



INO - CNR
Istituto
Nazionale di
Ottica

Lo standard CEI EN 60825-1 (2014)

Relatori:

Luca Mercatelli – CNR INO

David Jafrancesco – CNR INO



Struttura e requisiti dello standard CEI EN 60825-1

- Elementi di ottica e laser
- EMP (Esposizione Massima Permissa)
- LEA (Limiti di Emissione Accessibile)
- Classificazione dei laser
- Parametri per la classificazione dei laser (misura della Classe)

Questa presentazione è pensata fondamentalmente per utenti che hanno elevata competenza nel settore laser; però, poiché potrebbero esserci tra i presenti persone che non lavorano con i laser, è necessario premettere alcune considerazioni base sull'ottica e sul funzionamento di questi ultimi.



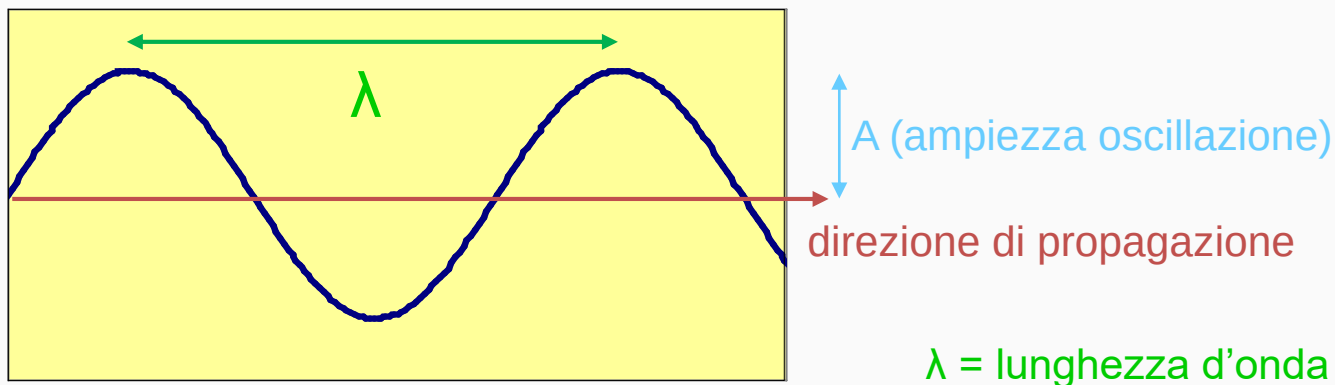
Elementi di ottica e laser



Radiazioni elettromagnetiche

Le radiazioni elettromagnetiche, di cui le radiazioni ottiche sono una parte, sono oscillazioni (onde) nello spazio elettromagnetico. Esse sono caratterizzate da diversi parametri: quelli che interessano a noi sono la lunghezza d'onda (direttamente) e l'ampiezza (indirettamente).

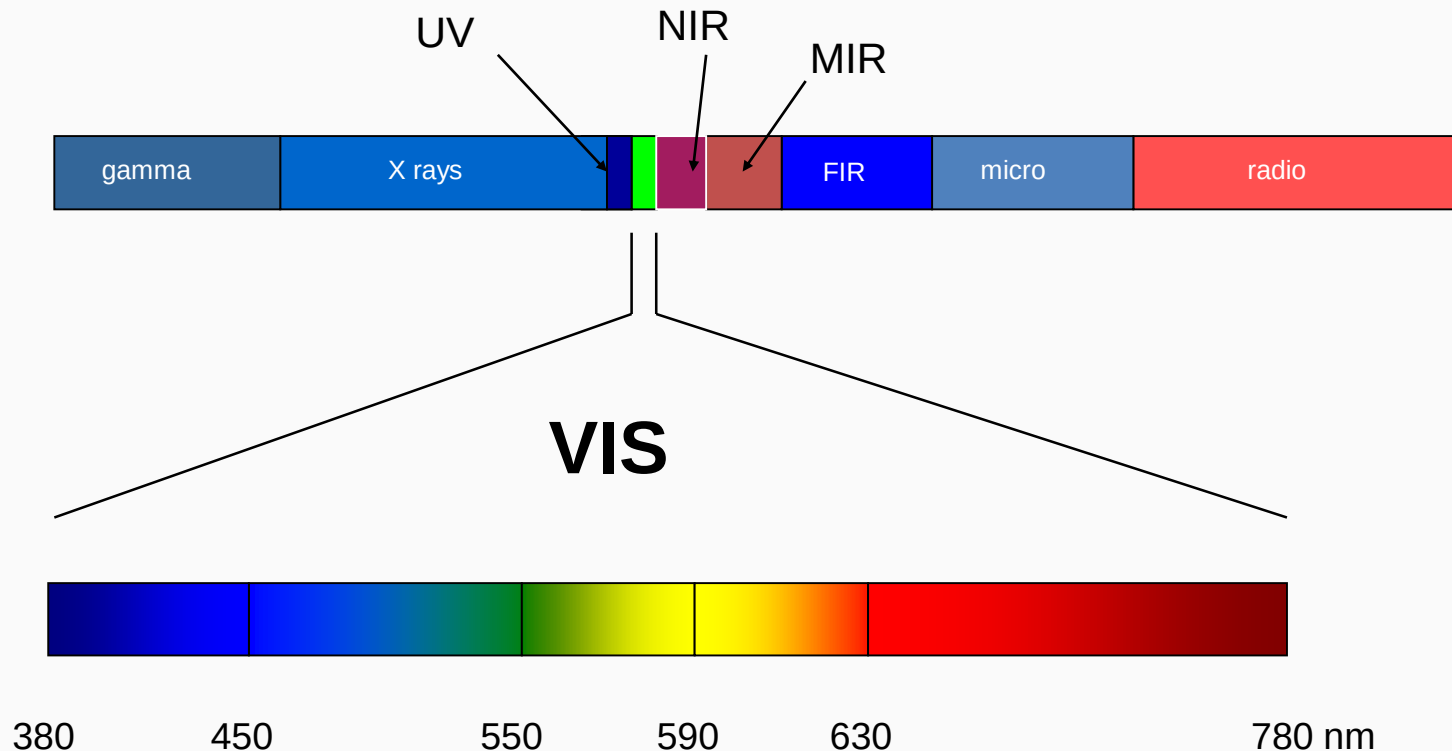
La lunghezza d'onda λ si misura in metri (m) o in suoi sottomultipli: micron ($1 \mu\text{m} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m} = 0.001 \text{ mm}$) e nanometri ($1 \text{ nm} = 1 \cdot 10^{-9} \text{ m} = 0.000001 \text{ mm}$)





Spettro

Lo spettro è l'insieme delle lunghezze d'onda della radiazione elettromagnetica:





Radiazione ottica e luce

Radiazione ottica	radiazione elettromagnetica di lunghezza d'onda compresa tra 100 nm e 1mm
Luce	radiazione ottica di lunghezza d'onda compresa tra 380 e 780 nm, cioè nell'intervallo in cui è percepibile dall'occhio umano

Quindi: la luce è radiazione ottica, ma non tutta la radiazione ottica è luce



Attenzione: il fatto che l'occhio umano non percepisca una specifica lunghezza d'onda NON equivale a dire che non sia sensibile ad essa!



Radiometria

La radiometria è quella parte dell'ottica che si occupa della misura della radiazione. Tutte le grandezze in gioco per la sicurezza laser sono grandezze radiometriche.

Radiometria:

Range $100 \text{ nm} \leq \lambda \leq 1 \text{ mm} (= 10^6 \text{ nm})$

λ = lunghezza d'onda



La radiazione sotto 100 nm rientra nelle radiazioni ionizzanti, che sono estremamente pericolose. In questo caso deve SEMPRE intervenire l'«esperto qualificato», cioè un tecnico esperto in modo specifico di radioprotezione



Grandezze radiometriche di interesse

- Energia (energy): si misura in Joule (J)
- Flusso radiante (radiant flux): è quella che viene generalmente chiamata "potenza", e si misura in Watt (W)
- Esposizione energetica (radiant exposure): è l'energia ricevuta per unità di superficie. Si misura in J/m^2
- Irradimento (irradiance): è il flusso radiante incidente per unità di superficie; quando è emesso dalla superficie dovrebbe prendere il nome di "emittenza energetica" (radiant exitance). Si misura in W/m^2



Geometria e tipo di emissione della sorgente

Una sorgente di luce è definita dalla sua geometria, cioè dalla struttura che possiede, e dal suo modo di emissione. Principalmente, una sorgente può essere:

- **puntiforme**, se per quel che ci riguarda può essere assimilata ad un punto
- **estesa**, in caso contrario
- **continua**, se emette luce in modo continuo
- **pulsata**, se emette impulsi di luce



Cosa è un laser

Un laser, acronimo di Light Amplification by Stimulated Emitted Radiation, è un sistema che permette di generare radiazione ottica che può essere*:

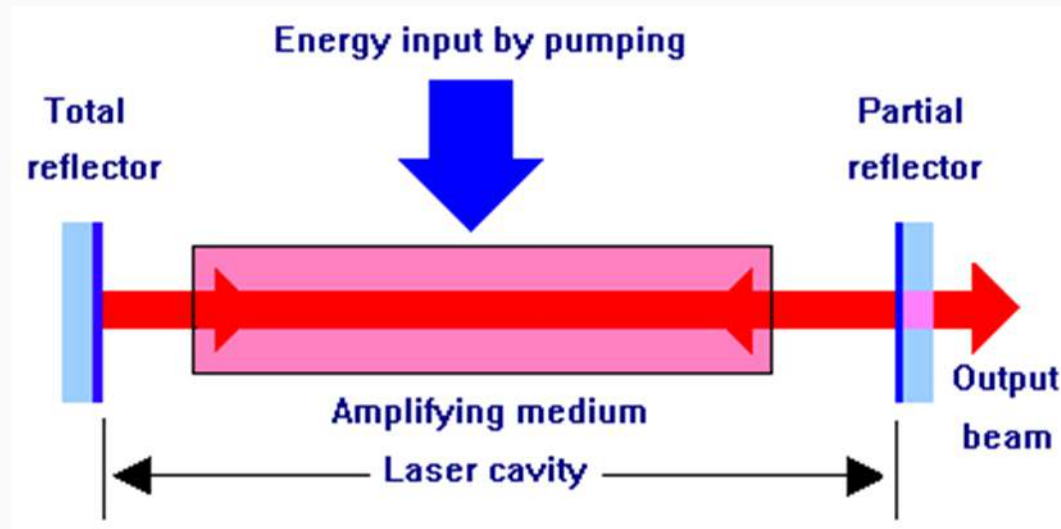
- altamente monocromatica;
- fortemente direzionale (collimata);
- estremamente intensa.

Un laser è costituito da un sistema che fornisce energia (lampade, scarica elettrica, reazione chimica,...), un sistema che trasforma tale energia in radiazione ottica (mezzo attivo) ed un sistema che «gestisce» tale radiazione ottica (cavità, modulatori, specchi,...) in modo da darle le caratteristiche proprie della radiazione laser

* ci interessano qui solo le caratteristiche che riguardano la sicurezza

Come è fatto un laser

Lo schema di base di un laser può essere pensato così:



La sicurezza laser non riguarda solo il fascio in uscita ma tutto il laser, cioè anche i «rischi connessi» (per esempio quelli derivanti dall'utilizzo dell'alta tensione per l'alimentazione).



Laser raddoppiati e triplicati

Si deve anche tener conto che la radiazione in uscita da un laser può essere «raddoppiata» o «triplicata» (si intende in frequenza), cioè tramite particolari componenti la lunghezza d'onda del fascio può essere dimezzata o divisa per tre (a volte anche per quattro o più). Un tipo di laser che molto spesso è raddoppiato o triplicato è il laser Nd-YAG.



Molto spesso la presenza di radiazione «raddoppiata» o «triplicata» non impedisce che nel fascio rimanga una buona parte della radiazione originaria (per esempio, un laser Nd-YAG può generare un fascio con radiazione a 355 nm, a 532 nm e a 1064 nm).



Tipi più comuni di laser

Nome	Lunghezza d'onda (nm)	CW / Pulsed	Potenza CW o media indicativa in Laboratorio
Eccimeri	UV (150-350)	P	1-50 W
Nd-YAD 3a arm.	355	C/P	0.1-10 W
Nd-YAD 2a arm.	532	C/P	0.2-20 W
He-Ne	633	C	1-10 mW
Diodo	UV-NIR	C/P	0.1 mW - 1 kW (array)
Ti:Sa	700-1000	C/P	0.2 – 10 W
Nd-YAG	1064	C/P	0.5 - 50 W
CO ₂	10600	C	1 W – 1 kW



EMP - Esposizione Massima Permessa



Schema fondamentale della sicurezza ROA

Studi, ricerche cliniche e dati sulla sicurezza



Valori massimi di energia e/o flusso a livello dell'organo bersaglio



EMP (Esposizione massima Permissa) [MPE]



LEA (Livelli di Emissione Accessibile) [AEL]

Sono i livelli massimi consentiti di esposizione, espressi in forma di flusso, irradiazione, energia o esposizione energetica, a livello di cornea o cute

Sono i valori di flusso, irradiazione, energia o esposizione energetica che in determinate condizioni di misura un laser deve rispettare per essere ragionevolmente sicuri di non superare i livelli di EMP



Facciamo un esempio “meccanico” (completamente inventato!!):

Da studi clinici so che le falangi del piede possono essere danneggiate se sottoposte ad una pressione superiore a 5 kg/cm^2 , e che le falangi sono la parte più delicata della parte superiore del piede, cioè sono il mio «organo bersaglio»

So anche che per ottenere 5 kg/cm^2 sulle falangi devo sottoporre il dorso del piede ad una pressione di 7.5 kg/cm^2 (è l'equivalente dell'EMP)

Io sono un costruttore di martelli, e la legge mi impone che i miei martelli siano sicuri in caso di incidente (cioè se il martello mi cade di mano e mi finisce sul piede). Ma come faccio a sapere se il mio martello è sicuro?

Mosso a pietà, il legislatore mi aiuta e, dopo ulteriori studi, mi dice che il mio martello lo posso considerare sicuro se il rapporto tra la sua massa e la sua superficie piana più piccola è minore di X e se la raggiatura minima dei suoi spigoli è superiore a Y (è l'equivalente dei LEA)



LEA – Limiti di Emissione Accessibile



LEA (AEL) = Limiti di Emissione Accessibile (Accessible Emission Limits)

I LEA sono i massimi livelli di emissione accessibile per una determinata classe di laser. L'«emissione accessibile» (accessible emission) è il livello di radiazione ottica in una determinata posizione, con un determinato diaframma di apertura e con una determinata finestra di campo (quest'ultima a volte non esplicitata).

L'emissione accessibile deve essere sempre valutata in riferimento al punto in cui è possibile l'accesso umano, il che non vuol dire che il rivelatore vada messo sempre dove è possibile l'accesso umano.

Ricordiamo che i LEA sono l'applicazione pratica dell'EMP, cioè l'emissione accessibile è quello che si misura per valutare qual è la classe di sicurezza di un laser



Come è fatta una tabella LEA

- lunghezza d'onda in ordinate, tempo in ascisse
- limiti espressi in J, W, J/m² o W/m²
- presenza di numerosi coefficienti (es. C₂, C₄) e alcuni valori-limite (es. T₁)

Table 8 – Accessible emission limits for Class 3B laser products ^a

Wavelength λ nm	Emission duration t s		
	$<10^{-9}$	10^{-9} to 0,25	0,25 to 3×10^4
180 to 302,5	$3,8 \times 10^5$ W	$3,8 \times 10^{-4}$ J	$1,5 \times 10^{-3}$ W
302,5 to 315	$1,25 \times 10^4$ C ₂ W	$1,25 \times 10^{-5}$ C ₂ J	5×10^{-5} C ₂ W
315 to 400	$1,25 \times 10^8$ W	0,125 J	0,5 W
400 to 700	3×10^7 W	0,03 J for $t < 0,06$ s 0,5 W for $t \geq 0,06$ s	0,5 W
700 to 1 050	3×10^7 C ₄ W	0,03 C ₄ J for $t < 0,06$ C ₄ s 0,5 W for $t \geq 0,06$ C ₄ s	0,5 W
1 050 to 1 400	$1,5 \times 10^8$ W	0,15 J	0,5 W
1 400 to 10^6	$1,25 \times 10^8$ W	0,125 J	0,5 W

^a For correction factors and units, see Table 9.



Dai LEA alle classi dei laser

In dipendenza dai LEA sono stabilite le classi di sicurezza dei laser. Ogni sistema laser (comprendendo in esso anche le eventuali ottiche che modificano il fascio) deve essere assegnato ad una classe di sicurezza.

Le classi laser non individuano tanto il rischio quanto la tipologia di rischio. Tra un laser a CO₂ da 1 W ed un laser in fibra da 25 kW, entrambi in continua, la differenza di rischio è enorme, ma sono ambedue assegnati alla classe 4.



Classificazione dei laser



Classi di sicurezza laser

Vi sono 8 classi di sicurezza: 1, 1M, 1C, 2, 2M, 3R, 3B, 4

1: non pericolosi

1M: non pericolosi se non osservati con uno strumento ottico

1C: non pericolosi se utilizzati nelle condizioni d'uso prescritte

2: non pericolosi per riflesso palpebrale

2M: non pericolosi per riflesso palpebrale se non osservati con uno strumento ottico

3R: mediamente pericolosi; superano i limiti ma non di molto (borderline)

3B: pericolosi per l'occhio

4: pericolosi anche per la cute e per riflessione



Visione volontaria e situazioni particolari



Tutto quanto stiamo dicendo riguarda l'interazione involontaria con il fascio: la visione volontaria non è contemplata; per esempio, un laser di classe 2 **NON** è sicuro se uno vuole guardare direttamente il fascio! Per questo in zone aperte al pubblico e senza controllo possono essere utilizzati esclusivamente laser di classe 1.



Uguualmente, non è nemmeno considerata l'esistenza di casi particolari che potrebbero aumentare il rischio (assenza del riflesso palpebrale, cristallino artificiale, ...), o meglio la norma specifica che in questi casi le EMP tabulate potrebbero essere sovrastimate.

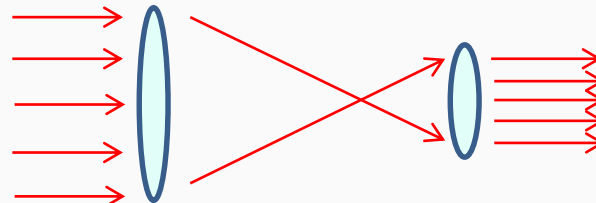
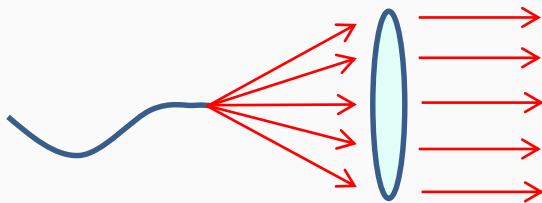


Classi 1 e 1M

I laser di classe 1 sono non pericolosi in tutte le condizioni d'uso*. Possono essere utilizzati in luoghi aperti al pubblico senza sorveglianza o misure particolari.

I laser di classe 1M sono laser che emettono tra 302.5 e 4000 nm e sono non pericolosi se il loro fascio non è osservato tramite strumenti ottici. Gli strumenti ottici pericolosi sono principalmente:

- sistemi ottici a focale positiva nel cui fuoco può essere posta l'uscita di un laser divergente;
- telescopi che possono modificare divergenza e diametro dei fasci

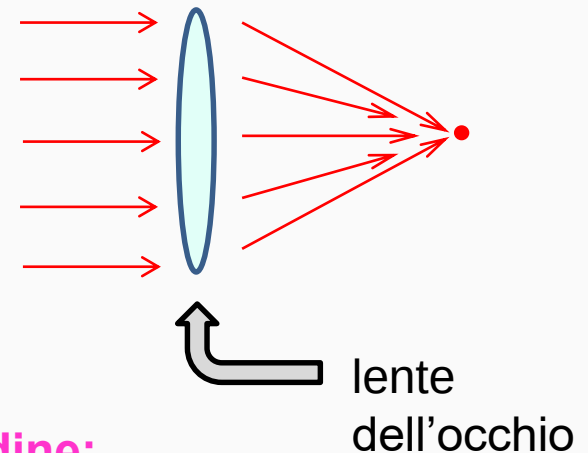


* si intende in condizioni d'uso non eccezionali o estremamente particolari

Pericolosità dei fasci collimati

I fasci collimati (cioè i fasci i cui raggi sono sostanzialmente paralleli tra loro) sono molto pericolosi perché producono sulla retina un'immagine puntiforme*.

In pratica l'immagine di un fascio collimato è simile all'immagine di una sorgente puntiforme a distanza finita, con la differenza che nel secondo caso l'occhio deve mettere a fuoco (la posizione di riposo è l'infinito)



Gli «oggetti» più pericolosi sono quindi nell'ordine:

- 1) i fasci collimati**
- 2) le sorgenti molto piccole**

* cioè tale che la sua dimensione è determinata dalle aberrazioni dell'occhio



Classi 2 e 2M

I laser di classe 2 sono non pericolosi grazie al riflesso palpebrale, e quindi questa classe è riservata a laser che emettono solo nel visibile (400-700 nm)

I laser di classe 2M sono come i classe 2, ma il loro fascio non deve essere osservato tramite strumenti ottici.

Come è facile intuire, tutti i laser da allineamento (che cioè servono per allineare un altro sistema) sono nel visibile, e spesso sono di Classe 2 o 2M.

Gli occhiali per la regolazione laser, che si usano per allineare laser nel visibile superiori alla Classe 2M, devono essere calcolati in modo da limitare l'esposizione alla Classe 2/2M.



Classe 1C

I laser di classe 1C (classe non presente nelle precedenti edizioni della norma) sono laser per i quali l'uso previsto è a contatto con il target. Il riferimento sostanzialmente esclusivo è a laser medicali. Vi è però un'altra condizione: deve esistere uno standard verticale IEC che prevede un set di requisiti di sicurezza.

Se l'utilizzo previsto è a contatto con la cute (NON con il tessuto oculare), lo standard verticale deve fare parte delle famiglie IEC 60601 oppure IEC 60335; questo standard verticale deve prevedere i controlli per evitare l'emissione di radiazione fuori dalla zona di irradiazione prevista (stray light, leakage of laser radiation). Possono essere anche utilizzati senza la supervisione di personale specializzato.



Classe 3R

I laser di classe 3R sono laser che superano i limiti di sicurezza, ma il cui rischio di provocare effettivamente danni oculari in caso di visione accidentale è abbastanza bassa.

I limiti sono 5 volte quelli della classe 1 (sotto 400 nm e sopra 700 nm) e 5 volte quelli della classe 2 (tra 400 e 700 nm).

In pratica la 3R è una classe-ponte tra fasci sicuri e dannosi; i laser appartenenti a questa classe richiedono l'applicazione di misure di sicurezza ma non così elaborate come quelle relative ai laser di classe 3B e 4. Non sono di libera vendita (almeno ufficialmente...)



Classe 3B

I laser di classe 3B sono laser che superano i limiti di sicurezza in misura maggiore rispetto ai laser di classe 3R. Sono effettivamente pericolosi in caso di visione accidentale del fascio, cioè vi è una rilevante probabilità che possano provocare danni oculari. Non sono pericolose le riflessioni diffuse né l'esposizione della cute.



Attenzione: le riflessioni speculari sono pericolose esattamente come il fascio originale!

Esiste anche, per lo standard statunitense ANSI, la classe 3A, che di fatto è simile alla 2M. Comunque la classe 3A non è riconosciuta né dall'attuale né dalla precedente edizione dello standard 60825.



Classe 4

Sono laser pericolosi in ogni condizione d'uso, anche per la cute e per riflessione diffusa. Inoltre il loro uso comporta rischi di natura non ottica (per esempio rischio d'incendio). La classe 4 è una classe residuale, cioè comprende i laser che non rientrano nelle altre classi.

Come si è già detto, non tutti i laser di classe 4 sono pericolosi nello stesso modo: la classificazione serve infatti per determinare la tipologia di rischio e di conseguenza qual genere di misure di sicurezza utilizzare, NON quali misure di sicurezza concrete utilizzare. Per questo esiste il TSL!

Per esempio, se ho un laser di classe 4 so che devo fare attenzione anche alle superfici dove il fascio potrebbe riflettersi in modo diffuso, ma quali precauzioni prendere dipende dal tipo di emissione, dalla potenza, dall'utilizzo, dalla configurazione dei locali e dal personale che li frequenta, ecc.

Un laser non classificato deve essere precauzionalmente attribuito alla Classe 4, ma ciò non basta per la sicurezza!



II TSL

Se in una struttura sono presenti laser di Classe 3B o 4, il datore di lavoro ha l'obbligo di nominare un TSL (Tecnico Sicurezza Laser) che deve coadiuvare il RSPP per la gestione del rischio da ROA (Radiazioni Ottiche Artificiali).

Il TSL deve prendere in considerazione tutti gli aspetti dell'ambiente, dell'attività lavorativa, della strumentazione utilizzata, del personale impiegato al fine di suggerire una serie di misure tendenti alla riduzione del rischio. Data la varietà delle situazioni, non esistono quasi mai regole fisse: sta al TSL decidere quali misure adottare (e prendersene la responsabilità)

Il TSL deve anche intervenire in quei casi in cui vi siano situazioni particolari, per esempio quando un laser di classe superiore alla 1 è utilizzato in spazi aperti al pubblico (in questo caso deve suggerire le misure da prendere per la sicurezza pubblica).



Parametri di valutazione LEA per l'assegnazione della Classe



Lista parametri per la determinazione della classe

- diametro del fascio: dimensione trasversa del fascio che racchiude il 63% della potenza o energia
- lunghezza d'onda
- divergenza del fascio
- potenza
- angolo di accettazione
- tempo di esposizione (base dei tempi)

Logica di base: considerare tutte le condizioni possibili di emissione del laser al fine di verificarne la sicurezza



Diametro del fascio

Per le lunghezze d'onda che arrivano sulla retina (400 - 1400 nm), il diametro del fascio è limitato dalla dimensione della pupilla, cioè da un diametro di 7 mm (è preso conservativamente il diametro massimo); questo è infatti il diametro della finestra di misura.

Per altre lunghezze d'onda o regioni spettrali sono considerati altri valori; inoltre sono considerati anche diametri relativi a strumenti ottici con cui è possibile osservare il fascio (50 mm, Tab. 10 Condition 1)



Lunghezza d'onda 1

Le cose più importanti da ricordarsi sono:

- tra 400 nm e 1400 nm la radiazione ottica arriva alla retina, e quindi è questa l'organo bersaglio
- tra 300 nm e 4000 nm la radiazione può interessare le parti interne dell'occhio
- le lunghezze d'onda più pericolose sono quelle tra 800 e 1400 nm, perché la radiazione arriva sulla retina, ma essendo invisibile non ci può essere riflesso palpebrale; tra queste, quelle più pericolose in assoluto sono quelle vicino a 800 nm, perché possono provocare una debole sensazione visiva che porta alla fissazione sul fascio e all'apertura della pupilla



Lunghezza d'onda 2

Nei laboratori di ricerca i problemi potrebbero sorgere con dispositivi che utilizzano contemporaneamente più lunghezze d'onda; esiste per questo una Tabella che determina se gli effetti di lunghezze d'onda diverse si devono sommare. Ricordiamo inoltre che tra 400 nm e 600 nm esiste un doppio limite, poiché è la zona del rischio fotochimico.

Come si può facilmente intuire, la presenza in contemporanea di fasci a lunghezze d'onda molto diverse tra loro pone problemi di sicurezza notevoli: per esempio, quale occhiale utilizzare se ho un laser Nd-YAG (1064 nm) raddoppiato (532 nm) e triplicato (355 nm) pompato da diodi laser (808 nm)?



Divergenza del fascio 1

Per la norma 60825, avere un fascio meno divergente vuol dire avere un oggetto virtuale* più piccolo. Un oggetto più piccolo, reale o virtuale, porta ad una dimensione minore dello spot sulla retina, ed è quindi potenzialmente più pericoloso.

* per «oggetto» si intende ciò che il nostro occhio vede e di cui fa l'immagine sulla retina; tale oggetto può essere reale (per esempio un oggetto tangibile, ma anche l'immagine reale di un sistema ottico a focale positiva) oppure virtuale (per esempio l'immagine prodotta da un sistema ottico a focale negativa)

Il grado di collimazione del fascio è uno degli elementi più importanti per la valutazione del rischio



Divergenza del fascio 2

Quindi un fascio collimato (= con minore divergenza) è più pericoloso di uno non collimato (= con maggiore divergenza) perché genera sulla retina un'immagine più piccola, ed a parità di potenza un maggiore irradiazione retinico.

Vi sono però dei limiti: a causa delle aberrazioni dell'occhio la dimensione dell'immagine retinica non varia per divergenze inferiori a 1.5 mrad, ed oltre 100 mrad l'immagine sulla retina è così grande che i processi termici diffusivi non dipendono più dalla sua dimensione.



Divergenza del fascio 3

Calcolare la dimensione dell'oggetto virtuale o la divergenza del fascio può essere molto complesso in alcuni casi, per cui la 60825 ha due tabelle, una semplificata che considera le sorgenti perfettamente collimate e quindi è più conservativa, ed un'altra che tiene conto delle dimensioni della sorgente apparente



L'inserimento di una lente sul percorso del fascio può modificare il suo grado di collimazione e quindi aumentare il rischio anche in modo notevole!



Potenza 1

La potenza (flusso radiante) è ovviamente uno dei parametri più importanti.

Per i laser in continua (CW) tra 400 e 1400 nm diamo dei riferimenti approssimativi ma utili per orientarsi:

Classe 1 < 0.4 mW fino a 1000 nm, < 2mW oltre 1000 nm

Classe 2 VIS < 1 mW

Classe 3R VIS < 5 mW

Classe 3R NIR < 2 mW da 700 a 1000 nm, < 10 mW oltre 1000 nm

Classe 3B < 0.5 W



Potenza 2

Per laser in continua collimati, diamo alcuni limiti, sempre di massima, in dipendenza dal tipo di laser:

	nm	1	2	3R	3B
Nd-YAG 3° arm.	355	7.9 μ W	-	0.04 mW	0.5 W
Nd-YAG 2° arm.	532	0.39 mW*	1 mW	5 mW	0.5 W
He-Ne	633	0.39 mW*	1 mW	5 mW	0.5 W
Diodo (coll.)	808	0.64 mW	-	2 mW	0.5 W
Nd-YAG	1064	2 mW	-	9.8 mW	0.5 W
HF	2800	10 mW	-	50 mW	0.5 W
CO2	10600	1000 W/m ²	-	5000 W/m ²	0.5 W

* limite per visione intenzionale o in luoghi aperti al pubblico



Potenza 3

Qualche considerazione:

- il limite di Classe 1 per un laser a CO_2 che ha un diametro del fascio di 10 mm è circa 0.127 W; per questo tipo di laser il rischio non riguarda MAI la retina, e nemmeno gli organi interni dell'occhio, ma solo la pelle e la cornea
- il fatto che il rischio non riguardi la parte interna dell'occhio NON vuol dire che questa parte non sia a rischio (sembra un gioco di parole ma non lo è): un laser a CO_2 di 100 W può bruciare la cornea e quindi distruggere la parte interna dell'occhio senza difficoltà
- poiché la perdita di un occhio è più grave dell'ustione anche profonda su un braccio, ha senso anche proteggere solamente gli occhi se non è possibile fare altrimenti



Base dei tempi 1 (laser in continua - CW)

La base dei tempi è un riferimento ragionevole che indica il massimo tempo per cui l'occhio di un osservatore punta il fascio oppure la cute è esposta alla radiazione. Quindi il tempo di esposizione t considerato ai fini della sicurezza può coincidere o essere inferiore alla base dei tempi, ma mai superiore.

Per esempio, per la visione accidentale di un laser nel visibile tale tempo è 0.25 s (per le classi 2, 2M e 3R), perché questo è esattamente il tempo medio del riflesso palpebrale; invece, fuori da questo range il tempo da considerare è 100 s per visione non intenzionale e 30000 s (= 8 ore) per visione intenzionale oppure per lunghezze d'onda sotto i 400 nm.

Di fatto, la base dei tempi va considerata come una specie di «contenitore» entro il quale vanno considerati tutti i tempi possibili di esposizione.

Per un laser effettivamente CW (cioè che emette senza interruzioni a potenza costante per un tempo teoricamente infinito) il tempo di esposizione coincide con la base dei tempi.



Base dei tempi 2 (laser pulsati)

Per i laser pulsati il discorso è più complesso. La regola generale è la seguente:

As a general requirement, the accessible emission of any group of pulses (or sub-group of pulses in a train) delivered in any given time shall not exceed the AEL for that given time (see also 4.3 e) regarding considering every possible emission duration).

Sostanzialmente dobbiamo distinguere la durata del singolo impulso e quella del treno di impulsi.

Vi sono tre limiti da rispettare:

1. per il singolo impulso (AEL_{single})
2. per il treno di impulsi (AEL_T), cioè per la potenza media
3. tra 400 e 1400 nm, esclusi laser 3B e limiti fotochimici, per il singolo impulso nel treno di impulsi



Base dei tempi 3 (laser pulsati)

I limiti 1. e 2. sono analoghi a quelli dei laser CW

Il limite 3. richiede invece che l'energia per impulso non sia superiore all'AEL del singolo impulso moltiplicato per un fattore di correzione C_5 :

$$AEL_{s.p.train} = AEL_{single} * C_5$$

La 60825 indica le modalità per il calcolo di C_5 e per l'eventuale somma di impulsi temporalmente molto vicini tra loro



Da quanto detto, si comprende che un laser pulsato non è MAI meno pericoloso (e può essere più pericoloso) di un laser in continua che ha la stessa potenza media e le stesse caratteristiche del fascio!



In pratica, cosa dobbiamo fare in Laboratorio?

- 1) Se utilizziamo laser commerciali con tutta la documentazione necessaria senza modificare il fascio, la classe è quella fornita dal costruttore (che in genere dà anche indicazioni per i DPI)
- 2) Se modifichiamo il fascio (per esempio inserendo una lente nel suo percorso) dovrebbe in teoria essere fatta una valutazione da parte del TSL; questo ovviamente non è possibile, quindi in genere il TSL valuterà la peggior condizione ragionevolmente possibile
- 3) Se costruiamo un laser oppure abbiamo un laser senza documentazione, si dovranno eseguire delle misure con strumentazione calibrata (in assenza di strumentazione calibrata: con strumentazione usualmente utilizzata per l'attività scientifica)
- 4) In caso di situazioni particolari, per esempio attività che prevedono l'uso di laser superiori alla Classe 1 all'esterno, deve essere avvertito il TSL, che determinerà le misure di sicurezza da prendere

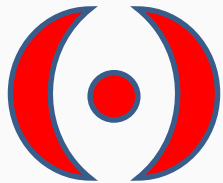


**GRAZIE A TUTTI E
BUONO STUDIO**



APPENDICE

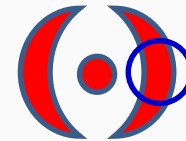
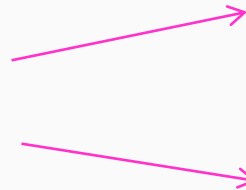
Come misurare il diametro del fascio



spot trasverso
del fascio



finestra di
misura



Attenzione:

- 1) diametri del fascio più piccoli della finestra di misura devono essere misurati con la finestra di misura!
- 2) solo a parità delle altre condizioni (es. divergenza) può essere eseguita la misura solo nella condizione in cui la potenza è più alta



Base dei tempi, T_1 e T_2

Nelle tabelle spesso viene confrontato il tempo t (durata di esposizione considerata) con altri tempi (T_1 e T_2) valutati in base alla divergenza del fascio.

Per esempio:

- per un laser oftalmico a 632 nm che emette per un tempo massimo di 3 s dovrò considerare un base dei tempi di 0.25 s
- per un laser UV CW per lavorazioni dovrò considerare una base dei tempi di 100 s
- per un laser IR che emette per 8 s la base dei tempi applicabile è 100 s, ma il tempo di esposizione considerato sarà esattamente 8 s

Attenzione: il tempo effettivo di esposizione, se inferiore alla base dei tempi, è quello materialmente non superabile dallo strumento; per uno laser terapeutico, ad esempio, non basta che sia quello massimo che il medico effettivamente utilizza



Somma degli impulsi per laser pulsati

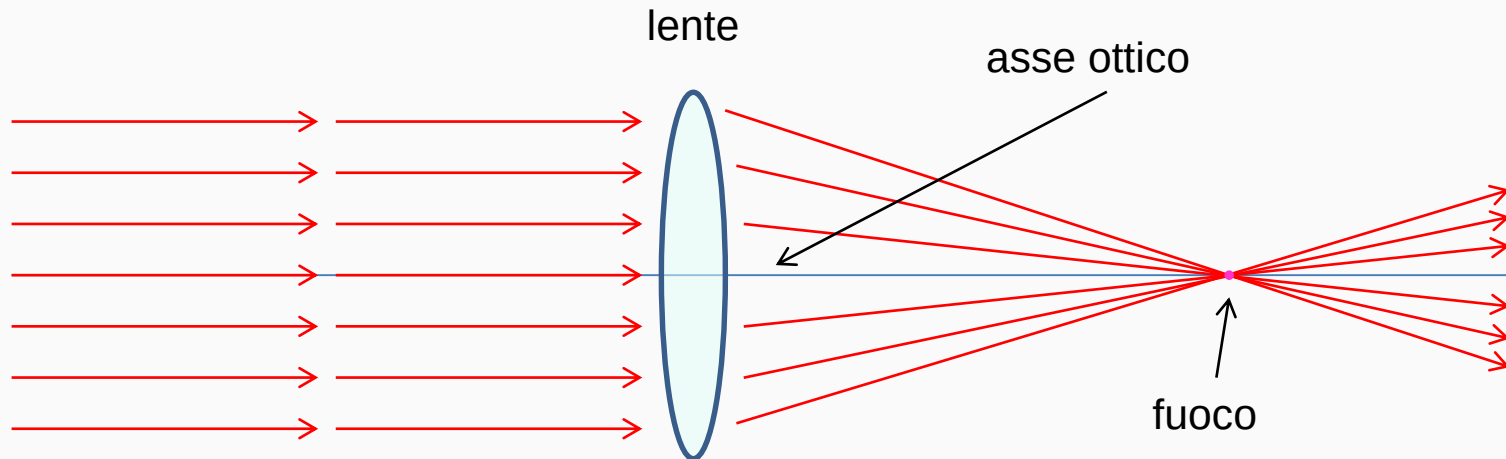
In relazione al limite 3., vi sono dei tempi T_i , indicati in Tab. 2 a pag. 28, sotto i quali i singoli impulsi devono essere sommati (solo per l'energia). Tale tabella serve però anche per il calcolo del limite 2. (treno di impulsi) nel caso di impulsi irregolari.

Table 2 – Times below which pulse groups are summed

Wavelength nm	T_i s
$400 \leq \lambda < 1\,050$	5×10^{-6}
$1\,050 \leq \lambda < 1\,400$	13×10^{-6}
$1\,400 \leq \lambda < 1\,500$	10^{-3}
$1\,500 \leq \lambda < 1\,800$	10
$1\,800 \leq \lambda < 2\,600$	10^{-3}
$2\,600 \leq \lambda \leq 10^6$	10^{-7}

Divergenza del fascio 1

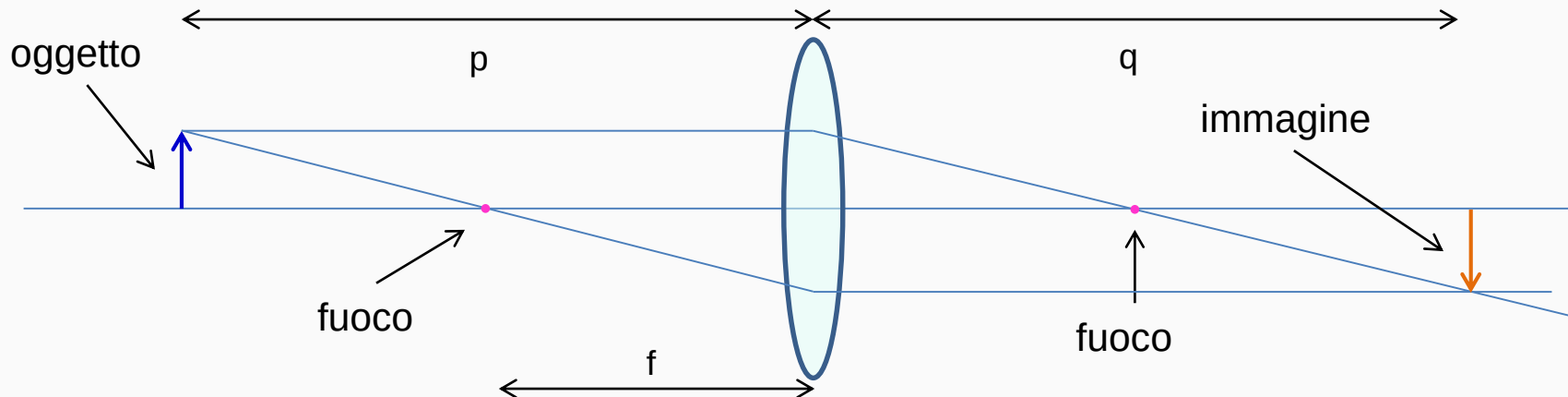
Supponiamo di avere una lente sottile a focale positiva (biconvessa per esempio) ed un fascio di raggi perfettamente collimato che proviene da sinistra verso destra.



La lente ha un fuoco anche a sinistra (punto dove converge un fascio di raggi parallelo proveniente da destra). Se a sinistra e a destra della lente c'è lo stesso mezzo (es. aria) i fuochi sono ad uguale distanza da essa (distanza focale).

Divergenza del fascio 2

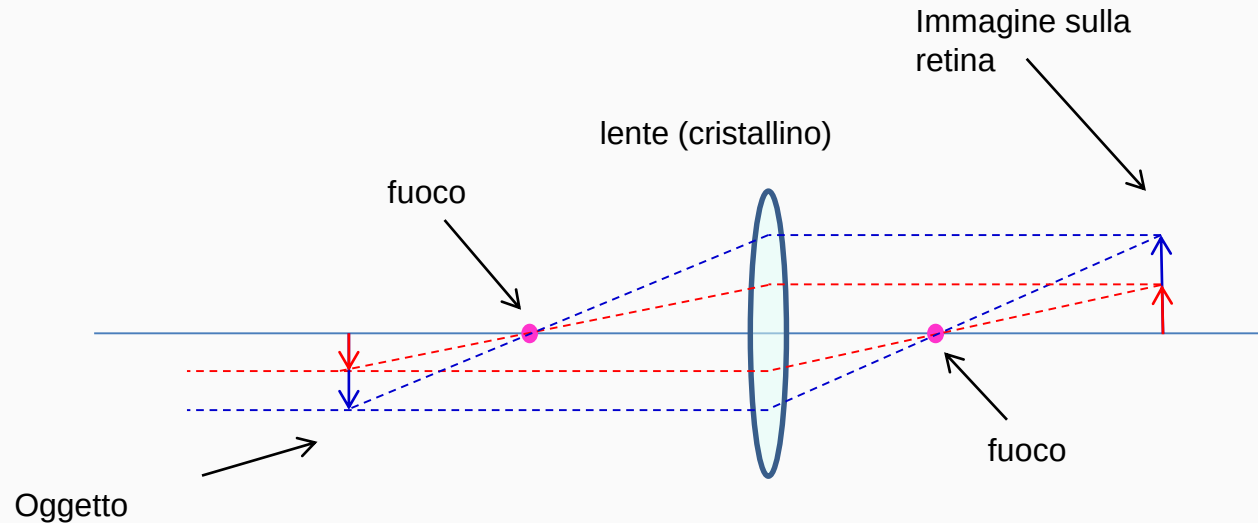
Una lente sottile positiva forma l'immagine di un oggetto reale o virtuale secondo la ben nota legge $1/p + 1/q = 1/f$, dove f è la distanza focale, p è la distanza dell'oggetto e q la distanza dell'immagine



Si comprende bene dalla rappresentazione grafica che più l'oggetto è piccolo e lontano, più l'immagine sarà piccola e vicina al fuoco. Se l'oggetto è all'infinito i raggi provenienti dallo stesso punto sono paralleli: in particolare, se i raggi sono paralleli tra loro (= fascio collimato) e paralleli all'asse ottico l'oggetto sarà un punto sull'asse all'infinito e l'immagine coinciderà con il fuoco.

Divergenza del fascio 3

Un oggetto più piccolo produce un'immagine sulla retina più piccola



L'oggetto è molto spesso il beam waist del laser (la 60825 lo chiama genericamente «apparent source»)



Divergenza del fascio 4

Per i nostri scopi è necessario aver chiari alcuni concetti:

- un fascio collimato (= con i raggi paralleli) quando attraversa una lente produce un'immagine teoricamente puntiforme
- una sorgente estesa produce un'immagine estesa
- una sorgente puntiforme produce un'immagine teoricamente puntiforme

Anche il cristallino che abbiamo nell'occhio è una lente, quindi:

- **un fascio collimato che entra nel nostro occhio genera sulla retina uno spot puntiforme***
- **una sorgente estesa genera sulla retina uno spot esteso**
- **una sorgente puntiforme genera sulla retina uno spot esteso**

* non diamo qui al termine «puntiforme» un significato matematico ma pratico, cioè uno spot puntiforme è per noi uno spot le cui variazioni di dimensioni sono ininfluenti sui processi biologici inerenti l'occhio umano



APPENDICE

Rischi delle radiazioni ottiche

Tabella 2.1

Rischi delle radiazioni

Lunghezza d'onda [nm] λ	Campo di radiazione	Organo interes- sato	Rischio	Tabella dei valori limite di esposizione
da 180 a 400	UV	occhio	danno fotochimico e danno termico	2.2, 2.3
da 180 a 400	UV	cute	eritema	2.4
da 400 a 700	visibile	occhio	danno alla retina	2.2
da 400 a 600	visibile	occhio	danno fotochimico	2.3
da 400 a 700	visibile	cute	danno termico	2.4
da 700 a 1 400	IRA	occhio	danno termico	2.2, 2.3
da 700 a 1 400	IRA	cute	danno termico	2.4
da 1 400 a 2 600	IRB	occhio	danno termico	2.2
da 2 600 a 10^6	IRC	occhio	danno termico	2.2
da 1 400 a 10^6	IRB, IRC	occhio	danno termico	2.3
da 1 400 a 10^6	IRB, IRC	cute	danno termico	2.4