

Le radiazioni ottiche artificiali: cenni di fisica e  
grandezze radiometriche e fotometriche.

Il Titolo VIII capo V del D.Lgs. 81/08



Pina Scandurra

Il Capo V del titolo VIII del D.Lgs. 81/08, noto ormai come “il Testo Unico” recepisce in Italia, la Direttiva “006/25/CE sulla protezione dalle radiazioni ottiche artificiali.

## **L'art. 181 del D.Lgs. 81/08 recita:**

**“il datore di lavoro valuta tutti i rischi derivanti da esposizione ad agenti fisici nei luoghi di lavoro”**

**L'art. 180 precisa che “per agenti fisici si intendono il rumore, gli ultrasuoni, gli infrasuoni, le vibrazioni meccaniche, i campi elettromagnetici, le radiazioni ottiche di origine artificiale, il microclima e le atmosfere iperbariche che possono comportare rischi per la salute e la sicurezza dei lavoratori”**



**Coordinamento Tecnico per la sicurezza nei luoghi di lavoro  
delle Regioni e delle Province autonome**

**Decreto Legislativo 81/2008  
Titolo VIII, Capo I, II, III, IV e V  
sulla prevenzione e protezione dai rischi dovuti  
all'esposizione ad agenti fisici  
nei luoghi di lavoro**

**Indicazioni operative**

in collaborazione con:



**ISPEL - Istituto Superiore  
per la Prevenzione E la Sicurezza del Lavoro**



**Istituto Superiore di Sanità**

Con il termine radiazione ottica si intende la porzione di spettro elettromagnetico fra 100 nm e 1 mm; a lunghezza d'onda inferiore abbiamo le radiazioni ionizzanti, oltre la lunghezza d'onda di 1 mm si parla comunemente di campi elettromagnetici, trattati nel capo IV.

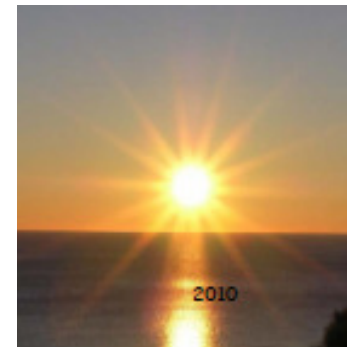
La definizione “**ottica**” deriva dal fatto che, in questo intervallo di lunghezza d’onda, si applicano le leggi dell’ottica classica, a prescindere dalla capacità del cervello umano di rilevare la radiazione come “visibile”.

# Radiazioni ottiche

Le radiazioni ottiche possono essere prodotte sia da fonti *naturali che artificiali*.

La sorgente naturale per eccellenza è il *sole* che, come è noto, emette in tutto lo spettro elettromagnetico.

Le sorgenti artificiali, invece, possono essere di diversi tipi a seconda del principale spettro di emissione e a seconda del tipo di fascio emesso (coerente o incoerente).



# Cosa richiede la legge

Art. 213 - Campo di applicazione

1. Il presente capo stabilisce prescrizioni minime di protezione dei lavoratori contro i rischi per la salute e la sicurezza che possono derivare, dall'esposizione alle radiazioni ottiche artificiali durante il lavoro con particolare riguardo ai rischi dovuti agli **effetti nocivi sugli occhi e sulla cute**.

Nell'allegato XXXVII sono fissati i valori limite per:

- radiazioni ottiche incoerenti (parte I)
- radiazioni laser (parte II)



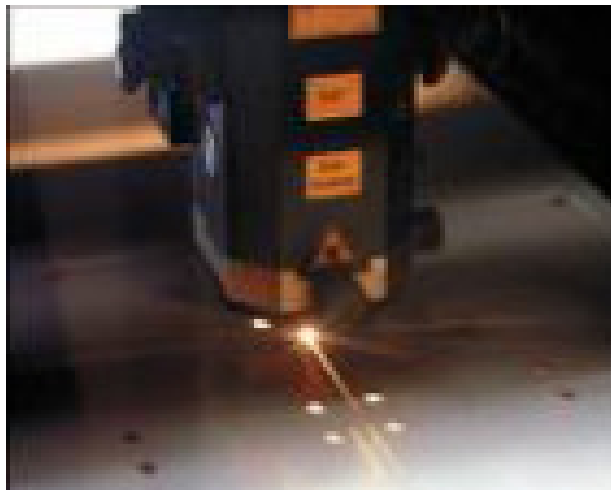
In generale i rischi che la legislazione intende prevenire sono quelli per la salute e sicurezza che possono derivare dall'esposizione alle ROA o dal loro impiego durante il lavoro, con particolare riguardo ai rischi dovuti agli effetti nocivi sugli occhi e sulla cute.



**Non tutte le lunghezze d'onda appartenenti alle radiazioni ottiche hanno gli stessi effetti su occhio e cute, come mostrato nella tabella sottostante.**

RADIAZIONE OTTICA	OCCHIO	CUTE
ULTRAVIOLETTO	fotocheratocongiuntivite (UVB-UVC), cataratta fotochimica (UVB)	eritema (UVB-UVC), sensibilizzazione (UVA-UVB), fotoinvecchiamento (UVC-UVB-UVA), cancerogenesi (UVB-UVA)
VISIBILE	fotoretinite (in particolare da luce blu, 380-550 nm)	fotodermatosi
INFRAROSSO	ustioni corneali (IRC-IRB), cataratta termica (IRB-IRA), danno termico retinico (IRA)	vasodilatazione, eritema, ustioni

Nel caso in cui la sorgente luminosa sia rappresentata da un laser, gli effetti sopra riportati risultano, nella maggior parte dei casi, amplificati e spesso irreversibili



La **tipologia di effetti** dell'esposizione dipende dalla lunghezza d'onda della radiazione incidente, mentre **dall'intensità** dipendono sia la possibilità che questi effetti si verifichino che la loro gravità.

Oltre ai rischi per la salute dovuti all'esposizione diretta alle radiazioni ottiche artificiali esistono ulteriori rischi **indiretti**, quali:

- ❖ sovraesposizione a luce visibile: disturbi temporanei visivi, quali abbagliamento, accecamento temporaneo;
- ❖ rischi di incendio e di esplosione innescati dalle sorgenti stesse e/o dal fascio di radiazione;
- ❖ stress termico, contatti con superfici calde ecc.

# .....cosa richiede la legge

## Art. 214 - Definizioni

- 1) Agli effetti delle disposizioni del presente decreto si intendono per:
  - a) radiazioni ottiche: tutte le radiazioni elettromagnetiche con lunghezza d'onda nella gamma di lunghezza d'onda compresa tra 100 nm e 1 mm.

1) **Radiazioni ultraviolette**: radiazioni ottiche a lunghezza d'onda compresa tra 100 e 400 nm.

La banda degli ultravioletti è suddivisa in UVA (315-400 nm), UVB (280-315 nm) e UVC (100, 280 nm);

1) **Radiazioni visibili**: radiazioni ottiche a lunghezza d'onda compresa tra 380 e 780 nm;

2) **Radiazioni infrarosse**: radiazioni ottiche a lunghezza d'onda compresa tra 780 nm e 1mm. La regione degli infrarossi è suddivisa in IRA (780- 1400 nm); IRB (1440- 3000 nm) e IRC (3000 nm – 1 mm)

- b) **Laser** (amplificazione di luce mediante emissione stimolata di radiazione);
- c) **Radiazione laser**: radiazione ottica prodotta da un laser;
- d) **Radiazione non coerente**: qualsiasi radiazione ottica diversa dalla radiazione laser;
- e) **Valori limite di esposizione**: limiti di esposizione alle radiazioni ottiche che sono basati direttamente sugli effetti sulla salute accertati e su considerazioni biologiche. Il rispetto di questi limiti garantisce che i lavoratori esposti a sorgenti artificiali di radiazioni ottiche siano protetti contro tutti gli effetti nocivi sugli occhi e sulla cute conosciuti;

## Grandezze fisiche e unità di misura

- f) **Irradianza** (E) o densità: la potenza radiante incidente per unità di area su una superficie espressa in  $\text{W/m}^2$
- g) **Esposizione radiante** (H): integrale nel tempo dell'irradianza espressa in  $\text{J/m}^2$
- h) **Radianza** (L): il flusso radiante o la potenza per unità di angolo solido per unità di superficie, espressa in  $\text{W/m}^2 \text{sr}$
- i) **Livello**: la combinazione di irradianza, esposizione radiante e radianza alle quali è esposto un lavoratore

## Art. 216

Nella valutazione dei rischi occorre prestare particolare attenzione ai seguenti elementi:

- a) Livello, gamma di lunghezza d'onda, durata della esposizione;
- b) Valori limite di esposizione (VLE);
- c) Gruppi particolarmente sensibili al rischio;
- d) Interazioni tra le ROA e le sostanze chimiche foto-sensibilizzanti
- e) Effetti indiretti, come l'accecamento temporaneo, le esplosioni o il fuoco;
- f) Esistenza di attrezzature di lavoro alternative, progettate per ridurre i livelli di esposizione alle ROA;
- g) Disponibilità di azioni di risanamento volte a minimizzare i livelli di esposizione alle ROA;
- h) Informazioni adeguate raccolte nel corso della sorveglianza sanitaria, comprese le informazioni pubblicate;
- i) Sorgenti multiple di esposizione alle ROA,
- l) Classificazione dei laser, stabilita conformemente alla pertinente norma IEC e, in relazione a tutte le sorgenti artificiali che possono arrecare danni simili a quelli di un laser della classe 3B o 4, tutte le classificazioni analoghe;
- m) Informazioni fornite dai fabbricanti delle sorgenti di radiazioni ottiche e delle relative attrezzature di lavoro in conformità alle pertinenti direttive comunitarie.



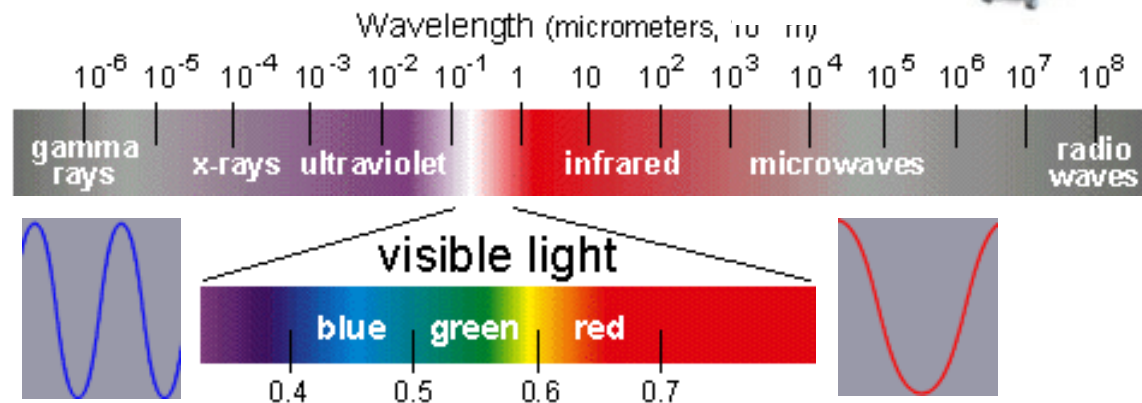
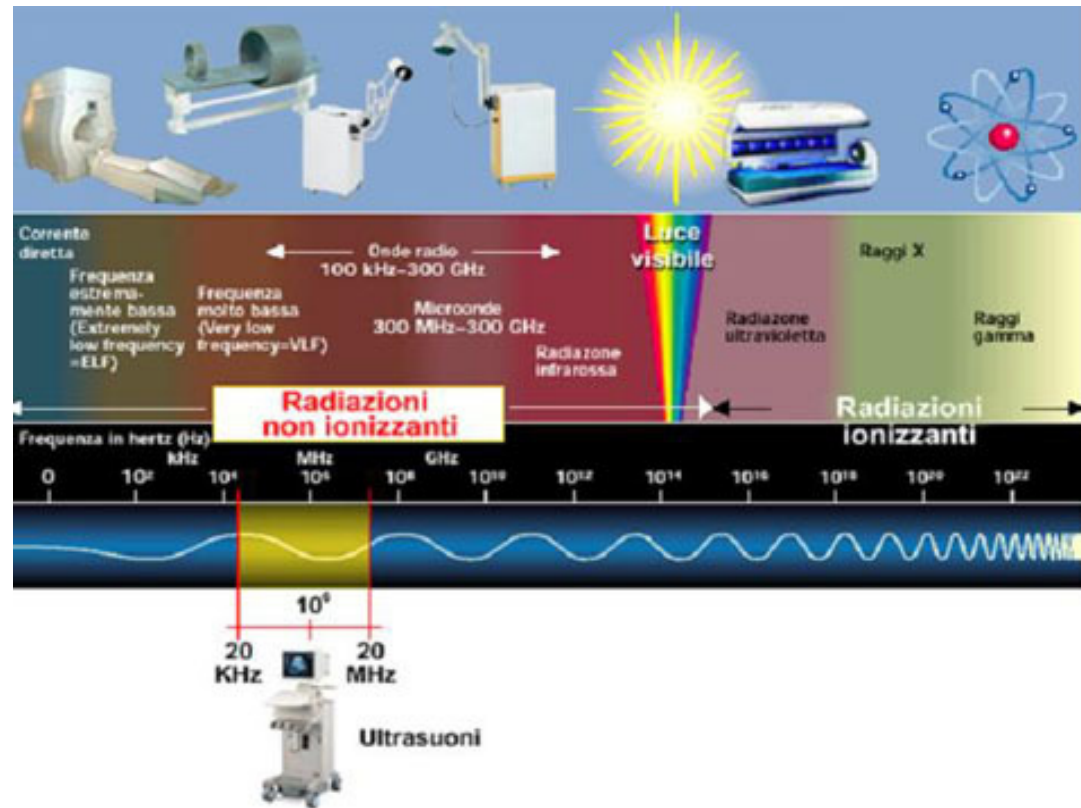
Abbiamo

- 3 zone dello spettro (UV, visibile, IR)
- 2 tipi di radiazione (coerente/incoerente)
- 5 grandezze (valore di esposizione, irradianza, esposizione radiante, radianza, livello)

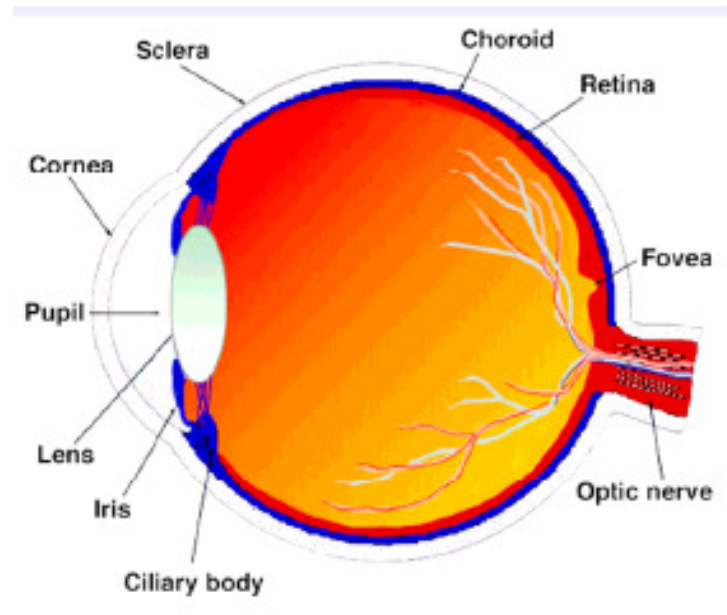
# Spettro di una sorgente

- **La radiazione ottica artificiale è sempre prodotta da una sorgente.**
- **Un laser produce in genere energia solo ad una determinata lunghezza d'onda (più esattamente in una banda strettissima!).**
- **Una lampadina ad incandescenza emette pochissima energia nell'UV, poca nel blu, un po' nel verde, abbastanza nel giallo, molta nel rosso e moltissima nell'infrarosso (è proprio la radiazione IR che percepiamo come calore).**
- **Un LED bianco emette molta energia nel blu, poca nel verde, abbastanza nel giallo e quasi niente nel rosso.**
- **Tecnicamente si dice che queste sorgenti hanno uno spettro di emissione diverso**

# Lo spettro elettromagnetico



# Sistema visivo umano



**L'occhio umano è simile a un rivelatore di luce.**

**I fotoni incidenti sono focalizzati sulla retina.**

**La regione di messa a fuoco della retina è la fovea, che è responsabile del riconoscimento di dettagli di oggetti ad alta luminosità**

# Il sistema visivo

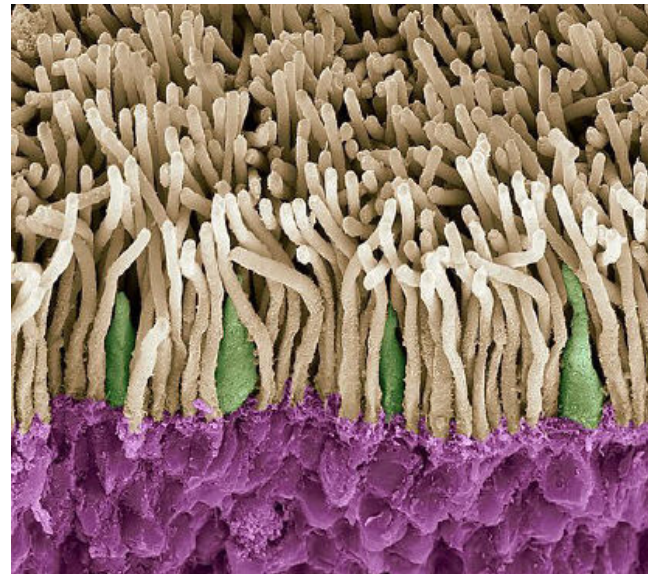
Nella retina vi sono due tipi di cellule sensibili alla luce:

- i **coni**: sono sensibili alla lunghezza d'onda (percezione del colore).
- i **bastoncelli**: hanno lo scopo di adattarsi ai cambiamenti di intensita' di luce ad esempio alla luce crepuscolare e notturna.

bastoncelli

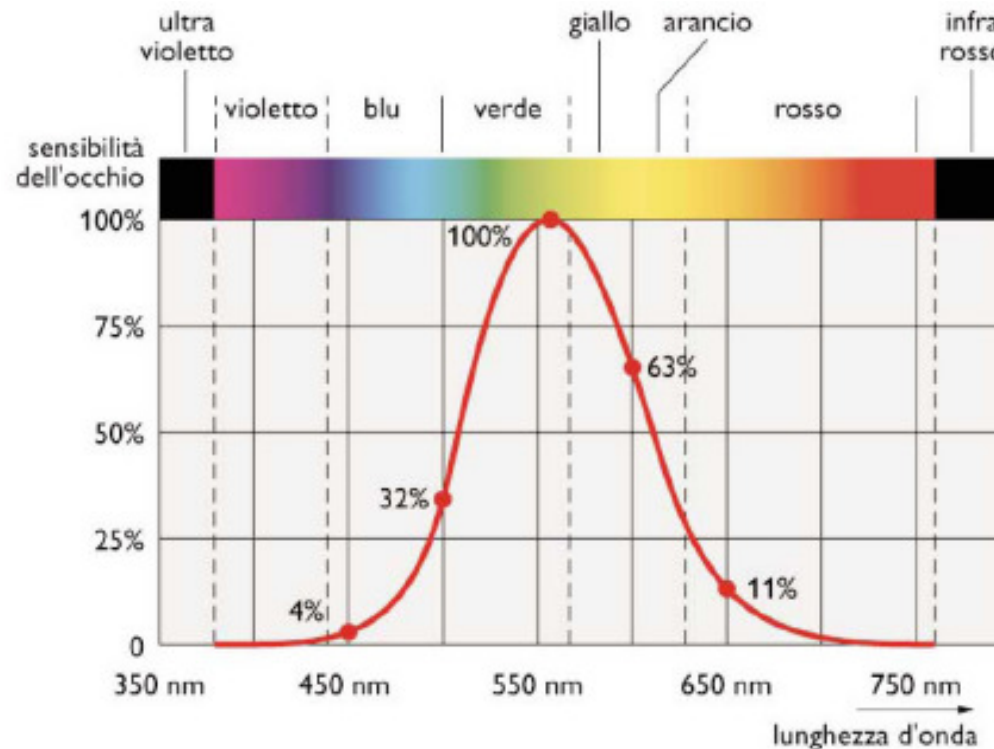
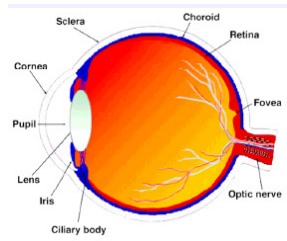


coni

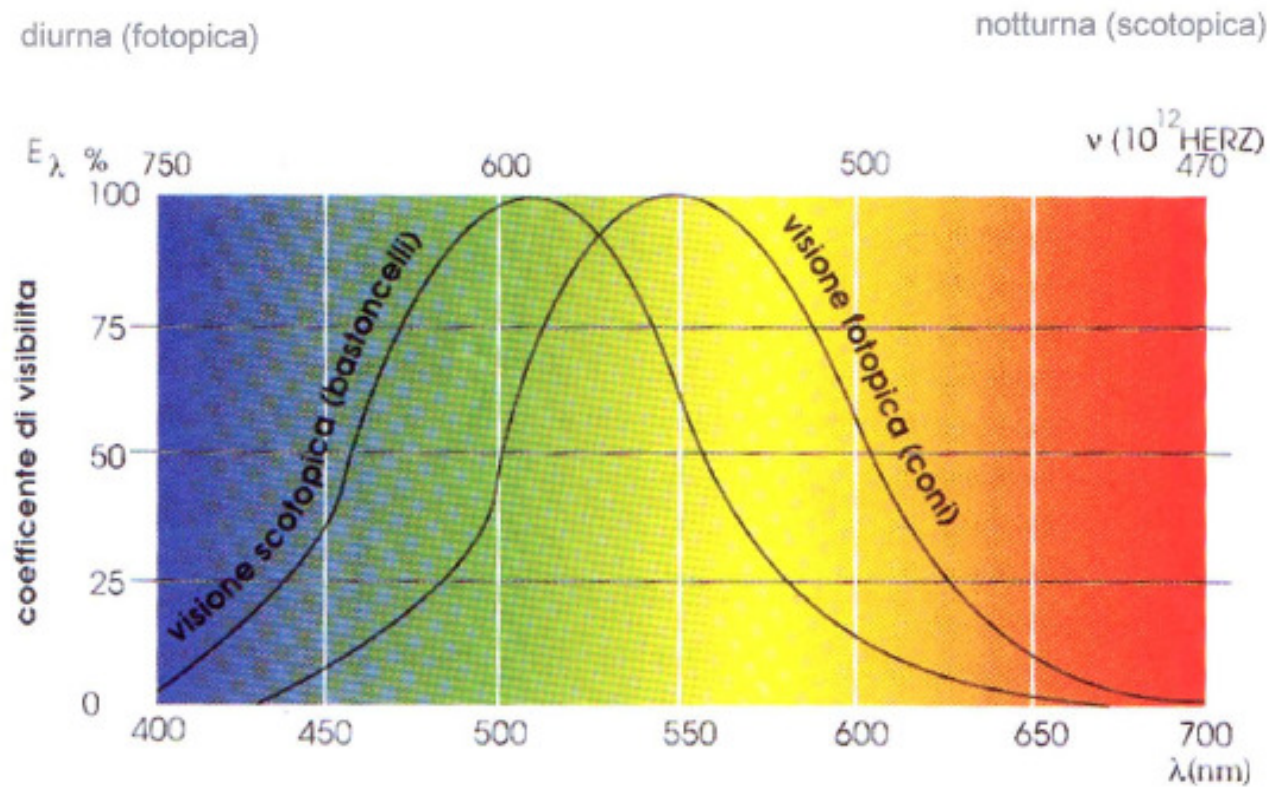


L'occhio umano valuta in misura diversa l'intensità corrispondente alle varie lunghezze d'onda ed è per questo che uguali quantità di energia radiante di differenti lunghezze d'onda non provocano una impressione luminosa di uguale intensità.

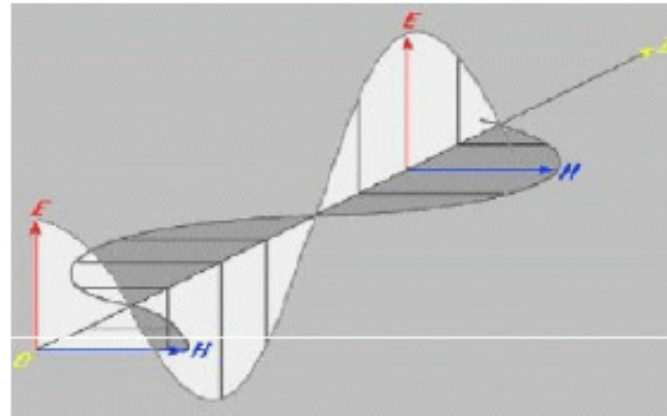
Se, ad esempio, si considerano uguali quantità di energia per tutte le varie lunghezze d'onda e si paragona l'intensità della sensazione ricevuta, si constata che alla radiazione giallo verde (lunghezza d'onda pari a 555 nm), corrisponde l'impressione luminosa più intensa mentre le radiazioni rosse e violette determinano una impressione molto più debole.



**Nella visione fotopica (coni) l'occhio può pienamente percepire i colori.  
Nella visione scotopica (bastoncelli) l'occhio può percepire solo i grigi  
(ambiente poco illuminato).**



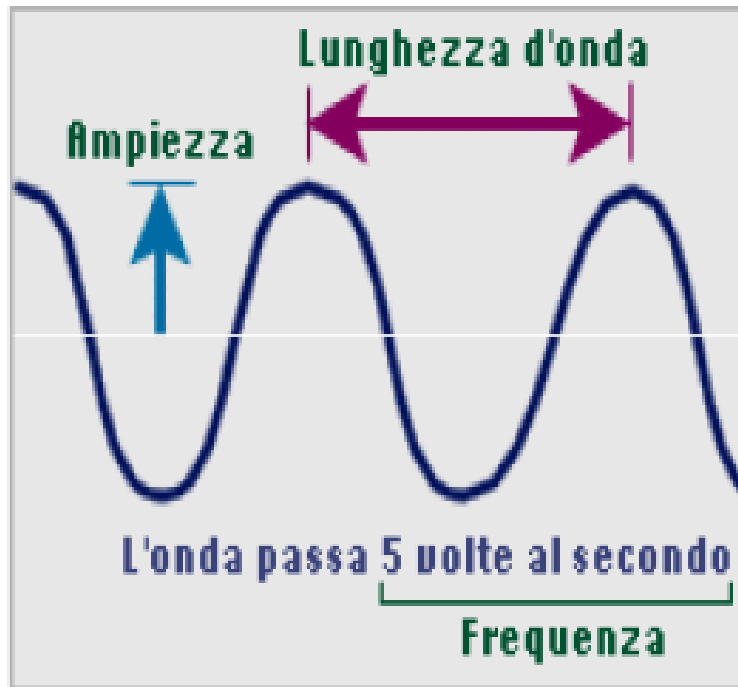
# Le onde elettromagnetiche



- Sono caratterizzate da un campo elettrico e un campo magnetico tra loro perpendicolari di ampiezza variabile periodicamente
- La loro velocità di propagazione nel vuoto è una costante pari a  $300\,000\text{ km s}^{-1}$



# Le caratteristiche



- Tutte le onde hanno le seguenti caratteristiche:
- **Ampiezza**: l'intensità della vibrazione.
  - **Frequenza [f ]**: il numero di onde che passano per un punto nell'unità di tempo
  - **Lunghezza d'onda [ $\lambda$ ]**: la distanza tra due picchi.

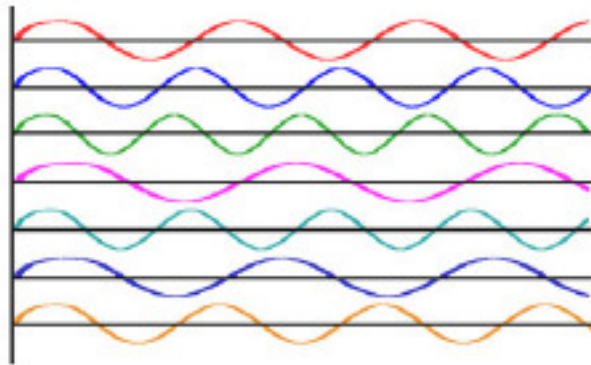
$$f: [\text{Hz} = 1/\text{s}] \quad \lambda: [\text{m}]$$

$$\lambda = c / f ; \quad f = c / \lambda$$

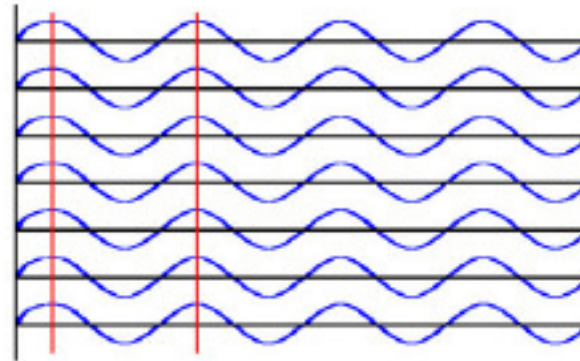
## Classificazione delle Radiazioni ottiche

**NON COERENTI:** l'emissione avviene in modo caotico, i massimi ed i minimi tendono a sottrarsi in alcuni punti e a sommarsi in altri;

**COERENTI:** esiste una quasi perfetta relazione di fase per tutte le onde emesse, l'onda risultante si "rafforza" sempre.



**Ordine interno assente**  
**Frequenze e fasi diverse**



**Ordine interno**  
**Onde con frequenze e fasi identiche**

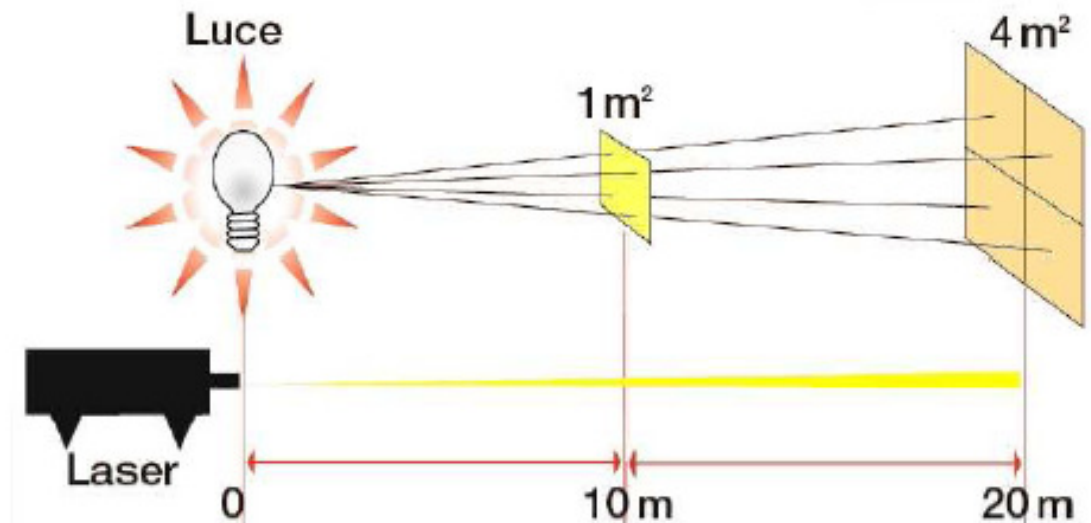
# Sorgenti coerenti e incoerenti

**Il laser emette luce direzionata (sorgente coerente)  
Con un opportuno rivelatore è semplice raccogliere  
tutta la luce emessa**

**Una generica sorgente emette in tutte le direzioni  
(sorgente incoerente)  
Si raccoglie una quantità di luce che dipende dall'area  
sensibile del rivelatore**



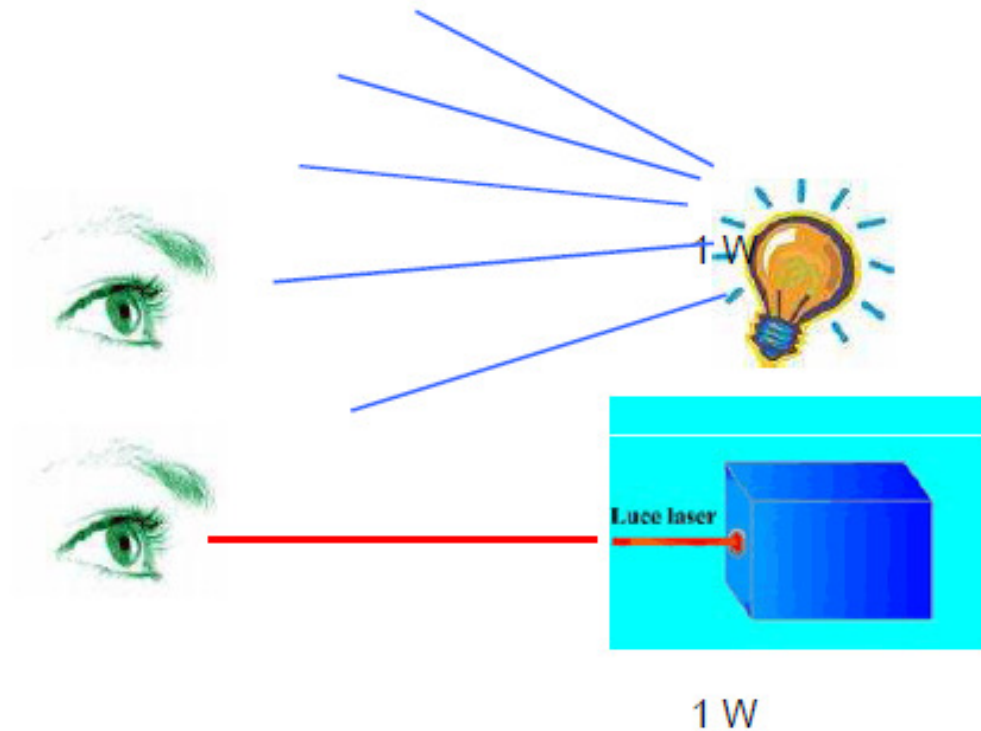
# La propagazione



**Luce non coerente: si propaga col quadrato della distanza**

**Luce laser: si disperde con la sola divergenza (spesso trascurabile anche alle grandi distanze)**

# La pericolosità

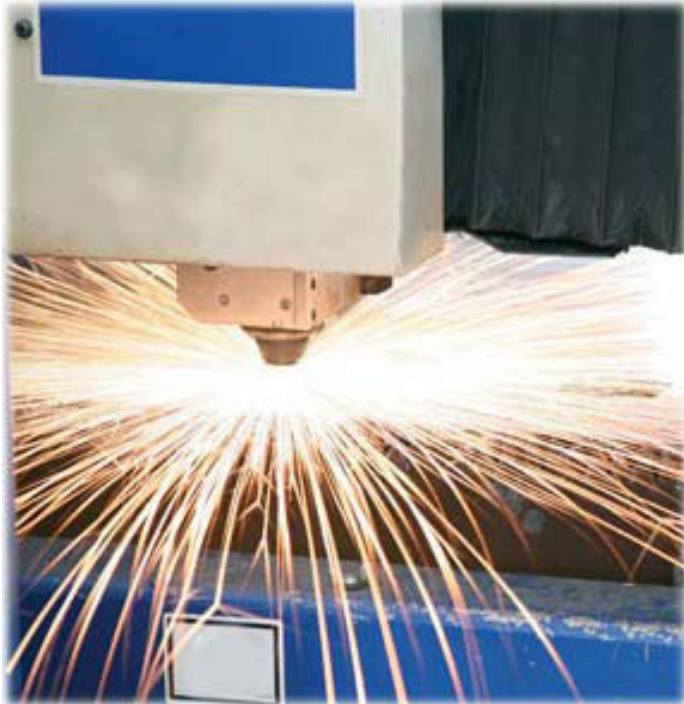


**Tutta l'energia entra nell'occhio ed è 100 000 volte  
( a un metro) più potente**

# Sorgenti non coerenti



# Sorgenti coerenti



# Sorgenti non coerenti



Sorgenti infrarosse  
Fornace





# Il Corpo Nero

un corpo solido freddo non produce alcuna emissione, ma al crescere della temperatura comincia a diventare **luminoso** e a cambiare **colore**.

un metallo che diventa incandescente cambia il suo colore e diventa prima rosso, poi arancione, e infine di un giallo-bianco abbagliante



# Temperatura di Colore

La **Legge di Wien** ci da la relazione tra la lunghezza d'onda del picco di un'emissione da parte di un corpo nero, e la sua temperatura:

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}$$

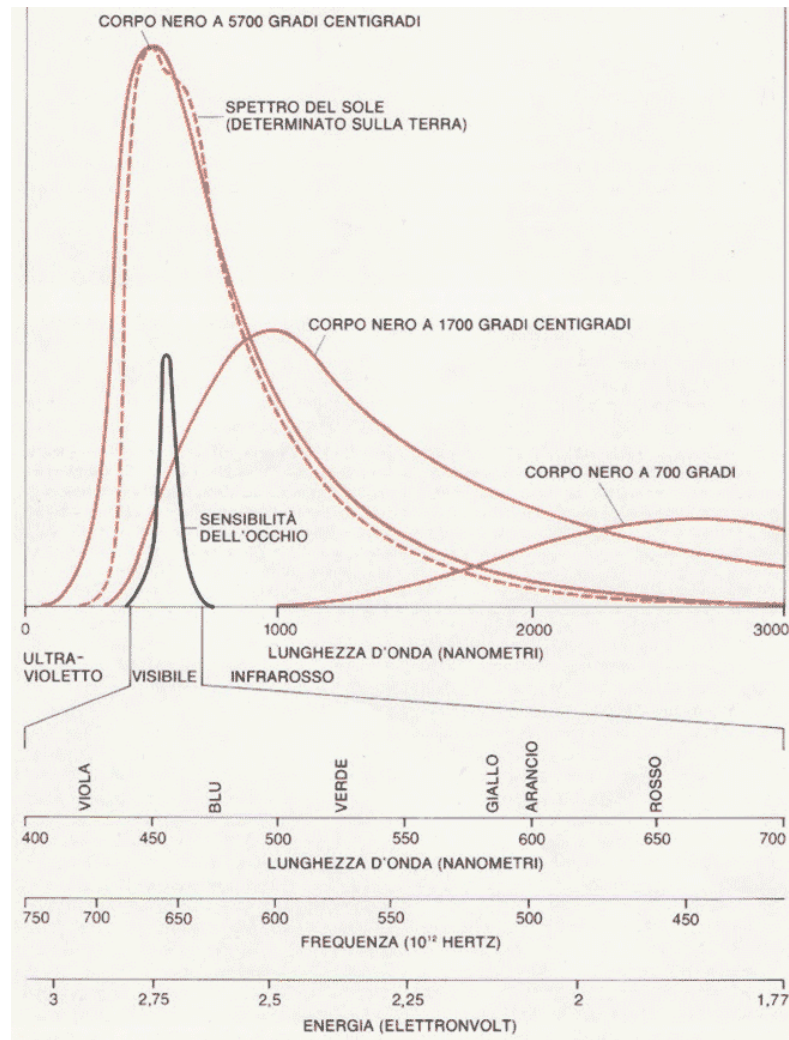
dove T è la temperatura del corpo nero espressa in kelvin,  $\lambda_{\max}$  è la lunghezza d'onda espressa in metri del picco massimo di energia, e b è una costante di proporzionalità, chiamata **costante dello spostamento di Wien**, il cui valore è:

$$b = 2,8977685 \times 10^{-3} \text{ m } ^\circ\text{K}$$

In pratica, più caldo è un oggetto, più corta è la lunghezza d'onda a cui emetterà radiazione. Per esempio, la temperatura superficiale del Sole è di 5778 K, il che dà un picco a circa 500 nm.



# Spettro di emissione del corpo nero





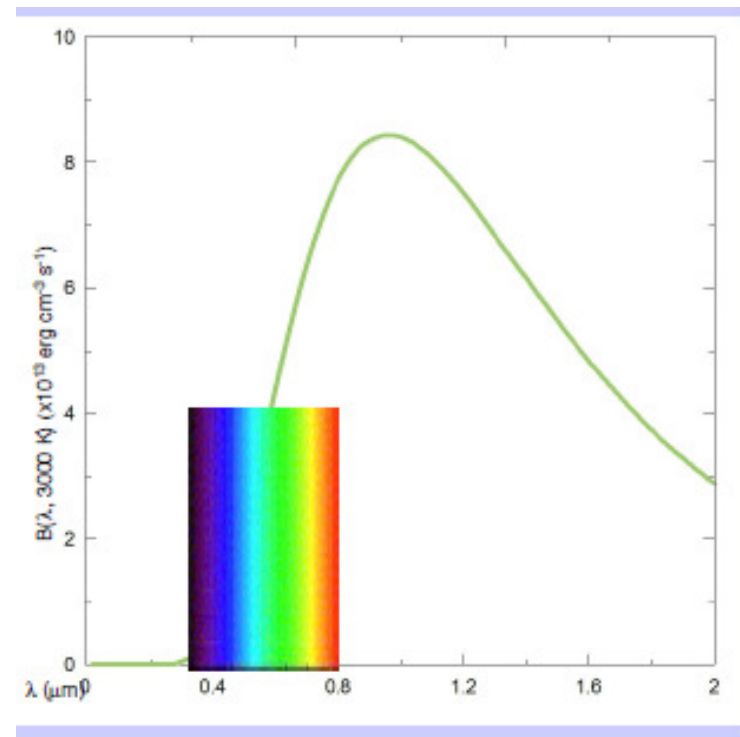
Lampada a incandescenza

$T \approx 3\,000\text{ K}$

$$\lambda_{\text{max}} \approx 1\ \mu$$

**La funzione di Planck per un corpo nero che emette alla temperatura di una lampadina a incandescenza.**

**Il massimo di emissione è collocato nell'infrarosso, eppure la lampadina emette luce visibile. Questo è possibile perché, come si vede dal grafico, la funzione si estende fino a 0.3 micron, includendo l'intervallo di lunghezza d'onda visibile. Quindi solo una frazione della radiazione globale emessa dalla lampadina è luce visibile.**



## RADIOMETRIA E FOTOMETRIA

Descrivono la propagazione di energia nello spazio per mezzo della radiazione elettromagnetica tra una sorgente e un ricevitore. In fotometria il rivelatore è l'occhio umano.

### Grandezze radiometriche:

Sono legate alla quantità di energia trasportata nel tempo (potenza espressa in Watt) che viene emessa da una sorgente o che incide su una superficie.

### Grandezze fotometriche

Quantificano la radiazione elettromagnetica in funzione della sensibilità dell'osservatore medio. Si ottengono tramite "pesatura" delle grandezze radiometriche con le *funzioni di efficienza luminosa spettrale dell'occhio umano*

- **Fotometria**

flusso [ Lumen ]

$\lambda$  nel visibile

- **Radiometria**

flusso [ Watts ]

tutte le  $\lambda$

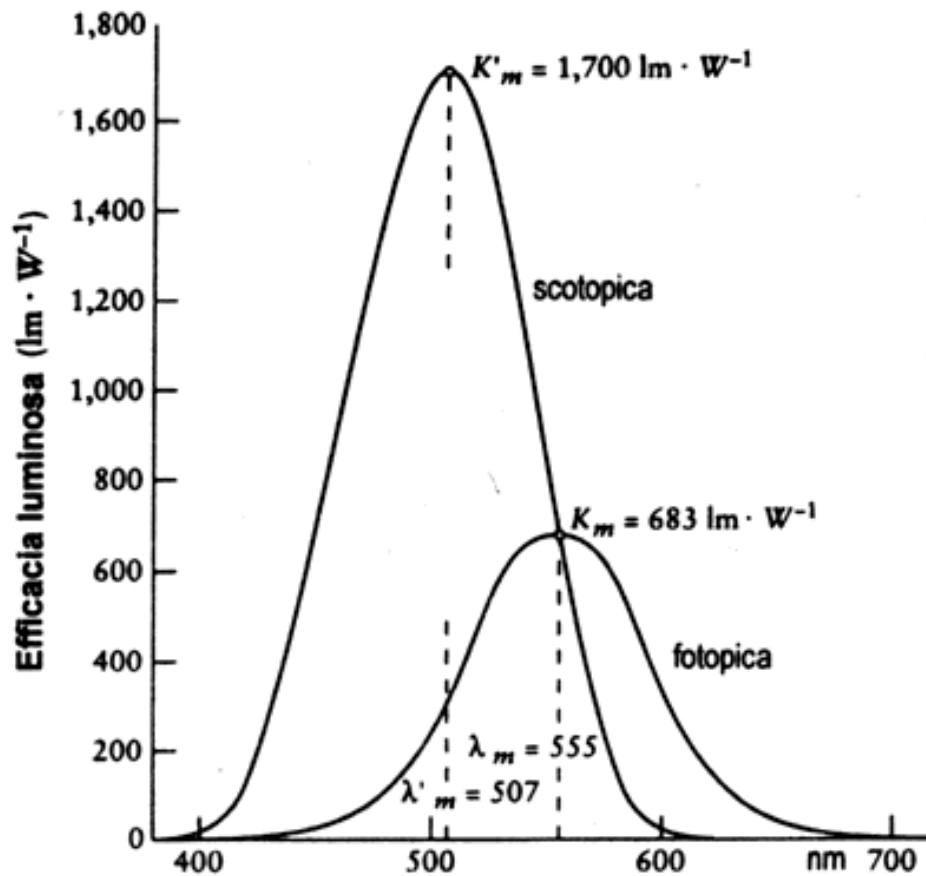
	Grandezze Radiometriche		Grandezze Fotometriche	
Energia luminosa	Energia Radiante <b>Q</b>	Joule (J)	Quantità di luce	Talbot (tb) lum*s
Flusso di energia luminosa	Potenza radiante o Flusso di energia Radiante <b>Φ</b>	Watt (W)	Flusso luminoso	Lumen (lm) Lm = cd sr
Intensità angolare del flusso luminoso	Intensità radiante <b>I</b>	Watt/steradiante (W/sr)	Intensità luminosa	Candela (cd) Lum/sr
Intensità del flusso di energia luminosa per unità di superficie radiante	Irradianza o Emittenza radiante o Densità di potenza <b>E</b>	W/m <sup>2</sup>	Illuminanza o illuminamento	Lux (lx) Lum/m <sup>2</sup>
Quantità di flusso radiante da una semisfera per unità di superficie e di angolo solido	Radianza <b>L</b>	W/ m <sup>2</sup> sr	Luminanza	Nit Cd/ m <sup>2</sup> Lm/sr m <sup>2</sup>

# Grandezze Fotometriche e Radiometriche

Da un punto di vista strettamente fisico parrebbe che non ci sia alcuna differenza tra le grandezze radiometriche, definite nell'intero spettro della radiazione elettromagnetica, e quelle fotometriche, limitate all'intervallo 380-780 nm.

Dal punto di vista del significato che attribuiamo alle grandezze fotometriche invece occorre tenere conto delle caratteristiche del sistema visivo umano, che, come abbiamo visto non reagisce agli stimoli elettromagnetici nello stesso modo alle varie lunghezze d'onda





Questa funzione consente di mettere in relazione grandezze radiometriche e grandezze fotometriche, permettendo di considerare queste ultime per il loro reale significato: funzioni che descrivono il comportamento della radiazione elettromagnetica capace di stimolare il sistema visivo umano.

Con la funzione seguente:

$$K(\lambda) = 683 V(\lambda)$$

possiamo mettere in relazione le grandezze radiometriche con quelle fotometriche per condizioni di alta illuminazione (quando cioè nella visione sono attivi i coni):

$$\text{unità fotom.} = K(\lambda) \cdot \text{Unità radiom.}$$

In altri termini le grandezze fotometriche che abbiamo definito in precedenza sono la rappresentazione delle grandezze radiometriche in relazione alla loro capacità di stimolare il sistema visivo umano.

# Grandezze radiometriche

possono essere divise in due classi:

1. Descrivono la sorgente emettitrice ( $\Phi$ ,  $L$ )
2. Descrivono la superficie irradiata ( $E$ ,  $H$ )

- Possiamo distinguere in grandezze radiometriche totali e grandezze radiometriche spettrali.
- Nei valori totali si considera la quantità di energia a prescindere dalla lunghezza d'onda.
- Le grandezze spettrali invece sono funzioni della lunghezza d'onda.
- Le grandezze totali perdono una dimensione  $m^{-1}$
- Es.: Radianza spettrale:  $L_e(\lambda)$  [Watt  $sr^{-1}m^{-3}$ ]

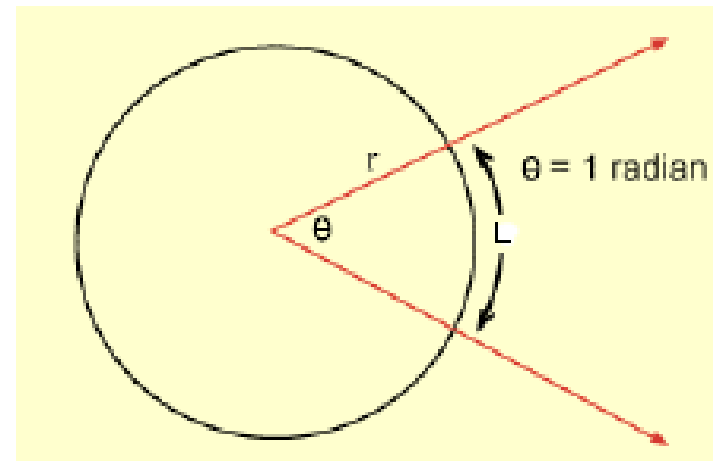
- Radianza  $L_e = \int_{\lambda} L_e(\lambda) d\lambda$  [Watt  $sr^{-1}m^{-2}$ ]

# Angoli

- Angolo piano: è il rapporto tra la lunghezza dell'arco sotteso da due raggi ed il raggio della circonferenza

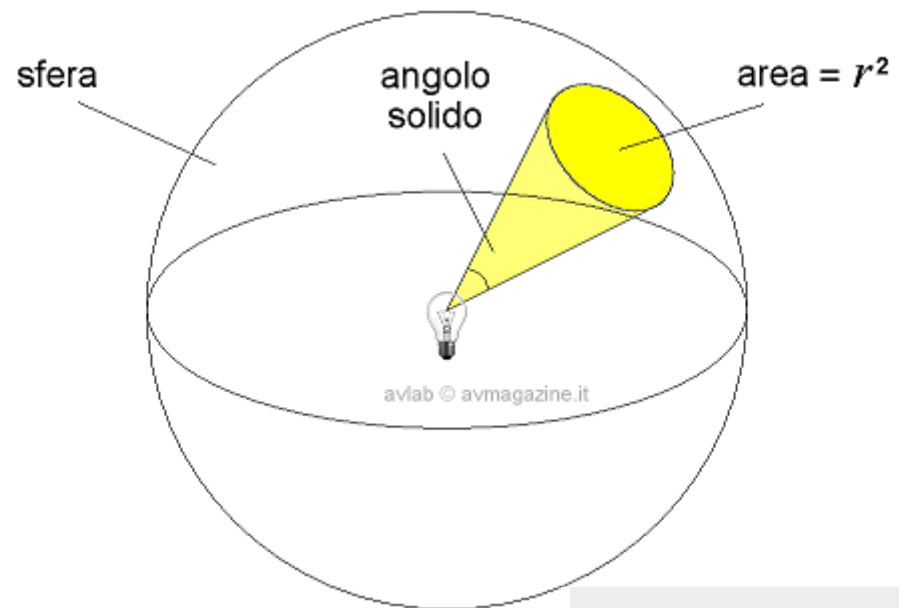
Si misura in radianti

$$\theta = \frac{L}{r}$$



# Angoli

- Angolo solido: è una regione conica di spazio ed è definito dal rapporto tra l'area della superficie  $A$  racchiusa sulla sfera ed il quadrato del raggio della stessa
- Si misura in steradiani [sr]



$$\omega = \frac{A}{r^2}$$

# Energia radiante

è l'energia totale emessa da una sorgente,  $Q$   
Si misura in Joule (J).

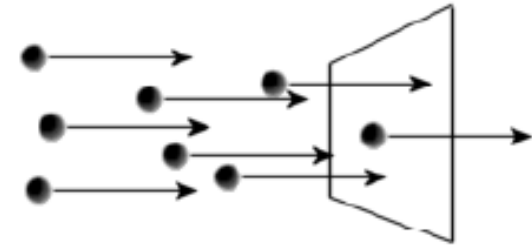


# Potenza radiante o Flusso radiante “ $\Phi$ ”

È l'energia irraggiata da una sorgente per unità di tempo

Se Q rappresenta l'energia:

$$\Phi = \frac{dQ}{dt}$$



Considerata la grandezza radiometrica fondamentale, sulla base della quale sono definite tutte le grandezze successive viene misurata in Watt

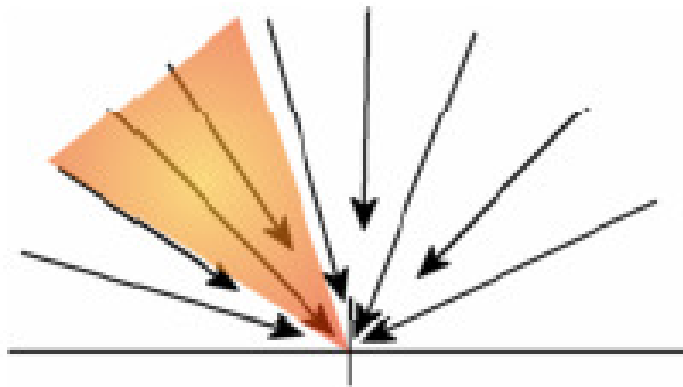


## Intensità Radiante

è il flusso radiante emesso da una sorgente puntiforme  
in una certa direzione per unità di angolo solido

Si misura in W/sr

$$I_e = \frac{d^2 Q_e}{dt d\omega}$$



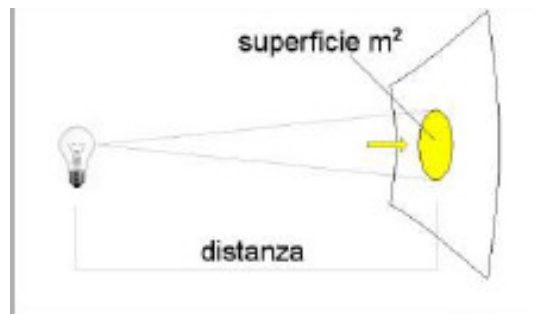


# Irradianza “E”

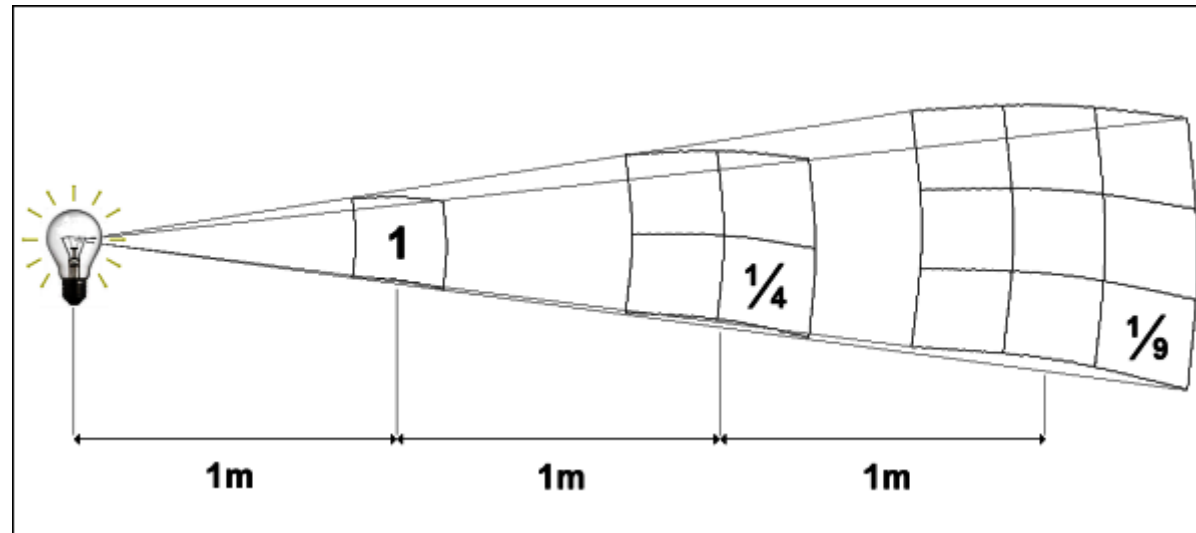
Descrive la potenza radiante incidente per unità di area su una superficie, espressa in  $W / m^2$

$$E = \frac{d\Phi}{dA} \quad W / m^2$$

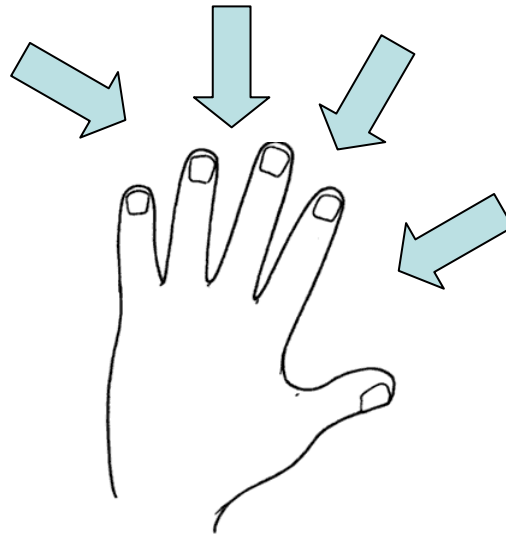
Grandezza fondamentale per valutare i danni alla pelle, alla cornea e al cristallino.



L'irradianza è inversamente proporzionale alla distanza ed è legata alla *legge dell'inverso del quadrato*.



# Perché l'irradianza?

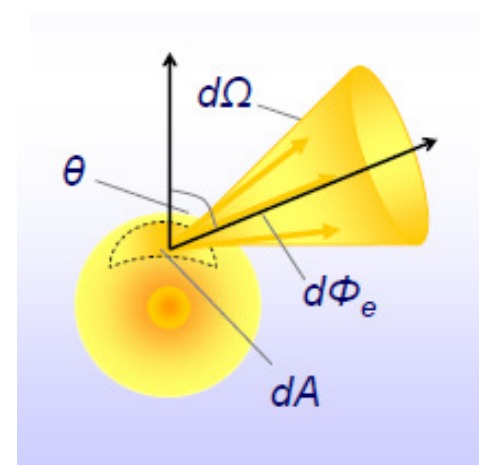
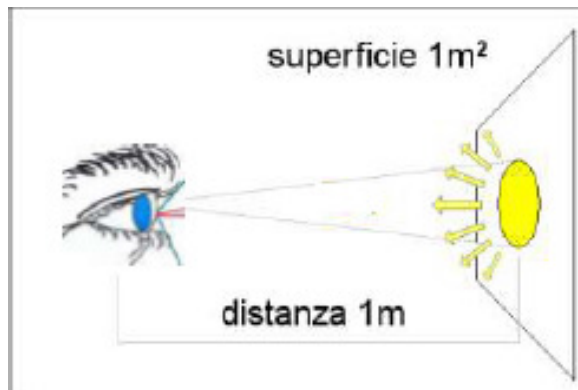


**L'irradianza è una misura sulla superficie investita**

# Radianza “L”

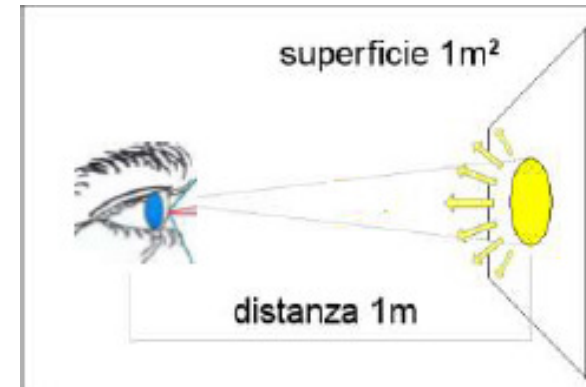
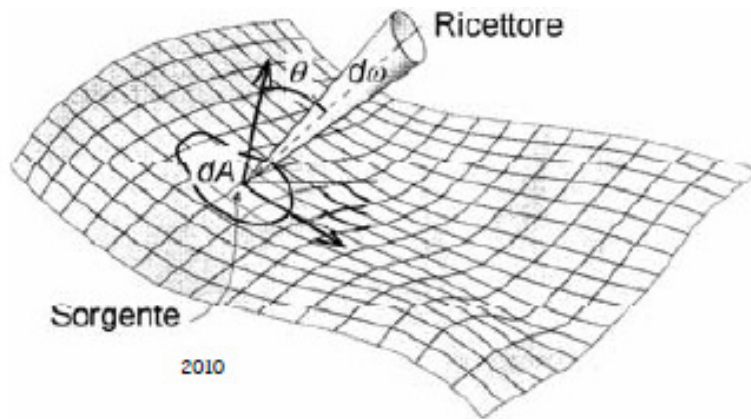
flusso radiante o potenza per unità di angolo solido per unità di superficie, espressa in Watt su metro quadro su steradiani ( $W / m^2sr$ )

$$L = \frac{d^2\Phi}{dA^\perp d\omega}$$



# Radianza “L”

- La radianza è una grandezza utilizzata per descrivere quanto un fascio di radiazione ottica è concentrato.



- Può essere calcolata dividendo l'irradianza ( in  $W/m^2$  ) ad una data posizione dalla sorgente per l'angolo solido con cui la si osserva da quella posizione.

La radianza è utilizzata per caratterizzare le sorgenti che possono produrre danno sulla retina (formazione dell'immagine)

- **$\alpha$  è l'angolo sotteso dalla sorgente.**
- **Se è  $\alpha < 11$  mrad la sorgente può essere considerata puntiforme (ossia l'immagine ha dimensioni inferiori circa uguali a quelle della fovea); il limite di danno viene pertanto dato ancora come valore di irradianza**
- **Se  $\alpha > 11$  mrad l'occhio produce un immagine sulla retina. Il limite di esposizione si da allora in radianza**

$$\alpha = (Z/d) \times \cos \theta$$

Z= dimensione media della sorgente

d = distanza

$\theta$  = ( angolo di osservazione)

# Esposizione radiante (H)

integrale nel tempo dell'irradianza

La esposizione radiante descrive quanta energia, per unità di superficie, è arrivata in un dato luogo rispetto alla posizione della sorgente.

$$H = \int_{t1}^{t2} E dt$$

La esposizione radiante consente quindi di quantificare l'effetto dell'esposizione integrata nel tempo ed il conseguente rischio.

Si misura in J/m<sup>2</sup>

# Limiti di esposizione

Il rispetto dei limiti di esposizione garantisce i lavoratori esposti a ROA dagli effetti nocivi sugli occhi e sulla cute.

I limiti sono definiti per:

[E] = Irradianza ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

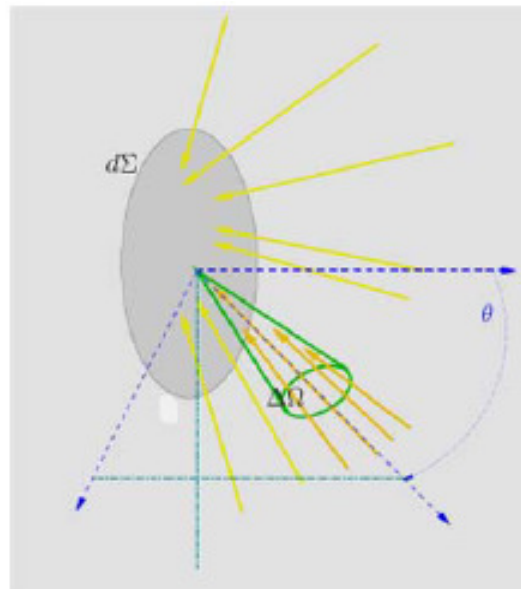
[H] = Esposizione radiante ( $\text{J}/\text{m}^2$ )

[L] = Radianza ( $\text{W}/\text{m}^2 \text{ sr}$ )





- **L'irradianza "E"** viene adottata, quale VLE, quando gli effetti sono indipendenti dall'angolo di osservazione e dal tempo di esposizione
- **L'esposizione radiante "H"** viene adottata, quale VLE, quando si deve considerare l'effetto dell'energia assorbita in relazione al tempo di esposizione
- **La radianza "L"** viene adottata, quale VLE, quando è importante la dipendenza angolare



# Le curve di azione di danno biologico

Da un punto di vista “del danno da radiazione” sono richiesti i valori di irradianza e esposizione radiante **efficaci** (o dose), ossia legati al danno biologico che generano alle diverse lunghezze d’onda

- Esempi di danno sono: agli occhi (fotocheratite, fotocongiuntivite...), alla pelle (eritema, tumore...)
- Selezionato un tipo di danno, si vede che non tutte le lunghezze d’onda sono ugualmente responsabili nel provocarlo
- Pertanto ad ogni danno, quando possibile, rimane associata una “curva di azione”, ossia una curva in cui si fornisce un fattore peso (un valore da 0 a 1) in funzione della lunghezza d’onda

## Limiti di esposizione “efficaci”

- Irradianza efficace  $E_{\text{eff}}$
- Esposizione radiante efficace  $H_{\text{eff}}$
- Radianza efficace  $L_R$

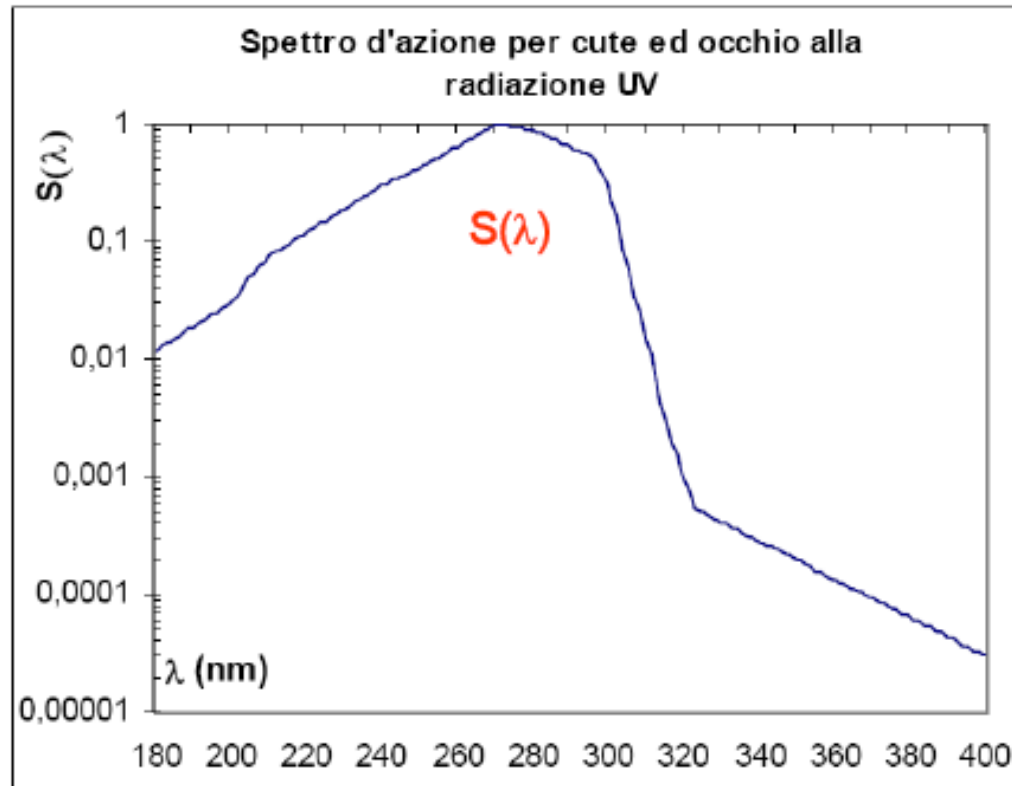


Il termine “efficace” si riferisce alle grandezze radiometriche “pesate” per gli effetti biologici che generano alle diverse lunghezze d’onda. Per fare ciò sono definiti i seguenti fattori adimensionali:

## Grandezze Efficaci

- ❖  **$S(\lambda)$  *fattore di peso spettrale***: tiene conto della dipendenza dalla lunghezza d'onda degli effetti sulla salute delle radiazioni UV sull'occhio e sulla cute
- ❖  **$R(\lambda)$  *fattore di peso spettrale***: tiene conto della dipendenza dalla lunghezza d'onda delle lesioni termiche provocate sull'occhio dalle radiazioni visibili e IRA
- ❖  **$B(\lambda)$  *ponderazione spettrale***: tiene conto della dipendenza dalla lunghezza d'onda della lesione fotochimica provocata all'occhio dalla radiazione di luce blu

# $S(\lambda)$ *fattore di peso spettrale* - da 180 a 400 nm

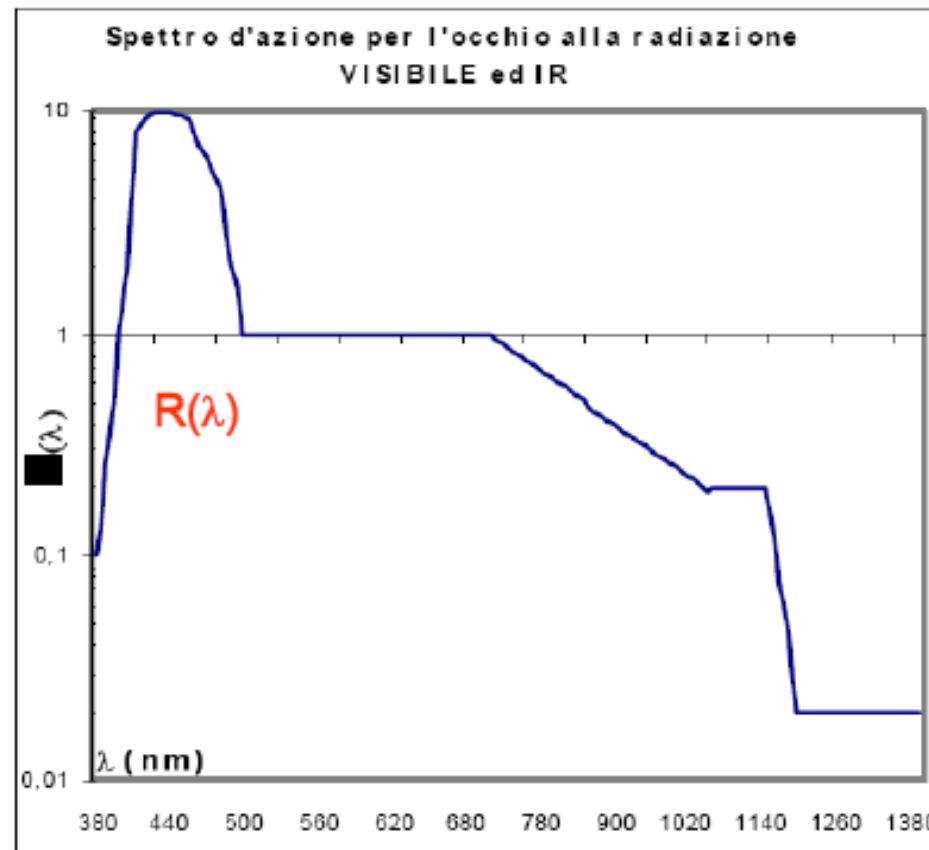


Lo spettro d'azione è il grafico del reciproco del valore dell'esposizione radiante che produce un dato effetto biologico ad ogni lunghezza d'onda.

Tutti i dati in tale curva sono normalizzati al valore corrispondente alla lunghezza d'onda a cui si ha la massima efficacia biologica della radiazione.

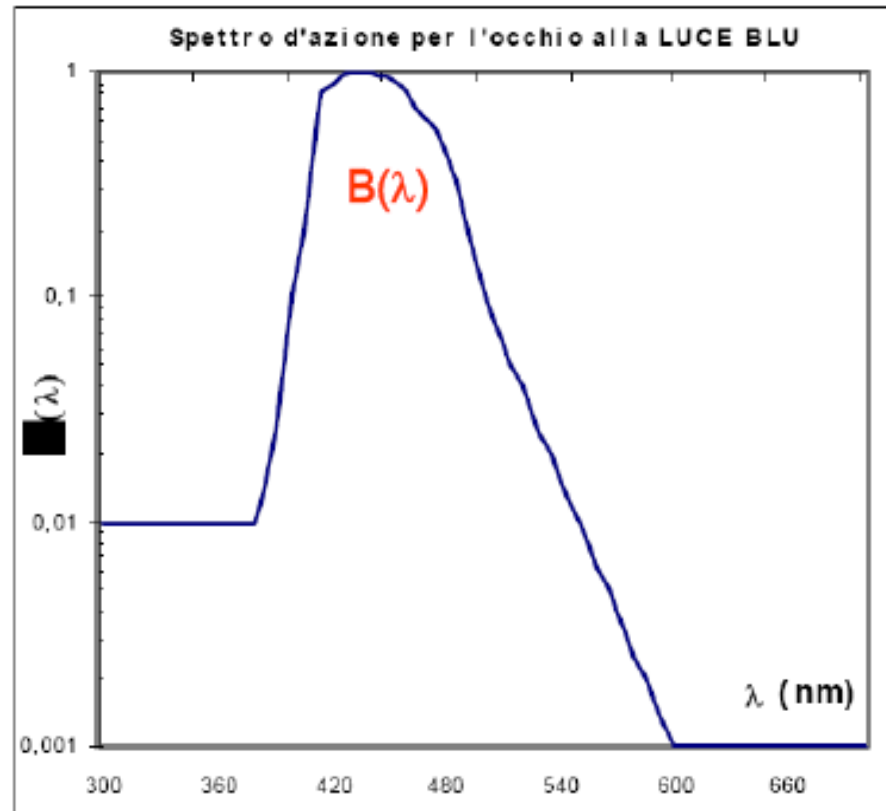
**Tiene conto della dipendenza dalla lunghezza d'onda dell'effetto biologico rappresentato dall'eritema cutaneo, nonché fotocheratite, congiuntivite e catarattogenesi**

## $R(\lambda)$ fattore *di peso spettrale* - da 380 a 1400 nm



Tiene conto della dipendenza dalla lunghezza d'onda delle lesioni termiche provocate sull'occhio (danno termico retinico)

$B(\lambda)$  fattore *di ponderazione spettrale* - da 380 a 700 nm



Tiene conto della dipendenza dalla lunghezza d'onda della lesione fotochimica provocata all'occhio dalla luce blu



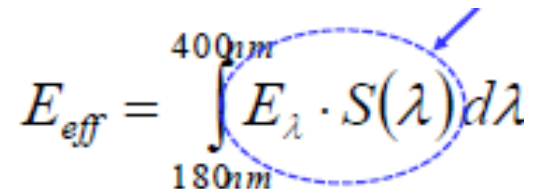
## Fattori di peso spettrale

- Nella tabella 1.2 sono riportati i fattori di peso spettrale  $S(\lambda)$  per  $180 < \lambda < 400$  nm
- Nella tabella 1.3 sono riportati i fattori di peso spettrale  $B(\lambda)$  e  $R(\lambda)$  per  $380 < \lambda < 1400$  nm

# Grandezze efficaci

Esempio:

Calcolo di una irradianza efficace secondo S (per rischio da UV)

$$E_{eff} = \int_{180nm}^{400nm} E_{\lambda} \cdot S(\lambda) d\lambda$$
The equation  $E_{eff} = \int_{180nm}^{400nm} E_{\lambda} \cdot S(\lambda) d\lambda$  is shown. A blue dashed oval encircles the integrand  $E_{\lambda} \cdot S(\lambda)$ . A blue arrow points to the top-right corner of this oval.

Esposizione radiante efficace secondo S

$$H_{eff} = \int_{t1}^{t2} E_{eff} dt$$

## ALLEGATO XXXVII del D.Lgs. 81/08 Parte I

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.

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)	$L_R = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda}(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot d\lambda$	(Cfr. tabella 1.1 per i valori appropriati di $\lambda_1$ e $\lambda_2$ )
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)

# VALORI LIMITE PER RADIAZIONI LASER (ROA COERENTI)



valori limite di esposizione per le radiazioni incoerenti sono riportati nell'allegato XXXVII, parte II, tabelle 2.2, 2.3, 2..4;

Essi sono espressi per mezzo delle seguenti grandezze fisiche:

GRANDEZZA	DEFINIZIONE	UNITA' DI MISURA
E	Irradianza	$W/m^2$
H	Esposizione radiante	$J/m^2$

Le suddette grandezze devono essere prese, di volta in volta, come riferimento ed assumono valori differenti (adottati quale valore limite, appunto) in funzione dei seguenti parametri:

PARAMETRO	DEFINIZIONE	UNITA' DI MISURA
$\lambda$	Lunghezza d'onda	nm
t	Tempo di esposizione	sec.
Apertura	Diametro di apertura del fascio	mm
Angolo sotteso	$\alpha$	mrad

- Data la variabilità dei casi, viene preliminarmente identificata una tabella (la tabella 2.1 dell'allegato XXXVII) per la scelta delle tabelle dei valori limite di riferimento.

**TABELLA 2.1**

Lunghezza d'onda [nm]	Campo di Radiazione	Organo interessato	Rischio	Tabella dei valori limite di esposizione
da 180 a 400	UV	Occhio	Danno fotochimica 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 fotochimica	2.3
da 400 a 700	Visibile	Cute	Danno termico	2.4
da 700 a 1400	IRA	Occhio	Danno termico	2.2, 2.4
da 700 a 1400	IRA	Cute	Danno termico	2.4
da 1400 a 2600	IRB	Occhio	Danno termico	2.2
da 2600 a 10 <sup>6</sup>	IRC	Occhio	Danno termico	2.2
da 1400 a 10 <sup>6</sup>	IRB,IRC	Occhio	Danno termico	2.3
da 1400 a 10 <sup>6</sup>	IRB,IRC	cute	Danno termico	2.4

In relazione, poi, alla durata dell'esposizione (breve o lunga) ed alla parte del corpo interessata dall'esposizione medesima, vengono proposte differenti tabelle riportanti i valori limite, secondo la seguente suddivisione:

- VALORI LIMITE DI ESPOSIZIONE DELL'OCCHIO A RADIAZIONI LASER (ESPOSIZIONE BREVE < 10 secondi)

TABELLA 2.2

- VALORI LIMITE DI ESPOSIZIONE DELL'OCCHIO A RADIAZIONI LASER (ESPOSIZIONE LUNGA > 10 secondi)

TABELLA 2.3

- VALORI LIMITE DI ESPOSIZIONE DELLA CUTE A RADIAZIONI LASER

TABELLA 2.4



**Grazie per l'attenzione**