



CORSO DI FORMAZIONE PER TECNICO SICUREZZA LASER (TSL) E ADDETTO SICUREZZA LASER (ASL)

Relatore: Luisa Biazzi

2023

Parte 3

luisa.biazzi@unipv.it

Corso di Formazione su
**TECNICO SICUREZZA LASER (TSL) E
ADDETTO SICUREZZA LASER (ASL)**
VALUTAZIONE DEL RISCHIO E MISURE DI PREVENZIONE E PROTEZIONE

IL LASER
**APPLICAZIONI E MISURE DI
PREVENZIONE E PROTEZIONE**

- Sorgenti, tipi di laser, applicazioni
- Effetti biologici e rischi
- Lavoro in sicurezza

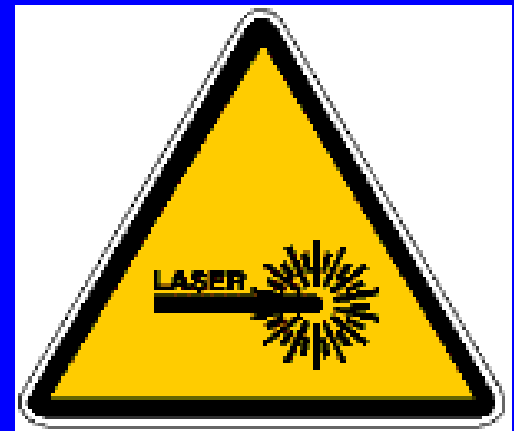
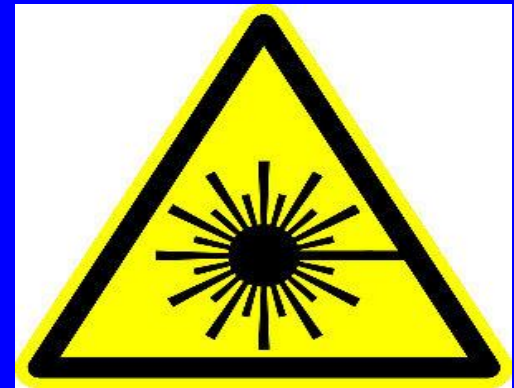
Luisa Biazzi
luisa.biazzi@unipv.it

Università degli Studi di Pavia – Fisica medica

L.A.S.E.R.

sorgente di luce coerente

- **Light**
- **Amplification**
- **by**
- **Stimulated**
- **Emission**
- **of**
- **Radiation**



LASER :

“Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation”

sorgente di luce coerente

Definizione:

- Ogni dispositivo che produce o amplifica una radiazione elettromagnetica coerente compresa nell'intervallo λ : 180 nm – 1×10^6 nm (1 mm) con il fenomeno dell'emissione stimolata (norma CEI EN 60825-1 par.3,40)

LASER

- Il laser è un generatore di radiazione elettromagnetica basato sul processo di emissione stimolata di radiazione da parte di un sistema di atomi eccitati che operano transizioni da uno stato quantico a un altro stato quantico di energia inferiore.
- E' costituito da un “mezzo attivo” che è cioè capace di amplificare la radiazione che lo attraversa a cui un sistema esterno di “pompaggio” fornisce energia

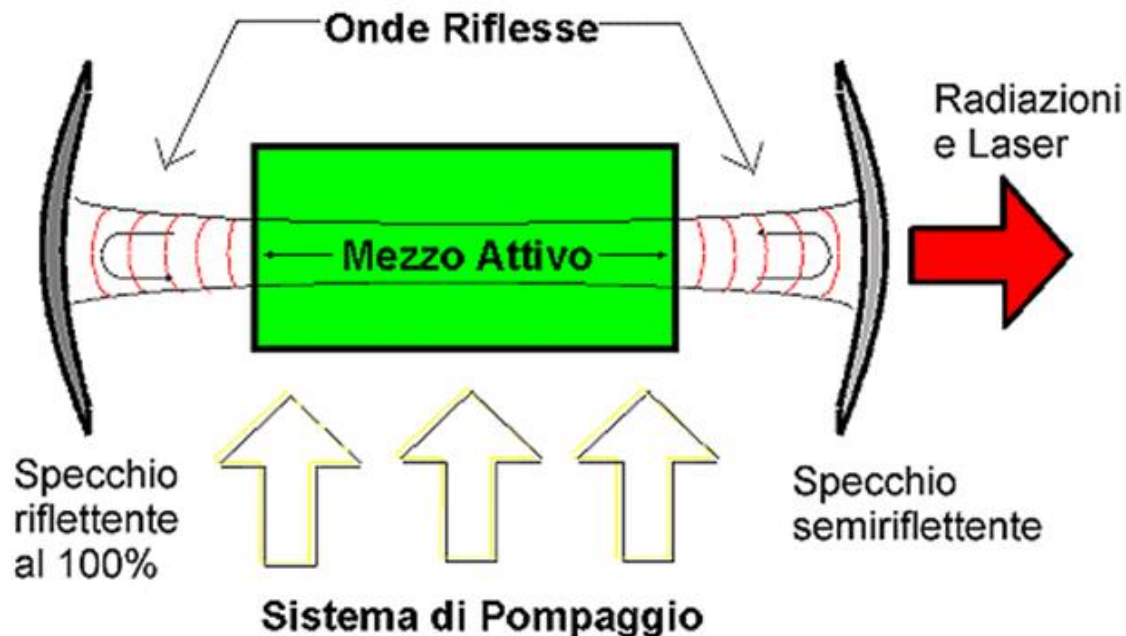
- Un laser è costituito da un cilindro allungato in materiale attivo in grado di amplificare la radiazione che lo attraversa, inserito tra una coppia di specchi contrapposti formanti una cavità risonante che rinviano continuamente la radiazione attraverso il materiale stesso.
- Uno dei 2 specchi è parzialmente trasparente per consentire l'estrazione del fascio e, se l'amplificazione del mezzo attivo è sufficiente a compensare le perdite di intensità del fascio dovute alla trasmissione parziale dello specchio, si genera all'interno e all'esterno un fascio coerente.
- Un sistema di pompaggio (pompa) fornisce energia per l'inversione della popolazione (scarica elettrica, flash lamp, ecc)

STRUTTURA DI UN LASER

Un laser è costituito da un cilindro allungato di materiale o mezzo attivo, in grado cioè di amplificare la radiazione che lo attraversa.

Per ottenere tale amplificazione è necessario fornire (“pompare”) energia attraverso un sistema esterno di pompaggio:

- elettrico con scarica elettrica (laser a gas) o corrente per laser a semiconduttore
- ottico con sorgente di luce:
 - in regime continuo: lampada Tg/Kr/vapori Hg;
 - in regime impulsato: lampada flash



Condizioni per la produzione di radiazione laser

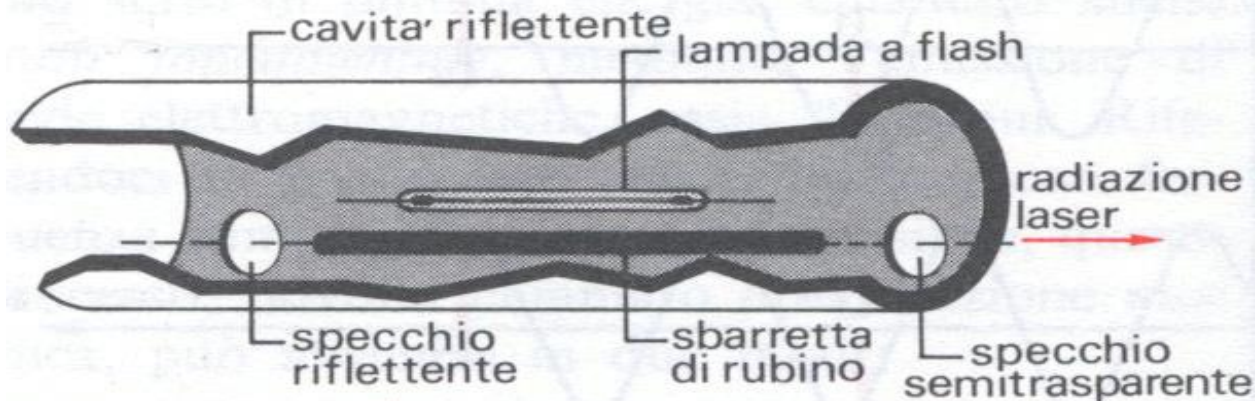
Per ottenere la produzione di una radiazione laser si devono verificare tre condizioni:

per ottenere atomi eccitati è necessario fornire energia in modo che l'emissione stimolata non si esaurisca una volta che tutti gli atomi si sono diseccitati (*sistema di pompaggio*)

lo stato eccitato del sistema deve essere uno stato metastabile ($\tau_m \approx 10^{-3} \text{s}$), cioè la sua vita media deve essere lunga rispetto all'usuale breve tempo degli stati eccitati ($\tau_e \approx 10^{-8} \text{s}$), in modo che l'emissione stimolata abbia più probabilità di verificarsi prima di quella spontanea

il fotone emesso deve essere confinato nel sistema abbastanza a lungo in modo da permettere un'ulteriore emissione stimolata da parte di altri atomi eccitati (*coppia di specchi contrapposti che forma un risonatore ottico*)

DISPOSITIVO LASER



- Ecco un dispositivo laser, per esempio un **laser a rubino**, che rappresenta il primo laser a stato solido: è essenzialmente formato da una **cavità speculare** nel cui interno sono inserite una lampada a flash e una sbarretta di rubino.
- La sorgente, detta **lampada di pompaggio**, serve per innescare mediante un lampo di luce molto intenso l'eccitazione iniziale.
- Il **cristallo di rubino**, opportunamente dimensionato, rappresenta il **materiale otticamente attivo**, ossia il mezzo da eccitare; esso è delimitato da due specchi paralleli, uno perfettamente **riflettente**, l'altro **semitrasparente** per consentire la parziale emissione della radiazione coerente che si forma nella cavità.

CLASSIFICAZIONE DELLE SORGENTI

- La grande varietà di lunghezze d'onda, energie e caratteristiche d'impulso dei laser e di sistemi che includono laser e delle applicazioni e dei modi di impiego di tali sistemi rendono indispensabile, ai fini della sicurezza, il raggruppamento dei laser in categorie o classi di rischio.
- Risultata utile l'introduzione di un parametro chiamato **Limite di Emissione Accettabile** (LEA) che descrive i livelli di radiazione emergente da un sistema laser la cui valutazione permette di collocare un laser nell'opportuna categoria di rischio.
- La determinazione del LEA deve essere effettuata nelle condizioni più sfavorevoli ai fini della sicurezza.

CARATTERISTICHE DELLA RADIAZIONE LASER

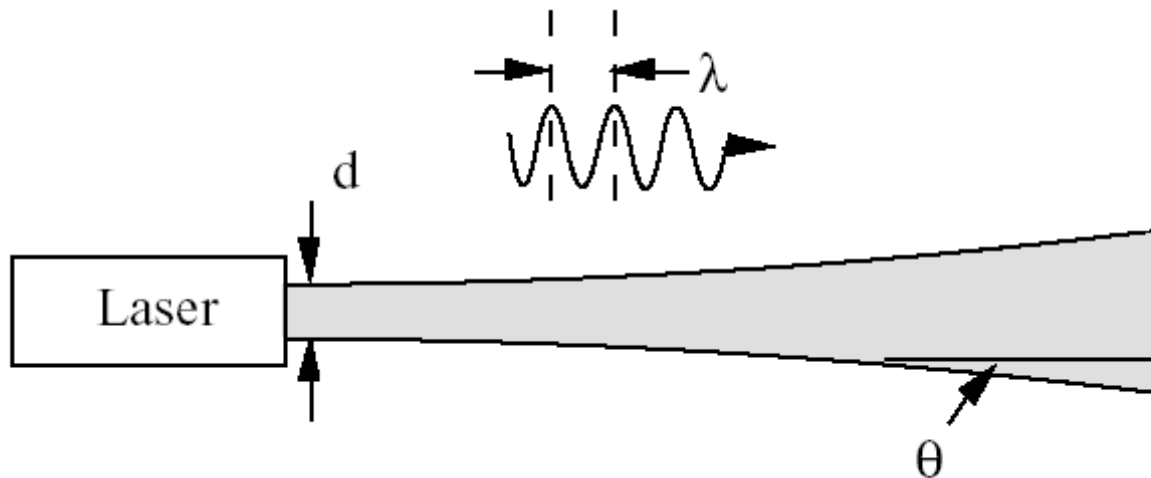
Monocromaticità: i fotoni sono emessi con la stessa λ o ν ; ciò permette di trasportare info nelle fibre ottiche e a grandi distanze

Unidirezionalità: il fascio di luce laser diverge molto poco e si muove in linea retta; si può quindi direzionarlo con elevata precisione (piccolo angolo solido sotteso dal laser)

Coerenza (spaziale e temporale): le onde e.m. viaggiano in fase nella stessa direzione e la fase si mantiene nel tempo e nello spazio; ciò permette alta efficienza nel processo di amplificazione: strumenti per misure di distanze, spostamenti (nm) e velocità molto piccoli

Brillanza=luminosità: concentrazione di elevata potenza (watt o J/s) emessa per unità di superficie e unità di angolo solido (analogo alla radianza W/m^2sr per Rad. ott. incoerenti): alto N° fotoni per unità di frequenza conseguenza della monocromaticità e direzionalità. Impieghi conseguenti: taglio, saldatura di metalli. E' legata al rischio oculare.

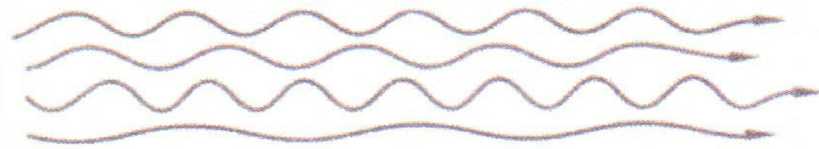
Direzionalità e Divergenza



$\theta \approx \lambda/d$ divergenza in campo lontano

SORGENTI COERENTI E SORGENTI INCOERENTI

1. Incoherent



Different wavelengths (colours)

La **SORGENTE INCOERENTE** emette in tutte le direzioni e la quantità di luce raccolta dipende dall'area sensibile del rivelatore

2. Coherent and monochromatic



Laser

La **SORGENTE COERENTE (LASER)** emette luce direzionata e il rivelatore può raccogliere tutta la luce emessa



Same wavelength (monochromatic)
Light waves in phase (coherent)



Le sorgenti **COERENTI** emettono radiazioni in fase fra di loro (i minimi e i massimi delle radiazioni coincidono), e sono generate da LASER, mentre le sorgenti **INCOERENTI** emettono radiazioni sfasate e sono generate da tutte le altre sorgenti non LASER (sorgenti R.O. «artificiali» - ROA) e dal Sole (sorgenti R.O. «naturali»).

REGIONI SPETTRALI E LASER: definite dal CIE

(Commission International de l'Eclairage)

UV **100nm - 400 nm**

- **UV-C** **100 nm - 280 nm**
- **UV-B** **280 nm - 315 nm**
- **UV-A** **315 nm - 400 nm**

VISIBILE **400 nm - 780 nm**

IR **780 nm – 1 mm**

- **IR-A** **780 nm - 1400 nm**
- **IR-B** **1400 nm - 3000 nm**
- **IR-C** **3000 nm - 1.000.000 nm (1 mm)**

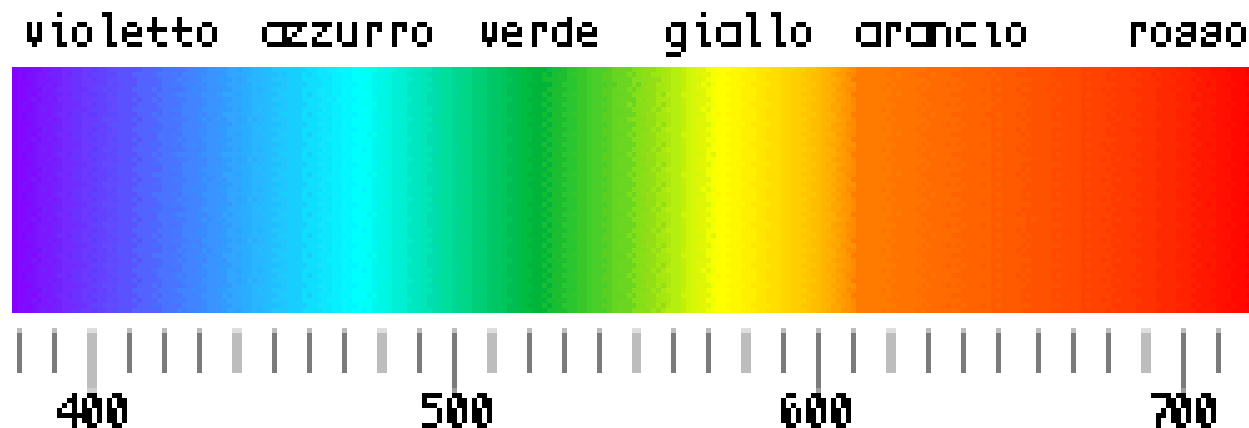
- LASER: $180 \text{ nm} \leq \lambda \leq 1 \text{ mm}$
- LASER a luce visibile $400 \text{ nm (violetto)} < \lambda < 760 \text{ nm (rosso)}$
- I laser a luce invisibile sono i più pericolosi

LUCE VISIBILE

La lunghezza d'onda della radiazione nel campo del visibile è compresa tra :

$$400 \text{ (380) nm} < \lambda < 780 \text{ nm (700)}$$

Nelle norme di sicurezza laser il limite superiore dell'intervallo del visibile è posto a **700 nm invece di 780 nm**, perché nella regione con λ compresa tra: $700 \text{ nm} < \lambda < 780 \text{ nm}$ la sensibilità visiva dell'occhio è molto bassa, impedendo l'attuarsi della reazione di difesa (es. chiusura delle palpebre) come per la radiazione invisibile.



SUDDIVISIONE DELLA RADIAZIONE OTTICA

CRITERIO FISICO	CRITERIO FOTOBIOLOGICO
Ultravioletto estremo $10 \text{ nm} \div 180 \text{ nm}$	UV – C $100 \text{ nm} \div 280 \text{ nm}$
Ultravioletto intermedio $180 \text{ nm} \div 300 \text{ nm}$	UV – B $280 \text{ nm} \div 315 \text{ nm}$
Ultravioletto vicino $300 \text{ nm} \div 400 \text{ nm}$	UV – A $315 \text{ nm} \div 400 \text{ nm}$
Luce $400 \text{ nm} \div 700 \text{ nm}$	Luce $380 \text{ nm} \div 780 \text{ nm}$
Infrarosso vicino $700 \text{ nm} \div 1200 \text{ nm}$	IR – A $780 \text{ nm} \div 1400 \text{ nm}$
Infrarosso intermedio $1,2 \text{ } \mu\text{m} \div 7 \text{ } \mu\text{m}$	IR – B $1400 \text{ nm} \div 3000 \text{ nm}$
Infrarosso lontano $7 \text{ } \mu\text{m} \div 1 \text{ mm}$	IR – C $3000 \text{ nm} \div 1 \text{ mm}$

SORGENTI LASER

APPLICAZIONI MEDICHE

Applicazioni mediche e mediche per uso estetico

Applicazioni per uso estetico (depilazione)

APPLICAZIONI INDUSTRIALI E CIVILI

Telecomunicazioni

Informatica

Lavorazione di materiali: taglio, saldatura, incisione, marcatura, foratura, abrasione

Metrologia e misure

Beni di consumo (lettori CD e "bar-code",...)

Intrattenimento (laser per discoteche, concerti,...)

APPLICAZIONI VARIE E DI RICERCA

Restauro e pulitura di opere d'arte (spessore qualche μm)

Spettrometria Generazione Plasmi

TIPI DI LASER

- I diversi tipi di laser si distinguono in base allo stato di aggregazione del materiale o mezzo attivo che determina principalmente la λ e da questa dipendono gli effetti sui tessuti.

I mezzi attivi più diffusi sono:

- a semiconduttore (a diodi)
- a gas: laser ad atomi neutri, laser ionici, laser molecolari, laser eccimeri
- laser a liquidi
- laser a stato solido
- a fibra ottica

I più comuni mezzi attivi per i laser sono:

CO₂

Nd:YAG

Er:YAG

Ho:YAG

Argon

Diodo

Eccimeri

Fibra ottica

LASER A SEMICONDUCTORE (laser a diodi)

Mezzo attivo: un sottile strato di semiconduttore in cui la radiazione è dovuta alla stimolazione a seguito della ricombinazione degli elettroni .

Sistema di pompaggio: applicazione di un impulso di corrente alla giunzione dei semiconduttori.

Laser a diodi

LASER A FIBRA OTTICA

Mezzo attivo: la fibra ottica stessa drogata

Sistema di pompaggio: diodi a bassa potenza

LASER A GAS

Mezzo attivo: una miscela di gas

Sistema di pompaggio: scarica elettrica eccita la miscela

I laser a gas, secondo il mezzo attivo, si distinguono in

- **ATOMICI NEUTRI:** He-Ne ($\lambda=632.8$ nm)
- **IONICI** (scarica intensa): Ar (varie λ in VS e UV)
- **MOLECOLARI** (scarica elettrica o ottica): CO₂ ($\lambda=10600$ nm)
- **ECCIMERI** (molecole instabili che si formano durante la scarica di eccitazione): Xe-Cl ($\lambda=308$ nm)

LASER A STATO LIQUIDO (laser a colorante)

Mezzo attivo: soluzione di acqua, alcool, glicole con coloranti organici (es. cumarine); ora pochi

Sistema di pompaggio: di tipo ottico

Dye Laser

LASER A STATO SOLIDO

Mezzo attivo: cristallo o vetro

Sistema di pompaggio: di tipo ottico (lampada)

Laser più comuni:

-**Nd:YAG** $\lambda = 1064$ nm (mezzo attivo = ioni di neodimio in matrice YAG) (*)

-**Ho:YAG** $\lambda = 2100$ nm (mezzo attivo = ioni di olmio in matrice YAG) (*)

(*) YAG = *Yttrium Aluminum Garnet* = granato di ittrio alluminio

TIPO DI POMPAGGIO

I laser possono essere suddivisi anche in base al tipo di pompaggio ad essi applicato:

- **Laser in continua** ai quali il pompaggio viene applicato in modo costante
- **Laser ad impulsi:** ai quali il pompaggio viene applicato ad impulsi definiti.

I principali laser in campo medicale in funzione del sistema di pompaggio sono:

- **emissione continua** He-Ne
- **emissione pulsata** eccimeri
- **emissione pulsata e continua** Nd:YAG , Ho:YAG , CO₂

MODALITA' DI EMISIONE DELLE SORGENTI

- **Continua** (“cw” emissione costante nel tempo)
- **Pulsata** (“p” emissione variabile nel tempo):
max energia in minimo tempo; a parità di energia:
 - con tempi brevi si ha veloce vaporizzazione di piccoli volumi
 - con tempi superiori si ha riscaldamento locale senza evaporazione

Pulsata a impulsi ultracorti (mode locking $t \sim 10^{-9}\text{s}$)

Pulsata a impulsi giganti (Q-switched $10^{-9} \leq t \leq 10^{-7}\text{s}$)

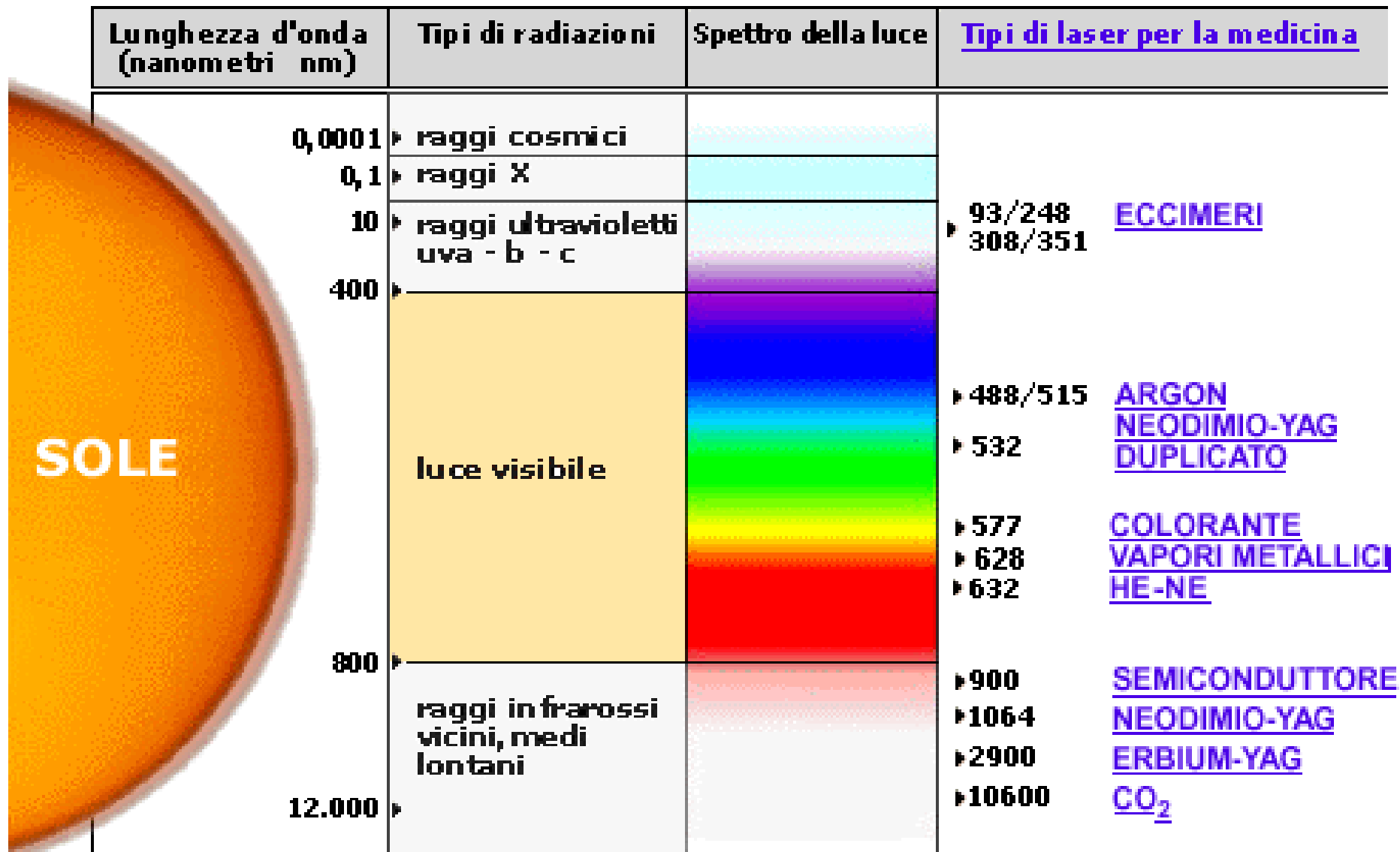
- **Potenze impiegate per emissione:**
 - continua: da qualche watt a qualche decina di watt
 - pulsata: da qualche mJ a qualche decina di mJ

Laser (λ- Banda spettrale)	Applicazioni sanitarie	Tipo	Regime cw = continuo p = pulsato
CO ₂ (10600nm, IR)	ORL, ch. plastica, dermatologia (<i>skin resurfacing</i>), urologia, odontoiatria, ch. cardiovascolare (<i>rivascolarizzazione</i>), neurochirurgia, ginecologia, fisioterapia	gas	CW
Nd:YAG (1064nm-IR)	dermatologia (<i>tatuaggi, epilazione</i>), litotrixxia, oftalmologia (<i>iridotomia x glaucoma</i>), odontoiatria, ch. cardiovascolare (<i>rivascolarizzazione</i>), fisioterapia	solido	P, CW
Er:YAG (2940nm-IR)	dermatologia (<i>skin resurfacing</i>), odontoiatria, ecc	solido	P
Ho:YAG (2127nm-IR)	urologia (<i>ipertrofia prostatica benigna</i>), ecc	solido	P
Diodi (IR)	dermatologia (<i>epilazione</i>), odontoiatria, fisioterapia, ecc	semicon duttore	P, CW
Diodi (VIS)	oftalmologia (<i>trattamento delle membrane neovascolari nella degenerazione maculare legata all'età</i>), fisioterapia	semicon duttore	P, CW
Nd:YAG 2ω (532nm-VIS)	oftalmologia (<i>trattamento del glaucoma cronico</i>), dermatologia (<i>MAV, tatuaggi</i>), ecc	semicon duttore	P, CW
Argon (514.5nm-VIS)	oftalmologia (<i>trabeculoplastica x glaucoma, retinopatia diabetica</i>), dermatologia, urologia (<i>ca vescica</i>) (ecc	solido	P, CW
Dye laser (VIS)	dermatologia (<i>MAV</i>), oncologia (PDT), ecc	liquido	P, CW
Eccimeri (UV)	oftalmologia (<i>chirurgia refrattiva</i>), ch. cardiovascolare (<i>angioplastica, rimozione elettrocateri</i>), dermatologia (<i>skin resurfacing</i>), ecc	gas	P

CARATTERISTICHE GENERALI DI LASER MEDICALI

Materiale attivo	Lunghezza d'onda (nm)	Regime: continuo o pulsato	Frequenza impulsi	Energia o potenza	Impiego
Eccimeri	da 190 a 350, 248, 308	pulsato	da 1 a 400 Hz	da 100mJ a qualche J	Angioplastica, oftalmologia
Vapori metallici, plasma	511, 578, 628	pulsato	10 kHz	da 5 a 20 W	Dermatologia, chirurgia plastica, fototerapia
Elio-Neon	632	continuo		da 0,1 a 50 mW	Agopuntura, medicina sportiva ed estetica, reumatologia, dermatologia, traumatologia
Argon-Krypton (plasma)	488 - 515 647 - 976	continuo		da 0,1 a 20 W	Dermatologia, pompaggio di laser a coloranti, oftalmologia, fotocoagulazione, chirurgia plastica
Monossido di carbonio CO	5300	continuo		da 1 a 20 W	ORL, ginecologia, dermatologia, odontoiatria
Biossido di carbonio CO ₂	10600	pulsato continuo	10 kHz	100 J fino a 100 W	Terapia cardiovascolare, ORL, dermatologia, ginecologia, chirurgia plastica, odontoiatria
Yag-Erbium	2930	pulsato	qualche Hz	10 J cm ⁻²	Dermatologia, effetti combinati dei laser a CO ₂ e a eccimeri, oftalmologia
Yag radd. con cristallo di Kr	532	pulsato continuo	da 1 a 50 Hz	da 1 a 120 W	Dermatologia
Rubino	694	pulsato	qualche Hz	da 10 a 50 mJ	Dermatologia, distruzione di calcoli renali
Titanio zaffiro	a 700 a 1070	pulsato continuo	da 1 a 50 kHz	qualche mJ 1 W	fototerapia
Diodi laser	850	pulsato continuo	-	qualche W	Oftalmologia, angioplastica
Coloranti	da 320 a 1200 soprattutto 504 e 630	pulsato continuo	-	da qualche W	Fototerapia, dermatologia, fotocoagulazione, fotochemioterapia
Yag-Holmium	2100	pulsato	da 1 a 5 Hz	da 0,5 a 100 J cm ⁻²	-
Yag_Neodimio raddopp. Con cristallo KDP, KTP	1064 532 (radd.in frequenza)	pulsato continuo	da 1 a 50 kHz	da 1 a 60 W	ORL, ginecologia, urologia, neurologia, chirurgia generali, odontoiatria, oftalmologia, dermatologia

Emissioni laser in medicina



TIPI DI LASER IN CAMPO INDUSTRIALE, CIVILE, RICERCA -1

APPLICAZIONI INDUSTRIALI E CIVILI

Telecomunicazioni

Informatica

Lavorazione dei materiali (metalli, plastica, tessuti, vetro, legno, cuoio, pietre):
saldatura, taglio, incisione, marcatura, foratura, abrasione

Metrologia e misure

Beni di consumo (lettori CD e "bar-code",...)

Intrattenimento (laser per discoteche, concerti,...)

Olografia (disegni 3D)

TIPI DI LASER IN CAMPO

INDUSTRIALE, CIVILE, RICERCA -2

1. Lavorazioni di materiali

- Foratura, taglio, saldatura, trattamenti termici, etc.

Es. Taglio: vaporizzazione (l.pulsato Nd:YAG, Ar); fusione (Co₂ cw alta potenza); combustione (Co₂ cw bassa potenza)

2. Misure industriali, civili ed ambientali

- *Settore industriale*: interferometri laser per metrologia, misuratori di diametri di fili, granulometri, rugosimetri sistemi di rilievo di campi di deformazione.
- *Settore civile*: sistemi laser di allineamento livelle laser, telemetri topografici e geodimetri.
- *Settore ambientale*: Lidar e rilevatori di inquinamento.
- *Settore della presentazione*: laser per la visualizzazione di ologrammi, pointer laser per conferenze, sistemi laser per la didattica.
- *Settore giochi di luce*: laser per effetti speciali in discoteche, mostre spettacoli all'aperto e simili.
- *Settore beni durevoli*: lettori al laser di codici a barre, lettori di compact disk, stampanti laser e simili.

3. Telecomunicazioni e fibre ottiche

- Sorgenti laser a semiconduttore per applicazioni, tramite fibra ottica, nella
- trasmissione ed elaborazione ottica di dati.

4. Applicazioni nei laboratori di ricerca

- Ottica non lineare
- Spettroscopia lineare e non lineare
- Interazione radiazione materia
- Restauro e pulitura di opere d'arte (spessore qualche μm)
- Spettrometria
- Plasmi

CARATTERISTICHE GENERALI DI LASER INDUSTRIALI E DA LABORATORIO

Materiale attivo	Lunghezza d'onda (nm)	Regime: continuo o pulsato	Frequenza impulsi	Energia o potenza	Impiego
Azoto	337	100 ns	da 1 a 100 Hz	da 1 mJ a 100 mJ	Fotochimica, ricerca, stampa grafica
Eccimeri (KrF, ArF, XeCl)	da 190 a 350	da 10 a 60 ns	da 1 a 10 kHz	da 1 mJ a 300 mJ	Stampa, fotochimica, spettroscopia, pulizia
Elio-Neon	632	continuo		da 0,1 W a 100 mW	Telemetria, topografia, metrologia, olografia, stampa
Gas ionizzato (Kr, Ar)	da 350 a 800	continuo		da 0,1 W a 40 W	Telemetria, spettroscopia, ricerca, spettacolo
Biossido di carbonio CO ₂	10600	da 10 a 100 ns continuo	10 kHz	da 1 W a 50 kW	Taglio, marchiatura, foratura, saldatura, trattamento termico
Vapori metallici	da 500 a 15000	20 ns	qualche Hz	qualche mJ	Ricerca, separazione isotopi dell'uranio
Rubino	694	30 ns 500 μs	da 0.03 a 10 Hz	da 0,1 J a 10 J da 0,05 a 5 J	Olografia dinamica, telemetria, foratura
Yag-Neodimio	1064 532(radd.in fr) 355(tripl.in fr) 266(quadrupl.in fr)	da 30 ps a 30 ns o continuo	da 1 a 80 kHz	da 0,1 mJ a 50 J	Vaporizzazione di metalli, saldatura, foratura, pulizia, incisione
Vetro drogato al neodimio	1060	da 0,5 a 5 ns	da 10 a 20 Hz	da 1 a 400 J	Saldatura, foratura, incisione, spettrografia
Titanio zaffiro	selezionabile da 370 a 3000	$< 8 * 10^{-6}$	da 1 a 50 kHz	fino a 0,2 J	Spettroscopia, ricerca
Diodi laser	selezionabile da 447 a 30000	continuo (con sovrapposizione di segnali impulsivi)		da 1 a 65 mW	Telemetria, lettura dei codici a barre, audio-video, hi-fi
Coloranti	variabile da 350 a 1000	continuo o pulsato	-	da qualche mW a qualche W	Spettroscopia, studio di materiali

Esempi di applicazioni industriali e civili; incisioni, giochi di luce, marcatura, taglio, saldatura, foratura

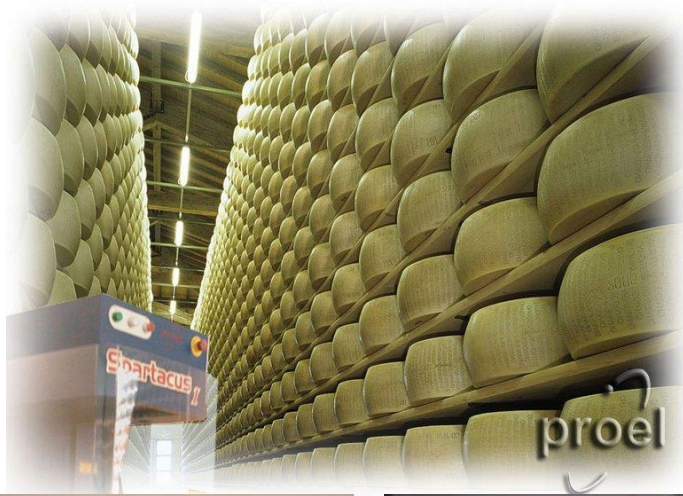
32



Esempi di applicazioni: vetro, tessuti, pelle, legno, plastica, metallo



Esempi di applicazioni: alimentari, legno, tessuti, metalli, plastica



Tipi di laser in campo medico -1

Applicazioni dei laser in *Oftalmologia*

Applicazioni cliniche dei laser in *Chirurgia Generale*

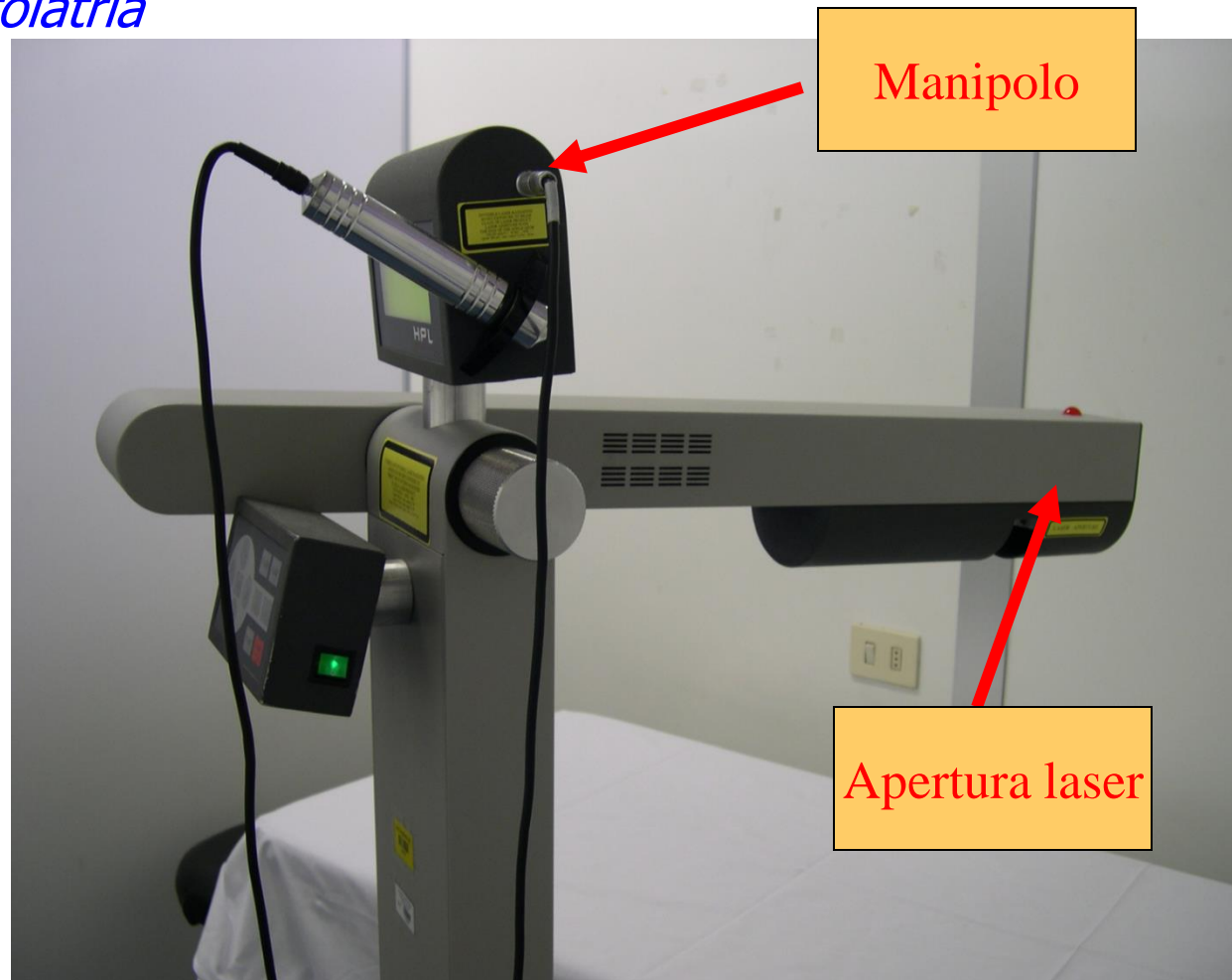
Applicazioni cliniche dei laser in *Chirurgia con microscopio operatorio*

Applicazioni cliniche dei laser in *Chirurgia Endoscopica*

Applicazioni in *Odontoiatria*

LASER IN MEDICINA:
PER FISIOTERAPIA

Led GaAlAs
808 - 915 nm
Classe 4



LASER IN MEDICINA:
LASER OFTALMICO

ZEISS VISULAS
Nd:YAG 1064 nm
Classe 4





SISTEMI DI TRASMISSIONE DELLA RADIAZIONE LASER IN MEDICINA

già Norma CEI 76-6

- Il tipo di sistema di trasmissione della radiazione laser sul punto di trattamento è determinato dalla λ
- I sistemi di trasmissione più diffusi della radiazione sul tessuto sono:

- **Trasmissione diretta**
- **Braccio articolato**
- **Fibra ottica**
- **Guida d'onda flessibile cava**

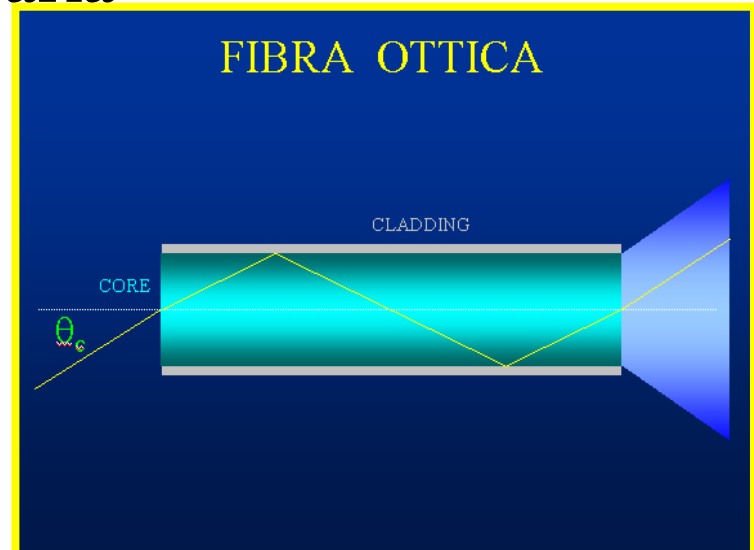
SISTEMI A TRASMISSIONE DIRETTA

- L'energia del laser viene trasmessa direttamente dall'apertura di emissione al tessuto (con o senza lenti di focalizzazione).
- Il fascio può essere orientato manualmente o con mezzi meccanici:
sono sistemi di posizionamento
 - ✓ **puntatori laser**
 - ✓ **laser per centratura dei pazienti**

SISTEMI DI TRASMISSIONE CON FIBRA OTTICA

Riflessione totale all'interfaccia vetro-aria

- ✓ L'energia laser viene focalizzata con una lente in una fibra ottica in vetro e quindi trasmessa in modo da emergere come fascio divergente/convergente all'estremità della fibra (flessibile/incurvata) secondo la punta
- ✓ Indice rifrazione: $n_{\text{core}} > n_{\text{cladding}}$
- ✓ Fibre monomodali ($\Phi_{\text{core}} \sim \mu\text{m}$; il fascio interno si propaga in modo unico//asse fibra)
- ✓ Fibre multimodali-CH (Φ_{core} : 200-800 μm ; a gradino o graduali secondo "n")
- ✓ Fibre coassiali: talvolta copertura con tubo plastico coassiale per flusso di gas inerte su punta per raffreddarla e rimuovere i fumi laser-tessuto
- ✓ Generalmente il sistema di trasmissione a fibre ottiche viene utilizzato assieme a endoscopi (flessibili o rigidi).
 - ✓ Laser Nd:YAG



BRACCIO ARTICOLATO O A GUIDA D'ONDA

- Alcune λ vengono assorbite dal materiale delle fibre ottiche (es. laser CO_2) e non possono quindi essere trasmesse mediante normali fibre.
- Si utilizzano allora bracci articolati mediante i quali la radiazione attraversa un braccio cavo contenente un sistema di specchi riflettenti.
 - ✓ laser a CO_2

Per guida d'onda: piccole cannule con rivestimento interno; fascio trasmesso ed eventualmente deviato con piccolo specchio in punta.



APPLICATORI E MANIPOLI del fascio laser al tessuto da trattare

- **lenti di focalizzazione** (a contatto, per variare l'irradiazione o il diametro del fascio)
- **punte di contatto in zaffiro o simili** (a contatto, conica/semisf/cilindr. per variare energia e dimensione del fascio es. Nd-YAG per migliorare il taglio, la profondità e favorire la coagulazione)
- **fibre con punta sagomata** (a contatto/non/interstiziale; non serve refrigerante per la punta; meno fragili e più piccole e strette dello zaffiro)
- **estremità metalliche o in ceramica** (usate per le ostruzioni)
- **diffusori di luce su ampia area e sonde** per la terapia fotodinamica
- **sistemi a scansione**, con specchi mobili per deflettere il fascio in area piccola; uso in fisioterapia

Micromanipolatori ed endoscopi con joystick su specchio per dirigere energia fascio

CLASSIFICAZIONE DEI LASER

Nuova Vecchia

- Classe 1 (ex Cl.1) per conferenza (meno pericolosi)
- Classe 1M
- Classe 2 (ex Cl.2) per apparecchi RX (puntatori/centratori)
- Classe 2M
- Classe 3R (ex Cl.3A eliminata)
- Classe 3B (ex Cl.3B) pochi per medicina / fisioterapia
- Classe 4 (ex Cl.4) uso in medicina
- Classe 1C «C» = contatto cute (non occhi!)

LA CLASSE 1C

Nella versione IEC 60825-1, 2014 è stata introdotta anche una classe 1C dove “C” è un riferimento all’applicazione a contatto.

La classe 1C si applica infatti ai laser progettati per essere applicati a contatto del tessuto da trattare (escluso l’occhio) e dotati di accorgimenti che impediscano la fuga di radiazione al di sopra del LEA della classe 1.

Questi sistemi laser interrompono l’emissione della radiazione laser quando si allontana la punta del laser dalla superficie.

- un sistema di classe 1C deve incorporare un interruttore di prossimità
- Il fascio laser si deve interrompere

EMP «Esposizione Massima Permissa»

Il valore di **EMP** è il livello massimo di radiazione a cui gli occhi o la pelle possono essere esposti senza che vi siano danni.

L'EMP si riferisce ad **esposizioni accidentali**, non ad esposizioni continuative o ripetute nel tempo.

Infatti i valori di EMP indicati nelle tabelle sono riferiti ad esposizioni di durata fino a 30000 s (poco più di 8 ore, che rappresentano una giornata lavorativa) e non si considerano effetti dovuti a ulteriori esposizioni oltre quel limite di tempo.

In realtà, l'esposizione alla radiazione laser deve essere sempre la più bassa possibile.

EMP

I valori di EMP sono diversi a seconda se sono riferiti agli **occhi** o alla **pelle** e dipendono da:

- lunghezza d'onda
- durata dell'esposizione
- dimensione della zona irradiata

I valori di EMP sono ricavati a partire dalle soglie di danneggiamento, espresse come **ED₅₀** (livello in corrispondenza del quale si ha una probabilità del 50% di avere un danno del tessuto biologico).

I limiti vengono generalmente assunti con un fattore di riduzione 2-5 (un tempo 10) rispetto **ED₅₀**

Esempio di EMP

Un particolare andamento dei valori di EMP in funzione della durata dell'esposizione è quello relativo all'esposizione dell'occhio a radiazione con lunghezza d'onda compresa tra **400 e 1400 nm** e durate di esposizione comprese tra **18 μ s e 10 s**.

Questo particolare andamento dell'EMP riflette quello della soglia di danno della retina dovuto all'effetto termico.

In questo caso, il valore di EMP, espresso in esposizione energetica, risulta **proporzionale a $t^{0,75}$** , mentre, espresso in irradiazione, risulta **proporzionale a $t^{-1/4}$** , dove t è la durata dell'esposizione.

LEA «Livelli di Emissione Accettabile»

Dai valori di EMP si ricavano i LEA.

In particolare, i LEA sono basati sui valori **EMP dell'occhio**.

I valori dei LEA e i relativi metodi di misura si basano sui fattori che maggiormente hanno effetto sull'esposizione, considerandoli nel caso di maggiore pericolosità:

- dimensione del fascio
- diametro della pupilla
- durata dell'esposizione
- eventuale uso di strumenti ottici

$$\text{LEA}_{\text{cl2}} = 1 \text{ mW per cw ; } \text{LEA}_{\text{cl2}} = 2 \cdot 10^{-7} \text{ J per pw}$$



GRANDEZZE RADIOMETRICHE

Per misurare l'emissione della radiazione da un laser (LEA) si usano le seguenti grandezze radiometriche (norme tecniche IEC 60825):

- **P = potenza radiante o flusso radiante (W)**
- **Q = energia radiante (J)**
- **E = irradianza o irradianza o densità di potenza (W/m^2)**
- **H = esposizione radiante o energetica o fluenza (J/m^2)**

Le ultime due grandezze sono usate anche per valutare l'esposizione di una parte del corpo alla radiazione laser (D.Lgs.81/08).

Classificazione dei LASER (IEC 60825-1:2009-07-03)

- Classe 1:** intrinsecamente sicuri (bassa potenza) anche per visione diretta e prolungata del fascio (VS: possibile abbagliamento temporaneo)
- Classe 1M:** 302,5-4000 nm; sono sicuri nelle condizioni di funzionamento ragionevolmente prevedibili, ma possono essere pericolosi (superamento EMP e danni oculari) se l'utilizzatore impiega ottiche per la visione diretta del fascio (*strumenti ottici: binocolo, microscopio*)
- Classe 2:** 400-700 nm (VS); non sono intrinsecamente sicuri, ma la protezione dell'occhio è normalmente assicurata dal riflesso di difesa compreso il riflesso palpebrale (abbagliamento/accecamento da luce intensa con possibili conseguenze sul lavoro in casi critici). Bisogna evitare di guardare nel fascio (*luce V.S.  ammiccamento*)
- Classe 2M:** 400-700 nm; sono sicuri solo per brevi esposizioni, la protezione dell'occhio è normalmente assicurata dal riflesso di difesa compreso il riflesso palpebrale (abbagliamento/accecamento da luce intensa con possibili conseguenze sul lavoro in casi critici). Tuttavia l'osservazione dell'emissione può risultare pericolosa se l'utilizzatore impiega ottiche per la visione diretta del fascio (*luce V.S.  ammiccamento*)
- Classe 3R:** 302,5-10⁶nm; la visione diretta del fascio è potenzialmente pericolosa, ma il rischio è inferiore alla classe 3B (*da U.V. a I.R., V.S. incluso*)
- Classe 3B:** la visione diretta del fascio, anche accidentale e breve o di sue riflessioni speculari, è sempre pericolosa mentre non è a rischio la visione di radiazioni diffuse. Nel VS la visione riflessa o rifratta non è normalmente a rischio se la distanza minima di visione è non inferiore a 13 cm e il tempo di visione non è superiore a 10 s
- Classe 4:** pericolosa l'esposizione sia diretta al fascio o alle sue riflessioni speculari sia alla radiazione diffusa (attenzione agli oggetti specchiati!) con o senza strumenti ottici. Sono pericolosi per occhio e pelle. Presentano anche un rischio di incendio (*per energia elevata*)

Classi di rischio (IEC 60825-1:2003)

Limite sup di potenza per emissione cw	Classe di rischio <small>a cura del costruttore</small>	Rischi
<0.4 mW	1	nessuno
	1M	visione fascio con ottiche
< 1 mW	2	nessuno (riflesso palpebrale) (VIS)
	2M	visione fascio con ottiche (VIS)
< 5 mW	3R	visione fascio diretto
< 500 mW	3B	visione fascio diretto
> 500 mW	4	visione fascio diretto e diffuso

Etichettature sull'apparecchio laser

Come da Norma tecnica per i costruttori (IEC 60825-1:2003) e UNI EN ISO 11553-1 e UNI EN ISO 11553-2 del 2009 :

- dal punto di vista delle informazioni di sicurezza **il fabbricante deve apporre una o più targhette su ogni apparecchio laser**. Al simbolo che riporta il **pittogramma** del laser deve essere associata, tranne che per la classe 1, una **ulteriore targhetta** che riporta:
 - gli avvertimenti relativi all'utilizzo in sicurezza del laser;
 - la classe del laser, la massima potenza della radiazione laser emessa, le lunghezze d'onda emesse, la durata dell'impulso (se il caso);
 - la norma usata per la classificazione.
 - se l'emissione della radiazione laser è invisibile (esterna, totalmente o in parte, all'intervallo delle lunghezze d'onda della radiazione visibile) deve essere indicato sulla targhetta.

Quando la protezione degli occhi risulta indispensabile, anche solo per talune operazioni, devono essere fornite dal costruttore anche tutte le indicazioni necessarie per la scelta di DPI oculari



EFFETTI BIOLOGICI NELLE APPLICAZIONI SANITARIE

L'effetto biologico dipende da λ radiazione, densità di energia/potenza, durata dell'esposizione, durata dell'impulso, tipo di tessuto irradiato (coefficiente di trasmissione e ads.nei tessuti \Rightarrow profondità di penetrazione), ampiezza della superficie irradiata.

A parità di flusso di energia erogato, cambiando il tempo di interazione si hanno effetti diverse

- Effetto **fotochimico** (> 10 s) tipico della radiazione **UV** e **VS** (reazione chimica che può essere diretta oppure mediata dalla presenza di sostanze fotosensibilizzanti). L'energia ads. serve per riarrangiamenti strutturali delle molecole, formazione di nuove specie, trasferimento di energia ad altre molecole che reagiranno, non termicamente, con le molecole del mezzo. Si verificano per livelli molto bassi di densità di potenza ($\sim 1 \text{ W/cm}^2$) e tempi di esposizione lunghi.
- Effetto **fototermico** (da 100 ms a più s) caratteristico di **IR** e **VS** (aumento di temperatura): trasformazione di energia em in termica. Avviene per laser a emissione continua con densità potenza $> 10 \text{ W/cm}^2$ o laser impulsati con durata impulso $> \mu\text{s}$. Il calore è prodotto dall'ads.locale della radiazione laser da parte dei cromofori dei tessuti. Danno selettivo secondo λ e tempo (durata impulso $<$ tempo rilassamento termico).
- Effetto **fotomeccanico/termoacustico** transitorio ($< \text{ns}$ a qualche ns): quando la rad.laser è focalizzata ad alta fluenza ($\sim 10^3 \text{ J/cm}^2$) su tessuto con impulsi brevissimi (ns-ps). L'onda d'urto generata può portare alla rottura meccanica localizzata dei tessuti colpiti
- Effetto **fotoablative** (esplosione cellule) impulsi brevi (10-100 ns) e alta densità di potenza (10^7 - 10^{10} W/cm^2) provocano ablazione dei tessuti senza effetti termici su quelli adiacenti. Concomitanti effetti: fotochimici (rottura legami molecolari), fototermici (rapida evaporazione del tessuto), fotomeccanici (onde urto).



PRINCIPALI LASER SANITARI: APPLICAZIONI

Laser (Banda spettrale) nm	Applicazioni sanitarie	interaz fotomeccanica	interaz fotoablativa	interaz fototermica	interaz fotochimica
CO ₂ (IR) 10600	Laser chirurgico per eccellenza: ORL, ch. plastica, dermatologia (<i>skin resurfacing</i>), urologia, odontoiatria, ch. cardiovascolare (<i>rivascolarizzazione</i>), neurochirurgia, ginecologia, ecc			SI	
Nd:YAG (IR) 1064	dermatologia (<i>tatuaggi, epilazione</i>), <u>litotrissia</u> , oftalmologia (<i>iridotomia x glaucoma ad angolo stretto, capsulotomia posteriore in cataratta secondaria</i>), odontoiatria, ch. cardiovascolare (<i>rivascolarizzazione</i>), ecc	SI		SI	
Er:YAG (IR) 2940	dermatologia (<i>skin resurfacing</i>), odontoiatria, ecc			SI	
Ho:YAG (IR) 2100	urologia, ecc			SI	
Diodi (IR) 810-980	dermatologia (<i>epilazione</i>), odontoiatria, ecc			SI	
Diodi (VIS)	oftalmologia (<i>trattamento delle membrane neovascolari nella degenerazione maculare legata all'età</i>)				SI
Nd:YAG (1064)	oftalmologia (<i>trattamento del glaucoma cronico</i>) dermatologia (<i>MAV, tatuaggi</i>), ecc			SI	
Argon (VIS) (514,5)	oftalmologia (<i>trabeculoplastica x glaucoma, retinopatia diabetica</i>), dermatologia, <u>urologia</u> (<i>ca vescica</i>) ecc			SI	SI
DyeLaser (VIS) 575	dermatologia (<i>MAV</i>), oncologia (<u>PDT</u>), ecc			SI	SI
Eccimeri (UV)	<u>oftalmologia</u> (<i>chirurgia refrattiva</i>), ch. cardiovascolare (<i>angioplastica, rimozione elettrocateteri</i>), ecc		SI		



PRINCIPALI LASER SANITARI: EFFETTI BIOLOGICI

Interazione	Laser (λ in nm)	Cromòforo	Effetto	Procedura
Fotochimica	Semiconduttore (670-690)	Foto-sensibilizzatore	Ossidazione	Terapia Foto-Dinamica (PDT)
Fototermica	Semiconduttore (810)	Melanina	Ipertermia ($T = 43-45^\circ\text{C}$)	TermoTerapia Transpupillare (TTT)
	CO ₂ (10600) Er:YAG (2940)	Acqua	Retrazione tissutale ($T = 45-50^\circ\text{C}$)	Rimodellamento cutaneo (anti-rughe)
	Ar (514), Kr (647), dye (560-630), semiconduttore (810) Nd:YAG cw (1064) Nd:YAG 2 ω (532)	Melanina, emoglobina	Denaturazione proteica ($T = 60-80^\circ\text{C}$)	Fotocoagulazione
	CO ₂ (10600), Nd:YAG cw (1064), Er:YAG (2940)	Acqua	Vaporizzazione dell'acqua tissutale (100°C)	Fotoresezione di tessuti molli
	CO ₂ (10600) Nd:YAF cw (1064)	Acqua	Carbonizzazione ($T > 150^\circ\text{C}$), fusione ($T > 300^\circ\text{C}$)	Fotoablazione di tessuti duri
Fotomeccanica	Nd:YAG Q-S (1064)	Nessuno (elettroni liberi)	Breakdown ottico	Fotodistruzione (capsulotomia, iridotomia)
Fotoablativa	Eccimero ArF (193)	Biomolecole	Fotodecomposizione esplosiva	Chirurgia fotorefrattiva

INTERAZIONE RADIAZIONE TESSUTO. DANNO

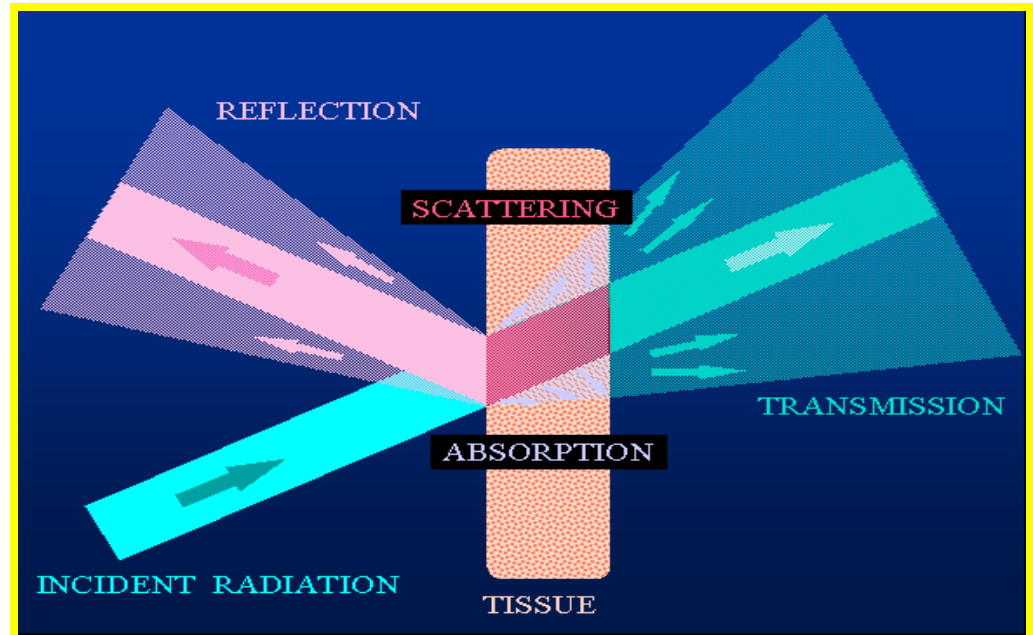
a seguito dell'interazione si possono avere:

- riflessione (secondo angolo di incidenza del fascio e colore del tessuto: per incidenza normale $\sim 5\%$, causa diverso indice di rifrazione esterno-tessuto),
 - assorbimento nel tessuto (secondo λ);
 - diffusione (secondo il tipo di tessuto);
 - trasmissione
- Quanto maggiore è la quantità di radiazione assorbita, tanto maggiore è il danno per il tessuto.
 - Le soglie di danneggiamento sono inversamente proporzionali al coefficiente di assorbimento, definito come rapporto tra la potenza della radiazione assorbita e quella incidente.

INTERAZIONE LASER-MATERIALI

I principali meccanismi di interazione sono:

- DIFFUSIONE O SCATTERING: dipende dalla composizione del materiale
- RIFLESSIONE: dipende dal colore del materiale e dall'angolo di incidenza del fascio
- TRASMISSIONE
- ASSORBIMENTO



DANNI DELLA R.O. SU OCCHIO E PELLE -1

Regione spettrale CIE*	Occhio	Pelle	
Ultravioletto C (da 180 nm a 280 nm)	Fotocheratite	Eritema (bruciatura della pelle)	Processo accelerato di invecchiamento della pelle
Ultravioletto B (da 280 nm a 315 nm)		Aumento della pigmentazione	
Ultravioletto A (da 315 nm a 400 nm)	Cataratta fotochimica	Colore più intenso della pigmentazione, reazione di fotosensibilità	Bruciatura della pelle
Visibile (da 400 nm a 780 nm)	Lesione fotochimica e termica della retina		
Infrarosso A (da 780 nm a 1400 nm)	Cataratta e bruciatura della retina		
Infrarosso B (da 1400 nm a 3000 nm)	Infiammazione acquosa, cataratta, bruciatura della cornea		
Infrarosso C (3000 nm a 1 mm)	Bruciatura della sola cornea		

*Comité International de l'Eclairage

- La radiazione laser che ha fascio molto collimato e alta energia iniziale trasmette grande energia ai tessuti biologici che è assorbita dal sistema in una zona ristretta = bruciatura con denaturazione delle proteine
- L'energia assorbita a livello atomico o molecolare e il tipo di tessuto danneggiato dipendono dalla lunghezza d'onda del laser.
- Il danno dipende dalla durata del riscaldamento e quindi dalla durata dell'impulso
- L'assorbimento produce vibrazione e quindi calore che è trasmesso ai tessuti circostanti
- Per laser a impulsi lunghi o continui la persistenza del fronte termico produce per conduzione un allargamento della lesione
(non c'è tempo di raffreddarsi → riscaldamento)
- Per laser a impulsi corti con grande potenza di picco (es. impulsi giganti Q-switched o ad agganciamento di modo mode locking) la grande densità di potenza produce irradiazione elevato con rapida trasformazione dei liquidi in gas e rottura esplosiva delle cellule (energia in breve tempo → danno a cellule per evaporazione → esplosione)

- In un fascio ben collimato il pericolo è virtualmente indipendente dalla distanza tra sorgente laser e occhio poiché si assume che immagine retinica sia una macchia, al limite di diffrazione, di circa $10\text{ }\mu\text{m}$ diametro: in questo caso la zona di pericolo per la retina è di $25\text{ }\mu\text{m}$ minimo.
- Ciò anche per una sorgente estesa perché l'irradiazione retinica dipende solo dalla radianza della sorgente e dalle caratteristiche di focalizzazione dell'occhio.
- Per una sorgente puntiforme con fascio divergente, il pericolo aumenta con la diminuzione della distanza tra il punto di raggio minimo del fascio e l'occhio: infatti diminuendo la distanza aumenta la potenza raccolta mentre si può supporre che la dimensione dell'immagine retinica resti al limite della diffrazione, a causa dell'accomodazione dell'occhio.
- Per distanze ancora inferiori si riduce il pericolo, perché aumenta l'immagine retinica e si riduce il corrispondente irradiazione anche se la potenza raccolta possa essere superiore.
- Il pericolo maggiore si ha alla più corta distanza di accomodamento dell'occhio umano (100 mm)

DANNI DEL LASER -4

- I **laser** rappresentano un tipo peculiare di sorgenti ottiche, in quanto emettono fasci di radiazione **coerente** (collimata), **direzionale**, **monocromatica**, in continuo o sotto forma di impulsi discreti.
- La radiazione coerente, a differenza della radiazione diffusa, può essere raccolta dalle strutture diottiche dell'occhio (cristallino) e focalizzata sulla retina con **raggiungimento di densità di energia molto elevate in piccole aree della retina**, **causa rapide e irreversibili lesioni di natura fotochimica** (laser visibili) o **termica** (laser che emettono nell'infrarosso vicino)
- **Impulsi di radiazione coerente di breve durata e forte intensità possono indurre danni di tipo meccanico alla retina e ad altre strutture dell'occhio come effetto dell'onda d'urto conseguente all'impulso di energia.**

DANNI DEL LASER -5

- Ciò vale soprattutto per i laser che emettono nel visibile e nel vicino IR. Di conseguenza a livello retinico è possibile raggiungere densità di energia molto elevate, anche per fasci in origine di bassa potenza, e questo può tradursi in esteso e irreversibile danno al tessuto della retina.
- La radiazione coerente, specie se di potenza, può arrecare danno anche alla cute (es. ustione localizzata).

ORGANI SENSIBILI PER R.O.

- Occhio: organo “critico”
- Cute: eritemi: ustioni cutanee
- Organi interni: solo per laser di potenza molto elevata

EFFETTI PATOLOGICI

Regione spettrale

UV-C 180-280 nm

UV-B 280-315 nm

UV-A 315-400 nm

Visibile 400-780 nm

IR-A 780-1400 nm

IR-B 1400-3000 nm

IR-C 3000 nm-1mm

Occhio

Fotocheratite

Fotocheratite

Cataratta

**Fotochimico e termico
retina**

**Cataratta, bruciatura
retina**

**Infiammaz. umore acq.
Cataratta, bruciatura
cornea**

Bruciatura cornea

Pelle

**Eritema
Invecchiamento
Pigmentazione**

**Annerimento
pigmento**

**Annerimento
pigmento**

**Annerimento
pigmento**

**Bruciatura della
pelle**

Bruciatura pelle

Bruciatura pelle

La vulnerabilità dell'**occhio** e il danno conseguente dipendono dal tipo di radiazione ottica λ (ultravioletto 100-400nm, visibile 400-760 nm, infrarosso 760-1mm) e dall'intensità.

Si possono avere diversi tipi di danno a carico dell'occhio:

- danni retinici di natura fotochimica, alterazioni retiniche caratterizzate da piccoli addensamenti di pigmento, discromie, effetti catarattogeni di origine fotochimica e termica, fotocheratoconjuntivite, ustioni corneali.

- Di minore importanza è l'eventuale danno a carico della **cute** e i più comuni sono: eritemi, ustioni (cutanee, superficiali e profonde) la cui gravità sarà in rapporto, oltre che all'energia calorica incidente, al grado di pigmentazione, all'efficienza dei fenomeni locali di termoregolazione, alla capacità di penetrazione nei vari strati delle radiazioni incidenti.

- Laser di potenza notevolmente elevata possono danneggiare seriamente anche gli **organi interni**.

CARATTERISTICHE DELL'OCCHIO

Caratteristiche dell'occhio legate alla sicurezza laser:

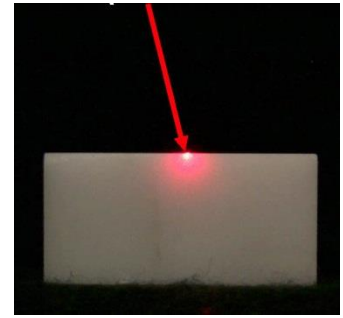
- dimensioni della pupilla (7 mm max) max dilataz.pupilla
- distanza di focalizzazione (17 mm) tra cornea e retina
- dimensione della minima immagine retinica (25 μm)

Focalizzazione

La capacità dell'occhio di concentrare attraverso la focalizzazione molta potenza su una piccola superficie retinica rende particolarmente critiche le esposizioni alla radiazione che può raggiungere la retina (VS e IR-A).

L'aumento dell'irradiazione tra cornea e retina è ~ 100.000 volte, cioè un fascio di 50 W m^{-2} sulla cornea diventa $5.000.000 \text{ W m}^{-2}$ sulla retina.

ESEMPIO



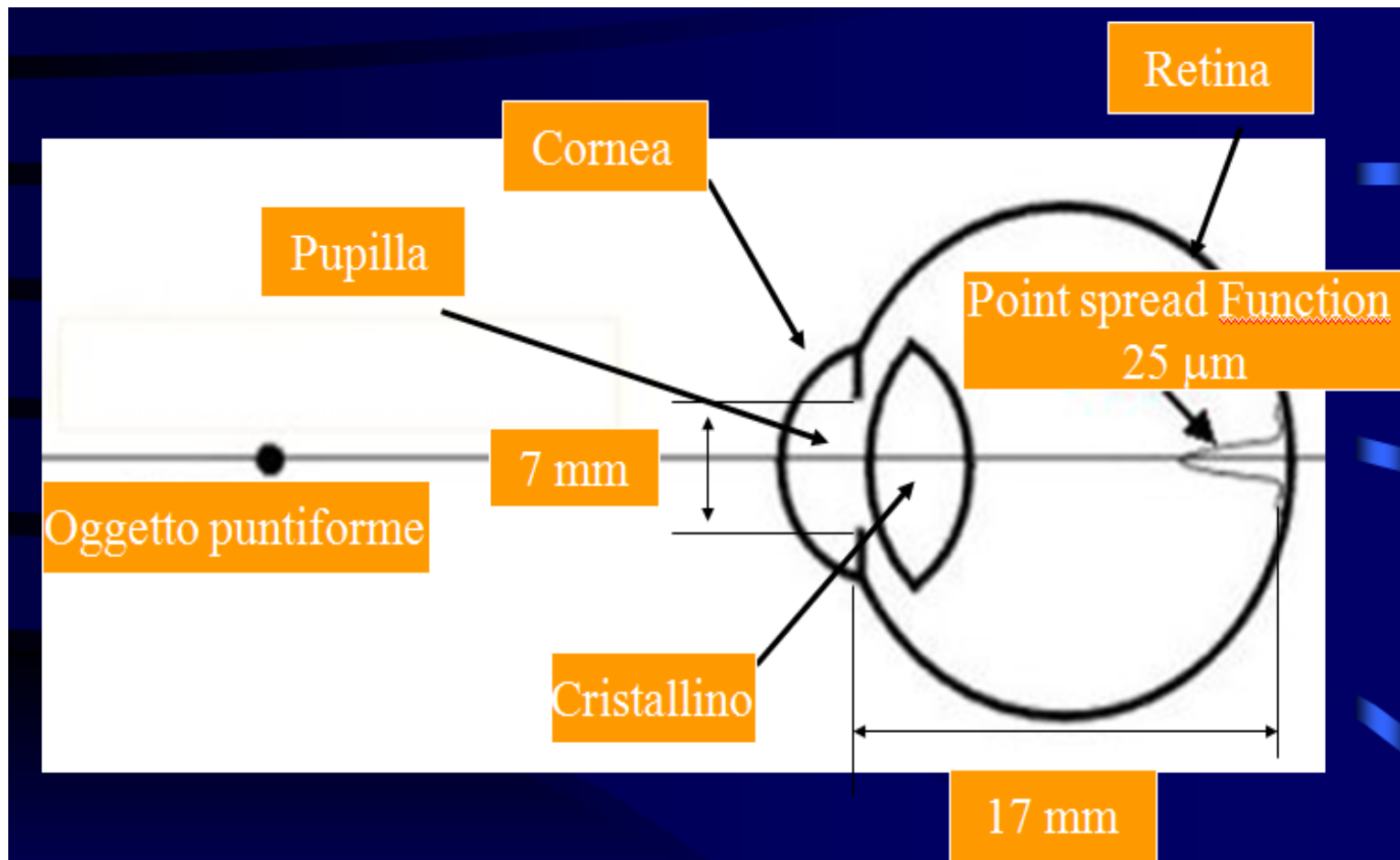
Confrontiamo:

- l'intensità della radiazione solare al suolo ($1 \text{ kWm}^{-2} \equiv 10^3 \text{ Wm}^{-2}$) con quella di
- un puntatore laser da 1 mW focalizzato su una superficie di raggio 0.05 mm:

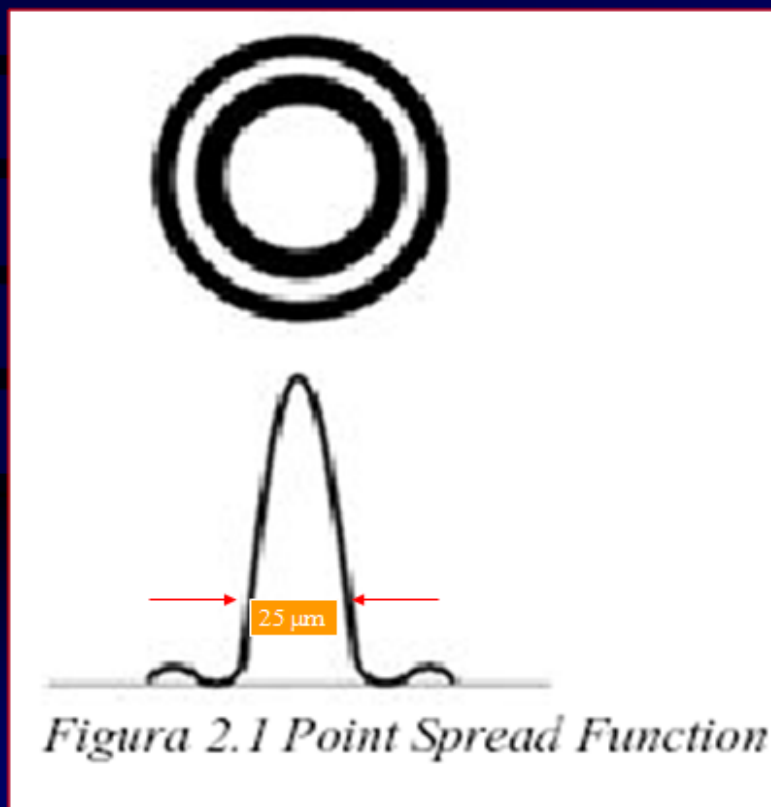
laser:

$$= \frac{1 \text{ mW}}{\pi (0.05 \text{ mm})^2} \cong 1 \cdot 10^5 \text{ Wm}^{-2}$$

-> 100 volte superiore a quella solare



Point Spread Function



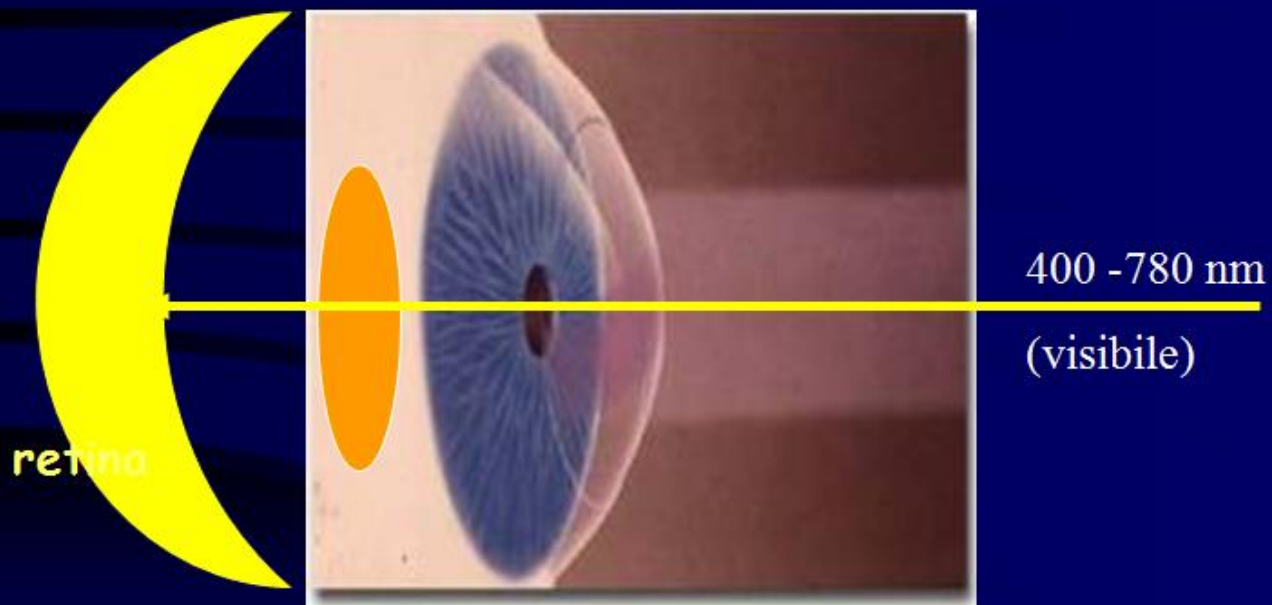
Un oggetto puntiforme produce la seguente figura di diffrazione, detta disco di Airy.

STRUTTURE BERSAGLIO DELLA RADIAZIONE OTTICA PER L'OCCHIO

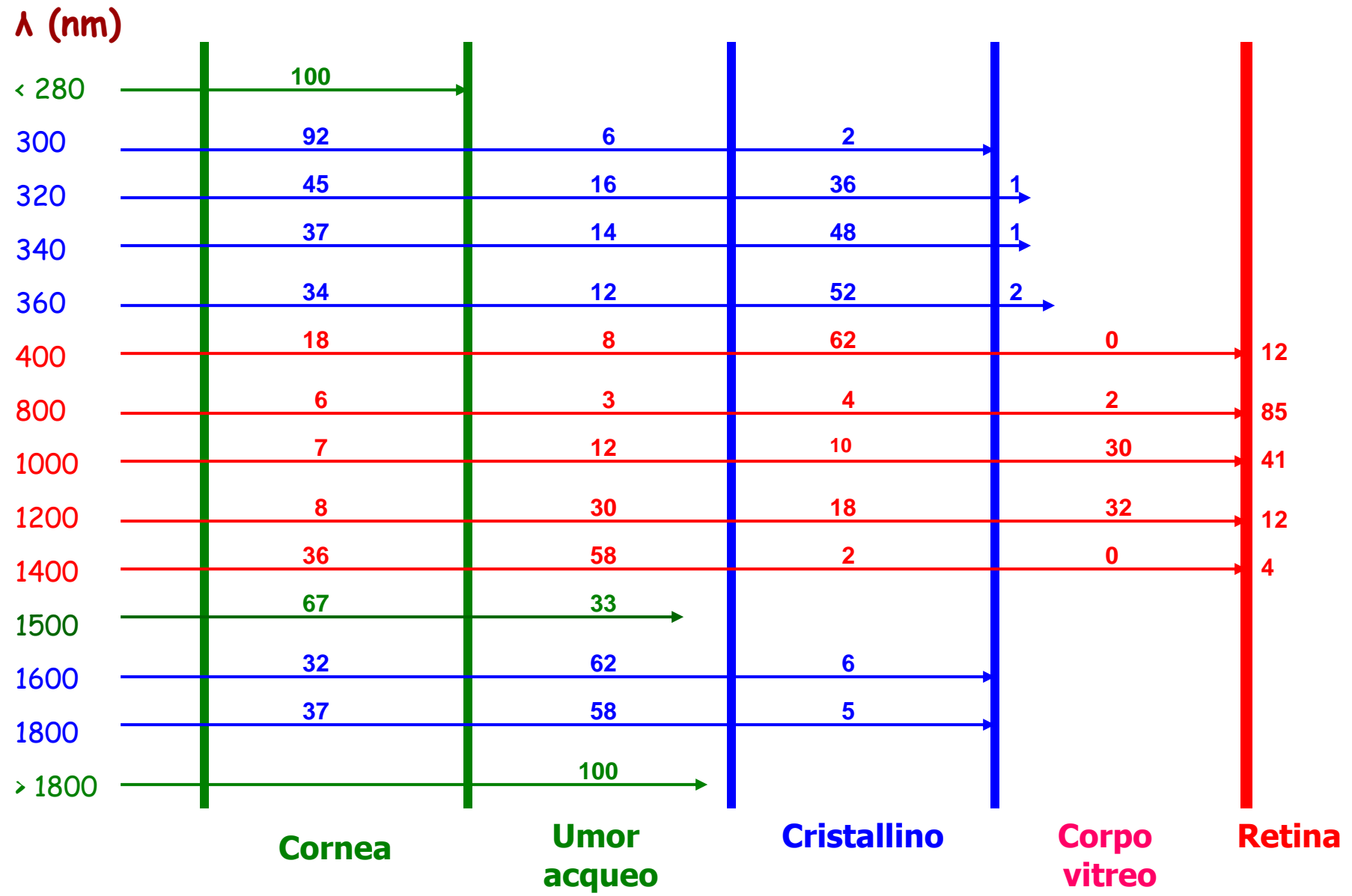
Struttura Bersaglio Banda	Cornea	Cristallino	Retina
UV-C	SI	--	--
UV-B	SI	--	--
UV-A	SI	SI	--
VISIBILE	--	--	SI
IR-A	--	SI	SI
IR-B	SI	SI	--
IR-C	SI	--	--

Penetrazione fascio VS e IRA sulla retina

Andamento della penetrazione in funzione della lunghezza d'onda (occhio)



Assorbimento % della radiazione ottica da parte delle diverse strutture oculari (*da Campurra, 2001*) in funzione di λ

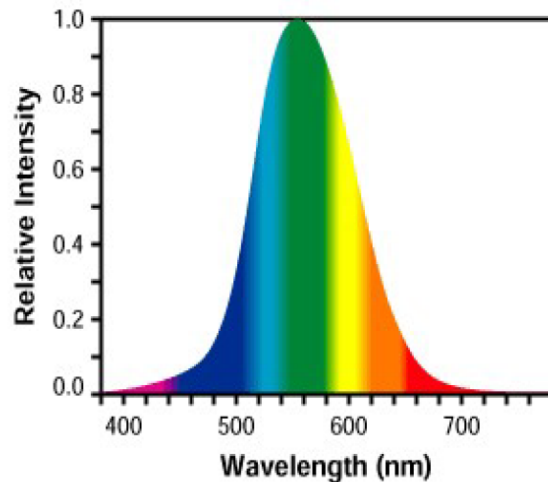


Sensibilità relativa dell'occhio $V(\lambda)$

L'occhio non ha la stessa sensibilità a tutte le lunghezze d'onda, e la sensibilità dipende anche dall'intensità della radiazione:

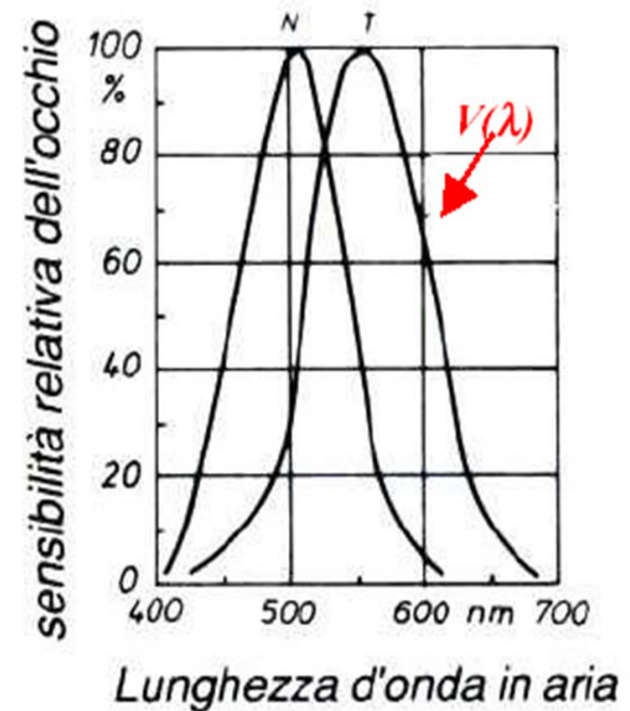
- in condizioni di *alta intensità* si ha il regime *fotopico* (*visione diurna*): la luce è percepita principalmente dai coni al centro della retina, la *sensibilità relativa* $V(\lambda)$ è data dalla curva **T** della figura e ha il massimo a 555 nm (verde);
- in condizioni di *bassa intensità* si ha il regime *scotopico* (*visione notturna*): la luce è percepita principalmente dai bastoncelli al bordo della retina, la *sensibilità relativa* $V(\lambda)$ è data dalla curva **N** della figura e ha il massimo a 507 nm

Fotometriche



Curva Fotopica

- Curva "media" di risposta dell'occhio umano
- Massimo nel verde
- Simmetrica
- Nulla sotto 370 nm e sopra 770 nm



Curva standard CIE:

su di essa si definiscono le grandezze illuminotecniche

PRECAUZIONI PER GLI OCCHI

In caso di possibile superamento della EMP devono essere indossati occhiali di protezione (operatori, paziente,...) etichettati con la densità ottica e la lunghezza d'onda per cui è garantita la protezione



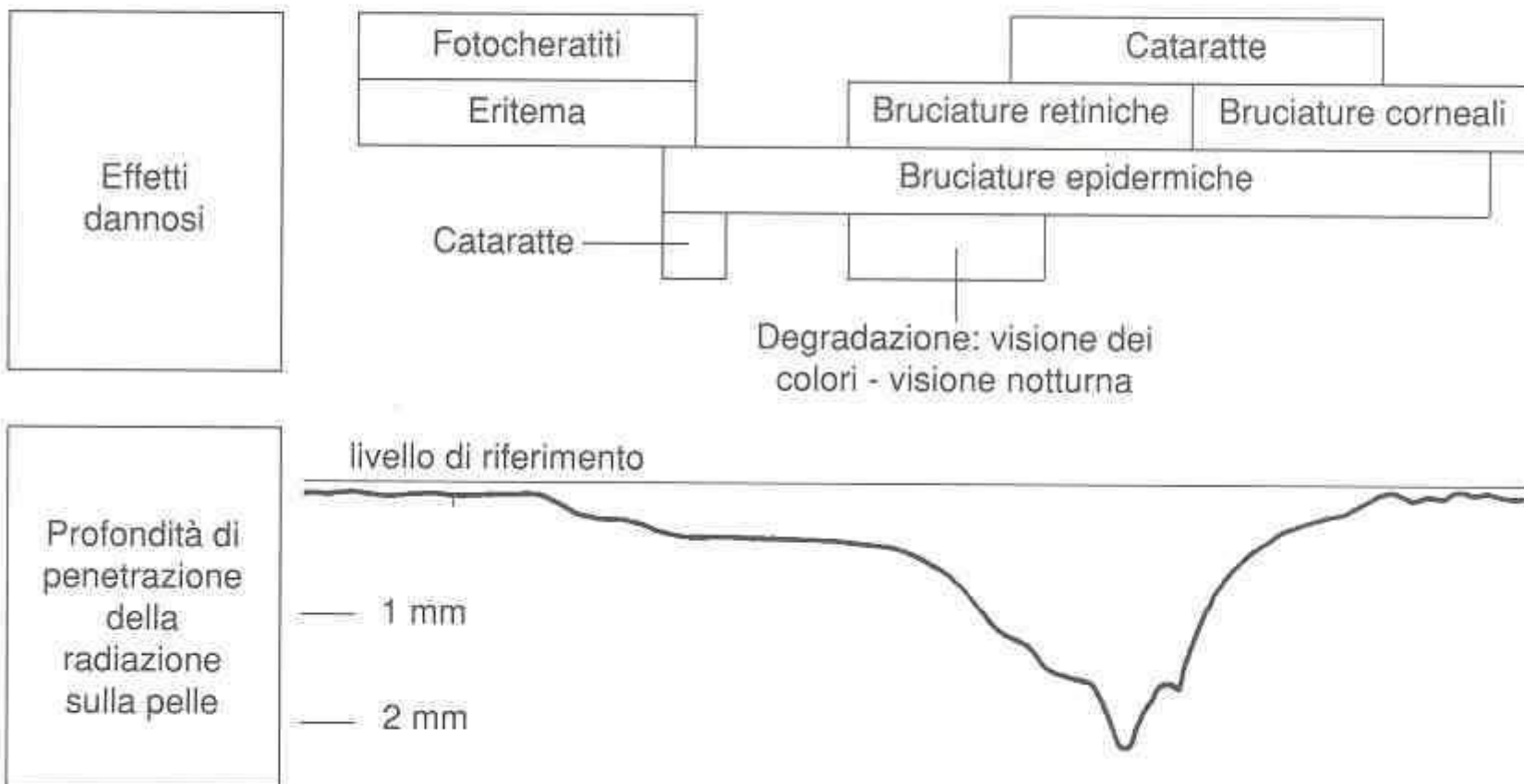
In campo medico

- Se si usano **ottiche di osservazione** (endoscopi, microscopi, laparoscopi, colposcopi, lampada a fessura, ecc.), gli utilizzatori devono avere uno schermo o un filtro adeguato a ridurre il rischio di radiazione riflessa attraverso il canale di visione.
- L'uso di un **videoendoscopio** può eliminare il contributo della radiazione riflessa nelle ottiche di osservazione; è comunque opportuno che i presenti indossino occhiali protettivi quando c'è rischio di rottura della fibra o di un'emissione accidentale quando la fibra è fuori dall'endoscopio

PRECAUZIONI PER LA PELLE

- La pelle è in grado di tollerare una esposizione al fascio laser superiore a quella dell'occhio, ma un'esposizione accidentale può comunque provocare danni (eritema, ustione)
- E' consigliato l'uso di camici in cotone pesante a maniche lunghe
- Evitare teli o indumenti in tessuto non tessuto (TNT) tipo “usa e getta”

Bande - CIE	UV-C	UV-B	UV-A	Visibile	IR-A	IR-B	IR-C
nm	100	280	315	400	760	1400	3000 10 ⁶



Sintesi dei principali effetti della radiazione sui tessuti nelle diverse regioni spettrali, definite secondo gli standard CIE.

DISTANZA NOMINALE DI RISCHIO OCULARE (DNRO e DNROE)
ZONA NOMINALE DI RISCHIO OCULARE (ZNRO e ZNROE)
ZONA LASER CONTROLLATA (ZLC)

DNRO: distanza dall'apertura di emissione per la quale l'irradianza (W/m^2) o l'esposizione energetica (J/m^2) del fascio è uguale all'esposizione massima permessa (EMP) per la cornea.

DNRO estesa (DNROE) se DNRO include la possibilità di visione otticamente assistita.

ZNRO: zona nominale di rischio oculare (ZNRO) a distanza minore di DNRO (qui vanno usati i DPI)

per $d > \text{DNRO (EMP)}$  No DANNO

ZNRO estesa (ZNROE) se ZNRO include la possibilità di visione otticamente assistita.

ZLC: zona in cui la presenza e l'attività di persone sono regolate da procedure specifiche di controllo e sorveglianza per la protezione dai rischi

DISTANZA NOMINALE DI RISCHIO OCULARE

$$DNRO = \frac{1}{\phi} \sqrt{\frac{4kP_0}{\pi E_{EMP}}} - \frac{a}{\phi}$$

dove:

- P_0 = potenza del fascio laser
- E_{EMP} = valore di EMP espresso in irradiazione (corrisponde al VLE del D.Lgs.81/08 allegato XXXVII)
- a = diametro iniziale del fascio (all'uscita dal laser)
- ϕ = divergenza del fascio
- k = fattore dipendente dalla forma del fascio

ZONA LASER CONTROLLATA ZLC

La ZLC va delimitata con cartelli opportuni:

- cartello giallo di avviso di pericolo laser
- cartello di delimitazione di ZLC
- cartello di indicazione di classe del laser
- cartello prescrizione occhiali (se previsti)



oppure con un unico cartello che raccolga tutte le informazioni:



e che includa eventualmente informazioni specifiche sul laser in oggetto, quali lunghezza d'onda e potenza massima emessa.

- indicatore di avvertimento luminoso (lampada gialla o scritta "Attenzione: laser in funzione")

L'ESPERTO IN SICUREZZA LASER

- **Nell'industria e nei laboratori** dove si usano laser di Classe da 3B e 4 l'utilizzatore deve servirsi della consulenza specialistica di un **Tecnico per la Sicurezza Laser (TSL)** con competenze specifiche relative ai problemi di sicurezza per la verifica del rispetto della Normativa corrispondente e per l'adozione delle necessarie misure di prevenzione specifiche (Guida CEI 76-11 per l'utilizzatore «Laser Safety Officer» LSO, in inglese)

- **In campo sanitario** se si usano laser di Classe superiore a 3R o 3A (vecchia classif.) deve essere nominata una figura specifica:

l'Addetto alla Sicurezza Laser (ASL):

- “persona che possiede le conoscenze necessarie per valutare e controllare i rischi causati dai laser e ha la responsabilità di supervisione sul controllo di questi rischi” (CEI 76-6 Sicurezza degli apparecchi laser – Parte 8: Guida all'uso degli apparecchi laser in medicina)

Compiti e responsabilità del TSL e ASL

- Collaborare col datore di lavoro riguardo alla sicurezza laser
- Valutare i rischi dell'installazione e dei sistemi laser:
 - classificare le sorgenti se il caso,
 - determinare la zona nominale di rischio oculare (DNRO) e la zona laser controllata (ZLC)
 - delimitare la zona controllata con segnaletica apposita
- Individuare i DPI adeguati
- Informare il responsabile sui problemi della sicurezza
- Effettuare test di accettazione e i controlli periodici, se incaricato
- Partecipare all'attività di info-formazione e addestramento degli addetti al laser
- Definire le procedure operative e di sicurezza laser
- Verificare l'efficacia delle misure di prevenzione e protezione adottate
- Analizzare gli infortuni e gli incidenti inerenti i laser
- Collaborare col SPP



**CORSO DI FORMAZIONE PER
TECNICO SICUREZZA LASER (TSL) E
ADDETTO SICUREZZA LASER (ASL)**

Grazie dell'attenzione

luisa.biazzi@unipv.it