

MISURE DI OTTICA GEOMETRICA CON UN BANCO OTTICO

Il materiale a disposizione consiste in un banco ottico, una sorgente luminosa, alcuni corpi ottici (lente semi-cilindrica, lente convessa e lente concava di plexiglass, specchio a 3 facce, prismi a base triangolare e trapezoidale), alcune lenti montate su un supporto fissabile sul banco ottico, una piattaforma circolare graduata anch'essa fissabile sul banco ottico, e uno schermo. La sorgente luminosa può essere posta, a seconda dell'esperimento che si vuole realizzare, sul supporto inseribile nel banco ottico oppure semplicemente appoggiata su un piano, ad esempio un foglio di carta bianca (nel rimuovere la sorgente luminosa dal supporto ricordarsi di scollegare il cavo di alimentazione proveniente dal trasformatore a 12 Volt).

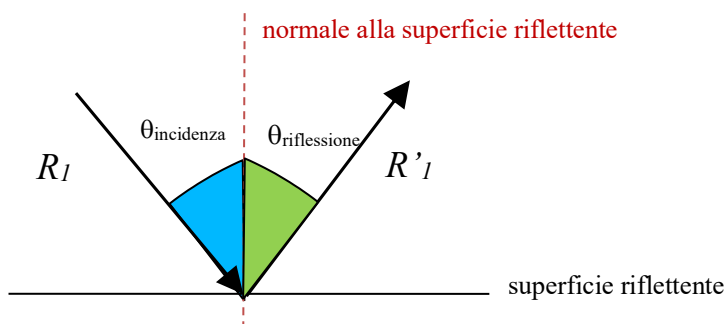
Sulla sorgente va selezionato il tipo di oggetto luminoso desiderato. La sorgente può fornire un singolo fascio di luce bianca o 5 raggi bianchi, raggi colorati, un bersaglio millimetrato.

Introduzione

La luce è radiazione elettromagnetica, di diverse lunghezze d'onda. Quando gli oggetti che la luce incontra nel suo propagarsi (ostacoli, fenditure ecc.) sono di dimensione molto maggiore della lunghezza d'onda si può far riferimento al concetto di **raggio luminoso**. In un mezzo trasparente, omogeneo e isotropo il raggio di luce si propaga in linea **retta**. Se incontra una superficie riflettente subisce il fenomeno della **riflessione**, se attraversa la superficie di separazione di due mezzi trasparenti diversi subisce il fenomeno della **rifrazione**.

Legge della Riflessione

Il raggio incidente R_I , il raggio riflesso R'_I e la normale alla superficie nel punto di incidenza giacciono nello stesso piano.



Si definisce *angolo di incidenza* $\theta_{\text{incidenza}}$ l'angolo formato tra il raggio incidente e la **normale** alla superficie di riflessione nel punto di incidenza. Si definisce *angolo di riflessione* $\theta_{\text{riflessione}}$ l'angolo formato tra il raggio riflesso e la **normale** alla superficie.

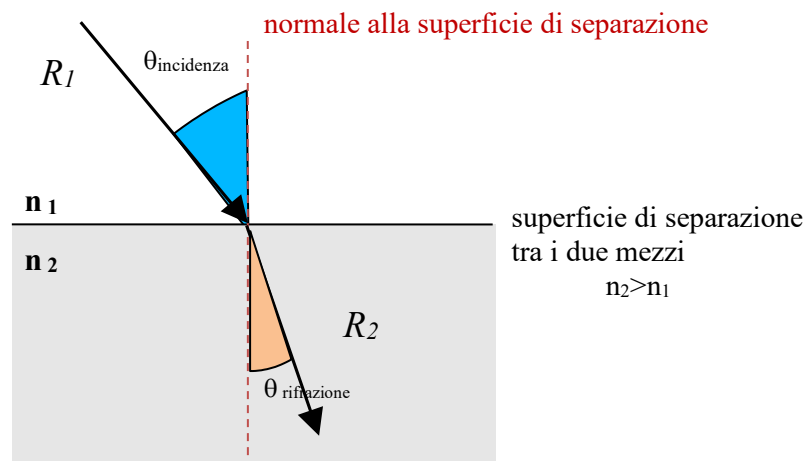
L'angolo di riflessione è uguale all'angolo di incidenza

$$\theta_{\text{incidenza}} = \theta_{\text{riflessione}}$$

Legge della rifrazione o legge di Snell

Il raggio incidente R_1 , il raggio trasmesso (rifratto) R_2 e la normale alla superficie nel punto di incidenza giacciono nello stesso piano.

Si definisce *angolo di rifrazione* $\theta_{\text{rifrazione}}$ l'angolo formato tra il raggio rifratto R_2 e la **normale** alla superficie.



La velocità di propagazione della luce nel vuoto è una costante, **c**, la velocità di propagazione della luce nei mezzi materiali è una caratteristica del mezzo, è sempre minore di quella vuoto e dipende dalla lunghezza d'onda della luce. Il rapporto tra la velocità nel vuoto e quella nel mezzo è detto **indice di rifrazione** del mezzo:

$$n = \frac{c}{v}$$

L'indice di rifrazione è pertanto sempre maggiore di 1 e dipende dalla lunghezza d'onda della luce.

Se un raggio luminoso attraversa la superficie di separazione tra due materiali di tipo differente, con corrispondenti indici di rifrazione n_1 ed n_2 , esso viene deviato (*rifratto*) secondo la legge di Snell:

$$n_1 \sin \theta_{\text{incidenza}} = n_2 \sin \theta_{\text{rifrazione}}$$

dove $\theta_{\text{incidenza}}$ e $\theta_{\text{rifrazione}}$ sono gli angoli *rispetto la normale* alla superficie di separazione dei due mezzi, prima (nel mezzo 1) e dopo la separazione (nel mezzo 2), rispettivamente.

Un caso particolare si ha quando il raggio incide perpendicolarmente alla superficie di separazione e quindi l'angolo di incidenza è di 0° gradi, in tal caso si ha:

$$\sin \theta_{\text{rifrazione}} = (n_1 / n_2) \sin \theta_{\text{incidenza}} = 0$$

da cui si ricava che anche $\theta_{\text{rifrazione}} = 0^\circ$. Il raggio luminoso rimane perpendicolare anche nel secondo mezzo, risulta quindi non deviato.

La legge di Snell garantisce anche la *reversibilità del cammino ottico*: in figura è mostrato il cammino ottico di un raggio luminoso R_1 che incide sulla superficie di separazione 1-2 provenendo dal mezzo 1 e si propaga nel mezzo 2. Un raggio R_2 che provenga invece dal mezzo 2 incidendo sulla superficie di separazione 2-1 con lo stesso angolo $\theta'_{\text{incidenza}} = \theta_{\text{rifrazione}}$ si propaga nel mezzo 1 lungo lo stesso cammino ottico del raggio R_1 ($\theta'_{\text{rifrazione}} = \theta_{\text{incidenza}}$) cioè il raggio percorre lo stesso cammino all'indietro.

Dispersione

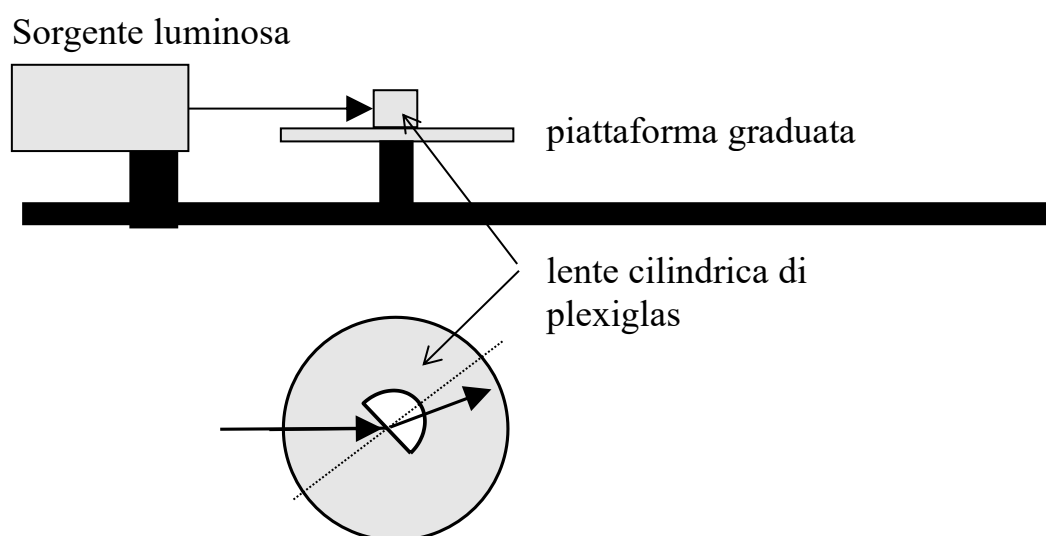
La luce bianca è composta da diversi colori (somma di luce con lunghezza d'onda differente), quando attraversa un mezzo il cui indice di rifrazione varia apprezzabilmente con la lunghezza d'onda, la luce bianca viene scomposta nei vari colori che la costituiscono. Luce con lunghezza d'onda diversa è rifratta ad angolo diverso e si osservano raggi di diverso colore che si propagano in direzioni differenti, questo fenomeno è detto *dispersione*.

SVOLGIMENTO DELLE ESPERIENZE

A) Legge di rifrazione (legge di Snell) e reversibilità dei cammini ottici

Lo scopo dell'esperienza è di verificare la legge di Snell, la reversibilità del cammino ottico ed ottenere una misura dell'indice di rifrazione della lente utilizzata.

Si utilizza la **lente semi-cilindrica di plexiglas** e la si pone al centro della piattaforma circolare graduata montata sul banco ottico. Si usa come sorgente il raggio luminoso singolo e lo si fa incidere sulla lente. Il raggio luminoso attraversa due superfici di separazione: la superficie aria-plexiglas e successivamente la superficie plexiglas-aria. Se si fa in modo che il raggio luminoso incida nel **centro della lente semi-cilindrica**, esso, attraversata la lente, arriva alla superficie di separazione curva con un angolo di incidenza pari a 0° gradi (essendo il raggio perpendicolare alla tangente alla superficie curva della lente, e quindi diretto come la normale in quel punto) e quindi all'uscita della lente non subisce deviazione. Pertanto, la deviazione totale subita dal raggio rispetto la direzione di propagazione iniziale corrisponde ad una sola rifrazione.



Fate incidere il raggio luminoso sulla faccia piana della lente cilindrica (nel centro) ad un angolo θ_{inc} e misurate il corrispondente angolo di rifrazione θ_{rif} . Ripete la misura per diversi valori dell'angolo di incidenza, misurate i corrispondenti angoli di rifrazione e raccogliete i dati in una tabella in cui annotate i valori di θ_{inc} , θ_{rif} , $\sin \theta_{inc}$, $\sin \theta_{rif}$.

Successivamente ruotate la piastra circolare in modo da fare incidere il raggio luminoso sulla faccia curva della lente cilindrica, facendolo sempre puntare verso il centro del cilindro. Ripetete la misura per diversi angoli di incidenza prendendo nota dei corrispondenti angoli di rifrazione.

Per verificare la reversibilità dei cammini ottici scegliete come nuovi valori degli angoli di incidenza θ'_{inc} **valori uguali a quelli degli angoli di rifrazione misurati in precedenza** ($\theta'_{inc} = \theta_{rif}$). Dovreste ottenere come angoli di rifrazione valori uguali (entro gli errori sperimentali) ai precedenti angoli di incidenza ($\theta'_{rif} = \theta_{inc}$).

Utilizzando i dati raccolti verificate la **legge di Snell** ponendo in grafico $y = \sin \theta_{rifrazione}$ verso $x = \sin \theta_{incidenza}$ ed eseguendo una interpolazione lineare. Determinate la miglior stima dell'**indice di rifrazione** n del plexiglas e l'incertezza corrispondente dal coefficiente angolare della retta (approssimando ad 1 l'indice di rifrazione dell'aria). In alternativa potete calcolare n per ogni coppia di valori di θ_{inc} e θ_{rif} e farne la media **aritmetica**.

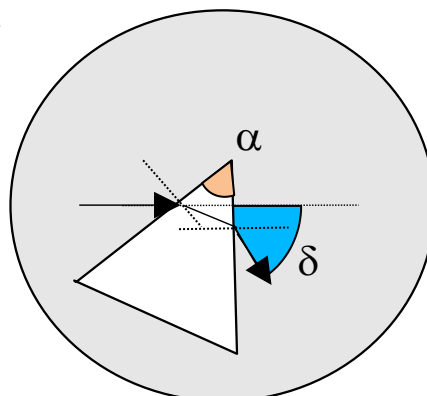
Quando fate entrare il raggio luminoso dalla parte curva della lente, potete trovare un valore dell'angolo incidente (detto *angolo critico*) per il quale il raggio rifratto svanisce e si manifesta il fenomeno della *riflessione totale*: spiegate il fenomeno sulla base della legge di Snell. Misurate l'**angolo critico** e ricavate da questo una nuova stima dell'**indice di rifrazione** del plexiglas da confrontare con le precedenti. La misura può essere ripetuta facendo incidere la luce dal lato opposto alla normale.

B) Misura dell'indice di rifrazione dall'angolo di deviazione minima

Lo scopo dell'esperienza è di misurare l'indice di rifrazione di un prisma a base triangolare utilizzando il metodo dell'angolo di deviazione minima.

Disponendo di un oggetto che presenti almeno uno spigolo, si può ricavare l'indice di rifrazione dalla misura dell'**angolo di deviazione minima**.

Ponete la piattaforma circolare sulla rotaia e disponete **il raggio** singolo in modo che, in assenza di ostacoli, **passi per il centro della piattaforma**. Ponete il **prisma di vetro a base triangolare equilatera** sulla piattaforma con un vertice un po' oltre il centro della stessa in modo che il raggio luminoso passi vicino ad uno spigolo. Il raggio subisce una doppia rifrazione nell'attraversamento della superficie aria-vetro e successivamente vetro-aria.



Si indichi con δ la **deviazione totale** subita dal raggio, ossia **l'angolo tra il raggio incidente sul prisma e quello uscente dal prisma**.

Fate ruotare la piattaforma e osservate come si muove il raggio rifratto al variare dell'angolo di incidenza, notate che il raggio rifratto ha una posizione limite: l'angolo δ diminuisce fino ad un certo valore minimo per poi aumentare nuovamente. Questa posizione limite verrà resa più evidente se avvicinate lo schermo alla piattaforma e osservate sullo schermo la distanza dell'immagine del raggio rifratto dal centro dello schermo. Notate anche che il raggio rifratto presenta una certa scomposizione nei colori dello spettro (l'indice di rifrazione è differente per i diversi colori di cui la luce bianca è composta).

Misurate il valore dell'angolo δ quando è al suo valore minimo, detto **angolo di deviazione minima** e da questo calcolate l'indice di rifrazione del vetro costituente il prisma utilizzando la relazione:

$$n = \frac{\sin\left(\frac{\delta_{min}}{2} + \frac{\alpha}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}$$

dove α è l'angolo dello spigolo su cui incide il raggio. Nel caso di prisma equilatero in figura l'angolo $\alpha=60^\circ$ è uguale per tutti gli spigoli.

Ripetete la misura nel caso del **prisma a base trapezoidale**, usando lo spigolo di 45° , e calcolate allo stesso modo l'indice di rifrazione del plexiglas di cui tale prisma è fatto.

NB. Poiché gli oggetti utilizzati non sono tutti dello stesso materiale, non ci si aspetta di trovare lo stesso indice di rifrazione per tutti.

C) Lastra a facce parallele

Usando le due **facce parallele** del prisma a base trapezoidale potete osservare la deviazione del raggio luminoso che le attraversa. In questo caso il raggio uscente risulta parallelo al raggio incidente ma spostato lateralmente di una distanza d che dipende dall'angolo di incidenza θ , dallo spessore della lastra h e dall'indice di rifrazione n . Applicando la legge di Snell alle due superfici parallele si ricava

$$d = h \sin \vartheta \left(1 - \frac{\cos \vartheta}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \vartheta}} \right)$$

Misurate il valore della distanza d per vari angoli di incidenza θ .

Calcolate il valore di d previsto dalla legge, utilizzando per n il valore dell'indice di rifrazione determinato precedentemente per il plexiglass di questo stesso prisma e per h la misura dello spessore della lastra, e confrontatelo con quello misurato.

D) Lenti sottili

Lo scopo dell'esperienza è di verificare la legge delle lenti sottili, misurare la lunghezza focale di alcune lenti convergenti, misurare l'ingrandimento e confrontarlo con quello previsto.

INTRODUZIONE

Una lente sottile costituisce il più semplice strumento ottico.

Consideriamo una lente doppio-convessa. L'**asse** di una lente è una linea retta che passa per il centro della lente ed è normale alle sue due facce. La lente, di plastica trasparente, ha un indice di rifrazione maggiore di quello dell'aria esterna. Secondo la legge di Snell un raggio che attraversa la lente è deviato verso l'asse della lente. Quando un fascio di raggi paralleli colpisce una lente convessa i raggi vengono concentrati in un punto F detto punto focale o fuoco della lente.

I raggi luminosi provenienti da un punto a distanza infinita rispetto la lente sono paralleli. Pertanto, il *punto focale* è il punto-immagine di un oggetto posto all'infinito sull'asse della lente. La distanza tra la lente e il punto focale è detta **distanza o lunghezza focale** della lente o *focale* (f).

Indichiamo con p la distanza **oggetto-lente** e con q la distanza **lente-immagine**.

La relazione tra la distanza focale della lente e le distanze oggetto-lente e lente-immagine è detta **legge dei punti coniugati**:

$$1/f = 1/p + 1/q$$

L'immagine che viene messa a fuoco ha generalmente dimensioni differenti da quelle dell'oggetto, l'**ingrandimento trasversale** M di una lente, è definito come il rapporto tra le dimensioni trasversali dell'immagine e quelle dell'oggetto: $M = L_{immagine} / L_{oggetto}$ e (come si vede facilmente dalla geometria) risulta pari al rapporto tra q e p

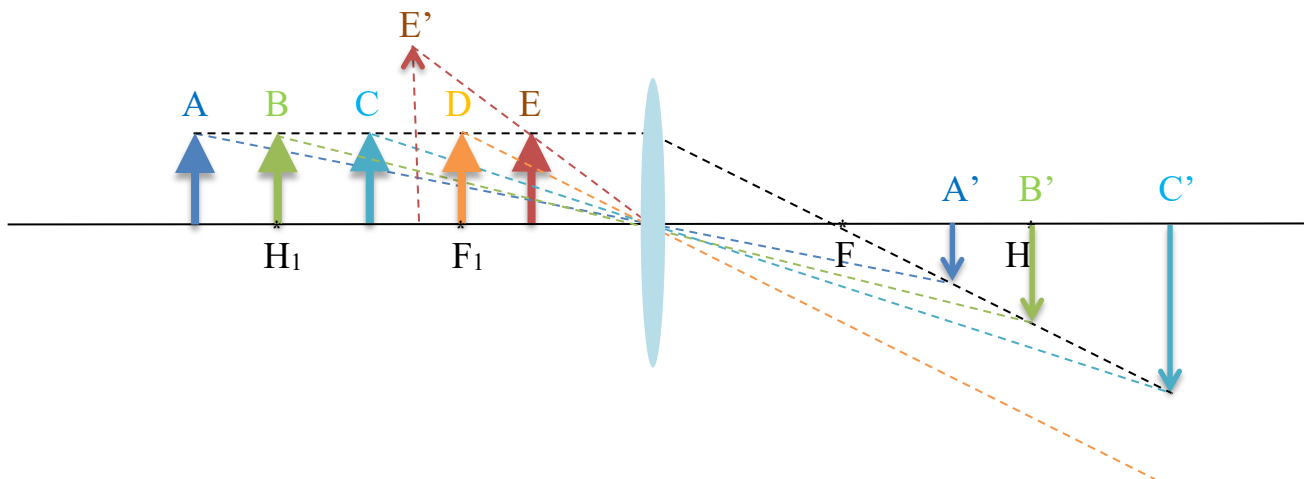
$$M = q / p$$

Consideriamo una lente convergente sottile e diversi oggetti (freccette nel disegno) posti alla sua sinistra, con un estremo posto sull'asse della lente. Per determinare dove si formerà l'immagine basta disegnare due dei tanti raggi che partono dall'altro estremo dell'oggetto: il raggio che proviene dall'infinito, parallelo all'asse, che, attraversata la lente viene focalizzato nel fuoco F , e il raggio che passa nel centro della lente e non viene deviato. L'intersezione di questi due raggi determina l'estremo dell'immagine.

Indichiamo in figura con F e F_1 i due fuochi della lente (a distanza f dalla lente), e con H e H_1 i punti a distanza $2f$ dalla lente.

Si possono dare diverse situazioni, a seconda di dove è posto l'oggetto.

- A) $p > 2f$: l'oggetto è distante dalla lente più del doppio della focale. L'immagine A' è reale, capovolta, rimpicciolita, a distanza dalla lente q con $f < q < 2f$.
- B) $p = 2f$: l'oggetto è distante dalla lente esattamente il doppio della focale. L'immagine B' è reale, capovolta, della stessa dimensione dell'oggetto, a distanza dalla lente $q = 2f$.
- C) $f < p < 2f$: l'oggetto è ad una distanza intermedia tra f e $2f$. L'immagine C' è reale, capovolta, ingrandita, a distanza dalla lente $q > 2f$.
- D) $p = f$: l'oggetto è nel fuoco della lente. L'immagine è a distanza infinita, capovolta.
- E) $p < f$: l'oggetto è tra il fuoco e la lente. L'immagine E' è virtuale, diritta, ingrandita.



SVOLGIMENTO DELL'ESPERIENZA

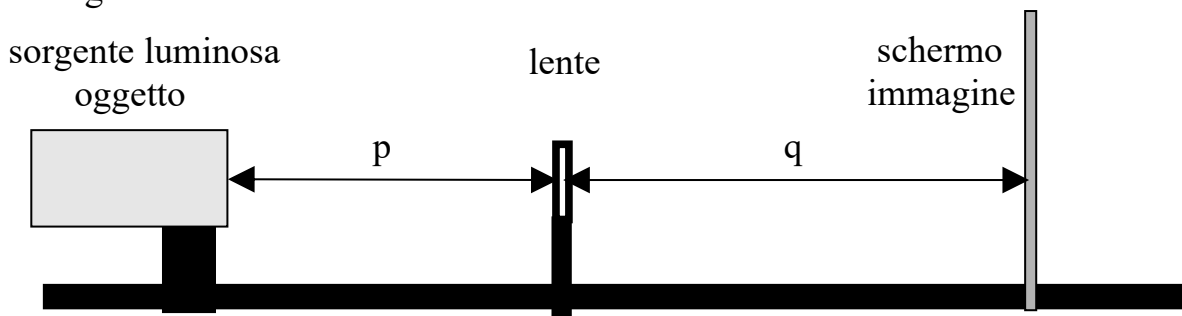
Un primo metodo per avere una grossolana misura della focale di una lente consiste nel mettere a fuoco su uno schermo (come un semplice foglio di carta) un oggetto abbastanza lontano da essere considerato *all'infinito*; in pratica una lampada in una stanza purché distante almeno qualche metro, oppure, se si dispone di una finestra, un edificio, un albero, ecc.

Un altro metodo semplice comporta l'osservazione diretta del punto focale. Usate la sorgente luminosa nella posizione in cui emette 5 raggi paralleli e ponete sulla piattaforma circolare la lente convessa: osservate come i raggi paralleli vengono focalizzati in un punto e misurate la distanza tra la lente e il punto focale.

Sostituite alla lente convessa quella concava e osservate cosa succede. Come potete misurare la distanza focale di questa nuova lente?

Per una misura più precisa della lunghezza focale di una lente si usa il banco ottico.

Montate sul banco ottico la sorgente luminosa dalla parte che illumina la figura di due freccette poste a croce, millimetrata. La figura millimetrata in questo caso costituisce l'oggetto luminoso. Montate lo schermo, su cui si dovrà visualizzare l'immagine, e una lente (iniziate con la lente di focale $f = +250$ mm) e procedete nel modo seguente.



a) Ponete la sorgente (oggetto) e lo schermo agli estremi del banco ottico, mettete la lente in una posizione intermedia e muovetela sino a quando non vedete formarsi sullo schermo l'immagine dell'oggetto come immagine ben visibile, “a fuoco”.

Misurate le distanze p tra lente e oggetto e q tra lente e immagine e registrate tali valori in una tabella. Misurate anche le dimensioni trasversali di oggetto e immagine in questa posizione e registratele nella tabella.

b) Poiché la relazione $1/f = 1/p + 1/q$ è simmetrica, ci si aspetta che esista una seconda posizione in cui l'immagine è a fuoco: muovendo SOLO la lente cercate l'altra posizione in cui ottenete l'immagine a fuoco e misurate nuovamente le distanze p e q . Registrateli in tabella i nuovi valori di p e q . Misurate anche le dimensioni trasversali di oggetto e immagine in questa nuova posizione e registratele nella tabella.

c) Ripetete ora le misure in a)-b) per posizioni diverse dello schermo: avvicinate lo schermo alla sorgente di circa 10 cm alla volta e per ogni posizione ripetete le misure di p , q e delle dimensioni trasversali.

d) Continuando ad avvicinare lo schermo ad un certo punto non riuscite più a focalizzare l'immagine, cioè esiste una “distanza minima” dello schermo dalla sorgente, quanto vale questa distanza? Siete in grado di ricavarne il valore teorico e confrontarlo con quello che misurate?

Con i dati raccolti **verificate la legge dei punti coniugati**. Potete procedere in due modi:

1. Costruite un grafico che rappresenti la relazione tra $1/p$ e $1/q$. Interpolate i punti del **grafico** di $1/p$ verso $1/q$ verificando la relazione di linearità prevista dalla legge dei punti coniugati.

L'intercetta della retta è $1/f$, l'inverso della distanza focale. Ricavate il valore $1/f$ utilizzando il metodo dei **minimi quadrati** e di conseguenza la distanza focale f .

2. Per ciascuna coppia di punti ($1/p$, $1/q$) che raccolta in tabella calcolate la somma:

$$1/f = 1/p + 1/q.$$

Potete ottenere una stima della lunghezza focale della lente dalla **media aritmetica** dei valori di f e l'errore standard della media.

e) Utilizzando i dati delle dimensioni trasversali di oggetto ed immagine raccolte in tabella valutate l'ingrandimento trasversale M della lente e confrontatelo con la previsione $M = q/p$.

Ripetete le operazioni con la lente con focale $f = +100$ mm.

Strumenti ottici (facoltativo)

Utilizzando un sistema di due lenti convergenti potete costruire un **telescopio**: montate le lenti come indicato in figura, muovete l'obiettivo fino a mettere a fuoco la sorgente, eliminate l'effetto di parallasse muovendo l'oculare fino a quando l'immagine è nello stesso piano dell'oggetto (per fare questo dovete guardare la sorgente in modo che un occhio guardi attraverso il telescopio e l'altro no: dovete vedere le immagini sovrapposte).



Utilizzando un sistema di due lenti convergenti potete costruire un **microscopio**: montate le lenti come indicato in figura, muovete l'obiettivo fino a mettere a fuoco la sorgente, eliminate l'effetto di parallasse muovendo l'oculare fino a quando l'immagine è nello stesso piano dell'oggetto.

