

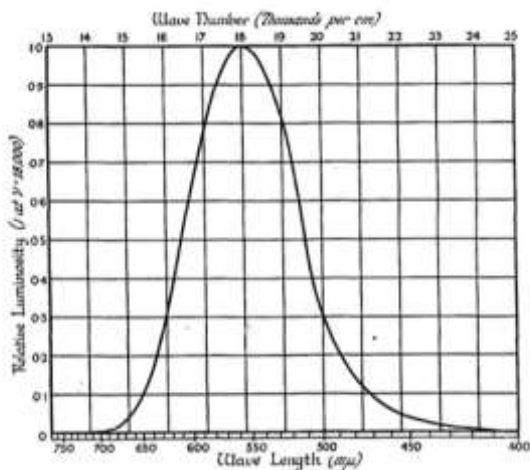
## LE GRANDEZZE FOTOMETRICHE

### LA LEZIONE

---

#### DALL'EQUIVALENTE MECCANICO DELLA LUCE ALLA DEFINIZIONE DI CANDELA

Negli anni Venti del secolo scorso la **fotometria** era già una disciplina ben definita con unità e costanti vicine a quelle da noi adottate. Così se si prende un manuale dell'epoca si ritrova la curva "che mostra la risposta della retina alle differenti frequenze", con il massimo a 556 nanometri (in notazione moderna). Un valore, vicino alla lunghezza d'onda di 555 nm oggi accettata, frutto delle analisi di campioni di persone sottoposte a misura delle sensazioni dei colori da parte della *Commission Internationale d'Eclairage* (CIE) nel 1924.



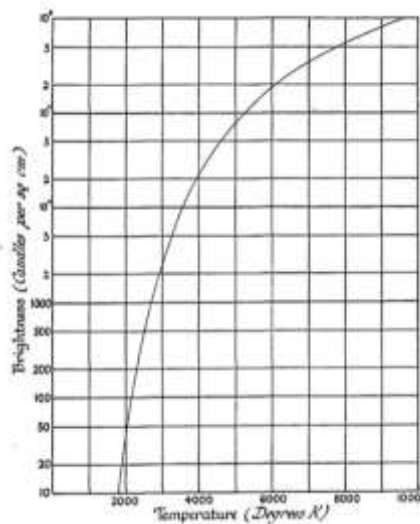
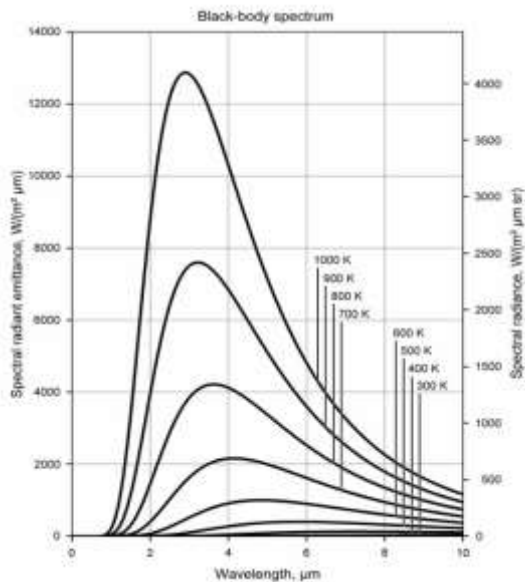
**fig.1** La luminosità relativa dei diversi colori del **visibile**

Il passaggio dalle unità energetiche tipiche della radiazione a quelle legate alle sensazioni di luminosità implicava l'individuazione di un valore costante chiamato nel secolo scorso "l'equivalente meccanico della luce". Come spiegava J. W. T. Walsh in *Photometry* del 1926 (pag. 296): "L'equivalente è il rapporto tra il flusso radiante (espresso in watt) e il flusso luminoso (espresso in lumen) relativo alla frequenza corrispondente alla massima luminosità."

"I valori medi dell'equivalente meccanico della luce determinati recentemente con vari metodi -continuava l'autore- hanno portato a 0,0016 watt/lumen." Per poi aggiungere nell'Appendice: "come valore standard per l'equivalente meccanico della luce è raccomandato 0,0015 watt a lumen."

Oggi l'inverso dell'equivalente meccanico della luce è il massimo dell'efficienza luminosa fissato a 683 lm/W, quindi in termini moderni il rapporto tra i flussi è uguale a  $1/683=0,001464$  W/lm.

Il passaggio della relazione tra flusso energetico e luminoso a una data lunghezza d'onda (frequenza) al caso generale era possibile solo conoscendo la distribuzione dell'energia della radiazione emessa in funzione della lunghezza d'onda. Il **corpo nero**, di cui Planck aveva individuato all'inizio del secolo l'equazione, rappresentava allora il sistema ideale di sorgente luminosa.



**fig.2** Curve spettrali del corpo nero a diverse temperature; **fig.3** Intensità luminosa (a unità di superficie) nelle emissioni di un corpo nero a diverse temperature assolute

Al variare della temperatura del corpo nero era possibile tracciare la curva della **brillanza** espressa in candele al centimetro quadro. Walsh presentava un grafico crescente nell'intervallo tra 1800 e 9500 kelvin. In esso alla temperatura di 2000 K corrispondeva il valore di circa cinquanta candele al centimetro quadro.

Nel 1948, la settima *Conferenza Generale dei Pesi e Misure* definiva l'unità principale dell'intensità luminosa. La candela diventava la sessantesima parte dell'intensità luminosa emessa perpendicolarmente da un centimetro quadrato di radiatore ideale (corpo nero) alla temperatura di solidificazione del platino (2042 K). La definizione internazionale conciliava le ricerche di Planck a quelle del francese **Violle** del 1881 nelle quali la sorgente di luce campione era un centimetro quadro di platino alla temperatura di fusione. Solo nel 1979 l'unità di misura fotometrica, al termine del XVI CGPM, assumeva la forma attuale.

*La candela è l'intensità luminosa, in una data direzione, di una sorgente che emette una radiazione monocromatica di 5,40 10<sup>14</sup> Hz, la cui intensità nella stessa direzione è 1/683 W/sr (watt a steradiani).*

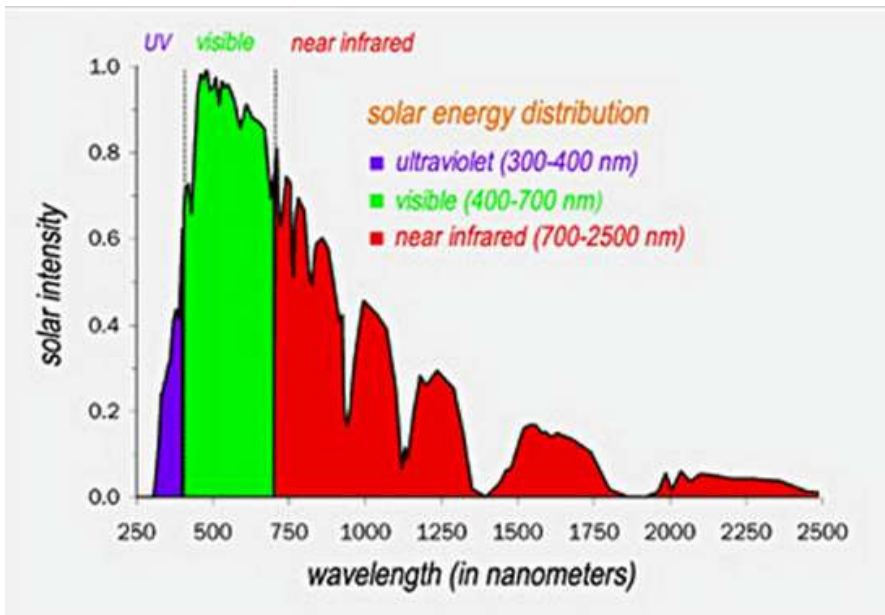
Il valore numerico del rapporto rappresentava l'aggiornamento dell'equivalente meccanico della luce, mentre la frequenza di riferimento si otteneva dal valore numerico della lunghezza d'onda di 555 nm e da quello della velocità della luce nell'aria. Sono così uniti, apparentemente, nella definizione vigente di candela, elementi propri della sorgente (la potenza della radiazione emessa in riferimento all'unità dell'angolo solido) e quelli della visione (la frequenza corrispondente al massimo della curva del coefficiente di visibilità nella visione diurna). Una sorta di unità antropometrica.

Lo stretto collegamento con la fotometria del ventesimo secolo sarà consolidato con la prossima definizione dell'unità già fissata dalle Commissioni Internazionali. La candela, cd, l'unità dell'intensità luminosa, sarà basata sull'efficienza  $K_{cd}$ . L'efficienza luminosa

caratteristica di una radiazione monocromatica di frequenza 540 THz sarà esattamente uguale a  $683 \text{ lm W}^{-1}$ .

## INTENSITÀ E FLUSSO LUMINOSI

La principale fonte luminosa naturale per la nostra visione è la luce solare filtrata dall'atmosfera terrestre. Scomponendo la radiazione del Sole nelle diverse componenti spettrali è possibile rappresentare graficamente una densità spettrale di potenza  $P(\lambda)$ .

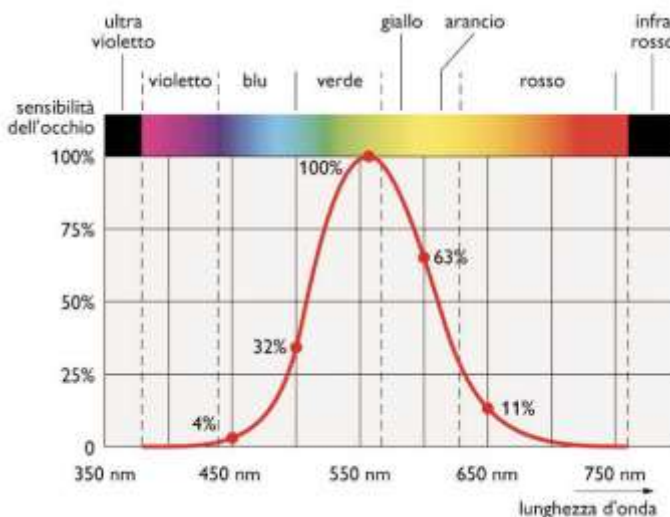


L'area delimitata dalla curva e dall'asse delle lunghezze d'onda rappresenta allora la potenza complessiva della radiazione emessa.

**fig.4** Distribuzione spettrale dell'energia solare

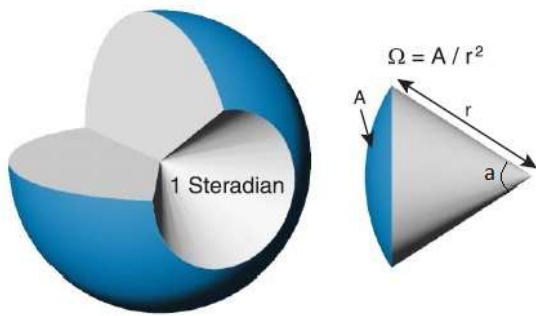
Secondo la legge di Stefan-Boltzmann l'energia radiante a unità di tempo è proporzionale all'area della superficie emittente e alla quarta potenza della temperatura assoluta. In essa compare inoltre una costante fondamentale pari a  $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ .

Dell'intero spettro della radiazione emessa solo una percentuale limitata è assorbita dai fotorecettori della retina. In primo luogo, perché l'intervallo delle lunghezze d'onda della luce visibile ai nostri occhi è limitato a un ristretto intervallo (gli estremi sono



convenzionali; l'inferiore è prossimo a 400 nm, ma molti autori scendono a 360-380 nm; quello superiore oscilla nei riferimenti tra 780 nm e 830 nm). In secondo luogo, la probabilità di assorbimento di un fotone da parte della retina nella visione diurna è variabile, dipendendo dalla frequenza del fotone stesso. La risposta ha un massimo uguale a uno a 555 nm e valori minori per le altre lunghezze d'onda, raggiungendo valori prossimi a zero a 400 nm e 750 nm.

**fig.5** Sensibilità dell'occhio alle diverse lunghezze d'onda



**fig.6** Angolo solido

La curva  $V(\lambda)$  della visione diurna rappresenta il fattore di visibilità, il filtro che seleziona in modo diverso le luci monocromatiche. Per l'occhio umano, a parità di intensità energetica, risulta più brillante (luminosa) la luce verde rispetto a quella viola o a quella rossa (il numero di fotoni "verdi" che vengono "assorbiti" sono notevolmente superiori a quelli "rossi").

L'intensità della radiazione  $I = E / \Omega \Delta t$  (con  $E$  energia,  $\Omega$  angolo solido e  $\Delta t$  intervallo di tempo) si trasforma in intensità luminosa  $I_L$  tenendo conto della funzione  $V(\lambda)$  e della costante numerica pari a 683, valida per luce monocromatica a 555 nm (frequenza di 540 THz).

Solo se  $V(\lambda) = 1$  la luce monocromatica produce un'intensità luminosa pari a 683 cd/(W/sr) volte l'intensità radiante energetica:  $I_L = 683 I$ .

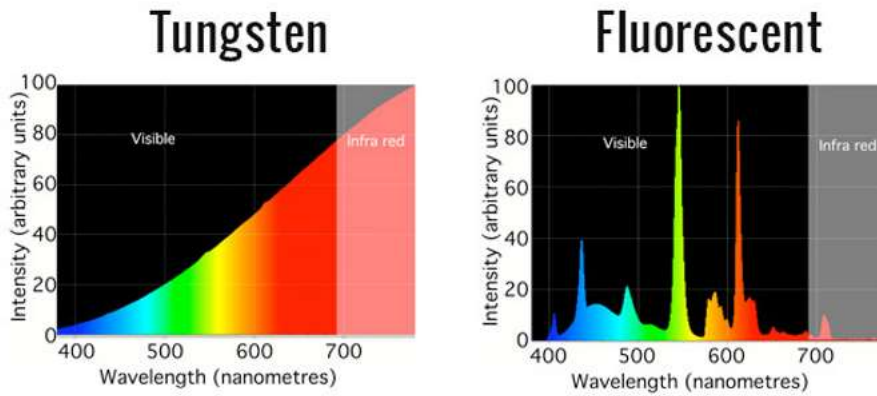
La stessa relazione vale tra il flusso luminoso  $\Phi_L$  e il flusso radiante  $\Phi$  per la radiazione con effetto massimo:  $\Phi_L = 683 \Phi$ . Per piccole variazioni di flusso,  $\Delta \Phi_L = I_L \Delta \Phi$  e ammettendo inoltre che la sorgente luminosa sia puntiforme e indipendente dalla direzione, si arriva a  $I_L = \Phi_L / 4\pi$ .

Come debba essere affrontato il caso di una radiazione con molte componenti spettrali diverse dal massimo della curva è un problema matematico che rimanda al calcolo integrale. Si può però darne una versione intuitiva suddividendo la densità della potenza spettrale  $P(\lambda)$  in modo discreto, diciamo ad esempio ogni nm, e calcolando i prodotti  $V(\lambda)P(\lambda)$ .

In questo modo il flusso luminoso, misurato in lumen o candele per steradiani, è 683 (lumen a watt) volte il prodotto pesato dai fattori  $V$  con la densità di potenza spettrale:  $\Phi_L = 683 \sum V(\lambda)P(\lambda)$ , nell'intervallo di lunghezze d'onda tra 380 nm e 780 nm.

## **SORGENTI DI LUCE BIANCA**

Ancora in molte abitazioni europee si possono trovare delle lampade a incandescenza, anche se la loro produzione è interrotta da diversi anni. La loro efficienza (per ora useremo il termine in modo intuitivo) è bassa. Non tanto per il rendimento di produzione di fotoni a causa del riscaldamento del filamento di wolframio (tungsteno), quanto per la frequenza degli stessi che si trova in gran parte nella zona dell'infrarosso. Del resto anche un ideale corpo nero alla temperatura del metallo darebbe luogo allo stesso problema: gran parte dei fotoni emessi non è in grado di stimolare la nostra visione.



**fig.7** Confronto delle componenti spettrali di una lampada ad incandescenza e di una fluorescente;

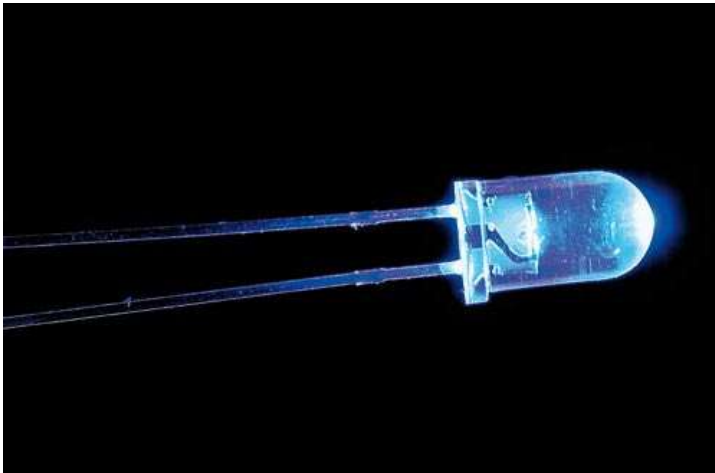


**fig.8** Lampade a vapori di sodio per l'illuminazione stradale

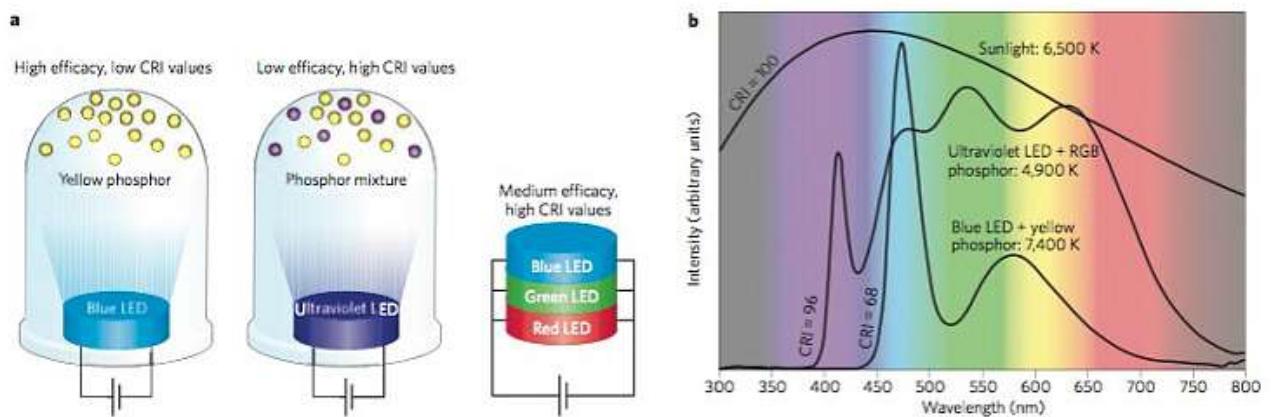
La stessa densità spettrale di potenza della luce solare, pur avendo un picco prossimo al valore estremo della sensibilità dei nostri occhi (nella visione diurna) produce più del 65% della radiazione in zone inaccessibili alla retina.

La luce solare rappresenta comunque il riferimento principale per un'altra caratteristica delle lampade: la loro capacità di mantenere inalterata la nostra visione dei **colori** quando queste illuminano la sera gli oggetti nelle nostre case o nelle strade. Se lo spettro delle lampade avesse una dominante principale: un blu o un giallo, i colori degli oggetti cambierebbero come ci si rende conto ad esempio con le lampade a vapori di sodio dell'illuminazione stradale. Così queste ultime hanno un'alta efficienza, ma un basso valore di compatibilità con la luce solare. Misurando questo con un indice di resa cromatica (l'acronimo inglese è CRI) pari a 100 (nel caso di luce solare) con la luce giallastra si ha un valore prossimo a 20. Generalmente per l'illuminazione domestica i valori di CRI accettati devono essere maggiori o uguali a 80. Lampade fluorescenti (a scarica elettrica in un gas), alogene e LED (a ricombinazione di coppie lacuna-elettrone) soddisfano a tale condizione. La produzione di luce bianca da *Light Emitting Diode* è una realtà recente iniziata dopo l'invenzione di LED blu.





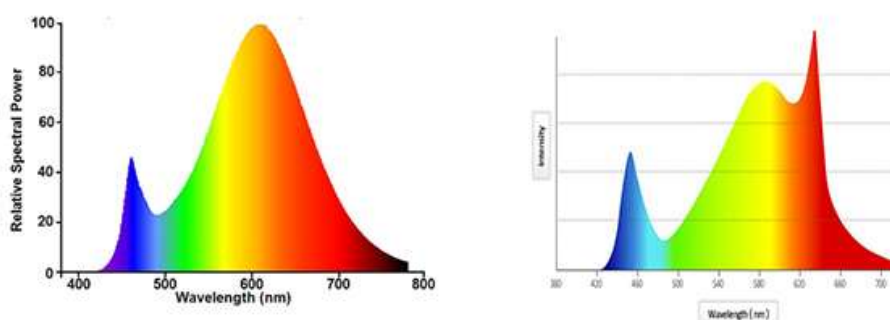
**fig.9** LED blu



**fig.10** Confronto tra tre diverse lampade LED a luce bianca

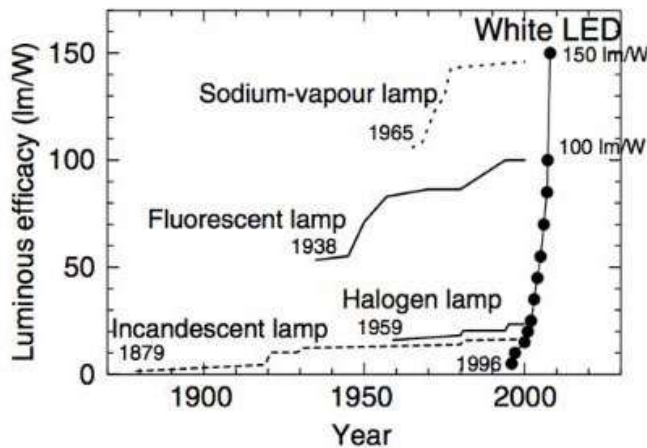
Il tassello mancante per la realizzazione della luce bianca con diodi ha portato nel 2014 tre ricercatori giapponesi al premio Nobel per la fisica.

Combinando la luce di tre LED "primari" con luce rossa, verde e blu si ottiene luce bianca con un alto CRI, ma con media efficienza. Si sono così seguite altre strade. Un LED blu che stimola fosfori gialli produce luce bianca con una resa cromatica bassa ed elevata efficienza. Infine un risultato intermedio ai precedenti si ha con LED a luce ultravioletta che illuminano una mistura di fosfori. Oggi le lampade a LED delle abitazioni hanno un indice prossimo a 80 e possono avere spettri molto diversi a seconda della combinazioni delle componenti con diverse dominanti (blu, luce fredda; rossa, luce calda).

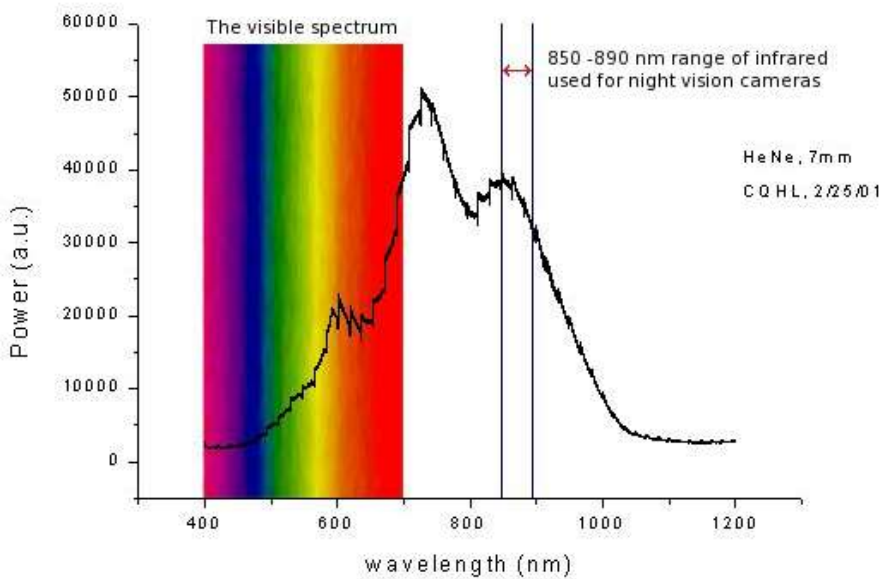


**fig.11** Lampade LED a luce fredda (a sn) e a luce calda (a ds)

Se si analizza invece l'efficienza delle lampadine negli ultimi cento anni si nota l'aumento rapidissimo che contraddistingue le lampade a LED.



**fig.12** Evoluzione dell'efficacia luminosa dell'illuminazione



**fig.13** Spettro di una lampada alogena

In poco più di un ventennio alle incandescenti sono succedute le alogene che hanno innalzato la temperatura del tungsteno intorno ai 3400 K; sono seguite le fluorescenti compatte che non hanno l'inconveniente della grande emissione di radiazione nel campo dell'infrarosso, ma che contengono mercurio.

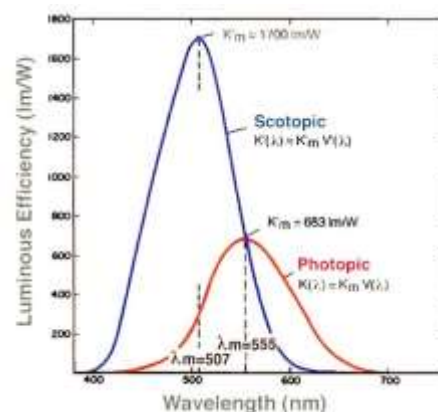
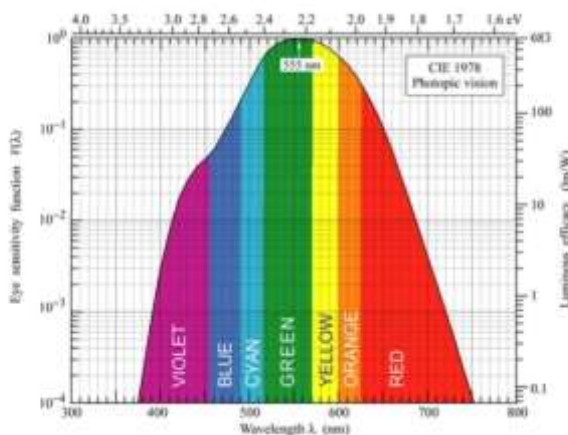
Infine i LED che hanno una durata notevolmente superiore alle precedenti, con un incremento dell'efficienza che in genere va a scapito dell'indice di resa cromatica.

	Osram 60W Replacement LED	Cree 4Flow LED	Cree 60W Rep. LED	Philips 60W Rep. LED	Philips SlimStyle LED	Ikea Ledare LED (frosted)
Lumens (measured* / stated)	852 / 800	835 / 815	746 / 800	864 / 830	815 / 800	658 / 600
Watts	8.5	11	9.5	11	10.5	10
Efficiency (lumens per watt)	94.12	74.09	84.21	75.45	76.19	60
Estimated yearly energy cost	\$1.03	\$1.33	\$1.15	\$1.33	\$1.27	\$1.21
Color temperature (measured / stated)	2,580K / 2,700K	2,617K / 2,700K	2,669K / 2,700K	2,584K / 2,700K	2,653K / 2,700K	2,632K / 2,700K
Lifespan	25,000 hours	25,000 hours	25,000 hours	25,000 hours	25,000 hours	25,000 hours
Color rendering index	78	80	80	80	80	88

**fig.14** Confronto di alcune lampade a LED di tipo commerciale

## EFFICIENZA LUMINOSA

Una lampada ideale dovrebbe trasformare tutta l'energia elettrica in luce (fotoni con frequenza nell'intervallo del visibile) bianca confrontabile con quella solare (indice di resa cromatica uguale a 100). La misura dell'efficienza si può suddividere in varie questioni. Limitandoci al caso più semplice possiamo parlare di un rendimento energetico che valuta la percentuale di potenza elettrica che la lampada trasforma in potenza radiativa e un'efficienza spettrale che tiene conto della curva caratteristica della visione fotopica (aggiornata nel 1978).



**fig.15** La più recente curva fotopica del 1978; **fig.16** L'efficienza luminosa in funzione della lunghezza d'onda

Il valore limite dell'efficienza luminosa, almeno per una luce monocromatica, della curva di visibilità diurna è 683 lumen a watt. Nel caso di una sorgente di luce bianca, l'efficienza luminosa è semplicemente il rapporto tra il flusso luminoso e la potenza elettrica.

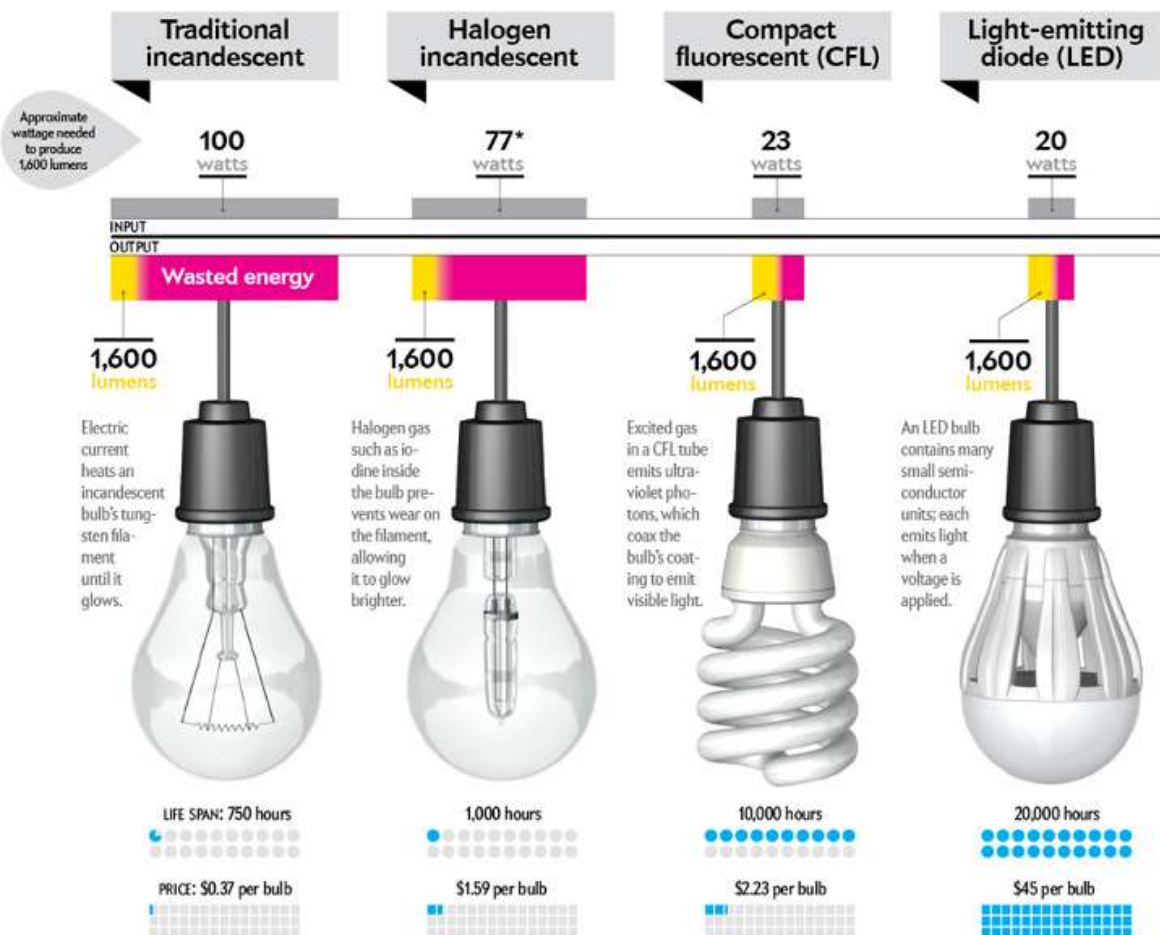
Una lampada a LED di luce bianca di recente produzione ha riportato sulla confezione il valore della potenza elettrica assorbita (in watt) e del flusso luminoso (in lumen) emesso. Così per lampade LED non particolarmente costose il flusso luminoso può essere 806 lm e la potenza si aggira intorno ai 10 W. L'efficienza luminosa è allora



80,6 lm/W. Si pensi che l'efficienza di una candela è solo 0,3 lm/W, quella di un'alogeno 24 lm/W, una compatta fluorescente 60 lm/W. Solo con le scariche elettriche nei vapori di sodio si ottengono 150-200 lm/W, ma va considerato il fatto che la luce non è bianca.



**fig.17** I dati dichiarati sulla confezione di una lampada LED permettono il calcolo dell'efficienza luminosa



**fig.18** Caratteristiche delle lampade commerciali degli ultimi anni

Ci si potrebbe chiedere se esiste un limite per la luce bianca verso il quale tende la parte spettrale dell'efficienza luminosa. Conoscendo la densità di potenza spettrale della sorgente di luce diversi autori ottengono valori prossimi a 300 lm/W, mentre altri si spingono ad indicare efficienze superiori a 400 lm/W. I prototipi di lampade LED (con resa cromatica non ottimale) hanno raggiunto i 300 lm/W (valore riportato nell'annuncio del premio Nobel per la fisica del 2014). Esso rimane comunque lontanissimo dalle caratteristiche dei prodotti commerciali che, ripetiamolo, con un CRI=80, si avvicinano a 100 lm/W.

Dunque i margini di miglioramento per l'efficienza delle sorgenti artificiali di illuminazione sono assai ampi e l'obiettivo di una luce bianca simile a quella solare con uno spettro ristretto all'intervallo del visibile è ancora lontano da una soluzione ottimale.