

## Fotometria e radiometria

### Spettro luminoso

Ricordiamo che la radiazione luminosa è energia elettromagnetica che si propaga nello spazio. Il campo elettrico e magnetico vibrano su due piani ortogonali tra di loro, a una frequenza che caratterizza il tipo di radiazione. In particolare la radiazione luminosa ha lunghezze d'onda comprese tra 380 e 780 nm (nano metri =  $10^{-9}$  m). Le lunghezze d'onda più piccole corrispondono a luce di colore blu-azzurro quelle più lunghe a luce di colore arancio-rosso. Valori inferiori e vicini ai 380 nm caratterizzano radiazione ultravioletta, quelli al di là dei 780 nm caratterizzano radiazione infrarossa e termica.

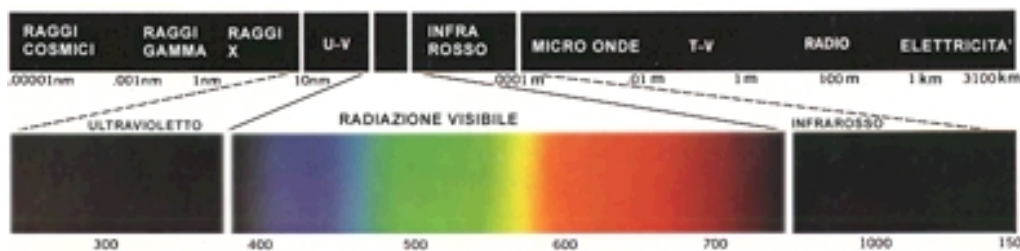


Fig. 1-6a.01- Lo spettro della radiazione elettromagnetica e l'intervallo della radiazione visibile

Newton per primo osservò attraverso il prisma la presenza di molteplici lunghezze d'onda nella luce solare.

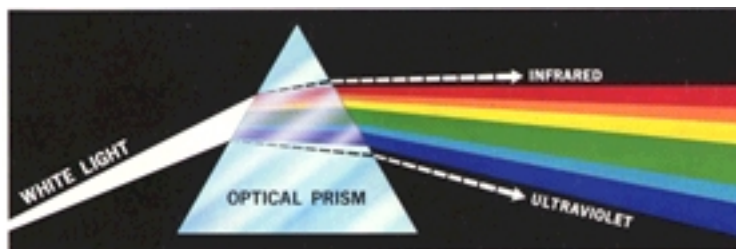


Fig. 1-6a.02- Il prisma disperde la luce con un angolo dipendente dalla lunghezza d'onda

Il nostro sistema visivo è attrezzato dunque a rilevare radiazione elettromagnetica per questo intervallo di lunghezze d'onda, mentre dispositivi speciali sono in grado di rilevare radiazione di lunghezze d'onda inferiori o superiori.

### Misure fotometriche

Per caratterizzare la radiazione luminosa si utilizzano alcune grandezze fisiche che permettono di misurarne le caratteristiche. Tutte le grandezze fisiche considerate sono espresse in funzione della lunghezza d'onda  $\lambda$ .

La grandezza principale è l'energia luminosa spettrale, che misura la quantità di energia propagata da una determinata radiazione luminosa. Essa si rappresenta con il simbolo  $Q(\lambda)$  (qualche volta si rappresenta anche con il simbolo  $E$ ), e si misura in Joule (J).

Se l'energia luminosa emessa varia nel tempo, la quantità di energia emessa per unità di tempo viene chiamata flusso luminoso spettrale, e si indica con  $\Phi(\lambda)$ :

$$\Phi(\lambda) = \frac{dQ(\lambda)}{dt}$$

(Ricordiamo che con il simbolo  $d$  denotiamo un intervallo infinitesimo). La sua unità di misura è il lumen/metro (lm/m).

Queste due grandezze sono indipendenti dalla direzione di emissione e dalla estensione della sorgente di emissione; per tenere conto di queste due caratteristiche si utilizzano altre grandezze: la

*intensità luminosa spettrale*, la *luminanza spettrale*, la *uscita luminosa spettrale* e la *illuminanza spettrale*.

L'*intensità luminosa spettrale* il flusso luminoso emesso secondo una direzione determinata e indica quindi la variazione di flusso in un angolo solido infinitesimo, che viene rappresentato con il simbolo  $d\omega$ :

$$I(\lambda) = \frac{d\Phi(\lambda)}{d\omega}$$

L'unità di misura della intensità luminosa spettrale la candela (cd). Con l'intensità luminosa spettrale si possono caratterizzare molto bene sorgenti di luce puntiformi, in quanto si descrive il flusso al variare della direzione di emissione; quando si ha a che fare con sorgenti estese o quando si vuole descrivere la radiazione luminosa che giunge su una determinata superficie si ricorre alle altre grandezze.

La *luminanza spettrale* indica l'intensità di una radiazione emessa da una superficie infinitesima e considerata perpendicolarmente alla direzione di osservazione:

$$L(\lambda) = \frac{dI(\lambda)}{dA} = \frac{d^2\Phi(\lambda)}{d\omega dA \cos\vartheta}$$

In questa equazione  $dA$  indica l'elemento di superficie infinitesimo e  $\cos\vartheta$  indica l'angolo tra la direzione di osservazione e la normale alla superficie.

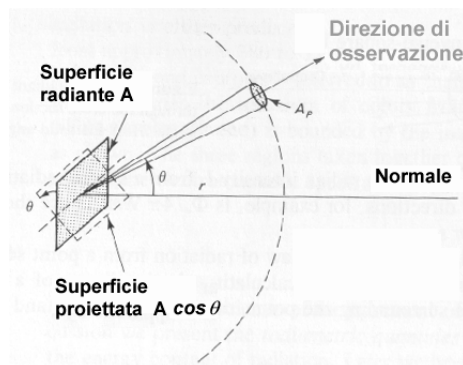


Fig. 1-6a.03- La luminanza irradiata da una superficie

Questo nuovo fattore tiene conto della radiazione che effettivamente giunge a un osservatore. L'unità di misura della luminanza spettrale il *nit* che corrisponde alla candela/(metro<sup>2</sup>).

Infine la *uscita luminosa spettrale* e la *illuminanza spettrale* sono la stessa grandezza ma la prima viene considerata come energia emessa e la seconda come energia che giunge su una superficie infinitesima. La definizione di illuminanza spettrale quindi:

$$E(\lambda) = \frac{d\Phi(\lambda)}{dA}$$

e l'unità di misura il lumen/(metro quadro) (lm/m<sup>2</sup>).

Nella tabella queste grandezze fisiche sono riassunte con le loro unità di misura; nell'ultima colonna sono indicate altre unità di misura che a volte si incontrano nella letteratura tecnica.

Nome	Definizione	Unit di misura	Altre unit di misura
Energia luminosa spettrale	$Q(\lambda)$	Joule - J	
Flusso luminoso spettrale	$\Phi(l) = \frac{dQ(l)}{dt}$	Watt - W	lumen - lm
Intensit spettrale	$I(\lambda) = \frac{d\Phi(\lambda)}{d\omega}$	candela -cd	Watt/steradiante - W/sr lumen/steradiante - lm/sr

Luminanza spettrale	$L(\lambda) = \frac{dI(\lambda)}{dA} = \frac{d^2\Phi(\lambda)}{d\omega dA \cos\vartheta}$	nit	candela/m <sup>2</sup> - cd/ m <sup>2</sup> stilb (1stilb = 10.000 nit) lambert (1 lambert = 10.000/π nit)
Uscita luminosa spettrale	$E(\lambda) = \frac{d\Phi(\lambda)}{dA}$	lumen/ m <sup>2</sup> - lm/ m <sup>2</sup>	
Illuminanza spettrale	$E(\lambda) = \frac{d\Phi(\lambda)}{dA}$	lux - lx	lumen/ m <sup>2</sup> - lm/ m <sup>2</sup> nox (1 lux = 1.000 nox) phot (1 phot = 10.000lux)

L'aggettivo *spettrale* che abbiamo aggiunto a ciascuna di queste grandezze fisiche indica che esse dipendono dalla lunghezza d'onda, ovvero possono assumere valori diversi per lunghezze d'onda diverse. Se vogliamo conoscerne il valore sull'intero intervallo della luce visibile, dovremo eseguire una integrazione, ovvero sommarne il contributo infinitesimo relativo a ciascuna lunghezza d'onda. Solitamente l'integrazione viene approssimata da una somma considerata su intervalli di 10 nm da 380 a 780 nm.

In generale gli strumenti che si utilizzano per misurare la radiazione luminosa forniscono valori non spettrali, ma integrati sull'intero intervallo delle lunghezze d'onda visibili. Inoltre eseguono anche una integrazione sia rispetto alla direzione di provenienza della luce sia rispetto all'area illuminata.



Fig. 1-6a.04 Spettrofotometro portatile Cortesia Minolta

Per comprendere meglio questa tecnologia pensiamo all'esposimetro incorporato in una macchina fotografica: esso misura la illuminanza che giunge sul piano della pellicola dall'apertura dell'obiettivo, quindi misura una illuminanza spettrale integrata nell'intervallo della luce visibile e integrata rispetto all'angolo solido del campo di ripresa dell'obiettivo.

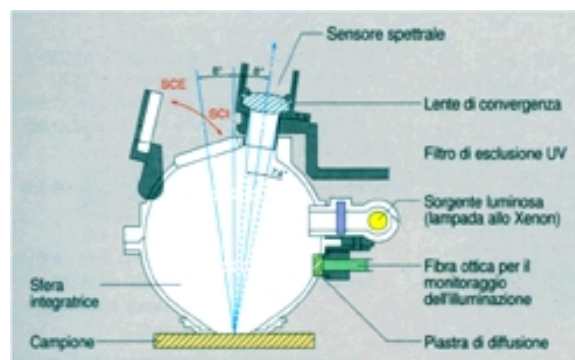


Fig. 1-6a.05- Schema di funzionamento dello spettrofotometro. Il campione da misurare viene illuminato da una sorgente standard, la luce viene riflessa in una sfera e viene misurata dal recettore. Quando si esclude la componente speculare si misura la riflessione lambertiana pura.  
Cortesia Minolta

Nel campo delle immagini digitali, acquisite o create con tecniche di sintesi foto realistica o pittorica, si considerano soltanto tre valori, relativi alle componenti R, G e B. Ci corrisponde a valutare ogni grandezza fisica in tre intervalli approssimativamente centrati intorno ai 450, 550 e 650 nm., ovvero in prossimità dei colori blu, verde e rossi rispettivamente. Inoltre, come vedremo, nei modelli di illuminazione per la sintesi di immagini si utilizzano varie grandezze fisiche: la intensità per i modelli locali e la luminanza o la illuminanza per quelli globali.

Quando si considerano radiazioni elettromagnetiche estese sull'intero intervallo delle lunghezze d'onda possibili, che va da  $10^{-16}$  a  $10^8$  m, si definiscono grandezze fisiche analoghe, i cui nomi sono: *energia radiante*, *flusso radiante*, *intensità radiante*, *radianza*, *uscita radiante* e *irradianza*, rispettivamente.

Da un punto di vista strettamente fisico parrebbe che non ci sia alcuna differenza tra le grandezze radiometriche, definite nell'intero spettro della radiazione elettromagnetica, e quelle fotometriche, limitate all'intervallo 380-780 nm. Dal punto di vista del significato che attribuiamo alle grandezze fotometriche invece occorre tenere conto delle caratteristiche del sistema visivo umano. Infatti, come vedremo meglio nel paragrafo specificamente dedicato a questo soggetto, il sistema visivo umano non reagisce agli stimoli elettromagnetici nello stesso modo alle varie lunghezze d'onda. L'occhio umano infatti ha un massimo di sensibilità in corrispondenza a 555 nm e decresce per valori inferiori e superiori come si vede in figura efficacia.

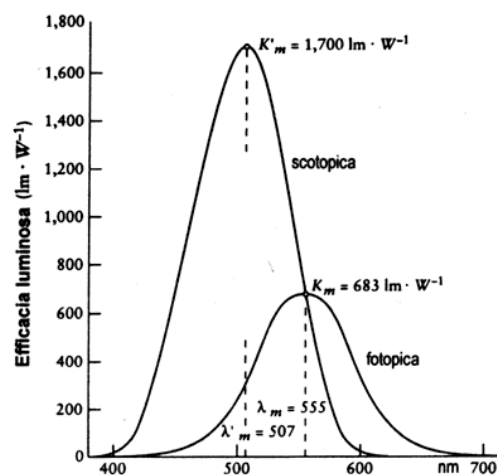


Fig. 1-6a.06- le due curve rappresentano l'efficacia di risposta del sistema visivo umano in condizioni di alta illuminazione (fotopica) e di scarsa illuminazione (scotopica)

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

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

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

$$\text{unit -fotometriche} = K(\lambda) \cdot \text{unit -radiometriche}$$

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

## Sorgenti luminose

L'emissione della radiazione luminosa è il risultato di uno stato di elevata eccitazione termica dei materiali. Quando la temperatura è sufficientemente elevata un corpo solido emette radiazioni

dovute alla agitazione atomica che provoca salti di stato degli elettroni, che cambiano livello di energia. A ogni cambio di livello corrisponde una emissione di energia, a una determinata lunghezza d'onda. La numerosità e casualità dei salti provocano emissione di radiazione composta da innumerevoli lunghezze d'onda; tuttavia la miscela di lunghezze d'onda prodotte da un dato corpo è caratteristica di quel corpo, in un certo senso la composizione spettrale di una radiazione emessa da un corpo a una data temperatura ne costituisce la "firma".

## Il corpo nero

Un corpo ideale che non trasmette e non riflette l'energia che lo colpisce, ma la assorbe interamente è chiamato in fisica *corpo nero*. Se un corpo nero viene portato a temperature elevate la sua emissione di energia è descritta dalla *uscita radiante totale* ed è governata dalle leggi di Stefan-Boltzmann:

$$M_e = \sigma T^4$$

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15h^3 c^3} = 5,6697 \cdot 10^{-8} \text{ (W/m}^2\text{K}^4\text{)}$$

$\sigma$  la costante di Stefan-Boltzmann,  $k$  la costante di Boltzmann,  $h$  la costante di Planck,  $c$  la velocità della luce nel vuoto. Si vede da questa legge che l'energia emessa dipende dalla quarta potenza della temperatura  $T$ . Planck ha a sua volta determinato la legge che governa l'*uscita radiante spettrale* del corpo nero, quindi come avviene l'emissione di energia alle diverse lunghezze d'onda:

$$M_e(\lambda) = \frac{hc^3}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda kT} - 1)}$$

Nella figura *spet\_rad* vediamo il diagramma della uscita radiante spettrale del corpo nero; i valori numerici a fianco di ogni curva indicano la temperatura cui il corpo nero è stato portato; la uscita radiante spettrale è espressa in  $\text{W/m}^2$  e le unità sono in  $\mu\text{m}$ , la notazione  $5\text{E}7$  equivale a  $5 \times 10^7$ ; la lunghezza d'onda è anch'essa espressa in  $\mu\text{m}$ . La curva più alta, ad esempio, indica la distribuzione di energia emessa dal corpo nero alla temperatura di  $6000 \text{ K}$ . Le due linee tratteggiate verticali indicano l'intervallo delle lunghezze d'onda della radiazione visibile, mentre la curva tratteggiata unisce i picchi delle curve di emissione spettrale alle differenti temperature, ed è chiamata legge di Wien.

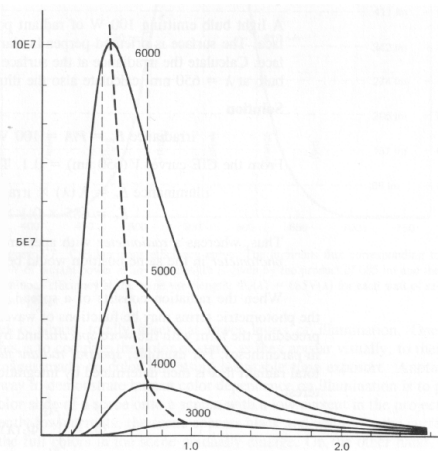


Fig. 1-6a.07- Uscita radiante spettrale del corpo nero alle varie temperature

È interessante osservare che al di sotto di  $3000 \text{ K}$  il corpo nero emette pochissima energia visibile e per lo più spostata verso il rosso, mentre a  $6000 \text{ K}$  la radiazione emessa copre l'intero intervallo del visibile con valori molto alti.

Un diagramma che spesso si incontra nella letteratura tecnica relativa agli apparecchi illuminanti la distribuzione di potenza relativa, ed il rapporto tra la uscita radiante spettrale del corpo nero e l'uscita radiante a  $\lambda=555\text{ nm}$  moltiplicata per 100:

$$S_e(\lambda) = \frac{M_e(\lambda)}{M_e(555)} \cdot 100$$

Questa grandezza permette di confrontare la composizione spettrale di emissioni a diverse temperature, prescindendo dalla loro energia.

In figura distr\_pot vediamo un diagramma con diverse curve alle temperature a fianco indicate, sempre relativamente alla emissione di un corpo nero.

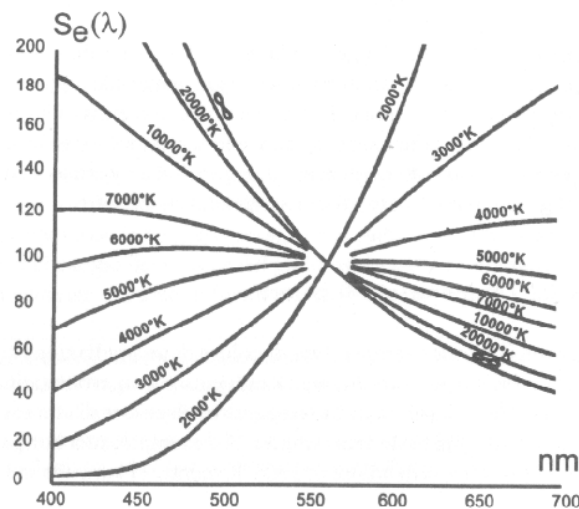


Fig. 1-6a.08- distribuzionedi potenza relativaemessa dal corpo nero

L'aspetto interessante di questo diagramma che mostra in modo evidente la presenza di dominanti cromatiche in una determinata sorgente: infatti un corpo nero a 2000 K ha, in proporzione, una maggiore quantità di radiazione sulle lunghezze d'onda elevate (giallo, arancio rosso e infrarosso) rispetto all'emissione a 10.000 K. A sua volta la emissione a 5.000 - 6.000 K ha una distribuzione di lunghezze d'onda quasi uniforme e corrisponde a una sorgente di luce che chiamiamo comunemente *luce bianca*. La temperatura di emissione di un corpo nero per la quale una determinata pellicola fotografica è stata calibrata, viene chiamata *temperatura colore*. Nella fotografia tradizionale le pellicole a colori per fotografie in esterno sono calibrate a una temperatura colore di 6.500 K, che corrisponde alla distribuzione di frequenze della luce diurna in una normale giornata di sole rilevata a Nord; la fiamma di una candela ha, a sua volta, una temperatura colore di circa 1.900 K, e una lampada ad incandescenza al tungsteno circa 3000 K.

Oggetti e superfici reali, non il corpo nero che è un oggetto ideale, hanno un comportamento di emissione che è ancora ben descritto dalla legge di Stefan-Boltzmann ma con la differenza che interviene una costante di emissività  $\epsilon(T)$ , che può essere funzione della temperatura, e che è definita come rapporto tra la uscita radiante dell'oggetto reale e quella del corpo nero alla stessa temperatura. Se l'emissività è indipendente dalla lunghezza d'onda abbiamo a che fare con i cosiddetti *corpi grigi*, e in tal caso l'uscita radiante del corpo grigio è direttamente proporzionale a quella del corpo nero. Ad esempio un filo di tungsteno incandescente (utilizzato per le normali lampade ad incandescenza) si comporta come un corpo grigio con emissività  $\epsilon = 0,4 \approx 0,5$ .

### **Sorgenti artificiali e luce naturale**

Abbiamo visto che l'emissione di luce avviene per l'eccitazione degli atomi di un oggetto; se l'oggetto utilizzato è composto da un solo elemento allora l'emissione di radiazione avviene per valori discreti ben definiti. Perciò la radiazione emessa da oggetti composti da un solo elemento ha una composizione spettrale a gradini e ciascun gradino corrisponde a un possibile salto di livello di

un elettrone periferico degli atomi di quell'elemento. In figura mercurio vediamo la distribuzione di potenza relativa di una sorgente al mercurio.

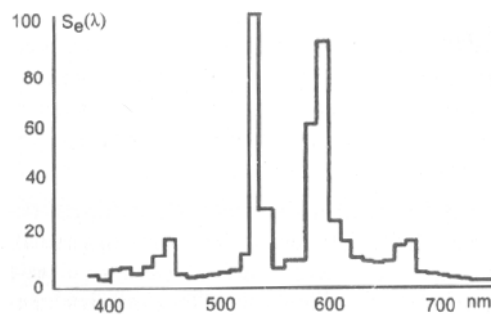


Fig. 1-6a.09- Distribuzione di potenza di una sorgente di luce al mercurio

Altre sorgenti di luce possono essere composte con sostanze fluorescenti, ovvero sostanze che hanno la capacità di assorbire la radiazione ultravioletta catturandone l'energia e rilasciandola dopo un certo periodo, emettendo una luce a una determinata lunghezza d'onda, maggiore di quella catturata. In figura fluorescenza vediamo la distribuzione di potenza relativa di una lampada a fluorescenza con temperatura colore di 6.500  $\mu$ K.

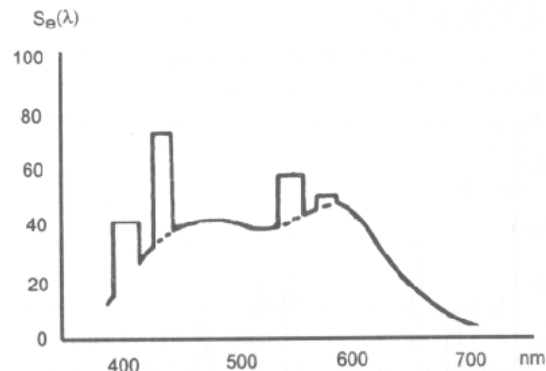


Fig. 1-6a.10- Distribuzione di potenza di una sorgente di luce fluorescente

Tra gli illuminanti artificiali hanno importanza particolare gli illuminanti *standard*, la cui distribuzione spettrale è stata concordata a livello internazionale per garantire compatibilità tra prodotti e strumenti di fotometria e radiometria. Particolarmente importanti sono gli illuminanti riassunti nella seguente tabella:

Nome	Tipo	Temperatura colore
A	filamento di tungsteno in atmosfera gassosa	2.855,6 $\mu$ K
B	come A con un filtro; luce simile alla luce solare diretta	4.874 $\mu$ K
C	come A con filtro simile a luce con cielo coperto	6.775 $\mu$ K
D65	solo dati numerici, non esiste sorgente artificiale corrispondente	6.500 $\mu$ K

In figura standard vediamo la distribuzione di potenza relativa di questi illuminanti.

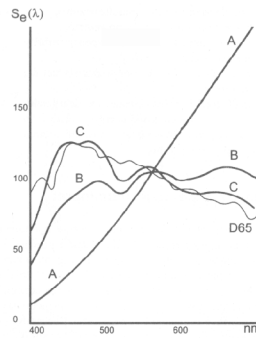


Fig. 1-6a.11- Distribuzione di potenza relativa dei principali illuminanti standard

La luce naturale prodotta dal sole è il risultato dei processi di fusione nucleare che si svolgono nella massa solare, e che danno luogo a emissione in tutte le lunghezze d'onda, a causa dei continui salti di livello degli elettroni degli atomi di tutte le sostanze che costituiscono la massa solare. La luce che giunge a noi, tuttavia, attraversa anche l'atmosfera che ha, a sua volta, la capacità di disperdere e di assorbire la luce alle varie lunghezze d'onda. In particolare il fenomeno della dispersione di luce alla diffusione della luce, in virtù della quale in situazioni naturali (anche di notte) le zone in ombra non sono mai completamente buie. La diffusione della luce è maggiore nel campo delle onde più corte e questo giustifica il colore azzurro del cielo. L'assorbimento della luce di lunghezza ai fenomeni che Leonardo Da Vinci chiamava '*prospettiva aerea*' ovvero alla graduale attenuazione della saturazione dei colori col progredire della distanza.

Nel descrivere la composizione spettrale della luce naturale si usano solitamente quattro situazioni tipiche:

- a - cielo sereno allo zenit e molto azzurro
- b - cielo sereno al nord e meno azzurro
- c - cielo completamente coperto con forte diffusione per la presenza delle nuvole
- d - luce diretta del sole sommata alla luce diffusa dal cielo sereno

In figura naturale vediamo la distribuzione di potenza relativa della luce naturale nelle quattro situazioni indicate sopra.

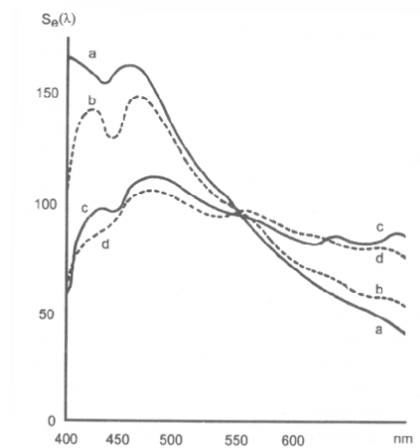


Fig. 1-6a.12- Distribuzione di potenza relativa della luce naturale

### **Apparecchi illuminanti**

Gli apparecchi illuminanti (nella letteratura tecnica inglese spesso denominati *luminaire*) sono composti da una sorgente di luce artificiale, montata in un contenitore con sistemi a specchio o lenti per dirigere la luce in aree privilegiate. La sorgente in linea di principio potrebbe avere una



emissione isotropa nelle varie direzioni; l'apparecchio illuminante modifica questa isotropia posizionando la sorgente nel fuoco di uno specchio parabolico e ponendo di fronte ad essa una lente per focalizzare il fascio di luce. Per descrivere la forma della emissione si usa rappresentare l'intensità luminosa prodotta dall'apparecchio nelle varie direzioni con dei segmenti di lunghezza proporzionale, in modo che la superficie che avvolge i vertici di questi segmenti costituisce un solido chiamato *solido fotometrico*.

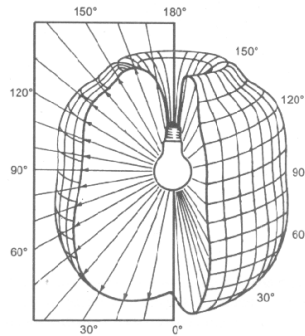


Fig. 1-6a.13 Rappresentazione di un apparecchio illuminante mediante il solido fotometrico

Un'altra tecnica di rappresentazione sfrutta linee curve che rappresentano regioni di eguale intensità luminosa proiettate su diversi piani, che costituiscono a loro volta sezioni del solido fotometrico, come vediamo in figura sezioni\_fotom.

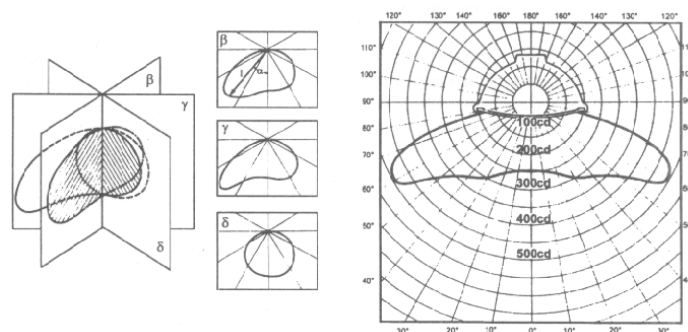


Fig. 1-6a.14 Sezioni del solido fotometrico per descrivere l'emissione di un proiettore per autoveicoli

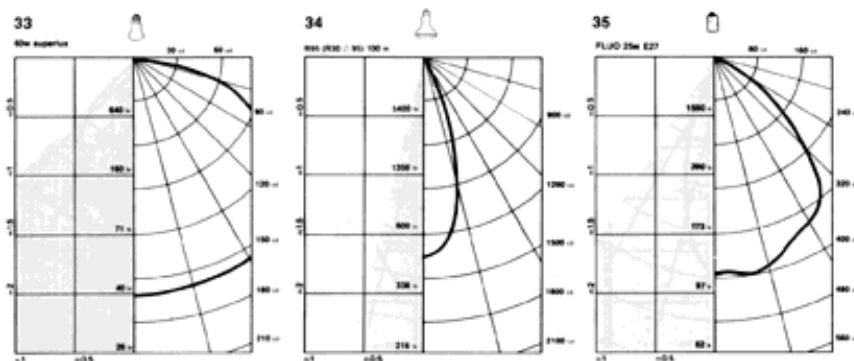


Fig. 1-6a.15 Diagrammi di emissione da un catalogo di apparecchi illuminanti Targetti

La conoscenza della composizione spettrale, della intensità di emissione nel solido fotometrico, la struttura e le caratteristiche di una eventuale lente permettono di caratterizzare con grande accuratezza un apparecchio illuminante.