

OTTICA GEOMETRICA ed OTTICA FISICA

La luce e la sua natura

La luce è un fenomeno di natura ondulatoria dovuto alla propagazione di onde trasversali *elettromagnetiche* prodotte dalle oscillazioni degli elettroni atomici.

L'emissione, la propagazione e l'assorbimento della luce possono essere quindi descritti utilizzando le leggi dei fenomeni ondulatori.

Tuttavia esistono dei particolari eventi (problema del corpo nero, effetto fotoelettrico) che possono essere spiegati solo assumendo per la luce una natura corpuscolare:

DUALISMO ONDA - PARTICELLA.

OTTICA GEOMETRICA ed OTTICA FISICA

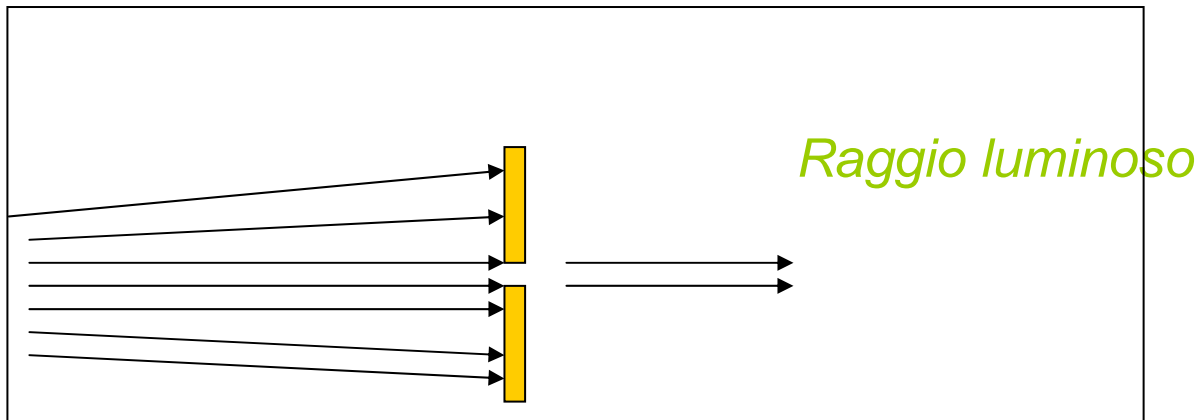
- L'**ottica fisica** è quella parte della fisica che studia i fenomeni di propagazione della luce attraverso mezzi di natura diversa per i quali si applicano le leggi delle onde.
-
- L'**ottica geometrica** può essere applicata nell'ipotesi che le dimensioni dei mezzi siano molto maggiori della lunghezza d'onda della luce. In questa ipotesi si può trascurare l'aspetto ondulatorio e assumere che la luce si propaga in un dato mezzo in linea retta: concetto di **raggio luminoso**.

Raggio luminoso

Nell'ipotesi di una sorgente luminosa posta a distanza infinita, introducendo uno schermo con un piccolo foro centrale, si osserva

come la luce emerga proseguendo in linea retta con una ampiezza pari alle dimensioni del foro stesso: questo fascio di luce è definito come **raggio luminoso**.

Propagazione lineare della luce



Velocità della luce e indice di rifrazione

La luce, come in generale le onde elettromagnetiche, si propagano nel vuoto ad una velocità costante **c** pari a **$2.9975 \times 10^8 \text{ m/s}$** .

In un qualsiasi altro mezzo si verifica sperimentalmente come la velocità della luce **v** sia minore di **c** e dipende dalle caratteristiche fisiche del mezzo.

Si definisce come **indice di rifrazione n** per un dato mezzo il rapporto tra la velocità della luce nel vuoto e la corrispondente nel mezzo in questione:

$$n = c / v \qquad n > 1$$

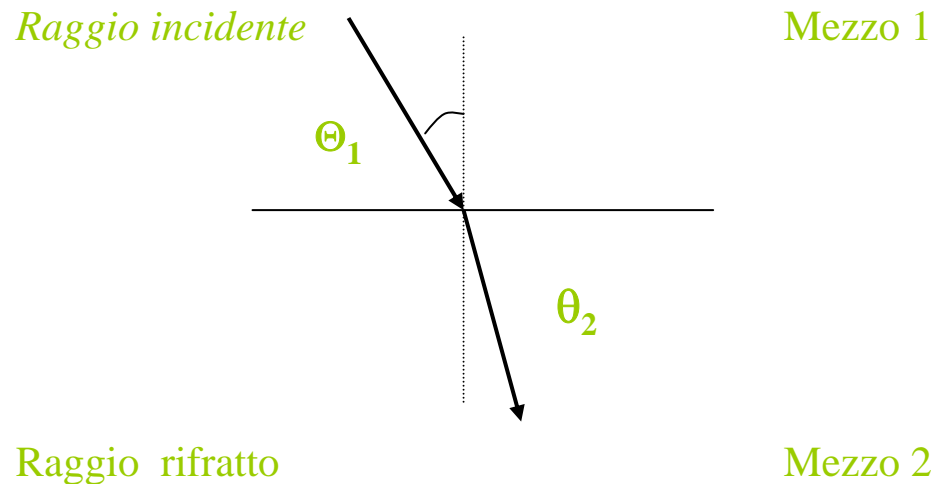
Il passaggio della luce attraverso mezzi ad indici di rifrazione n diversi provoca la variazione della sua traiettoria

Rifrazione:

Legge di Snell

Si consideri un fascio di luce (inteso come un insieme di raggi luminosi paralleli) che incida sulla superficie di separazione tra due mezzi di diverso indice di rifrazione.

Si definiscono **raggi incidenti** i raggi che provengono dal primo mezzo e **raggi rifratti** i raggi che emergono nel secondo mezzo.



Rifrazione:

Legge di Snell

La legge che regola la propagazione dei raggi luminosi al passaggio dei due mezzi, nota come legge di Snell, afferma:

raggio incidente, retta normale alla superficie di separazione e raggio rifratto giacciono sullo stesso piano

l'angolo di incidenza θ_1 e l'angolo di rifrazione θ_2 soddisfano la seguente relazione:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

$$n_2 = \frac{n_1 \sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

Rifrazione:

Legge di Snell

- Se il secondo mezzo risulta più rifrangente ovvero
- $n_2 > n_1 \Rightarrow \frac{n_1}{n_2} < 1$
-
- risulta che $\sin \theta_1 > \sin \theta_2$
- e quindi che $\theta_1 > \theta_2$
-
- ovvero il raggio rifratto si avvicina alla retta normale alla superficie di separazione.

Rifrazione

-
- ***Il raggio incidente nel passaggio tra i due mezzi cambia direzione.***
- Tale comportamento è effetto della diversa velocità di propagazione della luce nei due mezzi: se il secondo mezzo è più rifrangente del primo, la velocità della luce nel secondo mezzo risulta minore e quindi il raggio percorre traiettorie minori.
- **Osservazione:** nell'ipotesi che un raggio incida sulla superficie di separazione dal secondo mezzo con un angolo θ_2 , il raggio rifratto seguirà la stessa traiettoria in senso inverso.

Indice di rifrazione e la "luce bianca"

L'indice di rifrazione n dipende dal tipo di materiale ma anche dalla frequenza della luce.

La luce solare o quella prodotta da una comune lampada ad incandescenza appare all'occhio umano come "luce bianca". In realtà la luce bianca risulta "*policromatica*", essendo costituita da tutte le radiazioni elettromagnetiche **visibili** (**colori fondamentali**) caratterizzate da un range di frequenze molto stretto.

Come risulta dalla tabella, per ciascun colore la frequenza è leggermente diversa; quindi per un dato materiale (ad esempio il vetro crown) il valore dell'indice di rifrazione cambia leggermente.

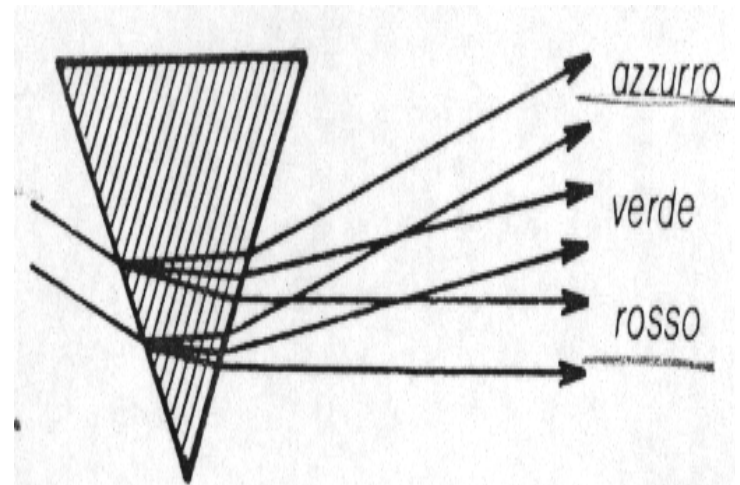
La variazione dell'indice n risulta comunque molto lenta, pari a circa 1%, ma tale da produrre il noto **fenomeno di dispersione**.

TABELLA DEGLI INDICI DI RIFRAZIONE PER IL VETRO CROWN

	Lunghezza d'onda λ (nm) nel vuoto	Frequenza ν (10^{14} Hz)	Indice di rifrazione n
Ultravioletto vicino	361	8.31	1.539
Azzurro scuro	434	6.92	1.528
Azzurro verde	486	6.18	1.523
Giallo	589	5.10	1.517
Rosso	656	4.57	1.514
Rosso scuro	768	3.91	1.511
Infrarosso	1200	2.50	1.505

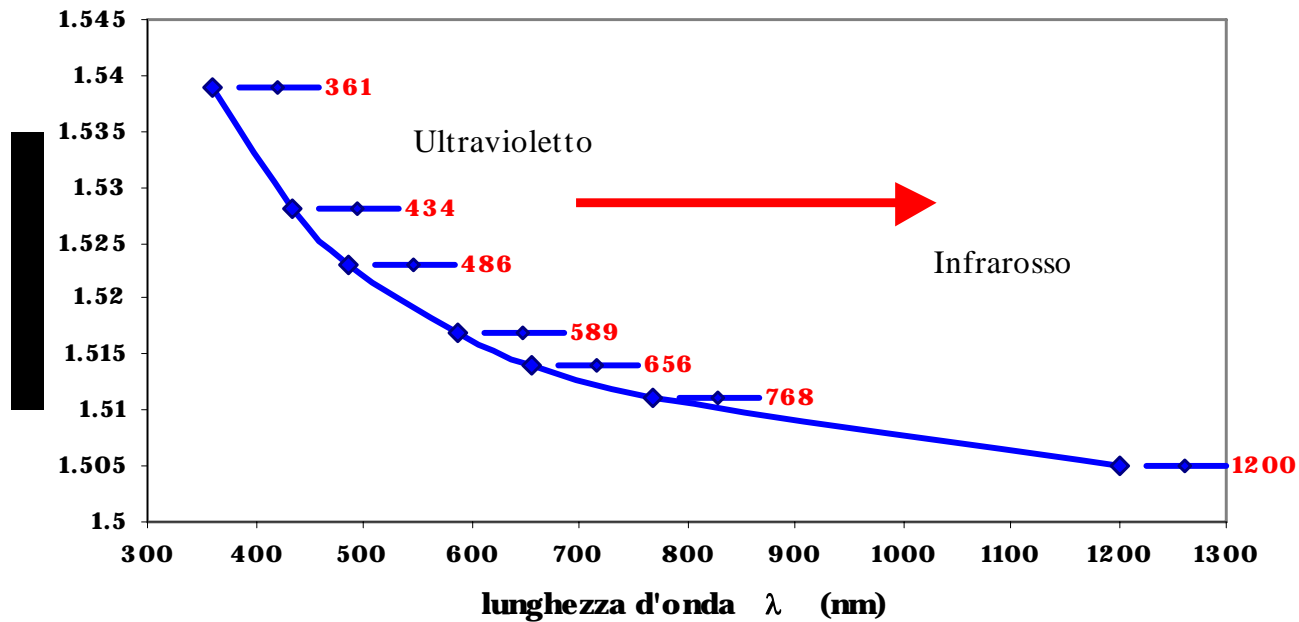
DISPERSIONE DELLA LUCE BIANCA

Un fascio di luce solare che incide sul prisma risulta "**disperso**" all'uscita del prisma nei vari colori. Ciascun colore ha subito una deflessione di un angolo dipendente dal colore (cioè dalla sua frequenza).

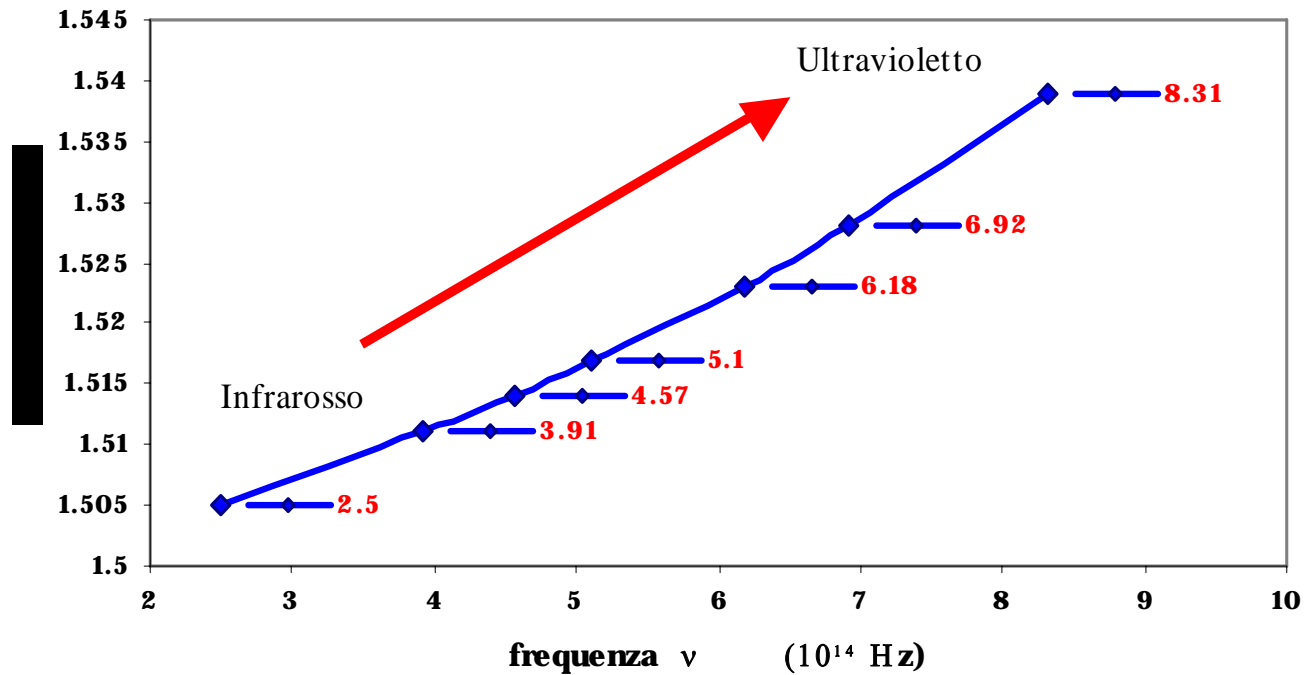


L'angolo di deflessione risulta massimo per il blu, minimo per il rosso come conseguenza del fatto che l'indice di rifrazione per il colore rosso è minore rispetto al colore blu

ANDAMENTO DEGLI INDICI DI RIFRAZIONE IN FUNZIONE DELLA LUNGHEZZA D'ONDA PER IL VETRO CROWN

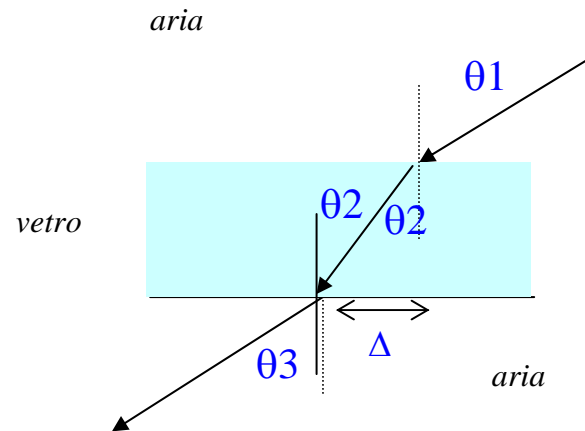


ANDAMENTO DEGLI INDICI DI RIFRAZIONE IN FUNZIONE DELLA FREQUENZA PER IL VETRO CROWN



PASSAGGIO DELLA LUCE ATTRAVERSO UNA LASTRA PIANO - PARALLELA

Un raggio di luce che si propaga in un mezzo di indice di rifrazione n_1 , incide su una lastra piano-parallela di indice di rifrazione n_2 nel punto A con un angolo di incidenza θ_1 . La lastra ha uno spessore t . Il raggio rifratto in A con un angolo di rifrazione θ_2 prosegue attraverso la lastra finchè incontra la superficie di separazione vetro-aria e viene nuovamente rifratto di un angolo θ_3 pari, per la reversibilità della legge di Snell, a θ_1 .



PASSAGGIO DELLA LUCE ATTRAVERSO UNA LASTRA PIANO - PARALLELA

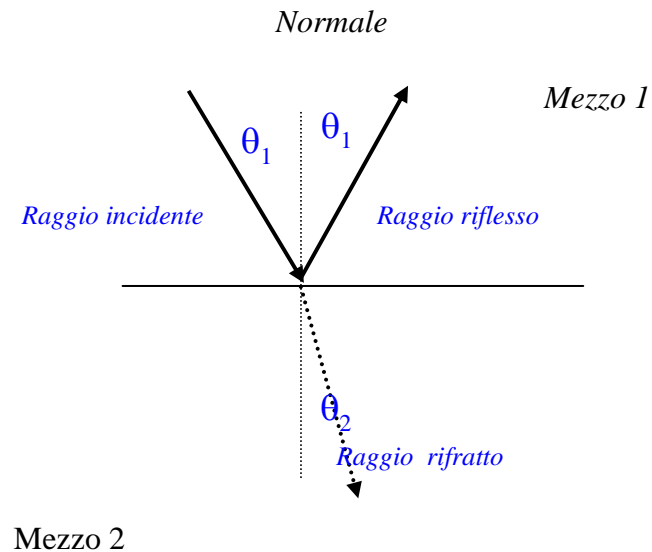
- L'effetto della lastra sul raggio è solo quello di spostarlo parallelamente di una quantità pari ad Δ .
- La entità di Δ risulta proporzionale allo spessore t , secondo la relazione:

•

- $$\Delta = t \frac{\sin (\theta_1 - \theta_2)}{\cos (\theta_2)}$$

Riflessione

- Si consideri un fascio di luce (inteso come un insieme di raggi luminosi paralleli) che incida sulla superficie di separazione tra due mezzi di diverso indice di rifrazione.



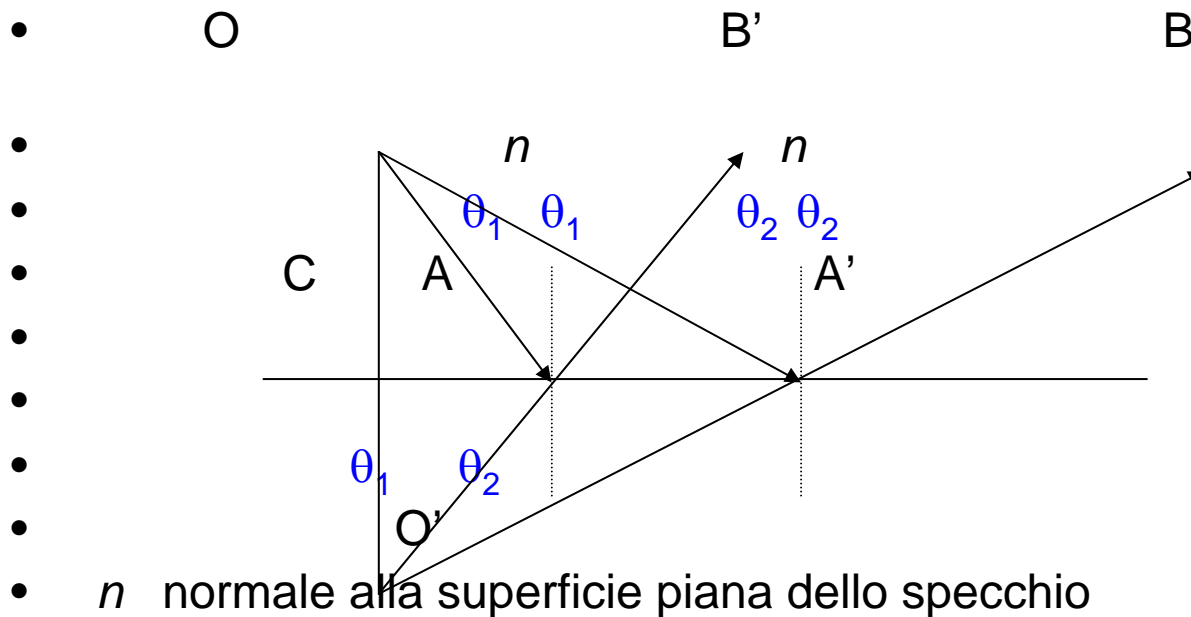
Riflessione

- Oltre al raggio rifratto emergente nel secondo mezzo, esiste un raggio “riflesso” che si propaga nel primo mezzo, secondo la seguente legge:
- - raggio incidente, normale alla superficie di separazione e raggio riflesso giacciono sullo stesso piano;
-
- - l'angolo di incidenza e l'angolo di riflessione sono uguali
-
- *L'intensità del raggio incidente si ripartisce tra raggio rifratto e riflesso secondo proporzioni che dipendono dall'angolo di incidenza.*

FORMAZIONE DELL'IMMAGINE

SU UNO SPECCHIO PIANO

- Definiamo come **specchio piano** una qualsiasi superficie metallica piana e liscia.



FORMAZIONE DELL'IMMAGINE

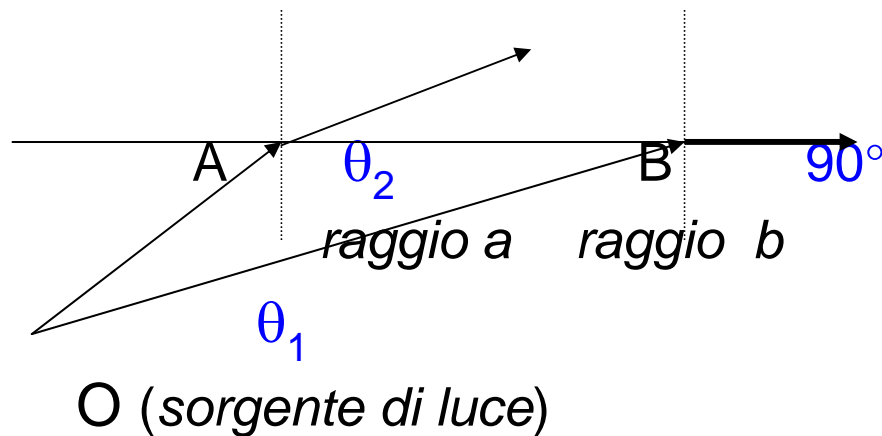
SU UNO SPECCHIO PIANO

- **O** è definito come punto oggetto da cui provengono i raggi incidenti di tutte le direzioni.
- Per l'uguaglianza dei triangoli OAC e O'AC segue che:
 $OC = O'C$
-
- Per la legge di riflessione, i prolungamenti dei raggi riflessi si intersecano in uno stesso **punto virtuale** oltre la superficie dello specchio.
- - **O' è l'immagine virtuale di O**

-
- ***Immagine reale:*** si definisce come immagine reale di un punto oggetto fornita da uno strumento ottico il punto per cui passano tutti i raggi provenienti dall'oggetto dopo aver attraversato lo strumento.
-
-
- ***Immagine virtuale:*** si definisce come immagine virtuale di un punto oggetto fornita da uno strumento ottico il punto dal quale sembrano emergere tutti i raggi provenienti dall'oggetto dopo aver attraversato lo strumento.

RIFLESSIONE INTERNA TOTALE

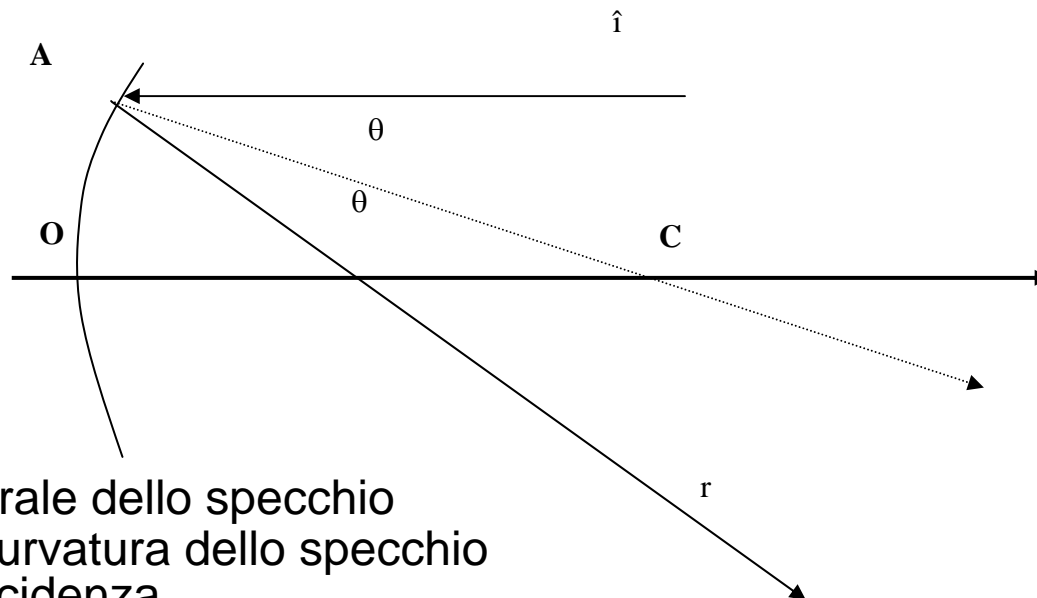
- Il fenomeno della riflessione interna totale ha luogo quando un raggio luminoso passa da un mezzo ad un altro meno denso.



RIFLESSIONE INTERNA TOTALE

-
- Applicando la legge di rifrazione, per l'angolo vale la relazione:
- $\sin \theta_2 = n_1 \sin \theta_1 > \sin \theta_1$
- essendo $n_1 > n_2$
- Se si considerano raggi provenienti da O con angoli incidenti θ_1 sempre più crescenti esisterà un valore limite c a cui corrisponde un angolo di rifrazione pari a 90° :
- $\sin c = n_2 \sin 90^\circ = n_2$
- Per queste condizioni il raggio rifratto corre parallelo alla superficie di separazione, per angoli incidenti maggiori del valore c si avrà solo riflessione.

RIFLESSIONE SU SUPERFICIE SFERICA



- O: punto centrale dello specchio
- C: centro di curvatura dello specchio
- A: punto di incidenza
- \hat{i} : raggio incidente
- r: raggio riflesso
- OC: asse ottico dello specchio
- OC: raggio di curvatura
- θ : angolo di incidenza uguale all'angolo di riflessione

RIFLESSIONE SU SUPERFICIE SFERICA

- Per conoscere il segmento **CD** si applica il teorema di Carnot per i triangoli qualsiasi:

- $CD^2 = AC^2 + AD^2 - 2 AC AD \cos \theta$

- essendo $AD = CD$
- esprimendo la relazione in funzione di CD

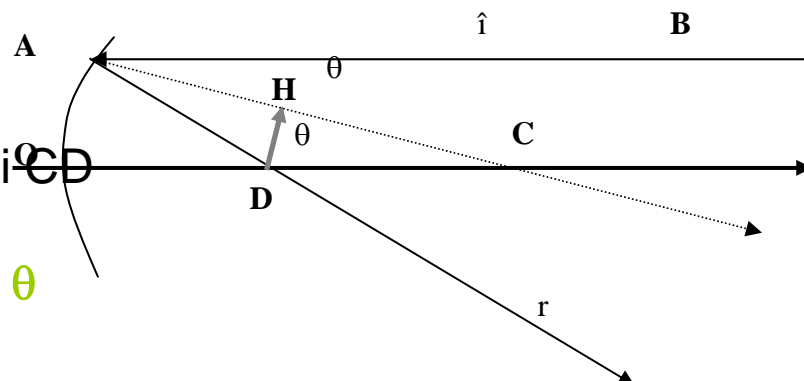
- $CD^2 = AC^2 + CD^2 - 2 AC AD \cos \theta$

- Essendo $AC \neq 0$, si divide per AC :

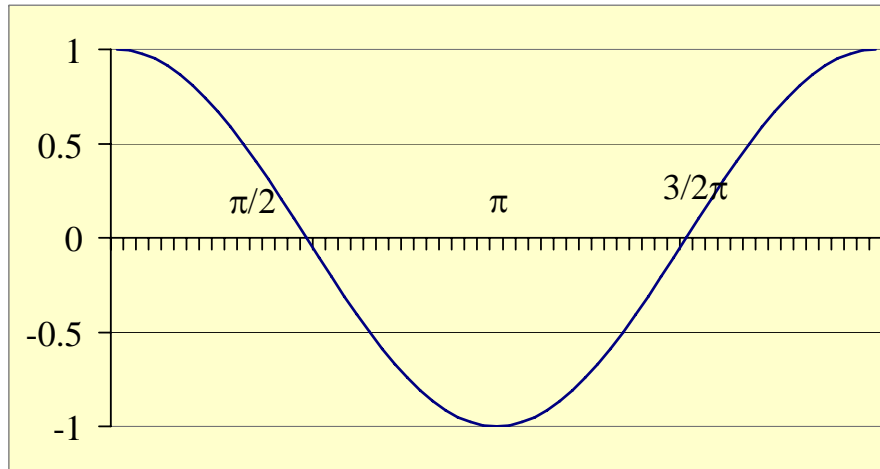
- $0 = AC^2 - 2 AC AD \cos \theta \Rightarrow AC = 2 CD \cos \theta$

- $CD = AC / 2 \cos \theta$

- essendo: $AC = OC = r \Rightarrow CD = r / 2 \cos \theta$



SPECCHI DI PICCOLA APERTURA



$$CD = \frac{r}{2 \cos \theta}$$

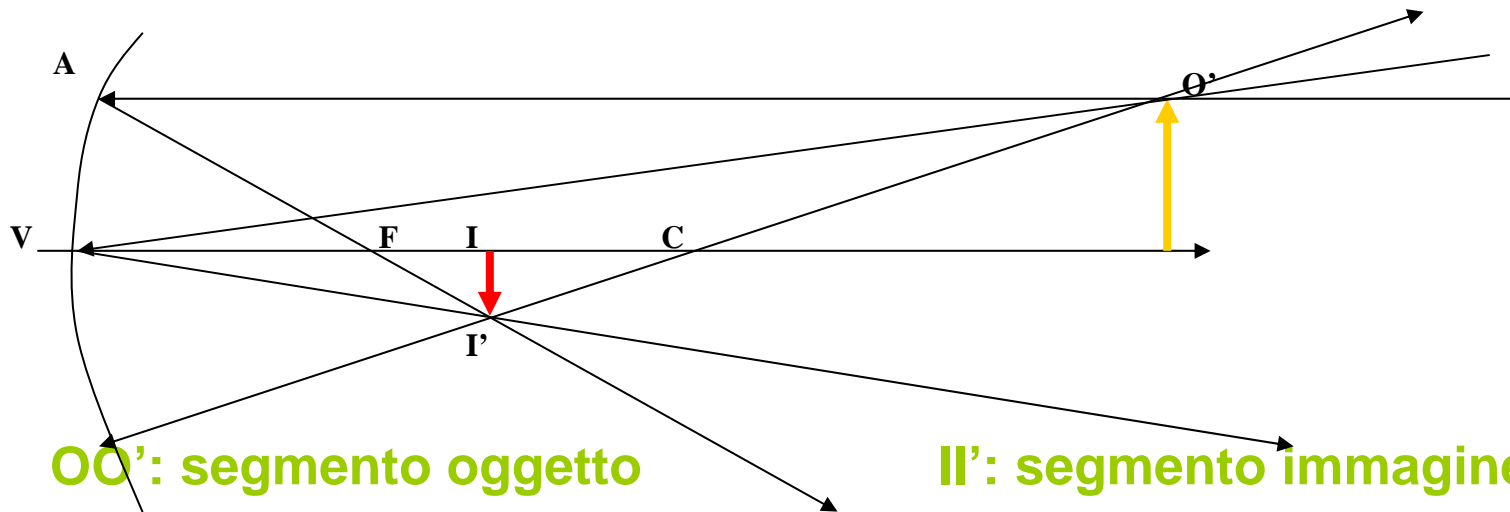
$$\theta \rightarrow 0$$

$$\cos \theta \rightarrow 1 \quad \Rightarrow \quad CD = \frac{r}{2} = \text{distanza focale } f$$

Ipotesi per specchi sferici

- *Specchi di piccola apertura*
- *Raggi parassiali (paralleli e molto vicini all'asse ottico)*
- *Fuoco o punto in cui convergono tutti i raggi paralleli all'asse ottico*
- *Distanza focale f pari a metà del raggio r di curvatura:*
- $f = r/2$
- **OGGETTI VICINO L'ASSE**
- **PUNTI OGGETTO \Rightarrow PUNTI IMMAGINE**
- **SEGMENTI OGGETTO \Rightarrow SEGMENTI IMMAGINE**
- **OGGETTI PIANI \Rightarrow IMMAGINI PIANE NON DISTORTE**

FORMULA DEGLI SPECCHI SFERICI



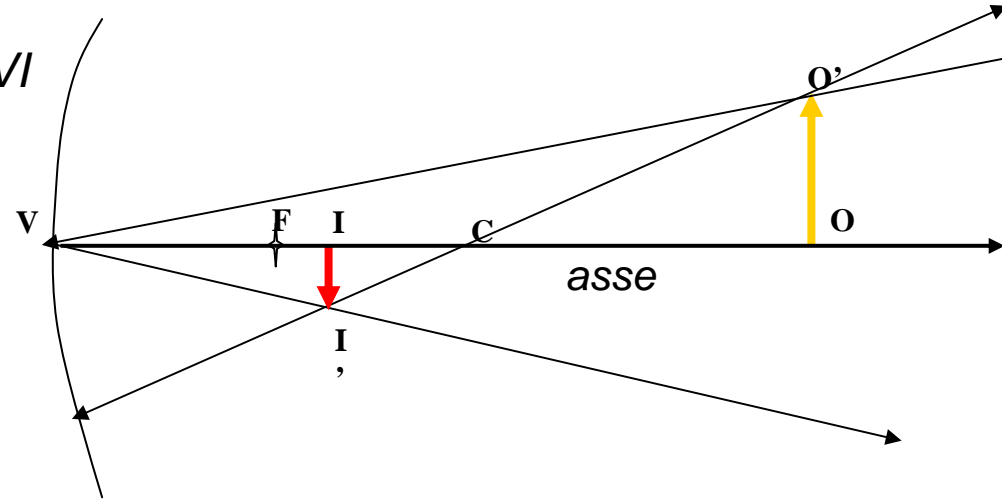
- **OO': segmento oggetto** **II': segmento immagine**
- . il raggio O'A parallelo all'asse ottico si riflette e passa per il fuoco F
- . Il raggio O'V si riflette in V rispetto l'asse ottico
- . il raggio O'C passante per il centro ottico dello specchio si riflette su se stesso
- . il raggio O'F passante per il fuoco F si riflette parallelamente all'asse ottico.
- *Tutti gli infiniti raggi che illuminano O' dopo la riflessione con lo specchio si intersecano in uno stesso punto I' detto **punto immagine** di O'*

FORMULA DEGLI SPECCHI SFERICI

- si definisce u la distanza oggetto VO
-
- si definisce v la distanza immagine VI

- triangolo OO'A simile triangolo I I'A ottico
-

$$\bullet \text{OO}' : \text{II}' = \text{OA} : \text{AI} \Rightarrow \frac{\text{OO}'}{\text{II}'} = \frac{\text{OA}}{\text{AI}}$$



$$\frac{\text{OO}'}{\text{II}'} = \frac{u}{v}$$

- triangolo OO'C simile triangolo I I'C
-

$$\bullet \text{OO}' : \text{II}' = \text{OC} : \text{CI} \Rightarrow \frac{\text{OO}'}{\text{II}'} = \frac{\text{OC}}{\text{CI}} \quad \frac{\text{OC}}{\text{AC} - \text{AI}} = \frac{\text{AO} - \text{AC}}{\text{AC} - \text{AI}}$$

$$\bullet \frac{\text{OO}'}{\text{II}'} = \frac{u-r}{r-v}$$

FORMULA DEGLI SPECCHI

- riassumendo: $\frac{OO'}{v} = \frac{u}{v}$ e $\frac{OO'}{r-v} = \frac{u-r}{v}$

- quindi: $\frac{u}{v} = \frac{u-r}{r-v} \quad \text{/.}(r-v)v$

- $ur - uv = uv - vr$

- $ur + vr = 2uv$

- $\frac{1}{v} + \frac{1}{u} = \frac{2}{r}$

- essendo $f = r/2 \Rightarrow \frac{1}{v} + \frac{1}{u} = \frac{1}{f}$ formula degli specchi

INGRANDIMENTO DI UNO SPECCHIO SFERICO

- Si definisce come ingrandimento **m** il rapporto tra dimensione dell'immagine e quella dell'oggetto:
-
- $$m = \frac{II'}{OO'} = - \frac{v}{u}$$
-
- Se l'immagine è reale v è un numero positivo, quindi m risulta negativo
- Se l'immagine è virtuale v è un numero negativo, quindi m risulta positivo
- L'oggetto è sempre reale quindi è sempre positivo

SPECCHIO CONCAVO

1° caso:

- $u > r$ e $r > 0 \Rightarrow$ *immagine reale invertita rimpicciolita*

-

- se $u > r \Rightarrow u - r > 0 \Rightarrow \frac{1}{u} < \frac{1}{r} \Rightarrow \frac{1}{r} - \frac{1}{u} > 0$

-

- dalla legge degli specchi

- $\frac{1}{v} + \frac{1}{u} = \frac{1}{f} \Rightarrow \frac{1}{v} + \frac{1}{u} = \frac{2}{r} = \frac{1}{r} + \frac{1}{r}$

-

-

- $\Rightarrow \frac{1}{v} = \frac{1}{r} + \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{u}\right) > 0$

-

- $\Rightarrow v > 0 \Rightarrow$ *immagine reale*

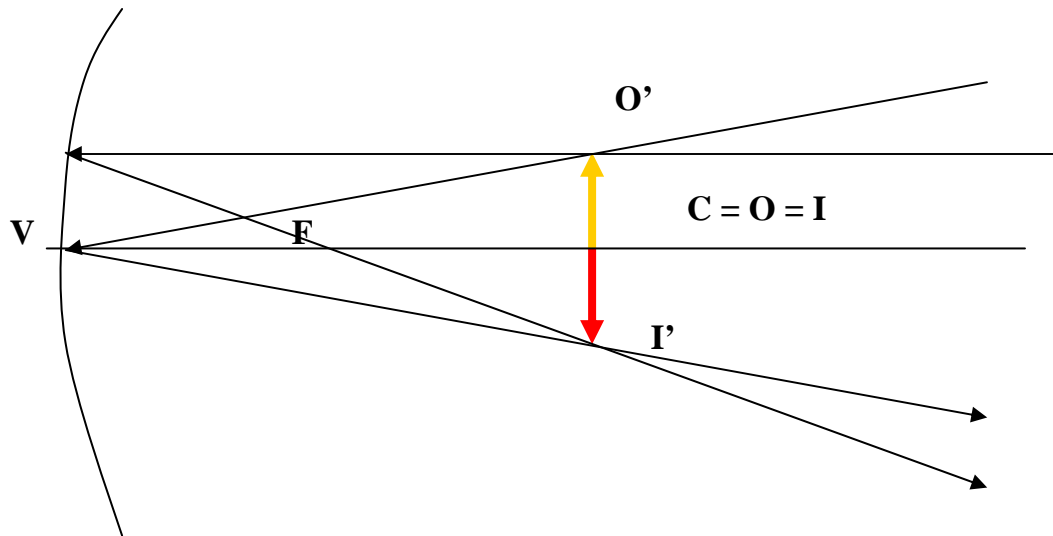
-

- $m = -\frac{v}{u} < 0 \Rightarrow$ *immagine invertita*

SPECCHIO CONCAVO

2° caso:

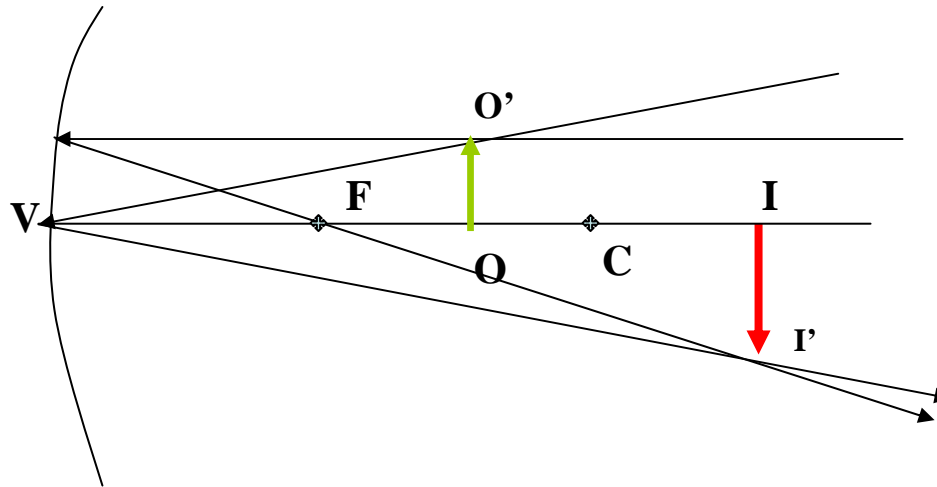
- $u = r$ e $r > 0$ \Rightarrow *immagine reale invertita*
- \Rightarrow *ingrandimento pari a -1*



SPECCHIO CONCAVO

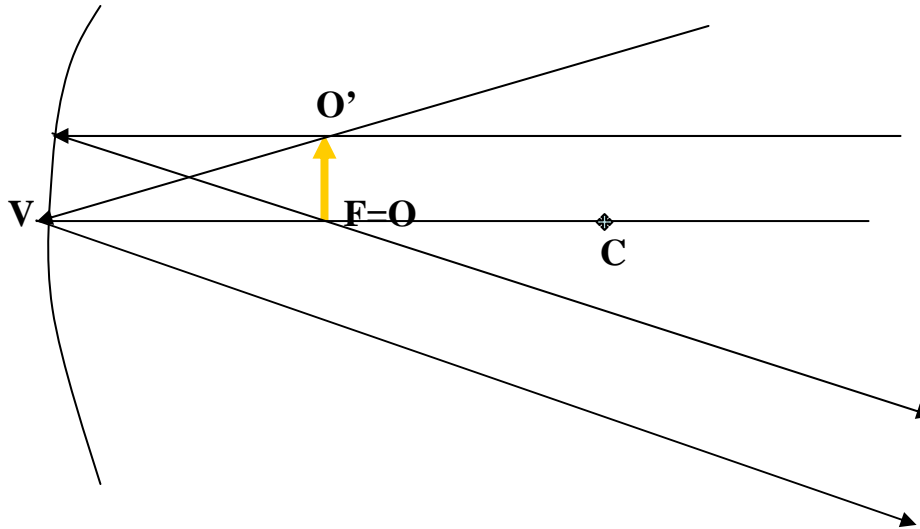
3° caso:

$r/2 < u < r$ e $r > 0 \Rightarrow$ *immagine reale invertita*
 \Rightarrow *ingrandimento $|m| > 1$*



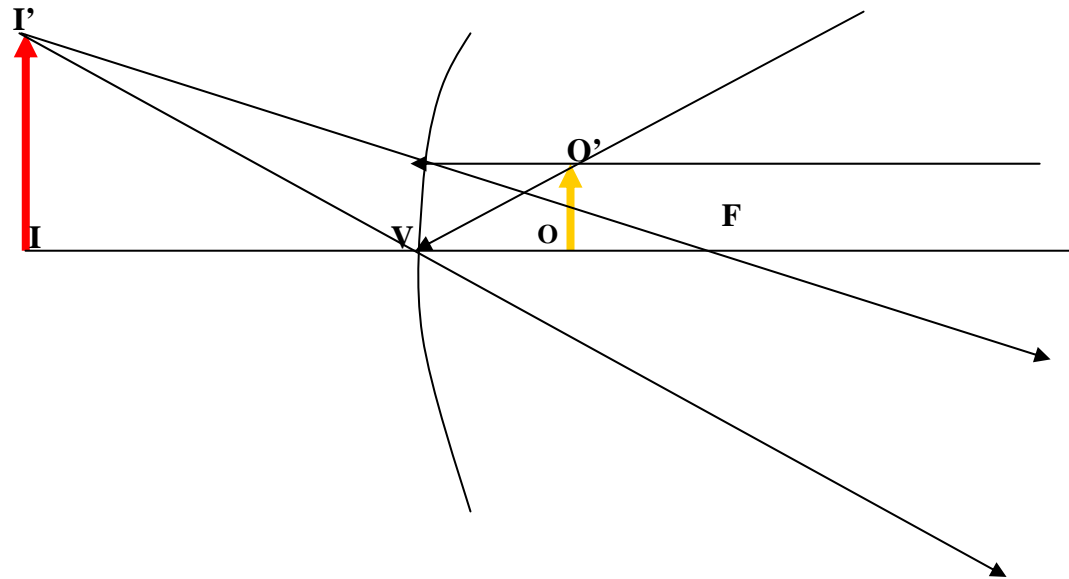
SPECCHIO CONCAVO

- 4° caso:
- $u = r/2$ e $r > 0 \Rightarrow$ *immagine all'infinito*
- \Rightarrow *ingrandimento $|m| \rightarrow \infty$*
-



SPECCHIO CONCAVO

- **5° caso:**
- $u < r/2$ e $r > 0 \Rightarrow$ *immagine virtuale diritta*
- \Rightarrow *ingrandimento $|m| > 1$*



SPECCHIO CONVESSO

- $\forall u < 0$ e $f < 0 \Rightarrow$ *immagine virtuale diritta*
• \Rightarrow *ingrandimento $|m| < 1$*

