

CAPITOLO 7

CENNI SULLE SORGENTI LUMINOSE

7.1 Generalità

Come noto, le odierne sorgenti luminose sono alimentate elettricamente per cui, per quantificare le loro prestazioni ed effettuare confronti, è necessario fare riferimento al concetto di “efficienza luminosa”. Si definisce **efficienza luminosa η_l di una sorgente** il rapporto tra il flusso luminoso emesso Φ_l [lm] e la potenza elettrica assorbita **P** [W].

$$\eta_l = \frac{\Phi_l}{P}$$

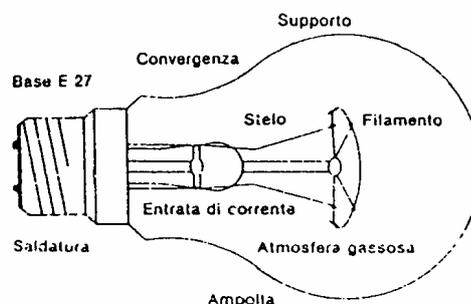
L'efficienza luminosa η_l si esprime, pertanto, in **lm/W**. Appare evidente che una sorgente luminosa consumerà, a parità di flusso luminoso prodotto, tanto meno energia elettrica quanto più elevata sarà la sua efficienza luminosa. Le odierne sorgenti luminose possono essere classificate in tre gruppi:

- a) **ad incandescenza;**
- b) **a luminescenza;**
- c) **a fluorescenza.**

7.1.1 Sorgenti ad incandescenza

Le sorgenti luminose ad incandescenza realizzano l'emissione di luce mantenendo ad alta temperatura un filamento metallico di tungsteno (simbolo chimico **W**). Il flusso energetico necessario a tale scopo è ottenuto facendo attraversare direttamente il filamento da corrente elettrica (effetto Joule).

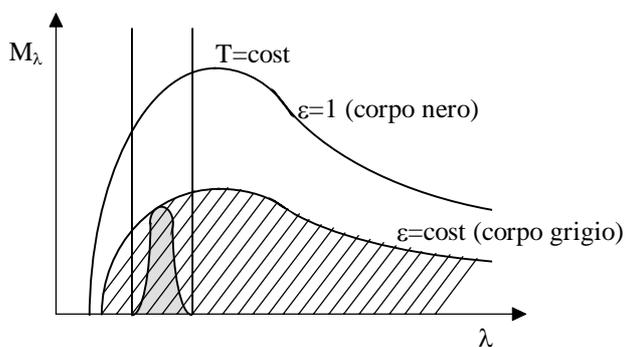
Le lampade ad incandescenza comprendono un bulbo di vetro al cui



interno viene sorretto un filamento di tungsteno sorretto da sostegni metallici. Il bulbo è chiuso da un attacco che serve per il collegamento con la linea d'alimentazione elettrica.

In una normale lampadina la potenza elettrica fornita al filamento d'elevata resistenza elettrica, si trasforma in potenza termica per l'effetto Joule. In condizioni di regime la potenza termica fornita deve essere smaltita verso l'esterno sia per irraggiamento dalla superficie del filamento, sia anche, in misura minore, per conduzione e convezione.

Si consideri, ad esempio, una sorgente luminosa costituita da una superficie incandescente d'area unitaria a temperatura T . Trascurando le perdite di potenza per conduzione e convezione, ed ipotizzando per semplicità che la superficie del filamento sia assimilabile ad un corpo grigio ($\epsilon = \text{cost}$), è facile intuire dal seguente diagramma



come l'efficienza luminosa di questa sorgente non possa che essere ridotta.

La potenza elettrica impiegata per mantenere a temperatura costante la superficie in esame deve eguagliare il totale flusso emesso per irraggiamento termico. Come noto, questo flusso è rappresentato

dall'area tratteggiata; il flusso luminoso è proporzionale all'area punteggiata in grigio (fattore di proporzionalità V_m). Appare, quindi, subito evidente la ragione per cui l'efficienza luminosa η_l di questo tipo di sorgenti non possa essere elevata: buona parte del flusso energetico è emesso nella regione infrarossa.

Nelle prime lampade ad incandescenza si praticava il vuoto nell'ampolla e la temperatura di lavoro del filamento era di circa 2300-2450 [K], il che comportava efficienze luminose alquanto ridotte dell'ordine di 10 [lm/W]. Attualmente le sorgenti ad incandescenza più sofisticate raggiungono efficienze luminose solo di poco più elevate (fino a 21-24 [lm/W]).

Per aumentare l'efficienza η_l è, quindi, necessario aumentare la temperatura del filamento. Tuttavia, al crescere di questa aumenta pure la pressione di vapore del tungsteno e quindi anche la sua velocità di sublimazione, per cui il filamento, assottigliatosi per evaporazione, si fulmina con maggiore rapidità.

Un artificio adottato per rallentare la sublimazione del tungsteno, e quindi l'assottigliamento del filamento, fu quello di riempire il bulbo della lampada con piccole quantità di gas inerte (azoto); il che però determinava anche un incremento delle perdite per convezione termica. A quest'ultimo inconveniente si poté in parte ovviare sia incrementando la temperatura di funzionamento sia realizzando il filamento stesso in forma di spirale. Entrambi i provvedimenti risultano positivi: il primo in quanto la potenza dissipata dal filamento sotto forma di energia radiante cresce con la temperatura più rapidamente di quella dissipata per convezione termica, il secondo in quanto consente di ridurre l'entità degli scambi per convezione, che dipendono essenzialmente dalla lunghezza del filamento e assai poco dal suo diametro.

Attualmente, invece di usare **azoto**, si preferisce riempire il bulbo con **argon** che, grazie alla sua maggiore massa molecolare, permette di rallentare ulteriormente la velocità di sublimazione del filamento di tungsteno. La durata media di queste lampade corrisponde a circa 1000 ore di funzionamento. Temperature di funzionamento ancora superiori (circa 3300 K) sono state raggiunte nelle **lampade ad alogeni**, grazie all'introduzione nel bulbo di piccole quantità di queste sostanze (in genere *iodio*).

In questi casi il filamento può essere mantenuto a temperature di circa 3300 [K] grazie al seguente meccanismo di rigenerazione del filamento: i vapori di tungsteno che sublimano da questo si combinano con lo iodio presente allo stato gassoso nel bulbo dando luogo alla formazione di ioduro di tungsteno secondo la seguente reazione:



Lo ioduro **WI₂** formatosi è chimicamente stabile alla temperatura delle pareti del bulbo e non si deposita su queste, mentre alle elevate temperature di funzionamento del filamento si ri-dissocia in tungsteno e iodio. Di conseguenza il tungsteno che sublima dal filamento viene ad esservi ri-depositato chimicamente.

Le lampade ad alogeni sono, quindi, caratterizzate da una più elevata efficienza luminosa (circa 24 [lm/W]) e da una durata che può raggiungere le 2000 ore.

7.1.2 Sorgenti a luminescenza

Per realizzare sorgenti luminose ad incandescenza caratterizzate da più elevate efficienze luminose (al di sopra dei 24 [lm/W]) occorrerebbe disporre di materiali ad elevatissimo punto di fusione, il che comporta notevoli problemi tecnici. Una via

alternativa per produrre lampade ad alta efficienza utilizza la fenomenologia delle scariche elettriche nei gas.

Le **sorgenti a luminescenza** consistono in tubi nei quali è presente gas rarefatto (pressioni dell'ordine di qualche millesimo di bar). Se la colonna di gas è sottoposta ad un'opportuna differenza di potenziale elettrico, applicata su due elettrodi posizionati alle estremità del tubo, attraverso il gas si verifica una scarica elettrica a cui corrisponde emissione di luce in corrispondenza di alcune particolari lunghezze d'onda.

Il meccanismo che porta all'emissione di luce, solo in corrispondenza ad alcune specifiche lunghezze d'onda (spettri di emissione a righe), e cioè di luce fortemente caratterizzata dal punto di vista cromatico, viene detto **luminescenza** e può spiegarsi sulla base della natura atomica del gas o vapore in oggetto. Come noto, l'atomo può essere schematizzato come un nucleo carico positivamente circondato da una nube d'elettroni, ciascuno dei quali può essere caratterizzato solo da ben definiti livelli d'energia (livelli energetici). Nella configurazione stabile gli elettroni occupano i livelli caratterizzati da minori contenuti energetici.

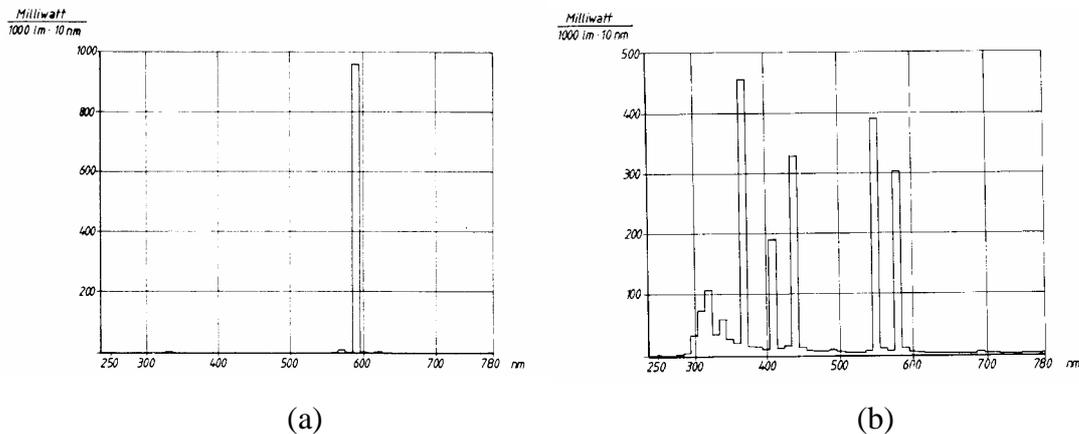
Se si somministra ad un atomo un'opportuna quantità d'energia, un elettrone può portarsi ad un superiore livello energetico: in queste condizioni si afferma che l'atomo è eccitato. La condizione di eccitazione è, però, instabile e non permane se non per tempi brevissimi: l'elettrone ritorna allo stato iniziale liberandosi dell'energia in eccesso tramite l'emissione di quanti di energia elettromagnetica $E = hf$.

Spesso poi l'elettrone, nel tornare al suo livello stabile, può passare attraverso livelli energetici intermedi con emissione di due o più quanti di minore energia.

Lo spettro d'emissione di una sorgente a luminescenza è, pertanto, sempre caratterizzato dall'emissione d'energia esclusivamente in corrispondenza a poche e ben distinte lunghezze d'onda (**spettri d'emissione a righe**).

Durante la scarica elettrica nel gas, per effetto della differenza di potenziale applicata, si verifica il seguente processo: elettroni (cariche negative) e ioni (cariche positive) naturalmente presenti in piccola quantità nel gas accelerano sotto l'azione del campo elettrico applicato agli elettrodi acquistando energia cinetica. Sebbene gli elettroni e gli ioni si muovano in realtà in tutte le direzioni, l'andamento generale del moto risulta diretto verso le due estremità del tubo alle quali è applicata la differenza di potenziale elettrico. Precisamente gli elettroni migrano verso l'estremità a potenziale positivo (anodo) e gli ioni verso l'estremità a potenziale negativo (catodo).

In conseguenza degli urti tra gli atomi del gas e le particelle in moto, alcuni atomi possono portarsi in uno stato eccitato. Quando ciò avviene, come già ricordato, l'atomo colpito viene, per tempo brevissimo, a portarsi in una situazione di instabilità energetica: subito dopo esso ritorna però allo stato normale emettendo l'energia in eccesso sotto forma di quanti di energia elettromagnetica $E = hf$. In funzione della natura del gas la radiazione emessa può cadere o no nel campo del visibile. Nel caso che la radiazione sia emessa all'interno dello spettro visibile, il fenomeno può essere sfruttato per ottenere direttamente sorgenti di luce, come avviene per le lampade al sodio che hanno importanti emissioni attorno ad una lunghezza d'onda pari a $\lambda = 0.58$ [μm]. In figura, è riportato lo spettro d'emissione di una sorgente a vapori di sodio a bassa pressione (a) e quello di una sorgente a vapori di mercurio ad alta pressione (b).



Ad esempio, se venisse utilizzato argon o xeno la luce risulta blu, con il neon rossa, con l'elio gialla, ecc. Nel caso di vapori metallici di sodio la luce è gialla, mentre nel caso di vapori di mercurio si hanno diverse emissioni (blu, verdi e rosse) che complessivamente vengono percepite dall'occhio come luce bianca.

L'efficienza luminosa per il sodio è dell'ordine di 120-130 [lm/W] e può raggiungere per le sorgenti di maggiore potenza anche valori di circa 200 [lm/W], per il mercurio è 40-70 [lm/W].

Le lampade a luminescenza sono classificabili in:

- lampade a scarica ad alta tensione;
- lampade a scarica a vapori metallici a bassa pressione;
- lampade a scarica a vapori metallici ad alta e altissima pressione.

Le sorgenti **a scarica ad alta tensione** sono ampiamente impiegate per pubblicità luminosa perché possono essere costruite con tubi molto lunghi rispetto al diametro, facilmente foggibili nelle forme richieste.

Le lampade attuali impiegano per il riempimento quasi esclusivamente gas rari, puri od un miscuglio di questi che consente di ottenere luci di colori diversi. L'efficienza può raggiungere valori relativamente elevati (fino a 15-16 [lm/W]), con una pressione di riempimento del gas molto bassa (1-2 [mmHg]), in corrispondenza della quale però la durata si riduce sensibilmente a causa della rapida disintegrazione degli elettrodi e dei fenomeni di assorbimento del gas. Si preferisce perciò, a causa dei forti costi delle operazioni di sostituzione, costruire tubi operanti a pressione maggiore, che seppur siano caratterizzati da minori efficienze (3-5 [lm/W]) presentino maggiore durata.

Le lampade **a scarica a vapori metallici a bassa pressione** utilizzano come aeriforme di riempimento vapore di sodio. Esse funzionano con una pressione di riempimento a freddo estremamente bassa (0.1 [mmHg] circa), insufficiente per ottenere l'inizio della scarica. Per provocare la sublimazione del sodio metallico contenuto nell'ampolla, occorre quindi un riscaldamento iniziale che si ottiene introducendo nel tubo una piccola quantità di gas (elio o argon): la scarica si avvia inizialmente in tale gas e solo quando si raggiunge una sufficiente temperatura inizia la scarica nel sodio.

La luce, pressoché monocromatica emessa da queste lampade, deforma sgradevolmente il colore degli oggetti. Poiché, peraltro l'efficienza specifica può raggiungere valori molto elevati (fino a 200 [lm/W]), con durata economica assai lunga (circa 6000 ore e oltre), le lampade al sodio trovano frequentemente impiego in tutti quei casi in cui le esigenze della corretta resa cromatica e della gradevolezza si fanno poco sentire (illuminazione stradale, industriale, etc.), oppure quando la particolare deformazione cromatica è desiderata in quanto esalta certi aspetti degli oggetti (per esempio murature antiche).

Le lampade **a vapori metallici ad alta e altissima pressione** utilizzano come aeriforme di riempimento *vapore di mercurio* e vengono realizzate con tubi di *quarzo*: il vetro infatti non resisterebbe alle elevate temperature di funzionamento necessarie per ottenere una buona efficienza luminosa e un'accettabile composizione spettrale (la temperatura della parete del bulbo è mediamente intorno a 1000 [K], cioè più elevata di quella di rammollimento dei migliori vetri).

Il tubo di scarica in quarzo è sempre contenuto in un secondo involucro in vetro entro il quale trovano posto le connessioni elettriche tra gli elettrodi. Esso ha lo scopo di proteggere il tubo di quarzo e gli altri componenti, di assorbire le radiazioni ultraviolette dannose per l'occhio umano e di mantenere nei limiti di uniformità richiesti il campo di temperatura intorno al tubo di quarzo.

Il colore della luce emessa è piuttosto gradevole, tendente al bianco dorato, e la sua resa cromatica sufficientemente buona. L'efficienza specifica si aggira sui 100 [lm/W] e la durata economica intorno alle 10000 ore. Tali lampade sono in genere caratterizzate da elevate potenze specifiche; non sono ancora prodotte, allo stato attuale, lampade di potenza ridotta. Se oltre al vapore di mercurio si introducono nel tubo di scarica alcuni ioduri metallici (ioduro di sodio, tallio indio, etc) vengono emesse anche altre radiazioni nello spettro visibile che “colmano“ quelle zone ove il vapore di mercurio non presenta linee di emissione. Queste sorgenti **a ioduri metallici** consentono quindi di migliorare le prestazioni cromatiche delle sorgenti a mercurio.

7.1.3 Lampade a fluorescenza

Quando la radiazione emessa per luminescenza da un gas o da un vapore metallico non è compresa nel visibile ma, ad esempio, cade nell'ultravioletto con lunghezze d'onda inferiori a $\lambda = 0.3$ [μm], si può sfruttare, per ottenere l'emissione di luce visibile, il fenomeno della **fluorescenza**. A questo scopo si ricoprono le superfici interne del tubo, con sostanze che, irraggiate da radiazioni ultraviolette sono in grado di riemettere luce visibile. Le lampade fluorescenti quindi sono anch'esse costituite da tubi di vetro contenenti gas inerte e funzionano grazie alla combinazione dei due effetti:

- **luminescenza**: la scarica di corrente nel tubo attraversa vapori di mercurio che a bassa pressione emettono buona parte delle loro radiazioni nella regione dell'ultravioletto;
- **fluorescenza**: sulla faccia interna del tubo uno strato di particolari sostanze (tungstati, silicati, ecc, detti fosfori) riemettono luce secondo uno spettro quasi continuo di radiazioni a più elevata lunghezza d'onda.

Si può arrivare con queste lampade a fluorescenza a realizzare efficienze abbastanza elevate, dell'ordine di 80-100 [lm/W]. Altre qualità, rappresentate fondamentalmente dalla ridotta luminanza, dalla ricca gamma di sfumature cromatiche ottenibili attraverso opportune miscele di sostanze fosforescenti ed il costo di produzione relativamente

basso, rendono queste lampade particolarmente adatte per gli impianti d'illuminazione di base di stabilimenti industriali, di grandi uffici, d'ambienti commerciali. Più limitato è l'uso per l'illuminazione domestica e per quella degli esterni, a causa principalmente dell'ingombro degli apparecchi destinati a contenerle.

Nel caso dei comuni tubi fluorescenti la pressione del vapore di mercurio viene regolata al valore di circa 0.008 [mmHg]: in queste condizioni l'energia raggiante emessa per effetto della scarica è per la maggior parte (circa il 30%) emessa sotto forma di una radiazione ultravioletta corrispondente alla lunghezza d'onda di 0.2537 [μm].

La radiazione ultravioletta cade sul sottile strato di materiale fluorescente con cui è rivestita la faccia interna del tubo, il quale ne assorbe una parte e ne riemette una parte ancora minore sotto forma di energia dello spettro visibile.

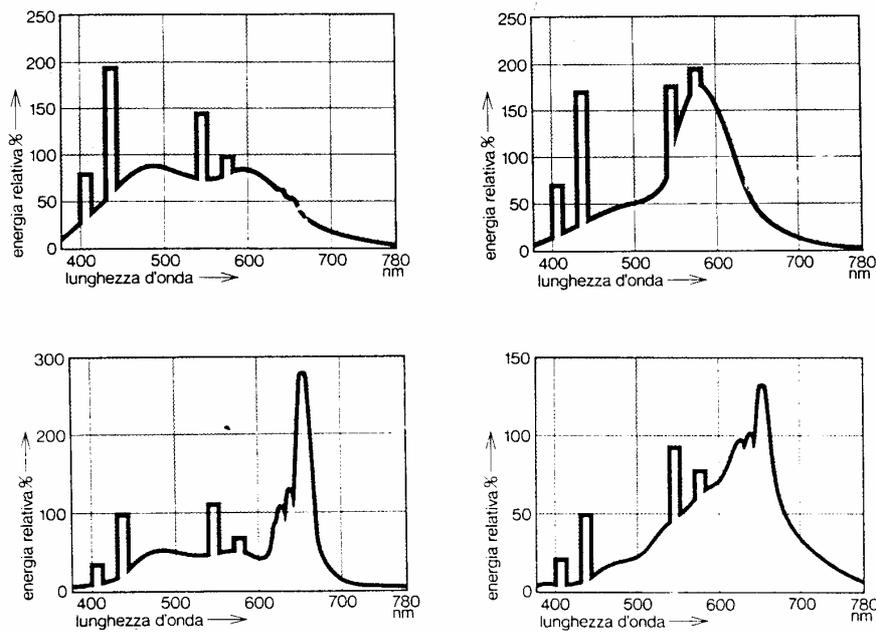
Le qualità della lampada dipendono ovviamente dalla natura e dallo stato dei materiali fluorescenti. Questi devono essere caratterizzati da un alto coefficiente di assorbimento per l'ultravioletto e, al tempo stesso, da un'elevata efficienza di trasformazione: e cioè è importante che la quota di energia riemessa non solo sia sufficientemente elevata ma anche che risulti opportunamente distribuita nello spettro visibile. Ambedue queste qualità dipendono dalla natura dei sali cristallini utilizzati per realizzare la fluorescenza.

In genere il materiale fluorescente, finemente polverizzato e posto in sospensione in un legante organico, viene applicato sulla faccia interna del tubo: quindi il legante viene eliminato con procedimento di riscaldamento a temperatura più elevata.

I tipi di lampade fluorescenti correntemente prodotti sono molto numerosi: esse vengono classificate in categorie che si diversificano fundamentalmente per la qualità cromatica della luce emessa e che vengono distinte con nomi commerciali per descrivere tale qualità. Le potenze elettriche assorbite sono state oggetto di normalizzazione e si distribuiscono su una gamma che va da 4 a 120 [W].

Valori elevati di efficienza specifica si ottengono con i tipi di lampada nel cui spettro abbondano le radiazioni viola e giallo-verde e che perciò sono caratterizzate da una resa cromatica scadente; essi si riducono quando, attraverso l'uso di adatti materiali fluorescenti, si cerca di arricchire gli spettri con radiazioni di grande lunghezza d'onda e conseguentemente di basso fattore di visibilità.

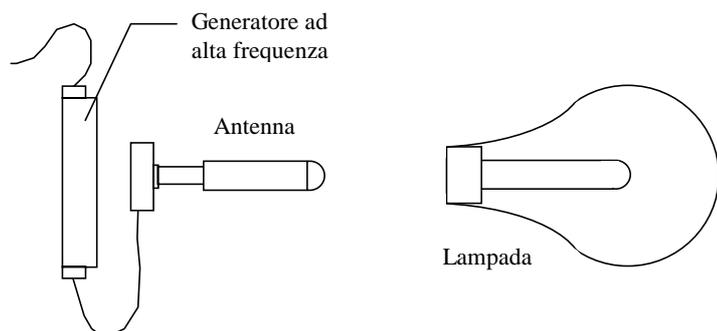
In figura vengono riportati a titolo di esempio gli spettri di emissione di alcuni tipi lampade tubolari lineari fluorescenti.



Sono state realizzate anche **sorgenti a luce mista** e cioè realizzate con un tubo a scarica a vapore di mercurio e un filamento di tungsteno collegato in serie portato ad incandescenza. Il tipo di luce emessa a causa del contributo dello spettro continuo del filamento a incandescenza è particolarmente gradevole dal punto di vista cromatico.

Un nuovo tipo di sorgente a fluorescenza di recente introdotto non richiede la presenza di elettrodi per realizzare la luminescenza di vapori di mercurio. In questo caso l'effetto di luminescenza è ottenuto mediante un'antenna accoppiata ad un generatore di onde elettromagnetiche ad alta frequenza secondo lo schema rappresentato in figura.

In tal modo si riescono ad ottenere periodi di funzionamento valutabili nell'ordine delle 60.000 ore. Questo tipo di lampade presenta una serie di benefici rispetto alle convenzionali lampade fluorescenti

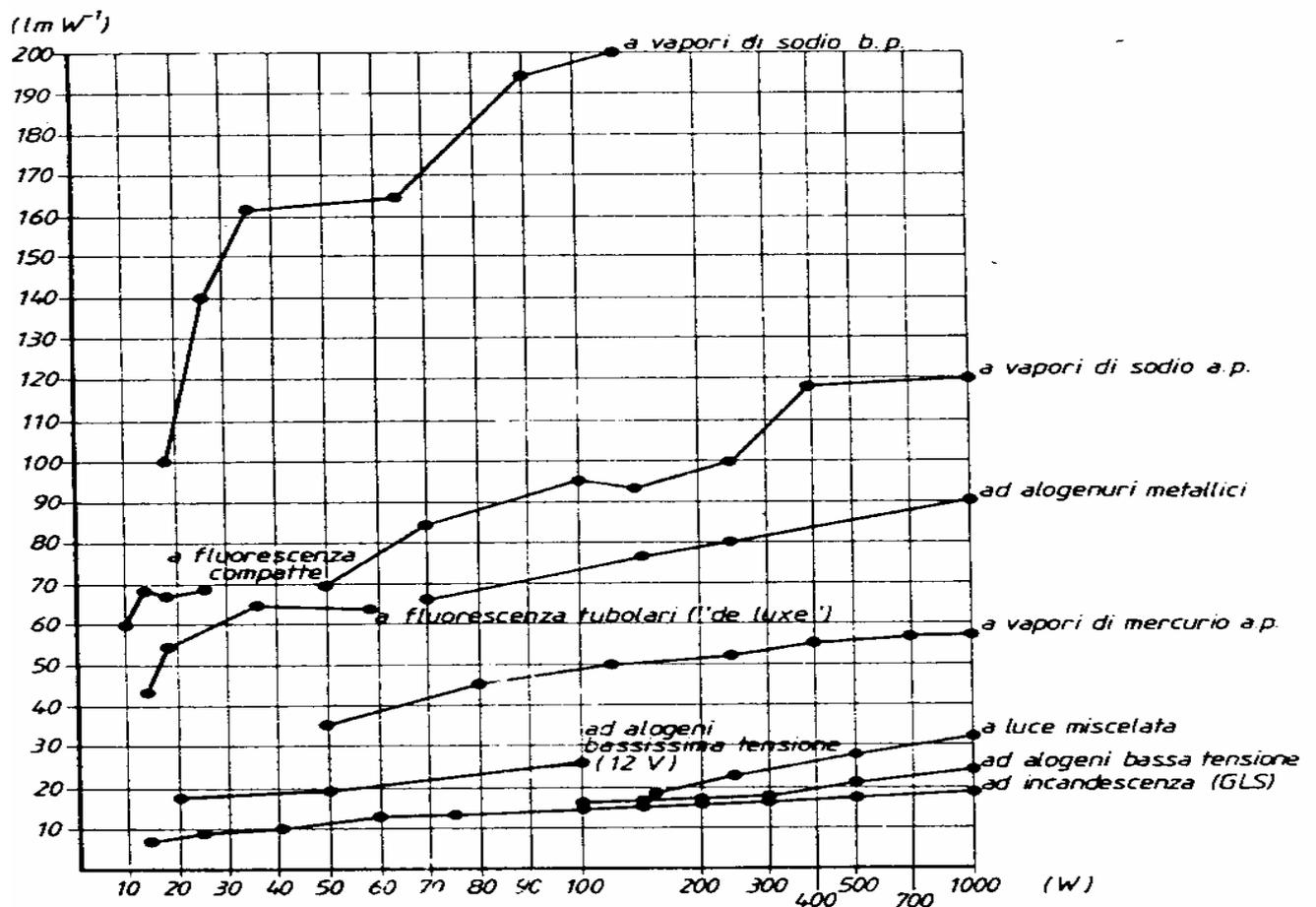


tradizionali e cioè soprattutto la possibilità di regolazione del flusso luminoso ed una durata circa 10 volte maggiore. Oltre a ciò, c'è da considerare che l'eliminazione degli elettrodi aumenta l'affidabilità di questo tipo di sorgente in tutte le situazioni ove

esistono sollecitazioni meccaniche ripetute, che nelle lampade fluorescenti normali determinano guasti accidentali.

7.2 Efficienza luminosa delle sorgenti

L'efficienza luminosa dei vari tipi di sorgenti esaminate è comunque ben lontana dal limite teorico massimo di 683 [lm/W]; ciò è dovuto sia alle particolari distribuzioni spettrali tipiche delle varie sorgenti, sia alle inevitabili perdite di potenza durante il funzionamento, ad esempio calore dissipato dal bulbo, dagli elettrodi e dall'alimentatore. In figura sono riportate le **efficienze luminose** η_l per le principali sorgenti luminose citate in funzione della loro potenza elettrica nominale.



Nella tabella sottostante sono riportati i flussi luminosi, le potenze elettriche nominali e le corrispondenti efficienze luminose η_1 di alcune sorgenti.

SORGENTE LUMINOSA	flusso luminoso [lm]	potenza [W]	η_1 [lm/W]
lampadina a incandescenza	440	40	11
lampada ad alogeni	10000	500	20
sorgente a luminescenza a vapori di mercurio	30000	300	100
tubo fluorescente	3000	40	75

7.3 Apparecchi

Gli **apparecchi** (armature) posti intorno alle sorgenti luminose vere e proprie hanno in genere la funzione di indirizzare nel modo desiderato l'emissione luminosa di queste. In molti casi la funzione principale dell'apparecchio è quella di evitare all'osservatore la vista diretta delle sorgenti luminose (spesso di piccola area e quindi di elevata luminanza) presentando invece all'osservatore superfici luminose di maggior superficie e quindi di più ridotta luminanza. Talvolta l'involucro che contiene la sorgente luminosa deve anche consentire un'adeguata protezione della sorgente nei riguardi degli agenti esterni.

È di comune impiego la distinzione in:

- apparecchi diffusori;
- apparecchi rifrattori;
- apparecchi riflettori;

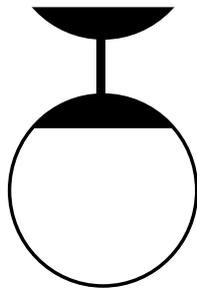
anche se talvolta si sfruttano contemporaneamente effetti di riflessione, diffusione e riflessione. Per ciascun apparecchio illuminante è possibile definire un rendimento luminoso definito dall'espressione:

$$\eta = \frac{\phi_{\text{apparecchio}}}{\phi_{\text{lampada}}}$$

ove per η si possono assumere in via orientativa valori dell'ordine di 70-90 % per i riflettori, 60-75 % per i diffusori e 60-70 % per i rifrattori.

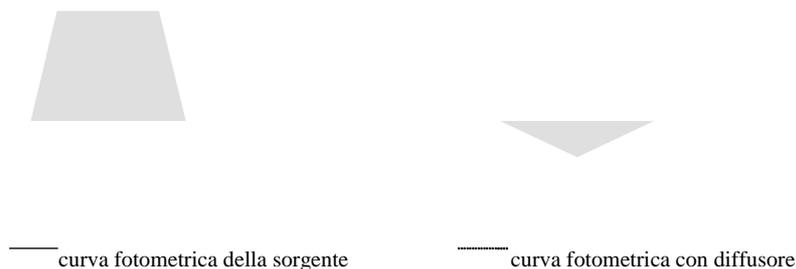
- **Apparecchi diffusori**

Col fine di controllare l'emissione luminosa della sorgente si possono utilizzare schermature traslucide di vetro smerigliato, tessuto, carta, etc. La luce emessa attraverso queste schermature perde la sua originaria direzionalità. Il flusso luminoso non scaturisce più da una porzione limitata dello spazio ma da superfici più estese e pertanto la luminanza della sorgente viene ad essere anche notevolmente ridotta. Un buon diffusore, posto alla distanza giusta dalla sorgente e realizzato con materiali e tecniche appropriate, è in grado di mascherare completamente la sorgente luminosa al punto da rendere quasi del tutto indistinguibile la sua forma. Può, al più ancora rimanere un alone più chiaro in corrispondenza della stessa.



L'effetto di diffusione può essere naturalmente favorito tramite l'installazione di lampade già munite di bulbo smerigliato, satinato, opalino. Un tipico esempio di diffusore è costituito da una *sfera di vetro traslucida posta intorno ad una sorgente* (vedi figura)

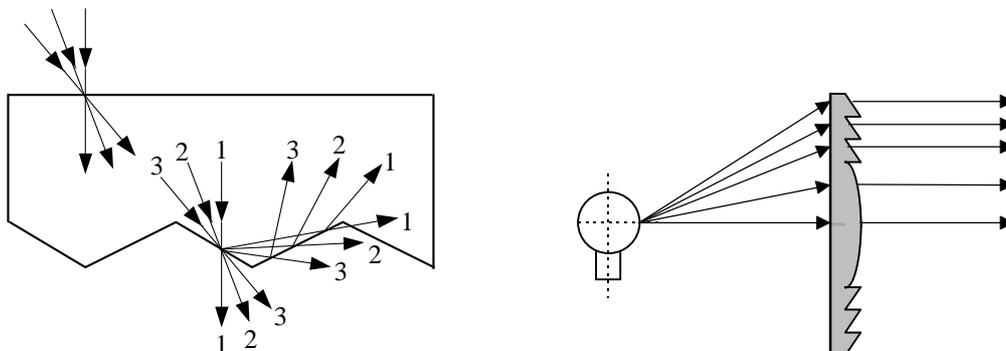
I diffusori possono avere forme diverse: nella figura seguente sono schematizzati alcuni tipici apparecchi diffusori.



- **Apparecchi rifrattori**

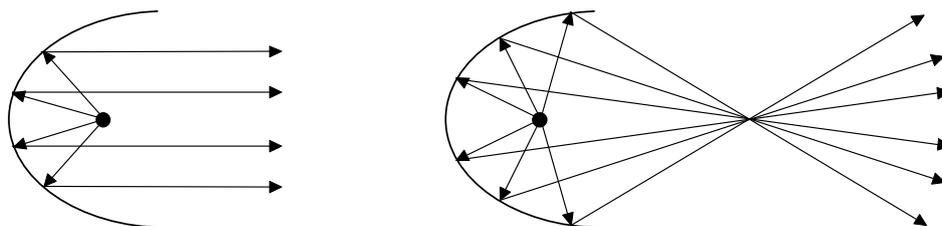
I rifrattori utilizzano il principio della rifrazione per modificare la direzionalità dell'emissione luminosa. I pannelli rifrattori a prismi conici impiegati per l'illuminazione degli interni sono generalmente accoppiati a superfici riflettenti

opportunamente predisposte. I pannelli possono essere realizzati in resine acriliche, polistirolische o in vetro.



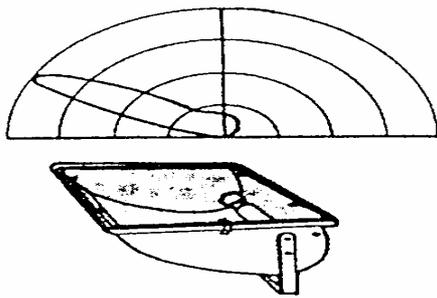
- **Apparecchi riflettori e proiettori**

Gli involucri riflettori hanno lo scopo di dirigere il flusso luminoso in un angolo solido determinato e servono a produrre elevati valori d'illuminamento su una superficie privilegiata. In questo caso, si utilizzano, per l'involucro, materiali con fattore di riflessione elevato, quali vetro argentato o alluminio lucidato. I riflettori a specchio per sorgenti luminose puntiformi (come lampade ad incandescenza) hanno forma diversa (parabolica, ellittica ecc.) in relazione alle necessità, come rappresentato ad esempio nelle seguenti figure.



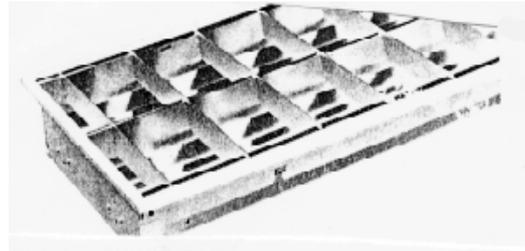
A questo tipo di riflettore appartengono i proiettori, impiegati per illuminazione di campi sportivi, monumenti, ecc.

Quando il flusso luminoso non deve essere necessariamente concentrato in un fascio molto stretto, e la luce può essere ripartita entro un angolo solido abbastanza grande, sono impiegati materiali a riflessione diffusa, come superfici smaltate in bianco, superfici d'alluminio, etc.



Nella figura a alto è rappresentato un riflettore asimmetrico inserito in un proiettore, con la relativa curva fotometrica nel piano perpendicolare all'asse del proiettore stesso.

Nell'illuminazione d'interni si può corredare l'apparecchio riflettore con schermi interni od esterni in varie forme, ad esempio a lamelle o a nido d'ape (vedi figura a lato).

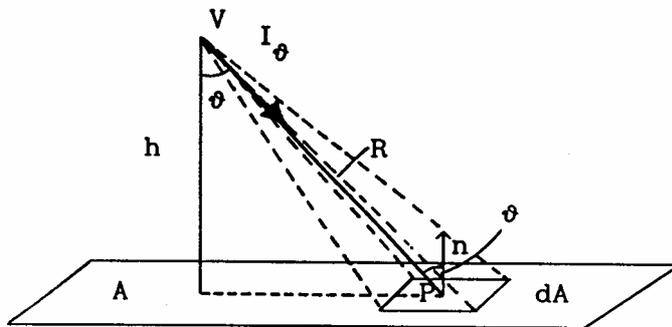


La superficie riflettente in alcuni casi viene irruvidita per realizzare una riflessione della luce maggiormente diffusa. Si può parlare in questi casi di riflettore-diffusore.

7.4 Calcolo dell'illuminamento

- *Caso sorgente puntiforme*

L'illuminamento prodotto da una **sorgente puntiforme**, e cioè da una *sorgente le cui dimensioni siano piccole rispetto alla distanza dalla superficie illuminata*, può essere calcolato in riferimento alla situazione schematizzata in figura. Si consideri il punto P sulla superficie illuminata **A** ed un'area infinitesima **dA**, centrata attorno al punto P; il segmento **R** rappresenti la distanza tra la sorgente e il punto P. Con ϑ si è indicato l'angolo formato tra la normale alla superficie **dA** ed il segmento **R**.



Ipotesi:

sia noto il valore dell'*intensità luminosa* I_{ϑ} emessa dalla sorgente nella direzione ϑ come rappresentato in figura (nel caso in cui il solido fotometrico della sorgente fosse una sfera risulterebbe ovviamente $I_{\vartheta} = I = \text{cost}$).

L'illuminamento **E** nel punto P è fornito da:

$$E = \frac{d\varphi_1}{dA}$$

ove:

$d\varphi_1 =$ *flusso luminoso incidente sulla superficie dA.*

Trascurando l'assorbimento della luce da parte dell'aria, il flusso $d\varphi_1$ che incide su **dA** risulta pari al flusso luminoso emesso nell'angolo solido $d\omega = dA \cos\vartheta/R^2$. Risulta, quindi:

$$d\varphi_1 = I_{\vartheta} d\omega = I_{\vartheta} dA \frac{\cos \vartheta}{R^2}$$

L'illuminamento E nel punto P risulta allora dato da:

$$E = \frac{d\phi_1}{dA} = I_\vartheta dA \frac{\cos \vartheta}{R^2 dA} = I_\vartheta \frac{\cos \vartheta}{R^2}$$

In riferimento alla situazione rappresentata in figura (sorgente luminosa sospesa ad un'altezza h sopra un piano orizzontale) essendo anche

$$h = R \cos \vartheta$$

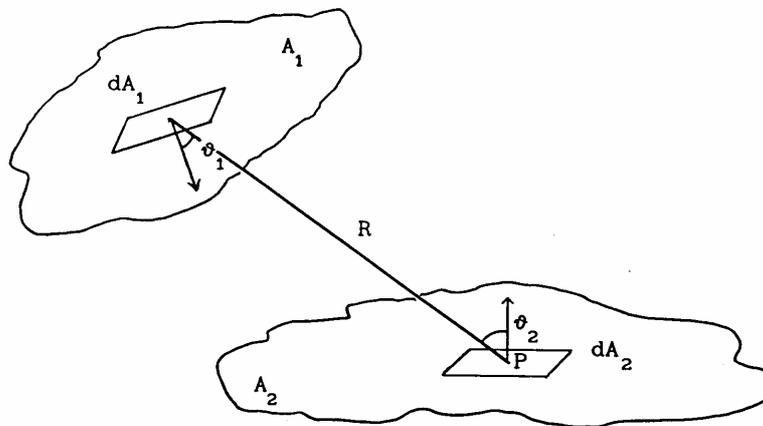
si può anche scrivere:

$$E = \frac{I_\vartheta \cdot \cos^3 \vartheta}{h^2}$$

- **Caso sorgente estesa**

Per valutare l'illuminamento prodotto in un punto P da una sorgente estesa si adotta in genere l'**ipotesi** semplificativa che la superficie luminosa emettente sia caratterizzata da una luminanza L costante (superficie lambertiana).

Si consideri la situazione rappresentata in figura: l'illuminamento provocato dalla sorgente di superficie A_1 nel punto P posizionato su una superficie A_2 può essere valutato nel seguente modo.



Si individui sulla superficie della sorgente A_1 un'area infinitesima dA_1 e sulla superficie illuminata un'area infinitesima dA_2 centrata attorno al punto P ; il segmento R rappresenti la distanza tra la sorgente e il punto P . Con ϑ_1 e ϑ_2 si sono rispettivamente indicati (vedi figura) gli angoli formati tra le normali alle superfici dA_1 e dA_2 ed il segmento R . Ricordando la definizione di **luminanza**, si può scrivere:

$$L_1 = \frac{d^2\phi_{1 \rightarrow 2}}{dA_1 \cos \vartheta_1 d\omega_1} = \cos t$$

ove:

$d^2\varphi_{1\rightarrow 2}$ = flusso luminoso contenuto nell'angolo solido $d\omega_1$ che, emesso da dA_1 incide sulla superficie dA_2 .

Poiché può anche porsi:

$$d\omega_1 = dA_2 \cos\theta_2 / R^2$$

Si può scrivere:

$$d^2\varphi_{1\rightarrow 2} = L_1 dA_1 \cos\vartheta_1 dA_2 \cos\vartheta_2 / R^2$$

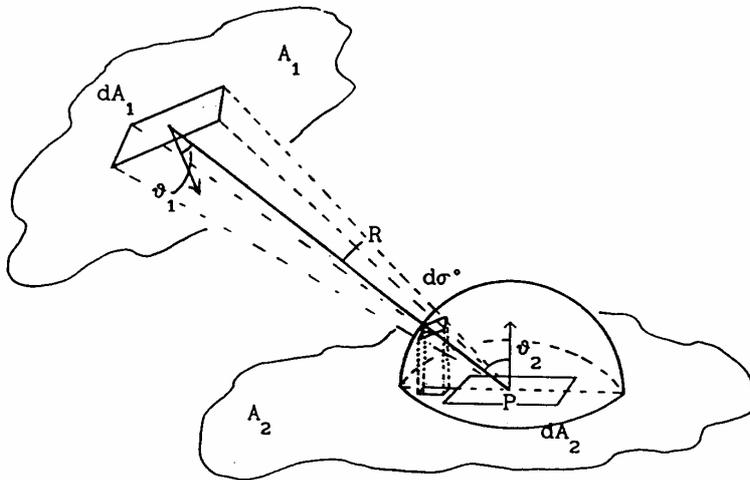
L'illuminamento infinitesimo dE_P provocato allora da dA_1 nel punto P è esprimibile con:

$$dE_P = d^2\varphi_{1\rightarrow 2} / dA_2 = L_1 dA_1 \cos\vartheta_1 \cos\vartheta_2 / R^2$$

L'illuminamento complessivo provocato in P dall'intera superficie luminosa A_1 può ottenersi integrando su A_1 i contributi dE_P e cioè:

$$E_P = \int dE_P = \int_{A_1} L_1 dA_1 \cos\vartheta_1 \cos\vartheta_2 / R^2 = L_1 \int_{A_1} (dA_1 \cos\vartheta_1 / R^2) \cos\vartheta_2$$

Il calcolo di questa espressione risulta in generale alquanto complesso per cui, spesso, si ricorre ad una particolare costruzione geometrica.



Come rappresentato in figura, si costruisce con centro in P una calotta emisferica di raggio r unitario; in questa costruzione il rapporto $dA_1 \cos\vartheta_1 / R^2$ (corrispondente all'angolo solido $d\omega_2$) risulta esprimibile come $d\sigma^0 / r^2 = d\sigma^0$ (essendo $r = 1$).

Risulta anche:

$$E_P = \int dE_P = L_1 \int_{A_1} (dA_1 \cos\vartheta_1 / R^2) \cos\vartheta_2 = L_1 \int_{A_1} d\sigma^0 \cos\vartheta_2$$

Si noti ora che $d\sigma^o \cos \vartheta$ rappresenta la proiezione della superficie $d\sigma^o$ sul piano equatoriale della semisfera di raggio unitario e l'espressione:

$$\int_{A_1} d\sigma^o \cos \vartheta_2$$

rappresenta geometricamente sul piano A_2 la seconda proiezione della superficie luminosa della sorgente. Nel caso in cui la sorgente sia così estesa da poter essere considerata come una completa calotta luminosa sovrastante il piano ove sia situato il punto P, la proiezione della calotta sulla superficie emisferica di raggio unitario corrisponde evidentemente all'intera superficie emisferica. In questo caso l'area della seconda proiezione di tale superficie sul piano equatoriale contenente il punto P è:

$$\int_{A_1} d\sigma^o \cos \vartheta_2 = \pi r^2 = \pi$$

e, quindi, si ottiene in questo caso un illuminamento nel punto P pari a:

$$E_P = L_1 \pi$$

Nel caso si desiderasse valutare piuttosto che l'illuminamento in P, come finora considerato, l'illuminamento medio provocato da una sorgente piana estesa (area A_1) su una superficie piana d'area A_2 , si può procedere nello stesso modo precedentemente considerato per lo scambio termico tra due superfici piane. Integrando relativamente alle superfici A_1 e A_2 l'espressione:

$$d^2 \varphi_{1 \rightarrow 2} = L_1 dA_1 \cos \vartheta_1 dA_2 \cos \vartheta_2 / R^2$$

si ottiene:

$$\varphi_{1 \rightarrow 2} = L_1 \int_{A_1} \int_{A_2} dA_1 \cos \vartheta_1 dA_2 \cos \vartheta_2 / R^2$$

Essendo poi $M_{11} = L_1 \pi$ si può anche scrivere:

$$\varphi_{1 \rightarrow 2} = \frac{M_{11}}{\pi} \cdot \int_{A_1} \int_{A_2} dA_1 \cos \vartheta_1 dA_2 \cos \vartheta_2 / R^2$$

Ricordando poi la definizione di fattore di vista F :

$$F_{12} = \frac{1}{A_1 \pi} \cdot \int_{A_1} \int_{A_2} dA_1 \cos \vartheta_1 dA_2 \cos \vartheta_2 / R^2$$

anche nella forma:

$$\varphi_{1 \rightarrow 2} = A_1 M_{11} F_{12}$$

L'illuminamento medio E_m sulla superficie A_2 risulta quindi pari a:

$$E_{m2} = \frac{\Phi_{1 \rightarrow 2}}{A_2} = \frac{A_1 M_{11} F_{12}}{A_2}$$

Come si può osservare E_{m2} è immediatamente valutabile una volta noto il fattore di vista F_{12} . Per le configurazioni geometriche di maggiore interesse tecnico (ad esempio superfici rettangolari affacciate) i fattori di vista sono stati calcolati risolvendo l'integrale doppio per varie situazioni geometriche di interesse e i risultati sono riportati in forma grafica in molte fonti bibliografiche. A titolo d'esempio, si riportano qui di seguito due configurazioni che rientrano in molti problemi illuminotecnici:

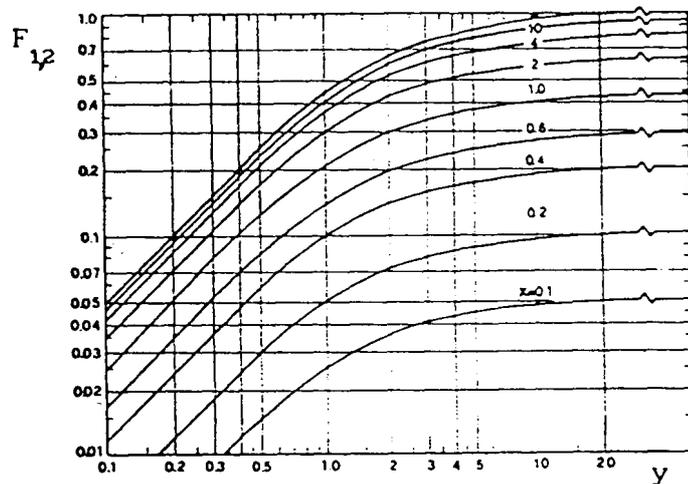
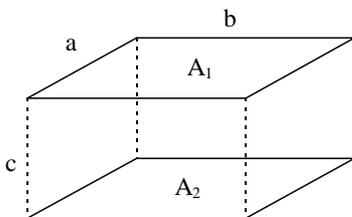
caso I: due superfici rettangolari uguali e parallele tra loro

caso II: due superfici rettangolari ortogonali tra loro con lato in comune

Nel **caso I** (vedi figura) la superficie A_1 illumina la A_2 ; la geometria dell'insieme è definita in figura. Quindi, in base ai rapporti seguenti:

$$x = \frac{a}{c} \quad y = \frac{b}{c}$$

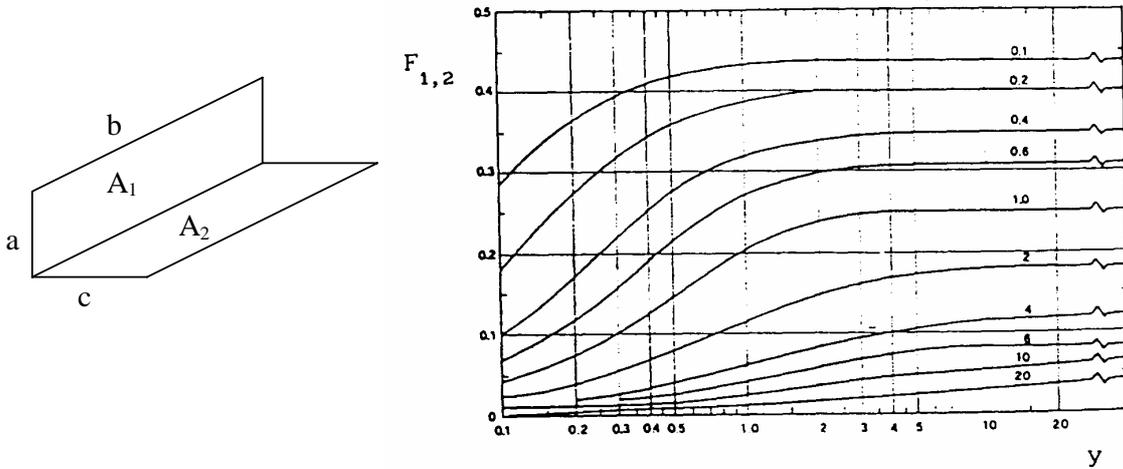
si può calcolare, attraverso il diagramma riportato, il fattore di vista cercato F_{12} .



Anche nel **caso II** (figura seguente) la superficie A_1 illumina la A_2 : le due superfici in questo caso sono normali tra loro, hanno un lato b in comune e hanno rispettivamente una larghezza c e l'altra altezza a . In base ai due parametri:

$$x = \frac{a}{b} \quad y = \frac{c}{b}$$

si può leggere in ordinata il valore corrispondente del fattore di vista F_{12} .

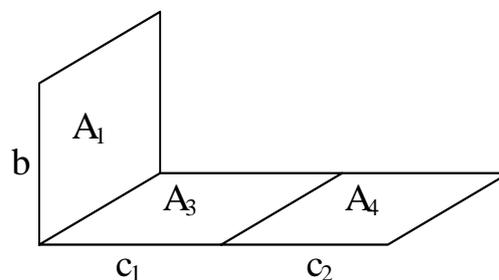


I diagrammi presenti in letteratura, come quelli ad esempio sopra riportati, possono essere utilizzati anche per altre situazioni. Spesso, infatti, alcune geometrie particolari possono ricondursi ai casi noti sulla base del teorema di reciprocità tra i fattori di vista ($F_{12}A_1 = F_{21}A_2$), già dimostrato nell'irraggiamento termico. Si debba ad **esempio** valutare il fattore di vista $F_{1,4}$ tra le superfici A_1 ed A_4 nel caso della seguente figura. Il problema può ricondursi al caso precedente se come A_2 si considera la somma $A_3 + A_4$; in tal caso si può scrivere che:

$$A_1 F_{1,2} = A_1 F_{1,3+4} = A_1 F_{1,3} + A_1 F_{1,4}$$

e cioè:

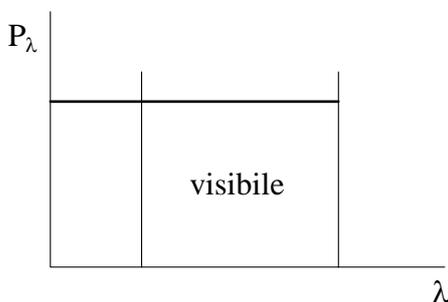
$$F_{1,4} = F_{1,3+4} - F_{1,3}$$



7.5 Cenni sulla sensazione cromatica

La conoscenza degli aspetti fondamentali della **sensazione cromatica**, ed una rigorosa classificazione dei colori, presenta grande importanza in numerosi settori; si pensi, ad esempio, alla costruzione e trasmissione di immagini a colori, la produzione di pitture, colorazione di tessuti ecc. Lo studio degli elementi fondamentali della colorimetria riveste notevole importanza anche per l'architetto; in talune problematiche progettuali può, ad esempio, essere particolarmente importante riprodurre fedelmente determinate tinte, o anche dover progettare un impianto d'illuminazione che consenta di garantire una buona percezione dei colori. Si pensi all'importanza di questa problematica nel caso dell'illuminazione di musei, pinacoteche, affreschi in locali monumentali, ecc.

Come già precedentemente accennato, un fascio di radiazioni luminose in cui siano presenti radiazioni di tutte le lunghezze d'onda, con gli stessi livelli di potenza energetica $P_\lambda = \frac{d\phi_\lambda}{d\lambda} = \text{cost}$ alle varie λ (vedi figura), appare al nostro occhio come luce bianca, mentre un fascio monocromatico (nel visibile ovviamente) provoca la sensazione di un particolare colore (ad esempio luce monocromatica a $\lambda = 0.5$ appare verde); in altre parole, la sensazione cromatica provata da un osservatore dipende dalla composizione spettrale delle radiazioni incidenti sul suo occhio. In conseguenza, un modo per osservare un particolare colore è quello di inviare all'occhio luce monocromatica di opportuna λ .



Ci si può chiedere però se questo modo sia anche l'unico: la risposta a questo quesito è negativa. L'esperienza infatti insegna che una identica sensazione cromatica può essere provocata anche da luci policromatiche di diversa composizione spettrale.

In colorimetria, tuttavia, non si cerca di analizzare la sensazione cromatica provata soggettivamente da un certo osservatore (sarebbe ovviamente impossibile studiare oggettivamente la sensazione provocata da un certo colore, ad esempio il verde), ma

piuttosto ci si limita a studiare in quali condizioni due sensazioni di verde siano indistinguibili tra loro per l'osservatore medio.

Quando le radiazioni provengono direttamente da una sorgente luminosa, la sensazione cromatica, e cioè il colore osservato, dipenderà solo dalla composizione spettrale della luce emessa dalla sorgente stessa, mentre nel caso in cui le radiazioni suddette abbiano interagito con corpi opachi o trasparenti la situazione risulta diversa.

Ad esempio, si supponga di osservare la luce riflessa dalla superficie di un oggetto (caso molto comune), o trasmessa attraverso uno spessore di materiale più o meno trasparente. Ebbene, la composizione spettrale delle radiazioni che giungono all'osservatore, e quindi il colore osservato, oltre a dipendere dalla composizione spettrale della luce incidente, dipende da una proprietà dell'oggetto, e cioè dal suo fattore di riflessione ρ_λ o di trasmissione τ_λ . In casi come questi il colore osservato è sempre il risultato di una riflessione o di una trasmissione selettiva della luce incidente: se, ad esempio, un oggetto illuminato da luce diurna appare rosso, evidentemente il fattore di riflessione $\rho_\lambda = f(\lambda)$ che caratterizza la sua superficie sarà tale da riflettere maggiormente la luce a queste λ .

In generale, ogni sensazione cromatica può essere qualitativamente caratterizzata da **tre attributi**: la *tinta*, la *saturazione* e la *brillanza*.

- La **tinta** è l'attributo secondo il quale una sorgente luminosa o una superficie illuminata viene descritta come rossa, verde, ecc.
- La **saturazione** rappresenta un *attributo aggiuntivo della tinta*, ad esempio: verde chiaro, blu vivido ecc. Se la saturazione di una tinta è intensa, il colore risulta fortemente caratterizzato, se invece essa è debole, il colore tende ad essere poco caratterizzato e, cioè, acromatico (grigio).
- La **brillanza** dipende dalla *luminanza della sorgente*, le tinte appaiono più o meno brillanti all'osservatore in relazione diretta alla luminanza della superficie osservata.

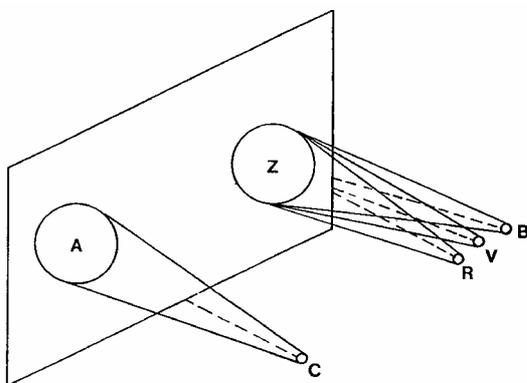
La colorimetria consente di trattare questi attributi in modo quantitativo.

7.6 Cenni sulla teoria tricromatica

Come già discusso, l'occhio umano, tramite le sue cellule fotosensibili, è in grado di trasmettere ai centri cerebrali opportuni stimoli, i quali sono elaborati dal cervello sotto forma di sensazioni. Più in particolare risulta possibile, a bassi livelli d'illuminamento, valutare solo la potenza luminosa incidente sull'occhio (visione in bianco e nero o scotopica), mentre ai livelli d'illuminamento più elevati che caratterizzano la visione diurna o fotopica si verificano anche le sensazioni cromatiche, cioè si possono distinguere i colori degli oggetti.

Come già ricordato, le cellule adibite alla distinzione dei colori sono dette coni, mentre alla visione in bianco e nero sono deputati i bastoncelli. Nei coni sono state individuate tre diverse sostanze o pigmenti capaci di assorbire selettivamente la luce: uno assorbe fortemente nella regione spettrale dei rossi, un altro nei blu e infine un altro nei verdi. In conseguenza un fascio di radiazioni (monocromatico o policromatico) verrà analizzato solo sulla base dell'entità del totale assorbimento verificatosi nelle tre regioni spettrali e queste tre informazioni, in un modo ancora non interamente chiarito, vengono elaborate dal cervello per decidere di quale colore si tratti (**teoria tricromatica di Young e Helmholtz**).

Come rappresentato in figura, si supponga di illuminare una porzione **A** di una superficie ($\rho_\lambda = \rho = 1$) mediante una certa luce policromatica **C** ed un'altra porzione **Z** di superficie a questa prossima mediante tre sorgenti monocromatiche **R**, **V**, **B**, scelte nella regione spettrale dei rossi, dei verdi e dei blu, e quindi con $\lambda_R \neq \lambda_V \neq \lambda_B$, ed agenti contemporaneamente. L'esperienza prova che, regolando opportunamente i flussi



luminosi ϕ_{IR} , ϕ_{IV} , ϕ_{IB} di queste tre sorgenti (primarie) che incidono sulla superficie, risulta quasi sempre possibile ottenere da parte dell'osservatore giudizi di equivalenza cromatica tra le due porzioni illuminate.

Talvolta, per ottenere il giudizio d'equivalenza tra le due superfici illuminate, può essere necessario spostare una delle luci primarie sulla

zona illuminata dalla luce policromatica. In queste condizioni le due porzioni di superficie risultano cromaticamente indistinguibili, e cioè eguali per tinta, saturazione e brillantezza (luminanza).

Al fine di caratterizzare cromaticamente la luce emessa dalle sorgenti luminose, si usa far riferimento alla **temperatura di colore** e all'**indice di resa cromatica** della sorgente stessa.

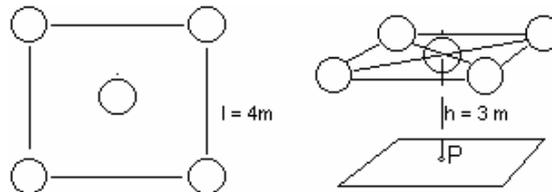
La **temperatura di colore** è definita come la temperatura (in Kelvin) a cui occorre portare un corpo nero affinché emetta radiazioni di caratteristiche cromatiche eguali, o almeno molto simili, a quelle della sorgente in esame. Ad esempio, a circa 1000 [K] il corpo nero emette radiazioni rossastre, mentre già a circa 3000 [K] la luce appare bianca con una tonalità "calda". A circa 6000 [K] la luce bianca è caratterizzata da una tonalità "fredda".

L' **indice di resa cromatica R_a** , variabile tra 0 e 100, costituisce un importante criterio per valutare l'alterazione che i colori di oggetti illuminati subiscono in relazione alla particolare sorgente utilizzata. Valori inferiori indicano una capacità progressivamente minore di resa cromatica. L'indice si dimostra un valido ausilio nella progettazione di molti ambienti, dove i contrasti e le armonie cromatiche d'oggetti e superfici subirebbero sgradevoli alterazioni se non fossero utilizzate lampade con adeguato indice di resa cromatica.

Insieme alla temperatura di colore questo parametro assume una notevole importanza nel caso d'illuminazione d'interni: ad esempio, nel caso di musei nei quali siano esposte opere pittoriche.

ESERCIZI ED ESEMPI

1) Si consideri un reticolo quadrato di lato $l = 4\text{ m}$ con sorgenti luminose uguali puntiformi, disposte come in figura. Se le sorgenti sono isotrope ($I = 50\text{ cd}$), si valuti l'illuminamento nel punto P ($h = 3\text{ m}$) posto lungo la verticale passante per la sorgente centrale.



Per le quattro sorgenti poste in corrispondenza degli spigoli del quadrato si ha:

$$\cos \vartheta = \frac{h}{d} = \frac{3}{\sqrt{17}} = 0.7276$$

dove d è la distanza tra il punto P e ciascuna sorgente: $d = (3^2 + (2\sqrt{2})^2)^{1/2} = \sqrt{17}$

L'illuminamento prodotto dalla singola lampada risulta:

$$E_1 = \frac{I \cdot \cos^3 \vartheta}{h^2} = 50 \cdot 0.7276^3 / 3^2 \cong 2.1 \text{ lx}$$

Per la lampada posta al centro del quadrato:

$$\cos \vartheta = 1$$

$$d = h$$

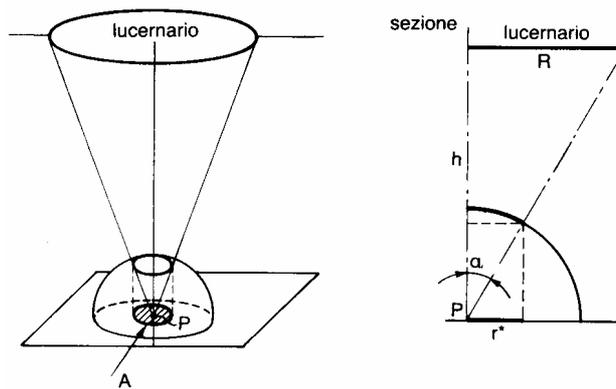
e il relativo illuminamento è dato da:

$$E_1 = \frac{I \cdot \cos^3 \vartheta}{h^2} = 50 \cdot 1 / 3^2 \cong 5.5 \text{ lx}$$

L'illuminamento totale nel punto P è, quindi:

$$E_{\text{tot}} = 4 \cdot 2.1 + 5.5 = 13.9 \text{ lx}$$

2) Valutare l'illuminamento prodotto da una sorgente superficiale estesa di forma circolare (raggio $R = 1\text{ m}$) nel punto P sottostante il centro della superficie, come rappresentato in figura. La sorgente superficiale (ad esempio un lucernario) è caratterizzata da una luminanza di 2000 nit (cd/m^2) ed è posta ad un'altezza $h = 5\text{ m}$.



Risulta

$$E_P = L_1 \int_{A_1} (dA_1 \cos \vartheta_1 / R^2) \cos \vartheta_2 = L_1 \int_{A_1} d\sigma^0 \cos \vartheta_2 = L_1 A$$

$$E_P = L_1 \cdot A = L_1 \cdot \pi \cdot r^{*2}$$

dove:

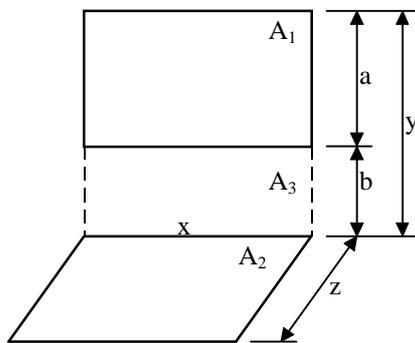
$$r^* = R \cdot \sin \alpha$$

$$\tan \alpha = \frac{R}{h} \Rightarrow \alpha = \arctan \frac{R}{h} = 11.31^\circ \Rightarrow \sin \alpha = 0.196$$

Si ha quindi:

$$E_P = L_1 \cdot \pi \cdot \sin^2 \alpha = 2000 \cdot 3.14 \cdot (0.196)^2 = 241 \text{ lux}$$

3) Valutare l'illuminamento medio prodotto dalla superficie luminosa A_1 di forma rettangolare sulla superficie A_2 come rappresentato in figura.



L'illuminamento medio E_{m_2} prodotto sulla superficie A_2 dalla superficie luminosa A_1 è dato da:

$$\varphi_{1 \rightarrow 2} = M_{11} F_{1+3,2} (A_1 + A_3) - M_{11} F_{3,2} A_3$$

$$E_{m_2} = \frac{\varphi_{1 \rightarrow 2}}{A_2} = \pi \cdot [L_1 F_{1+3,2} (A_1 + A_3) - L_1 F_{3,2} A_3] / A_2$$

Il flusso luminoso $\varphi_{1 \rightarrow 2}$ si ottiene per differenza tra il flusso luminoso che $A_1 + A_3$ con luminanza L_1 determinerebbero su A_2 ed il flusso luminoso $\varphi_{3 \rightarrow 2}$ che la superficie A_3 determinerebbe da sola.

Nel caso in cui $L_1=2000$ [nit], $a = 2$ [m], $b = 1$ [m], $x = 3$ [m], $z = 2.5$ [m], si ha dalla figura:

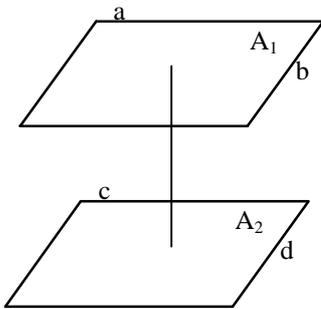
$$x_{1+3,2} = \frac{3}{3} = 1; \quad y_{1+3,2} = \frac{2.5}{3} = 0.83 \quad \text{e quindi} \quad F_{1+3,2} = 0.18$$

$$x_{3,2} = \frac{1}{3} = 0.33; \quad y_{3,2} = \frac{2.5}{3} = 0.83 \quad \text{e quindi} \quad F_{3,2} = 0.33$$

Applicando la relazione si ha:

$$E_{m_2} = 3.14 \cdot 2000 \cdot [0.18 \cdot 9 - 0.33 \cdot 3] / 7.5 = 526 \text{ [lux]}$$

4) Valutare l'illuminamento medio prodotto dalla superficie luminosa A_1 di forma rettangolare sulla superficie A_2 come rappresentato in figura.



L'illuminamento medio E_{m_2} prodotto da una superficie luminosa A_1 sulla superficie A_2 rappresentata in figura è dato da:

$$E_{m_2} = \frac{\Phi_{1 \rightarrow 2}}{A_2} = \pi \cdot L_1 \cdot F_{1,2} \cdot A_1 / A_2$$

Per cui ponendo $L_1=1500$ [nit], $a = c = 3$ [m], $b = d = 1.5$ [m], $h = 3$ [m], si ha dalla figura:

$$\frac{b}{h} = \frac{1.5}{3} = 0.5 \quad \text{e, quindi:} \quad F_{1,2} = 0.13$$

Dunque, applicando la relazione, si ha:

$$E_{m_2} = 3.14 \cdot 1500 \cdot 0.13 \cdot 4.5 / 4.5 = 612 \text{ [lux]}$$