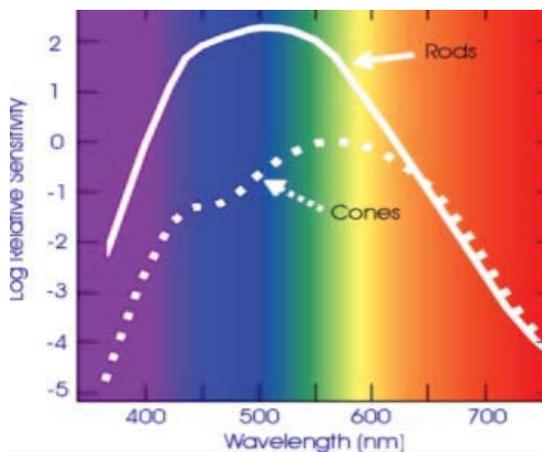


Grandezze fotometriche, illuminamento diretto e proprietà delle superfici

Influenza del livello di luce sul comportamento dei fotorecettori



Quando i recettori assorbono molta luce i loro fotopigmenti “sbiancano” e smettono il trasferimento dei segnali al cervello.

30 minuti di buio rigenerano i fotopigmenti.

I bastoncelli sono più sensibili dei coni.

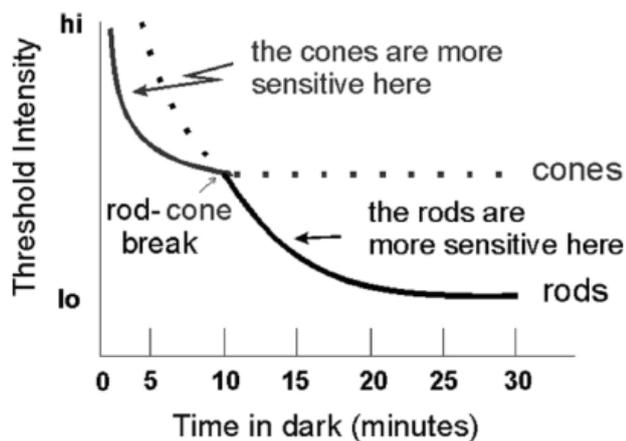
Per livelli di luce elevati i bastoncelli “saturano”, cioè la loro risposta non aumenta più al crescere della stimolazione.

I coni hanno la stessa sensibilità al blu (450 nm) ed al rosso (650 nm). Per cui, per valori elevati del livello di luce, non è difficile equalizzare la luminosità del blu e del rosso.

Riducendo il livello di luce fino alla soglia dei coni, i bastoncelli conservano ancora una sensibilità alta nella zona del blu-verde (visione mesopica) e questi colori appaiono più luminosi.

Riducendo il livello di luce sotto la soglia dei coni, la percezione dei colori sparisce (visione scotopica) ed il blu appare più luminoso.

Adattamento al livello di luce



Il passaggio da un ambiente molto luminoso ad un ambiente scarsamente illuminato comporta un tempo di adattamento per passare dal non vedere alcunché, al poter distinguere gli oggetti.

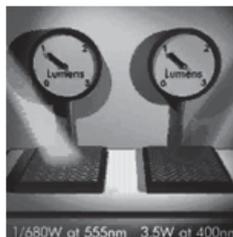
Nel passaggio dal buio alla luce piena la visione è degradata per un certo tempo. Le immagini appaiono inizialmente sbiadite, ovvero carenti di contrasto.

Una differenza importante tra il passaggio luce-buio ed il passaggio buio-luce è il tempo di adattamento. Nel primo caso l'adattamento completo si raggiunge dopo 30 minuti (figura). Nel secondo caso, in qualche minuto.

Nel passaggio luce-buio inizia un processo di rigenerazione dei pigmenti dei fotorecettori che recuperano la loro sensibilità piena.

Questo processo è più lento per i bastoncelli. Nei primi 10' è recuperata la soglia dei coni. La capacità visiva continua ad aumentare grazie alla sensibilità dei bastoncelli.

3



Razionale della derivazione delle grandezze fotometriche

Nel processo di formulazione del giudizio di luminosità la funzione visiva giudica con "peso" diverso la stessa potenza raggiante in dipendenza della lunghezza d'onda della radiazione.

Le descrizioni della luce in relazione alla visione umana **diventano più significative** se la potenza spettrale oggettiva è "pesata" a somiglianza del comportamento del sistema visivo umano, sia nel calcolo sia nella strumentazione di misura.

Allora:

Data una densità spettrale della potenza raggiante $w(\lambda)$;

La potenza raggiante elementare nell'intervallo $d\lambda$ intorno a λ è pari a $dW(\lambda) = w(\lambda)d\lambda$;

Per la percezione della luminosità questa potenza vale $V(\lambda)dW(\lambda) = V(\lambda)w(\lambda)d\lambda$ rispetto al valore della stessa potenza elementare intorno alla lunghezza d'onda di 555 nm dove è massima la sensibilità [$V(555 \text{ nm}) = 1$].

La somma degli infiniti contributi spettrali elementari pesati, ovvero l'integrale, fornisce una potenza pesata con la curva di visibilità relativa.

Flusso luminoso e flusso raggianti

Il flusso luminoso è la potenza raggianti il cui spettro viene pesato con $V(\lambda)$ e poi convertito, mediante una costante moltiplicativa, in unità fotometriche **lumen** il cui simbolo è **lm**.

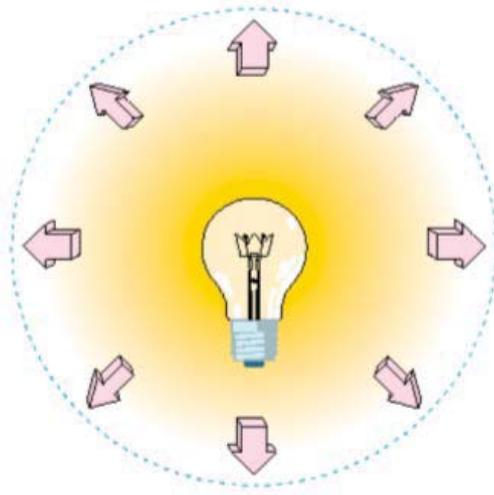
Per convenzione (CIE) ad 1 W a $\lambda = 555 \text{ nm}$ [$V(\lambda) = 1$] corrispondono 683,0 lm.

Per quanto detto, per il flusso luminoso Φ risulta:

$$\Phi = 683 \int V(\lambda)w(\lambda)d\lambda \quad (\text{lm})$$

dove $w(\lambda)$ è la densità spettrale della radiazione in W/m e λ è la lunghezza d'onda in m.

Il flusso raggianti è la potenza fisica in W (emessa ad es. da una sorgente di luce).



5

Intensità luminosa ed intensità raggianti

L'**intensità luminosa** è il flusso luminoso emesso da una sorgente puntiforme in un angolo solido unitario.

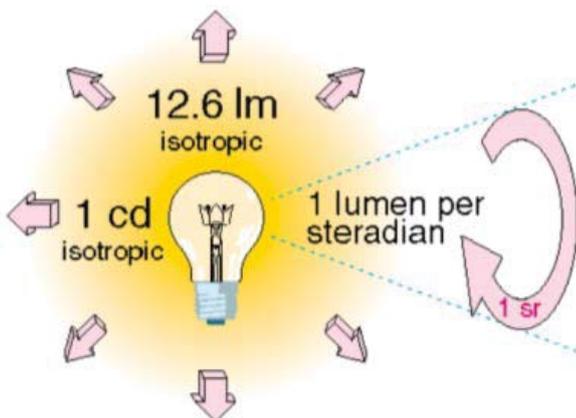
Dipende dalla direzione. L'unità di misura è lumen/sr (lm/sr) = candela (cd):

$$I_{\theta} = d\Phi/d\Omega \quad (\text{cd})$$

Se una sorgente irradia $I_{\theta} = 1 \text{ cd}$ uniformemente in tutte le direzioni (sorgente isotropica) emette un flusso luminoso $\Phi = 1 \times 4\pi = 12,6 \text{ lm}$. La relazione generale è:

$$\Phi = \int_{4\pi} I_{\theta} d\Omega \quad (\text{lm})$$

L'**intensità raggianti**, similmente, è la potenza fisica in W emessa da una sorgente puntiforme in un angolo solido unitario. Dipende dalla direzione. L'unità di misura è watt/steradiano (W/sr).



6

Esempi di valori dell'intensità luminosa



Candela = 1 cd



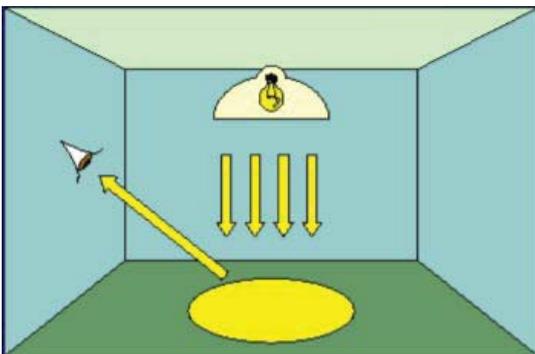
Lampadina da 100 watt = 110 cd



Sole = 3×10^{27} cd

7

Luminanza e radianza



La luminanza, in un certo punto di una superficie (reale o immaginaria) e lungo una certa direzione, è definita dalla relazione:

$$L = I_{\theta} / (dS \cos\theta) \quad (\text{cd/m}^2)$$

dove I_{θ} è l'intensità luminosa lungo la direzione di osservazione θ , rispetto alla normale nel punto di emissione che è contornato dalla superficie elementare dS .

Si noti che $dS \cos\theta$ è la superficie come appare all'osservatore. A parità di I_{θ} la luminanza è tanto più alta quanto più radente è la direzione di osservazione (θ tendente a 0).

La definizione implica che la luce proviene dalla superficie o come generazione o come rinvio.

Rispetto all'intensità luminosa, la luminanza è correlata meglio con la luminosità.

La radianza è analoga alla luminanza, fatta eccezione per l'intensità raggiante al numeratore. U.M. = $\text{W}/(\text{sr m}^2)$.

8

Luminanza (cd/m²) per varie sorgenti (valori approssimativi)



- Bomba atomica 0,1ms dopo l'esplosione = 2×10^{12} ;



- Candela in grasso di sperma di balena = 1×10^4 ;



- Folgore = 8×10^{10} ;



- Tubo fluorescente = 1×10^4 ;



- Pieno sole = 2×10^9 ;



- Cielo chiaro blu = 4×10^3 ;



- Flash fotografico = $2,5 \times 10^8$;



- Luna vista dalla terra = 3×10^3 ;



- Lampada opalina ad incandescenza da 60 W = $1,2 \times 10^5$;



- Cielo stellato = 5×10^{-4} ;

9

Illuminamento ed emetenza



L'illuminamento rappresenta la quantità di luce visibile sull'unità di area di una certa superficie ricevente.

La sua definizione puntuale è:

$$E = d\Phi/dS \text{ (lx) (lm/m}^2 = \text{lux)}$$

L'emetenza rappresenta il flusso riflesso o emesso per unità di superficie:

$$M = d\Phi_{\text{rif/em}}/dS \text{ (lx)}$$

Illuminamento medio in condizioni varie (valori approssimativi)



Parete soleggiata = 10^5 lx



Cielo coperto = 10^4 lx



Ufficio = 500 lx



Corridoio = 100 lx



Imbrunire = 50 lx



Viale di sera = 10 lx



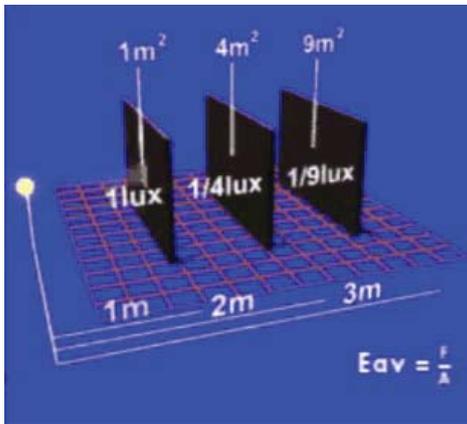
Al chiaro di luna = 0,5 lx



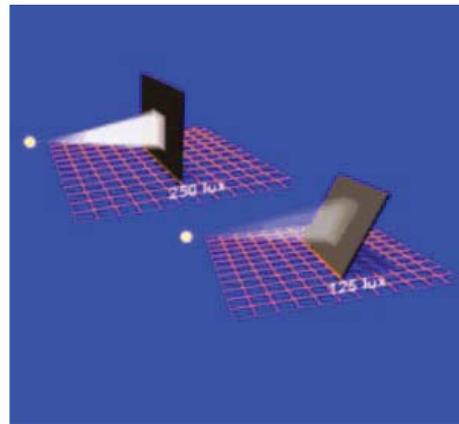
Sotto le stelle = 0,2 lx

10

Illuminamento diretto

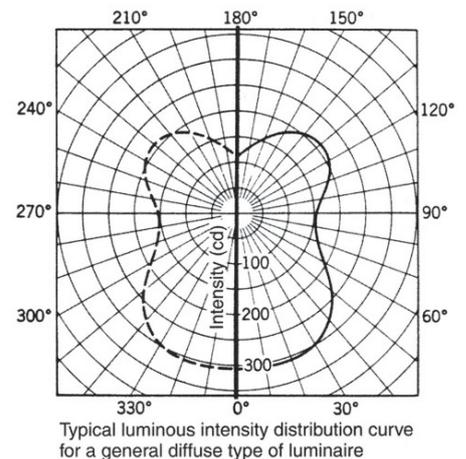
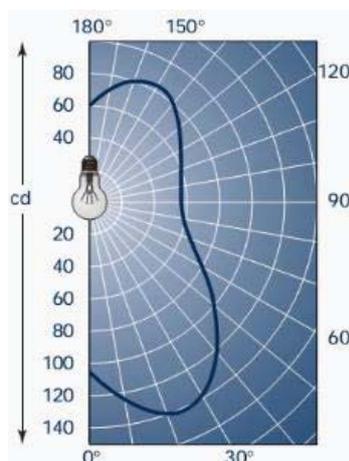
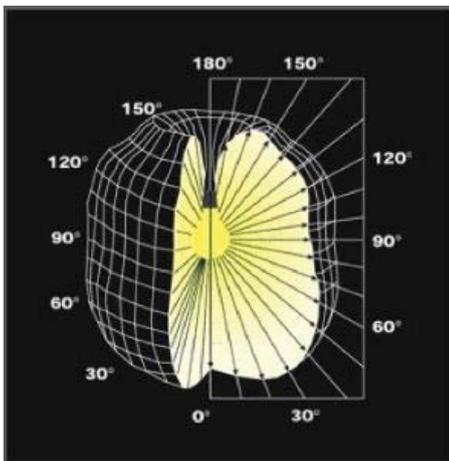


La **legge quadratica inversa** prevede che per un fascio di luce molto stretto l'illuminamento su una superficie normale all'asse del fascio decresce con il quadrato della distanza dalla sorgente puntiforme.

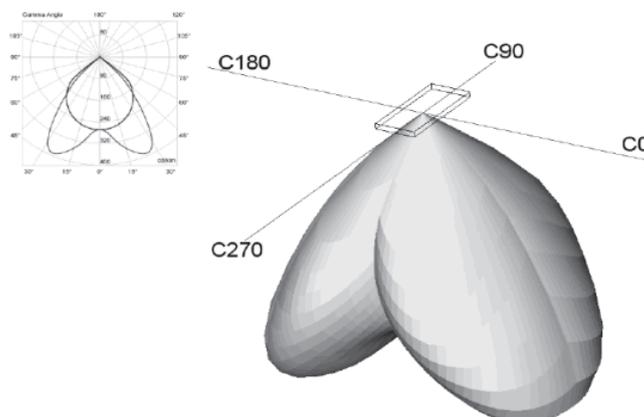


Se si inclina lo schermo, il fascio di luce intercetta un'area maggiore. Quindi, essendo costante il flusso del fascio, l'illuminamento sulla superficie diminuisce. Il rapporto tra il minore ed il maggiore è pari al coseno dell'angolo di inclinazione rispetto alla verticale (**Legge del coseno**).

Sorgenti luminose: solido fotometrico



Valori espressi in [cd] o [cd/klm]



Calcolo dell'illuminamento diretto

$$E_P = \frac{d\Phi}{dS} \quad \text{definizione}$$

$$I_\gamma = \frac{d\Phi}{d\omega} \quad \text{intensità in direzione } \gamma$$

$$dS_\gamma = dS \cos \gamma$$

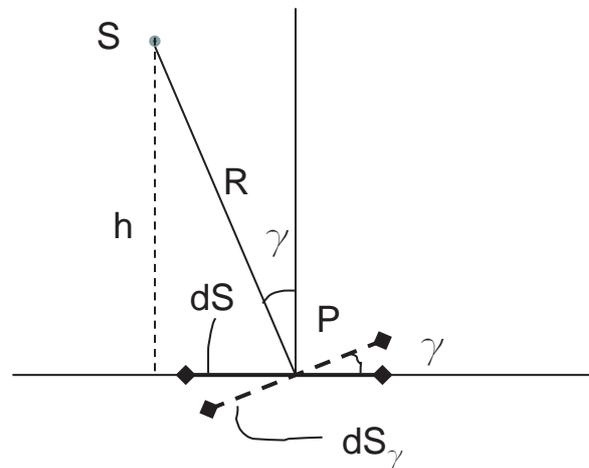
$$dS_\gamma = R^2 d\omega$$

quindi

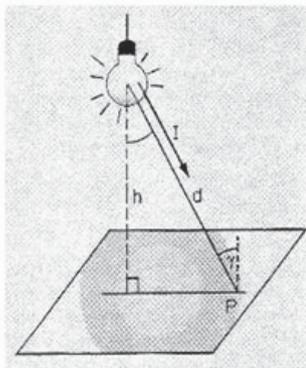
$$E_P = \frac{d\Phi}{dS} = \frac{d\Phi}{dS_\gamma} \cos \gamma = \frac{I_\gamma d\omega}{dS_\gamma} \cos \gamma = \frac{I_\gamma d\omega}{R^2 d\omega} \cos \gamma = \frac{I_\gamma \cos \gamma}{R^2}$$

ma

$$R \cos \gamma = h \quad E_P = \frac{I_\gamma \cos^3 \gamma}{h^2} \quad I_\gamma \quad \text{si ricava dal solido fotometrico}$$

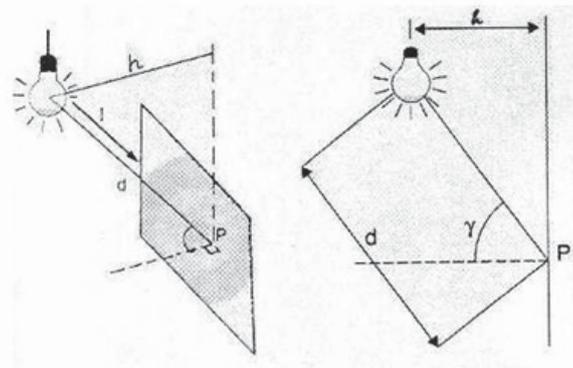


Illuminamento in un punto di una superficie, orizzontale o verticale, in funzione della distanza della sorgente



La formula del coseno in funzione dell'altezza h della sorgente rispetto al piano orizzontale si specializza nella seguente:

$$E_{PO} = I_\gamma \cos^3 \gamma / h^2$$



La formula del coseno in funzione della distanza h della sorgente dal piano verticale si specializza nella seguente:

$$E_{PV} = I_\gamma \cos^3 \gamma / h^2$$

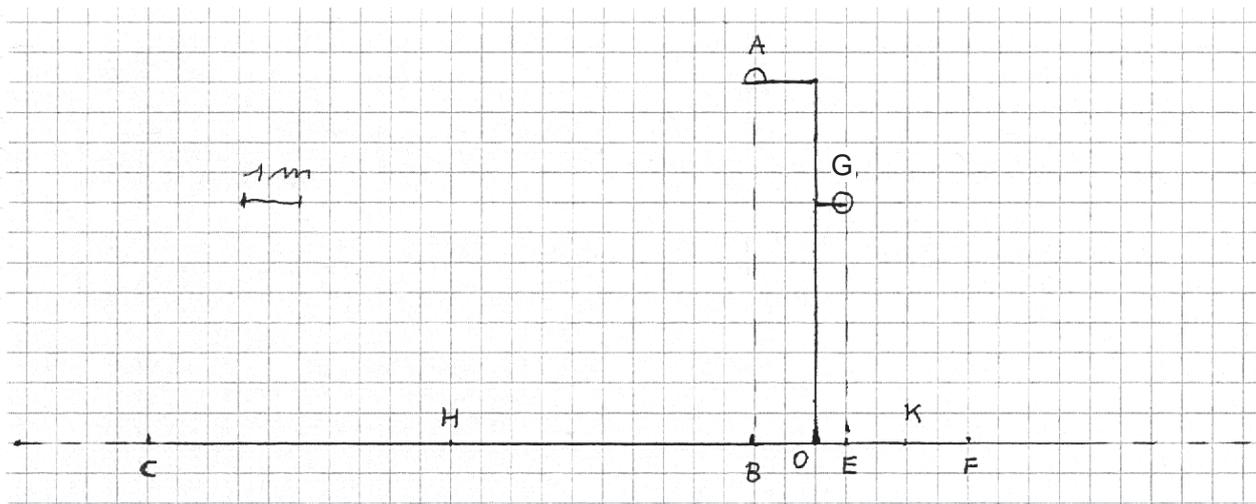
Esercizio

Due lampioni sono montati sul medesimo palo ad un'altezza di 6m e 4m ed illuminano rispettivamente una strada larga 10m e la pista ciclabile ad essa affiancata, larga 2m. I centri luminosi sono in asse con i cigli e i lampioni hanno solido fotometrico descritto dalle equazioni

$$I_{\gamma_1} = I_1 \cos^2(\gamma_1) \quad \text{per il più alto e} \quad I_{\gamma_2} = I_2$$

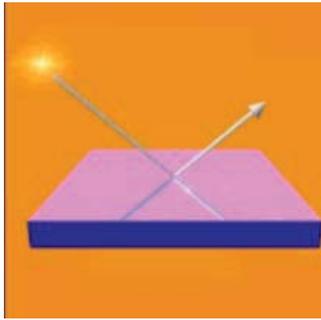
per il secondo, dove $I_1=710$ cd e $I_2=220$ cd. Basandosi sulla geometria in figura (in scala) calcolare:

- l'illuminamento fornito da ciascuno dei due lampioni sulle mezzerie H e K;
- l'illuminamento complessivo sulle mezzerie H e K.



Soluzione esercizio			
OB=	1 m	OE=	0.5 m
BC=	10 m	EF=	2 m
BH=HC=	5 m	EK=KF=	1 m
AB=	6 m	BE=	4 m
$I_1=$	710 cd	$I_2=$	220 cd
$I_{g1}=I_1 \cos^2(\gamma_1)$		$I_{g2}=I_2$	
Calcolo illuminamento primo lampione			
$E_1(H)=$	5.3 lx		39.8
$E_1(K)=$	13.2 lx		22.6
Calcolo illuminamento secondo lampione			
$E_2(H)=$	2.0 lx		58.4
$E_2(K)=$	12.6 lx		14.0
Calcolo illuminamenti totali			
$E(H)=$	7.3 lx		
$E(K)=$	25.8 lx		

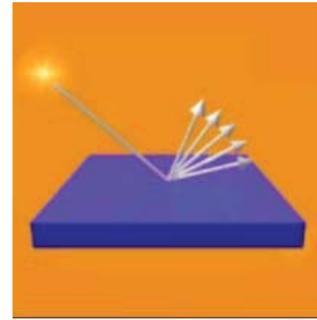
Proprietà delle superfici: modalità di rinvio della luce



Riflessione speculare: avviene secondo la legge di Snell per lo specchio ideale. Sebbene le riflessioni speculari producono immagini chiare, il flusso rinvio è relativamente basso. Una superficie liscia in acciaio inossidabile riflette per il 60%. Se di alluminio, riflette per l'85%.



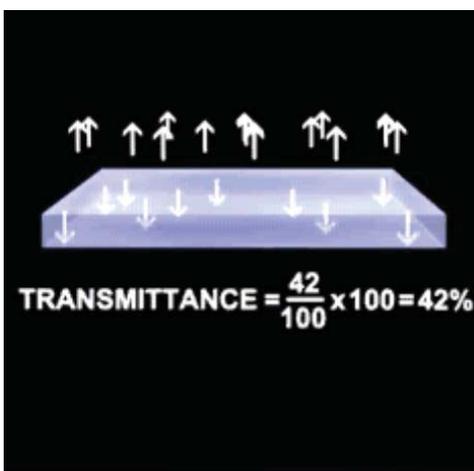
Riflessione diffusa: il flusso incidente lungo una direzione viene rinvio con intensità uniforme in tutte le direzioni. Non è riconoscibile alcuna immagine riflessa. E' il comportamento di superfici rugose e matte come l'intonaco a stucco usuale, tappeti, etc.



Riflessione mista: E' un comportamento intermedio rispetto ai primi due. Buona parte del flusso incidente lungo una certa direzione è rinvio in modo diffuso con una concentrazione di intensità intorno alla direzione speculare. A seconda del caso, è visibile un'immagine molto confusa o una macchia luminosa più intensa dell'intorno.

17

Proprietà delle superfici: trasmittanza



Certi materiali hanno la capacità di trasmettere e diffondere la luce.

Ad esempio le plastiche ed i vetri opalini utilizzati in certi apparecchi illuminanti.

Quando la luce incide su un materiale opalino, una parte è rinvio all'indietro, una parte viene assorbita dal materiale ed una parte viene trasmessa in modo diffuso.

Il rapporto tra il flusso luminoso trasmesso Φ_{tr} e quello incidente Φ_{inc} è un coefficiente di trasmissione totale detto trasmittanza:

$$\tau = \Phi_{tr} / \Phi_{inc}$$

quantità adimensionale espressa anche in %.

Se si fa riferimento alla superficie unitaria, la trasmittanza coincide con il coefficiente di trasmissione.

18



La superficie di Lambert

Si consideri l'elemento di superficie dS . Sia dI_α l'intensità luminosa lungo la direzione α , rispetto alla normale n , che collega il centro dell'elemento dS con l'osservatore (a).

La luminanza osservata è:

$$L = dI_\alpha / (dS \cos\alpha)$$

Si pone il quesito:

Quale è la distribuzione angolare dell'intensità perché si osservi per ogni α la stessa luminanza?

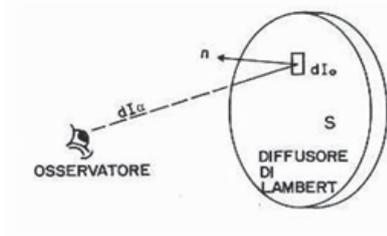
La risposta è:

$$dI_\alpha = dI_0 \cos\alpha$$

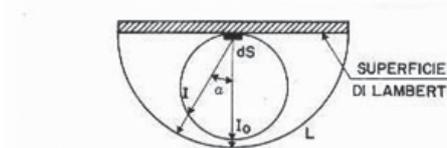
Infatti, sostituendo nella relazione della luminanza, si ottiene:

$$L = dI_\alpha / dS = \text{costante}$$

Come è mostrato in (b), se l'intensità emessa dall'elemento di superficie segue una legge angolare $\cos\alpha$ con il valore massimo dI_0 lungo n , la luminanza dell'elemento emittente non dipende dalla direzione di osservazione α ed è pari a dI_0 / dS .



(a)



(b)

Conseguenze della diffusione secondo Lambert

Siano dati l'elemento dS , che emette secondo Lambert, ed una sfera tangente in P. L'illuminamento sull'elemento di superficie opposto diametralmente è:

$$dE_0 = dI_0 / r^2$$

In un altro punto generico a distanza x dal punto di tangenza risulta:

$$dE_p = dI_\alpha \cos\alpha / x^2$$

Siccome:

$$x = r \cos\alpha \text{ e } dI_\alpha = dI_0 \cos\alpha$$

risulta:

$$dE_p = (dI_0 \cos^2\alpha) / (r^2 \cos^2\alpha) = dI_0 / r^2 = dE_0 = \text{costante}$$

Prima conseguenza: l'illuminamento dovuto all'emissione di un elemento della sfera è uguale su tutti gli altri elementi della superficie interna.

