

Parte II

Strumentazione optometrica e relativi principi fisici

Laser

Applicazioni optometriche dei laser

Strumentazione optometrica

L'OFATLAMOSCOPIO

L'Oftalmoscopio permette di osservare in vivo la trasparenza dei mezzi oculari e delle varie strutture che compongono la tonaca retinica, tra cui la papilla del nervo ottico, la fovea e i vasi sanguigni.

La progettazione dell'oftalmoscopio è del 1847, opera di Charles Babbage; lo strumento non è però stato diffusamente utilizzato fino a quando Hermann von Helmholtz, nel 1851, ne ha realizzato un modello analogo presentandolo a Bruxelles in un convegno di oculisti i quali, riconoscendone l'utilità e la praticità, ne hanno abbracciato la pratica.

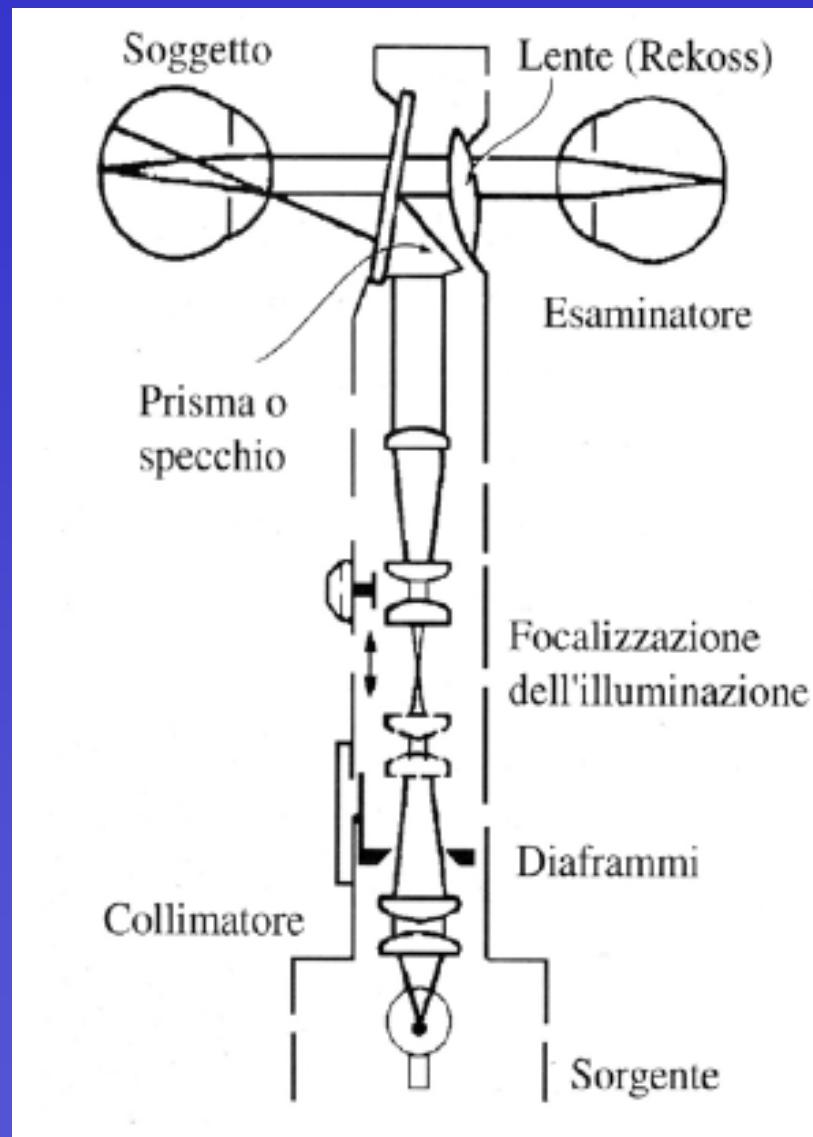
Quello realizzato a metà dell'Ottocento era un oftalmoscopio diretto, prevedeva l'interposizione di una semplice lente convessa tra l'osservatore e il soggetto esaminato e forniva un'immagine reale e ingrandita (circa 3X) delle strutture osservate.

L'OFATLAMOSCOPIO DIRETTO



Nel corso del tempo l'oftalmoscopio diretto si è evoluto ma il principio fondamentale è rimasto lo stesso ovvero un sistema di illuminazione del fondo oculare che permette un'osservazione diretta, chiara e ingrandita dell'area illuminata.

L'OFITALMOSCOPIO DIRETTO



La radiazione illuminante prodotta dall'oftalmoscopio diretto può essere convogliata all'interno della pupilla grazie a uno specchio (piano o concavo) forato al centro oppure per mezzo di un prisma (Prisma di May), oppure per mezzo di uno specchio semitrasparente. La testa dello strumento contiene un disco con lenti sferiche positive e negative (Disco di Rekoss) che permettono di focalizzare un'immagine nitida del fondo oculare. L'ingrandimento fornito dall'oftalmoscopio diretto è notevole (circa 15X), il campo di osservazione è limitato e l'immagine fornita è diritta, con i lati non invertiti.

L'OFATLAMOSCOPIO INDIRETTO

Nel 1915, Willam Noah Allyn e Frederick Welch hanno messo a punto il primo oftalmoscopio indiretto autoilluminato, precursore dell'apparecchio oggi utilizzato dagli oftalmologi di tutto il mondo i tipi presentano vantaggi e svantaggi.

L'OFATLAMOSCOPIO INDIRETTO



L'oftalmoscopio indiretto attuale consiste in un caschetto (dotato di un potente sistema di illuminazione) e di un sistema di osservazione binoculare coassiale. Prevede l'utilizzo di una lente positiva (da $f=+13$ D a $f=+25$ D) che l'oftalmologo tiene pochi centimetri davanti all'occhio del soggetto esaminato; l'immagine fornita è capovolta e con i lati invertiti, mentre il campo visivo investigato è ampio e permette l'ispezione dell'intero fundus fino alla periferia retinica (previo utilizzo di sostanze midriatiche per la dilatazione della pupilla).

L'OFATLAMOSCOPIO INDIRETTO

L'ingrandimento fornito dall'oftalmoscopio indiretto è modesto (2-4X) e varia in relazione al potere dell'occhio esaminato e al potere della lente utilizzata per l'osservazione:

$$M_{\text{lineare}} = F_{\text{occhio}} / F_{\text{lente}}$$

Per esempio, in caso di utilizzo di una lente di $f=+15$ D nell'esame di un occhio con caratteristiche nella media ($F = 60$ D) si avrà:

$$M_{\text{lineare}} = F_{\text{occhio}} / F_{\text{lente}} = 60 / 15 = 4X$$

RETINOGRAFO

Al principio di funzionamento dell'oftalmoscopio si è ispirata la tecnologia del Retinografo, uno strumento che consente di osservare (oltre che di acquisire, tramite il software connesso) immagini del fondo oculare di elevata qualità. Mentre l'oftalmoscopia richiede all'esaminatore un'ottima manualità e una solida esperienza (acquisibili soltanto con una pratica continua e prolungata) il retinografo è di facile e rapido utilizzo. È un importante sussidio per l'osservazione accurata del fundus retinico sia dal punto di vista clinico che per attività di screening in quanto fornisce allo specialista una documentazione dettagliata e archiviabile della porzione di retina osservata; il suo supporto si rivela essenziale nei casi in cui vanno controllati gli sviluppi nel tempo di determinate patologie retiniche oppure vanno valutati gli effetti di trattamenti chirurgici o di cure farmacologiche. La chiarezza dei dettagli e la risoluzione dell'immagine realizzate nella retinografia, decisamente superiori a quelle fornite dall'esame oftalmoscopico, possono essere osservate direttamente sullo schermo del computer e hanno una significativa valenza didattica e comunicativa, consentendo maggior chiarezza e precisione nel dialogo tra lo specialista e il soggetto esaminato.

SCHIASCOPIO

Lo strumento è composto da una sorgente luminosa, una lente condensatrice e uno specchio che può presentare un foro nella parte centrale oppure essere uno specchio semitrasparente, in modo che l'esaminatore possa controllare la luce riflessa dall'occhio esaminato lungo la direzione del fascio luminoso prodotto dallo schiascopio.



SCHIASCOPIA

Eseguendo la schiascopia, l'esaminatore considera l'occhio esaminato come una lente di potere sconosciuto e determina la sua condizione rifrattiva localizzando il suo fuoco immagine nello spazio.

L'esame del riflesso può avvenire in condizioni di accomodazione rilassata con l'esaminato che osserva una mira posta all'infinito (schiascopia statica), oppure con accomodazione attiva mentre il soggetto osserva una mira a distanza prossimale (schiascopia dinamica).

SCHIASCOPIA

Esistono schiascopi a spot e a striscia. La radiazione luminosa emessa dallo schiascopio a spot ha un'area con intensità uniforme e forma circolare, mentre la radiazione luminosa emessa dallo schiascopio a striscia è una fessura prodotta da una lampadina a filamento, che ha spessore regolabile e può essere ruotata attorno all'asse dello strumento; la striscia luminosa, ruotata opportunamente, permette così di determinare con maggior precisione l'asse dell'eventuale astigmatismo.

AUTOREFRATTOMETRO

Al principio di funzionamento dello schiasscopio si è ispirata la tecnologia dell'Autorefrattometro, uno strumento computerizzato (utile sia nella pratica clinica ordinaria che nell'attività di screening) che permette una rilevazione oggettiva rapidissima dello stato rifrattivo dell'occhio.



AUTOREFRATTOMETRO

L'autorefrattometro funziona mediante la proiezione di un fascio di radiazione infrarossa sul fondo dell'occhio e la valutazione del relativo comportamento; viene usata radiazione infrarossa perché rende più confortevole l'esame e permette di evitare la miosi pupillare riflessa che sarebbe inevitabilmente provocata dalla radiazione visibile. La mira di fissazione può essere interna allo strumento oppure essere esterna ovvero ambientale (ottotitipi, diapositive o filmati).

CONSULTARE: Angela Ravasi e Silvio Maffioletti, «Strumenti Optometrici in Evoluzione», Università di Milano Bicocca.

STRUMENTAZIONE

- Lampada a fessura (LaF)
- Elettroretinogramma
- Tomografia a coerenza ottica (OCT)

Nella LaF mediante un sistema di lenti collettrici si ottiene una illuminazione intensa e non diffusa, una lama di luce che crea un forte contrasto fra l'area illuminata e le zone circostanti.

E' possibile variare l'ampiezza della fessura, l'intensità della luce, la distribuzione spettrale e l'incidenza del fascio luminoso in modo da osservare diverse strutture oculari più o meno profonde.

Si può osservare la superficie capsulare del cristallino e si possono osservare le parti prossime delle fibre zonulari.

Il raggio a fessura permette di osservare la corteccia, il nucleo, le suture a Y anteriori e posteriori, la capsula lenticolare posteriore, e la porzione anteriore del vitreo.

Con la LaF è possibile osservare il nucleo del cristallino che in fase di invecchiamento assume un colore giallognolo (*sclerosi nucleare*).

La LaF è dotata di ingrandimenti poco elevati, che permettono l'osservazione contemporanea di palpebra superiore, bulbo e palpebra inferiore.

Si possono diagnosticare opacità della cornea, del cristallino (cataratta) dell'umor acqueo, congiuntiviti, e in più con una lente opportuna e in midirasi è possibile effettuare anche l'**esame del fondo oculare**

ELETTRORETINOGRAMMA (ERG)

L'ERG è la registrazione delle modificazioni della ddp fra un elettrodo interno all'occhio ed uno posto sul polo posteriore dell'occhio.

In condizioni di riposo vi è, fra questi due poli una ddp di 6 mV.

Uno stimolo luminoso provoca una serie di modificazioni di questo potenziale che costituisce appunto l'ERG.

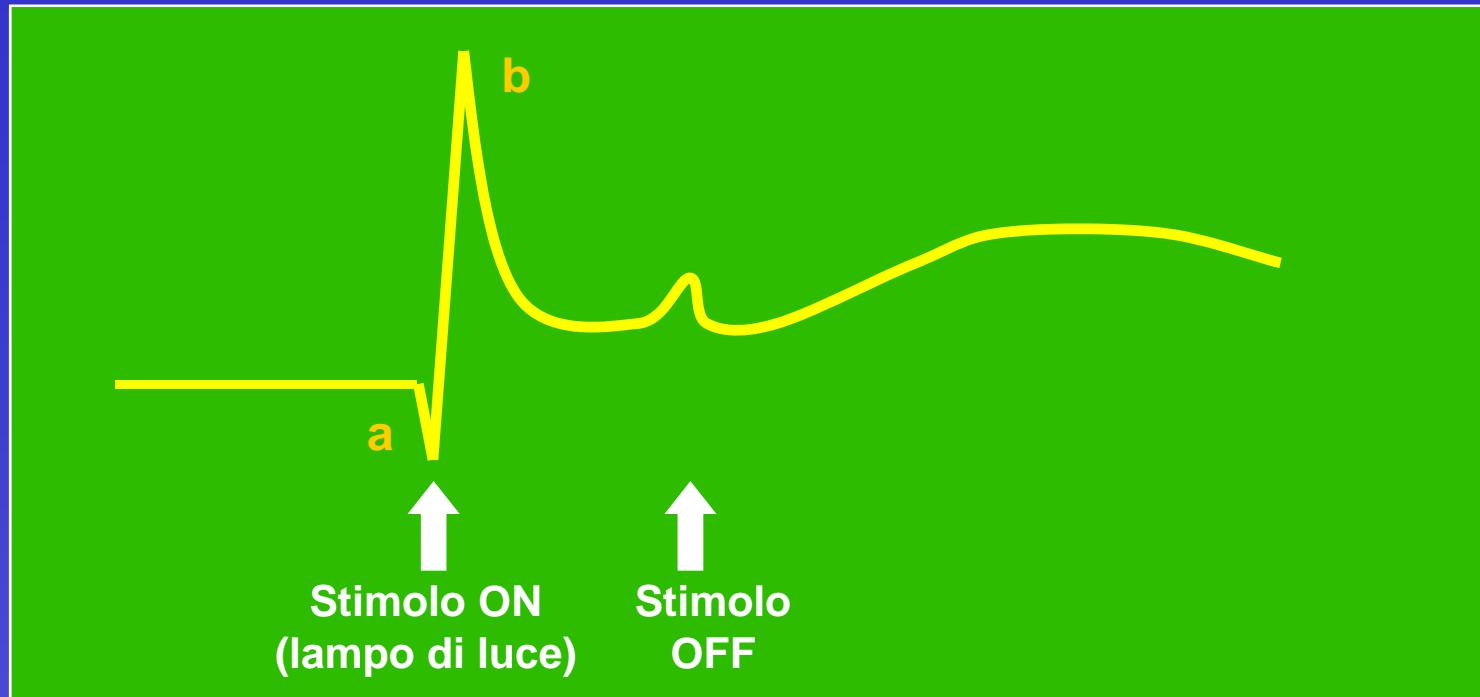
Tutte le cellule viventi sono sede di attività elettriche: l'eccitazione di una cellula genera una ddp.

Si parla di potenziale d'azione in contrapposizione al potenziale di riposo che le cellule presentano in assenza di stimolo.

La cornea funge da polo positivo e la retina da polo negativo: la ddp tra i due elettrodi è legata alle stimolazioni luminose ed in particolare si accentua dopo una breve caduta esponendo la retina alla luce e, viceversa, cade progressivamente, dopo un transitorio aumento, quando viene a mancare l'eccitazione luminosa.

L'ERG consiste nella registrazione dei potenziali di azione della retina.

Segnale ERG visualizzato sull'oscilloscopio



Il tracciato ERG è caratterizzato da vari tratti:

- un periodo di latenza che segue la stimolazione luminosa;
- un'onda negativa (a);
- un'onda positiva (b).

In base alle caratteristiche del tratto *b* il tracciato viene definito *normale*, *ipernormale* (onda *b* troppo alta), *iponormale* (onda *b* troppo bassa).

RIFERIMENTI:

1. FISICA BIO-MEDICA

E. Zingoni, F. Tognazzi, A. Zingoni, editore: Zanichelli;

1. <http://it.wikipedia.org>

TOMOGRAFIA A COERENZA OTTICA (OCT)

La OCT è una tecnica di imaging medico:

- non invasiva;
- fornisce immagini ad alta risoluzione della retina e della parte anteriore dell'occhio: il potere di risoluzione spaziale è di circa $7-10 \mu\text{m}$;
- si basa su una tecnica interferometrica che utilizza luce del vicino infrarosso (λ da 700 nm a $1 \mu\text{m}$);
- La luce ad alta lunghezza d'onda permette di penetrare a maggiore profondità nel tessuto biologico rispetto ad altre tecniche;
- Le prime immagini *in vivo* della struttura della retina sono state pubblicate nel **1993**.

Rispetto ad altre tecniche di imaging oculari ha i seguenti vantaggi:

- Alta risoluzione spaziale (circa $10 \mu\text{m}$) rispetto all'oftalmoscopia a scansione laser, che forniscono rispettivamente immagini con una risoluzione di 150 e $300 \mu\text{m}$;
- Maggiore capacità di penetrazione (dell'ordine dei mm), rispetto alla microscopia confocale;
- Imaging diretto ed istantaneo della morfologia dei tessuti;
- Il campione (o il soggetto) non va preparato prima dell'indagine;
- Assenza di radiazioni ionizzanti.

La OCT si basa su una tecnica interferometrica a bassa coerenza.

Nella interferometria ad alta coerenza si ha che l'interferenza della luce laser avviene a distanza di metri dalla sorgente.

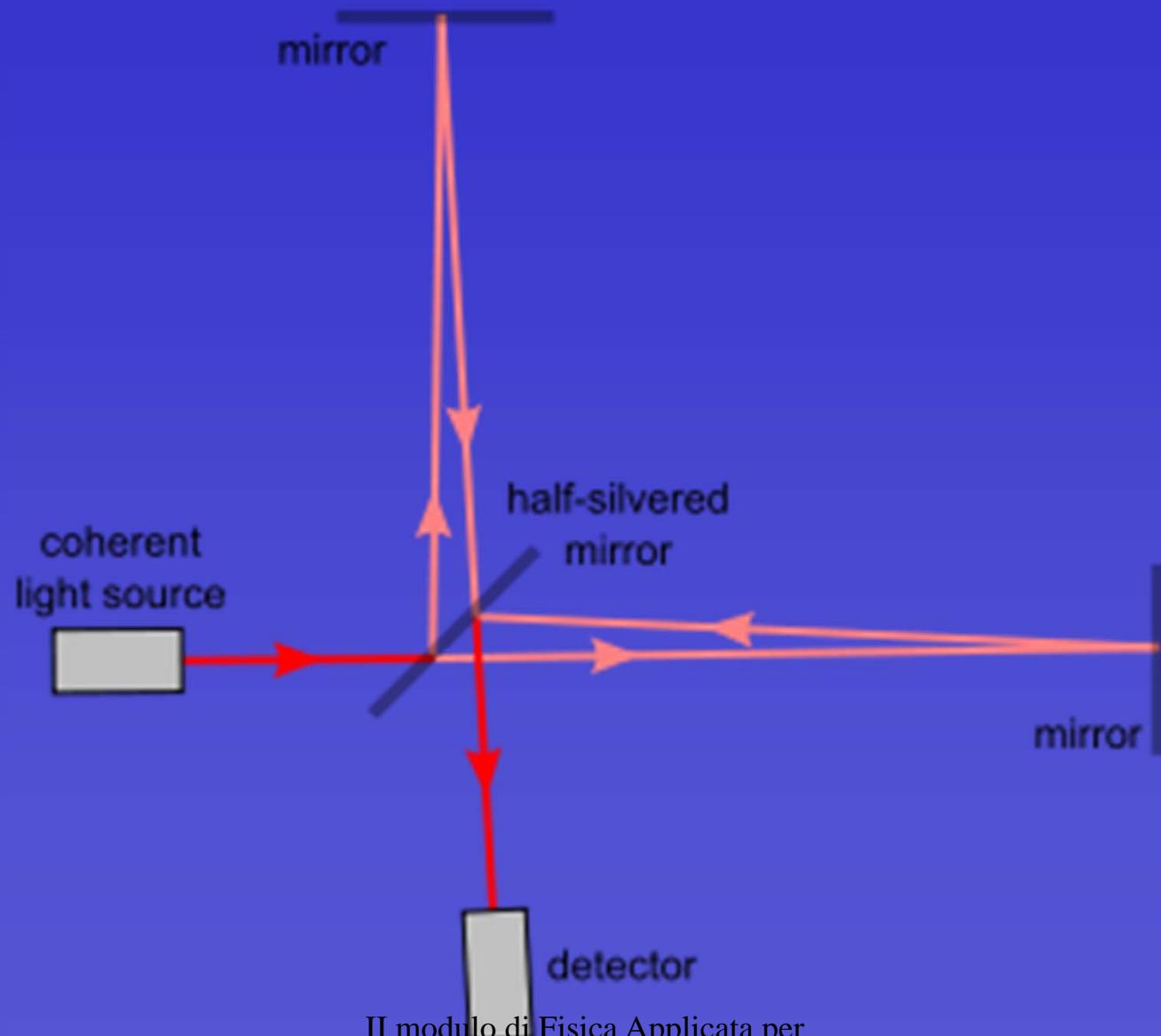
Nella OCT questa distanza è accorciata fino all'ordine dei micrometri grazie all'utilizzo di sorgenti di luce a banda larga (cioè, sorgenti che emettono radiazioni in un ampio intervallo di frequenze).

Tale luce viene prodotta da diodi superluminescenti o da laser con impulsi molto brevi (laser a femtosecondo).

Anche la luce bianca è a banda larga, ma ha bassa potenza.

L'interferometria
è una tecnica basata sullo studio della
figura di interferenza
dovuta alla sovrapposizione
di due onde coerenti tra loro.

INTERFEROMETRO DI MICHELSON



L'interferometria fa uso del principio di sovrapposizione per combinare le onde separate.

Questo è dovuto al fatto che quando due onde coerenti con la stessa frequenza si combinano la figura che risulta è determinata dalla differenza di fase tra le due onde.

Onde che sono in fase tra loro daranno luogo ad interferenza costruttiva, mentre onde sfasate tra loro daranno luogo ad interferenza distruttiva.

Interferenza costruttiva

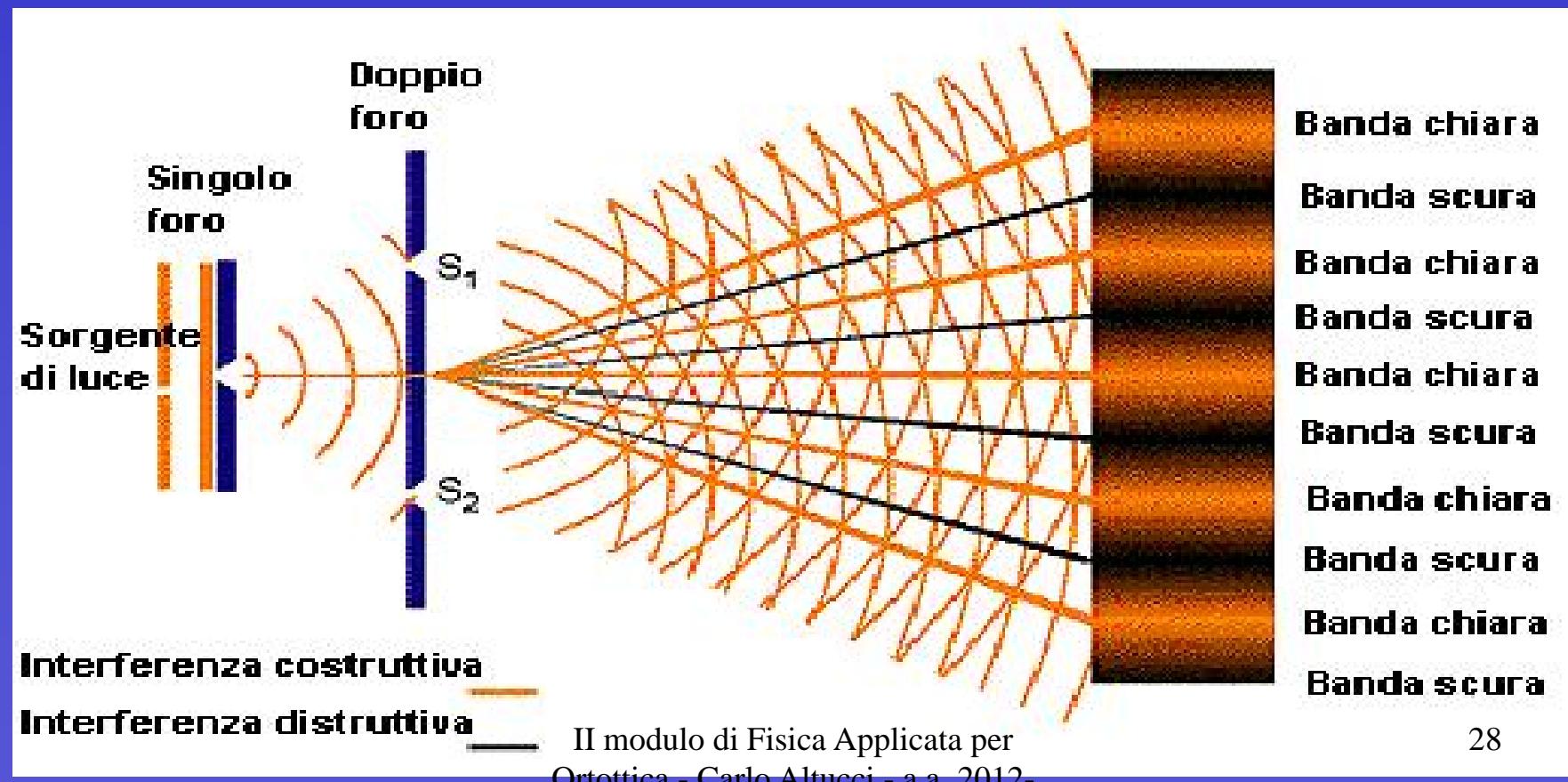
Interferenza distruttiva

Sorgente di luce coerente (laser)

Il percorso ottico viene variato

Esperimento di Young

Nel **1801** Thomas Young (1773-1829) effettuò un'esperienza decisiva a favore dell'ipotesi ondulatoria della luce, mostrando che anche con i raggi luminosi si possono verificare i fenomeni di *interferenza* e *diffrazione*, tipici dei fenomeni ondulatori.

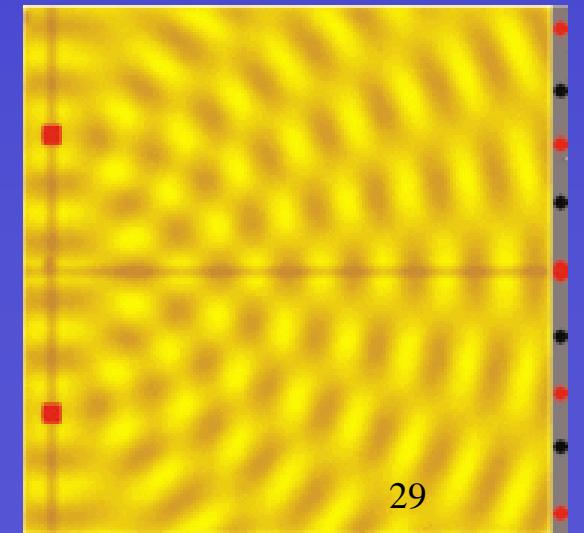
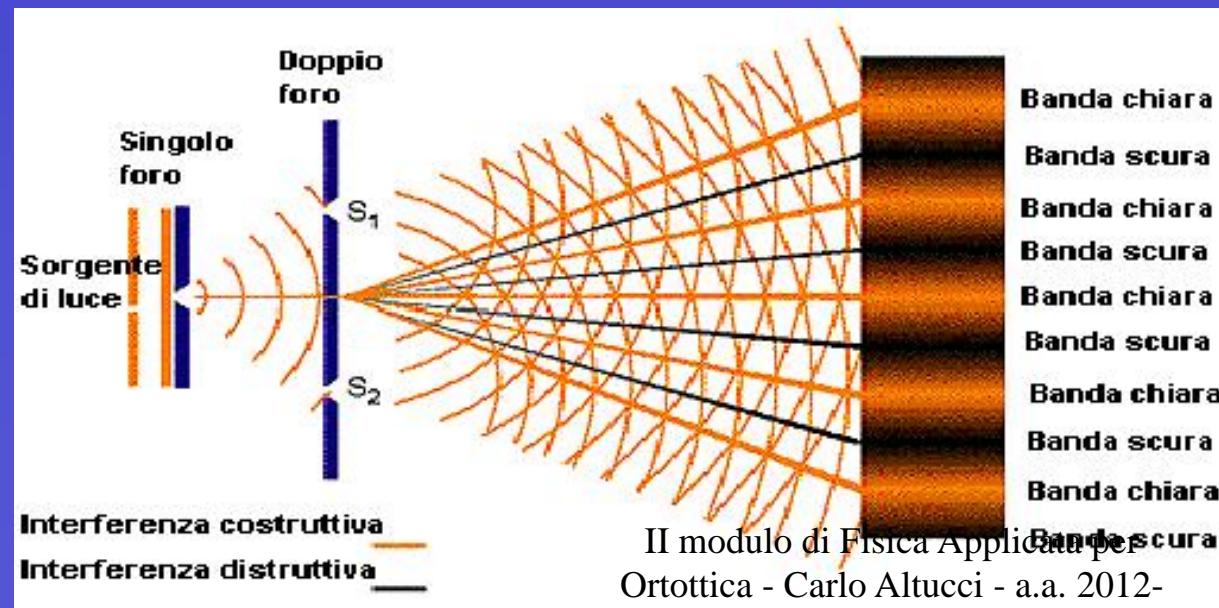


Un raggio di luce laser monocromatico colpisce un microscopico forellino e da questo, in base al principio di Huygens, viene *diffratto* sulle due sottilissime fenditure **S₁** ed **S₂** equidistanti dalla fenditura singola.

I due fori (di dimensioni paragonabili alla lunghezza d'onda della luce) si comportano come *sorgenti puntiformi* e *coerenti* e la luce da essi emessa interferisce come le onde sull'acqua prodotte da una sorgente doppia.

Proseguendo, la luce colpisce uno schermo sul quale si visualizza una *figura di interferenza* caratterizzata da **bande chiare e scure**, cioè da *antinodi* in cui l'interferenza è costruttiva e da *nodi* in cui l'interferenza è distruttiva.

L'esperimento di Young permette di ricavare anche, misurando la distanza tra le bande e la distanza dello schermo, di misurare la *lunghezza d'onda* della luce che è dell'ordine dei 10^{-7} m.



La lunghezza d'onda λ è data da:

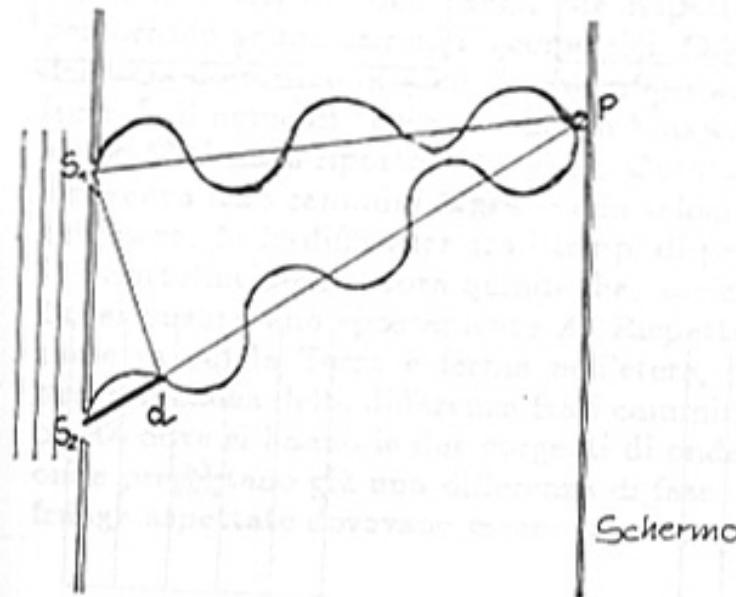
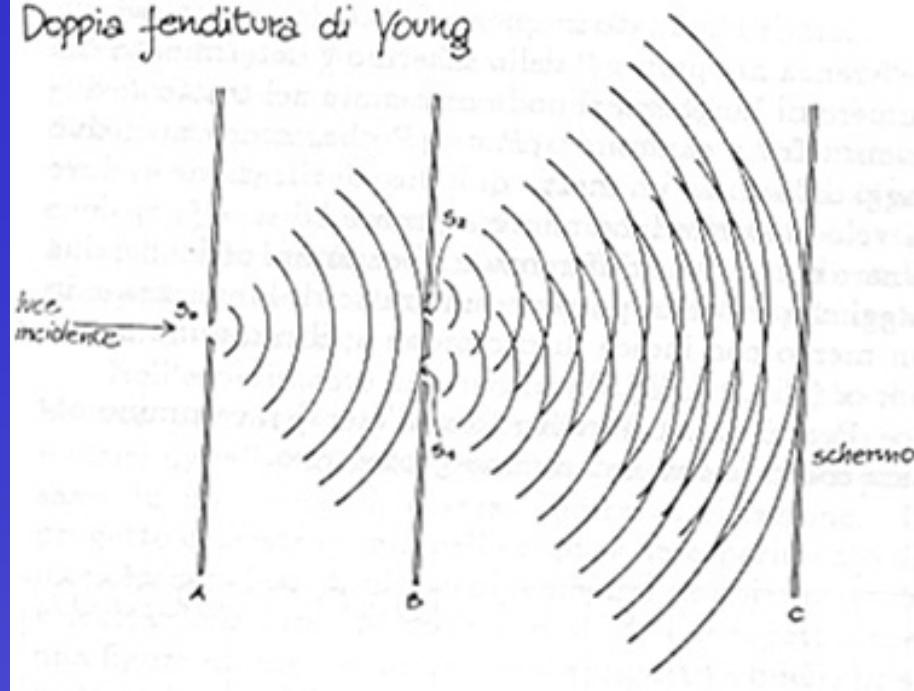
$$\lambda = \frac{d \cdot x}{l}$$

dove d è la distanza tra le fenditure, x è la distanza tra due massimi consecutivi e L la distanza dello schermo dalla doppia fenditura.

La relazione è valida per $l \gg d$.

L'esperimento della doppia fenditura ebbe un'importanza storica decisiva perché pose un punto fermo alla annosa questione della natura della luce, stabilendone la natura ondulatoria.

Doppia fenditura di Young



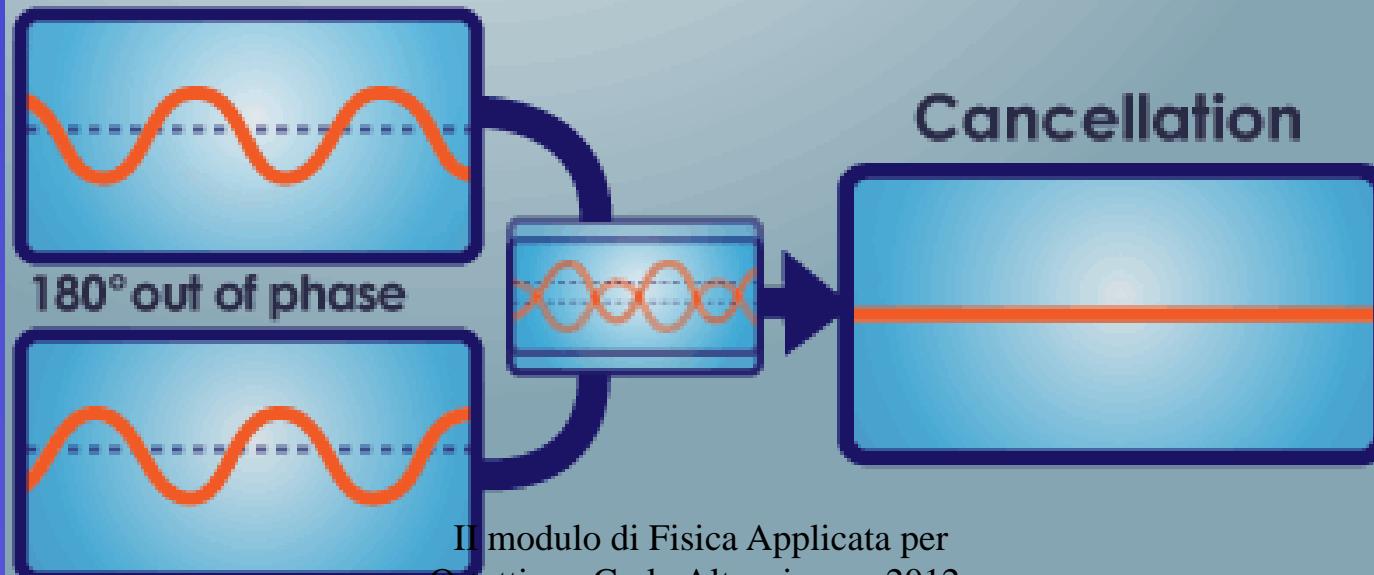
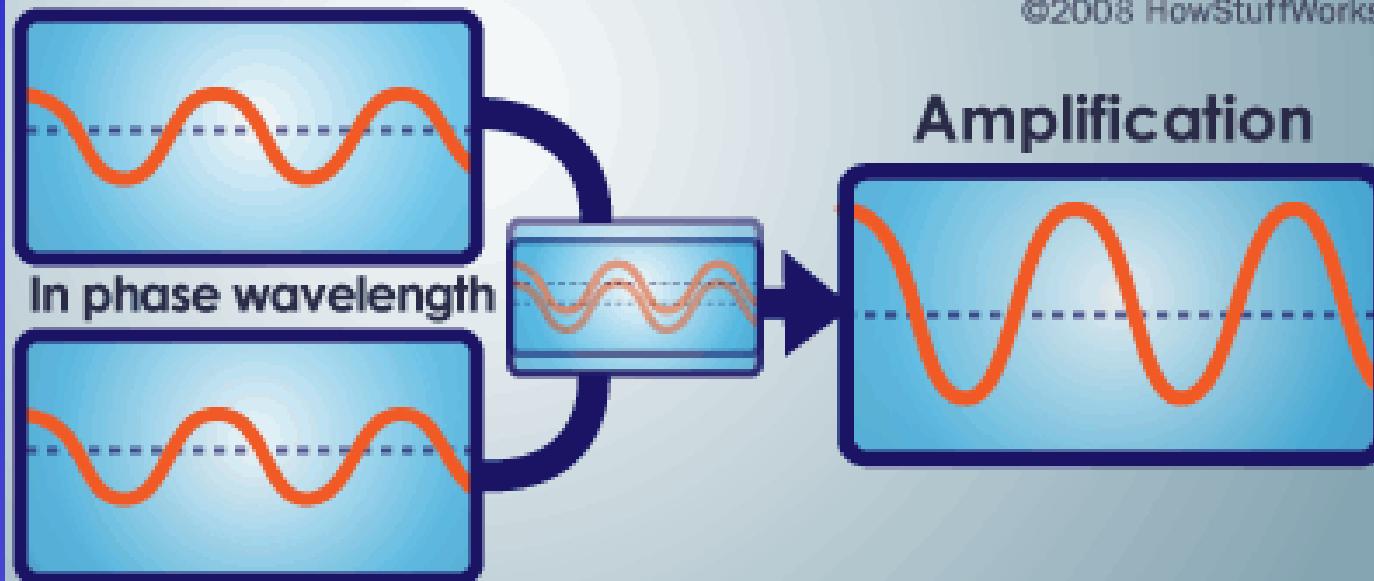
$$d = n\lambda \text{ interferenza costruttiva}$$
$$d = (2n + 1)\frac{\lambda}{2} \text{ interferenza distruttiva}$$

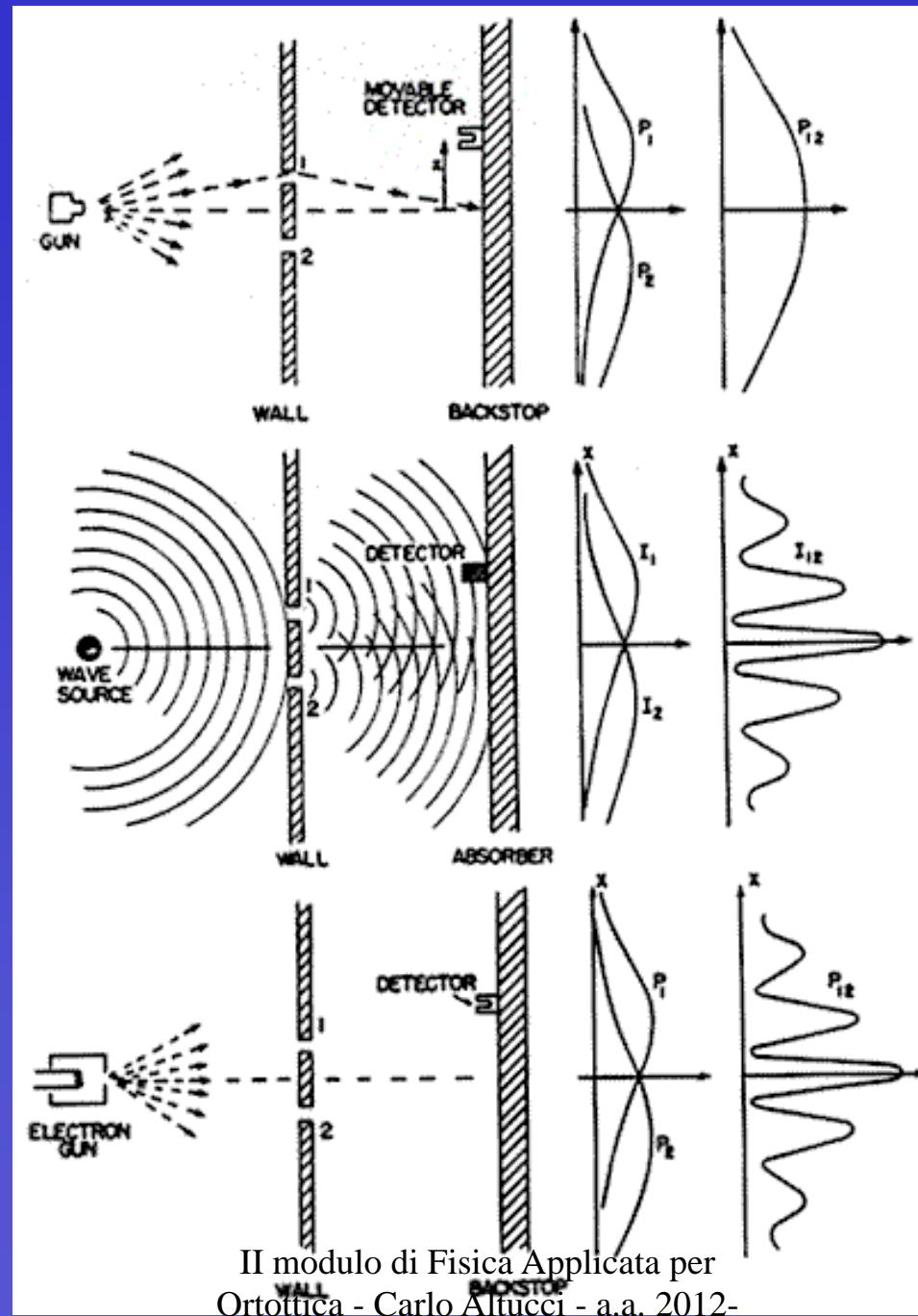
Se la differenza di fase fra le due onde è un multiplo intero pari della lunghezza d'onda, allora si ha, fra le due onde, interferenza **COSTRUTTIVA**.

Se la differenza di fase è pari a mezza lunghezza d'onda o ad un multiplo dispari, allora si interferenza **DISTRUTTIVA**.

Constructive & Destructive interference

©2008 HowStuffWorks





OCT nel dominio del tempo

In un sistema OCT il fascio di luce viene diviso in due bracci:

- in un braccio la luce viene riflessa dal campione da studiare,
- nell'altro braccio (detto di riferimento) la luce viene riflessa da uno specchio.

I due fasci di luce si incontrano dopo i rispettivi percorsi e, purché la differenza fra i due cammini ottici sia minore di una lunghezza di coerenza, essi daranno luogo ad una figura di interferenza.

Il percorso ottico della luce proveniente dal campione dipende dalla forma del campione stesso, nel senso che la forma del campione determina il ritardo (o l'anticipo) del fascio ottico rispetto al fascio di riferimento.

Il fascio di luce coerente viene diviso, tramite un divisore di fascio, in due fasci identici. Ognuno di questi due fasci percorrerà un cammino diverso, fino a ricombinarsi sul rivelatore.

La differenza del cammino ottico percorso da ogni fascio genera una differenza di fase tra loro. E' questa differenza di fase che dà luogo alla figura di interferenza.

Nella OCT a dominio temporale la lunghezza ottica del braccio di riferimento viene traslata longitudinalmente (cioè, accorciata e allungata) nel tempo.

Una proprietà della interferometria a bassa coerenza e dell'interferometria in generale è che la figura di interferenza, cioè la serie di frange scure e luminose, si ottiene solamente se la differenza di cammino ottico fra i due bracci è minore della lunghezza di coerenza della luce stessa.

L'inviluppo della figura di interferenza stessa cambia al variare del cammino ottico stesso, laddove il picco dell'inviluppo corrisponde all'uguaglianza dei cammini ottici.

Tomografia

Origine della figura di interferenza:

- L'area del campione riflette la luce incidente in modo diverso, a seconda della sua forma e della sua dimensione.
- La luce che è al di fuori della lunghezza di coerenza NON contribuisce alla figura di interferenza.
- Il profilo dovuto al contributo della luce riflessa è chiamato A-scan e contiene informazioni sulle dimensioni spaziali e sulla localizzazione delle strutture all'interno del campione stesso.
- Combinando una serie di queste scansioni assiali laterali (A-scan) si può ottenere una tomografia (detta B-scan) del campione.

OCT nel dominio delle frequenze

Nella OCT a dominio nelle frequenze, la larghezza di banda dell'interferenza viene acquisita con dei rivelatori separati spettralmente.

In questa modalità non c'è bisogno di muovere il braccio di riferimento.

Questa caratteristica fornisce le immagini in tempi molto più brevi, e si riduce il rapporto segnale/rumore.

La OCT raggiunge un'alta risoluzione spaziale perché la lunghezza d'onda della luce utilizzata è più bassa di quella degli ultrasuoni o radio-frequenze.

La luce che incide sul campione è solo in parte riflessa (e va quindi a formare la figura di interferenza), in gran parte viene diffusa (*scattered*). La componente di luce diffusa contribuisce al riverbero.

Nella tecnica dell'OCT la componente di luce diffusa viene eliminata tramite dei filtri.

Il principio fisico che permette di filtrare la luce diffusa è la coerenza ottica (differenza di fase costante nel tempo).

Infatti, **solo** la luce riflessa (non diffusa) è coerente (cioè, conserva la fase ottica che consente ai raggi di luce di propagarsi in una piuttosto che in un'altra direzione).

Nella strumentazione OCT un interferometro ottico è regolato in modo tale da rivelare *solo* la componente coerente: in pratica, l'interferometro seleziona solo la luce coerente, necessaria alla formazione dell'immagine, facendo disperdere quella diffusa.

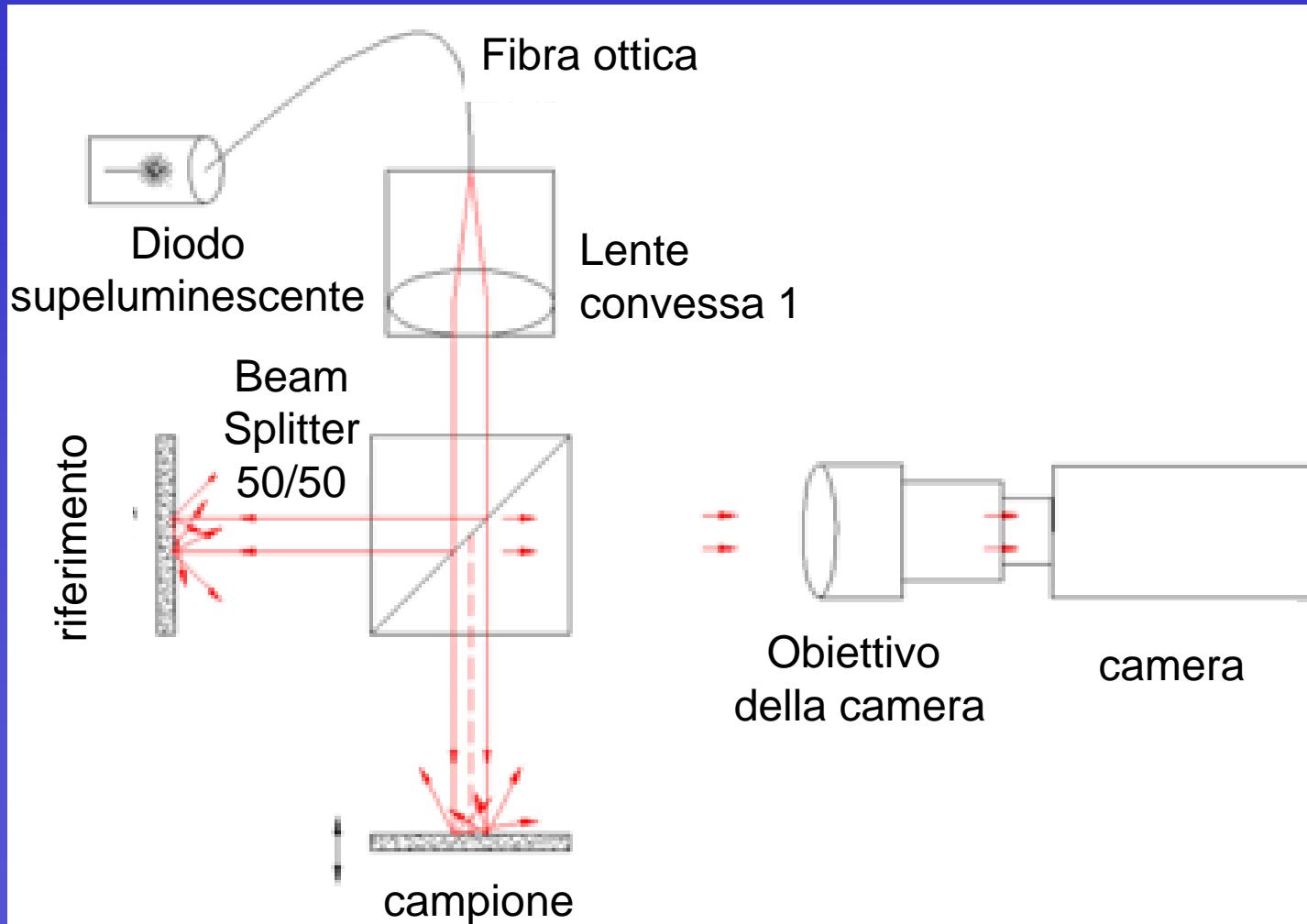
Nel processo di formazione dell'immagine si tiene conto anche della profondità e dell'intensità della luce riflessa proveniente da un sottostato.

Nell'ambito delle tecniche di imaging 3D, la OCT è simile all'imaging con gli ultrasuoni. La tecnica è limitata all'imaging fino ad 1-2 mm al di sotto della superficie del tessuto biologico perché a profondità maggiori la componente di luce riflessa è troppo piccola per essere rivelata.

Non è richiesta una preparazione specifica del tessuto da investigare.

E' anche importante osservare che la potenza del laser in uscita è bassa e non è pericolosa per l'occhio.

SCHEMA DI UN APPARATO DI OCT



Broad bandwidth
source (QD-SLED)



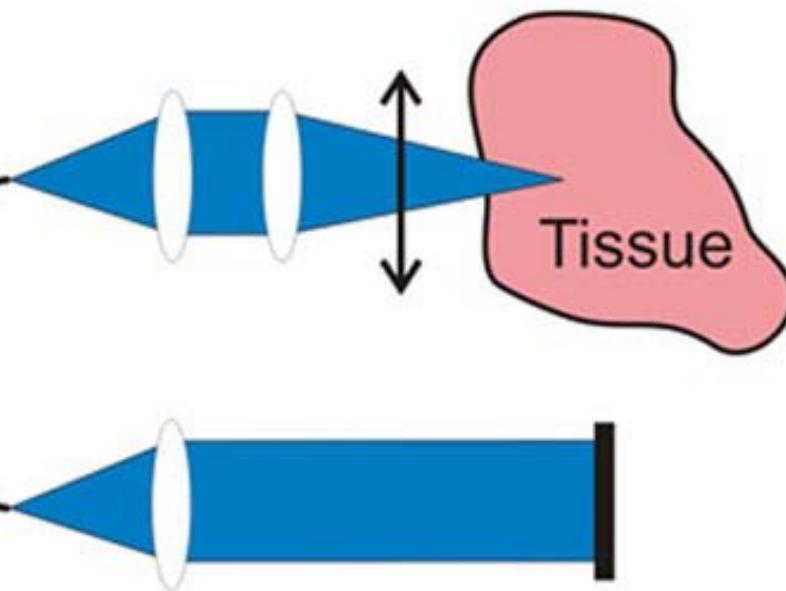
Fiber-optic
beam splitter



Detector

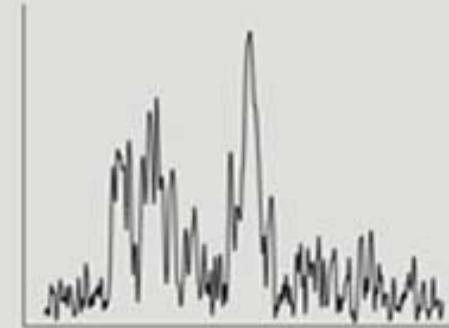


Tissue

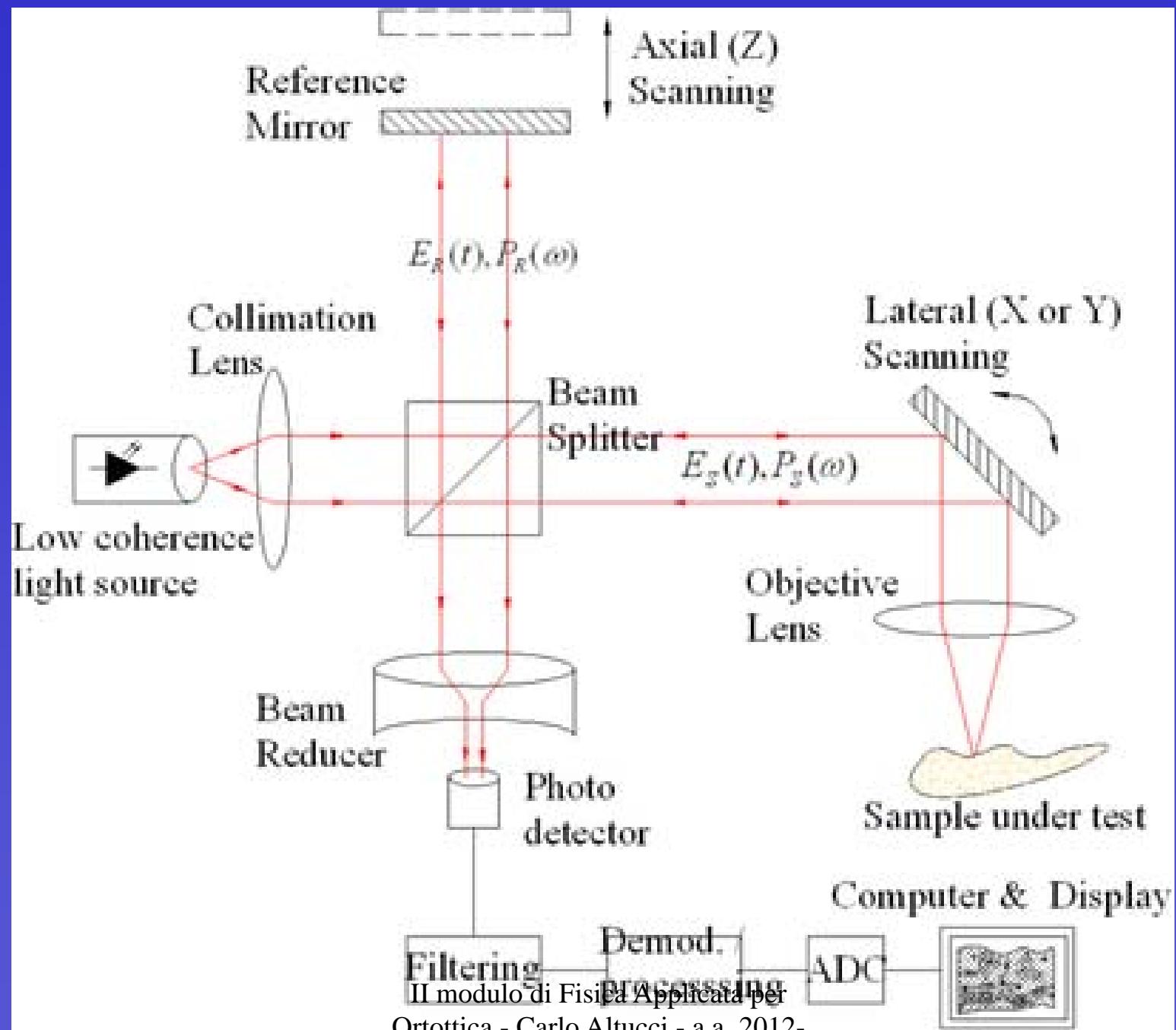


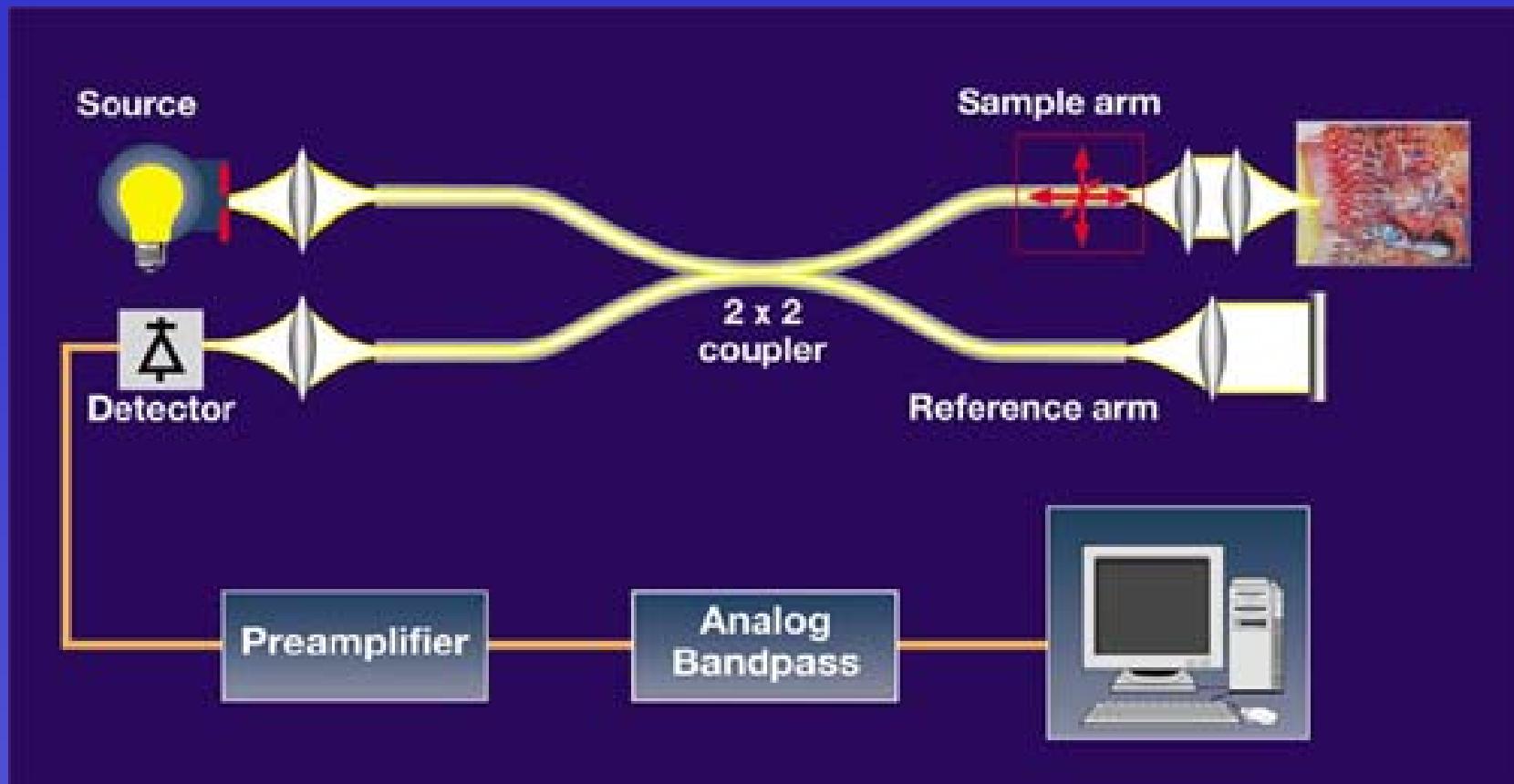
Single reflection site

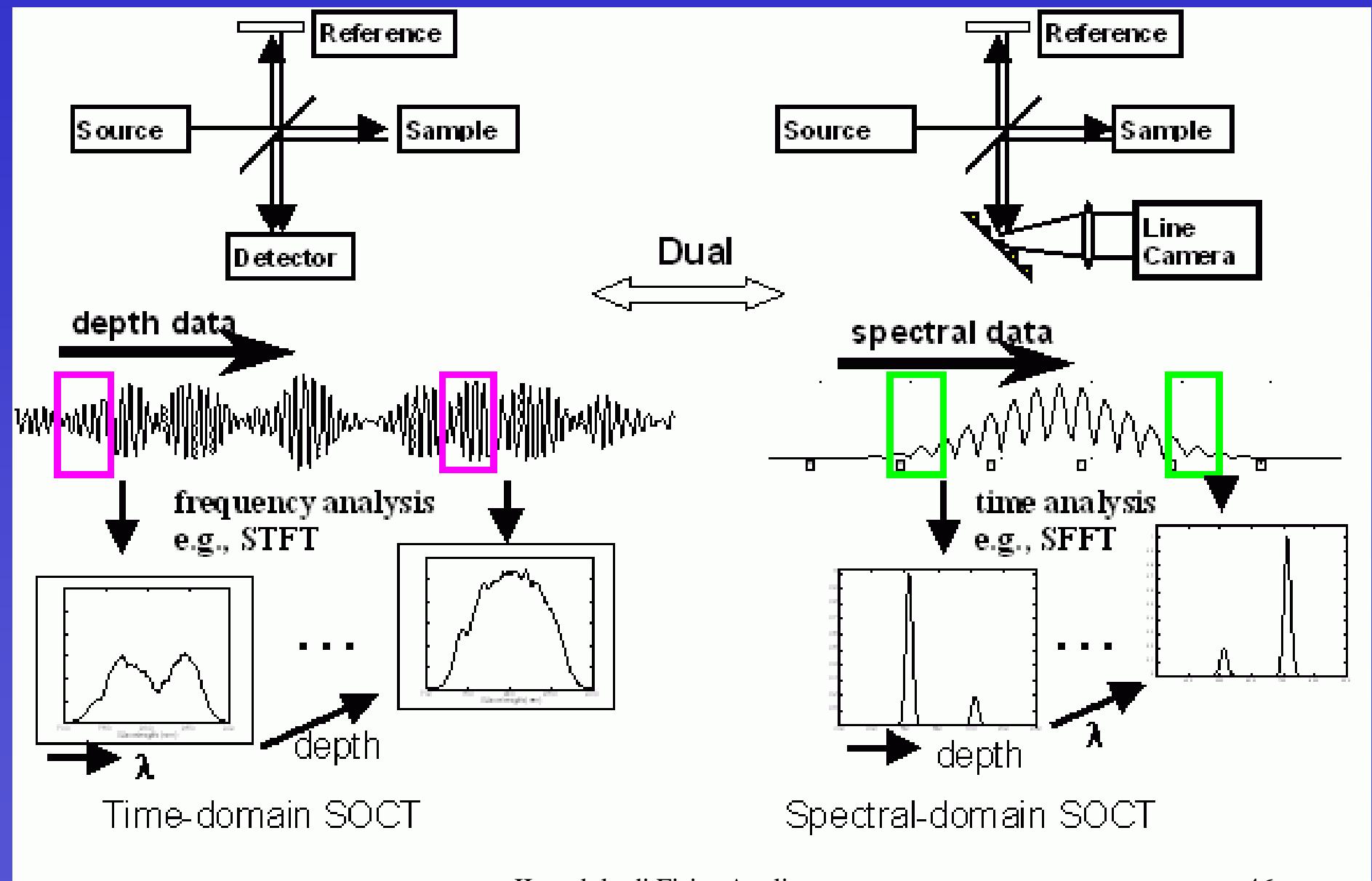
A-scan (envelope)



Optical
delay line
scanning reference
mirror







L'OCT proietta sulla retina un fascio di lunghezza d'onda nel vicino infrarosso (820 nm) generato da un diodo superluminescente; confronta quindi i tempi di propagazione dell'eco della luce riflessa dalla retina con quelli relativi allo stesso fascio di luce riflesso da uno specchio di riferimento posto a distanza nota. Benché la luce riflessa dalla retina sia composta da echi multipli, la distanza percorsa dagli stessi viene determinata tramite la variazione della distanza dallo specchio di riferimento.

L'interferometro OCT rileva elettronicamente, raccoglie, elabora e memorizza gli schemi di ritardo dell'eco provenienti dalla retina.

I tomogrammi vengono visualizzati in tempo reale utilizzando una scala in falsi colori che rappresenta il grado di riflettività dei tessuti posti a diversa profondità: i colori scuri (blu e nero) rappresentano zone a minima riflettività ottica, mentre i colori chiari come il rosso ed il bianco definiscono zone molto riflettenti.

Infine il sistema memorizza le scansioni selezionate, permettendone la successiva elaborazione, tra cui la possibilità di correggere l'effetto dei movimenti oculari longitudinali.

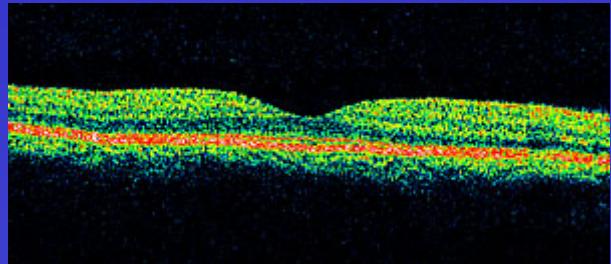
L'OCT è quindi un esame semplice, rapido, non invasivo ed altamente riproducibile, ma è limitato dalla presenza di qualsiasi opacità dei mezzi diottici (edema o leucomi corneali, cataratta, emovitreo) e dalla miosi.

Le immagini tomografiche ottenute con l'OCT permettono uno studio sia di tipo qualitativo che quantitativo del tessuto retinico, con la possibilità di dirigere la scansione direttamente verso la zona di interesse grazie alla contemporanea osservazione della retina. Dal punto di vista qualitativo su ogni scansione si può effettuare un'analisi della morfologia e del grado di riflettività degli strati retinici. Per quanto riguarda la valutazione quantitativa lo strumento permette di misurare lo spessore della retina, che può anche essere rappresentato in mappe di spessore.

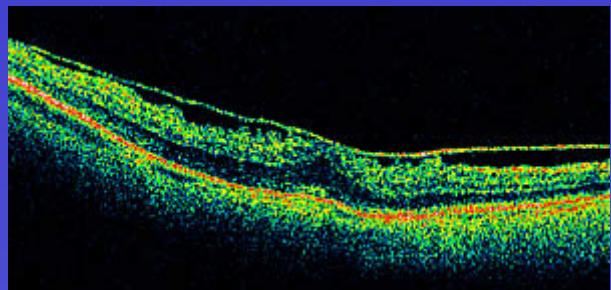
UN MODERNO APPARATO DI OCT



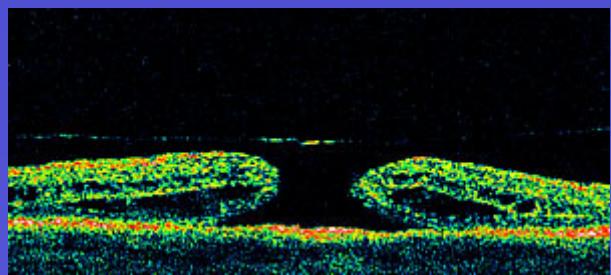
RICOSTRUZIONI: SITUAZIONI FISIOLOGICHE E PATHOLOGIE



Sezione tomografica della regione maculare in condizioni normali

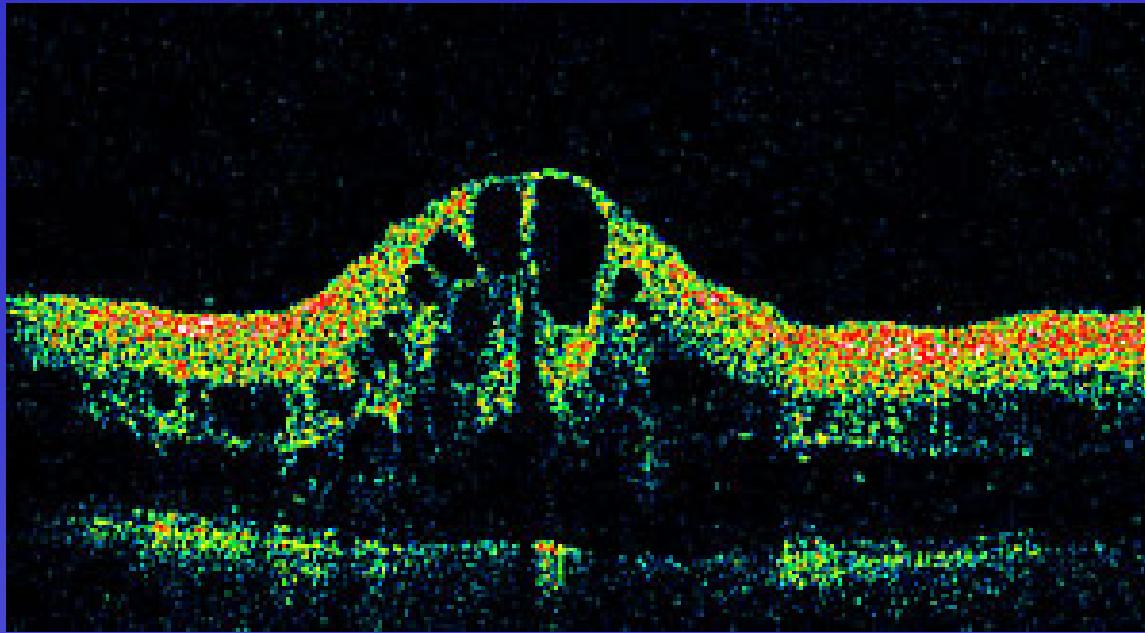


Fibrosi pre-retinica. Si possono osservare aumento dello spessore retinico, scomparsa della depressione foveale e presenza di aree a diminuita reflettività all'interno della retina, indice di edema intraretinico



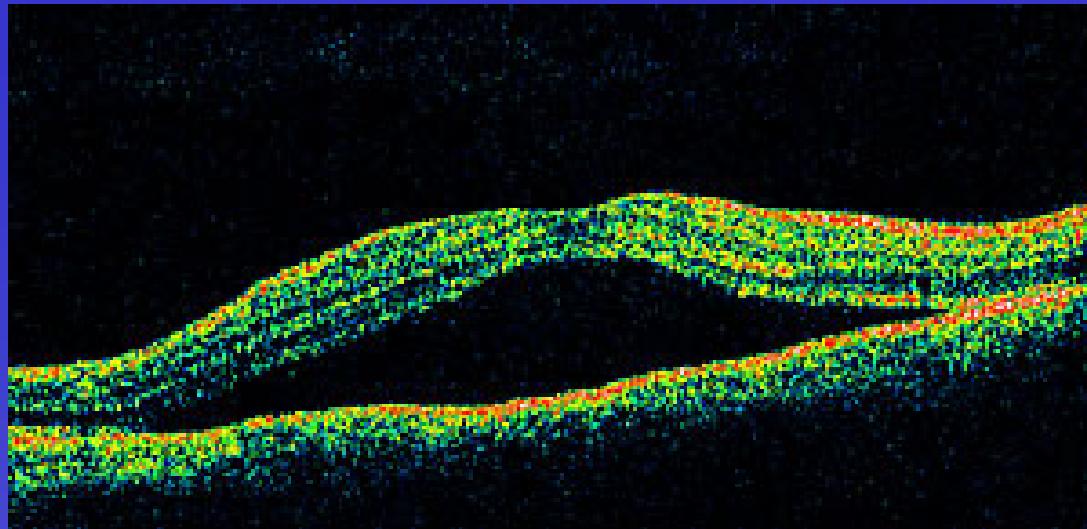
L'OCT è l'esame più indicato per selezionare i casi di foro maculare e di sindrome dell'interfaccia vitreo-retinica potenzialmente suscettibili di trattamento chirurgico

RICOSTRUZIONI: PATOLOGIE



L'OCT consente una semplice e sensibile diagnosi dell'edema maculare secondario a retinopatia diabetica, occlusione della vena centrale della retina, uveite, fibrosi pre-retinica o post-intervento di cataratta. In questi casi le sezioni tomografiche mostrano un aumento più o meno marcato dello spessore della retina, che può mostrare al suo interno aree tondeggianti a ridotta reflettività, segno di accumulo intraretinico di liquido (edema cistoide). L'ispessimento retinico può essere quantificato e venir rappresentato in mappe di spessore retinico, di evidente utilità nel corso del follow-up del paziente

RICOSTRUZIONI: PATOLOGIE



Distacco del neuroepitelio maculare. Nella Corioretinopatia Sierosa Centrale di tipo acuto l'OCT permette di valutare in modo oggettivo e quantificabile il distacco del neuroepitelio e l'eventuale presenza di piccoli distacchi dell'epitelio pigmentato associati, con la possibilità di monitorarne l'evoluzione spontanea o successiva a trattamento fotocoagulativo. Anche piccoli sollevamenti del neuroepitelio, non clinicamente identificabili all'esame biomicroscopico, possono essere evidenziati dall'OCT sotto forma di sottili bande a ridotta reflettività comprese tra il complesso EPR-coriocapillare e lo strato dei fotorecettori

Riferimenti:

- 1) <http://www.fondazionemacula.it/pagine/tomografiaacoerenzaoottica.php>
- 2) [Wikipedia](#)
- 3) <http://lob.epfl.ch/webdav/site/lob/users/138230/public/OCT.gif>
- 4) <http://www.fondazionemacula.it/pagine/tomografiaacoerenzaoottica.php>



UNIVERSITA' DI NAPOLI
“FEDERICO II”

I laser

Sommario

- **Sorgenti laser: cenni di teoria del laser e caratteristiche della luce laser.**
- **Principali applicazioni dei laser, in particolare in biologia e medicina.**
- **Il rischio da laser: classificazione delle sorgenti laser in base al rischio, misure di sicurezza, normativa.**

LASER

Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

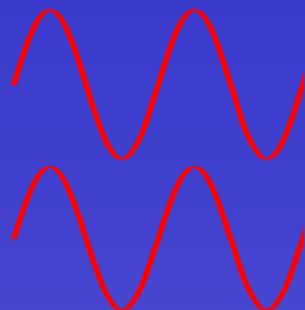
La radiazione elettromagnetica

La luce è un'onda elettromagnetica, a cui è associata una **lunghezza d'onda** (distanza fra due picchi consecutivi) e un'**ampiezza** (altezza dei picchi)



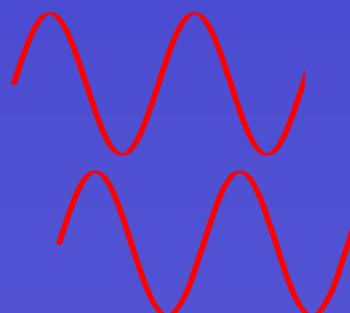
La luce trasporta un'energia che
aumenta al diminuire della sua lunghezza d'onda

La luce può essere considerata come un insieme di corpuscoli, detti **fotoni**, ciascuno dei quali porta un “pacchetto d’onda”



ONDE IN FASE

Due pacchetti d’onda sono in fase se la posizione dei loro picchi e delle loro valli coincide.

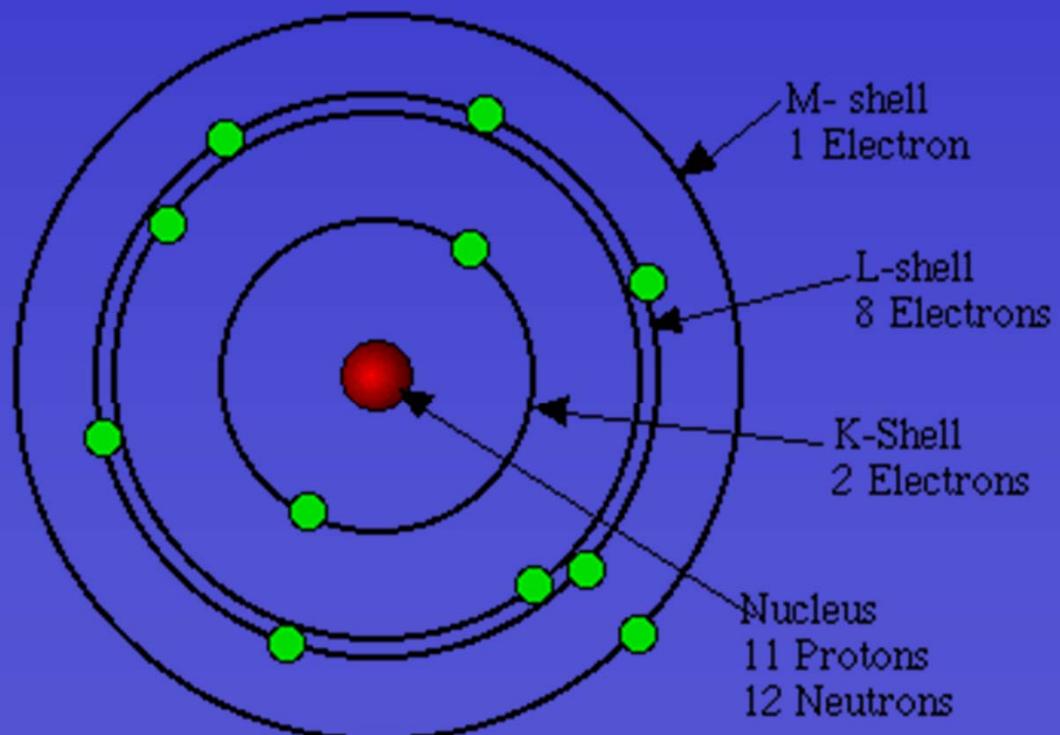


ONDE FUORI FASE

Altrimenti essi sono *fuori fase*.

Energia quantizzata

Gli atomi hanno livelli energetici quantizzati, cioè non possono assumere valori energetici continui ma solo valori discreti. Ciò corrisponde al fatto che gli elettroni orbitano intorno al nucleo su traiettorie a distanze fisse dal nucleo.

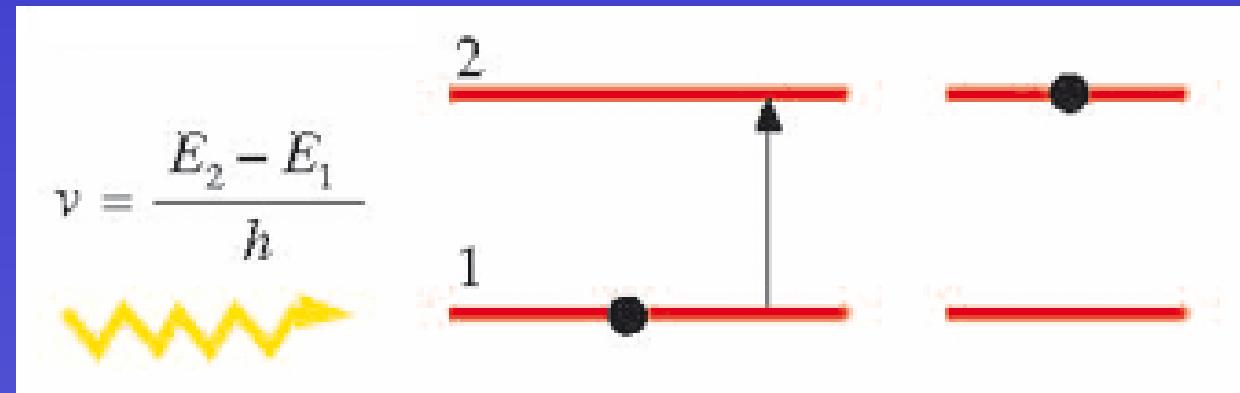


The Bohr Picture of the Sodium (Na-11) Atom

Sorgenti di luce: assorbimento ed eccitazione

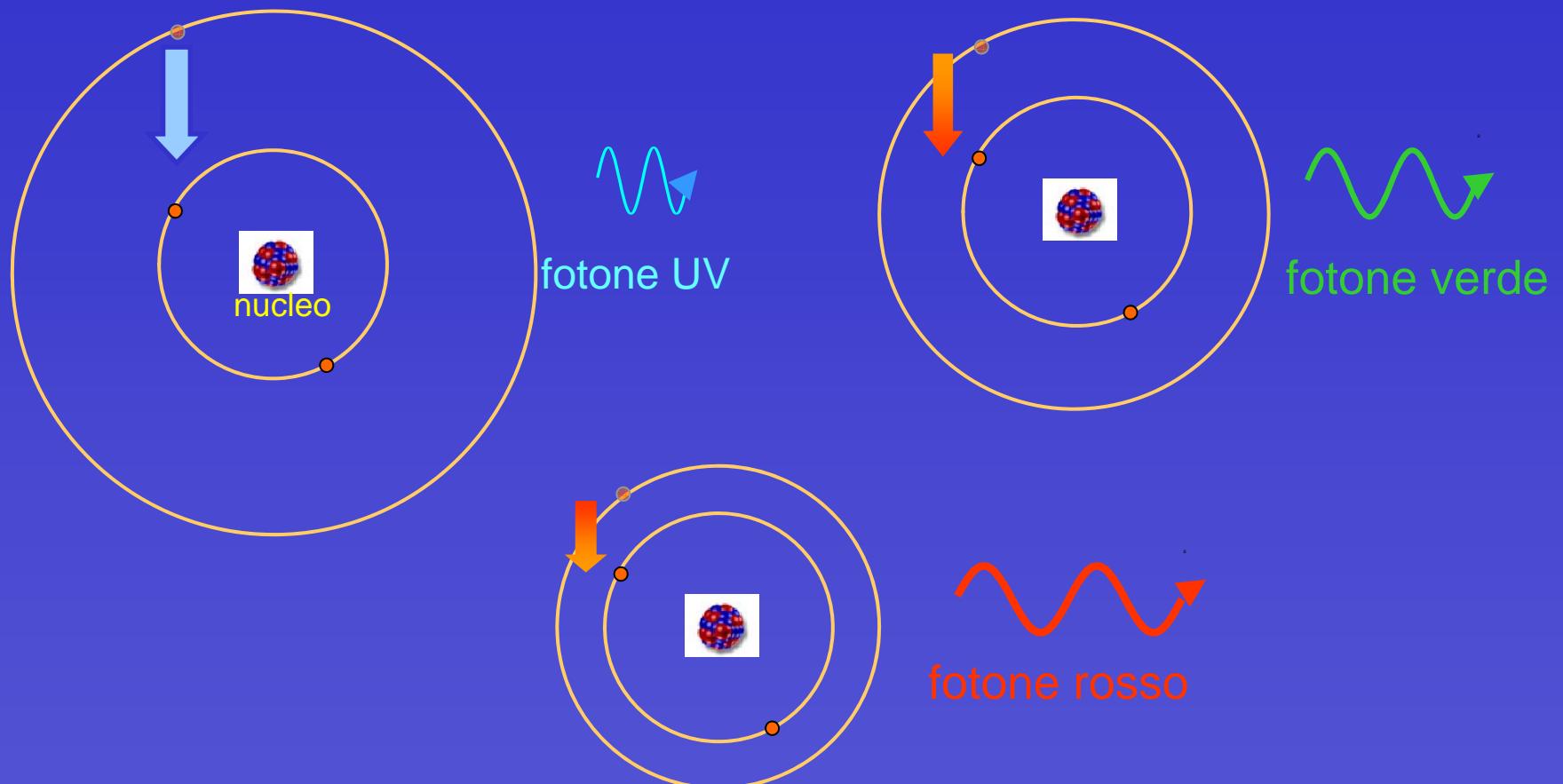
La produzione della luce visibile avviene all'interno degli atomi, che sono composti di un nucleo (di protoni e neutroni) e di elettroni che orbitano intorno ad esso.

L'assorbimento di un fotone eccita l'elettrone ad un livello di energia maggiore.



Se si fornisce energia all'atomo (assorbimento), un elettrone può “saltare” da un'orbita vicina al nucleo ad un'orbita più lontana. L'atomo diventa eccitato, ed ha più energia di prima.

Emissione spontanea



Un atomo eccitato torna nello stato fondamentale *spontaneamente* dopo un certo tempo caratteristico, emettendo l'energia assorbita sotto forma di luce.

Emissione spontanea

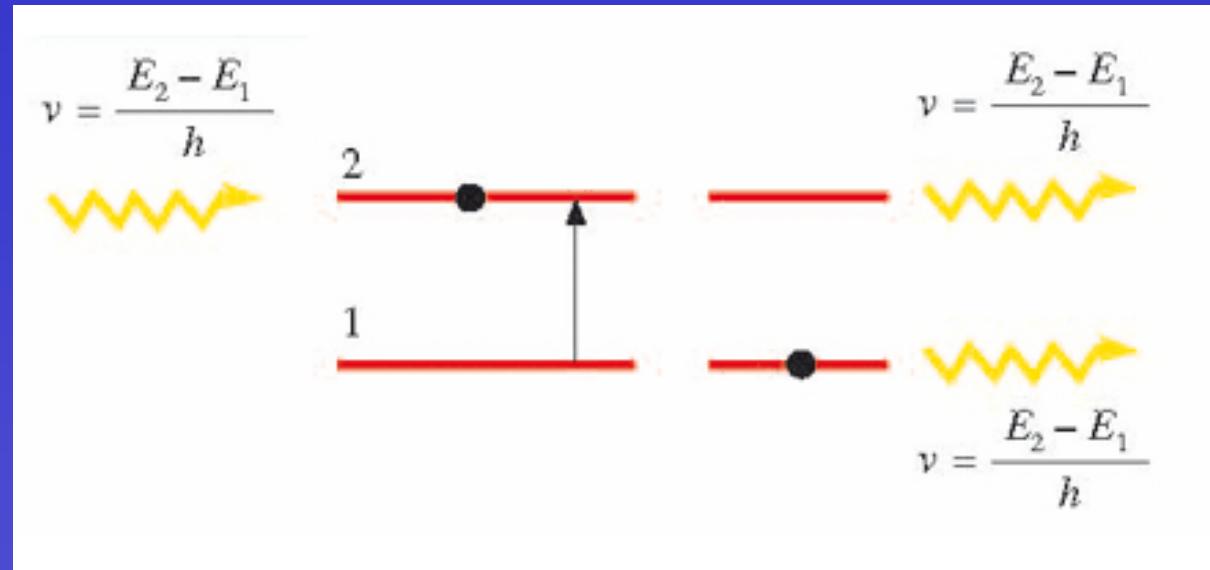
Questo processo avviene in maniera **casuale**: i fotoni vengono emessi **in tutte le direzioni** e le onde ad essi associate sono **sfasate** tra loro.

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

Successivamente essi si diseccitano emettendo luce.



Emissione stimolata



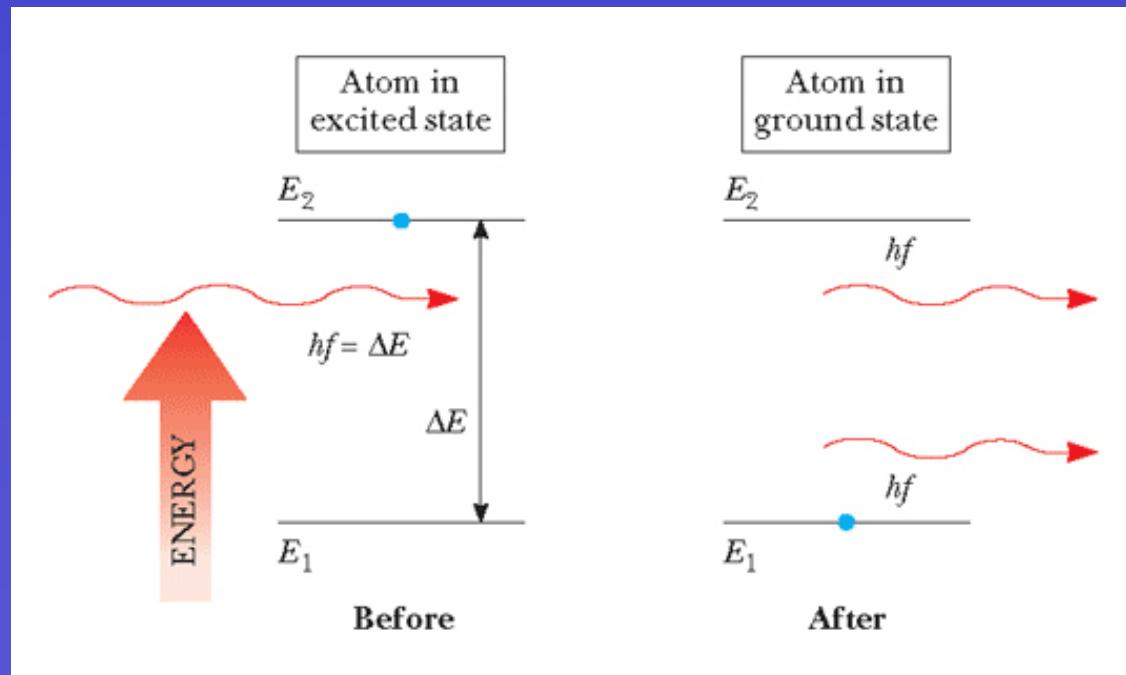
L'emissione stimolata consiste nella diseccitazione del livello eccitato mediante un fotone della stessa energia.

Si ottengono così due quanti di radiazione em identici, cioè coerenti (con la stessa fase) e con la stessa lunghezza d'onda e con la stessa direzione.

Il laser

Il laser sfrutta il fenomeno dell'emissione stimolata, scoperto nel 1917 da Albert Einstein:

Se si ha una popolazione di atomi in uno stato eccitato ed essi vengono investiti da una radiazione di energia pari a quella di eccitazione, gli elettroni ricadranno immediatamente nell'orbita più bassa, emettendo un altro fotone della stessa energia, fase e direzione di quello incidente.



Condizioni necessarie

Per far sì che l'emissione stimolata produca luce laser è necessario avere un'accumulazione di fotoni nello stato eccitato del sistema. Per ottenere questa accumulazione devono essere soddisfatte le 3 seguenti condizioni:

1. Inversione di popolazione;
2. Lo stato eccitato deve essere uno stato metastabile;
3. Il fotone emesso deve a sua volta stimolare altri fotoni del sistema e deve quindi essere confinato.

1. Inversione di popolazione

Gli atomi sono, di solito, nello stato fondamentale, quindi una radiazione incidente ha una probabilità maggiore di essere assorbita, piuttosto che di produrre emissione stimolata.

E' necessario, quindi, portare gran parte degli atomi in uno stato energetico superiore, lasciando quasi vuoto lo stato inferiore.

Questa condizione si chiama **INVERSIONE DI POPOLAZIONE**.

Un fotone incidente potrebbe provocare una “valanga” di elettroni stimolati, tutti perfettamente in accordo di fase. Tale onda stimolante continuerebbe ad aumentare di intensità mentre si propaga attraverso il **mezzo attivo**, purché possa essere mantenuta l'inversione di popolazione.

1. Inversione di popolazione

La condizione di inversione di popolazione si ha quando:

$$N_2 > N_1$$

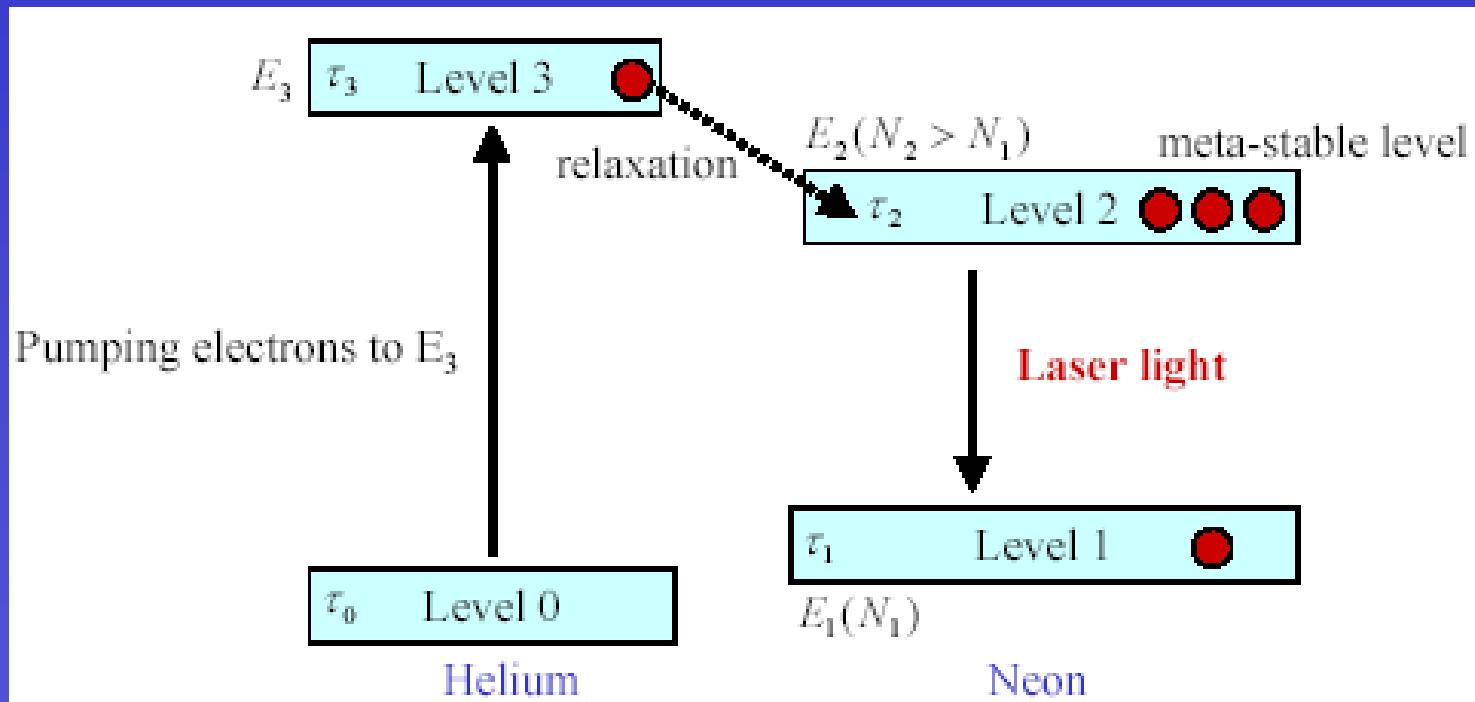
Cioè quando il n° di atomi eccitati nel mezzo attivo è maggiore del n° di atomi nello stato fondamentale.

In un laser a due livelli si può aver al più: $N_2 = N_1$, quindi non è un dispositivo vantaggioso.

Si realizzano allora laser con sistemi a 3 o a 4 livelli.

2. Stato eccitato metastabile

Se lo stato eccitato è metastabile (cioè ha una vita media lunga paragonata all'usuale breve tempo degli stati eccitati che è $\sim 10^{-8}$ s), allora l'emissione stimolata ha più probabilità di avvenire che l'emissione spontanea.



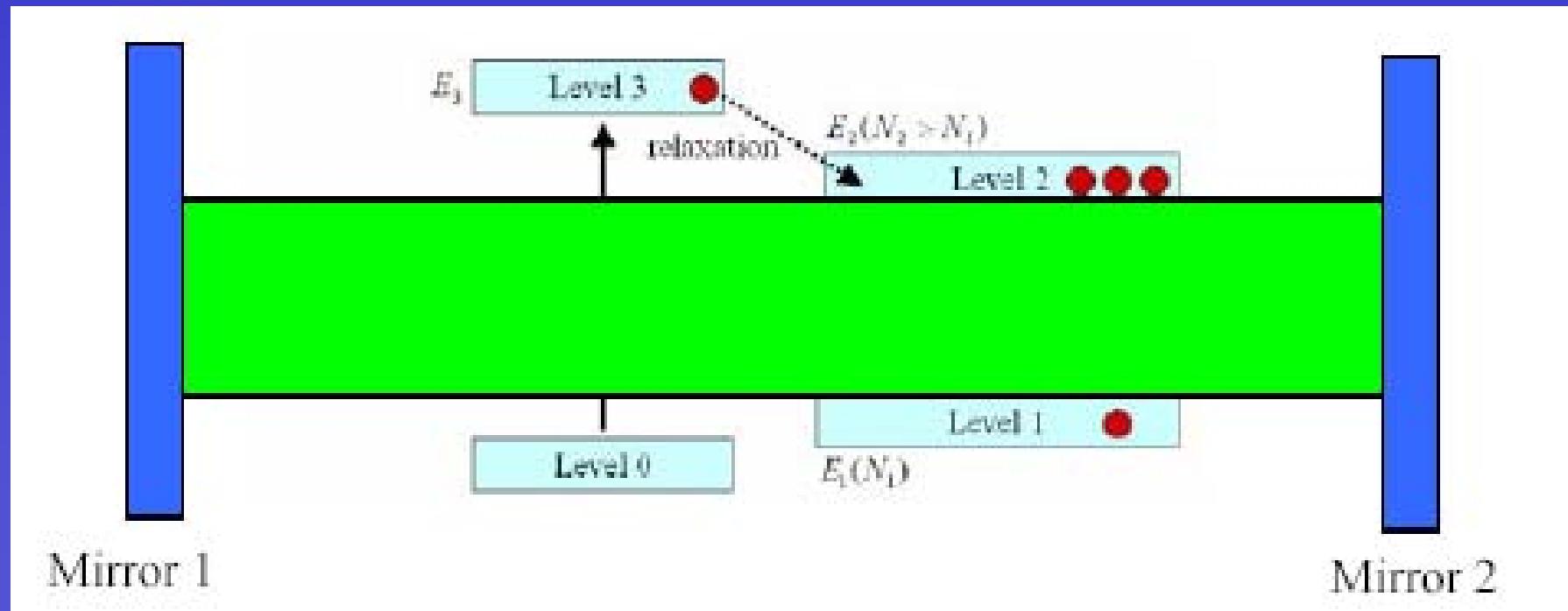
$T_2 > T_3$
 T_2 lungo
 T_1 breve

Il modulo di Fisica Applicata per Ortottica
Carlo Altucci - a.a. 2012-2013

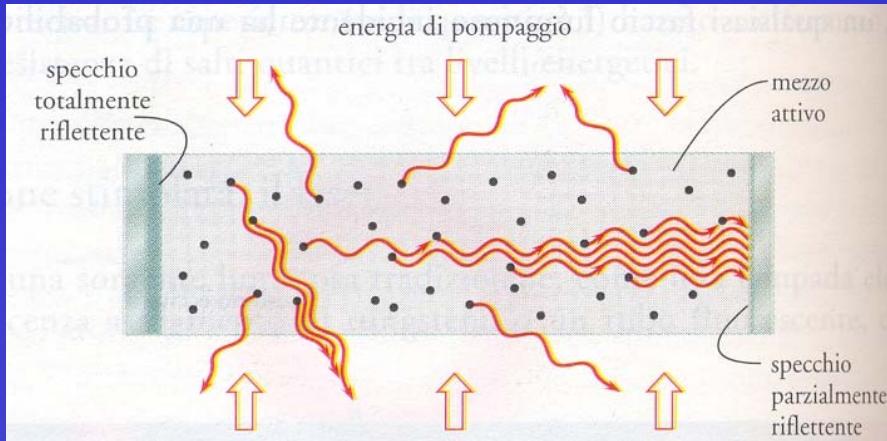
**inversione di
popolazione**

3. Cavità risonante

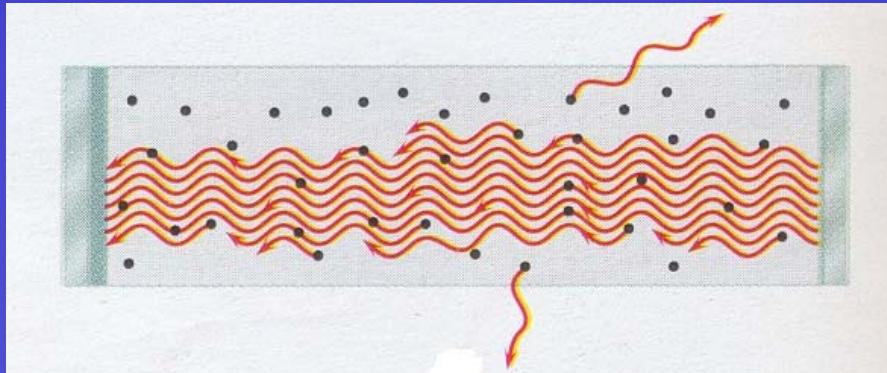
Il processo si può promuovere ponendo il mezzo attivo tra due specchi, affinché l'onda luminosa, riflettendosi avanti e indietro, attraversi il mezzo più volte.



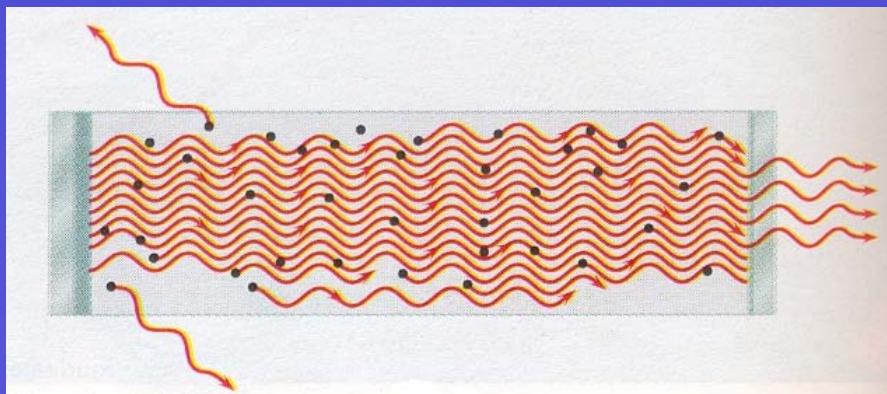
3. Cavità risonante



Uno degli specchi riflette la luce al 100%, l'altro al 99% per permettere alla luce di uscire, sotto forma di fascio laser.

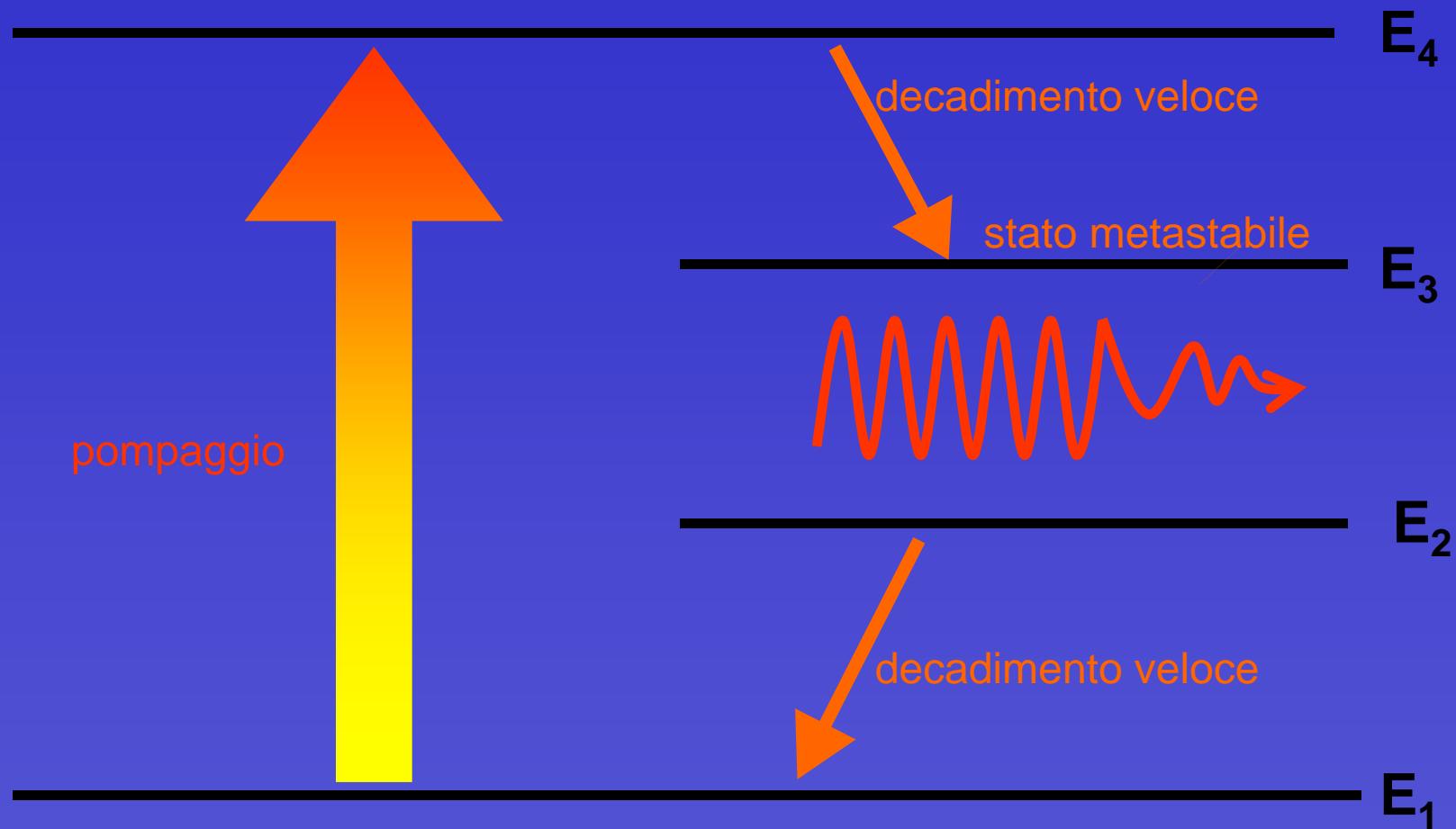


I due specchi, che confinano i fotoni nella cavità, costituiscono una cavità risonante: si propagano solo quelle λ contenute esattamente nella cavità.



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

Laser a quattro livelli: schema generale



efficienza quantica:
$$\frac{E_{3 \rightarrow 2}}{E_{1 \rightarrow 4}}$$

Piccola storia dei laser:

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

Evoluzione prestazioni laser:

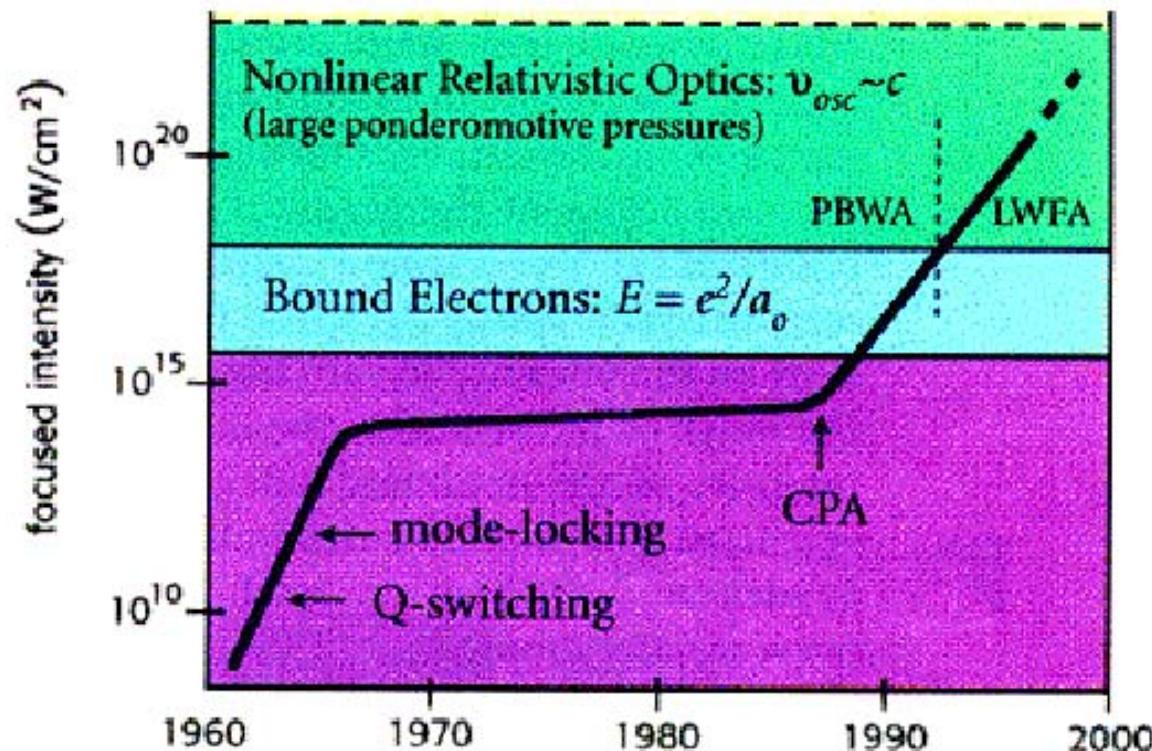
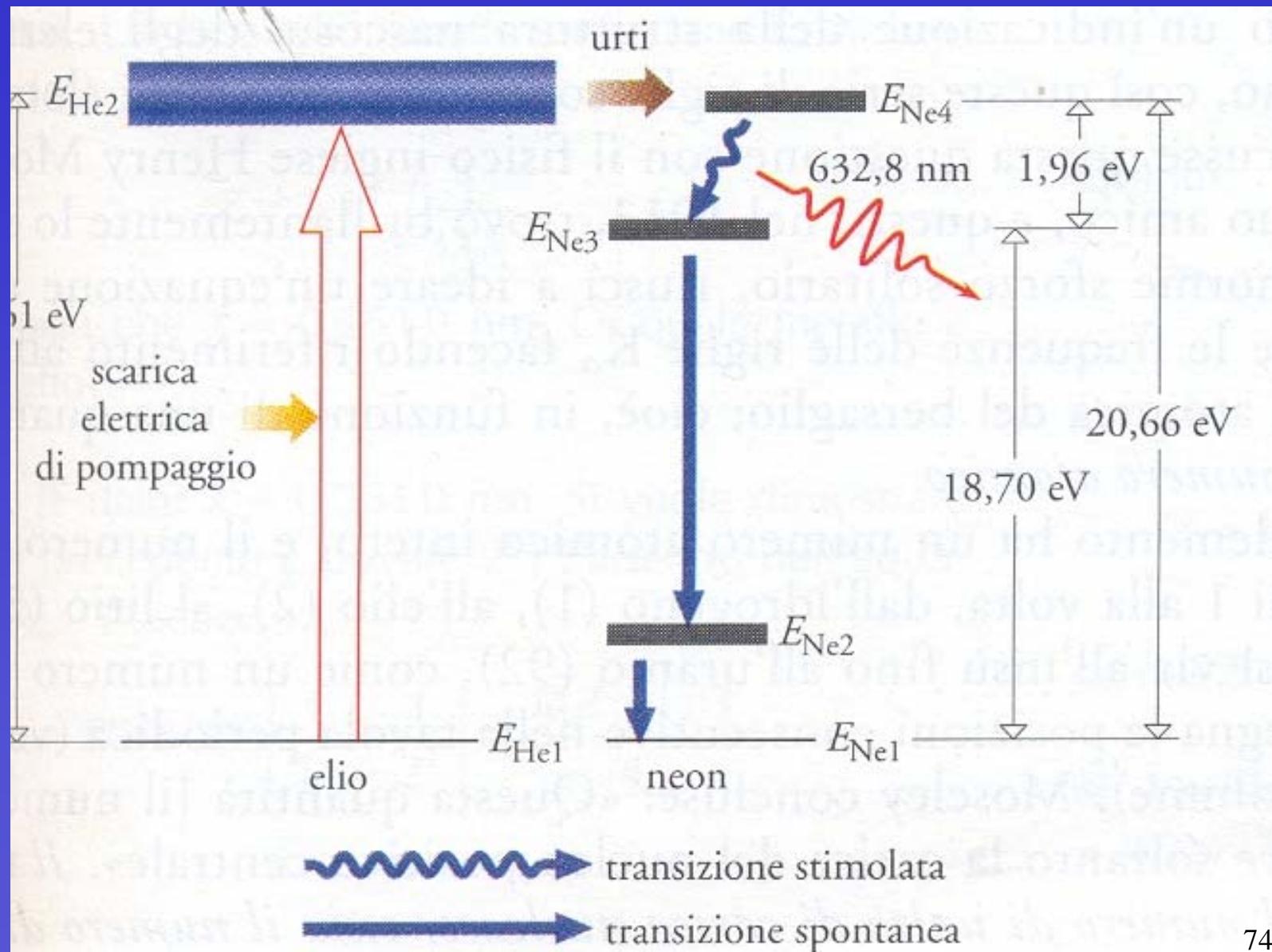


Figure 1. Laser intensity as a function of year, showing the impact of the CPA concept and the different thresholds of physical regimes. The sharp increase in intensity since the advent of CPA is comparable to the sharp increase after the invention of the laser in the 1960's.

Laser a quattro livelli: He-Ne



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

Tale corrente genera elettroni all'interno del tubo che urtano contro gli atomi di He, portandoli in uno stato eccitato E_{He2} da cui non sono permesse transizioni radiative.

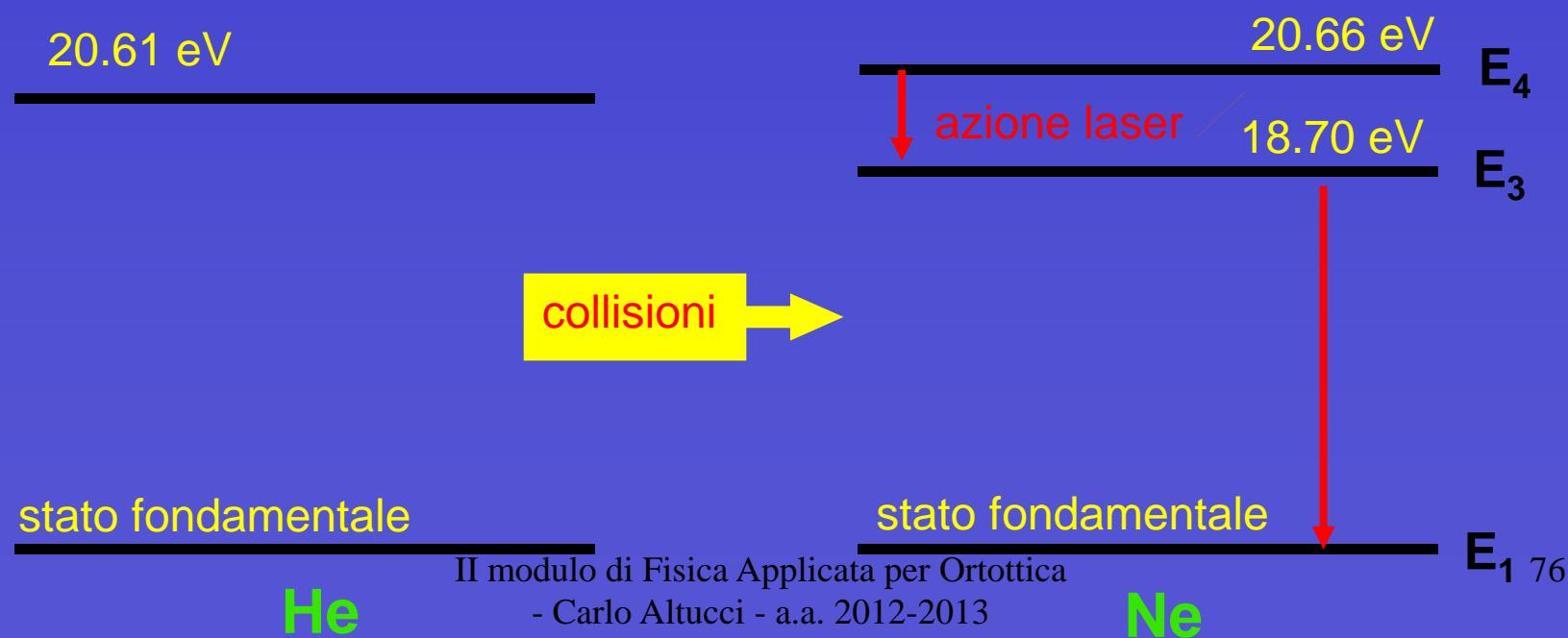
Gli atomi di He eccitati urtano anelasticamente contro gli atomi di Ne allo stato fondamentale, e trasferiscono ad essi energia, trasportandoli in uno stato energetico E_{Ne4} longevo (metastabile).

Si ha quindi, nella popolazione di atomi di Ne, un'inversione di popolazione rispetto al livello E_{Ne3} .

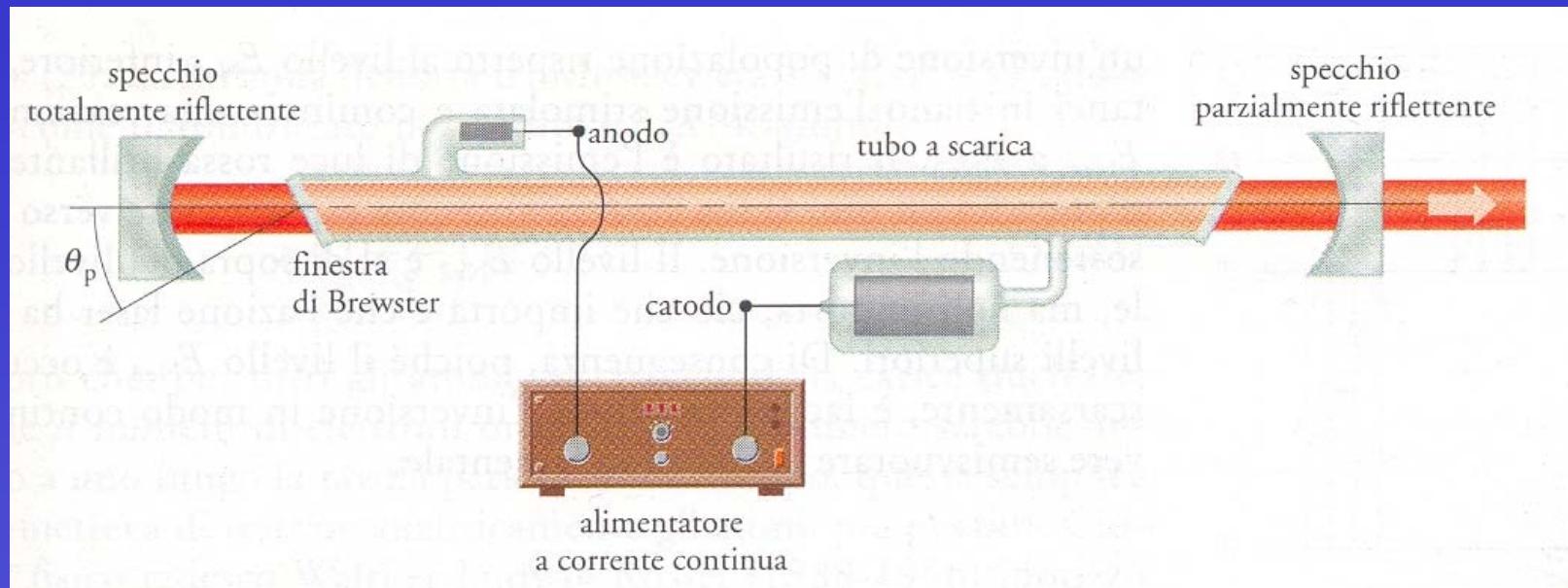
Fotoni spontanei iniziano allora il processo di emissione stimolata e comincia un processo di reazione a catena da E_{Ne4} a E_{Ne3} .

Il risultato è l'emissione di luce a 632.8 nm (rosso brillante).

Il livello E_{Ne3} si svuota rapidamente verso il livello E_{Ne2} , facendo così in modo che il livello 4 sia sempre più popolato del 3 .

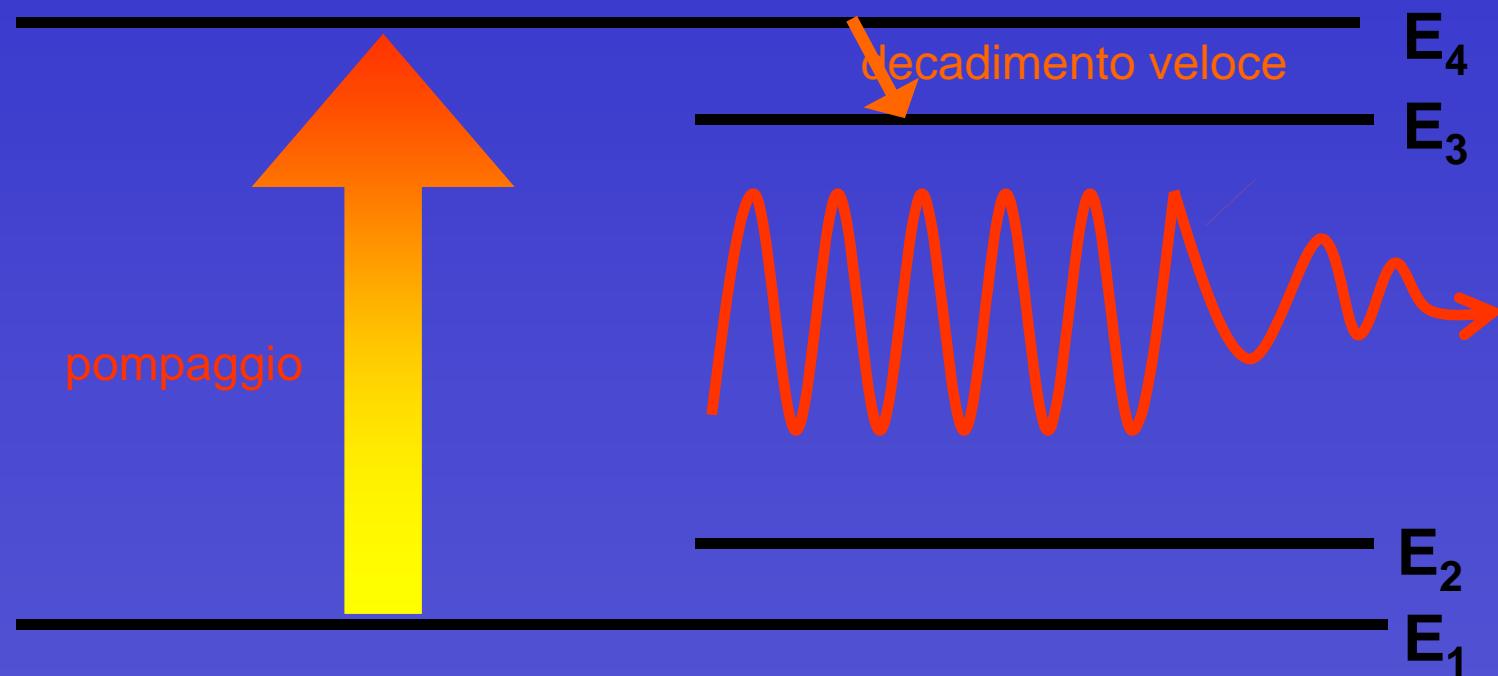


Schema di un laser



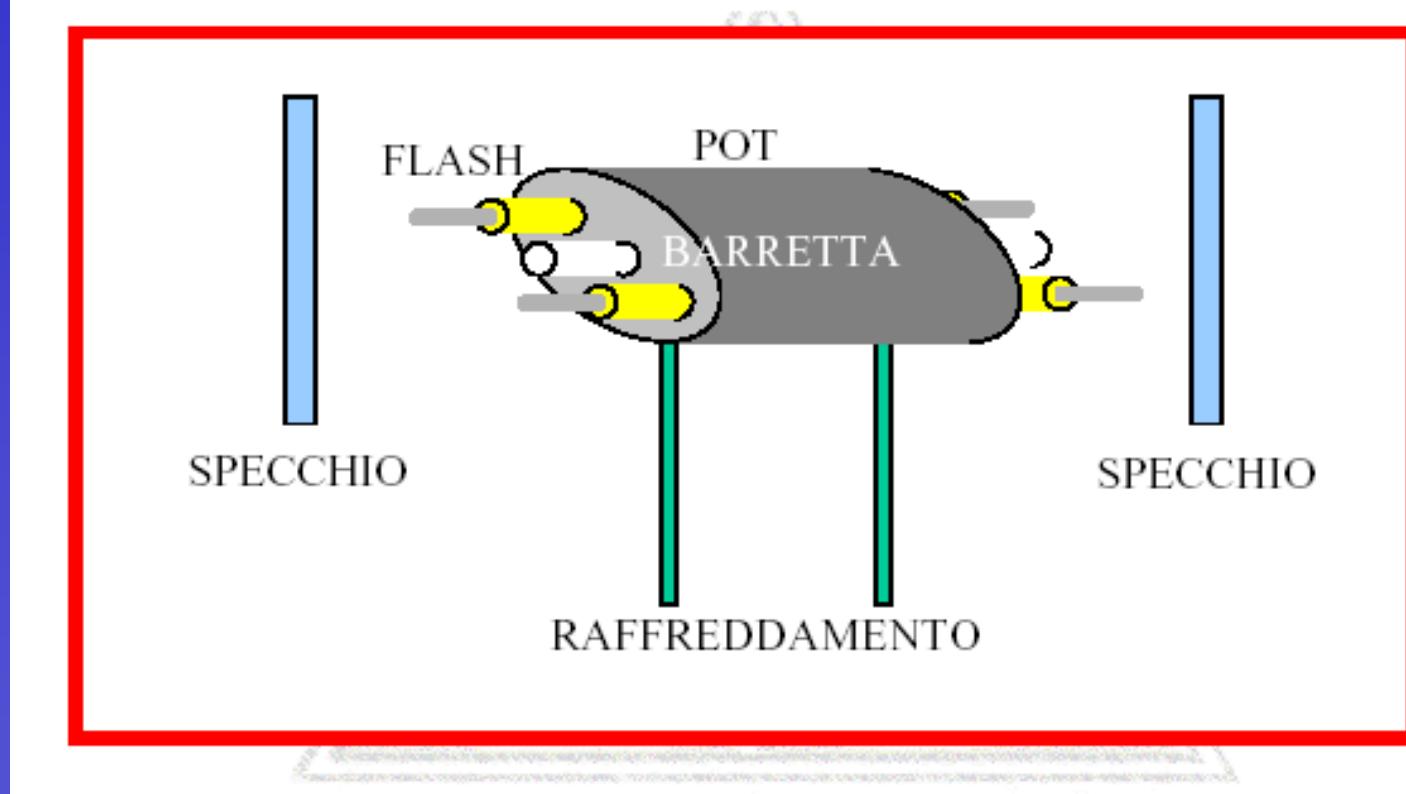
1. Laser a Stato Solido (es: Nd-YAG)

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



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

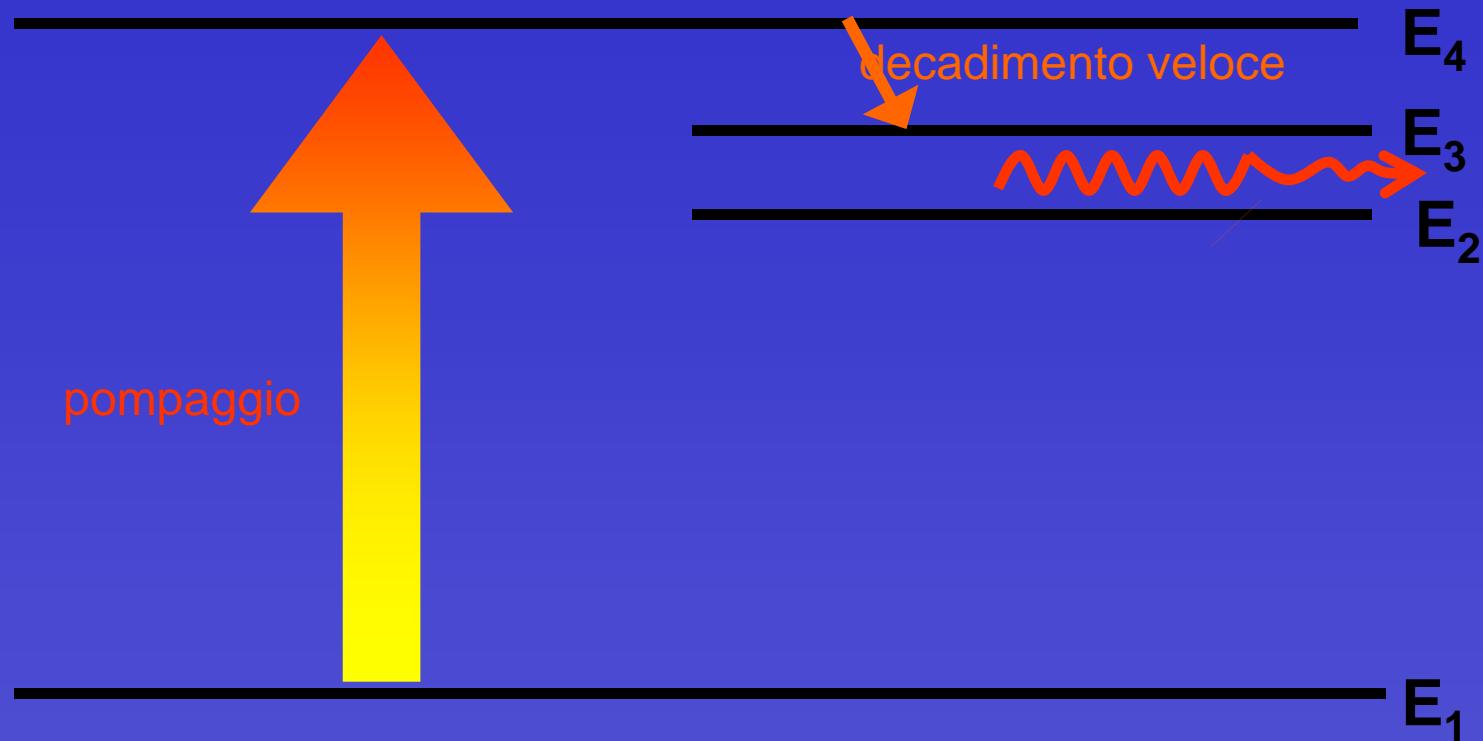
ELEMENTI COSTITUTIVI DI UN LASER a STATO SOLIDO



LASER A STATO SOLIDO

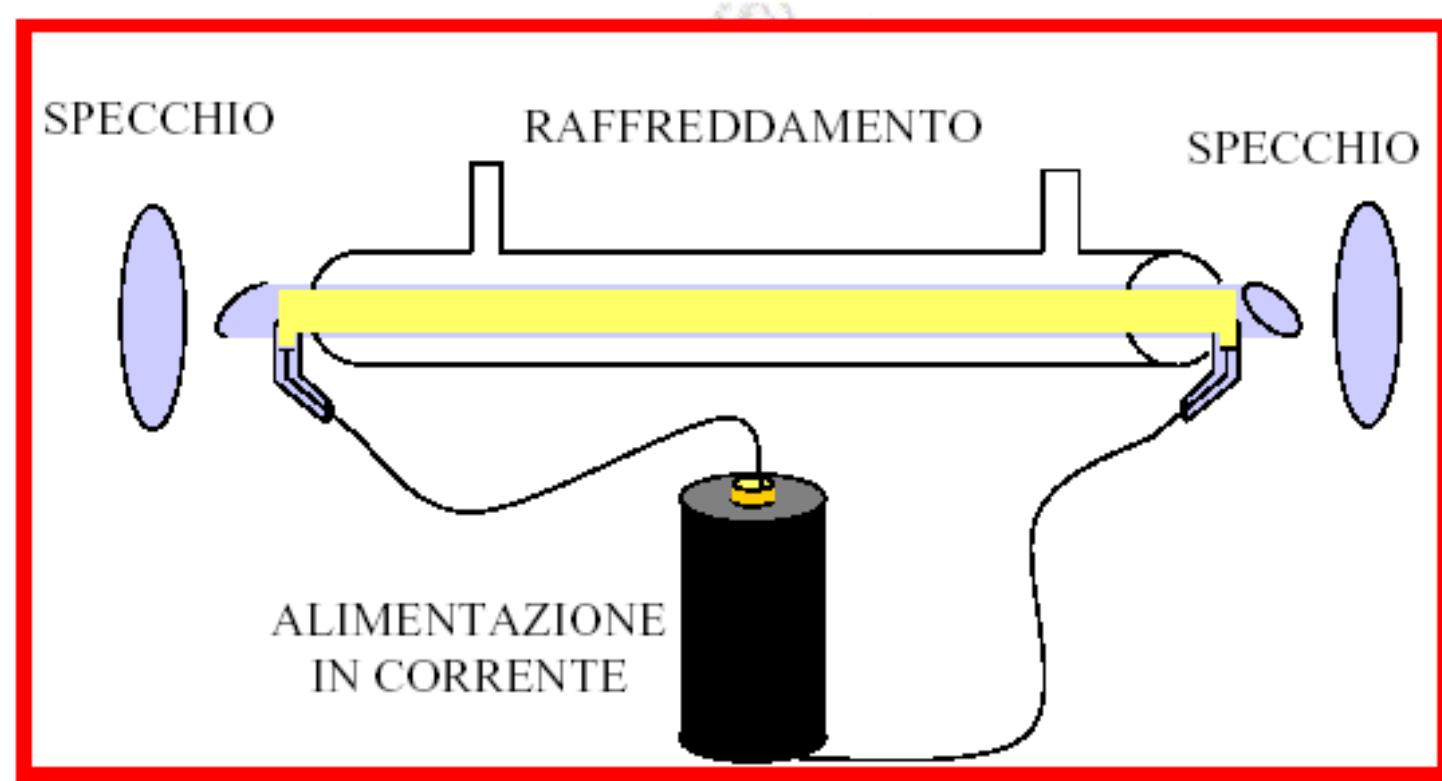
Cr^{3+} in Rubino	emissione visibile: ROSSO ($\lambda=692.8\text{nm}$)	
Nd^{3+} in Y.A.G. (Yttrium Aluminium Garnet)	emissione vicino IR: ($\lambda=1064\text{ nm}$)	
Nd in Vetro	emissione vicino IR: ($\lambda=1064\text{ nm}$)	
Cr^{4+} in YAG	emissione vicino IR: ($\lambda=1550\text{ nm}$)	
Ti-ZAFFIRO	emissione vicino IR: ($700 < \lambda < 1100\text{ nm}$)	
<i>CENTRI DI COLORE</i>	emissione vicino IR: ($1000 < \lambda < 1600\text{ nm}$)	
<i>SEMICONDUTTORE</i>	emissione visibile-vicino IR: ($\lambda= 670/785/1100/1300/1500\text{nm}$)	

2. Laser ad Ar (gas inerte)



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

ELEMENTI COSTITUTIVI DI UN LASER a GAS



LASER A STATO GASSOSO

He-Ne (Kr, Xe,)	emissioni selettive nel visibile/IR: ($\lambda=632.8/1100$ nm)	
vapori di rame (Au, Pb, Ca, Sr, Mn)	emissione nel verde e nel giallo: ($\lambda=510/578$ nm)	
Ar^+	emissione visibile/UV: ($\lambda=514.5/488/350$ nm)	
He-Cd (Sn, Pb, Zn, Se)	emissione visibile/UV: ($\lambda=416/325$ nm)	
CO_2	emissione lontano IR: ($\lambda=10.64/9.6$ μm)	
CO	emissione lontano IR: ($\lambda=5.0$ μm)	
N_2	emissione UV: ($\lambda=337$ nm)	
ECCIMERI (KrF, ArF, KrCl, XeC, XeF, ...)	emissione UV: ($150 < \lambda < 400$ nm)	

eugenio.fazio@unironia1.it

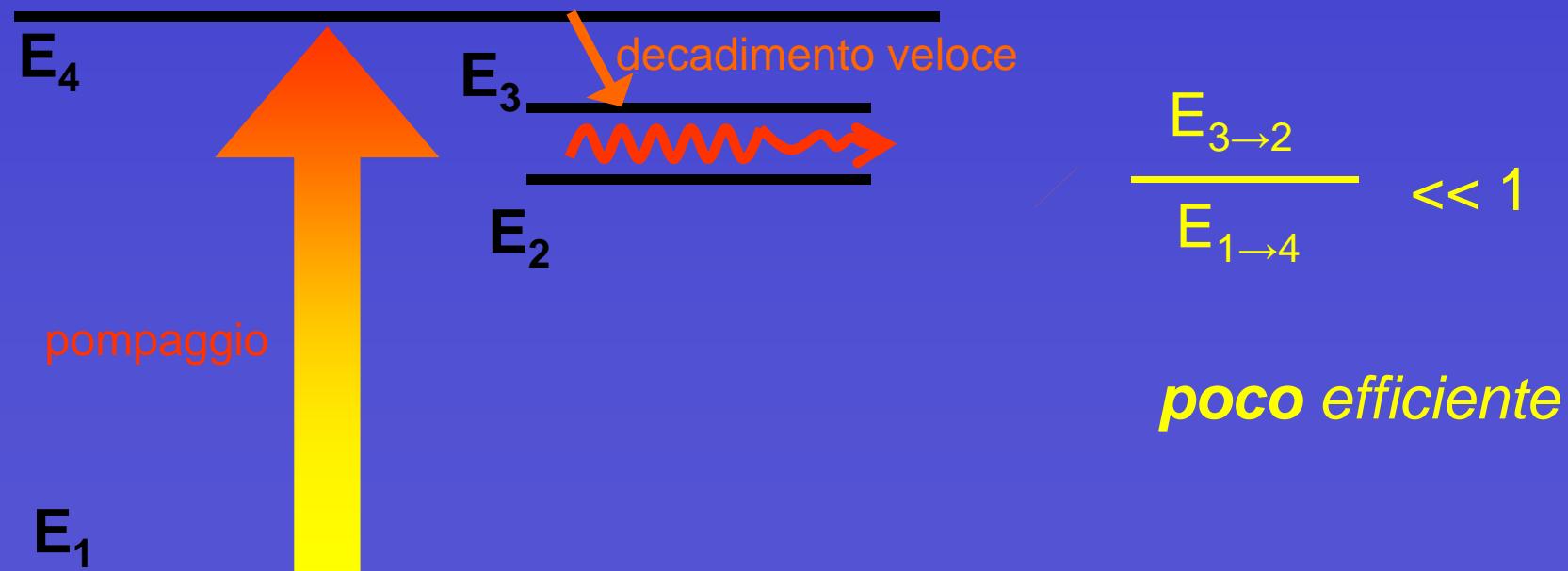
3. Laser a eccimeri (excited dymers)

Gli eccimeri sono molecole non esistenti in natura. Sono costituite da un atomo di un gas nobile eccitato più un atomo alogeno. Tali molecole esistono solo nello stato eccitato.

L'eccitazione viene prodotta da una scarica elettrica nel mezzo attivo (es: Xenon + fluoro).

Quando la molecola si diseccita emette radiazione laser.

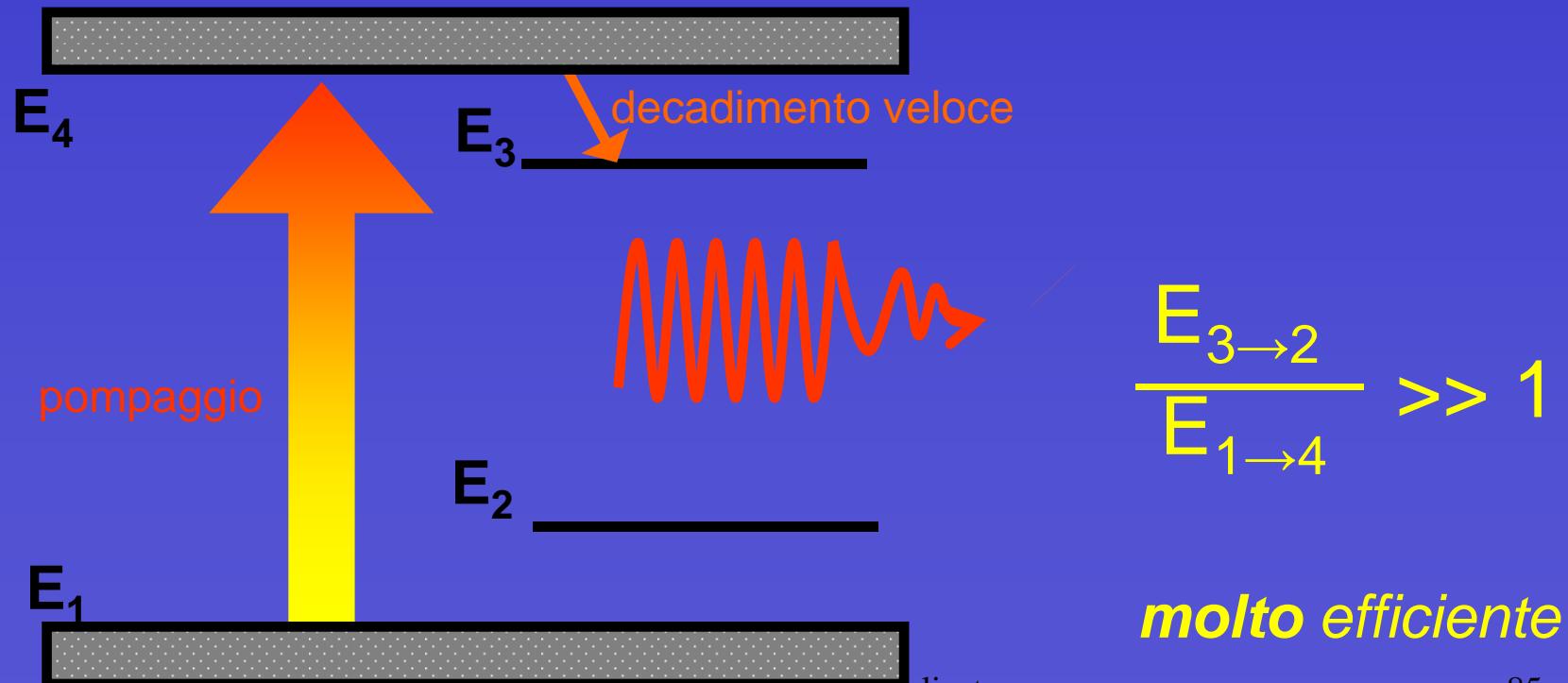
Vantaggio: emette radiazione a λ corte (150 – 300 nm).



4. Laser a diodi

Sono caratterizzati da:

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



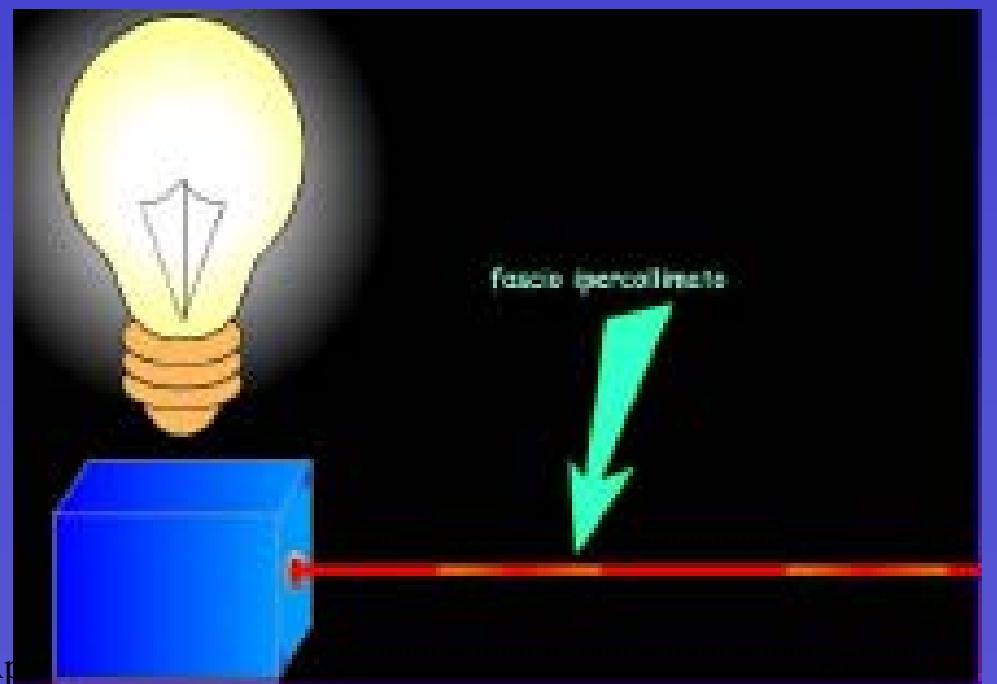
Tipi di luce laser

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

Proprietà della luce laser: Unidirezionalità

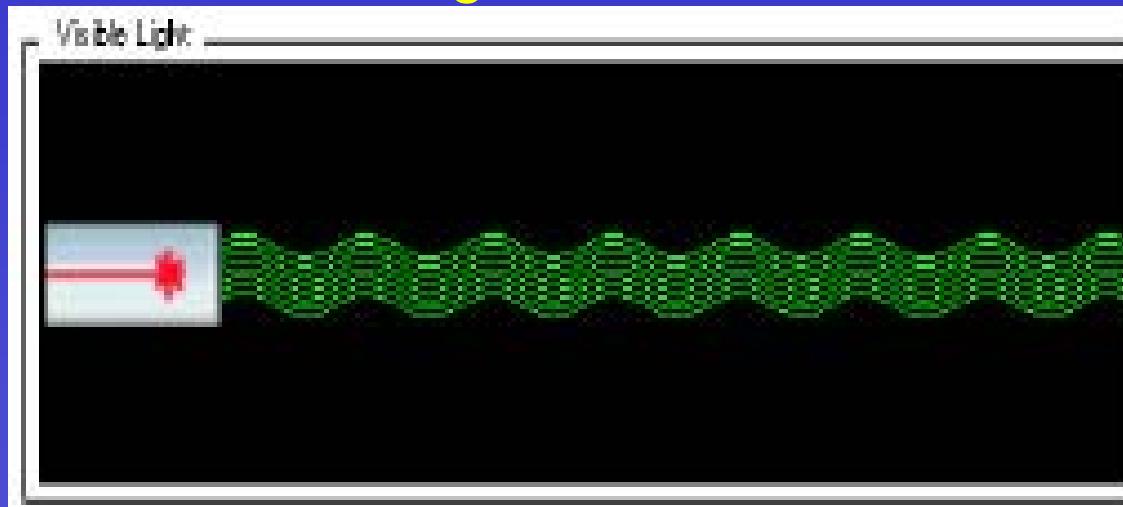
Un fascio laser a grande distanza diverge in maniera minima: un fascio verde di un laser ad Argo con sezione in partenza di un centimetro di diametro si allarga fino ad una sezione di tre centimetri di diametro dopo un percorso di 500 metri.

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



Proprietà della luce laser: Monocromaticità

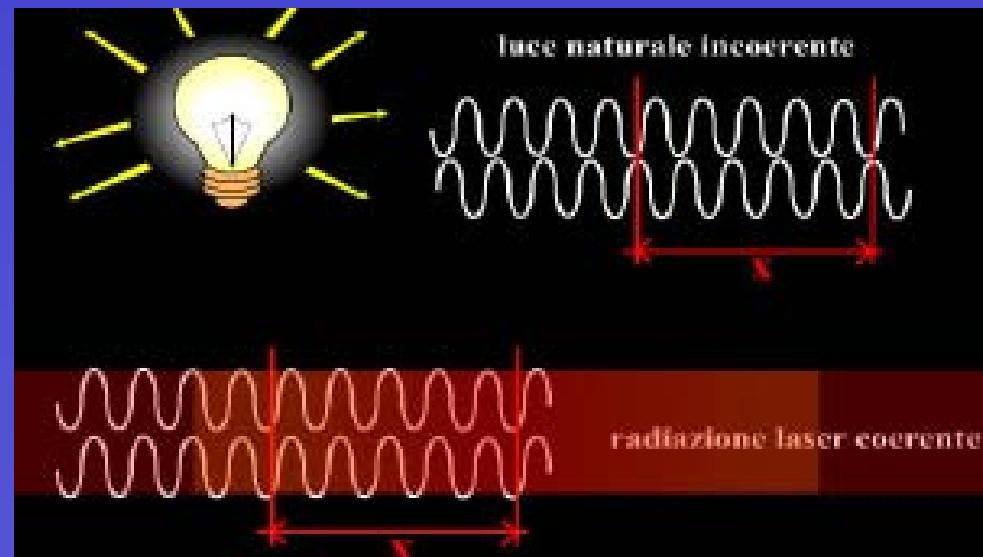
La radiazione laser presenta sempre una stessa frequenza mentre una lampadina a incandescenza emette radiazione composta da fotoni di energie differenti.



La monocromaticità è legata alla coerenza temporale ed è dovuta al meccanismo dell'emissione stimolata di radiazione da parte del materiale attivo che può essere solido (rubino, Nd-YAG, ecc.), gassoso (CO₂, Argo) o liquido (laser a coloranti).

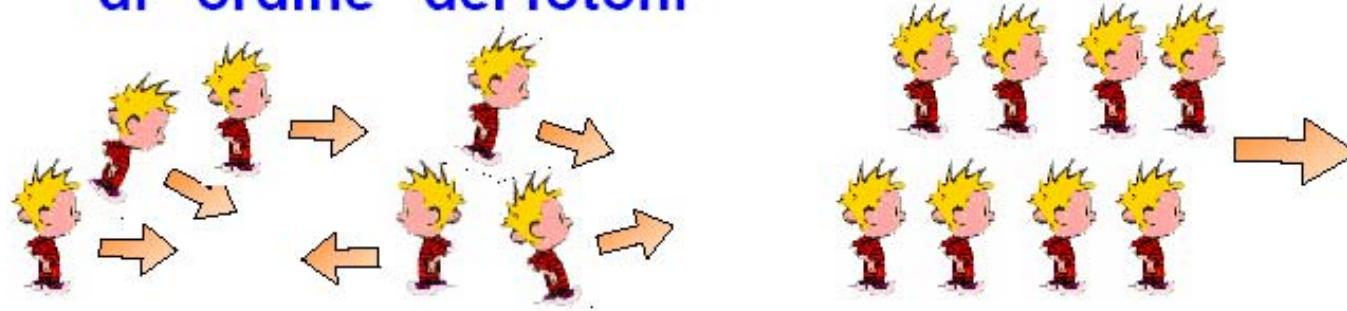
Proprietà della luce laser: Coerenza spaziale

La proprietà di unidirezionalità dei fasci laser è legata alla coerenza spaziale ed è una conseguenza della struttura della cavità risonante del laser formata da due specchi paralleli che creano in uscita un fascio di fotoni con direzione esattamente perpendicolare alla loro superficie.

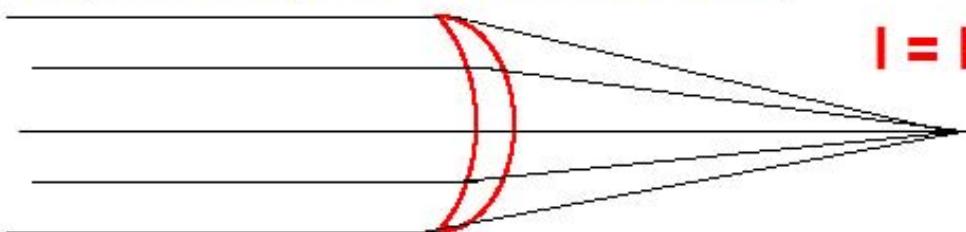


Proprietà della luce laser: Coerenza spaziale (II)

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

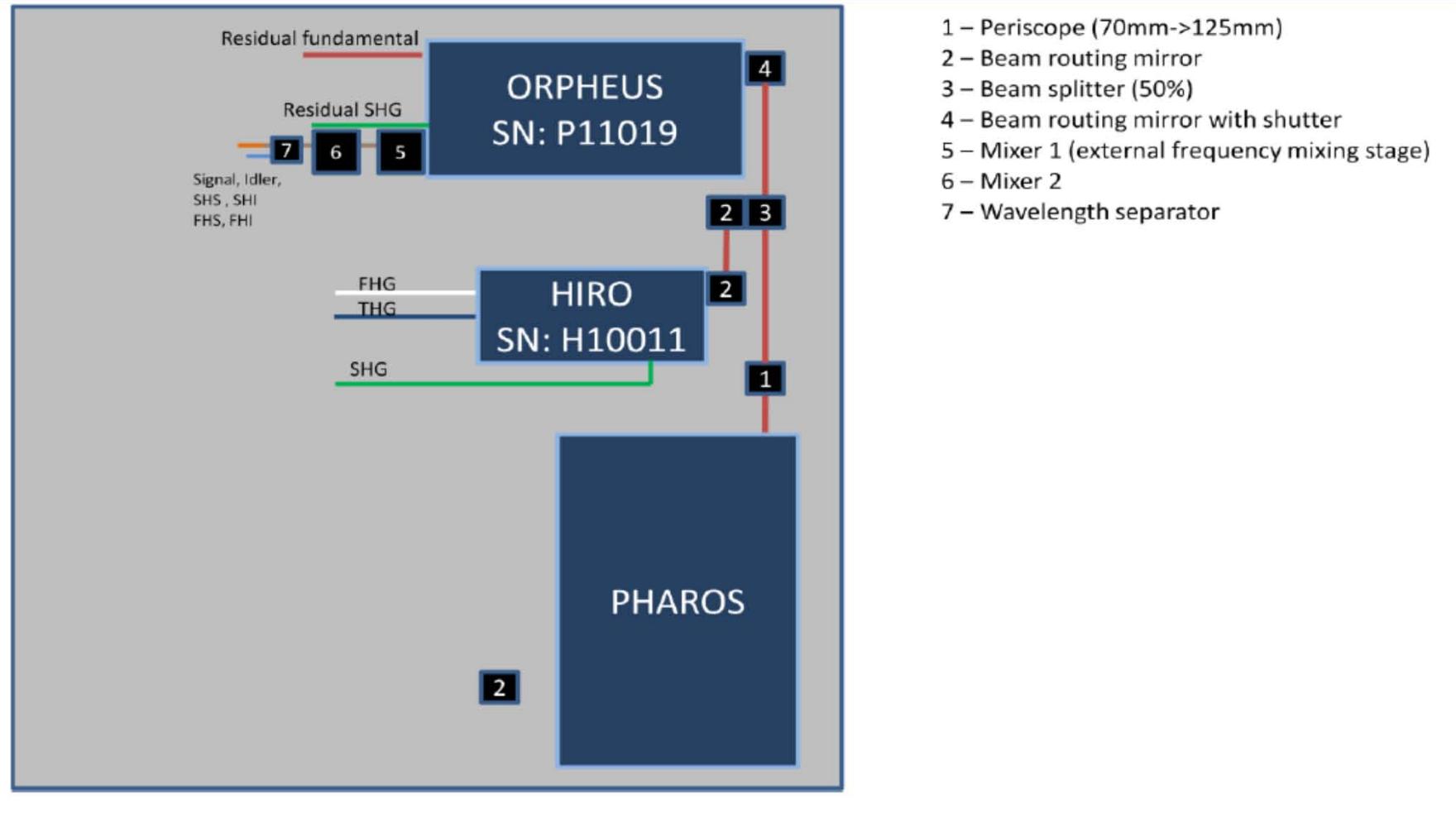


In pratica una coerenza elevata implica una elevata focalizzabilità del laser (macchia focale molto piccola, intensità elevata)

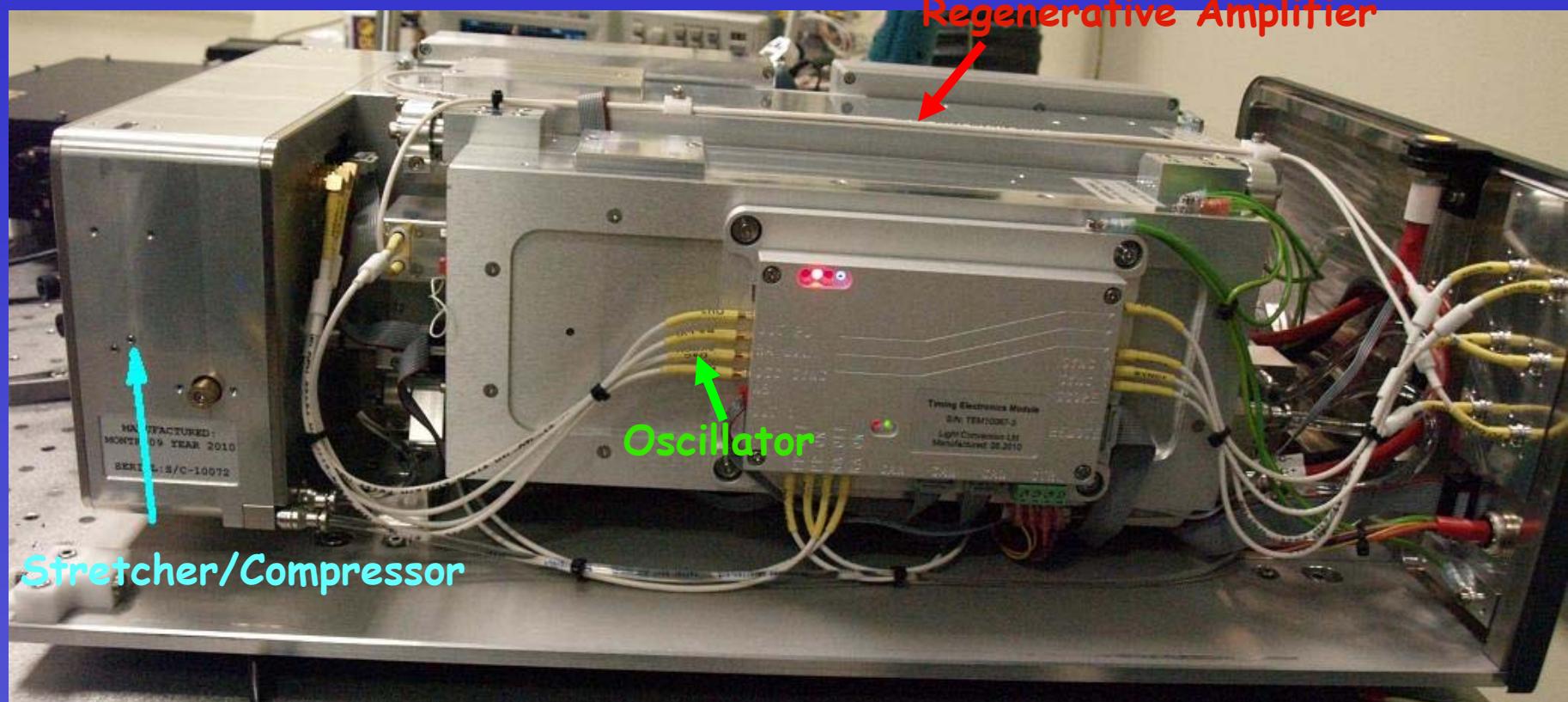


$$I = P / S = E / \tau S$$

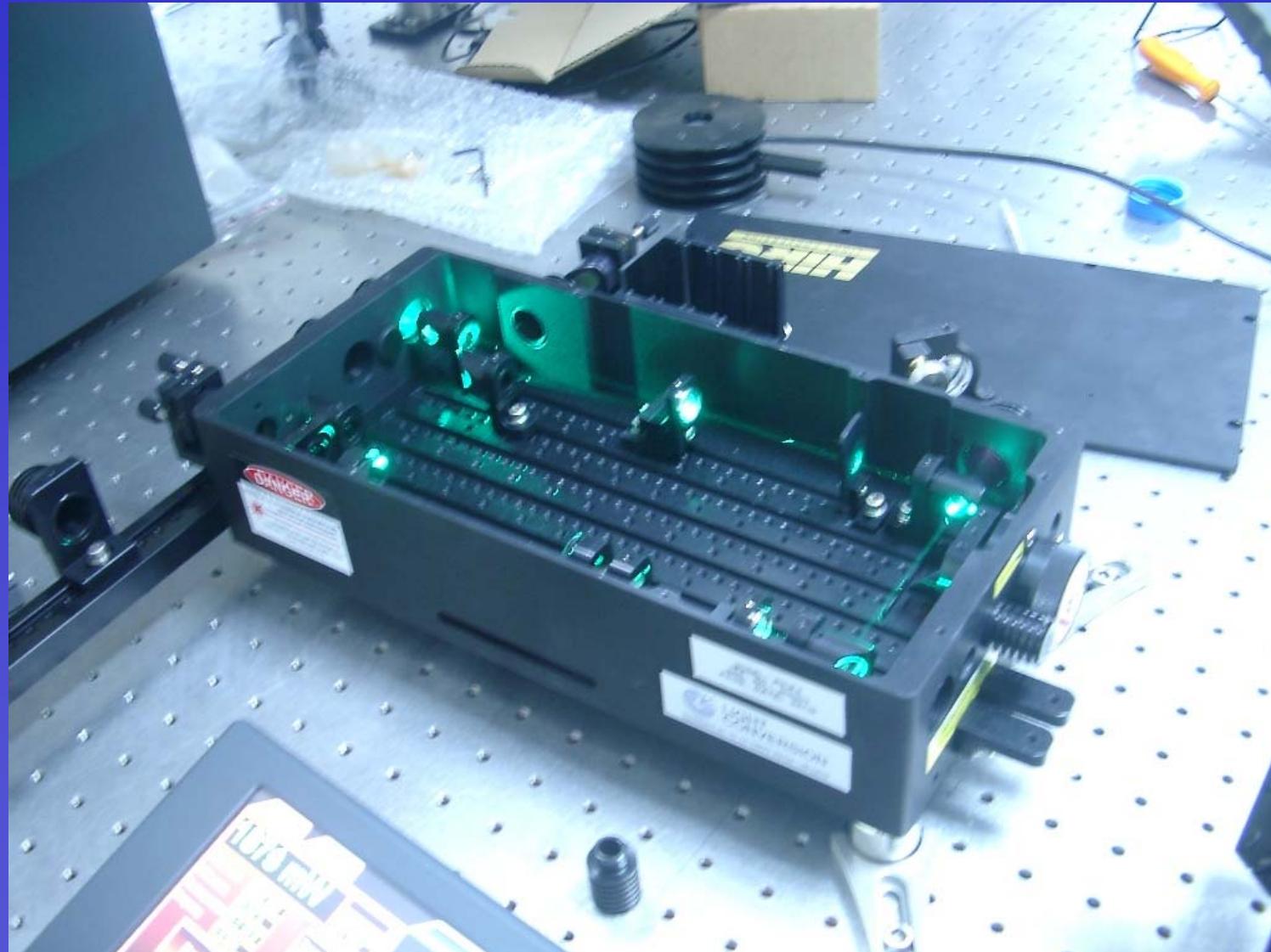
Schema di una sorgente laser ultracorta accordabile molto avanzata (PHAROS+HIRO+ORPHEUS)



Schema del PHAROS



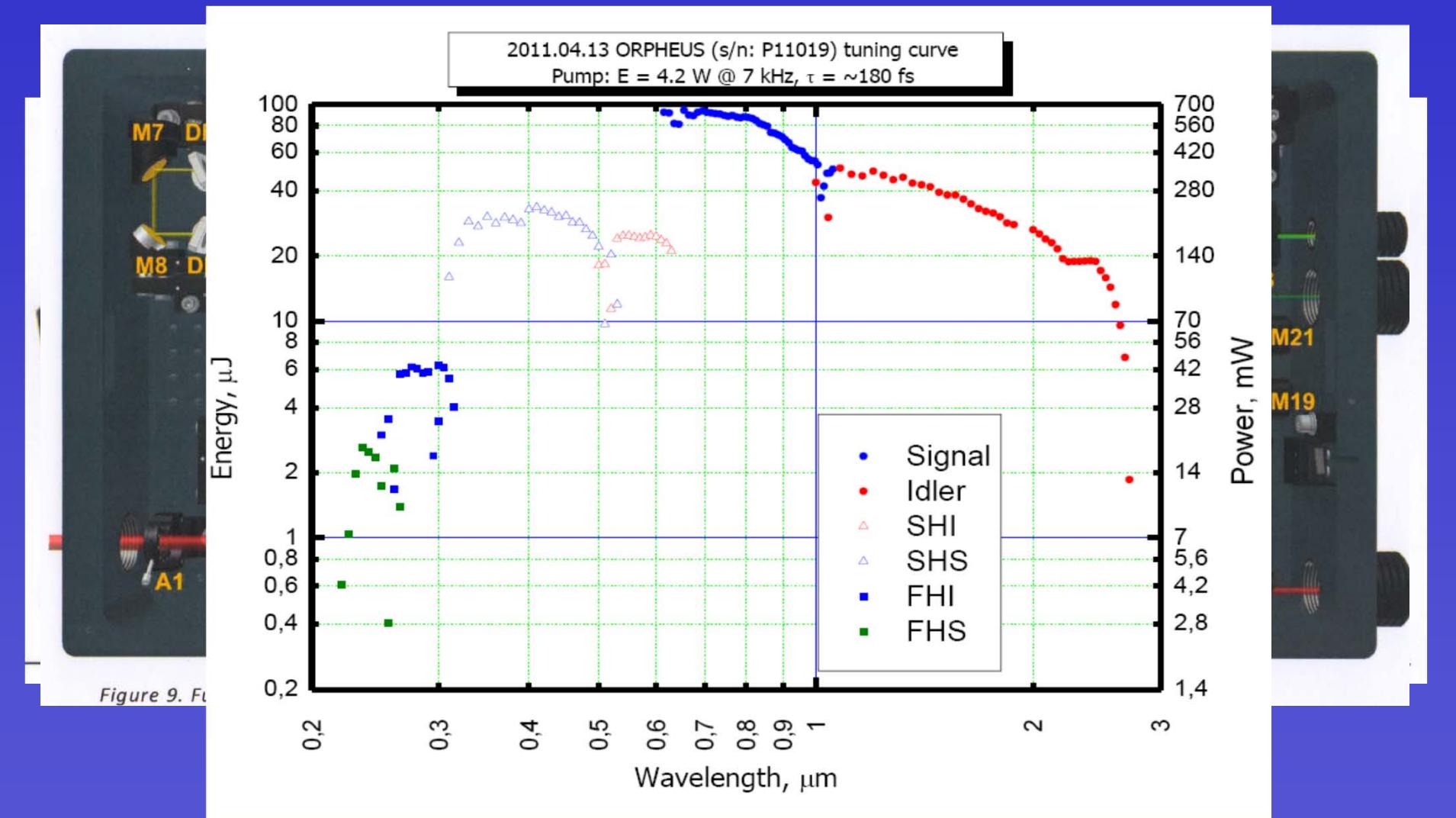
Schema del generatore di armoniche HIRO



PHAROS + HIRO



ORPHEUS: una sorgente ultracorta accordabile



Applicazioni dei laser



Interazione laser-tessuto

PROCESSO FOTOTERMICO:

È DOVUTO ALL'AUMENTO DI TEMPERATURA CAUSATO DALL'ASSORBIMENTO DELLA RADIAZIONE. QUESTO È IL PROCESSO PIÙ FREQUENTE ED È IMPORTANTE SOPRATTUTTO PER ESPOSIZIONI DELL'ORDINE DEL MILLISECONDО O PIÙ LUNGHE. PER ESPOSIZIONI MOLTO LUNGHE E PER $\lambda > 600$ nm (VERSO L'IR) È L'UNICO EFFETTO CHE DETERMINA IL DANNO.

PROCESSO FOTOCHEMICO:

CONSISTE NELLA MODIFICAZIONE DELLE MOLECOLE DEL TESSUTO E/O NELLA PRODUZIONE DI NUOVE SOSTANZE A CAUSA DI REAZIONI CHIMICHE ATTIVATE DALLA RADIAZIONE. QUESTO PROCESSO È QUASI TOTALMENTE LIMITATO A $\lambda < 600$ nm (verde-blu-UV) ED È IMPORTANTE SOPRATTUTTO PER ESPOSIZIONI DI ALCUNI SECONDI O PIÙ LUNGHE.

PROCESSO FOTOMECCANICO:

È DOVUTO ALLA FORMAZIONE DI ONDE D'URTO CAUSE DALLA RADIAZIONE E IN GRADO DI DANNEGGIARE IL TESSUTO. È IL PROCESSO PIÙ IMPORTANTE NEL CASO DI IMPULSI DI FORTE INTENSITÀ DI PICCO E DI BREVISSIMA DURATA (ps E fs).

PROCESSO FOTOABLATIVO:

È UN PROCESSO MOLTO COMPLESSO CHE CAUSA LA RIMOZIONE ESPLOSIVA DI MATERIALE DAL TESSUTO IN SEGUITO ALL'IRRAGGIAMENTO. È IMPORTANTE SOPRATTUTTO NEL CASO DI IMPULSI DI ELEVATA POTENZA, SOPRATTUTTO NELL'UV. NELLA FOTOABLAVIONE LASER SONO PRESENTI IN VARIA MISURA PROCESSI FOTOTERMICI, FOTOCHEMICI E FOTOMECCANICI.

Laser in oftalmologia

- **Interazione fotoablativa:** chirurgia rifrattiva: laser ad eccimeri (ArF, $\lambda=193\text{nm}$)
- **Interazione fototermica:** trattamento del glaucoma cronico, retinopatia diabetica, profilassi del distacco retinico, malattie degenerative della macula: Ar ($\lambda=514.4\text{nm}$), Kr ($\lambda=647\text{nm}$), diodi ($\lambda=780-840\text{nm}$), Nd:YAG 2w ($\lambda=532\text{nm}$)
- **Interazione fotomeccanica:** capsulotomia posteriore in cataratta secondaria; iridectomia in glaucoma ad angolo stretto: Q-switching Nd:YAG ($\lambda=1064\text{nm}$)
- **Interazione fotochimica:** trattamento delle membrane neovascolari nella degenerazione maculare legata all'età: diodi a emissione nel VIS con l'accoppiata ad uno specifico assorbitore.

Laser in oftalmologia (II)

CHIRURGIA RIFRATTIVA

AGISCE MODIFICANDO LA FORMA DELLA SUPERFICIE ANTERIORE
DELL'OCCHIO IN MODO DA CORREGGERE IL DIFETTO DI FOCALIZZAZIONE
(MIOPIA, IPERMETROPIA E/O ASTIGMATISMO).
USA IL LASER AD ECCIMERI (NELL'UV), CHE VAPORIZZA I TESSUTI
ROMPENDONE I LEGAMI MOLECOLARI (FOTOABLAVZIONE)

GLAUCOMA CRONICO (FOTOTERMICA)

ALT: TRABECULOPLASTICA CON LASER AD ARGON, TRATTAMENTO DI
ELEZIONE. SI USA DA 30 ANNI.

SLT: TECNICA PIÙ RECENTE. FORNISCE L'1% DELL'ENERGIA FORNITA
DALLA ALT. SFRUTTA IL PRINCIPIO CHE L'ENERGIA È ASSORBITA SOLO
DALLE CELLULE PIGMENTATE, EVITANDO COSÌ IL DANNO TERMICO ALTRI
CELLULE ADIACENTI. TEORICAMENTE OFFRE I SEGUENTI VANTAGGI (DA
CONFERMARE): PUÒ ESSERE EFFETTUATA PIÙ VOLTE (ANCHE DOPO
FALLIMENTO DELLA ALT). OFFRE MAGGIOR SICUREZZA

Laser ad Eccimeri - Tecnica LASIK

Il trattamento con il laser ad eccimeri (nell'UV) in questo caso non avviene sulla superficie della cornea, ma all'interno di essa. Perché ciò sia possibile è necessario praticare, prima del trattamento con il laser a eccimeri, una sottile incisione a lamella: a ciò provvede uno strumento meccanico, il microcheratomo.

Si può paragonare questo intervento chirurgico alla apertura di un libro (azione di creazione della lamella corneale, o flap, da parte del microcheratomo), alla estrazione di alcuni fogli sottostanti alla copertina (azione del laser), e alla chiusura del libro (riposizionamento della lamella). In rari casi può rendersi necessario apporre alcuni punti di sutura temporanei.

Talvolta il taglio lamellare può essere ritenuto dal chirurgo qualitativamente non adeguato; in questo caso è universalmente ritenuto più opportuno riapporre la lamella e differire l'intervento di un tempo variabile a giudizio del chirurgo.



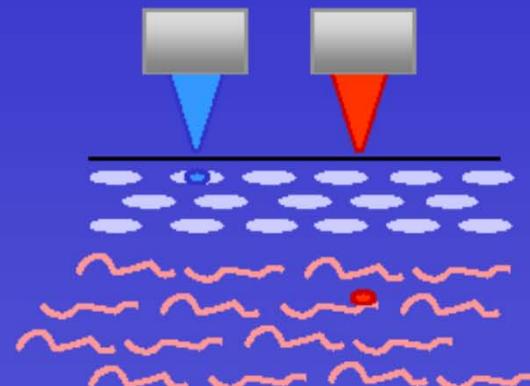
Il laser in medicina

Può essere concentrato molto precisamente per colpire solo le zone d'interesse.

Trasmette calore alle cellule da cui la radiazione viene assorbita. Ad alta energia le vaporizza, e taglia i tessuti o distrugge le cellule. A bassa energia le fa coagulare.

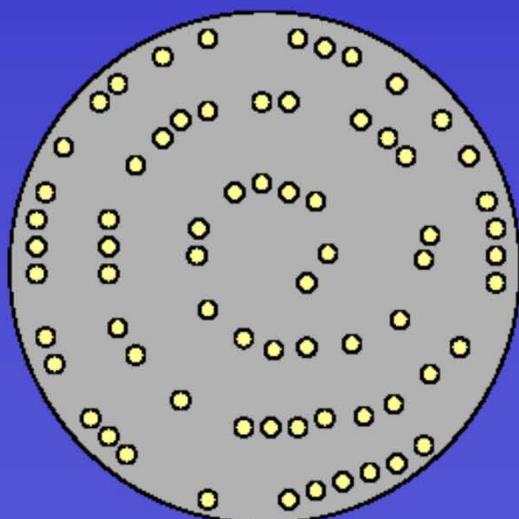
Può essere trasportato con fibre ottiche e raggiungere zone interne senza tagliare i tessuti sovrastanti.

La radiazione laser agisce solo sul tipo di cellula che assorbe quella determinata lunghezza d'onda.



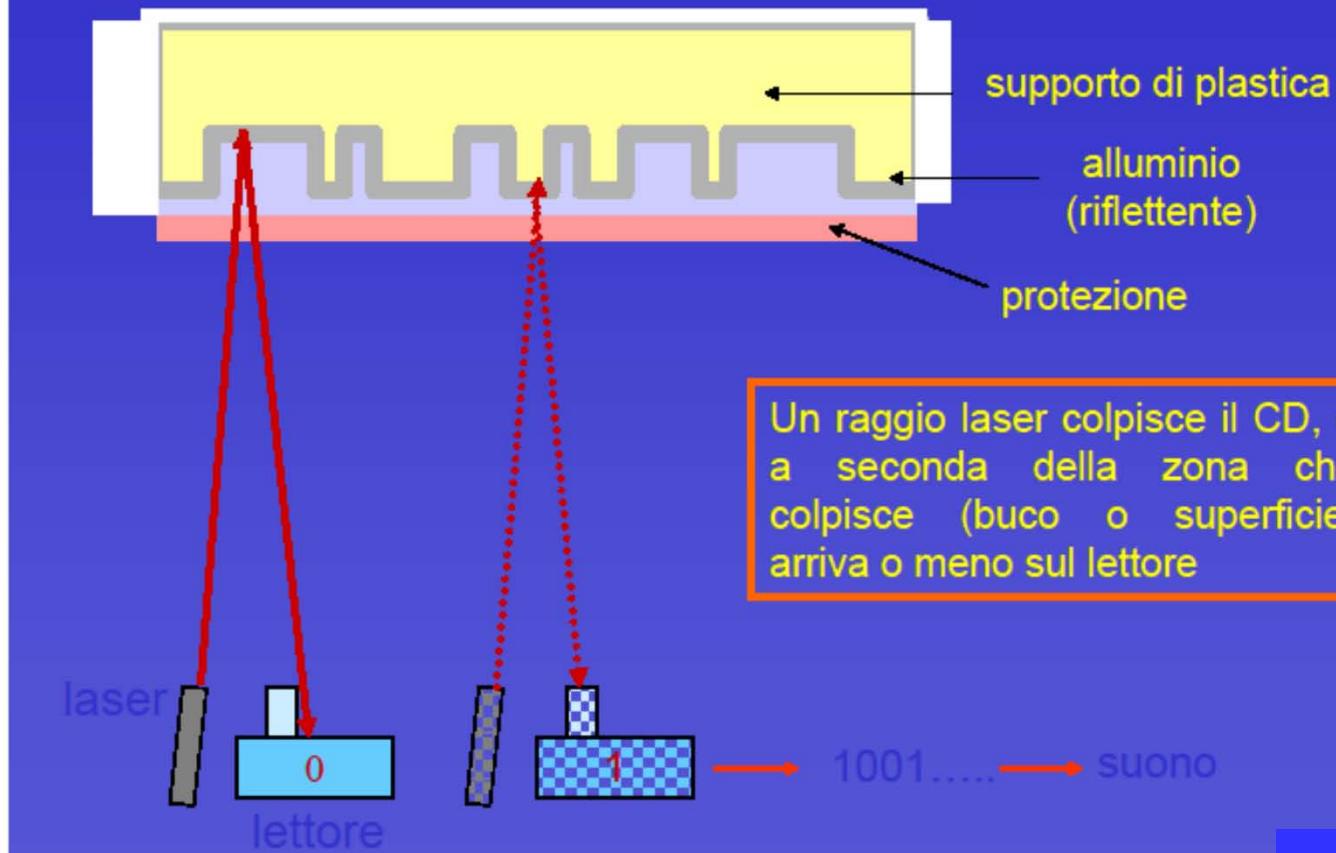
Compact Disc e DVD

Un Compact Disc è formato da un materiale in cui, con un laser, vengono scavati dei minuscoli fori, disposti a spirale, che vengono poi ricoperti di un materiale riflettente.

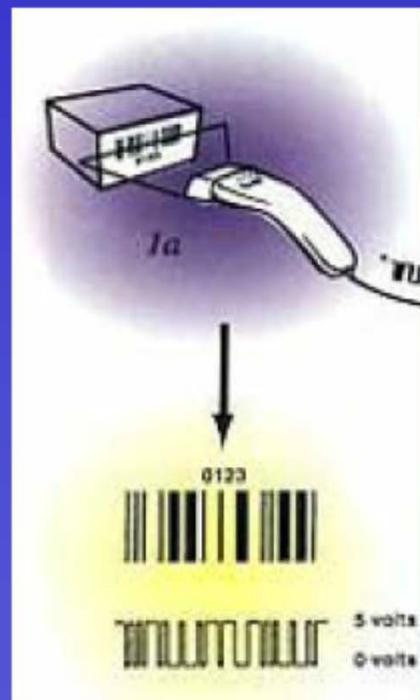


Si usa il laser perché può essere concentrato su dimensioni molto piccole (meno di un millesimo di millimetro), raggiungendo così energie molto elevate ed in grado di "bucare" il materiale

Compact Disc e DVD



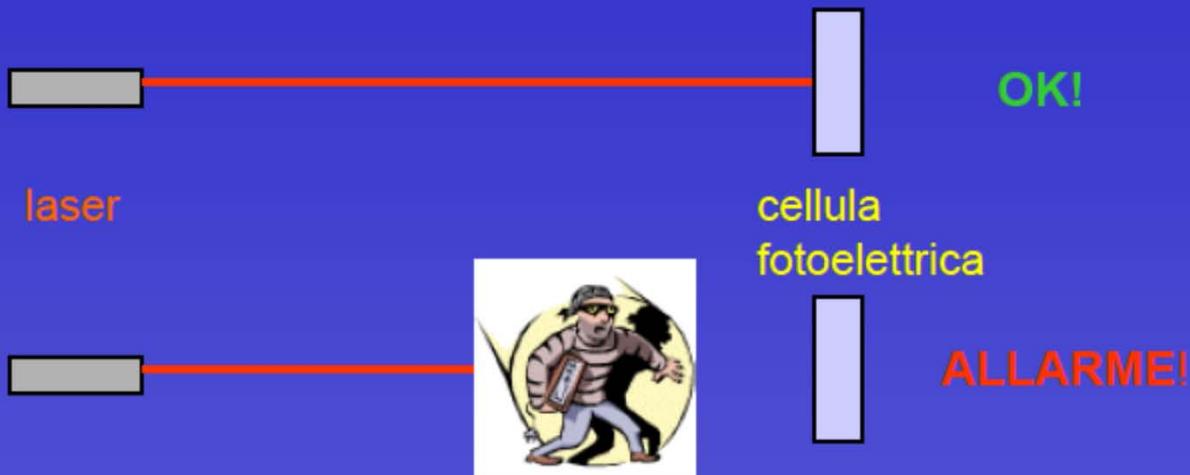
Lettori di codici a barre



Funziona come il CD, solo che qui le parti non riflettenti e quelle riflettenti sono costituite dalle strisce nere e dallo sfondo bianco.

La sequenza di 1 e 0 corrisponde alle caratteristiche e al prezzo del prodotto.

Cellule fotoelettriche



La cellula fotoelettrica rivela il fascio laser. Se il fascio viene interrotto da un intruso, scatta l'allarme

Misurare le distanze con il laser

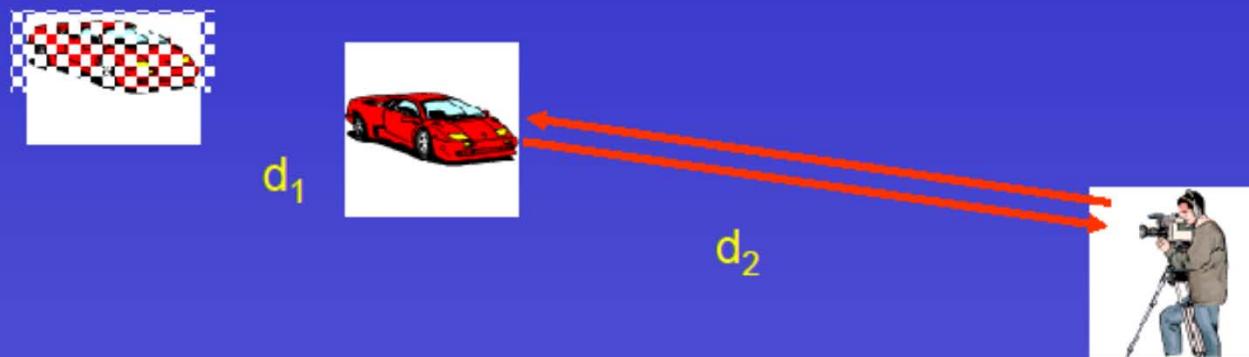
Un raggio laser viene inviato verso il bersaglio, da cui viene riflesso e rimandato indietro.



Misurando il tempo necessario a compiere il tragitto e conoscendo la velocità della luce, si calcola la distanza dell'oggetto.

Misurare le distanze con il laser

L'autovelox misura la distanza di una macchina che si sta avvicinando in due istanti successivi

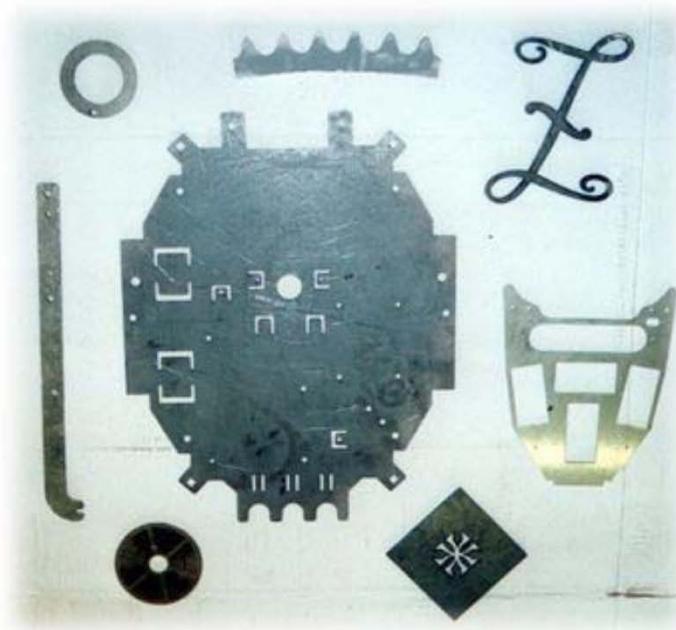


Se la distanza percorsa fra i due istanti è troppo elevata, cioè se la macchina sta andando troppo veloce, viene fatta una multa.rilevato l'eccesso di velocità.

Taglio Laser:



MACCHINA LASER CO₂ DA 2000 W



PARTICOLARI TAGLIATI CON LA MACCHINA LASER

RISCHIO LASER

Confronto tra il sole e un laser:

SOLE:

intensità massima luce solare a terra = 1 kW/m^2 or 1 mW/mm^2

Assumendo un diametro pupillare di 2 mm l'area è circa 3 mm^2

Quindi la potenza raccolta dall'occhio è = 3 mW

Il sole forma un'immagine $\approx 100 \mu\text{m}$ di raggio sulla retina (area = 0.03 mm^2)

L'intensità sulla retina (Potenza/Area) = $3 \text{ mW}/0.03 \text{ mm}^2 = 100 \text{ mW/mm}^2$.

Tipico laser He Ne da 1 mW (o laser pointer):

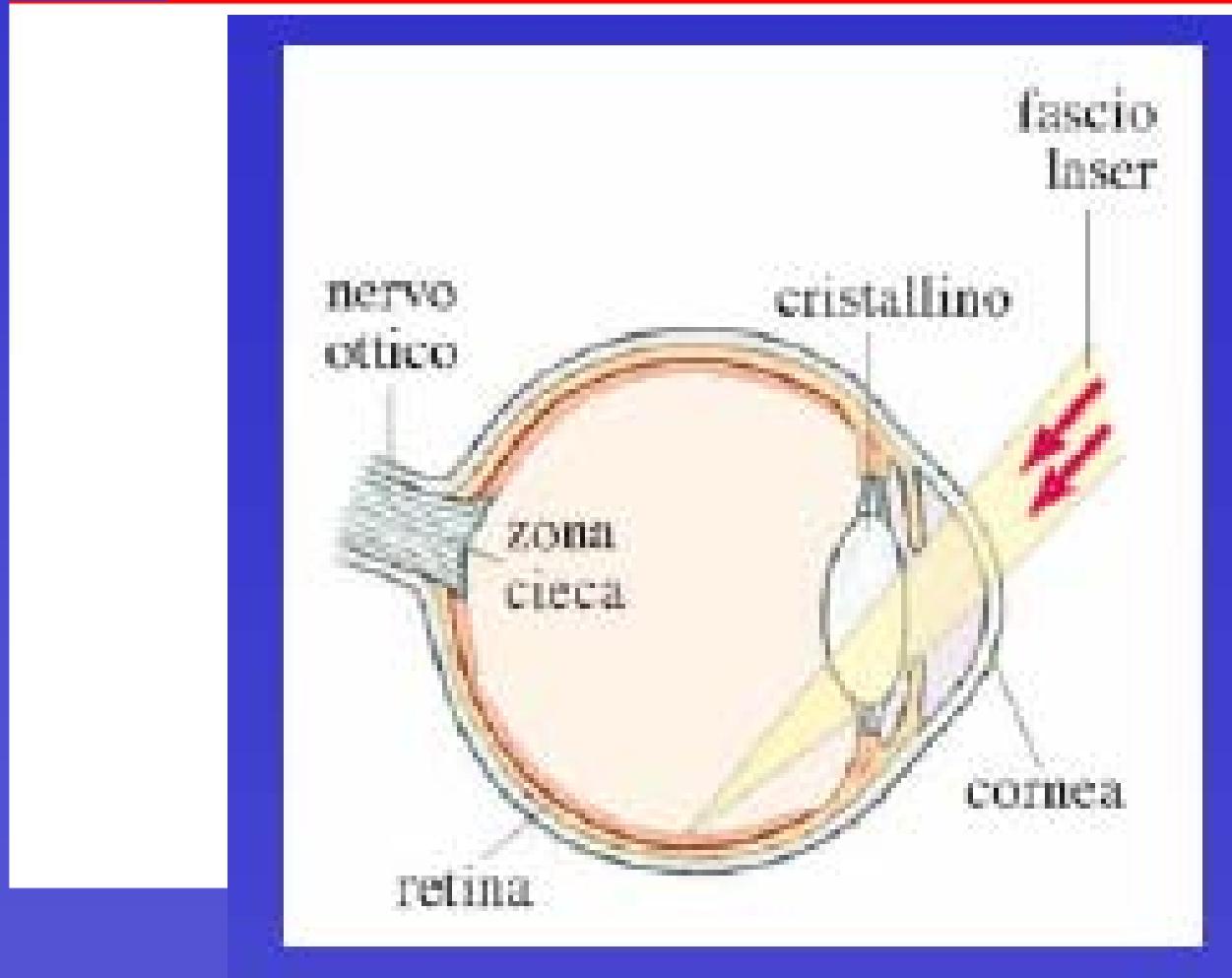
Potenza (P) = 1 mW, raggio del fascio = 1 mm

forma un'immagine con raggio di $10 \mu\text{m}$ (area dello spot = $3 \cdot 10^{-4} \text{ mm}^2$)

L'intensità dell'HeNe sulla retina è $1 \text{ mW}/(3 \cdot 10^{-4} \text{ mm}^2) = 3100 \text{ mW/mm}^2$

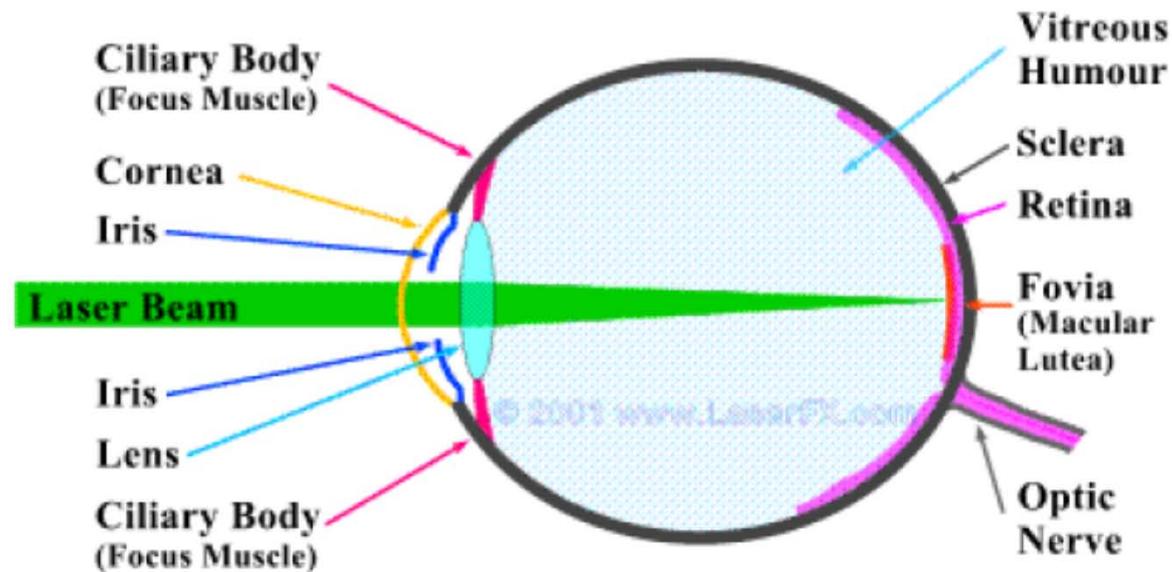
31 volte l'intensità del sole!!

L'occhio umano:



Meccanismi di danno 1:

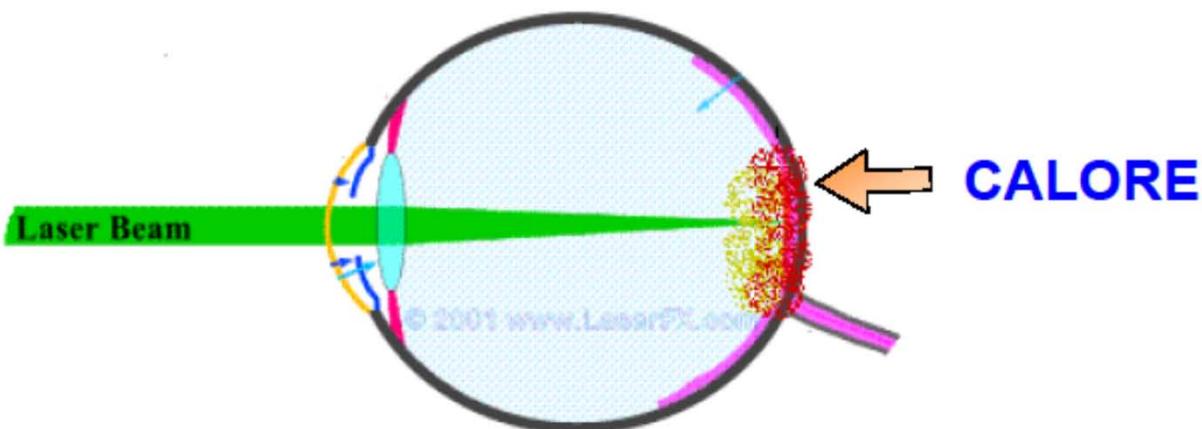
Simplified Cross Section of the Human Eye



Laser beams are almost parallel thus the eye's lens will focus them down to a small spot causing retinal burns.

Meccanismi di danno 2:

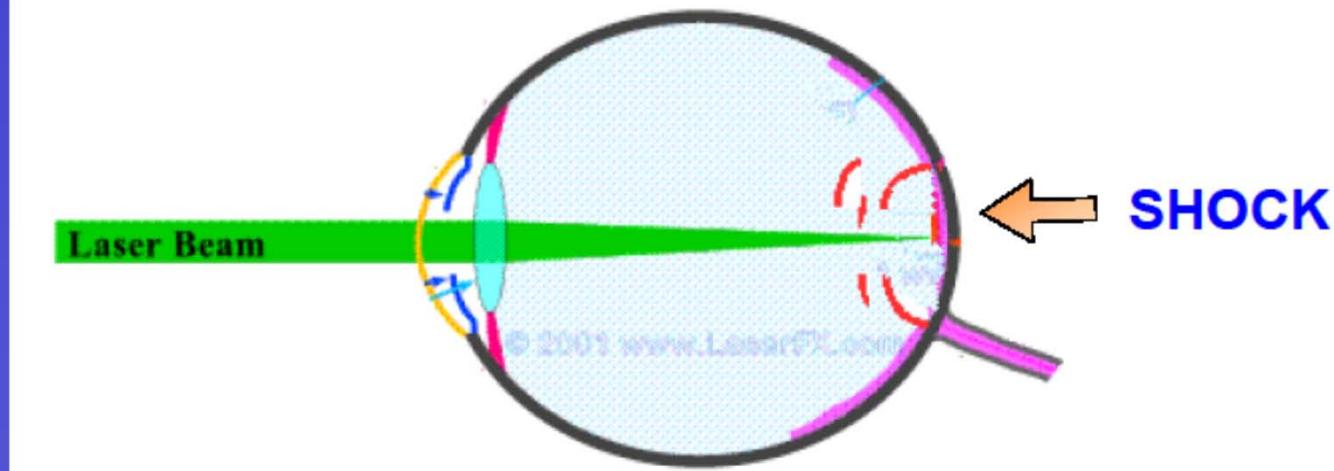
Effetto Fototermico: parte della radiazione incidente è assorbita dai tessuti. La temperatura aumenta ad un livello tale da provocare un danno. Bruciature della retina da laser



Effetto Fotochimico: impulsi lunghi che non provocano un aumento di temperatura. Dipende dall'energia totale piuttosto che dalla potenza (come l'effetto fototermico)

Meccanismi di danno 3:

Effetto Fotoacustico (o da onda d'urto): Impulsi laser brevi e di alta energia. Una dose significativa di energia è assorbita in tempi brevi rispetto alla diffusione termica. Ablazione e rapida espansione del materiale, esplosione e onda d'urto, danno esteso alla retina. Effetti proporzionali all'energia dell'impulso.



Vista prima del danno:

Visione telecamera

CONSIGNES D'UTILISATION DES LUNETTES

- Utiliser exclusivement des lunettes :
- conformes aux exigences des normes EN 207 (utilisation) ou EN 208 (maintenance),
- adaptées au laser mis en œuvre,
- en bon état.
- Lire la notice d'utilisation fournie par le fabricant.
- Ne jamais regarder volontairement le faisceau laser direct ou une de ses réflexions, même avec un protecteur oculaire.
- Nettoyer régulièrement les lunettes.
- Remettre, après utilisation, les lunettes de protection dans leurs étuis.
- Ranger les étuis hors de la zone laser.
- Eliminer toute paire de lunettes défectueuse (filtres rayés ou endommagés).
- Prévoir des lunettes supplémentaires pour les visiteurs.

Visione dell'occhio

CONSIGNES D'UTILISATION DES LUNETTES

- Utiliser exclusivement des lunettes :
- conformes aux exigences des normes EN 207 (utilisation) ou EN 208 (maintenance),
- adaptées au laser mis en œuvre,
- en bon état.
- Lire la notice d'utilisation fournie par le fabricant.
- Ne jamais regarder volontairement le faisceau laser direct ou une de ses réflexions, même avec un protecteur oculaire.
- Nettoyer régulièrement les lunettes.
- Remettre, après utilisation, les lunettes de protection dans leurs étuis.
- Ranger les étuis hors de la zone laser.
- Eliminer toute paire de lunettes défectueuse (filtres rayés ou endommagés).
- Prévoir des lunettes supplémentaires pour les visiteurs.

Effetti del danno:

Visione telecamera

CONSIGNES D'UTILISATION DES LUNETTES

- Utiliser exclusivement des lunettes :
- conformes aux exigences des normes EN 207 (utilisation) ou EN 208 (maintenance),
- adaptées au laser mis en œuvre,
- en bon état.
- Lire la notice d'utilisation fournie par le fabricant.
- Ne jamais regarder vers le faisceau laser direct ou une de ses réflexions, même avec un protecteur oculaire.
- Nettoyer régulièrement les lunettes.
- Remettre, après utilisation, les lunettes de protection dans leurs étuis.
- Ranger les étuis hors de la zone laser.
- Eliminer toute paire de lunettes défectueuse (filtres rayés ou endommagés).
- Prévoir des lunettes supplémentaires pour les visiteurs.

Visione dell'occhio

CONSIGNES D'UTILISATION DES LUNETTES

- Utiliser exclusivement des lunettes :
- conformes aux exigences des normes EN 207 (utilisation) ou EN 208 (maintenance),
- adaptées au laser mis en œuvre,
- en bon état.
- Lire la notice d'utilisation fournie par le fabricant.
- Ne jamais regarder vers le faisceau laser direct ou une de ses réflexions, même avec un protecteur oculaire.
- Nettoyer régulièrement les lunettes.
- Remettre, après utilisation, les lunettes de protection dans leurs étuis.
- Ranger les étuis hors de la zone laser.
- Eliminer toute paire de lunettes défectueuse (filtres rayés ou endommagés).
- Prévoir des lunettes supplémentaires pour les visiteurs.

Trasparenza dell'occhio:

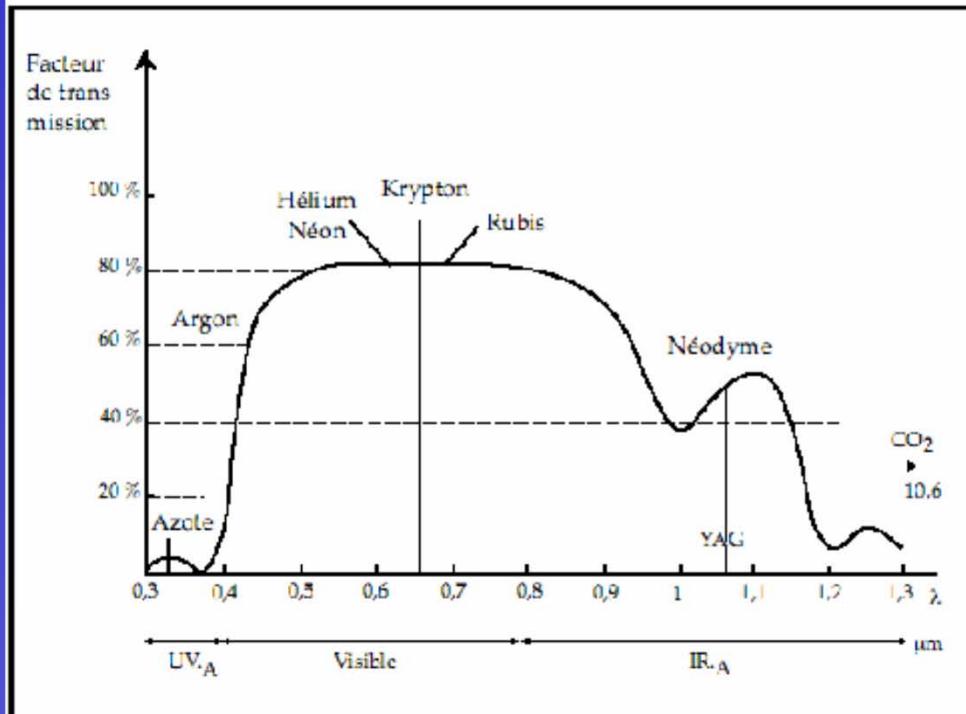
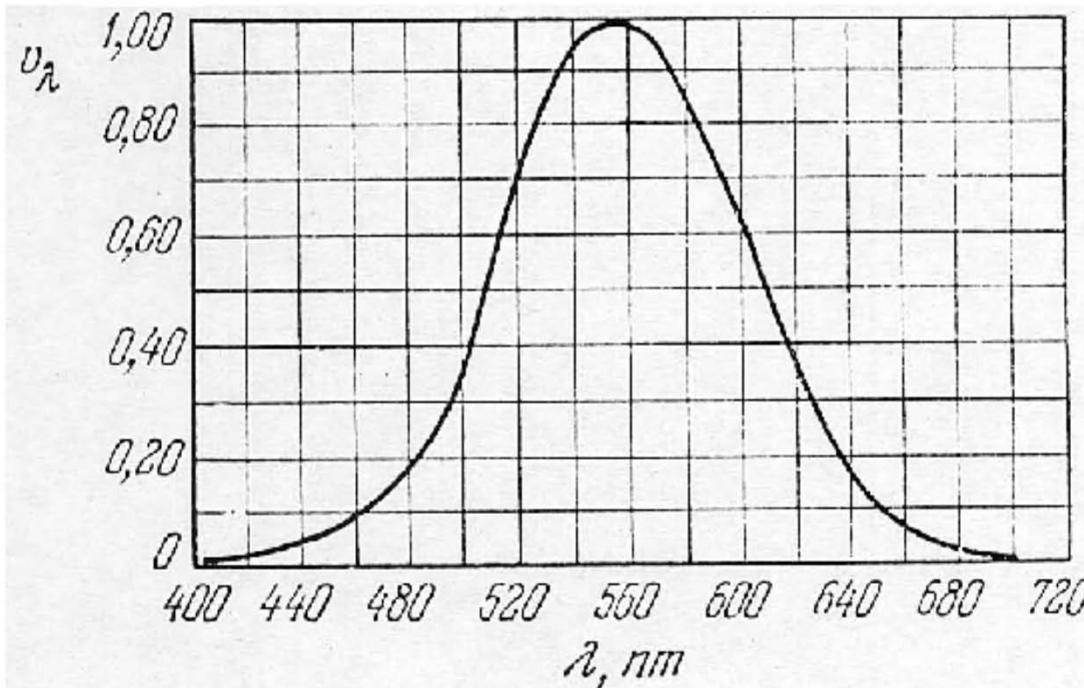


Figure 23 : Transmission des rayonnements par les milieux optiques de l'œil

**Laser visibili e IR
Danni alla retina**

**Laser UV:
Danni alla cornea**

Curva di visibilità dell'occhio umano



$\lambda_{\max} = 555 \text{ nm}$
(verde)

Attenzione ai laser ai limiti della curva
che **sembrano** poco intensi!!

Sicurezza nell'irraggiamento laser:

LIMITI

ESPOSIZIONE MASSIMA PERMESSA (EMP o MPE):

Il livello di radiazione al quale, in circostanze normali, una persona può essere esposta senza subire alcun effetto

LIMITE D'EMISSIONE ACCESSIBILE (LEA o AEL):

Il livello di radiazione massimo permesso in particolari in circostanze

DISTANZA E ZONA NOMINALE DI RISCHIO OCULARE (ZNR):

zona all'interno della quale il livello della radiazione è superiore all'EMP applicabile; all'interno di questa zona si possono avere danni oculari.

Classificazione dei laser:

CLASSE 1: intrinsecamente sicuri: l'EMP non può essere MAI superata (potenza bassa o laser interamente CHIUSO in un contenitore con interlock). $P < 0.4 \mu\text{W}$ nel visibile

CLASSE 2: radiazione visibile con potenza $< 1\text{mW}$. Normalmente il riflesso di chiusura delle palpebre (0.25 s) è sufficiente per la protezione dell'occhio

CLASSE 3A: radiazione visibile CW con potenza $< 5\text{mW}$ e intensità $< 2.6 \text{mW/cm}^2$ (non più di 1 mW passi attraverso un'apertura di 7 mm di diametro). Pericolosi se visti tramite strumenti ottici.

CLASSE 3B: radiazione visibile o invisibile, CW o impulsata. La visione diretta o tramite riflessione speculare è SEMPRE pericolosa ma in certe circostanze possono essere visti tramite riflessione diffusa

CLASSE 4: laser di potenza. Danni da riflessioni diffuse. Danni alla pelle. Pericolosi di incendio

“Altri” rischi dei laser:

PERICOLO	classe dei laser				
	1	2	3A	3B	4
Occhio: i) irraggiamento diretto ii) riflessioni speculari iii) riflessioni diffuse		1*	*	*	*
Pelle : i) Lesioni ii) Rischio cancerogeno		1*	*	*	*
Incendio					*
Rischio Elettrico	Per laser alimentati ad alta tensione quando vengono aperti				
Rischio Chimico	Laser a coloranti (DYE) Laser a gas (KrF, XeCl, ...) Gas da interazione laser bersaglio				

1* solo se il laser viene guardato volontariamente per più di 0.25 s

PROBLEMI SUI LASER

1. *Chirurgia laser dell'occhio.* Un impulso di luce viene diretto verso un'areola della retina e la "salda" al substrato. A questo scopo si usa di solito un laser a neodimio. La durata di un impulso tipico è 1 ns e l'energia totale dell'impulso è di circa 1 mJ. Se la saldatura deve riguardare un'areola circolare di 25 μm di diametro, quanto vale la potenza per unità di superficie impartita all'areola?
2. Descrivere brevemente i processi fisici fondamentali che stanno alla base dell'azione laser.
3. Descrivere brevemente il principio di funzionamento di un laser a 3 livelli.
4. Un laser al titanio-zaffiro, con modi vincolati in fase, ha una lunghezza d'onda di 850 nm e produce 100 milioni di impulsi di luce al secondo. Ogni impulso ha una durata di 125 femtosecondi ($1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$) ed è costituito da 5×10^9 fotoni. Quanto vale la potenza media prodotta dal laser?
5. Descrivere l'azione di un laser a 4 livelli e spiegare perché è richiesta una potenza minore rispetto ad un laser a 3 livelli per produrre inversione di popolazione.