Università degli Studi di Firenze

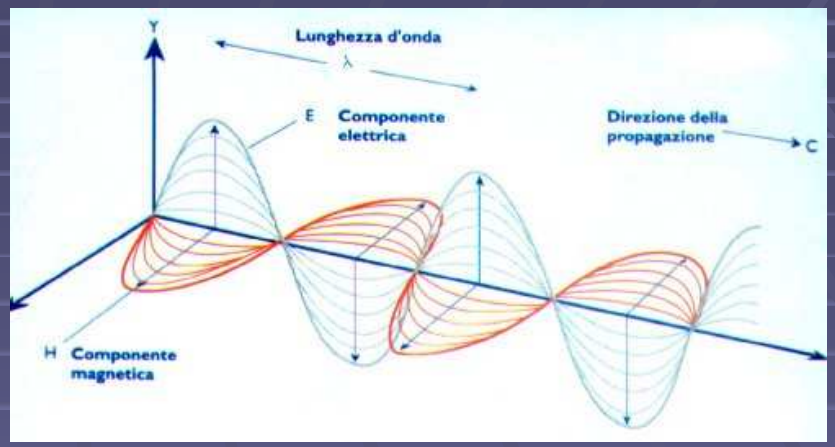
I rischi nell'uso dei laser

Dott. Luca Pettini
Settore Ambiente Sicurezza
Polo Scientifico e Tecnologico
Università di Firenze
V.Le delle Idee, 22

GENERALITÀ SUI LASER

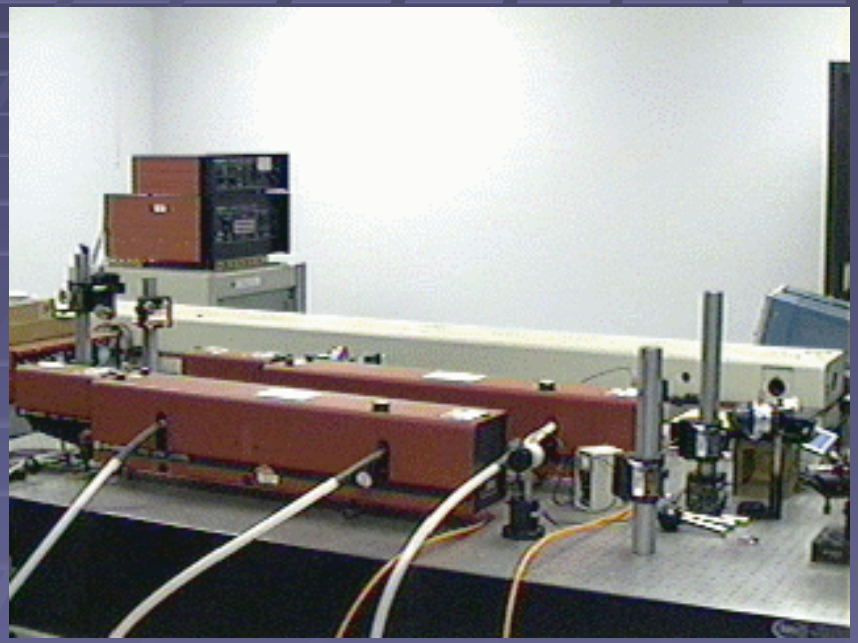
Onda elettromagnetica

- modalità di propagazione nello spazio di un campo elettrico e di un campo magnetico che, in particolari condizioni, si generano e si sostengono a vicenda, dando luogo ad un fenomeno ondulatorio che si allontana indefinitamente dalla sorgente



- Le onde elettromagnetiche, sono caratterizzate da due grandezze fondamentali:
  - l'**ampiezza:** indica quanto un'onda è intensa
  - la **frequenza (ν)**: (misurata in hertz, simbolo Hz) rappresenta il numero di onde che si susseguono in un secondo.
- La **lunghezza d'onda** (λ) è legata alla frequenza dalla relazione $\lambda \cdot \nu = c$ dove c è la velocità della luce ($c \approx 3 \cdot 10^8\ m \cdot s^{-1}$)

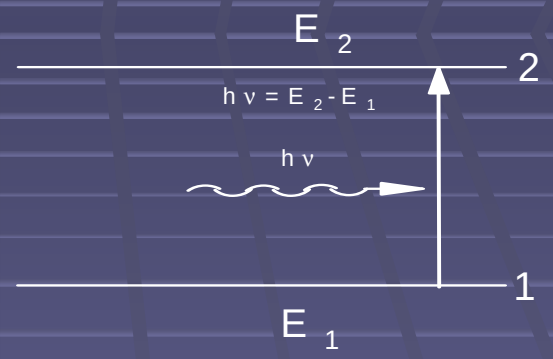
Definizione ed usi dei laser



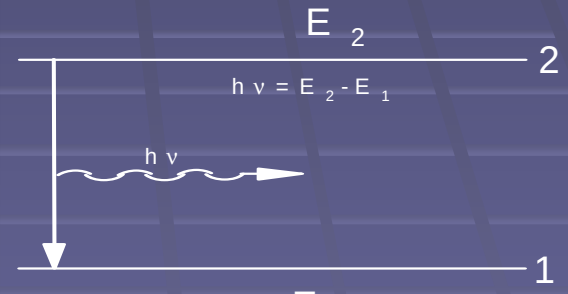
- LASER: acronimo inglese di *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*
- I laser sono apparecchi che producono ed amplificano raggi di luce coerente
- I laser sono utilizzati nella ricerca, in medicina, nell'industria, in applicazioni commerciali, nello spettacolo

Principio di funzionamento Emissione e Assorbimento

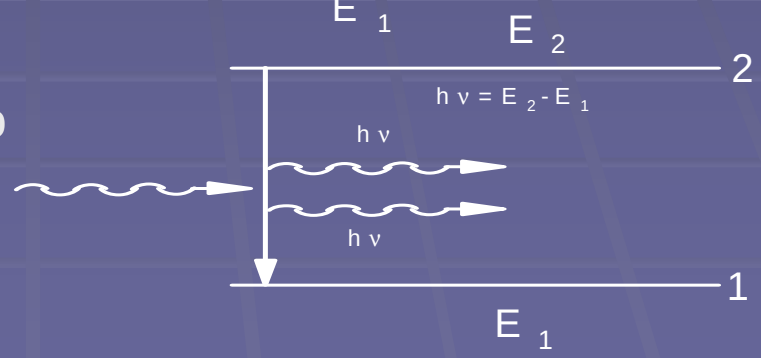
ASSORBIMENTO: il sistema (atomo o molecola) viene eccitato assorbendo energia dall'esterno



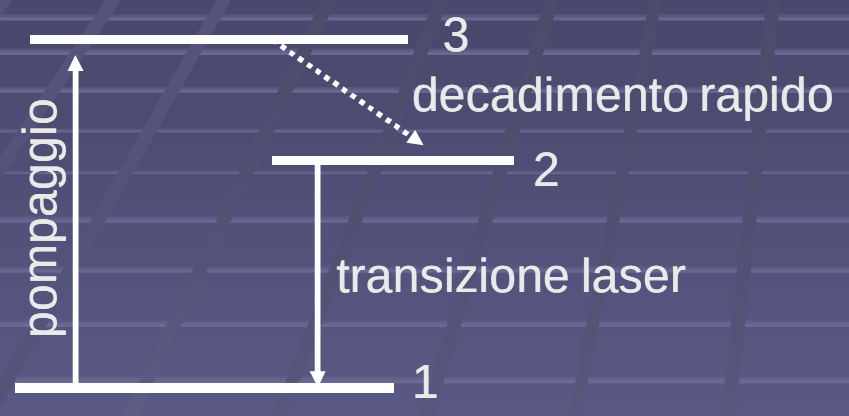
EMISSIONE SPONTANEA: il sistema torna allo stato fondamentale riemettendo l'energia assorbita sotto formo di radiazione elettromagnetica.



EMISSIONE STIMOLATA: il sistema eccitato viene investito da una radiazione di energia analoga al salto energetico ed emette radiazione di doppia intensità in fase.



Principio di funzionamento
Inversione di popolazione



- Laser a tre livelli: l'effetto laser si ha quando il pompaggio ha portato più elettroni al livello 3 di quanti ve ne siano al livello 1
- Laser a quattro livelli: molto più efficiente: l'inversione di popolazione è immediata

Schema apparato laser

- Mezzo attivo (gas, liquido, solido, semiconduttore)
- Meccanismo di eccitazione: ottico, elettrico, chimico, meccanico
- Meccanismo amplificazione: specchi
- Meccanismo di uscita: specchio semitrasparente

Pompaggio

1. **Pompaggio ottico** (laser a cristalli o a coloranti):
   a) Lampade a funzionamento impulsato
   b) Lampade a funzionamento continuo
   c) Laser
2. **Pompaggio elettrico** (laser a gas o a semiconduttore):
   a) Nei laser a gas si ha ionizzazione con urti che provocano eccitazione;
   b) Nei laser a semiconduttore si ha popolazione della banda di conduzione per separazione di carica
3. **Reazione Chimica**: l'energia in gioco dà prodotti di reazione allo stato eccitato
4. **Espansione di gas**

Natura e rischi

- La luce laser ha caratteristiche diverse da quella normale sotto tre aspetti:
  - È monocromatica
  - È direzionale
  - È coerente
- I laser possono determinare rischi molto maggiori della luce normale perché concentrano molta energia in un'area piccola

NORMATIVA DI SICUREZZA

Norme specifiche

Normativa specifica sui laser

- Norma CEI EN 60825-1: classificazione delle apparecchiature, prescrizioni e guida per l'utilizzatore
  - Norma CEI 76 – CT 76 – Fascicolo 3850 R – Guida utilizzazione apparati laser nei laboratori di ricerca
  - Norma CEI 76-6 – CT 76 – Fascicolo 5928: Guida all'uso degli apparati laser in medicina
  - Norma CEI 76 – CT 76 – Fascicolo 3849 R: Guida all'uso degli apparati laser in industria, telecomunicazioni etc.
  - Norma CEI EN 60825-2: Sicurezza dei sistemi di telecomunicazione e fibre ottiche
- Norma CEI EN 60825-4: Barriere per laser
- Norma CEI EN 61040: rilevatori e misuratori potenza o energia

Normativa sui sistemi di protezione

- Norma UNI EN 207: protettori dell'occhio contro i laser
- Norma UNI EN 208: protettori dell'occhio per regolazioni laser

Nuovo testo unico

- Nell'ambito della valutazione dei rischi il datore di lavoro valuta e, quando necessario, misura e/o calcola i livelli delle radiazioni ottiche a cui possono essere esposti i lavoratori.
- La metodologia seguita nella valutazione, nella misurazione e/o nel calcolo rispetta le norme della Commissione elettrotecnica internazionale (IEC), per quanto riguarda le radiazioni laser, e le raccomandazioni della Commissione internazionale per l'illuminazione (CIE) e del Comitato europeo di normazione (CEN) per quanto riguarda le radiazioni incoerenti.
- In tutti i casi di esposizione, la valutazione tiene conto dei dati indicati dai fabbricanti delle attrezzature, se contemplate da pertinenti direttive comunitarie di prodotto.

Norma CEI EN 60825-1

Sicurezza degli apparecchi laser – Parte 1: Classificazione delle apparecchiature, prescrizioni e guida per l'utilizzatore

- riporta le prescrizioni minime relative alla sicurezza degli apparecchi laser, composti da un solo laser con o senza dispositivo di alimentazione separato o da più laser in un sistema complesso ottico, elettrico o meccanico.
- si riferisce a tutte le applicazioni, come:
  - dimostrazione fenomeni fisici e ottici,
  - lavorazione materiali,
  - lettura e registrazione dati
  - trasmissione e visualizzazione dell'informazione.
- Sono inclusi i diodi che emettono luce (LED).

- Nel caso in cui un sistema laser costituisca una parte di un'apparecchiatura che è soggetta a un'altra norma per la sicurezza, ad esempio applicazione medica, si utilizza la presente norma che si applica in relazione ai rischi specifici derivanti dalle radiazioni laser.

Norma *CEI 76*

Classificazione CEI *76* - **CT** *76* - **Fascicolo** *3849 R*
Guida per l'utilizzazione di apparati laser

- contiene guide all'utilizzazione di apparati laser con lo scopo di fornire all'utilizzatore criteri di applicazione che permettano l'uso appropriato delle apparecchiature laser.
- Contiene le guide inerenti:
  - le applicazioni di apparati laser alle lavorazioni di materiali.
  - le applicazioni di apparati laser per misure industriali, civili e ambientali; presentazioni di immagini e giochi di luce.
  - le applicazioni di apparati laser a sistemi di telecomunicazioni e di trasmissioni dati per mezzo di fibre ottiche.
  - le applicazioni cliniche di apparati laser medicali. Per tutte le applicazioni che non rientrano nelle categorie suddette valgono i criteri d'uso di tipo generale indicati nella Guida B in quanto applicabile.

CEI 76 - Laboratori

Classificazione CEI *76* - CT *76* - Fascicolo *3850 R* Guida per l'utilizzazione di apparati laser per laboratori di ricerca

- contiene la Guida E per l'utilizzazione di apparati laser per laboratori di ricerca
- specifica le misure di sicurezza e i mezzi di controllo da adottare nella messa a punto e nella modifica di laser e/o apparati laser.
- La Guida è destinata a completare la serie di Guide per l'utilizzatore pubblicate sull'argomento e si affianca alla Norma CEI 76-2 riguardante la sicurezza delle radiazioni di apparati laser.
- costituisce la ristampa senza modifiche, secondo il nuovo progetto di veste editoriale, della Guida pari numero ed edizione (Fascicolo 1381 G).

Laser in medicina

- **Norma Italiana** *CEI 76-6* - **Classificazione CEI** *76-6* - **CT** *76* - **Fascicolo** *5928* - Sicurezza degli apparecchi laser - Parte 8: Guida all'uso degli apparecchi laser in medicina

- fornisce informazioni al datore di lavoro e all'utilizzatore sull'uso sicuro dei laser e delle apparecchiature laser di classe 3B o 4 per applicazioni diagnostiche e terapeutiche in strutture sanitarie.

- Descrive le misure di controllo raccomandate per la sicurezza dei pazienti, del personale, del personale addetto alla manutenzione e quanti altri abbiano a che fare con tali tipi di apparecchi.

- Tratta le seguenti problematiche:
  - sistemi di trasmissione del fascio;
  - effetti biologici della radiazione laser;
  - rapporto di infortuni e situazioni pericolose;
  - elenco delle verifiche.

Norma *CEI EN 60825-2*

Classificazione CEI *76-4* **- CT** *76* **- Fascicolo** *6121*

Sicurezza degli apparecchi laser - Parte 2: Sicurezza dei sistemi di telecomunicazione a fibre ottiche

- fornisce le prescrizioni e le linee guida specifiche per l'utilizzo senza pericolo dei sistemi a fibre ottiche di telecomunicazioni e/o controllo dove la potenza ottica può essere accessibile a grande distanza dalla sorgente ottica.
- non si applica a sistemi a fibre ottiche progettati per trasmettere potenza ottica per applicazioni quali la lavorazione dei materiali o cure mediche.

- annulla e sostituisce la CEI EN 60825-2 (1997) e sua Modifica,

Norma *CEI EN 60825-4*

Classificazione CEI *76-5* - **CT** *76* - **Fascicolo** *4604* Sicurezza degli apparecchi laser - Parte 4: Barriere per laser

- specifica le protezioni relative alle barriere per laser permanenti e temporanee che racchiudono la zona di lavoro di una macchina di lavorazione laser e per dispositivi di protezione.
- si applica a tutte le parti componenti di una barriera per laser, inclusi schermi e finestre di osservazione, pannelli, pareti per laser e pareti.
- indica come valutare e specificare le proprietà protettive di una barriera per laser.

Norma CEI EN 61040

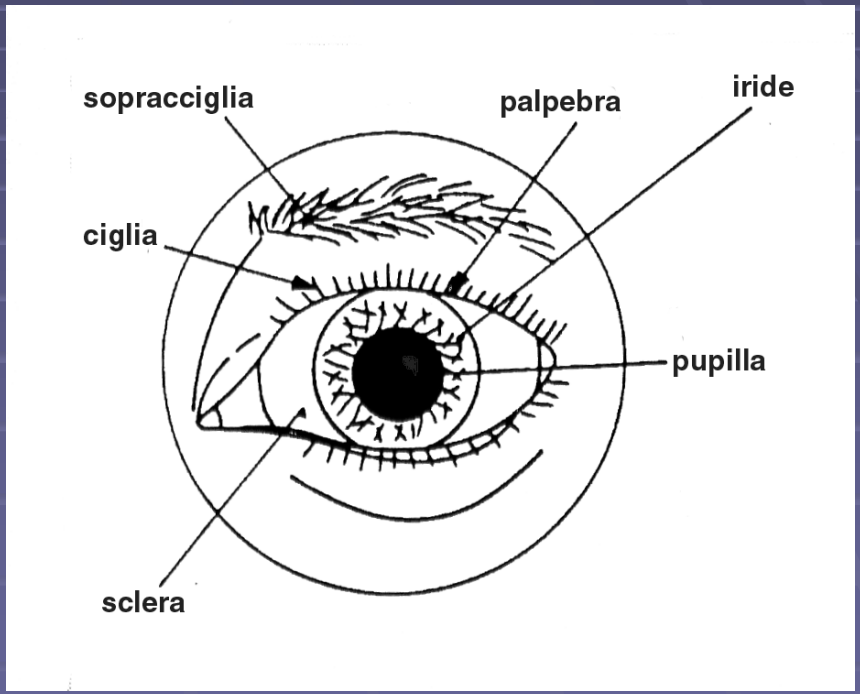
Rilevatori, strumenti e apparati per la misura della potenza e dell'energia della radiazione laser

- si applica agli strumenti e agli apparati che misurano la potenza e l'energia di radiazione laser nella gamma spettrale ottica (con lunghezza d'onda da 100 nm a 1 mm).
- ha per oggetto di stabilire le definizioni, le prescrizioni minime e le procedure di prova adatte per le caratteristiche e le norme di fabbricazione di rivelatori, strumenti e apparati per la misura della potenza e dell'energia della radiazione laser.

EFFETTI BIOLOGICI

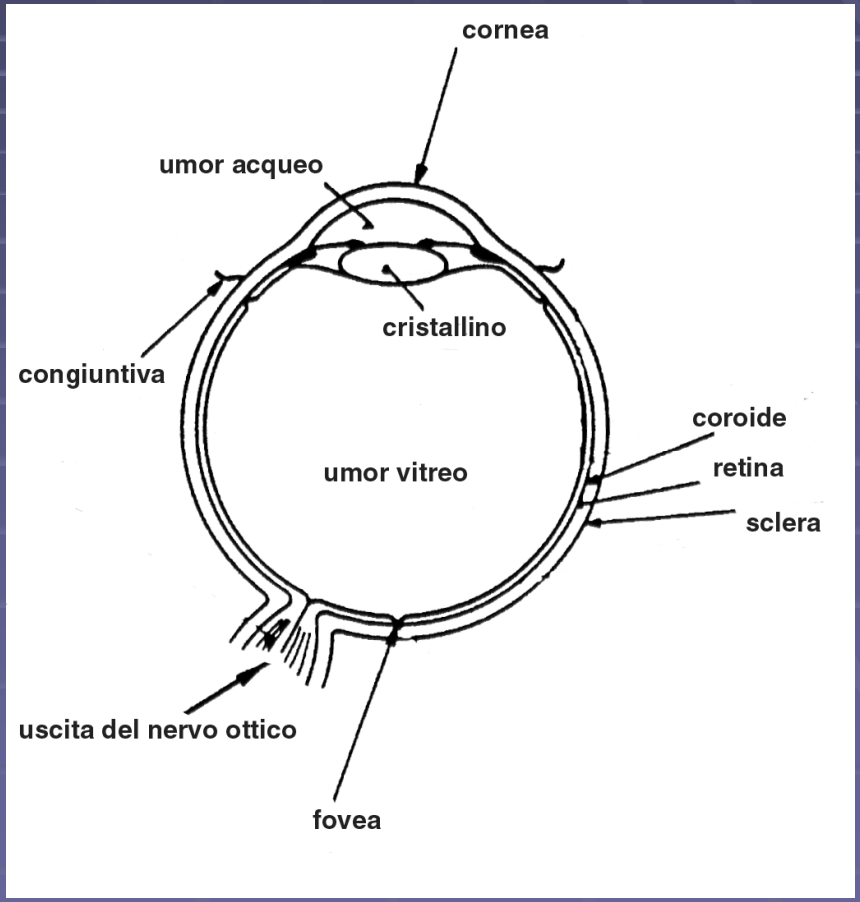
Anatomia dell'occhio

- Schema della struttura esterna di un occhio sinistro.
- La distanza fra le palpebre che lo ricoprono limita il campo visivo una superficie a forma di mandorla.



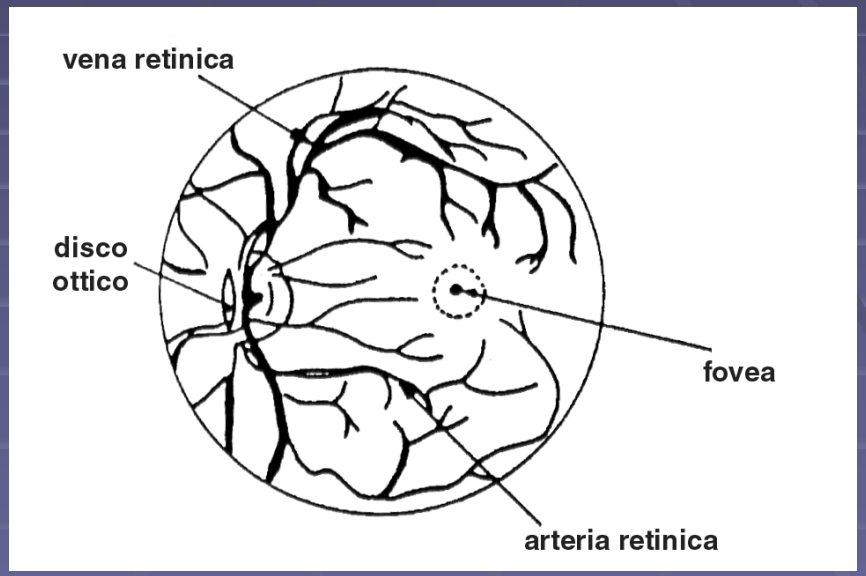
Parti dell’occhio

- Schema della sezione orizzontale di un occhio sinistro.
- L'occhio è diviso in due parti
- la camera frontale o anteriore è limitata dalla cornea, dall'iride e dal cristallino,
- la camera posteriore è limitata dalla retina e contiene l'umor vitreo, di aspetto gelatinoso.



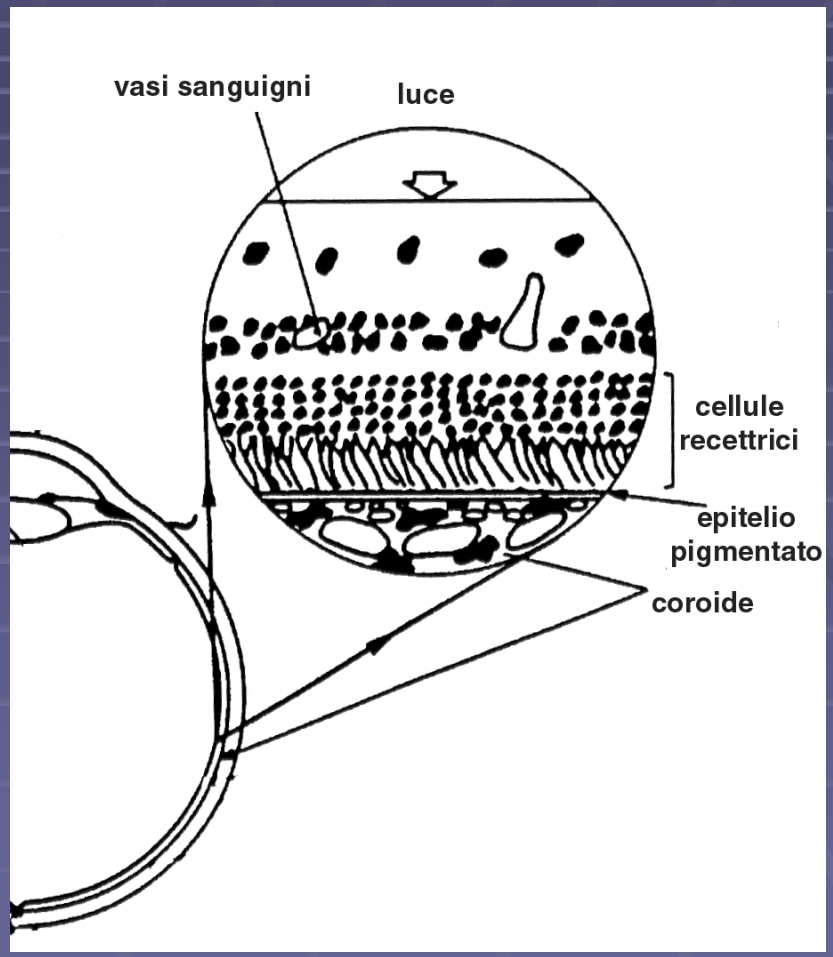
Fondo oculare

- Il fondo oculare si vede con l'oftalmoscopio che illumina l'interno dell'occhio permettendo così di osservarlo.
- Il fondo oculare appare rossastro, ma si possono vedere chiaramente i principali vasi della retina.
- Gli altri elementi principali sono il disco ottico, di colore biancastro, e la fovea.
- La fovea è il centro della macula ed è responsabile della visione nitida

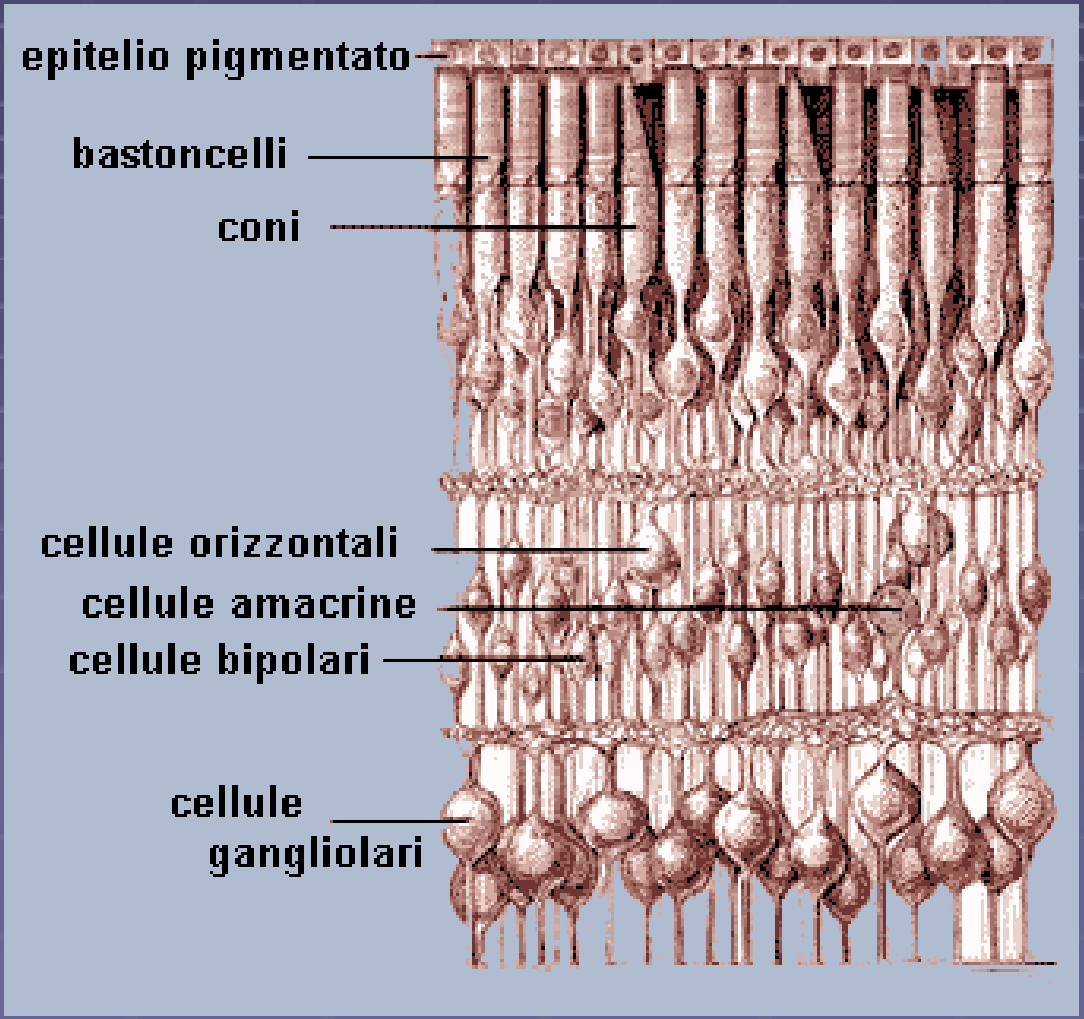


Retina

- Struttura della retina ingrandita approssimativamente di 320 volte.
- La retina è composta da una serie di strati di cellule nervose che ricoprono le cellule fotosensibili: coni e bastoncelli;
- Sotto coni e bastoncelli si trova l'epitelio pigmentato che contiene un pigmento nero brunastro chiamato melanina;
- e al di sotto vi è uno strato di sottili vasi sanguigni, i coriocapillari.
- L'ultimo strato assorbente è la coroide che contiene sia cellule pigmentale sia vasi sanguigni.



Tessuto retineo

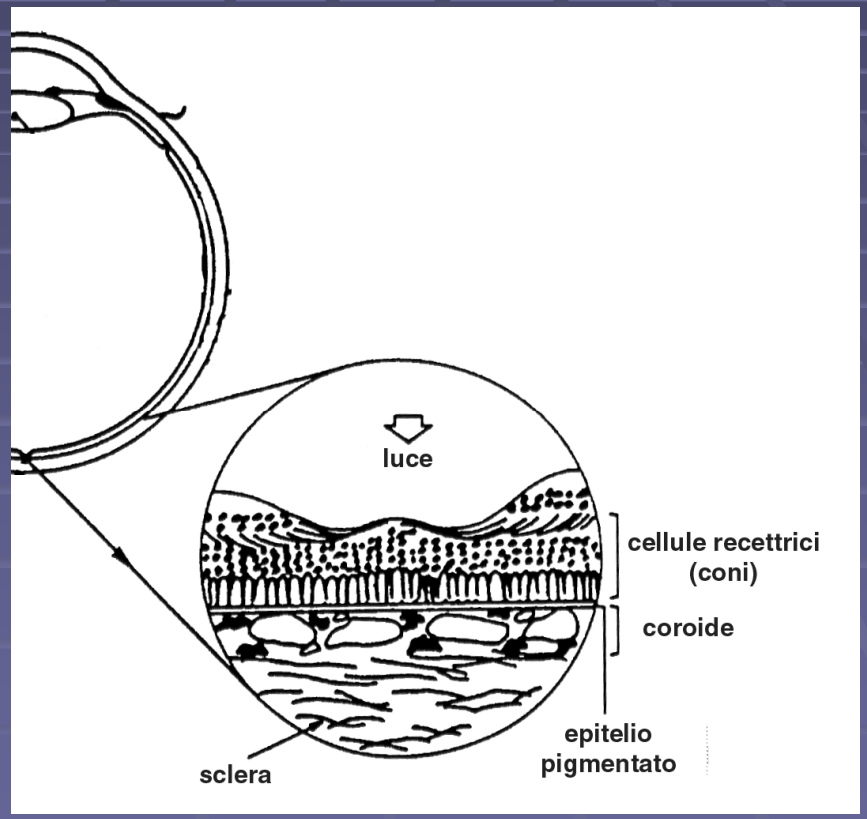


Macula

- La macula è una piccola zona ellissoidale del diametro di circa 2,5 mm posta sulla retina in opposizione alla pupilla
- Contiene solo coni e controlla la capacità di discriminazione fine: riconoscere gli oggetti ed i colori, leggere e scrivere.
- Il resto della retina serve ad ampliare il campo visivo e ad attirare l'attenzione sugli oggetti individuati.
- La fovea è un affossamento interno alla macula ed è la responsabile della visione più nitida

Fovea

- Struttura della fovea ingrandita circa 150 volte
- Sono presenti solo i coni
- Le cellule nervose sono spostate radialmente verso l'esterno
- Il pigmento maculare che assorbe fortemente fra 400 e 500 nm è situato nello strato fibroso di Henle



Effetti sui tessuti

- Il meccanismo con il quale la radiazione laser provoca un danno è simile per tutti i sistemi biologici
  - interazioni di calore,
  - fenomeni termoacustici transitori,
  - processi fotochimici
  - effetti non lineari.

Parametri fisici coinvolti

- La prevalenza di un effetto sull'altro dipende dai parametri fisici della radiazione:
  - lunghezza d'onda
  - durata dell'impulso
  - dimensione dell'immagine
  - irradiamento
  - esposizione energetica.

Irradiamento e esposizione energetica

- **Irradiamento**: rapporto fra il flusso radiante incidente $d\Phi$ su un elemento di superficie e l'area A di quell'elemento:

$$E = \frac{d\Phi}{dA} \quad \left(\mathrm{W \cdot m^{-2}}\right)$$

- **Esposizione Energetica**: in un punto di una superficie, energia radiante incidente su un elemento di superficie divisa per l'area di questo elemento:

$$H = \frac{dQ}{dA} = \int \mathrm{E\,dt} \quad \left(\mathrm{J \cdot m^{-2}}\right)$$

Energia e potenza radiante

- **Energia radiante**: integrale nel tempo del flusso radiante su una durata Δt:

$$Q = \int_{\Delta t} \Phi \, \mathrm{dt} \quad (J)$$

- **Potenza radiante, flusso radiante**: potenza emessa, trasmessa o ricevuta sotto forma di radiazione:

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} \quad (W)$$

Diametro del fascio

- Diametro d_u del più piccolo cerchio che contiene l'u% della potenza (o dell'energia) totale del fascio;
- Ai fini della Norma si considera d_{63} che, nel caso di un fascio gaussiano corrisponde alla soglia sotto la quale l'irradiamento (o l'esposizione energetica) scende sotto 1/e

Sorgente apparente

- L'oggetto reale o virtuale che forma la più piccola immagine retinica possibile
- Definizione usata per localizzare la posizione di un'origine apparente della radiazione laser per radiazioni focalizzabili sulla retina (400 nm $\leq \lambda \leq$ 1400 nm)
- L'origine apparente di un fascio collimato (divergenza tendente a zero) è posta all'infinito
- Si può usare anche nel campo esteso 302,5 nm $\leq \lambda \leq$ 4000 nm perché la focalizzazione è possibile con lenti convenzionali

Diametro apparente (α)

- Angolo sotteso da una sorgente apparente osservata in un punto dello spazio.
- In base al valore di α si hanno sorgenti piccole o estese:
  - **Piccola sorgente**: $\alpha < \alpha_{min}$ (1,5 mrad). I valori limite non dipendono da α
  - **Sorgente estesa**: $\alpha > a_{min}$. I valori limite dipendono da α
  - Se $\alpha > \alpha_{max}$ (100 mrad) la classificazione del laser non dipende più dal diametro apparente del fascio

Lunghezza d'onda

- Determina il tipo di interazione radiazione-tessuto
- Gli effetti cambiano a seconda di come e dove viene ad interagire col tessuto e delle modalità con cui il tessuto rilascia l'energia ricevuta
- L'occhio non è trasparente a certe lunghezze d'onda, mentre altre vengono focalizzate sulla retina

Durata impulso

In generale, nelle esposizioni la cui potenza supera la soglia di esposizione necessaria a produrre effetti, il tipo di meccanismo predominante dipende in larga misura dalla durata dell'impulso dell'esposizione.

- ≤ **ns**: fenomeni acustici transitori ed effetti non lineari;
- **da 1 ms a diversi secondi**: effetti termici
- **>10 s**: effetti fotochimici.

Effetti interazione

- **Effetti termici**: la radiazione assorbita viene rilasciata sotto forma di calore che riscalda il tessuto
- **Effetti fotochimici**: la radiazione assorbita produce una reazione di una specie chimica allo stato eccitato
- **Effetti non lineari**: laser Q-switched o mode-locked

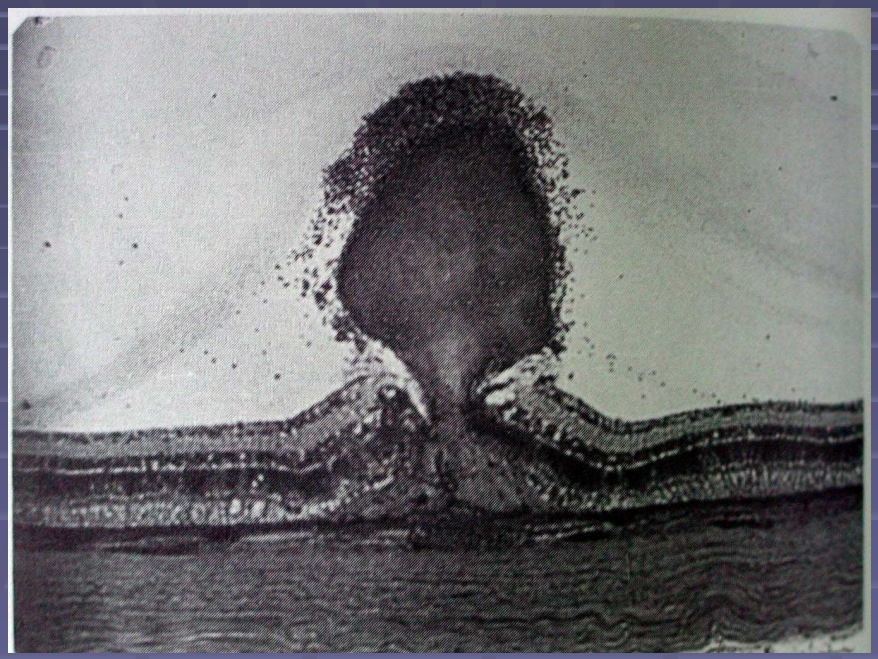
Effetti termici

- Si ha un riscaldamento dei tessuti con denaturazione proteine (bruciatura)
- Il danno termico è spesso limitato ad una zona ristretta vicina al luogo dove è centrato il fascio della radiazione
- Con laser a impulso lungo o continuo la zona interessata si estende progressivamente per conduzione

Efffetti non lineari

- Laser a brevi impulsi giganti (Q-switched o mode-locked);
- La cellula riceve tanta energia in tempi molto brevi;
- I componenti liquidi gassificano e le cellule esplodono
- Gli effetti di pressione possono provocare spostamento di masse e recisione di tessuti lontani

Immagine effetti non lineari

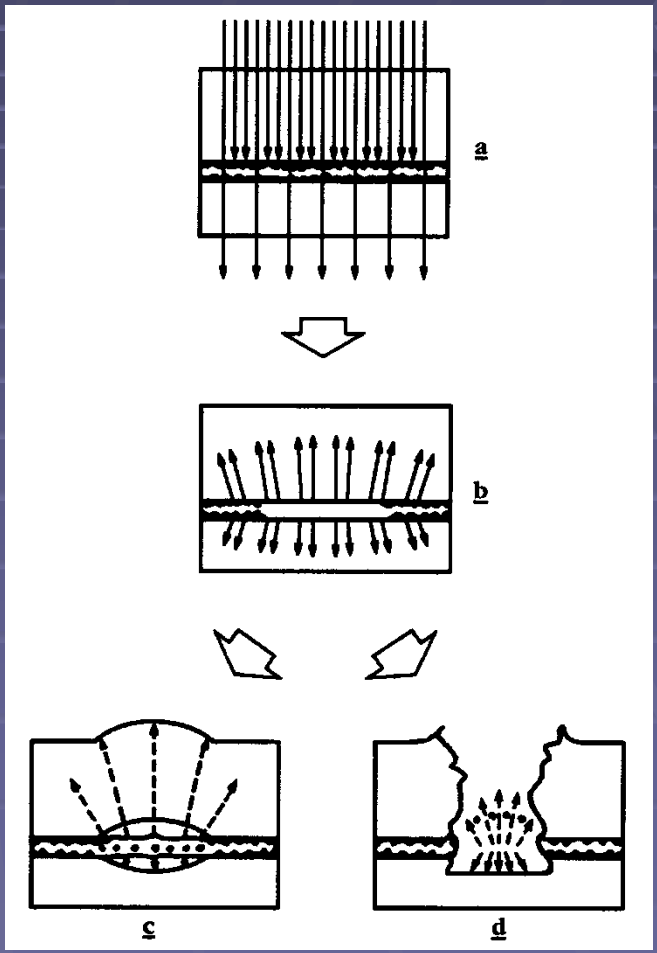


Rottura esplosiva della retina con emorragia nell'umor vitreo dovuta a laser Nd:YAG Q-switched con E=105,4 mJ esposizione ad un singolo impulso a 100 m

Xu Jiemin et al. – Health Physics Vol. 56, No. 5 (1989)

Riepilogo effetti termici

A. L'energia laser è assorbita dal sistema
B. L'energia assorbita produce calore che è trasmesso ai tessuti circostanti
C. Per laser a impulsi lunghi o a emissione continua la persistenza del fronte termico produce allargamento lesione
D. Per laser a impulsi corti la grande densità di potenza dà luogo a rottura esplosiva delle cellule ed a lesione per spostamento



Effetti fotochimici

- All'assorbimento non consegue rilassamento ma reazione chimica allo stato eccitato
- Tali reazioni possono provocare variazioni irreversibili della pelle, del cristallino ed in particolare della retina
- Tali danni si verificano soprattutto per esposizioni prolungate a radiazioni UV o visibile a bassa lunghezza d'onda

Interazione con l'occhio

- L'occhio è particolarmente adatto a ricevere e trasferire radiazione elettromagnetica
- La parte dell'occhio che interagisce con la radiazione dipende dalla lunghezza d'onda
- Al variare della λ si hanno le seguenti interazioni:
  - Retina (visibile, IR-A)
  - Cristallino (UV-A)
  - Cornea (UV-B, UV-C, IR-B, IR-C)
- Cornea, umor vitreo ed umor acqueo sono trasparenti a radiazioni con λ compreso fra 400 e 1400 nm

Potenza che interessa la retina

- La luce che arriva alla retina viene focalizzata. L'aumento dell'irradiamento è proporzionale al rapporto tra superficie della pupilla e immagine retinica
- Il diametro massimo di una pupilla giovane 7 mm
- Immagine retinica 10-20 μm, corrispondente ad α_{min}
- Aumento irradiamento ~$2 \cdot 10^5$
- Es. fascio 50 W $\cdot$ m^{-2} sulla cornea diventa $1 \cdot 10^7$ sulla retina W $\cdot$ m^{-2}

Visibile e vicino infrarosso

- La radiazione fra 400 e 1400 nm viene focalizzata sulla retina
- Di questa, fino al 5% della luce viene assorbito dai pigmenti visivi di coni e bastoncelli.
- La maggior parte viene assorbita dalla **melanina** che si trova nell'epitelio pigmentato
- nella regione maculare una certa energia nell'intervallo 400 nm - 500 nm viene assorbita dal pigmento maculare giallo.
- L'energia assorbita provoca un riscaldamento e brucia l'epitelio pigmentato, i coni e i bastoncelli adiacenti.

Visibile e vicino infrarosso

- **La bruciatura o lesione può causare la perdita della vista.**
- La perdita della vista può essere o non essere permanente.
- In generale, si nota una diminuzione della vista solo quando sia stata coinvolta la parte centrale o foveale della macula.
- I danni fotochimici, benché non di natura termica, sono localizzati nell'epitelio pigmentato.

Danni alla fovea

- L'angolo visivo sotteso dalla fovea è approssimativamente uguale a quello sotteso dalla luna (circa 33').
- Se la fovea è danneggiata si vede all'inizio una macchia bianca sfocata che oscura la zona centrale della visione
- In due o più settimane la macchia può diventare nera
- Alla fine la persona colpita può cessare di vedere la macchia, che risulta però evidente fissando un foglio bianco

Lesioni periferiche alla retina

- Le lesioni periferiche sono registrate soggettivamente solo quando la retina ha subito un danno importante
- Le lesioni periferiche leggere passano inosservate possono anche non essere rilevate durante un esame sistematico dell'occhio

Dipendenza dalla distanza
fascio collimato

- il pericolo è virtualmente indipendente dalla distanza tra la sorgente della radiazione e l'occhio,
- Per distanze dalla sorgente superiori a 10 cm, si assume che l'immagine retinica venga comunque focalizzata in una macchia di dimensioni caratteristiche di circa 10-20 μm
- In questo caso la più piccola zona di pericolo è definita da α_{min}, che sottende sulla retina an'area di circa 25 μm.

Dipendenza dalla distanza
sorgente divergente

- Nel caso di una sorgente puntiforme con fascio divergente, fino alla distanza di accomodamento (10 cm), il pericolo aumenta con la diminuzione della distanza tra il punto di raggio minimo del fascio e l'occhio
- Questo perché la potenza raccolta aumenta mentre la dimensione dell'immagine sulla retina rimane uguale
- Sotto la distanza di accomodamento, l'immagine retinica cresce ed il pericolo diminuisce
- Per la visione con strumenti ottici tipo binocoli o telescopi si considera una distanza di accomodamento di 2 m con apertura 50 mm considerata la distanza più breve di visione nitida

Dipendenza dalla distanza
sorgente estesa

- Il pericolo varia con la distanza tra la sorgente e l'occhio
- La diffusione di energia termica è meno efficiente per immagini di grandi dimensioni e dipende dalle dimensioni dell'immagine retinica
- I movimenti oculari propagano il danno per tempi di esposizione lunghi (laser continui a a impulsi lunghi).
- I danni fotochimici (predominanti tra 400 e 600 nm) continuano a non dipendere dalle dimensioni

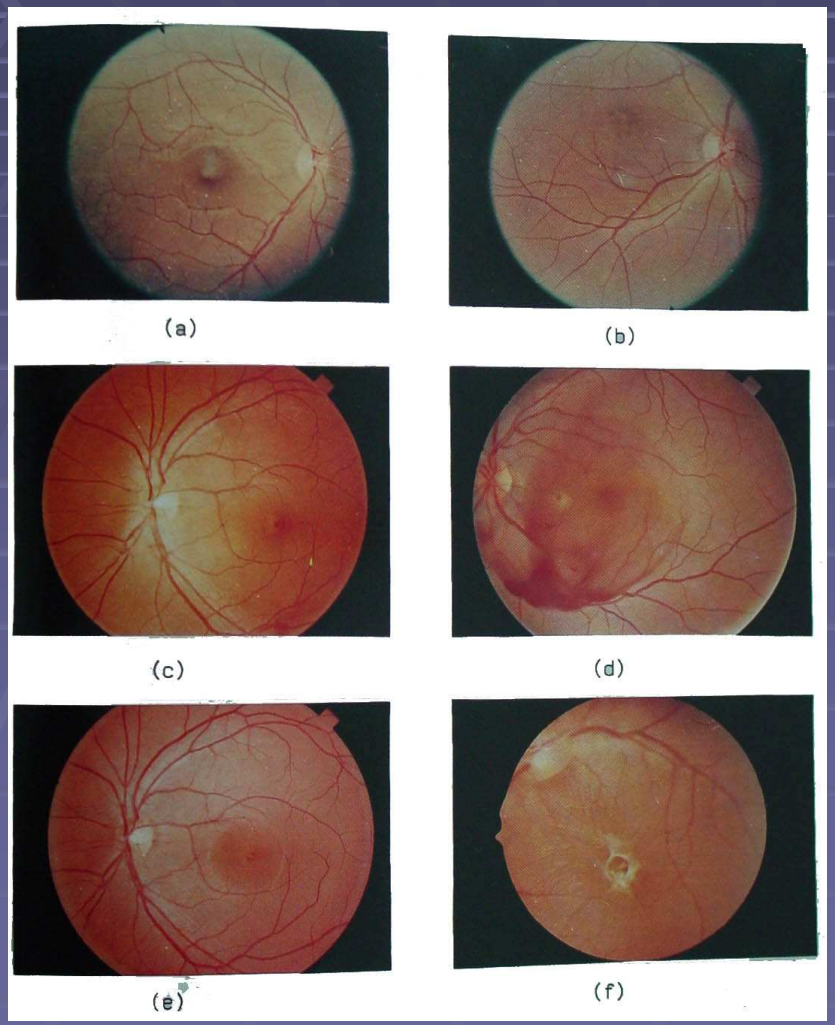
Movimenti dell'occhio

- I movimenti dell'occhio per accomodare la visione, detti saccadi, sono i movimenti più rapidi che il corpo umano può effettuare
- Contribuiscono ad aumentare la zona interessata dall'esposizione luminosa: a 0,25 s la macchia retinica è 50 μm, a 10 s è 75 μm, a 100 s è difficile ottenere una zona illuminata inferiore a 135 μm
- Gli studi sui movimenti degli occhi sono stati combinati per valutarli nel calcolo dei limiti di classificazione

Danni fotochimici

- non si ha dipendenza dalla dimensione della zona interessata per un'immagine stabilizzata
- Forte dipendenza da λ e tempo di esposizione
- Studi sulle lesioni provocate da archi di saldatura con diametri apparenti di 1-1,5 mrad hanno mostrato lesioni di 185-200 μm (angoli apparenti di 11-12 mrad)
- Il lungo tempo di esposizione permette ai movimenti oculari di irradiare un'ampia zona

Lesioni fondo oculare



(a) e (b): lesioni di I grado alla macula destra e sinistra dopo 3 giorni dall'esposizione ad un laser a rubino;

(c) Lesione di II grado dell'occhio sinistro dopo 3 giorni dall'esposizione ad un laser Nd:YAG

(d) Lesione di III grado dopo 4 ore dall'esposizione ad un laser Nd:YAG

(e) Macchia sulla macula dopo 10 giorni da una lesione di III grado

(f) Cicatrice sulla macula dopo 6 mesi

UV e lontano IR

- Per lunghezze d'onda inferiori a 400 nm o superiori a 1400 nm il pericolo maggiore è rappresentato dal danno al cristallino o alla cornea.
- A seconda della lunghezza d'onda, la radiazione ottica è assorbita preferenzialmente o esclusivamente dalla cornea o dal cristallino

Lontano IR (1400 ÷ 3000)

- Nell'intervallo di lunghezze d'onda 1500 nm - 2600 nm, la radiazione penetra nell'umore acqueo.
- L'effetto di riscaldamento viene quindi dissipato su un maggior volume dell'occhio,
- I livelli di esposizione per esposizioni inferiori a 10 s sono quindi maggiori.
- L'aumento maggiore dei livelli avviene per impulsi di durata molto breve e per λ di 1500 nm - 1800 nm, in cui il volume di assorbimento è il maggiore.

UV B (280 ÷ 315) e C (100 ÷ 280 nm)

- La superficie della cornea assorbe tutta la radiazione UV di tipo B e C
- Si ha una denaturazione delle proteine della cornea che produce una fotocheratite
- Spesso il danno è reversibile perché il tessuto della cornea si rigenera rapidamente

UV A (315÷400 nm)

- La radiazione arriva fino al cristallino ed all'umor acqueo
- In massima parte la radiazione viene assorbita dal cristallino con denaturazione fotochimica delle proteine e formazione di cataratta

Pericoli per la pelle

- la pelle può sopportare un'esposizione molto maggiore rispetto all'occhio.
- Con **visibile e IR** si produce da un lieve eritema a grosse vesciche, in ragione della potenza.
- Con **laser ad impulsi molto corti** di grande potenza di picco si ha una carbonizzazione color cenere, a cui può seguire o no un eritema
- un **irradiamento estremamente elevato** può produrre pigmentazione, ulcerazione, comparsa di cicatrici sulla pelle e danneggiamento degli organi sottostanti

Pericoli per la pelle

- Emissioni UV di 200 ÷ 280 nm producono eritema e possono provocare cancro della pelle e invecchiamento precoce
- Emissioni UV di 280 ÷ 400 nm producono pigmentazione e fotosensibilizzazione

Pericoli per la pelle effetti cumulativi

- Si è constatato che non sono frequenti gli effetti latenti o cumulativi della radiazione laser.
- Tuttavia, alcune ricerche limitate hanno suggerito che, in condizioni particolari, esposizioni locali ripetute possono sensibilizzare piccole zone del tessuto umano,
- Nell'intervallo di lunghezze d'onda 1500 nm - 2600 nm, gli studi sulla soglia biologica indicano che il pericolo di lesioni della pelle segue un percorso simile a quello dell'occhio. Per esposizioni sino a 10 s, l'EMP aumenta all'interno di questa regione spettrale.

Riepilogo effetti patologici

Regione spettrale CIE	Occhio	Pelle	
UV C (180–280 nm)	Fotocheratite	Eritema Accelerazione del processo di invecchiamento Aumento pigmentazione	
UV B (280–315 nm)			
UV A (315 – 400 nm)	Cataratta fotochimica	Annerimento del pigmento Reazioni fotosensibili	Ustioni
Visibile (400–700 nm)	Lesione fotochimica e termica della retina		
IR A (780-1400 nm)	Cataratta, bruciatura della retina	Bruciatura della pelle	
IR B (1400-3000 nm)	Infiammazione dell'umore acqueo, cataratta, bruciatura della cornea		
IR C (3-1000 νm)	Bruciatura della sola cornea		

CLASSIFICAZIONE DEI SISTEMI LASER

Necessità della classificazione

- I sistemi laser presentano un'elevata variabilità nella lunghezza d'onda della radiazione, nella sua potenza, nelle caratteristiche dell'impulso, nella geometria del fascio
- Non è possibile considerare i laser come un unico gruppo a cui sia possibile applicare limiti e comportamenti di sicurezza comuni

Criteri di classificazione

- I laser vengono classificati sulla base di Limiti di Emissione Accettabile (LEA)
- I LEA dipendono da:
  - Lunghezza d'onda
  - Durata di emissione
  - Numero di impulsi
  - Diametro apparente
- I LEA sono espressi in termini di potenza (W), energia (J), irradiamento ($W \cdot m^{-2}$) o esposizione energetica ($J \cdot m^{-2}$)
- I LEA sintetizzano tutti i dati riportati in letteratura

Responsabilità di classificazione

- È responsabilità del costruttore o del suo agente fornire la corretta classificazione di un apparecchio laser
- L'apparecchio deve essere classificato sulla base di quelle combinazioni di potenza(e) di emissione e di lunghezza(e) d'onda della radiazione accessibile che porti(no) alla collocazione nella classe più elevata

Classe 1

- Laser che sono sicuri nelle condizioni di funzionamento nelle condizioni ragionevolemente prevedibili, compresa la visione con strumenti ottici

Classe 1M

- Laser con 302,5 nm < λ < 4000 nm che sono sicuri nelle condizioni di funzionamento ragionevolmente prevedibili, ma che possono essere pericolosi se l'utilizzatore impiega ottiche di visualizzazione del raggio del raggio
- Sono per laser divergenti o di grande diametro che, se focalizzati con strumenti ottici, danno livelli energetici maggiori della classe 1

Classe 2

- Laser che emettono radiazione con 400 nm < λ < 700 nm per cui la protezione è garantita dalle reazioni di difesa naturale compreso il riflesso palpebrale.
- Ci si aspetta che tali reazioni consentano un adeguato livello di protezione in condizioni d'uso ragionevolmente prevedibili anche con l'uso di strumenti ottici per la visione diretta del fascio
- Se il laser presenta altre emissioni fuori dalla gamma di λ queste devono rispettare i requisiti per la classe 1

Classe 2M

- Laser che emettono radiazione con 400 nm < λ < 700 nm per cui la protezione è garantita dalle reazioni di difesa naturale compreso il riflesso palpebrale, ma per i quali l'osservazione può risultare più pericolosa se l'osservatore utilizza ottiche di visualizzazione del fascio
- Se il laser presenta altre emissioni fuori dalla gamma di λ queste devono rispettare i requisiti per la classe 1

Classe 3R

- Laser che emettono radiazione con 302,5 nm < λ < 10^6 nm in cui la visione diretta del fascio è potenzialmente pericolosa ma lo è meno di quella dei laser della successiva classe 3B e pertanto si applicano prescrizioni costruttive e di controllo minori
- Il limite di emissione accessibile è compreso entro cinque volte quello della classe 2 per 400 nm < λ < 700 nm e entro cinque volte quello della classe 1 per le altre λ

Classe 3B

- Laser che sono normalmente pericolosi in caso di visione diretta del fascio
- Le riflessioni diffuse non sono normalmente pericolose

Classe 4

- laser che sono in grado di produrre riflessioni diffuse pericolose
- possono causare lesioni alla pelle
- potrebbero costituire pericolo di incendio

Tabella riassuntiva

Classe 1	Sicuri nelle condizioni di funzionamento ragionevolmente prevedibili, compreso l'uso di strumenti ottici
Classe 1M	Emettono tra 302,5 e 4000 nm, sono sicuri nelle condizioni di funzionamento ma possono essere pericolosi usando ottiche all'interno del fascio
Classe 2	Emettono radiazione visibile (400-700 nm) che a causa del riflesso palpebrale non presenta normalmente rischi anche se potrebbe presentarne se fosse vista per tempi lunghi
Classe 2M	Emettono radiazione visibile (400-700 nm) che a causa del riflesso palpebrale non presenta normalmente rischi anche se potrebbe presentarne se fosse vista per tempi lunghi. Possono essere pericolosi usando ottiche all'interno del fascio
Classe 3R	Emettono tra 302,5 e 10^6 nm. La visione diretta del fascio è potenzialmente pericolosa, ma il rischio è inferiore a quello del laser di classe 3B e si applicano prescrizioni costruttive e misure di controllo minori.
Classe 3B	Laser pericolosi in caso di visione diretta del fascio, le cui riflessioni diffuse sono però normalmente sicure.
Classe 4	Lase in grado di produrre riflessioni diffuse pericolose. Possono causare lesioni alla pelle e potrebbero anche costituire un pericolo di incendio.

Regole di classificazione
Apparecchi a λ unica

- Un apparecchio laser ad una sola lunghezza d'onda, con una regione spettrale della linea di emissione abbastanza stretta da non modificare i LEA, è assegnato ad una classe quando la radiazione laser accessibile, misurata nelle condizioni appropriate per tale classe, supera il LEA di tutte le classi inferiori, ma non quello della classe assegnata.

Attribuzione alla classe 1M

- In presenza di fasci divergenti o di grande diametro che possono essere focalizzati con strumenti ottici, si misura il livello di radiazione che due condizioni di distanza e diaframma (riportate in tabella come condizione 1 e condizione 2);
- Se il livello misurato nelle condizioni 1 e 2 è inferiore o uguale al LEA della classe 1, il laser è attribuito alla classe 1

Attribuzione alla classe 1M

- Se il livello misurato nelle condizioni 1 e 2 è superiore al LEA della classe 1 ma inferiore a quello della classe 3B si misura il livello di radiazione nelle condizioni di distanza e diaframma normali
- Se il livello misurato in queste condizioni è inferiore alla classe 1, il laser è di classe 1M

Attribuzione alla classe 2M

- Si effettuano le stesse operazioni per l'attribuzione alla classe 1M ma considerando al posto della classe 1 la classe 2.
- Questa classe vale solo per 400 nm < λ < 700 nm e per tempi di esposizione inferiori a 0,25 s.

Regole di classificazione
Apparecchi a più λ

- Occorre vedere se le λ sono da considerarsi additive o no (c'è un'apposita tabella)
- λ **additive**: il laser è assegnato ad una classe quando la somma dei rapporti della radiazione laser accessibile, rispetto ai LEA di quelle lunghezze d'onda è superiore all'unità per tutte le classi inferiori, ma non per la classe assegnata.
- λ **non additive**: il laser è assegnato ad una classe quando la radiazione laser accessibile, supera i LEA di tutte le classi inferiori per almeno una lunghezza d'onda, ma non supera i LEA della classe assegnata per nessuna lunghezza d'onda.

Additività di radiazioni differenti

Regione spettrale	UV-C e UV-B 180 ÷ 315 nm	UV-A 315 ÷ 400 nm	Visibile e IR-A 400 ÷ 1400 nm	IR-B e IR-C 1400 ÷ 10^6 nm
UV-C e UV-B 180 ÷ 315 nm	occhio pelle	—	—	—
UV-A 315 ÷ 400 nm	—	occhio pelle	pelle	occhio pelle
Visibile e IR-A 400 ÷ 1400 nm	—	pelle	occhio pelle	pelle
IR-B e IR-C 1400 ÷ 10^6 nm	—	occhio pelle	pelle	occhio pelle

Radiazione da sorgenti estese

- Sono per esempio radiazioni riflesse da superfici diffondenti viste da vicino o raggi con grande divergenza visti da lontano
- Il pericolo per gli occhi dovuto a sorgenti laser con 400 nm < λ < 1400 nm, dipende dal diametro apparente della sorgente.
- Una sorgente è considerata estesa quando il diametro apparente della sorgente è maggiore di α_{min} (1,5 mrad).
- Per le sorgenti il cui diametro apparente è minore o uguale a α_{min} il LEA è indipendente dal diametro apparente α della sorgente.

Sorgenti estese

- **rischio termico della retina** (da 400 nm a 1400 nm): i LEA per le sorgenti estese sono direttamente proporzionati al diametro apparente della sorgente.
- **rischio fotochimico della retina** (da 400 nm a 600 nm): per esposizioni superiori ad 1 s, i LEA non variano direttamente con il diametro apparente della sorgente, ma, in funzione della durata di esposizione. Per la misura si fa uso di un angolo limite di accettazione γ_p di 11 mrad o più.

Sorgenti estese
limiti termici

- La dipendenza del LEA dal diametro apparente per il rischio termico viene introdotta per sorgenti con $\alpha_{min} \leq \alpha \leq \alpha_{max}$ e $400 < \lambda < 1400$ nm;
- A tale scopo si definisce un coefficiente C_6 tale che:
  - $C_6 = 1$ per $\alpha \leq \alpha_{min}$;
  - $C_6 = \alpha/\alpha_{min}$ per $\alpha_{min} \leq \alpha \leq \alpha_{max}$
  - $C_6 = \alpha_{max} / \alpha_{min}$ per $\alpha > \alpha_{max}$

Sorgenti multiple e non-circolari

- sorgente apparente:
  - Costituita da molteplici sorgenti multiformi
  - Lineare con diametro apparente $>\alpha_{min}$ e λ compresa fra 400 e 1400 nm
- Le misure e le valutazioni si devono effettuare per ogni singolo punto o insieme di punti in modo da assicurare che l'esposizione non superi i LEA per ogni possibile angolo sotteso da ogni area parziale per cui $\alpha_{min} < \alpha < \alpha_{max}$

Laser a impulsi ripetitivi o modulati

- Si devono considerare le seguenti condizioni

i. L'esposizione ad ogni singolo impulso appartenente ad un treno di impulsi non deve superare il LEA per un singolo impulso.

ii. La potenza media di un impulso di un treno di impulsi di durata T non deve superare la potenza corrispondente al LEA per un impulso singolo di durata *T*

iii. L'energia media di un singolo impulso non deve superare il LEA per un impulso singolo moltiplicato per il fattore di correzione C_5.

Laser a impulsi

- Se vengono impiegati impulsi di ampiezza variabile, la valutazione viene fatta separatamente per impulsi di ciascuna ampiezza e per l'intero treno di impulsi.
- Se il LEA calcolato è inferiore a quello per funzionamento continuo alla stessa potenza di picco, si prende quest'ultimo
- Se si hanno impulsi molto brevi ci sono delle regole per raggrupparli in pacchetti di impulsi più lunghi
- Il LEA per 400 nm < λ < 10^6 nm viene determinato utilizzando la più restrittiva delle prescrizioni i), ii) e iii).
- Per altre lunghezze d'onda, il LEA viene determinato utilizzando la più restrittiva delle prescrizioni i) e ii).
- La prescrizione iii) si applica solo ai limiti termici non a quelli fotochimici.

Condizioni di misura

- Per valutare i limiti si possono effettuare misure di irradiamento o esposizione energetica del sistema, a meno che la classe non si possa desumere dalle caratteristiche intrinseche del sistema
- Le misure vanno effettuate
  - nelle condizioni e con le procedure che portano al massimo valore
  - Con i comandi regolati per dare il massimo di emissione e con eventuali accessori che possono aumentare il rischio (ottiche collimatrici etc.)
  - Deve essere limitata la radiazione collaterale (radiazione non laser)

Geometria della misura

- Ogni misura va effettuata ad una determinata distanza dalla sorgente e con un diaframma specificato (c'è un'apposita tabella)

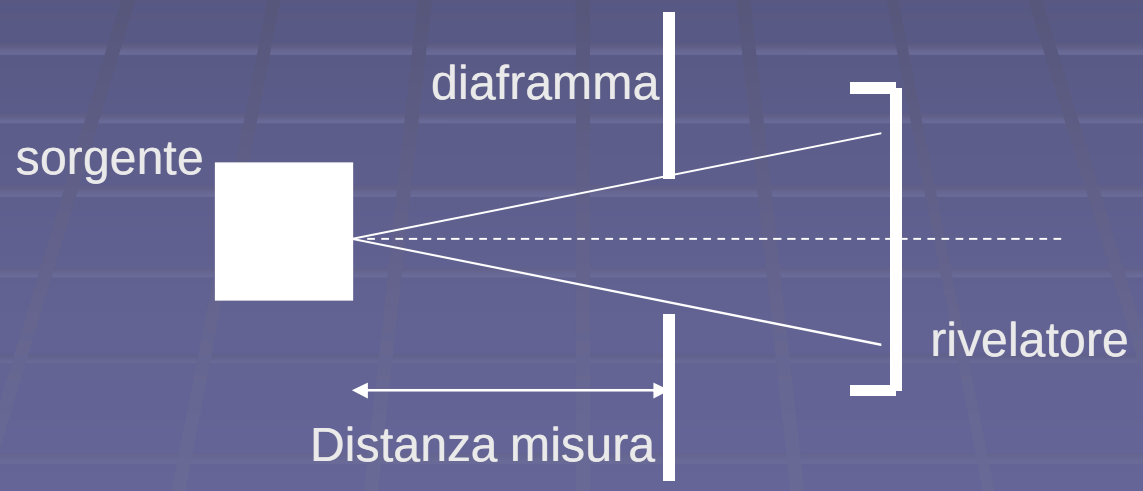


Tabella condizioni di misura

Lunghezza d'onda nm	Per valori espressi in potenza W o energia J				Per irradiamento W/m^2 oppure per esposizione energetica J/m^2	
	Condizione 1		Condizione 2			
	Diaframma mm	Distanza mm	Diaframma mm	Distanza mm	Diaframma limite mm	Distanza mm
< 302,5	-	-	7	14	1	0
302,5 ÷ 400	25	2000	7	14	1	100
400 ÷ 1400	50	2000	7	r	7	100
4000 ÷ 4000	25	2000	7	14	1 per $t \leq 0,35$ s 1,5 $t^{3/8}$ per $0,35 < t < 10$ 3,5 per $t \leq 10$	100
302,5 ÷ 10^5	-	-	7	14	1 per $t \leq 0,35$ s 1,5 $t^{3/8}$ per $0,35 < t < 10$ 3,5 per $t \leq 10$	0
10^5 ÷ 10^6	-	-	7	14	11	0

Significato condizioni di misura

- **Diametro 1 mm λ 180-400 nm**: area in cui ha luogo la diffusione (scattering) nella cornea. L'ICNIRP raccomanda 3,5 mm per esposizioni prolungate (movimenti dell'occhio);
- **Diametro 7 mm λ 400-1400 nm**: Diametro della pupilla dilatata e movimento laterale nella esposizioni ad emissione continua
- Per λ > 1400 nm il diametro varia da 1 mm (t < 0,35 s) fino a 3,5 mm (t > 10 s): maggiore diffusione termica e spostamento del tessuto bersaglio rispetto al raggio
- **Diametro 11 mm per l 10^5-10^6**: l'apertura deve essere circa 10 volte λ per superare il limite di diffrazione.

Movimenti dell'occhio

- Hanno l'effetto di far aumentare la zona irradiata
- La dimensione di questa zona cresce al crescere del tempo di esposizione
- Per i danni termici è stato introdotto un tempo di transizione T_2 a cui i movimenti dell'occhio compensano il rischio che si avrebbe aumentando il tempo di esposizione per un occhio fisso
- T_2 dipende dal diametro apparente della sorgente:

$$T_2 = \begin{cases} \text{se } \alpha < \alpha_{\min} & 10\,\text{s} \\ \text{se } \alpha_{\min} < \alpha < \alpha_{\max} & 10 \cdot 10^{\frac{\alpha - \alpha_{\min}}{98,5}}\ s \\ \text{se } \alpha > \alpha_{\max} & 100\,\text{s} \end{cases}$$

Movimenti dell'occhio

- T_2 è 10 s per $\alpha<\alpha_{min}$; 100 per $\alpha>\alpha_{max}$, varia tra 10 e 100 per $\alpha_{min} < \alpha < \alpha_{max}$
- Se $t < T_2$, il limite è proporzionale a $t^{0,75}$;
- se $t < T_2$, il limite non dipende più da t ed è moltiplicato per $T_2^{-0,25}$
- Basta un piccolo aumento dell'area esposta per compensare un più lungo tempo di esposizione
- Quando le dimensioni della sorgente aumentano, la compensazione è minore e T_2 si innalza

Pericolo fotochimico

- Per 400 < λ < 600 nm e t > 10 s deve essere valutato anche il pericolo fotochimico
- In questo caso si il limite è il più gravoso tra quello calcolato per il pericolo fotochimico e per il pericolo termico
- La dipendenza da l del pericolo fotochimico è espressa mediante il coefficiente C_3:

$$C_3 = 10^{0,02(\lambda - 450)}$$

- La dipendenza dal tempo è espressa mediante l'angolo di accettazione

Angolo di accettazione

- Angolo entro il quale il rilevatore risponde alla radiazione ottica.
- Per le misure sui limiti fotochimici della retina l'angolo di accettazione limite γ_p è:

Tempo esposizione (s)	γ_p (mrad)
≤ 100 s	11
$100 \div 10^4$	$1{,}1\ t^{0.5}$
$10^4 \div 3 \cdot 10^4$	110

- Quando $\alpha > \gamma_p$; $\gamma \leq \gamma_p$ altrimenti basta che $\gamma > \alpha$
- Per tutti gli altri limiti basta che $\gamma > \alpha$

ESPOSIZIONI MASSIME PERMESSE

Definizione

- Livello di radiazione laser a cui possono essere esposte le persone in condizioni normali senza subire effetti dannosi
- Ve ne sono per l'occhio e per la pelle
- Rappresentano il livello massimo a cui il tessuto può essere esposto senza subire un danno a breve o lungo termine
- Dipendono dalla λ, dalla durata dell'impulso o dal tempo di esposizione, dal tipo di tessuto esposto e, nel visibile, dalla dimensione dell'immagine retinica

Osservazioni generali

- I valori di esposizione massima permessa:
  - sono destinati agli utilizzatori,
  - sono fissati al di sotto dei livelli di pericolo conosciuti
  - si basano sulle più valide informazioni disponibili ottenute da studi sperimentali.
- I valori di EMP sono una guida nel controllo delle esposizioni
- Non vanno considerati come linee divisorie precise tra i livelli di sicurezza e i livelli di pericolo.
- In tutti i casi, l'esposizione alla radiazione laser deve essere la più bassa possibile.
- Quando un laser emette una radiazione su più lunghezze d'onda molto differenti, o quando degli impulsi sono sovrapposti ad un fondo di emissione continua, il calcolo del rischio può essere complesso.

Emissioni su più λ

- Quando un sistema emette su più λ molto differenti o quando degli impulsi sono sovrapposti ad un fondo di emissione continua si può assumere un effetto additivo purché:
  a) La larghezza degli impulsi o la durata di esposizione siano dello stesso ordine di grandezza, e
  b) le regioni spettrali siano indicate come additive dai simboli (o) per l'esposizione oculare e (p) per l'esposizione della pelle nell'apposita tabella.
- Se le lunghezze d'onda non sono indicate come additive, i rischi dovrebbero essere valutati separatamente

Diaframma limite

- È il diametro di una superficie circolare sulla quale l'irradiamento o l'esposizione energetica devono essere mediati;
- Il diaframma limite dipende dall'organo esposto (occhio o pelle) e dalla λ della radiazione
- Nelle misure di esposizione si deve usare un'apertura delle dimensioni del diaframma limite

Valori diaframma limite

Regione spettrale	Diametro del diaframma	
	occhio	pelle
180 ÷ 400	1	3,5
≤ 400 ÷ 1400	7	3,5
≤ 1400 ÷ 10^5	1 per $t \leq 0{,}35$ s 1,5 per $0{,}35 < t < 10$ s 3,5 per $t \geq 10$ s	3,5
≤ 10^5 ÷ 10^6	11	11

Sorgenti estese

- Nel caso di visioni di riflessioni diffuse, di LED, insiemi laser si devono applicare delle correzioni al calcolo dell'EMP;
- In particolare, per il rischio termico con radiazioni con $400 < \lambda < 1400$ nm si ha un coefficiente C6 tale che:
  - C6 = 1 per $\alpha \leq \alpha_{min}$;
  - C6 = α/α_{min} per $\alpha_{min} \leq \alpha \leq \alpha_{max}$
  - C6 = $\alpha_{max}/\alpha_{min}$ per $\alpha > \alpha_{max}$

Laser modulati o impulsati

- Per calcolare l'EMP di laser a impulsi si considerano tre condizioni:

a) L'esposizione ad ogni singolo impulso appartenente ad un treno di impulsi non deve superare l'EMP per un impulso singolo.

b) L'esposizione media per un treno di impulsi di durata di esposizione *T* non deve superare l'EMP per un impulso singolo di durata di esposizione *T*

c) L'esposizione media ad impulsi appartenenti ad un treno di impulsi non deve superare l'EMP per un impulso singolo moltiplicata per il fattore di correzione C_5:

$$EMP_{treno} = EMP_{singolo} \times C_5$$

$$C_5 = N^{-1/4}$$

Grafico EMP occhio

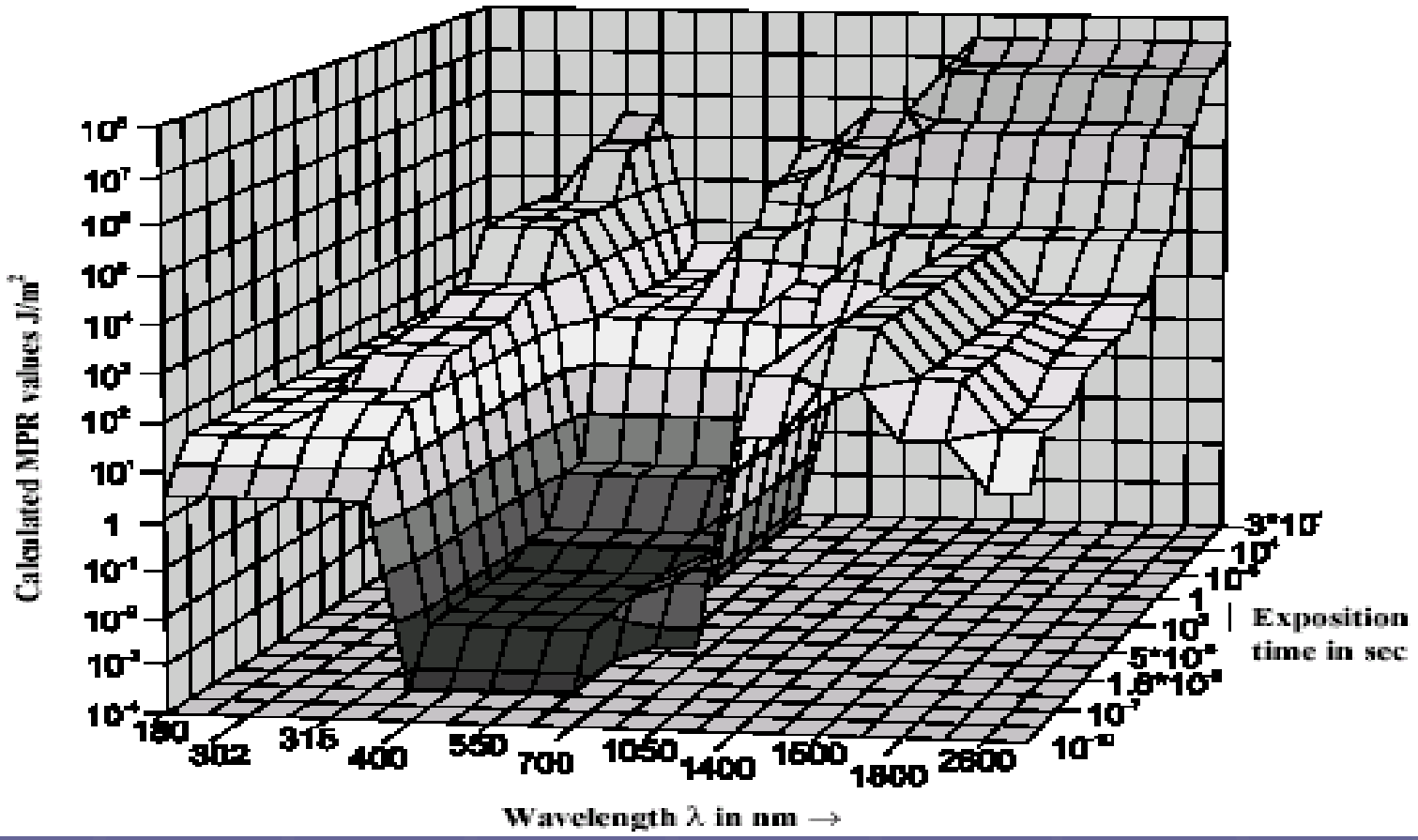


Tabella EMP occhio

Tempo di esposizione t in s / *Exposure time t in s* — Lunghezza d'onda λ in nm / *Wavelength λ in nm*	$10^{-13} \div 10^{-11}$	$10^{-11} \div 10^{-9}$	$10^{-9} \div 10^{-7}$	$10^{-7} \div 1{,}8 \times 10^{-5}$	$1{,}8 \times 10^{-5} \div 5 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-5} \div 1 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-3} \div 10$	$10 \div 10^{2}$	$10^{2} \div 10^{3}$	$10^{3} \div 10^{4}$	$10^{4} \div 3 \times 10^{4}$
180 ÷ 302,5	3×10^{10} W · m^{-2}		30 J · m^{-2}								
302,5 ÷ 315			($t \le T_1$) C_1 J · m^{-2}				C_2 J · m^{-2} ($t > T_1$)	C_2 J · m^{-2}			
315 ÷ 400			C_1 J · m^{-2}					10^{4} J · m^{-2}		10 W · m^{-2}	
400 ÷ 600 nm [d]								Pericolo fotochimico per la retina *Retinal photochemical hazard*			
								100 C_3 J · m^{-2} con_ *using* γ_p = 11 mrad	1 C_3 W · m^{-2} con_ *using* $\gamma_p = 1{,}1\ t^{0,5}$ mrad	1 C_3 W · m^{-2} con_ *using* γ_p = 110 mrad	
								E_*AND*[d]			
400 ÷ 700 [d]	$1{,}5 \times 10^{-4}\ C_6$ J · m^{-2}	$2{,}7 \times 10^{4}\ t^{0,75}\ C_6$ J · m^{-2}	$5 \times 10^{-3}\ C_6$ J · m^{-2}	$18\ t^{0,75}\ C_6$ J · m^{-2}				Pericolo termico per la retina *Retinal thermal hazard*			
400 ÷ 700 nm [d]								($t \le T_2$) $18\ t^{0,75}\ C_6$ J · m^{-2}		$\alpha \le 1{,}5$ mrad: 10 W · m^{-2}; $\alpha > 1{,}5$ mrad: $18\ C_6\ T_2^{-0,25}$ W · m^{-2} ($t > T_2$)	
700 ÷ 1050	$1{,}5 \times 10^{-4}\ C_4\ C_6$ J · m^{-2}	$2{,}7 \times 10^{4}\ t^{0,75}\ C_4\ C_6$ J · m^{-2}	$5 \times 10^{-3}\ C_4\ C_6$ J · m^{-2}	$1{,}8\ t^{0,75}\ C_4\ C_6$ J · m^{-2}							
1050 ÷ 1400	$1{,}5 \times 10^{-3}\ C_6\ C_7$ J · m^{-2}	$2{,}7 \times 10^{5}\ t^{0,75}\ C_6\ C_7$ J · m^{-2}	$5 \times 10^{-2}\ C_6\ C_7$ J · m^{-2}		$90\ t^{0,75}\ C_6\ C_7$ J · m^{-2}						
								($t \le T_2$) $18\ t^{0,75}\ C_4\ C_6\ C_7$ J · m^{-2}		$\alpha \le 1{,}5$ mrad: $10\ C_4\ C_7$ W · m^{-2}; $\alpha > 1{,}5$ mrad: $18\ C_4\ C_6\ C_7\ T_2^{-0,25}$ W · m^{-2} ($t > T_2$)	
1400 ÷ 1500	10^{12} W · m^{-2}		10^{3} J · m^{-2}				$5600\ t^{0,25}$ J · m^{-2}	1000 W · m^{-2}			
1500 ÷ 1800	10^{13} W · m^{-2}		10^{4} J · m^{-2}								
1800 ÷ 2600	10^{12} W · m^{-2}		10^{3} J · m^{-2}				$5600\ t^{0,25}$ J · m^{-2}				
2600 ÷ 10^{6}	10^{11} W · m^{-2}		100 J · m^{-2}	$5600\ t^{0,25}$ J · m^{-2}							

Tabella EMP pelle

	Durata emissione t (s)				
	$< 10^{-9}$	$10^{-9} \div 10^{-7}$	$10^{-7} \div 10$	$10 \div 10^{3}$	$10^{3} \div 3 \times 10^{4}$
180 ÷ 302,5		30 J · m²			
302,5 ÷ 315	3×10^{10} W · m²	C_2 J · m² ($t < T_1$) C_1 J · m² ($t > T_1$)		C_2 J · m²	
315 ÷ 400		C_1 J · m²		10^4 J · m²	10 W · m²
400 ÷ 700	2×10^{11} W · m²	200 J · m²	$1{,}1 \times 10^4\ t^{0,25}$ J · m²	2000 W · m²	
700 ÷ 1400	$2 \times 10^{11}\ C_4$ W · m²	200 C_4 J · m²	$1{,}1 \times 10^4\ C_4\ t^{0,25}$ J · m²	2000 C_4 W · m²	
1400 ÷ 10^6	10^{11} W · m²	200 J · m²	$5600\ t^{0,25}$ J · m²	1000 W · m²	

Esempio calcolo EMP

Laser He-Cd; λ = 325 nm; t = 0,1 s

Guardando la tabella si trova che

$$\mathbf{EMP = C_1\ J \cdot m^{-2}}$$

Dove

$$\mathbf{C_1 = 5{,}6 \times 10^3 \times t^{0{,}25}}$$

L'esposizione energetica è:

$$\mathbf{H_{EMP} = 5{,}6 \times 10^3 \times 0{,}1^{0{,}25}}\ \ J \cdot m^{-2}$$

Dividendo per t si ottiene l'irradiamento:

$$\mathbf{E_{EMP} = 3{,}15 \times 10^4}\ W \cdot m^{-2}$$

Esempio calcolo EMP

Laser arseniuro di gallio, λ = 905 nm t = 100 ns

$$H_{EMP} = 5 \times 10^{-3} \times C_4 \times C_6 \quad J \cdot m^{-2}$$

$$C_4 = 10^{0,002(\lambda-700)} = 2,57$$

$$C_6 = 1$$

$$H_{EMP} = 12,9 \times 10^{-3} \; J \cdot m^{-2}$$

DISTANZA NOMINALE RISCHIO OCULARE

Distanza nominale rischio oculare

- Distanza alla quale, in condizioni ideali, l'irradiamento (o l'esposizione energetica) scendono sotto l'EMP appropriato
- L'irradiamento a distanza r dalla sorgente è dato da:

$$E = \frac{4P_0 e^{-\mu r}}{\pi(a + r\phi)}$$

- a: diametro del fascio laser emergente (m)
- ϕ: divergenza del fascio laser emergente (rad)
- P_0: potenza radiante (flusso radiante) totale o potenza radiante media per laser a impulsi (W)
- μ: coefficiente di attenuazione atmosferica (dipende da λ), (m^{-1})

Profili non gaussiani

- *a* ed *e* sono misurati ai punti corrispondenti a 1/e del profilo del fascio.
- Solo laser a gas hanno profili gaussiani
- Se il profilo non è gaussiano si usa la:

$$L = \frac{Ie^{-\mu r}}{r^2}$$

- *I*: intensità radiante (W sr^{-1})
- Se I non è nota o misurabile, si aumenta P_0 di 2,5

DNRO

- Il termine $e^{-\mu r}$ rappresenta le perdite per attenuazione atmosferica e può essere trascurato:

$$E = \frac{4P_0}{\pi(a + r\phi)^2}$$

- La DNRO è quel particolare valore di r per cui $E=E_{EMP}$

DNRO

$$DNRO = \frac{\sqrt{\frac{4P_0}{\pi E_{EMP}}} - a}{\phi}$$

- Quando non si può trascurare l'attenuazione atmosferica si applica una formula semplificata cautelativa:

$$r_\mu = 0{,}5 r_c \left(1 + e^{-\mu r_c}\right)$$

- r_μ è la distanza tenendo conto dell'attenuazione e r_c è la distanza calcolata senza tener conto dell'attenuazione

Attenuazione atmosferica

- μ si può stimare dalla:

$$\mu = 10^{-3} \times \frac{3{,}91}{V} \times \left(\frac{0{,}55}{\lambda} \right)^{A}$$

- A: 0,585 $V^{0,33}$
- V: distanza di visibilità in km
- λ: lunghezza d'onda in μm

Strumenti ottici

- Quando si utilizzano strumenti ottici, la DNRO va estesa per l'aumento della radiazione che entra nell'occhio;
- Se il diametro della pupilla di uscita dello strumento ottico non è maggiore di 7 mm (diametro massimo pupilla umana)

$$G = \frac{\text{diametro obiettivo o diaframma strumento}}{\text{diametro teorico pupilla}}$$

$$G = \frac{D_0}{7 \times 10^{-3}}$$

$$DNRO = DNRO_{base} \times G \times \frac{a(G-1)}{\phi}$$

SORGENTI PUNTIFORMI CON FASCIO DIVERGENTE

Premesse

- Si assume che il fascio provenga da una piccola sorgente e sia divergente
- Si approssima come gaussiano il profilo del fascio in campo lontano
- L'approssimazione gaussiana è una stima conservativa

Divergenza

- La divergenza di una fascio è definita come l'angolo piano di apertura del cono definito dalla variazione del diametro del fascio con la distanza
- Se i diametri del fascio in due punti a distanza r_1 è d_{63} e d'_{63}, la divergenza ϕ è:

$$\varphi = 2\arctan\left(\frac{d_{63} - d'_{63}}{2r}\right)$$

Apertura numerica

- La maggior parte di costruttori di sorgenti con fascio divergente indica la divergenza in termini di *apertura numerica, AN*
- L'apertura numerica è definita come:

$$AN = sen\left(\frac{\varphi}{2}\right)$$

- Da cui si ricava il valore della divergenza:

$$\frac{\varphi}{2} = arcsen(AN)$$

Valore di d_{95}

- Per un fascio gaussiano, il diametro del fascio relativo ai punti al 5% dell'irradiamento di picco contiene il 95% della potenza o dell'energia totale.
- Il diametro del fascio d_{95} ad una distanza r dalla sorgente apparente è:

$$d_{95} = a + 2r\tan\left(\frac{\varphi}{2}\right) = a + 2r\tan\left[\arcsin\left(AN\right)\right]$$

- Dove a è il diametro del fascio laser emergente

Approssimazioni

- Il diametro a del fascio emergente è spesso dell'ordine di qualche μm e può essere trascurato;
- Per angoli piccoli

$$\arcsin(x) \approx x$$

$$\tan(x) \approx x$$

d_{63}

- Il valore di d_{63} è legato a d_{95} dalla relazione:

$$\frac{d_{95}}{d_{63}} = 1{,}7$$

- Pertanto:

$$d_{63} = \frac{2r}{1{,}7}\tan\left[\arcsin\left(AN\right)\right] \cong \frac{2rAN}{1{,}7}$$

Potenza passante da un'apertura

- Molte procedure di classificazione richiedono una misurazione della potenza (o dell'energia) che passa attraverso un'apertura di un certo diametro ad una certa distanza dalla sorgente apparente.
- Per una fascio gaussiano la frazione di potenza (o energia) che passa attraverso un'apertura circolare di diametro d_a, ad una distanza r, è espressa come parametro di accoppiamento:

$$\eta = 1 - e^{-\left(\frac{d_a}{d_{63}}\right)^2}$$

Potenza passante da un'apertura

- La potenza passante è pertanto:

$$P_a = \eta P_o$$

- L'energia passante è:

$$Q_a = \eta Q_o$$

PRESCRIZIONI DI COSTRUZIONE

Prescrizioni di costruzione

- È necessario incorporare negli apparecchi laser alcuni dispositivi di sicurezza in funzione della classe di rischio alla quale sono stati assegnati dal costruttore
- Se la modifica di un apparecchio laser influenza un qualsiasi aspetto della prestazione o delle funzioni, la persona o l'organismo che attua la modifica è responsabile della nuova classificazione ed etichettatura dell'apparecchio.

Ripari di protezione

- Ogni apparecchio laser deve avere involucri di protezione (custodie, pannelli etc.) che impediscano l'accesso umano a radiazioni superiori alla classe 1, tranne quando questo è necessario all'uso dell'apparecchio;
- Qualunque parte dell'involucro o della custodia che può essere rimossa o spostata con accesso superiore ai LEA assegnati e non provvista di blocchi di sicurezza deve essere fissata in modo da richiedere l'uso di utensili
- In determinati casi il riparo di protezione può essere una stanza (riparo accessibile)

Pannelli di accesso e blocchi di sicurezza

- I pannelli di accesso degli involucri di protezione devono essere muniti di un blocco di sicurezza automatico che spenga o attenui la radiazione quando il pannello viene aperto.
- La presenza del blocco di sicurezza è obbligatoria quando:
  - È prevista la rimozione o spostamento del pannello di accesso durante la manutenzione o il funzionamento
  - La rimozione del pannello permette l'accesso a livelli di radiazione indicati con X nella tabella

Tabella blocchi di sicurezza

Classe	Emissione accessibile durante la rimozione del pannello di accesso				
	1,1M	2, 2M	3R	3B	4
1,1M	—	—	X	X	X
2, 2M	—	—	X	X	X
3R	—	—	—	X	X
3B	—	—	—	X	X
4	—	—	—	X	X

Pannelli di accesso e blocchi di sicurezza

- Il dispositivo di blocco di sicurezza deve impedire in ogni caso e in modo automatico l'accesso umano ad una radiazione di classe 3 o 4, quando parte dell'involucro viene rimossa.
- La rimozione del pannello non deve provocare un'emissione generata attraverso l'apertura, superiore alla classe 1M o alla classe 2M a seconda della lunghezza d'onda
- Il blocco di sicurezza deve essere progettato in modo da impedire l'accesso alla radiazione fino a che questa non sia inferiore al LEA segnato con X nella tabella

Blocchi di sicurezza
Rimozione o esclusione

- Se il blocco di sicurezza è involontariamente rimosso mentre il pannello è aperto, non si deve avere un ripristino dei valori di emissione attenuati dal blocco
- Se è previsto un dispositivo di esclusione intenzionale, si deve poter rimettere al proprio posto il pannello di accesso solo dopo che questo è stato rimosso

Blocchi di sicurezza
Segnali di avvertimento

- Il blocco di sicurezza deve essere associato ad una targhetta di avvertimento
- Quando è inserito il dispositivo di esclusione deve innescarsi un segnale di avvertimento visivo o sonoro se il laser è in funzione o se le batterie di condensatori non sono del tutto scariche, sia che il pannello di accesso venga o non venga tolto o spostato
- Gli avvertimenti visivi devono essere visibili con le protezioni oculari

Connettore di blocco a distanza

- Dispositivo che consente lo spegnimento volontario immediato o l'attenuazione della radiazione
- Ogni sistema laser 3B o 4 deve avere un connettore di blocco a distanza
- Quando il connettore è attivato, la radiazione accessibile non deve superare la classe 1M o 2M, a seconda della lunghezza d'onda
- Il connettore deve essere accessibile dalla postazione di lavoro

Comando a chiave

- I laser 3B e 4 devono essere dotati di comando a chiave.
- La radiazione laser non deve essere accessibile quando la chiave è rimossa
- La chiave deve essere rimovibile
- La chiave può essere sostituita da carte magnetiche, codici di combinazione etc.

Avvertimento di emissione

- I laser 3B e 4 e 3R (per λ compreso fra 400 nm e 700 nm), devono emettere un segnale di avvertimento sonoro o visivo quando
  - sono in funzione,
  - Eventuali batterie di condensatori sono in carica o non sono state completamente scaricate.
- I dispositivi di avvertimento devono essere intrinsecamente sicuri o ridondanti.

Avvertimento visivo

- Controlli di funzionamento e aperture laser distanti più di 2 metri dal dispositivo di avvertimento per la radiazione devono a loro volta essere provvisti di un dispositivo di avvertimento per la radiazione.
- Nel caso in cui l'emissione laser possa essere ripartita attraverso più di un'apertura di emissione, un dispositivo di avvertimento visivo deve indicare chiaramente l'apertura o le aperture attraverso cui può avvenire l'emissione

Avvertimento di emissione

- Il dispositivo di avvertimento deve essere chiaramente visibile o udibile da una persona nelle vicinanze del controllo di funzionamento o dell'apertura laser.
- Ogni dispositivo di avvertimento visivo deve essere chiaramente visibile attraverso le protezioni oculari previste per le lunghezze d'onda della radiazione laser emessa.
- Il dispositivo di avvenimento visivo si deve poter osservare senza esporsi a radiazione laser superiore a 1M e 2M.

Dispositivo di arresto o attenuazione

- I laser 3B e 4 devono contenere uno o più dispositivi di arresto o attenuazione fissati in modo permanente
- Devono essere diversi dall'interruttore di alimentazione del laser, dal connettore di alimentazione elettrica o dal comando a chiave
- Il dispositivo di arresto del fascio o l'attenuatore del fascio devono essere in grado di impedire, per quanto possibile, l'accesso umano a radiazione superiore alla Classe 1M o alla Classe 2M, a seconda dei casi.

Posizione comandi

- Ogni apparecchio laser deve avere i comandi posizionati in modo che la regolazione ed il funzionamento non richiedano l'esposizione a radiazione laser di classe 3B o 4

Ottiche di osservazione

- Eventuali ottiche di osservazione (lenti, telescopi, microscopi, endoscopi etc.), finestre o schermi di visualizzazione presenti in un apparecchio laser devono assicurare un'attenuazione sufficiente ad impedire l'accesso umano a radiazione laser che superi la classe 1M

Ottiche di osservazione
Otturatori e attenuatori

- Se è presente un otturatore o un attenuatore variabile incorporato alle ottiche di osservazione, si deve far in modo che:
  - Sia impedito l'accesso a radiazione laser superiore alla classe 1M
  - Sia impossibile aprire l'otturatore o variare l'attenuatore quando può esservi esposizione a radiazione di classe superiore alla 1M

Radiazione a scansione

- Radiazione laser con direzione, origine o schema di propagazione che variano nel tempo rispetto ad un sistema di riferimento fisso
- Gli apparecchi laser previsti per emettere radiazione a scansione e classificati su questa base, non devono, come conseguenza di un guasto al sistema di scansione, o di una variazione della velocità di scansione o dell'ampiezza di scansione, permettere l'accesso umano a radiazione laser che supera i LEA della classe assegnata.

Mezzi di aiuto per l'allineamento

- Nel caso in cui la manutenzione ordinaria richieda l'allineamento dei componenti sul percorso del fascio, devono essere forniti dei mezzi sicuri per realizzarlo.
- Si devono usare cartine per allineamento specifiche per le lunghezze d'onda in gioco

Accesso pedonale

- Se un alloggiamento di protezione è dotato di un pannello di accesso che prevede un accesso pedonale, allora:

a) devono essere forniti dei mezzi tali per cui ogni persona all'interno dell'alloggiamento sia in grado di evitare il rischio di accensione di laser, della Classe 3B o 4.

b) deve essere collocato un dispositivo di avvertimento in modo da segnalare adeguatamente, a tutte le persone che potrebbero trovarsi all'interno dell'alloggiamento, l'emissione di radiazione di laser della Classe 3R (per λ inferiori a 400 nm e superiori a 700 nm), di Classe 3B o Classe 4.

Condizioni ambientali

- L'apparecchio laser deve soddisfare i requisiti di sicurezza in tutte le prevedibili condizioni di funzionamento tipiche dell'utilizzo previsto dell'apparecchio.
- I parametri che devono essere presi in considerazione comprendono:
  - le condizioni climatiche (per es. temperatura, umidità relativa);
  - le vibrazioni e gli urti.

Rischi di natura non ottica

- Le prescrizioni della norma di sicurezza applicabile all'apparecchio devono essere seguite durante il funzionamento e nel caso di un singolo guasto per i seguenti rischi:
  - rischi elettrici;
  - temperatura eccessiva;
  - propagazione di incendio dall'apparecchio;
  - rumori acustici e ultrasuoni;
  - sostanze nocive;
  - esplosione.

Radiazione collaterale

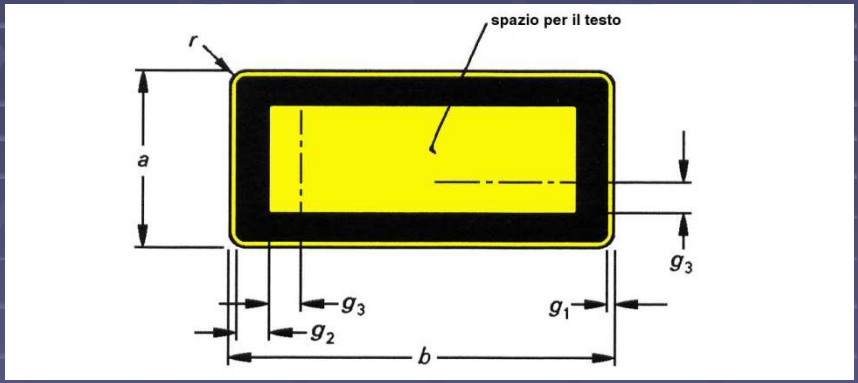
- Normalmente i ripari di protezione degli apparecchi laser devono proteggere dai rischi di radiazione collaterale (per es. UV, visibile, IR).
- Tuttavia, se permane un dubbio sul fatto che della radiazione collaterale accessibile possa essere pericolosa, possono essere applicati i valori di EMP per i laser per valutare prudenzialmente questo rischio.

TARGHETTATURA

Generalità

- Ogni apparecchio laser deve essere munito di targhetta(e).
- Le targhette devono essere:
  - fissate in modo permanente,
  - leggibili
  - chiaramente visibili durante il funzionamento, la manutenzione o l'assistenza, secondo il caso.
  - posizionate in modo da poter essere lette evitando l'esposizione a radiazione laser che supera i LEA della Classe 1.
- Il testo, i bordi e simboli devono essere in nero su fondo giallo eccettuata la Classe 1,
- Se le dimensioni o il progetto dell'apparecchio rendono impossibile la targhettatura, le targhette devono essere riprodotte nelle informazioni per l'utilizzatore o poste sull'imballaggio.

Formato targhetta



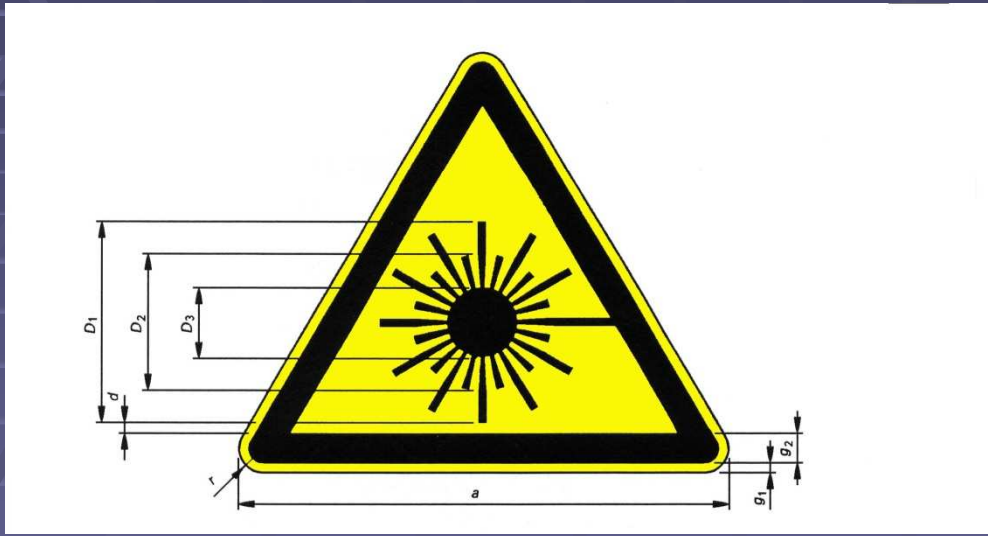
a x b	g_1	g_2	g_3	g_4	altezza minima della dicitura
26x52	1	4	4	2	La dicitura del testo deve essere di dimensione tale da renderla leggibile
52 x 105	1,6	5	5	3,2	
74 x 148	2	6	7,5	4	
l00 x 250	2,5	8	12,5	5	
140 x 200	2,5	10	10	5	
140 x 250	2,5	10	12,5	5	
140 x 400	3	10	20	6	
200 x 250	3	12	12,5	6	
200 x 400	3	12	20	6	
250 x 400	4	15	25	8	
La dimensione g_1 è raccomandata					

La relazione fra la più grande distanza alla quale la targhetta può essere capita e l'area minima della targhetta è:

$$A = L^2/2000$$

Dove A e L sono in metri ed L<50.

Targhetta avvertimento



a	g_1	g_2	r	D_1	D_2	D_3	d
25	0,5	1,5	1,25	10,5	7	3,5	0,5
50	1	3	2,5	21	14	7	1
100	2	6	5	42	28	14	2
150	3	9	7,5	63	42	21	3
200	4	12	10	84	56	28	4
400	8	24	20	168	112	56	8
600	12	36	30	252	168	84	12
Le dimensioni D_1, D_2, D_3, g_1 e d sono valori raccomandati							

La relazione fra la più grande distanza alla quale la targhetta può essere capita e l'area minima della targhetta è:

A = L2/2000

Dove A e L sono in metri ed L<50.

Targhette classe 1

APPARECCHIO LASER DI CLASSE 1

Targhetta classe 1M

RADIAZIONE LASER
NON OSSERVARE DIRETTAMENTE
CON STRUMENTI OTTICI
APPARECCHIO LASER DI CLASSE 1M

dopo le parole “strumenti ottici” si può aggiungere un termine tipo “BINOCOLI O TELESCOPI” o “LENTI DI INGRANDIMENTO”

Targhetta classe 2

RADIAZIONE LASER

NON FISSARE IL FASCIO

APPARECCHIO LASER DI CLASSE 2

Sull'apparecchio deve essere apposta anche una targhetta di avvertimento

Targhetta classe 2M

RADIAZIONE LASER

NON FISSARE IL FASCIO AD OCCHIO NUDO NÉ GUARDARE DIRETTAMENTE

CON STRUMENTI OTTICI

APPARECCHIO LASER DI CLASSE 2M

dopo le parole “strumenti ottici” si può aggiungere un termine tipo “BINOCOLI O TELESCOPI” o “LENTI DI INGRANDIMENTO”

Sull’apparecchio deve essere apposta anche una targhetta di avvertimento

Targhetta classe 3R

400 nm < λ < 1400 nm

RADIAZIONE LASER
EVITARE L'ESPOSIZIONE DIRETTA DEGLI OCCHI
APPARECCHIO LASER DI CLASSE 3R

Sull'apparecchio deve essere apposta anche una targhetta di avvertimento

Targhetta classe 3R

λ<400 nm o λ>1400 nm

RADIAZIONE LASER
EVITARE L'ESPOSIZIONE AL FASCIO
APPARECCHIO LASER DI CLASSE 3R

Sull'apparecchio deve essere apposta anche una targhetta di avvertimento

Targhetta classe 3B

RADIAZIONE LASER
EVITARE L'ESPOSIZIONE AL FASCIO
APPARECCHIO LASER DI CLASSE 3B

Sull'apparecchio deve essere apposta anche una targhetta di avvertimento

Targhetta classe 4

RADIAZIONE LASER
EVITARE L'ESPOSIZIONE DELL'OCCHIO O DELLA PELLE ALLA RADIAZIONE DIRETTA O DIFFUSA
APPARECCHIO LASER DI CLASSE 4

Sull'apparecchio deve essere apposta anche una targhetta di avvertimento

Targhetta indicante l'apertura

- Su ogni apparecchio delle Classi 3R, 3B e 4 deve essere fissata una targhetta in prossimità di ogni apertura da cui sia emessa una radiazione laser superiore alle classi 1 o 2
- La targhetta deve riportare le parole:

APERTURA LASER

oppure

EVITARE L'ESPOSIZIONE - DA QUESTA APERTURA È EMESSA RADIAZIONE LASER

Targhette per i pannelli di accesso

- Ogni collegamento, pannello di un riparo di protezione e pannello di un involucro di protezione che, una volta tolto o spostato, permetta l'accesso umano a radiazione superiore alla classe 1 deve avere una targhetta con le parole

  ATTENZIONE –RADIAZIONE LASER

  IN CASO DI APERTURA

- Seguono le indicazioni relative alla classe di radiazione a cui è esposti in caso di apertura

Targhette per pannelli con blocco di sicurezza

- Se i pannelli sono dotati di blocco di sicurezza, alla fine della dizione relativa, va aggiunta la seguente frase:

E DI GUASTO

O DISATTIVAZIONE DEI BLOCCHI

Informazioni sulla radiazione emessa e sulle norme

- La targhetta informativa di ogni apparecchio laser, ad eccezione di quelli di Classe 1, deve indicare
  - la potenza massima della radiazione laser emessa,
  - la durata dell'impulso (se del caso)
  - la(e) lunghezza(e) d'onda emessa(e).
- Il nome e la data di pubblicazione della Norma in base alla quale l'apparecchio è stato classificato devono essere riportati sulla targhetta informativa, o in qualunque posto molto vicino ad essa sull'apparecchio.
- Per la Classe 1 e la Classe 1M, invece che sulle targhette, le indicazioni possono essere incluse nelle informazioni per l'utilizzatore.

MISURE DI SICUREZZA

Tecnico Sicurezza Laser

- Deve essere designato nelle installazioni in cui sono in funzione:
  - laser di Classe 3R, che emettono energia ad una lunghezza d'onda esterna all'intervallo da 400 nm a 700 nm,
  - laser di Classe 3B
  - laser Classe 4,

Compiti TSL

- Il Tecnico Sicurezza Laser:
  - Verifica il rispetto della normativa
  - Verifica l'adozione delle misure di sicurezza
  - Indica i controlli adeguati che devono essere effettuati

Necessità delle misure di protezione

- Lo scopo delle misure di sicurezza e di controllo è quello di ridurre la possibilità di esposizione a livelli pericolosi di radiazioni laser, e di altri rischi associati.
- Può non essere necessario adottare tutte le misure indicate.
- Quando l'applicazione di una o più misure riduce la possibilità di esposizione al livello o al di sotto del livello applicabile di EMP, l'applicazione di ulteriori misure di controllo non è più necessaria.

Responsabilità

Nei laboratori di ricerca dove vengono impiegati sorgenti e/o sistemi laser:

- Il TSL consiglia le misure di sicurezza e i controlli
- Il Direttore (Responsabile/Dirigente) del Laboratorio è responsabile dell'acquisizione e della messa in atto delle protezioni necessarie
- Gli operatori qualificati (preposti) direttamente coinvolti sono responsabili dell'utilizzo del sistema laser in osservanza delle misure di sicurezza relative

Modifiche

- Se la modifica, richiesta da un utilizzatore, di un apparecchio laser precedentemente classificato influenza un qualunque aspetto della prestazione, o delle funzioni previste dell'apparecchio, la persona o l'organismo che effettua una tale modifica ha la responsabilità di provvedere alla riclassificazione e alla rietichettatura dell'apparecchio laser.

MEZZI DI PROTEZIONE COLLETTIVA

Connettore di blocco a distanza

- Nei laboratori di ricerca il connettore deve essere collegato ad un blocco di emergenza a distanza <5m dalla zona dove si svolge l'attività
- Il connettore di blocco a distanza dei laser di Classe 3B e Classe 4 dovrebbe essere collegato ad un blocco di scollegamento principale di emergenza, o a dispositivi di blocco dei locali o delle porte o degli infissi
- Il personale incaricato può essere autorizzato a rimuovere temporaneamente il connettore del blocco a distanza per permettere l'accesso ad altre persone autorizzate, se risulta evidente che non vi siano rischi di radiazione ottica al momento e nel punto di accesso.

Comando a chiave

- I sistemi laser appartenenti alle Classi 3B e 4, quando non vengono impiegati, **devono** essere protetti da un uso non autorizzato rimuovendo la chiave dal comando

Terminazione del fascio

- Per evitare esposizioni involontarie a radiazione di classe 3B o 4 o la produzione di riflessi accidentali, i fasci devono essere terminati su in mezzo di arresto o attenuazione alla fine della zona utile di lavoro;
- Il materiale costitutivo del mezzo di arresto deve essere diffondente e con adeguate proprietà riflettenti e termiche o assorbente.

Segnali di avvertimento

- Sugli accessi alle aree o degli ambienti di protezione che contengono apparecchi laser di Classe 3B e Classe 4 devono essere affissi segnali di avvertimento.
- All'ingresso delle stanze dove sono presenti laser di classe 3B o 4 devono essere installati indicatori di emissione luminosi che si accendano automaticamente quando il laser è attivo

Traiettorie del fascio

- Le traiettorie esposte del fascio del laser dovrebbero, quando possibile, passare al di sopra o al di sotto del livello degli occhi.

Traiettorie del fascio

- Le traiettorie del fascio degli apparecchi laser
  - di Classe 3R, che emettano ad una lunghezza d'onda esterna all'intervallo da 400 nm a 700 nm,
  - di Classe 3B o Classe 4

dovrebbero

  - essere il più possibile brevi,
  - avere un numero minimo di cambiamenti di direzione,
  - non incrociare il passaggio delle persone e altre vie di accesso

Traiettorie del fascio

- I fasci laser dovrebbero, quando possibile, essere racchiusi da un involucro di protezione (per esempio un tubo)
- L'involucro del fascio (per esempio un tubo) dovrebbe essere fissato in modo sicuro, ma preferibilmente non collegato, ai componenti che formano il fascio.

Riflessioni speculari

- Specchi, lenti e divisori di fascio dovrebbero essere fissati rigidamente ed essere soggetti solo a movimenti controllati.
- È richiesta un'attenzione speciale nella scelta dei componenti ottici per i laser di Classe 3B e Classe 4 e nella pulizia delle loro superfici.
- prestare attenzione per prevenire la riflessione speculare accidentale di radiazioni di apparecchi laser di Classe 1M e 2M da superfici che possano focalizzare il fascio.

Riflessioni speculari

- Superfici che sembrano riflettere la radiazione in forma diffusa, possono in realtà rifletterne una parte consistente in modo speculare, specialmente nella regione dell'infrarosso
- Questo effetto può risultare pericoloso soprattutto a distanze maggiori di quelle attese per riflessioni di tipo puramente diffusivo

Riflessioni speculari

- Riflessioni speculari potenzialmente pericolose avvengono su tutte le superfici dei componenti ottici trasmissivi, come lenti, prismi, finestrelle e divisori di fascio.
- La radiazione potenzialmente pericolosa può essere trasmessa anche attraverso alcuni componenti ottici riflettenti, come gli specchi (per esempio, la radiazione infrarossa che attraversa un riflettore di radiazione visibile).

Sorveglianza medica

a) gli esami oculistici di preimpiego dovrebbero essere eseguiti sul personale che opera con i laser di Classe 3B e Classe 4. Tali esami rivestono solo un valore medico legale e non fanno necessariamente parte del programma di sicurezza.
b) subito dopo un'evidente o sospetta esposizione dannosa dell'occhio, si dovrebbe provvedere ad un esame medico effettuato da uno specialista qualificato. Questo dovrebbe essere accompagnato da un'analisi biofisica completa delle circostanze nelle quali si è verificato l'incidente.

Addestramento

- al controllo di sistemi laser di classe da 1M a 4 deve essere posto solo personale che abbia ricevuto un adeguato livello di addestramento, che includa almeno:
  a) la familiarizzazione con le procedure di funzionamento del sistema;
  b) il corretto utilizzo delle procedure di controllo del pericolo, dei segnali di avvertimento, ecc.;
  c) la necessità della protezione personale;
  d) le procedure di rapporto in caso di incidente;
  e) gli effetti biologici del laser sugli occhi e la pelle.

DISPOSITIVI DI PROTEZIONE INDIVIDUALE

Protezione degli occhi

- Nelle aree di pericolo in cui sono impiegati apparecchi laser
  - di Classe 3R che emettano energia con una lunghezza d'onda esterna all'intervallo da 400 nm a 700 nm,
  - di Classe 3B
  - di Classe 4

  si deve impiegare un'adeguata protezione per gli occhi prevista per lunghezze d'onda specifiche.

Eccezioni all'obbligo di protezione degli occhi

a) quando le procedure tecniche e procedurali siano tali da eliminare il rischio potenziale di esposizione superiore all'EMP applicabile;

b) quando a causa di prescrizioni operative inusuali, l'impiego di protezioni per gli occhi non sia possibile.

- Queste procedure operative dovrebbero essere intraprese dal Responsabile del sistema esclusivamente con l'approvazione del TSL.

Protezione per gli occhi

Parametri da considerare

a) lunghezza/e d'onda di funzionamento;
b) esposizione energetica o irradiamento;
c) esposizione massima permessa (EMP);
d) densità ottica delle protezioni oculari alla lunghezza d'onda emessa;
e) requisiti di trasmissione della luce visibile;
f) esposizione energetica o l'irradiamento a cui avviene il danno alle protezioni oculari;
g) necessità di impiegare occhiali da vista;
h) comfort e ventilazione;
i) degrado o alterazioni del mezzo assorbente, anche se temporanee o transitorie;
j) resistenza dei materiali (resistenza agli urti);
k) prescrizioni per la visione periferica;

Protezioni oculari
requisiti

- Devono avere un'etichetta con le informazioni necessarie alla scelta in relazione al tipo di laser.
- Devono essere comode da indossare,
- Devono fornire per quanto possibile un'ampia visuale,
- Devono essere aderenti ma garantire la ventilazione (rischio appannamento),
- Si devono evitare, per quanto possibile, superfici piatte riflettenti che diano riflessioni speculari pericolose.
- La struttura e le eventuali parti laterali devono fornire una protezione equivalente a quella delle lenti.
- Nella scelta delle protezioni oculari per i laser di Classe 4 si deve prestare un'attenzione alle caratteristiche di stabilità e resistenza alle radiazioni laser.

Tipi di protezioni oculari

- La norma EN 207 stabilisce gli standard per filtri e protettori contro le radiazioni laser
- La norma EN 208 stabilisce gli standard per filtri e protettori degli occhi nelle operazioni di regolazione di sistemi laser nel visibile

Occhiali da allineamento

- Gli occhiali definiti dalla norma EN 208 sono caratterizzati da una piccola attenuazione nella gamma spettrale del visibile
- trasmettono una radiazione residua di classe 2 per poter effettuare le regolazioni.
- L'attenuazione è molto più forte fuori dalla gamma visibile.
- L'attenuazione di classe 2 è sicura nel limite del riflesso oculare ($t < 0,25$ s) e vale per esposizioni accidentali

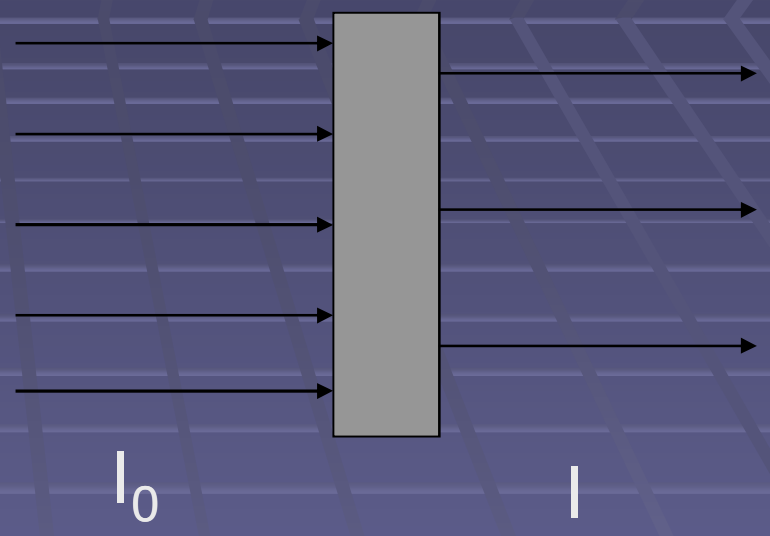
Tipi di occhiali da usare

- **UNI EN 208**: quando per effettuare operazioni sul sistema è indispensabile vedere il percorso del raggio
- **UNI EN 207**:
  - Con radiazioni non visibili
  - Quando sono previste lunghe esposizioni
  - Per tutte le operazioni in cui non è indispensabile vedere il percorso del raggio (misure etc.)

Grandezze caratteristiche

- Trasmittanza $\tau(\lambda)$:

$$\tau(\lambda) = \frac{I}{I_0}$$



- Densità ottica D_λ:

$$D_\lambda = -\log_{10} \tau(\lambda)$$

Parametri valutati

- Nelle prove sui filtri si valuta:
  - Valore di rifrazione
  - Qualità del materiale e della superficie
  - Stabilità alla luce UV
  - Stabilità alla temperatura
  - Infiammabilità
  - Campo visivo (almeno 40°)
  - Montatura: deve impedire accesso alla radiazione dai lati

UNI EN 207

Informazioni fabbricante

- Le informazioni devono essere nella lingua del Paese in cui viene venduto il protettore dell'occhio
- Le istruzioni devono anche indicare che una riflessione accidentale delle radiazioni laser, dovuta per esempio a parti riflettenti (protettori dell'occhio inclusi), all'inclinazione o a una regolazione imperfetta dei componenti ottici, può causare pericoli.
- Le istruzioni devono indicare che tutto il personale che lavora in zone in cui vi è un rischio di esposizione a radiazioni laser pericolose dovrebbe indossare un'adeguata protezione degli occhi.
- Inoltre, il fabbricante deve fornire ulteriori informazioni sotto forma di curve di trasmissione.

Contenuti obbligatori delle istruzioni

- fattore di trasmissione luminosa;
- se il fattore di trasmissione luminosa è minore del 20%, questo deve essere riportato e si deve raccomandare all'utilizzatore di aumentare l'intensità dell'illuminazione sul posto di lavoro;
- nel caso di filtri colorati, un'avvertenza all'utilizzatore perché controlli se viene compromesso il riconoscimento di spie luminose o di segnali di avvertimento;
- l'indicazione che i protettori dell'occhio sono destinati esclusivamente a proteggere da radiazioni accidentali e che sia i valori limite, sia le prove di stabilità si basano su un periodo massimo di 10 s;

Contenuti obbligatori delle istruzioni

- l'indicazione che i protettori dell'occhio e i filtri che proteggono dalle radiazioni laser che sono stati danneggiati o che hanno subito un cambiamento del colore non dovrebbero più essere usati;
- una spiegazione dei simboli usati per la marcatura;
- la nota che i valori limite specificati all'appendice A sono stati semplificati privilegiando la sicurezza rispetto ai valori limite riportati nella EN 60825-1.
- dettagli relativi a un adeguato metodo di pulizia;
- un'avvertenza che una protezione dell'occhio danneggiata e una protezione dell'occhio con oculari graffiati devono essere sostituite.

Marcatura

- Sui filtri o sulle montature, devono essere marcati in modo permanente i seguenti elementi:

a) simbolo della condizione di prova (laser continuo, a impulsi etc.);
b) Lunghezza d'onda (in nm) in cui il filtro garantisce la protezione;
c) numero di graduazione.
d) marchio di identificazione del fabbricante.
e) marchio di certificazione, se applicabile;
f) se il protettore dell'occhio soddisfa il requisito di resistenza meccanica

- Se i simboli sono riportati sui filtri, essi non devono compromettere la visione né l'effetto protettivo.

Codice marcatura

D nnn Lm X ZZ S

- D condizione di prova (laser a onda continua, a impulsi, a impulsi giganti, a modo accoppiato)
- nnn lunghezza d'onda per la quale il protettore dell'occhio fornisce la protezione
- Lm numero di graduazione
- X marchio identificazione del fabbricante
- ZZ Marchio certificazione se applicabile
- S Simbolo della resistenza meccanica

Esempi marcatura

- **D 633 L5 X ZZ S**: Occhiale per laser in continua che garantisce protezione L5 (trasmittanza 10^{-5}) per λ=633
- **D680-700 L5 + IR 700-1100 L7 X ZZ SS**: occhiale che garantisce protezione L5 per laser continui nella gamma 680-700 nm e protezione L7 per laser a impulsi e a impulsi giganti nella gamma 700-1100 nm

Scelta del protettore oculare

- I protettori oculari UNI EN 207 non permettono la visione del raggio
- La norma CEI EN 60825-1 definisce la densità ottica richiesta a partire dalla potenza (o energia) del raggio e dalla EMP:

$$D_\lambda = \log_{10} \frac{H_0}{EMP}$$

Scelta del protettore oculare

- La dipendenza di EMP dal tempo di esposizione e da λ è complicata
- La norma UNI EN 207 presenta pertanto una tabella con valori semplificati con criteri cautelativi (EMP risulta inferiore)
- Per λ compresa fra 400 nm e 1400 nm la variazione di D_λ con l'angolo di incidenza è limitata al campo 0°-30°, perché i movimenti oculari per fissare un oggetto si limitano a 15°, dopodiché si gira la testa

Tabella scelta filtro

Numero di graduazione	Fattore spettrale massimo di trasmissione per lunghezze d'onda laser	Densità massima di potenza e/o energia nel campo di lunghezze d'onda								
		da 180 nm a 315 nm			oltre 315 nm fino a 1 400 nm			oltre 1 400 nm fino a 1 000 μm		
		Tipo di laser/periodo di esposizione alla radiazione in s								
		D	I, R	M	D	I, R	M	D	I, R	M
		$\geq 3 \cdot 10^4$	da 10^{-9} a $3 \cdot 10^4$	$< 10^{-9}$	$> 5 \cdot 10^{-4}$	da 10^{-9} a $5 \cdot 10^{-4}$	$< 10^{-9}$	$> 0,1$	da 10^{-9} a $0,1$	$< 10^{-9}$
		E	*H*	*E*	*E*	*H*	*E*	*E*	*H*	*E*
	$\tau(\lambda)$	W/m^2	J/m^2	W/m^2	W/m^2	J/m^2	W/m^2	W/m^2	J/m^2	W/m^2
L1	10^{-1}	0,01	$3 \cdot 10^2$	$3 \cdot 10^{11}$	10^2	0,05	$5 \cdot 10^7$	10^4	10^3	10^{12}
L2	10^{-2}	0,1	$3 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^{12}$	10^3	0,5	$5 \cdot 10^8$	10^5	10^4	10^{13}
L3	10^{-3}	1	$3 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^{13}$	10^4	5	$5 \cdot 10^9$	10^6	10^5	10^{14}
L4	10^{-4}	10	$3 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^{14}$	10^5	50	$5 \cdot 10^{10}$	10^7	10^6	10^{15}
L5	10^{-5}	10^2	$3 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^{15}$	10^6	$5 \cdot 10^2$	$5 \cdot 10^{11}$	10^8	10^7	10^{16}
L6	10^{-6}	10^3	$3 \cdot 10^7$	$3 \cdot 10^{16}$	10^7	$5 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^{12}$	10^9	10^8	10^{17}
L7	10^{-7}	10^4	$3 \cdot 10^8$	$3 \cdot 10^{17}$	10^8	$5 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^{13}$	10^{10}	10^9	10^{18}
L8	10^{-8}	10^5	$3 \cdot 10^9$	$3 \cdot 10^{18}$	10^9	$5 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^{14}$	10^{11}	10^{10}	10^{19}
L9	10^{-9}	10^6	$3 \cdot 10^{10}$	$3 \cdot 10^{19}$	10^{10}	$5 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^{15}$	10^{12}	10^{11}	10^{20}
L10	10^{-10}	10^7	$3 \cdot 10^{11}$	$3 \cdot 10^{20}$	10^{11}	$5 \cdot 10^7$	$5 \cdot 10^{16}$	10^{13}	10^{12}	10^{21}

Simboli occhiali

Simbolo	Tipo di laser	Durata impulso (s)	Numero impulsi
D	Onda continua	10	1
I	Impulsi	$10^{-4} \div 10^{-1}$	100
R	Impulsi giganti	$10^{-9} \div 10^{-7}$	100
M	Impulsi a modo accoppiato	$<10^{-9}$	100

Determinazione numero graduazione
laser a onda continua

- Si determina il valore dell'irradiamento:

$$E = \frac{P}{A} \qquad \left(W \cdot m^{-2}\right)$$

- Dove:
  - P è la potenza radiante del laser
  - A è l'area della sezione del raggio
- Si cerca il valore corrispondente nella tabella alla colonna della rispettiva λ contrassegnata con D e si ricava Ln.

Determinazione numero graduazione laser a onda impulsi $t \geq 10^{-9}$

- Si considera l'esposizione energetica:

$$H = \frac{Q}{A}$$

- Per laser con λ da 400 a 1400 nm, si considera un numero di impulsi pari a

$$N = \nu \cdot 10 \text{ s}$$

(ν è la frequenza di ripetizione)

E si valuta

$$H' = H \cdot N^{1/4}$$

- Si cerca il valore corrispondente nella tabella alla colonna della rispettiva λ contrassegnata con I o R e si ricava Ln

Determinazione numero graduazione
laser a onda impulsi $t < 10^{-9}$

- Si considera l'irradiamento per la potenza di picco P:

$$E = \frac{P}{A}$$

- Per laser con l da 400 a 1400 nm, si considera un numero di impulsi pari a

$$N = \nu \cdot 10\ s$$

(ν è la frequenza di ripetizione)

E si valuta

$$E' = E \cdot N^{1/4}$$

- Si cerca il valore corrispondente nella tabella alla colonna della rispettiva λ contrassegnata con M e si ricava Ln

UNI EN 208

Informazioni

- Le informazioni devono essere nella lingua del Paese in cui viene venduto il protettore dell'occhio.
- Le informazioni fornite - per esempio su un adesivo, nella confezione o su un'etichetta -devono contenere almeno i seguenti dati
- Che il protettore dell'occhio garantisce la protezione soltanto contro le radiazioni laser:
  - fino a 0,01 W e fino a $2 \cdot 10^{-6}$ J per il numero di graduazione R1,
  - fino a 0,1 W e fino a $2 \cdot 10^{-5}$ J per il numero di graduazione R2,
  - fino a 1 W e fino a $2 \cdot 10^{-4}$ J per il numero di graduazione R3,
  - fino a 10 W e fino a $2 \cdot 10^{-3}$ J per il numero di graduazione R4,
  - fino a 100 W e fino a $2 \cdot 10^{-2}$ J per il numero di graduazione R5;

Informazioni

- Che il protettore dell'occhio non è destinato a essere usato per guardare direttamente il raggio;
- che fornisce protezione soltanto contro l'esposizione occasionale alle radiazioni dove non vi è alcuna soppressione o riduzione (trattamento medico, malattia, **...)** del riflesso palpebrale e di conseguenza devono essere evitate le esposizioni ripetute alle radiazioni;

Informazioni

- Che dettagli relativi a un adeguato metodo di pulizia;
- Che un'avvertenza che una protezione dell'occhio danneggiata e una protezione dell'occhio con oculari graffiati devono essere sostituite;
- Che deve essere indicato il fattore di trasmissione luminosa. Si deve indicare se il fattore di trasmissione luminosa è minore del 20% e, in tal caso, si deve raccomandare all'utilizzatore di aumentare l'intensità dell'illuminazione sul posto di lavoro;

Informazioni

- nel caso di filtri colorati, un'avvertenza all'utilizzatore perché controlli se viene compromesso il riconoscimento di spie luminose o di segnali di avvertimento;
- le istruzioni per l'uso devono anche contenere l'indicazione che i protettori dell'occhio e i filtri che proteggono dalle radiazioni laser che sono stati danneggiati o che hanno subito un cambiamento del colore non dovrebbero più essere usati;

Informazioni

- devono essere spiegati i simboli utilizzati per la designazione;
- si deve far presente che una riflessione accidentale delle radiazioni laser, per esempio dovuta a parti riflettenti (protettori dell'occhio inclusi), all'inclinazione o a una regolazione imperfetta dei componenti ottici, può causare pericoli. Tutto il personale che lavora in queste zone deve indossare protettori dell'occhio.

Marcatura

- Potenza massima in watt ed energia massima in Joule
- λ (o gamma di λ) per la quale è prescritto il protettore dell'occhio
- Numero di graduazione
- Marchio identificazione fabbricante
- Marchio certificazione, se applicabile
- Simbolo della resistenza meccanica, se del caso

Esempio marcatura

1W $2 \cdot 10^{-4}$ J 514 R3 X ZZ

- Occhiali che proteggono per la radiazione di 514 nm da usare con laser di potenza massima 1W o energia massima di $2 \cdot 10^{-4}$ J per la quale garantiscono una trasmittanza compresa fra 10^{-4} e 10^{-3}

Scelta del filtro

- Gli occhiali da allineamento devono essere usati solo per lavori di regolazione nel campo spettrale 400-700 nm in cui deve essere visto il percorso del raggio
- Quando si usano questi occhiali l'occhio è protetto solo dai danni derivanti dall'osservazione accidentale diretta del raggio per t<0,25 s
- Se il riflesso palpebrale è soppresso o ritardato (trattamento medico, malattia etc.) la protezione non è garantita
- Per osservazioni prolungate vanno **sempre** usati occhiali rispondenti alla norma UNI EN 207

Scelta del filtro
laser continui

- Laser in continua ($t \geq 2 \cdot 10^{-4}$ s): si valuta la potenza massima istantanea e si sceglie il numero di graduazione corrispondente nell'apposita tabella

Scelta del filtro
laser a impulsi

- Laser a impulsi ($10^{-9} < t < 2 \cdot 10^{-4}$ s) con frequenza di ripetizione < 0,1 s^{-1}: si valuta l'energia massima e si sceglie il numero di graduazione corrispondente nell'apposita tabella.
- Laser a impulsi ($10^{-9} < t < 2 \cdot 10^{-4}$ s) con frequenza di ripetizione > 0,1 s^{-1}: si valuta

$$Q' = Q \cdot N^{1/4}$$

$$N = \nu \cdot 10 \text{ s}$$

e si sceglie il numero di graduazione corrispondente nell'apposita tabella.

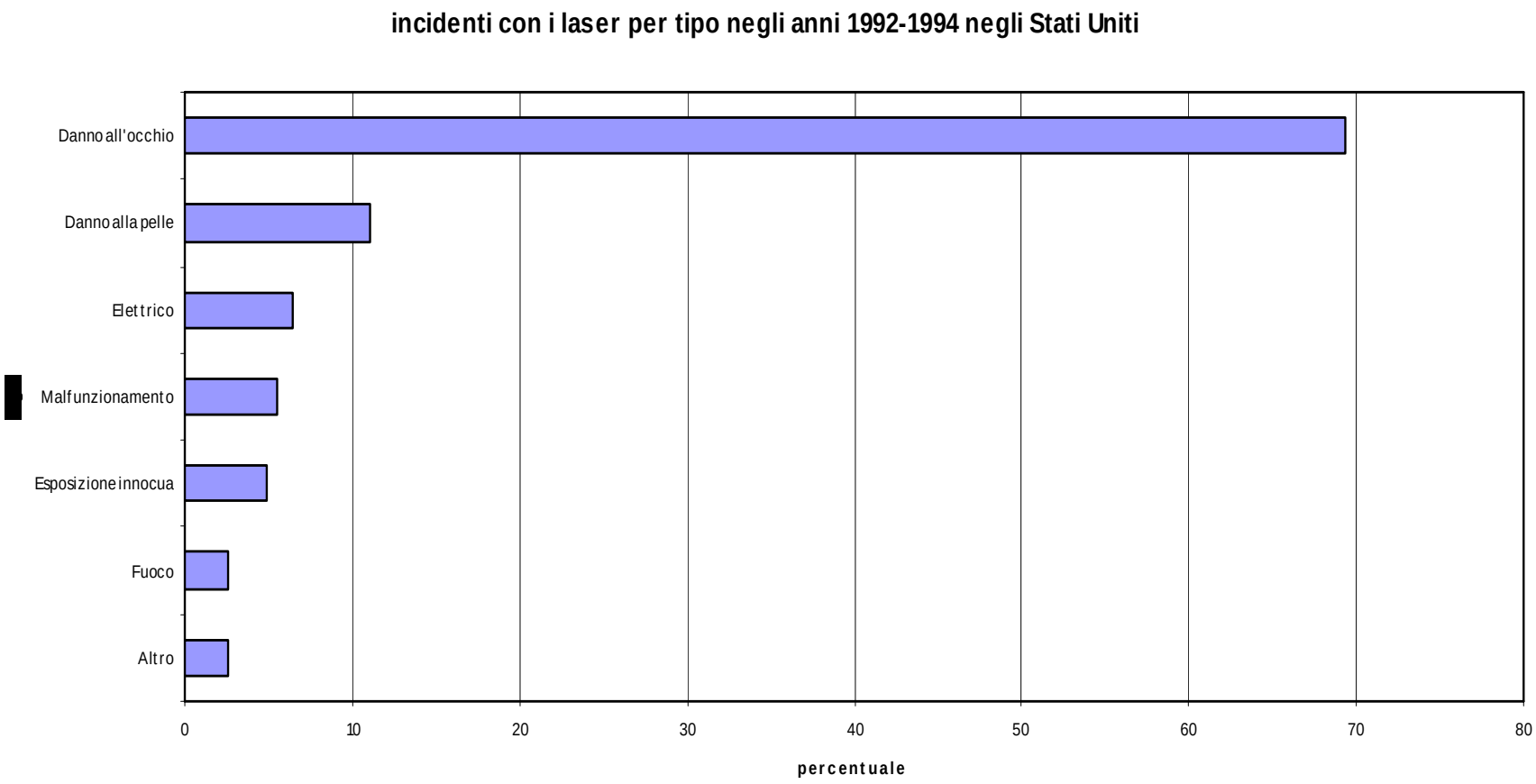
Tabella scelta filtro

Numero di graduazione	Fattore spettrale di trasmissione		Laser in emissione continua e laser a impulsi con $t \geq 2 \cdot 10\text{-}4$ s Potenza laser massima W	Laser a impulsi con durata dell'impulso > 10-9 s fino a 2 · 10^4 s Energia massima dell'impulso J
	Filtro	Montatura		
R 1	$10^{-2}<\tau(\lambda)<10^{-1}$	$\tau(\lambda)\leq 10^{-1}$	0,01	2
R 2	$10^{-3}<\tau(\lambda)<10^{-2}$	$\tau(\lambda)\leq 10^{-2}$	0,1	20
R 3	$10^{-4}<\tau(\lambda)<10^{-3}$	$\tau(\lambda)\leq 10^{-3}$	1	200
R 4	$10^{-5}<\tau(\lambda)<10^{-4}$	$\tau(\lambda)\leq 10^{-4}$	10	2000
R 5	$10^{-6}<\tau(\lambda)<10^{-5}$	$\tau(\lambda)\leq 10^{-5}$	100	20000

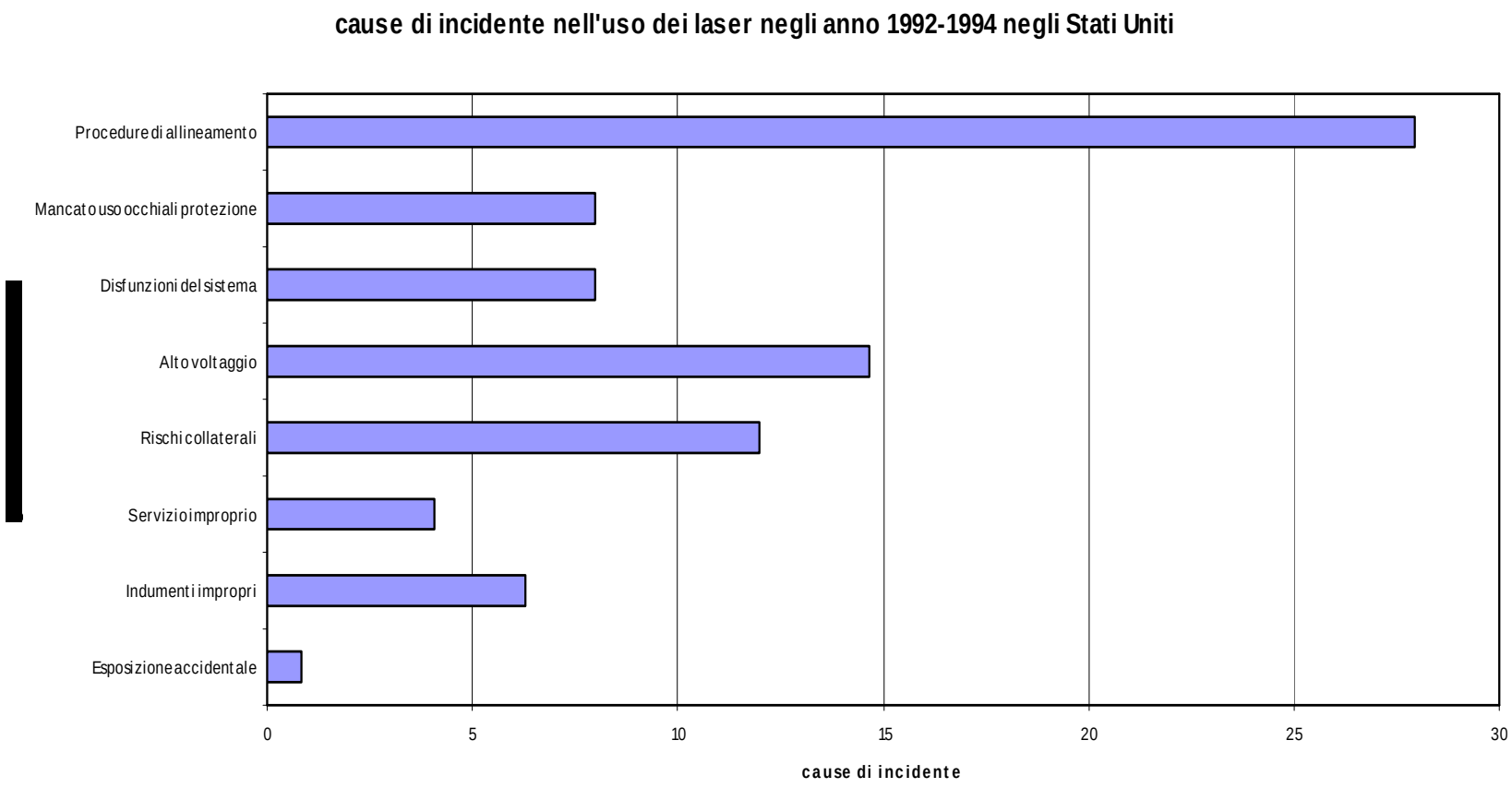
Indumenti protettivi

- Quando il personale può essere esposto a livelli di radiazione che superino l'EMP per la pelle, devono essere previsti adeguati indumenti.
- I laser di Classe 4, in modo particolare, rappresentano un potenziale pericolo di incendio e gli indumenti protettivi indossati dovrebbero essere in un adeguato materiale ignifugo e termoresistente.
- Nella scelta degli indumenti per la protezione dai laser di Classe 4, si deve prestare un'attenzione speciale per le caratteristiche di stabilità e resistenza alle radiazioni laser.

Statistica incidenti



Statistica incidenti



RISCHI NON OTTICI

Contaminazione atmosferica

a) I gas provenienti dai sistemi laser a circolazione di gas o dai prodotti delle reazioni innescate dal laser, quali il bromo, cloro e acido cianidrico.
b) I gas o i vapori dei refrigeranti criogenici.
c) I gas di assistenza per le interazioni laser-bersaglio, come l'ossigeno (industriale)
d) I materiali bersaglio vaporizzati e i prodotti di reazione dovuti alle operazioni di taglio, foratura e saldatura con il laser. Questi materiali possono comprendere, amianto, monossido di carbonio, anidride carbonica, ozono, piombo, mercurio e altri metalli e materiali biologici (industriale)

Pericoli di radiazione collaterale

Radiazione collaterale ultravioletta

- Può esservi un considerevole pericolo legato alla radiazione ultravioletta associata alle lampade flash e ai tubi a scarica di laser ad emissione continua, specialmente quando si impiegano tubi o specchi che trasmettono nell'ultravioletto (come quelli al quarzo).

Radiazione collaterale visibile ed Infrarossa

- La radiazione visibile e del vicino infrarosso emessa dai tubi flash e dalle sorgenti di pompaggio e la radiazione di ritorno dal bersaglio possono avere una radianza sufficiente a produrre pericoli potenziali.

Rischio chimico

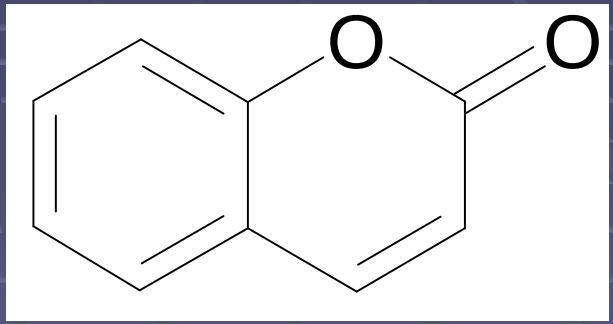
- Coloranti organici presenti in alcuni sistemi laser (laser a coloranti)
- Prodotti chimici mutageni, cancerogeni tossici e/o altamente reattivi
- Gas prodotti dai laser o interazione fra il laser e il bersaglio

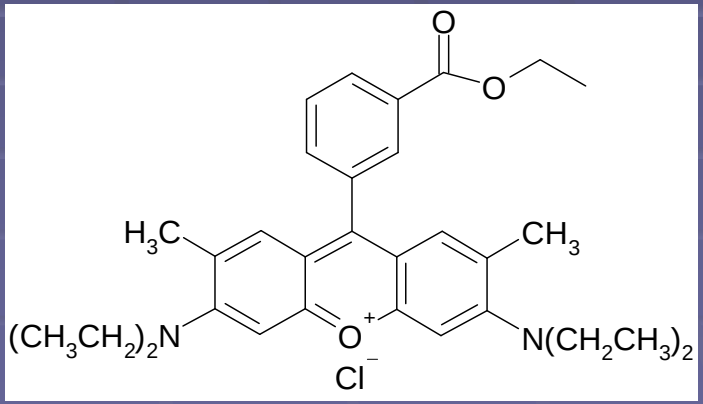
Prevenzione rischio chimico

- Usare le normali misure di sicurezza di laboratorio (DPI, corretto stoccaggio, armadi aspirati, cappe etc.)
- Leggere sempre le schede di sicurezza dei prodotti

Coloranti

- I più importanti coloranti usati come mezzo attivo appartengono alla famiglia delle cumarine o delle rodammine
- Si sa poco sulla loro tossicità





Pericoli elettrici

- È il rischio non radiativo più comune
- Molti laser impiegano tensioni elevate (superiori ai kV), e i laser pulsati sono particolarmente pericolosi a causa dell'energia immagazzinata nei banchi di condensatori.
- I componenti dei circuiti, quali i tubi elettronici che funzionano a tensioni dell'anodo superiori a 5 kV, possono emettere raggi X e quindi andrebbero adeguatamente schermati
- I rischi elettrici si prevengono usando le normali misure di sicurezza elettrica

Refrigeranti criogenici

- I liquidi criogenici possono provocare necrosi e richiedono particolari precauzioni durante la manipolazione.

Pericoli di incendio

- Esiste il rischio di incendio anche a grande distanza per l'interazione del fascio con sostanze infiammabili;
- Durante le operazioni di taglio, foratura o di saldatura, si possono avere particelle incandescenti, emesse dalla zona del bersaglio

Altri pericoli

- Durante il funzionamento di alcuni sistemi laser a potenza elevata vi è un rischio di esplosioni nei banchi di condensatori o nei sistemi a pompaggio ottico.
- Sono possibili reazioni esplosive di reagenti nei laser chimici o di altri gas usati nel laboratorio
- Durante le operazioni di taglio, foratura e saldatura con laser vi è la possibilità di particelle volanti provenienti dall'area bersaglio. Sono anche possibili reazioni esplosive di reagenti per laser chimici o di altri gas impiegati nel laboratorio.

PROCEDURE DI CONTROLLO DEI RISCHI

Aspetti da considerare

- Nella valutazione dei possibili pericoli e nell'applicazione delle misure di controllo bisogna tenere in considerazione tre aspetti legati dell'uso dei laser:
  a) la capacità del laser o del sistema laser di provocare lesioni alle persone. Questo comprende qualsiasi considerazione relativa all'accesso umano all'apertura di emissione principale o ad eventuali aperture secondarie;
  b) l'ambiente in cui il laser viene impiegato;
  c) il livello di addestramento del personale che fa funzionare il laser o che può essere esposto alla sua radiazione

Tipologie di utilizzo

- I mezzi pratici di valutazione e di controllo per un uso sicuro degli apparecchi laser si possono distinguere sulla base dell'uso:
  - *in ambienti esterni e in edifici*: i controlli procedurali spesso forniscono solo un ragionevole approccio praticabile al funzionamento in condizioni sicure;
  - *in laboratorio o in ambienti di lavoro*: i controlli tecnici possono giocare il ruolo principale;
  - *in ambienti per presentazioni e dimostrazioni*: la prepianificazione, la definizione e il controllo dell'accesso spesso forniscono

Installazioni laser in laboratorio e luoghi di lavoro

Laser Classe 1

- Utilizzo senza prescrizioni

Laser 1M, 2, 2M e 3R

- Sono richieste precauzioni solo per prevenire l'osservazione continua del fascio diretto;
- per le Classi 1M, 2 e 2M, un'esposizione temporanea (0,25 s) alla radiazione nella banda di lunghezza d'onda da 400 nm a 700 nm, che potrebbe avvenire in situazioni di osservazione accidentale non è considerata pericolosa.
- Tuttavia, il fascio laser non dovrebbe essere puntato intenzionalmente verso persone.
- L'impiego di ausili ottici di osservazione (per esempio binocoli) con gli apparecchi laser di Classe 1M, 2M e 3R può aumentare il rischio oculare.

Apparecchi laser della Classe 3B

- I laser di Classe 3B sono potenzialmente pericolosi nel caso in cui un **fascio diretto** o una **riflessione speculare** vengano osservati da un occhio non protetto (visione diretta del fascio).
- Il laser deve essere fatto funzionare solo in un'area controllata.
- Si deve prestare attenzione per prevenire le riflessioni speculari non intenzionali.

Apparecchi laser della Classe 3B

- Il fascio del laser deve essere terminato, quando possibile, alla fine del suo percorso utile con un mezzo di arresto o attenuazione
- Vanno protetti gli occhi se vi è una qualsiasi possibilità di osservazione del fascio diretto o riflesso specularmente.
- Sugli accessi alle aree devono essere posti segnali di avvertimento normalizzati.
- Di norma deve essere impedito l'accesso ai non addetti quando il sistema è in funzione

Laser di Classe 4

- Gli apparecchi di Classe 4 possono provocare lesioni sia con fascio diretto, sia con le sue riflessioni speculari che con quelle diffuse. Essi rappresentano anche un potenziale pericolo di incendio.
- Si devono adottare tutte le precauzioni per i laser 3B,
- Le traiettorie del fascio devono essere, quando possibile, sempre racchiuse.
- Gli addetti devono indossano protezioni oculari e indumenti protettivi adeguati al laser durante funzionamento.

Laser classe 4 (segue)

- È importante una buona illuminazione interna ed è auspicabile in colore chiaro delle pareti
- I laser devono essere fatti funzionare, quando possibile, sempre con un comando a distanza, eliminando così la necessità che il personale sia fisicamente presente nell'ambiente del laser.

Laser di Classe 4 (segue)

- L'incendio è un potenziale pericolo associato ai laser di grande potenza (CO_2, HF etc.).
- Si deve prevedere un adeguato dispositivo di arresto del fascio, preferibilmente sotto forma di bersaglio metallico o di grafite adeguatamente raffreddato.

Laser di Classe 4 (segue)

- Possono essere necessarie speciali precauzioni per impedire riflessioni indesiderate nello spettro invisibile da una radiazione infrarossa e il fascio e l'area di bersaglio dovrebbero essere circondati da materiale opaco alla lunghezza d'onda del laser (anche superfici metalliche opache possono essere molto speculari alla lunghezza d'onda del CO_2 di 10,6 pm).
- Possono essere impiegati schermi posti localmente, quando possibile, per ridurre il livello di radiazione riflessa.

Prescrizioni per gli operatori

- **Non osservare mai direttamente il fascio anche se indossano gli occhiali protettivi**
- **indossare gli occhiali o le maschere specifici per la sorgente in uso e conservarli con cura**

Prescrizioni per gli operatori

- **non osservare il fascio laser attraverso fibre ottiche o sistemi di raccolta (telescopi, microscopi ecc.) senza espressa autorizzazione del Responsabile,**
- **evitare con cura le riflessioni non controllate ed accidentali (non indossare orologi, orecchini ecc)**

Prescrizioni per gli operatori

- **verificare che tutte le condizioni di sicurezza previste siano correttamente predisposte prima di inviare il fascio in un'area che non è sotto diretta visione**
- **non rimuovere né modificare, senza autorizzazione del Responsabile, i dispositivi di protezione e di interblocco e non compiere manovre che non siano di competenza o che possano compromettere la sicurezza**

Prescrizioni per gli operatori

- **avvisare il Responsabile, dei dispositivi di prevenzione e protezione che non funzionano o sono danneggiati, nonché di eventuali pericoli di cui si venga a conoscenza, sospendendo nel contempo l'uso del laser ed eliminando eventuali pericoli immediati.**
- **Solo gli operatori specificamente autorizzati dal Responsabile dovrebbero effettuare interventi di manutenzione, ivi compreso l'allineamento del fascio che comporta l'apertura dell'involucro;**

Prescrizioni per gli operatori

- **in caso di incidente, provvedere a contenerne le conseguenze ed avvisare immediatamente il Responsabile**
- **Quando non è in uso il laser deve essere disabilitato in modo da prevenire un utilizzo non autorizzato;**
- **le pulizie dei locali possono essere effettuate solo a laser spenti**

Valutazione dei pericoli per l’impiego di laser in esterno

Dipendenza del rischio dalla distanza

- Il potenziale di pericolo degli apparecchi laser
  - di Classe 1M e Classe 2M che superano la classe 1 o 2 se osservati con ottiche di osservazione a distanza
  - di laser che emettono energia ad una lunghezza d'onda esterna all'intervallo da 400 nm a 700 nm,
  - di apparecchi laser di Classe 3B o Classe 4

  può estendersi a distanze considerevoli.
- La distanza dal laser alla quale l'irradiamento o l'esposizione energetica scende al di sotto della EMP appropriata, è indicata come distanza nominale di rischio oculare (DNRO).

Dipendenza dalla distanza

- La zona all'interno della quale l'irradiamento o l'esposizione energetica del fascio supera la EMP appropriata è detta zona nominale di rischio oculare (ZNRO). Questa zona è racchiusa nei limiti di spostamento trasversale, verticale e di precisione del puntamento del sistema laser e si estende sino al limite della DNRO, o alla posizione di un eventuale bersaglio o arresto.
- L'esatta ZNRO dipenderà anche dalla natura degli eventuali materiali che si trovano sulla traiettoria del fascio, per esempio riflettori speculari.

Dimostrazioni, presentazioni ed esibizioni

- Dovrebbero essere impiegati solo apparecchi laser di Classe 1 o Classe 2.
- L'uso di laser di altre classi dovrebbe essere permesso:
  - quando il funzionamento del laser avviene sotto il controllo di un operatore esperto ben addestrato,
  - quando gli spettatori sono protetti dall'esposizione a livelli che superano la EMP applicabile.

Dimostrazioni, presentazioni ed esibizioni

- Ogni apparecchio laser per dimostrazione utilizzato a fini educativi in scuole ecc., dovrebbe essere conforme a tutte le prescrizioni applicabili per gli apparecchi laser della Classe 1 o della Classe 2.
- Un apparecchio laser per dimostrazioni non deve permettere, per quanto possibile, l'accesso umano a radiazioni superiori ai limiti di emissione accessibili delle Classi 1 e 2.
- Si possono trovare ulteriori linee guida nella IEC 60825-3, un rapporto tecnico sulle precauzioni relative alla sicurezza per gli spettacoli e presentazioni con luce laser.

Installazioni laser all’aperto e in edifici

Apparecchi laser di Classe 2

- Quando ragionevolmente possibile, il fascio dovrebbe essere terminato alla fine del suo cammino utile e il laser non dovrebbe essere puntato direttamente verso le persone (all'altezza del capo).

Laser 1M, 2M e 3R utilizzati per topografia, l'allineamento e il livellamento

- Solo le persone qualificate e addestrate dovrebbero essere assegnate all'installazione, alla regolazione e al funzionamento di un apparecchio laser.
- Nelle aree in cui questi laser sono impiegati dovrebbero essere affissi segnali di avvertimento appropriati al tipo di laser.
- Quando possibile, per effettuare l'allineamento del laser si dovrebbero impiegare mezzi meccanici o elettrici.

Laser 1M, 2M e 3R utilizzati per topografia, l'allineamento e il livellamento

- Si dovrebbero adottare precauzioni per assicurare che le persone non osservino direttamente il fascio (osservazioni dirette prolungate possono essere pericolose). L'osservazione diretta del fascio attraverso gli strumenti ottici (teodoliti, ecc.) può anch'essa risultare pericolosa, in modo particolare per i laser di Classe 1M e 2M che non soddisfano la condizione 1 della Tab. 10, e non dovrebbe essere permessa, a meno che non sia espressamente approvata dall'addetto alla sicurezza del laser.
- Il fascio del laser dovrebbe essere terminato alla fine del suo cammino utile, e in ogni caso quando il cammino pericoloso (sino al DNRO) si estende oltre l'area controllata.

Laser 1M, 2M e 3R utilizzati per topografia, l'allineamento e il livellamento

- Il fascio del laser, se possibile, dovrebbe essere posto ben al di sopra o al di sotto del livello degli occhi.
- Si dovrebbero adottare precauzioni per assicurare che il fascio del laser non sia involontariamente diretto verso superfici riflettenti (speculari) (ma soprattutto non su superfici riflettenti piane o concave).
- Quando non utilizzato il laser dovrebbe essere riposto in un luogo in cui le persone non autorizzate non abbiano accesso.

Laser di Classe 3B e Classe 4

- Dispositivi tecnici, quali barriere fisiche, blocchi che limitano gli spostamenti trasversali e verticali, etc. dovrebbero essere impiegati, quando possibile per aumentare l'efficacia dei controlli procedurali amministrativi.
- Gli apparecchi laser di Classe 3B e 4 impiegati all'aperto e ambienti assimilabili, dovrebbero essere fatti funzionare esclusivamente da personale adeguatamente addestrato al loro uso e approvato dall'addetto alla sicurezza del laser.
- Il personale non dovrebbe trovarsi sulla traiettoria del fascio in tutti quei punti in cui l'irradiamento o l'esposizione energetica del fascio supera la EMP, a meno che non indossino protezioni oculari e indumenti adeguati.

Laser di Classe 3B e Classe 4

- Una soluzione alternativa consiste nel porre l'operatore all'interno di un locale chiuso che fornisca la protezione dai fasci vaganti e garantisca una buona visibilità circostante.
- Il puntamento ottico intenzionale di veicoli stradali o aerei, non aventi un rapporto con il bersaglio dovrebbe essere vietato entro la distanza nominale di rischio oculare.

Laser di Classe 3B e Classe 4

- Dalle traiettorie dei fasci dovrebbero, quando possibile, essere eliminate tutte le superfici in grado di produrre riflessioni non intenzionali, che siano potenzialmente pericolose, oppure la zona di pericolo dovrebbe essere estesa di conseguenza.
- Sebbene l'osservazione diretta del fascio dei laser di Classe 3B sia normalmente pericolosa, un fascio può, in tutti i casi, essere osservato in sicurezza attraverso una riflessione diffusa alle seguenti condizioni:
  - distanza minima visiva tra lo schermo e la cornea di 13 cm;
  - massima durata di esposizione 10 s.
- Se una delle due condizioni non è soddisfatta, è necessaria un'attenta valutazione dei rischi.

Laser utilizzati per topografia, allineamento e livellamento

- Per le applicazioni di topografia, allineamento e livellamento si dovrebbero impiegare, quando possibile, i laser delle Classi 1 o 2.
- possono esistere situazioni in cui gli elevati livelli luminosi dell'ambiente richiedono l'impiego di laser di potenza superiore.

Laser utilizzati per topografia, allineamento e livellamento

- Se vengono utilizzati laser delle Classi 1M, 2M e 3R, si dovrebbero rispettare le prescrizioni per l'uso all'aperto
- non dovrebbe essere consentita l'esposizione umana alla radiazione laser nell'intervallo di lunghezza d'onda da 400 nm a 700 nm con una potenza radiante superiore a 5 x 10 W per durate superiori a 3,8 x s o l'esposizione alla radiazione laser superiore al LEA per la Classe 1 per qualsiasi altra combinazione di durate di emissione e lunghezza d'onda.