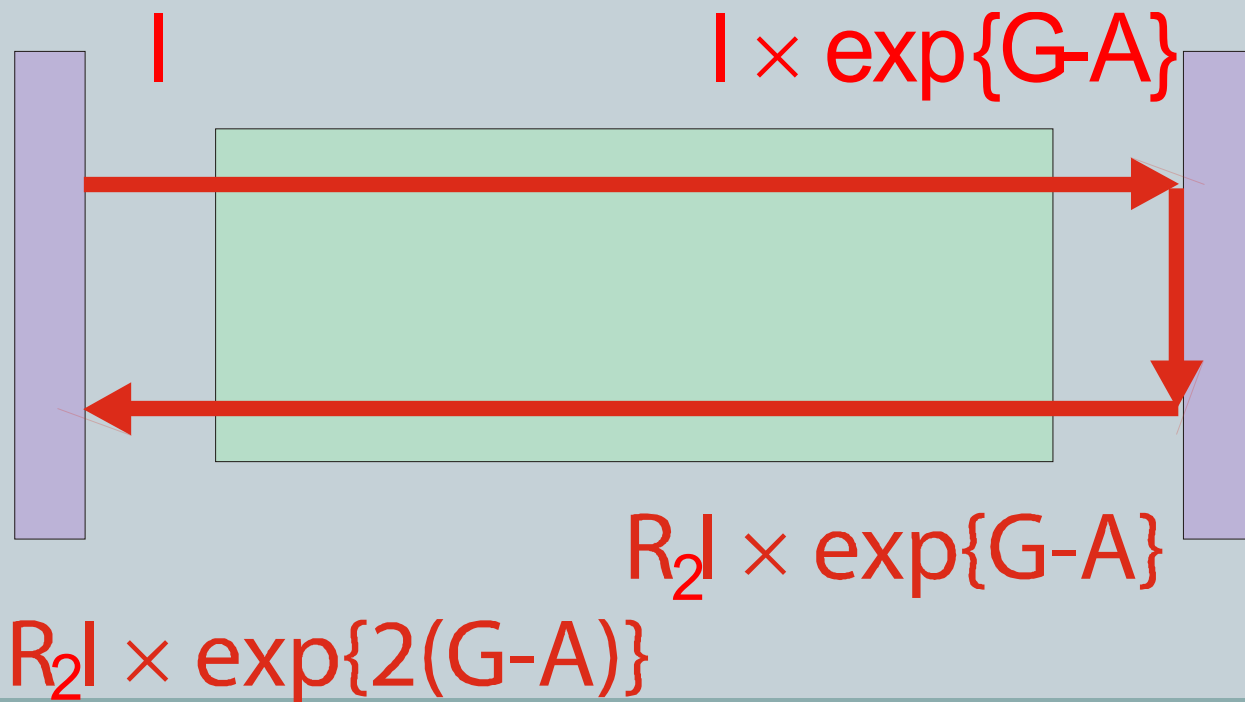
# „Circolazione“ nel risonatore

39



# „Circolazione“ nel risonatore

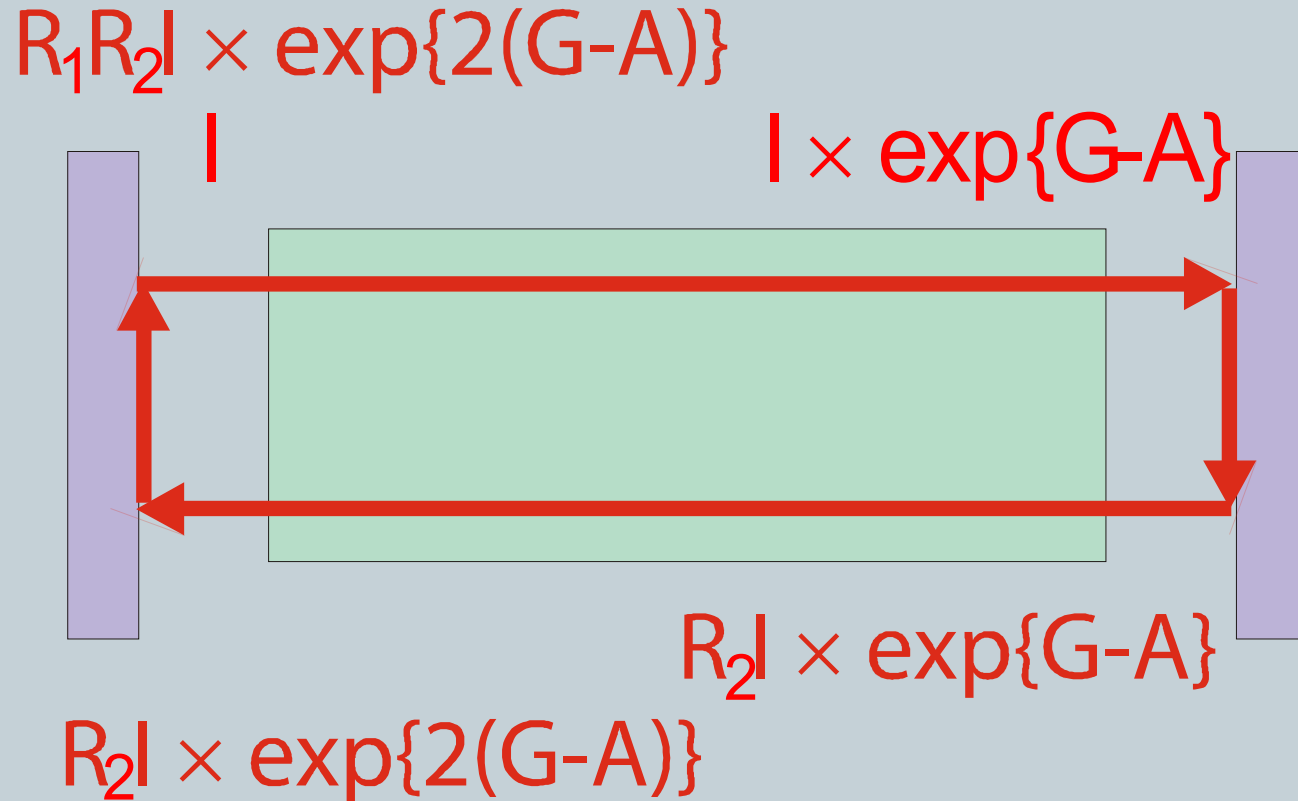
40





# „Circolazione“ nel risonatore

41



# Condizione di soglia: Gain > Loss

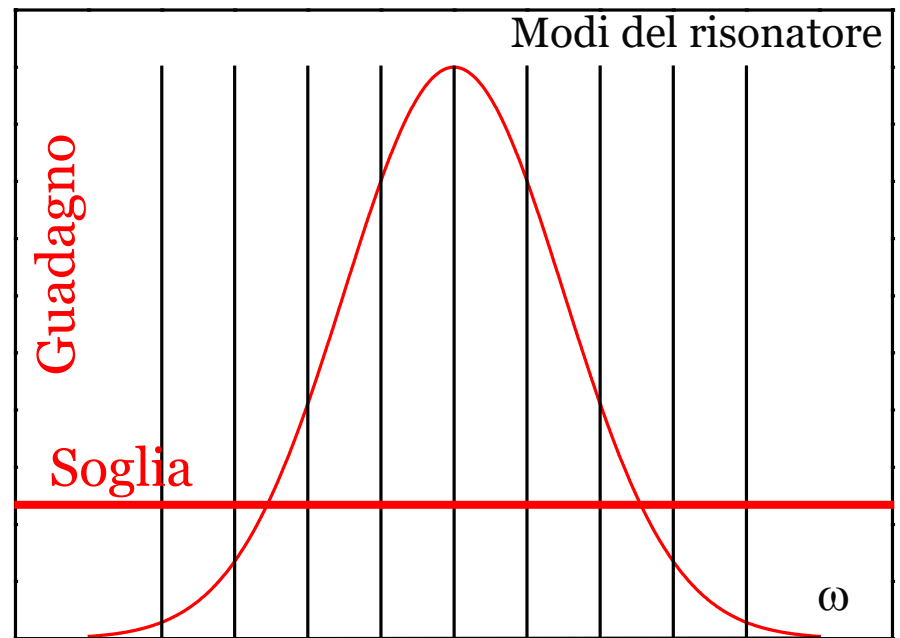
42

Amplificazione, se:

$$I \leq R_1 R_2 I \cdot e^{2(G-A)}$$

Valore di soglia:

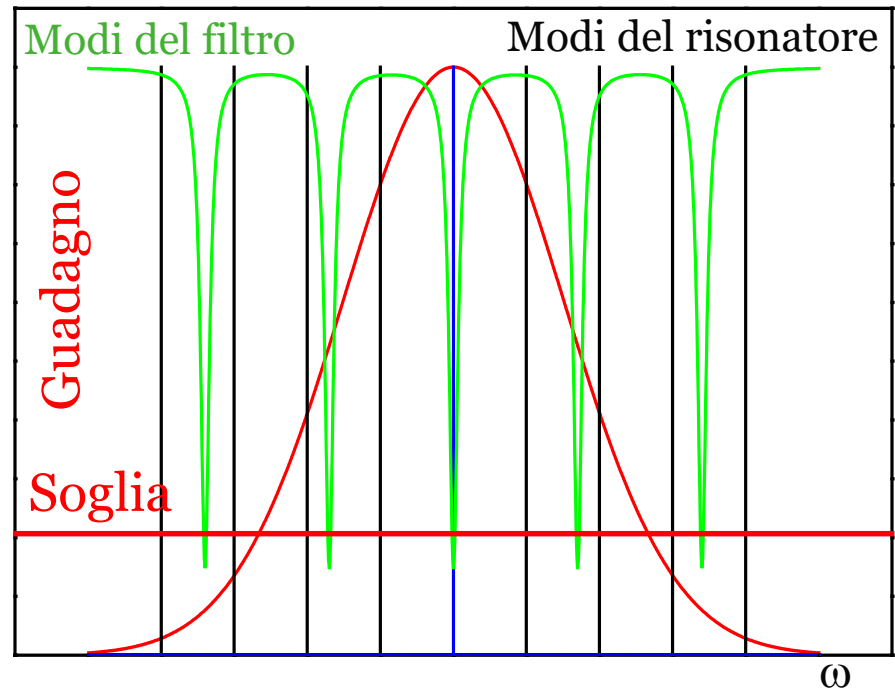
$$G \geq \frac{1}{2} \ln \left( \frac{1}{R_1 R_2} \right) + A$$



# Selezione dei modi

43

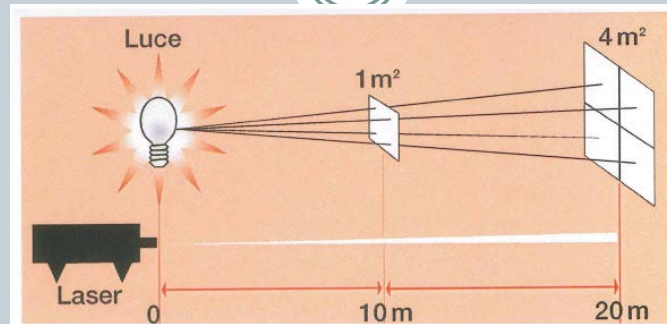
- **Modi trasversali**  
modi superiori = grande estensione radiale  
→ Selezione  $TEM_{00}$ -  
(diaframma)
- **Modi longitudinali**  
→ addizionale a filtro  
interferenziale (Etalon)





# Attenti al laser!

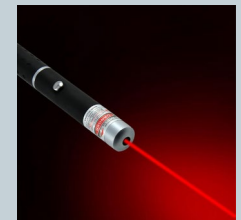
44



## Intensità sulla retina: confronto Sole-Laser:

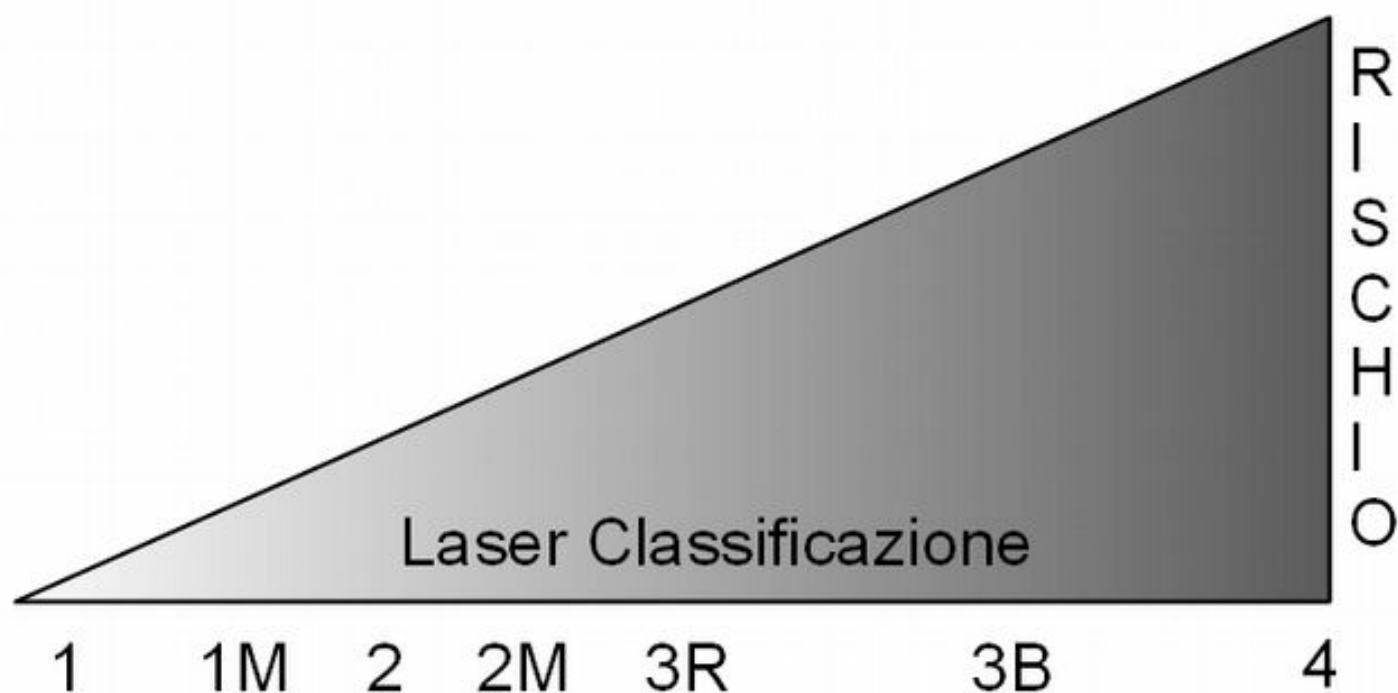
Diametro pupillare: 2 mm  $\rightarrow$  area 3 mm<sup>2</sup>

- **Intensità massima Sole sulla Terra = 1 kW/m<sup>2</sup> (1mW/mm<sup>2</sup>)**
  - Potenza raccolta dall'occhio: 3 mW
  - Raggio immagine su retina:  $\approx 100 \mu\text{m}$  (Area = 0.03 mm<sup>2</sup>)
  - Intensità Sole su retina:  $3 \text{ mW} / 0.03 \text{ mm}^2 = 100 \text{ mW/mm}^2$ .
- **Intensità tipico laser-pointer: 3 mW**
  - Raggio del fascio = 1 mm
  - Raggio immagine su retina  $\approx 10 \mu\text{m}$  (Area =  $3 \times 10^{-4} \text{ mm}^2$ )
  - Intensità Laser su retina:  $3 \text{ mW} / (3 \times 10^{-4} \text{ mm}^2) = 9300 \text{ mW/mm}^2$ 
    - Circa 100 volte l'intensità del Sole!



# Classificazione dei laser

45



# Tabella requisiti di sicurezza per varie tipologie di laser

46

	<b>Classe 1</b>	<b>Classe 1M</b>	<b>Classe 2</b>	<b>Classe 2M</b>	<b>Classe 3R</b>	<b>Classe 3B</b>	<b>Classe 4</b>
<b>Descrizione classe</b>	Sono sicuri nelle condizioni di funzionamento ragionevolmente prevedibili,	Sono sicuri nelle condizioni di funzionamento ragionevolmente prevedibili, ma possono essere pericolosi se l'operatore impiega ottiche	Sicuro per breve esposizioni agli occhi;	Sicuri per breve esposizioni a occhio nudo; possono essere pericolosi se l'utente impiega ottiche	Rischio di lesioni è relativamente bassa, ma può essere pericoloso per uso improprio da parte di personale inesperto	Sono normalmente pericolosi nel caso di esposizione diretta del fascio	Sono pericolosi per l'occhio e la pelle; rischio di incendio
<b>Area controllata</b>	Non richiesta	Localizzata o delimitata (chiusa)	Non richiesta	Localizzata o delimitata (chiusa)	delimitata (chiusa)	Delimitato e protetto da interblocco	Delimitato e protetto da interblocco
<b>Comando a chiave</b>	Non richiesto	Non richiesto	Non richiesto	Non richiesto	Non richiesto	Richiesto	Richiesto

# Alcuni tipi di laser

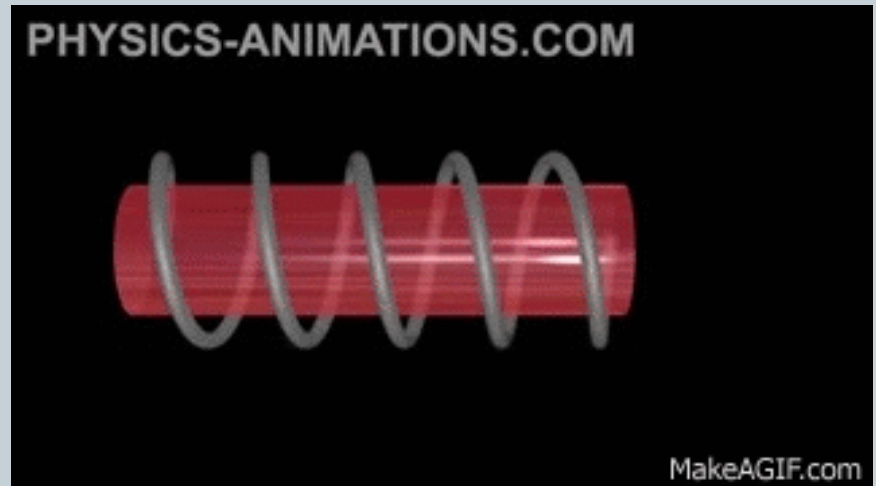
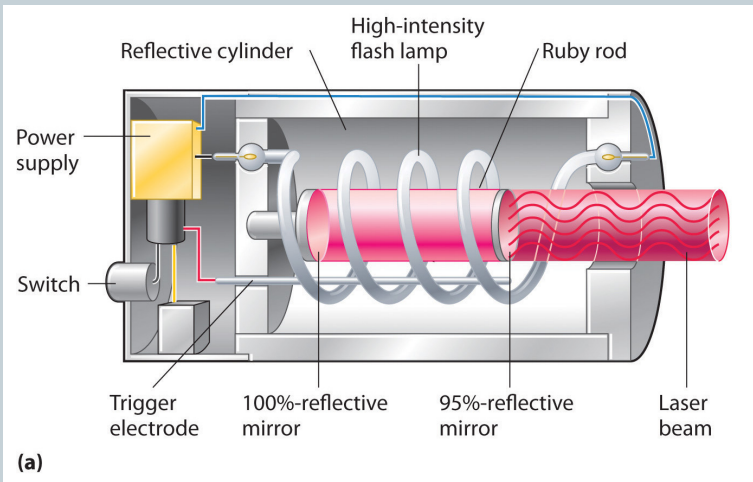
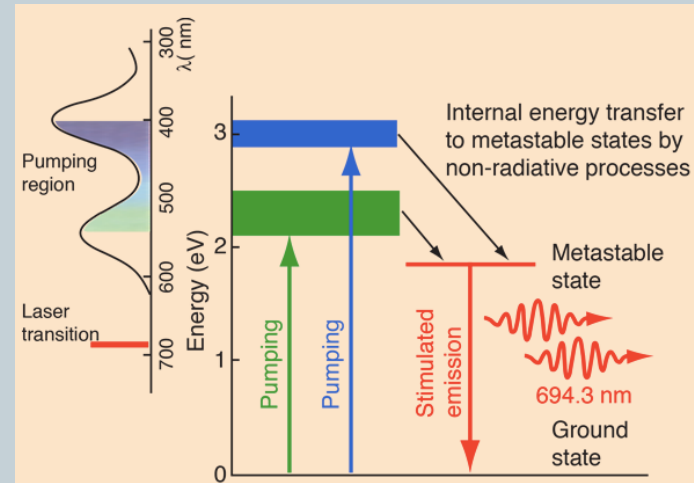
47

- Laser a rubino
- Laser a semiconduttore
- Laser He-Ne
- Laser a “elettroni liberi”

# Laser a rubino

48

- **Rubino:** Corindone ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) con impurità  $\text{Cr}^+$
- Prima gemma artificiale
- Luce rosso cupo ( $\lambda=694.3 \text{ nm}$ )
- Laser a 3 livelli

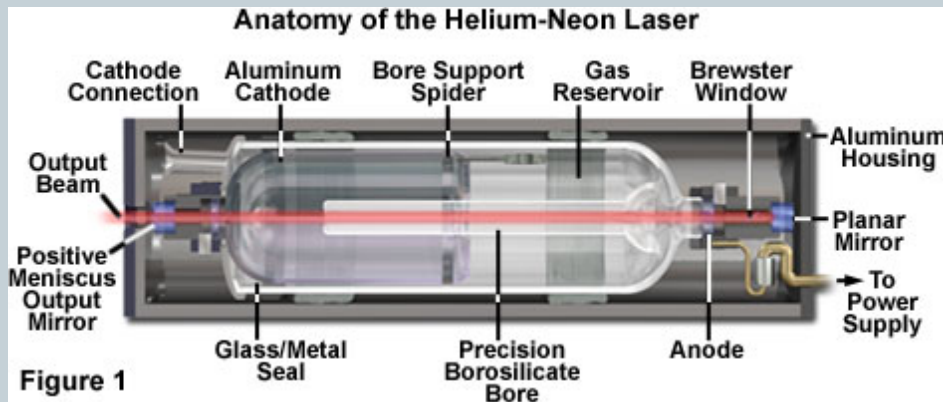
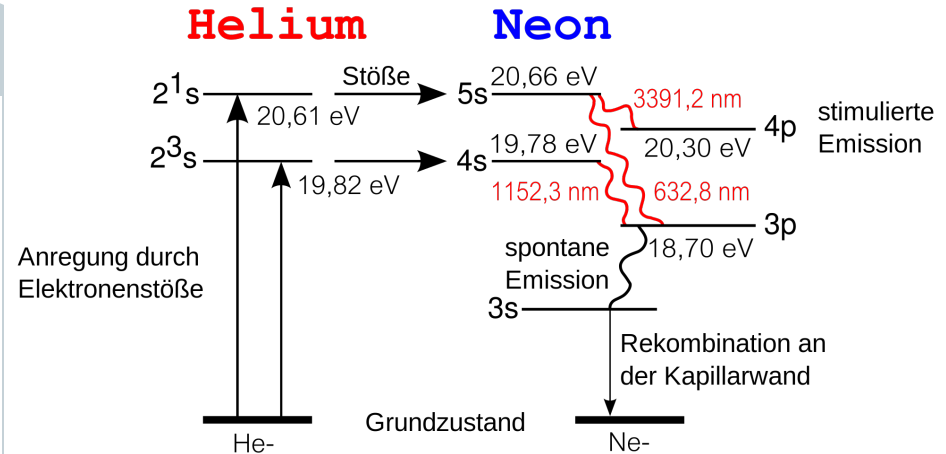




# Laser He-Ne

49

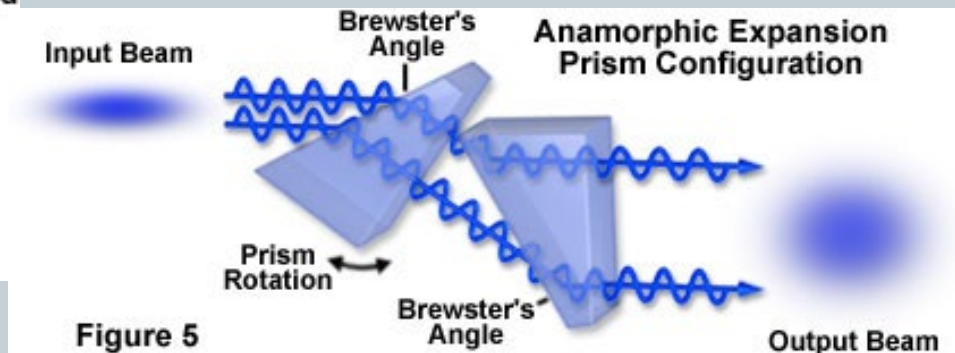
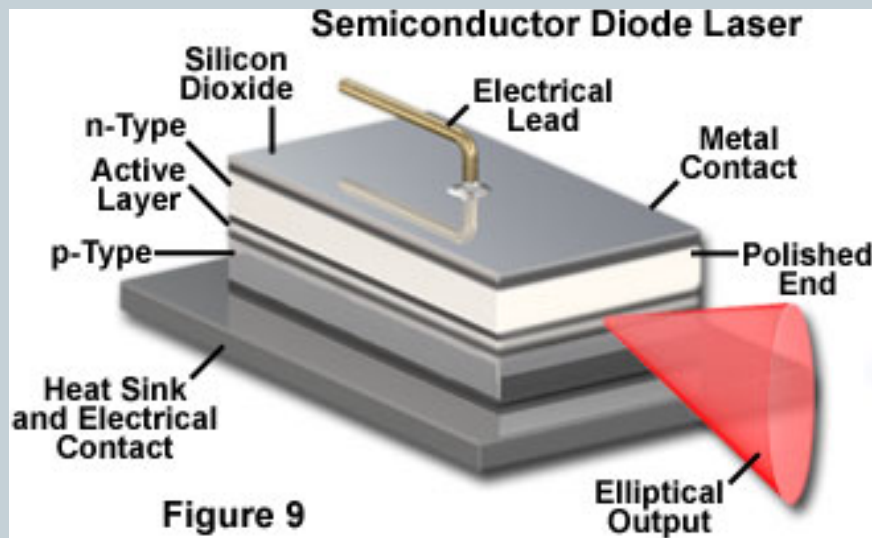
- Miscela 80% He + 20% Ne
- Scarica nei gas pompa il livello dell'He
- Energia trasferita al Ne (quasi risonante)
- Inversione tra livelli del Ne
- Luce laser rossa con  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$
- Laser a 4 livelli



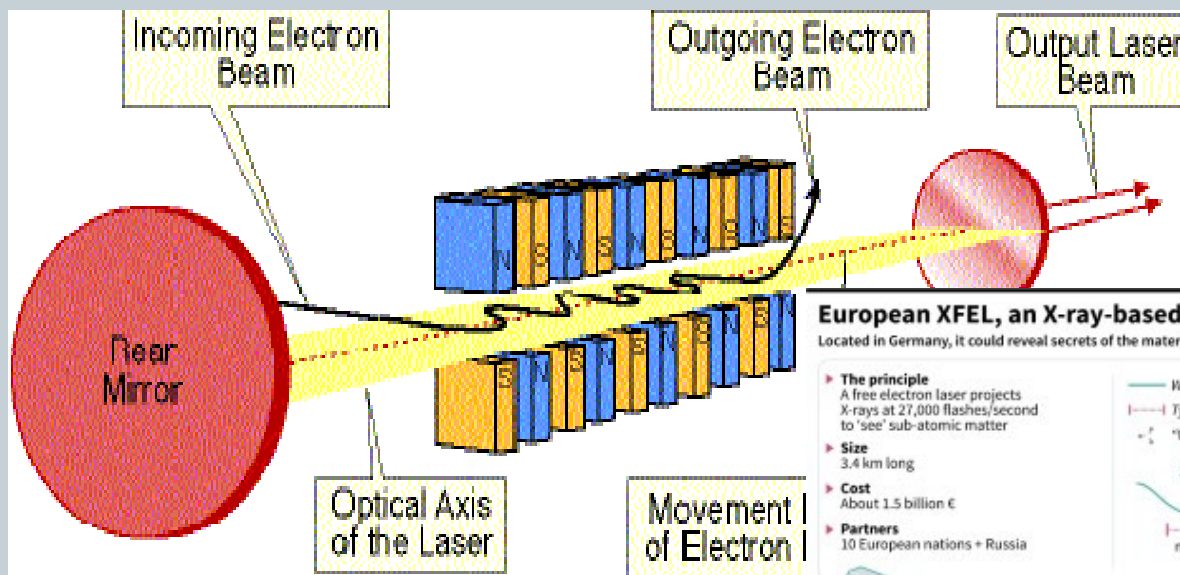
# Diode laser

50

- **Pompaggio**: iniezione di elettroni in banda di conduzione e di buche in banda di valenza mediante un diodo p-n polarizzato direttamente.
- **Emissione stimolata**: ricombinazione di elettroni nella banda di conduzione con buche nella banda di valenza.
- **“Anamorphic prism pair”**: trasformazione del fascio fortemente ellittico uscente dal diodo laser in un fascio circolare



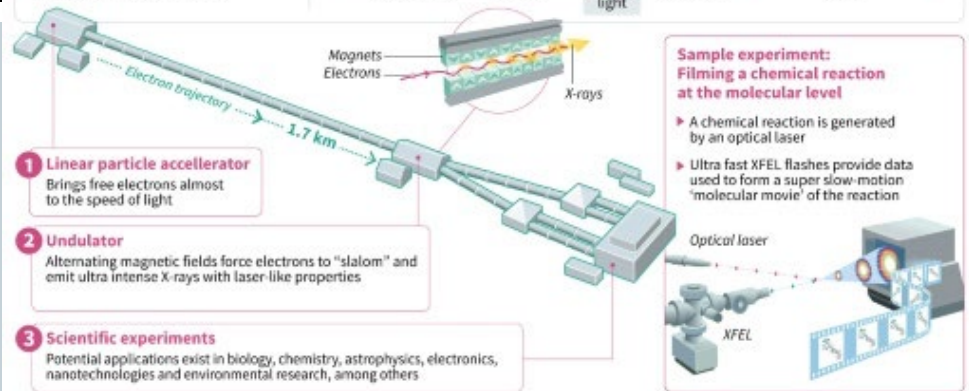
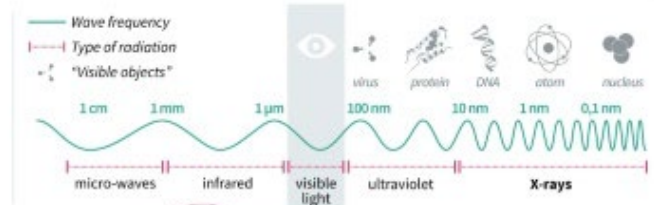
# Laser a elettroni liberi



## European XFEL, an X-ray-based super laser

Located in Germany, it could reveal secrets of the material world

- **The principle**  
A free electron laser projects X-rays at 27,000 flashes/second to "see" sub-atomic matter
- **Size**  
3.4 km long
- **Cost**  
About 1.5 billion €
- **Partners**  
10 European nations + Russia



Source: European XFEL

# Applicazioni

52

## Uso quotidiano

- Lettori codici a barre
- Compact disc
- Stampanti laser
- Comunicazioni (fibre ottiche)
- Ologrammi

## Chirurgia

- Oculistica
- Generale
- Odontoiatria
- Dermatologia

## Applicazioni industriali

- Misurazioni
- Lavorazione di materiali
- Analisi spettrale

## Ricerca scientifica

- Ricerca fondamentale
- Spettroscopia
- Fusione nucleare
- Raffreddamento di atomi
- Impulsi ultracorti

# Codice a barre

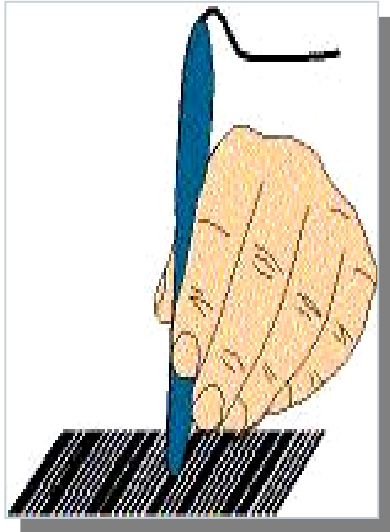
53

- Larga banda scura -> 1
- Sottile banda scura -> 0
- Spazio -> larghezza fissa



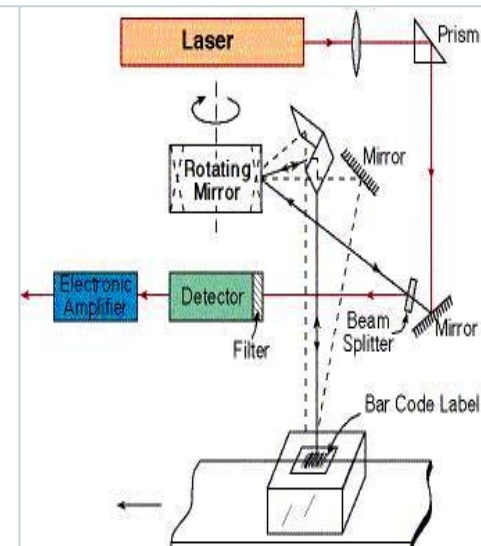
## Penna“ luminosa:

- laser a diodo
- rivelatore



## Sistema con laser fisso

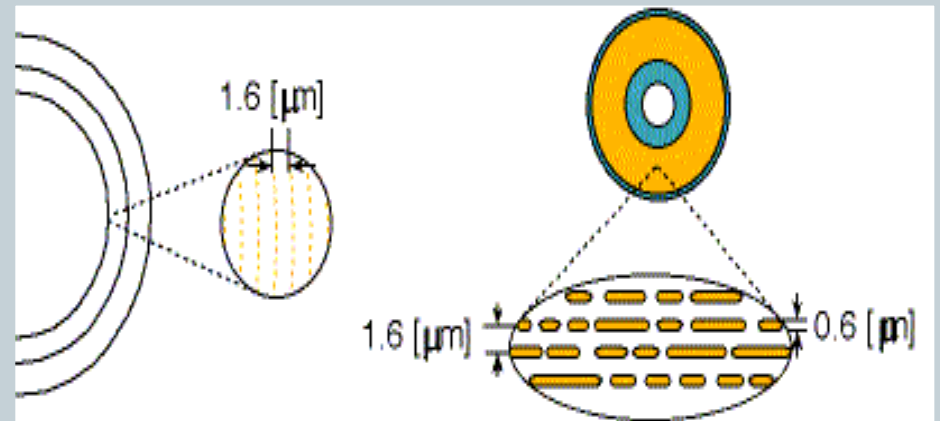
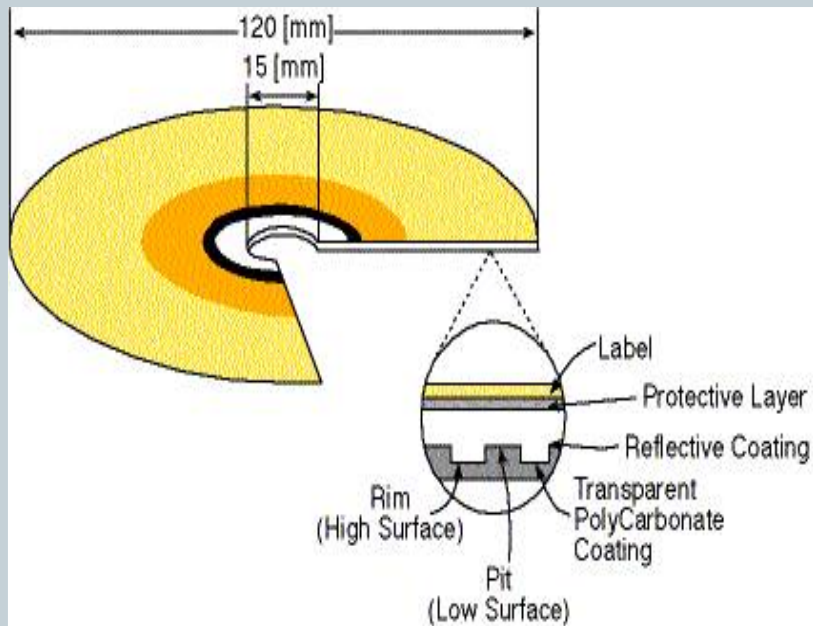
Prodotto mosso attraverso il fascio laser fisso



# CD-ROM

54

- Tecnologia dei CD sviluppata nel 1976 dalla Philips e dalla Sony.

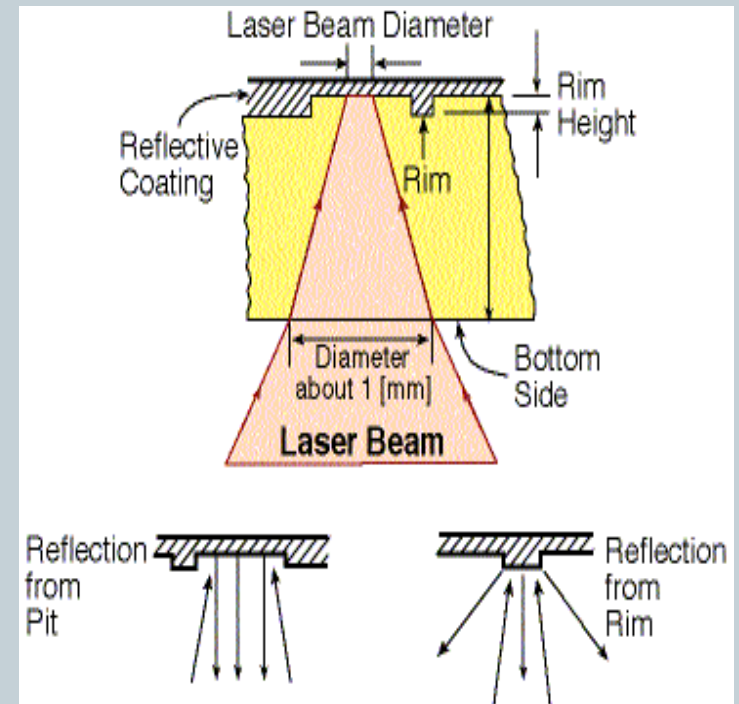


- Informazione registrata in forma binaria ("0" e "1")
- Informazione è codificata in depressioni ("pits") nel CD

# Lettura di un CD-ROM

55

- Illuminazione con diodo-laser focalizzato
- Radiazione riflessa da “pit” e “rim”.
- Luce riflessa da buca:  
differenza di fase:  $180^\circ$  rispetto a cresta.  
lettura codificata come “zero”.
- Transizione buca-cresta:  
interferenza distruttiva tra onde riflesse  
lettura codificata come “uno”.



*Può accumulare 650 MB di dati*



# Nota: CD vs vinile

56



- **CD:**
  - *Densità dati:* *costante*
  - Velocità lineare: *costante*
  - Velocità angolare:  $\omega \propto 1/R$



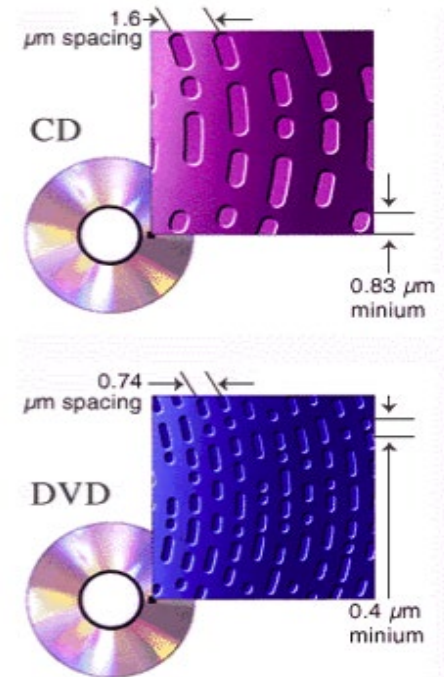
- **Vinile:**
  - Velocità angolare:  $\omega = \text{costante}$
  - Velocità lineare:  $v = \omega R$
  - *Densità dati:*  $\propto 1/R$



# DVD

57

- 1995 - nuovo standard: Digital Versatile Disk
- Diffrazione limita le minime dimensioni dello spot laser focalizzato  
-> Per aumentare la densità di informazioni bisogna diminuire  $\lambda$ :
  - CD-ROM:  $\lambda=780$  nm (infrarosso)
  - DVD:  $\lambda=650$  nm (rosso)
- La dimensione è la stessa del CD, ma poichè viene usata una lunghezza d'onda più piccola, le buche possono essere più piccole ( $0.4\text{ }\mu\text{m}$ ) e così anche la distanza tra tracce ( $0.74\text{ }\mu\text{m}$ ).



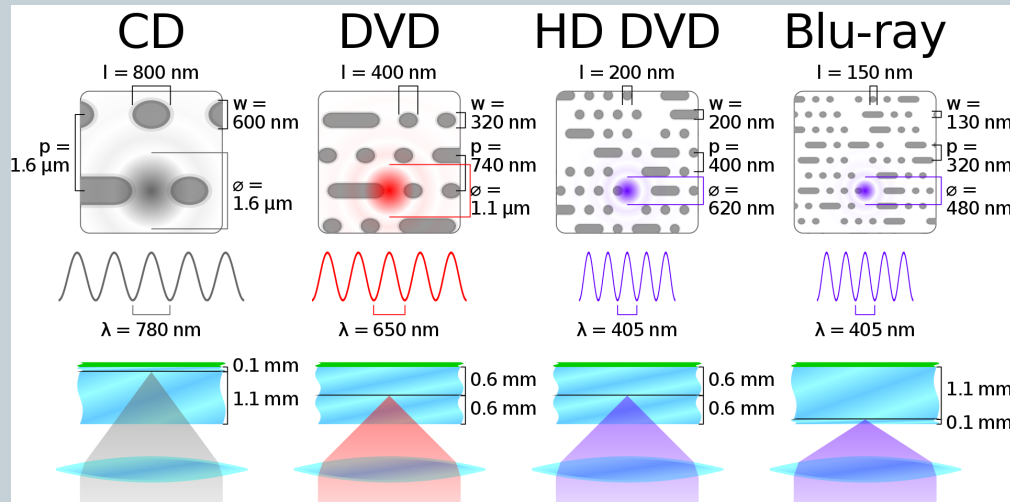
*Può contenere 4.7 GB di dati su un singolo strato del disco.*

# Blu-Ray Disk

58

- **Laser a diodo nel blu** ( $\lambda=405$  nm), con distanza tra tracce di  $0.32\mu\text{m}$ .
- I dischi DVD dispongono di un polimero trasparente di  $0,6$  mm che copre i substrati, mentre lo strato del Blu-Ray è di solo  $0,1$  mm. Questo significa che il substrato è molto vicino alla superficie, e la diffusione del laser è minore.

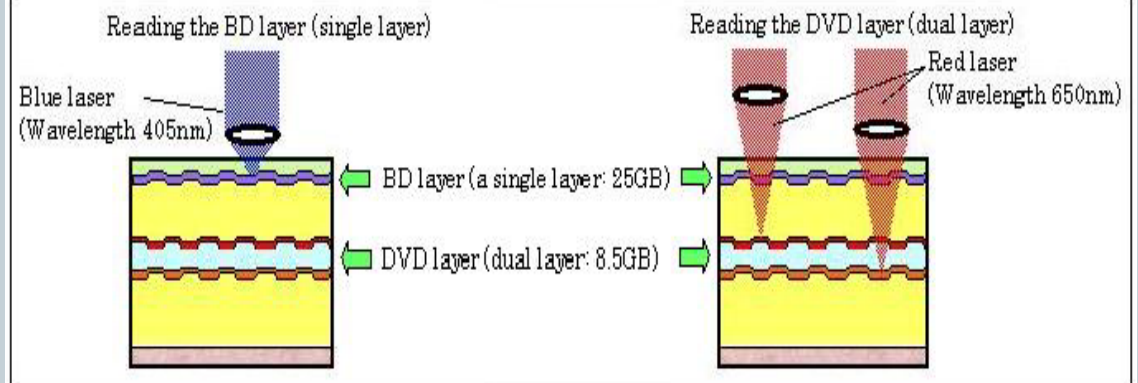
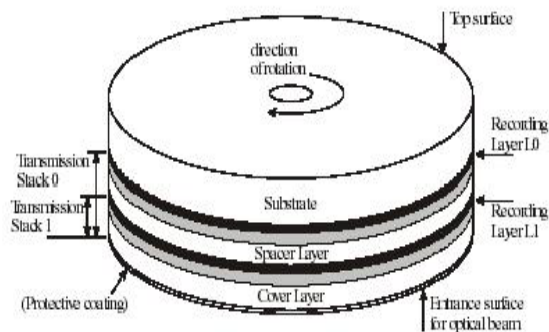
*Può immagazzinare fino a 27GB di dati per singolo strato!*



# Doppio layer

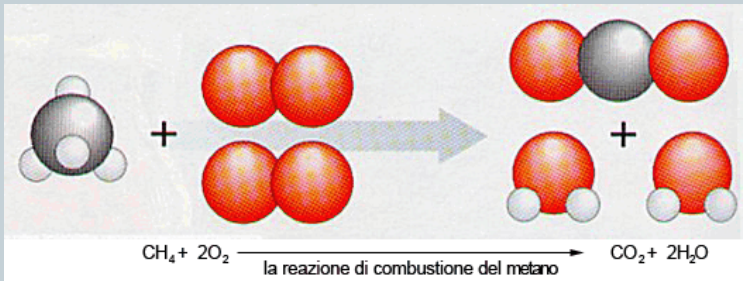
59

## The structure of dual layer disc



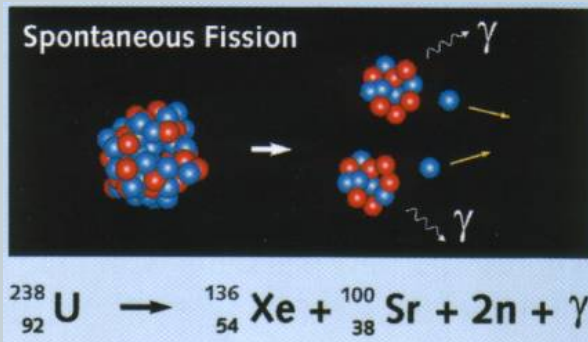
# Fusione Nucleare?

60



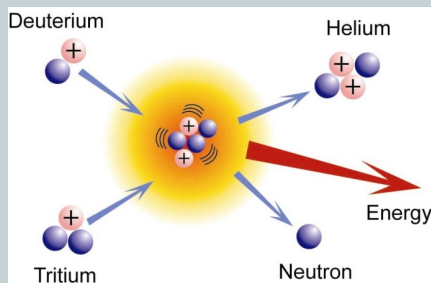
Energia liberata nella combustione ( $F_{\text{elm}}$ ):

H	30kWh/kg	$2 \times 10^{-9}$ energia/massa
C	5kWh/kg	$3 \times 10^{-10}$ energia/massa



Energia liberata nella fissione ( $F_{\text{nuc}}$ ):

$^{235}\text{U}$	$3.2 \times 10^7$ kWh/kg	$1 \times 10^{-3}$ energia/massa
------------------	--------------------------	----------------------------------

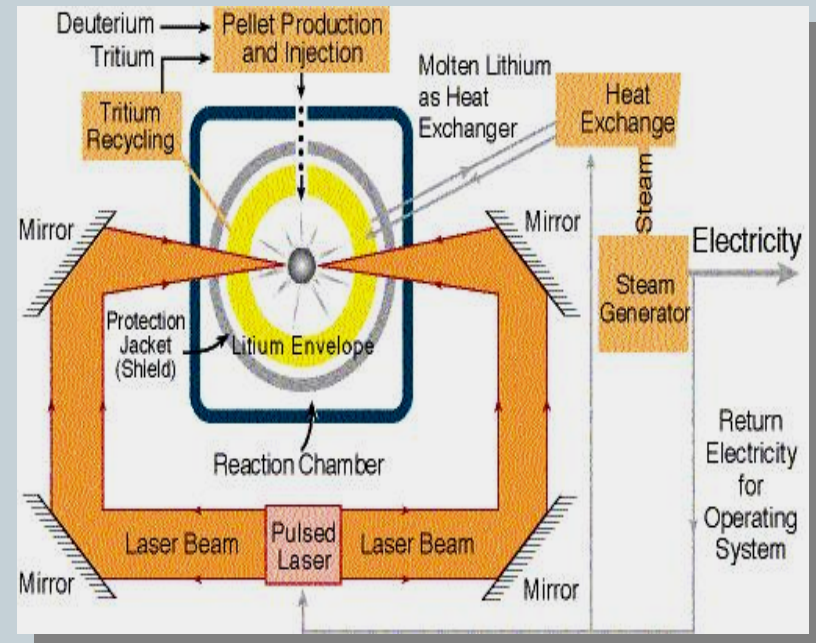
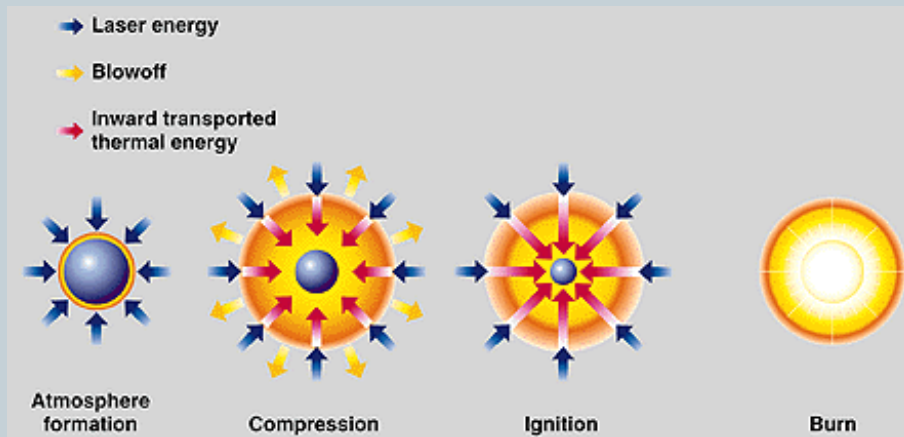


Energia liberata nella fusione ( $F_{\text{nuc}}$ ):

H	$2.1 \times 10^8$ kWh/kg	$6 \times 10^{-3}$ energia/massa
---	--------------------------	----------------------------------

# Fusione Inerziale

61



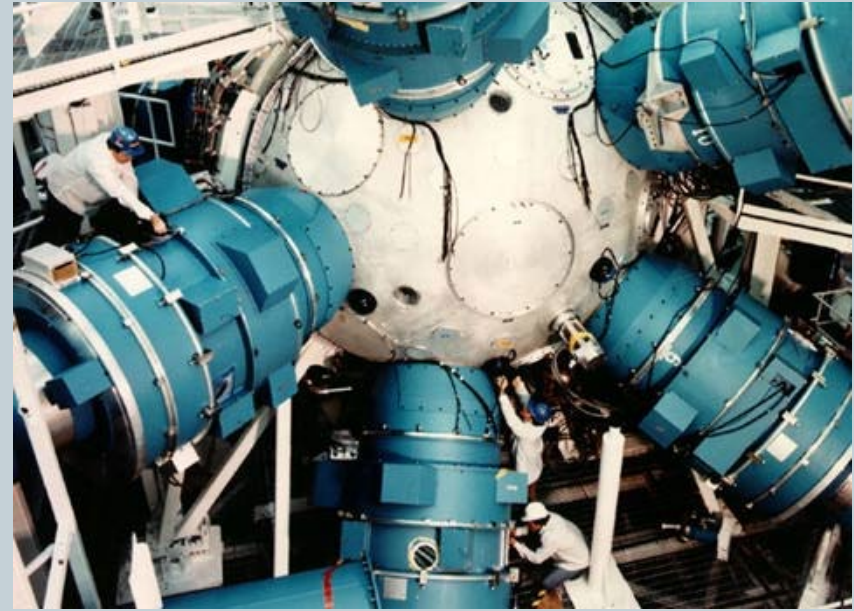
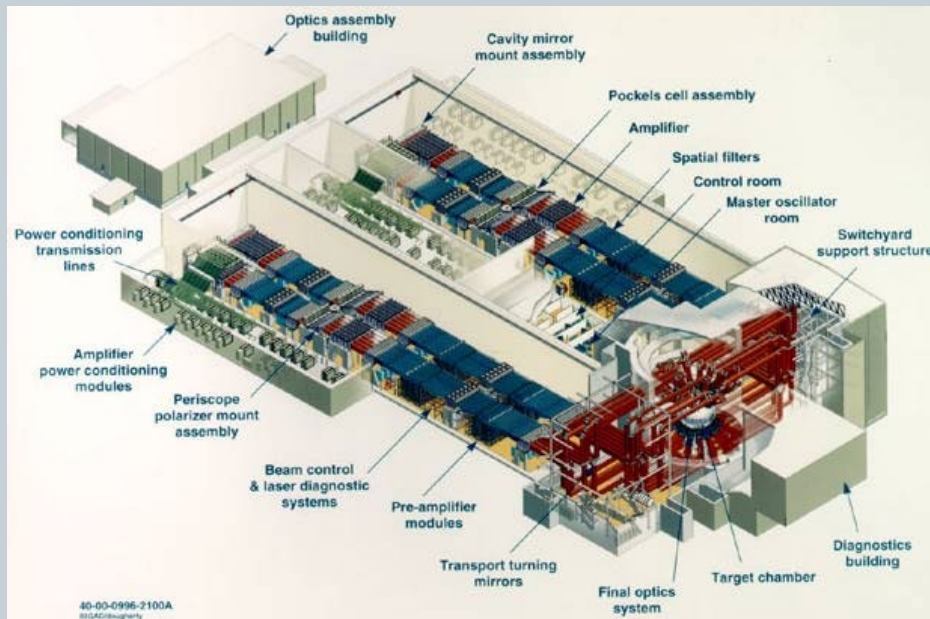
*Impulsi laser della durata di  $10^{-12}$  s con potenza di  $10^{15}$  W*

(Potenza elettrica media Italia: 32 GW)



# National Ignition Facility - Livermore

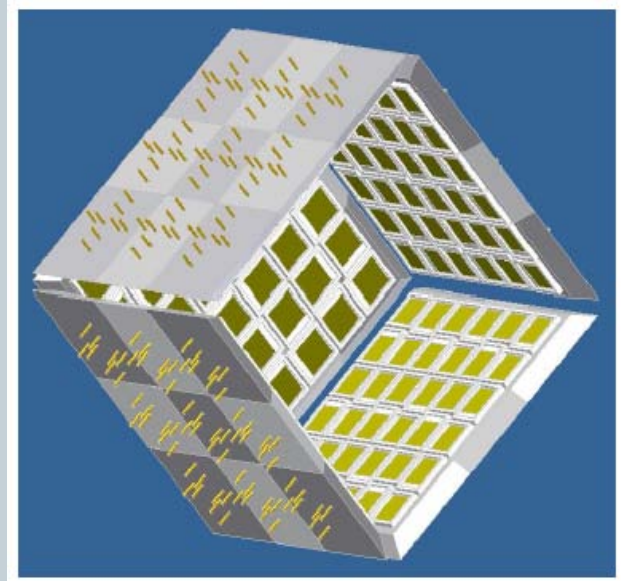
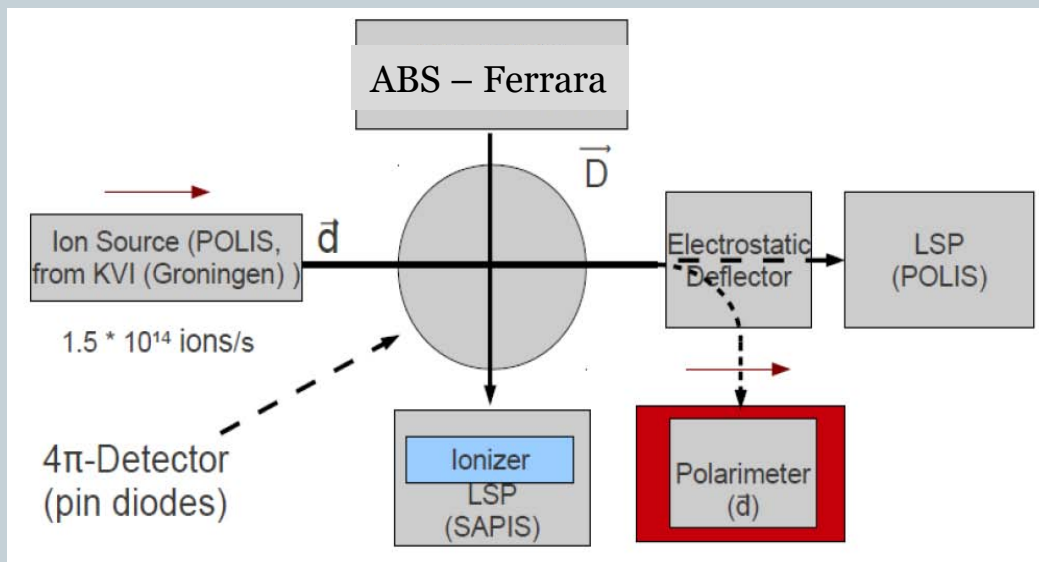
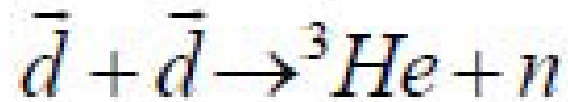
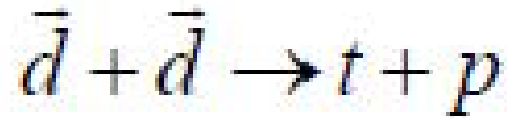
62



- 192 lasers
- $10^6$ J fired every second
- $10^6$ W = 10,000 100W lightbulbs

# Misure di “fusione polarizzata” di UNIFE a Gatchcina (Russia)

63



# Raffreddamento laser

64

- Temperatura e velocità:
  - Teoria cinetica dei gas: proporzionalità tra temperatura assoluta ed energia cinetica media delle molecole del gas.
    - ✧  $V$  tende a zero al tendere di  $T$  allo zero assoluto.
- Raffreddare un gas di atomi equivale a “rallentare” gli atomi stessi



# Forza spontanea

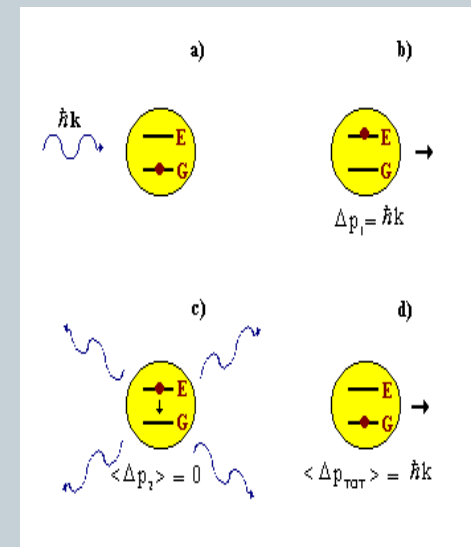
65

## The Nobel Prize in Physics 1997

"for development of methods to cool and trap atoms with laser light"

Steven Chu, Claude Cohen-Tannoudji, William D. Phillips

- Il fotone ha una quantità di moto  $p=h/\lambda$
- Interazione atomo-fotone: conserva la quantità di moto.
- **Assorbimento**: momento trasferito in unica direzione.
- **Emissione spontanea**: emissione isotropa
- Grande n° cicli assorbimento-emissione spontanea: trasferimento quantità di moto da radiazione ad atomo.

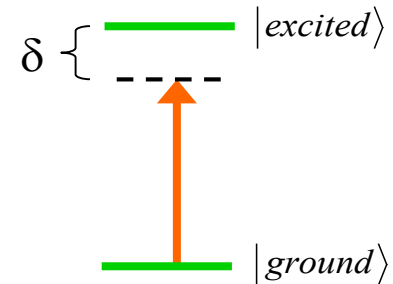
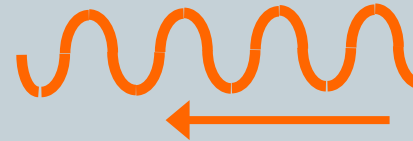
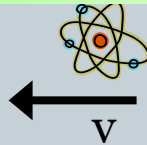
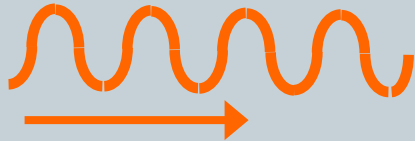


- Sistema in moto: la **frequenza dei fotoni** viene alterata (Doppler shift)
- Sistema in **avvicinamento**: spostamento **verso il blu**
- Sistema in **allontanamento**: spostamento verso il **rosso**

# Come può un laser “raffreddare”?

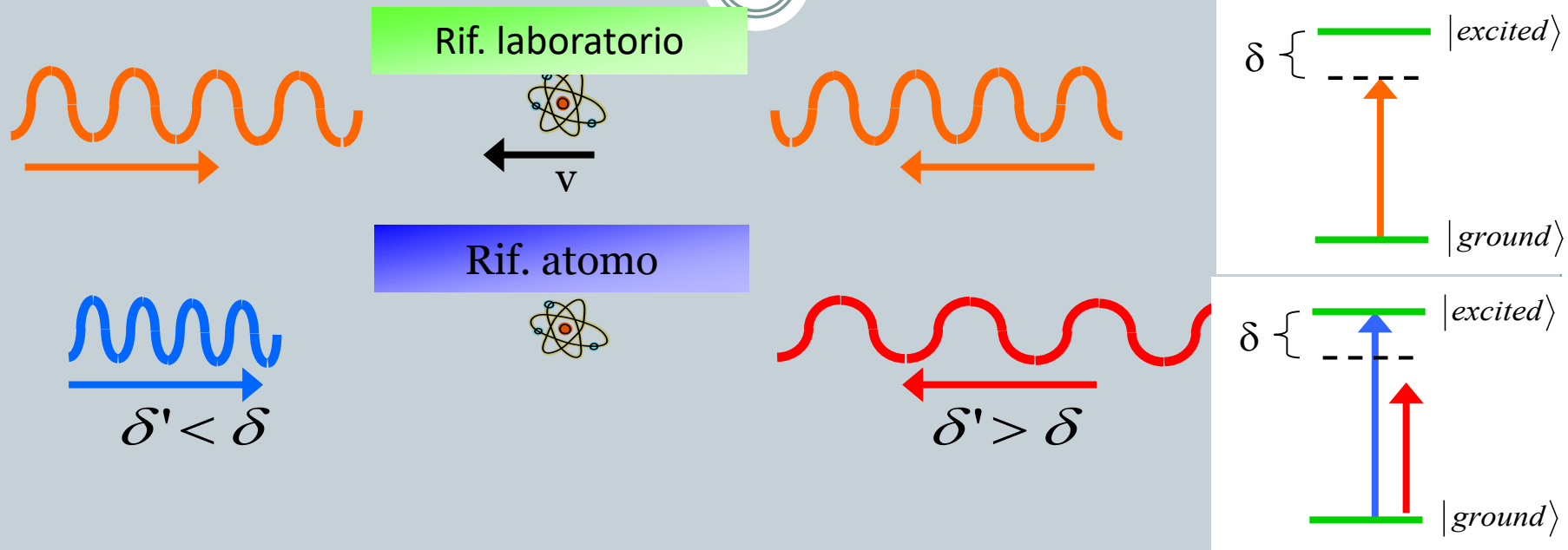
66

Rif. laboratorio



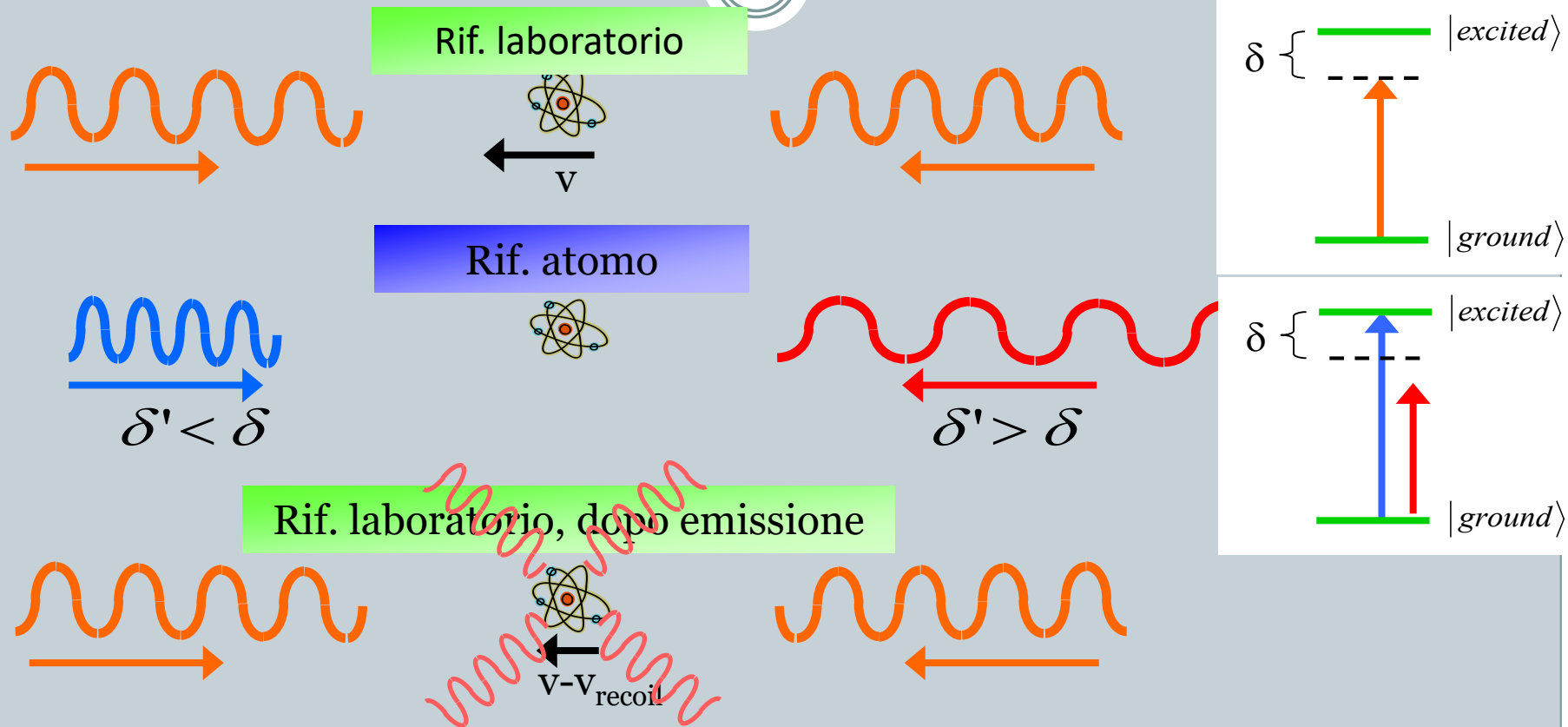
# Come può un laser “raffreddare”?

67



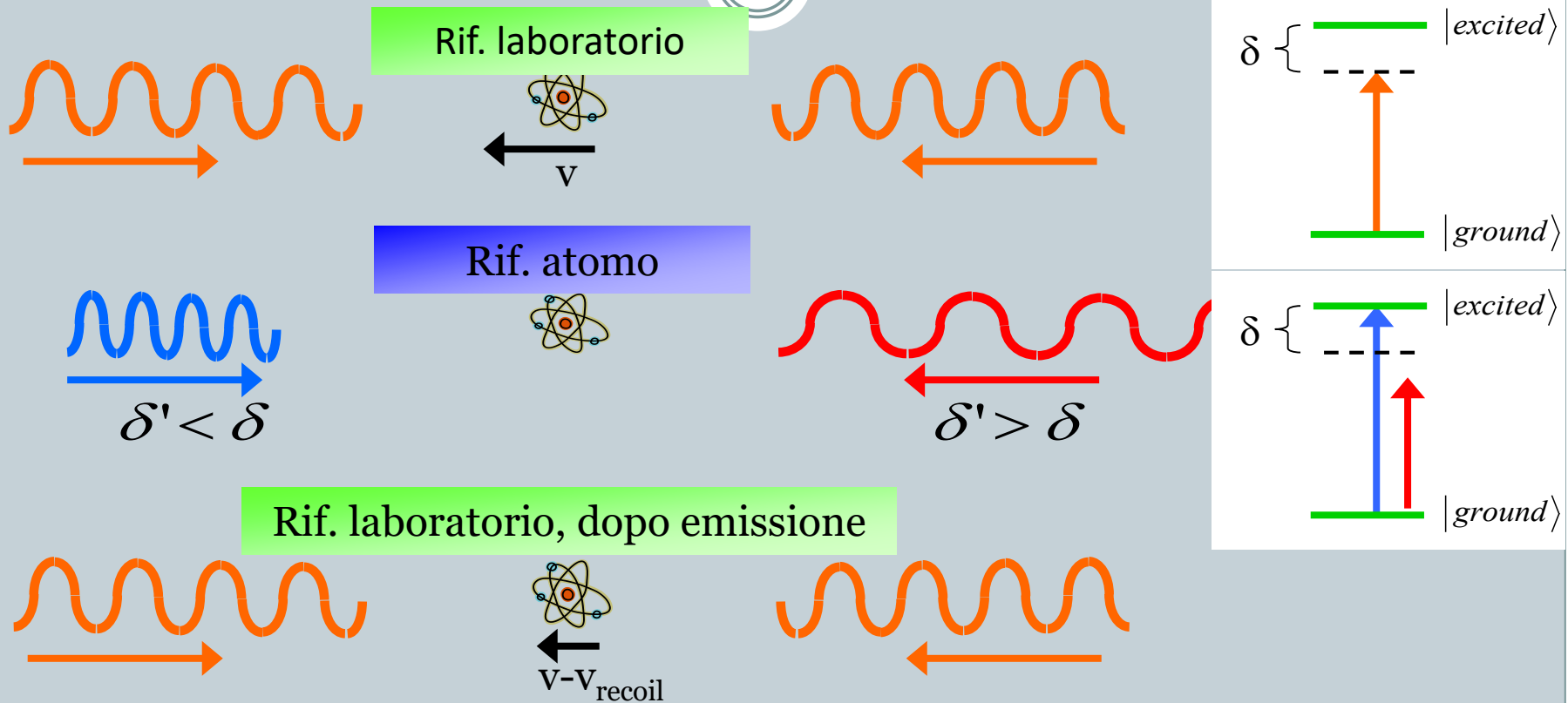
# Come può un laser “raffreddare”?

68



# Come può un laser “raffreddare”?

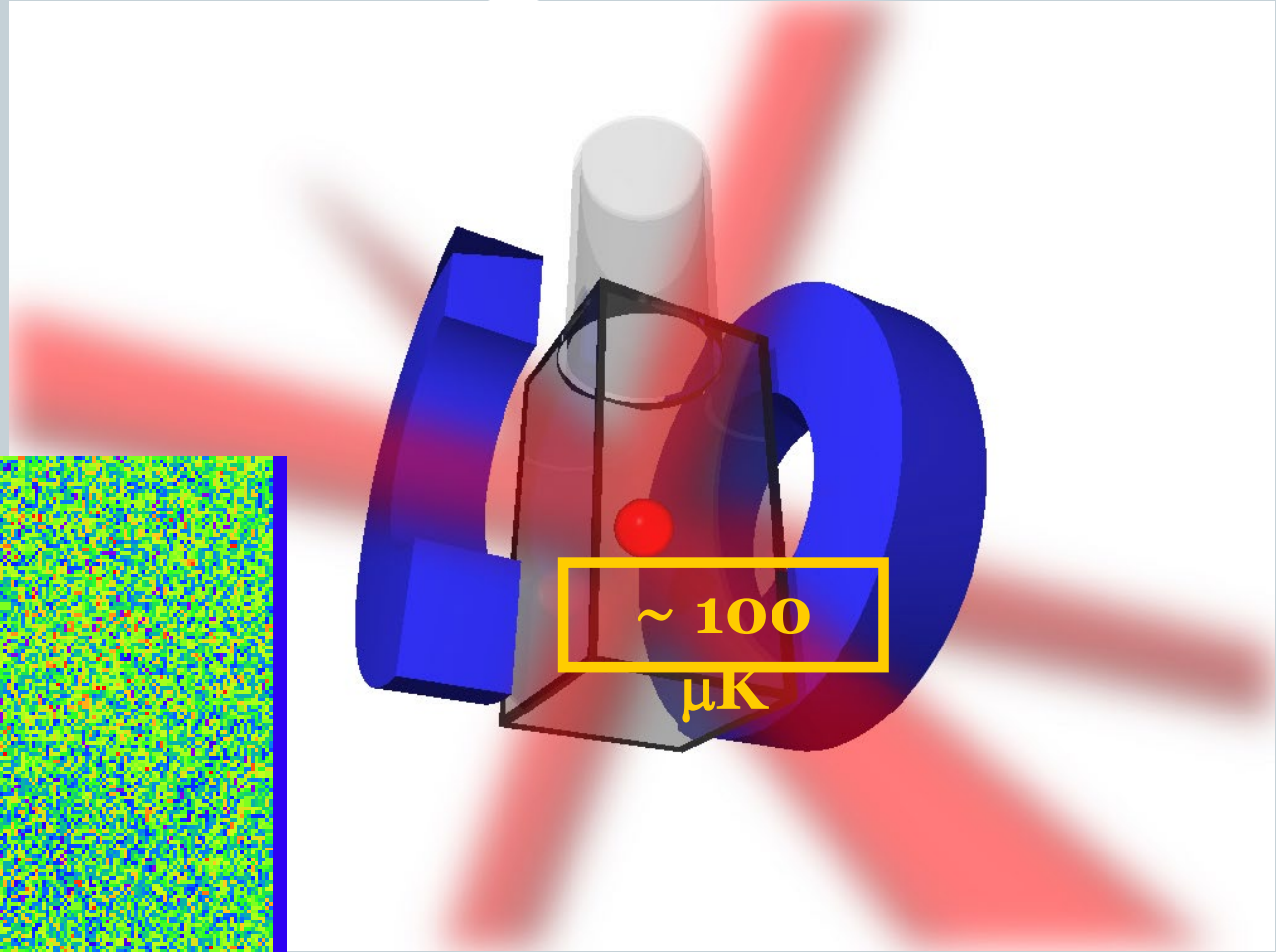
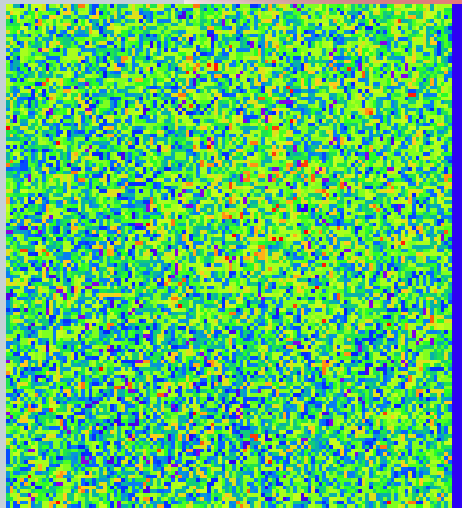
69



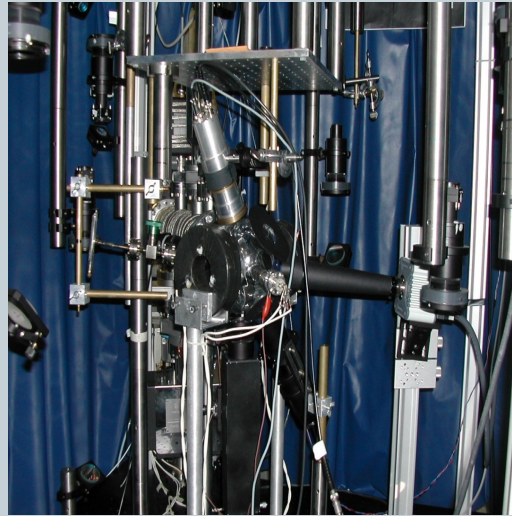
- Assorbimento di un fotone  $\rightarrow$  l'atomo rincula di  $p=h/\lambda$
- Radiazione di diseccitazione è isotropica  $\rightarrow$  contributo medio nullo
- Ripetizione processo a  $10^7$  rinculi/s  $\rightarrow$  decelerazione.

# Trappola “magneto-ottica”

70



# Trappola del Francio di UNIFE a Legnaro



# Applicazione del raffreddamento laser: la “condensazione di Bose-Einstein”

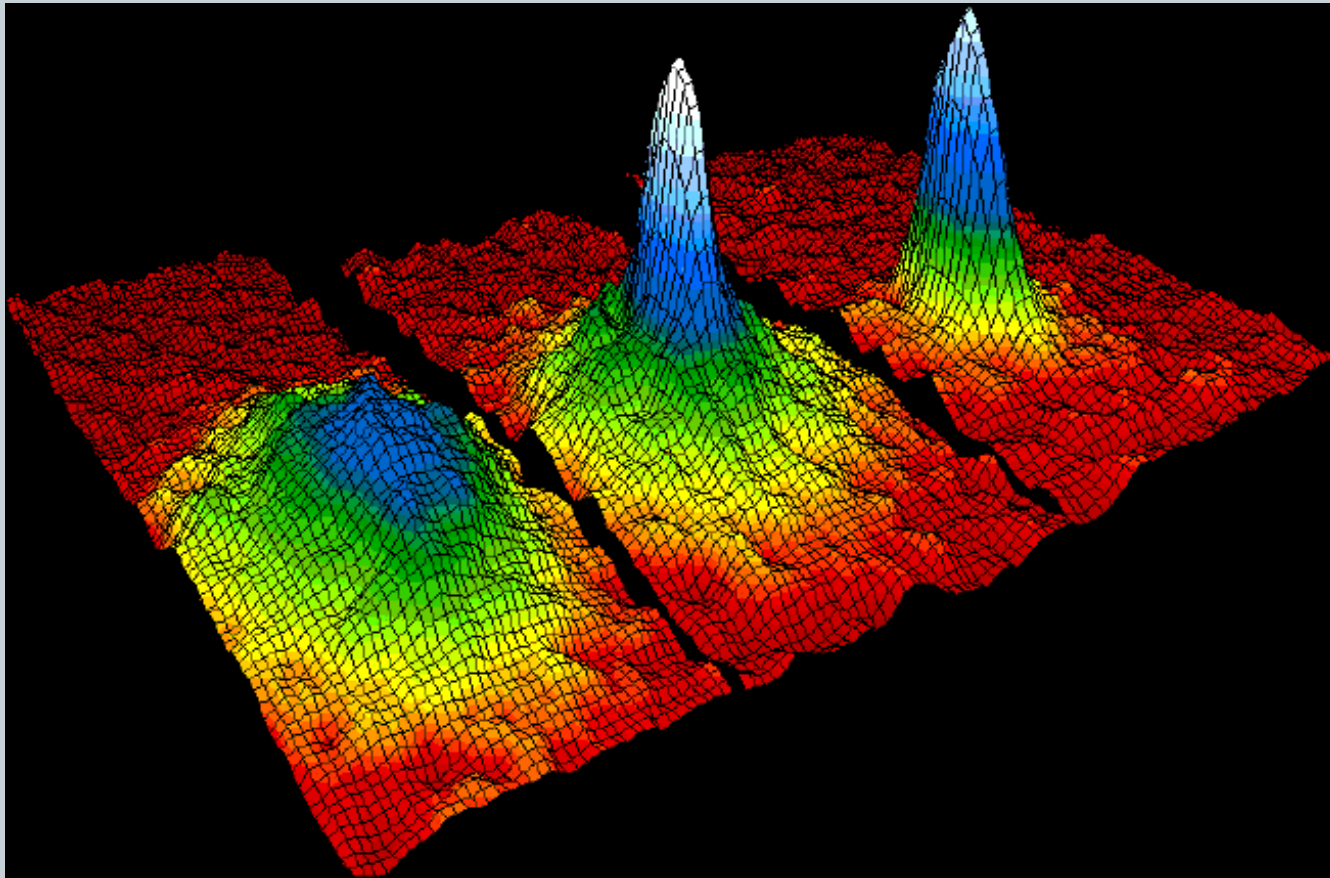
72

- Bose elaborò la statistica per i fotoni, Einstein la estese alle altre particelle a spin intero.
- Egli predisse che a una certa temperatura tutte le particelle bosoniche si aggregano nello stato fondamentale.
- Quando questo avviene, le funzioni d'onda delle particelle cominciano a sovrapporsi e perdono la loro individualità. (**Condensazione di Bose-Einstein**).
- Usando questo effetto è possibile mettere un gran numero di atomi in un singolo stato quantico e studiare la natura ondulatoria della materia.



# Fotografia di un condensato di Bose-Einstein

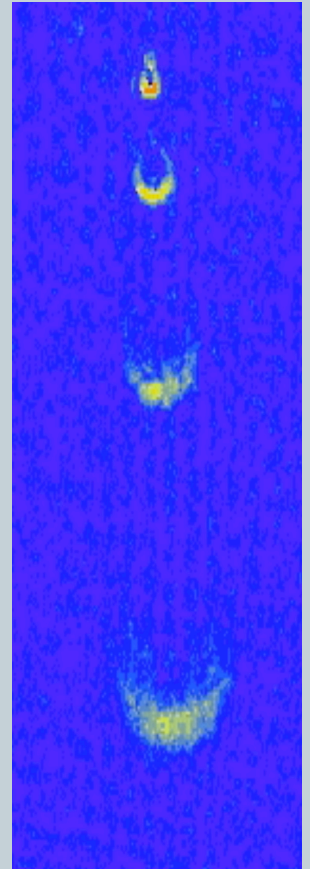
73



# Un laser di materia: il laser atomico

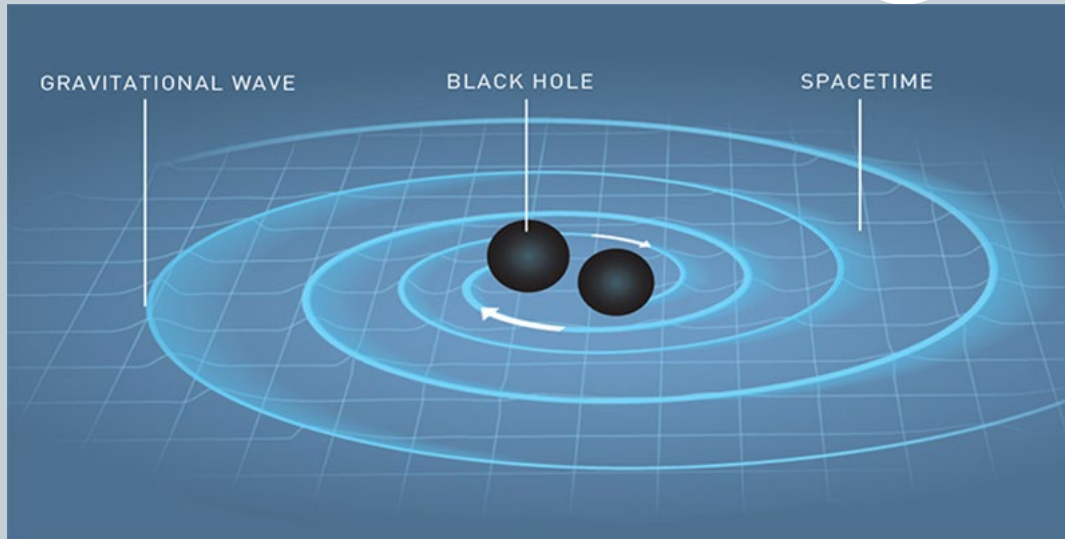
74

- Impulsi di atomi di Na nello stesso stato quantico accoppiati a un condensato confinato in una trappola.
- Ogni 5 ms un impulso RF trasferisce una frazione di atomi in uno stato non confinato, che esce dalla trappola accelerato dalla gravità.
- Ogni impulso contiene tra  $10^5$  e  $10^6$  atomi.



# 2015: il laser rivela le onde dello spazio-tempo

75



1.5 miliardi di anni fa:  
due buchi neri si fondono

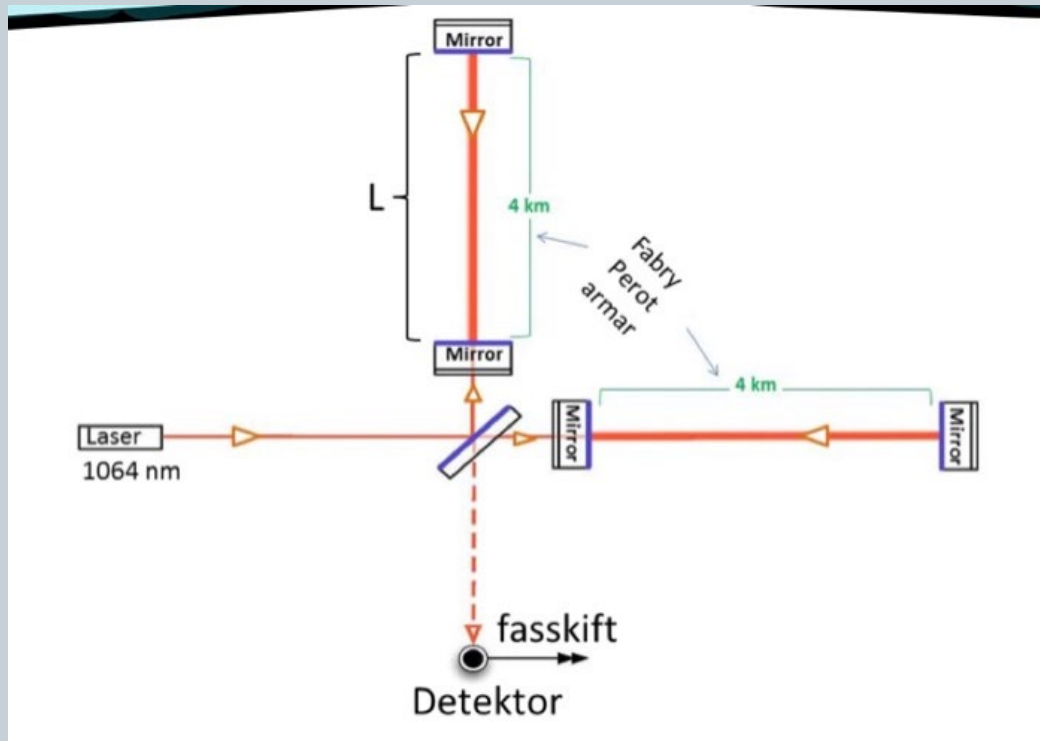
15 settembre 2015:

LIGO rivela una perturbazione dello  
spazio-tempo



# Un interferometro per le onde gravitazionali

76



## Laser: Nd:YAG

- $\lambda$  1064 nm
- P (laser) 20 W
- P (cavity) 100 kW

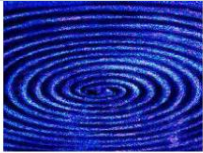
## Interferometro:

- Braccio 4 km
- No passaggi 250
- Sensibilità (fase)  $7 \times 10^{-9}$  rad
- Sensibilità (m)  $10^{-19}$  m

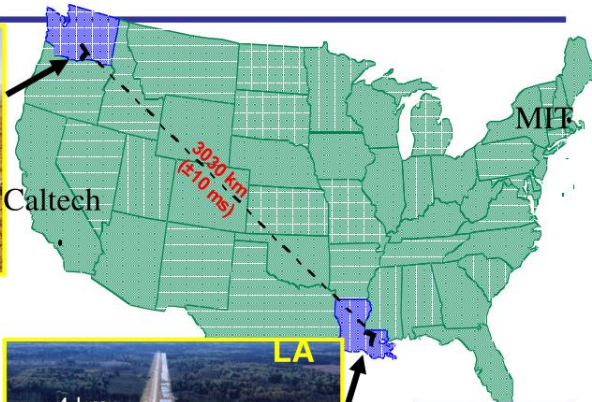
*(1000 volte più piccolo protone)*

# Il segnale

77

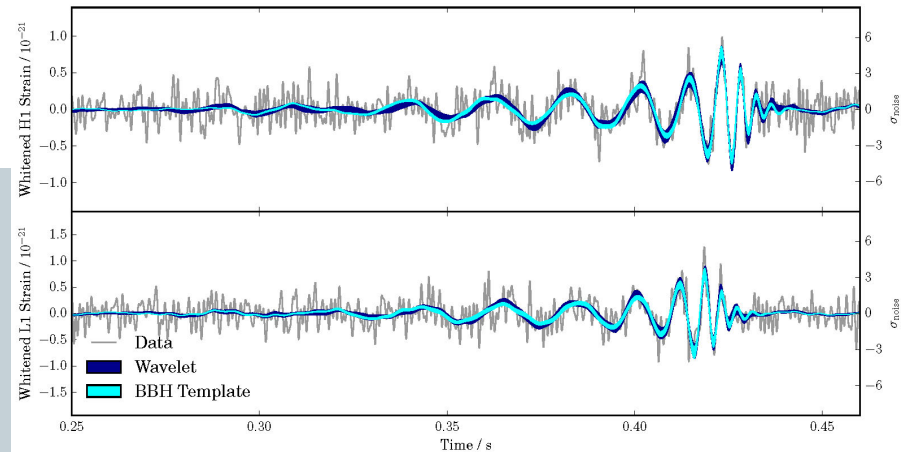


## LIGO: Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory



- Managed and operated by Caltech & MIT with funding from NSF
- Ground breaking 1995
- 1st interferometer lock 2000
- LIGO Scientific collaboration: 45 institutions, world-wide

March 2, 2007





# Effetto Schwinger: il laser e il “vuoto” quantistico

78

- Secondo la teoria dei campi quantistici, il vuoto, è pieno di particelle virtuali.
- Coppie virtuali di elettroni e positroni si creano ed annientano in breve tempo e distanza:

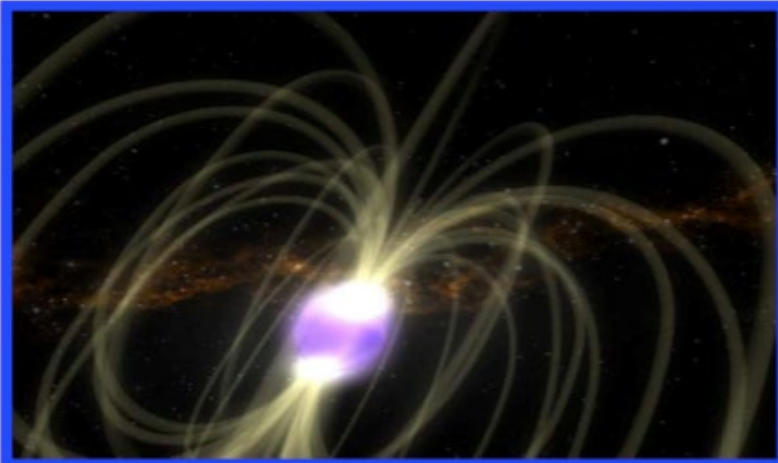
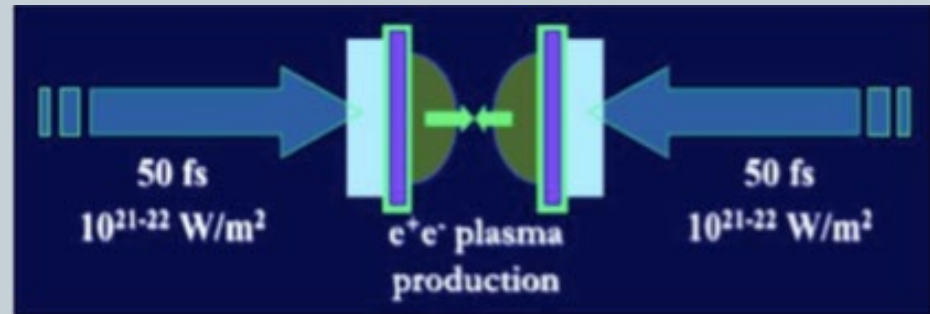
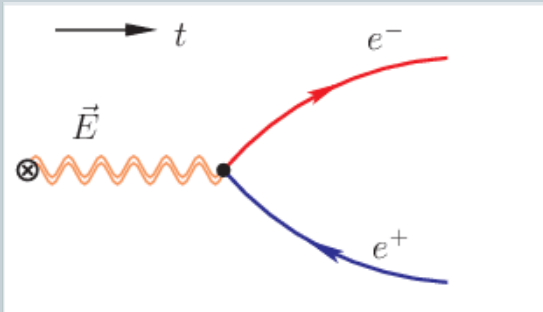
$$\Delta t \sim \frac{\hbar}{2m_e c^2} \simeq 10^{-21} \text{s}, \quad \Delta x \sim \frac{\hbar}{2m_e c} \simeq 10^{-12} \text{m}.$$

- Un forte campo elettrico nel vuoto attirerebbe elettrone virtuale e positrone in direzioni opposte separandole prima che si possano ricombinare:
  - coppie di elettroni e positroni reali possono essere create dal vuoto.
- Il campo elettrico deve essere forte, per fornire energia sufficiente per la produzione di coppie ( $E > 2 m_e c^2$ ).
- Per creare particelle reali, l'elettrone e il positrone devono essere separati di almeno una lunghezza d'onda Compton (in modo che i loro pacchetti d'onda non si sovrappongano molto).  $eE\lambda_e \geq 2m_e c^2$ .
- Oltre tale distanza, l'energia fornita dal campo elettrico è

$$E_{\text{th}} \triangleq \frac{2m_e c^3}{e\hbar} \simeq 10^{18} \text{V/m}.$$

# Effetto Schwinger: creazione di materia dal vuoto

79



ARTIST VIEW OF A MAGNETAR (NASA)

- Creazione di coppie in elevati campi elm
- Magnetar (stella neutroni):  $B = 10^{15} \text{ G}$

# Progetto: trasmissione tramite fibre ottiche

80

