

ALLEGATO XXXVII

RADIAZIONI OTTICHE

PARTE I – RADIAZIONI OTTICHE NON COERENTI

Radiazioni ottiche non coerenti

I valori limite di esposizione alle radiazioni ottiche, pertinenti dal punto di vista biofisico, possono essere determinati con le formule seguenti. Le formule da usare dipendono dal tipo della radiazione emessa dalla sorgente e i risultati devono essere comparati con i corrispondenti valori limite di esposizione indicati nella tabella 1.1. Per una determinata sorgente di radiazioni ottiche possono essere pertinenti più valori di esposizione e corrispondenti limiti di esposizione.

Le lettere da a) a o) si riferiscono alle corrispondenti righe della tabella 1.1.

$$\begin{aligned}
 \text{a)} \quad H_{\text{eff}} &= \int_0^t \int_{\lambda=380 \text{ nm}}^{\lambda=400 \text{ nm}} E_{\lambda}(\lambda, t) \cdot S(\lambda) \cdot d\lambda \cdot dt & (H_{\text{eff}} \text{ è pertinente solo nell'intervallo da 180 a 400 nm}) \\
 \text{b)} \quad H_{\text{UVA}} &= \int_0^t \int_{\lambda=315 \text{ nm}}^{\lambda=400 \text{ nm}} E_{\lambda}(\lambda, t) \cdot d\lambda \cdot dt & (H_{\text{UVA}} \text{ è pertinente solo nell'intervallo da 315 a 400 nm}) \\
 \text{c), d)} \quad I_B &= \int_{\lambda=300 \text{ nm}}^{\lambda=700 \text{ nm}} L_{\lambda}(\lambda) \cdot B(\lambda) \cdot d\lambda & (I_B \text{ è pertinente solo nell'intervallo da 300 a 700 nm}) \\
 \text{e), f)} \quad E_B &= \int_{\lambda=300 \text{ nm}}^{\lambda=700 \text{ nm}} E_{\lambda}(\lambda) \cdot B(\lambda) \cdot d\lambda & (E_B \text{ è pertinente solo nell'intervallo da 300 a 700 nm}) \\
 \text{g)-l)} \quad I_R &= \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda}(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot d\lambda & (\text{Cfr. tabella 1.1 per i valori appropriati di } \lambda_1 \text{ e } \lambda_2) \\
 \text{m), n)} \quad E_{\text{IR}} &= \int_{\lambda=780 \text{ nm}}^{\lambda=1000 \text{ nm}} E_{\lambda}(\lambda) \cdot d\lambda & (E_{\text{IR}} \text{ è pertinente solo nell'intervallo da 780 a 1000 nm}) \\
 \text{o)} \quad H_{\text{Ato}} &= \int_0^t \int_{\lambda=380 \text{ nm}}^{\lambda=1000 \text{ nm}} E_{\lambda}(\lambda, t) \cdot d\lambda \cdot dt & (H_{\text{Ato}} \text{ è pertinente solo nell'intervallo da 380 a 1000 nm})
 \end{aligned}$$

Ai fini della direttiva, le formule di cui sopra possono essere sostituite dalle seguenti espressioni e dall'utilizzo dei valori discreti che figurano nelle tabelle successive:

$$\begin{aligned}
 \text{a)} \quad E_{\text{eff}} &= \sum_{\lambda=380 \text{ nm}}^{\lambda=400 \text{ nm}} E_{\lambda} \cdot S(\lambda) \cdot \Delta\lambda & \text{e } H_{\text{eff}} &= E_{\text{eff}} \cdot \Delta t \\
 \text{b)} \quad E_{\text{UVA}} &= \sum_{\lambda=315 \text{ nm}}^{\lambda=400 \text{ nm}} E_{\lambda} \cdot \Delta\lambda & \text{e } H_{\text{UVA}} &= E_{\text{UVA}} \cdot \Delta t \\
 \text{c), d)} \quad I_B &= \sum_{\lambda=300 \text{ nm}}^{\lambda=700 \text{ nm}} L_{\lambda} \cdot B(\lambda) \cdot \Delta\lambda \\
 \text{e), f)} \quad E_B &= \sum_{\lambda=300 \text{ nm}}^{\lambda=700 \text{ nm}} E_{\lambda} \cdot B(\lambda) \cdot \Delta\lambda \\
 \text{g)-l)} \quad I_R &= \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda} \cdot R(\lambda) \cdot \Delta\lambda & (\text{Cfr. tabella 1.1 per i valori appropriati di } \lambda_1 \text{ e } \lambda_2) \\
 \text{m), n)} \quad E_{\text{IR}} &= \sum_{\lambda=780 \text{ nm}}^{\lambda=1000 \text{ nm}} E_{\lambda} \cdot \Delta\lambda
 \end{aligned}$$

$$o) \quad E_{\text{skin}} = \sum_{\lambda=100 \text{ nm}}^{\lambda=1000 \text{ nm}} E_{\lambda} \cdot \Delta\lambda \quad \text{e} \quad H_{\text{skin}} = E_{\text{skin}} \cdot \Delta t$$

Note:

$E_{\lambda}(\lambda, t)$, E_{λ} *irradianza spettrale o densità di potenza spettrale*: la potenza radiante incidente per unità di area su una superficie, espressa in watt su metro quadrato per nanometro [$\text{W m}^{-2} \text{nm}^{-1}$]; i valori di $E_{\lambda}(\lambda, t)$ ed E_{λ} sono il risultato di misurazioni o possono essere forniti dal fabbricante delle attrezzature;

E_{eff} *irradianza efficace (gamma UV)*: irradianza calcolata nell'intervallo di lunghezza d'onda UV da 180 a 400 nm, ponderata spettralmente con $S(\lambda)$, espressa in watt su metro quadrato [W m^{-2}];

H *esposizione radiante*: integrale nel tempo dell'irradianza, espressa in joule su metro quadrato [J m^{-2}];

H_{eff} *esposizione radiante efficace*: esposizione radiante ponderata spettralmente con $S(\lambda)$, espressa in joule su metro quadrato [J m^{-2}];

E_{UVA} *irradianza totale (UVA)*: irradianza calcolata nell'intervallo di lunghezza d'onda UVA da 315 a 400 nm, espressa in watt su metro quadrato [W m^{-2}];

H_{UVA} *esposizione radiante*: integrale o somma nel tempo e nella lunghezza d'onda dell'irradianza nell'intervallo di lunghezza d'onda UVA da 315 a 400 nm, espressa in joule su metro quadrato [J m^{-2}];

$S(\lambda)$ *fattore di peso spettrale*: tiene conto della dipendenza dalla lunghezza d'onda degli effetti sulla salute delle radiazioni UV sull'occhio e sulla cute (tabella 1.2) [adimensionale];

t , Δt *tempo, durata dell'esposizione*, espressi in secondi [s];

λ *lunghezza d'onda*, espressa in nanometri [nm];

$\Delta\lambda$ *larghezza di banda*, espressa in nanometri [nm], degli intervalli di calcolo o di misurazione

$I_{\lambda}(\lambda)$, I_{λ} *radianza spettrale della sorgente*, espressa in watt su metro quadrato per steradiante per nanometro [$\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$];

$R(\lambda)$ *fattore di peso spettrale*: tiene conto della dipendenza dalla lunghezza d'onda delle lesioni termiche provocate sull'occhio dalle radiazioni visibili e IRA (tabella 1.3) [adimensionale];

I_{IR} *radianza efficace (lesione termica)*: radianza calcolata ponderata spettralmente con $R(\lambda)$, espressa in watt su metro quadrato per steradiante [$\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1}$];

$B(\lambda)$ *ponderazione spettrale*: tiene conto della dipendenza dalla lunghezza d'onda della lesione fotochimica provocata all'occhio dalla radiazione di luce blu (tabella 1.3) [adimensionale];

I_{B} *radianza efficace (luce blu)*: radianza calcolata ponderata spettralmente con $B(\lambda)$, espressa in watt su metro quadrato per steradiante [$\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1}$];

E_{B} *irradianza efficace (luce blu)*: irradianza calcolata ponderata spettralmente con $B(\lambda)$ espressa in watt su metro quadrato [W m^{-2}];

E_{IR} *irradianza totale (lesione termica)*: irradianza calcolata nell'intervallo di lunghezze d'onda dell'infrarosso da 780 nm a 3 000 nm, espressa in watt su metro quadrato [W m^{-2}];

E_{skin} *irradianza totale (visibile, IRA e IRB)*: irradianza calcolata nell'intervallo di lunghezze d'onda visibile e dell'infrarosso da 380 nm a 3 000 nm, espressa in watt su metro quadrato [W m^{-2}];

H_{skin} *esposizione radiante*: integrale o somma nel tempo e nella lunghezza d'onda dell'irradianza nell'intervallo di lunghezze d'onda visibile e dell'infrarosso da 380 nm a 3 000 nm, espressa in joule su metro quadrato [J m^{-2}];

α *angolo sotteso*: angolo sotteso da una sorgente apparente, visto in un punto nello spazio, espresso in milliradiani (mrad). La sorgente apparente è l'oggetto reale o virtuale che forma l'immagine retinica più piccola possibile.

Tabella 1.1
Valori limiti di esposizione per radiazioni ottiche non coerenti

Indice	Lunghezza d'onda nm	Valori limite di esposizione	Unità	Commenti	Parti del corpo	Rischio
a.	180-400 (UVA, UVB e UVC)	$E_{UV} = 30$ Valore giornaliero 8 ore	[J m ⁻²]		occhio: cornea congiuntiva cristallino cute	fotocheratite congiuntivite catarattogenesi eritema danno al tumore della cute
b.	315-400 (UVA)	$E_{UVA} = 10^6$ Valore giornaliero 8 ore	[J m ⁻²]		occhio: cristallino	catarattogenesi
c.	400-700 (Luce blu) Cfr. nota 1	$E_4 = \frac{10^4}{t}$ per $t \leq 10.000$ s	E_4 [W m ⁻² sr ⁻¹] t: [secondi]	per $\alpha \geq 11$ mrad		
d.	400-700 (Luce blu) Cfr. nota 1	$E_4 = 100$ per $t > 10.000$ s	[W m ⁻² sr ⁻¹]			
e.	400-700 (Luce blu) Cfr. nota 1	$E_4 = \frac{100}{t}$ per $t \leq 10.000$ s	E_4 [W m ⁻²] t: [secondi]	per $\alpha < 11$ mrad Cfr. nota 2	occhio: retina	fotoconicità
f.	400-700 (Luce blu) Cfr. nota 1	$E_4 = 0,01$ per $t > 10.000$ s	[W m ⁻²]			

Indice	Lunghezza d'onda nm	Valori limite di esposizione	Unità	Commenti	Parte del corpo	Rischio
g.	380-1 400 (Visibile e IRLA)	$I_{Aq} = \frac{2,8 \cdot 10^7}{C_a}$ per $t > 10$ s	$[W m^{-2} sr^{-1}]$	$C_a = 1,7$ per $\alpha \leq 1,7$ mrad $C_a = \alpha$ per $1,7 \leq \alpha \leq 100$ mrad $C_a = 100$ per $\alpha > 100$ mrad $\lambda_1 = 380; \lambda_2 = 1 400$	occhio; retina	lesione retina
h.	380-1 400 (Visibile e IRLA)	$I_{Aq} = \frac{5 \cdot 10^7}{C_a \alpha^{0,25}}$ per $10 \mu s \leq t \leq 10$ s	$I_{Aq} [W m^{-2} sr^{-1}]$ t: [secondi]			
i.	380-1 400 (Visibile e IRLA)	$I_{Aq} = \frac{8,89 \cdot 10^8}{C_a}$ per $t < 10 \mu s$	$[W m^{-2} sr^{-1}]$			
j.	780-1 400 (IRa)	$I_{Aq} = \frac{6 \cdot 10^6}{C_a}$ per $t > 10$ s	$[W m^{-2} sr^{-1}]$	$C_a = 11$ per $\alpha \leq 11$ mrad $C_a = \alpha$ per $11 \leq \alpha \leq 100$ mrad $C_a = 100$ per $\alpha > 100$ mrad (campo di vista per la misurazione: 11 mrad) $\lambda_1 = 780; \lambda_2 = 1 400$	occhio; retina	lesione retina
k.	780-1 400 (IRa)	$I_{Aq} = \frac{5 \cdot 10^7}{C_a \alpha^{0,25}}$ per $10 \mu s \leq t \leq 10$ s	$I_{Aq} [W m^{-2} sr^{-1}]$ t: [secondi]			
l.	780-1 400 (IRa)	$I_{Aq} = \frac{8,89 \cdot 10^8}{C_a}$ per $t < 10 \mu s$	$[W m^{-2} sr^{-1}]$			
m.	780-3 000 (IRa e IIRB)	$E_{Aq} = 18 000 t^{0,75}$ per $t \leq 1 000$ s	$E: [W m^{-2}]$ t: [secondi]		occhio; cornea cristallino	lesione cornea cataratto; glaucoma
n.	780-3 000 (IRa e IIRB)	$E_{Aq} = 100$ per $t > 1 000$ s	$[W m^{-2}]$			

Indice	Lunghezza d'onda nm	Valori limite di esposizione	Unità	Commenti	Parte del corpo	Rischio
a.	380-3 000 (Visible, IRL e IRE)	$H_{lim} = 20\,000\ t^{0,25}$ per $t < 10\ s$	$H: [J\ m^{-2})$ $t: [secondi]$		cuti	ustione

Nota 1: L'intervallo di lunghezze d'onda 300-700 nm copre in parte gli UVB, tutti gli UVA e la maggior parte delle radiazioni visibili; tuttavia il rischio associato è normalmente denominato rischio da «luce blu». In senso stretto la luce blu riguarda soltanto approssimativamente l'intervallo 400-490 nm.

Nota 2: Per la fissazione costante di soggetti piccolissimi che sottendono angoli $< 11\ mrad$, I_0 può essere convertito in E_0 . Ciò si applica di solito solo agli strumenti oftalmici o all'occhio stabilizzato sotto anestesia. Il «tempo di fissazione» massimo è dato da $t_{max} = 100/E_0$ dove E_0 è espressa in $W\ m^{-2}$. Considerati i movimenti dell'occhio durante compiti visivi normali, questo valore non supera i 100s.

Tabella 1.2

S (λ) [adimensionale], da 180 nm a 400 nm

λ in nm	S (λ)	λ in nm	S (λ)	λ in nm	S (λ)	λ in nm	S (λ)	λ in nm	S (λ)
180	0.0170	225	0.1737	276	0.9434	324	0.000570	372	0.00086
181	0.0126	226	0.1819	277	0.9272	325	0.000500	373	0.00083
182	0.0132	227	0.1900	278	0.9112	326	0.000479	374	0.00080
183	0.0138	228	0.1995	279	0.8954	327	0.000459	375	0.00077
184	0.0144	229	0.2089	280	0.8800	328	0.000440	376	0.00074
185	0.0151	230	0.2188	281	0.8568	329	0.000425	377	0.00072
186	0.0158	231	0.2292	282	0.8342	330	0.000410	378	0.00069
187	0.0166	232	0.2400	283	0.8122	331	0.000396	379	0.00066
188	0.0173	233	0.2510	284	0.7908	332	0.000383	380	0.00064
189	0.0181	234	0.2624	285	0.7700	333	0.000370	381	0.00062
190	0.0190	235	0.2744	286	0.7420	334	0.000355	382	0.00059
191	0.0199	236	0.2869	287	0.7151	335	0.000340	383	0.00057
192	0.0208	237	0.3000	288	0.6891	336	0.000327	384	0.00055
193	0.0218	238	0.3111	289	0.6641	337	0.000315	385	0.00053
194	0.0228	239	0.3227	290	0.6400	338	0.000303	386	0.00051
195	0.0239	240	0.3347	291	0.6186	339	0.000291	387	0.00049
196	0.0250	241	0.3471	292	0.5980	340	0.000280	388	0.00047
197	0.0262	242	0.3600	293	0.5780	341	0.000271	389	0.00046
198	0.0274	243	0.3730	294	0.5587	342	0.000263	390	0.00044
199	0.0287	244	0.3865	295	0.5400	343	0.000255	391	0.00042
200	0.0300	245	0.4005	296	0.4984	344	0.000248	392	0.00041
201	0.0334	246	0.4150	297	0.4600	345	0.000240	393	0.00039
202	0.0371	247	0.4300	298	0.3989	346	0.000231	394	0.00037
203	0.0412	248	0.4465	299	0.3459	347	0.000223	395	0.00036
204	0.0459	249	0.4637	300	0.3000	348	0.000215	396	0.00035
205	0.0510	250	0.4815	301	0.2210	349	0.000207	397	0.00033
206	0.0551	251	0.5000	302	0.1629	350	0.000200	398	0.00032
207	0.0595	252	0.5200	303	0.1200	351	0.000191	399	0.00031
208	0.0643	253	0.5437	304	0.0849	352	0.000183	400	0.00030
209	0.0694	254	0.5685	305	0.0600	353	0.000175		
210	0.0750	255	0.5945	306	0.0454	354	0.000167		
211	0.0786	256	0.6216	307	0.0344	355	0.000160		
212	0.0824	257	0.6500	308	0.0260	356	0.000153		
213	0.0864	258	0.6792	309	0.0197	357	0.000147		
214	0.0906	259	0.7098	310	0.0150	358	0.000141		
215	0.0950	260	0.7417	311	0.0111	359	0.000136		
216	0.0995	261	0.7751	312	0.0081	360	0.000130		
217	0.1043	262	0.8100	313	0.0060	361	0.000126		
218	0.1093	263	0.8449	314	0.0042	362	0.000122		
219	0.1145	264	0.8812	315	0.0030	363	0.000118		
220	0.1200	265	0.9192	316	0.0024	364	0.000114		
221	0.1257	266	0.9587	317	0.0020	365	0.000110		
222	0.1316	267	1.0000	318	0.0016	366	0.000106		
223	0.1378	268	0.9919	319	0.0012	367	0.000103		
224	0.1444	269	0.9838	320	0.0010	368	0.000099		
225	0.1500	270	0.9758	321	0.000819	369	0.000096		
226	0.1583	271	0.9679	322	0.000670	370	0.000093		
227	0.1658	272	0.9600	323	0.000540	371	0.000090		

Tabella 1.3

B (Å), R (Å) [adimensionale], da 380 nm a 1 400 nm

λ in nm	B (Å)	R (Å)
$300 \leq \lambda < 380$	0,01	—
380	0,01	0,1
385	0,013	0,13
390	0,025	0,25
395	0,05	0,5
400	0,1	1
405	0,2	2
410	0,4	4
415	0,8	8
420	0,9	9
425	0,95	9,5
430	0,98	9,8
435	1	10
440	1	10
445	0,97	9,7
450	0,94	9,4
455	0,9	9
460	0,8	8
465	0,7	7
470	0,62	6,2
475	0,55	5,5
480	0,45	4,5
485	0,32	3,2
490	0,22	2,2
495	0,16	1,6
500	0,1	1
$500 < \lambda \leq 600$	$10^{0,02(4704-\lambda)}$	1
$600 < \lambda \leq 700$	0,001	1
$700 < \lambda \leq 1\,050$	—	$10^{0,002(700-\lambda)}$
$1\,050 < \lambda \leq 1\,150$	—	0,2
$1\,150 < \lambda \leq 1\,200$	—	$0,2 \cdot 10^{0,02(1\,150-\lambda)}$
$1\,200 < \lambda \leq 1\,400$	—	0,02

PARTE II – RADIAZIONI LASER

Radiazioni laser

I valori di esposizione alle radiazioni ottiche, pertinenti dal punto di vista biofisico, possono essere determinati con le formule seguenti. La formula da usare dipende dalla lunghezza d'onda e dalla durata delle radiazioni emesse dalla sorgente e i risultati devono essere comparati con i corrispondenti valori limite di esposizione di cui alle tabelle da 2.2 a 2.4. Per una determinata sorgente di radiazione laser possono essere pertinenti più valori di esposizione e corrispondenti limiti di esposizione.

I coefficienti usati come fattori di calcolo nelle tabelle da 2.2 a 2.4 sono riportati nella tabella 2.5 e i fattori di correzione per l'esposizione ripetuta nella tabella 2.6.

$$E = \frac{dP}{dA} \text{ [W m}^{-2}\text{]}$$

$$H = \int_0^t E(t) \cdot dt \text{ [J m}^{-2}\text{]}$$

Note:

dP *potenza*, espressa in watt [W];

dA *superficie*, espressa in metri quadrati [m²];

E(t), E *irradianza o densità di potenza*: la potenza radiante incidente per unità di area su una superficie generalmente espressa in watt su metro quadrato [W m⁻²]. I valori E(t) ed E sono il risultato di misurazioni o possono essere indicati dal fabbricante delle attrezzature;

H *esposizione radiante*: integrale nel tempo dell'irradianza, espressa in joule su metro quadrato [J m⁻²];

t *tempo, durata dell'esposizione*, espressa in secondi [s];

λ *lunghezza d'onda*, espressa in nanometri [nm];

γ *angolo del cono che limita il campo di vista per la misurazione*, espresso in milliradiani [mrad];

γ_m *campo di vista per la misurazione*, espresso in milliradiani [mrad];

α *angolo sotteso da una sorgente*, espresso in milliradiani [mrad];

apertura limite: superficie circolare su cui si basa la media dell'irradianza e dell'esposizione radiante;

G *radianza integrata*: integrale della radianza su un determinato tempo di esposizione, espresso come energia radiante per unità di area di una superficie radiante per unità dell'angolo solido di emissione, espressa in joule su metro quadrato per steradiano [J m⁻² sr⁻¹].

Tabella 2.1

Rischi delle radiazioni

Lunghezza d'onda [nm] λ	Campo di radiazione	Organo interessato	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

Tabella 2.2

Valori limite di esposizione dell'occhio a radiazioni laser — Durata di esposizione breve < 10 s

Lunghezza d'onda ^a [nm]		Apertura	Durata [s]							
			10 ⁻¹³ - 10 ⁻¹¹	10 ⁻¹¹ - 10 ⁻⁹	10 ⁻⁹ - 10 ⁻⁷	10 ⁻⁷ - 1,8 · 10 ⁻⁵	1,8 · 10 ⁻⁵ - 5 · 10 ⁻³	5 · 10 ⁻³ - 10 ³	10 ³ - 10 ¹	
UVC	180 - 280	1 mm per t ≤ 0,3 s; 1,5 · t ^{0,375} per 0,3 < t ≤ 10 s	E = 3 · 10 ¹⁰ · [W m ⁻²] Cfr. nota ^c	H = 30 [J m ⁻²]						
UVB	280 - 302			H = 40 [J m ⁻²]						
	303			se t < 2,6 · 10 ⁻⁹ allora H = 5,6 · 10 ³ · t ^{0,25} [J m ⁻²] cfr. nota ^d						
	304			H = 60 [J m ⁻²]						
	305			se t < 1,3 · 10 ⁻⁸ allora H = 5,6 · 10 ³ · t ^{0,25} [J m ⁻²] cfr. nota ^d						
	306			H = 100 [J m ⁻²]						
	307			se t < 1,0 · 10 ⁻⁷ allora H = 5,6 · 10 ³ · t ^{0,25} [J m ⁻²] cfr. nota ^d						
	308			H = 160 [J m ⁻²]						
	309			se t < 6,7 · 10 ⁻⁷ allora H = 5,6 · 10 ³ · t ^{0,25} [J m ⁻²] cfr. nota ^d						
	310			H = 250 [J m ⁻²]						
	311			se t < 4,0 · 10 ⁻⁶ allora H = 5,6 · 10 ³ · t ^{0,25} [J m ⁻²] cfr. nota ^d						
	312			H = 400 [J m ⁻²]						
	313			se t < 2,6 · 10 ⁻⁵ allora H = 5,6 · 10 ³ · t ^{0,25} [J m ⁻²] cfr. nota ^d						
	314			H = 630 [J m ⁻²]						
	315			se t < 1,6 · 10 ⁻⁴ allora H = 5,6 · 10 ³ · t ^{0,25} [J m ⁻²] cfr. nota ^d						
316	H = 10 ³ [J m ⁻²]									
317	se t < 1,0 · 10 ⁻³ allora H = 5,6 · 10 ³ · t ^{0,25} [J m ⁻²] cfr. nota ^d									
318	H = 1,6 · 10 ³ [J m ⁻²]									
319	se t < 6,7 · 10 ⁻³ allora H = 5,6 · 10 ³ · t ^{0,25} [J m ⁻²] cfr. nota ^d									
320	H = 2,5 · 10 ³ [J m ⁻²]									
321	se t < 4,0 · 10 ⁻² allora H = 5,6 · 10 ³ · t ^{0,25} [J m ⁻²] cfr. nota ^d									
322	H = 4,0 · 10 ³ [J m ⁻²]									
323	se t < 2,6 · 10 ⁻¹ allora H = 5,6 · 10 ³ · t ^{0,25} [J m ⁻²] cfr. nota ^d									
324	H = 6,3 · 10 ³ [J m ⁻²]									
325	se t < 1,6 · 10 ⁰ allora H = 5,6 · 10 ⁴ · t ^{0,25} [J m ⁻²] cfr. nota ^d									
326	H = 5,6 · 10 ³ · t ^{0,25} [J m ⁻²]									
Visibile e IRA	400 - 700	7 mm	H = 1,5 · 10 ⁻⁴ C _E [J m ⁻²]	H = 2,7 · 10 ⁻⁴ · t ^{0,75} C _E [J m ⁻²]	H = 5 · 10 ⁻³ C _E [J m ⁻²]		H = 18 · t ^{0,75} C _E [J m ⁻²]			
	700 - 1 050		H = 1,5 · 10 ⁻⁴ C _A C _E [J m ⁻²]	H = 2,7 · 10 ⁻⁴ · t ^{0,75} C _A C _E [J m ⁻²]	H = 5 · 10 ⁻³ C _A C _E [J m ⁻²]		H = 18 · t ^{0,75} C _A C _E [J m ⁻²]			
	1 050 - 1 400		H = 1,5 · 10 ⁻³ C _C C _E [J m ⁻²]	H = 2,7 · 10 ⁻³ · t ^{0,75} C _C C _E [J m ⁻²]	H = 5 · 10 ⁻² C _C C _E [J m ⁻²]			H = 90 · t ^{0,75} C _C C _E [J m ⁻²]		
IRB e IRC	1 400 - 1 500	Cfr. nota ^b	E = 10 ¹² [W m ⁻²]		Cfr. nota ^c		H = 10 ³ [J m ⁻²]		H = 5,6 · 10 ³ · t ^{0,25} [J m ⁻²]	
	1 500 - 1 800		E = 10 ¹³ [W m ⁻²]		Cfr. nota ^c		H = 10 ⁴ [J m ⁻²]			
	1 800 - 2 600		E = 10 ¹² [W m ⁻²]		Cfr. nota ^c		H = 10 ³ [J m ⁻²]		H = 5,6 · 10 ³ · t ^{0,25} [J m ⁻²]	
	2 600 - 10 ⁶		E = 10 ¹¹ [W m ⁻²]		Cfr. nota ^c		H = 100 [J m ⁻²]	H = 5,6 · 10 ³ · t ^{0,25} [J m ⁻²]		

Tabella 2.3

Valori limite di esposizione dell'occhio a radiazioni laser — Durata di esposizione lunga ≥ 10 s

Lunghezza d'onda ^a [nm]		Apertura	Durata [s]		
			$10^1 - 10^2$	$10^2 - 10^4$	$10^4 - 3 \cdot 10^4$
UVC	180 - 280	3,5 mm	$H = 30 \text{ [J m}^{-2}\text{]}$		
UVB	280 - 302		$H = 40 \text{ [J m}^{-2}\text{]}$		
	303		$H = 60 \text{ [J m}^{-2}\text{]}$		
	304		$H = 100 \text{ [J m}^{-2}\text{]}$		
	305		$H = 160 \text{ [J m}^{-2}\text{]}$		
	306		$H = 250 \text{ [J m}^{-2}\text{]}$		
	307		$H = 400 \text{ [J m}^{-2}\text{]}$		
	308		$H = 630 \text{ [J m}^{-2}\text{]}$		
	309		$H = 1,0 \cdot 10^3 \text{ [J m}^{-2}\text{]}$		
	310		$H = 1,6 \cdot 10^3 \text{ [J m}^{-2}\text{]}$		
	311		$H = 2,5 \cdot 10^3 \text{ [J m}^{-2}\text{]}$		
	312		$H = 4,0 \cdot 10^3 \text{ [J m}^{-2}\text{]}$		
	313		$H = 6,3 \cdot 10^3 \text{ [J m}^{-2}\text{]}$		
	314		$H = 10^4 \text{ [J m}^{-2}\text{]}$		
UVA	315 - 400		$H = 10^4 \text{ [J m}^{-2}\text{]}$		
Visibile 400 - 700	400 - 600 Danno fotochimico ^b Danno alla retina	7 mm	$H = 100 C_R \text{ [J m}^{-2}\text{]}$ ($\gamma = 11 \text{ mrad}$) ^d	$E = 1 C_B \text{ [W m}^{-2}\text{]}; (\gamma = 1,1 \text{ t}^{0,5} \text{ mrad})^d$	$E = 1 C_B \text{ [W m}^{-2}\text{]}$ ($\gamma = 110 \text{ mrad}$) ^d
	400 - 700 Danno termico ^b Danno alla retina		se $\alpha < 1,5 \text{ mrad}$ se $\alpha > 1,5 \text{ mrad}$ e $t \leq T_2$ se $\alpha > 1,5 \text{ mrad}$ e $t > T_2$	allora $E = 10 \text{ [W m}^{-2}\text{]}$ allora $H = 18 C_t t^{0,75} \text{ [J m}^{-2}\text{]}$ allora $E = 18 C_E T_2^{-0,25} \text{ [W m}^{-2}\text{]}$	
IRA	700 - 1 400	7 mm	se $\alpha < 1,5 \text{ mrad}$ se $\alpha > 1,5 \text{ mrad}$ e $t \leq T_2$ se $\alpha > 1,5 \text{ mrad}$ e $t > T_2$	allora $E = 10 C_A C_C \text{ [W m}^{-2}\text{]}$ allora $H = 18 C_A C_C C_t t^{0,75} \text{ [J m}^{-2}\text{]}$ allora $E = 18 C_A C_C C_E T_2^{-0,25} \text{ [W m}^{-2}\text{]}$ (non superare $1\,000 \text{ W m}^{-2}$)	
IRB e IRC	$1\,400 - 10^4$	cfr. ^c	$E = 1\,000 \text{ [W m}^{-2}\text{]}$		

a Se la lunghezza d'onda o un'altra caratteristica del laser è coperto da due limiti, si applica il più restrittivo.

b Per sorgenti piccole che sottendono un angolo di $1,5 \text{ mrad}$ o inferiore, i doppi valori limiti nel visibile da 400 nm a 600 nm si riducono ai limiti per rischi termici per $10 \text{ s} \leq t < T_1$ e ai limiti per rischi fotochimici per periodi superiori. Per T_1 e T_2 cfr. tabella 2.5. Il limite di rischio fotochimico per la retina può anche essere espresso come radianza integrata nel tempo $G = 10^6 C_R \text{ [J m}^{-2} \text{sr}^{-1}\text{]}$ per $t > 10 \text{ s}$ fino a $t = 10\,000 \text{ s}$ e $L = 100 C_R \text{ [W m}^{-2} \text{sr}^{-1}\text{]}$ per $t > 10\,000 \text{ s}$. Per la misurazione di G e L , γ_m deve essere usato come campo di vista medio. Il confine ufficiale tra visibile e infrarosso è 780 nm come stabilito dalla CIE. La colonna con le denominazioni della lunghezza d'onda ha il solo scopo di fornire un inquadramento migliore all'utente. (Il simbolo G è usato dal CEN; il simbolo L_v dalla CIE, il simbolo L_{η} dall'IEC e dal CENELEC).

c Per lunghezza d'onda $1\,400 - 10^4 \text{ nm}$: apertura diametro = $3,5 \text{ mm}$; per lunghezza d'onda $10^3 - 10^6 \text{ nm}$: apertura diametro = 11 mm .

d Per la misurazione del valore di esposizione γ è così definita: se α (angolo sotteso da una sorgente) $> \gamma$ (angolo del cono di limitazione, indicato tra parentesi nella colonna corrispondente) allora il campo di vista di misurazione di γ_m dovrebbe essere il valore dato di γ (se si utilizza un valore superiore del campo di vista il rischio risulta sovrastimato).
Se $\alpha < \gamma$ il valore del campo di vista di misurazione γ_m deve essere sufficientemente grande da includere completamente la sorgente, altrimenti non è limitato e può essere superiore a γ .

Tabella 2.4

Valori limite di esposizione della cute a radiazioni laser

Lunghezza d'onda ^a [nm]		Apertura	Durata [s]					
			$< 10^{-9}$	$10^{-9} - 10^{-2}$	$10^{-2} - 10^{-3}$	$10^{-3} - 10^1$	$10^1 - 10^3$	$10^3 - 3 \cdot 10^4$
UV (A, B, C)	180 - 400	3,5mm	$E = 3 \cdot 10^{10} \text{ [Wm}^{-2}\text{]}$					
Visibile ^c IRA	400 - 700	3,5mm	$E = 2 \cdot 10^{11} \text{ [Wm}^{-2}\text{]}$					
	700 - 1 400		$E = 2 \cdot 10^{11} C_A \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2}\text{]}$					
IRB ^c IRC	1 400 - 1 500		$H = 200 C_A$ $[\text{J m}^{-2}]$		$H = 1,1 \cdot 10^4 C_A t^{0,25} \text{ [J m}^{-2}\text{]}$		$E = 2 \cdot 10^3 C_A \text{ [W m}^{-2}\text{]}$	
	1 500 - 1 800							
	1 800 - 2 600							
	2 600 - 10 ⁶		$E = 10^{12} \text{ [Wm}^{-2}\text{]}$					
			Come i limiti di esposizione per l'occhio					

a Se la lunghezza d'onda o un'altra condizione del laser è coperta da due limiti, si applica il più restrittivo.

Tabella 2.5

Fattori di correzione applicati e altri parametri di calcolo

Parametri elencati da ICNIRP	Regione spettrale valida (nm)	Valore o descrizione
C_A	$\lambda < 700$	$C_A = 1,0$
	700 — 1 050	$C_A = 10^{0,002(\lambda - 700)}$
	1 050 — 1 400	$C_A = 5,0$
C_B	400 — 450	$C_B = 1,0$
	450 — 700	$C_B = 10^{0,02(\lambda - 450)}$
C_C	700 — 1 150	$C_C = 1,0$
	1 150 — 1 200	$C_C = 10^{0,018(\lambda - 1 150)}$
	1 200 — 1 400	$C_C = 8,0$
T_1	$\lambda < 450$	$T_1 = 10 \text{ s}$
	450 — 500	$T_1 = 10 \cdot [10^{0,02(\lambda - 450)}] \text{ s}$
	$\lambda > 500$	$T_1 = 100 \text{ s}$
Parametri elencati da ICNIRP	Valido per effetto biologico	Valore o descrizione
α_{\min}	tutti gli effetti termici	$\alpha_{\min} = 1,5 \text{ mrad}$
Parametri elencati da ICNIRP	Intervallo angolare valido (mrad)	Valore o descrizione
C_E	$\alpha < \alpha_{\min}$	$C_E = 1,0$
	$\alpha_{\min} < \alpha < 100$	$C_E = \alpha / \alpha_{\min}$
	$\alpha > 100$	$C_E = \alpha^2 / (\alpha_{\min} \cdot \alpha_{\max}) \text{ mrad con } \alpha_{\max} = 100 \text{ mrad}$
T_2	$\alpha < 1,5$	$T_2 = 10 \text{ s}$
	$1,5 < \alpha < 100$	$T_2 = 10 \cdot [10^{(\alpha - 1,5) / 98,5}] \text{ s}$
	$\alpha > 100$	$T_2 = 100 \text{ s}$

Parametri elencati da ICNIRP	Intervallo temporale valido per l'esposizione (s)	Valore o descrizione
γ	$t \leq 100$	$\gamma = 11$ [mrad]
	$100 < t < 10^4$	$\gamma = 1,1 t^{0,5}$ [mrad]
	$t > 10^4$	$\gamma = 110$ [mrad]

Tabella 2.6

Correzione per esposizioni ripetute

Per tutte le esposizioni ripetute, derivanti da sistemi laser a impulsi ripetitivi o a scansione, dovrebbero essere applicate le tre norme generali seguenti:

1. L'esposizione derivante da un singolo impulso di un treno di impulsi non supera il valore limite di esposizione per un singolo impulso della durata di quell'impulso.
2. L'esposizione derivante da qualsiasi gruppo di impulsi (o sottogruppi di un treno di impulsi) che si verifichi in un tempo t non supera il valore limite di esposizione per il tempo t .
3. L'esposizione derivante da un singolo impulso in un gruppo di impulsi non supera il valore limite di esposizione del singolo impulso moltiplicato per un fattore di correzione termica cumulativa $C_p = N^{-0,25}$, dove N è il numero di impulsi. Questa norma si applica soltanto a limiti di esposizione per la protezione da lesione termica, laddove tutti gli impulsi che si verificano in meno di T_{min} sono trattati come singoli impulsi.

Parametri	Regione spettrale valida (nm)	Valore o descrizione
T_{min}	$315 < \lambda \leq 400$	$T_{min} = 10^{-9}$ s (= 1 ns)
	$400 < \lambda \leq 1\,050$	$T_{min} = 18 \cdot 10^{-6}$ s (= 18 μ s)
	$1\,050 < \lambda \leq 1\,400$	$T_{min} = 50 \cdot 10^{-6}$ s (= 50 μ s)
	$1\,400 < \lambda \leq 1\,500$	$T_{min} = 10^{-3}$ s (= 1 ms)
	$1\,500 < \lambda \leq 1\,800$	$T_{min} = 10$ s
	$1\,800 < \lambda \leq 2\,600$	$T_{min} = 10^{-3}$ s (= 1 ms)
	$2\,600 < \lambda \leq 10^6$	$T_{min} = 10^{-7}$ s (= 100 ns)

