Guida alle esperienze di laboratorio

Esperienze di ottica

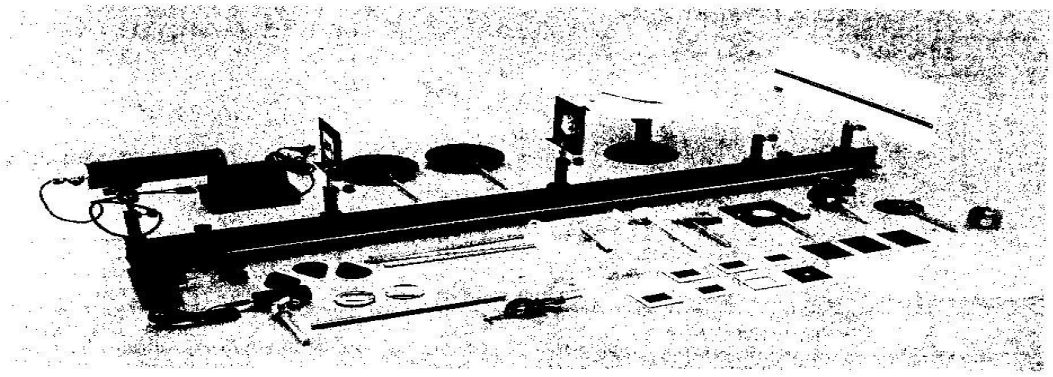
I

Prof. Giuseppe Caputo

Ottica geometrica

Voglio aggiungere alcune note a proposito della legge dell'irraggiamento luminoso alla scheda allegata del banco ottico.

BANCO DI OTTICA
GEOMETRICA E ONDULATORIA



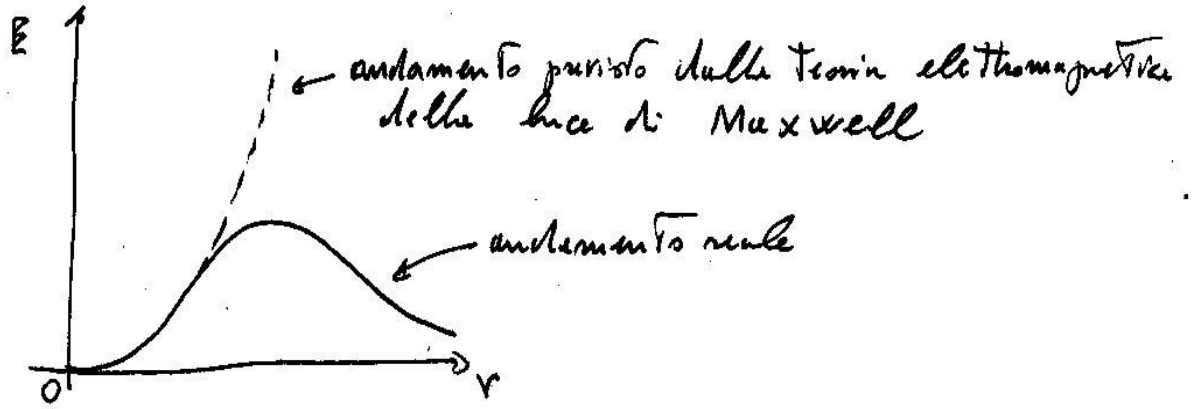
<u>Corpo nero</u>

Si dice <u>corpo nero</u> un corpo che assorbe tutta l'energia radiante incidente su di esso indipendentemente dalla frequenza della radiazione; la superficie del corpo nero appare scura all'osservazione poiché non riflette alcuna radiazione. Bisogna osservare che la temperatura del corpo nero non deve essere elevata altrimenti una frazione della radiazione emessa dal corpo, come sorgente di radiazione, renderebbe quest'ultimo visibile, benché un qualsiasi corpo a temperatura assoluta $T > 0$ K costituisce una sorgente di radiazioni elettromagnetiche. Nel corpo nero però lo spettro delle radiazioni emesse risulta indipendente dalle particolarità strutturali del corpo e dipende solo dalla temperatura.

Approssimativamente, per costruire in laboratorio un corpo nero, si utilizza una cavità isolata termicamente e annerita con del nerofumo in cui viene praticato un foro di piccole dimensioni. Qualunque sia la sostanza di cui son fatte le pareti della cavità, ogni radiazione che entri in essa per il forellino ha una probabilità trascurabilmente piccola di riuscire all'esterno. La superficie del forellino rappresenta quindi un ricevitore integrale (corpo nero) alla temperatura T. Da essa

escono delle radiazioni provenienti dall'interno della cavità emesse dalle pareti: la composizione spettrale di queste radiazioni deve essere quella stessa di un corpo nero qualsiasi.

Da rilievi sperimentali fatti alla fine del XIX secolo, si trovò che l'energia E emessa al secondo in un intervallo unitario di frequenza ha, in funzione della frequenza v, l'andamento seguente riportato nel grafico, ben lontano dalle previsioni teoriche della teoria elettromagnetica della luce rappresentate dalla curva tratteggiata.



Secondo le equazioni di Maxwell del campo elettromagnetico si giunge al risultato assurdo che al crescere della frequenza v l'energia emessa dal forellino del corpo nero cresce indefinitamente. Tale differenza dei risultati sperimentali dalla teoria basata sulle equazioni del campo elettromagnetico fu definita come *catastrofe ultravioletta*.

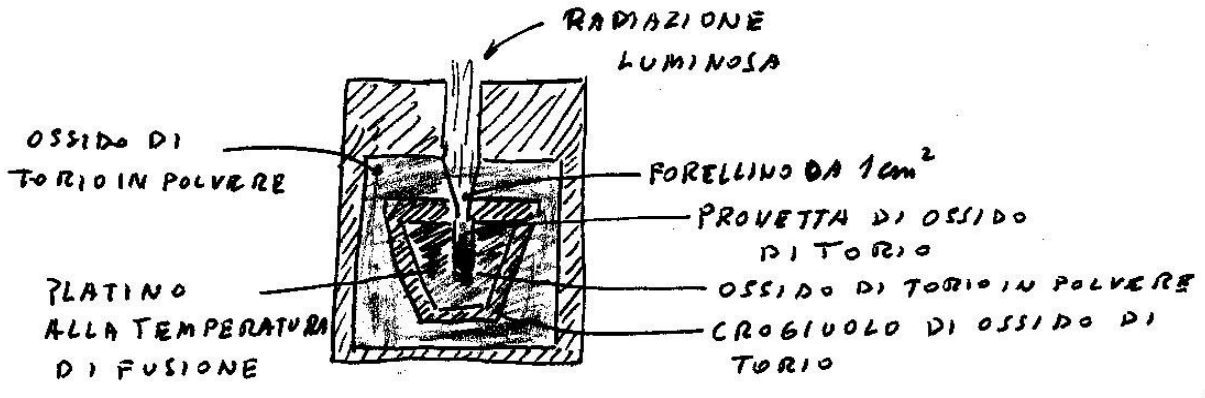
La contraddizione fu risolta nel 1901 da Max Planck, il quale abbandonò la teoria ondulatoria e, in contrasto con le affermazioni di essa, ammise che gli scambi di energia tra materia e radiazione(cioè l'assorbimento e l'emissione) possano avvenire solo per atti elementari in ciascuno dei quali viene emesso o assorbito un singolo *quanto di energia*, il cui ammontare, se v è la frequenza della radiazione, è dato da

$\boldsymbol{E = hv}$, essendo $= 6.62606957 \times 10^{-34} J \cdot s = 4.13562852 \times 10^{-15} eV \cdot s$ la costante di Planck. Questa è l'ipotesi fondamentale della *teoria dei quanti*. In questo modo Planck riuscì a calcolare con sorprendente esattezza la curva sperimentale che nel grafico precedente è tratteggiata.

Ritornando ora al corpo nero, Mantenendo costante la temperatura della cavità, la radiazione emessa dal forellino si dice *radiazione del corpo nero* a quella temperatura fissata.

Il corpo nero di Burgess è un particolare corpo nero In cui la sorgente di radiazioni, considerata come sorgente luminosa standard, è il platino portato alla temperatura di fusione di 1773°C. Nella

seguente figura è riportata una sezione di tale corpo nero.



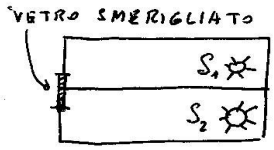
<u>Intensità luminosa</u>

L'intensità luminosa **I** di una sorgente è la grandezza fondamentale dell'Ottica.La definizione operativa di questa grandezza implica che:

1. Considerare uno strumento detto fotometro che consente di confrontare le intensità luminose di diverse sorgenti.
2. Scegliere una sorgente campione con caratteristiche costanti alla quale attribuire un valore unitario dell'intensità luminosa.

Dallo studio di un qualsiasi testo di fisica liceale si sa che il fotometro, nella sua versione elementare di scatola chiusa con pareti annerite per minimizzare la diffusione della luce, divisa in due parti uguali all'interno, dà una stima qualitativa ma non quantitativa dell'intensità luminosa.

L'osservazione attraverso il vetro smerigliato permette di stabilire quale delle due sorgenti

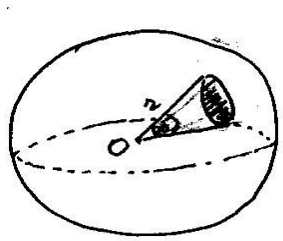


S_1 e S_2 è più luminosa ma non quanto sia luminosa. Per determinare una misura dell'intensità luminosa di una sorgente per convenzione si considera la <u>candela</u> (cd) sessantesima parte dell'intensità luminosa della radiazione emessa dal corpo nero di Brugess alla temperatura di fusione del platino perpendicolarmente a un'area di $1cm^2$di superficie.

Possiamo avere un'idea di tale intensità luminosa mettendo idealmente nel fotometro come sorgente S_1il corpo nero di Brugess e come sorgente S_2 una lampadina elettrica; se non notiamo alcuna differenza d'intensità luminosa, possiamo affermare che la lampadina ha intensità luminosa di 60 cd.

Angolo solido

Considerata sulla superficie di una sfera di centro O e raggio r una sua parte di area S e uniti tutti i punti della curva γ frontiera di S con il centro O, si determina una regione conica dello spazio detta angolo solido la cui misura è data dal rapporto $\omega = \frac{S}{r^2}$. L'unità di misura dell'angolo solido è lo steradiante (sr); 1 sr è l'angolo solido individuato su di una qualsiasi superficie S di una sfera di centro O e raggio r per cui si abbia che l'area S è uguale al quadrato del raggio r, cioè se $S = r^2$. Quindi se $S = 4\pi r^2$, si ha $\omega = 4\pi$ misura tutto lo spazio.



Quantità di luce

Data una sorgente di luce puntiforme avente intensità luminosa **I** che diffonde luce in tutto lo spazio, consideriamo solo lo spazio conico compreso entro un angolo solido ω.

Si definisce quantità di luce Q la luce d'intensità **I** irradiata nell'intervallo di tempo t entro l'angolo solido ω per cui si abbia $\boldsymbol{Q = \omega I t}$. Nel S.I. l'unità di misura è lo $sr \cdot cd \cdot s$.

Flusso luminoso

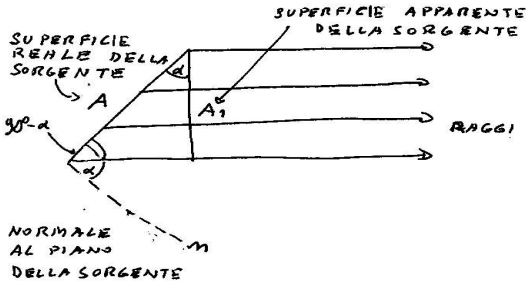
Il flusso luminoso $\emptyset$ è la quantità di luce Q emessa dalla sorgente S in un secondo entro l'angolo solido ω ovvero $\emptyset = \frac{Q}{t} = I\omega$. Nel S.I. l'unità di misura è il lumen (ln) definito da $1ln = 1cd \cdot 1sr$, che quindi è la quantità di luce emessa in $1s$ entro l'angolo solido di $1sr$ da una sorgente luminosa d'intensità di $1cd$. Si noti che una sorgente luminosa di $1cd$ irradia in tutto lo spazio un flusso luminoso uguale a $\emptyset = 1\ cd \cdot 4\pi\ sr = 4\pi\ lm \approx 12.56\ lm$

Luminanza

E'una grandezza esprimente quantitativamente la brillantezza di una sorgente luminosa piana. Sperimentalmente si verifica che è costante il rapporto detto luminanza $\boldsymbol{L = \frac{I}{A}}$,dove **I** è l'intensità luminosa di una sorgente estesa piana in direzione normale ad essa ed **A** è l'area della superficie della sorgente. Ne segue che raddoppiando l'area d'illuminazione della sorgente raddoppia l'intensità luminosa **I** , per cui **I** ed **A** sono grandezze direttamente proporzionali secondo la costante di proporzionalità **L**. Nel S.I. l'unità di misura della luminanza è il nit (nt) definito da $nt = \frac{cd}{m^2}$; si usa pure lo stilb(sb) definito da $sb = \frac{cd}{m^2} = 10^4 nt$.

Nel caso che la direzione lungo la quale viene osservata la sorgente estesa non è perpendicolare alla superficie A, detto α l'angolo che la direzione dei raggi forma con la normale n al piano della sorgente reale, bisogna considerare quella superficie apparente tale che i raggi siano perpendicolari ad essa , data da $A_1 = Acos\ \alpha$. Si ricava allora il valore della luminanza data da $L = \frac{I_1}{A_1} = \frac{I_1}{Acos\ \alpha}$, dove I_1 è l'intensità luminosa della superficie apparente.

Poiché $Acos\ \alpha$ ha il massimo valore per $\alpha = 0$, da $I = LAcos\ \alpha$ segue che l'intensità I è massima quando i raggi sono perpendicolari alla superficie.

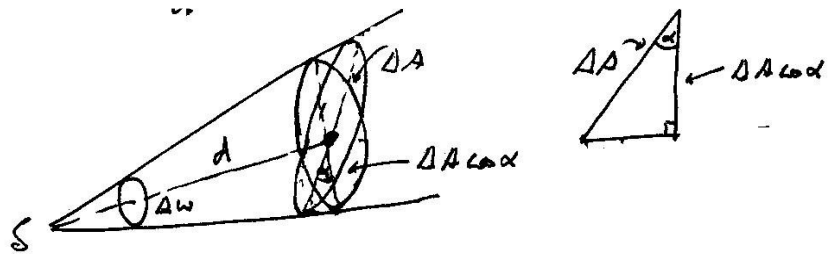


<u>Illuminamento</u> (intensità d'illuminazione)

Si definisce <u>illuminamento</u> E la quantità di flusso luminoso Ø relativo ad una determinata superficie illuminata di area A, cioè $E = \frac{\emptyset}{\mathrm{A}}$. Dalla definizione si ricava che la quantità d'illuminazione E è direttamente proporzionale al flusso luminoso Ø ed è inversamente proporzionale all'area illuminata A. L'unità d'intensità d'illuminazione nel S.I. è il lux (lx) definito da $lx = \frac{\mathrm{lm}}{\mathrm{m}^2}$, da cui discende che $1lx$ è l'illuminamento di una superficie di $1m^2$ su cui incide il flusso luminoso di $1lm$.

<u>Legge di Lambert</u>

Sia S una sorgente luminosa puntiforme avente intensità **I** e il cono di luce da essa emessa entro l'angolo solido (piccolo) $\Delta\omega = \frac{\Delta \mathrm{A} \cos \alpha}{\mathrm{d}^2}$



Si ha che

$$E = \frac{\Delta\emptyset}{\Delta \mathrm{A}} = \frac{\mathrm{I}\Delta\omega}{\Delta \mathrm{A}} = \frac{\mathrm{I}\Delta \mathrm{A} \cos \alpha}{\mathrm{d}^2 \Delta \mathrm{A}} = \frac{\mathrm{I}}{\mathrm{d}^2} \cos \alpha \xrightarrow{yields} \boxed{\boldsymbol{E = \frac{I}{d^2} \cos \alpha}} \quad \boldsymbol{legge\ di\ Lambert.}$$

Tale legge afferma che l'illuminamento E su una superficie è direttamente proporzionale all'intensità luminosa I della sorgente S, direttamente proporzionale al coseno dell'angolo formato dalla superficie considerata e da quella della normale alla direzione di propagazione della luce, inversamente proporzionale al quadrato della distanza d tra la superficie illuminata e la sorgente.

<u>Legge dei quadrati delle distanze</u>

Consideriamo due sorgenti puntiformi $\mathrm{S_1}$e $\mathrm{S_2}$ e siano $\mathrm{I_1}$e $\mathrm{I_2}$le rispettive intensità luminose, quindi $\mathrm{d_1}$e $\mathrm{d_2}$ le rispettive distanze da un determinato schermo.. Supponiamo inoltre che i raggi di luce provenienti dalle due sorgenti arrivino sullo schermo con la stessa inclinazioneSe la luce emessa da S_1 produce sullo schermo un illuminamento E_1 uguale a quello E_2 prodotto dalla luce di S_2, dalla legge di Lambert si ricava $E_1 = E_2 \xrightarrow{yields} \frac{\mathrm{I_1}}{\mathrm{d_1^2}} \cos\alpha = \frac{\mathrm{I_2}}{\mathrm{d_2^2}} \cos\alpha \xrightarrow{yields}$

$\boxed{\mathbf{\frac{I_1}{I_2} = \frac{d_1^2}{d_2^2}}}$ **Legge dei quadrati delle distanze** : se due sorgenti illuminano ugualmente uno schermo, le loro intensità luminose sono direttamente proporzionali ai quadrati delle loro distanze dallo schermo C.

Considerando un'unica sorgente luminosa S posta successivamente a distanze diverse d_1 e d_2, siano rispettivamente $\mathrm{E_1}$e $\mathrm{E_2}$ gli illuminamenti prodotti su uno stesso schermo C.

Per la legge dei quadrati delle distanze, le intensità luminose sono direttamente proporzionali ai quadrati delle distanze e ciò comporta che gli illuminamenti prodotti, in quanto flussi luminosi per unità di superficie, risultano inversamente proporzionali ai quadrati delle distanze della sorgente dallo schermo.

Infatti dalla legge di Lambert, osservato che l' intensità luminose I della sorgente è costante, segue che

$$\frac{\mathrm{E_1}}{\mathrm{E_2}} = \frac{\frac{I}{d_1^2}\cos\alpha}{\frac{I}{d_2^2}\cos\alpha} = \frac{d_2^2}{d_1^2} \xrightarrow{yields} \boxed{\mathbf{\frac{E_1}{E_2} = \frac{d_2^2}{d_1^2}}}$$

Poiché il flusso luminose $\emptyset = \mathrm{I}\omega$ rimane costante al variare della distanza, si ha che $\mathrm{E_1} = \frac{\emptyset}{\mathrm{A_1}}$ e

$\mathrm{E_2} = \frac{\emptyset}{\mathrm{A_2}}$, da cui sostituendo nella relazione sopra segue:

$$\frac{\mathrm{E_1}}{\mathrm{E_2}} = \frac{\frac{\emptyset}{A_1}}{\frac{\emptyset}{\mathrm{A_2}}} = \frac{A_2}{A_1} = \frac{d_2^2}{d_1^2} \xrightarrow{yields} \boxed{\mathbf{\frac{A_1}{A_2} = \frac{d_1^2}{d_2^2}}}$$

Ciò spiega del tutto la scheda dell' esperienza n°4 che di seguito riportiamo.

4. LA LEGGE DELL'IRRAGGIAMENTO

Se sulla traiettoria di un fascio di radiazioni ottiche emesse da una sorgente puntiforme S si interpone uno schermo opaco B con un foro quadrato al centro, solo una piccola parta dell'energia raggiante emessa dalla sorgente giunge sullo schermo C (fig. 11).
Indicando L il lato della superficie irradiata sullo schermo C, il flusso di energia $\varnothing$ si distribuisce su un'area $A = L^2$, per cui il flusso di irraggiamento sull'unità di superficie E, risulta

$$E = \frac{\varnothing}{A}$$

ESPERIENZA N. 4

Se la distanza d tra lo schermo C e la sorgente S viene raddoppiata, triplicata, ecc., l'area della superficie irradiata diviene quattro, nove, ecc., volte più estesa (fig. 12).
Pertanto, ad una distanza doppia, il flusso di energia viene distribuito su una superficie quattro volte più estesa; ad una distanza tripla viene distribuito su una superficie nove volte più estesa, e così via.
Cioè, il flusso di irraggiamento sull'unità di superficie, anche detto illuminamento, è inversamente proporzionale al quadrato della distanza dalla sorgente.

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{d^2_2}{d^2_1}$$

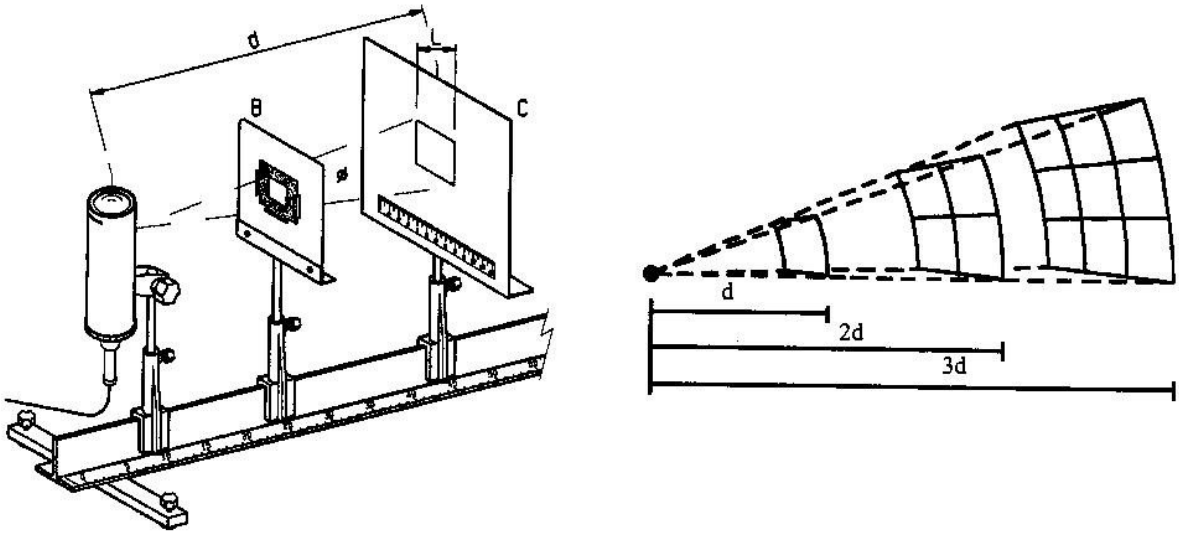


fig.12