

Laurea Magistrale in Metodologie per la Conservazione e il Restauro dei Beni Culturali

Paolo Prati

***Dipartimento di Fisica, studio S830
Tel. 010-3536439; prati@ge.infn.it***

***Fisica e Metodologie Fisiche
per la Conservazione dei Beni Culturali***

A.A. 2021/2022

Ottica geometrica

- L'ottica geometrica tratta quei fenomeni che possono essere descritti senza far uso del concetto di onda.
- Si considererà dunque la **luce** come un **raggio che si propaga rettilineamente** in un mezzo omogeneo ed isotropo.
- Quando la luce passa da un primo ad un secondo mezzo trasparente, in entrambi si propagherà seguendo una retta.
- E' però interessante considerare i fenomeni che avvengono sulla superficie di separazione tra i due mezzi

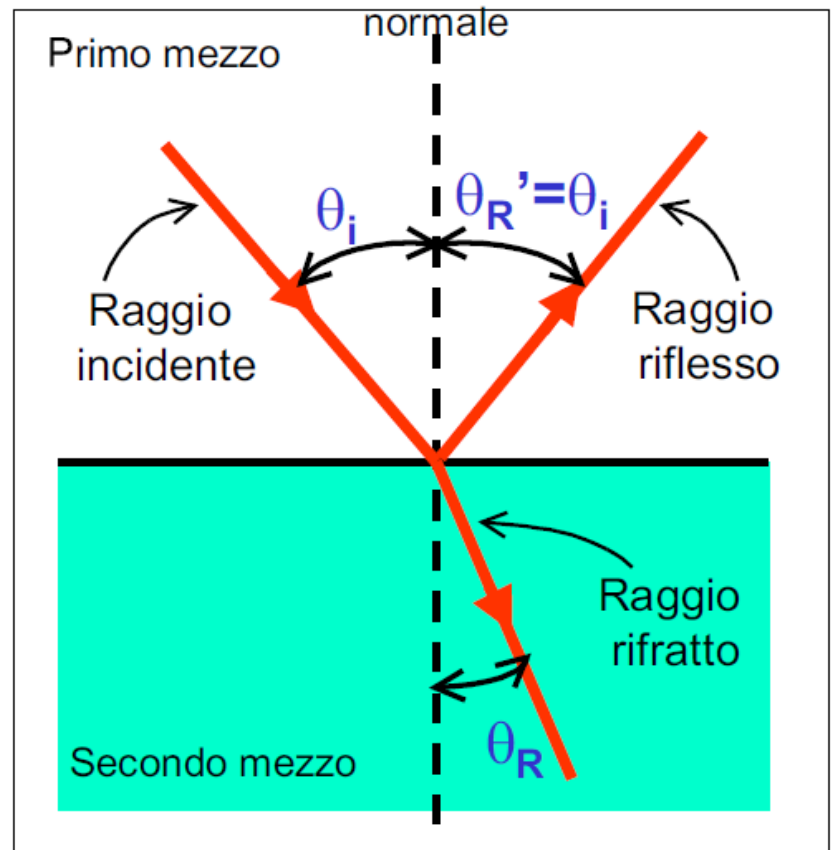
Leggi della riflessione

- Quando un raggio luminoso incide sulla superficie di separazione tra due diversi mezzi trasparenti, in generale si osservano un raggio riflesso, che si propaga nel primo mezzo, e un raggio rifratto che si propaga nel secondo.
- Consideriamo dapprima il solo raggio riflesso: valgono le

LEGGI DELLA RIFLESSIONE

- Il raggio incidente, il raggio rifratto e la normale alla superficie di separazione giacciono sullo stesso piano
- L'angolo di incidenza θ_i (l'angolo tra il raggio incidente e la normale) e l'angolo di riflessione θ_R' (l'angolo tra il raggio riflesso e la normale) sono uguali

$$\theta_I = \theta'_R$$



Specchi piani

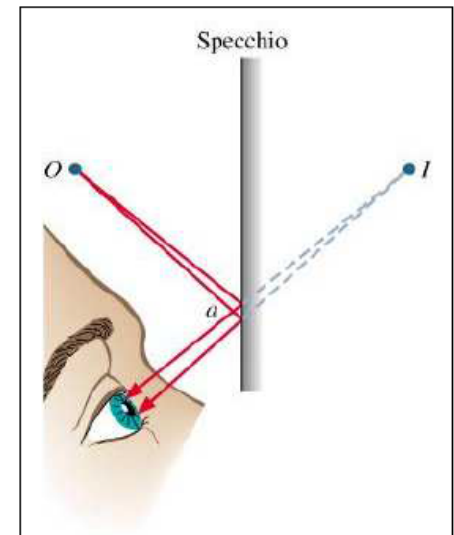
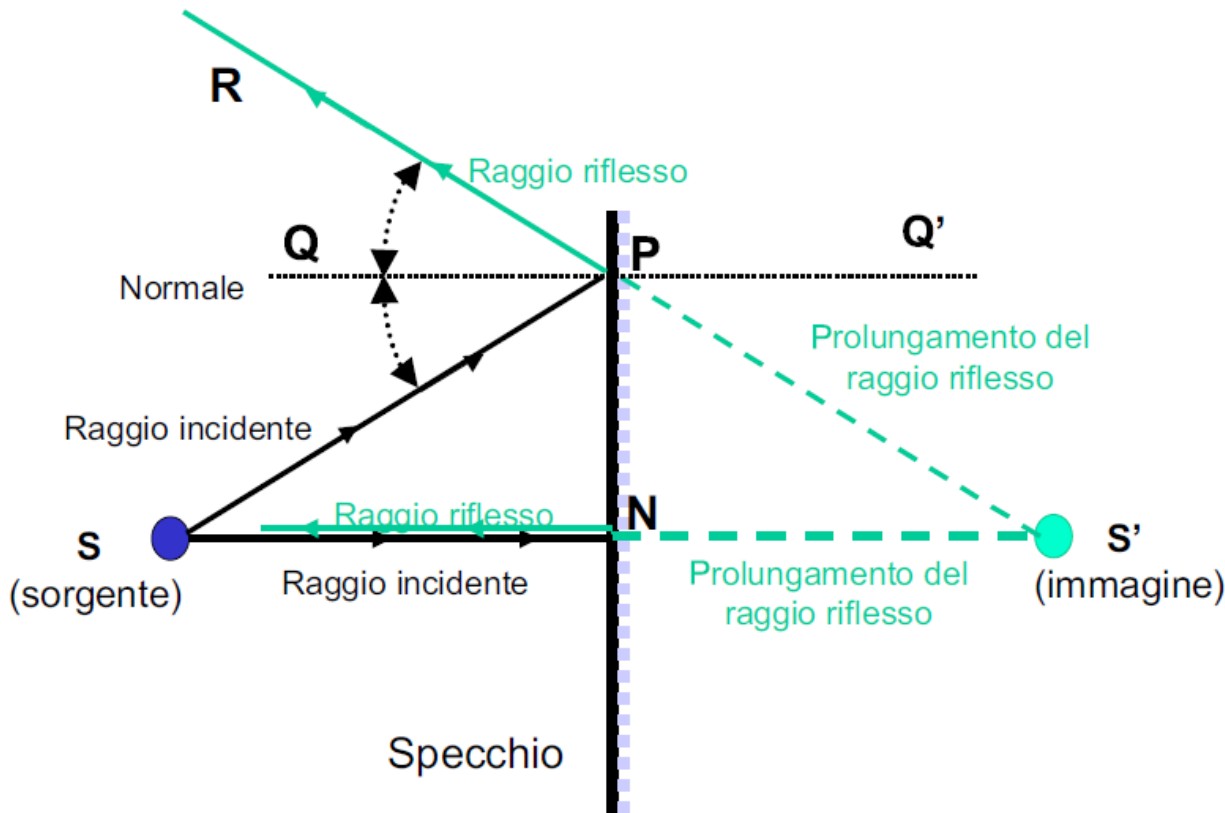
Consideriamo due raggi emessi dalla sorgente S

Applichiamo le leggi della riflessione per ricavare i raggi riflessi

L'immagine S' di S si forma nel punto in cui i raggi, o i loro prolungamenti, si incrociano

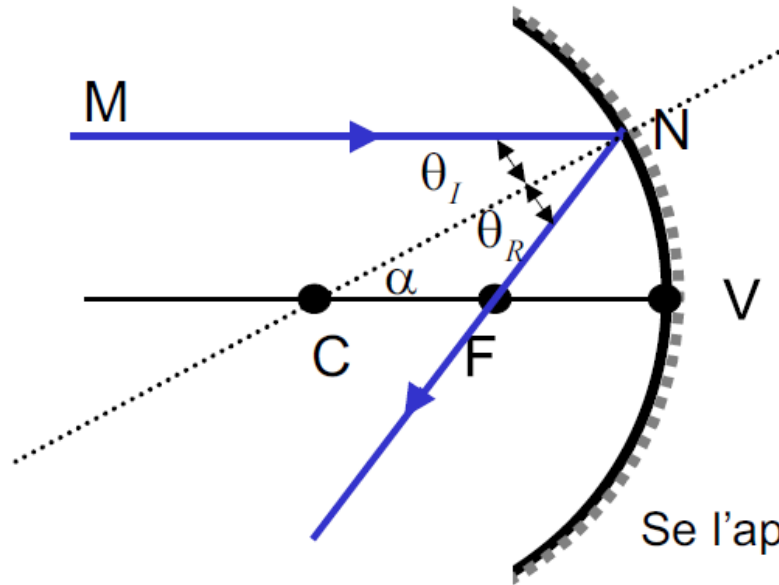
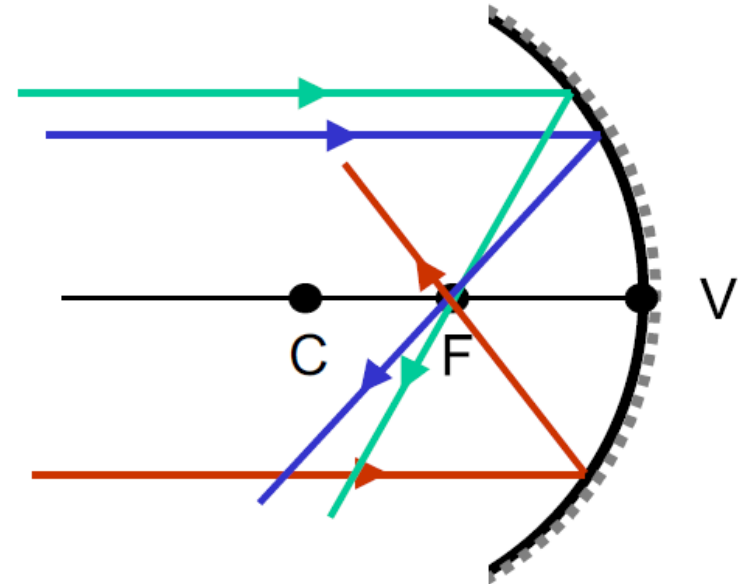
In questo caso, l'immagine S' è **virtuale**, perché è ottenuta incrociando i prolungamenti dei raggi

Notare che **SN = NS'**



Specchi concavi

- Tutti i raggi paralleli all'asse ottico passano per un punto **F** detto **FUOCO**



Il raggio CN e' normale alla superficie

$\theta_I = \theta_R$ per le leggi della riflessione

$\theta_I = \alpha$ perche' alterni interni

$\theta_R = \alpha$

$\overline{CF} = \overline{FN}$

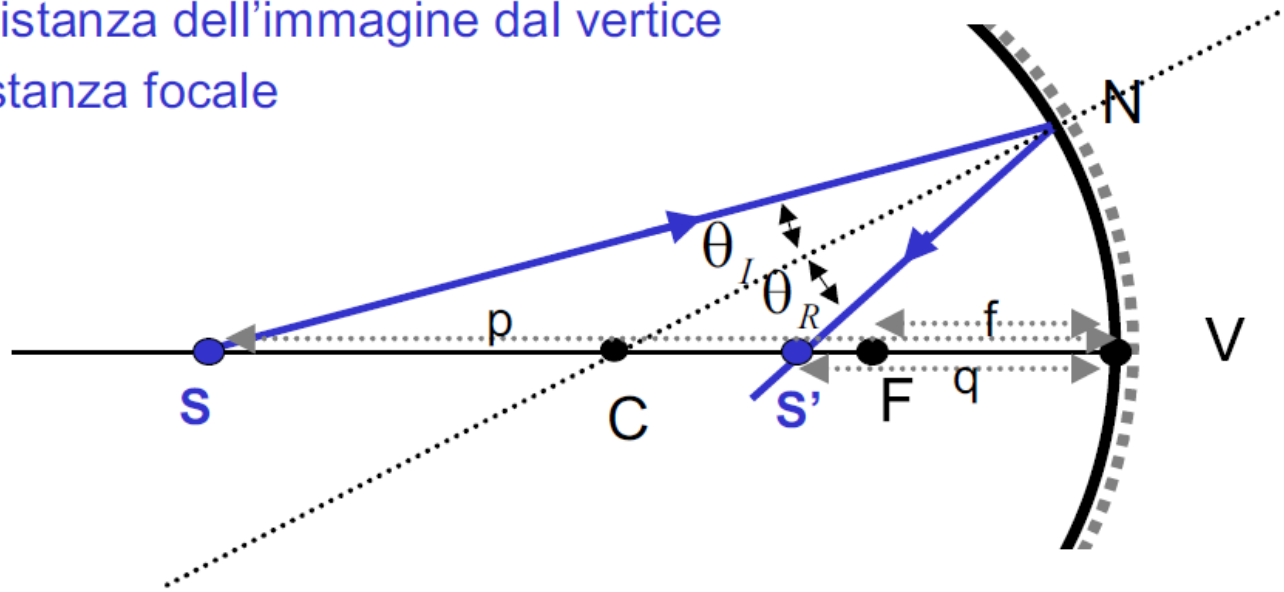
Se l'apertura dello specchio e' piccola $\overline{FN} \approx \overline{FV}$,
 $\overline{CF} \approx \overline{FV}$

Il fuoco si trova nel punto di mezzo tra il centro e il vertice

Formula degli specchi sferici

Indichiamo con:

- $p = SV$: distanza dell'oggetto dal vertice
- $q = S'V$: distanza dell'immagine dal vertice
- $f = FV$: distanza focale



- Si puo' dimostrare che, per specchi di piccola apertura, vale la relazione:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f}$$

Formula degli
specchi sferici

(p: distanza tra oggetto e vertice; f: distanza tra immagine e fuoco; q: distanza tra immagine e vertice)

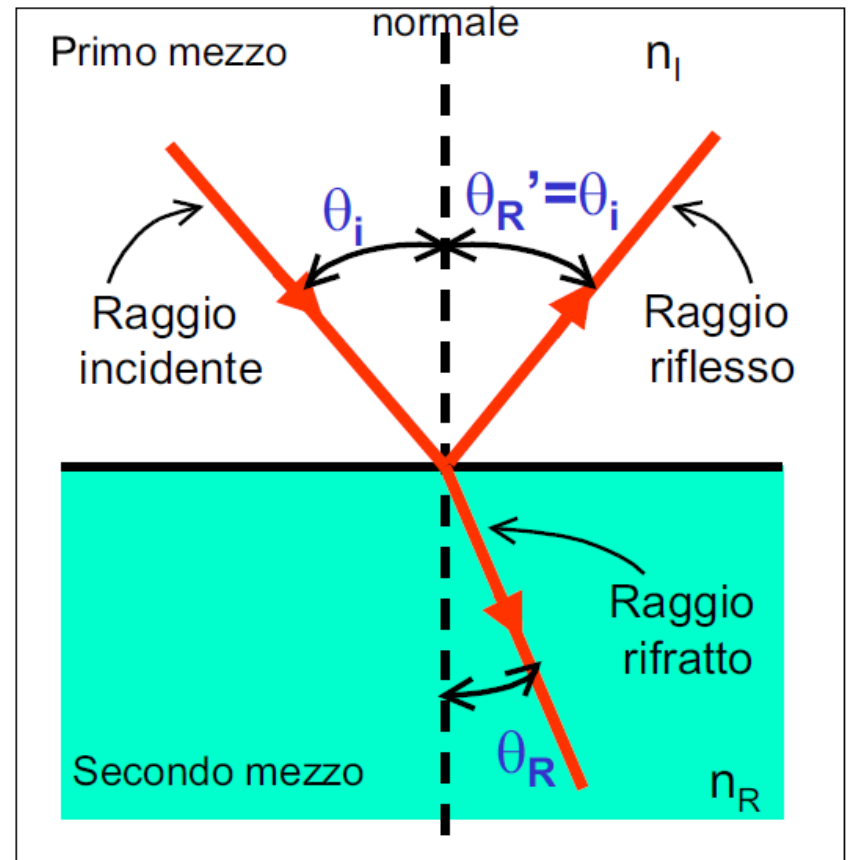
Rifrazione

- Quando un raggio incide sulla superficie di separazione tra due mezzi trasparenti, il raggio verra' parzialmente riflesso;
- l'altra parte del raggio si propaghera' nel secondo mezzo, mutando direzione: ovvero verra' **rifratto**

- Il parametro che caratterizza la rifrazione e' l'indice di **rifrazione** di ciascuno dei due mezzi.
- L'indice di rifrazione di un mezzo e' dato dal rapporto tra la velocita' della luce nel vuoto (c) e la velocita' della luce nel mezzo (v)

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

Nota: $n \geq 1$ Perche'?



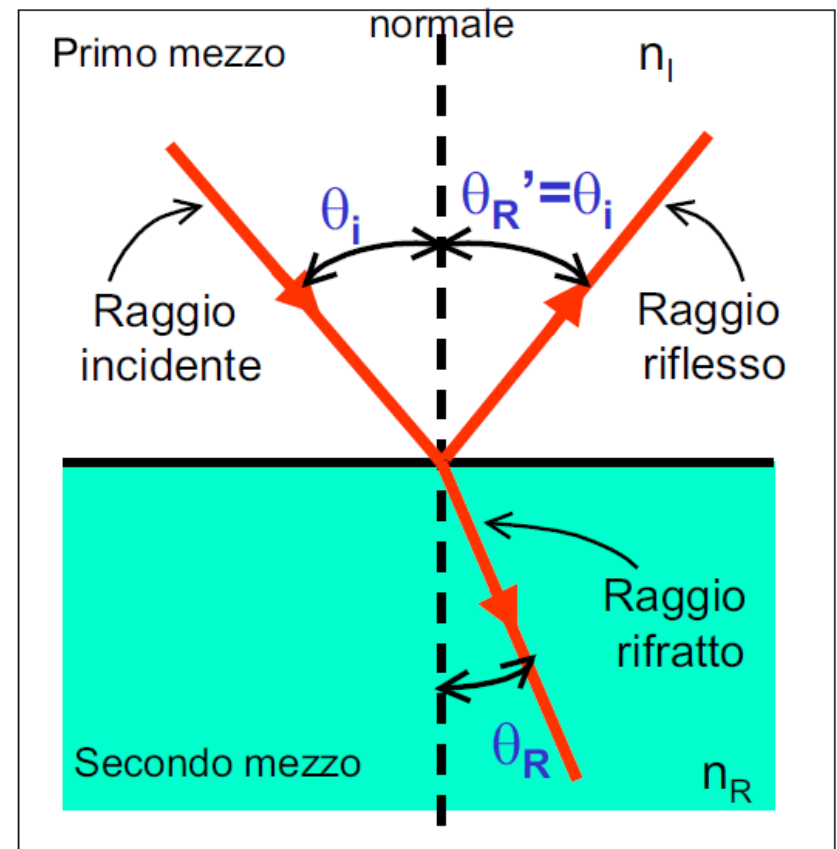
Leggi della rifrazione

1. Il raggio incidente, il raggio rifratto e la normale alla superficie di separazione giacciono sullo stesso piano
2. La relazione tra gli angoli di incidenza e di rifrazione e gli indici di rifrazione e' data dalla

LEGGE DI SNELL:

$$n_I \sin \theta_I = n_R \sin \theta_R$$

Nota: se il secondo mezzo e' piu' rifrangente del primo (cioe' se $n_R > n_I$) il raggio si avvicina alla normale. Viceversa, $n_R < n_I$ se si allontana



Indice di rifrazione e dispersione cromatica

Mezzo	n ($\lambda=5890\text{\AA}$)
Vuoto	1
Aria	1.00029
Acqua	1.33
Vetro comune	1.52
Vetro flint pesante	1.65
Diamante	2.42

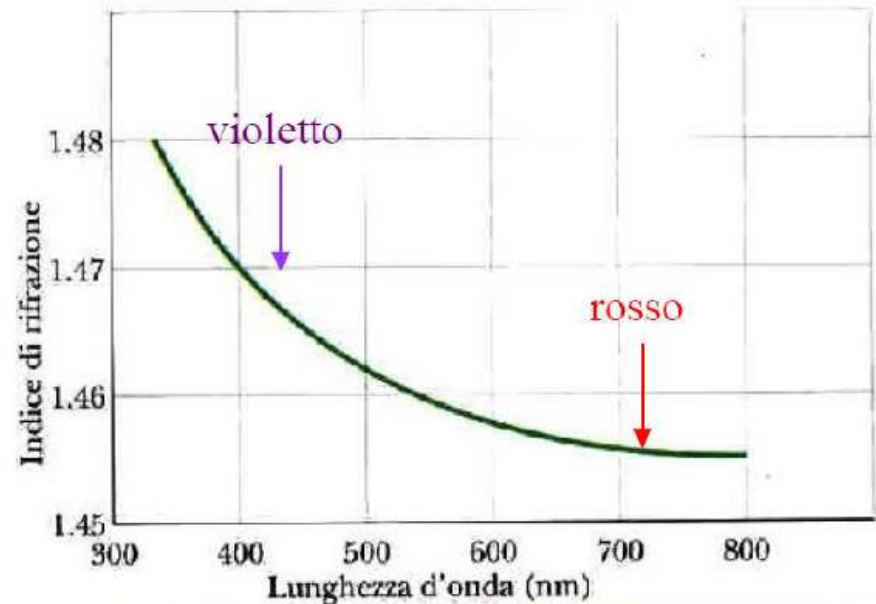
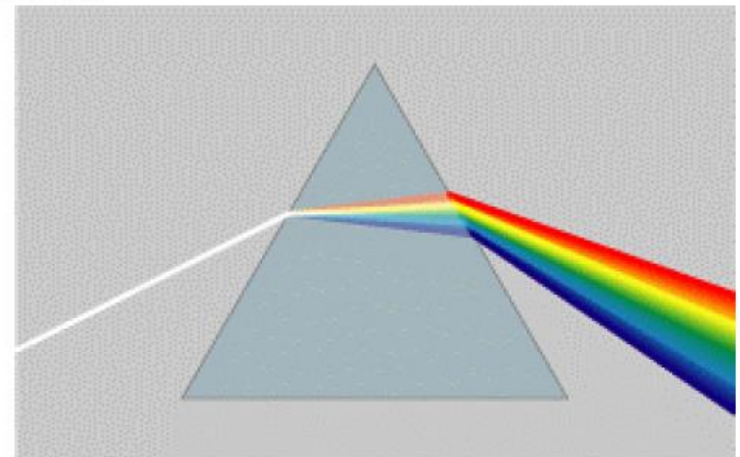


Figura 4 Indice di rifrazione del quarzo fuso in funzione della lunghezza d'onda.

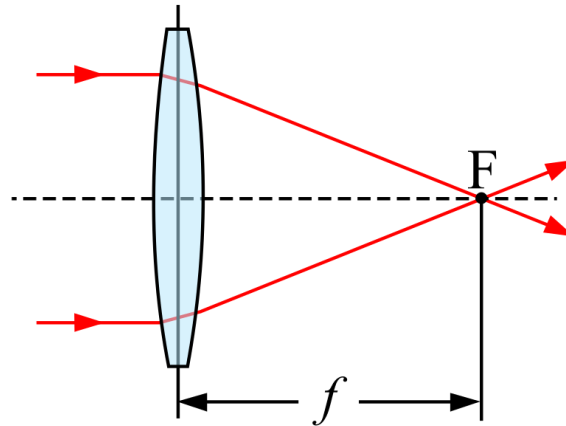
DISPERSIONE CROMATICA

- In genere n decresce al crescere della lunghezza d'onda.
- Prisma ottico: perche' il prisma scompone la luce bianca? Perche' i colori appaiono come in figura?



La formazione delle immagini

Una lente positiva o convergente focalizza un fascio collimato parallelo all'asse in un punto focale, a distanza f dalla lente. Specularmente, una sorgente luminosa collocata nel punto focale produrrà attraverso la lente un fascio di luce collimato.



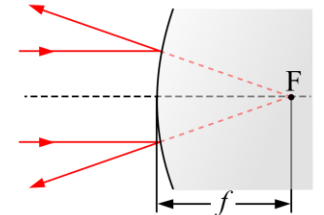
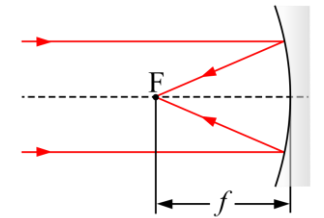
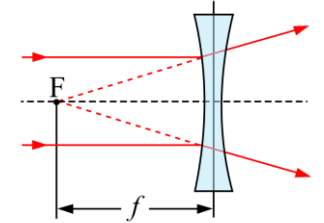
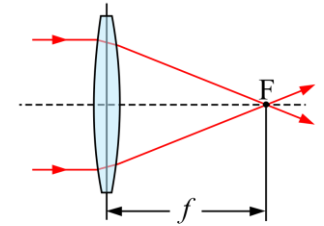
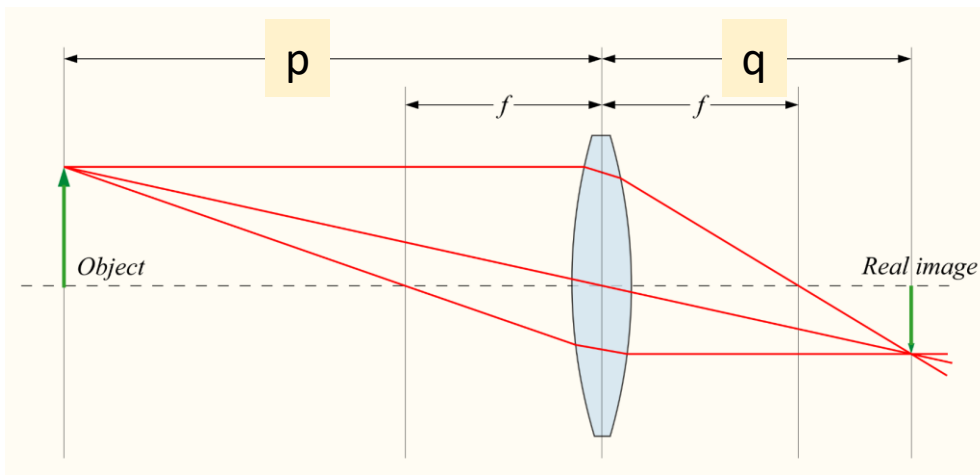
Questi due casi sono esempio di *immagini* formate dalla lente. Nel primo caso un oggetto posto a distanza infinita è focalizzato in una immagine su un piano posto alla distanza focale, chiamato *piano focale*. Nel secondo caso un oggetto posto nel punto focale forma una immagine all'infinito.

La formazione delle immagini

Date le distanze p tra lente e oggetto e q tra lente e immagine, per una lente di spessore trascurabile vale la formula:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f}$$

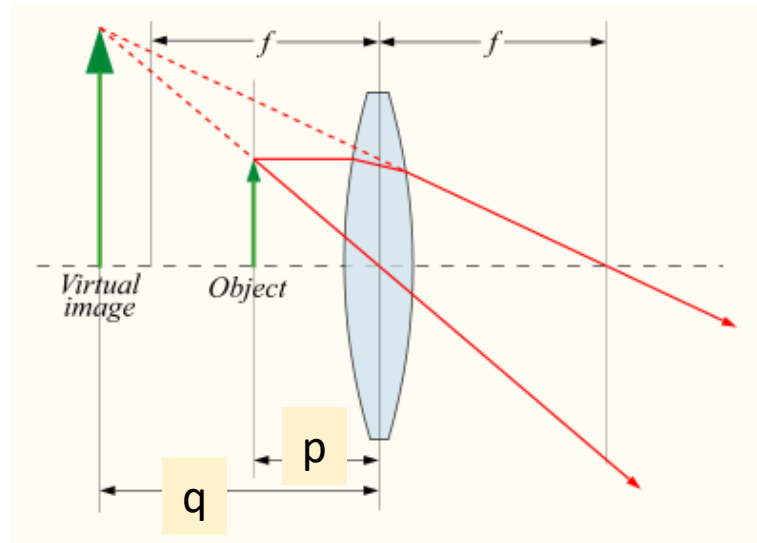
da cui deriva che se un oggetto è posto a distanza p sull'asse della lente positiva di focale f , su uno schermo posto a distanza q si formerà l'immagine dell'oggetto.



Questo caso, che vale per $p > f$ è alla base della [fotografia](#). L'immagine così formata è detta *immagine reale*.

La formazione delle immagini

Si noti che se $p < f$, allora q diviene negativo, e l'immagine si forma apparentemente dallo stesso lato dell'oggetto rispetto alla lente.



Questo tipo di immagine, detta *immagine virtuale*, non può essere proiettata su uno schermo, ma un osservatore vedrebbe attraverso la lente una immagine in quella posizione.

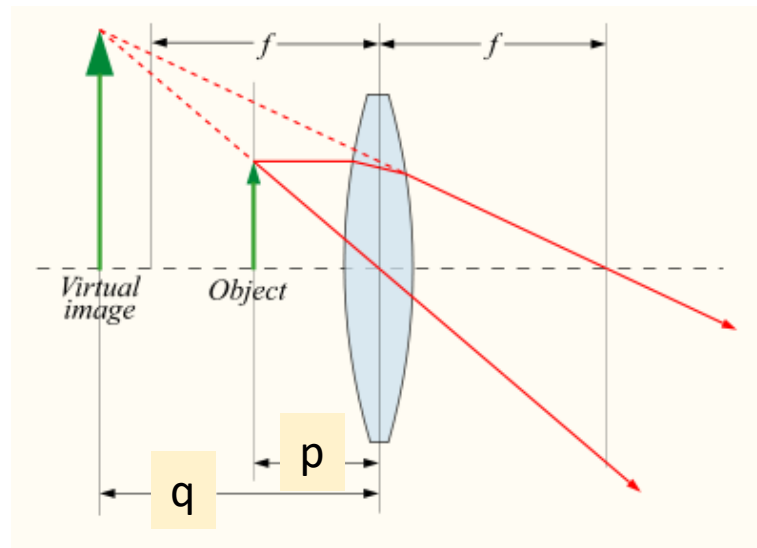
Una [lente di ingrandimento](#) genera questo tipo di immagine e il fattore di ingrandimento M (detto anche [magnificazione](#)) è dato da:

$$M = -\frac{q}{p} = \frac{f}{f - p}$$

dove f è la [lunghezza focale](#) e p la distanza della lente dall'oggetto. Notare che per le immagini reali M è negativo e l'immagine è capovolta. Per le immagini virtuali M è positivo e l'immagine è corretta.

La formazione delle immagini

Una **lente d'ingrandimento** è una singola [lente convessa](#), utilizzata per ottenere l'immagine ingrandita di un oggetto. La lente è solitamente racchiusa in una cornice (spesso metallica) dotata di manico.

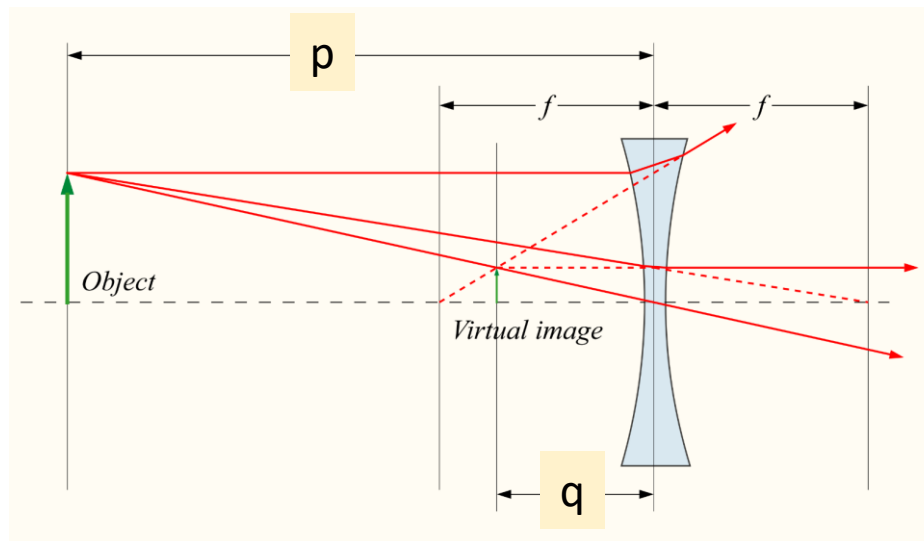


Una lente d'ingrandimento crea un'[immagine](#) virtuale ingrandita dell'oggetto che si trova oltre la lente stessa. Perché ciò avvenga, la distanza tra la lente e l'oggetto deve essere minore della [lunghezza focale](#) della lente.

$$M = -\frac{q}{p} = \frac{f}{f - p}$$

La formazione delle immagini

se $|M| > 1$ l'immagine è più grande dell'oggetto. Si noti che il segno negativo indica che l'immagine è capovolta rispetto all'oggetto → immagini reali.
Per le immagini virtuali M è positivo e l'immagine è diritta.



Nel caso speciale in cui $p = \infty$, si ottiene $q = f$ e $M = -f / \infty = 0$

La dimensione del punto in realtà non è nulla nemmeno per lenti perfette e prive di [aberrazioni](#), poiché la [diffrazione](#) impone un diametro minimo del punto.

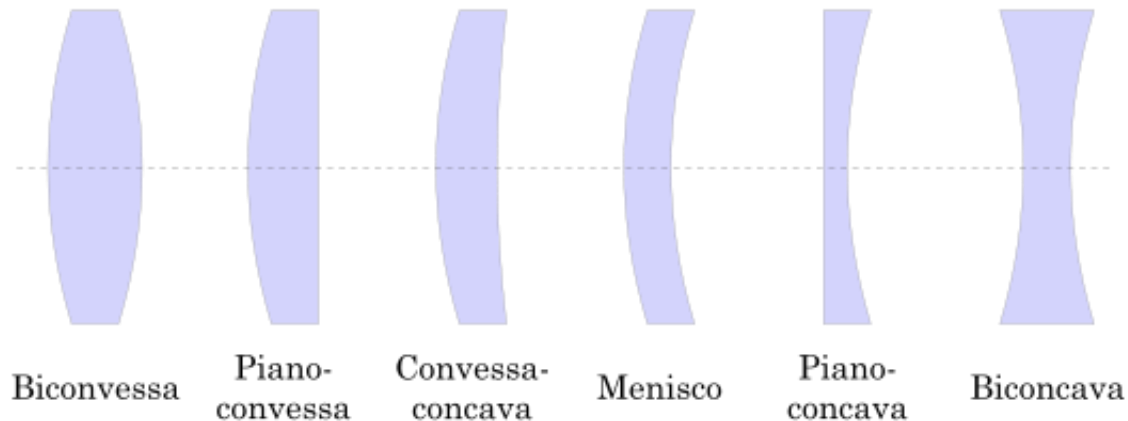
La formazione delle immagini

L'IMMAGINE REALE è formata da RAGGI CONVERGENTI, quella VIRTUALE da RAGGI DIVERGENTI.

A questo criterio puramente geometrico se ne affianca un altro relativo alle modalità di osservazione dei due tipi di immagine. In sostanza si dice:

L'IMMAGINE REALE può essere raccolta su uno SCHERMO e si può FOTOGRAFARE. Quella virtuale può essere osservata SOLO DALL'OCCHIO.

Tipi di lenti



Le lenti sono classificate secondo la curvatura delle due superfici:

- *biconvessa* o semplicemente *convessa* se entrambe sono convesse,
- *biconcava* o *concava* se entrambe sono concave,
- *piano-convessa* se una è piatta e l'altra convessa,
- *piano-concava* se una è piatta l'altra è concava,
- *concavo-convessa* se sono una concava e una convessa.

La diottria

La **diottria** in ottica, è l'unità di misura (in m^{-1}) del potere di rifrazione di un sistema ottico o di una semplice lente.

È chiamata anche *potere convergente della lente* ed esprime la sua capacità di modificare le direzioni dei raggi paralleli di un fascio di luce entrante nella lente per focalizzarli in modo da formarne un'immagine, reale o virtuale, ad una certa distanza dal centro del sistema ottico stesso (distanza focale).

Il numero di diottrie di una lente o di un sistema ottico è pari all'inverso della distanza focale espressa in metri:

$$D = \frac{1}{f}$$

Nell'occhio umano, la distanza focale della lente costituita dal cristallino è circa $f_{\text{norm}} = 17 \text{ mm}$. Un occhio miope non ha la stessa distanza focale di un occhio normale: l'immagine reale si forma al centro dell'occhio, prima della retina → ha bisogno di aumentare la distanza focale. Volendo correggere il difetto di vista, si deve utilizzare una lente divergente.

Esercizio

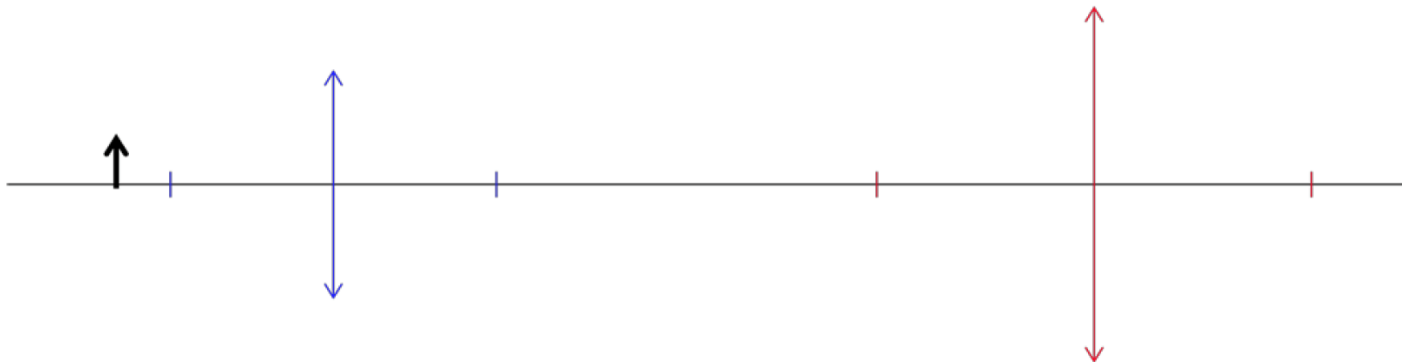
Sistema di lenti

Un sistema di lenti è formato da una lente convergente di lunghezza focale $f_1 = 15$ cm e da una seconda lente convergente di focale $f_2 = 20$ cm posta a 70 cm a destra della prima. Un oggetto è posto a distanza $o_1 = 20$ cm a sinistra della prima lente. Disegnare il sistema.

Determinare

- la distanza dell'immagine dovuta alla prima lente e le caratteristiche dell'immagine (R/V, D/C) e l'ingrandimento relativo;
- la distanza dell'immagine dovuta alla seconda lente, le caratteristiche dell'immagine e l'ingrandimento relativo;
- le caratteristiche dell'immagine dovuta alle due lenti e l'ingrandimento relativo;

Il sistema è il seguente



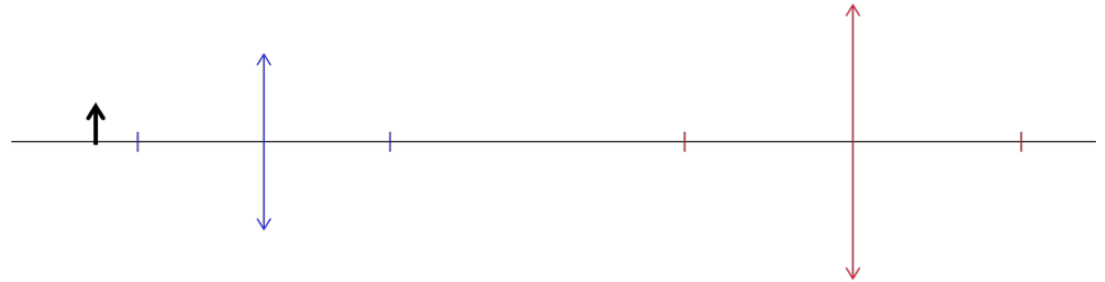
Esercizio

Sistema di lenti

Un sistema di lenti è formato da una lente convergente di lunghezza focale $f_1 = 15$ cm e da una seconda lente convergente di focale $f_2 = 20$ cm posta a 70 cm a destra della prima. Un oggetto è posto a distanza $o_1 = 20$ cm a sinistra della prima lente. Disegnare il sistema.

Determinare

- a) la distanza dell'immagine dovuta alla prima lente e le caratteristiche dell'immagine (R/V, D/C) e l'ingrandimento relativo;



- a) Applichiamo l'equazione delle lenti alla prima lente $\frac{1}{o_1} + \frac{1}{i_1} = \frac{1}{f_1}$ e

$$\frac{1}{i_1} = \frac{1}{f_1} - \frac{1}{o_1} = \frac{1}{15} - \frac{1}{20} = \frac{4-3}{60} = \frac{1}{60}$$

da cui $i_1 = 60$ cm, l'immagine è reale (R). L'ingrandimento è dato da $G_1 = -\frac{i_1}{o_1} = -\frac{60}{20} = -3$

quindi l'immagine è capovolta (C) e ingrandita.

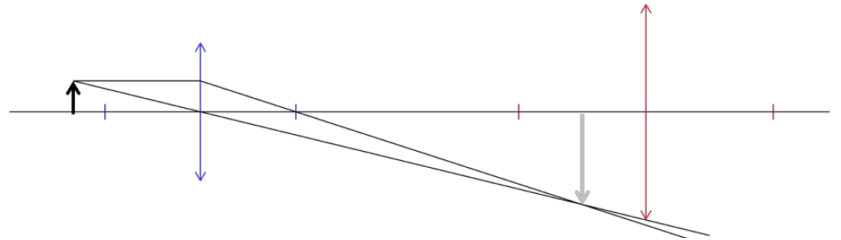
Esercizio

Sistema di lenti

Un sistema di lenti è formato da una lente convergente di lunghezza focale $f_1 = 15$ cm e da una seconda lente convergente di focale $f_2 = 20$ cm posta a 70 cm a destra della prima. Un oggetto è posto a distanza $o_1 = 20$ cm a sinistra della prima lente. Disegnare il sistema.

Determinare

- b) la distanza dell'immagine dovuta alla seconda lente, le caratteristiche dell'immagine e l'ingrandimento relativo;



- b) Applichiamo l'equazione delle lenti alla seconda lente $\frac{1}{o_2} + \frac{1}{i_2} = \frac{1}{f_2}$ e

$$o_2 = d - i_1 = 70 - 60 = 10 \text{ cm} \text{ da cui}$$

$$\frac{1}{i_2} = \frac{1}{f_2} - \frac{1}{o_2} = \frac{1}{20} - \frac{1}{10} = \frac{1-2}{20} = -\frac{1}{20}$$

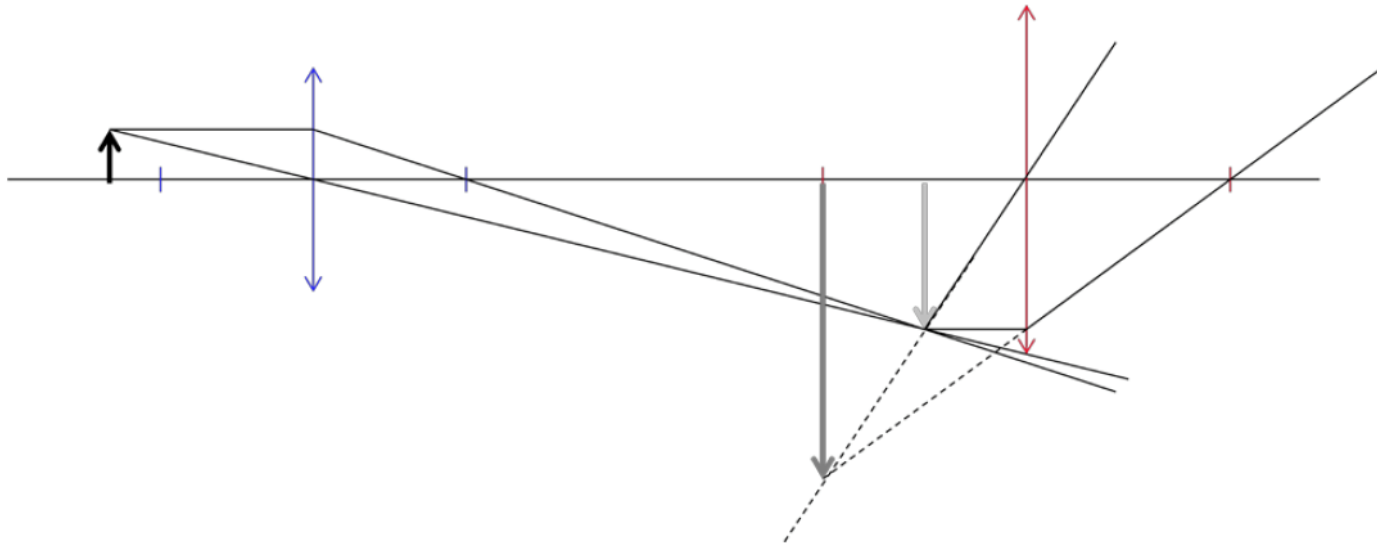
e $i_2 = -20$ cm, l'immagine è virtuale (V). L'ingrandimento è dato da $G_2 = -\frac{i_2}{o_2} = -\frac{-20}{10} = +2$

quindi l'immagine è diritta (D) e ingrandita.

Esercizio

c) L'immagine di tutto il sistema è virtuale, capovolta (VC) e ingrandita, l'ingrandimento vale

$$G = G_1 G_2 = (-3) \cdot (+2) = -6$$



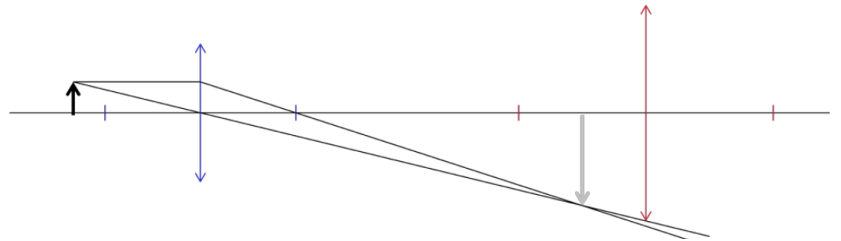
Esercizio

Sistema di lenti

Un sistema di lenti è formato da una lente convergente di lunghezza focale $f_1 = 15$ cm e da una seconda lente convergente di focale $f_2 = 20$ cm posta a 70 cm a destra della prima. Un oggetto è posto a distanza $o_1 = 20$ cm a sinistra della prima lente. Disegnare il sistema.

Determinare

- c) le caratteristiche dell'immagine dovuta alle due lenti e l'ingrandimento relativo;



- b) Applichiamo l'equazione delle lenti alla seconda lente $\frac{1}{o_2} + \frac{1}{i_2} = \frac{1}{f_2}$ e

$$o_2 = d - i_1 = 70 - 60 = 10 \text{ cm} \text{ da cui}$$

$$\frac{1}{i_2} = \frac{1}{f_2} - \frac{1}{o_2} = \frac{1}{20} - \frac{1}{10} = \frac{1-2}{20} = -\frac{1}{20}$$

e $i_2 = -20$ cm, l'immagine è virtuale (V). L'ingrandimento è dato da $G_2 = -\frac{i_2}{o_2} = -\frac{-20}{10} = +2$

quindi l'immagine è diritta (D) e ingrandita.