

DAI PUNTATORI AI LASER SHOW: RISCHIO LASER SOLO NEL LUOGO DI LAVORO?

**Francesco Frigerio (1), Luisa Biazzi (2), Chiara Mariotti (2) Filippo
Scortichini (3)**

ICS Maugeri Spa Pavia (1)

Università degli Studi di Pavia (2)

Super FX – Travagliato (BS) (3)

Introduzione

Da quando T.H Maiman ha fatto funzionare il primo sistema rubino nel 1960, le sorgenti laser si sono gradualmente diffuse da strumentazioni di laboratorio al campo industriale prima, successivamente al campo sanitario e ultimamente alla vita quotidiana.

Mentre non è frequente reperire in letteratura descrizioni di eventi incidentali che coinvolgono dispositivi laser in ambiente di lavoro, sono abbondantemente descritte lesioni oculari dovute a puntatori o altre sorgenti in uso al pubblico e spesso utilizzate con scarsa consapevolezza dei rischi [1].

La normativa tecnica sulla sicurezza laser è aggiornata continuamente al progresso della tecnologia dalla Commissione Elettrotecnica Internazionale (IEC) con le norme della serie 60825.

Queste norme impongono al “costruttore” del laser, una classificazione in funzione del Livello di Esposizione Accessibile (LEA).

A ciascuna classe sono associate anche particolari prescrizioni di sicurezza, in funzione della possibilità o meno di superare i valori di Esposizione Massima Permissa (EMP), derivati dai valori di esposizione stabiliti dalla International Commission on Non Ionizing Radiation Protection (ICNIRP).

Per questo, i valori di EMP riportati nella 60825-1, edizione 2007, coincidono con i Valori Limite di Esposizione (VLE) applicabili all’esposizione dei lavoratori ai sensi del D.Lgs 81/2008.

Tabella I: classificazione sintetica dei laser secondo la IEC-60825-1:2007

Classe 1 - Laser che sono sicuri nelle condizioni di funzionamento ragionevolmente prevedibili, incluso l'uso di strumenti ottici per la visione del fascio;
Classe 1M - Laser che emettono nell'intervallo di lunghezza d'onda tra 302,5 nm e 4000 nm che sono sicuri nelle condizioni di funzionamento ragionevolmente prevedibili, ma possono essere pericolosi se l'operatore impiega ottiche di osservazione all'interno del fascio (lenti d'ingrandimento, binocoli,...).;
Classe 2 - Laser che emettono radiazione visibile nell'intervallo di lunghezze d'onda tra 400 e 700 nm; la protezione dell'occhio è normalmente assicurata dalle reazioni di difesa compreso il riflesso palpebrale. Questa reazione fornisce un'adeguata protezione nelle condizioni di funzionamento ragionevolmente prevedibili, incluso l'uso di strumenti ottici per la visione del fascio;
Classe 2M - Laser che emettono radiazione visibile nell'intervallo di lunghezze d'onda tra 400 e 700 nm; la protezione dell'occhio è normalmente assicurata dalle reazioni di difesa compreso il riflesso palpebrale; comunque, la visione del fascio può essere pericolosa se l'operatore impiega ottiche di osservazione all'interno del fascio (lenti d'ingrandimento, binocoli,...).;
Classe 3R -Laser che emettono nell'intervallo di lunghezze d'onda tra 302,5 nm e 10 μm , dove la visione diretta del fascio è potenzialmente pericolosa ma il rischio è più basso dei laser di Classe 3B; i requisiti del costruttore e le misure di controllo per il Responsabile delle attività sono meno restrittive che per i laser di Classe 3B;
Classe 3B - Laser che sono normalmente pericolosi nel caso di esposizione diretta del fascio; la visione della radiazione diffusa è normalmente non pericolosa;
Classe 4 - Laser che sono anche in grado di produrre riflessioni diffuse pericolose; possono causare lesioni alla pelle e potrebbero anche costituire un pericolo d'incendio. Il loro uso richiede un'estrema cautela

Nella Tabella I è riportata la descrizione sintetica delle classi, l'illustrazione dei LEA è compiutamente descritta nella norma in quanto oltre al valore della potenza occorre fare riferimento anche ad altri parametri quali l'angolo di visione e l'eventuale presenza di impulsi ultra corti.

La 60825-1 è stata successivamente aggiornata nel 2014 [2], e altre norme della stessa serie si possono utilizzare come guida per la sicurezza in applicazioni particolari.

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

La classe 1C si applica infatti ai laser, progettati per essere applicati a contatto del tessuto da trattare (escluso l’occhio) e dotati di accorgimenti che impediscano la fuga di radiazione al di sopra del LEA della classe 1; questi sistemi laser interrompono l’emissione della radiazione laser quando si allontana la punta del laser dalla superficie.

Molti dispositivi laser di importazione, in particolare quelli più economici, possono riportare riferimenti a classi, espresse generalmente con numeri romani, derivanti dal capitolo 21 del Code of Federal Regulations (CFR) della Food and Drug Administration (FDA) degli Stati Uniti [3].

La classificazione FDA ha validità solo negli Stati Uniti e può corrispondere solo in parte alla classificazione IEC.

Le classi I e IV hanno definizioni e condizioni di applicabilità molto simili alle classi 1 e 4 IEC ma importanti differenze possono esserci per esempio per il rischio di osservazione con strumenti ottici per dispositivi di classe IIIA che potrebbero corrispondere alla 3R o alla 2M a seconda delle condizioni di impiego.

In questo lavoro saranno descritte una serie di situazioni di impiego di dispositivi laser che possono comportare un’esposizione della popolazione.

Il caso più noto è quello dei puntatori, che spesso presentano difformità tra la classificazione riportata sull’etichetta, quando presente, e l’effettiva potenza di uscita [4].

In particolare, è importante prestare attenzione ai puntatori di colore verde, molto popolari per la caratteristica di essere facilmente diffusi dall’atmosfera e quindi molto visibili almeno di notte.

La maggior parte di questi puntatori verdi (lunghezza d’onda 532 nm) sono ottenuti raddoppiando la frequenza di emissione di un laser Nd:YAG [5] con il risultato di avere spesso anche una significativa emissione a 1064 nm, nel vicino infrarosso.

A questa lunghezza d’onda, l’EMP è maggiore rispetto a quello nel visibile.

Il potenziale danno retinico, termico e fotochimico, è quindi cautelativamente valutato assumendo che tutta la potenza sia emessa nel visibile a 532 nm. Un fascio focalizzato infrarosso può tuttavia innescare incendi di eventuali materiali infiammabili più facilmente rispetto alla luce visibile soprattutto se di potenza elevata.

Nel caso dei puntatori, un'ulteriore sorgente di confusione è data dal fatto che negli Stati Uniti sono considerati sicuri anche i puntatori di classe IIIA, ovvero con potenza < 5 mW.

In Italia, un'ordinanza del Ministero della Salute, risalente al 1998 [6], vieta la commercializzazione come puntatori di dispositivi laser pari o superiori alla classe 3, quindi con potenza maggiore di 1 mW.

Salvo poche eccezioni non trattate nel presente lavoro, il rischio laser per il pubblico è associato alla luce visibile.

Nel seguito, considerati i livelli di potenza relativamente bassi che sono in gioco quasi sempre, ci occuperemo, per brevità, del solo rischio oculare che è comunque quello associato ai limiti di esposizione più bassi.

Limiti e unità di misura

I valori di EMP sono riportati e discussi nell'Appendice A alla Norma IEC-60825-1: 2014 [2], dove sono anche descritti i criteri per determinare il tempo di esposizione da applicare.

Per tempi di esposizione T compresi tra $5 \mu\text{s}$ e 10 s, la densità di energia sulla pupilla, definita esposizione radiante, H , deve essere limitata a

$$H_{EMP} = 18T^{0,75}C_6 \quad \text{J/m}^2 \quad (1)$$

Poiché il fascio ha in ogni caso una elevata luminanza nel visibile, la norma assume, in caso di esposizione ad un fascio continuo, un tempo di esposizione T $0,25$ s relativo al tempo del naturale riflesso palpebrale di un occhio sano.

Il coefficiente C_6 , tiene conto del fatto che il rischio maggiore è associato alla minima dimensione dell'immagine della sorgente sulla retina, che si genera quando la sorgente stessa è vista come puntiforme.

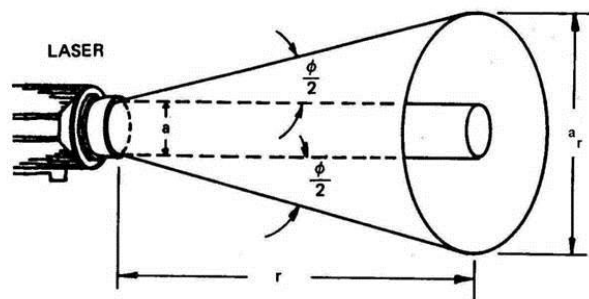
La norma stessa prescrive come calcolare C_6 nei diversi casi; il coefficiente assume il valore minimo $C_6 = 1$ in caso di sorgente puntiforme (rischio massimo) e valori più elevati per sorgenti estese.

Nelle sorgenti laser che andremo a considerare nel seguito, il fascio è collimato ovvero presenta un valore piccolo del parametro chiamato divergenza, φ , espressa in radianti.

A distanza r dalla sorgente, un fascio di dimensione iniziale (apertura) a , si allarga per effetto della divergenza φ e il valore del diametro è pertanto

$$d = a + r\varphi \quad (2)$$

Figura 1: determinazione dell'ampiezza del fascio laser con divergenza ϕ a distanza r



Dividendo la (1) per il tempo di esposizione T 0,25 s, si ottiene un valore dell'irradianza massima permessa, per sorgenti puntiformi, pari a $E_{EMP} = 25 \text{ W/m}^2$.

Esprimere l'EMP come irradianza E_{EMP} è utile in quanto permette facilmente di calcolare la Distanza Nominale di Rischio Oculare (DNRO), ovvero la distanza oltre la quale, per effetto della divergenza, l'irradianza è inferiore all'EMP:

$$DNRO = \frac{1}{\phi} \sqrt{\frac{4P}{\pi E_{EMP}}} \quad (3)$$

Se P è la potenza del laser in W e E_{EMP} è espresso in W/m^2 , si ottiene la DNRO in metri

L'espressione (3) è strettamente applicabile solo per sorgenti puntiformi, per le quali si trascura la dimensione iniziale del fascio.

Se il fascio non è continuo, occorre considerare l'eventuale effetto termomeccanico dovuto all'assorbimento di impulsi, che possono causare la propagazione di onde meccaniche nel bersaglio.

La norma richiede di calcolare il valore di EMP per i seguenti casi:

1. esposizione ad un singolo impulso di durata $t < T$
2. esposizione al valore medio degli impulsi assorbiti in T
3. esposizione ad un singolo impulso di durata t , moltiplicata per un coefficiente che tiene conto del numero di impulsi assorbiti in T

In funzione della durata t e della frequenza di ripetizione degli impulsi, il criterio di scelta dell'EMP è quello più cautelativo ossia quello a cui corrisponde l'EMP inferiore tra i tre.

La versione 2014 della IEC 60825-1 ha cambiato, in pratica, proprio le procedure per effettuare il confronto sopra descritto, per esempio, impulsi inferiori ad una certa durata devono essere considerati come un singolo impulso etc.

Queste novità normative non hanno effetti pratici per laser continui o con durate di impulso elevate, ovvero superiori a qualche μ s, ma possono essere invece rilevanti per i laser a impulsi ultra corti.

In questo caso è necessario ricordare che la norma tecnica IEC, o meglio CEI-EN-IEC è aggiornata al 2014, il D.Lgs 81/2008 riporta invece, nell'Allegato XXXVII, i valori limite per l'esposizione dei lavoratori, contenuti nella versione 2007.

Materiali e metodi

Anche per quanto sopra, è importante valutare le singole sorgenti laser non solo dal punto di vista della potenza media emessa ma anche verificando che il fascio abbia l'andamento temporale corretto ai fini della determinazione del LEA.

Per i laser utilizzati in fisioterapia, per esempio, è stato dimostrato che gli impulsi effettivamente generati non sempre corrispondono a quanto riportato nel manuale di istruzione del sistema laser fornito a corredo [7].

Per tutti i laser di seguito descritti, la lunghezza d'onda della radiazione emessa è stata misurata determinando l'irradianza spettrale $E(\lambda)$ fra 200 e 1000 nm, utilizzando lo spettroradiometro HR4000 della Ocean Optics.

L'irradianza è stata misurata facendo diffondere la radiazione su un campione di diffusione bianco realizzato dalla Bruel e Kjaer.

La potenza del fascio è stata misurata mediante Power Meter Ophir Nova II con rivelatore a termopila a risposta piatta fra 200 e 6000 nm.

La forma dell'impulso è stata invece determinata mediante un oscilloscopio GW Instek, a memoria digitale accoppiato ad un fotodiodo.

Sorgenti laser nella vita quotidiana

Nella Tabella II sono illustrate una serie di sorgenti laser non utilizzate a fini professionali.

Si noti che il Laser 1, dovrebbe essere un oggetto per utilizzo professionale. Si è invece verificato che il termometro a infrarossi era stato acquistato per misurare la temperatura dell'acqua del bagno dei bambini (sic!).

Per tutti i dispositivi indicati, il manuale di istruzioni era risultato smarrito, le uniche informazioni disponibili erano quelle riportate sull'etichetta.

Il controllo con l'oscilloscopio ha evidenziato che in tutti i casi il fascio emesso era continuo e non sono state individuate significative differenze tra la lunghezza d'onda dichiarata sull'etichetta, quando presente, e quella effettivamente emessa.

La Figura 2 mostra lo spettro del Laser 3: in questo caso è stata schermata la radiazione fondamentale a 1064 nm ma non quella del laser "pompa" a 800 nm

Figura 2 : spettro della radiazione del laser 3 si vede la radiazione di pompa a 800 nm ma non la fondamentale a 1064 nm

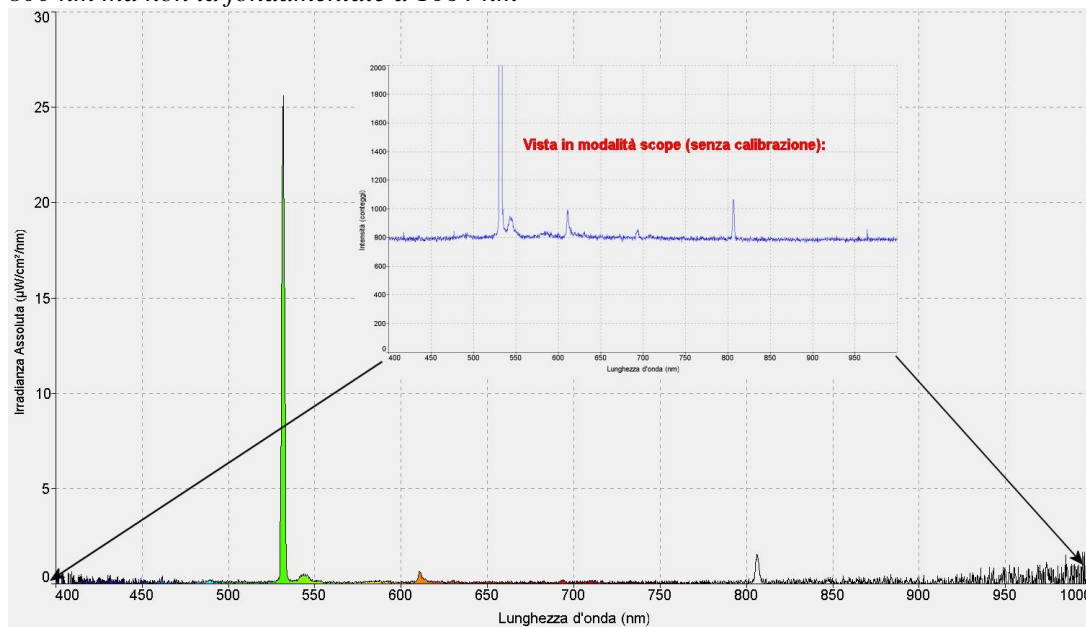


Tabella II: laser utilizzabili nella vita quotidiana

<i>Sorgente</i>	<i>Marca e modello</i>	<i>Classe dichiarata</i>	<i>Impiego</i>	<i>Immagine</i>
Laser 1	GM320	II	Puntatore rosso inserito in termometro a distanza	
Laser 2	LEICA DISTO A3	2	Telemetro (rosso)	
Laser 3	YL-LASER 303	III	Puntatore verde	
Laser 4	LUCEN	II A	Puntatore rosso inserito in penna-gadget	
Laser 5		1	Puntatore rosso progettato come giocattolo per gatti	
Laser 6		2	Illuminazione decorativa da esterno verde-rosso	

I laser 1,3 e 4 riportano solo la classificazione US-EPA e non quella IEC, si noti che secondo la norma americana [3], indicando classe III si deve intendere che il dispositivo può essere classe IIIA o IIIB; ma se è in classe IIIB, la norma americana prevede la presenza di un avvertimento visivo o sonoro precedente all'emissione al fine di evitare la visione accidentale.

Nella Tabella III, il LEA corrispondente alla classificazione riportata sull'etichetta è confrontato con la potenza effettivamente misurata.

Tabella III: confronto fra LEA e potenza effettiva di laser reperiti tra il pubblico, in giallo i casi di non conformità

<i>Sorgente</i>	<i>LEA da classificazione</i>	<i>Potenza massima misurata con apertura di 7 mm</i>
Laser 1	< 1 mW	5 mW
Laser 2	< 1 mW	0,9 mW
Laser 3	< 500 mW	83 mW
Laser 4	< 1 mW	0,8 mW
Laser 5	< 0,039 mW	0,1 mW
Laser 6	< 1 mW	Rosso + verde: 0,030 mW Rosso: 0,150 mW Verde: 0,066 mW

I laser 1 e 5 presentano un LEA superiore a quello di classificazione; il laser 3, anche se venduto come puntatore, è in effetti un sistema di classe IIIB, quindi non conforme nemmeno secondo la norma americana.

Tutti i laser sopra descritti sono stati prestati dai proprietari temporaneamente, pertanto sono stati misurati con le batterie nello stato di carica nei quali sono stati forniti.

Si ricorda che, almeno per i puntatori, è dimostrato [8] che la potenza dipende anche dallo stato di carica della batteria.

Per i laser 1 e 3, la protezione dovrebbe essere garantita dal riflesso oculare; il laser 5, ha una potenza inferiore ma bisogna tenere conto che proprio per questo potrebbe essere osservato per tempi prolungati, tanto più se viene considerato un giocattolo.

Nella Tabella IV sono quindi riportati, per questi casi, i valori di DNRO calcolati utilizzando la (3).

Per la divergenza è stato assunto per tutti $\varphi = 1,5$ mrad in quanto fasci collimati.

Per il laser 5 il valore di EMP è quello previsto in caso di osservazione intenzionale per tempi > 10 s.

Tabella IV: DNRO calcolata per i laser 1,3 e 5

	P misurata mW	EMP W/m ²	DNRO m
Laser1	5	25	10,6
Laser3	83	25	43,3
Laser5	0,1	10	2,4

Come si vede, dispositivi da pochi mW possono causare incidenti con danni oculari anche a distanze non trascurabili.

Il laser 6 è commercializzato a scopo decorativo e, dalle misure eseguite, risulta sicuro; la potenza è effettivamente limitata al LEA della classe 2 e la divergenza è maggiore di 1,5 mrad in quanto gli effetti grafici sono generati mediante una lente.

Ci sono però dispositivi per intrattenimento ben più potenti, che devono essere utilizzati da personale qualificato.

Laser show professionali

Per gli spettacoli con luce laser (con emissione nello spettro visibile tra 380 nm e 780 nm), si applicano il Rapporto Tecnico del CEI 3849 del CT 76, “*Sicurezza dei dispositivi da spettacolo di luce con laser*” [12] e la norma IEC 60825-3 “*Sicurezza dei prodotti laser – parte 3 Guida per gli spettacoli con laser*” [13].

Queste norme individuano le aree dove i fasci laser devono rispettare l’EMP di cui alla [2], e le aree, ad una certa distanza da quella occupabile dal pubblico, dove l’esposizione può arrivare fino a 5*EMP.

Una caratterizzazione degli impulsi generati da un sistema laser KVANTda 30 W [9] è stata presentata alla *18th International Conference on Environment and Electrical Engineerin* gorganizzata a Palermo nel giugno 2018 dall’Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE).

Il sistema genera effetti laser multicolore utilizzando 3 sorgenti continue a diodo combinate in un unico fascio per ottenere un fascio del colore desiderato regolando l’intensità dei tre colori fondamentali.

Le potenze massime delle tre sorgenti, per come riportate nel manuale sono

Rosso (637 nm),	8000 mW
Verde (520 nm),	10000 mW
Blu (460 + 445 nm),	11000 mW

I tre fasci sono poi combinati in un unico sistema di scansione che proietta il fascio risultante in una serie predeterminata di direzioni per generare un'immagine come una sequenza di punti.

Il fascio combinato ha una dimensione dichiarata all'apertura laser di 6 X 5,5 mm e una divergenza $\varphi = 1$ mrad.

La persistenza sulla retina della sequenza dei punti crea l'effetto di un disegno, questo disegno può essere fisso, o più spesso in movimento con cambio di colore durante il movimento stesso.

La definizione e la stabilità dell'immagine, dipendono dalla velocità di scansione (scan rate, "SR") espressa in punti per secondo (pps).

Il rapporto tra lo scan rate ed il numero di punti che compongono l'immagine determina il numero di immagini al secondo proiettate, se questo numero supera il valore di 20, l'occhio umano riesce a percepire solo un'immagine fissa la cui forma può essere fatta variare con continuità.

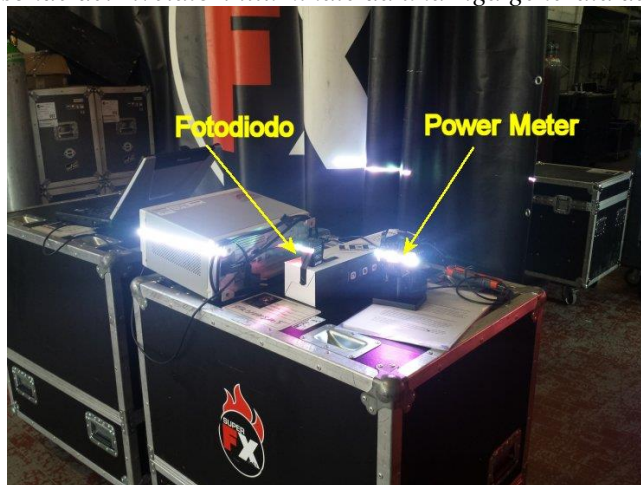
Valori di SR troppo bassi, rispetto al numero dei punti, creano un'immagine sfarfallante o troppo marcata in alcuni punti.

Lo scan rate è limitato dalle caratteristiche elettromeccaniche del sistema di movimento degli specchi e viene di solito predeterminato.

Le misure oggetto della presente sono state realizzate con $SR = 30$ kpps.

Nella Figura 3 si vede una linea composta da $N = 316$ punti che incide sul power meter e sul diodo contemporaneamente, per effettuare le misure.

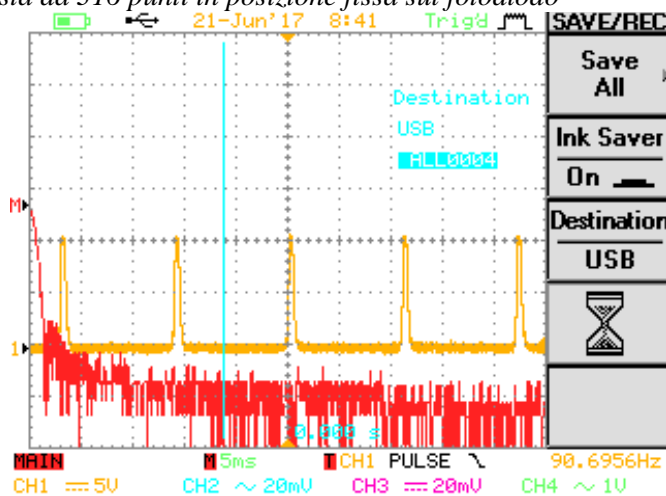
Figura 3: le sonde dei rivelatori illuminate da una riga generata dal laser



Nella Figura 4 si vede come, anche se l'osservatore percepisce una linea continua come nell'immagine, il fotodiodo rivela un fascio impulsato alla frequenza

$$f = \frac{SR}{N} \quad (4)$$

Figura 4: andamento dell'intensità del fascio misurata facendo incidere una riga composta da 316 punti in posizione fissa sul fotodiodo



Anche mantenendo il fascio fisso sul rivelatore, il power meter è in grado di misurare solo il valore della potenza media data da

$$P_m = P_p \frac{T_{on}}{T_{off}} \quad (5)$$

dove $T_{off}=1/f$ e T_{on} è il tempo durante il quale il fascio, in moto a velocità angolare

$$\omega = SR \cdot \varphi(6)$$

rimane puntato sulla pupilla.

Questo tempo è dato dal rapporto tra il diametro del fascio dato dalla (2) e la velocità lineare del fascio $\omega \cdot r$.

Si ha pertanto

$$T_{on} = d_{p1} \frac{a+r\varphi}{d_{p0}} \frac{1}{\omega r} (7)$$

Il termine $\frac{d_{p1}}{d_{p0}}$ tiene conto del fatto che l'apertura con la quale viene osservato il fascio potrebbe essere maggiore di quella della pupilla che, secondo la norma [2] è $d_{p0} = 7 \text{ mm}$.

Se il fascio è osservato a occhio nudo, $d_{p1}=d_{p0}$ ma se viene utilizzato uno strumento ottico con un'apertura più grande, il fascio incide sulla retina per un tempo maggiore.

Per effetto delle espressioni (5) e (7), l'osservazione del fascio con strumenti ottici aumenta la potenza media della radiazione incidente sulla pupilla.

Per strumenti ottici si intendono strumenti tipo binocolo e assimilabili e il mirino ottico di fotocamere e telecamere.

L'uso di binocoli e cannocchiali può essere vietato agli spettatori di laser show; per quanto riguarda telecamere e fotocamere con mirino ottico, si evidenzia che questi dispositivi sono ormai quasi sempre affiancati alla visualizzazione digitale in macchine utilizzate generalmente da professionisti o amatori esperti.

Per queste persone può essere prescritto, ai fini della sicurezza laser, l'utilizzo dell'"online-view", ovvero controllare l'immagine esclusivamente attraverso il display dell'apparecchiatura di ripresa.

Quanto ai sistemi esclusivamente digitali, si ricorda che la radiazione laser può danneggiare il rivelatore senza trasmettere un'irradianza eccessiva all'utilizzatore.

Le equazioni (4), (6) e (7) mostrano poi che il valore di SR ricorre sia al numeratore che al denominatore.

In termini fisici, una velocità maggiore comporta una più alta frequenza di ripetizione del fascio ma anche una minore durata dell'esposizione.

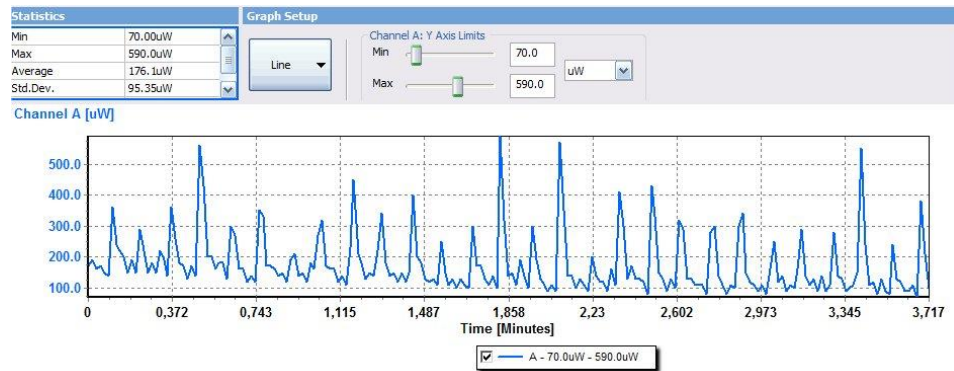
Assumendo per semplicità la visione a occhio nudo, la potenza media incidente sulla pupilla a distanza r dalla sorgente è data da

$$P_m = \frac{P_p}{N} \left(\frac{a}{r\phi} + 1 \right) \quad (8)$$

La misura della potenza media con il powermeter, ai fini del confronto tra irradianza sull'occhio del pubblico e EMP deve pertanto essere per lo meno corretta per il numero dei punti come sopra descritto.

Se poi il fascio è in movimento, si ottiene un valore fortemente variabile come quello mostrato in Figura 5, che è ancora più fuorviante.

Figura 5: andamento della potenza misurabile con powermeter quando la linea è in movimento



Le formule sopra descritte permettono di costruire un semplice foglio elettronico che permette di verificare, a qualunque distanza dalla sorgente, il valore atteso della potenza e l'EMP applicabile.

La Tabella V riporta un esempio di calcolo per la potenza di 30 W e $N = 316$ punti.

Tabella V: Calcolo di irradianza e EMP applicabile a diverse distanze per 30 W e $N = 316$

Distanza di osservazione a occhio nudo m	Durata impulso s	Potenza media misurabile in mW su 7 mm	EMP come potenza media in mW su 7 mm	EMP W/m ² (come irradianza dell'impulso singolo)	Irradianza media sullo spot W/m ²	EMP W/m ² come irradianza media	C ₆
0,1	2,75E-03	5645,91	19,40	1933,02	146706,10	504,02	54,26
0,2	1,39E-03	2789,11	5,82	1145,92	72473,45	151,21	27,13
0,4	7,12E-04	1361,89	1,76	677,34	35388,03	45,76	13,57
0,8	3,72E-04	650,48	0,54	398,17	16902,29	14,08	6,78
1,6	2,03E-04	298,52	0,38	511,48	7756,96	9,85	3,39
3,2	1,18E-04	128,20	0,13	292,78	3331,22	3,28	1,70
6,4	7,57E-05	49,99	0,05	192,96	1299,03	1,39	1,00
12,8	5,45E-05	17,36	0,04	209,47	450,99	1,08	1,00
25,6	4,39E-05	5,39	0,04	221,09	139,95	0,92	1,00
51,2	3,86E-05	1,53	0,03	228,32	39,79	0,84	1,00
102,4	3,60E-05	0,41	0,03	232,41	10,68	0,79	1,00
204,8	3,47E-05	0,11	0,03	234,60	2,77	0,77	1,00
409,6	3,40E-05	0,03	0,03	235,73	0,71	0,76	1,00
819,2	3,37E-05	0,01	0,03	236,31	0,18	0,76	1,00

Irradianza ed EMP applicabile sono espressi sia in relazione all'impulso singolo sia, applicando la (5), come irradianza media e anche come potenza media su un apertura di 7 mm al fine di confrontare i valori teorici con eventuali misure.

La DNRO si ottiene per via numerica quando si verifica che $E < EMP$, l'espressione (3) non è infatti applicabile a causa del coefficiente C_6 che dipende dalla distanza così come la durata dell'impulso.

La International Laser Display Association (ILDA), riunisce le principali società in grado di produrre spettacoli laser di alto livello.

In Italia ci sono al momento solo 2 società iscritte all'associazione, una delle quali ha richiesto lo studio qui presentato.

In un documento tecnico del 2009 [10], vengono fornite alcune indicazioni tecniche per garantire la sicurezza del pubblico tenendo conto della necessità di utilizzare potenze elevate per garantire la qualità delle immagini.

Queste indicazioni sono basate sul fatto che gli operatori devono essere adeguatamente formati e addestrati, e che i proiettori professionali sono dotati di software in grado di

- regolare punto per punto la potenza di ciascuna sorgente;
- interrompere il fascio nel caso in cui, per qualche motivo dovesse guastarsi il sistema di specchi che mantiene il fascio in movimento.

Le misure eseguite [9] hanno in effetti evidenziato un buon accordo tra il livello di potenza impostato e l'effettiva potenza emessa.

Nella proposta tecnica [10], gli spettacoli con laser vengono distinti in due livelli.

- Livello 1: il fascio viene mantenuto in tutti i punti nei quali il pubblico può essere interessato ad un'irradianza massima di 100 W/m^2 .
- Livello 2: spettacoli nei quali gli spettatori vengono avvisati della pericolosità del fascio e sono avvertiti di “*non osservare direttamente il fascio*”. Sotto queste condizioni l'irradianza del fascio che può interessare il pubblico può raggiungere i 1000 W/m^2 .

Considerando che gli spettatori sono esposti ad un'irradianza ridotta rispetto al valore impostato per effetto del movimento del fascio, uno spettacolo di livello 1 viene ritenuto sicuramente conforme all'EMP mentre uno spettacolo di livello 2 viene ritenuto non pericoloso in quanto le assunzioni alla base dei valori di EMP sono ritenute adeguatamente cautelative da proteggere gli spettatori “avvertiti”.

Il foglio elettronico permette invece di ottenere, nelle condizioni sopra descritte, valori dell'EMP sull'impulso singolo che sono effettivamente più alti del valore di 100 W/m^2 considerati dall'ILDA per uno spettacolo di livello 1 ma inferiori al limite per il livello 2 che non risulta in effetti adeguatamente motivato.

Gli incidenti legati agli spettacoli laser descritti in letteratura sono effettivamente molti meno numerosi di quelli causati dai puntatori.

I due tipi di sorgenti sono ugualmente pericolose anche se i livelli di potenza in gioco sembrano diversi.

Nel 2010, un gruppo di medici, in Belgio [11], ha trattato due pazienti che si sono presentati al pronto soccorso una settimana dopo uno spettacolo laser accusando una perdita di acuità visiva.

Gli organizzatori dello spettacolo hanno attribuito i danni a puntatori laser in uso incontrollato a persone del pubblico.

Gli autori hanno tentato una verifica sperimentale, arruolando un soggetto al quale, a causa di un melanoma della coroide, doveva essere asportato un occhio che presentava una retina sana.

Prima dell'asportazione hanno illuminato la retina con una sequenza di impulsi di durata crescente, generati da un puntatore verde di classe 3B "acquistato su internet".

Non avendo riscontrato la tipologia di lesioni attese, hanno concluso che la potenza di un puntatore non è comunque in grado di procurare le stesse lesioni di un laser da spettacolo.

Nel lavoro non viene riportata una caratterizzazione del puntatore laser, se non in base alla classe dichiarata.

Come descritto in letteratura [4], i laser verdi possono emettere una significativa frazione della potenza a 1064 nm (infrarosso).

Assumendo che la potenza di 500 mW sia corretta, la sequenza di impulsi descritta, equivale ad un'energia di 63,8 J, che su una superficie di 7 mm di diametro corrisponde ad un'esposizione radiante di $1,7 \cdot 10^6 \text{ J/m}^2$.

A titolo di confronto, si evidenzia che per ottenere la stessa esposizione con il proiettore Kvant nelle condizioni descritte in questo lavoro, il tempo di esposizione avrebbe dovuto essere $> 1200 \text{ s}$.

In alternativa, un fascio continuo da 30 W, dovrebbe essere fissato per più 2 s.

Conclusioni

L'esposizione del pubblico a sorgenti laser è effettivamente pericolosa anche perché non sufficientemente conosciuta.

La caratterizzazione delle sorgenti laser in termini di potenza, modulazione temporale e lunghezze d'onda emesse, è in ogni caso indispensabile nella discussione dei casi di incidente.

Gli incidenti possono essere prevenuti con una maggiore consapevolezza degli utilizzatori.

Proprio per queste considerazioni inerenti la pericolosità di tali sorgenti e il possibile rischio di incidenti, durante spettacoli all'aperto con l'impiego di

sistemi laser di classe 3B e 4 i responsabili dei laser show devono produrre una relazione tecnica in cui viene fatta una valutazione del rischio anche per il pubblico corredata dalle misure di prevenzione e protezione predisposte.

In particolare andranno valutate le condizioni di guasto del sistema laser ragionevolmente prevedibili e la formazione e l'addestramento degli operatori i quali durante utilizzo dovranno stare in posizione tale da controllare continuamente la traiettoria dei fasci e la loro terminazione. Durante i laser show all'aperto andrà anche garantita la sicurezza del traffico aereo e stradale nei limiti della distanza nominale del rischio oculare.

Si precisa che il D.lgs.81/08 Titolo VIII Capo V con l'Allegato XXXVII Parte II "LASER", che deriva dal recepimento della Direttiva 2006/25/CE, si applica solo ai lavoratori (lavoratori della ditta installatrice sia in fase di allineamento del sistema laser sia durante lo spettacolo quali operatori generici, operatori laser, personale dell'organizzatore locale, musicisti, ecc.).

Non esistono analoghe disposizioni di legge per la sicurezza delle persone del pubblico se non quanto previsto nel Rapporto Tecnico [12] e nella Norma Tecnica [13]. Tuttavia in nessun caso il pubblico generico dovrà avere accesso a radiazione laser che superi i Valori Limite di Esposizione applicabili in ogni condizione operativa possibile.

Ai sensi del Rapporto Tecnico [12] in relazione ai laser show *“Per installazioni dove sono messi in opera laser di classe superiore alla 3A l'utilizzatore deve servirsi della consulenza specialistica di un tecnico laser con competenze specifiche relative ai problemi di sicurezza (“Tecnico Sicurezza Laser”-TSL) per la verifica del rispetto della normativa vigente e per l'adozione delle necessarie misure di prevenzione”*.

Nella valutazione dei rischi dovuti alla radiazione laser di classe 3B e 4 dovranno essere prese in considerazione non solo l'esposizione diretta ma anche riflessioni speculari o diffondenti da tutte le superfici possibili in particolare con sistemi di protezione dai guasti nel caso in cui il fascio resti fisso e con sistemi di blocco degli specchi di rinvio dei fasci.

Gli strumenti di scansione del fascio laser comprese le sfere speculari rotanti, dovranno incorporare un mezzo che impedisca l'emissione laser in caso di guasto che abbia come effetto la variazione della velocità o dell'ampiezza della scansione.

Tutti i sistemi dimostrativi laser saranno provvisti di un sistema, facilmente accessibile, che provochi l'immediata cessazione dell'emissione laser.

I fasci laser devono essere diretti in volumi non occupati da persone.
Se la dimostrazione non richiede una supervisione continua o un controllo operativo, dovrà essere designata una persona specificatamente formata, presente durante tutta la dimostrazione, responsabile dell'immediata cessazione dell'emissione laser, nel caso di malfunzionamento dell'apparecchiatura, comportamento scorretto del pubblico e ogni altra situazione rischiosa.
Se l'installazione laser soddisfa tutte le prescrizioni qui esposte, non sarà necessario apporre cartelli o scritte di avvertimento.

Bibliografia

- [1] Gregory D Lee, Caroline R Bauman, David Lally, John D Pitcher, James Vander, Jay S Duker 1
Retinal injury after inadvertent handheld laser exposure
Retina, Lippincott Williams & Wilkins Philadelphia, Pa (December 2014 - Volume 34 - Issue 12)
- [2] International Electro-technical Commission IEC 60825-1 *Safety of laser products - Part 1: Equipment classification and requirements* Edition 3.0 2014-05
- [3] United States Of America, Code of Federal Regulations, Title 21, Volume CFR1040.10
- [4] Joshua Hadler, Edna Tobares, Marla Dowell “*Random testing reveals excessive power in commercial laser pointers*” Journal of Laser Applications 04/2013; 25(3) 2013 Laser Institute of America.
- [5] Galang J., Restelli A., Hagley EW., Clark CW., “*A Green Laser Pointer Hazard*” NIST Technical Note 1668, July 2010
- [6] Ministero della Salute, Dipartimento della Prevenzione, ORDINANZA 16 luglio 1998 “*Divieto di commercializzazione sul territorio nazionale di puntatori laser o di oggetti con funzione di puntatori laser di classe pari o superiore a 3 secondo la norma CEI EN 60825.* (published in the Official Journal of the Italian Republic n. 167 20 July 1998)”

- [7] Bivona R, Frigerio F, Tomaselli A. “*Control measurements for lasers in physiotherapy*”, *Giornale Italiano di Medicina del Lavoro ed Ergonomia*, Volume XXXIX (1) gennaio-marzo 2017
- [8] Francesco Frigerio: *Risk for general public in the use of handheld laser pointers*. *Italian Journal Of Environmental and Industrial Hygiene* eISSN: 2464-8817, Vol. 6 (1) 2015
- [9] Francesco Frigerio, Luisa Biazzi: *Maximum permissible exposure in the laser display shows*. IEEE 18th International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2nd Industrial and Commercial Power Systems Europe, Palermo, Italy 12-15th june 2018; 06/2018
- [10] Patrick Murphy and Greg Makhov. *Scanning Audiences at Laser Shows: Theory, Practice and a Proposal* International Laser Display Association 2009 <http://www.ilda.com/>
- [11] Boosten K. Van Ginderdeuren R. Spileers W. et al. *Laser-induced retinal injury following a recreational laser show: two case reports and a clinicopathological study*. *Bull SocBelgeOphtalmol*. 2011;317:11–16
- [12] Rapporto Tecnico del CEI 3849 del CT 76, “*Sicurezza dei dispositivi da spettacolo di luce con laser*”, 1998
- [13] Norma Tecnica IEC 60825-3 “*Sicurezza dei prodotti laser – parte 3 Guida per gli spettacoli con laser*”, 2008