

Unità Didattica N° 32

- 01) La natura duale della luce
- 02) I primi elementi di ottica geometrica
- 03) Propagazione rettilinea della luce
- 04) Riflessione e diffusione della luce
- 05) Specchi piani
- 06) Specchi sferici
- 07) Formula dei punti coniugati
- 08) La concezione della luce attraverso i secoli

La natura duale della luce

La natura della luce ha suscitato vivaci discussioni e sono state formulate su di essa teorie di ogni specie. Tuttavia due sono le teorie proposte derivanti da serie indagini sperimentali: quella corpuscolare di Newton e quella ondulatoria di Huygens. Il modello corpuscolare considera la luce come un insieme di particelle aventi le seguenti proprietà:

- sono così piccole da rendere impossibile le interazioni reciproche
- si muovono insieme in piccoli fasci seguendo traiettorie rettilinee chiamate raggi
- obbediscono alle leggi della meccanica, alle leggi di conservazione dell'energia e della quantità di moto, scambiando energia in tempi brevissimi ed in quantità finite.

Il modello ondulatorio considera la luce come un'onda che si può propagare nei mezzi materiali e nel vuoto.

La teoria corpuscolare spiega bene solo alcuni fenomeni come la riflessione e la rifrazione, ma non è in grado di spiegare fenomeni come l'interferenza, la diffrazione e la polarizzazione. La teoria ondulatoria non è in grado di spiegare l'effetto fotoelettrico (che consiste nell'emissione di elettroni da parte dei metalli colpiti da onde elettromagnetiche di opportuna frequenza). L'effetto fotoelettrico fu chiarito da Einstein il quale teorizzò che la luce fosse costituita da particelle, chiamate fotoni. Fu merito di Einstein l'aver conciliati i due modelli ipotizzando una duplice natura della luce, corpuscolare (nei fenomeni di interazione) ondulatoria (nei fenomeni di propagazione).

I primi elementi di ottica geometrica

L'ottica è quella parte della fisica che studia la propagazione della luce e la sua interazione con i corpi materiali. L'ottica si divide in ottica geometrica ed ottica ondulatoria. L'ottica geometrica studia la propagazione rettilinea della luce nei mezzi omogenei ed isotropi.

Permette lo studio e l'interpretazione delle leggi della **riflessione** e della **rifrazione** e quindi delle immagini formate da specchi e lenti. Si basa sull'ipotesi che la luce sia costituita da corpuscoli (**fotoni**) che si propagano in linea retta nel vuoto e nei mezzi trasparenti omogenei. Secondo il modello corpuscolare, la luce è un insieme di corpuscoli, detti **fotoni**, emessi dalla sorgente luminosa in tutte le direzioni, che si propagano in linea retta trasportando energia.

L'**ottica ondulatoria** studia la propagazione e l'interpretazione della luce sulla base di un modello ondulatorio secondo il quale la luce è un'onda **elettromagnetica di opportuna frequenza** cioè un'onda elettromagnetica la cui frequenza varia da $4 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$ a $8 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$, cioè sono onde elettromagnetiche le cui lunghezze d'onda variano tra i 4000 \AA e 8000 \AA . L'**ottica ondulatoria** studia e spiega i fenomeni di **interferenza**, **diffrazione** e **polarizzazione**; si ammette che la luce si propaghi mediante **onde trasversali**.

Velocità della luce

La luce si propaga nel vuoto alla velocità $c = 2,99792458 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. In un mezzo omogeneo ed isotropo¹ di indice di rifrazione **n** la luce si propaga con la velocità $v = \frac{c}{n}$.

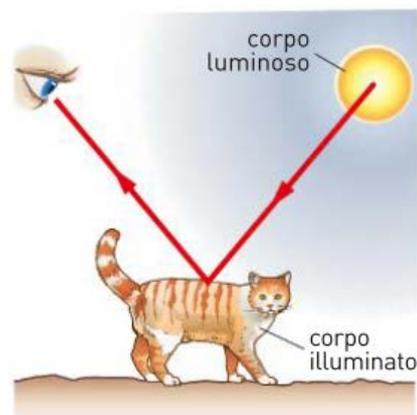
Sorgente luminosa

E' un qualsiasi corpo o dispositivo capace di emettere luce. **Sorgente primaria** di luce è un qualsiasi corpo incandescente (Sole, lampadina,...) capace di emettere luce propria. Se un oggetto, colpito dalla luce, la rimanda indietro tutta o in parte, abbiamo una **sorgente secondaria** o un **corpo illuminato**.

¹ Un mezzo si dice **isotropo** quando le sue proprietà fisiche sono le stesse in tutte le direzioni .

Le lampadine, il Sole e tutti i corpi che emettono raggi di luce sono detti corpi luminosi o **sorgenti di luce**. I raggi che da essi provengono possono giungere ai nostri occhi direttamente o dopo essere stati deviati da altri oggetti, chiamati **corpi illuminati**. I raggi che così riceviamo ci permettono di vedere tutti e due questi tipi di corpi.

Perché possiamo vedere un corpo illuminato, esso deve deviare verso i nostri occhi alcuni dei raggi di luce che lo colpiscono e che provengono da un corpo luminoso.



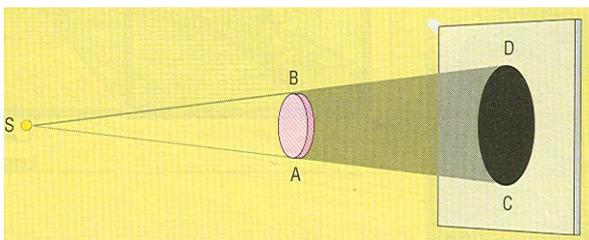
Corpi trasparenti, opachi, traslucidi

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**. Un **corpo opaco**, quando viene colpito dalla luce, in parte l'**assorbe**, in parte la **riflette** in una precisa direzione se la sua superficie esterna è liscia; se la superficie esterna è scabra, invia la luce in tutte le direzioni, cioè la **diffonde**. 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. Sono corpi traslucidi il vetro smerigliato, il vetro bianco, la carta oleata, la porcellana, la carta pergamena, l'alabastro.

La propagazione rettilinea della luce

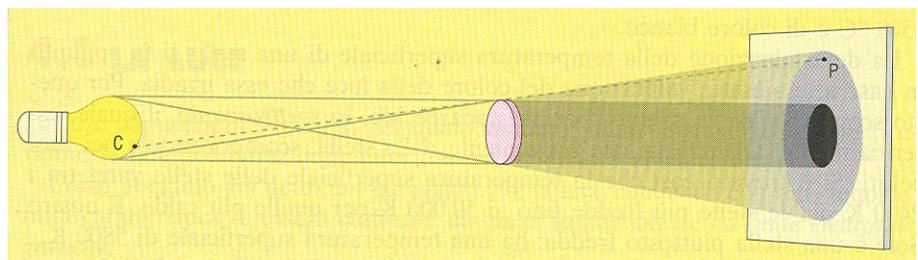
L'esperienza comune ci consente di affermare che la luce si propaga in linea retta. Una sorgente luminosa puntiforme va pensata come un punto dal quale partono in tutte le direzioni infiniti raggi luminosi rettilinei. **La formazione delle ombre dimostra che la luce si propaga in linea retta.**

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.



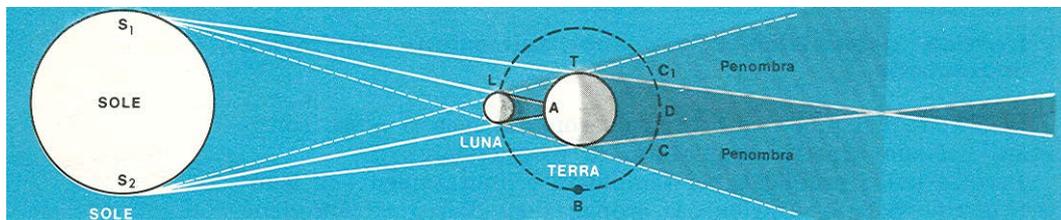
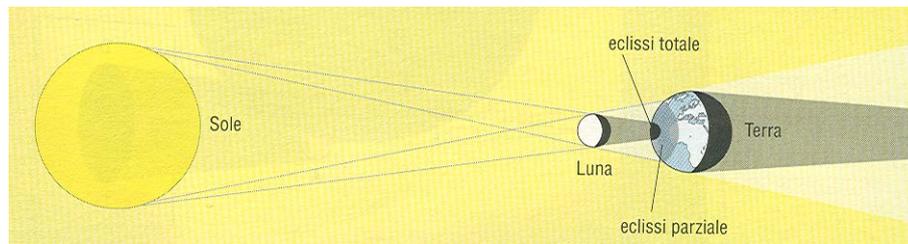
I raggi luminosi emessi da una sorgente puntiforme S si propagano in linea retta in tutte le direzioni. Un ostacolo AB posto sul loro cammino genera un'ombra netta su uno schermo.

Una lampadina è una sorgente di luce estesa. Un ostacolo posto di fronte a essa produce oltre alla zona d'ombra



Anche una zona di penombra. A quest'ultima appartengono quei punti che sono raggiunti solo da alcuni raggi emessi dalla sorgente. Per esempio, Il punto P dello schermo è illuminato dai punti della lampadina che stanno sopra C (e non da quelli che stanno sotto).

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. Nel punto A della Terra non arriva nessuno dei raggi provenienti dal Sole di modo che un osservatore posto in quel punto non vede il Sole. Naturalmente, a causa del movimento della Luna, il punto A rimane in ombra per poco tempo, in genere per circa due minuti. In ciò consiste il fenomeno dell'eclissi di Sole. Si ha l'eclissi di Luna quando la Terra si trova allineata tra il Sole e la Luna e questa si trova nella zona d'ombra proiettata dalla Terra.

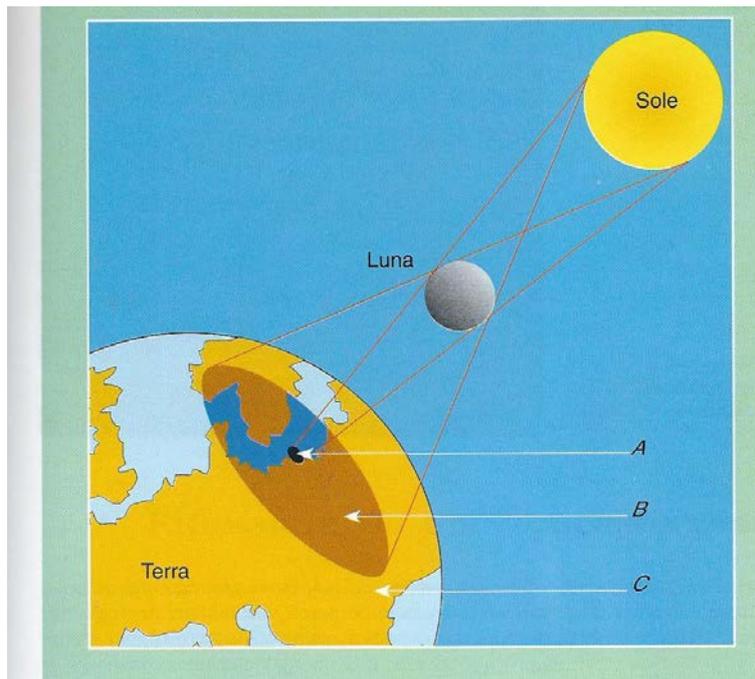


L'eclissi di Sole ha luogo quando la Luna si trova allineata tra la Terra ed il Sole. Dai punti della superficie terrestre che stanno nella zona d'ombra si osserva l'eclissi totale. Invece, dai punti che si trovano nella zona di penombra l'eclissi è parziale.

Nell'eclissi del sole della figura sottostante:

- la zona A è la zona di ombra: un osservatore che si trovi in un qualsiasi punto della zona A vede il Sole completamente oscurato dal disco lunare.
- la zona B è detta zona di penombra. Un osservatore che si trovi in un qualsiasi punto della zona B vede soltanto una eclissi parziale in quanto il Sole è solo parzialmente coperto dal disco lunare.

- nella zona C non c'è eclissi in quanto la zona è completamente libera.

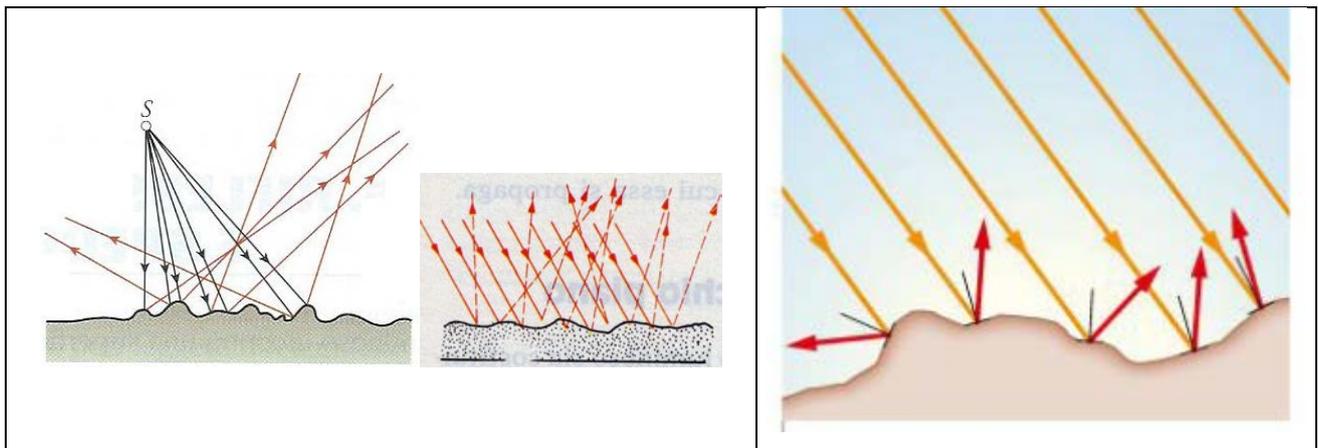


L'eclissi di Luna si verifica quando la Terra si trova tra il Sole e la Luna e intercetta i raggi solari oscurando totalmente o parzialmente la superficie della Luna.



La diffusione della luce

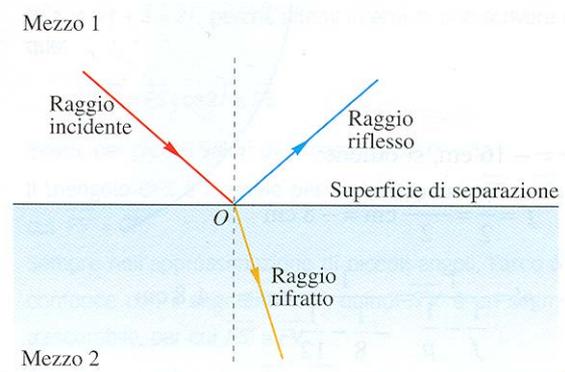
Quando la luce colpisce una superficie scabra essa viene riflessa in tutte le direzioni . Il fenomeno prende il nome di **diffusione della luce**. Nelle Figure è messa in evidenza la diffusione dei raggi luminosi emessi da una sorgente puntiforme S. Ciascun raggio incidente si riflette secondo le leggi 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.



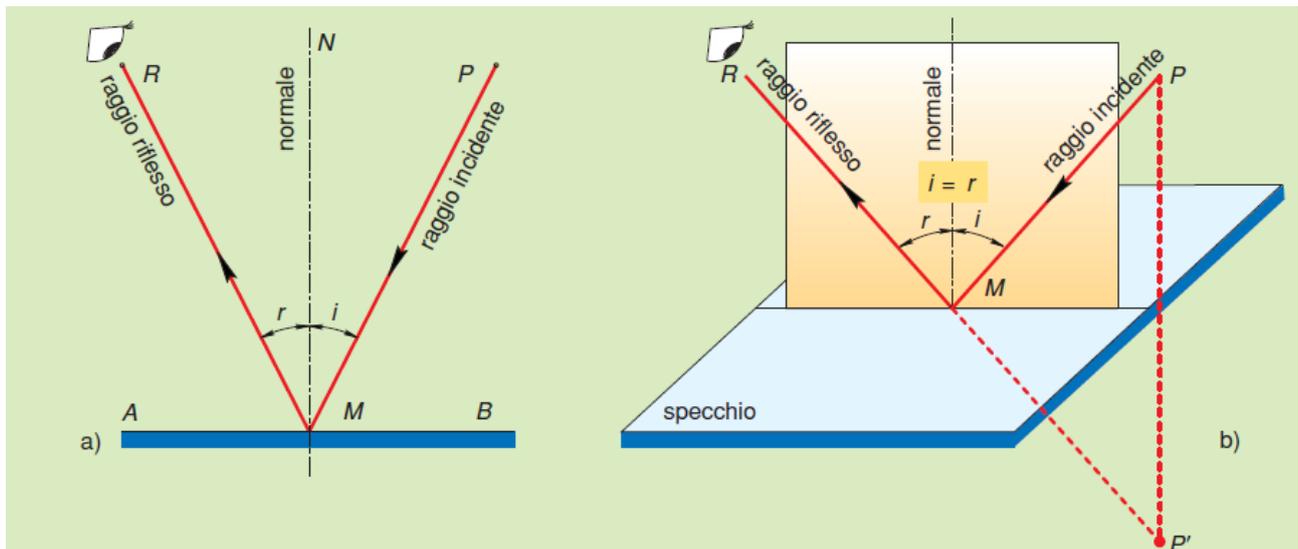
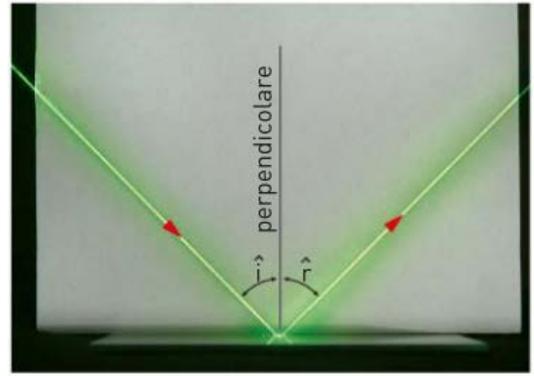
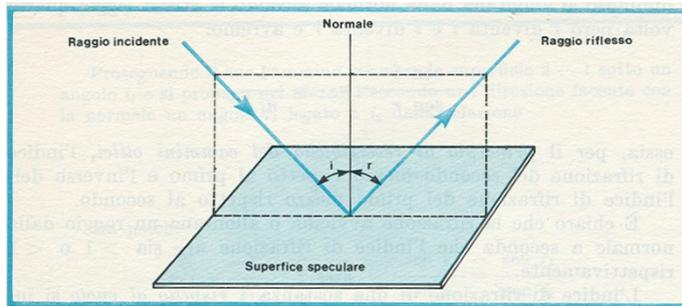
Se la superficie riflettente è scabra, ciascun raggio incidente si riflette rispettando le leggi della riflessione, ma i raggi riflessi hanno direzioni distribuite a caso.

La riflessione della luce

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. In generale, però, quando un fascio di raggi luminosi colpisce la superficie di separazione di due mezzi otticamente diversi, una parte della



luce è rinvia nel primo mezzo determinando il fenomeno della **riflessione**, una parte penetra nel secondo mezzo determinando il fenomeno della **rifrazione**.



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 sugli specchi piani

Uno **specchio** è una superficie perfettamente levigata che riflette la luce ricevuta in una ben precisa direzione: il **raggio riflesso** forma con la retta normale allo specchio nel punto di incidenza un angolo uguale a quello di incidenza: $\hat{i} = \hat{r}$

Uno specchio è generalmente costituito da una lastra di vetro con la faccia posteriore metallizzata. Quando la superficie riflettente è piana allora abbiamo lo **specchio piano**, quando è sferica abbiamo lo **specchio sferico**. 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** della sorgente **S**.

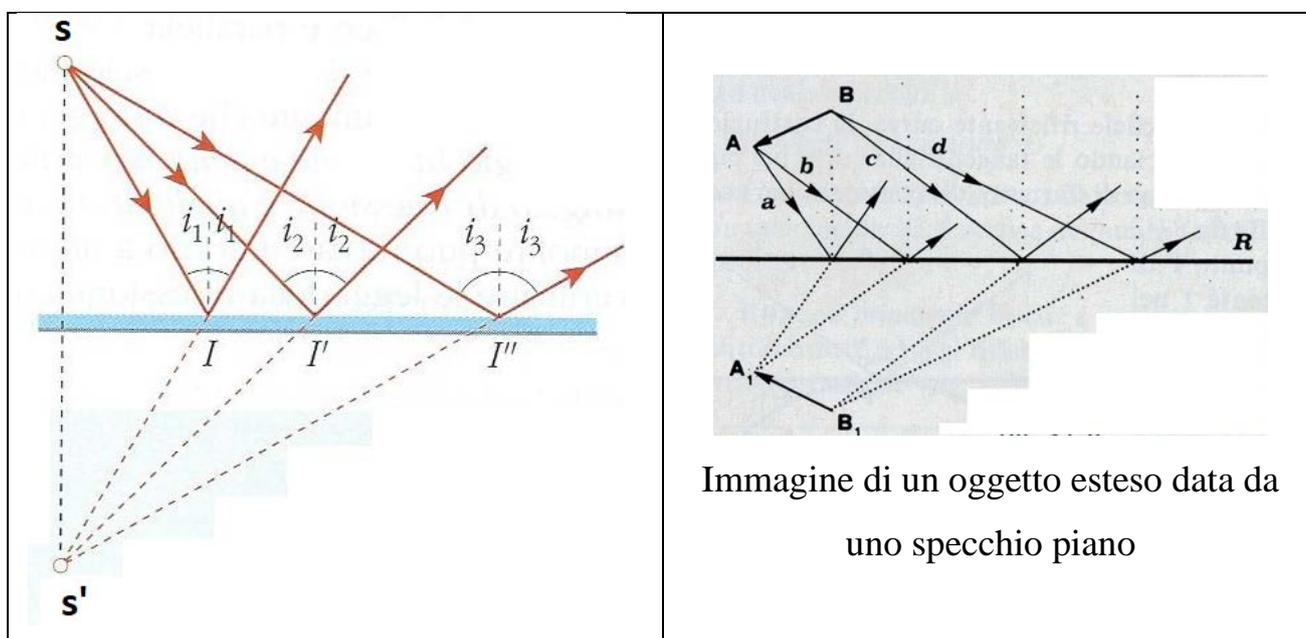
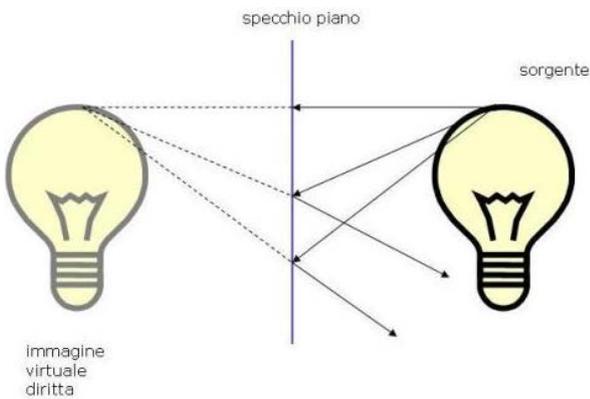
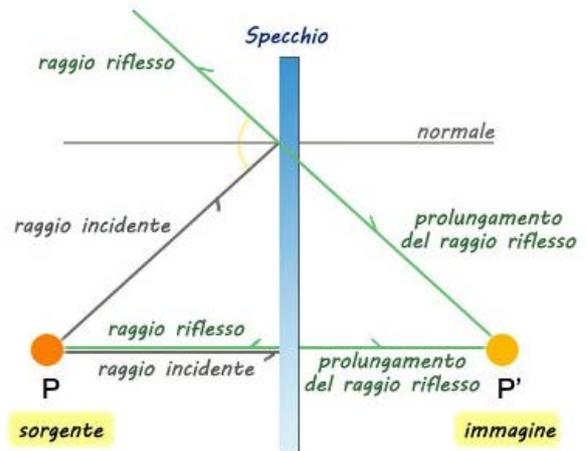
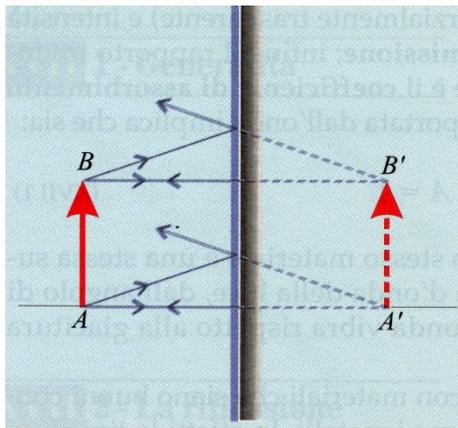


Immagine virtuale è quella che si ottiene quando i raggi riflessi che la determinano non si incontrano, mentre si incontrano i loro prolungamenti.

Immagine reale è quella che si ottiene quando i raggi riflessi si incontrano. Uno specchio piano forma un'immagine virtuale, dritta e di dimensioni uguali a quelle dell'oggetto.

In uno specchio piano l'immagine: • dista dallo specchio quanto l'oggetto posto di fronte allo specchio • è virtuale • è dritta • scambia la destra con la sinistra e viceversa • ha le stesse dimensioni dell'oggetto

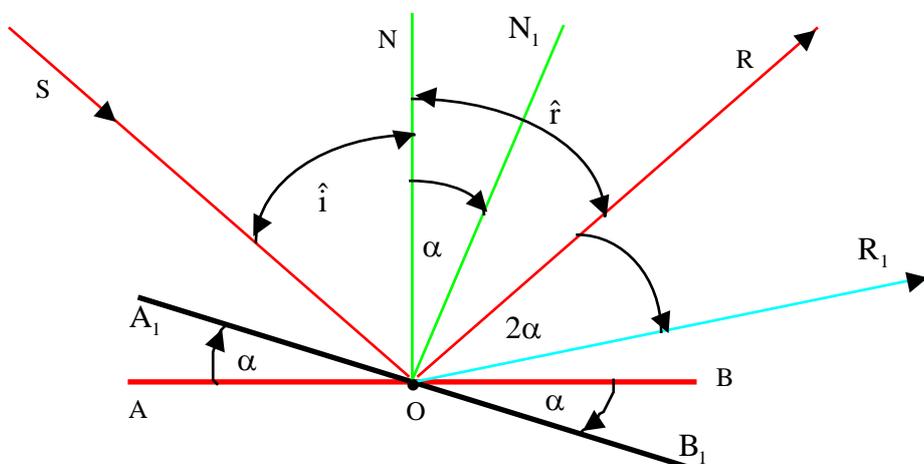




Uno specchio piano dà una immagine virtuale e diritta. L'ingrandimento trasversale G vale 1.

Specchio piano ruotante

Se uno specchio piano AB ruota di un angolo α attorno ad un asse appartenente allo specchio e passante per il punto O di incidenza di un raggio incidente SO fisso, il raggio riflesso OR ruoterà nello stesso verso di un angolo doppio 2α .



Ruotando lo specchio su cui si riflette un raggio luminoso fisso constatiamo che il raggio riflesso subisce una rotazione doppia rispetto a quella subita dallo specchio

Il raggio luminoso SO è fisso, incide sullo specchio piano AB e si riflette nel raggio luminoso OR . Lo specchio AB ruota in senso orario dell'angolo α . Il raggio luminoso fisso SO incontra in O lo specchio piano che occupa la posizione A_1B_1 e si riflette nel raggio luminoso R_1O . **Risulta:** $\widehat{ROR_1} = 2\alpha$

Dimostrazione

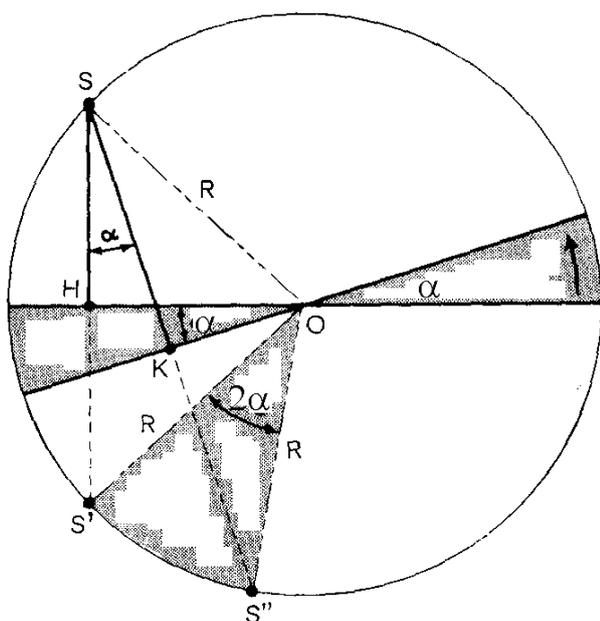
Sia AB uno specchio piano sul quale incide il raggio luminoso fisso SO che si riflette nel raggio luminoso OR . NO è la normale allo specchio nel punto di incidenza O .

$$\widehat{S\hat{O}N} = \hat{i} = \widehat{N\hat{O}R} = \hat{r}$$

Quando lo specchio ruota in senso orario di un angolo α portandosi nella posizione A_1B_1 il raggio luminoso fisso SO incidente sullo specchio piano in O si riflette nel raggio luminoso R_1O essendo adesso N_1O la normale nel punto di incidenza. Vogliamo dimostrare che il raggio riflesso OR ha subito una rotazione in senso orario di un angolo 2α . Intanto constatiamo che $\widehat{N\hat{O}N_1} = \widehat{A\hat{O}O_1} = \alpha$ in quanto ciascun lato del primo angolo è perpendicolare al rispettivo lato del secondo angolo ($NO \perp AB$, $N_1O \perp A_1B_1$).

$$\widehat{R\hat{O}R_1} = \widehat{S\hat{O}R_1} - \widehat{S\hat{O}R} = 2 \cdot \widehat{S\hat{O}N_1} - 2 \cdot \widehat{S\hat{O}N} = 2(\hat{i} + \alpha) - 2\hat{i} = 2\hat{i} + 2\alpha - 2\hat{i} = 2\alpha$$

Ne consegue che: **quando uno specchio piano ruota di un angolo α , l'immagine S' di una sorgente puntiforme S ruota di un angolo doppio 2α**



Facciamo ruotare lo specchio di un angolo α . Costruiamo le due immagini virtuali S' ed S'' relative alla posizione iniziale e finale dello specchio. I triangoli SOS' ed SOS'' sono isosceli. Deduciamo che: $SO = S'O$, $SO = S''O$ e quindi: $\boxed{SO = S'O = S''O}$. I tre punti S , S' , S'' Essendo equidistanti da O , appartengono ad una circonferenza di centro O e raggio OS . $\widehat{S'\hat{S}S''} = \widehat{H\hat{O}K} = \alpha$ in quanto $SS' \perp HO$, $SS'' \perp KO$. $\widehat{S'\hat{O}S''} = 2 \cdot \widehat{S'\hat{S}S''} = 2\alpha$ in quanto angoli al centro ed alla circonferenza che insistono sullo stesso arco $S'S''$.

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**

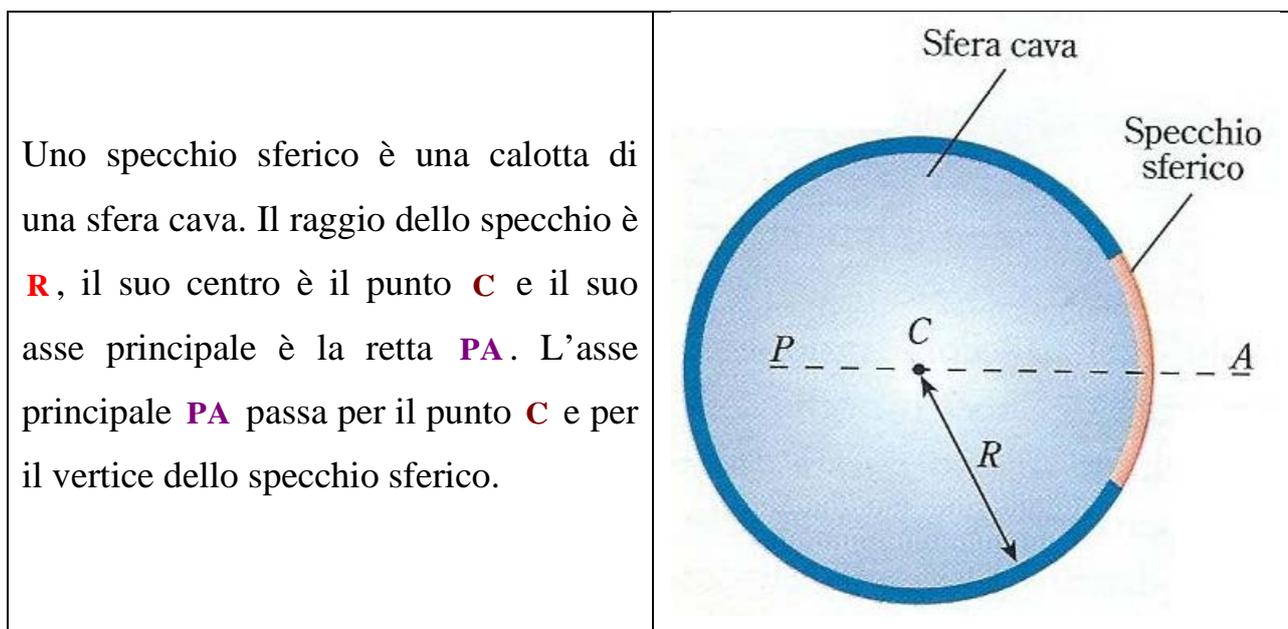
- d) **angolo di apertura**: angolo \widehat{ACB} individuato dai due raggi CA e CB condotti dal centro **C** e passanti per gli estremi A e B dell'arco sezione \widehat{AVB}

- 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

- Indicheremo con la lettera **p** la distanza oggetto-specchio, 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

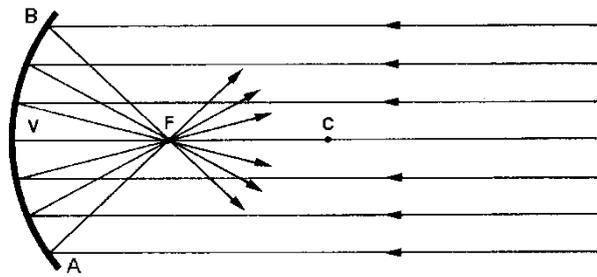


Per gli specchi sferici vale la legge dei punti coniugati: $\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f}$

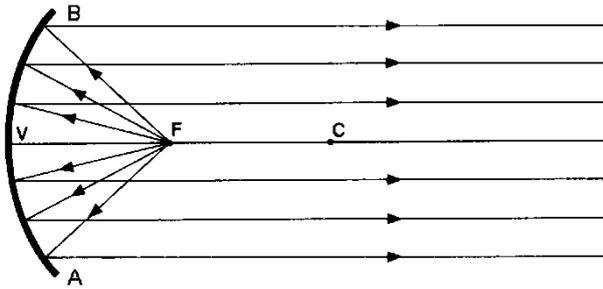
p = distanza dell'oggetto = distanza della sorgente dal vertice **V** dello specchio

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

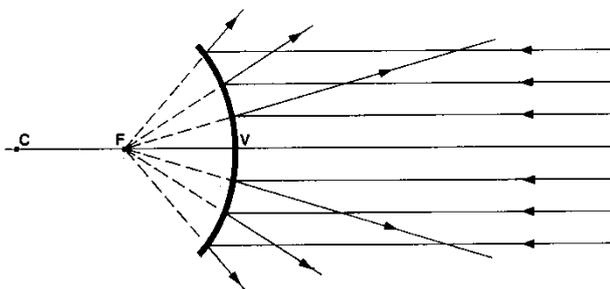
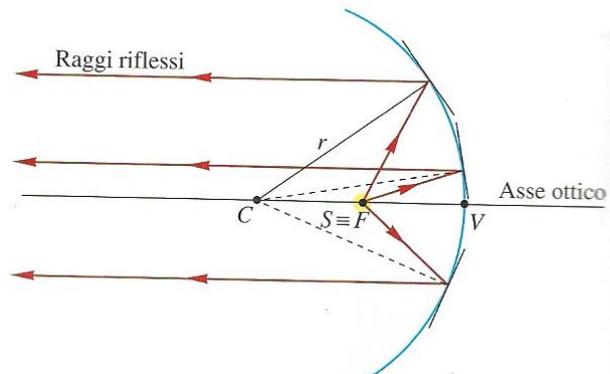
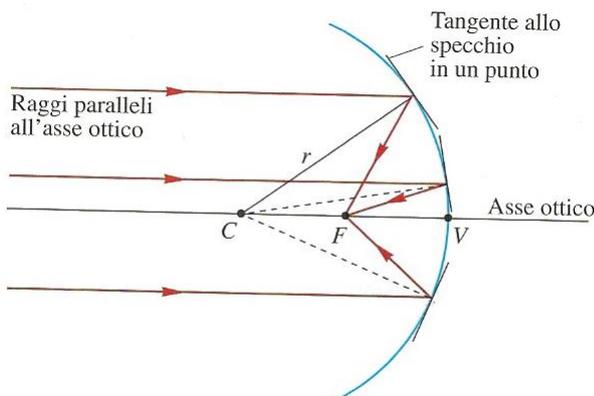
f = distanza focale = distanza del fuoco dal vertice **V** dello specchio



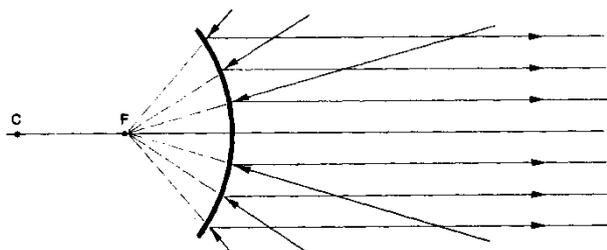
Riflessione di un fascio di raggi luminosi paralleli all'asse ottico principale di uno specchio sferico concavo: se lo specchio è di piccola apertura tutti i raggi riflessi convergono in un punto dell'asse ottico principale, chiamato fuoco. **Ogni raggio luminoso, parallelo all'asse ottico principale, si riflette passando per il fuoco**



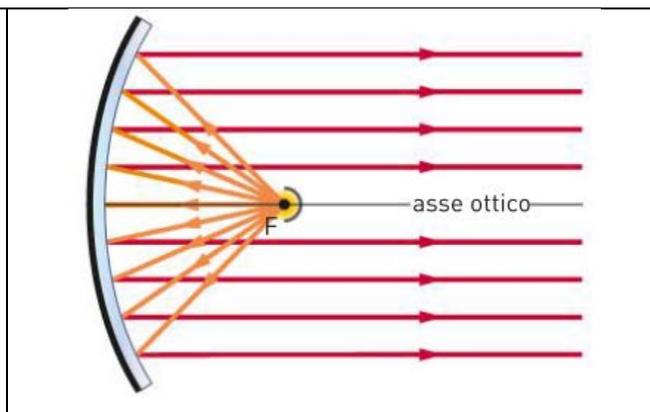
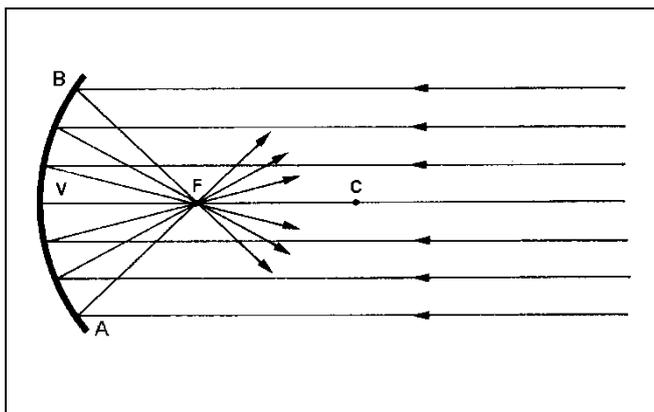
Un fascio di raggi luminosi provenienti da una sorgente puntiforme posta nel fuoco di uno specchio sferico di piccola apertura si riflette in un fascio di raggi luminosi paralleli all'asse ottico principale. **Ogni raggio luminoso passante per il fuoco si riflette parallelamente all'asse ottico principale**



Riflessione di un fascio di raggi luminosi paralleli all'asse ottico principale di uno specchio sferico convesso: **tutti i raggi riflessi divergono in modo che i loro prolungamenti passano per il fuoco dello specchio sferico**

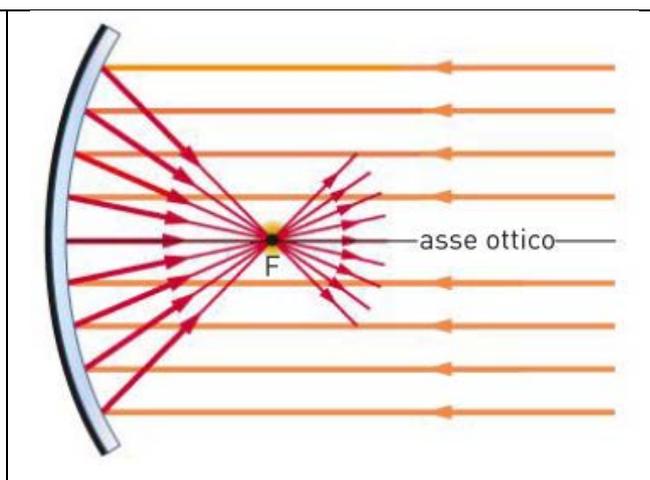
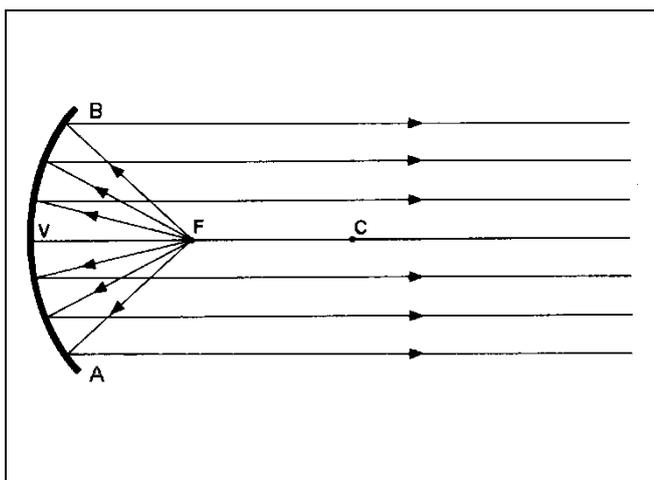


Intercettando con uno specchio sferico convesso un fascio di raggi luminosi i cui prolungamenti convergono nel fuoco dello specchio, per il principio della reversibilità del cammino ottico i raggi riflessi sono paralleli all'asse ottico principale.



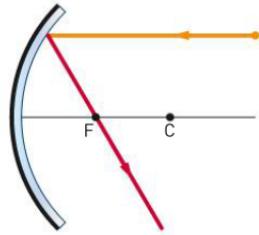
Riflessione di un fascio di raggi luminosi paralleli all'asse ottico principale di uno specchio sferico concavo: se lo specchio è di piccola apertura tutti i raggi riflessi convergono in un punto **F** dell'asse ottico principale, chiamato fuoco.

Ogni raggio luminoso, parallelo all'asse ottico principale, si riflette passando per il fuoco

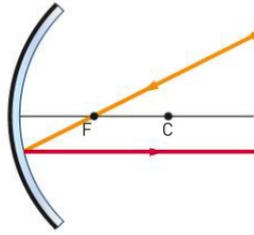


Un fascio di raggi luminosi provenienti da una sorgente puntiforme posta nel fuoco di uno specchio sferico di piccola apertura si riflette in un fascio di raggi luminosi paralleli all'asse ottico principale. **Ogni raggio luminoso passante per il fuoco si riflette parallelamente all'asse ottico principale**

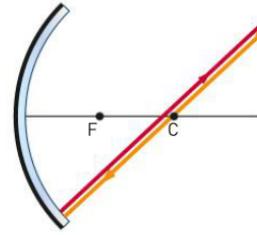
■ Un raggio che arriva parallelo all'asse ottico è riflesso nel fuoco.



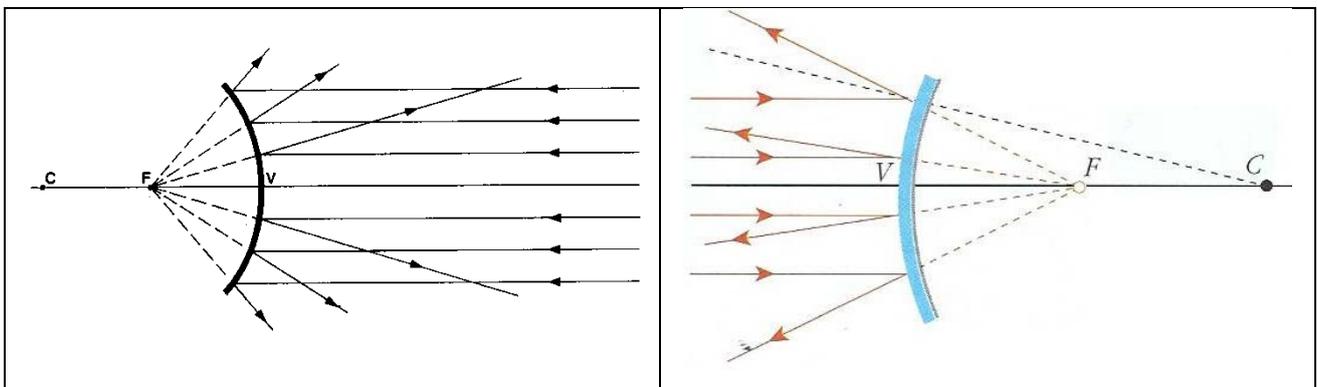
■ Un raggio che passa per il fuoco è riflesso parallelamente all'asse ottico.



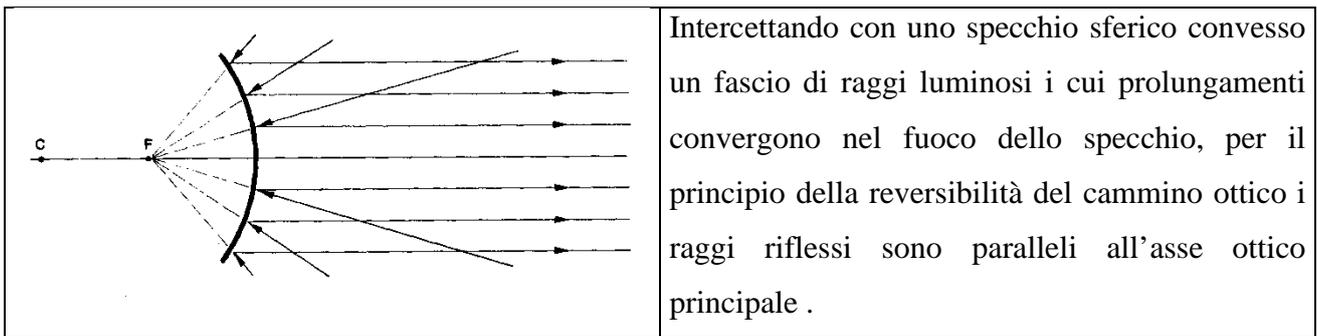
■ Un raggio che passa per il centro (i = 0) è riflesso su sé stesso.



L'immagine di un oggetto è reale se è determinata dall'intersezione dei raggi riflessi, è virtuale se è formata dall'intersezione dei loro prolungamenti-



Riflessione di un fascio di raggi luminosi paralleli all'asse ottico principale di uno specchio sferico convesso: tutti i raggi riflessi divergono in modo che i loro prolungamenti passano per il fuoco dello specchio sferico



Intercettando con uno specchio sferico convesso un fascio di raggi luminosi i cui prolungamenti convergono nel fuoco dello specchio, per il principio della reversibilità del cammino ottico i raggi riflessi sono paralleli all'asse ottico principale .

Formula dei punti coniugati

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

$f = \frac{r}{2}$ per gli specchi concavi, $f = -\frac{r}{2}$ per gli specchi convessi

Per i segni dei parametri p , q , f valgono le seguenti regole:

- il segno di q è **positivo** per le immagini reali, **negativo** per le immagini virtuali
- il segno di p è **sempre positivo**
- il segno di f è **positivo** per gli specchi concavi, **negativo** per gli specchi convessi

Formula dei punti coniugati: dimostrazione

Sia P un punto luminoso posto sull'asse **ottico principale**. Siano: (1) PR un generico raggio luminoso incidente sullo specchio sferico (2) CR la normale allo specchio nel punto d'incidenza (3) RQ il raggio riflesso del raggio incidente PR .

Applico al triangolo PRQ il teorema della bisettrice dell'angolo interno:

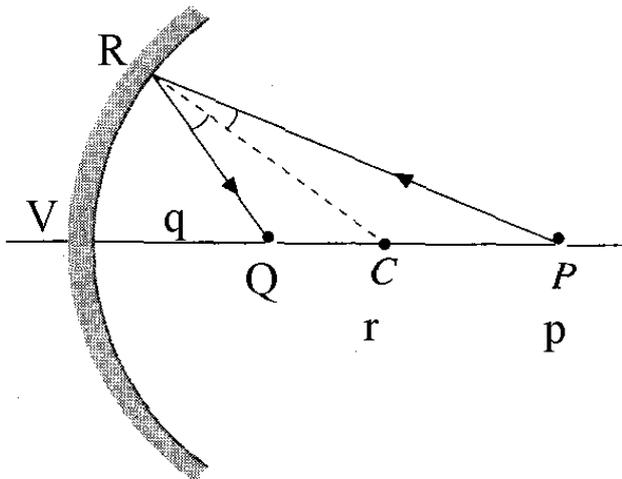
$$QC:CP=RQ:RP$$

Poiché lo specchio sferico è di piccola apertura (**approssimazioni di Gauss**) risulta:

$$PR=PQ=p \quad , \quad QR=QV=q \quad , \quad QC = r - q \quad , \quad CP = p - r$$

$$(r - q):(p - r) = q:p \quad , \quad q(p - r) = p(r - q) \quad , \quad qp - rq = pr - pq \quad , \quad pr + rq = 2pq$$

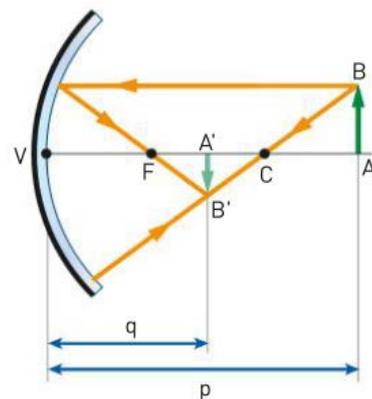
Dividendo ambo i membri per pqr e ricordando che $r = 2f$ abbiamo: $\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{2}{r} = \frac{1}{f}$



Questa relazione, nota come **formula dei punti coniugati** dello specchio sferico, ci consente di determinare la distanza **q** del punto immagine **Q** dal vertice dello specchio, quando conosciamo la distanza **p** del punto oggetto **P** (sorgente luminosa) dal vertice stesso ed il raggio **r** della calotta sferica.

$$q(p - r) = p(r - q) \Rightarrow \frac{r - q}{p - r} = \frac{q}{p}$$

La distanza **p** dell'oggetto dal vertice **V** dello specchio, la distanza **q** dell'immagine e la distanza focale sono legate tra loro dalla legge dei punti coniugati.

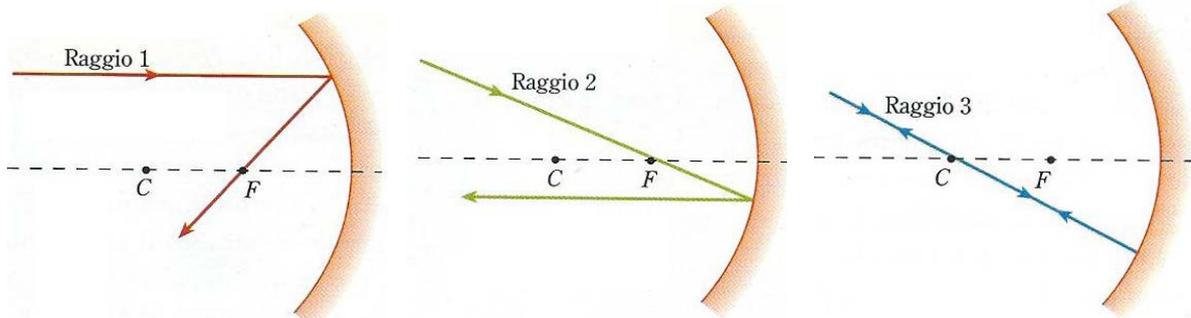


La costruzione grafica dell'immagine di un oggetto luminoso negli specchi sferici

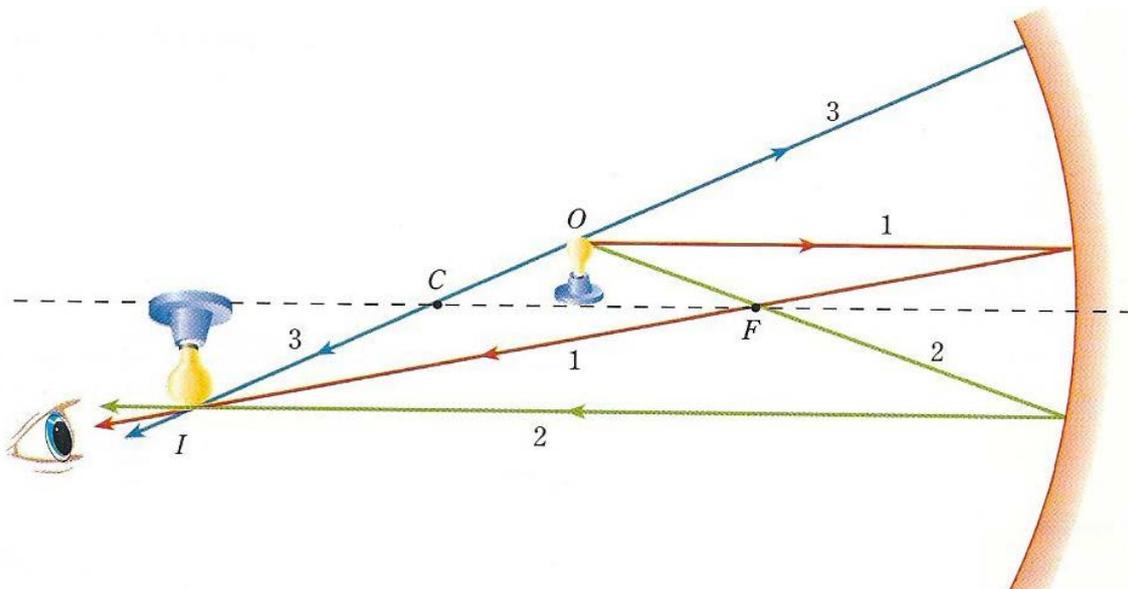
L'esperienza mostra che, ponendo un oggetto luminoso davanti allo specchio dalla parte della superficie riflettente, otteniamo una immagine avente generalmente dimensioni diverse dall'oggetto. Vediamo come possiamo costruire graficamente l'immagine di un oggetto luminoso. Per semplicità consideriamo solo oggetti lineari che fungono da sorgenti, per esempio un segmento AB rappresentato da una freccia. La costruzione grafica dell'immagine di un oggetto luminoso si realizza ricordando che:

- un raggio luminoso parallelo all'asse ottico principale viene riflesso attraverso il fuoco
- un raggio luminoso che passa per il fuoco viene riflesso parallelamente

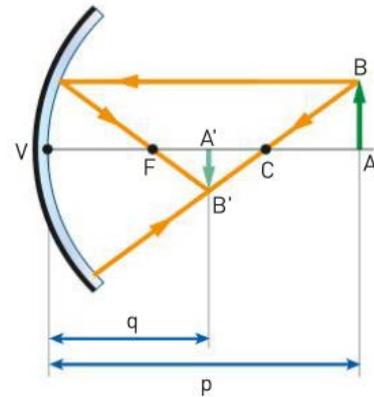
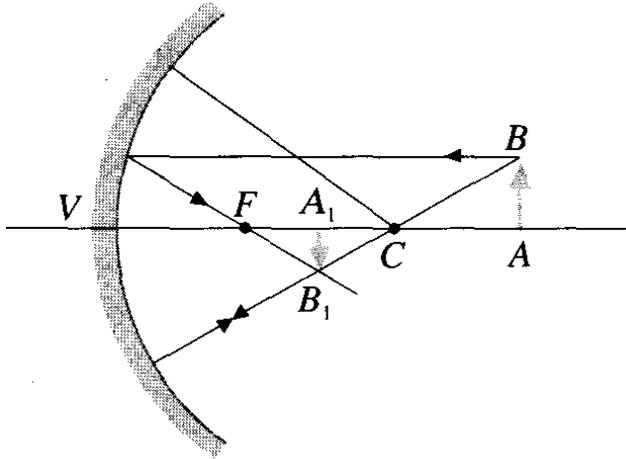
all'asse ottico principale • un raggio luminoso che passa per il centro dello specchio viene riflesso nella stessa direzione, cioè raggio incidente e raggio riflesso si trovano sulla stessa retta ma hanno versi opposti.



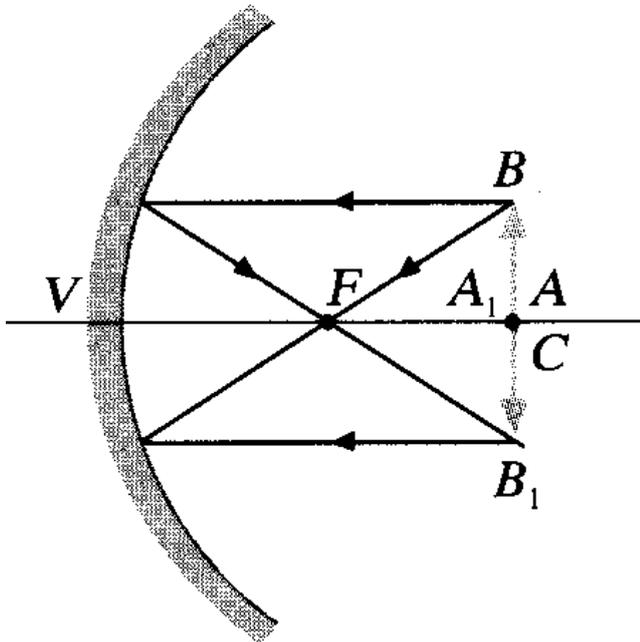
I tre particolari raggi utilizzati per determinare l'immagine di un oggetto luminoso ottenuta mediante uno specchio sferico concavo.



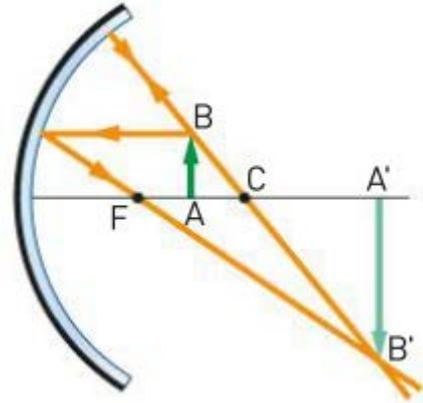
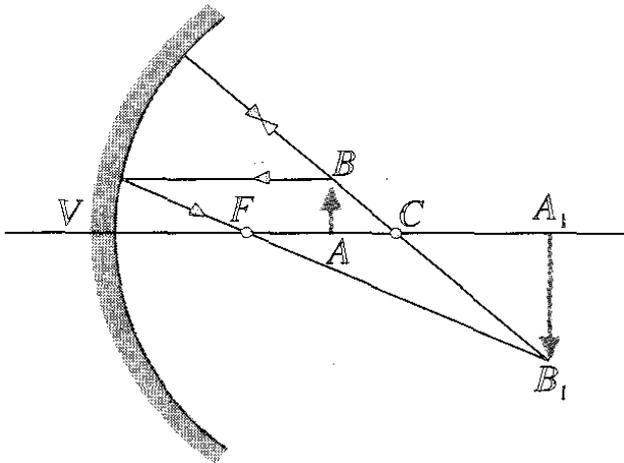
L'immagine \mathcal{I} formata dall'oggetto \circ è reale ed è stata tracciata utilizzando i tre raggi particolari a partire dall'oggetto \circ .



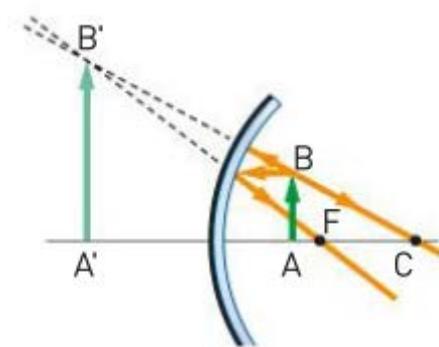
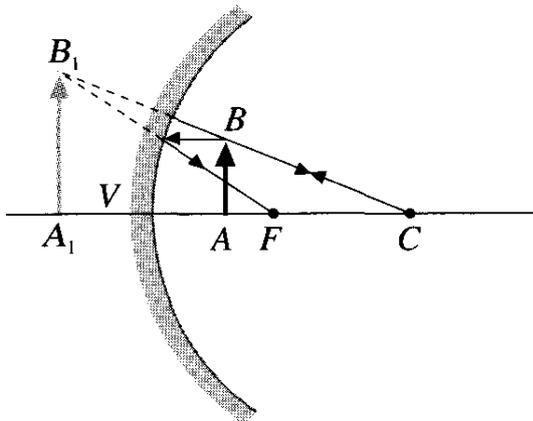
Se la sorgente AB è posta tra l'infinito ed il centro dello specchio, l'immagine A_1B_1 è reale, capovolta, rimpicciolita e situata tra il fuoco ed il centro dello specchio



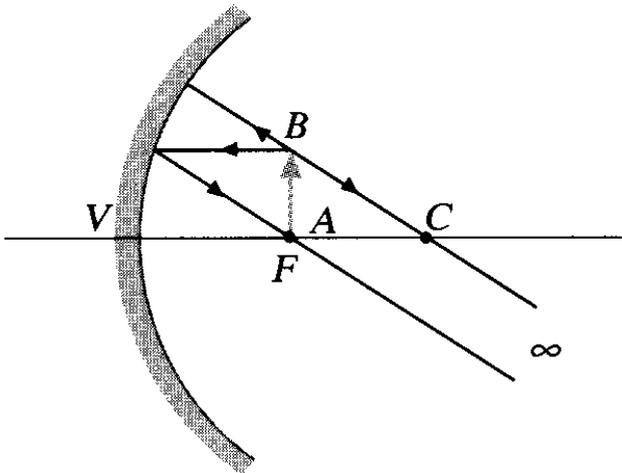
Lo specchio è concavo. L'oggetto AB è posto nel centro di curvatura C ; l'immagine A_1B_1 è anch'essa in C , è reale, capovolta ed ha le stesse dimensioni dell'oggetto.



Se la sorgente AB è posta tra il centro ottico ed il fuoco, l'immagine A_1B_1 è reale, capovolta, ingrandita e collocata tra il centro ottico e l'infinito



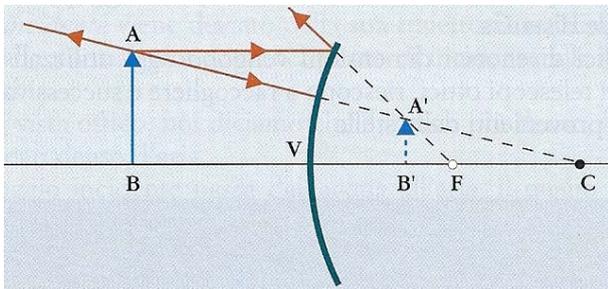
Se la sorgente AB è posta tra il fuoco e lo specchio, l'immagine A_1B_1 è virtuale, diritta ed ingrandita



Quando la sorgente si trova nel piano focale (**sorgente nel fuoco**), cioè nel piano normale all'asse ottico principale e passante per il fuoco, i raggi riflessi dallo specchio formano un fascio di luce parallela che si proietta all'**infinito**, senza dare alcuna immagine distinta.

Questo significa che se l'oggetto è posto sul fuoco dello specchio sferico, non è possibile raccogliere l'immagine dell'oggetto perché l'immagine sarà proiettata all'infinito.

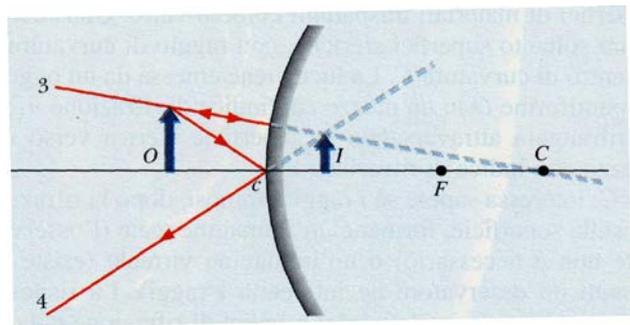
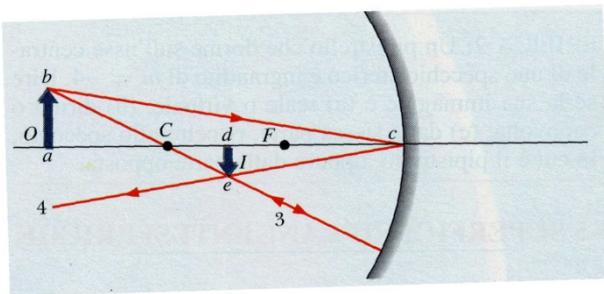
Conclusione: Lo specchio è **concavo**. L'oggetto AB è posto sul fuoco F; l'**immagine** è all'infinito.

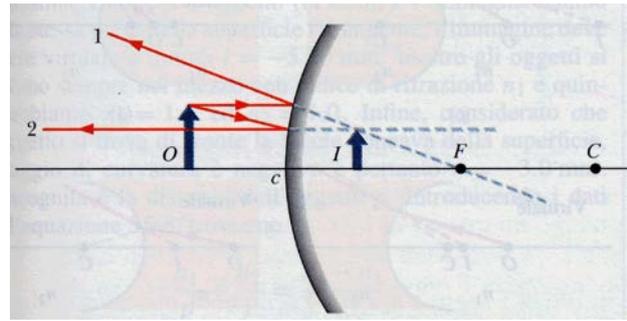
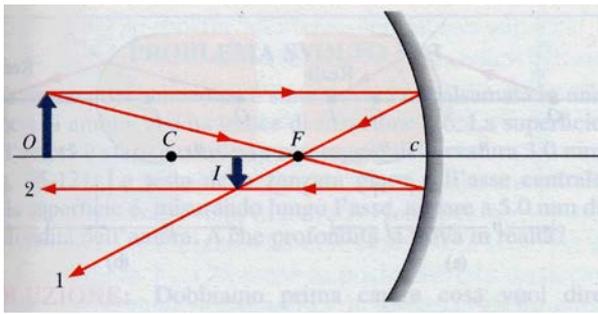


Specchio convesso

Negli specchi convessi, qualunque sia la posizione dell'oggetto, l'immagine è sempre virtuale, dritta, rimpicciolita e disposta tra il vertice e il fuoco.

Uno specchio convesso produce sempre un'immagine virtuale, dritta e rimpicciolita.





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:
$$G = \frac{A'B'}{AB} = -\frac{q}{p} = -\frac{f}{p-f}$$

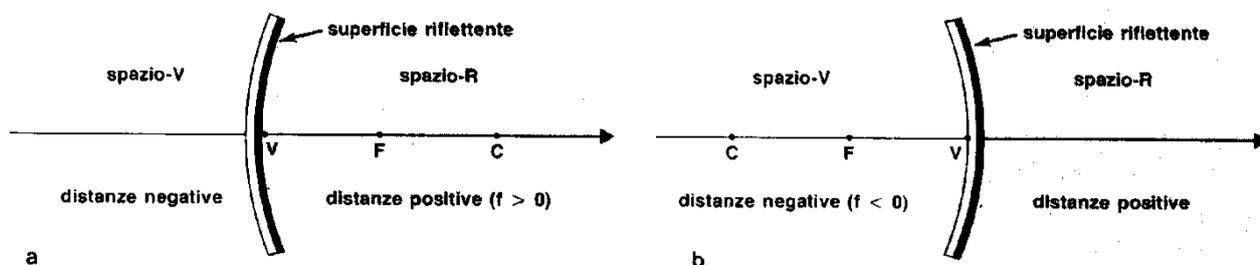
La relazione trovata vale sia per gli specchi concavi che per quelli convessi. In tale relazione i segni delle tre grandezze **p**, **q**, **f** devono sempre essere presi con i loro segni convenzionali. Così l'ingrandimento **G** risulta positivo quando l'immagine è dritta rispetto all'oggetto e negativo quando l'immagine è capovolta.

Convenzione dei segni delle distanze per gli specchi sferici

Nella formula dei punti coniugati **p**, **q**, **f** rappresentano misure algebriche rispettivamente della distanza dell'oggetto, dell'immagine, del fuoco. Vediamo quali convenzioni dobbiamo seguire per individuare il segno di ciascuna delle tre grandezze indicate.

Cominciamo con l'introduzione dei concetti di **spazio reale** o **spazio R** e di **spazio virtuale** o **spazio V**. Lo spazio **R** è lo spazio da cui arriva la luce e si formano le immagini reali; lo spazio **V** è lo spazio che si trova dall'altra parte dello specchio rispetto a quello da cui arriva la luce ed in cui si formano le immagini virtuali.

Per **convenzione** la distanza di un punto dallo specchio si considera positiva se si trova nello spazio R e negativa se si trova nello spazio V (nella pratica ciò equivale ad assumere come semiasse positivo dell'asse ottico principale quello contenuto nello spazio R).

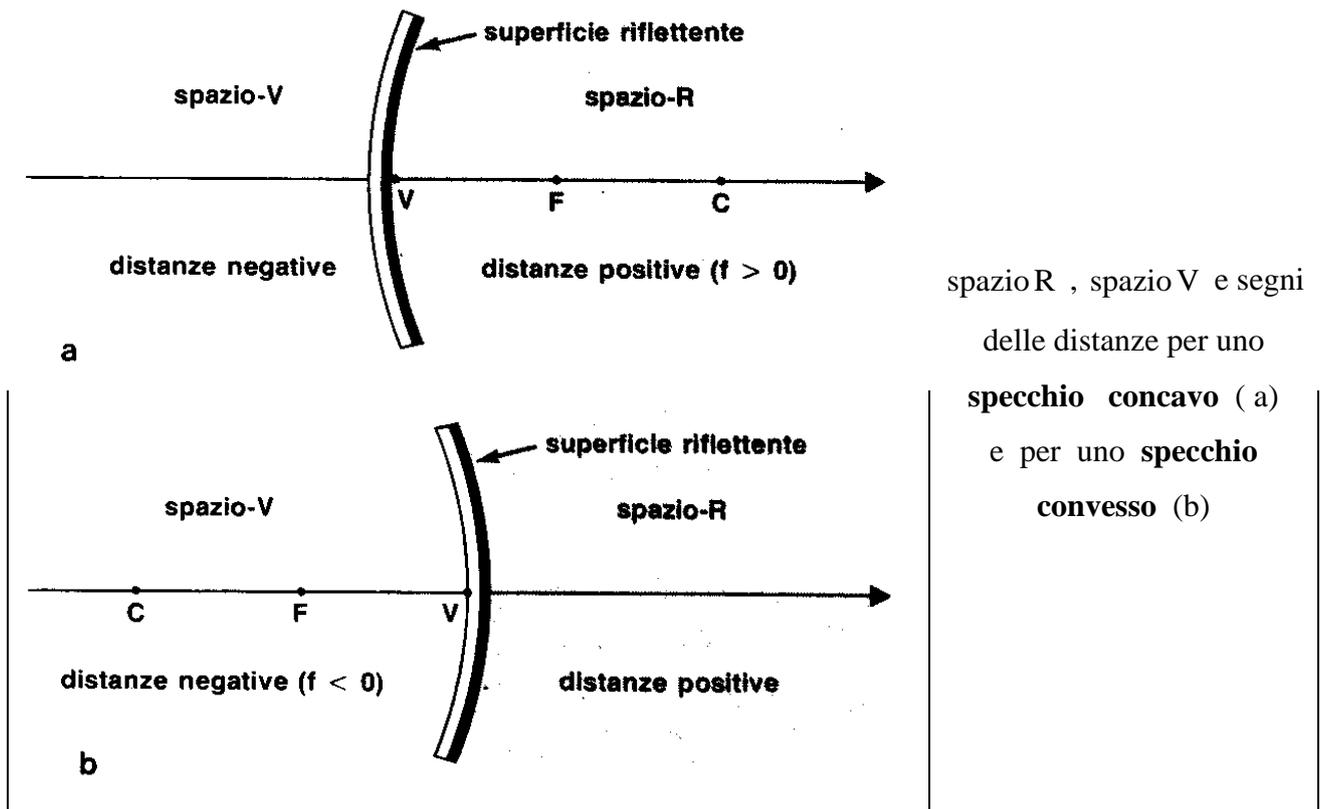


Questa convenzione sui segni delle distanze vale tanto per un punto oggetto quanto per un punto immagine. Anche alla distanza focale ed al raggio r dello specchio bisogna attribuire un segno. Esso è positivo per uno specchio concavo in quanto in esso il fuoco F ed il centro C stanno nello spazio R, mentre è negativo per uno specchio convesso in quanto in questo tipo di specchio il fuoco F ed il centro C stanno nello spazio V. La convenzione sui segni può essere estesa anche all'ingrandimento $G = \frac{q}{p}$. **L'ingrandimento trasversale G è positivo se**

l'immagine è capovolta rispetto all'oggetto; è negativo se l'immagine è diritta rispetto all'oggetto.

Alcuni autori preferiscono rappresentare un'immagine capovolta mediante un ingrandimento negativo ed una diritta mediante un ingrandimento positivo. Per aderire a questa nuova convenzione basta fare precedere dal segno meno le formule di G, scrivendole così:

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



| SPECCHIO CONCAVO | | | |
|---------------------------|-----------------------------|-----------------------|--|
| Distanza oggetto-specchio | Distanza immagine-specchio | Ingrandimento lineare | Tipo di immagine |
| $p \rightarrow \infty$ | $q = f$ | $G = 0$ | reale, puntiforme |
| $p > 2f$ | $f < q < 2f$ | $-1 < G < 0$ | reale, capovolta, rimpicciolita |
| $p = 2f$ | $q = 2f$ | $G = -1$ | reale, capovolta, di dimensioni uguali |
| $f < p < 2f$ | $q > 2f$ | $G < -1$ | reale, capovolta, ingrandita |
| $p = f$ | $q \rightarrow \infty$ | | |
| $p < f$ | $q < 0, q > p$ | $G > 1$ | virtuale, diritta, ingrandita |
| SPECCHIO CONVESSO | | | |
| qualsiasi | $q < 0, q < p, q < f $ | $0 < G < 1$ | virtuale, diritta, rimpicciolita |

10) La concezione della luce attraverso i secoli

La teoria corpuscolare della luce, la cui prima vaga formulazione risale a **Democrito (460-365 a.C.)** e ad **Empedocle (483-423 a.C.)**, fu per la prima volta presentata in una forma rigorosa da **Cartesio** nel **1637** nel trattato **Diottrica**, e fu successivamente ripresa e sviluppata da **Newton (1669)**, uno dei più convinti assertori. Secondo **Newton**, la luce è costituita da uno sciame di particelle, che, espulse con grandissima velocità dalle sorgenti luminose, attraversano i corpi trasparenti muovendosi per inerzia secondo traiettorie rettilinee che formano i **raggi luminosi**. In base a questa ipotesi, **Newton** riuscì a giustificare fenomeni come la riflessione, la rifrazione, la dispersione e la doppia rifrazione della luce che costituivano i principali fatti sperimentali noti al suo tempo. La teoria corpuscolare di **Newton** fu così geniale ed esauriente da avere, per secoli, numerosi quanto illustri proseliti, tra i quali ricordiamo Laplace, Malus, Biot, Brewster. Ancora oggi le teorie più moderne riconoscono che, per alcuni aspetti, la luce si comporta in modo simile ad un fascio di corpuscoli (i fotoni).

Accanto alla teoria ipotizzata da **Newton**, fu introdotta la teoria ondulatoria della luce. Questa teoria fece la sua prima apparizione soltanto nel **1690** con il trattato *Traité de la Lumière* di Cristian Huygens e perfezionata successivamente da Young e Fresnel. Tale teoria si fonda sull'ipotesi che la luce si propaga mediante onde elettromagnetiche generate da qualche sorgente luminosa e che la propagazione avvenisse in un ipotetico mezzo imponderabile chiamato etere che occupa tutto lo spazio. Secondo tale ipotesi la luce è costituita da un rapidissimo vibrare dell'etere del tutto simile ad un'onda sonora che si propaga nell'aria.

Tale onda trasporta energia e si propaga nel vuoto alla velocità $c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ di gran lunga superiore alla velocità di un'onda sonora. Dunque l'etere deve possedere proprietà meccaniche particolari mai rivelate nei processi fisici osservati.

Oltre a spiegare tutte le leggi dell'ottica geometrica la teoria ondulatoria spiega facilmente l'interferenza, la diffrazione e la polarizzazione che non trovano alcuna spiegazione nella teoria puramente corpuscolare. Sarà Einstein a dimostrare che la luce ha una natura duale, cioè è onda e corpuscolo.

Misura elementare degli angoli e degli archi

Per misurare gli angoli o gli archi ci serviremo di uno dei due seguenti sistemi:

(a) sistema sessagesimale (b) sistema radiale o circolare o ciclotometrico

Sistema sessagesimale

In questo sistema l'unità di misura degli angoli è l'angolo grado o semplicemente grado, cioè la 360^a parte dell'angolo giro, mentre l'unità di misura degli archi (di circonferenza) è l'arco grado, cioè la 360^a parte della circonferenza.

Sistema radiale

Un angolo $\alpha = a\hat{b}$ lo possiamo considerare sempre come angolo al centro di due (o più) circonferenze concentriche di raggi arbitrari OA ed OA' . Detti \widehat{AB} ed $\widehat{A'B'}$ gli archi corrispondenti, per un noto teorema di geometria euclidea, possiamo scrivere :

$AB:A'B' = OA:OA'$ ed anche: $\frac{AB}{OA} = \frac{A'B'}{OA'} = \alpha^R$ cioè il rapporto tra l'arco (individuato

su una circonferenza qualsiasi di centro O) ed il rispettivo raggio dipende esclusivamente dall'angolo e non dalla circonferenza considerata.

Tale rapporto (indicato col simbolo α^R) si assume come misura dell'angolo in radianti.

L'angolo $a\hat{O}b$ individua su una circonferenza di centro O e raggio r un arco MN di lunghezza ℓ . Il rapporto $\alpha^R = \frac{\ell}{r}$ [1], misura in radianti dell'angolo $a\hat{O}b$, dicesi anche misura in radianti dell'arco $MN = \ell$.

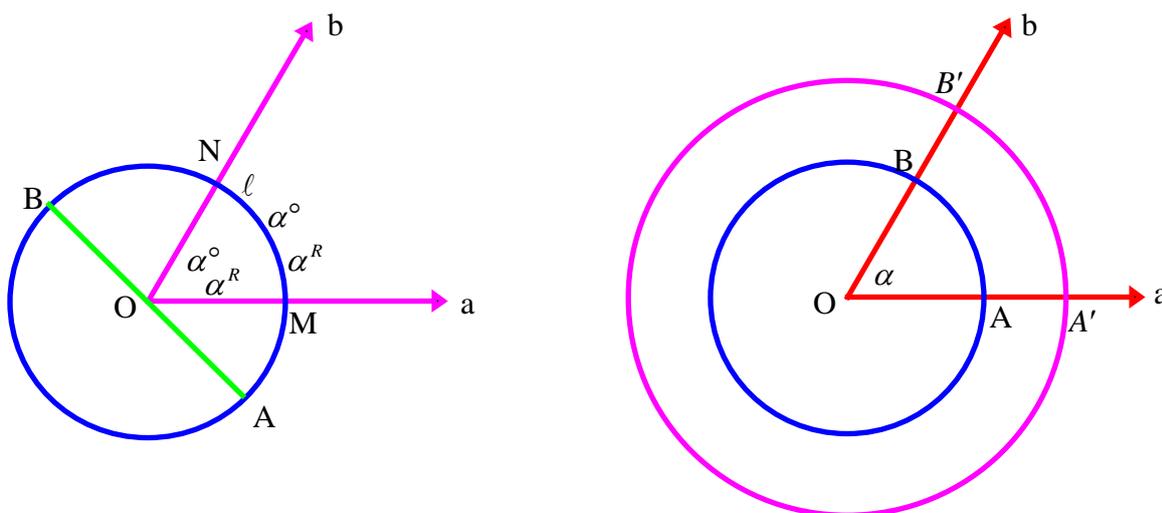
Se l'arco MN rettificato è lungo quanto il raggio della circonferenza cui appartiene abbiamo $\ell = r$ e quindi: $\alpha^R = \frac{r}{r} = 1 \text{ radiante} = 1^R$ cioè l'arco radiante è quell'arco lungo quanto il raggio della circonferenza che lo contiene.

Di conseguenza l'angolo radiante è quell'angolo che, posto col vertice nel centro di una qualsiasi circonferenza, sottende un arco lungo quanto il raggio.

La misura (α^R) in radianti di un angolo o di un arco è un numero puro in quanto rapporto di due grandezze (**lunghezze**) omogenee.

La misura di un angolo (arco) in radianti è detta **misura ciclotometrica** dell'angolo (arco).

La **misura ciclotometrica** di un arco coincide con la **misura ciclotometrica** del corrispondente angolo al centro. Dalla [1] ricaviamo: $\ell = \alpha^R \cdot r$ [2] cioè moltiplicando il raggio per la misura in radianti dell'arco si ottiene la lunghezza dell'arco stesso.



Per passare dalla misura di un angolo in gradi a quella in radianti e viceversa basta applicare la seguente proporzione:

$$\alpha^R : \pi = \alpha^\circ : 180^\circ \quad \text{cioè: } \alpha^R = \frac{\alpha^\circ}{180^\circ} \cdot \pi \quad \alpha^\circ = \frac{\alpha^R}{\pi} \cdot 180^\circ$$

La misura in radianti di un angolo la cui misura in gradi è **1** la si ottiene ponendo

nella [4] 1° al posto di α° , cioè: $1^\circ = \frac{\pi}{180} = 0,01745 \dots \text{radianti}$

la misura in gradi di un angolo la cui misura in radianti è **1** la si ottiene ponendo nella

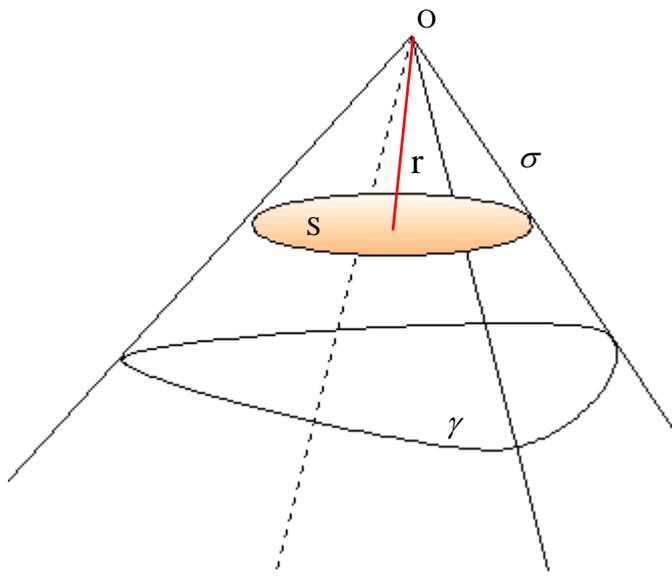
[5] 1^R al posto di α^R , cioè: $1^R = \frac{180^\circ}{\pi} = 57^\circ 17' 44'', 806L$

- Calcolare la misura in radianti degli angoli interni dei poligoni regolari di 3, 4, 5, 6, 10 lati.

$$\vartheta_3 = \pi \cdot \frac{60^\circ}{180^\circ} = \frac{\pi}{3}, \quad \vartheta_4 = \pi \cdot \frac{90^\circ}{180^\circ} = \frac{\pi}{2}, \quad \vartheta_5 = \pi \cdot \frac{108^\circ}{180^\circ} = \frac{3}{5}\pi, \quad \vartheta_6 = \pi \cdot \frac{120^\circ}{180^\circ} = \frac{2}{3}\pi$$

$$\vartheta_{10} = \pi \cdot \frac{144^\circ}{180^\circ} = \frac{4}{5}\pi$$

Altra definizione di angolo solido



Tutte le rette dello spazio passanti per un punto O e che si appoggiano alla curva piana γ (**direttrice del cono**) formano la superficie di un cono, la quale divide lo spazio in due regioni ciascuna delle quali si dice **angolo solido**. Otteniamo la sua misura in **steradiani** costruendo una superficie sferica di raggio r con centro nel vertice O del cono, e misurando l'area S della calotta sferica intercettata dal cono.

Si consideri una superficie conica σ avente forma qualsiasi (anche non circolare). Si chiama **angolo solido**, limitato dal cono in questione, l'insieme dei punti dello spazio non esterni al cono stesso. Consideriamo una sfera di raggio r arbitrario, avente il centro nel vertice del cono. Su di essa il cono stacca una calotta sferica di area S . Il rapporto tra l'area S ed il quadrato del raggio della sfera: $\omega = \frac{S}{r^2}$ non dipende da r (essendo l'area S proporzionale ad r^2) ma solo dall'ampiezza del cono. Si assume come misura dell'angolo solido considerato il valore di tale rapporto. L'angolo solido così definito viene misurato in **steradiani** (sr) . **Lo steradiante è l'angolo solido che su una sfera avente il centro nel suo vertice stacca una superficie d'area pari al quadrato del raggio.** L'angolo solido totale (coincidente con l'intero spazio tridimensionale) misura 4π sr .