

## I raggi di luce

L'**ottica** è quella parte della fisica che studia la propagazione della luce e la sua interazione con i corpi materiali. L'esperienza comune ci consente di affermare che la luce si propaga in linea retta. Una sorgente luminosa puntiforme va pensata come un punto dal quale partono in tutte le direzioni infiniti raggi luminosi rettilinei. **Un raggio luminoso è un fascio di luce molto sottile, che rappresentiamo con una retta.** I corpi che, come le lampadine, il Sole, emettono raggi di luce sono chiamati **sorgenti di luce**. Un corpo si dice **trasparente** se si lascia attraversare dalla luce. Sono corpi trasparenti il vetro, l'aria, l'acqua. Tutti i corpi, come i metalli, il legno che non si lasciano attraversare dalla luce sono detti **opachi**. I corpi **traslucidi** sono quelli che si lasciano attraversare dalla luce ma non permettono di distinguere la forma degli oggetti da cui essa proviene. Quindi, sono **traslucidi** i corpi che si lasciano attraversare dalla luce solo in parte e ci permettono di vedere solo in modo vago ed indistinto il contorno degli oggetti situati dietro di essi. Se tra una sorgente puntiforme ed uno schermo poniamo un corpo opaco, quest'ultimo produce sullo schermo un'**ombra**. Se la sorgente non è puntiforme tra l'ombra e la zona illuminata vi sarà una regione di **penombra** che riceve luce soltanto da una parte della sorgente.

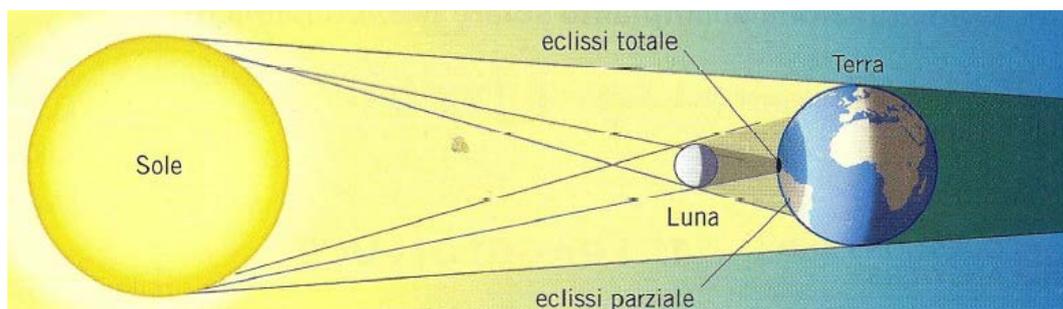
L'**eclissi di Sole** e di **Luna** sono due ottime prove sperimentali che ci confermano la propagazione rettilinea della luce.

I più grandiosi fenomeni d'ombra che possiamo osservare sono le **eclissi di Sole** e di **Luna**, conseguenza dei movimenti della Terra e della Luna.

Si ha **eclissi di Sole** quando la Luna viene a trovarsi fra la Terra ed il Sole di modo che essa intercetta i raggi luminosi da questo inviati sulla Terra .

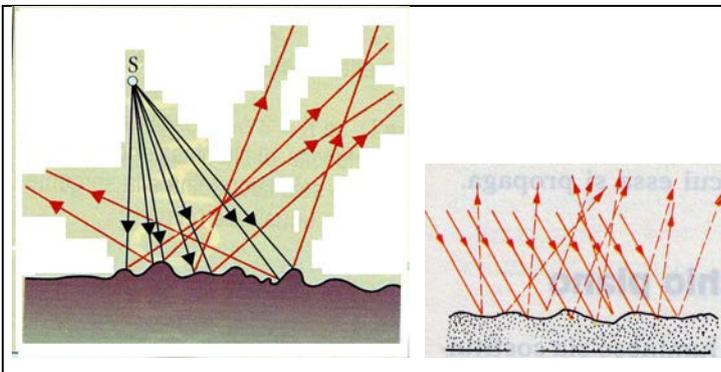
Dai punti della superficie terrestre che stanno nella zona d'ombra si osserva l'**eclissi totale**.

Invece, dai punti che si trovano nella zona di penombra l'**eclissi è parziale**.



Le leggi della riflessione e gli specchi piani

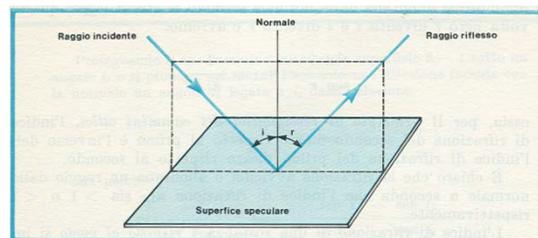
**Diffusione della luce:** Quando la luce colpisce una superficie scabra essa viene riflessa in tutte le direzioni. Il fenomeno prende il nome di **diffusione della luce**. Nella Fig. (A) è messa in evidenza la **diffusione dei raggi luminosi** emessi da una sorgente puntiforme S. Ciascun raggio incidente si riflette secondo le leggi della riflessione ma, poiché la superficie riflettente non ha una giacitura fissa, i raggi riflessi hanno direzioni che variano disordinatamente. Di conseguenza un osservatore che si trova dalla stessa parte di S rispetto alla superficie riceve i raggi riflessi sempre, qualunque sia la sua posizione. E' a causa di questo fenomeno che riusciamo a vedere i corpi illuminati dalle sorgenti.



**Diffusione della luce.**

Se la superficie riflettente è scabra, ciascun raggio incidente si riflette rispettando le leggi della riflessione, ma i raggi riflessi hanno direzioni distribuite a caso. Fig. (A)

La **riflessione della luce** è quel **fenomeno ottico** secondo il quale un **raggio luminoso** che investe la superficie di separazione di due mezzi otticamente diversi viene rimandata indietro secondo ben determinate leggi.



Le leggi che regolano la riflessione sono le seguenti:

- quando un raggio luminoso incontra una superficie riflettente torna indietro sotto forma di **raggio riflesso**
- il **raggio incidente**, il **raggio riflesso** e la **normale n** alla superficie riflettente nel punto di incidenza giacciono su uno stesso piano
- l'**angolo di incidenza  $\hat{i}$**  è uguale all'**angolo di riflessione  $\hat{r}$** :  $\hat{i} = \hat{r}$

La riflessione su uno specchio piano

Uno **specchio piano** è una qualsiasi lastra piana riflettente, per esempio una lamina di acciaio ben lucidata. Gli specchi di uso comune sono lastre di vetro, rese opache dalla verniciatura argentata che ricopre la parte inferiore. La luce, quando incontra una superficie liscia e ben levigata come quella di uno specchio piano, viene riflessa seguendo le leggi della riflessione. In tal caso lo specchio fornisce l'immagine  $S'$  della sorgente luminosa. Per la costruzione dell'immagine possiamo utilizzare il seguente procedimento: tra gli infiniti raggi uscenti dalla sorgente luminosa  $S$ , se ne considerano due che colpiscono lo specchio e vengono da questi riflessi. Si costruiscono i raggi riflessi ed i loro prolungamenti al di là della superficie speculare. Tali prolungamenti convergono nel punto  $S'$ , che rappresenta l'**immagine virtuale** della sorgente  $S$ .

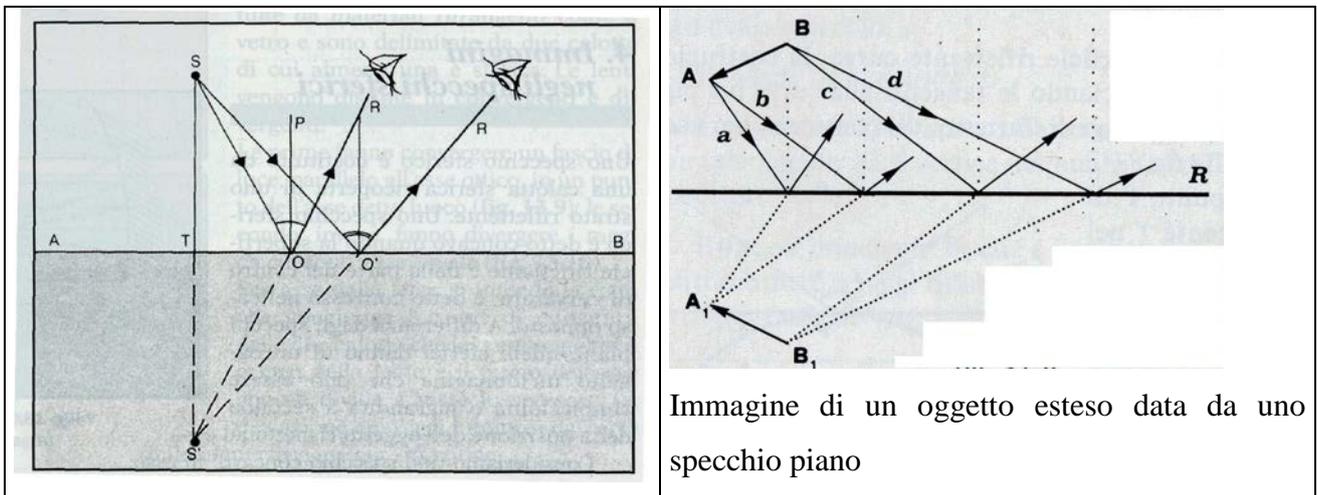
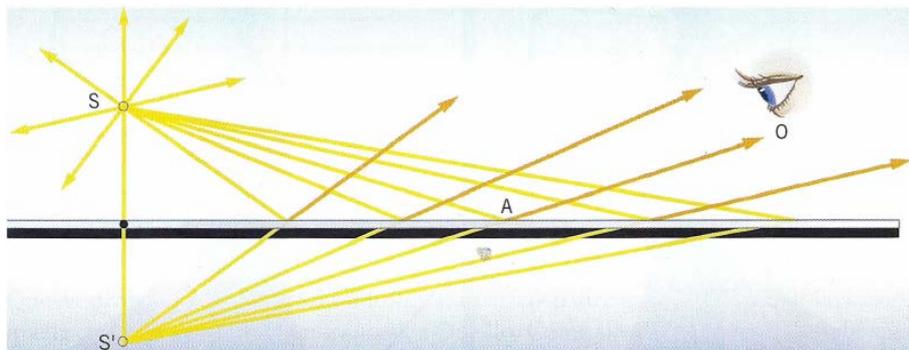


Immagine di un oggetto esteso data da uno specchio piano

**Immagine virtuale** è quella che si ottiene quando i raggi riflessi che la determinano non si incontrano, mentre si incontrano i loro prolungamenti. **Immagine reale** è quella che si ottiene quando i raggi riflessi si incontrano. **Uno specchio piano forma un'immagine virtuale, diritta e di dimensioni uguali a quelle dell'oggetto.**



## Specchi sferici

• Uno **specchio sferico** è costituito da una calotta sferica ricoperta di uno strato riflettente. Gli specchi sferici si dividono in due categorie: **a) specchi concavi** se la superficie riflettente è quella interna della calotta sferica **b) specchi convessi** se la superficie riflettente è quella esterna della calotta sferica.

• A differenza degli specchi piani, quelli sferici danno di un oggetto un'immagine che può essere rimpicciolita o ingrandita a seconda della posizione dell'oggetto rispetto ad esso.

• Gli **elementi caratteristici** degli specchi sferici sono:

**a) centro di curvatura**: centro C della sfera di cui fa parte la calotta sferica riflettente

**b) vertice**: punto centrale dello specchio sferico

**c) asse ottico principale**: retta CV passante per il centro C e per il vertice V

**d) angolo di apertura**: angolo  $\hat{ACB}$  individuato dai due raggi CA e CB condotti dal centro C e passanti per gli estremi A e B dell'arco sezione  $\hat{AVB}$

**e) asse secondario**: ogni retta passante per il centro C che incontri lo specchio considerato

**f) fuoco F**: punto medio F del segmento CV (per specchi di piccola apertura) = punto in cui convergono, dopo la riflessione, i raggi luminosi incidenti paralleli all'asse ottico principale

**g) distanza focale f**: distanza tra il fuoco F ed il vertice V  $f = \frac{r}{2}$

• Indicheremo con la lettera **p** la distanza **oggetto-specchi**, con la lettera **q** la distanza **immagine-specchio**

• Il cammino di un raggio luminoso è reversibile

• ogni raggio luminoso incidente proveniente dal centro dello specchio si riflette su se stesso

• **immagine reale** = luogo di incontro dei raggi riflessi dallo specchio provenienti da un fascio di raggi luminosi uscenti dalla sorgente

• **immagine virtuale** = luogo di incontro dei prolungamenti di un fascio di raggi luminosi riflessi divergenti

Per gli specchi sferici vale la **legge dei punti coniugati**:  $\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f}$

**p** = distanza dell'oggetto = distanza della sorgente dal vertice V dello specchio

**q** = distanza dell'immagine = distanza dell'immagine dal vertice V dello specchio

$f = \frac{r}{2}$  = distanza focale = distanza del fuoco dal vertice **V** dello specchio

<p>Ogni raggio luminoso, parallelo all'asse ottico principale, si riflette passando per il fuoco F</p>	<p>Ogni raggio luminoso passante per il fuoco si riflette parallelamente all'asse ottico principale</p>	<p>Ogni raggio luminoso che passa per il centro si riflette su se stesso</p>	<p>Ogni raggio luminoso che incide nel vertice <b>V</b> è riflesso in maniera simmetrica rispetto all'asse ottico</p>

### Costruzione dell'immagine per gli specchi sferici

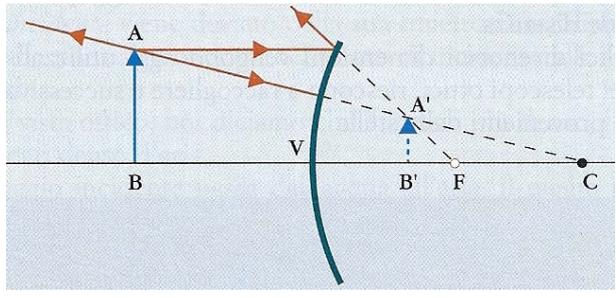
IN UNO SPECCHIO CONCAVO			
Posizione dell'oggetto	Immagine	Schema	Spiegazione
Oltre il centro	Reale, capovolta, rimpicciolita		Quando la freccia luminosa è lontana dallo specchio, la sua immagine è <i>reale</i> (perché lì si intersecano i raggi riflessi), capovolta e più piccola della freccia.
Tra il centro e il fuoco	Reale, capovolta, ingrandita		Man mano che la freccia si avvicina allo specchio, l'immagine, sempre capovolta e reale, si ingrandisce.
Tra il fuoco e lo specchio	Virtuale, diritta, ingrandita		Quando la freccia oltrepassa il fuoco, l'immagine diventa virtuale (perché lì si intersecano i <i>prolungamenti</i> dei raggi riflessi), diritta e più grande della freccia.

### Specchi sferici convessi

Gli **specchi sferici convessi** hanno il centro ed il fuoco dalla parte opposta a quella da cui provengono i raggi luminosi. Pertanto l'immagine che si ottiene è sempre **virtuale** e rimpicciolita.

Per gli specchi sferici convessi vale la legge dei punti coniugati:  $\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f} = -\frac{r}{2}$

essendo per tali specchi:  $f = -\frac{r}{2}$

<p>Negli <b>specchi convessi</b>, qualunque sia la posizione dell'oggetto, l'<b>immagine è sempre virtuale, diritta, rimpicciolita</b> e disposta tra il vertice de il fuoco.</p>	
---	--

Ingrandimento lineare

Per oggetti poco estesi ed assimilabili a segmenti luminosi, si definisce **ingrandimento lineare** il rapporto tra le dimensioni dell'immagine e quelle dell'oggetto.

Indicando con **G** questo ingrandimento abbiamo:  $G = \frac{A'B'}{AB} = \frac{q}{p}$

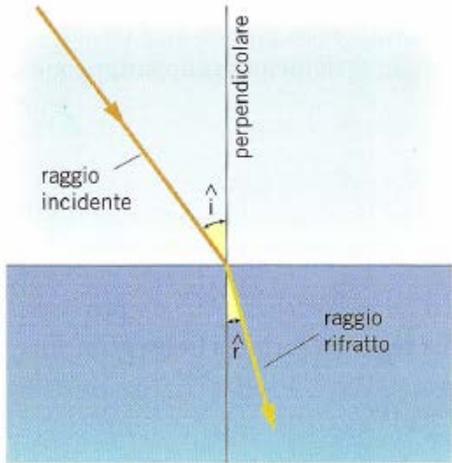
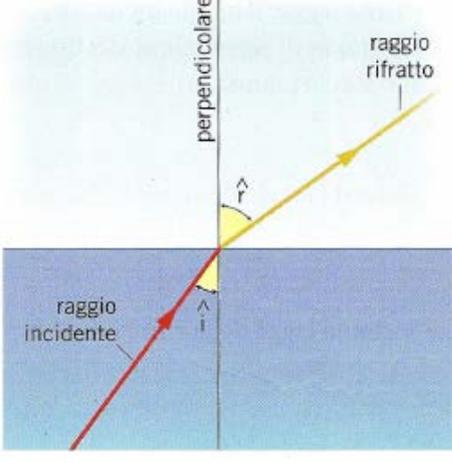
ingrandimento  $G = \frac{q}{p}$

distanza immagine-specchio (m)  $q$

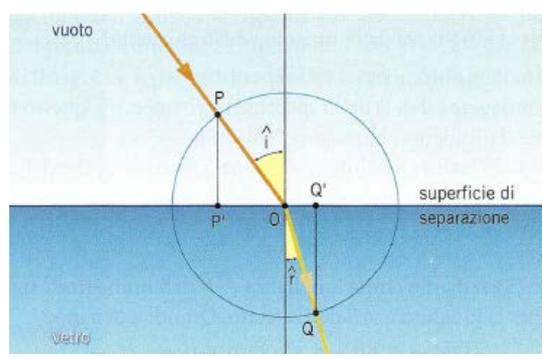
distanza oggetto-specchio (m)  $p$

Le leggi della rifrazione

Abbiamo già visto che in un mezzo trasparente ed omogeneo (aria, acqua) la luce si propaga in linea retta. Quando la luce passa da un mezzo trasparente ad un altro di natura diversa (ma anch'esso trasparente) cambia di direzione. Diciamo che la luce subisce il **fenomeno della rifrazione**.

 <p>Quando un raggio luminoso incidente passa dall'aria all'acqua, il raggio rifratto si avvicina alla normale condotta nel punto di incidenza alla superficie di separazione dei due mezzi</p>	 <p>Quando un raggio luminoso incidente passa dall'acqua all'aria, il raggio rifratto si allontana dalla normale condotta nel punto di incidenza alla superficie di separazione dei due mezzi</p>
--	---

E' ora naturale chiedersi: di quanto il raggio rifratto si avvicina alla normale nel caso in cui il raggio incidente passa da un mezzo meno denso ad uno più denso, e di quanto se ne allontana nel caso contrario. Ci aiuta a dare una risposta a questa domanda il seguente esperimento.

<p>Un raggio luminoso passa dal vuoto (con l'aria è la stessa cosa) ad un mezzo trasparente come il vetro. Al variare dell'angolo di incidenza <math>\hat{i}</math> varia anche l'angolo di rifrazione <math>\hat{r}</math> e, di conseguenza, variano anche le lunghezze dei segmenti <math>\overline{OP'}</math> e <math>\overline{OQ'}</math> ma non varia il loro rapporto <math>\frac{\overline{OP'}}{\overline{OQ'}}</math>.</p>	
--	--

Tale rapporto costante si chiama **indice di rifrazione assoluto** del vetro rispetto al vuoto

(all'aria) e si indica col simbolo:  $n = \frac{\overline{OP'}}{\overline{OQ'}}$

indice di rifrazione assoluto (numero puro)  $n = \frac{\overline{OP'}}{\overline{OQ'}}$

### Le leggi della rifrazione

- raggio incidente, raggio rifratto e normale nel punto di incidenza alla superficie di separazione giacciono sullo stesso piano
- Il rapporto tra il seno dell'angolo di incidenza ed il seno dell'angolo di rifrazione ha un valore costante che dipende dalla natura dei due mezzi.

$$n = \frac{\overline{OP'}}{\overline{OQ'}} = \frac{\sin \hat{i}}{\sin \hat{r}} = \frac{n_2}{n_1} = n_{12}$$

dove  $n_2$  è l'indice di rifrazione assoluto del secondo mezzo, dove  $n_1$  è l'indice di rifrazione assoluto del primo mezzo,  $n_{12}$  è l'indice di rifrazione relativo del secondo mezzo rispetto al primo

### Riflessione totale

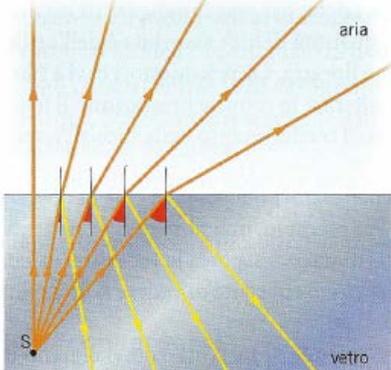
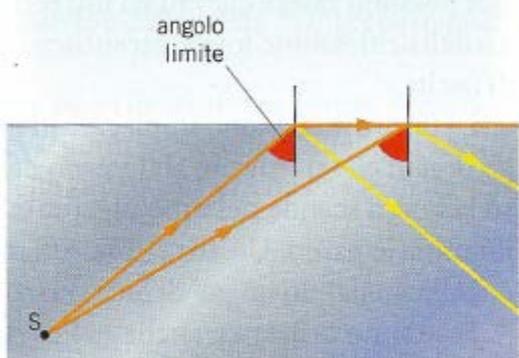
Quando un raggio luminoso passa da un mezzo più rifrangente (ad esempio acqua) ad uno meno rifrangente (ad esempio aria) accade che per un ben definito valore dell'angolo di incidenza  $\ell$  l'angolo di rifrazione sia di  $90^\circ$ , cioè il raggio rifratto esce parallelamente alla superficie di separazione.

Tale valore dell'angolo di incidenza è chiamato **angolo limite** (indicato col simbolo  $\ell$ ) perché, per angoli di incidenza maggiori di esso, il raggio di luce non viene più rifratto ma viene riflesso propagandosi nello stesso mezzo del raggio incidente. Il fenomeno prende il nome di **riflessione totale**.

Sia S una sorgente luminosa posta nel mezzo più rifrangente. Quando la luce passa da un mezzo più denso ad uno meno denso, all'aumentare dell'angolo di incidenza  $\hat{i}$  aumenta anche l'angolo di rifrazione  $\hat{r}$ . Il raggio rifratto si allontana sempre più dalla normale nel punto di incidenza finché forma con essa un angolo di  $90^\circ$ . L'angolo di incidenza  $\ell$  a cui corrisponde un angolo di rifrazione  $\hat{r} = 90^\circ$  prende il nome di **angolo limite**. Il valore di  $\ell$  si calcola ricordando che:

$$\frac{\sin \ell}{\sin 90^\circ} = \frac{n_1}{n_2} \quad \sin \ell = \frac{1}{n_2} \quad n_1 = 1 \text{ indice di rifrazione assoluto dell'aria}$$

**Il seno dell'angolo limite è uguale al reciproco dell'indice di rifrazione assoluto del mezzo più denso.**

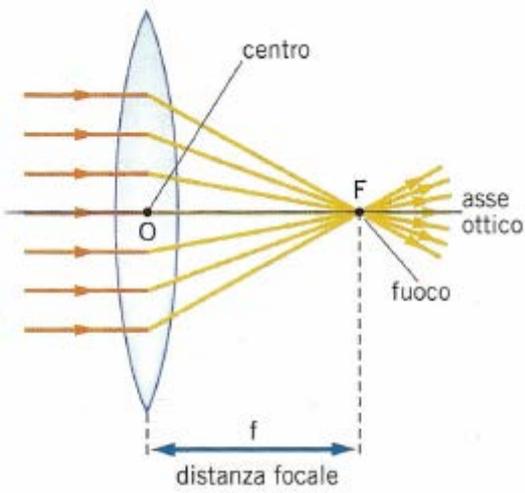
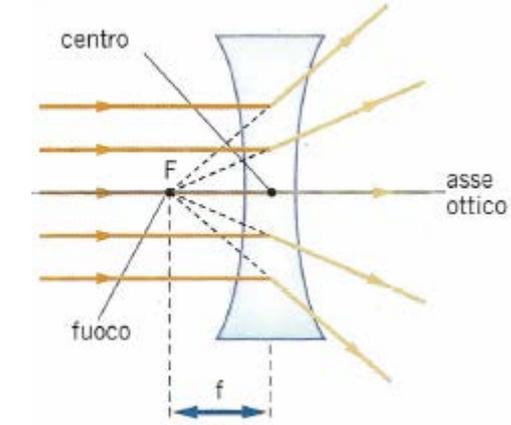
	
<p>Aumentando l'angolo di incidenza anche l'angolo di rifrazione aumenta e il raggio rifratto nell'aria si avvicina sempre più alla superficie di separazione.</p>	<p>Esiste un angolo limite <math>\ell</math> per cui il raggio rifratto è radente alla superficie di separazione. Per angoli di incidenza maggiori il raggio di luce non viene più rifratto ma viene riflesso propagandosi nello stesso mezzo del raggio incidente.</p>

### Lenti sferiche

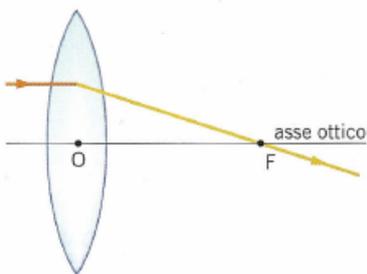
Una **lente sferica** è un corpo trasparente delimitato da due superfici sferiche, che produce immagini ingrandite o rimpicciolite degli oggetti. Gli elementi principali di una lente sono:

- L'asse ottico è la retta che congiunge i centri delle due superfici sferiche che delimitano la lente
- Il **centro**  $O$  è il punto dell'asse ottico che divide a metà lo spessore della lente

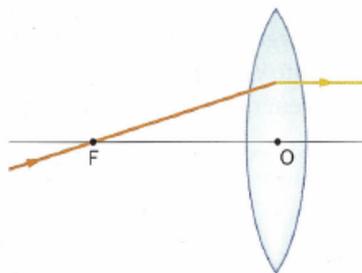
- La **distanza focale**  $f$  è la distanza tra il fuoco  $F$  e il centro

 <p>Una lente convergente fa convergere in un punto (fuoco) un fascio di raggi luminosi paralleli all'asse ottico.</p>	 <p>Una lente divergente fa divergere un fascio di raggi paralleli all'asse ottico in modo che sembrano uscire da un punto (fuoco).</p>
---	---

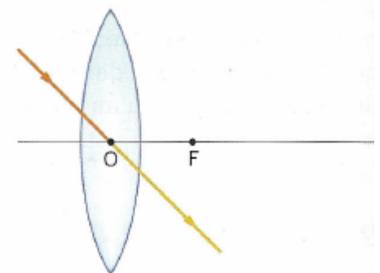
**A** Un raggio che arriva parallelo all'asse ottico converge nel fuoco.



**B** Un raggio che passa per il fuoco è deviato in direzione parallela all'asse ottico.

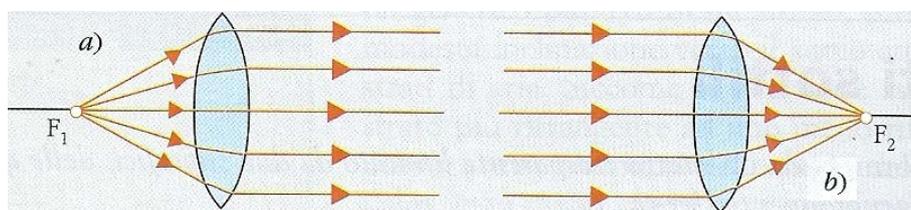


**C** Un raggio che passa per il centro prosegue nella stessa direzione.



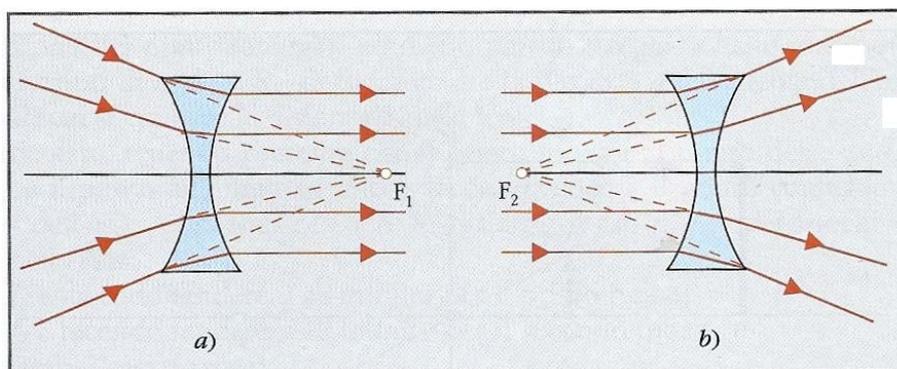
(a) I raggi luminosi uscenti dal primo fuoco  $F_1$  di una lente convergente, dopo essersi rifratti due volte sulle due facce della lente, escono dalla lente parallelamente all'asse ottico

(b) I raggi luminosi paralleli all'asse ottico, dopo essersi rifratti due volte sulle due facce della lente, escono convergendo nel secondo fuoco  $F_2$ .



(a) I raggi luminosi incidenti in modo che i loro prolungamenti convergano sul primo fuoco  $F_1$  di una lente divergente, dopo essersi rifratti due volte sulle due facce della lente, escono dalla lente parallelamente all'asse ottico.

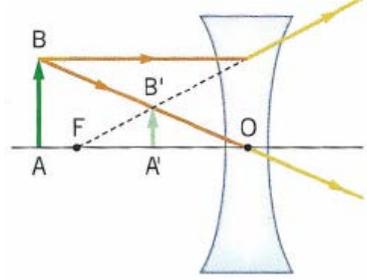
(b) I raggi luminosi paralleli all'asse ottico, dopo essersi rifratti due volte sulle due facce della lente, escono dalla lente divergendo in direzione tale che i loro prolungamenti convergano sul secondo fuoco  $F_2$ .



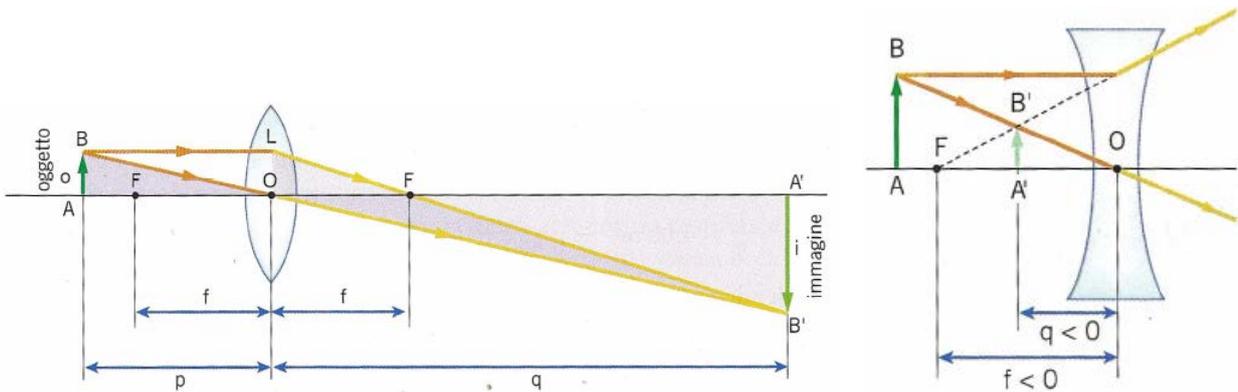
IMMAGINI IN UNALENTE SOTTILE CONVERGENTE

Posizione dell'oggetto	Immagine	Schema	Spiegazione
Oltre il doppio della distanza focale	Reale, capovolta, rimpicciolita		Quando la freccia luminosa $AB$ dista dalla lente più del doppio della distanza focale ( $2f$ ), la sua immagine $A'B'$ è reale (perché li si intersecano i raggi rifratti), capovolta e più piccola della freccia.
Doppio della distanza focale	Reale, capovolta, della stessa dimensione		Man mano che la freccia si avvicina alla lente, l'immagine, sempre capovolta e reale, si ingrandisce. È uguale all'oggetto quando questo è al doppio della distanza focale; diventa più grande quando l'oggetto sta tra $2f$ e $f$ .
Tra il fuoco e il doppio della distanza focale	Reale, capovolta, ingrandita		
Nel fuoco	Nessuna immagine		Quando la freccia luminosa è sul fuoco, l'immagine non si forma, perché i raggi rifratti sono paralleli e non convergono.
Tra la lente e il fuoco	Virtuale, diritta, ingrandita		Oltre il fuoco, l'immagine diventa virtuale (perché li si intersecano i prolungamenti dei raggi riflessi), diritta e più grande della freccia. È questa la condizione che viene sfruttata dalle lenti di ingrandimento.

Le lenti divergenti

<p>In una <b>lente divergente</b> i raggi paralleli all'asse ottico divergono, in modo che i loro prolungamenti passino per il fuoco. L'immagine è sempre virtuale, diritta e rimpicciolita.</p>	
--	--

La formula per le lenti sottili e l'ingrandimento



Per le **lenti sottili** vale la seguente formula dei punti coniugati:  $\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f}$

La grandezza  $\frac{1}{f}$  si chiama **potere diottrico** e si misura in **diottrie**. Come per gli specchi sferici, un valore di  $q > 0$  indica che l'immagine è reale mentre un valore di  $q < 0$  indica che l'immagine è virtuale.

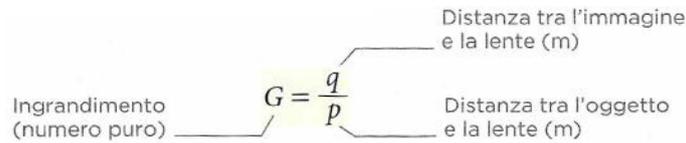
Quando la distanza fra i vertici delle due calotte sferiche è trascurabile rispetto ai loro raggi la lente si dice **sottile**.

	CONVENZIONI PER LA LEGGE DEI PUNTI CONIUGATI APPLICATA ALLE LENTI	
	Positivo	Negativo
Valore di $q$	Immagine reale	Immagine virtuale
Valore di $f$	Lente convergente	Lente divergente

L'ingrandimento

In una lente sottile l'ingrandimento ci viene fornito dal rapporto tra la lunghezza **A'B'**

dell'immagine e la lunghezza **AB** dell'oggetto:  $G = \frac{A'B'}{AB} = \frac{q}{p}$



Quando la distanza fra i vertici delle due calotte sferiche è trascurabile rispetto ai loro raggi la lente si dice sottile.

LE FORMULE

GRANDEZZA	FORMULA	SIGNIFICATO
Distanza focale di uno specchio concavo (m)	$f = \frac{r}{2}$	$\frac{\text{raggio dello specchio}}{2}$
Specchi: legge dei punti coniugati	$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f}$	$\frac{1}{\text{dist. oggetto}} + \frac{1}{\text{dist. immagine}} = \frac{1}{\text{dist. focale}}$
Specchi e lenti: ingrandimento	$G = \frac{q}{p}$	$\frac{\text{distanza dell'immagine}}{\text{distanza dell'oggetto}}$
Indice di rifrazione	$n = \frac{OP'}{OQ'}$	
Legge di Snell	$\frac{\sin \hat{i}}{\sin \hat{r}} = \frac{n_2}{n_1}$	$\frac{\text{seno dell'angolo } \hat{i}}{\text{seno dell'angolo } \hat{r}} = \frac{\text{ind. rifr. 2}}{\text{ind. rifr. 1}}$
Formule delle lenti sottili	$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f}$	$\frac{1}{\text{dist. oggetto}} + \frac{1}{\text{dist. immagine}} = \frac{1}{\text{dist. focale}}$