

ASPETTI PRATICI E DEFINIZIONI RIGUARDANTI ALCUNE GRANDEZZE FISICHE IN USO IN FOTOMETRIA E RADIOMETRIA

di Vincenzo Iorio
- Novembre 2010 -

Una delle prime grandezze metrologiche che troviamo in fotometria è la candela, simbolo “cd”. Essa esprime un'intensità luminosa, una sorta cioè di potenza del raggio luminoso. La definizione corretta estratta da *Wikipedia* risulta la seguente:

Una candela è pari all'intensità luminosa, in una data direzione, di una sorgente emettente una radiazione monocromatica di frequenza pari a $540 \cdot 10^{12}$ hertz e di intensità radiante in quella direzione di 1/683 di watt per steradiante.

Prima del 1979, anno in cui fu introdotta l'attuale definizione, la candela era definita come l'intensità luminosa, nella direzione perpendicolare ad una superficie di $1/600\,000 \text{ m}^2$ di un corpo nero alla temperatura di fusione del platino (1775°C), alla pressione di $101\,325 \text{ N/m}^2$ (che risulta essere la pressione atmosferica standard).

Il fattore arbitrario **1/683** che compare nell'attuale definizione venne scelto per far sì che essa coincidesse con la vecchia. La frequenza scelta è quella dello spettro visibile prossimo al verde (555,016 nanometri). L'occhio umano è più sensibile a questa frequenza (vedi modulo 3 e modulo 4 dell'opera “[Manuale di divulgazione scientifica](#)” scaricabile da questo stesso sito.

A un metro di distanza e sulla superficie di un metro quadrato, un'intensità di una candela produce l'illuminamento di **1 lux**. L'intensità luminosa delle lampade che irradiano su superfici molto ristrette e proiettano coni di luce molto delimitati è espressa di solito in candele.

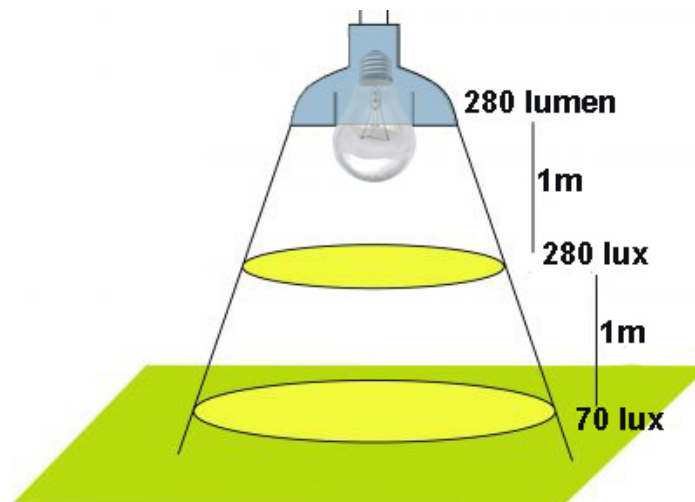
Ma definiamo meglio queste grandezze fotometriche:

La **candela ottica**, volendo adoperare un'analogia idraulica è come la pressione del flusso d'acqua in una condotta. Se infatti tramite una lente o tramite un particolare deflettore noi concentriamo il flusso luminoso in una determinata sezione, la luce ci appare molto più intensa.

Il **lumen** (simbolo: **lm**) è l'unità di misura del flusso luminoso. È l'unità più importante in ambito dell'illuminotecnica poiché il flusso luminoso indica appunto una quantità di luce che riesce ad essere irradiata dalla sorgente.

In questo caso, sempre utilizzando un'analogia idraulica, il flusso luminoso misurato in **lumen** sarebbe rappresentato dalla portata dell'acqua e quindi l'esatta espressione fisica della grandezza sarebbe una quantità che scorre nel tempo "t".

Il flusso di **1 lumen** equivale al flusso luminoso rilevabile in un angolo solido di **1 steradiante** emesso da una sorgente **isotropa** con intensità luminosa di **1 candela**. Ne discende che la stessa sorgente isotropa con intensità luminosa di 1 candela emette un flusso luminoso totale di **4π lumen**. Lux e lumen sono due diverse misure del flusso luminoso, ma mentre il lumen è una misura della "quantità di luce" su una porzione di sfera (incentrata sulla sorgente), il lux è una misura relativa all'area piana tangente la porzione sferica. Un lumen su un'area di 1 m^2 corrisponde ad 1 lux, mentre lo stesso lumen concentrato in 1 cm^2 corrisponde a 10 000 lux. Possiamo quindi definire **1 lux** come l'illuminamento a cui è sottoposta una superficie di **1 m^2** posta alla distanza di 1 m da una sorgente di **1 candela** che la illumina ortogonalmente con un flusso di 1 lumen.



- Esempio di distribuzione dei lux misurati alle varie distanze supponendo trascurabili i flussi luminosi dispersi o eventualmente assorbiti -

Per fare un esempio, il sole è una sorgente che produce un illuminamento che si estende fra **32.000 lux** fino a **100.000 lux** a seconda delle condizioni. Pari ad un flusso luminoso di **$3.76 \cdot 10^{28}$ Lumen**. La luna produce illuminamento di **1 lux** circa. Una stella invece produce l'illuminamento pari a **0,00005 lux**. Una lucciola (coleottero della famiglia delle *Lampyridae*) se osservato a circa 1 o 2 centimetri

è in grado di generare un illuminamento pari a circa **0,1 lux** con un'efficienza stimata di circa 600 lumen/watt.

Gli anglosassoni usano ancora una vecchia unità di misura di illuminamento chiamata footcandle (Candela/metro).

- 1 footcandle = 10,76 Lux
- 1 Lux = 0,0929 footcandle

Abbiamo anche:

- 1 lux = 1.000 NOX;
- 1 phot = 10.000 Lux

Sempre utilizzando un paragone idraulico possiamo trovare utile questo esempio: l'illuminamento misurato in **lux** e come se fosse rappresentato dalla quantità di acqua che bagna una superficie.

Nota: Possiamo eventualmente anche definire il termine radianza in **W/m²** che risulterebbe nell'ambito della radiometria essere il corrispondente dell'illuminamento (in lux) normalmente usato in fotometria.

ALCUNI ESEMPI DI LUX O LUMEN PRODOTTI DA LAMPADE

Flusso luminoso prodotto da alcune lampade:

LAMPADE AD INCANDESCENZA

Per le lampade ad incandescenza classiche (filamento) abbiamo mediamente:

- 100 W = 1750 lumen
- 60 W = 855 lumen
- 40 W = 450 lumen
- 25 W = 210 lumen
- 15 W = 120 lumen

Con efficienze medie pari a circa 20 Lumen/watt.

TUBI FLUORESCENTI

I tubi fluorescenti lineari (tipo T8) da 26 mm di diametro invece:

- 40 W = 3500 lumen
- 30 W = 2700 lumen
- 17 W = 1300 lumen

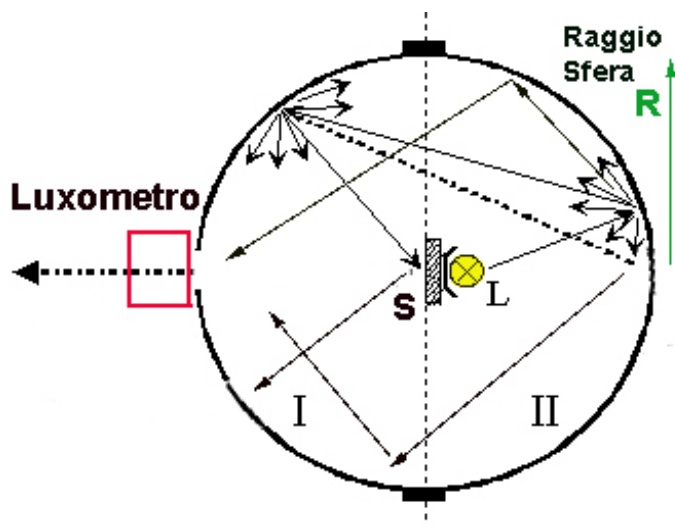
Con un'efficienza media di 77-100 lumen/watt

La lampada a sodio a bassa pressione per illuminazione stradale, e cioè la SOX **90W** produce un flusso luminoso pari a **14300 lumen** con efficienza che va da **100 a 200 lumen/watt**.

Alcuni led a forte luminosità sono in grado oggi (2010) di fornire **160 lumen/led** con un'efficienza luminosa pari a **40-60 lumen/watt**. Questi ultimi sono anche contrassegnati da un parametro molto interessante che risulta essere l'angolo di emissione del fascio di luce. In questi dispositivi, tale angolo che può variare in un intervallo compreso tra circa 4 gradi e oltre 120, permette di concentrare il flusso luminoso secondo le specifiche dell'impianto.

MISURA DEL FLUSSO LUMINOSO

Per misurare il flusso luminoso prodotto da una lampada è necessario avere in dotazione la sfera integrativa di **Ulbricht**. La sfera di Ulbricht normalmente di qualche metro di diametro, possiede una superficie interna molto chiara del tipo "lambertiano" cioè dotata di un'albedo estremamente elevata.



Normalmente l'albedo indica la capacità di riflessione di una superficie (vedi **NOTA2** di fine articolo). Da un punto di vista analitico l'albedo "a" viene calcolato facendo la derivata fra il flusso luminoso rinviato da una generica superficie $\Phi(r)$, e la parte del flusso emesso dalla sorgente in quella direzione $\Phi(a)$.

$$a = \frac{d\phi_r}{d\phi_a}$$

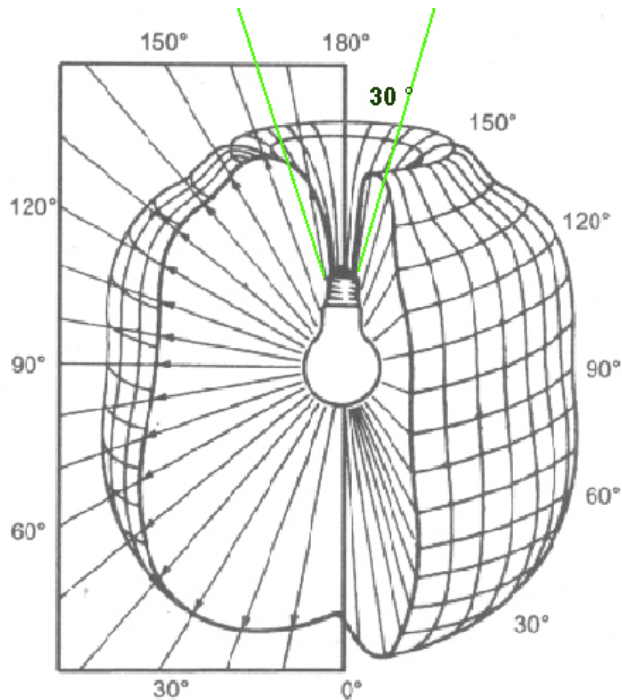
Quindi tipicamente la sfera di Ulbricht determina una sorta di integrazione di tutti i flussi luminosi prodotti e dispersi dalla sorgente lungo la superficie interna. La sorgente "L" che deve essere verificata dovrà essere collocata dietro uno schermo "S" opportuno in modo che le sue emissioni non sono dirette verso il sensore. E' buona norma che la sorgente sia collocata decentrata rispetto alla geometria della sfera. In un'apposita feritoia posta su di un lato della sfera si collocherà il sensore (tipicamente un luxmetro) che misurerà l'illuminamento in lux prodotto dalla lampada che risulterà proporzionale al flusso luminoso prodotto da quest'ultima.

La relazione analitica che esiste tra il flusso luminoso prodotto dalla lampada e l'illuminamento misurato dal sensore è data da questa seguente relazione:

$$lux = \frac{a}{1 - a} \cdot \frac{\Phi \text{ (lumen)}}{4 \cdot \pi \cdot R^2}$$

Dove per "a" abbiamo l'albedo della superficie interna della sfera, per "Φ" abbiamo il flusso in lumen che la lampada "L" produce all'interno della sfera, e con "R" viene indicato il raggio in metri della stessa. Sarebbe opportuno ovviamente tarare la sfera di Ulbricht con opportuna lampada campione e verificarne la sua attendibilità.

Non disponendo della sfera di Ulbricht la misura del flusso luminoso di una lampada diventa arduo e affetto da numerose imprecisioni. Questi problemi dipendono dal fatto che una lampada irradia secondo un'angolazione molto variabile. Se la lampada irradiasse in modo isotropo cioè in tutte le direzioni (cosa valida solo per i corpi celesti come le stelle, ... e neanche in questo caso se si analizza bene) la misura sarebbe semplice poiché la quantità in lux misurata ad un metro di distanza dovrebbe essere moltiplicato per 4π .



Se conosciamo in modo perfetto l'angolo solido di illuminamento e ammettendo per ipotesi che la distribuzione del flusso luminoso nell'angolo solido sia uniforme possiamo raggiungere il nostro obiettivo con un semplice calcolo matematico.

Per capire meglio il concetto facciamo un esempio numerico.

Supponiamo di avere una sorgente luminosa di cui vogliamo conoscere il flusso. Supponiamo possa essere una lampadina appesa ad un filo. Possiamo in prima approssimazione calcolare che il portalampada o il corpo lampada stesso proietti una certa ombra verso il soffitto e quindi possiamo ritenere che l'emissione riguardi solo i 330 gradi di un angolo giro.

Riteniamo, per cui, che i restanti 30 gradi siano in ombra. Inoltre, per assicurarci che l'esempio sia attendibile dobbiamo supporre che la distribuzione angolare del flusso luminoso sia omogeneo all'interno dell'angolo di illuminamento. Questo punto è un'evidente forzatura poiché una semplice lampadina a tungsteno ha un diagramma molto irregolare (vedi note alla fine dell'articolo).

A questo punto, per rendere un po' più complicato il calcolo, supponiamo di aver eventualmente effettuato una precedente misura con un apparecchio specifico non ad 1 metro di distanza dalla sorgente ma, ad una misura diversa. Supponiamo quindi che questa sorgente produca 22 lux a circa 3,162 metri.

Per prima cosa dobbiamo uniformare la misura al valore in lux che noi misureremo ponendo la sorgente ad 1 metro di distanza. Poiché la radiazione decade con l'inverso al quadrato della distanza possiamo applicare l'equazione:

$$E_1 = \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^2 \cdot E_2$$

Da cui la lettura in lux ad un metro sarebbe:

$$Lux_{(1metro)} = \left(\frac{3,162}{1} \right)^2 \cdot 22 = 219,9$$

Ora sappiamo che la sorgente ad 1 metro di distanza genera l'illuminamento di circa 220 lux per ogni metro quadro.

Questi 220 lux possono essere trasformati in Lumen/m² per definizione di grandezza fisica e considerando la superficie interessata dall'emissione luminosa su di un angolo di 330 gradi,.... Considerando l'angolo solido in steradiani possiamo al fine scrivere 220 lm/sr

Infatti, basta ricordare che:

$$\Phi = I \cdot \Omega$$

Dove “Φ” indica il flusso in lumen, “I” indica l'illuminamento (in lux) e “Ω” indica l'angolo solido che si misura in steradiani.

Torniamo al nostro esempio. Per calcolare i lumen totali emessi dalla sorgente possiamo applicare la seguente formula:

$$Lumen_{(sorgente)} = 2 \cdot \pi \cdot \left[1 - \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \right] \cdot lm / sr$$

Inserendo i valori numerici abbiamo:

$$Lumen_{(sorgente)} = 2 \cdot \pi \cdot \left[1 - \cos\left(\frac{330}{2}\right) \right] \cdot 220 =$$

$$Lumen_{(sorgente)} = 2 \cdot \pi \cdot [1 + 0,96] \cdot 220 = 2709$$

Quindi la sorgente ha un flusso totale pari a **2700 lumen**.

Un esempio molto interessante che spiega maggiormente la differenza tra il concetto di flusso misurato in lumen e l'intensità luminosa in candele l'ho trovato in rete e porta la firma di Zeno Martini che riporto testualmente:

La candela indica la concentrazione del flusso luminoso, i lumen, in una determinata direzione.

Più precisamente le candele sono i lumen racchiusi nell'angolo solido di uno steradiante. Una lampada emette in totale un certo flusso luminoso (es: 120 lumen). Se questo flusso si diffonde ugualmente in tutte le direzioni in ogni direzione c'è l'intensità di $120/12,56$ candele. (totale angolo solido è 12,56 steradiani). Se il flusso viene concentrato in un angolo pari ad un decimo di steradiante, l'intensità è $120/0,1=1200$ candele; se concentrata in un decimillesimo di steradiante sono 1200000 candele.

APPENDICE

Lo **steradiante** (simbolo **sr**; nome derivante dal Greco *stereos*, solido) è l'unità di misura del Sistema internazionale per l'angolo solido, il corrispondente tridimensionale del radiante.

Lo steradiante è definito come l'angolo solido, con vertice al centro di una sfera di raggio r , che sottende una calotta sferica di area pari a quella di un quadrato di lato r .

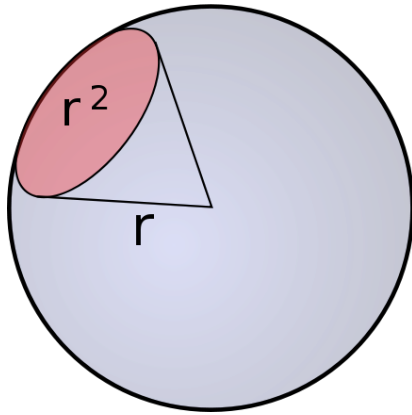
Possiamo calcolare un generico angolo solido misurando l'area e dividendola per il raggio al quadrato:

$$\Omega = \frac{A}{r^2}$$

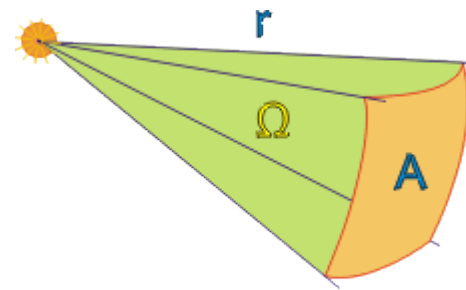
Essendo l'area di una sfera pari a $4\pi r^2$, e l'area della calotta sottesa dall'unità di angolo solido pari a r^2 , l'intera sfera sarà sottesa da un angolo solido di misura 4π sr.

Lo steradiante è stato un'unità SI supplementare fino al 1995 quando questa categoria è stata abolita.

Secondo la norma UNI CEI ISO 80000-1:2010 lo steradiante fa parte delle unità derivate (insieme a radianti, hertz, newton...).



Esempio grafico di steradiante

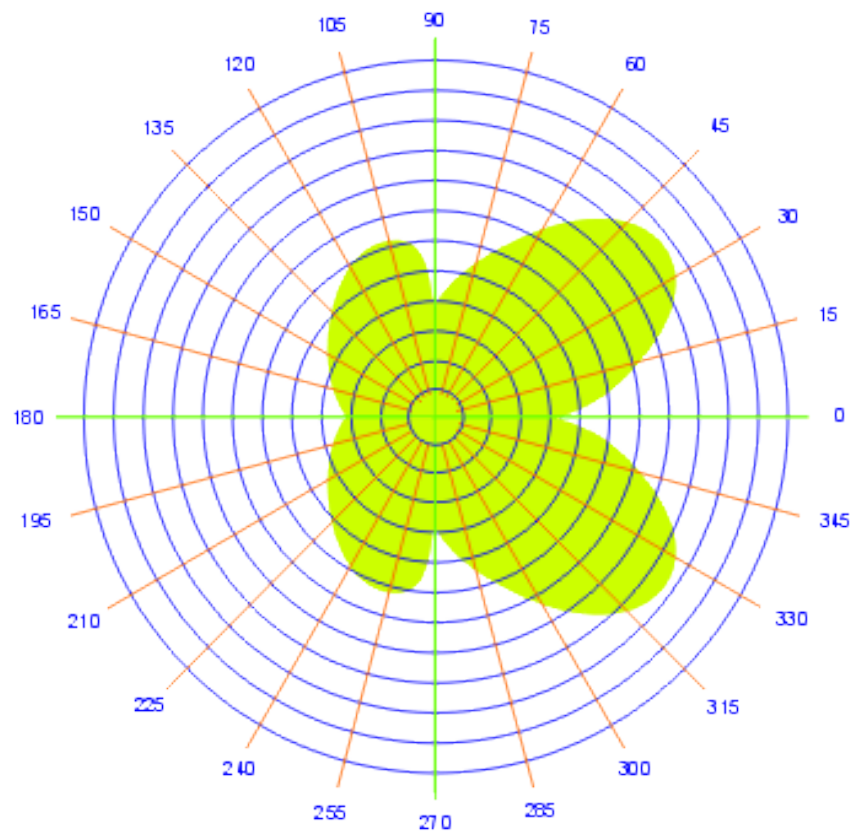


Flusso luminoso in un angolo solido -

NOTE

NOTA 1:

Un esempio in coordinate polari di distribuzione angolare dell'illuminamento di una generica lampada ad incandescenza.



NOTA 2:

A titolo di esempio alcune albedi dei corpi celesti a noi noti:

- Terra 0,29
- Giove 0,42
- Venere 0,66
- Luna 0,07
- Marte 0,15
- Urano 0,46
- Nettuno 0,53
- Saturno 0,45
- Plutone 0,45
- Mercurio 0,12

NOTA 3:

Tabella

Indice di riflessione di alcuni colori e materiali edili			
Colore	Fattore riflessione in %	Materiali	Fattore riflessione in %
Bianco	70-85	Vernice bianca	87-88
Grigio chiaro	45-65	Alluminio anodizzato	75-87
Grigio	25-40	Cartongesso bianco	60-80
Grigio scuro	10-20	Marmo bianco	60-70
Nero	5	Malta chiara	35-50
Giallo	65-75	Calcestruzzo chiaro	30-40
Bruno giallastro	30-50	Calcestruzzo scuro	15-25
Marrone scuro	10-25	Arenaria chiara	30-40
Verde chiaro	30-55	Arenaria scura	15-25
Verde scuro	10-25	Granito	15-25
Rosa	45-60	Mattoni chiari	20-30
Rosso chiaro	25-35	Mattoni scuri	10-15
Rosso scuro	10-20	Legno chiaro	30-50
Celeste	30-55	Legno scuro	10-25
Blu	10-25	Acciaio inox	55-65