

PSL 2008 - laboratorio di fisica

Il laboratorio si propone di studiare la fisica delle lampade a fluorescenza compatte (LFC). Saranno analizzati i principi fisici sui quali è basato il funzionamento di queste sorgenti di luce e si farà un confronto tra le prestazioni, in termini di potenza assorbita e resa, con le normali lampade a incandescenza e con quelle a led. Inoltre si esamineranno le caratteristiche spettroscopiche delle varie sorgenti di luce e le caratteristiche geometriche che condizionano il loro impiego (direzionalità o omnidirezionalità del fascio di luce emessa).

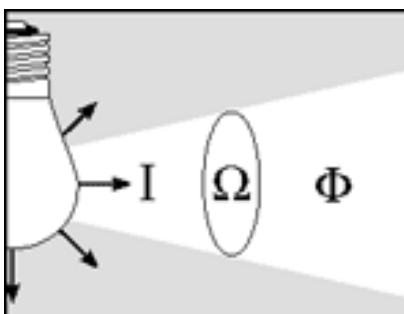
1° incontro 14/01/2008

Prima di cominciare ad affrontare i vari problemi è necessario chiarire quali sono le grandezze fisiche da misurare per arrivare ad un risultato concreto e, in un secondo tempo, quali sono gli strumenti necessari per le misure.

Le grandezze in gioco sono essenzialmente la potenza assorbita (*Watt*), il flusso luminoso emesso (*lumen*) e la potenza resa, cioè la parte di energia per unità di tempo utile per lo scopo di illuminare e quindi emessa nel visibile. Si vedrà infatti che una frazione non sempre trascurabile di energia viene resa sotto forma di radiazione infrarossa e quindi inutilizzabile per illuminazione.

Ma prima vediamo le definizioni delle grandezze fotometriche base:

- ♦ **Candela:** una candela (simbolo **cd**) è pari all'intensità luminosa, in una data direzione, di una sorgente emettente una radiazione monocromatica di frequenza pari a 540×10^{12} hertz e di intensità radiante in quella direzione di $1/683$ di watt per steradiante (il fattore arbitrario $1/683$ che compare nell'attuale definizione venne scelto per far sì che essa coincidesse con la vecchia definizione antecedente al 1982). La frequenza scelta è quella dello spettro visibile prossimo al verde. L'occhio umano è più sensibile a questa frequenza che è quella dove è localizzato il massimo irraggiamento per un corpo nero a 5600 K.
- ♦ **Lumen:** il lumen (simbolo **lm**) è l'unità di misura del flusso luminoso. Equivale al flusso luminoso rilevabile in un angolo solido di 1 steradiante emesso da una sorgente isotropica con intensità luminosa di 1 candela. Ne discende che la stessa sorgente isotropica con intensità luminosa di 1 candela emette un flusso luminoso totale di 4π lumen.
- ♦ **Lux:** Il lux (simbolo **lx**) è l'unità di misura per l'illuminamento del Sistema Internazionale. Un lux è pari a un lumen fratto un metro quadrato.



L'intensità luminosa di $I(\text{cd})$ genera un flusso luminoso di Φ (lm) nell'angolo solido ampio Ω (sr). Se questo flusso cade su una superficie di $S(\text{m}^2)$ genera un illuminamento di Φ/S lux.
Dimensionalmente $\text{lx} = \text{cd sr} / \text{m}^2$

Per rendersi conto qualitativamente di come vanno le cose è estremamente utile fare una prima osservazione mediante un radiometro di Crookes che, posto alla stessa distanza

(una decina di cm) da una lampada a incandescenza e da una LFC di dimensioni analoghe, gira molto velocemente nel primo caso e molto più lentamente nel secondo. Questo dimostra senza dubbio che la lampada a incandescenza scalda molto di più della LFC (naturalmente è anche opportuno chiarire il funzionamento del radiometro. Spesso si riscontrano errori in tale spiegazione perché, erroneamente, si attribuisce il moto delle pale alla pressione di radiazione della luce)⁽¹⁾. La differente emissione spettrale si può evidenziare anche utilizzando un filtro per l'infrarosso smontandolo da un proiettore di diapositive. In questi apparecchi il filtro serve per evitare che la lampada bruci la diapositiva. Se si pone il filtro tra la lampada a incandescenza e il radiometro si può notare che quest'ultimo rallenta in maniera molto evidente.

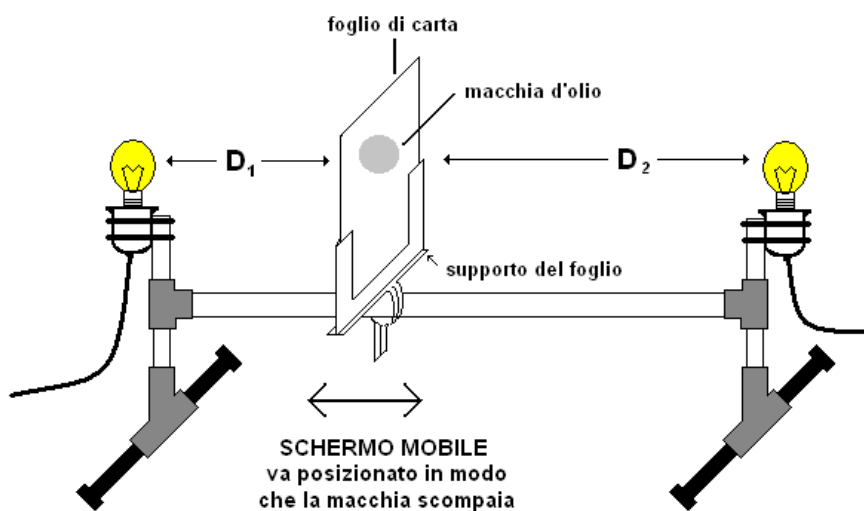
Uno degli aspetti più semplici da trattare potrebbe sembrare quello dell'assorbimento di energia tra i vari tipi di lampade. Quasi tutte le LFC riportano sulla confezione i dati relativi a potenza assorbita e flusso luminoso reso nel visibile. Quest'ultimo dato è più raro sulle confezioni delle lampade a incandescenza ma non è difficile trovarlo in rete sui siti delle aziende produttrici. Si può verificare la correttezza del dato che riguarda la potenza assorbita misurando tensione e corrente di esercizio (per le LFC può essere necessario attendere qualche minuto) e si vedrà che, tenendo conto del fatto che si sta lavorando in corrente alternata, 220 V a 50 Hz, il prodotto $I \times V$ risulta corrispondente al valore dichiarato dal costruttore per le lampade a incandescenza ma non per le LFC. Questo fatto è dovuto all'alimentazione alternata che per un carico puramente resistivo (incandescenza) non provoca sfasamenti tra corrente e tensione. Nel caso della LFC, poiché il carico è induttivo, gli sfasamenti sono invece presenti e occorre tenere conto del "fattore di potenza" cioè del $\cos \varphi$, dove φ è l'angolo di sfasamento tra corrente e tensione. Per determinare il valore dello sfasamento si può procedere, in maniera semplice, con un particolare multimetro, acquistabile anche nei supermercati, o mediante una analisi dei segnali da farsi mediante un oscilloscopio. Su questo tipo di misure torneremo in un incontro successivo. Il multimetro che fornisce la misura dello sfasamento dà anche la potenza assorbita e quindi si può verificare che anche con le LFC il valore dichiarato dal costruttore corrisponde a quello effettivo. Quello che è immediatamente evidente è la differenza macroscopica tra l'assorbimento delle due classi di lampade per valori di illuminamento confrontabili: le LFC assorbono 1/3, 1/4 della potenza rispetto alle incandescenza.

Una ulteriore misura collegata all'alimentazione in alternata è quella legata al fatto che anche l'emissione di luce varia al ritmo di 100 Hz. Questo fatto si può verificare per mezzo di un sensore (fotodiode o cella fotovoltaica) collegata ad un oscilloscopio. Nel caso della fotocella è la corrente erogata che è direttamente proporzionale all'intensità di illuminamento e quindi è necessario collegare i terminali con una resistenza di potenza da 300÷600 Ω e misurare la caduta di tensione ai suoi capi. Tale tensione sarà in sincrono con l'alimentazione della lampada. La misura dà gli stessi risultati sia con le lampade a incandescenza che con le LFC. Il fatto che la frequenza del segnale luminoso sia 100 Hz e quella dell'alimentazione sia 50 Hz è legato al fatto che la potenza resa è proporzionale al quadrato della corrente.

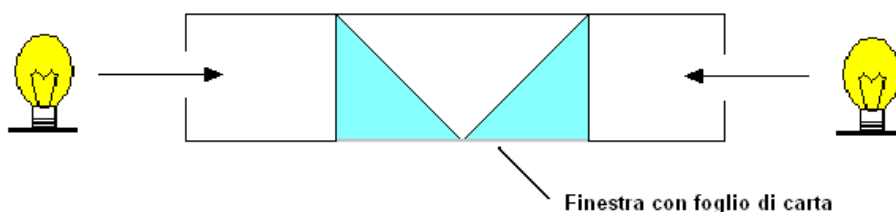
Passiamo ora a qualche misura che pone in confronto le LFC con lampade a incandescenza o anche lampade dello stesso tipo ma con caratteristiche diverse per compararne le prestazioni. Ci si propone di confrontare la capacità di illuminare. Per farlo è necessario uno strumento specifico, il luxmetro, che è costituito da un sensore di luce opportunamente tarato per la sensibilità dell'occhio umano e che dà una lettura immediata in *lux*. Le caratteristiche tecniche dello strumento sono generalmente dichiarate dal costruttore ma in ogni caso difficilmente sono noti i dettagli: tipo e natura del sensore, geometria del sistema, elettronica di controllo, ecc. In sostanza lo strumento è, nella maggior parte dei casi, una "scatola nera". In alternativa si può utilizzare un sensore di

potenza di area nota che ci permette di risalire al rapporto *potenza/area* anche se, in questo secondo caso, si rischia di misurare anche quella parte di spettro in cui la fonte luminosa irradgia ma che non viene percepita dall'occhio. Questi strumenti, soprattutto quelli del primo tipo, si possono trovare abbastanza facilmente a prezzi molto variabili, si va da un centinaio di euro a qualche migliaio a seconda dell'affidabilità e della precisione che evidentemente sono molto variabili.

Una valida alternativa, meno tecnologica e più economica delle precedenti, è quella di costruire un *fotometro di Bunsen* che è sostanzialmente un foglio di carta bianco sul quale si fa cadere una gocciolina di olio. Il principio di funzionamento è basato sul fatto che la goccia di olio rende traslucida la carta. Se i due lati del foglio vengono illuminati con due diverse sorgenti luminose la macchia finisce per scomparire quando l'illuminazione di un lato è uguale a quella dell'altro. In questo fotometro il sensore è l'occhio e questo fatto ci garantisce che le osservazioni riguardano la porzione di spettro che ci interessa.



Se con dei supporti, facilmente reperibili in laboratorio, costruiamo un dispositivo come quello mostrato in figura sarà molto facile misurare le distanze D_1 e D_2 che rendono uguale l'illuminamento, nell'ipotesi che le due lampade siano diverse. Così l'esperimento può diventare quantitativo e questo semplice apparato ci permette di confrontare le due sorgenti di luce. Va detto che spesso nei laboratori si trova il fotometro già assemblato e corredato di due specchi per consentire la visione dei due lati della macchia frontalmente. Una variante di questo fotometro è costituita da un tubo a sezione rettangolare all'interno del quale sono alloggiati due prismi a 90° secondo lo schema mostrato in figura con una finestra laterale ricoperta da un sottile foglio di carta.



La luce proveniente dalle due lampade viene deviata dai prismi a riflessione totale di 90° verso la finestra dove è possibile confrontare le due intensità. Anche con questo fotometro è possibile lavorare con le distanze delle sorgenti come nel precedente esperimento. Il

tubo a sezione rettangolare lo si può costruire utilizzando del cartoncino nero opaco e i prismi sono di facile reperibilità.

Occorre precisare che per ottenere dei buoni risultati con questi strumenti è necessario evitare il più possibile le riflessioni da parte di superfici chiare o lucide presenti nell'ambiente coprendole con dei panni opachi.

Passando alle misure si possono prendere coppie di lampade, possibilmente simili per dimensioni e con bulbo smerigliato per avere una buona diffusione della luce, e si può misurare la distanza che fornisce la medesima illuminazione. Se si confronta una LFC con una lampada a incandescenza si può notare immediatamente che la luce emessa dalla LFC appare più bianca rispetto a quella rossastra dell'incandescenza. Questo aspetto è legato al fatto che le LFC emettono a righe essendo lampade a scarica nel gas mentre le normali lampadine sono in qualche modo simili a un *corpo nero* con una temperatura di filamento dell'ordine di 2500 - 3000 K. Torneremo dettagliatamente su questo punto in un incontro successivo.

Anche il confronto tra lampade dello stesso tipo porta a considerazioni interessanti. Abbiamo posto a confronto due lampadine a incandescenza rispettivamente da 40 W e 75 W. Si può notare che la luce della lampada da 40 W è chiaramente più rossiccia di quella proveniente da quella da 75. Questo risultato è conseguenza della diversa temperatura di filamento. Infatti una lampada a incandescenza di debole potenza ha una temperatura di filamento più bassa rispetto a una analoga lampadina di potenza più elevata. Dato che la capacità di illuminare (quantità di energia emessa da una superficie unitaria nell'unità di tempo) è maggiore se la temperatura è più elevata, per la legge di Stefan-Boltzmann l'energia per secondo irradiata è direttamente proporzionale alla quarta potenza della temperatura ($U = \sigma T^4$), una lampada a incandescenza da 100 W è più efficiente di due da 50 W. Questo risultato stabilisce una ricetta per ottimizzare il consumo di energia per l'illuminazione: usando questo tipo di lampade è più conveniente concentrare i punti luce e usare sorgenti con potenza elevata.

Vediamo alcuni dati ricavati da misure effettuate con il fotometro di Bunsen e con quello a prismi. Le misure sono state effettuate montando i fotometri su un'asta alta circa un metro sostenuta da un piede a botte appoggiato sul pavimento e le distanze dalle lampade sono state misurate con un metro a nastro. Una disposizione che garantisce un errore percentuale sulle lunghezze del 2% (2 cm su distanze dell'ordine del metro). Anche con un dispositivo più stabile come quello descritto sopra resta comunque difficile stimare l'esatta distanza dell'elemento radiante che si trova all'interno del bulbo della lampada.

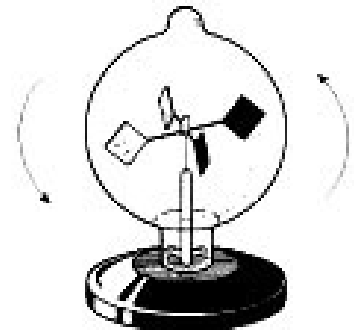
Le prime misure sono state effettuate confrontando le due lampade a incandescenza da 40 e 75 W. Consultando il sito di un costruttore di lampade siamo risaliti al dato per il flusso luminoso che risulta essere rispettivamente di 415 e 935 lm. Per inciso va detto che i dati relativi al flusso luminoso delle lampade a incandescenza varia molto poco, a parità di potenza, dal tipo con vetro trasparente rispetto al tipo con vetro smerigliato. L'identità di illuminamento viene raggiunta ponendo la lampadina da 40 W, 415 lm a 91 ± 2 cm dal fotometro e quella da 75 W, 935 lm a 139 ± 2 cm. La condizione di identico illuminamento consente comunque di stabilire quelle differenze di colore di luce delle quali abbiamo discusso sopra. Ora possiamo fare delle considerazioni quantitative riguardo all'efficienza. E' utile ricordare che l'intensità di illuminamento ha un andamento direttamente proporzionale all'inverso del quadrato della distanza ($I = k 1/d^2$) e quindi se vogliamo confrontare l'efficienza delle due lampade è necessario tenere conto di questo fatto. Il rapporto tra le distanze $139/91 = 1.53 \pm 4\%$ può essere assunto come indice. Se confrontiamo questo valore con la radice quadrata (per l'attenuazione dovuta alla distanza) del rapporto delle potenze otteniamo $(75/40)^{1/2} = 1.37$ mentre se si effettua lo stesso calcolo con il flusso luminoso si ottiene $(935/415)^{1/2} = 1.50$. Questi risultati indicano che c'è una perdita in termini di potenza assorbita, per le considerazioni fatte sopra

relativamente alle temperature di filamento, se il confronto avviene tra i flussi luminosi non si rileva alcuna discrepanza. Questo significa che la scelta della sorgente luminosa dovrebbe essere fatta facendo riferimento al flusso luminoso piuttosto che alla potenza assorbita.

Confrontiamo ora due lampade dello stesso costruttore: una incandescenza da 100 W, 1480 lm e una LFC da 20 W, 1160 lm. La condizione di identico illuminamento si ottiene per distanze di 121 ± 2 e 105 ± 2 cm rispettivamente con un rapporto tra le distanze $121/105 = 1.15 \pm 4\%$, per i flussi luminosi $(1480/1160)^{1/2} = 1.13$ con una sostanziale corrispondenza di risultati il che porta a dire che le due lampade hanno sostanzialmente la stessa resa luminosa e che quindi la LFC, a parità di efficacia, assorbe 1/5 di potenza.

Il confronto delle stesse due lampade effettuato con il fotometro a prismi dà come risultati per le distanze di uguale illuminamento 119 ± 2 cm dalla incandescenza e 107 ± 2 cm dalla LFC. Si può notare che i risultati sono assolutamente in linea con i precedenti e quindi i due strumenti sono perfettamente equivalenti. Il fotometro a prismi rende più facili i confronti tra le caratteristiche di "colore di luce" delle due sorgenti.

⁽¹⁾ Il radiometro di Crookes è costituito da un involucro di vetro sigillato contenente aria a bassa pressione (≈ 15 Pa) e un mulinello, costituito da quattro palette di colore bianco da un lato e nero su quello opposto, libero di ruotare attorno a un asse verticale. Quando viene investito dalla radiazione luminosa le palette girano con il lato bianco che precede quello nero (senso antiorario in figura).



Per la spiegazione completa del fenomeno si deve tenere conto della termodinamica del sistema. In particolare affinché una macchina termica funzioni ci deve essere una differenza di temperatura. In questo caso, la parte nera della paletta è più calda della parte bianca in quanto l'energia della radiazione luminosa riscalda più velocemente la superficie scura, che assorbe come un corpo-nero, di quella chiara. Le molecole di aria all'interno dell'ampolla si scaldano (aumentano la loro velocità) quando urtano la parte nera della paletta e quando invece urtano il vetro dell'ampolla si raffreddano in quanto l'involucro è a temperatura ambiente e dissipa calore. La dissipazione è favorita dalla pressione esterna che è più elevata. In questo modo la temperatura all'interno del radiometro viene ad assumere un valore costante, intermedio tra quello della paletta nera, più alto, e quello della paletta bianca, più basso. Se tra le due facce della paletta c'è qualche sorta di isolamento termico (può essere sufficiente anche la vernice che la colora) permane una differenza di temperatura. Chiarito questo punto è necessario spiegare il meccanismo che porta alla rotazione e facciamo subito una precisazione: la pressione di radiazione non c'entra, infatti il radiometro ruota nel verso visto sopra. Se un fotone colpisce la parte scura della paletta viene assorbito mentre se colpisce quella chiara "rimbalza". La variazione di quantità di moto è maggiore nel secondo caso (circa il doppio) e così la spinta sul lato bianco dovrebbe essere maggiore

di quella sul lato scuro e il senso di rotazione contrario a quello effettivo. Inoltre se il vuoto nell'ampolla aumenta il moto scompare mentre se fosse originato dalla pressione di radiazione dovrebbe aumentare. Anche la spiegazione in base alla quale la forza di rotazione ha origine dalla collisione delle molecole di gas con le facce delle palette, con scambio di quantità di moto maggiore nel caso del lato nero a causa della temperatura maggiore e conseguente forza maggiore su questo lato non convince completamente. In questo caso il problema è che le molecole che urtano la parte scura diventano più veloci e impediscono, a causa degli urti, a altre molecole di colpire la paletta. In sostanza lo scambio di energia tra gas e paletta è maggiore dal lato scuro ma la densità del gas coinvolto è minore rispetto a quella del lato chiaro, risultato: una sostanziale parità di effetti e nessuna rotazione. La situazione sarebbe diversa se il libero cammino medio delle molecole fosse così grande da permettere di raggiungere il vetro dell'ampolla ma, a queste pressioni, è dell'ordine di soli 0.5 mm. La soluzione del problema sembra quella trovata da Osborne Reynolds nel 1879 e poi perfezionata nel 1924 da Albert Einstein. Reynolds trova che se due ambienti, nei quali si trova gas a bassa pressione, sono separati da una parete porosa e sono a temperature diverse c'è un flusso di gas verso l'ambiente più caldo. Un po' come avviene per i superfluidi. Le pareti delle palette non sono porose ma Einstein sostiene che c'è un effetto di bordo nel senso che sul bordo, molto sottile, della paletta c'è una diffusione di molecole dal lato freddo a quello caldo, come attraverso delle porosità, e questo comporta un aumento di pressione sul lato scuro della paletta. Ora il radiometro gira nel verso giusto finché permane la differenza di temperatura tra i due lati.

Mi pare che la spiegazione più efficace sia quella di due effetti combinati: la collisione con le superfici scure più calde e la "diffusione" alla Einstein.

Nel documento "How does a light mill works" ci sono alcuni approfondimenti e un po' di bibliografia per approfondire (la questione è ancora molto viva).