

Portale Nazionale per la Protezione dagli Agenti Fisici nei luoghi di lavoro

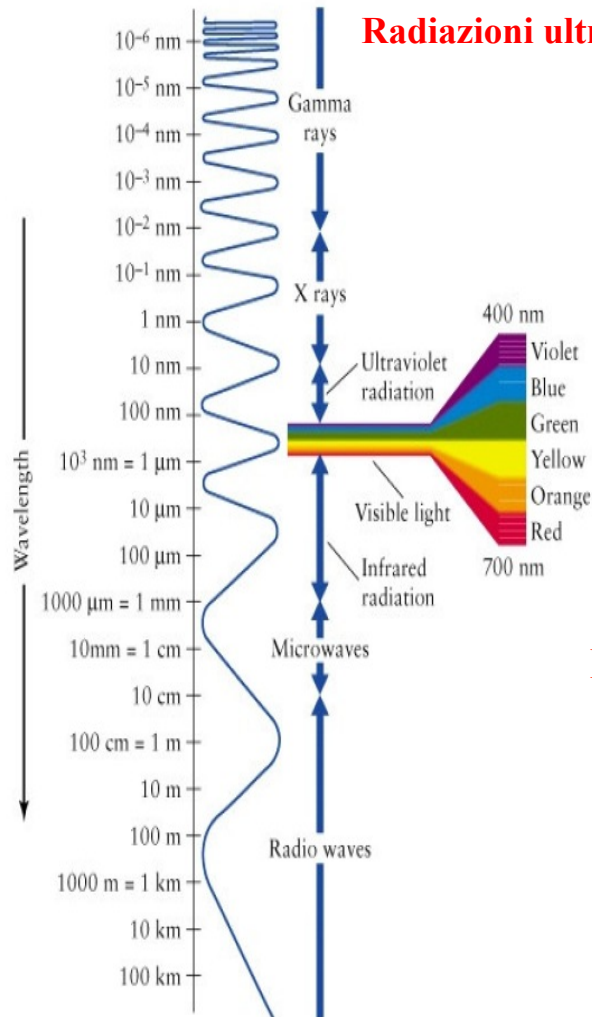


Radiazioni Ottiche Artificiali (ROA) Concetti Generali e Limiti di Esposizione

MODENA
7 MARZO 2012

La definizione di “Radiazione Ottica”

Sotto la denominazione di “**Radiazioni Ottiche**” si raggruppano quelle radiazioni elettromagnetiche che si possono controllare mediante: lenti, specchi, prismi e fibre ottiche ovvero le radiazioni di lunghezza d’onda compresa tra **100 nm e 1mm** così suddivise:



Radiazioni ultraviolette: 100 - 400 nm

UVA: 315 - 400 nm

UVB: 280 - 315 nm

UVC: 100 - 280 nm

Radiazioni visibile: 380 - 780 nm

Radiazioni infrarosse: 780 nm e 1 mm

IRA: 780 - 1400 nm

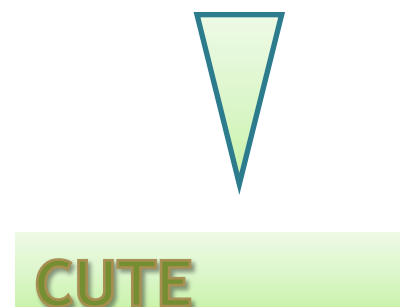
IRB: 1400 - 3000 nm

IRC: 3000 - 1 mm

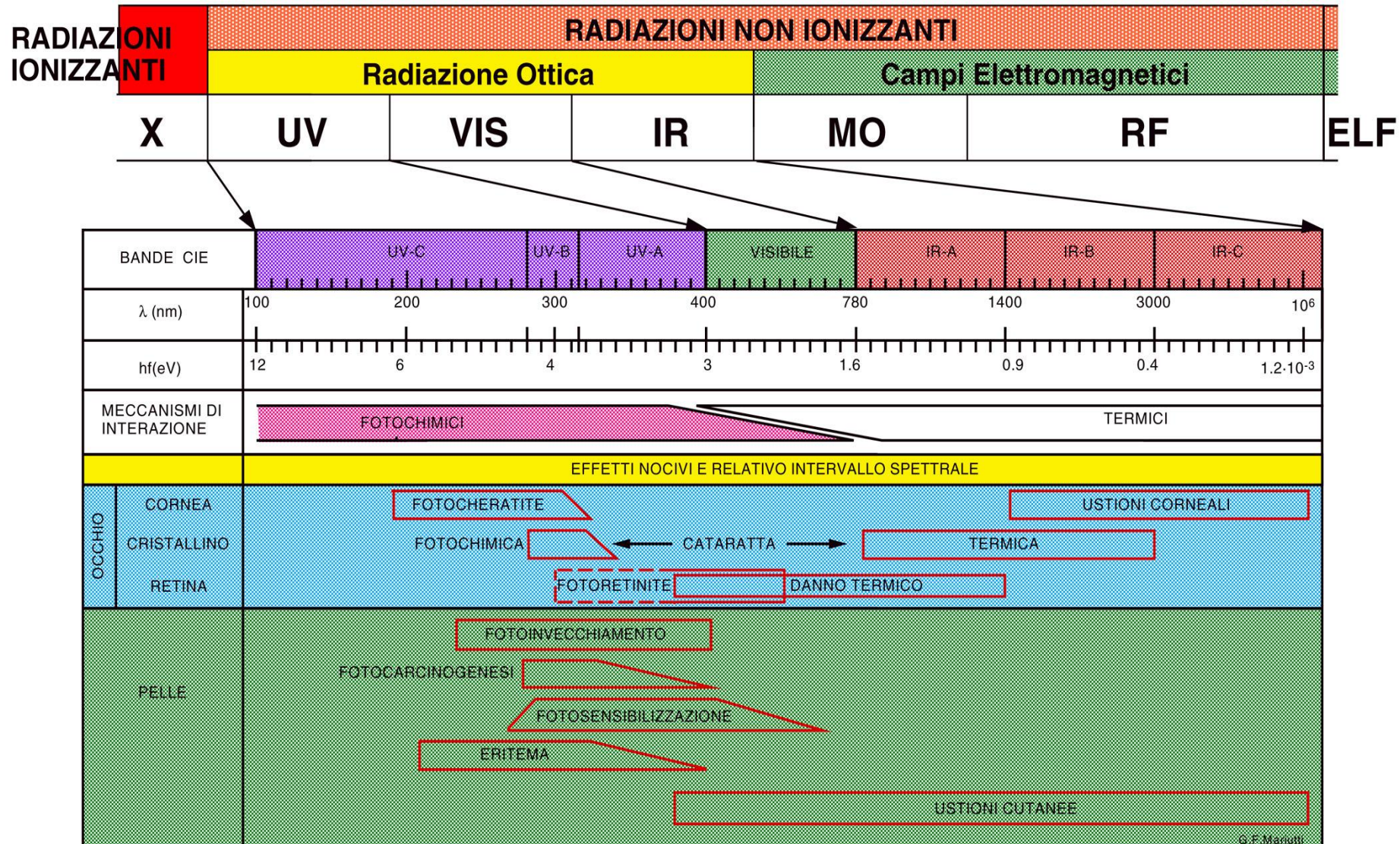
Le Radiazioni Ottiche, come tutte le onde elettromagnetiche, interagendo con un un “corpo” materiale possono essere **assorbite, riflesse o diffuse**

La quota di radiazione **assorbita** sarà quella che concorrerà a determinare gli effetti biologici.

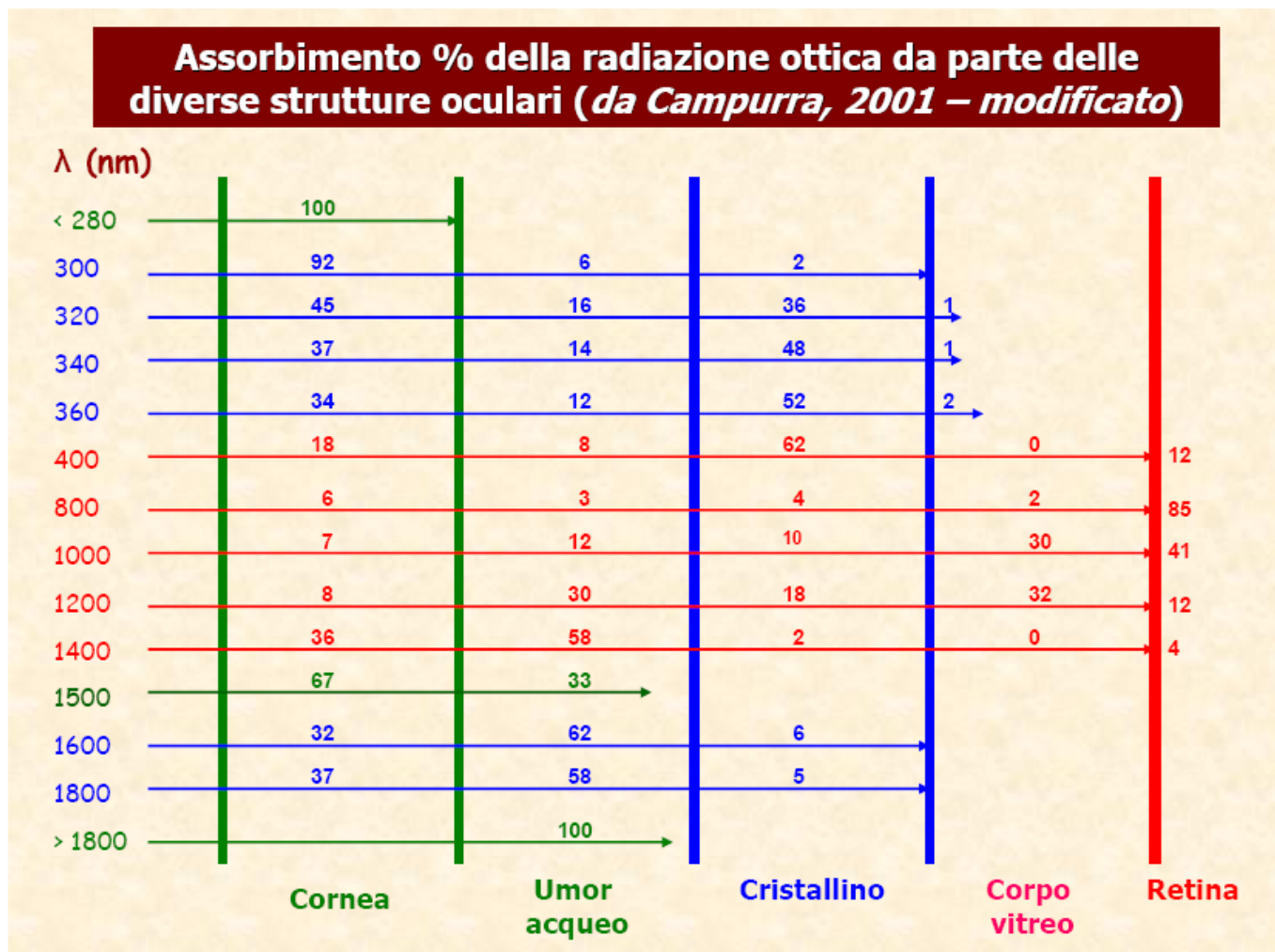
La Radiazione Ottica ha una limitata capacità di penetrazione, ne segue che gli effetti di tale interazione avverranno solo a carico degli **organi più esterni**



Effetti sanitari delle radiazioni elettromagnetiche



Localizzazione dell'interazione delle radiazioni con i tessuti: l'occhio



Dia tratta da: C. GRANDI - ISPESL

Localizzazione dell'interazione delle radiazioni con i tessuti: l'occhio

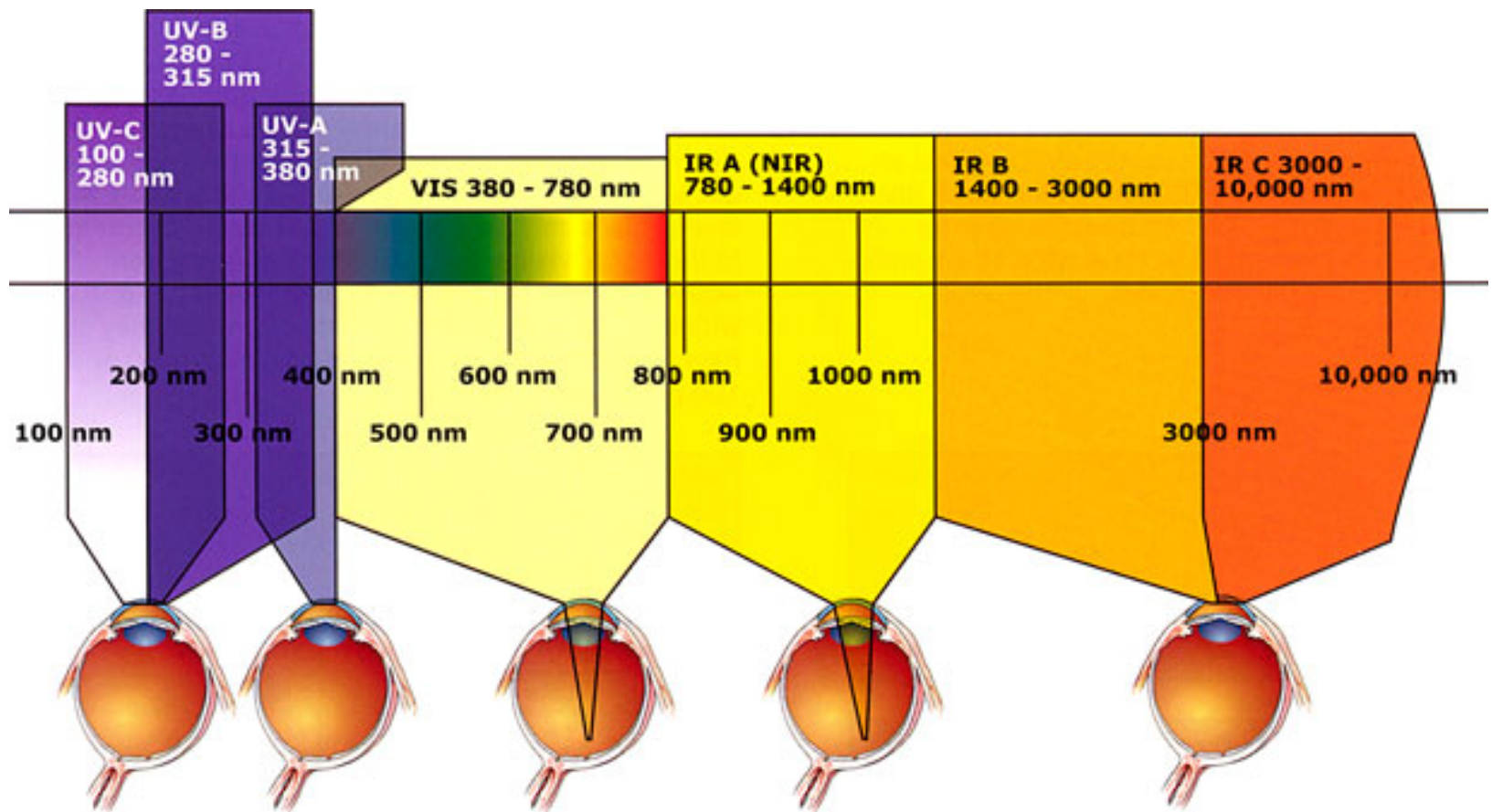
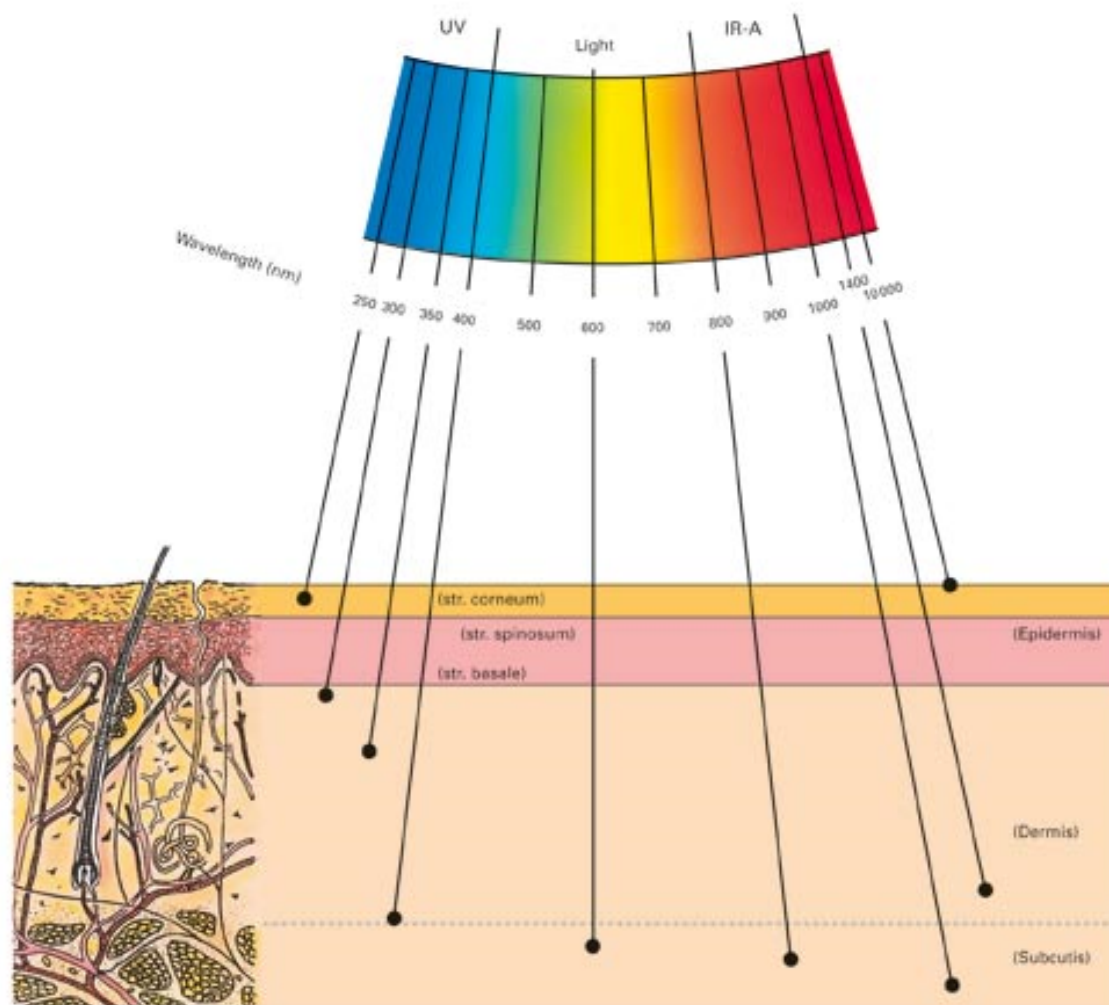


Figure 9. The above table shows the depth of penetration of electromagnetic radiation in the human eye.

Localizzazione dell'interazione delle radiazioni con i tessuti: la cute



a)
$$H_{eff} = \int_0^t \int_{\lambda=180\text{ nm}}^{\lambda=400\text{ nm}} E_{\lambda}(\lambda, t) \cdot S(\lambda) \cdot d\lambda \cdot dt$$
 (H_{eff} è pertinente solo nell'intervallo da 180 a 400 nm)

b)
$$H_{UVA} = \int_0^t \int_{\lambda=315\text{ nm}}^{\lambda=400\text{ nm}} E_{\lambda}(\lambda, t) \cdot d\lambda \cdot dt$$
 (H_{UVA} è pertinente solo nell'intervallo da 315 a 400 nm)

c), d)
$$L_B = \int_{\lambda=300\text{ nm}}^{\lambda=700\text{ nm}} L_{\lambda}(\lambda) \cdot B(\lambda) \cdot d\lambda$$
 (L_B è pertinente solo nell'intervallo da 300 a 700 nm)

e), f)
$$E_B = \int_{\lambda=300\text{ nm}}^{\lambda=700\text{ nm}} E_{\lambda}(\lambda) \cdot B(\lambda) \cdot d\lambda$$
 (E_B è pertinente solo nell'intervallo da 300 a 700 nm)

g)-l)
$$L_R = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda}(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot d\lambda$$
 (fr. tabella 1.1 per i valori appropriati di λ_1 e λ_2)

m), n)
$$E_{IR} = \int_{\lambda=780\text{ nm}}^{\lambda=3000\text{ nm}} E_{\lambda}(\lambda) \cdot d\lambda$$
 (E_{IR} è pertinente solo nell'intervallo da 780 a 3 000 nm)

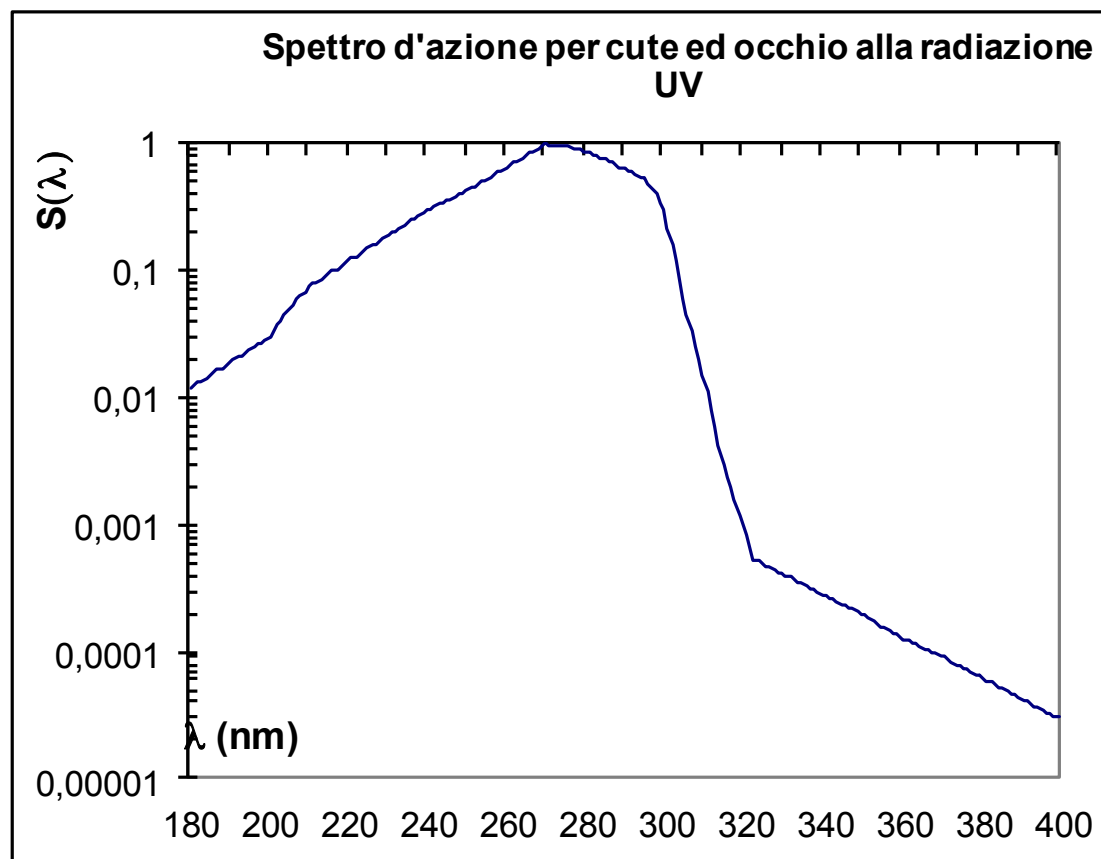
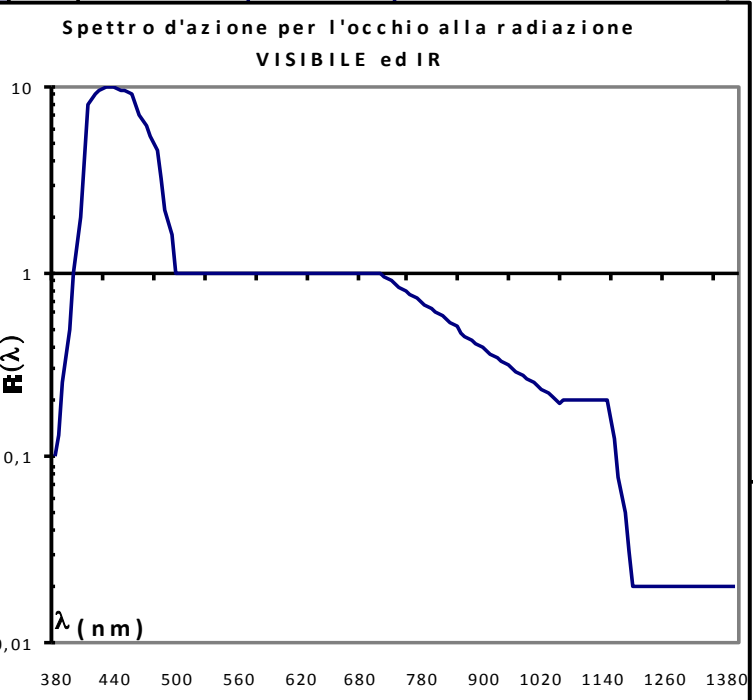
o)
$$H_{skin} = \int_0^t \int_{\lambda=380\text{ nm}}^{\lambda=3000\text{ nm}} E_{\lambda}(\lambda, t) \cdot d\lambda \cdot dt$$
 (H_{skin} è pertinente solo nell'intervallo da 380 a 3 000 nm)



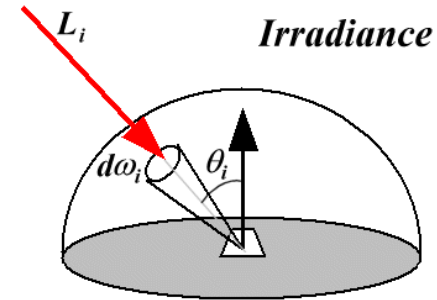
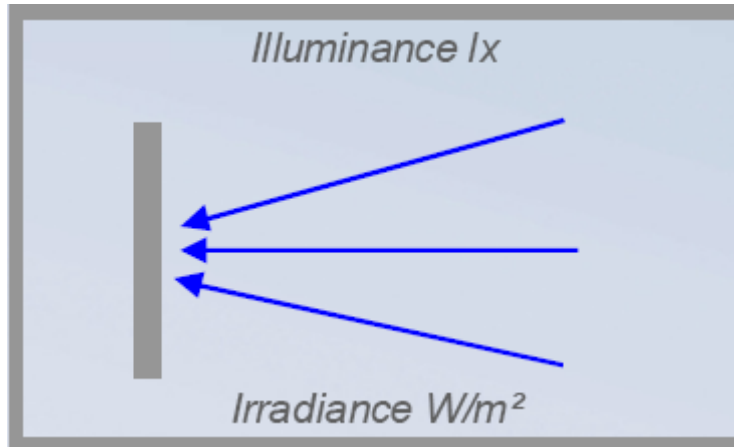
Lo spettro d'azione, la ponderazione spettrale e le grandezze efficaci

Lo **spettro d'azione** è una funzione complessa che correla l'efficacia relativa di una data radiazione nell'indurre uno specifico effetto biologico, alla lunghezza d'onda [adimensionale],

La **ponderazione spettrale**, ovvero la convoluzione dello spettro delle radianze (o delle irradianze) con lo spettro d'azione, **determina le corrispondenti grandezze efficaci**



Grandezze radiometriche di riferimento nella valutazione dei rischi ROA

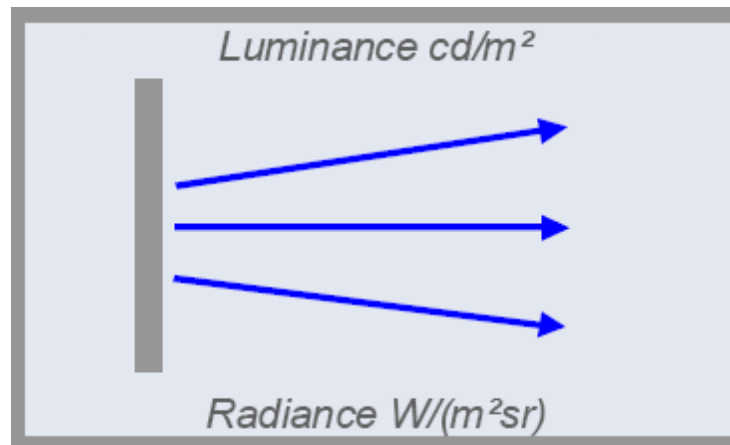
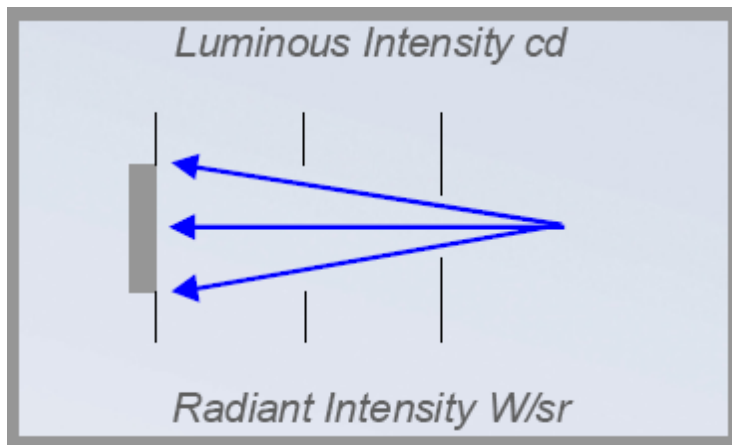


$$E_i = \int_{\Omega_i} L_i \cos \theta_i d\omega_i$$

- ▶ **«irradianza» (E)** o «densità di potenza»: la potenza radiante incidente per unità di area su una superficie espressa in watt su metro quadrato ($W m^{-2}$) (*)
- ▶ **«esposizione radiante» (H)**: integrale nel tempo dell'irradianza espresso in joule su metro quadrato ($J m^{-2}$) (*)

(*) la convoluzione dello spettro dell'irradianza o della radianza (ponderazione spettrale), con lo spettro d'azione (che tiene conto della dipendenza dell'effetto biologico provocato dalla radiazione sull'organo bersaglio dalla lunghezza d'onda) [adimensionale], determina le **corrispondenti grandezze efficaci**

Grandezze radiometriche di riferimento nella valutazione dei rischi ROA



«**radianza**» (**L**): il flusso radiante o la potenza per unità d'angolo solido per unità di superficie espressa in watt su metro quadrato su steradiano ($W m^{-2} sr^{-1}$) (*)

(*) la convoluzione dello spettro dell'Irradianza o della radianza (ponderazione spettrale), con lo spettro d'azione (che tiene conto della dipendenza dell'effetto biologico provocato dalla radiazione sull'organo bersaglio dalla lunghezza d'onda) [adimensionale], determina le **corrispondenti grandezze efficaci**

Quando i valori limite sono espressi in termini di IRRADIANZA? Quando invece in termini di RADIANZA?

La **radianza** è la grandezza attraverso cui si caratterizza l'esposizione della retina, pertanto verrà misurata per determinare il livello di esposizione delle radiazioni che possono essere focalizzate dal cristallino sulla retina, ovvero quelle di lunghezza d'onda compresa nell'intervallo spettrale VIS-IRA.

**UV
IRB e IRC**



**PELLE
CORNEA
CRISTALLINO**



IRRADIANZA

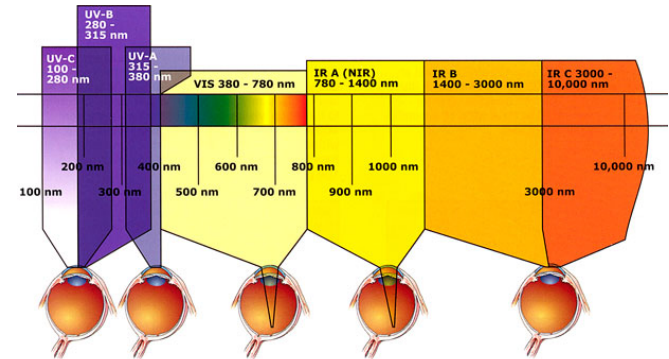


Figure 9. The above table shows the depth of penetration of electromagnetic radiation in the human eye.

VISIBILE e IRA

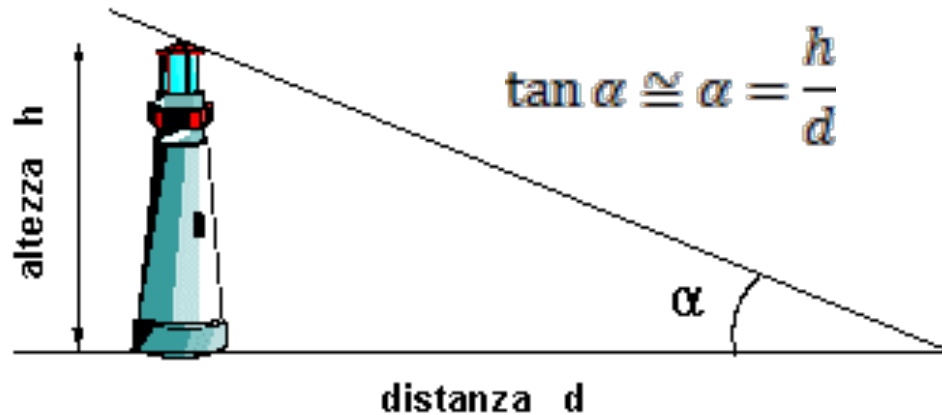


RETINA



RADIANZA

Sorgente puntiforme, sorgente estesa



$$\tan \alpha \cong \alpha = \frac{h}{d}$$

$$\alpha = \frac{h}{d} = 11 \text{ mrad}$$

Se $h=11 \text{ m}$ e $d=1.000 \text{ m}$



- 57.5 cm X 117.5 cm
- misure del diffusore

$Z = 87.5 \text{ cm}$

misura media del diffusore

$\alpha = Z/r$ ovvero

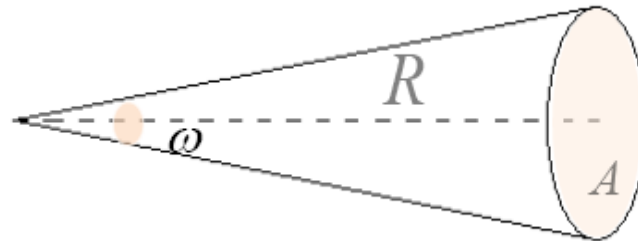
$\alpha = 87.5/100 = 0.875 \text{ rad}$

MISURARE

Da IRRADIANZA a RADIANZA

Il passaggio dalla misura di irradianza spettrale E , effettuata con lo strumento a una distanza R dalla sorgente di area A , alla radianza tiene conto dell'angolo solido ω con cui l'osservatore (la superficie sensibile dello strumento) vede la sorgente

$$E_{\lambda}(T) = \omega L_{\lambda}(T)$$



Grandezze radiometriche di riferimento nella valutazione dei rischi ROA

Note!

Caratterizzazione
della **SORGENTE**



Grandezze radiometriche
“**FISICHE**”



**Irradianza, esposizione
radiante, radianza**

Funzioni di superfici e angoli
esatti che caratterizzano la
misura

Caratterizzazione dell' **ESPOSIZIONE**



Grandezze radiometriche
“**biofisiche**”



Irradianza, esposizione radiante, radianza

Funzioni di superfici e angoli (ΦA stop, FOV)
definiti tenendo conto di **parametri**
fisiologici che caratterizzano l'esposizione
(tempo di esposizione e dimensioni della
sorgente)

a)
$$H_{\text{eff}} = \int_0^t \int_{\lambda=180 \text{ nm}}^{\lambda=400 \text{ nm}} E_{\lambda}(\lambda, t) \cdot S(\lambda) \cdot d\lambda \cdot dt$$
 (H_{eff} è pertinente solo nell'intervallo da 180 a 400 nm)

b)
$$H_{\text{UVA}} = \int_0^t \int_{\lambda=315 \text{ nm}}^{\lambda=400 \text{ nm}} E_{\lambda}(\lambda, t) \cdot d\lambda \cdot dt$$
 (H_{UVA} è pertinente solo nell'intervallo da 315 a 400 nm)

c), d)
$$L_{\text{B}} = \int_{\lambda=300 \text{ nm}}^{\lambda=700 \text{ nm}} L_{\lambda}(\lambda) \cdot B(\lambda) \cdot d\lambda$$
 (L_{B} è pertinente solo nell'intervallo da 300 a 700 nm)

e), f)
$$E_{\text{B}} = \int_{\lambda=300 \text{ nm}}^{\lambda=700 \text{ nm}} E_{\lambda}(\lambda) \cdot B(\lambda) \cdot d\lambda$$
 (E_{B} è pertinente solo nell'intervallo da 300 a 700 nm)

g)-l)
$$L_{\text{R}} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda}(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot d\lambda$$
 (Cfr. tabella 1.1 per i valori appropriati di λ_1 e λ_2)

m), n)
$$E_{\text{IR}} = \int_{\lambda=780 \text{ nm}}^{\lambda=3000 \text{ nm}} E_{\lambda}(\lambda) \cdot d\lambda$$
 (E_{IR} è pertinente solo nell'intervallo da 780 a 3 000 nm)

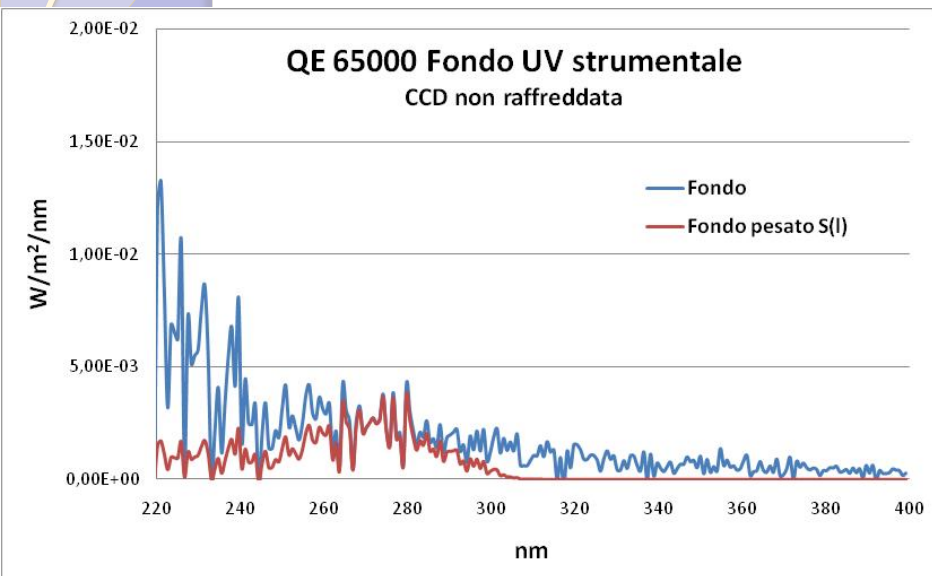
o)
$$H_{\text{skin}} = \int_0^t \int_{\lambda=380 \text{ nm}}^{\lambda=3000 \text{ nm}} E_{\lambda}(\lambda, t) \cdot d\lambda \cdot dt$$
 (H_{skin} è pertinente solo nell'intervallo da 380 a 3 000 nm)

I limiti per l'UV

Indice	Lunghezza d'onda nm	Valori limite di esposizione	Unità
a.	180-400 (UVA, UVB e UVC)	$H_{\text{eff}} = 30$ Valore giornaliero 8 ore	$[J \text{ m}^{-2}]$
$H_{\text{eff}} = \int_0^t \int_{\lambda = 180 \text{ nm}}^{\lambda = 400 \text{ nm}} E_{\lambda}(\lambda, t) \cdot S(\lambda) \cdot d\lambda \cdot dt$			IRRADIANZA
b.	315-400 (UVA)	$H_{\text{UVA}} = 10^4$ Valore giornaliero 8 ore	

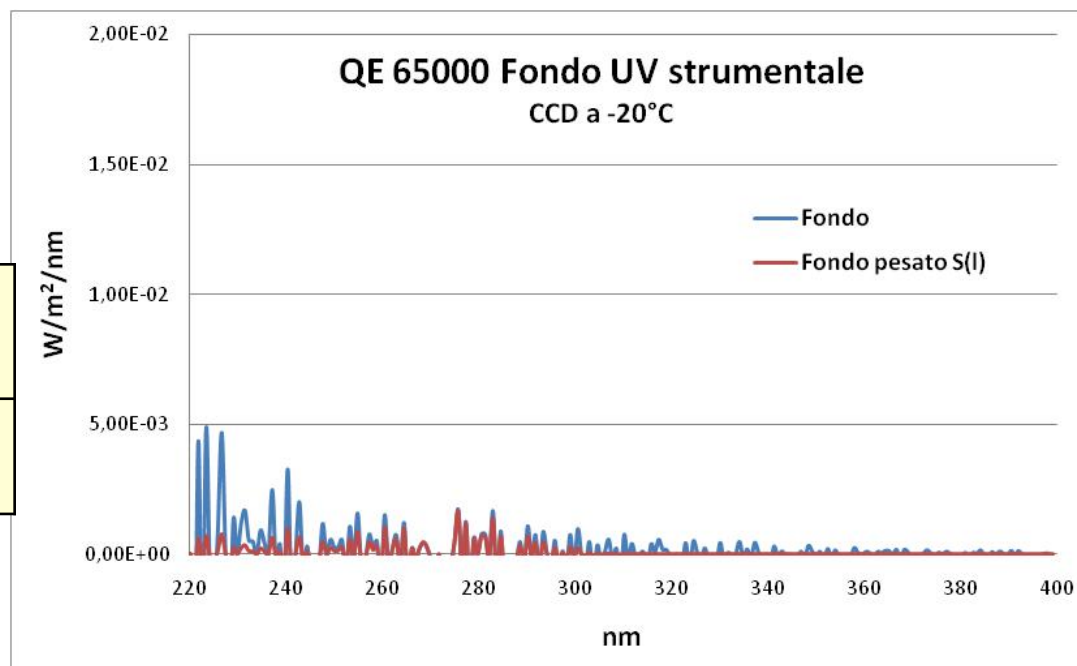
$$\begin{aligned}
 H_{\text{eff}} &= 30 \frac{J}{m^2} \\
 &= 0,5 \frac{W}{m^2} \cdot 60 \text{ s} \\
 &\cong 0,008 \frac{W}{m^2} \cdot 60 \text{ min} \\
 &\approx 0,001 \frac{W}{m^2} \cdot 8 \text{ h}
 \end{aligned}$$

La misura nell'UV



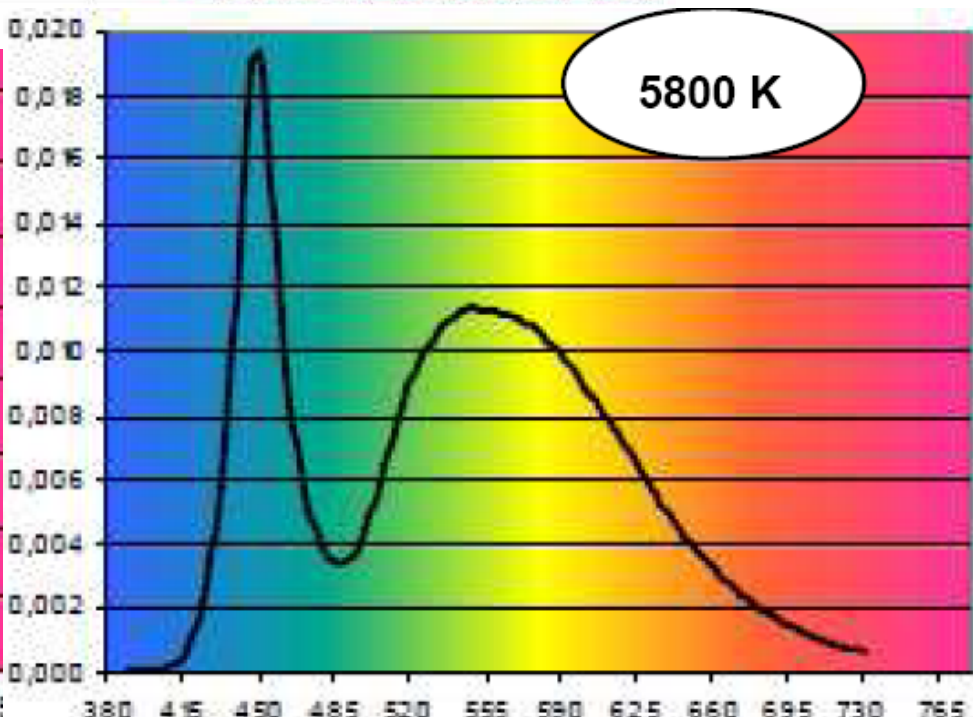
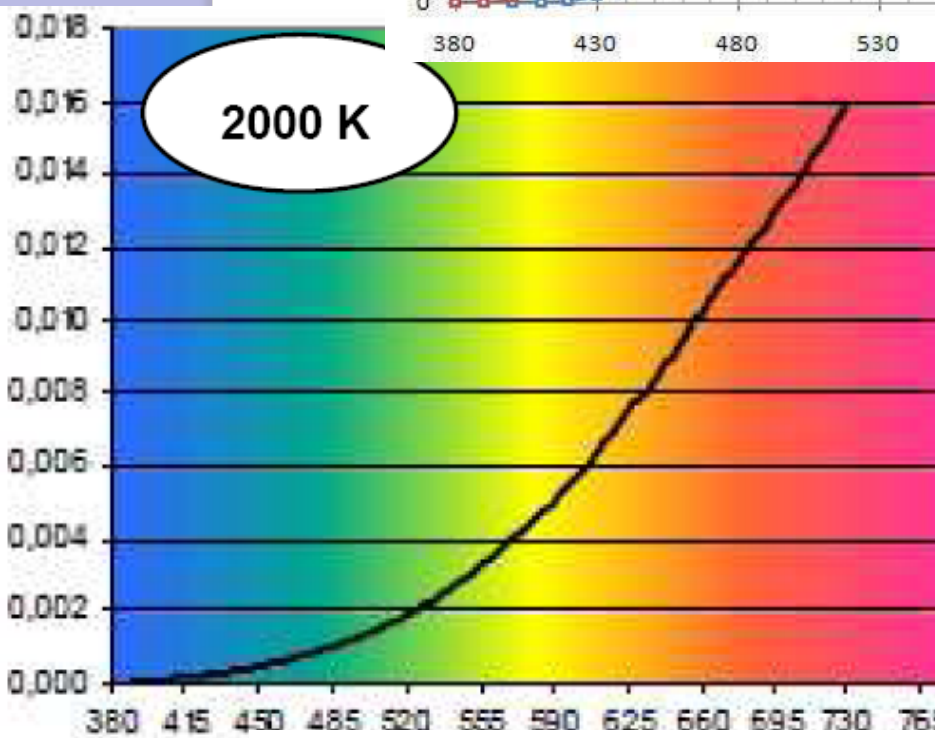
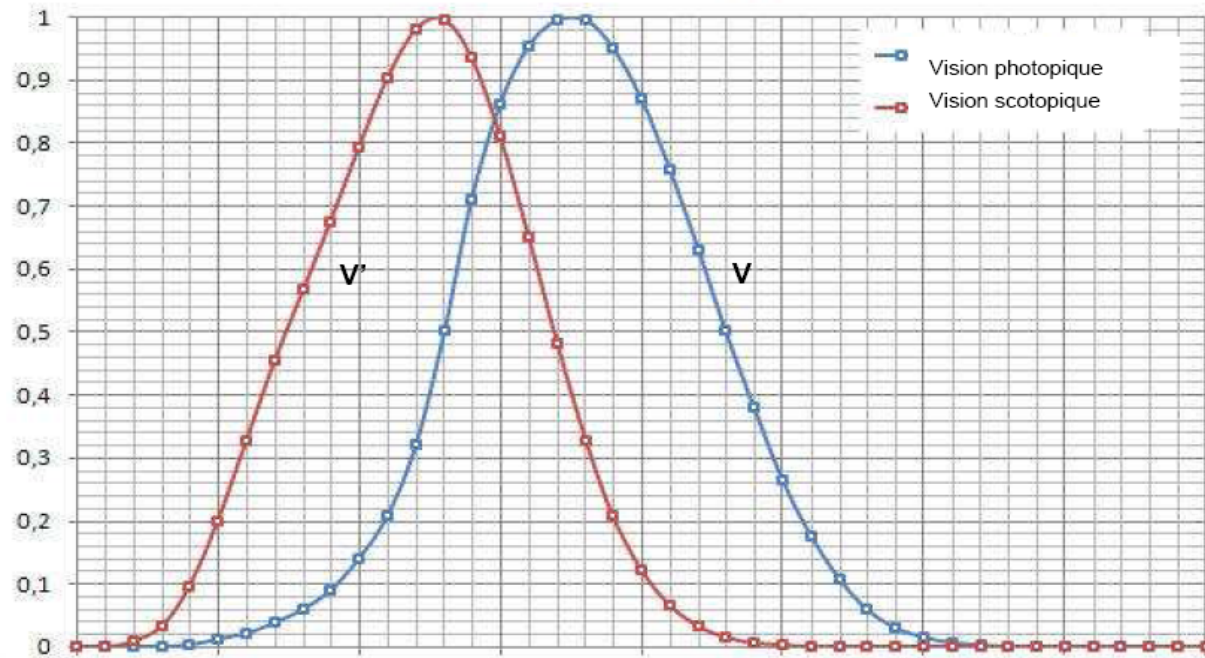
	E_{eff} [W m ⁻²]	t [s]	E_{UVA} [W m ⁻²]	t [s]
CCD senza Peltier	$1,15 \cdot 10^{-1}$	262	$5,0 \cdot 10^{-2}$	$2,0 \cdot 10^5$

	E_{eff} [W m ⁻²]	t [s]	E_{UVA} [W m ⁻²]	t [s]
CCD a -20°C	$4,20 \cdot 10^{-3}$	7170	$1,80 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^6$

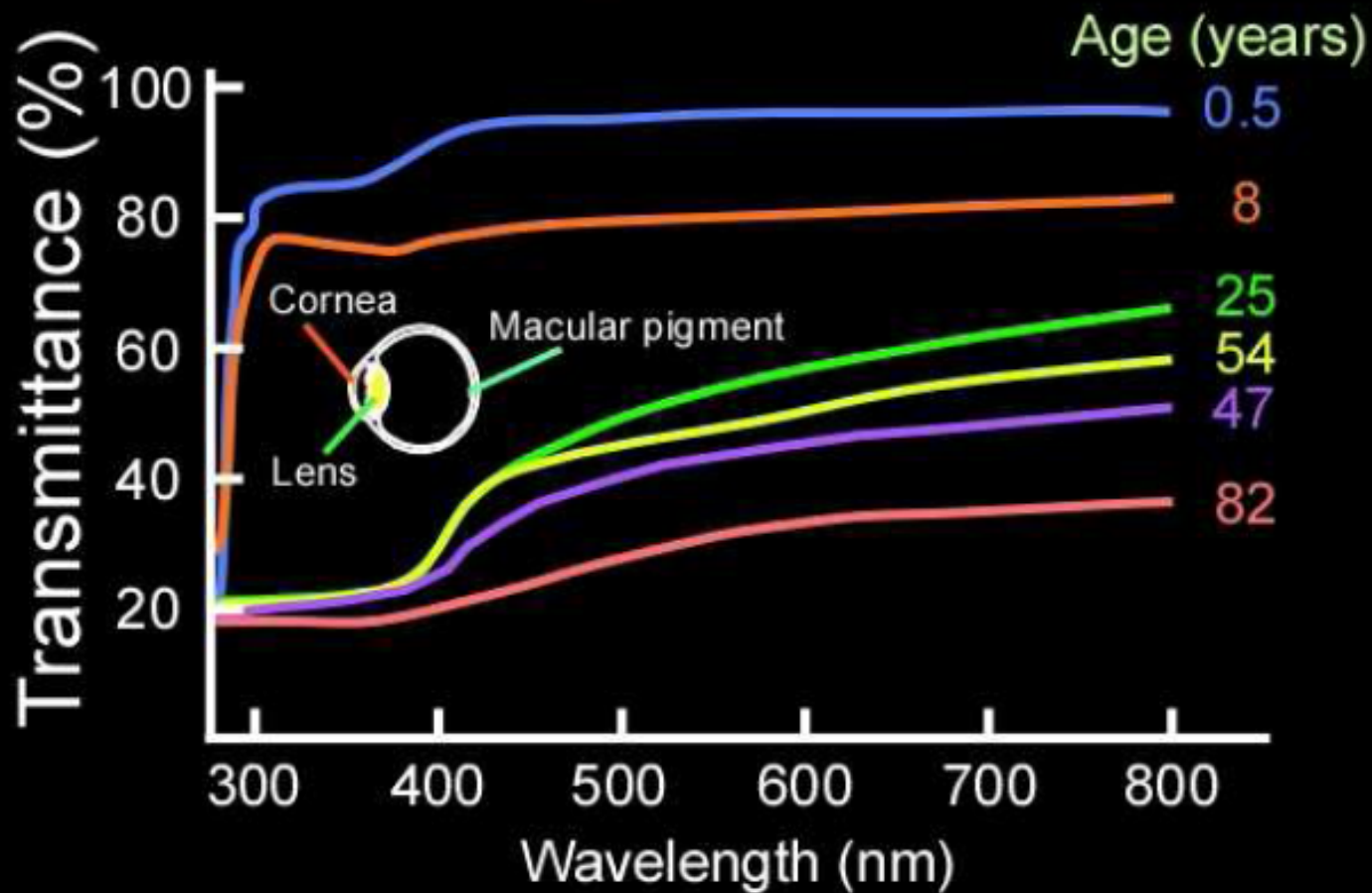


I limiti per il VISIBILE – Rischio fotochimico

c.	300-700 (Luce blu) Cfr. nota 1	$L_B = \frac{10^6}{t}$ per $t \leq 10\ 000\ s$	$L_B: [W\ m^{-2}\ sr^{-1}]$ $t: [secondi]$	per $\alpha \geq 11\ mrad$ RADIANZA
d.	300-700 (Luce blu) Cfr. nota 1	$L_B = 100$ per $t > 10\ 000\ s$	$[W\ m^{-2}\ sr^{-1}]$	
e.	300-700 (Luce blu) Cfr. nota 1	$E_B = \frac{100}{t}$ per $t \leq 10\ 000\ s$	$E_B: [W\ m^{-2}]$ $t: [secondi]$	per $\alpha < 11\ mrad$ Cfr. nota 2
f.	300-700 (Luce blu) Cfr. nota 1	$E_B = 0,01$ $t > 10\ 000\ s$	$[W\ m^{-2}]$	IRRADIANZA

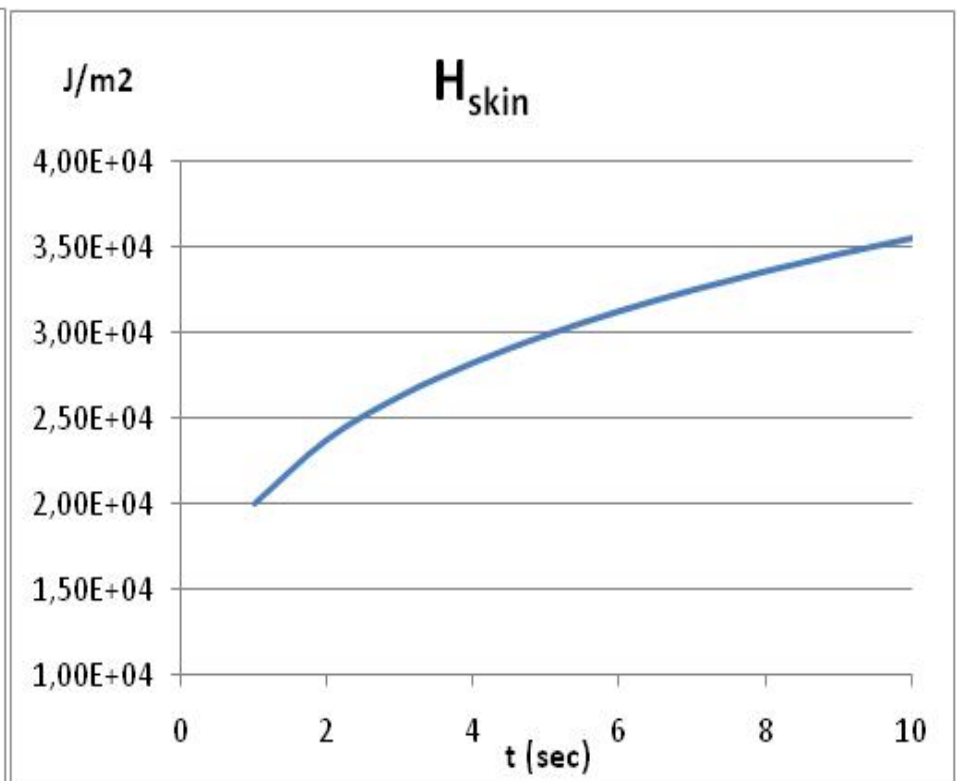
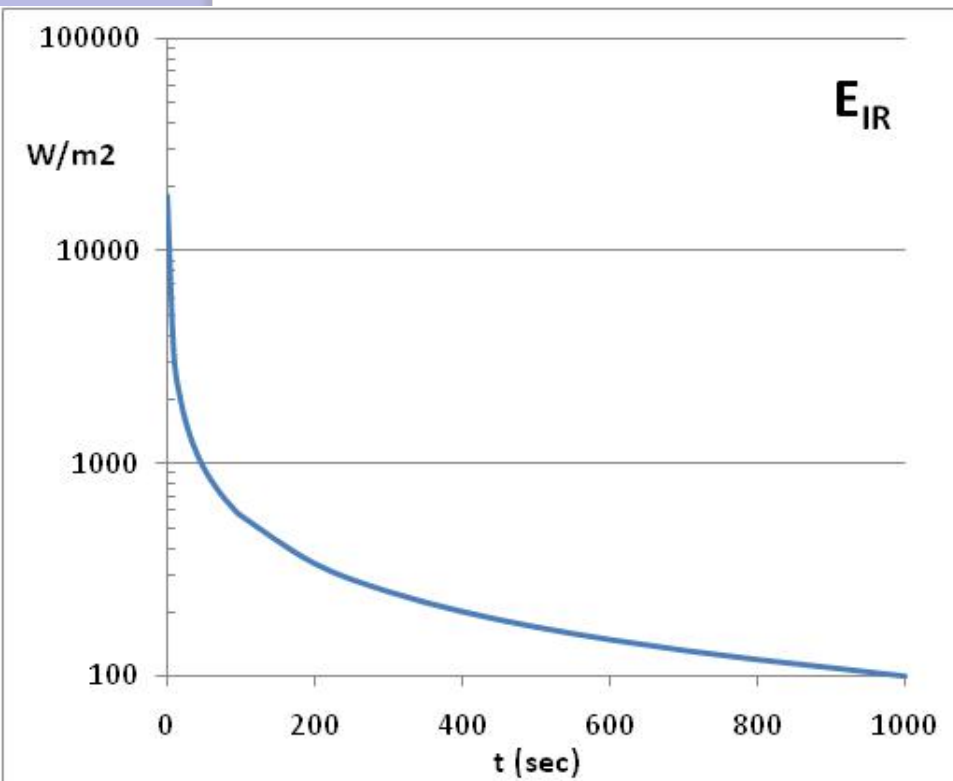


Absorption by Human Lenses



I limiti per l'INFRAROSSO

Indice	Lunghezza d'onda nm	Valori limite di esposizione	Unità	Commenti
n.	780-3 000 (IRA e IRB)	$E_{IR} = 18\ 000\ t^{-0,75}$ per $t \leq 1\ 000\ s$	E: [$W\ m^{-2}$] t: [secondi]	IRRADIANZA
l.	780-3 000 (IRAc e IRB)	$E_{IR} = 100$ per $t > 1\ 000\ s$	[$W\ m^{-2}$]	
o.	380-3 000 (Visibile, IRA e IRB)	$H_{skin} = 20\ 000\ t^{0,25}$ per $t < 10\ s$	H: [$J\ m^{-2}$] t: [secondi]	



La misura nell'INFRAROSSO



0,6 x 0,4 m

$T^{\circ} = 600^{\circ} \text{C}$

Distanza occhi 1,2 m

Distanza mano 0,2 m



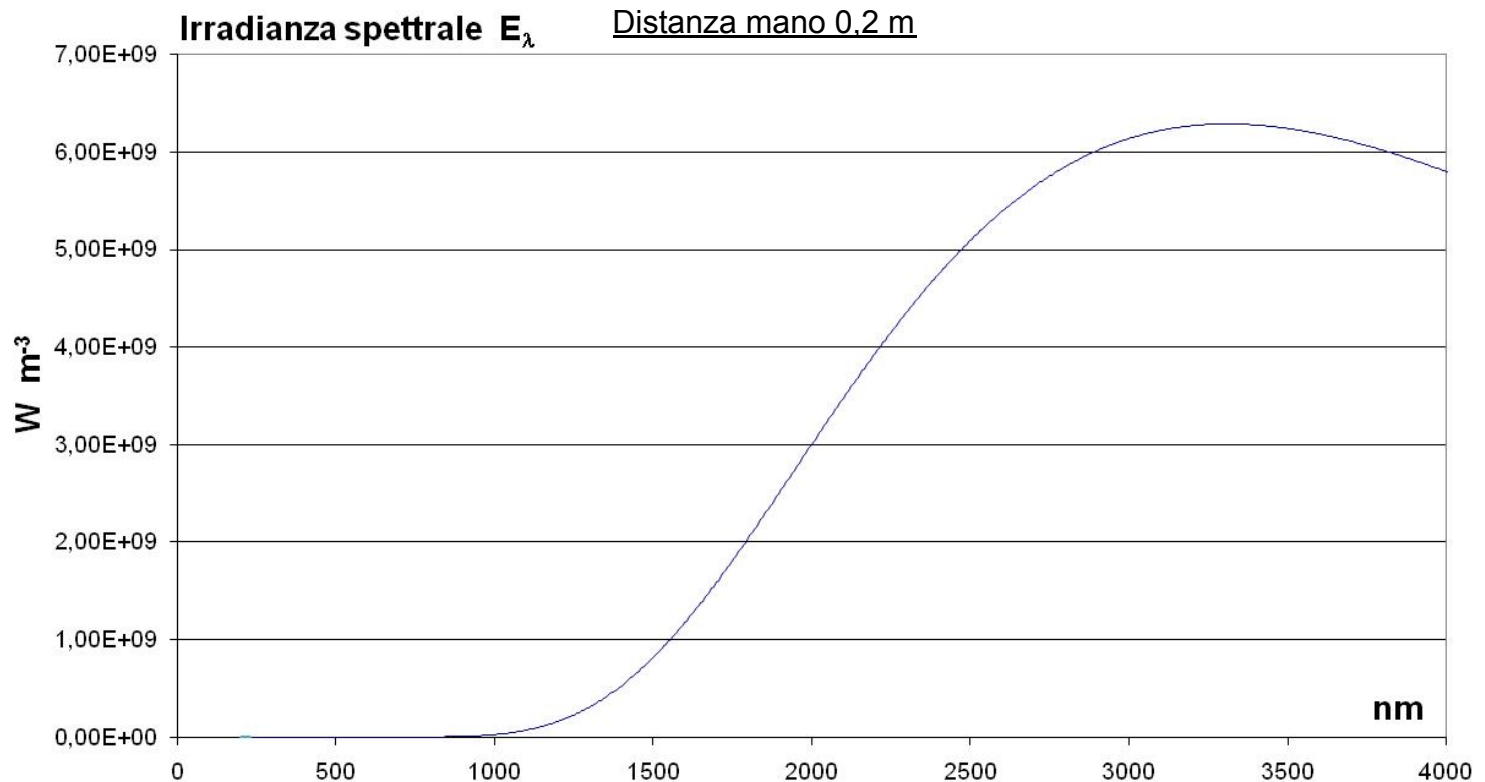
La misura nell'INFRAROSSO

$$E_{IR} = \sum_{780}^{3000} E_{\lambda} \cdot \Delta\lambda$$

$$E_{Peau} = \sum_{380}^{3000} E_{\lambda} \cdot \Delta\lambda$$



$$P_{\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{(hc/\lambda kt)} - 1)}$$



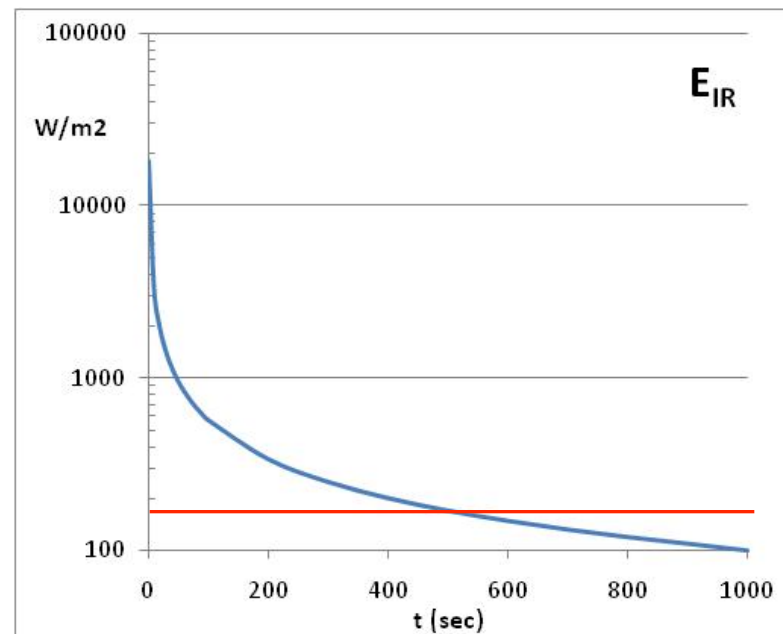
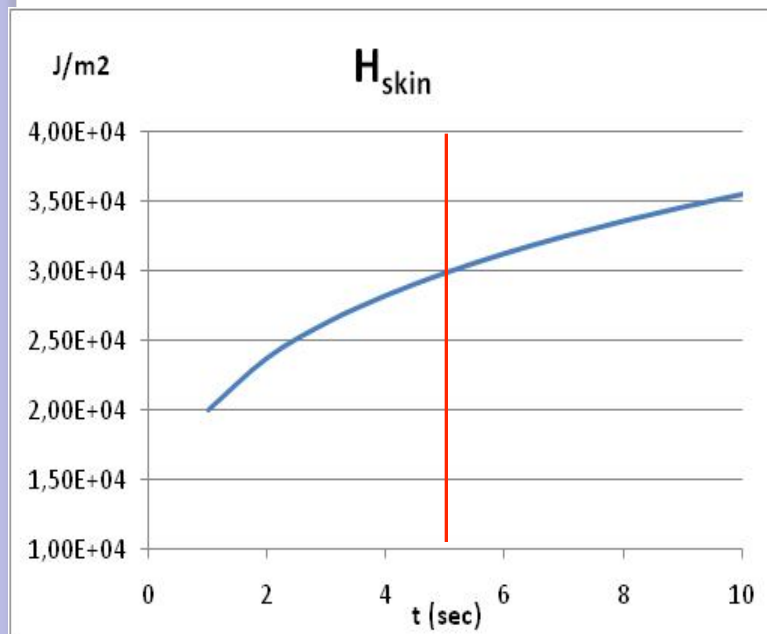
La misura nell'INFRAROSSO



Indice	Lunghezza d'onda nm	Valori limite di esposizione	Unità	Co
m.	780-3 000 (IRA e IRB)	$E_{IR} = 18\ 000\ t^{0,75}$ per $t \leq 1\ 000\ s$	E: [$W\ m^{-2}$] t: [secondi]	
n.	780-3 000 (IRAc e IRB)	$E_{IR} = 100$ per $t > 1\ 000\ s$	[$W\ m^{-2}$]	
o.	380-3 000 (Visibile, IRA e IRB)	$H_{skin} = 20\ 000\ t^{0,25}$ per $t < 10\ s$	H: [$J\ m^{-2}$] t: [secondi]	

L'irradianza calcolata alla distanza di 0,2 m (mano) supera il limite per H_{skin} in 5 secondi ($6.0\ kW/m^2 * 5\ sec = 3.0 \cdot 10^4\ J/m^2$)

L'irradianza calcolata alla distanza di 1,2 m ($170\ W/m^2$) supera il limite per E_{IR} in circa 10 minuti (550 s)



Sorgenti "sicure" (NBG-HPA)

A Non-Binding Guide to the Artificial Optical
Radiation Directive 2006/25/EC

Radiation Protection Division, Health Protection Agency



Sorgenti "sicure" (NBG-HPA)

- PC o analoghi dotati di schermo e palmari (Personal Digital Assistant)
- Lavagne luminose, Fotocopiatrici
- Flash fotografici
- Trappole UVA per insetti
- Apparecchi di illuminazione a soffitto con lampade a fluorescenza protette da schermi diffusori
- Apparecchi di illuminazione con lampade a fluorescenza compatte
- Illuminazione fluorescente compatta
- Apparecchi di illuminazione con faretto alogeni
- Lampade d'illum. al tungsteno (comprese quelle a spettro di luce diurna)
- Apparecchi di illuminazione a soffitto con lampade a incandescenza
- Indicatori LED
- Lampade indicatrici dei veicoli (frecce, freno, retromarcia, fendinebbia)
- Illuminazione stradale
- Riscaldatori a pannelli radianti a combustione di gas

Sorgenti "sicure" in determinate condizioni (NBG-HPA)

Sorgenti	Circostanze per un utilizzo sicuro
Lampade fluorescenti a soffitto senza diffusori sopra le lampade	Sicure ai normali livelli di illuminamento di lavoro (≤ 600 lux)
Illuminaz. di sicurezza a ioduri metallici o a Hg ad alta pressione	Sicura se il vetro ricoprente è intatto e se non in linea con lo sguardo
Lampade a luce nera UVA a bassa pressione	Sicure se non in linea con lo sguardo
Videoproiettori da tavolo	Sicuri se non si guarda il fascio
Fari dei veicoli	Sicuri ad eccezione di prolungata osservazione del fascio
Ogni dispositivo classificato "Esente" (EN 62471)	Sicuro, se non in linea con lo sguardo. Potrebbe essere pericoloso se si rimuovono le protezioni
Ogni dispositivo laser di "classe 1" (EN 60825-1)	Sicuri se la copertura è intatta. Potrebbe essere pericoloso se si rimuovono le protezioni

L.A.S.E.R.

sorgente di luce coerente

- **Ligh**
- **Amplification**
- **by**
- **Stimulated**
- **Emission**
- **of**
- **Radiation**



LASER “Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation”

Definizione:

- Ogni dispositivo che produce o amplifica una radiazione elettromagnetica coerente compresa nell'intervallo λ : 180 nm – 1×10^6 nm (1 mm) con il fenomeno dell'emissione stimolata (norma CEI EN 60825-1 par.3,40)

CARATTERISTICHE DELLA RADIAZIONE LASER

Monocromaticità: i fotoni sono emessi con la stessa λ o ν ; ciò permette di trasportare info nelle fibre ottiche e a grandi distanze

Unidirezionalità: il fascio di luce laser diverge molto poco e si muove in linea retta; si può quindi direzionarlo con elevata precisione (piccolo angolo solido sotteso dal laser)

Coerenza (spaziale e temporale): le onde e.m. viaggiano in fase nella stessa direzione e la fase si mantiene nel tempo e nello spazio; ciò permette alta efficienza nel processo di amplificazione: strumenti per misure di distanze, spostamenti e velocità molto piccoli (nm)

Brillanza=luminosità: concentrazione di elevata potenza (Watt o J/s) emessa per unità di superficie e unità di angolo solido (radianza $w/(m^2sr)$ (alto N° fotoni per unità di frequenza conseguenza della monocromaticità e direzionalità):

es.taglio, saldatura metalli/tessuti

MODALITA' DI EMISIONE DELLE SORGENTI caratteristiche

- **Continua** (cw emissione costante nel tempo; potenze da pochi mwatt a molte decine di watt)
- **Pulsata** (pw emissione variabile nel tempo; energia da pochi mj a molti mj per impulso potenze istantanee fino a diversi Mwatt):
 - Pulsata a impulsi ultracorti (mode locking $t \sim 10^{-9}s$)
 - Pulsata a impulsi giganti (Q-switched $10^{-9} \leq t \leq 10^{-7}s$)
- Potenze impiegate per emissione:
 - continua: da qualche watt a qualche decina di watt
 - pulsata: da qualche mj a qualche decina di mj

L.E.A.

LIMITE DI EMISSIONE ACCETTABILE

- parametro che descrive i livelli di radiazione emergente da un sistema laser la cui valutazione permette la collocazione dell'apparecchio in una data classe di rischio (CEI EN 60825-1:2009 - CEI 76-2)

Classi di LASER

Le classi di rischio si possono così riassumere:

Classe 1: sono intrinsecamente sicuri anche con strumenti ottici perché di bassa potenza

Classe 1M: sono sicuri nelle condizioni di funzionamento ragionevolmente prevedibili, ma **possono essere pericolosi se l'utilizzatore impiega ottiche all'interno del fascio** (*strumenti ottici: cannocchiale, microscopio*)

Classe 2: non sono intrinsecamente sicuri, ma la protezione dell'occhio è normalmente assicurata dal riflesso di ammiccamento. Bisogna evitare di guardare nel fascio.

Classe 2M: laser che emettono radiazione visibile ($400\text{nm} \leq \lambda \leq 700\text{nm}$) in cui la protezione dell'occhio è normalmente assicurata dalla reazione di difesa compreso il riflesso palpebrale; **l'osservazione dell'emissione può risultare pericolosa se si usano ottiche.**

Classe 3R: laser che emettono nell'intervallo $302,5\text{nm} \leq \lambda \leq 1\text{mm}$ in cui la visione diretta del fascio è potenzialmente pericolosa, ma il rischio è inferiore alla classe 3B.
(*da U.V. a I.R., V.S. incluso*)

Classe 3B: la visione diretta nel fascio è sempre pericolosa, mentre non è a rischio la visione di radiazioni non focalizzate, mediante riflessione diffusa, per $t < 10$ secondi
(*diffusa e non riflessa; t dipende da energia trasferita a occhio/pelle*)

Classe 4: il loro uso richiede estrema prudenza. Sono pericolosi anche per riflessione diffusa. Possono causare danni a carico della cute e presentano anche un rischio di incendio. E' necessario evitare l'esposizione dell'occhio e della pelle alla radiazione diretta o diffusa.
(*incendio per energia elevata. Attenzione a oggetti specchiati → diffusione*)

CLASSI DI RISCHIO

Limite sup di potenza per emissione CW	Classe di rischio	Rischi
<0.4 mW	1	nessuno
0.4-500 mW	1M	visione fascio con ottiche
< 1 mW	2	nessuno (riflesso palpebrale) (VIS)
1-500 mW	2M	visione fascio con ottiche (VIS)
< 5 mW	3R	visione fascio diretto
< 500 mW	3B	visione fascio diretto
> 500 mW	4	visione fascio diretto e diffuso

PRECAUZIONI PER GLI OCCHI

In caso di possibile superamento della esposizione massima permessa devono essere indossati occhiali di protezione (operatori, paziente) etichettati con la densità ottica e la lunghezza d'onda per cui è garantita la protezione



MARCATURA DELL'OCCHIALE

Ogni occhiale protettivo ha una marcatura sulla montatura o sui filtri con queste indicazioni:

- D= continua
- I = impulsata ($10^{-4} \leq t_{\text{secondi}} \leq 10^{-1}$)
- R= impulsi giganti (Q-switching: $10^{-9} \leq t_{\text{secondi}} \leq 10^{-7}$)
- M= impulsi a modo accoppiato (mode locking: $t_{\text{secondi}} \leq 10^{-9}$)
- Lunghezza d'onda o range garantito di protezione
- Numero di graduazione (attenuazione richiesta al filtro per ridurre la radiazione incidente sull'occhio al valore sicuro EMP)
- Marchio di identificazione del costruttore (conforme norma 207): include la stabilità ottica cioè la resistenza del DPI a varie tipologie di emissione del fascio laser

Esempio di marcatura di un occhiale

D 980-1400 L5 + IR 650-1000 L6 X ZZ S

- D condizione di prova secondo il prospetto 4-Norma UNI EN 207 (laser a onda continua 1 impulso di 10 secondi)
- 980-1400 intervallo di λ in nm in cui il filtro garantisce la protezione con il numero di graduazione seguente
- L5 numero di graduazione ossia il fattore spettrale massimo di trasmissione del filtro pari a 10^{-5} nel suddetto intervallo di λ
- IR sono altre due condizioni di prova cui sono stati testati i filtri:
I = laser a impulsi; R= laser a impulsi giganti (Q-switched)
- 650-1000 altro intervallo di λ in nm cui il filtro garantisce la protezione con il numero di graduazione seguente
- L6 numero massimo di graduazione ossia il fattore spettrale massimo di trasmissione del filtro pari a 10^{-6} nel suddetto intervallo di λ
- X marchio di identificazione del fabbricante
- ZZ marchio di certificazione se applicabile (EN, ecc)

Per il calcolo del numero di graduazione: CEI EN 60825-1 e UNI EN 207

TIPI DI OCCHIALI PROTETTIVI

D 980 - 1080 L4 +
IR 980-1070 L5



DI 800-1000 L4



D continuo

R impulsi giganti $10^{-9}s \leq t \leq 10^{-7}s$

I impulsi $10^{-4}s \leq t \leq 10^{-1}s$

M modi vincolati $< 10^{-9}s$

Grazie per l'attenzione

