



## LA VALUTAZIONE DEL RISCHIO RETINICO DA RADIAZIONE LASER

*Il calcolo della sorgente apparente alla base delle prescrizioni di sicurezza e classificazione degli apparecchi laser.*

*Enrico Galbiati, Presidente CEI CT 76*

Il tema della sicurezza laser è sempre più attuale per le crescenti applicazioni delle sorgenti laser. Tuttavia, è spesso difficile assegnare l'apparecchio laser alla classe di appartenenza in accordo alla Norma CEI EN 60825-1, così come valutare l'esposizione dell'occhio o della pelle alla radiazione e determinare la distanza minima di sicurezza, cioè la Distanza Nominale di Rischio Oculare (DNRO). La difficoltà nell'effettuare la corretta valutazione del rischio è particolarmente complessa nel caso in cui la radiazione laser arrivi alla retina, cioè quando la sua lunghezza d'onda è compresa tra 400 nm e 1400 nm (questo intervallo comprende la radiazione visibile e l'IRA, cioè il vicino infrarosso). Inoltre, la sempre maggiore complessità delle più recenti applicazioni laser rende sempre più difficile la corretta applicazione delle norme applicabili ed in particolare della CEI EN 60825-1.

Per determinare correttamente gli effetti della radiazione laser sulla retina, occorre analizzare come l'occhio mette a fuoco questa radiazione e quindi quanto è grande l'immagine della sorgente laser sulla retina. Infatti, a parità di potenza o energia della radiazione incidente sulla cornea, minore è la dimensione dell'immagine retinica della radiazione e maggiore è la densità di poten-

za ( $W/m^2$ ) o energia ( $J/m^2$ ) sulla retina e quindi il danneggiamento di questo importantissimo tessuto. Infatti, la capacità dell'occhio di concentrare, attraverso la focalizzazione, molta potenza in una piccola superficie retinica rende particolarmente critiche le esposizioni alla radiazione che può raggiungere la retina.

Per valutare adeguatamente questo aspetto, bisogna considerare che, in base alla conformazione dell'occhio e alla sua capacità di focalizzazione attraverso l'accomodazione, cioè la variazione della curvatura del cristallino, la focalizzazione dell'occhio può rendere la densità di potenza o energia a livello della retina molto maggiore di quello che si misurerebbe a livello della cornea. In particolare, considerando la massima dilatazione della pupilla, il cui diametro raggiunge i 7 mm, e la minima immagine retinica compatibile con l'aberrazione oculare, che ha un diametro di 25  $\mu m$  (corrispondente ad una sorgente puntiforme), l'irradiazione a livello della retina è maggiore di quello a livello della cornea di circa 78 mila volte, come mostrato dalla formula seguente:

$$(7 \times 10^3 / 25)^2 = 7,84 \times 10^4$$

Quindi, anche esposizioni che causano un irradiazione corneale relativamente basso potrebbero essere in grado di provocare lesioni alla retina.

Naturalmente, se l'immagine retinica fosse maggiore, e quindi se la sorgente "vista" dall'occhio apparisse non più come puntiforme, ma estesa, la concentrazione di energia o potenza sulla retina sarebbe minore. Queste considerazioni hanno un notevole impatto sulla classificazione e sulla valutazione dell'esposizione al fascio laser. Per valutare correttamente la dimensione dell'immagine retinica, bisogna introdurre il concetto di "sorgente apparente" del fascio laser, che rappresenta proprio la sorgente che appare all'occhio e che nella maggior parte dei casi non coincide affatto con la sorgente fisica. Più precisamente, si definisce "sorgente apparente" la sorgente reale o virtuale in grado di formare la più piccola immagine retinica. In realtà, è proprio la sorgente apparente, e non quella fisica, a determinare la dimensione dell'immagine retinica e quindi l'irradiazione sulla retina. Di conseguenza, è la sorgente apparente che determina la pericolosità di un fascio laser.

Al fine di evitare valutazioni errate del rischio che possano compromettere la sicurezza, è importante determinare con cura la dimensione e la posizione della sorgente apparente. La determinazione della sorgente apparente è sempre stata un argomento dibattuto e difficile da affrontare, in quanto i fasci laser sono "gaussiani", cioè seguono la legge di propagazione dei fasci gaussiani. Quindi si propagano in modo differente, soprattutto attraverso le ottiche, rispetto a quanto sarebbe previsto dall'ottica geometrica. Quest'ultima risulta essere un'approssimazione valida per la radiazione incoerente, e solo in particolari casi anche per i fasci laser. Inoltre, quando l'occhio riceve la radiazione laser, così come qualsiasi altro tipo di radiazione visibile, mette in atto l'accomodamento, cioè varia la focale del cristallino fino a formare la più piccola immagine retinica. Quindi l'occhio si presenta come un sistema a focale variabile. La difficoltà nel determinare l'immagine retinica era proprio legata a capire quale focale avrebbe usato l'occhio per focalizzare il fascio laser. Molto spesso si considerava l'immagine retinica come se fosse prodotta dalla focalizzazione del "beam waist" (Figura 1), cioè dalla sezione più stretta del fascio, caratteristica tipica di tutti i fasci gaussiani, oppure dalla sorgente fisica, o addirittura dalla sezione del fascio all'uscita dall'apparecchio laser.

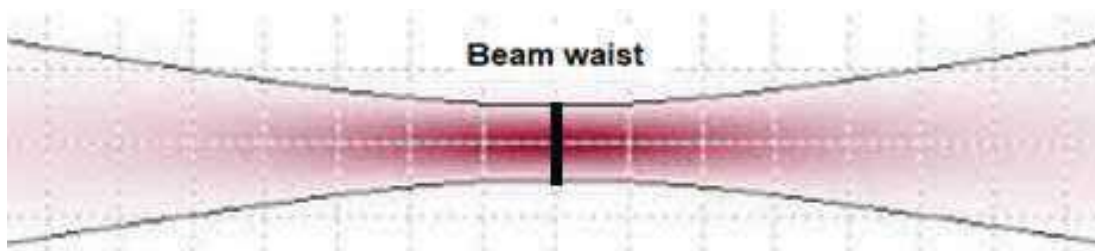


Figura 1 - Beam waist del fascio laser.

Tutte queste considerazioni si sono poi rivelate errate e pericolose, perché sovrastimavano la reale dimensione dell'immagine retinica. Purtroppo, ancora oggi questi errori sono piuttosto diffusi. Il problema di valutare correttamente la dimensione della sorgente apparente, e quindi dell'immagine retinica, è stato definitivamente risolto dalla pubblicazione di un mio articolo nel 2001, in cui viene indicato come calcolare la sorgente apparente in base alle caratteristiche del fascio (lunghezza d'onda, fattore di qualità del fascio e dimensione del beam waist, o in alternativa divergenza) e alla distanza dell'occhio dal beam waist.

La determinazione della sorgente apparente è particolarmente semplice nel caso di radiazione proveniente da riflessioni prodotte da superfici diffondenti o trasmessa attraverso diffusori, in modo che la sorgente si possa considerare simile ad una sorgente lambertiana (sorgente ideale la cui emissione è uniforme in tutte le direzioni). Infatti, in questo caso la sorgente apparente coincide con la superficie che emette la radiazione, per quanto riguarda sia la dimensione che la posizione, proprio perché in questi casi è possibile applicare l'approssimazione dell'ottica geometrica. La trasmissione attraverso ottiche, quali lenti o specchi, anche quando si ha un aumento del diametro del fascio, non rientra nei casi sopra indicati. Infatti, l'osservazione di una riflessione speculare non provoca una "diffusione" del fascio, così come le lenti non si possono affatto considerare diffusori. Per questo motivo, l'osservazione sia di fasci riflessi specularmente (o con una non trascurabile percentuale di riflessione speculare), sia di fasci trasmessi da lenti o sistemi di lenti, equivale all'osservazione diretta del fascio.

In generale, nel caso di fasci non provenienti da superfici diffondenti o non trasmessi attraverso diffusori, cioè non provenienti da superfici lambertiane, la determinazione della sorgente apparente non è semplice. Inoltre, anche la presenza di ottiche, come lenti e specchi, può modificare sia la sua dimensione che la sua posizione. In questo caso è difficile determinare la sorgente apparente, ed errori nella sua valutazione spesso portano a sovrastimare, anche di molto, la dimensione dell'immagine retinica, sottostimando così il reale rischio oculare.

<sup>1</sup> E. Galbiati, "Evaluation of the apparent source in laser safety", Journal of Laser Applications., vol. 13, No. 4, agosto 2001.

Ad eccezione dei casi sopra indicati (riflessione da superfici lambertiane o trasmissione da diffusori lambertiani) la sorgente apparente di un fascio laser osservato direttamente, oppure dopo riflessioni speculari o il passaggio attraverso sistemi ottici, quali specchi e lenti, ha le seguenti caratteristiche:

- si trova nel centro di curvatura che ha il fascio laser alla cornea;
- la sua dimensione è quella del fascio laser in corrispondenza di quel centro di curvatura.

Va notato che, contrariamente a quanto si potrebbe pensare, in generale la posizione della sorgente apparente non è in punto fisso (come accadrebbe se si potesse applicare l'ottica geometrica), ma si trova in punti diversi a seconda del punto di osservazione, ed in particolare a seconda della distanza tra il beam waist e l'occhio. In particolare, bisogna ricordare che generalmente, tranne alcune eccezioni, valgono le seguenti considerazioni:

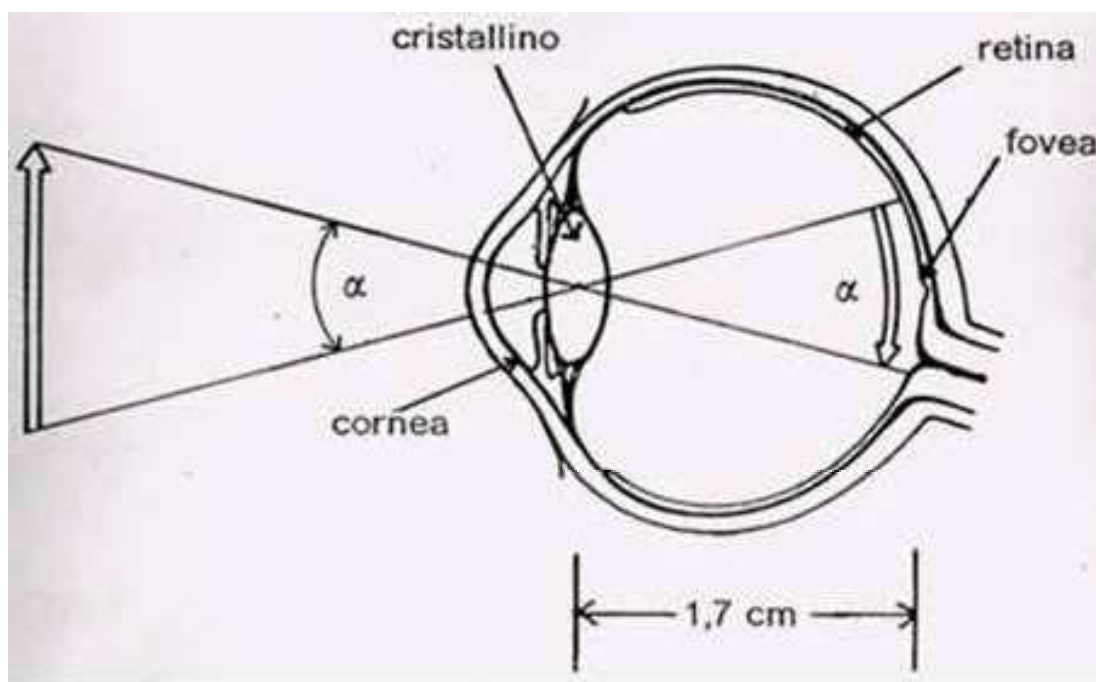
- la sorgente apparente non si può identificare con la sezione del fascio all'apertura del laser;
- la sorgente apparente non si può identificare con il beam waist, né con la sorgente fisica del fascio.

Quindi la sorgente apparente generalmente non coincide con la sorgente fisica della radiazione, né in termini di posizione, né in termini di dimensione. Solo in alcuni casi particolari la sorgente apparente coincide o, più precisamente, si avvicina, al beam waist, che a sua volta potrebbe essere molto prossimo alla sorgente fisica. Questo avviene con fasci laser molto divergenti, soprattutto se osservati a distanze non troppo piccole. Dato che è proprio la sorgente apparente a determinare l'immagine retinica, è evidente l'importanza di poterla identificare correttamente. Vediamo ora alcuni casi particolari.

Nel caso di un fascio collimato, cioè con divergenza molto bassa, la sorgente apparente è posta ad una distanza molto grande (teoricamente all'infinito), mentre la sua dimensione è molto piccola e in pratica si può considerare puntiforme.

Invece, nel caso di un fascio molto divergente, come già anticipato, con una buona approssimazione la sorgente apparente può essere considerata coincidente con il beam waist (spesso questo coincide anche con la sorgente fisica), sia per quanto riguarda la posizione che la dimensione. Nel caso di fasci molto divergenti, la propagazione dei fasci laser si può approssimare, con un errore trascurabile, a quella definita dall'ottica geometrica, considerando il beam waist del fascio laser come sorgente apparente del fascio. Essendo il beam waist inversamente proporzionale alla divergenza, quando quest'ultima è molto grande, il beam waist è molto piccolo. Quindi, anche nel caso di fasci laser con alta divergenza, la sorgente apparente è puntiforme.

Per "misurare" la dimensione della sorgente apparente, si considera la sua dimensione angolare, cioè l'angolo sotteso dalla sorgente apparente al cristallino, che è esattamente uguale all'angolo che l'immagine retinica di quella sorgente sottende sempre al cristallino (*Figura 2*).

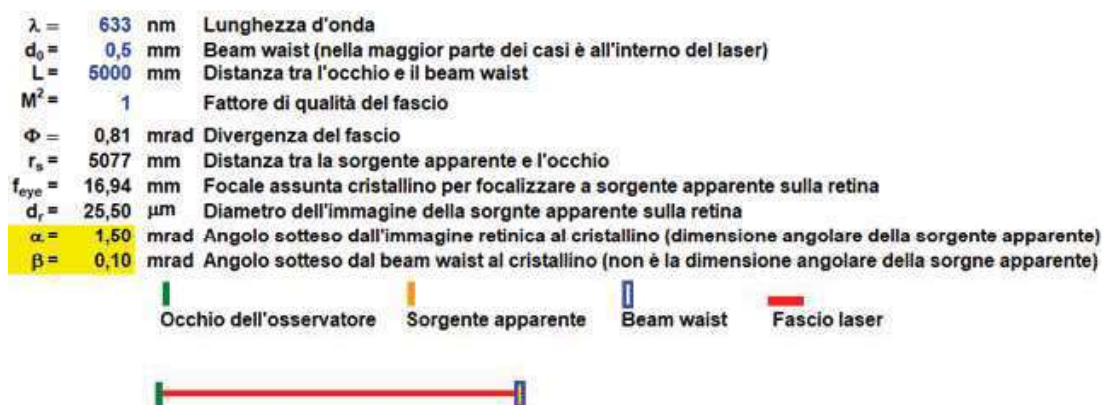


*Figura 2 - Immagine prodotta sulla retina da una sorgente apparente (rappresentata dalla freccia a sinistra, esterna all'occhio) che ha dimensione angolare  $\alpha$ , cioè che sottende un angolo  $\alpha$  al cristallino; questo angolo è uguale a quello sotteso al cristallino dall'immagine retinica (rappresentata dalla freccia a destra, posta sulla retina) di quella sorgente.*



Dato che la distanza tra la retina e il cristallino è fissa (in un occhio normale è di circa 17 mm), dalla dimensione angolare si ricava in modo univoco la dimensione dell'immagine retinica e viceversa. In particolare, una sorgente puntiforme, che quindi ha un'immagine retinica con un diametro di 25  $\mu\text{m}$ , ha una dimensione angolare  $\vartheta_{\min}$  di 1,5 mrad (milliradiani). A causa dell'aberrazione del sistema di focalizzazione dell'occhio, nessuna sorgente può avere una dimensione angolare inferiore  $\vartheta_{\min}$ , cioè a 1,5 mrad.

Vediamo ora un esempio di come variano posizione e dimensione della sorgente apparente a seconda della distanza dell'osservatore dal beam waist (che generalmente si trova all'interno del laser). Consideriamo un laser con lunghezza d'onda di 633 nm e beam waist di 0,5 mm. Se l'osservatore si trova alla distanza di 5 m dal beam waist (che per esempio potrebbe essere all'interno del laser), la sorgente apparente si trova praticamente molto vicina al beam waist, come mostrato in **Figura 3**, dove con  $L$  e  $r_s$  sono indicate rispettivamente la distanza del beam waist dall'osservatore e la distanza della sorgente apparente dall'osservatore.



**Figura 3** - Alla distanza di osservazione di 5 m dal beam waist, la sorgente apparente è praticamente coincidente con il beam waist e la distanza dell'osservatore dalla sorgente apparente è uguale alla distanza dal beam waist ( $r_s = L$ ). La dimensione angolare  $\vartheta$  della sorgente apparente è 1,5 mrad, quindi la sorgente è puntiforme.

Questo è quello che ci si aspetterebbe con una sorgente "ordinaria": la sorgente apparente è all'interno del dispositivo che genera il fascio. Ma se l'osservatore si avvicina, la sorgente apparente si allontana. Per esempio, se l'osservatore si trova a mezzo metro dal beam waist, la sorgente apparente si trova a una distanza di oltre un metro (**Figura 4**).



**Figura 4** - Alla distanza di osservazione di mezzo metro, la sorgente apparente si trova ad una distanza maggiore rispetto al beam waist ( $r_s > L$ ). La dimensione angolare  $\vartheta$  della sorgente apparente è 1,5 mrad, quindi la sorgente è puntiforme.

Esempi analoghi, con beam waist di 1 mm, sono descritti in **Figura 5** e **Figura 6**. In quest'ultima si nota che, mentre la corretta dimensione angolare della sorgente apparente, indicata con  $\vartheta$ , è 1,5 mrad, corrispondente ad una sorgente puntiforme, l'angolo sotteso dal beam waist, indicato con  $\beta$ , è 7,5 mrad, quindi 5 volte maggiore! Considerare quest'ultimo come dimensione angolare della sorgente porterebbe a sottostimare l'effettiva pericolosità del laser e l'entità del danno alla retina, in quanto si assumerebbe erroneamente un diametro dell'immagine retinica 5 volte maggiore di quello reale.



Figura 5 - Con un beam waist di 1,5 mm, anche ad una rilevante distanza di osservazione (5 metri), la sorgente apparente si trova ad una distanza nettamente maggiore rispetto al beam waist ( $r_s > L$ ). La dimensione angolare  $\alpha$  della sorgente apparente è 1,5 mrad, quindi la sorgente è puntiforme.

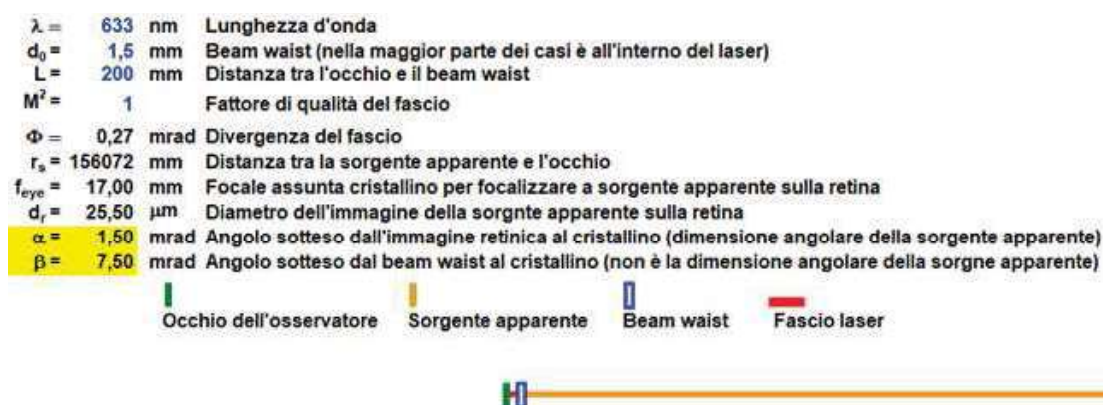


Figura 6 - Con un beam waist di 1,5 mm, alla distanza di osservazione di 20 cm la sorgente apparente si trova molto più lontana rispetto al beam waist ( $r_s > L$ ) (esce dallo spazio della figura). La dimensione angolare  $\alpha$  della sorgente apparente è 1,5 mrad, quindi la sorgente è puntiforme. È importante notare che, in questo caso, se si considerasse come dimensione angolare l'angolo sotteso dal beam waist, cioè  $\beta$  invece di  $\alpha$ , si assumerebbe un valore 5 volte maggiore di quello corretto ( $\beta/\alpha = 5$ ), sottostimando notevolmente il rischio oculare.

In realtà, praticamente nella quasi totalità dei casi, la sorgente apparente dei fasci laser è puntiforme. Rare eccezioni si hanno solo in casi in cui si hanno simultaneamente valori di qualità del fascio molto alti (per esempio  $M^2 = 10$ ) e brevissime distanze tra l'occhio dell'osservatore e il beam waist (per esempio 10 cm).

Comunque, anche in questi rari casi, la sorgente apparente è spesso molto piccola e, ai fini pratici, potrebbe essere considerata come puntiforme.

In conclusione, nelle varie applicazioni laser, non solo in quelle in cui il fascio laser può essere osservato direttamente, ma anche in quelle in cui il percorso del fascio è complesso e può arrivare all'occhio attraverso ottiche (specchi e lenti), oppure riflessioni da superfici che non si comportano come diffondenti lambertiani, la sorgente apparente va considerata puntiforme. Questo permette di evitare pericolose sottostime del rischio oculare.