

Parte 1

Introduzione: cosa, quando, come (e un po' di perché)

Ma 22.06.09 15-17 aula DIC

SOMMARIO

- Cosa è il laser:
percezione comune e caratteristiche fondamentali
- Quando:
un po' di storia e lo sviluppo di alcune applicazioni
- Qualche perché::
In che modo e per quali motivi (solo alcuni, per ora)
Il laser è uno strumento unico
- Come:
quali sono gli strumenti fondamentali per trattare il laser

Il laser richiede approcci di meccanica quantistica



Qualche richiamo un po' più generale sulla MQ
previsto nel corso

UN LASER IN VERSIONE BALNEARE



LASER: un nome che è una garanzia di notorietà...

NOMINA SUNT IN REBUS

L. : light

A.: amplifier

S.: stimulated

E.: emission

R.: radiation

Un sistema che emette radiazione luminosa
(va bene, si spiega anche classicamente, alla Maxwell)

Coinvolge amplificazione basata su emissione stimolata



Interazione radiazione materia trattata con un po' di MQ;
ci vuole almeno Einstein (approccio semiclassico)

Attenzione! Il LASER non è solo un amplificatore (piuttosto è un oscillatore!)

LASER figlio del MASER (ma oggi poco rilevante fare sorgente coerente di MW)

- 10^9 yr. B.C. First lasers were OH molecules, 1.6 GHz, in the cosmos, invented by mother nature. They were “masers”: *Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation.*
- 1954: First manmade maser, Townes Gordon Zeiger, 24 GHz ammonia (NH₄)

UN PO' DI STORIA

- 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)

LASER E ACCADEMIA

Diversi altri premi Nobel in Fisica legati o dovuti al laser.
Tra gli ultimi (10 anni):

2007 - Albert Fert, Peter Grünberg

2006 - John C. Mather, George F. Smoot

2005 - Roy J. Glauber, John L. Hall, Theodor W. Hänsch ←

2004 - David J. Gross, H. David Politzer, Frank Wilczek

2003 - Alexei A. Abrikosov, Vitaly L. Ginzburg, Anthony J. Leggett

2002 - Raymond Davis Jr., Masatoshi Koshiba, Riccardo Giacconi

2001 - Eric A. Cornell, Wolfgang Ketterle, Carl E. Wieman ←

2000 - Zhores I. Alferov, Herbert Kroemer, Jack S. Kilby ←

1999 - Gerardus 't Hooft, Martinus J.G. Veltman

1998 - Robert B. Laughlin, Horst L. Störmer, Daniel C. Tsui

1997 - Steven Chu, Claude Cohen-Tannoudji, William D. Phillips ←

(LA MIA PRIMA) PERCEZIONE DEL LASER



(LA MIA PRIMA) PERCEZIONE DEL LASER



Goldfinger 1962

Oh, e gli occhiali
di sicurezza???



(LA MIA PRIMA) PERCEZIONE DEL LASER

Raggio laser come sistema unico ed eccezionale per realizzare scopi meravigliosi...



COSA E' PER VOI UN LASER?

Ad esempio:

- Applicazioni meccaniche (spallation) e trattamento materiali
- Telecomunicazioni
- Telerilevamento
- Diagnostica materiali (frattura, crepe)
- Diagnostica superfici su scala micro/nano
- Caratterizzazione proprietà ottiche materiali e sistemi
- Optoelettronica

.....

Grande varietà di applicazioni in cui conta, tra l'altro:

- Potenza (intensità)
- Possibilità di fare interferenza e carattere “non dispersivo” (coerenza)
- Capacità di indirizzare e focalizzare
- Monocromaticità e sintonizzabilità

NO COMMENT



Laser famoso per raggi della morte scenici e, ahinoi, progetti di raggi della morte veri...
(negli anni 80 e, sembra, anche attualmente)



Star Wars: quelle vere di Bush

*I satelliti Usa saranno armati e in grado di colpire qualunque luogo terrestre
Questo progetto metterebbe nuovamente in pericolo gli equilibri internazionali*



Il raggio della morte continua a trovare estimatori potenziali a partire dagli anni 60 fino ad oggi...

POTENZA OLTRE IL PETAWATT...

Crossing the Petawatt Threshold

An extraordinarily powerful new laser promises to help make fusion power more easily attainable with "fast ignition." the laser beam's ultrashort pulses and extremely high intensities will also enable researchers to advance their understanding of the fundamental nature of energy and matter.



Laser physicist Deanna Peabody adjusts a diagnostic lens within the Petawatt's compressor chamber. At right is one of the diffraction gratings, while behind her is a turning mirror and the second compressor grating.

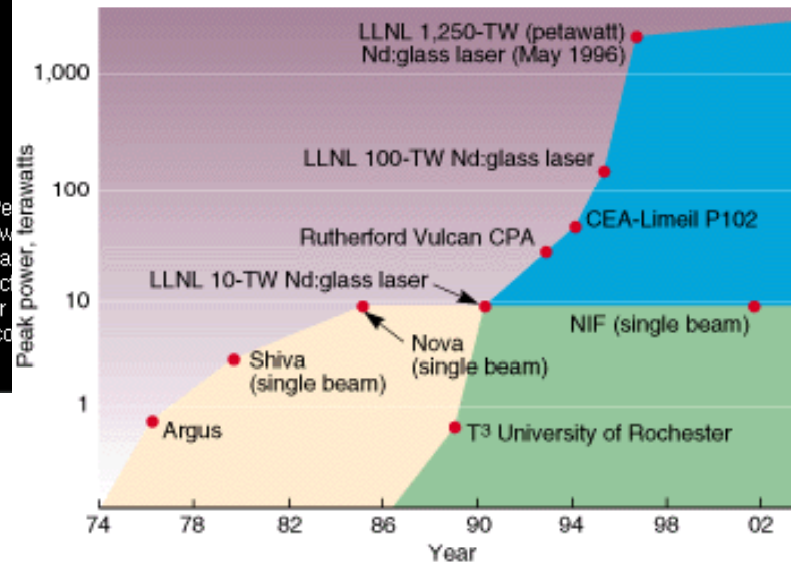
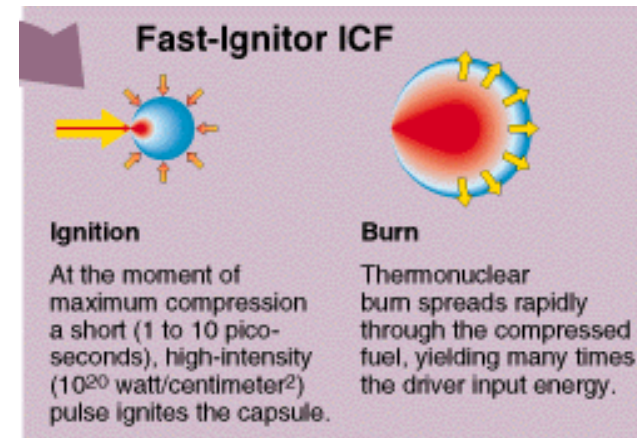


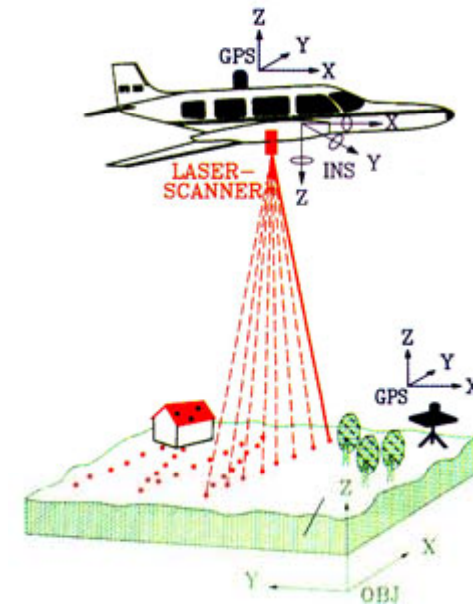
Figure 2. Milestones in laser development: early lasers (yellow), long-pulse technology (green), and chirped-pulse amplification technology (blue).

...NON SEMPRE NECESSARIA...

Laser scanners



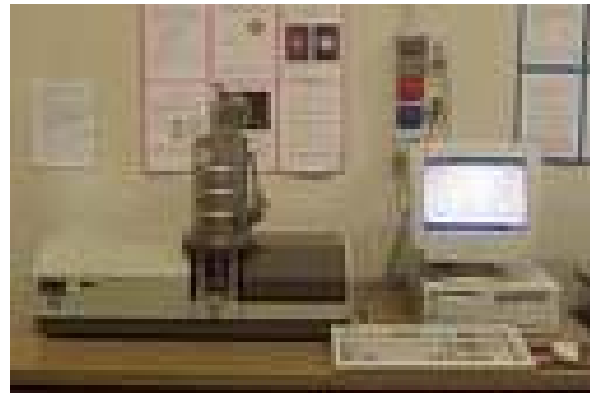
LASER-SCANNING



LIDAR

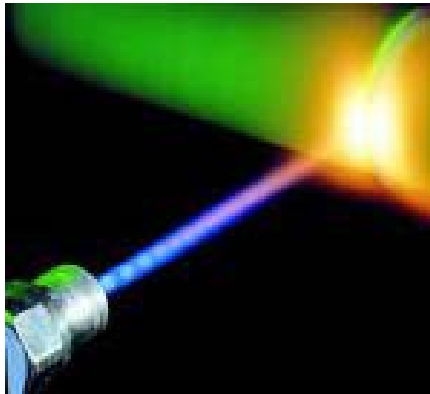


Laser profilometer



Laser spectrometer

...MA COMUNQUE UTILE



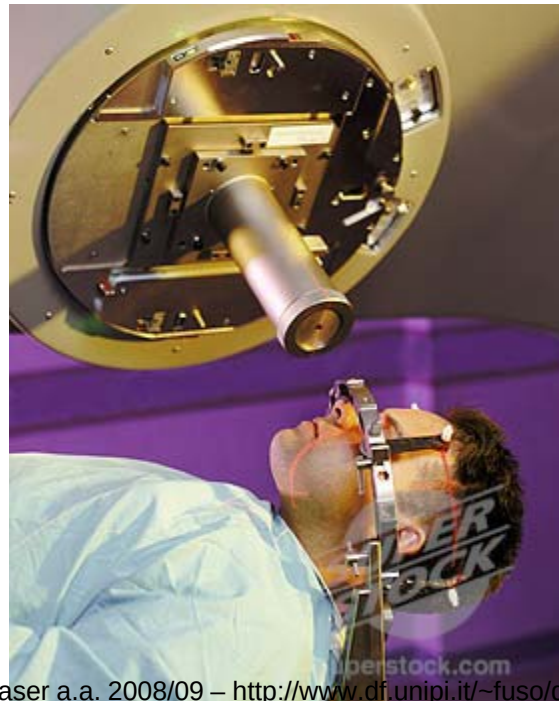
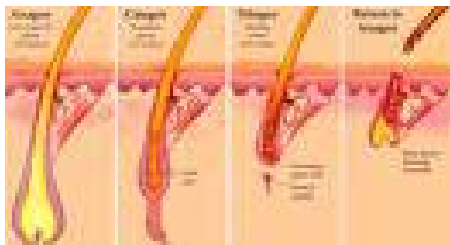
Laser cutting and welding



Laser marking and engraving



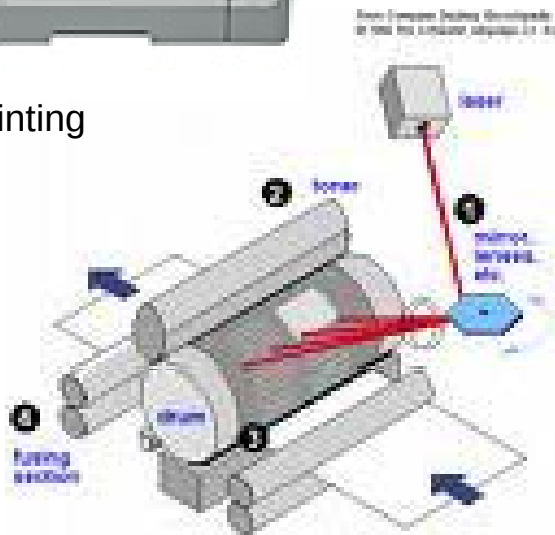
Laser therapy



APPLICAZIONI SU LARGA SCALA



Laser printing



TLC



ESPLOSIONE (COMMERCIALE!) LASER I

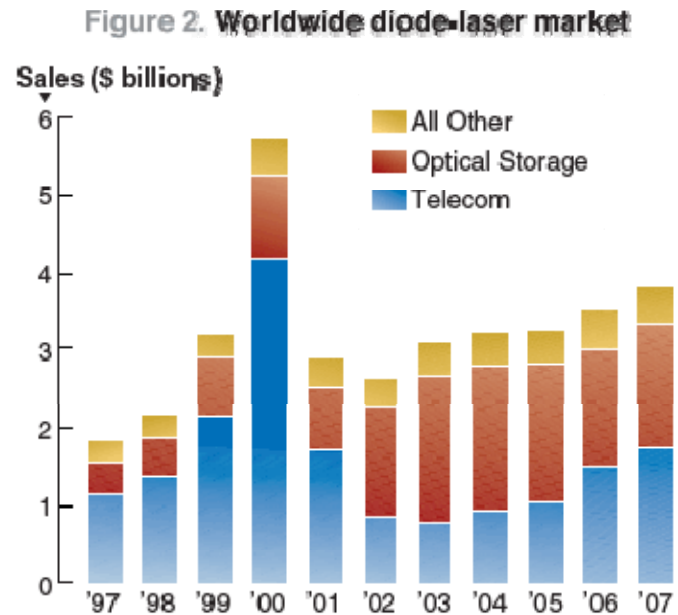
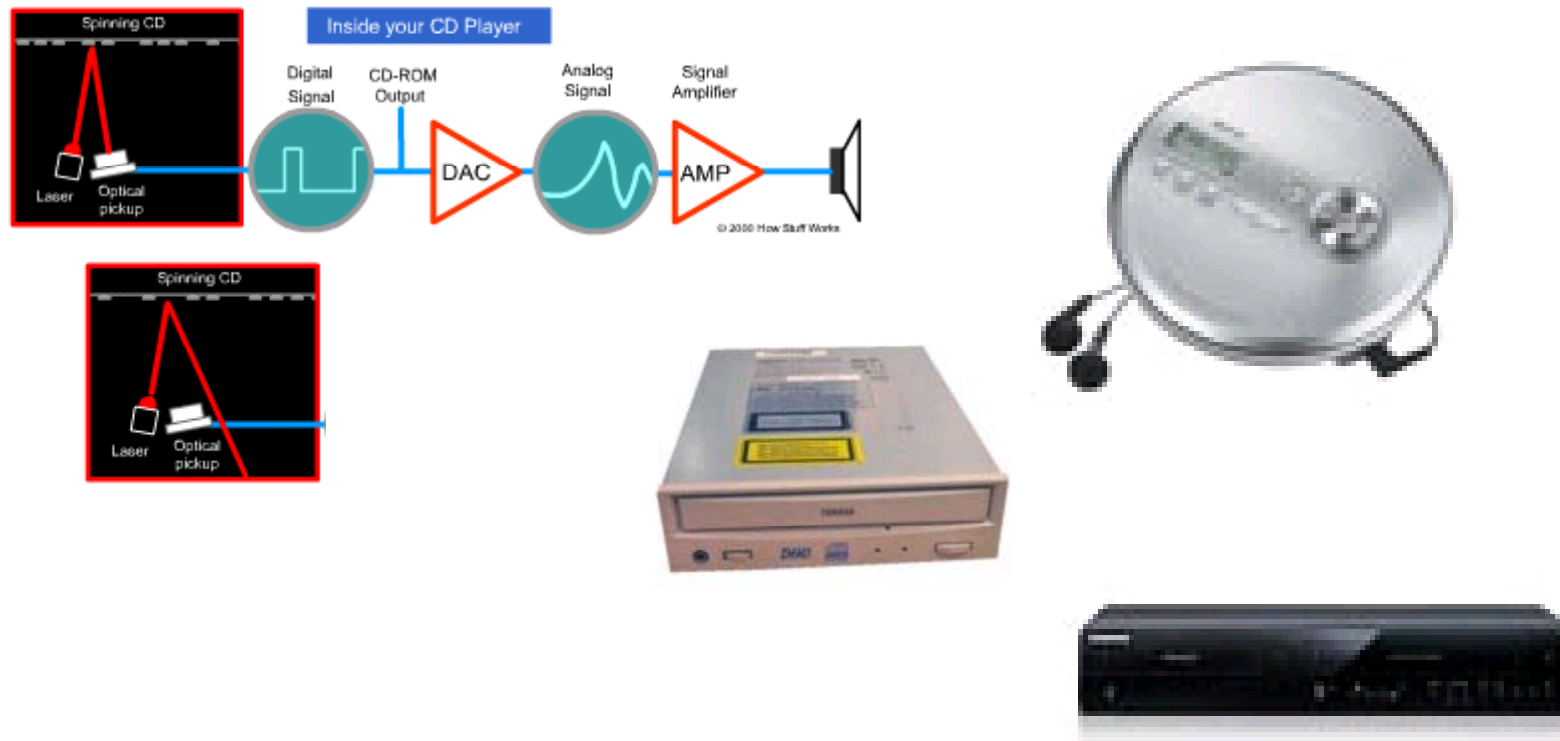


Table 1. Worldwide commercial diode-laser sales 2007–2008 (units)

DIODE UNITS		Materials processing	Medical therapeutics	Instrumentation	Basic research	Telecommunications	Optical storage	Entertainment	Image recording
<700 nm	2007	0	0	0	0	0	355,000,000	25,000,000	21,500
	2008	0	50	0	0	0	369,000,000	20,000,000	21,500
750–980 nm <100 mW	2007	0	0	0	0	0	359,000,000	0	9,800,000
	2008	0	0	0	0	0	345,000,000	0	10,100,000
750–980 nm 100 mW–10 W	2007	0	195,000	0	0	207,000	0	0	102,500
	2008	0	185,350	0	0	207,000	0	0	100,750
750–980 nm >10 W	2007	7,150	147,400	0	1,000	0	0	0	5,000
	2008	7,475	162,900	0	1,000	0	0	0	5,000
908–1550 nm	2007	0	925	0	0	12,643,000	0	0	0
	2008	0	1,300	0	0	14,243,000	0	0	0
>1550 nm	2007	0	0	0	0	0	0	0	0
	2008	0	0	0	0	0	0	0	0
Stacks	2007	500	3,609	0	0	0	0	0	0
	2008	525	4,713	0	0	0	0	0	0
TOTAL UNITS	2007	7,650	346,934	0	1,000	12,850,000	714,000,000	25,000,000	9,929,000
	2008	8,000	354,313	0	1,000	14,450,000	714,000,000	20,000,000	10,227,250

ESPLOSIONE (COMMERCIALE!) LASER II



Enorme sviluppo e diffusione del laser (**a diodo**) dagli anni '80 in poi

Tutti abbiamo diversi laser in casa, in ufficio, in auto, etc.!

OLTRE DATA STORAGE, ENTERTAINMENT, TLC

Moltissimi tipi di laser: a stato solido, a gas, a liquido; in continua o in impulsata; ad alta e bassa potenza; duplicati o in fondamentale;....

Sorgenti laser miniaturizzate (un laser a diodo di bassa potenza...) e gigantesche (un sistema per impulsi ultrapotenti)

Moltissime altre applicazioni (tradizionali e innovative) dei laser:

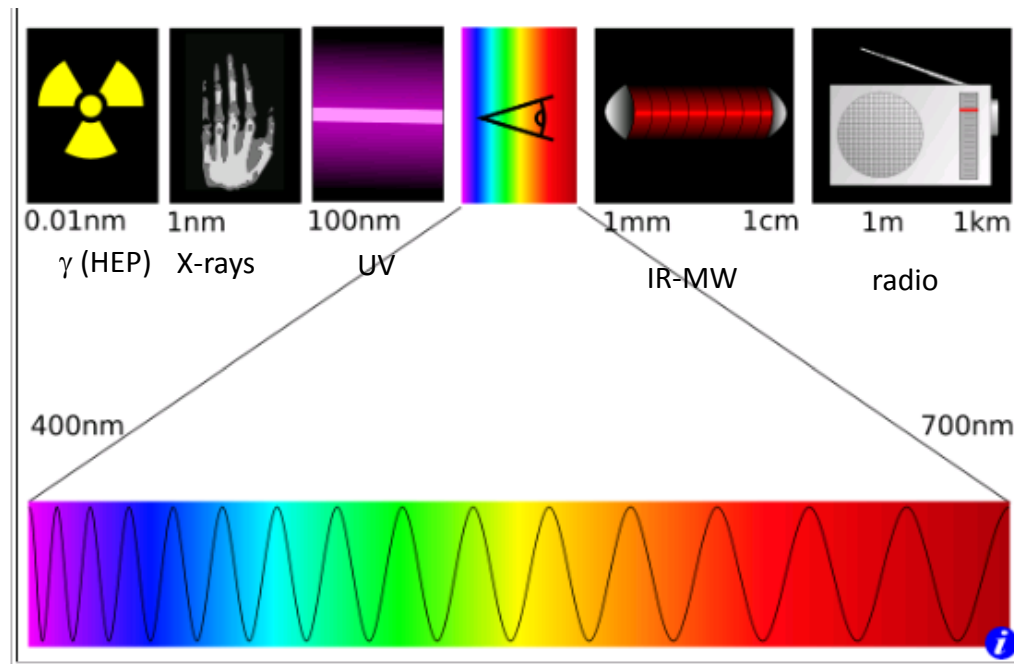
- Trattamento materiali: saldatura, taglio, annealing, ablazione e deposizione film,...
- Litografia ottica: laser ad eccimeri per definizione su resist di strutture < 100 nm
- Incisione, marcatura, olografia di materiali: e.g, sigle su bottoni o su componenti
- Giochi di luce e altre sciocchezze
- Applicazioni biomedicali: ablazione, dermoestetica, cauterizzazione,
- Applicazioni analitiche e sensoristica ambientale: spettroscopie, microscopie,...
- Metrologia: dalle analisi dimensionali agli standard di tempo e frequenza
- Ricerche fondamentali ed innovative: e.g., manipolazione materia
- (forse) innesco plasmi per fusione nucleare: confinamento inerziale
- chi più ne ha, più ne metta!

COSA È IL LASER?

Sorgente di luce (radiazione e.m.) non convenzionale:

- Intensa, utile per “sciogliere” lastre di acciaio;
- altamente direzionale, può essere mandata sulla Luna;
- ben colorata (rossa, blu, verde, e anche infrarosso o ultravioletta)

Il laser produce fasci di luce coerente (continua o impulsata che sia)



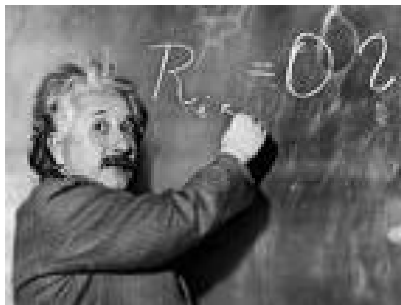
Per noi il laser ha:

Minima $\lambda = 157 \text{ nm}$ (laser eccimeri F_2 usato in litografia)

Massima $\lambda = 10.6 \text{ }\mu\text{m}$ (laser CO_2 usato per trattamento materiali)

Nota: esistono sorgenti coerenti anche in altre regioni, ad esempio raggi X e onde millimetriche

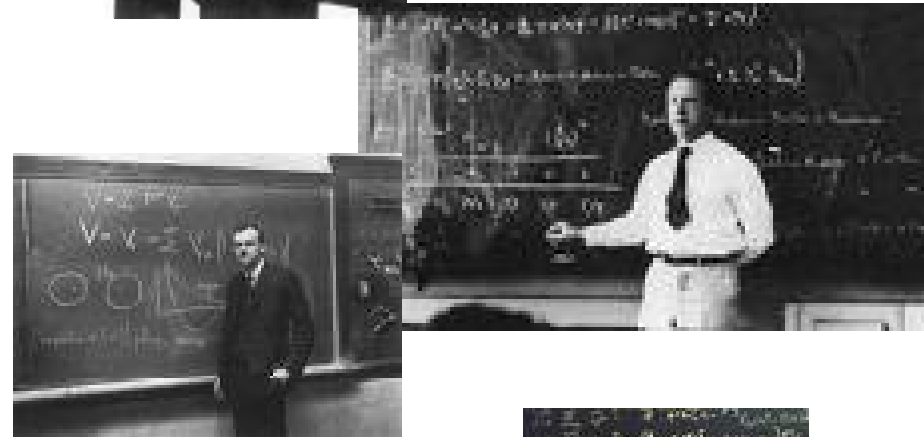
LASER FIGLIO DEL NOVECENTO



Teoria della relatività



Meccanica quantistica



ONDE ELETTROMAGNETICHE

Approccio ondulatorio (classico, Maxwell):

onda e.m. è perturbazione dipendente da r e t di campo elettrico e magnetico “accoppiati”



Le equazioni di Maxwell sono, riferite al vuoto:

$$I) \vec{\nabla} \cdot \vec{E}_0 = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$II) \vec{\nabla} \cdot \vec{B}_0 = 0$$

$$III) \vec{\nabla} \times \vec{E}_0 = -\frac{\partial \vec{B}_0}{\partial t}$$

$$IV) \vec{\nabla} \times \vec{B}_0 = \mu_0 \cdot \vec{J} + \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{E}_0}{\partial t}$$

In dielettrico omogeneo e isotropo

$$I) \vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0$$

$$II) \vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

$$III) \vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$IV) \vec{\nabla} \times \vec{B} = \epsilon \mu \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

e applicando il rotore di ambo i membri:

$$\vec{\nabla} \times \vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{\nabla} \times \vec{B}}{\partial t}$$

sostituiamo a secondo membro la quarta equazione in luogo di $\vec{\nabla} \times \vec{B}$:

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \epsilon \mu \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

otteniamo:

$$-\vec{\nabla}^2 \cdot \vec{E} = \vec{\nabla} \times \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -\epsilon \mu \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

cioè

$$\nabla^2 \vec{E} = \epsilon \mu \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

Analogamente applicando lo stesso procedimento alla quarta equazione otteniamo:

$$\nabla^2 \vec{B} = \epsilon \mu \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2}$$

Equazione delle onde

$$\nabla^2 \vec{E} - \epsilon \mu \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0$$

$$\nabla^2 \vec{B} - \epsilon \mu \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} = 0$$

ONDE PIANE

Una soluzione dell'eq. delle onde è rappresentata da onde piane:

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = E_0 e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t + \phi)} \hat{e}$$

$$\vec{B}(\vec{r}, t) = B_0 e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t + \phi)} \hat{b}$$

$$\hat{k} = \hat{e} \times \hat{b}$$

$\mathbf{k}$: vettore d'onda

ω : pulsazione

E_0, B_0 : ampiezze dei campi (con $E_0 = B_0 \omega/k$)

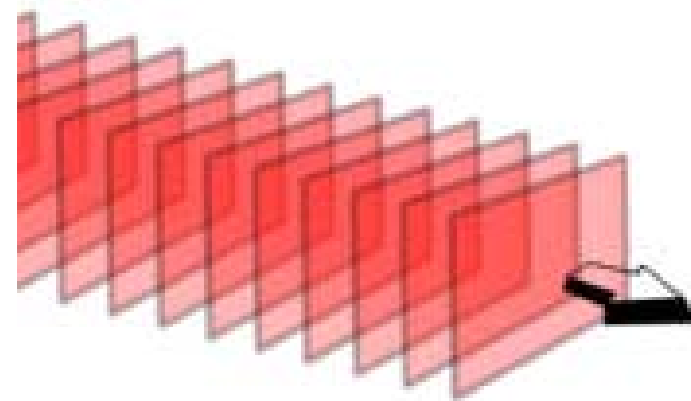
$\mathbf{e}, \mathbf{b}$: direzioni dei campi

Nota: la rappresentazione è complessa, ma per gli "effetti fisici" conta la parte reale!

Onda piana che si propaga lungo X (positivo) essendo polarizzata linearmente lungo Y

$$\vec{E}(x, t) = E_0 e^{i(kx - \omega t + \phi)} \hat{y}$$

$$\vec{B}(x, t) = B_0 e^{i(kx - \omega t + \phi)} \hat{z}$$



Fronti d'onda: luogo dei punti in cui $E(t)$ è uniforme: sono piani trasversali a $\mathbf{k}$

Propagazione: fronti d'onda "si muovono" con $v_{fase} = \omega/k$

Propagazione: vettore di Poynting ha direzione e verso di $\mathbf{k}$

PROPAGAZIONE E NOMENCLATURA

La soluzione di queste equazioni è un'onda che si propaga con velocità costante:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}}$$

Per Maxwell!!

Nel vuoto questa velocità diventa la velocità della luce:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}}$$

Si chiama **fronte d'onda** il luogo dei punti tali che, ad un certo istante, la soluzione delle equazioni delle onde assume valore costante. A seconda della possibilità di modellizzare l'onda a seconda della forma del suo fronte d'onda possiamo chiamare onda rettilinea se i suoi fronti d'onda sono rettilinei, circolare se i suoi fronti d'onda sono circolari e **onda piana** se i suoi fronti d'onda sono piani, infine, onda sferica se i suoi fronti d'onda sono superfici sferiche.

$$v_{fase} = c/n$$

n : indice di rifrazione “ordinario” (reale)
 $n = \sqrt{\epsilon_R}$ (con ϵ_R reale)
(per le situazioni di interesse ottico $\mu_R=1$)

λ : lunghezza d'onda: distanza tra due fronti d'onda consecutivi
 T : periodo: tempo necessario perché un fronte d'onda si muova di λ

$v = \frac{\lambda}{T}$ dove si ritrova la **velocità di fase** cioè la nostra velocità di propagazione dell'onda.

Altre proprietà dell'onda sinusoidale sono:

$$\nu = \frac{1}{T} \text{ la frequenza;}$$

$$\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T} \text{ la pulsazione;}$$

$$\vec{k} = \frac{2\pi}{\lambda} \text{ il numero d'onda o vettore d'onda che rappresenta la direzione di}$$

propagazione dell'onda.

Nel visibile (e nel vuoto):

$$\lambda \sim 350-750 \text{ nm}$$



$$\nu \sim 10^{14}-10^{15} \text{ Hz}$$

(ONDE SFERICHE)

Altre soluzioni possibili per equazione d'onda, ad esempio onde sferiche

Un'onda è sferica se il suo [fronte d'onda](#) è una sfera. Ciò vuol dire che un'onda sferica è tale quando la sorgente dell'onda è puntiforme in modo che il fronte d'onda si propaghi in proporzione alla distanza r dalla sorgente. Naturalmente poiché per quanto piccola, una sorgente non è mai puntiforme al finito, anche questo modello è soggetto ad approssimazione fisica. In generale un'onda sferica è rappresentabile allo stesso modo di un'onda piana.

sono quelle in cui i suoi fronti d'onda sono sfere. In questo caso le derivate delle equazioni delle onde del [campo elettrico](#) e del [magnetico](#) possono essere espresse in termini di [coordinate sferiche](#) ponendo uguali a zero le derivate rispetto a θ e a φ . Dunque, tenendo conto della simmetria sferica nello spazio, la nostra equazione delle onde è del tipo:

$$\nabla^2 \psi = \frac{1}{r} \frac{\partial^2 (r\psi)}{\partial r^2}$$

la cui soluzione generale è della forma:

$$\psi(r, t) = \frac{f(t - r/c)}{r}$$

Conservazione intensità:

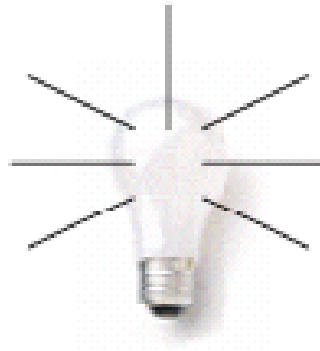
$$S \sim E^2 r^2 = 1/r^2 r^2 = \text{cost}$$

Onda sferica adatta per sorgenti puntiformi (e isotrope)

Tipico per sorgenti non-laser (un laser ha bisogno di “una direzione privilegiata”)

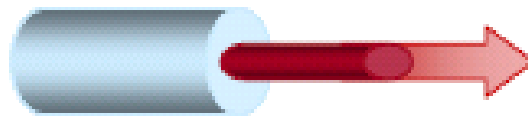
PERCHÉ IL LASER È UNICO (LO VEDREMO MEGLIO POI)

Luce normale



BASSA DIREZIONALITA'
BASSA MONOCROMATICITA'
BASSA COERENZA
BASSA POTENZA

Luce laser



ALTA DIREZIONALITA'
ALTA MONOCROMATICITA'
ALTA COERENZA
ALTA POTENZA

Coerenza??

ONDE PIANE E LASER

$$\vec{E}(x,t) = E_0 e^{i(kx - \omega t + \phi)} \hat{y}$$

Onda

piana: fronte d'onda

armonica: oscillazione periodica

progressiva: moto fronti d'onda

monocromatica: una sola frequenza

Caratteristiche generali della luce laser:

- ✓ Monocromaticità: un solo colore (o quasi, ma sempre possibile usare Fourier...)
- ✓ Direzionalità: c'è un solo k
- ✓ Intensità: dipende da E_0
- ✓ **Coerenza** temporale e spaziale:

Onda piana armonica progressiva monocromatica è “adeguata” a descrivere luce laser, almeno nel caso di fasci collimati (non focalizzati)

Nota: vero solo per situazioni ideali, ad esempio non esistono fronti d'onda piani indefiniti!

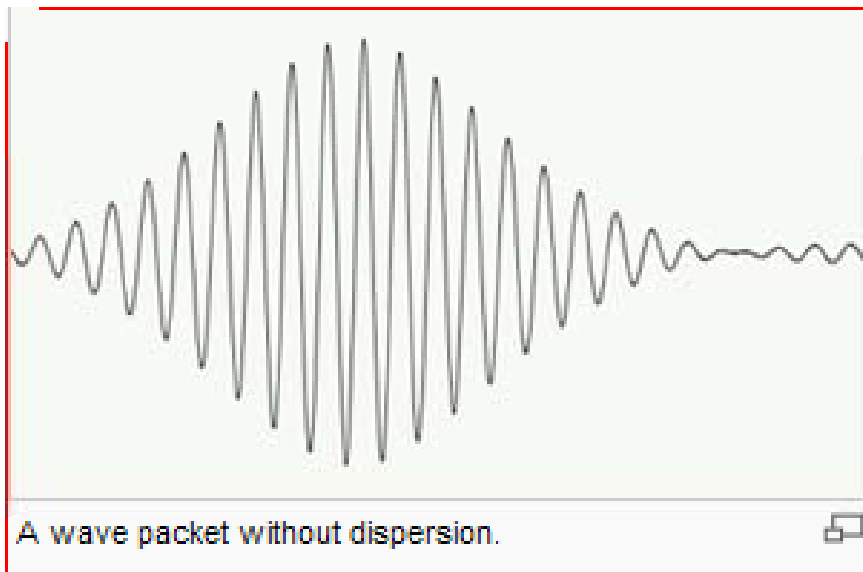
PACCHETTI D'ONDA

Principio di indeterminazione di Heisenberg (lo vedremo meglio poi):

$$\Delta X \Delta P \geq \frac{\hbar}{2}, \quad \Delta x \Delta k \geq \frac{1}{2}, \quad \Delta E \Delta t \gtrsim \frac{\hbar}{2}, \quad \Delta \omega \Delta t \geq \frac{1}{2}$$

A wave packet is a localized disturbance that results from the sum of many different wave forms. If the packet is strongly localized, more frequencies are needed to allow the constructive superposition in the region of localization and destructive superposition outside the region. From the basic solutions in one dimension, a general form of a wave packet can be expressed as

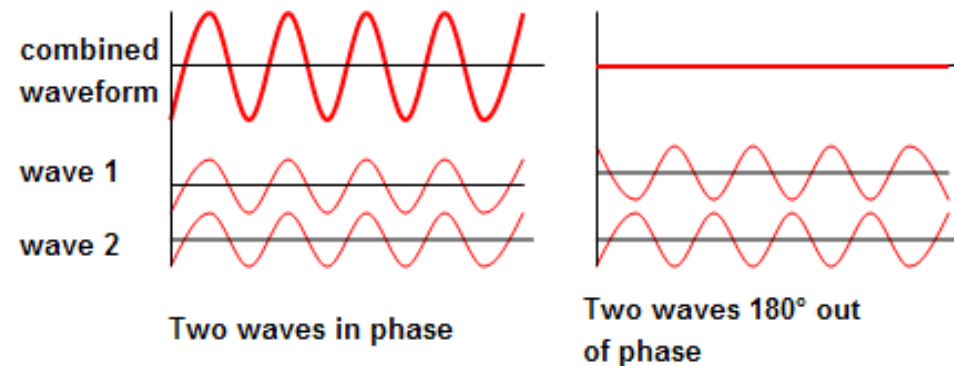
$$u(x, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} A(k) e^{i(kx - \omega(k)t)} dk. \quad \text{con} \quad A(k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} u(x, 0) e^{-ikx} dx.$$



Estensione finita nello spazio e nel tempo

INTERFERENZA

In physics, **interference** is the addition (**superposition**) of two or more **waves** that result in a new wave pattern. **Interference** usually refers to the interaction of waves which are correlated or **coherent** with each other, either because they come from the same source or because they have the same or nearly the same **frequency**.



Quanto detto risulta evidente nella trattazione analitica del problema, nel caso particolare di due onde armoniche A_1 e A_2 , entrambe di ampiezza a , che vibrano con la stessa frequenza ω e risultano sfasate di un angolo pari a g :

$$A_1 = a \cos(\omega t); A_2 = a \cos(\omega t + g)$$

Per il principio di sovrapposizione, l'onda risultante è data dalla somma delle due:

$$A_{\text{tot}} = A_1 + A_2 = (2a \cos g/2) \cos(\omega t + g/2)$$

Nell'espressione analitica dell'onda risultante A_{tot} (che si ottiene applicando le formule di prostaferesi per la somma di **coseni**), si possono individuare due fattori significativi: $(2a \cos g/2)$, che rappresenta l'ampiezza, e $\cos(\omega t + g/2)$, che esprime la dipendenza dal tempo. Da questo secondo fattore si evince che l'onda risultante vibra con la stessa frequenza delle due onde sovrapposte; dal primo, invece, si deduce che l'ampiezza risultante può variare tra 0 e $2a$ (il coseno è una funzione trigonometrica che varia tra 0 e 1), a seconda dello sfasamento g : è 0 quando $g/2$ vale 90° , cioè quando g è 180° , il che corrisponde al caso dell'interferenza distruttiva; è massimo quando $g = 0$, vale a dire quando le onde vibrano in fase, e si ha interferenza costruttiva.

COERENZA I

In physics, **coherence** is a property of waves, that enables stationary (i.e. temporally and spatially constant) **interference**. More generally, coherence describes all **correlation** properties between **physical quantities** of a wave.

$$\Delta\omega\Delta t \geq \frac{1}{2}$$

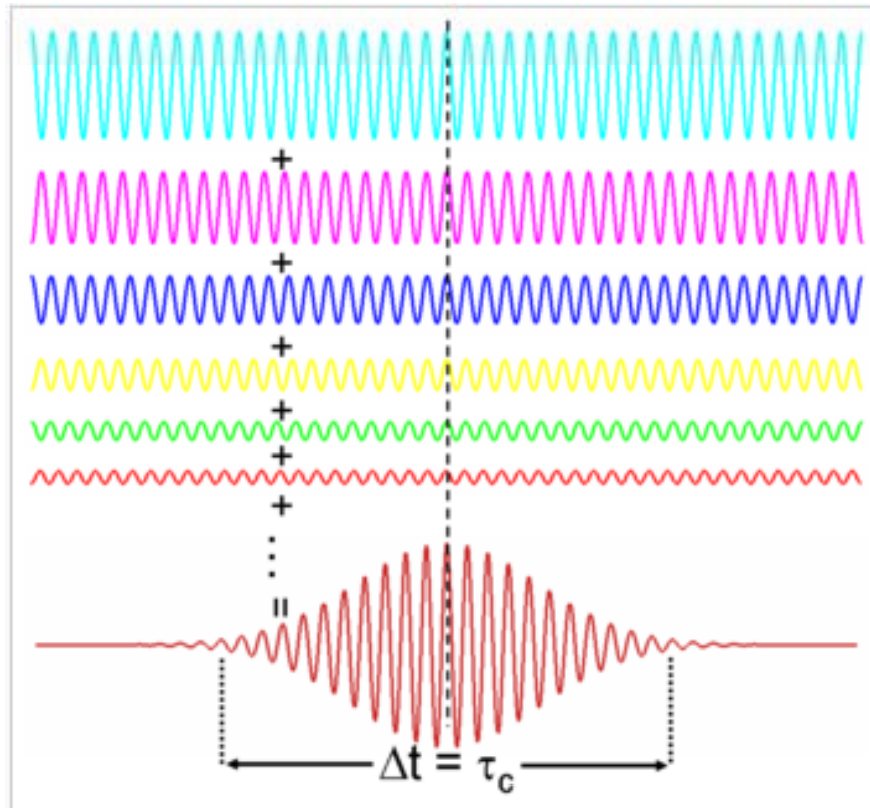


Figure 10: Waves of different frequencies (i.e. colors) interfere to form a pulse if they are coherent.

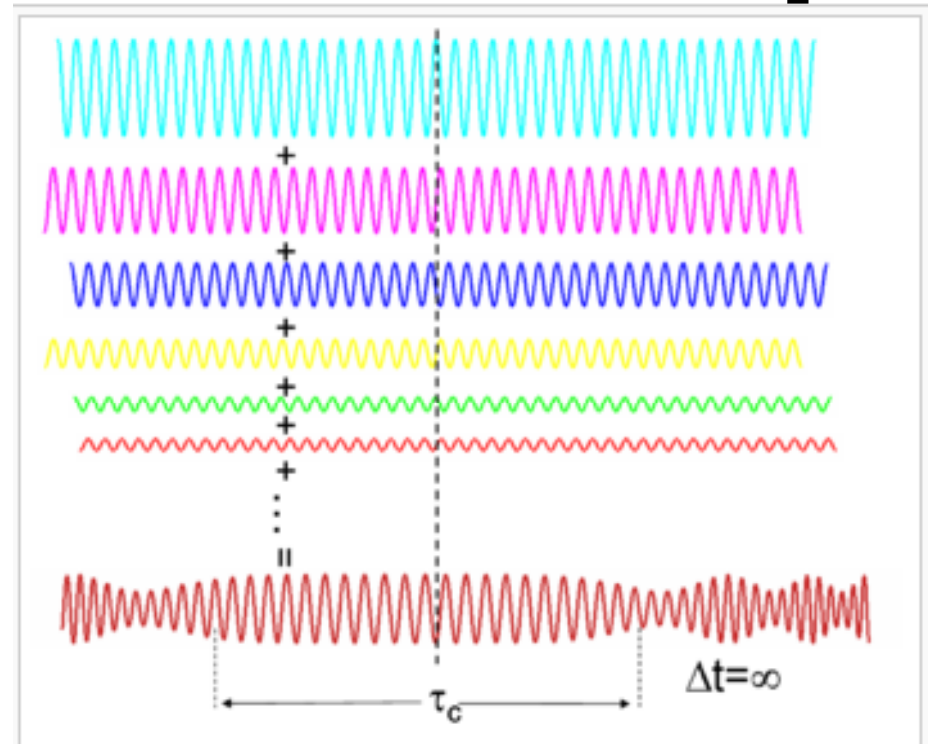


Figure 11: Spectrally incoherent light interferes to form continuous light with a randomly varying phase and amplitude

Onde di frequenza diversa mantengono relazione di fase costante

Coerenza spettrale

COERENZA II

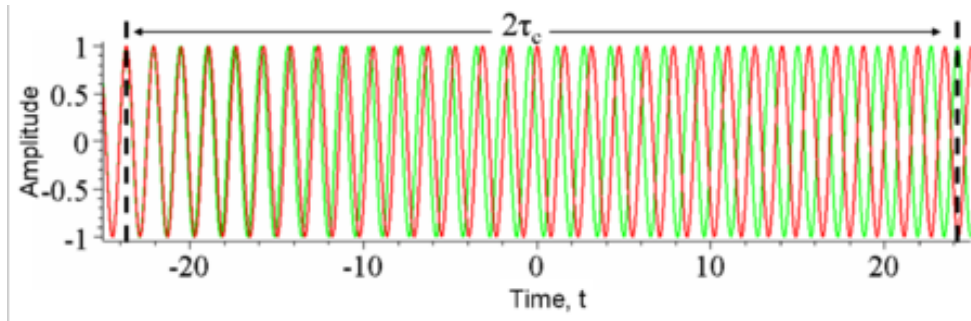


Figure 2: The amplitude of a wave whose phase drifts significantly in time τ_c as a function of time t (red) and a copy of the same wave delayed by $2\tau_c$ (green). At any particular time t the wave can interfere perfectly with its delayed copy. But, since half the time the red and green waves are in phase and half the time out of phase, when averaged over t any interference disappears at this delay.

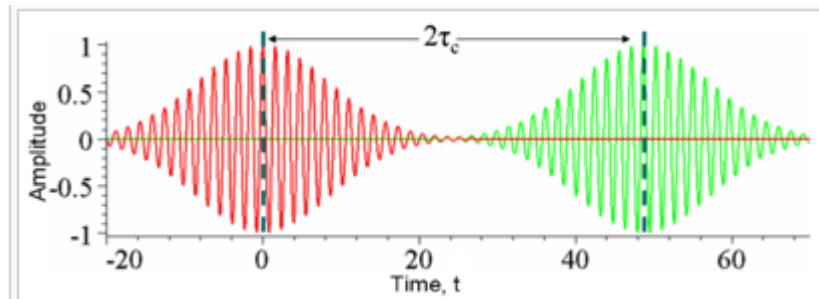


Figure 3: The amplitude of a wavepacket whose amplitude changes significantly in time τ_c (red) and a copy of the same wave delayed by $2\tau_c$ (green) plotted as a function of time t . At any particular time the red and green waves are uncorrelated; one oscillates while the other is constant and so there will be no interference at this delay. Another way of looking at this is the wavepackets are not overlapped in time and so at any particular time there is only one nonzero field so no interference can occur.

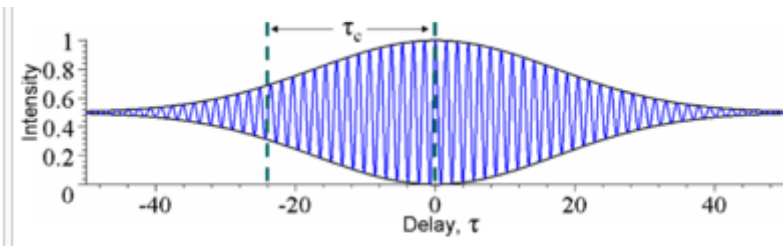


Figure 4: The time-averaged intensity (blue) detected at the output of an interferometer plotted as a function of delay τ for the example waves in Figures 2 and 3. As the delay is changed by half a period, the interference switches between constructive and destructive. The black lines indicate the interference envelope, which gives the **degree of coherence**. Although the waves in Figures 2 and 3 have different time durations, they have the same coherence time.

in un punto a due istanti diversi trovo differenza di fase costante

Coerenza temporale

COERENZA III

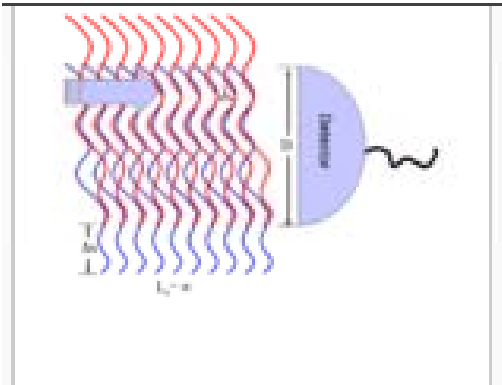


Figure 9: A wave with infinite coherence area is combined with a spatially-shifted copy of itself. Some sections in the wave interfere constructively and some will interfere destructively. Averaging over these sections, a detector with length D will measure reduced interference visibility. For

Coerenza spaziale (esempi)

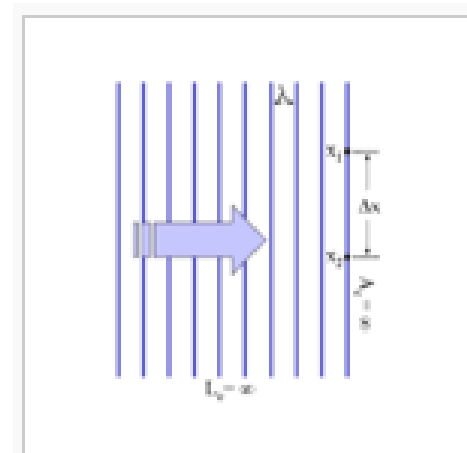


Figure 5: A plane wave with an infinite coherence length.

In due punti allo stesso istante trovo differenza di fase costante

CONCLUSIONI

Il laser è dispositivo unico per creare fasci di luce dotati di caratteristiche nettamente diverse rispetto a sorgenti ordinarie

La percezione comune del laser è ampia e, fortunatamente, basata non solo su raggi della morte e simili

Ognuno di noi ha ed usa quotidianamente diversi laser

Le caratteristiche della luce laser dipendono da amplificazione tramite emissione stimolata

Strumenti classici sono utili per la descrizione del laser

L'interazione laser materia alla base del funzionamento del laser richiede un po' di MQ

FONTI

O. Svelto and P. Hanna, Principles of Lasers (Plenum Press, 1998)

<http://www.wikipedia.org>

D.Batani, Seminario Sicurezza Laser (UniBicocca)

P.Burke, Lasers and Photonics, winter 2002 (uci.edu)

Altre in rete