

CAPITOLO 6

ILLUMINOTECNICA

6.1 Generalità

L'illuminotecnica si occupa di illuminazione artificiale e naturale sia di spazi esterni che interni con lo scopo di consentire buone prestazioni visive in condizioni di *comfort visivo*. Spesso nel progetto di illuminotecnica hanno grande importanza gli obiettivi estetici. Essenziale punto di partenza è la **fotometria**, che riguarda lo studio quantitativo dei rapporti esistenti fra la sensazione visiva e le radiazioni elettromagnetiche visibili (λ compresa tra 0.38 e 0.78 [μm]).

Come noto, vale la relazione:

$$c = \lambda \cdot f$$

dove:

c = velocità della luce (in aria circa $3 \cdot 10^8$ [m/s]);

f = frequenza [Hz].

Inoltre, come si ricorderà, le radiazioni elettromagnetiche sono **emesse/assorbite** in forma di quantità discrete (**quanti**) caratterizzati da un'energia proporzionale alla loro frequenza, in accordo con la **relazione di Planck**:

$$E = h \cdot f$$

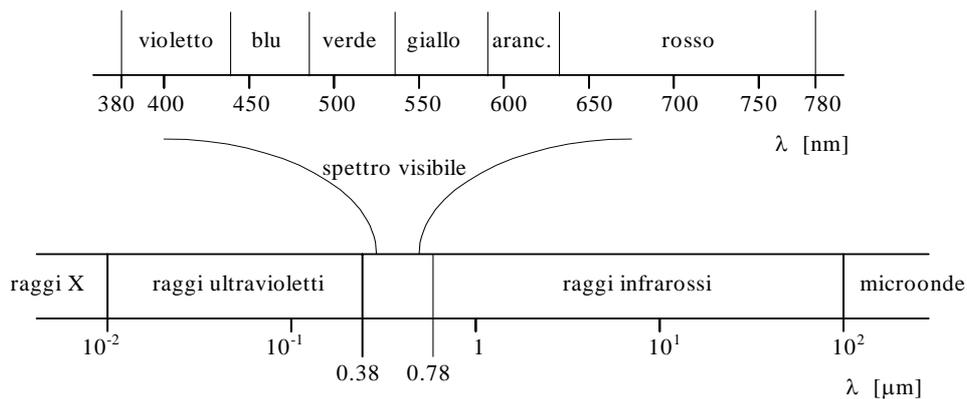
ove :

h = costante di Planck ($h = 6.63 \cdot 10^{-34}$ [J/s]).

Si può osservare che un fascio di radiazioni composto da onde di tutte le lunghezze d'onda (policromatico) con identica potenza per unità di λ e cioè:

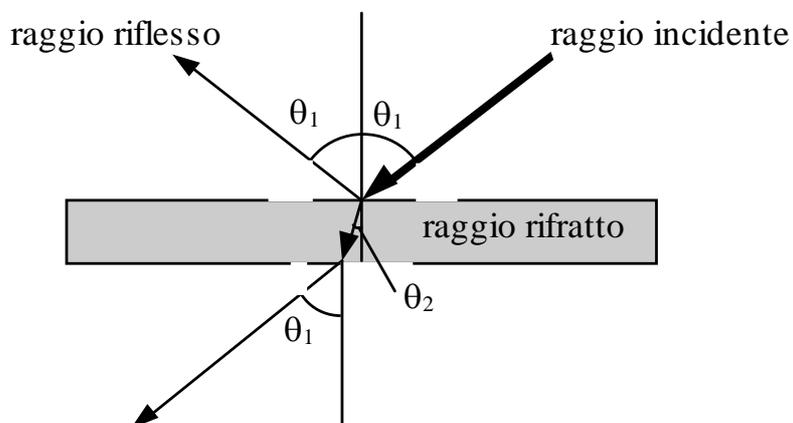
$$P_\lambda = \frac{d\phi_\lambda}{d\lambda} = \text{cost.}$$

appare al nostro occhio come **luce bianca**. Un fascio monocromatico (λ compresa in un intervallo $d\lambda$ ($\lambda + d\lambda/2$ e $\lambda - d\lambda/2$)) si manifesta al nostro occhio, al variare di λ , come **luce diversamente colorata**.



6.2 Cenni di ottica geometrica

In molte situazioni di nostro interesse, un raggio luminoso può essere rappresentato con un segmento di retta tracciato a partire dalla sorgente (**ottica geometrica**). Ad esempio, per rappresentare la luce divergente emessa da una sorgente si può fare riferimento ad un fascio di semirette con la stessa origine. Ovviamente, solo nel caso di sorgente sufficientemente lontana, i raggi potranno essere considerati paralleli. In un mezzo omogeneo e trasparente, quale può essere considerata l'aria, la luce si propaga in linea retta. Come tutte le onde, anche la luce visibile è soggetta a fenomeni di **rifrazione**, **riflessione**, **assorbimento**, **trasmissione**, ad esempio, quando interagisce con una lastra liscia di materiale trasparente. Per quanto riguarda la **rifrazione** della luce si può accennare che questo fenomeno consiste nella **deviazione** che i raggi luminosi subiscono attraversando l'interfaccia di separazione tra due mezzi trasparenti (ad esempio: aria-vetro). In figura è rappresentato un raggio di luce incidente su una superficie (liscia) di un mezzo trasparente (ad esempio una lastra di vetro).



In questo caso (**rifrazione regolare**) il raggio incidente e quello rifratto giacciono nello stesso piano e vale la relazione:

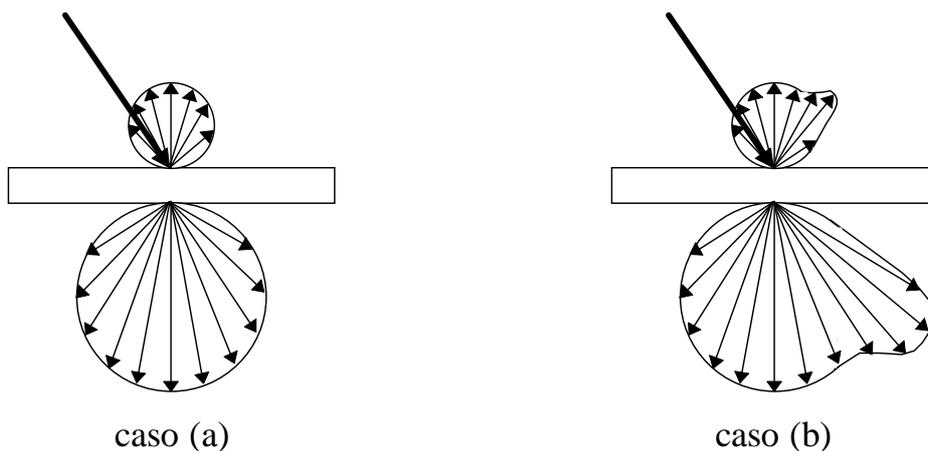
$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

ove:

n_1, n_2 = indici di rifrazione assoluti dei due mezzi (rapporto tra la velocità della luce nel vuoto c e rispettivamente nel mezzo **1** (aria) e **2** (vetro)). Anche il raggio riflesso (**riflessione regolare**) giace sullo stesso piano del raggio incidente e forma con la normale alla superficie angoli d'incidenza e di riflessione eguali.

Se le superfici di separazione tra i mezzi **non sono più perfettamente lisce** possono verificarsi vari casi qualitativamente rappresentati in figura.

- **Riflessione e trasmissione perfettamente diffusa (lambertiana)**: i raggi riflessi e trasmessi sono emessi in tutte le direzioni in eguale misura (per unità di area normale alla direzione di propagazione).
- **Riflessione e trasmissione miste**: i raggi riflessi e trasmessi presentano, almeno in parte, il ricordo delle direzioni preferenziali che caratterizzano i casi della riflessione speculare e della rifrazione regolare. Questi casi, intermedi tra le due situazioni limiti precedenti (regolare e perfettamente diffusa), costituiscono il caso più comune nella pratica.



6.3 Cenni sulla struttura e sul funzionamento dell'occhio

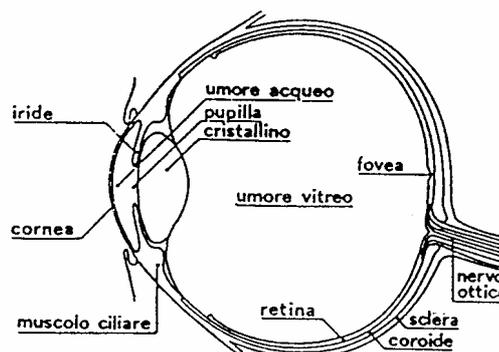
In figura è rappresentata una sezione schematica di un occhio umano. La luce, dopo essere penetrata nel cristallino, passa attraverso l'umor vitreo, (sostanza gelatinosa limpida che riempie il bulbo oculare dietro il cristallino) fino a incidere sulla retina ove si forma l'immagine. Sulla retina sono presenti due tipi di cellule fotosensibili dette **bastoncelli** e **coni** sensibili alla quantità di luce che incide nell'unità di tempo sulla retina. Coni e bastoncelli contengono particolari sostanze fotosensibili (pigmenti), la cui struttura chimica può essere alterata dalla luce.

La quantità di pigmento distrutta nell'unità di tempo provoca stimoli nervosi i quali, attraverso meccanismi solo in parte chiariti, passano al cervello attraverso il nervo ottico per l'interpretazione della visione. I segnali emessi dalle cellule fotosensibili nervosi vengono già in parte elaborati nella retina stessa che risulta, dal punto di vista fisiologico, un vero e proprio tessuto celebrale.

I bastoncelli sono concentrati soprattutto ai bordi della retina, mentre i coni sono prevalentemente ammassati in una piccola area centrale detta *fovea*.

I **bastoncelli** (circa 125 milioni) sono responsabili della visione in bianco e nero a bassa intensità (visione notturna) e cioè della potenza energetica visibile della radiazione, mentre i **coni** (circa 7 milioni) responsabili della distinzione dei colori forniscono una visione precisa alla luce intensa del giorno, ma sono poco utili di notte o con luce tenue. Il pigmento presente nei **bastoncelli** è detto *porpora retinica* mentre nei **coni** sono presenti **tre pigmenti diversi** (iodopsine): **uno** dei quali **assorbe fortemente** nella regione spettrale dei **rossi**, un **altro** nei **blu** e infine un **altro** nei **verdi**.

Radiazioni policromatiche sono, pertanto, analizzate solo in base **all'entità complessiva dello stimolo** causato in **ogni singola regione spettrale**. I tre stimoli vengono elaborati dal cervello per decidere di quale colore si tratti (teoria tricromatica di Young e Helmholtz).



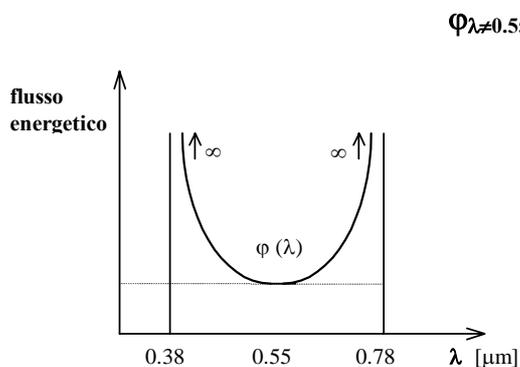
6.4 Fotometria, sensazione visiva e fattore di visibilità

Si può osservare che la sensazione visiva dipende dalla potenza incidente sulla retina in analogia col funzionamento di una telecamera. Inoltre, quando una radiazione luminosa di potenza costante investe l'occhio, la conseguente sensazione raggiunge rapidamente il suo valore definitivo che rimane poi costante. Il valore di regime della sensazione si raggiunge in tempi assai rapidi (dell'ordine di 0,1 [s]) per cui, nei problemi di normale tecnica dell'illuminazione, **non si prendono normalmente** in considerazione fenomeni luminosi di **carattere transitorio**.

Aspetti particolari, quali ad esempio visione in condizioni di traffico notturno veloce o applicazioni fondate sulla successione di sensazioni di breve durata o rapidamente variabili, richiederanno considerazioni più approfondite.

Per studiare il comportamento dell'occhio umano, prescindendo dalla percezione cromatica, si usa una particolare tecnica detta *di sfarfallamento*. La tecnica si basa sul fatto che una persona che osservi due fasci luminosi monocromatici (con λ diverse) che si alternino l'un l'altro con opportuna frequenza (**sfarfallamento**) viene a perdere la percezione delle differenze cromatiche.

Grazie a questa tecnica si è potuto evidenziare che l'occhio umano non è ugualmente sensibile alla potenza energetica dei due fasci monocromatici a diversa λ e cioè due fasci luminosi con la **stessa potenza energetica** potranno essere **giudicati** più o meno luminosi a seconda della loro λ . In particolare, l'osservatore giudicherà più intensa la luce a $\lambda = 0.55$ [μm], ove l'occhio presenta quindi massima sensibilità, mentre stimerà progressivamente meno intensa la luce con λ **maggiore o minore**. Oltre il limite inferiore di **0.38** e superiore di **0.78** [μm] non si avrà, poi, alcuna percezione visiva. Risulterà sempre:



$$\Phi_{\lambda \neq 0.55} > \Phi_{\lambda = 0.55}$$

cioè, muovendosi verso i due limiti inferiore (**0.38** [μm]) e superiore (**0.78** [μm]) dello spettro visibile, occorrerà, per ottenere un giudizio di equivalenza relativo ai due fasci luminosi, incrementare progressivamente la potenza della radiazione come rappresentato in figura.

Si osserva, quindi, che l'occhio presenta massima sensibilità a $\lambda = 0.55$ [μm] ove, si ricordi si ha anche la massima emittanza solare. Per tener conto della diversa sensibilità dell'occhio e poter introdurre grandezze tecniche significative (grandezze psicofisiche o fotometriche) la potenza di un generico fascio luminoso Φ_λ viene moltiplicata per un **coefficiente di visibilità** V_λ funzione di λ :

$$V_\lambda \cdot \Phi_\lambda = V_{\max} \cdot \Phi_{\lambda=0.55}$$

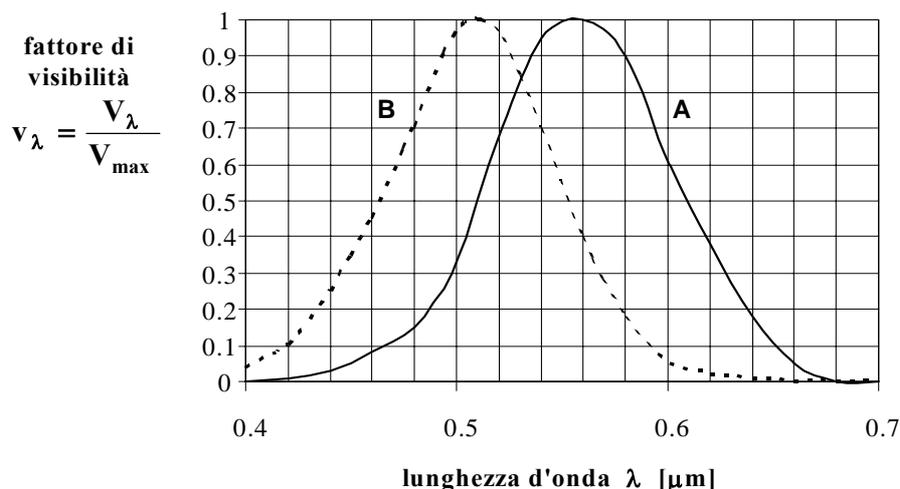
ove:

V_{\max} = massimo coefficiente di visibilità ($\lambda = 0.55$ [μm]).

Le misure prima ricordate consentono però di valutare solo il rapporto V_λ/V_{\max} o **fattore spettrale di visibilità** v_λ e cioè:

$$v_\lambda = \frac{V_\lambda}{V_{\max}} = \frac{\Phi_{\lambda=0.55}}{\Phi_\lambda}$$

L'esperienza dimostra che l'andamento di v_λ (curva **A** continua nella seguente figura) è indipendente dai livelli di potenza degli stimoli solo sopra di una soglia e cioè per luci piuttosto intense corrispondenti a condizioni di buona illuminazione (**visione diurna o fotopica**). Nel caso di luci molto deboli (**visione notturna o scotopica**) l'andamento del corrispondente fattore di visibilità risulta spostato a sinistra (curva **B** tratteggiata in figura).



Questi due tipi di visione sono dovuti ai due diversi tipi di recettori sensibili alla luce, cioè i bastoncelli responsabili della visione scotopica (notturna) e i coni per la visione fotopica (diurna) e la percezione dei colori.

6.5 Grandezze ed unità fotometriche

La necessità di distinguere gli effetti luminosi da quelli energetici in relazione alla sensibilità dell'occhio porta all'introduzione delle seguenti grandezze fotometriche.

6.5.1 Flusso luminoso ϕ_l

Come già osservato, due radiazioni monocromatiche λ_1 e λ_2 saranno giudicate egualmente luminose, e cioè equivalenti tra loro, solo se risulterà:

$$V_{\lambda_1} \cdot \phi_{\lambda_1} = V_{\lambda_2} \cdot \phi_{\lambda_2}$$

Nel caso di **luce monocromatica** si definisce, quindi, **flusso luminoso ϕ_l** il prodotto tra il flusso energetico ϕ_λ ed il coefficiente di visibilità V_λ (attitudine ad impressionare l'occhio).

Il flusso luminoso viene espresso in unità fotometriche dette **lumen [lm]**:

$$\phi_l = V_\lambda \phi_\lambda \quad [\text{lm}]$$

Il coefficiente V_λ risulterà espresso in:

$$V_\lambda = \frac{\phi_l}{\phi_\lambda} \quad [\text{lm/W}]$$

A $\lambda = 0.55$ [μm] (massima sensibilità per visione fotopica), si fissa:

$$V_{\max} = \frac{\phi_l}{\phi_{\lambda=0.55}} = 683 \quad [\text{lm/W}]$$

Pertanto, a questa λ un flusso energetico unitario ($\phi_{\lambda=0.55} = 1$ [W]) corrisponderà a un flusso luminoso $\phi_l = 683$ [lm]. Ad una λ generica V_λ sarà minore di V_{\max} essendo

$$V_\lambda = v_\lambda \cdot V_{\max}.$$

Nel caso di sorgente policromatica che emetta nell'intervallo ($\lambda_1 - \lambda_2$) radiazioni con potenza $P_\lambda = \frac{d\phi_\lambda}{d\lambda} = f(\lambda)$ si ipotizza un effetto complessivo pari alla somma dei

flussi luminosi elementari $d\phi_l = V_\lambda \cdot d\phi_\lambda = V_\lambda \cdot P_\lambda d\lambda$.

Il totale flusso luminoso può allora porsi nella forma:

$$\phi_l = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} d\phi_l = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} V_\lambda \cdot P_\lambda \cdot d\lambda$$

Inoltre, si può scrivere anche:

$$\varphi_1 = V_m \cdot \varphi$$

ove V_m rappresenta il valore medio del coefficiente V_λ pesato in relazione a φ_λ :

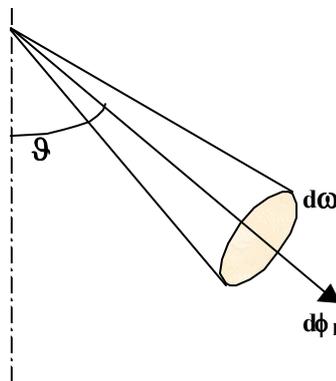
$$V_m = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} V_\lambda \cdot P_\lambda d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P_\lambda d\lambda}$$

e φ la potenza energetica totale:

$$\varphi = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P_\lambda \cdot d\lambda$$

6.5.2 Intensità luminosa I

La definizione presuppone il riferimento ad una sorgente puntiforme o di piccole dimensioni rispetto alla distanza d'osservazione. In pratica, una sorgente può considerarsi puntiforme quando le sue dimensioni trasversali sono all'incirca 1/5 - 1/10 della distanza da cui la sorgente è osservata.

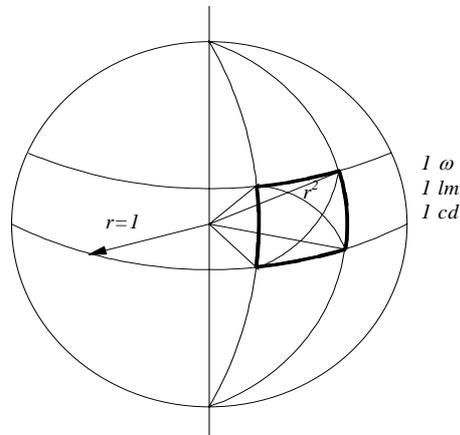


L'**intensità luminosa I** in un'assegnata direzione viene definita come il rapporto tra il flusso luminoso $d\varphi_1$ emesso e l'angolo solido $d\omega$ centrato attorno la stessa direzione:

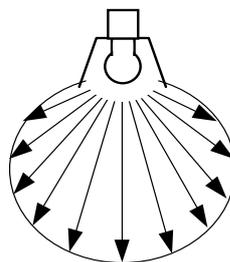
$$I = \frac{d\varphi_1}{d\omega} \quad [\text{cd}]$$

L'**intensità luminosa** è un vettore caratterizzato da modulo, direzione e verso. Nel **Sistema SI** l'intensità luminosa rappresenta, soprattutto per ragioni storiche, la grandezza fotometrica fondamentale; la sua unità di misura è detta **candela** (simbolo **cd**). Nella seguente figura una *sorgente puntiforme isotropa* posta al centro di una sfera di raggio unitario emette un flusso luminoso complessivo di 4π [lm]. Nell'angolo solido

unitario ($\omega = 1$ [sr]) viene pertanto emesso **1** [lm] e anche l'intensità luminosa in ogni direzione della sorgente è unitaria (**1** [cd]).



L'intensità luminosa è una grandezza essenziale per caratterizzare le varie sorgenti luminose. Ad esempio, se per una sorgente si conosce come cambia l'intensità luminosa **I** nelle varie direzioni di emissione, sarà anche noto il totale flusso luminoso Φ_1 emesso dalla sorgente. Gli estremi dei vettori intensità luminosa caratterizzanti una particolare sorgente nelle varie direzioni individuano nello spazio un **solido**, detto **fotometrico**. Nel caso di sorgenti caratterizzate da simmetria di rotazione intorno ad un'asse, il solido fotometrico può essere descritto da una rotazione di una sua sezione attorno all'asse. In questo caso si può considerare una **curva fotometrica** del tipo rappresentato nella seguente figura. Essa può essere di varie forme e dipende evidentemente anche dal tipo di armatura che viene posizionata attorno alla sorgente luminosa per riflettere e/o diffondere il flusso luminoso emesso.



Noto il particolare solido fotometrico di una sorgente, o la sua curva fotometrica, il totale flusso luminoso Φ_1 può essere valutato mediante la relazione:

$$\Phi_1 = \int_0^{4\pi} I \, d\omega$$

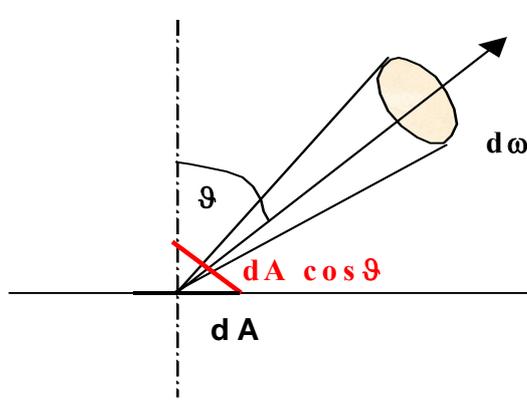
Ovviamente, se $I = \text{cost.}$ si ottiene immediatamente $\varphi_1 = I \cdot 4\pi$, altrimenti la valutazione per via analitica di questo integrale è subordinata alla conoscenza della funzione $I = I(\omega)$. In molti casi è sufficiente procedere ad una valutazione approssimata, ad esempio, noto il solido o la curva fotometrica, il flusso può essere determinato con metodi grafici, suddividendo il totale angolo solido di emissione (4π) in n porzioni e valutando in ciascuna di queste il relativo valore dell'intensità **luminosa media** I_n . Il totale flusso luminoso φ_1 emesso dalla sorgente si può valutare con la relazione:

$$\varphi = \sum_{i=1}^{i=n} (I_n \cdot \frac{4\pi}{n})$$

6.5.3 Luminanza L_ϑ

Si definisce **luminanza di una sorgente nella direzione ϑ** il flusso luminoso emesso per unità di area proiettata normalmente alla direzione di propagazione e per unità di angolo solido. Risulta, quindi:

$$L_\vartheta = \frac{d^2\varphi_{1\vartheta}}{dA \cdot \cos \vartheta \cdot d\omega}$$

	<p>Nel caso in cui la superficie emettente il flusso luminoso sia lambertiana (luce emessa uniformemente diffusa in tutte le direzioni) risulta:</p> $L = L_\vartheta = L_n$ <p>cioè la luminanza è costante ed indipendente dalla direzione ϑ di emissione della luce.</p>
---	---

Si può anche scrivere:

$$L_\vartheta = \frac{d}{\cos \vartheta \cdot dA} \left(\frac{d\varphi_{1\vartheta}}{d\omega} \right) = \frac{dI_\vartheta}{dA \cdot \cos \vartheta}$$

e cioè come rapporto tra l'intensità luminosa I_ϑ della sorgente nella direzione di emissione e l'area apparente della stessa (superficie che si vede dal punto di osservazione). La luminanza si esprime in **cd/m²** o **nit** (1 [nit] = 1 [cd/m²]), sottomultiplo dello **stilb** (1 [stilb] = 1 [cd/cm²]). Ovviamente 1 [stilb] = 10⁴ [nit].

Il concetto di luminanza presenta fondamentale importanza in illuminotecnica, ad esempio, se la luminanza di una sorgente luminosa osservata secondo una particolare direzione risulta elevata potranno verificarsi fenomeni di non comfort (abbagliamento).

6.5.4 Emetenza luminosa M_1

Si definisce **emetenza luminosa M_1** il flusso luminoso emesso in tutte le direzioni da una sorgente per unità di area della stessa. Ovvero:

$$M_1 = \frac{d\phi_1}{dA} \quad [\text{lm/m}^2]$$

L'emetenza luminosa, nel sistema fotometrico, si esprime in lumen/m²; si ricorda che, nel caso **di superficie lambertiana**, vale la relazione:

$$M_1 = \pi \cdot L$$

che esprime il legame tra il totale flusso luminoso emesso in tutte le direzioni del semispazio sovrastante la superficie emettente (emetenza luminosa) e la luminanza **L**.

6.5.5 Illuminamento E

Se anziché, alla sorgente, ci si riferisce alla superficie che riceve il flusso luminoso, si definisce **illuminamento E** il flusso luminoso ivi incidente per unità di area:

$$E = \frac{d\phi_1}{dS} \quad [\text{lux}] \quad (1 [\text{lux}] = 1 [\text{lm/m}^2])$$

In genere, come si vedrà in seguito, molti calcoli di illuminotecnica consistono nel verificare il raggiungimento o meno dei prescritti valori dell'illuminamento su opportune superfici piane (ad esempio su un piano ove si svolge una particolare attività). Si può anticipare che l'occhio è in grado di percepire un illuminamento che va da **0.2** a **100000** [lux]. Si consideri ora una superficie, caratterizzata da un **fattore di riflessione medio** della luce **ρ** , sottoposta ad un illuminamento **E** ; un elemento di area **dS** su di essa rifletterà nel semispazio sovrastante un flusso luminoso totale pari a :

$$d\phi_1 = \rho \cdot E \cdot dS$$

e cioè la superficie apparirà caratterizzata da un'emetenza luminosa:

$$M_1 = d\phi_1 / dS = \rho \cdot E$$

Se la superficie riflettente presenta comportamento lambertiano, la superficie sarà anche caratterizzata da una **luminanza costante**, indipendente dalla direzione di osservazione ($L_g = L = \text{cost}$):

$$L = M_1 / \pi = \rho \cdot E / \pi.$$

In modo del tutto simile, una lastra traslucida con fattore di trasmissione medio τ , purché perfettamente diffondente (e cioè a comportamento lambertiano), sarà caratterizzata da una luminanza costante pari a:

$$L = M_1 / \pi = \tau \cdot E / \pi$$

Lastre traslucide, con trasmissione di tipo lambertiano, consentono la realizzazione di superfici luminose caratterizzate da un'identica luminanza per tutte le direzioni di osservazione. Questi effetti sono frequentemente utilizzati in illuminotecnica per ridurre la luminanza delle sorgenti luminose (apparecchi diffusori).

6.6 Intensità luminosa e sistema SI

Le grandezze fotometriche definite sono:

1) **flusso luminoso:** $\Phi_1 = V_\lambda \Phi_\lambda$ o $\Phi_1 = V_m \cdot \Phi$ [lm]

2) **intensità luminosa:** $I = \frac{d\Phi_1}{d\omega}$ [cd]

3) **luminanza:** $L_\vartheta = \frac{d^2\Phi_{1\vartheta}}{dA \cdot \cos\vartheta \cdot d\omega}$ [cd/m²]

4) **emettanza luminosa:** $M_1 = \frac{d\Phi_1}{dA}$ [lm/m²]

5) **illuminamento:** $E = \frac{d\Phi_1}{dS}$ [lux]

In queste **5 relazioni** compaiono, oltre alle già note grandezze **S.I.** (lunghezza, superficie, potenza, ecc), **6** nuove grandezze fotometriche (**V_λ**, **Φ₁**, **I**, **L**, **M₁**, **E**) e, poiché non esistono altre relazioni tra queste grandezze, risulta evidente che una di queste dovrà essere fissata arbitrariamente.

Nel **sistema S.I.** la **candela** (grandezza fondamentale) era definita come frazione (**1/60**) dell'intensità luminosa **I_n** emessa da **1 cm²** di un **corpo nero** a **2039 K**.

Attualmente, dopo la XVI Conferenza Generale dei Pesi e delle Misure (1979), per ragioni di opportunità pratica la **candela** è stata ridefinita come l'intensità luminosa di una radiazione monocromatica (**λ = 0.555**) di potenza **Φ_λ = 1/683 W** emessa entro un angolo solido unitario. Pertanto, ad una radiazione monocromatica (**λ = 0.555**) di potenza **Φ_λ = 1 W** corrisponde un flusso luminoso **Φ₁ = 683 lm**.

ESERCIZI ED ESEMPI

- 1) Una sorgente luminosa isotropa emette un flusso luminoso $\Phi_1 = 6000$ [lm]. Quanto vale l'intensità luminosa di questa sorgente?

In questo caso (sorgente luminosa isotropa) il solido fotometrico o luogo geometrico dei vettori intensità luminosa è sferico. Il flusso luminoso Φ_1 emesso è:

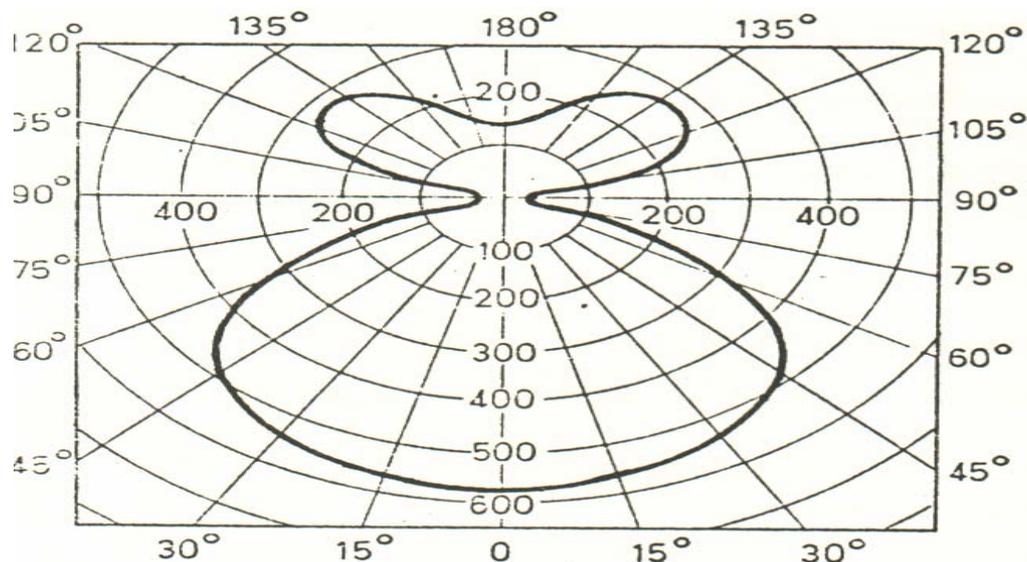
$$\Phi_1 = \int_0^{4\pi} I \, d\omega$$

e quindi per $I = \text{cost.}$ si ottiene immediatamente $\Phi_1 = I \cdot 4\pi$.

Risulta:

$$I = \frac{\Phi_1}{4\pi} = \frac{6000}{4 \cdot 3.14} = 477.7 \text{ [cd]}$$

- 2) La figura rappresenta la curva fotometrica di una sorgente luminosa caratterizzata da simmetria di rotazione attorno al suo asse verticale. Quanto vale l'intensità luminosa rispettivamente nelle direzioni formanti angoli di 30° e 60° ?



Dal diagramma risulta, rispettivamente:

$$I_{30^\circ} \cong 540 \text{ [cd]}$$

$$I_{60^\circ} \cong 300 \text{ [cd]}$$

- 3) L'illuminamento notturno realizzato sulla facciata di un edificio da un proiettore luminoso è $E = 100$ [lux]. Quale sarà la luminanza L assunta dalla facciata se la sua superficie fosse mattoni a vista ($\rho_{ma} = 0.1$) oppure fosse intonacata bianca ($\rho_{in} = 0.8$).

Nel caso di comportamento lambertiano la luminanza della superficie illuminata sarà costante (indipendente dalla direzione di osservazione) ma dipenderà dal fattore di riflessione della superficie.

Si avrà, nei due casi:

$$L_{ma} = \rho_{ma} \cdot E / \pi = \frac{0.1 \cdot 100}{3.14} = 3.2 \text{ [cd/m}^2\text{]}$$

$$L_{in} = \rho_{in} \cdot E / \pi = \frac{0.8 \cdot 100}{3.14} = 25.5 \text{ [cd/m}^2\text{]}$$