



FOTOMETRIA

Sommario

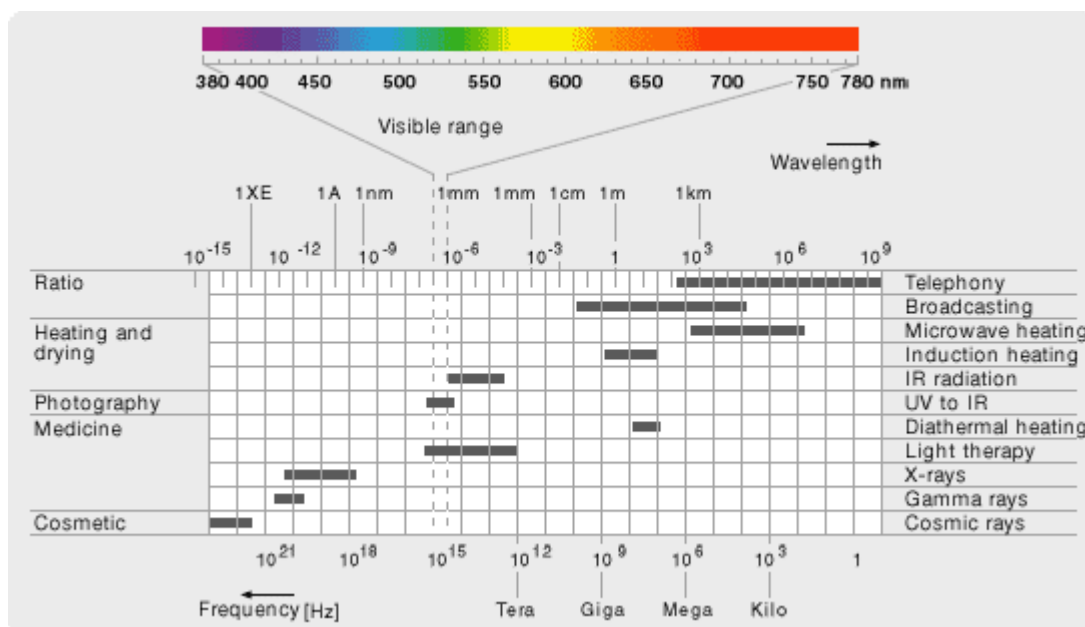
Introduzione	2
Misurazione della luce.....	2
Intensità luminosa (I)	4
Flusso luminoso (Φ)	6
Efficienza luminosa (η).....	8
Illuminamento (J)	10
Luminanza (L).....	12
Esposizione (E)	15
Valore di esposizione (EV)	15
Sensori ottici	24
Tipi di sensori ottici	25

Introduzione

Compito della fotometria è la **misurazione della luce nelle sue variabili**. Per le applicazioni nel settore della ripresa e riproduzione di immagini, le variabili più importanti sono: intensità, flusso, illuminamento, esposizione; le prime due si riferiscono alla sorgente, le ultime due al corpo illuminato.

Misurazione della luce

Per luce si intende quella banda di radiazioni visibili dello spettro elettromagnetico che, entrando nell'occhio, crea una sensazione visiva. Il campo delle lunghezze d'onda della luce è compreso fra 380 e 760 nm e ciascuna lunghezza d'onda della radiazione visibile è percepita dall'occhio sotto forma di un determinato colore dello spettro.



I parametri caratteristici delle onde elettromagnetiche sono i seguenti:



lunghezza d'onda, distanza tra due massimi o due minimi consecutivi [nm, nel visibile].



frequenza, numero di oscillazioni complete effettuate al secondo [cicli/s = Hz].

T

periodo, tempo impiegato a percorrere una distanza pari alla lunghezza d'onda [s].

c

velocità dell'onda elettromagnetica nel vuoto (≈ 300.000 km/s):

$$c = \lambda \cdot f = \lambda / T$$

La radiazione visibile è un insieme di pacchetti di energia o **quanti di luce** che rappresentano le particelle luminose elementari emesse o assorbite dagli elettroni di valenza degli atomi. Questi pacchetti di energia sono i **fotoni**.

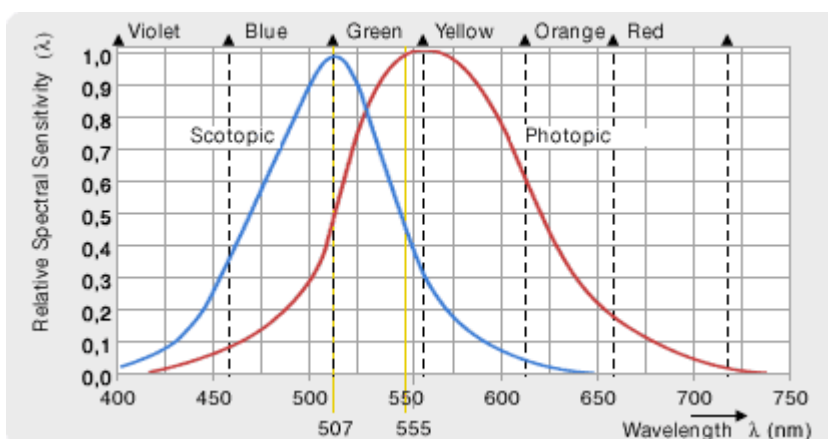
Ciascun fotone ha un contenuto di energia proporzionale alla frequenza dell'onda elettromagnetica ad esso associata:

$$E_{\lambda} = h \cdot f = h / T$$

I parametri della fotometria sono tipicamente l'intensità luminosa, il flusso luminoso, l'efficienza luminosa, l'illuminamento, la luminanza e, per quanto attiene specificamente alla fotografia, l'esposizione.

Queste grandezze tengono conto della sensibilità dell'occhio allo spettro della luce, vale a dire della sua differente sensibilità alle diverse lunghezze d'onda della luce.

La differente sensibilità dell'occhio alle diverse lunghezze d'onda ha portato alla determinazione della cosiddetta **curva di visibilità relativa**, la quale è di importanza fondamentale nelle misure fotometriche.



Intensità luminosa (I)

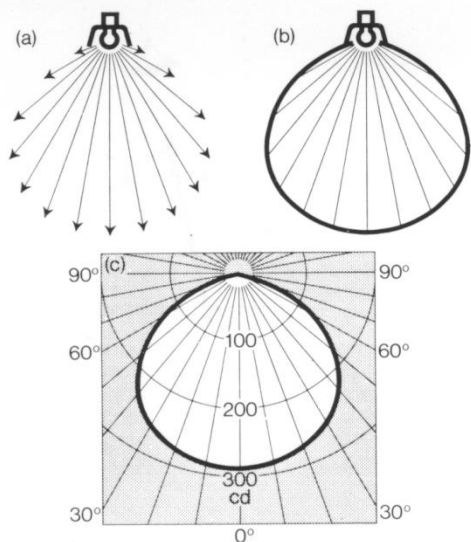
Generalmente le radiazioni di una sorgente luminosa variano di intensità secondo le diverse direzioni. L'intensità di radiazione visibile in una determinata direzione è detta intensità luminosa.

Candela [cd]

Corrisponde all'intensità luminosa, in una data direzione, di una sorgente che emette una radiazione monocromatica di frequenza uguale a $540 \cdot 10^{12}$ Hz e la cui intensità energetica in quella direzione è $1/683$ W/sr. La radiazione con la frequenza di $540 \cdot 10^{12}$ Hz ha una lunghezza d'onda pari a 555,5 nm. In Italia, la candela è misurata mediante il campione dell'Istituto Elettrotecnico Galileo Ferraris di Torino.

Si riporta ancora, perché di più facile comprensione, la vecchia definizione di candela: intensità luminosa nella direzione perpendicolare di una superficie di $1/60$ cm² del corpo nero alla temperatura di solidificazione del platino ($\cong 2046$ °K), alla pressione di 1 atm.

La distribuzione della luce di una lampada o di un apparecchio illuminante in un piano qualsiasi può essere rappresentata dalla curva di distribuzione dell'intensità luminosa, nota come **curva fotometrica**. Essa si ottiene immaginando di porre la lampada o l'apparecchio illuminante supposti puntiformi al centro di un diagramma polare, rappresentando poi le intensità luminose nelle diverse direzioni del piano con frecce in scala (vettori) che escono come raggi dal centro. Unendo insieme le punte delle frecce si ottiene la curva fotometrica. Le curve di distribuzione dell'intensità luminosa servono soprattutto a definire le caratteristiche illuminotecniche degli apparecchi illuminanti.



Curva fotometrica: si misurano le intensità luminose nelle varie direzioni (a), si riportano i valori misurati su un diagramma polare e si congiungono i punti rappresentativi (b). Il diagramma così ottenuto è la curva fotometrica della lampada o dell'apparecchio (c).

I valori dell'intensità luminosa nelle curve fotometriche sono riferiti in genere a un flusso luminoso di 1.000 lm. Se la lampada nell'apparecchio illuminante ha un diverso flusso luminoso, le intensità luminose indicate devono essere moltiplicate per il corrispondente fattore: per esempio nel caso di 2.000 lm per il fattore 2.

Intensità luminosa di sorgenti artificiali	
Tipo di lampada	Intensità luminosa
Lampada ad incandescenza Nitra [®] da 100 W	≅ 110 cd
Lampada fluorescente L36W/20 da 36 W a luce bianchissima	≅ 360 cd
Riflettore a fascio largo	≅ 200 cd/1.000 lm
Armatura stradale	≅ 300 cd/1.000 lm
Riflettore a fascio stretto speculare	≅ 1.000 cd/1.000 lm
Proiettore	Fino a 10 ⁶ cd/1.000 lm

Flusso luminoso (Φ)

La potenza irradiata da una sorgente isotropa (una sorgente luminosa si dice isotropa se emette il flusso luminoso in quantità costante nel tempo ed uguale in tutte le direzioni), puntiforme e percepita dall'occhio (quantità di luce emessa nell'unità di tempo) è definita come flusso luminoso.

Lumen [lm]

È la potenza irradiata da una sorgente luminosa sotto forma di radiazione visibile; non è espressa in watt, ma in lumen in quanto, come detto prima, si deve tenere conto che l'occhio ha una sensibilità differente alle diverse lunghezze d'onda.

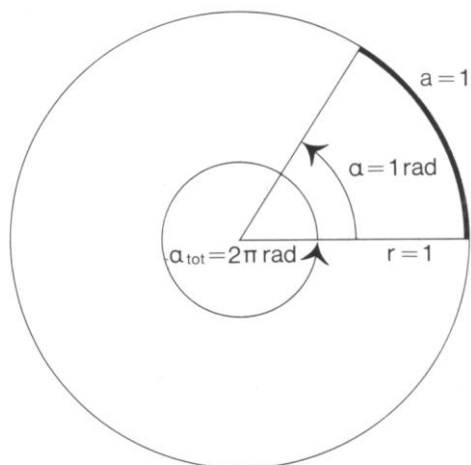
Intensità luminosa e flusso luminoso sono legati fra loro tramite l'angolo solido in cui sono misurati:

$$\Phi = I \cdot \omega$$

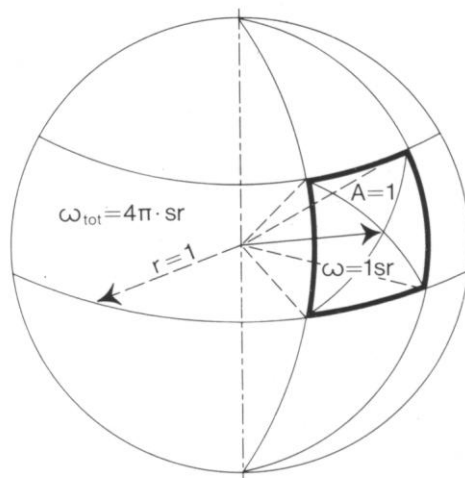
Steradiano [sr]

È l'angolo solido che, avendo il vertice al centro di una sfera, delimitata sulla superficie di questa un'area pari al quadrato del raggio della sfera stessa.

Come la lunghezza dell'arco di un cerchio di raggio unitario ($r = 1$) rappresenta una misura per l'angolo piano sotteso α (ad esempio $\alpha = 360^\circ \equiv 2\pi$ radianti [rad] = 6,28 rad), così l'area della superficie di una sfera di raggio unitario ($r = 1$) serve come misura per l'angolo solido. Poiché l'area totale della sfera è $4\pi r^2$, l'angolo solido totale ω è uguale a 4π steradiani [sr] = 12,56 sr.



L'arco di una circonferenza di raggio unitario può servire come misura dell'angolo piano sotteso.



L'area di una sfera di raggio unitario può servire come misura dell'angolo solido sotteso.

Se una sorgente luminosa posta al centro di una sfera di raggio $r = 1$ emette radiazioni in tutte le direzioni dello spazio con uguale intensità luminosa $I = 1 \text{ cd}$, ogni metro quadrato della superficie della sfera riceve il flusso luminoso $\Phi = 1 \text{ lm}$, quindi la superficie totale della sfera riceve $4\pi r^2 \cdot I = 12,56 \text{ lm}$.

Flusso luminoso di sorgenti artificiali	
Tipo di lampada	Flusso luminoso
Lampada Glimm	0,6 lm
Lampada per biciclette da 2 W	18 lm
Lampada a incandescenza normale Nitra® da 100 W/220 V	1.250 lm
Lampada fluorescente L36W/20 da 36 W a luce bianchissima	3.000 lm
Lampada a vapori di mercurio con bulbo fluorescente HQL 400 W	22.000 lm
Lampada a vapori di alogenuri HQI-T 2.000 W/N	190.000 lm

Efficienza luminosa (η)

L'efficienza luminosa, o rendimento luminoso, esprime la capacità di una lampada di convertire la potenza assorbita in flusso luminoso.

Lumen/watt [lm/W]

È il rapporto fra il flusso luminoso emesso, espresso in lumen, e la potenza elettrica assorbita, espressa in watt.

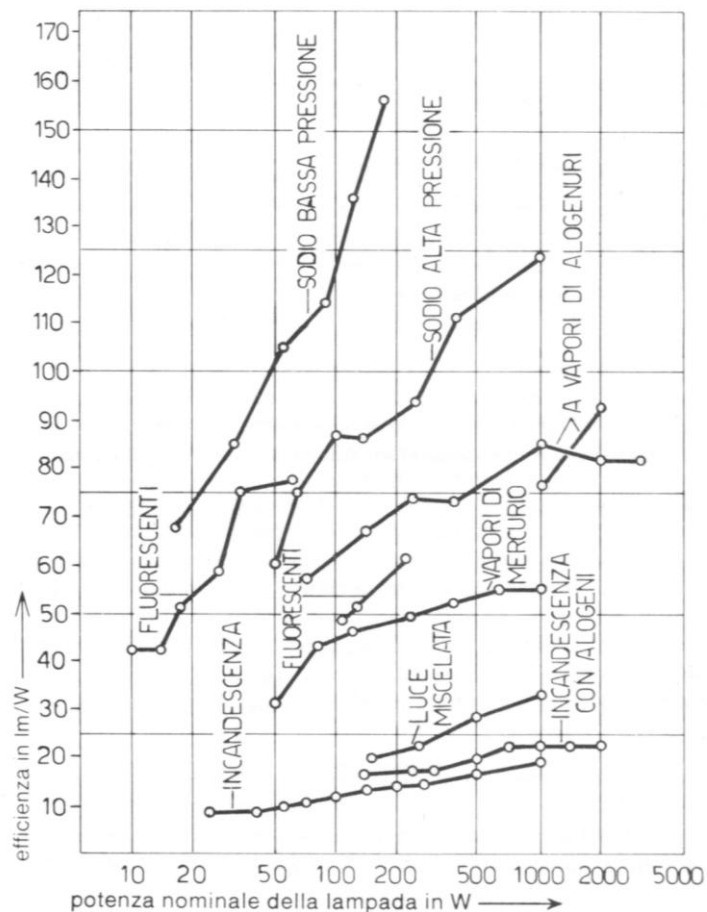
L'efficienza luminosa è molto diversa secondo i vari tipi di lampade. Maggiore è il suo valore e più economico è generalmente l'impiego di una sorgente luminosa.

Se tutta la potenza elettrica assorbita da una sorgente potesse essere emessa sotto forma di luce alla lunghezza d'onda di 555 nm (λ di massima sensibilità dell'occhio), si otterrebbe teoricamente un'efficienza luminosa di 680 lm/W. Se invece la potenza assorbita fosse emessa sotto forma di luce bianca a distribuzione spettrale costante (spettro di uguale energia), l'efficienza luminosa teorica sarebbe di 225 lm/W. In pratica si è ben lontani dal raggiungere queste efficienze luminose a causa delle inevitabili perdite di energia, ad esempio calore dissipato dagli elettrodi, dal bulbo, dall'alimentatore.

Potenza ed efficienza luminosa di sorgenti artificiali

Tipo di lampada	Potenza nominale [W]	Efficienza luminosa* [lm/W]
Glimm (al neon)	0,3	2
Nitra® 40 W/220 V	40	8,8
Fluorescente L36W/20	36	65
HQL 400 W	400	52
HQI-E 400 W/DV	360	67,5
NAV-T 400 W (Vialox®, al sodio ad alta pressione)	400	113
NA 180 W (al sodio a bassa pressione)	180	155

* **comprensiva delle perdite negli alimentatori**

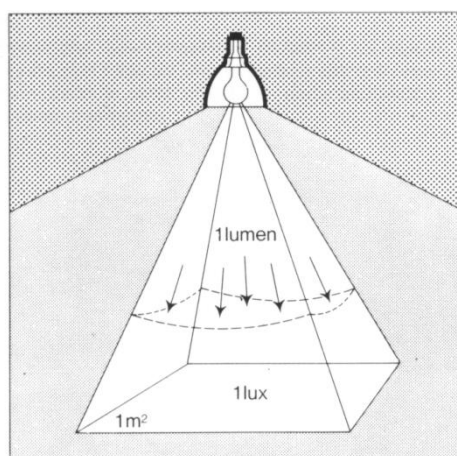


Illuminamento (J)

Quando la luce cade su di una superficie, il rapporto tra il flusso luminoso e l'area illuminata esprime l'illuminamento.

Lux [lx]

Si ha un illuminamento pari ad 1 lx quando ad esempio il flusso luminoso di 1 lm colpisce in modo uniforme una superficie di 1 m². In pratica però non si può contare su una distribuzione uniforme del flusso luminoso su di una superficie; l'illuminamento non potrà risultare perciò uguale in tutti i punti della superficie.



L'illuminamento di un lux è dato dal flusso luminoso di un lumen che cade sull'area di un metro quadrato.

Mentre il flusso luminoso e l'intensità luminosa sono riferiti alla sorgente emittente, l'illuminamento è riferito alla superficie illuminata. L'illuminamento calcolato secondo la formula dell'illuminamento delle superfici:

$$J = \Phi / A$$

dove A è l'area illuminata; deve quindi essere considerato un valore medio e si chiama illuminamento medio.

L'illuminamento può essere anche calcolato partendo dall'intensità luminosa della sorgente e dalla distanza d in metri tra sorgente e punto illuminato, quando la distanza, in rapporto all'estensione della sorgente luminosa, è

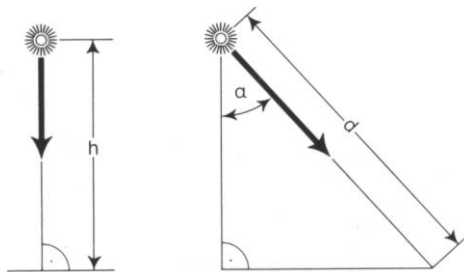
grande (per un calcolo approssimato), almeno tre volte tanto. Se la luce cade verticalmente sulla superficie, secondo la formula dell'illuminamento di un punto si ottiene:

$$J = I / d^2$$

In caso di incidenza obliqua di luce, si considera solamente la componente verticale dell'intensità luminosa e la formula diventa:

$$J = (I / d^2) \cdot \cos\alpha = (I / h^2) \cdot \cos^3\alpha$$

dove α è l'angolo tra il raggio luminoso e la verticale. Il termine $\cos\alpha$ si può ricavare praticamente facendo il rapporto fra l'altezza del centro luminoso e la distanza (**$\cos\alpha = h / d$**).



Illuminamento di un punto: dipende dalla distanza del centro luminoso e dall'angolo di incidenza della luce.

Ne consegue che, raddoppiando, ad esempio, la distanza tra sorgente luminosa e punto illuminato, l'illuminamento dello stesso si riduce a un quarto, mentre, dimezzando la distanza, aumenta di quattro volte (legge fotometrica delle distanze). Questa legge però non è valida per sorgenti luminose estese e per locali con soffitti e pareti riflettenti.

Illuminamento in esterni ed interni	
Tipo di illuminazione	Illuminamento
Giornata estiva di sole all'aperto	$\cong 100.000 \text{ lx}$
Con cielo coperto in estate	$\cong 20.000 \text{ lx}$
Vetrine bene illuminate	$\cong 3.000 \text{ lx}$
Buona illuminazione di uffici	$\cong 500 \text{ lx}$
Buona illuminazione di sale da pranzo	$\cong 200 \text{ lx}$
Buona illuminazione stradale	$\cong 30 \text{ lx}$
Notte di luna piena	$\cong 0,25 \text{ lx}$
Notte serena senza luce (luce delle stelle)	$\cong 0,01 \text{ lx}$

Luminanza (L)

La luminanza di una sorgente luminosa o di una superficie illuminata è determinante per lo stimolo luminoso che si viene a creare nell'occhio e di conseguenza per l'impressione di luminosità richiamata al cervello.

Se si osserva da una qualsiasi direzione una superficie luminosa, la sua intensità luminosa divisa per la sua area, così come è vista dall'occhio (area apparente), si chiama luminanza.

Candela / m² [cd/m²]

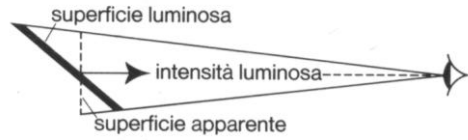
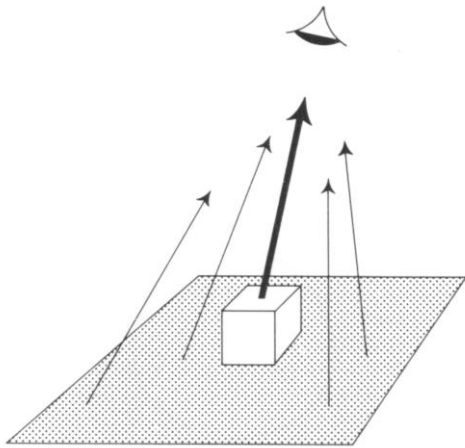
Una luminanza di 1 cd/m^2 rappresenta un valore relativamente piccolo. Chiamata anche **nit [nt]**, è utilizzata di solito per la valutazione di superfici illuminate, ad esempio superfici di interni, superfici stradali.

Come unità maggiore si usa la candela/cm² [cd/cm²], detta anche **stilb [sb]**. Serve per la misura della luminanza delle sorgenti luminose ($1 \text{ cd/cm}^2 = 10.000 \text{ cd/m}^2$).

Nel caso di superfici a riflessione diffusa c'è una semplice relazione tra luminanza e illuminamento:

$$L [sb] = J [lx] \cdot \gamma$$

dove: γ = **coefficiente di riflessione**.



La luminanza dipende dall'estensione della superficie apparente e dall'intensità luminosa di questa nella direzione dell'occhio.

Luminanza: esprime l'effetto di luminosità che una certa superficie produce sull'occhio (unità di misura: candela per metro quadrato).

Conversione fra diverse unità di luminanza			
	cd/m^2	cd/cm^2	asb
1 cd/m^2	1	10^{-4}	3,14
1 cd/cm^2	10^4	1	$3,14 \cdot 10^{-4}$
1 asb	0,318	$0,318 \cdot 10^{-4}$	1

Luminanza di sorgenti e superfici		
Tipo di illuminazione	cd/cm²	cd/m²
Sole	160.000	
Cielo sereno	0,3 - 0,5	
Cielo coperto	0,03 - 0,1	
Luna	0,4	
Fiamma di candela	0,7	
Lampada ad incandescenza Nitra [®] chiara	100 - 2.000	
Lampada ad incandescenza smerigliata Perla [®]	5 - 50	
Lampada ad incandescenza opalizzata Silica [®]	1 - 5	
Lampada a vapori di sodio a bassa pressione NA	10	
Lampada a vapori di sodio ad alta pressione tubolare chiara NAV-T	300 - 600	
Lampada a vapori di mercurio con bulbo fluorescente HQL	4 - 16	
Lampada allo xeno ad alta pressione XBO	15.000 - 100.000	
Lampada a vapori di mercurio ad altissima pressione HBO	fino a 170.000	
Lampada fluorescente	0,3 - 1,5	
Lampada Glimm (al neon)	0,02 - 0,05	
Oggetti chiari con illuminazione diurna esterna		1.000 - 10.000
Oggetti chiari con ottima illuminazione di interni		100 - 1.000
Oggetti chiari con debole illuminazione di interni		2 - 20
Strade bene illuminate		2

Esposizione (E)

L'emulsione fotografica, a differenza dei corpi non fotosensibili, immagazzina tanta più energia luminosa quanto maggiore è la durata dell'irradiazione luminoso. In fase di ripresa delle immagini si dovrà pertanto tenere conto, oltre che dell'illuminamento ricevuto dall'emulsione, anche del tempo di otturazione. Si avrà così una nuova grandezza, l'esposizione.

Lux · secondi [lx·s]

Esprime la quantità di energia luminosa immagazzinata dall'emulsione.

Per ottenere l'esposizione cui è sottoposta un'emulsione, si dovrà moltiplicare l'illuminamento (in lux) per il tempo (in secondi). La relazione sarà pertanto:

$$E = J \cdot t$$

Valore di esposizione (EV)

Il termine **valore di esposizione (Exposure Value, EV)** si riferisce a tutte le **combinazioni di tempi di otturazione ed aperture relative** che forniscono un'esposizione costante. Il concetto è stato sviluppato in Germania negli anni '50 del XX secolo al fine di semplificare la scelta tra combinazioni equivalenti delle impostazioni di esposizione.

Sebbene tutte le impostazioni della coppia otturatore-diaframma corrispondenti al medesimo valore di esposizione in teoria lascino invariata l'esposizione, in pratica non forniscono la stessa immagine. Il **tempo di esposizione (tempo di otturazione)** determina l'entità dell'effetto mosso, come illustrato dalle due immagini seguenti, e l'**apertura relativa (valore di diaframma)** determina la profondità di campo.



Tempo di otturazione breve: movimento congelato



Tempo di otturazione lungo: effetto mosso

Il valore di esposizione è definito dalla seguente relazione logaritmica:

$$EV = \log_2 \frac{N^2}{t}$$

dove: N = apertura relativa
t = tempo di esposizione (tempo di otturazione).

Valori di esposizione (EV)														
Apertura relativa (N)														
	1	1.2	2	2.4	4	5.6	8	11	16	22	32	44	64	
Tempo di otturazione [s]	1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	1/2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	1/4	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	1/8	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	1/15	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	1/30	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
	1/60	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
	1/125	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
	1/250	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	1/500	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
	1/1000	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
	1/2000	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
	1/4000	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
	1/8000	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25

Un incremento unitario del valore di esposizione equivale ad un decremento di uno stop dell'esposizione, con dimezzamento del tempo di otturazione o dell'apertura relativa. Viceversa, un decremento unitario del valore di esposizione equivale ad un incremento di uno stop dell'esposizione, con raddoppio del tempo di otturazione o dell'apertura relativa. I valori di esposizione più alti corrispondono a riprese fotografiche in condizioni di forte illuminazione o con emulsioni ad elevata sensibilità. Per bassi livelli dell'illuminazione della scena ripresa e/o della sensibilità del materiale fotosensibile, il numero EV può assumere anche valori negativi.

Combinando il valore di esposizione con la sensibilità della pellicola, è possibile utilizzare i numeri EV per indicare la luminosità del soggetto della ripresa fotografica. Benché non sempre si tenga in considerazione l'importanza della sensibilità del materiale fotosensibile, senza di essa il valore di esposizione si limita ad indicare le possibili coppie tempo di otturazione - apertura relativa. In assenza di dati espliciti o impliciti, normalmente si assume che la sensibilità sia pari a 100 ISO.

Sovente, i fabbricanti di fotocamere riportano la sensibilità del sistema esposimetrico o del sistema autofocus in numeri EV. Ad esempio, se l'esposimetro di una fotocamera SLR è in grado di fornire un'esposizione corretta nell'intervallo EV 1-20 a 100 ISO e f/1.4, significa che, con un obiettivo f/1.4 e la ghiera della sensibilità (pellicola o CCD/CMOS) impostata su 100 ISO, il fabbricante garantisce letture accurate dell'esposizione tra EV 1 ed EV 20. Utilizzando un obiettivo f/4 a 100 ISO, l'esposimetro leggerà 3 stop in meno rispetto all'apertura relativa f/1.4 e risulterà preciso tra EV 4 ed EV 23. Usando invece una pellicola da 25 ISO con l'obiettivo f/1.4, gli stop di differenza sono 2 e l'esposimetro sarà preciso tra EV -1 ed EV 18.

Si noti che l'intervallo di luminosità del soggetto varia in funzione delle caratteristiche dell'obiettivo usato, mentre rimane costante cambiando la sensibilità del materiale fotosensibile in quanto è necessario modificare l'esposizione. È quindi di capitale importanza specificare la sensibilità per correlare il valore di esposizione alla luminosità del soggetto.

Nel caso che la sensibilità sia differente dal valore di riferimento di 100 ISO, il valore di esposizione viene modificato in funzione del numero di stop corrispondenti alla differenza di sensibilità:

$$EV_S = EV_{100} + \log_2 \frac{S}{100}$$

Ad esempio, una sensibilità di 400 ISO risulterà più alta di 2 stop rispetto al valore di riferimento di 100 ISO:

$$EV_{400} = EV_{100} + \log_2 \frac{400}{100} = EV_{100} + \log_2 4 = EV_{100} + 2$$

Se invece la sensibilità è di 50 ISO, il valore di esposizione sarà più basso di 1 stop rispetto al valore di riferimento di 100 ISO:

$$EV_{50} = EV_{100} + \log_2 \frac{50}{100} = EV_{100} + \log_2 0,5 = EV_{100} - 1$$

Recentemente, da più parti è stato proposto l'uso del **valore di luce (Light Value, LV)** per indicare il valore di esposizione a 100 ISO. Occorre però rammentare che questo termine non è contemplato nelle attuali normative e che ne esistono diverse definizioni in contrasto tra di loro.

EV e condizioni di illuminazione

L'apertura relativa ed il tempo di otturazione da utilizzare in funzione della misurazione della luce riflessa e della sensibilità sono dati dalla seguente equazione dell'esposizione:

$$\frac{N^2}{t} = \frac{LS}{K}$$

dove: N = apertura relativa
t = tempo di esposizione (tempo di otturazione)
L = luminanza media della scena
S = sensibilità ISO
K = costante di calibrazione dell'esposimetro in luce riflessa.

ed il valore di esposizione è il valore logaritmico del secondo membro:

$$EV = \log_2 \frac{LS}{K}$$

Nel caso di misurazione della luce incidente, le due precedenti equazioni risultano così modificate:

$$\frac{(f/N)^2}{t} = \frac{JS}{C}$$

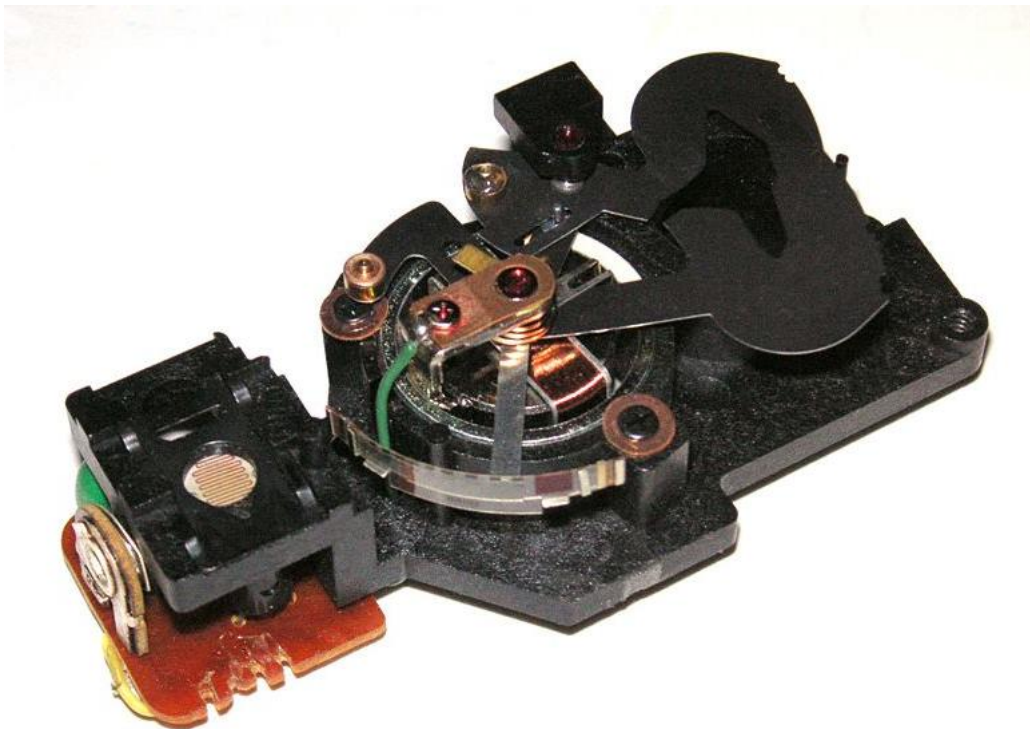
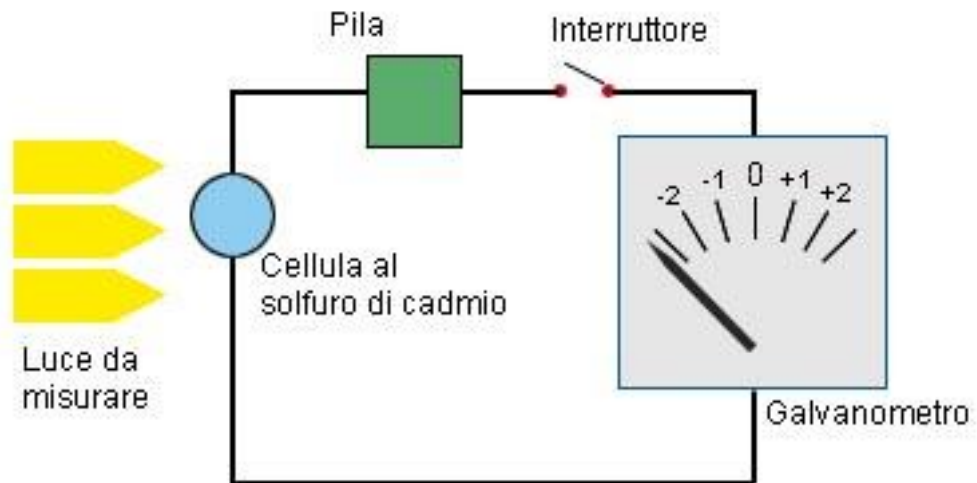
dove: J = illuminamento
C = costante di calibrazione dell'esposimetro in luce incidente.

e:

$$EV = \log_2 \frac{JS}{C}$$

Di norma, queste relazioni di EV in funzione della luminanza o dell'illuminamento sono corrette per riprese in esterni di giorno, mentre sono di applicazione problematica in scene con distribuzione anomala della luminanza, come nel caso di skyline (il profilo delineato contro il cielo dal panorama complessivo degli edifici di una città) di notte.

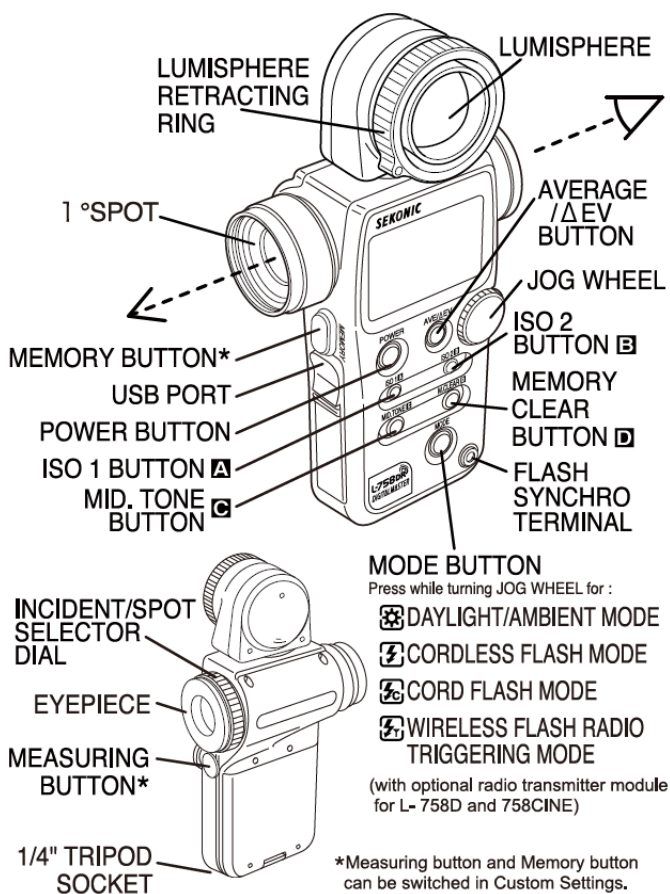
Valori di esposizione in funzione della luminanza (100 ISO, K=12,5) e dell'illuminamento (100 ISO, C=250)		
EV	L [cd/m²]	J [lx]
-4	0,008	0,156
-3	0,016	0,313
-2	0,031	0,625
-1	0,063	1,250
0	0,125	2,500
1	0,250	5
2	0,500	10
3	1	20
4	2	40
5	4	80
6	8	160
7	16	320
8	32	640
9	64	1280
10	128	2560
11	256	5120
12	512	10240
13	1024	20480
14	2048	40960
15	4096	81920
16	8192	163840



Esposimetro analogico:

- **schema elettrico,**
- **spaccato, con galvanometro al centro e fotoresistenza CdS (fotocellula) nell'apertura circolare a sinistra.**





Sensori ottici

I sensori di luce per le misurazioni fotometriche dovrebbero essere tarati in lumen o (giacché devono integrare sulla loro superficie sensibile) in lux. Ma nelle specifiche dei sensori commerciali la sensibilità è di solito data in unità di flusso di energia per unità di superficie.

La **sensibilità** di un sensore generico è sempre data come rapporto tra una unità di misura dello **stimolo** (grandezza che si vuole misurare) e una unità di misura della **risposta** (segnale utile del sensore). Poiché la risposta dei sensori ottici è di solito una corrente elettrica, viene specificata in ampere. Lo stimolo che si vuole misurare è il flusso luminoso, ma i sensori a nostra disposizione sono dispositivi che normalmente sentono anche l'energia radiante che non cade nella ristretta banda delle lunghezze d'onda elettromagnetiche visibili.

Un buon sensore dovrebbe essere lineare, cioè con sensibilità costante. Ma nella pratica, oltre che allo stimolo per cui il sensore è finalizzato, la sua risposta dipende anche da altri parametri.

Nel caso dei sensori ottici solo pochi sono sensibili solo alla quantità di energia trasportata dalle onde elettromagnetiche: nella maggior parte dei dispositivi commerciali la risposta allo stimolo luminoso dipende anche dalla lunghezza d'onda della luce.

Questo, che sembrerebbe un difetto in un sensore qualsiasi, può diventare invece un pregio per un sensore di flusso luminoso. Per misurare correttamente tale grandezza si deve, infatti, modulare la risposta del sensore in modo che risponda solo alla luce, cioè ai fotoni nell'intervallo di energie definito in precedenza.

Un sensore ideale di flusso luminoso è allora un dispositivo dotato di un filtro che blocca i fotoni con energia pari a quella dei raggi X (o superiore) ed i fotoni con energia tipica delle onde radio (o inferiore), e la cui sensibilità imita quella della retina umana.

Tipi di sensori ottici

I sensori ottici si possono dividere in quattro grandi categorie:

- fototubi,
- fotoresistenze,
- fototransistor e fotodiodi,
- sensori termici (bolometri).

Fototubi

I fototubi sono diodi a valvola (in bulbo sotto vuoto), con un catodo di grande superficie ricoperto da un metallo alcalino, quale il cesio, e un anodo a filamento.

Sfruttano l'**effetto fotoelettrico di tipo esterno**, cioè l'emissione di elettroni da una superficie metallica colpita da fotoni di energia superiore ad un valore di soglia. Benché siano stati i primi dispositivi utilizzati per rilevazioni luminose, attualmente trovano impiego solo in situazioni dove sia necessario misurare flussi luminosi molto deboli o in altri casi particolari.

Si tratta di dispositivi fragili, ingombranti e costosi, che possono però essere resi molto sensibili sfruttando un effetto di moltiplicazione degli elettroni estratti dai fotoni incidenti (**amplificazione del segnale elettrico**), aggiungendo una serie di elettrodi intermedi, tra anodo e catodo, tra cui viene stabilito un intenso campo elettrico. Il campo elettrico tra ogni coppia successiva di elettrodi fornisce agli elettroni estratti una

energia sufficiente ad estrarre altri elettroni e quindi si genera un processo a valanga che produce un impulso di corrente (anche di milioni di elettroni per fotone) e che spiega il nome di **fotomoltiplicatori** dato a questi dispositivi.

Fotoresistenze

Si tratta di resistenze costituite da materiali la cui resistività elettrica diminuisce quando sono illuminati. In questo caso si tratta di un **effetto fotoelettrico di tipo interno**, cioè la produzione di coppie elettrone-lacuna da parte di fotoni con energia superiore ad un valore di soglia.

I materiali di questo tipo sono detti **semiconduttori** ed in essi il trasporto di carica elettrica è dato non solo dalla migrazione di elettroni, ma anche dalla carenza di elettroni in siti particolari del reticolo (che vengono definiti lacune). In altre parole, in questo tipo di effetto fotoelettrico, l'energia E_λ associata ad un fotone incidente promuove un elettrone dalla banda di valenza alla banda di conduzione, lasciando una lacuna nella prima.

Le **coppie elettrone-lacuna** così generate aumentano la densità di portatori di carica e quindi la conducibilità elettrica del materiale.

La differenza di energia tra il massimo della banda di valenza ed il minimo della banda di conduzione, detta **Energy gap (E_g)**, è la minima energia che un fotone può avere affinché avvenga l'effetto fotoelettrico.

I sensori a fotoresistenza hanno una prontezza inversamente proporzionale alla loro sensibilità. Le coppie generate dai fotoni assorbiti continuano a contribuire alla conducibilità finché non si ricombinano; inoltre, tanto maggiore è la vita media delle coppie fotoprodotte, tanto maggiore è la sensibilità. Conta anche il tempo di transito dei portatori di carica nel dispositivo. Il tempo di risposta è tipicamente dell'ordine dei millisecondi, ma può arrivare a vari secondi.

Le fotoresistenze vanno alimentate ed il segnale prodotto è una variazione di tensione proporzionale alla luce ed alla tensione di polarizzazione.

In definitiva, si tratta di sensori molto compatti, robusti ed economici.

Fototransistor e fotodiodi

I materiali semiconduttori possono essere puri (germanio, silicio) o leghe (GaAs, InAs, InP, GaP, InGaAs, GaAsP, ecc.) ed in generale appartengono ai gruppi IV, II e VI, III e V della tavola periodica.

Le loro proprietà possono essere modificate introducendo delle **impurezze** nel reticolo cristallino (bastano pochi atomi per miliardo): si ottengono così **semiconduttori drogati**, che si dicono di **tipo P** o di **tipo N** secondo il tipo di impurezze.

Se si costruisce un dispositivo con due semiconduttori (P e N) adiacenti, la loro superficie di separazione costituisce ciò che viene chiamata una **giunzione P-N**.

Una giunzione P-N si comporta elettricamente come un **diodo**, con una conducibilità dipendente dal segno della sua polarizzazione.

Due giunzioni P-N adiacenti, cioè una doppia giunzione P-N-P o N-P-N, costituiscono un **transistor**.

Ma le proprietà rettificanti della giunzione P-N non sono le sole interessanti dal punto di vista tecnologico: quelle che qui interessano sono le sue proprietà optoelettroniche.

In uno strato sottilissimo adiacente alla giunzione (**strato di svuotamento**) la distribuzione dei portatori di carica (elettroni e lacune) cambia rispetto alla situazione esistente nel volume del semiconduttore P o N: in esso si crea un campo elettrico al quale sono soggette le coppie elettrone-lacuna generate al suo interno, ad esempio per effetto di un fotone incidente.

Questo fenomeno porta ad una corrente elettrica prodotta da un flusso di fotoni con energia superiore all'energia di soglia ($E_\lambda > E_g$) che raggiunge lo strato di svuotamento. Per ottenere un sensore di luce da un fotodiodo o un fototransistor è quindi sufficiente esporre la giunzione P-N alla luce affinché attraverso di essa si stabilisca una corrente elettrica proporzionale al flusso luminoso.

Il fototransistor differisce dal fotodiodo perché la fotocorrente generata da una giunzione viene moltiplicata per un fattore di guadagno (tipicamente 100) dalla seconda giunzione (ciò che fa del transistor un amplificatore). Quanto si acquista in sensibilità tuttavia lo si perde in linearità: mentre il fotodiodo può essere lineare (fotocorrente proporzionale al flusso luminoso), il fototransistor non lo è per niente.

La fotocorrente di una giunzione P-N può essere sfruttata per convertire energia luminosa in energia elettrica: i fotodiodi ottimizzati per questa funzione vengono denominati celle fotovoltaiche (o anche celle solari).

Sensori termici (bolometri)

Vengono detti bolometri i sensori di luce che sfruttano il riscaldamento prodotto dall'assorbimento di fotoni per generare un segnale utile (variazione di polarizzazione dielettrica o di forza elettromotrice).

Appartengono al primo tipo i **sensori piroelettrici**, al secondo tipo le **termopile**.

Caratteristiche comuni sono:

- 1) la **sensibilità spettrale praticamente piatta**, in un intervallo di lunghezze d'onda limitato solo dalle caratteristiche delle finestre ottiche di protezione utilizzate;
- 2) la **risposta solo a variazioni di illuminamento**: se sottoposti ad illuminamento costante, si portano in equilibrio termico e il segnale in uscita si azzerava.

