

1

Lezioni di illuminotecnica

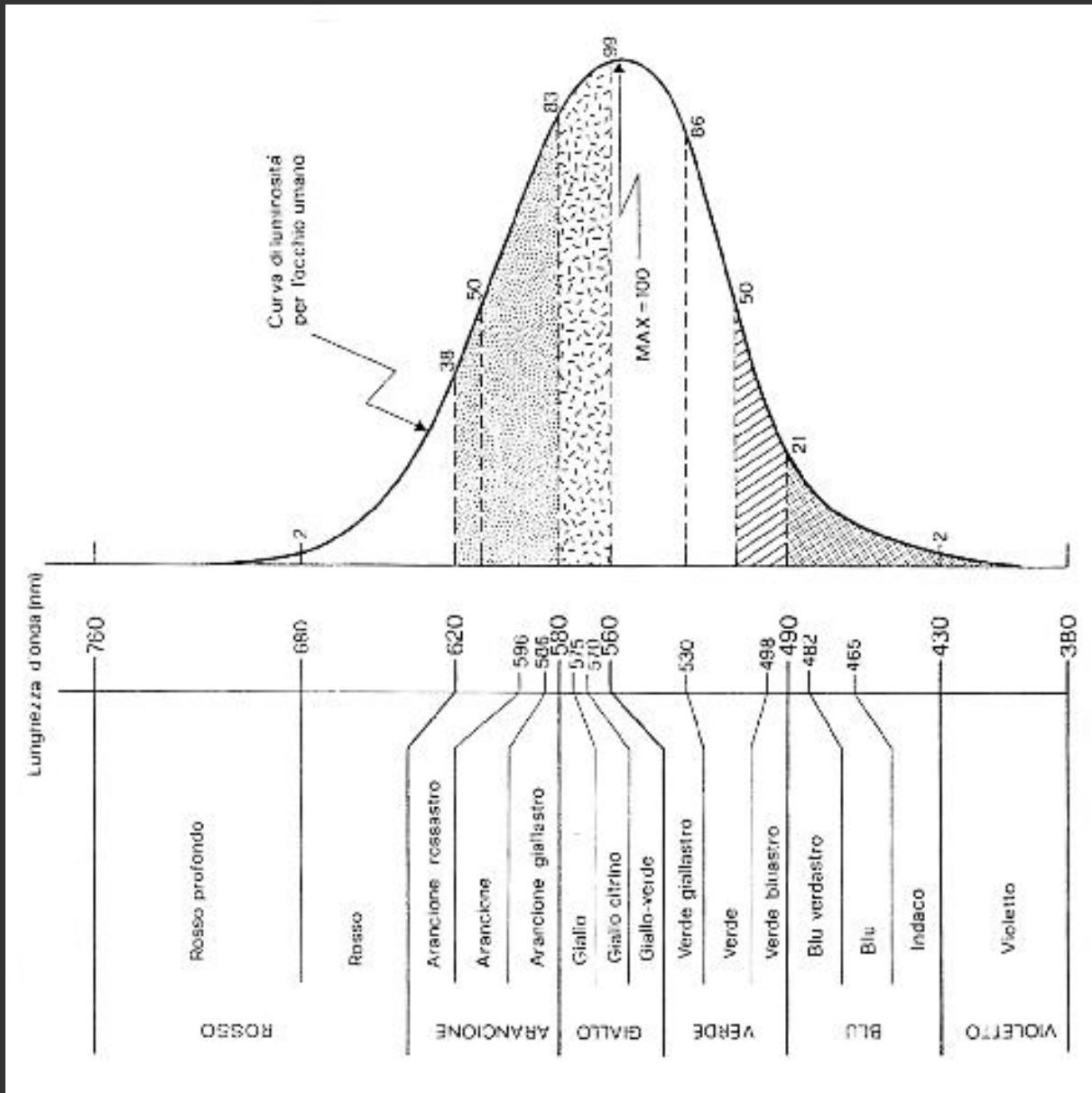
grandezze illuminotecniche



Grandezze fotometriche

- Flusso luminoso** – caratteristica propria delle sorgenti luminose;
- Intensità luminosa** – caratteristica propria delle sorgenti luminose;
- Illuminamento** – effetto su una superficie;
- Luminanza** – caratteristica sia delle sorgenti illuminanti sia degli oggetti illuminati, considerati sorgenti secondarie.
- Radianza** – caratteristica sia delle sorgenti illuminanti sia degli oggetti illuminati, considerati sorgenti secondarie.

Sensibilità dell'occhio umano



Con esperimenti effettuati su un gran numero di persone si è individuata la sensibilità spettrale relativa dell'occhio umano.

Si è definita una funzione che descrive la sensibilità media dell'occhio umano a radiazioni con lunghezza d'onda diversa, ma eguale energia. Tale funzione è detta **fattore di visibilità $K(\lambda)$** e rappresenta la quantificazione numerica della sensibilità visiva dell'occhio umano medio.

Fattore di visibilità e flusso luminoso

Considerando una radiazione monocromatica per determinare l'effetto luminoso bisogna pesare la sua potenza $P(\lambda)$ con la sensibilità dell'occhio umano ossia moltiplicarla per il corrispondente valore del fattore di visibilità $K(\lambda)$. Si otterrà la "luce", ovvero il flusso luminoso, corrispondente $\Phi(\lambda)$:

$$\Phi(\lambda) = K(\lambda) \cdot P(\lambda)$$

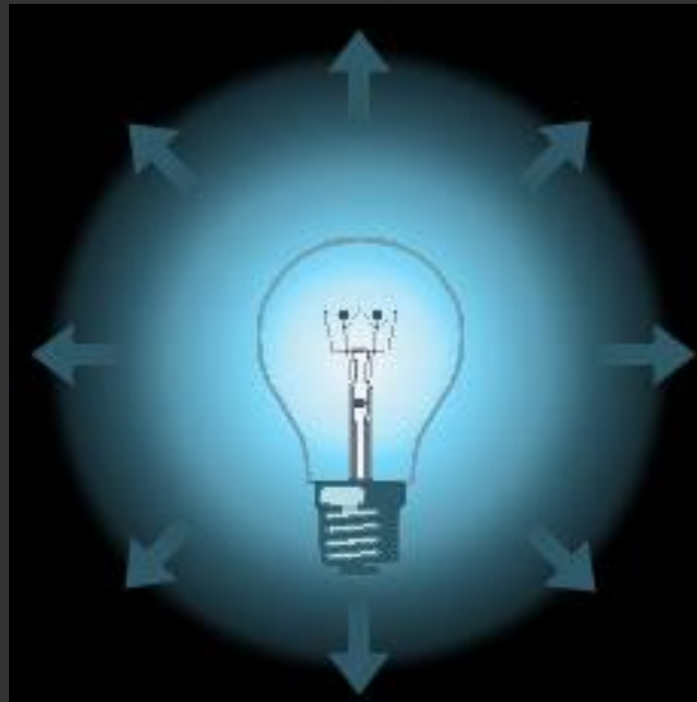
Il **fattore di visibilità** risulta definito a meno di una costante. Convenzionalmente per il valore massimo di $K(\lambda)$ a $0.555 \mu\text{m}$, per visione fotopica, si assume un valore di **683 lm/W**.

Oltre al fattore di visibilità è utile definire il **coefficiente di visibilità** definito come:

$$V(\lambda) = K(\lambda) / K_{\text{max}}$$

Flusso luminoso

Il flusso luminoso è la grandezza fotometrica che permette di valutare l'entità della sensazione luminosa corrispondente alla radiazione emessa da una sorgente.



Flusso luminoso

Quando si consideri una radiazione complessa bisogna considerare le diverse componenti della radiazione e poi sommare (integrare) alle diverse lunghezze d'onda secondo la sensibilità dell'occhio umano:

$$\Phi_{vis} = \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} P(\lambda) K(\lambda) d\lambda = K(\lambda)_{max} \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} P(\lambda) V(\lambda) d\lambda$$

L'unità di misura del flusso luminoso è il **lumen (lm)**. Esso viene definito come il flusso luminoso emesso, alla lunghezza d'onda di 0.555mm, da una sorgente puntiforme monocromatica, avente intensità luminosa pari a una candela, nella porzione di spazio che corrisponde ad uno steradiante.

Intensità luminosa

Si definisce **intensità luminosa**, **I**, il rapporto tra il flusso luminoso infinitesimo emesso dalla sorgente in una data direzione e l'angolo solido su cui si distribuisce.

$$I = \frac{d\Phi}{d\omega}$$

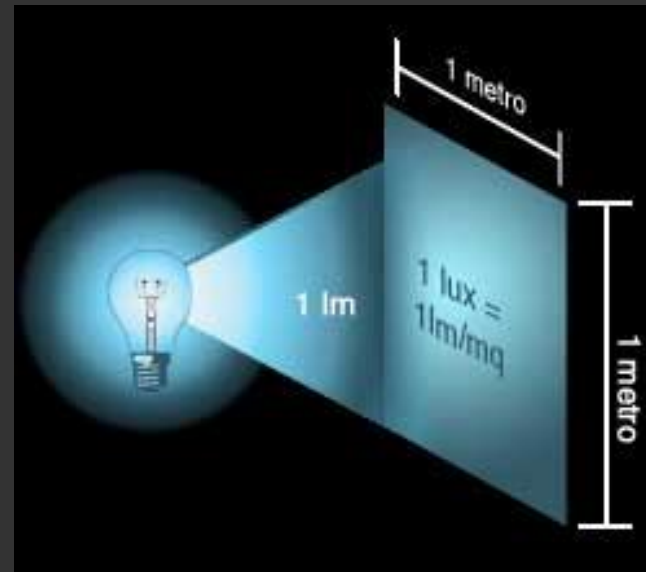


L'unità di misura di questa grandezza è la **candela (cd)**; è definita come l'intensità luminosa emessa, in una data direzione, da una sorgente che emette una radiazione monocromatica di frequenza $540 \cdot 10^{12}$ Hz ($\lambda = 555$ nm) e con intensità energetica in quella direzione di $1/683$ W/sr.

illuminamento

L'illuminamento è il rapporto tra il flusso luminoso **incidente** su una superficie e l'area della superficie stessa:

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

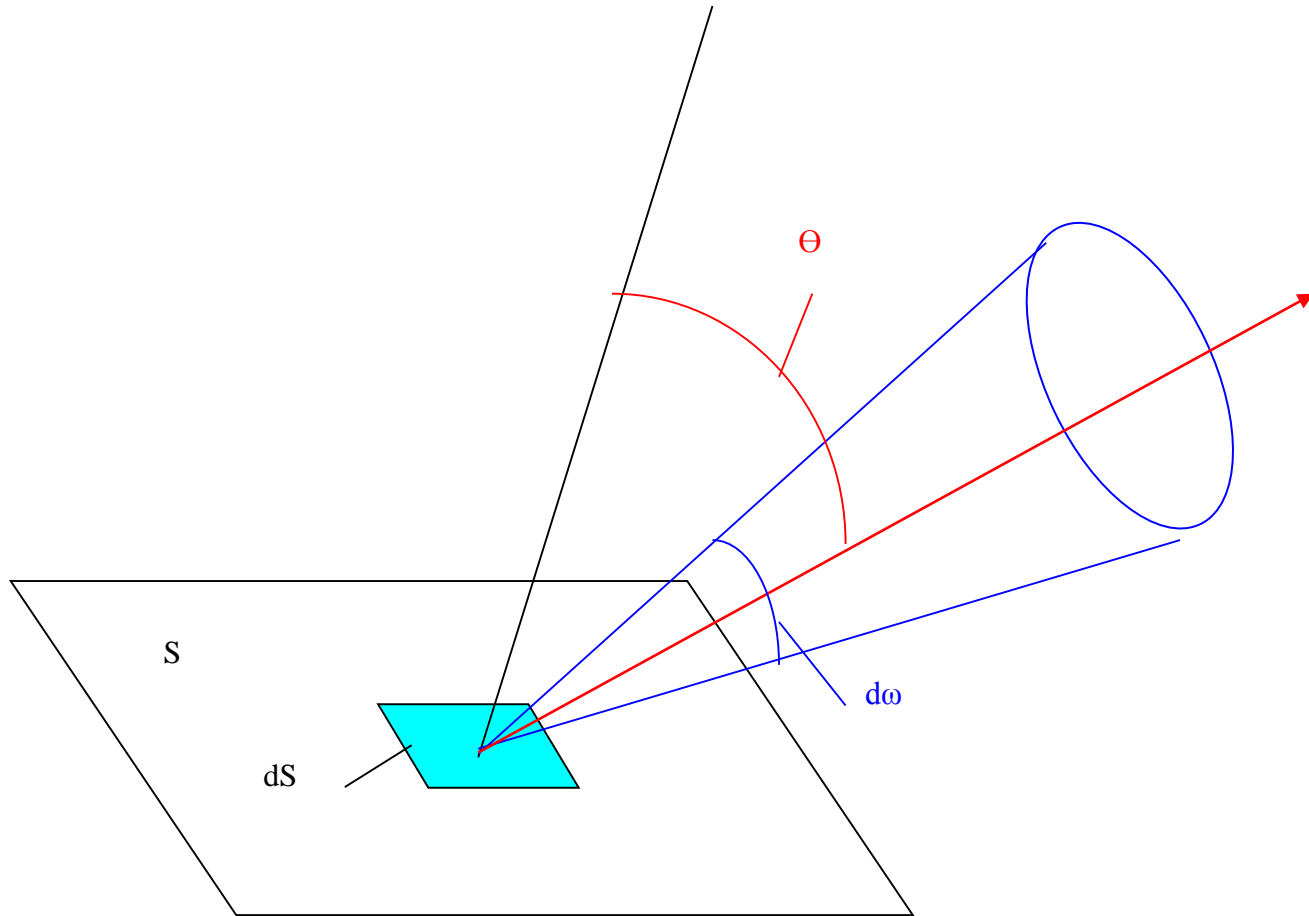


L'unità di misura è il **lux (lx)**. Esso corrisponde all'illuminamento prodotto dal flusso di un lumen distribuito in modo uniforme su di una superficie di un metro quadrato.

illuminamento

giornata estiva soleggiata all'aperto	100.000 lx
giornata estiva con cielo coperto	20.000 lx
vetrina bene illuminata	3000 lx
buona illuminazione uffici	500 lx
buona illuminazione sale da pranzo	200 lx
buona illuminazione stradale	25 lx
notte di luna piena	0,25 lx
notte senza luna, solo con luce stellare	0,01 lx

luminanza



luminanza

La luminanza, L , di un punto di una superficie, in una certa direzione, è il rapporto tra l'intensità luminosa emessa in quella direzione e la superficie emittente proiettata su un piano perpendicolare alla direzione stessa.

Una fonte di luce (sorgente luminosa primaria) od una superficie illuminata (sorgente secondaria di luce) che emettono una determinata intensità luminosa in una data direzione sono caratterizzate da una luminanza così definita:

$$L = \frac{d^2\phi}{dS \cdot \cos\Theta \cdot d\omega}$$

$$L = \frac{dI}{dS \cdot \cos\Theta} \quad \left[\frac{cd}{m^2} \right]$$

L'unità di misura è la candela per metro quadrato (cd/m^2) che viene detto nit.

luminanza

superficie del sole	1.650.000.000 cd/m ²
cielo in direzione sud	16.000 cd/m ²
cielo in direzione nord	8.000 cd/m ²
prato in giorno assolato	2.000 cd/m ²
foglio bianco ben illuminato	100 cd/m ²
lavagna illuminata	25 cd/m ²
strada ben illuminata	2 cd/m ²

radianza

La radianza R di un punto di una superficie è il rapporto tra il flusso luminoso **emesso** da un elemento di superficie attorno a quel punto e l'area dell'elemento stesso.

$$R = \frac{d\Phi}{dA}$$

La radianza R è legata all'illuminamento dal coefficiente di riflessione r della superficie considerata:

$$R = r \cdot E$$

Se $r=1$ ossia con superfici perfettamente riflettenti (bianche) si ha: $R = E$.

L'unità di misura della radianza è il **lux s.b.** (lux su bianco).

Riassumendo

Simbolo	Nome	Espressione	Unità di misura
Φ	Flusso luminoso	$K(\lambda) P(\lambda)$	lumen (lm)
E	Illuminamento	$d\Phi/dA$	lux (lm/m ²)
I	Intensità luminosa	$d\Phi/d\omega$	candela (lm/sr)
L	Luminanza	$dI/(dA \cos\alpha)$	nit (cd/m ²)
R	Radianza	$d\Phi/dA$	lux s.b. (lm/m ²)

Strumenti di misura



Luminanzometro

colorimetro



Luxmetro

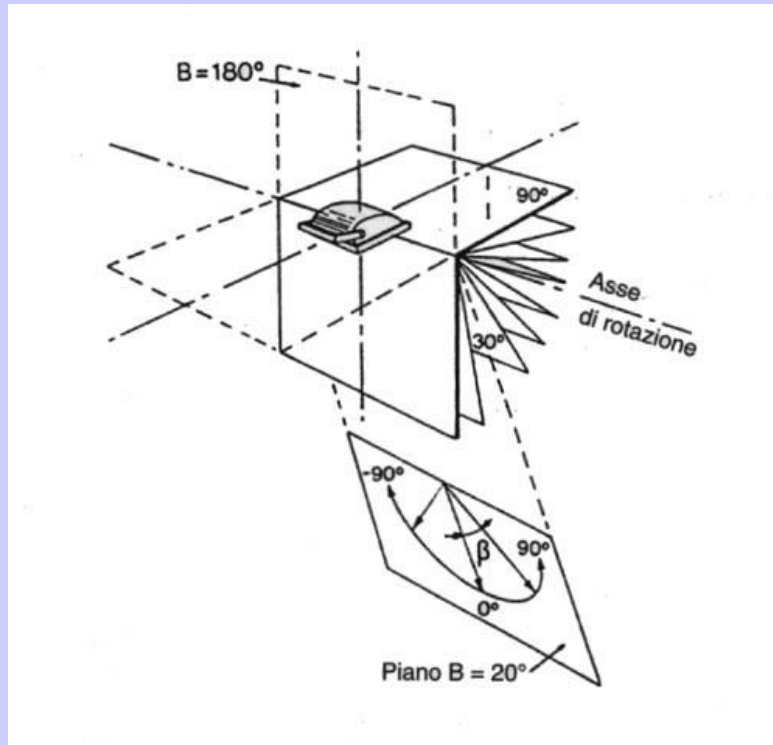
Strumenti di misura



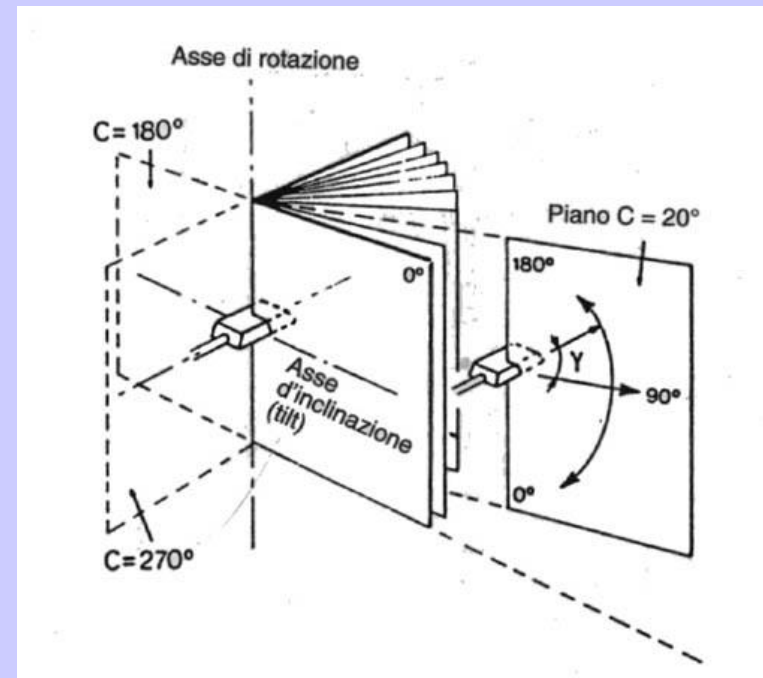
Sfera di Ulbricht



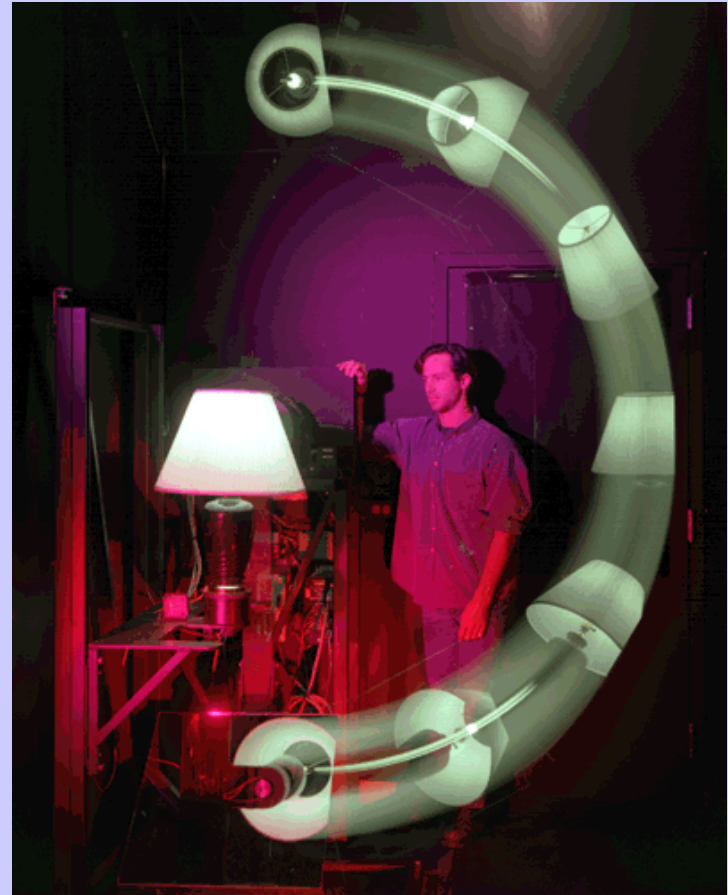
Strumenti di misura



goniofotometro



Strumenti di misura



goniofotometro

grandezze fotometriche qualitative

Oltre che con le grandezze viste la luce viene caratterizzata anche con alcuni parametri di tipo "qualitativo", utili a descrivere la sensazione visiva percepita dal nostro occhio.

Tali grandezze generalmente vengono utilizzate per caratterizzare le sorgenti di illuminazione artificiale e sono principalmente:

- La **temperatura di colore**, che rappresenta la temperatura del corpo nero con l'emissione più vicina a quella della sorgente considerata; di conseguenza descrive la sensazione di luce "calda" o "fredda" prodotta dalla tonalità della luce.
- La **resa cromatica**, che descrive quanto una luce artificiale alteri o meno il colore degli oggetti illuminati (indica cioè la fedeltà con cui la luce fornita da una sorgente artificiale riesce a riprodurre i colori reali, ossia la luce del Sole).

Temperatura di colore

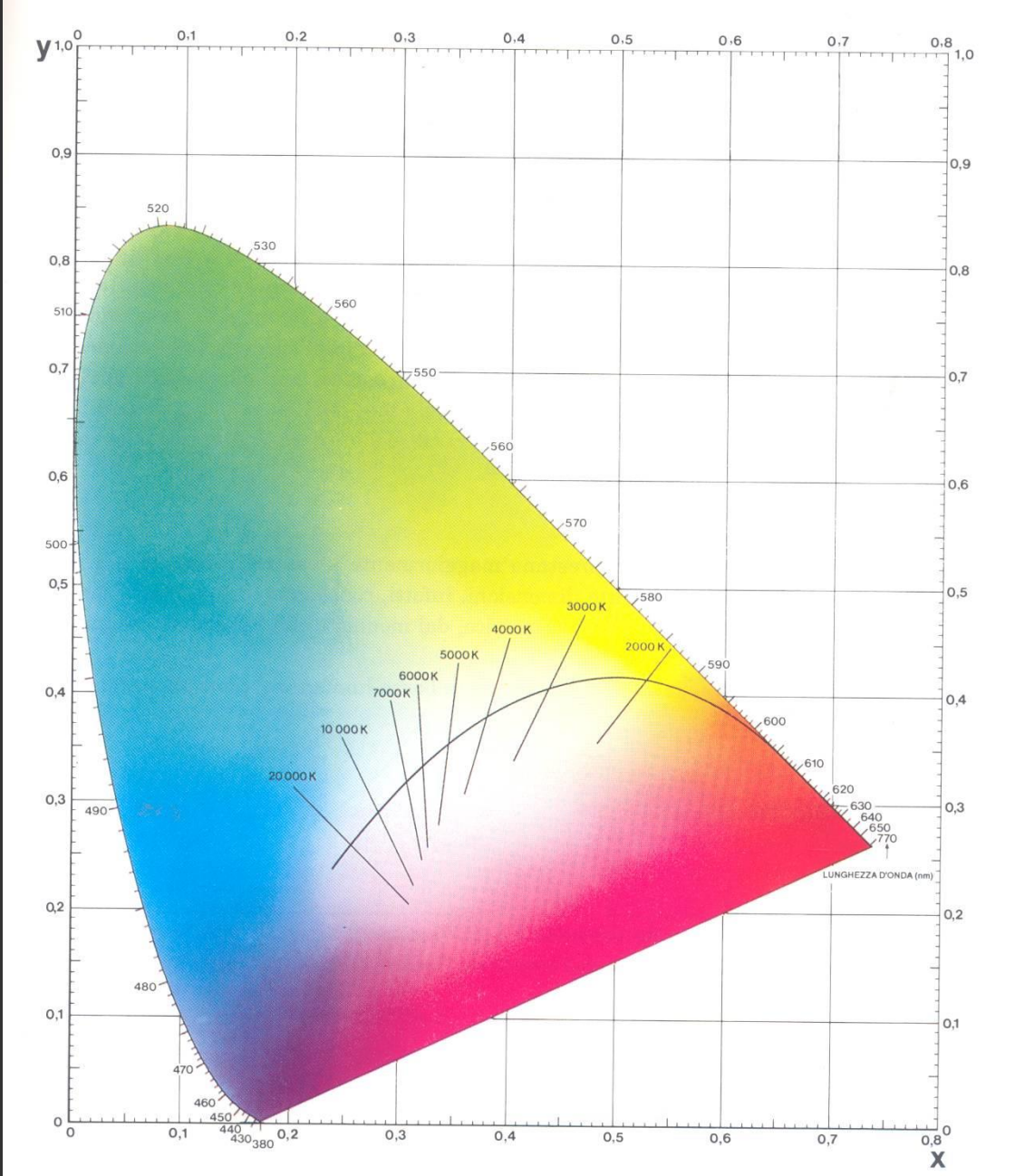
L'effetto cromatico prodotto sull'occhio umano da una sorgente può essere descritto in modo approssimato basandosi sulla comparazione della luce emessa da tale sorgente con quella emessa da un corpo nero.

Si fa ricorso alla grandezza **temperatura di colore (CCT)** definita come la temperatura che dovrebbe raggiungere il corpo nero per generare luce della stesso "colore" della luce prodotta dalla sorgente in esame.

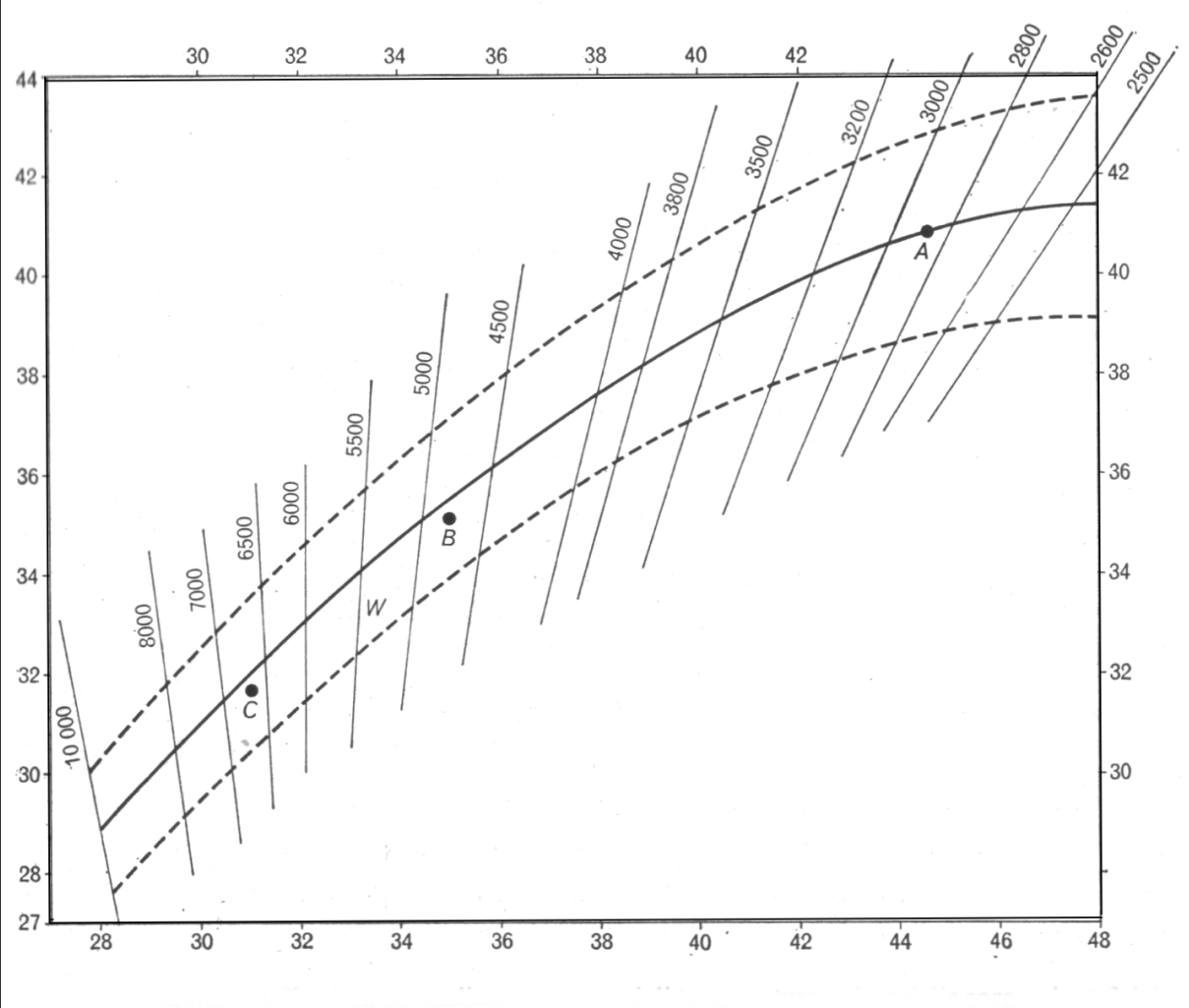
La luce rossastra ha una bassa temperatura di colore, mentre la luce bluastra ha un'alta temperatura di colore.

Sul diagramma cromatico CIE si può inserire la curva che rappresenta le coordinate tricromatiche della radiazione emessa da un corpo nero a diverse temperature.

Diagramma CIE



Temperatura di colore



Temperatura di colore

Vari esperimenti hanno dimostrato che l'apparato visivo dell'uomo percepisce come luce di tonalità **bianca** la luce che ha una temperatura di colore di circa **5.500 K**, corrispondente alla luce del sole in pieno giorno. Al di sopra e al di sotto di questo valore, la tonalità è giudicata rispettivamente fredda o calda.

La CIE (Publication n° 29.2 del 1986) classifica la tonalità della luce in tre gruppi:

Gruppo di tonalità	Tonalità	Temperatura di colore (K)
1	Calda (W)	< 3.300
2	Intermedia (I)	3.300 ÷ 5.300
3	Fredda (C)	> 5.300

Temperature di colore di diverse sorgenti

Sorgente	Temperatura di colore [K]
Cielo sereno	20000 ÷ 15000
Cielo coperto	15000 ÷ 5000
Sole a mezzogiorno	5250
Sole all'alba	1600
Lampade ad incandescenza	3000 ÷ 2400
Lampade fluorescenti	6500 ÷ 2900
Candele steariche	1900 ÷ 1800

Il diagramma di Kruithof

Determinati accoppiamenti tra temperatura di colore e livello di illuminamento raccolgono consensi e giudizi di soddisfazione dei fruitori. Esiste una correlazione proposta da Kruithof dopo accurate sperimentazioni che hanno evidenziato come:

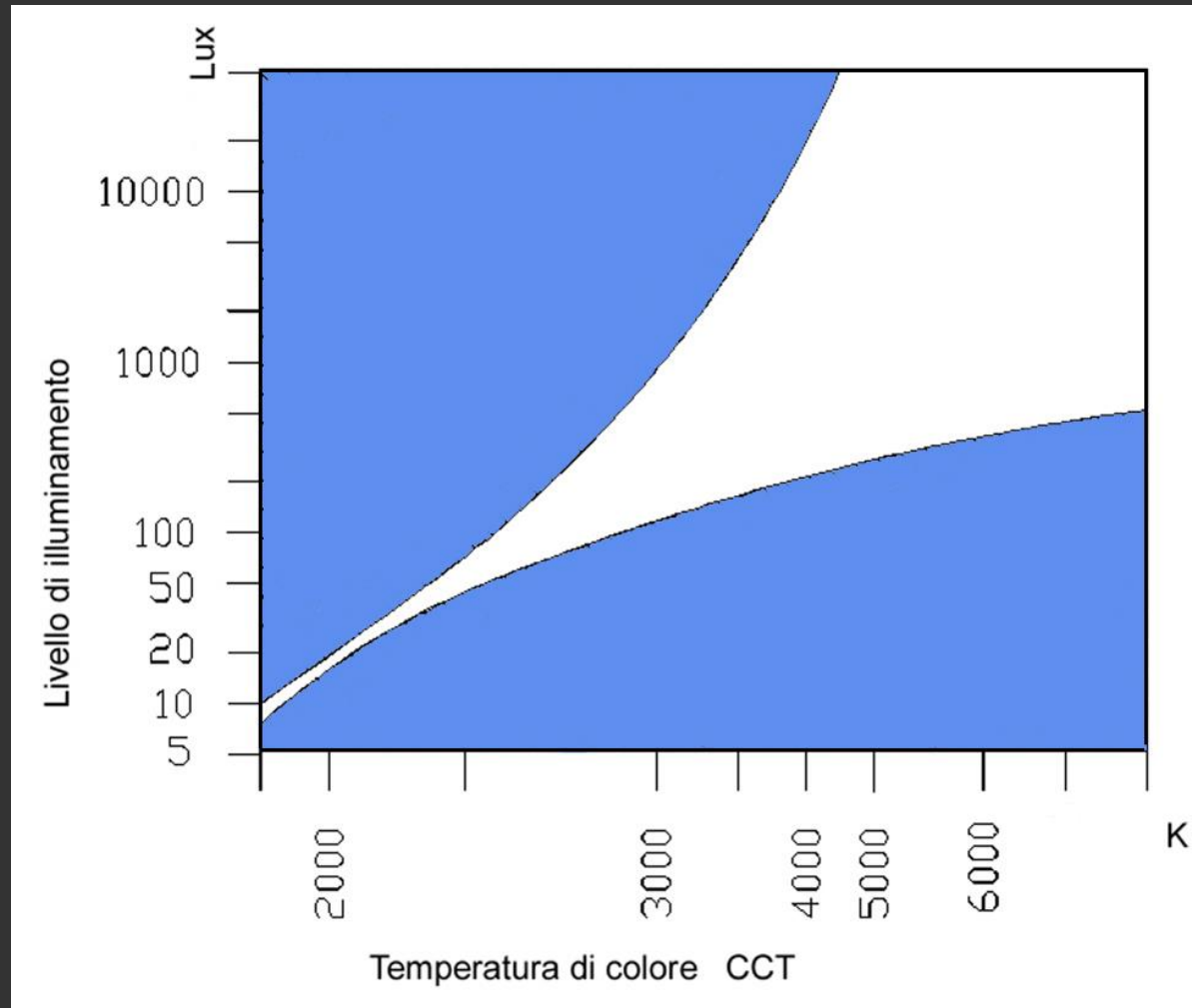
- basse temperature di colore richiedono bassi livelli di illuminamento;
- alte temperature di colore richiedono elevati illuminamenti.

La spiegazione del maggior gradimento è da ricercare nel fatto che la piena funzionalità del nostro apparato visivo si realizza in condizioni in qualche modo analoghe a quelle che si verificano con la luce del sole.

- Al crepuscolo l'illuminamento può variare nell'intervallo compreso tra 500 e 100 lux, mentre la temperatura di colore della luce è di circa 2.000 K.
- In pieno giorno, i livelli di illuminamento possono arrivare a 100.000 lux e la temperatura di colore a 6.000-7.500 K.

Con il diagramma conoscendo il livello di illuminamento richiesto si può determinare il tipo di sorgente illuminante più opportuna

Il diagramma di Kruithof



Indice di resa cromatica

La capacità di una luce di “rendere” il colore, si misura paragonando i colori degli oggetti illuminati dalla luce in esame con quelli che si ottengono con una lampada campione che riproduce l’illuminazione naturale.

Secondo la normativa CIE, vengono illuminati 14 predefiniti campioni di colori con una sorgente di riferimento e con la sorgente che si vuole caratterizzare. Mediante uno spettrofotometro si determina oggettivamente il colore apparente dei 14 campioni e si calcola la media degli scostamenti cromatici che si verificano nelle due letture.



Indice di resa cromatica

Il parametro che si ottiene in questo modo è definito Indice di Resa Cromatica CRI (Color Rendering Index). Esso stabilisce quanto una luce artificiale alteri o meno il colore degli oggetti illuminati.

I valori elevati dell'indice indicano una buona resa del colore. Il valore massimo è 100.

Lampada	CCT (K)	CRI	X	Y
Alogena	3190	100	0,424	0,399
Fluorescente bianco freddo	4250	62	0,373	0,385
Fluorescente bianco caldo	3020	52	0,436	0,406
Fluorescente De Luxe bianco freddo	4050	89	0,376	0,368
Fluorescente De Luxe bianco caldo	2940	73	0,440	0,403
Fluorescente luce diurna	6250	74	0,316	0,345
Vapori di mercurio	5710	15	0,326	0,390
Vapori di mercurio corretti	4430	32	0,373	0,415
Vapori di mercurio con alogenuri	3720	60	0,396	0,390
Sodio alta pressione	2100	21	0,519	0,418

Indice di resa cromatica

La CIE ha classificato le lampade in base alla resa cromatica definendo dei gruppi utilizzati dai costruttori nella descrizione dei prodotti in commercio.

In ogni caso valori elevati (90-100 %) significano che la sorgente permette una percezione dei colori corretta mentre valori di CRI inferiori all'80 % significano che la sorgente fornisce una percezione dei colori distorta.

Gruppo CIE	CRI	Tonalità	Applicazioni consigliabili	Applicazioni accettabili
1A	CRI > 90	tutte	comparazione colori, esami clinici, pinacoteche	
1B	80 < CRI < 90	calda intermedia	case, alberghi, ristoranti, uffici, ospedali, scuole e negozi	
		intermedia fredda	industrie tessili, grafiche, di meccanica fine	
2	60 < CRI < 80	tutte	edifici industriali	scuole, uffici
3	40 < CRI < 60		industrie pesanti	edifici industriali
4	20 < CRI < 40			industrie pesanti

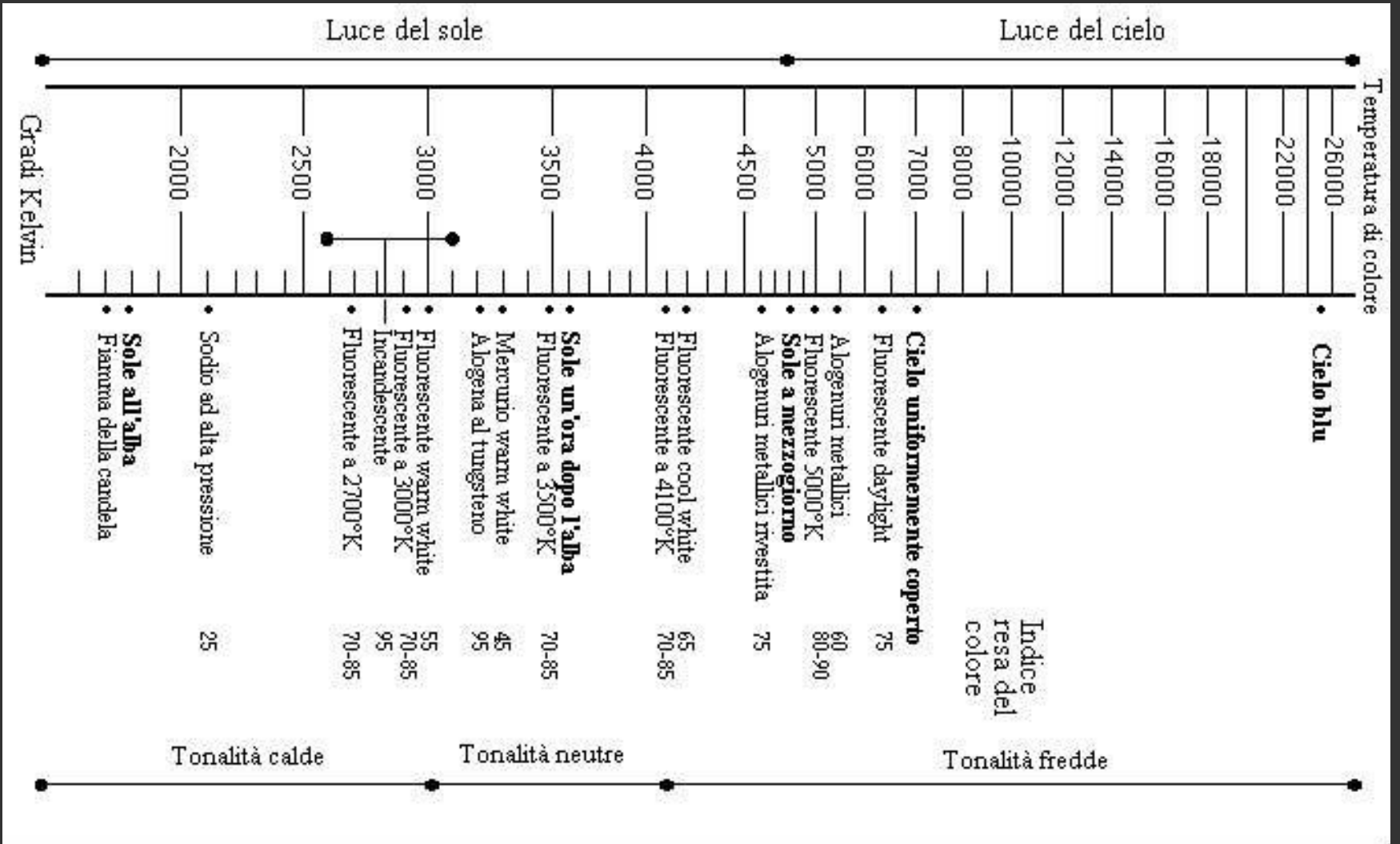
Altri indici cromatici

Sarebbe opportuno, nel giudizio sulla qualità dell'illuminazione, non basarsi solo sull'Indice di resa cromatica, ma prendere in considerazione anche altri parametri quali ad esempio:

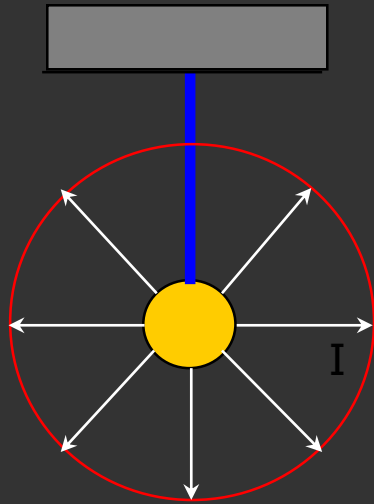
Indice di discriminazione del colore (CDI): misura la capacità di una luce di far distinguere dello stesso colore il maggior numero di sfumature diverse.

Indice di preferenza del colore (CPI): misura in modo statico la preferenza di gruppi campione nei riguardi della fedeltà di un colore riferito a determinati oggetti, ossia la risposta cromatica aderente ai colori preferiti dalla maggior parte delle persone: nel caso dei cibi si preferisce quel colore che è ritenuto espressione di freschezza.

Caratteristiche delle sorgenti

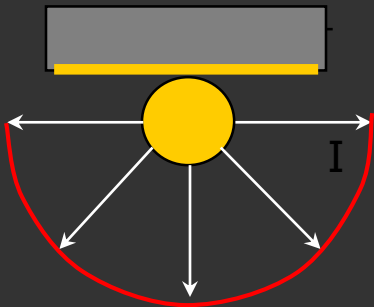


Alcune applicazioni



Considerando una sorgente sospesa che emette il flusso luminoso Φ uniforme distribuito su un angolo solido di 4π , l'intensità I uniforme corrispondente risulta:

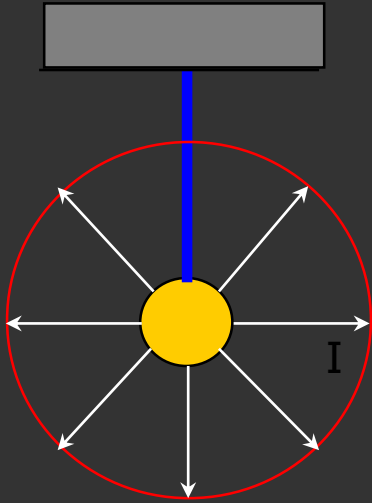
$$I = \frac{d\Phi}{d\omega} = \frac{\Phi}{4\pi}$$



Se la sorgente viene posizionata su di una superficie riflettente si ottiene una intensità uniforme I :

$$I = \frac{d\Phi}{d\omega} = \frac{\Phi}{2\pi}$$

Alcune applicazioni

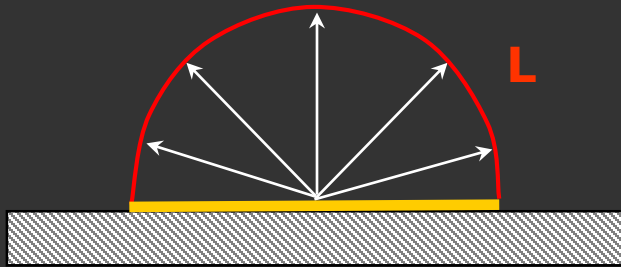


Si può calcolare la luminanza corrispondente all'intensità calcolata uniforme I della sorgente sospesa.

Si ammetta che la sorgente sia una sfera di raggio r perfettamente diffondente e area apparente πr^2 . La luminanza risulta costante pari a:

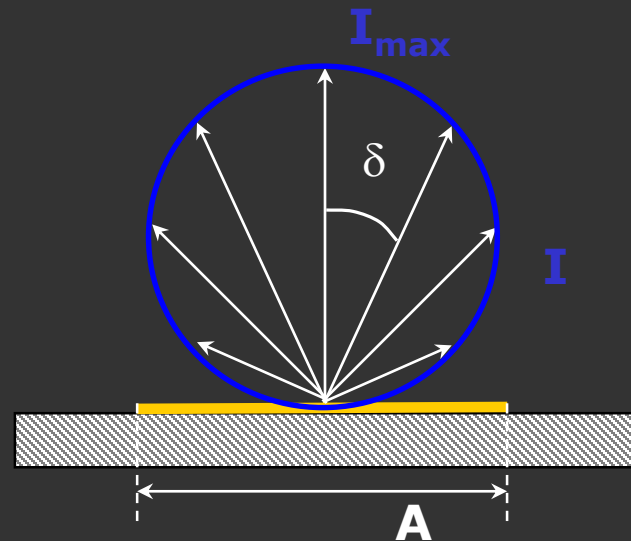
$$L = \frac{dI}{dA} = \frac{I}{\pi r^2} = \frac{\Phi}{4\pi^2 r^2}$$

Alcune applicazioni



Una superficie con luminanza uniforme in tutte le direzioni si dice lambertiana.

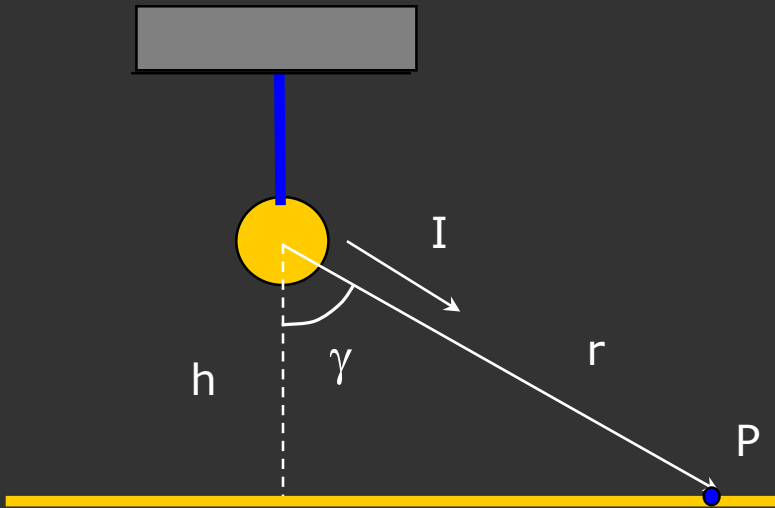
L'intensità dell'emissione nelle diverse direzioni deve compensare la variazione dell'area "vista" che varia con il coseno dell'angolo δ con la normale alla superficie:



$$I_{\delta} = I_{\max} \cos \delta$$

$$L_{\delta} = \frac{I}{A_{\text{app}}} = \frac{I_{\max} \cos \delta}{A \cos \delta} = \frac{I_{\max}}{A}$$

Alcune applicazioni



Considerando una sorgente puntiforme che emette con intensità I nella direzione individuata dall'angolo γ , l'illuminamento sul punto P su di una superficie perpendicolare alla direzione della radiazione alla distanza r può essere valutato come segue:

$$E = \frac{d\Phi}{dA} = \frac{I d\omega}{dA} = \frac{I dA \cos \gamma}{dA r^2} = \frac{I \cos \gamma}{r^2}$$

$$d\omega = \frac{dA \cos \gamma}{r^2}$$

Su di una superficie comunque orientata è necessario considerare la legge del coseno.

Esprimendo r in funzione di h si ottiene la relazione seguente:

$$r = h / \cos \gamma$$

$$E = \frac{I \cos \gamma}{r^2} = \frac{I \cos^2 \gamma \cos \gamma}{h^2} = \frac{I \cos^3 \gamma}{h^2}$$