

Università degli studi di Bologna
Facoltà di Ingegneria

**49498 - Acustica Applicata e
Illuminotecnica L (A-K)**

Dispensa n. 8

CENNI DI ILLUMINOTECNICA

Docente: Paolo Guidorzi

Rev. 9 gennaio 2008



Università degli studi di Bologna

49498 - ACUSTICA APPLICATA E
ILLUMINOTECNICA L (A-K)
Ing. Paolo Guidorzi

CENNI DI ILLUMINOTECNICA

Pag. 2

Indice

- 1 - Introduzione
- 2 - La propagazione della luce
- 3 - Le grandezze fotometriche
- 4 - Il flusso luminoso
- 5 - L'intensità luminosa
- 6 - La luminanza
- 7 - L'illuminamento
- 8 - La radianza
- 9 - Superfici isotrope e lambertiane

INTRODUZIONE

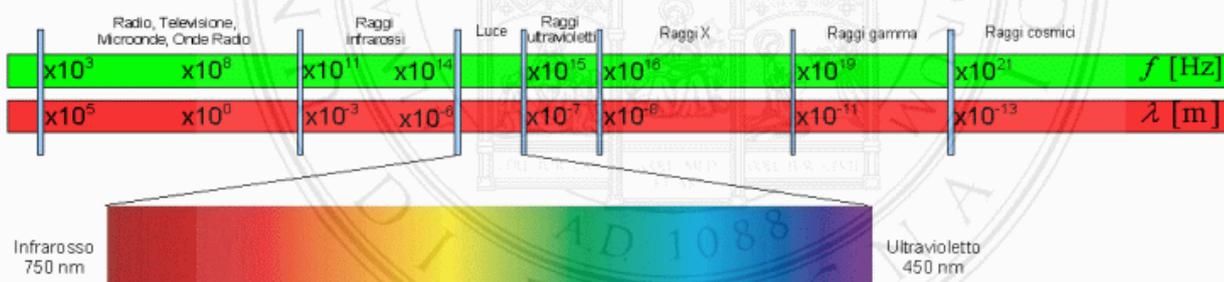
- Irraggiamento: trasmissione di energia a distanza senza trasporto di materia
- Un corpo a una certa temperatura emette energia radiante che si propaga
- Il corpo nero emette energia secondo la *Legge di Stefan-Boltzmann*
 $q_0 = \sigma_0 T^4 \quad [W / m^2]$ dove q_0 è l'energia emessa in tutto lo spettro, T è la temperatura assoluta del corpo $[K]$ e σ_0 è la costante di Stefan-Boltzmann, pari a $5,64 \cdot 10^{-8} \quad [W / m^2 K^4]$

In termini di potenza, considerando la superficie S : $Q = S \sigma_0 T^4 \quad [W]$

- Una radiazione elettromagnetica è caratterizzata da lunghezza d'onda, frequenza e velocità di propagazione nel mezzo.

- Vale la legge generale delle onde: $\lambda f = \frac{c_0}{n}$
 dove λ è la lunghezza d'onda (m oppure μm)
 f è la frequenza (Hz)
 n è l'indice di rifrazione del mezzo. Per l'aria e il vuoto vale 1
 c_0 è la velocità della luce nel vuoto, circa $3 \cdot 10^8$ m/s

- Ogni radiazione è caratterizzata da una lunghezza d'onda e da una frequenza



- La **frequenza** (Hz) è il numero di oscillazioni dell'onda in un secondo
- La **lunghezza d'onda** (m) è lo spazio percorso dall'onda in un periodo (ovvero il tempo impiegato per un'oscillazione, l'inverso della frequenza)
- L'**energia** associata alla radiazione elettromagnetica è proporzionale alla frequenza dell'onda secondo la relazione:

$$E = h \cdot f \quad [\text{J}]$$

h è la costante di Planck = $6,626 \cdot 10^{-34} [\text{J} \cdot \text{s}]$

- La **frequenza** di un'onda è univoca
- La **lunghezza d'onda** dipende dalla velocità di propagazione

$$\lambda f = \frac{c_0}{n}$$

- La lunghezza d'onda della luce varia tra 400 nm - 700 nm
Campo di variabilità 1-2
- La lunghezza d'onda del suono varia tra 4 m - 4 mm
Campo di variabilità 1-1000

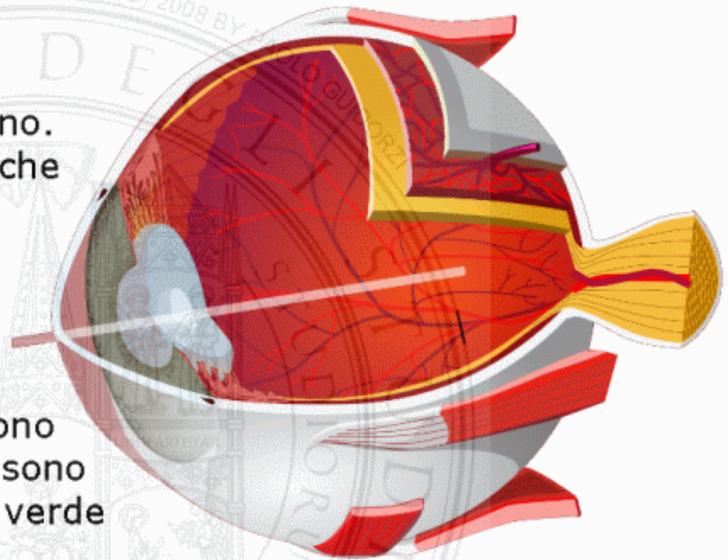
- La luce è recepita dall'occhio umano. Il sistema ottico è basato su lenti che concentrano l'energia sulla retina

- La **retina centrale** percepisce i dettagli, ha alta definizione, percepisce il contrasto e i colori.

Coni: distinguono i colori, forniscono visione precisa della luce intensa, sono di 3 pigmenti diversi, per il rosso, verde e blu.

- La **retina periferica** percepisce lo spazio circostante, ha bassa definizione, percepisce il movimento.

Bastoncelli: visione in bianco e nero, e a bassa intensità (visione notturna). E' presente un solo pigmento.



- La fotometria studia i legami tra ciò che l'occhio vede e ciò che la sorgente luminosa emette, nello spettro del visibile:

$$0,38\mu\text{m} < \lambda < 0,78\mu\text{m}$$

- La sensazione visiva dipende dalla potenza incidente sulla retina

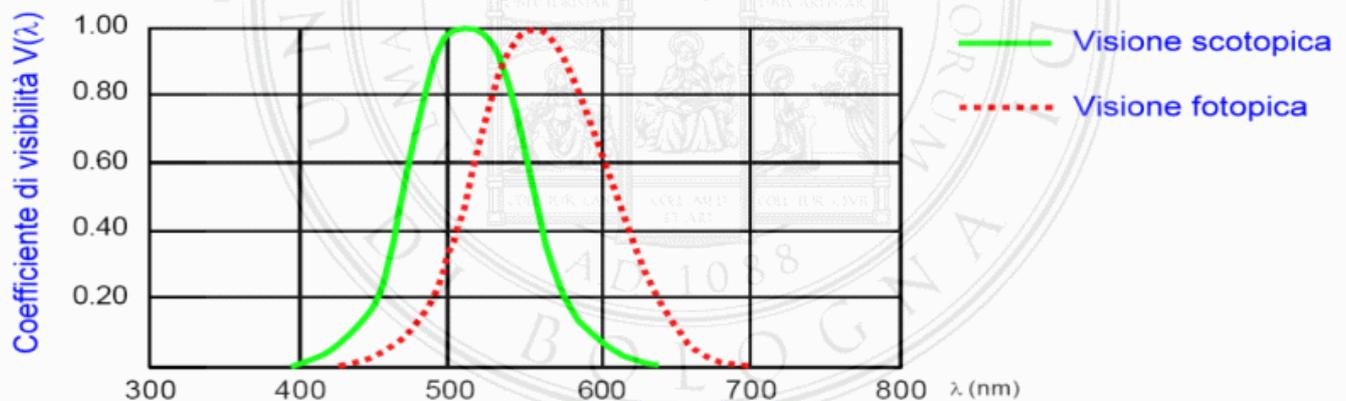
- L'occhio umano è sensibile in modo diverso alle diverse lunghezze d'onda. L'organismo CIE ha codificato un occhio con sensibilità media derivato da informazioni statistiche su molti soggetti.

- La sensibilità massima si ha intorno a $\lambda = 0,55\mu\text{m}$ (verde)

Per quantificare la sensibilità dell'occhio umano alle radiazioni a differente lunghezza d'onda si usa la funzione **fattore di visibilità $K(\lambda)$** .

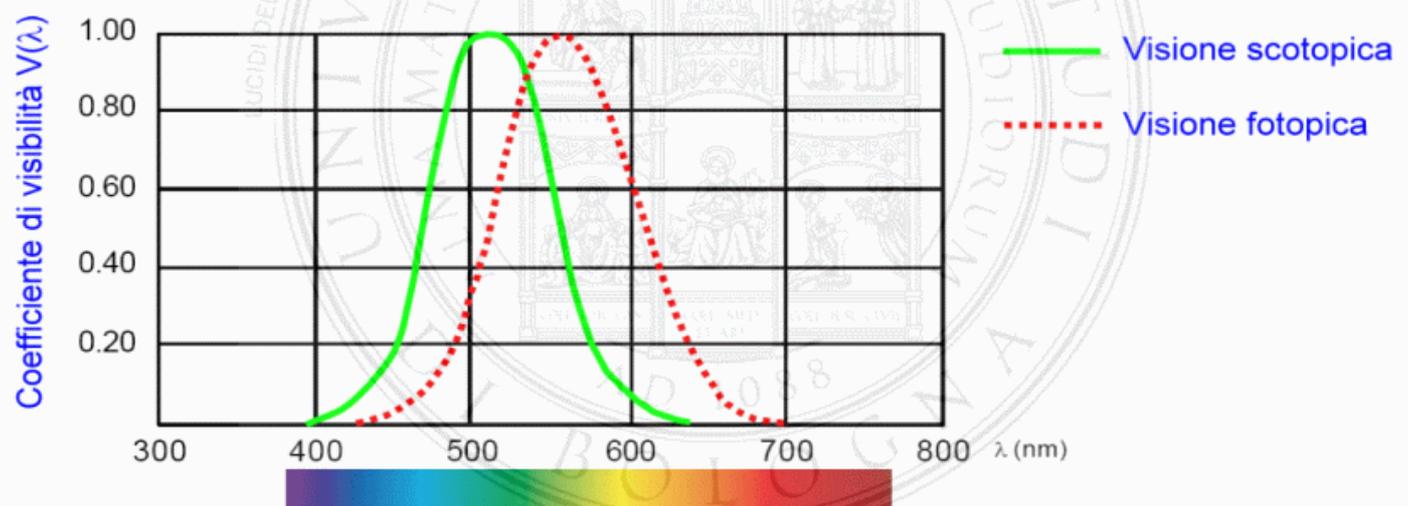
Il massimo di questo fattore, ovvero il massimo di sensazione di visibilità, $K(\lambda)=K_{max}$ si ha per $\lambda = 555$ nm (visione fotopica) o $\lambda = 510$ nm (visione scotopica).

Si definisce anche il **coefficiente di visibilità $V(\lambda)=K(\lambda)/K_{max}$** graficato nel seguente grafico, con le 2 curve per **visione diurna a colori (fotopica)** e **notturna in bianco e nero (scotopica)**



La **visione fotopica** è caratterizzata da nitida percezione dei colori e rapido adattamento alle variazioni di intensità. La **visione scotopica** invece è caratterizzata dalla visione monocromatica, lentezza dei processi di adattamento e scarsa definizione dell'immagine.

Il massimo di sensibilità per la visione scotopica si ha per una lunghezza d'onda minore rispetto alla visione fotopica (fenomeno di Purkinje), attorno all'azzurro-verde. Questo spiega perchè le guide ottiche di ospedali e aeroporti sono di questo colore



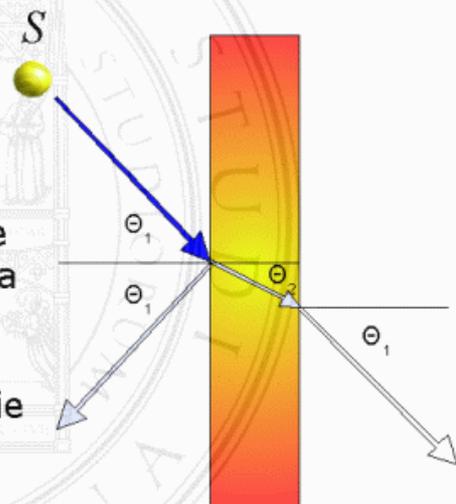
LA PROPAGAZIONE DELLA LUCE

La luce quando interagisce con lastre di materiale solido o superfici trasparenti, subisce fenomeni di riflessione, rifrazione, assorbimento e trasmissione.

Il **fattore di riflessione** di una superficie è il rapporto tra la quantità di luce riflessa e la quantità di luce incidente.

Il **fattore di trasmissione** di una superficie è il rapporto tra la quantità di luce trasmessa e la quantità di luce incidente.

Il **fattore di assorbimento** di una superficie è il rapporto tra la quantità di luce assorbita e la quantità di luce incidente.



La riflessione può essere:

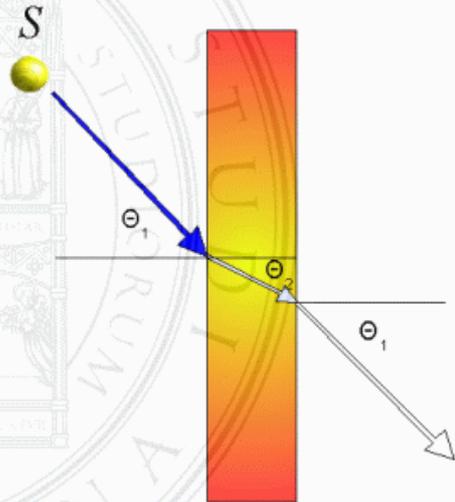
- **regolare**: l'angolo di riflessione è uguale all'angolo di incidenza.
Superfici speculari
- **diffusa**: la riflessione è uniforme in tutte le direzioni.
Superfici opache
- **mista**: combinazione di riflessione regolare e diffusa.



La **rifrazione** è il fenomeno di deviazione che la luce subisce all'interfaccia di un mezzo diverso. L'angolo della deviazione dipende dalle proprietà del mezzo.

La rifrazione può essere:

- **diretta** quando il mezzo lascia passare quasi tutto il raggio di luce (ad es. vetro)
- **diffusa** quando la luce dopo aver attraversato il mezzo si diffonde in tutte le direzioni (materiale traslucido)
- **mista** quando la luce si diffonde ma ha una direzione privilegiata

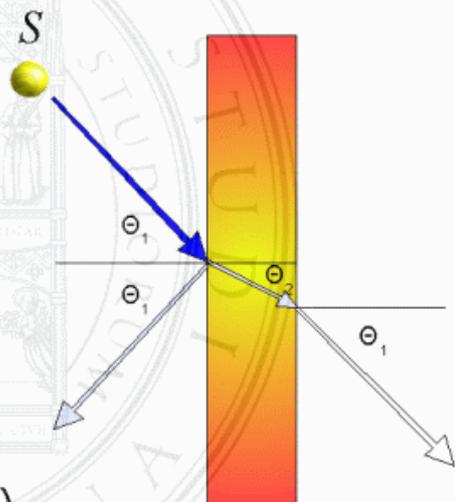


La **riflessione regolare** prevede che il raggio incidente e il raggio riflesso stiano sullo stesso piano e formino angoli di incidenza e riflessione uguali con la normale alla superficie.

Il raggio rifratto invece obbedisce alla legge di Snell:

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

dove n_1 e n_2 sono gli indici di rifrazione dei due mezzi (rapporti tra la velocità della luce nel vuoto e nel mezzo considerato)



LE GRANDEZZE FOTOMETRICHE

Flusso luminoso: Φ [lumen]**Intensità luminosa:** $I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$ [candela (lm/sr)]**Illuminamento:** $E = \frac{d\Phi_e}{dS}$ [Lux (lm/m²)]**Luminanza:** $L = \frac{dI}{dS \cos \vartheta}$ [Nit (cd/m²)] oppure [stilb (cd/cm²)]**Radianza:** $F = \frac{d\Phi_e}{dS}$ [Lux s.b. (lm/m²)]

IL FLUSSO LUMINOSO

Flusso luminoso: $\Phi = K_{\max} \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} V(\lambda) \cdot P(\lambda) \cdot d\lambda$ [lumen (lm)]nel caso di luce monocromatica: $\Phi(\lambda) = K_{\max} \cdot V(\lambda) \cdot P(\lambda)$ [lumen (lm)] $P(\lambda)$: potenza radiante [W] $K(\lambda)$: fattore di visibilità, varia nelle persone e con l'età K_{\max} : fattore di visibilità massimo ($\approx 680 \text{ lm/W}$) $V(\lambda)$: coefficiente di visibilità = $\frac{K(\lambda)}{K_{\max}}$

Il flusso luminoso quantifica la sensazione luminosa, legandola alla potenza dello stimolo, ovvero è la quantità di luce percepita dall'occhio. E' la parte del flusso energetico emesso da una sorgente luminosa ponderato dal coefficiente di visibilità.

L'INTENSITA' LUMINOSA

Intensità luminosa: $I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$ [candela (lm/sr)]

E' una grandezza vettoriale. Grandezza illuminotecnica fondamentale del **S.I.** Il flusso luminoso perciò è in realtà una grandezza derivata.

La candela è l'intensità luminosa, in una data direzione, di una sorgente che emette una radiazione monocromatica di frequenza 540×10^{12} Hz e la cui intensità energetica in tale direzione è di $1 / 683$ W/sr

ESEMPIO

Una sorgente puntiforme ha $I = \text{cost} = 200$ cd
Senza alcun proiettore si ha $\Omega = 4\pi$ e quindi un flusso = 2513 lm

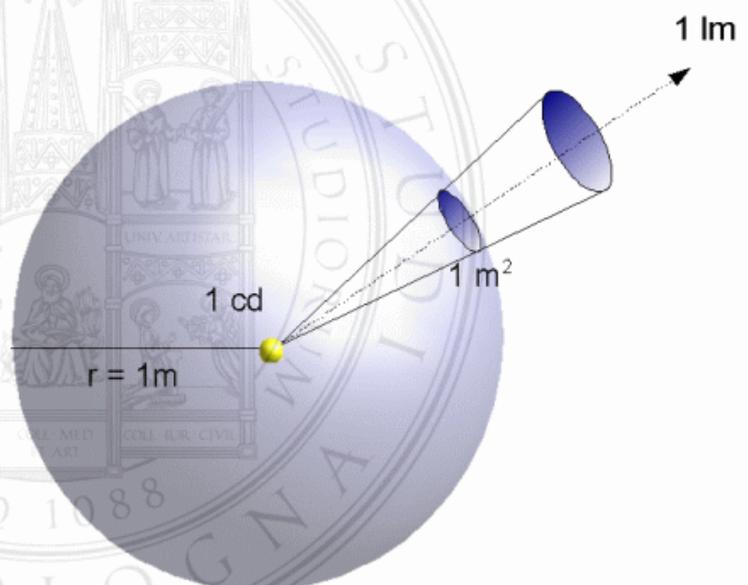
Se la sorgente è inserita in un proiettore tale che l'intensità I' risulta (dato che il flusso è costante): $d\Omega = \frac{4\pi}{1000}$

$$\Phi = \text{cost} = 4\pi \cdot I = \frac{4\pi}{1000} I' \Rightarrow I' = 1000 \cdot I = 200.000 \text{ cd}$$

Flusso luminoso: Φ [lumen (lm)]

Avendo definito l'intensità luminosa si può ora definire meglio il *lumen*:

Un lumen (lm) corrisponde al flusso luminoso emesso da una sorgente puntiforme di intensità pari a **1 cd** uscente da una superficie di **1 m²** intersecata su una sfera di raggio **1 m** (angolo solido **1 sr**).



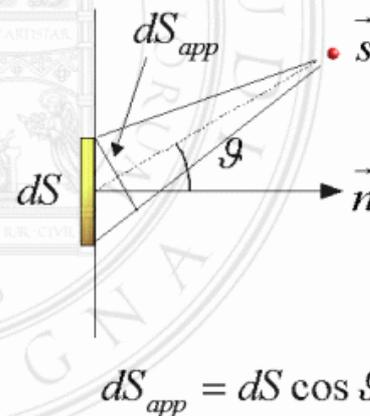
LA LUMINANZA

Luminanza: $L = \frac{dI}{dS_{app}}$ [Nit (cd/m²)] oppure [stilb (cd/cm²)]

E' il rapporto tra l'intensità luminosa in un punto di una superficie, osservata in una certa direzione, e la superficie emittente, proiettata su un piano perpendicolare alla direzione stessa.

La luminanza è legata alla visione e tiene conto della direzione di osservazione considerata.

E' importante nei calcoli dell'illuminotecnica, per valutare se si verifica il fenomeno dell'abbagliamento.



L'ILLUMINAMENTO

Illuminamento: $E = \frac{d\Phi_i}{dS}$ [Lux (lm/m²)]

E' il rapporto tra il flusso luminoso **incidente** sulla superficie elementare nell'intorno del punto considerato e la superficie elementare stessa.

Misura la quantità di luce che arriva su una superficie. **1 lux** corrisponde al flusso di **1 lumen** su una superficie di **1 m²**.

$$d\Phi = I d\Omega = I \frac{dS}{r^2} \quad E = \frac{d\Phi}{dS} = \frac{I}{r^2}$$

L'illuminamento cala col quadrato della distanza.

Se $r = 1$ m il numero di lux è uguale al numero di candele.

Illuminamento: $E = \frac{d\Phi_i}{dS}$ [Lux (lm/m²)]

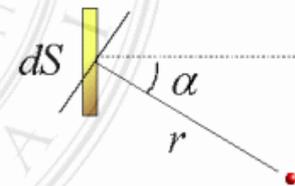
Illuminamento di superficie perpendicolare

$$d\Phi = Id\Omega = I \frac{dS}{r^2} \quad E = \frac{d\Phi}{dS} = \frac{I}{r^2}$$



Illuminamento di superficie inclinata

$$d\Phi = Id\Omega = I \frac{dS \cos \alpha}{r^2} \quad E = \frac{d\Phi}{dS} = \frac{I}{r^2} \cos \alpha$$



Calcoliamo ora l'illuminamento puntuale di una porzione di superficie S posta a distanza r da un punto P di una superficie elementare dS , essendo I_α l'intensità luminosa della sorgente in direzione di P e $d\Omega$ l'angolo solido sotto cui la sorgente vede dS

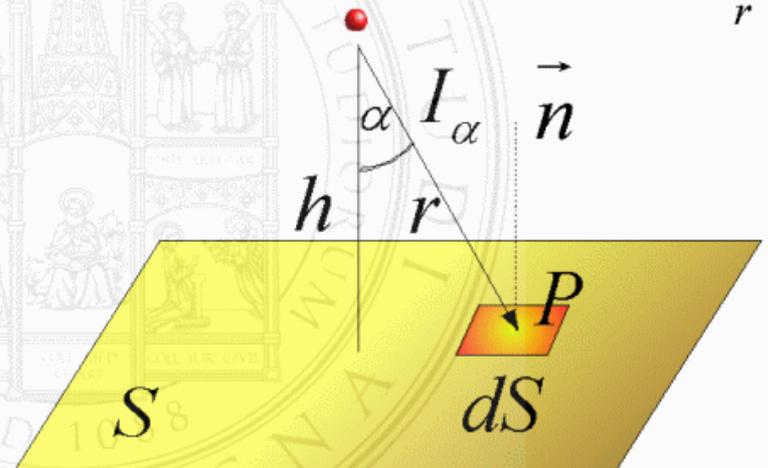
$$E_\alpha = \frac{d\Phi}{dS}$$

$$I_\alpha = \frac{d\Phi}{d\Omega}$$

$$\cos \alpha = \frac{h}{r}$$

$$dS = \frac{r^2 d\Omega}{\cos \alpha} \Rightarrow E_\alpha = \frac{d\Phi}{r^2 d\Omega} \cos \alpha$$

$$E_\alpha = \frac{d\Phi}{d\Omega} \frac{\cos^3 \alpha}{h^2} = I_\alpha \frac{\cos^3 \alpha}{h^2}$$



LA RADIANZA

Radianza: $F = \frac{d\Phi_e}{dS}$ [Lux s.b. (lm/m²)]

E' il rapporto tra il flusso luminoso **emesso** dalla superficie elementare nell'intorno del punto considerato e la superficie elementare stessa.

Corrisponde al prodotto dell'illuminamento E ricevuto dalla superficie considerata per il fattore di riflessione r della superficie:

$$F = \frac{d\Phi_e}{dS} = rE$$

$$E = \frac{d\Phi_i}{dS} \quad [\text{Lux (lm/m}^2\text{)}]$$

Per **r = 1** (superficie bianca e riflettente) si ha: **F = E**

Per **superfici lambertiane** (riflessione e trasmissione perfettamente diffuse) si può legare illuminamento e luminanza: **E = πL**

ESEMPIO

Una sorgente puntiforme ha Intensità luminosa = cost = 200 cd
Se coeff. di riflessione = 1 → F = E = 200 lux s.b. = 0,02 lambert
L'illuminamento vale:

$$E = \frac{I}{r^2} \Rightarrow \begin{cases} r = 1\text{m} \Rightarrow E = 200 \text{ lux} \\ r = 2\text{m} \Rightarrow E = 50 \text{ lux} \\ r = 3\text{m} \Rightarrow E = 22,2 \text{ lux} \end{cases}$$



$$\begin{aligned} 1 \text{ lux s.b.} &= \text{lumen} / \text{m}^2 \\ 1 \text{ lambert} &= \text{lumen} / \text{cm}^2 \\ [1 \text{ m}^2 &= 10000 \text{ cm}^2] \end{aligned}$$

Valori di riferimento:

Superficie bianca al sole, ore 12: $E=100.000$ lux
su superficie con $r=0,85$ $F=85.000$ lux s.b. = 8,5 lambert

Cielo sereno $F=2,3$ lambert

Cielo sereno vicino al sole $F= 6-10$ lambert

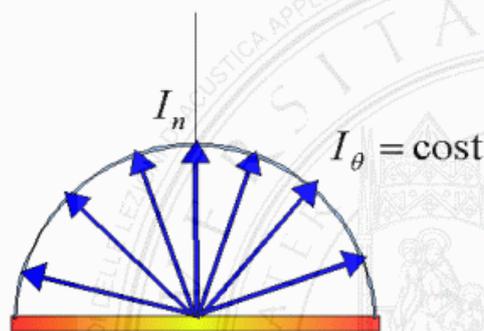
Nuvola chiara $F=2$ lambert

Nuvola bianca $F=1-6$ lambert

Luna piena $F= 2,4 \cdot 10^{-5}$ lambert

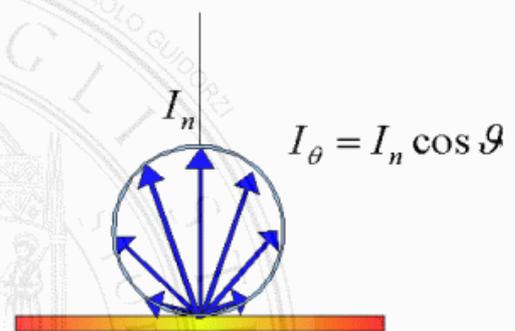
Superficie bianca al sole, $\alpha=60^\circ$: $E=100.000 \cdot \cos\alpha = 50.000$ lux
 $F=rE=42.500$ lux s.b. = 4,25 lambert

Se la superficie è lambertiana $L=F/\pi = 1,35$ cd/cm² (stilb)

SUPERFICI ISOTROPE E LAMBERTIANE**Superficie isotropa**

I raggi riflessi e trasmessi
sono emessi in tutte le
direzioni in eguale misura

La luminanza è la stessa in
ogni direzione

**Superficie lambertiana**

I raggi riflessi e trasmessi
seguono la legge

$$I_{\theta} = I_n \cos \theta$$