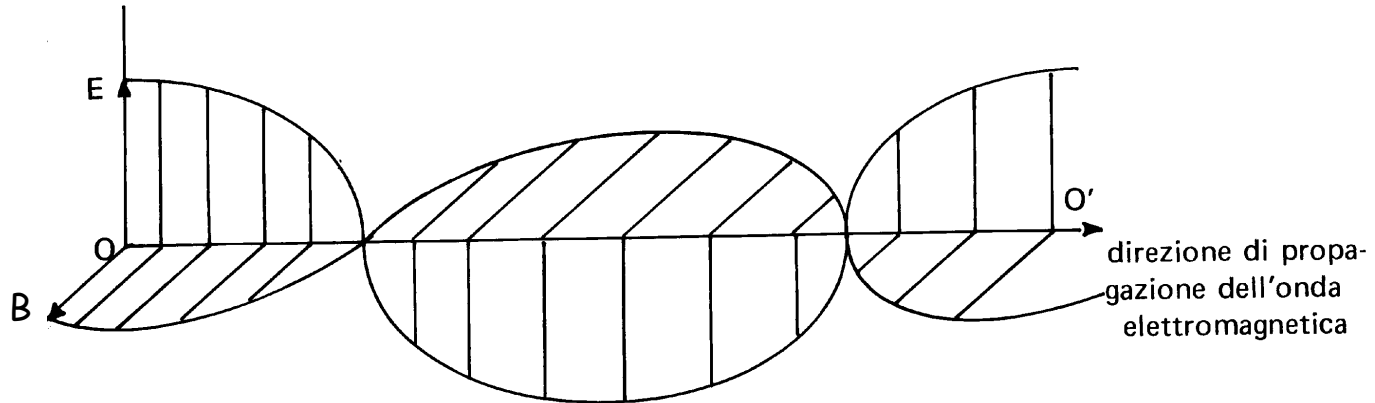


Natura ondulatoria della luce



Le radiazioni elettromagnetiche consistono nella propagazione di un campo elettrico e di un campo magnetico sinusoidalmente variabili perpendicolari tra loro e alla direzione di propagazione.

Per esse definiamo la lunghezza d'onda λ , la velocità di propagazione c ed il periodo T per i quali valgono le seguenti relazioni:

$$c = \lambda \nu \text{ con } \nu = 1/T$$

essendo c la velocità della luce nel vuoto pari a 3×10^8 m/s.

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.

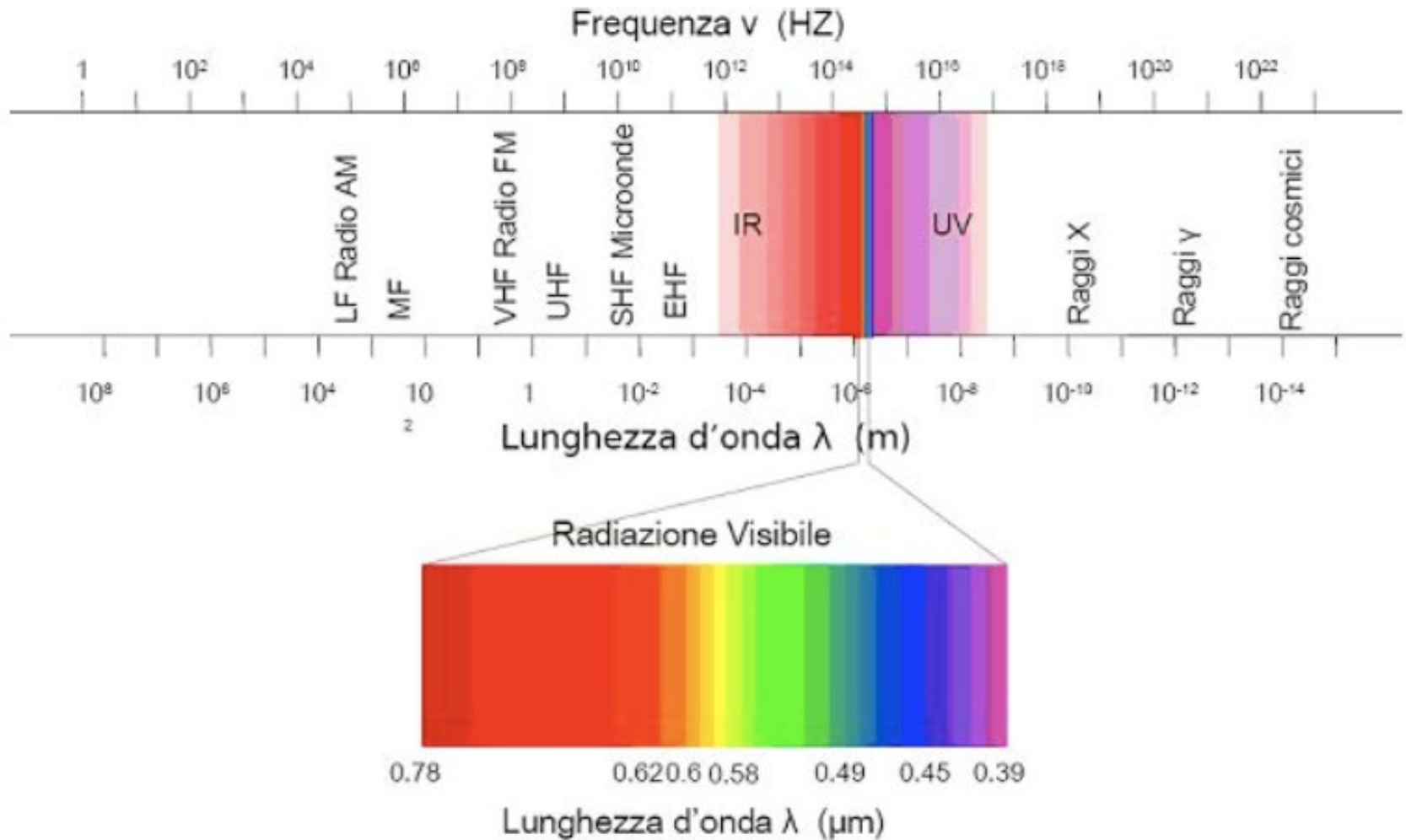


L'emissione, la propagazione e l'assorbimento della luce possono essere quindi descritti utilizzando le **leggi dei fenomeni ondulatori**.

Tuttavia esistono dei particolari eventi che possono essere spiegati solo assumendo per la luce una natura corpuscolare:

DUALISMO ONDA - PARTICELLA

Onde elettromagnetiche



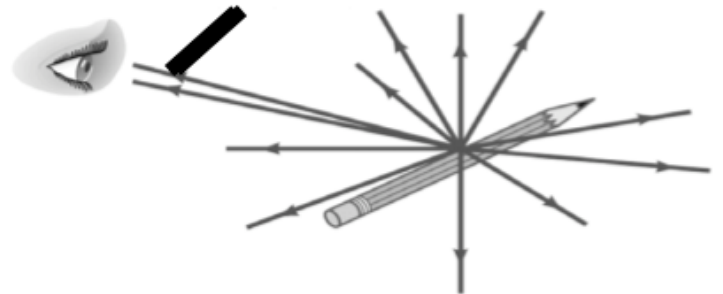
La luce e l'ottica geometrica

- La luce ha una natura elettromagnetica, come già visto
- La nostra esperienza sulla luce è legata all'occhio, che rivela la luce emessa dagli oggetti
- Questi possono:
 - Essere sorgenti di luce (sole, lampadina,)
 - Riflettere la luce (specchio, tavolo, ...)

Modello a raggi

La luce si propaga lungo cammini rettilinei detti raggi

- Un raggio è l'idealizzazione di un fascio di luce molto stretto
- Vedo un oggetto perché la luce raggiunge i miei occhi da ogni punto dell'oggetto
- Solo una piccola parte dei raggi che escono dall'oggetto raggiunge i miei occhi



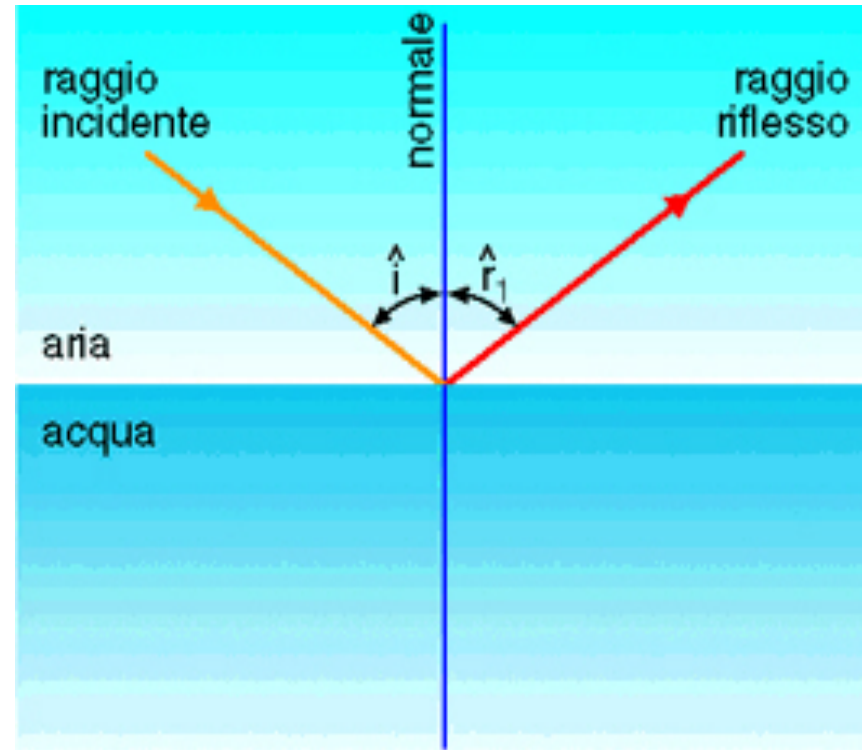
Si chiama ottica geometrica la teoria che descrive i fenomeni luminosi utilizzando direzioni e angoli di propagazione

OTTICA GEOMETRICA ed OTTICA FISICA

- 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 rettilineo**.
- 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. Studia fenomeni come interferenza, diffrazione, polarizzazione della luce per i quali non sono valide le ipotesi dell'ottica geometrica, ma si deve ricorrere alla natura ondulatoria della luce come radiazione elettromagnetica

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.



Oltre al raggio rifratto emergente nel secondo mezzo, esiste un raggio "riflesso" che si propaga nel primo mezzo.

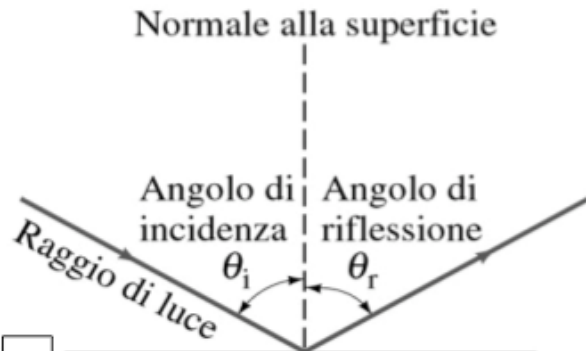
Riflessione

La legge che descrive il fenomeno della riflessione nell'ottica geometrica afferma:

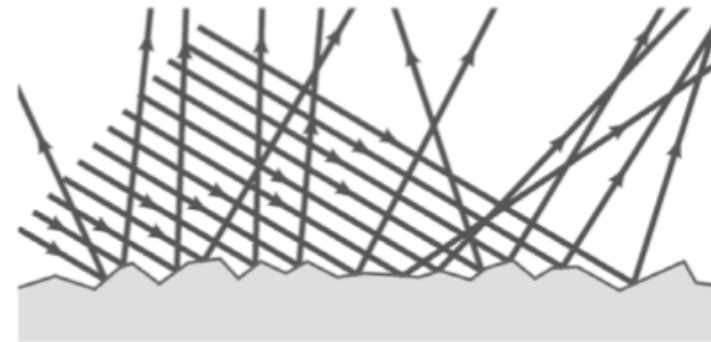
- raggio incidente, normale alla superficie di separazione, e raggio riflesso giacciono sullo stesso piano;
- l'angolo di incidenza e l'angolo di riflessione sono uguali

L'intensità del raggio incidente si ripartisce tra raggio rifratto e riflesso secondo proporzioni che dipendono dall'angolo di incidenza.

La riflessione

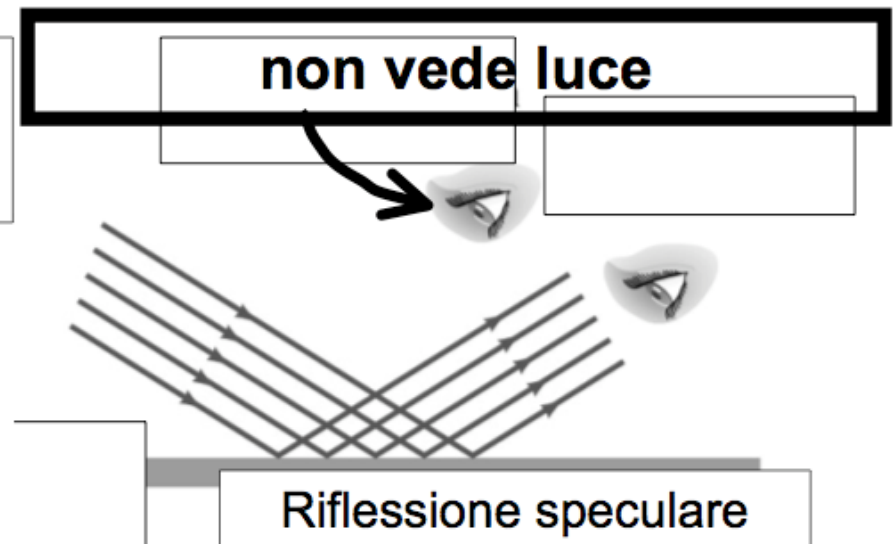
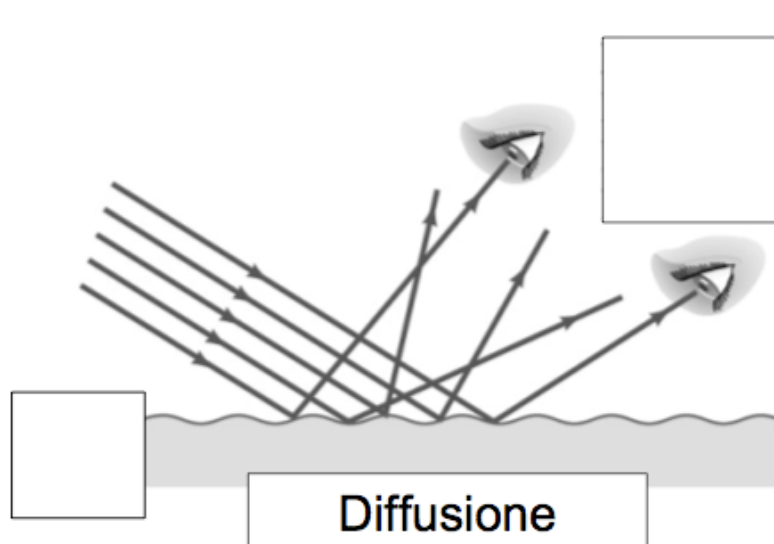


Riflessione speculare



Diffusione o
Riflessione diffusa

Nella costruzione, devo considerare ogni singolo raggio



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 2.9975×10^8 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:

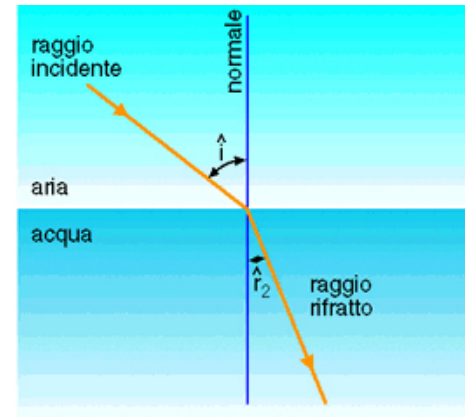
$$n = c/v \quad n > 1$$

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.



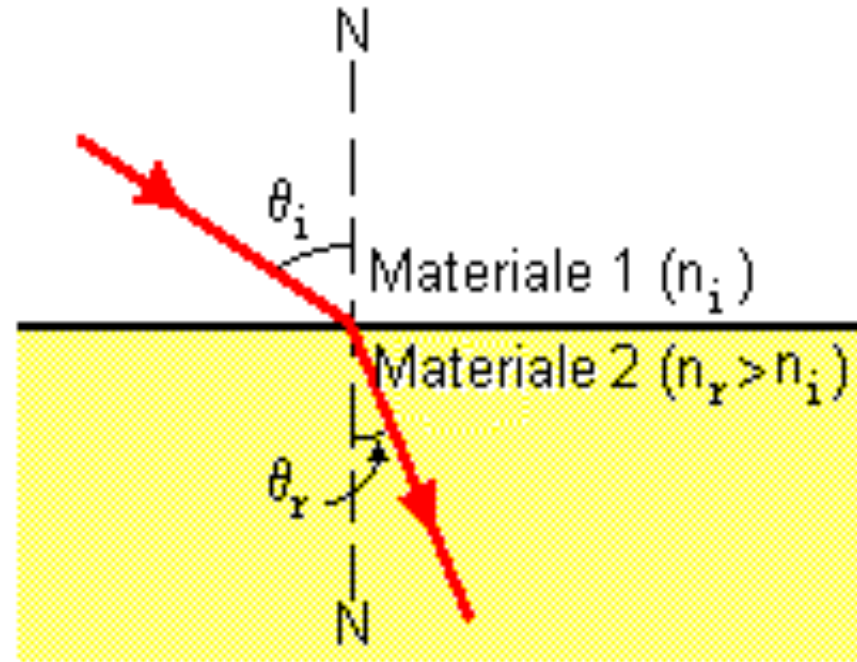
Si definiscono **raggi incidenti** i raggi che provengono dal primo mezzo e **raggi rifratti** i raggi che emergono nel secondo mezzo.

Rifrazione: legge di Snell

La legge regola la propagazione dei raggi luminosi al passaggio tra due mezzi trasparenti di natura diversa:

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

l'angolo di incidenza θ_i e l'angolo di rifrazione θ_r soddisfano la seguente relazione:



$$n_i \sin \theta_i = n_r \sin \theta_r$$

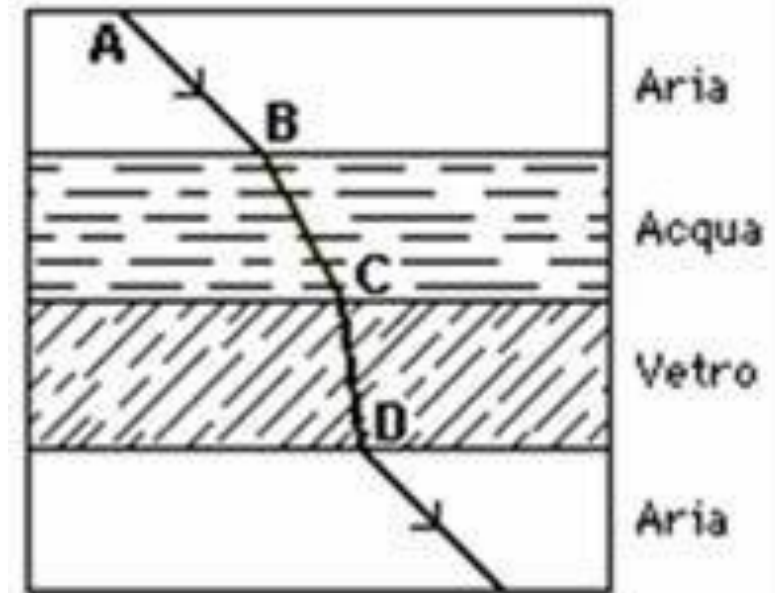
Rifrazione: Legge di Snell

Se il secondo mezzo risulta più rifrangente

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

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.

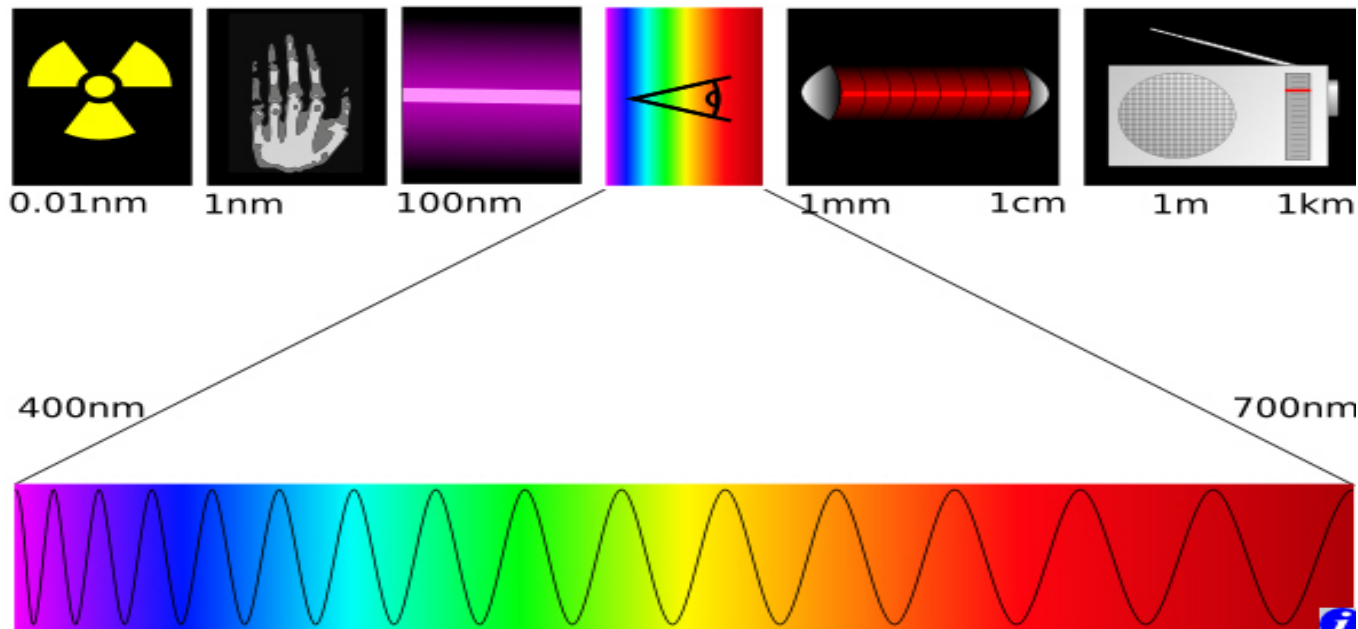
sostanza	n	velocità (unità c)
aria	1.000292	0.999708
anilina	1.586	0.631
acqua	1.332	0.751
benzene	1.501	0.666
tetraclorometano	1.599	0.625
cloroformio	1.446	0.692
glicerina	1.472	0.679
quarzo	1.425	0.702
vetro flint silicato	1.622	0.617
vetro crown silicato	1.517	0.659
diamante	2.417	0.414

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.

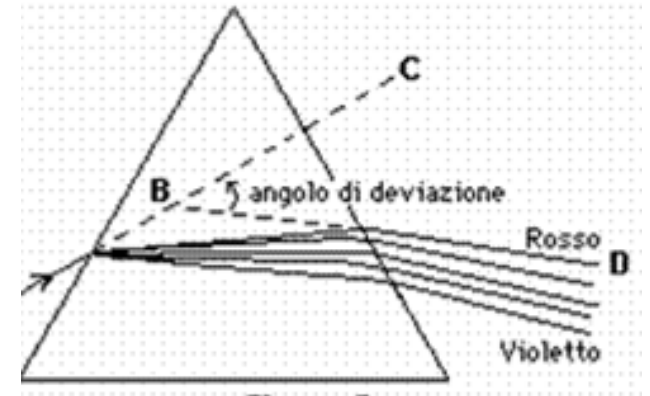


DISPERSIONE DELLA LUCE BIANCA: il prisma ottico

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).



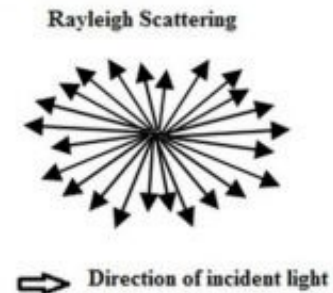
L'**angolo di deflessione** risulta massimo per il blu, minimo per il rosso come conseguenza del fatto che l'indice di rifrazione per il colore rosso è minore rispetto al colore blu

Intensita' della luce diffusa dipende da λ

Diffusione della luce incidente su una molecola avente dimensione minore di $0,1 \mu\text{m}$ ovvero una dimensione molto inferiore a quella della lunghezza d'onda più piccola del “campo del visibile” (scattering Rayleigh).

La luce è diffusa in tutte le direzioni con intensità diverse a seconda della direzione, secondo la seguente espressione:

$$I = I_0 \frac{(1 + \cos^2 \theta)}{2R^2} \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^4 \left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right)^2 \left(\frac{d}{2} \right)^6$$



- $(1 + \cos^2 \theta)$ è un coefficiente simmetrico rispetto al piano normale alla direzione incidente della luce; pertanto la luce diffusa in avanti ha la stessa intensità della luce diffusa indietro
- l'intensità è inversamente proporzionale alla quarta potenza della lunghezza d'onda (λ).

R = distanza dalla particella, d = diametro della particella, n = indice di rifrazione della particella, θ = angolo di diffusione, I intensita'

Intensita' diffusa dipende da λ :
il colore del cielo e del sole

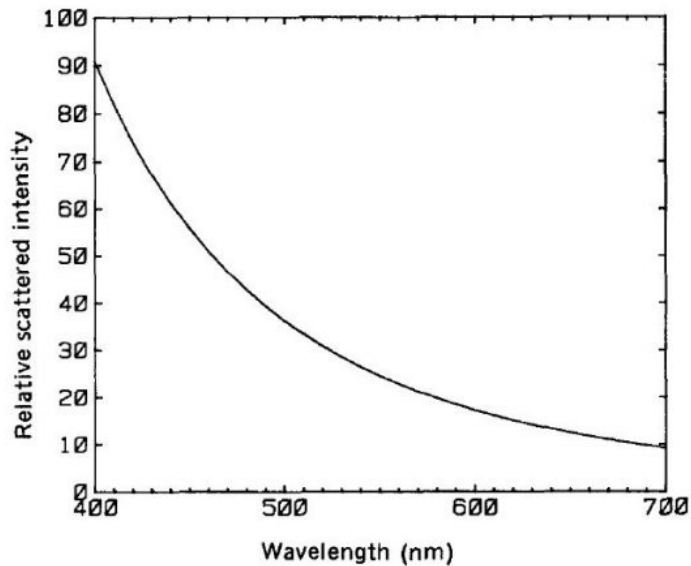
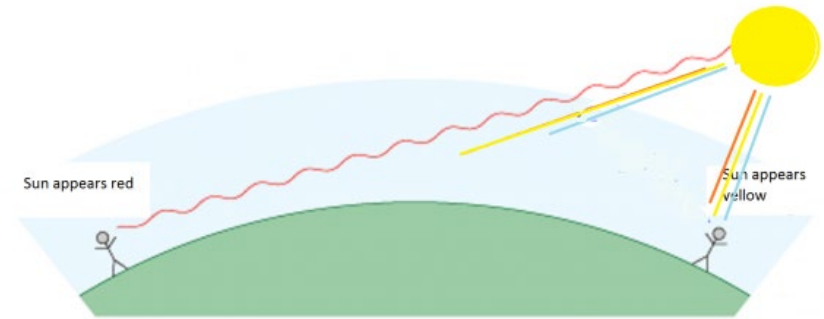


Fig. 2. Spectral dependence of scattering by atmospheric molecules.



La componente blu e' completamente diffusa quando la luce viaggia per una distanza piu' lunga nell'atmosfera. Resiste di piu' la componente rossa, che vediamo.

La componente blu e' anche quella che viene diffusa di piu' quando il sole e' allo zenith, per cui il cielo ci appare blu: siamo in grado di vedere la luce blu diffusa dalle particelle dell'atmosfera piu' delle alter componenti, che sono diffuse di meno.

RIFLESSIONE INTERNA TOTALE

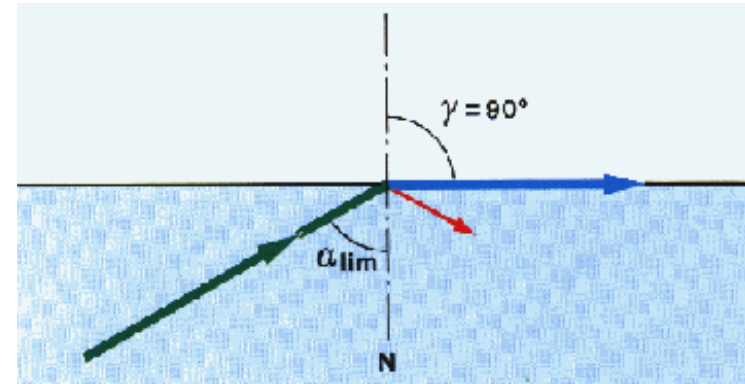
Il fenomeno della riflessione interna totale ha luogo quando un raggio luminoso passa da un mezzo ad un altro meno denso.

Applicando la legge di rifrazione

l'angolo di rifrazione e' > angolo incidenza:

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

essendo $n_1 > n_2$



Se si considerano raggi provenienti da O con angoli incidenti θ_1 sempre più crescenti esisterà un valore limite θ_{limite} a cui corrisponde un angolo di rifrazione pari a 90° :

$$n_1 / n_2 \sin \theta_1 = \sin \theta_2 \leq 1 \Rightarrow n_1 / n_2 \sin \theta_1 \leq 1 \Rightarrow \sin \theta_1 \leq n_2 / n_1$$

Cosa succede a θ_2 per angoli tali che $\sin \theta_1 > n_2 / n_1$?

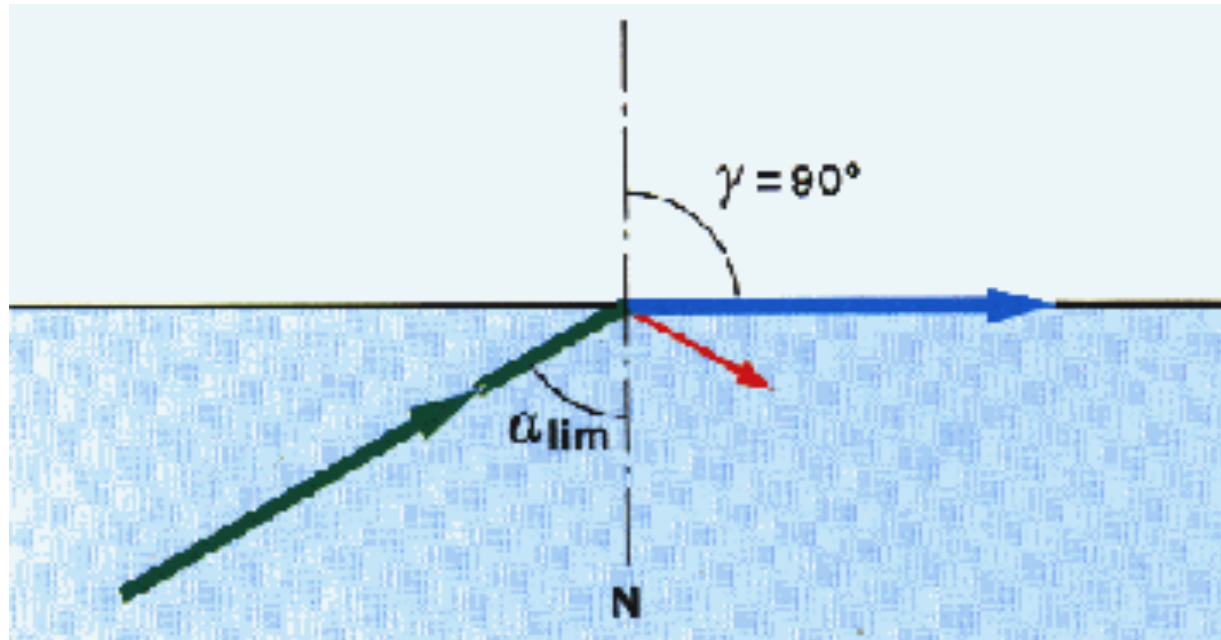
In questo caso :

$\sin \theta_2 = n_1 / n_2 \sin \theta_1 > n_1 / n_2 * n_2 / n_1 = 1$ che implica $\sin \theta_2 > 1$, che però non e' definita: corrisponde a una rifrazione non fisica, ovvero a **una riflessione totale**

Per queste condizioni il raggio rifratto corre parallelo alla superficie di separazione, per angoli incidenti maggiori del valore limite si avrà solo riflessione.

Riflessione interna totale

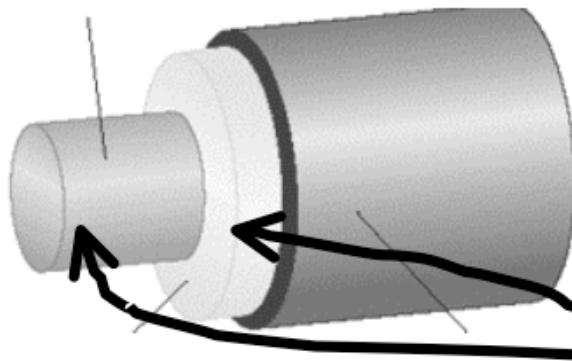
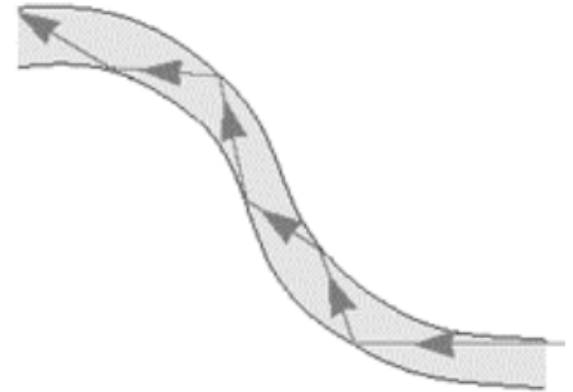
Il fenomeno della riflessione interna totale ha luogo quando un raggio luminoso passa da un mezzo ad un altro meno denso.



$$\begin{aligned} n_1 \operatorname{sen} \theta_1 &= n_2 \operatorname{sen} 90 \\ \operatorname{sen} \theta_1 &= n_2 / n_1 < 1 \end{aligned}$$

Le fibre ottiche

- Applicazione della riflessione totale: guida di luce



- Se uso un fascio di fibre sottili: fibre ottiche
- In genere il diametro di una fibra ottica e' di qualche decina di micron (20-100 μm)

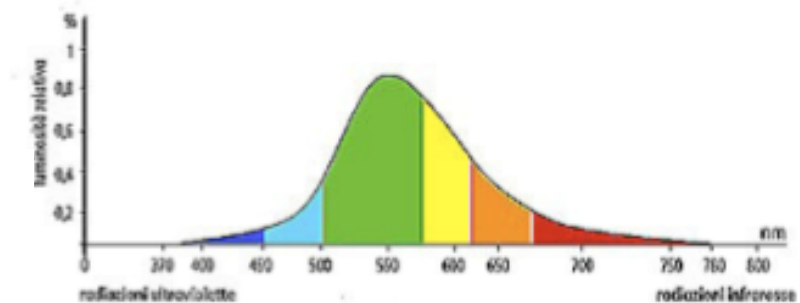
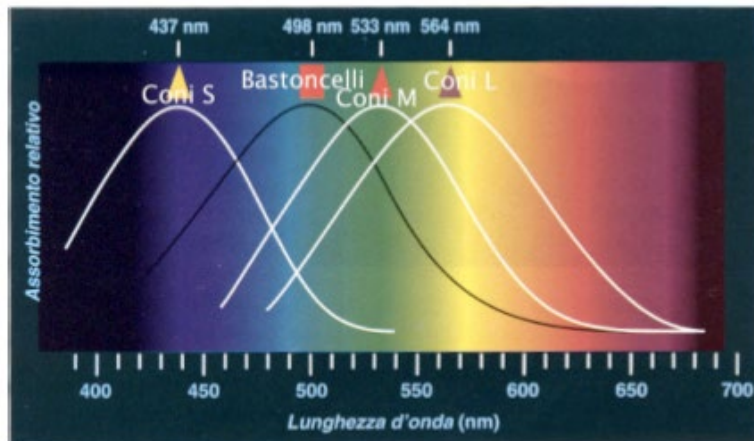
- Sono composte da:
 - un nucleo di vetro o plastica
 - un rivestimento con $n_{\text{rivestimento}} < n_{\text{nucleo}}$
- Per la legge di Snell
 - $\text{sen}\theta_{\text{riflessione totale}} = n_{\text{rivestimento}}/n_{\text{nucleo}}$
 - $n_{\text{rivestimento}} < n_{\text{nucleo}} \rightarrow n_{\text{rivestimento}}/n_{\text{nucleo}} < 1$
 - esiste un $\theta_{\text{riflessione totale}}$

**In una fibra ottica,
la luce rimbalza
sfruttando la
riflessione totale**

Colori e l'occhio

Nell'occhio umano la retina è l'organo sensibile alla luce. E' costituito da sensori detti *coni* e *bastoncelli*. I bastoncelli sono posti alla periferia della retina, permettono di percepire la luminosità e il movimento (visione scotopica), mentre i coni sono posti in una zona detta *fovea*, che permettono di diversificare i colori (visione fotopica). In realtà esistono tre tipi di coni, ciascuno sensibile ad una differente lunghezza d'onda:

- Cono S (blu – 437 nm)
- Cono M (verde – 533 nm)
- Cono L (rosso – 564 nm)

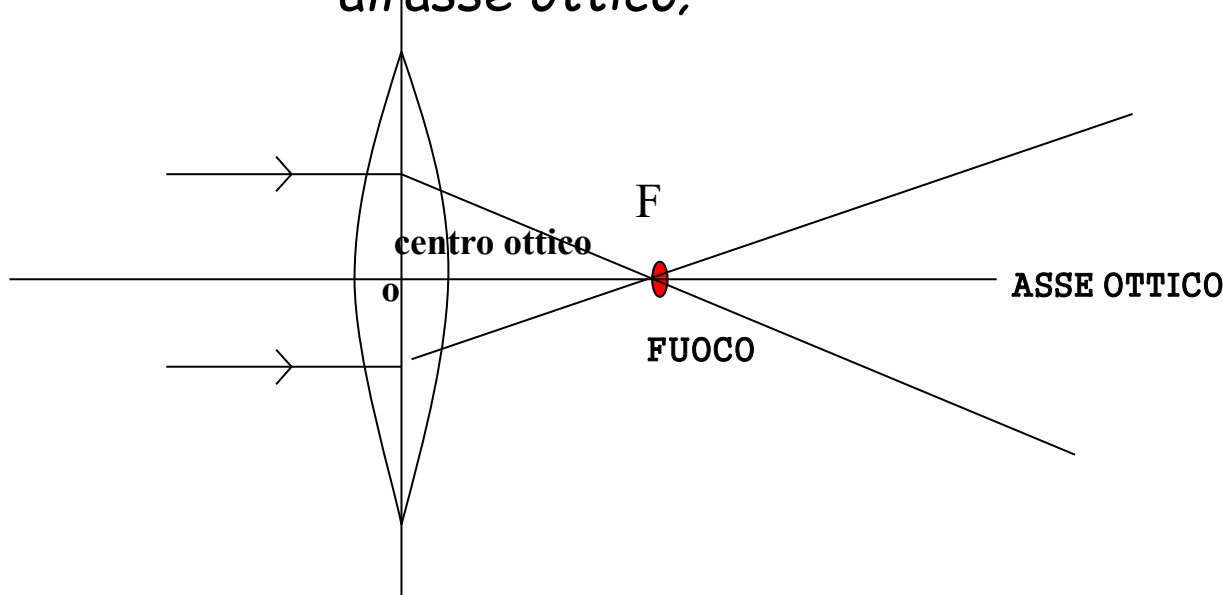


Quando un tipo di cono ha un difetto, la percezione del colore è imperfetta, e si parla allora di **daltonismo**.

LENTE: definizione e nomenclatura

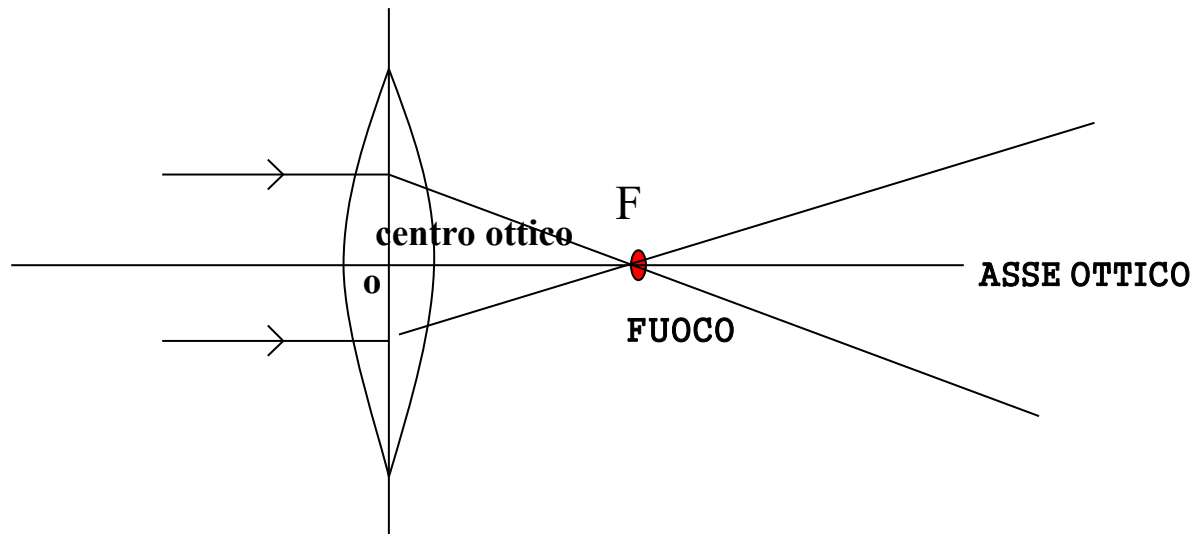
Lente → mezzo trasparente, limitato da due superfici ben levigate di cui almeno una è curva

- **asse ottico** = retta che congiunge i centri di curvatura delle due facce della lente;
- **centro ottico** = punto dell'asse ottico che divide a metà lo spessore della lente;
- **fuoco** = punto in cui convergono tutti i raggi paralleli all'asse ottico;



LENTE: definizione

Il comportamento di una lente è dovuto al **fenomeno della rifrazione**, ovvero al cambiamento di direzione che subisce un raggio luminoso nel passaggio da un mezzo ad un altro con diverso indice assoluto di rifrazione, come accade nel passaggio aria - vetro e vetro - aria attraverso una lente.

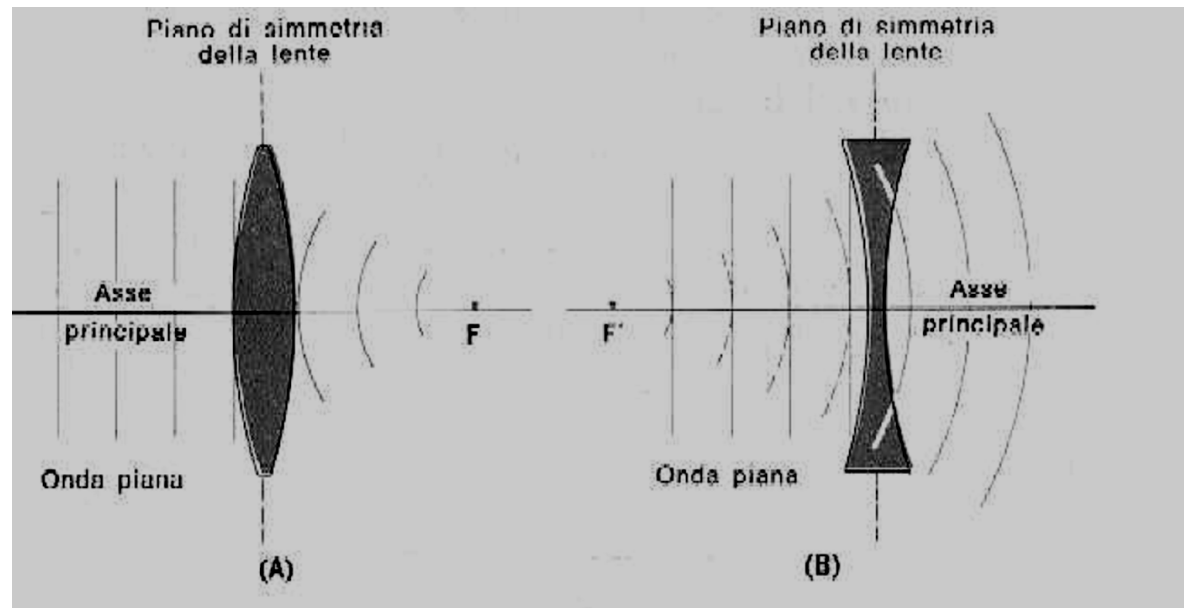


Classificazione delle Lenti

Convergenti →

Divergenti →

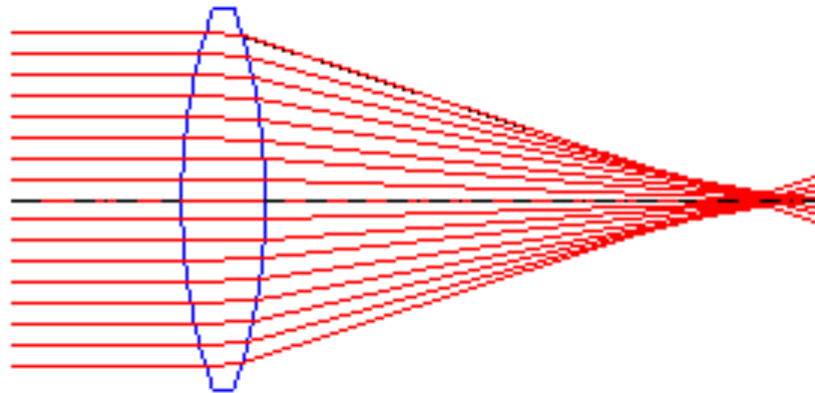
Posizione del fuoco



Lenti convergenti

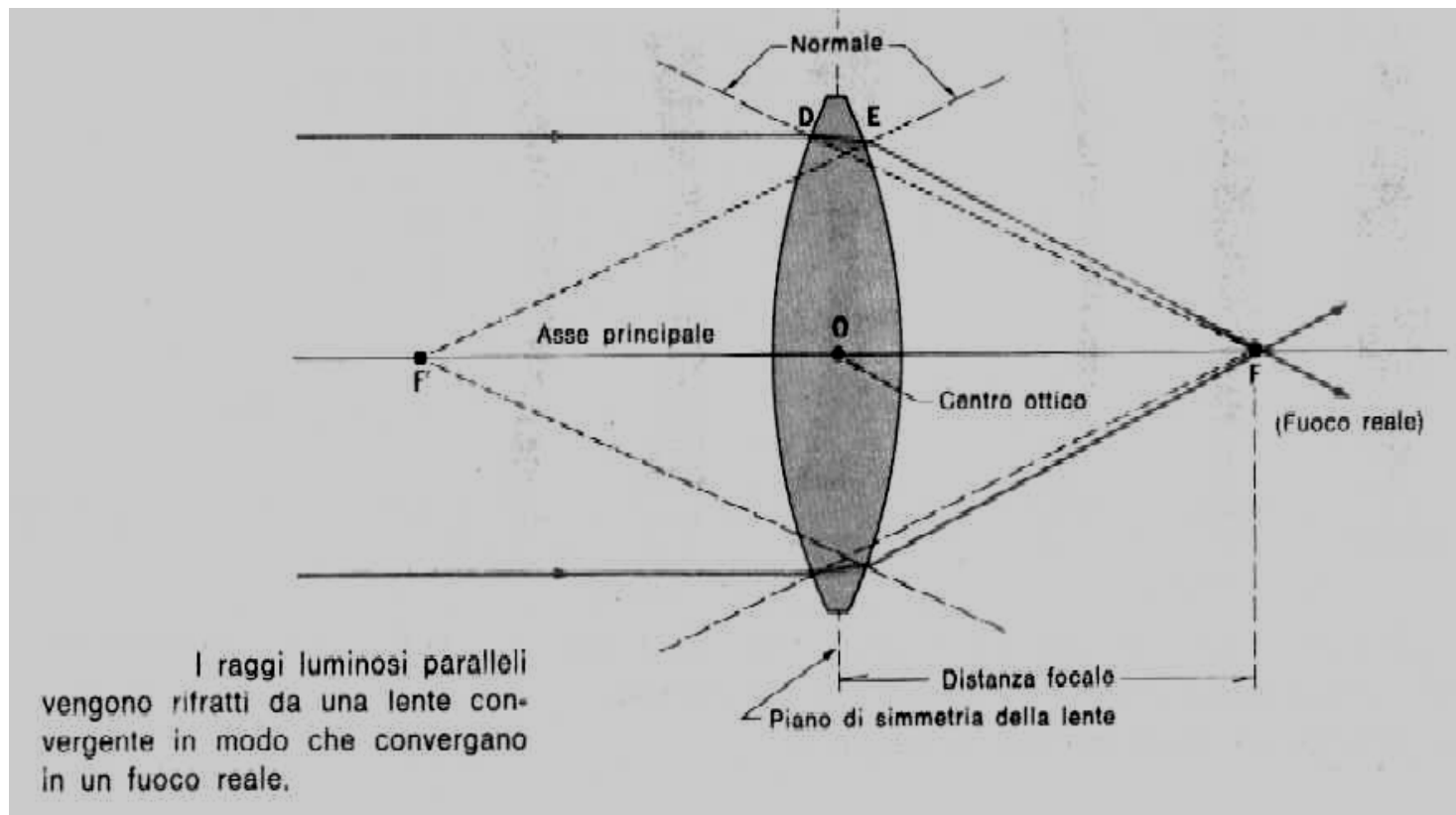
Sono lenti più spesse al centro che alla periferia

Una lente convergente fa deviare il fronte d'onda della luce che la attraversa, poiché la parte spessa rallenta la luce più della parte sottile. Un'onda piana incidente sulla superficie di una lente convergente parallelamente al piano di simmetria della lente viene rifratta e converge verso un punto al di là della lente.



Lenti convergenti

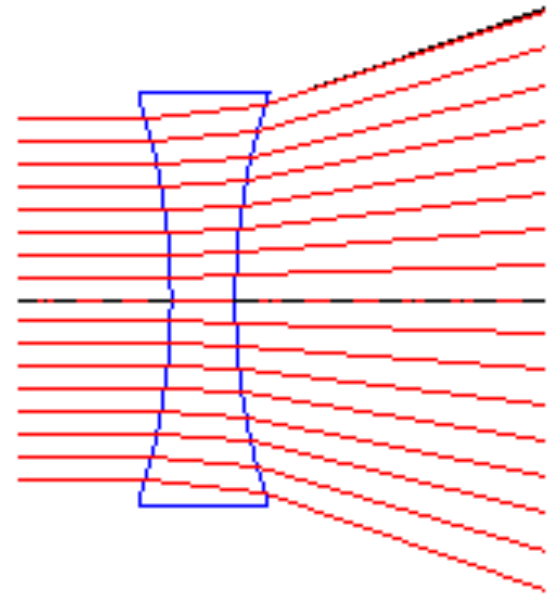
Un insieme di raggi che giungano con direzione parallela all'asse ottico vengono portati a convergere tutti in uno stesso punto detto FUOCO. Queste lenti danno immagini sia virtuali che reali a seconda della posizione dell'oggetto osservato rispetto all'asse ottico e della sua distanza dalla loro superficie.



Lenti Divergenti

Sono lenti più spesse alla periferia che al centro

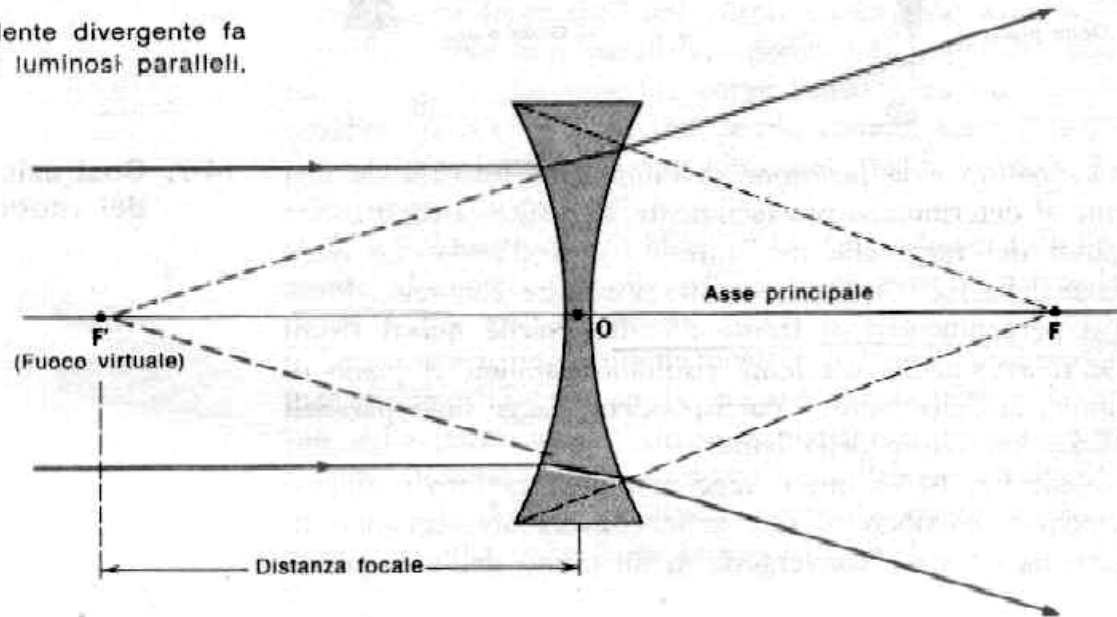
Una lente divergente fa deviare il fronte d'onda della luce che la attraversa, poiché la parte spessa rallenta la luce più della parte sottile. Le onde piane incidenti sulla superficie di una lente divergente parallelamente al piano di simmetria della lente vengono rifratte e convergono verso un punto al di qua della lente. La deviazione che subisce un insieme di raggi paralleli all'asse ottico è tale da farli allontanare l'un l'altro, cioè divergere.



Lenti Divergenti

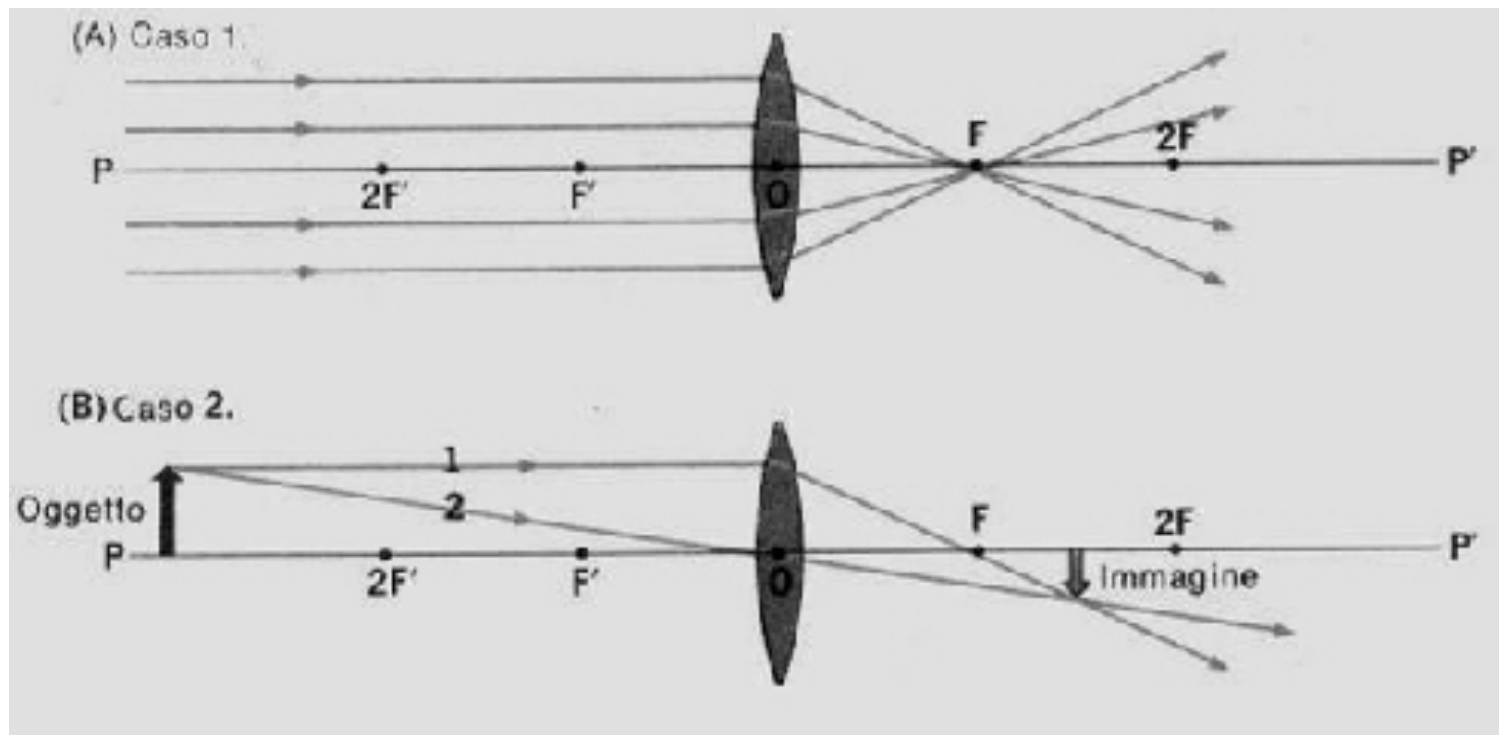
Il **fuoco della lente** è il punto dove si incontrano i *prolungamenti verso la sorgente dei raggi* che l'attraversano e pertanto questo tipo di lenti è in grado di produrre solo immagini virtuali degli oggetti reali.

Una lente divergente fa divergere i raggi luminosi paralleli.



IPOSTESI LENTI SOTTILI

- La luce emessa da una sorgente si propaga in linea retta all'interno di un mezzo omogeneo e isotropo
- Lo spessore delle lenti sia **piccolo** rispetto ai raggi delle superfici delle facce.
- Le caratteristiche ottiche dei mezzi trasparenti in cui si trova a passare il raggio luminoso o i raggi siano indipendenti sia dalla posizione (omogeneità del mezzo) che dal colore della luce.



Posizione oggetto	Posizione immagine	Tipo di immagine	Applicazioni
$P \rightarrow \infty$	Sul fuoco reale	> Un punto	Determinazione della distanza focale di una lente
$P > 2F$	$F < q < 2F$	<ul style="list-style-type: none"> > Reale > Capovolta > Rimpicciolita 	-Macchina fotografica

(C) Caso 3.



(D) Caso 4.

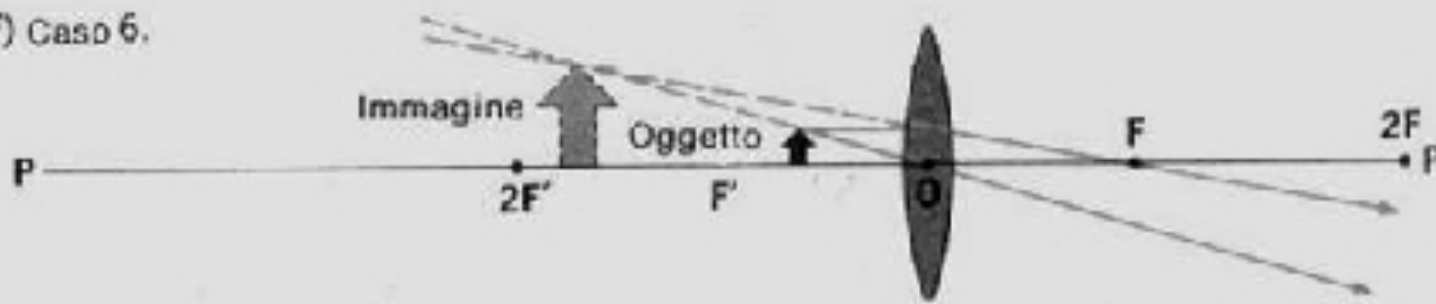


Posizione oggetto	Posizione immagine	Tipo di immagine	Applicazioni
$P = 2 F$	$q = 2 F$	-reale -capovolta -uguale	-cannocchiale terrestre
$2F > p > F$	$q > 2 F$	-Reale -Capovolta -ingrandita	Microscopio composto -Proiettore

(E) Caso 5.



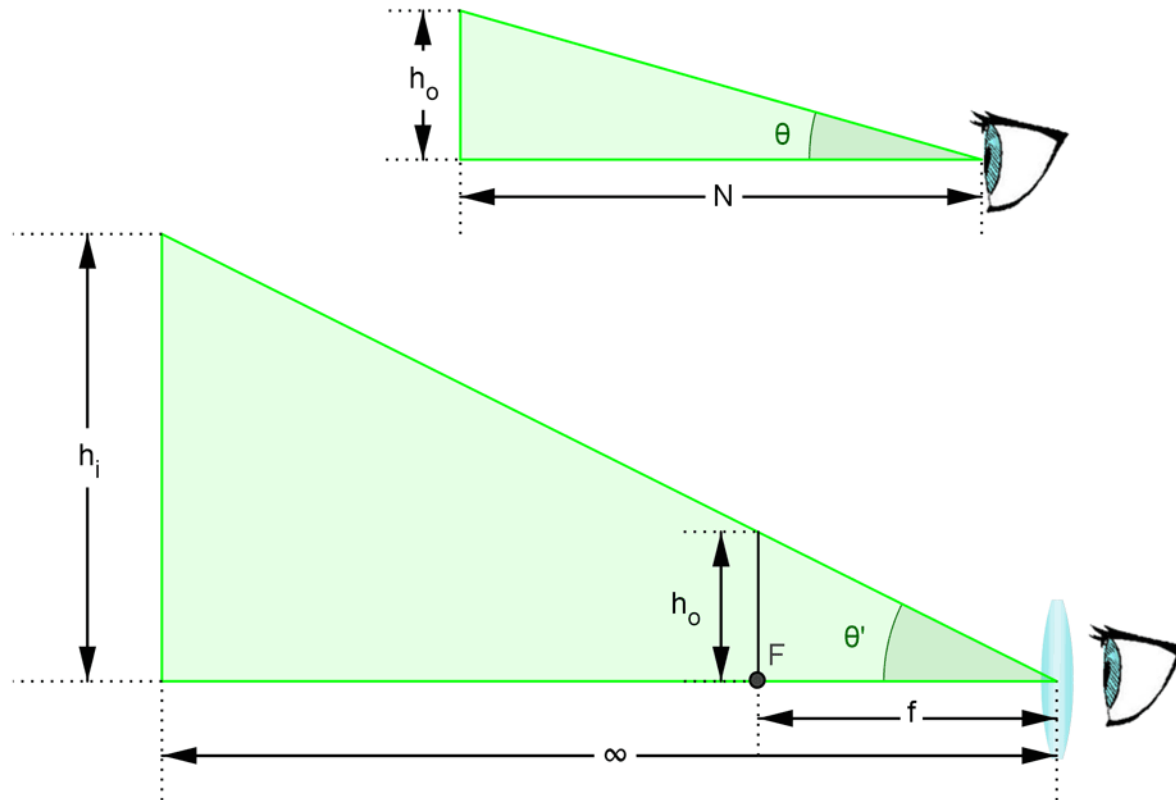
(F) Caso 6.



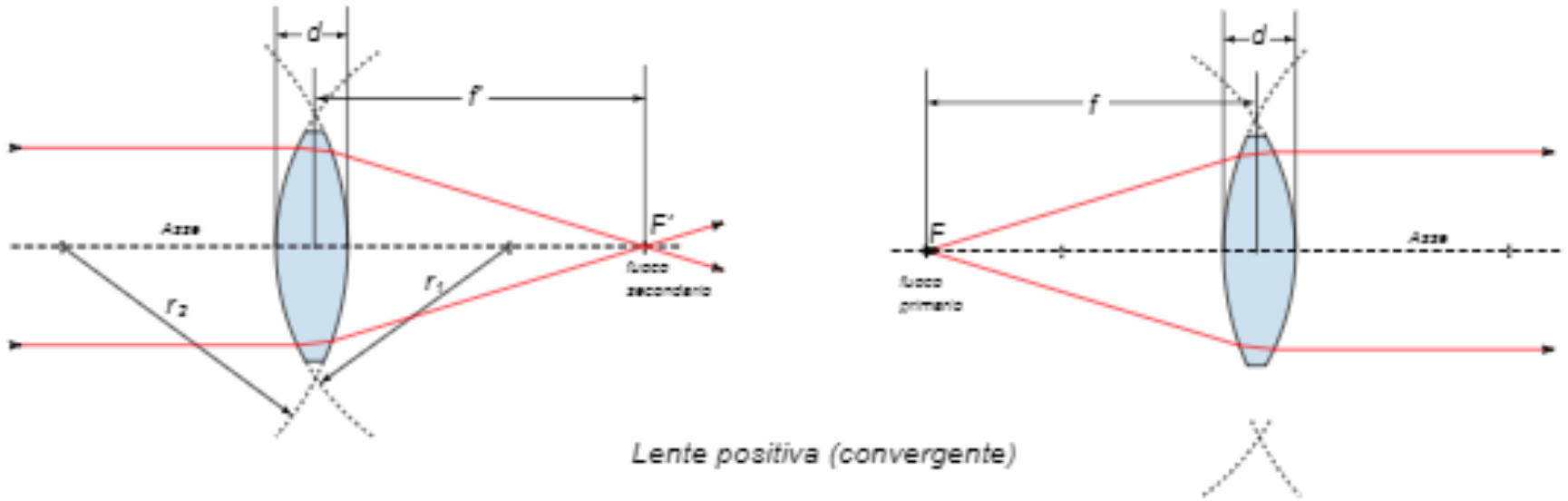
Posizione oggetto	Posizione immagine	Tipo di immagine	Applicazioni
$p = f$	∞	Non si crea	-Fari -Riflettori
$f > p > 0$	$2f > q > f$	-Virtuale -diritta -ingrandita	Lente d'ingrandimento

Lente di ingrandimento – caso F

Quando avviciniamo un oggetto per vederlo piu' grande, stiamo tentando di far coprire all'oggetto una porzione maggiore di retina. Abbiamo una limitazione: quando e' troppo vicino non riusciamo piu' a mettere a fuoco. Con la lente di ingrandimento possiamo crearne un'immagine piu' grande a distanza infinita.



Fuochi di una lente sottile



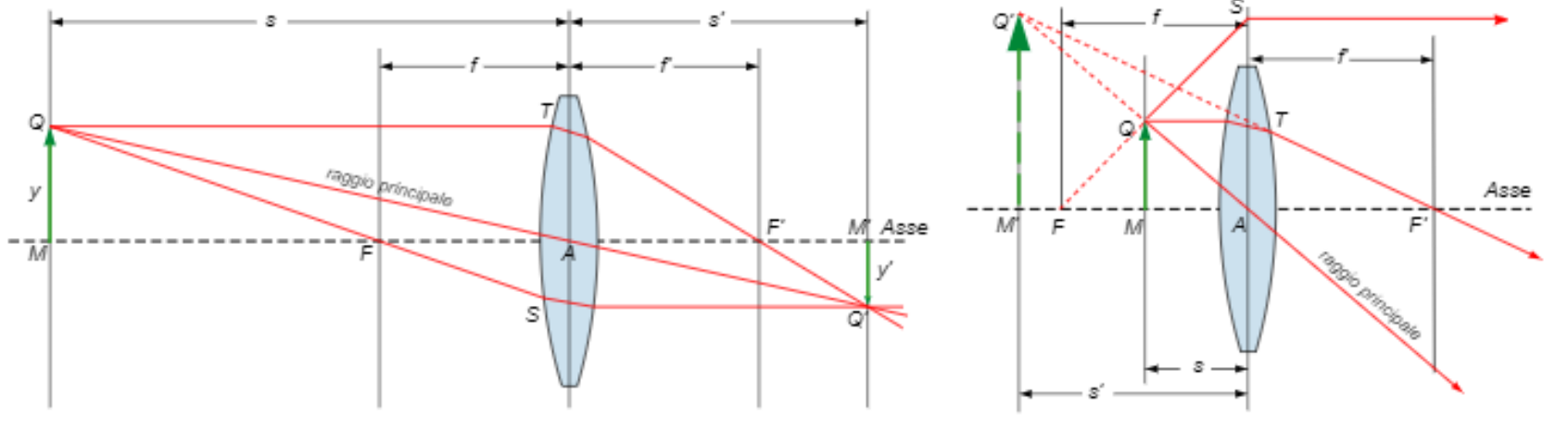
Il fuoco primario F è un punto assiale tale che ogni raggio proveniente da esso o diretto in esso si propaga parallelamente all'asse a seguito della rifrazione.

Il fuoco secondario F' è un punto assiale tale che ogni raggio propagantesi parallelamente all'asse e' diretto in esso o appare provenire da esso a seguito della rifrazione.

Indicando con f e f' rispettivamente le distanze di F ed F' dalla lente, per il principio di reversibilita' segue che

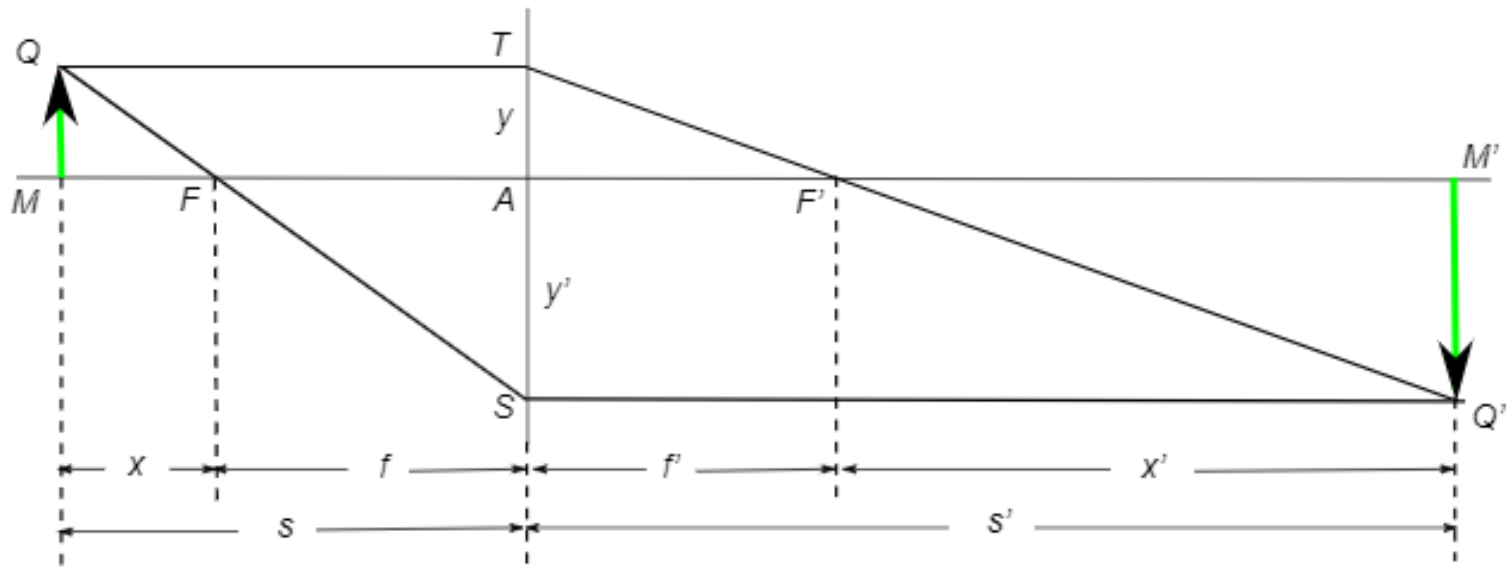
$$f = f'$$

Formazione dell'immagine



Nell'approssimazione parassiale il raggio passante per il centro della lente A non è deviato perché attraversa superfici parallele con piccolo angolo di incidenza. Applicando il principio di reversibilità, il ruolo dell'oggetto e dell'immagine si invertono.

Equazione lenti sottili



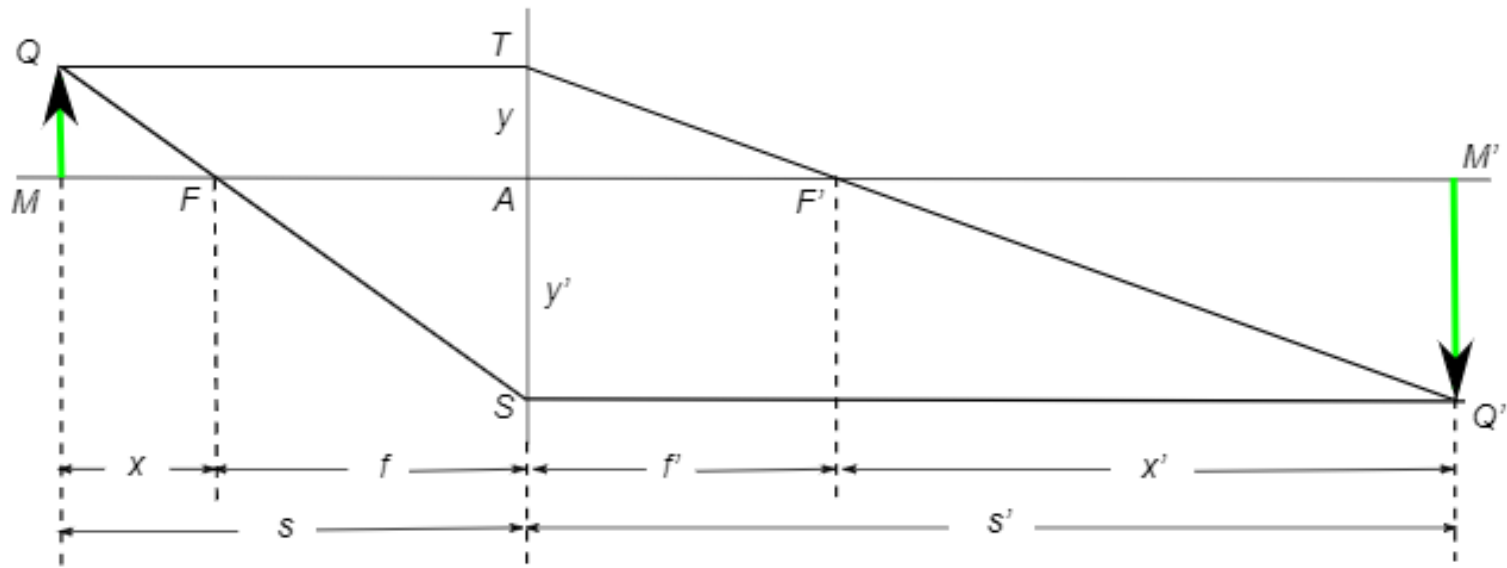
Visto che i triangoli Q'TS e F'TA e i triangoli QTS e FAS sono simili per costruzione, segue che:

$$\frac{y-y'}{s'} = \frac{y}{f} \text{ e } \frac{y-y'}{s} = \frac{-y'}{f}$$

Sommando membro a membro e ponendo $f=f'$ si ha:

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f}$$

Formula ingrandimento lenti



Si definisce l'ingrandimento lineare G prodotto da una lente come il rapporto tra la lunghezza y e y' . Se prendiamo i triangoli QMA e $Q'M'A$, essi sono simili, e quindi vale la formula:

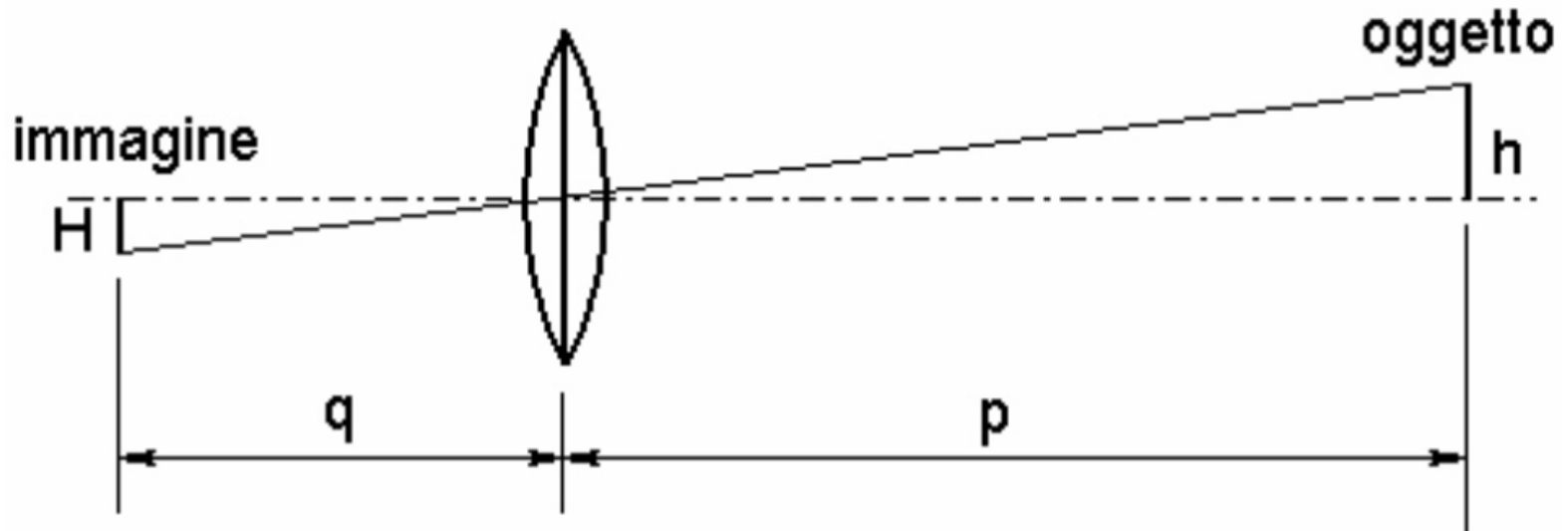
$$G = \frac{y'}{y} = -\frac{s'}{s}$$

Se s e s' , il segno negative indica che l'immagine e' capovolta

Relazione oggetto-immagine

$$I = -\frac{H}{h}$$

$$I = -\frac{q}{p}$$



Formula della
lente:

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

Formula
dell'ingrandimento:

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