

Cos'è l'ottica?

L' **ottica** è la parte della fisica che descrive il comportamento e le proprietà della luce e l'interazione della luce con la materia.

1. La sorgente di luce (ci sono oggetti che emettono luce)
2. L'oggetto (ci sono oggetti che rimandano la luce)
3. L'occhio (parte della luce entra nella pupilla e arriva sulla retina)
4. Il cervello (che interpreta i segnali ricevuti dalla retina).

L'Ottica si compone quindi non solo di fisica (che si occupa di 1 e 2), ma anche di fisiologia (3,4) e di psicologia (4).

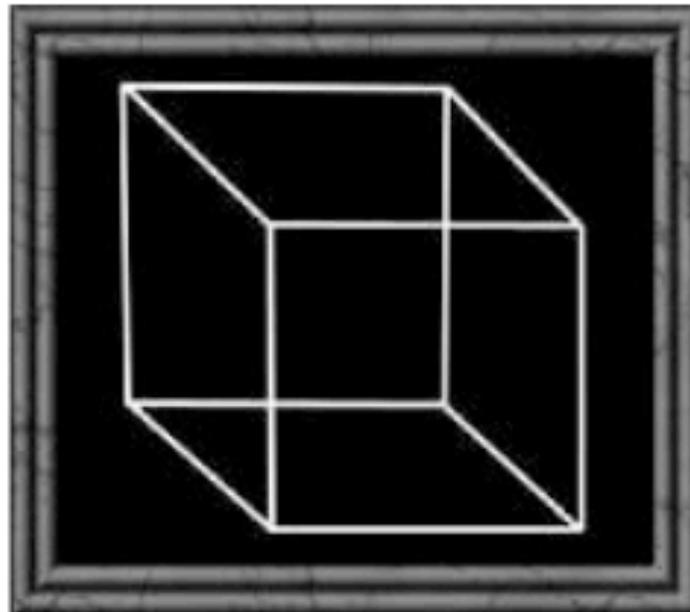
Interpretiamo sempre facilmente ciò che abbiamo davanti agli occhi?



Cosa rappresenta la figura?

Esempi

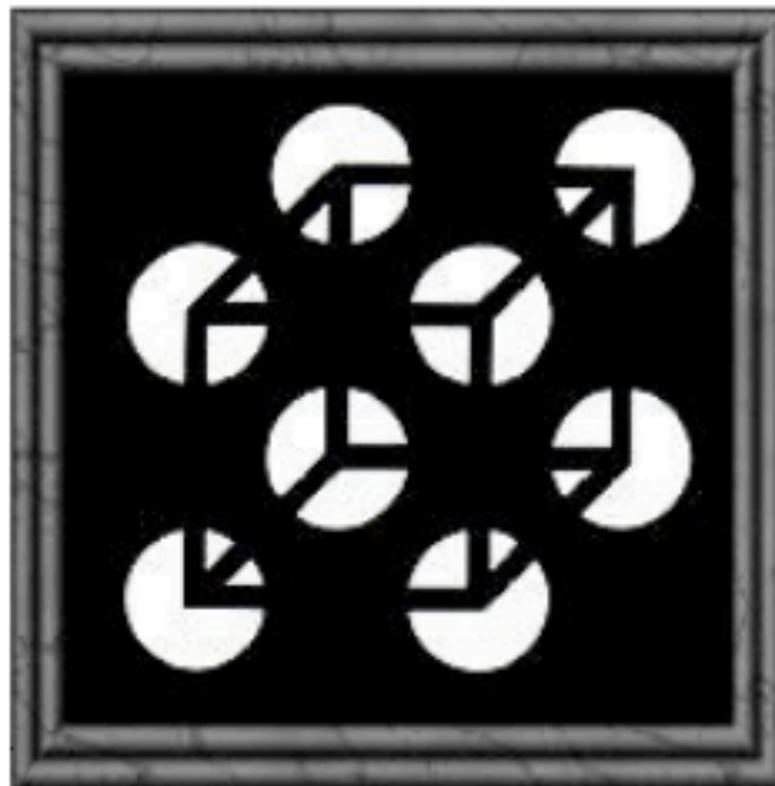
Interpretiamo sempre facilmente ciò che abbiamo davanti agli occhi?



Quale faccia è quella anteriore?

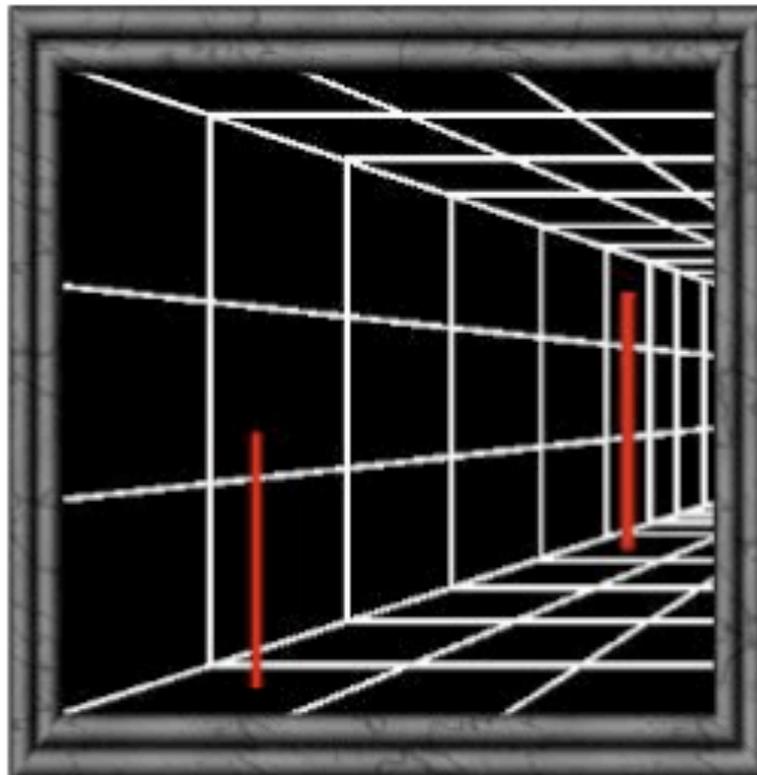
Esempi

Vediamo SOLO ciò che abbiamo davanti agli occhi?



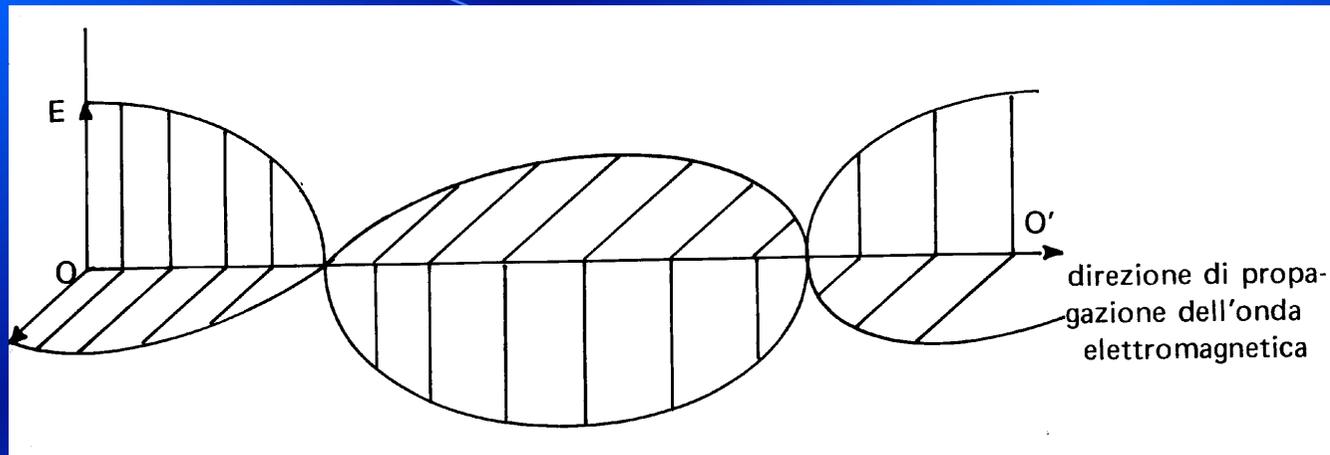
Esempi

Misuriamo correttamente le distanze?



Qual è il paletto più lungo?

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:

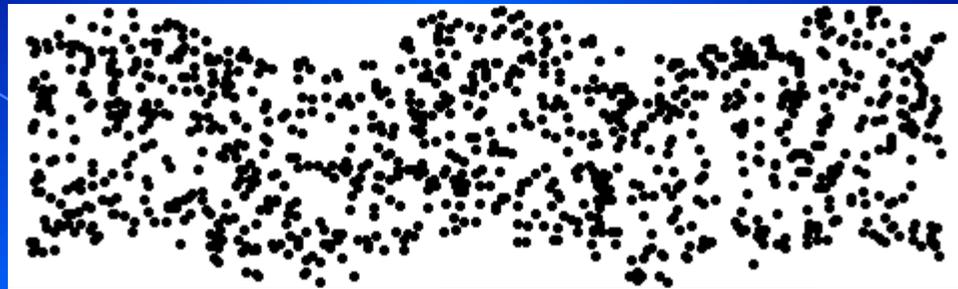
$$c = \lambda \cdot \nu \quad \nu = 1/T$$

essendo c la velocità della luce nel vuoto pari a $3 \cdot 10^8$ 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.

direzione di
movimento
delle particelle



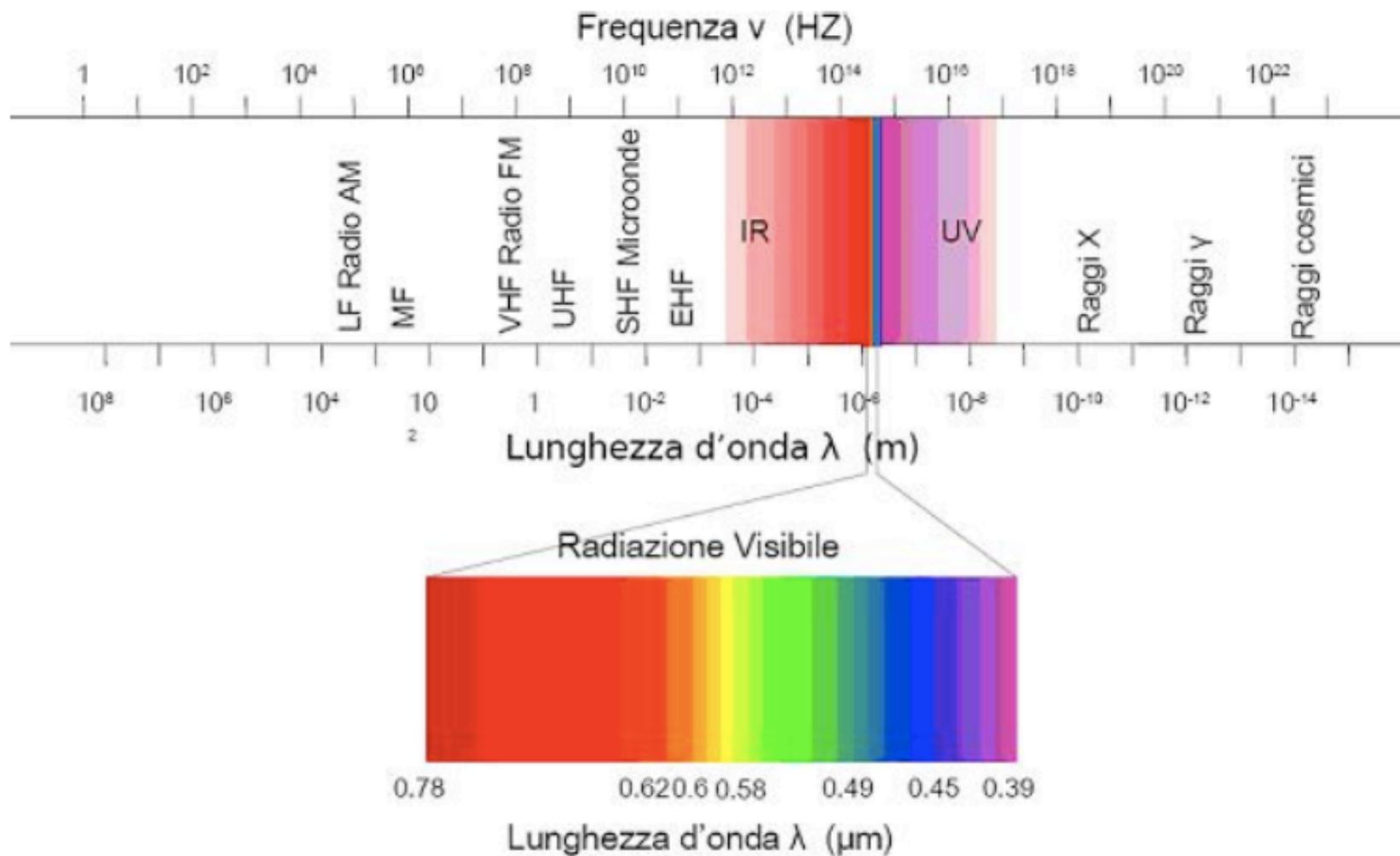
direzione di propagazione dell'onda

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



Luce e sorgenti

1. La sorgente di luce (ci sono oggetti che emettono luce)
2. L'oggetto (ci sono oggetti che rimandano la luce),

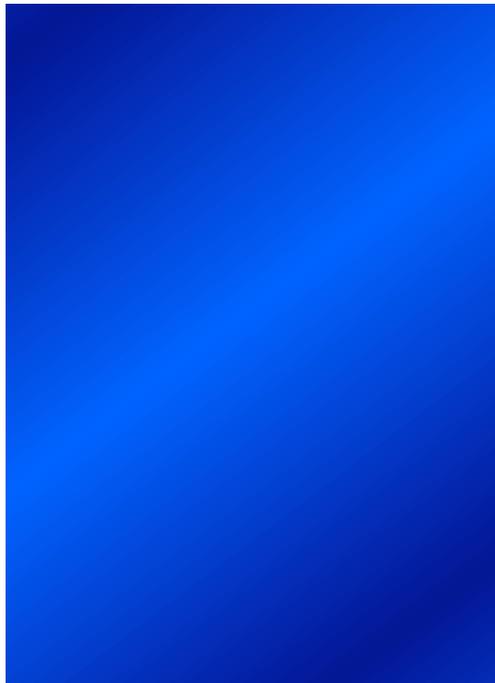
LA LUCE TRASPORTA ENERGIA

La quantità di energia che cade su un metro quadro di terreno mediamente soleggiato sarebbe sufficiente per il fabbisogno totale di una famiglia



La luce si vede?

Un raggio luminoso si vede solo se colpisce il nostro occhio.....a meno che la stanza non sia piena di polvere (o di fumo), e allora sfruttiamo la diffusione della luce (vedi in seguito) da parte delle particelle di sporco per osservare il raggio anche da posizioni laterali.



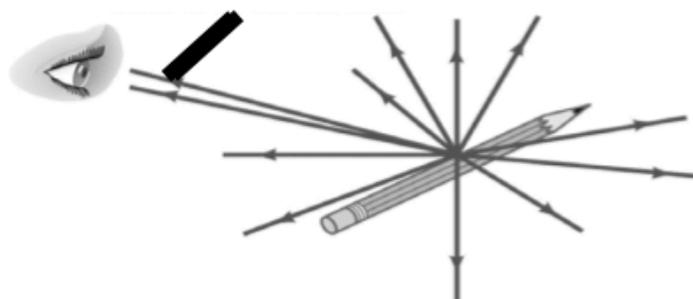
La luce e l'ottica geometrica

- 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

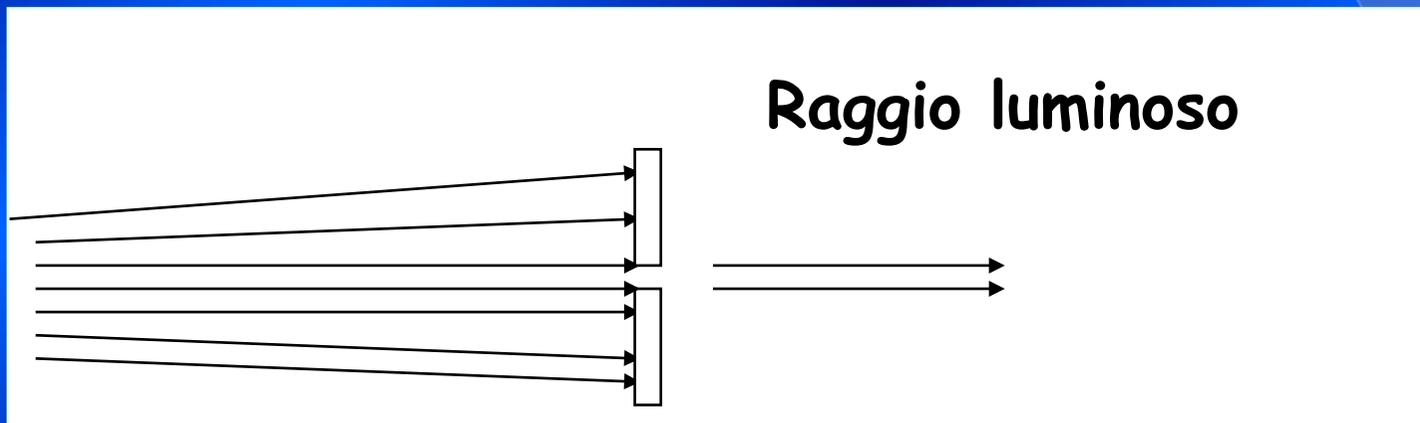
OTTICA GEOMETRICA ed OTTICA FISICA

- 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

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



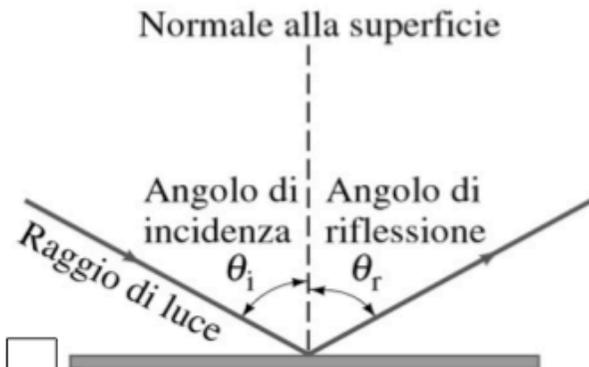
Riflessione

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

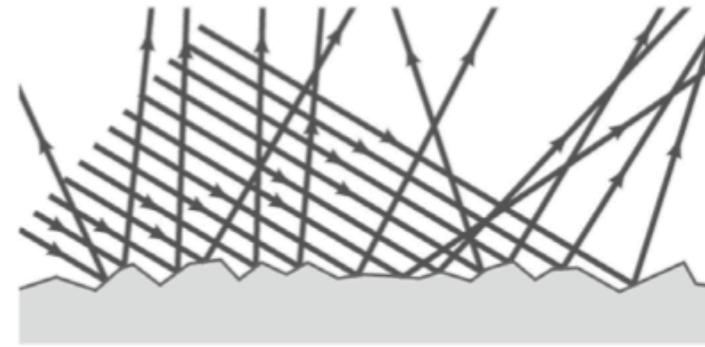
- raggio incidente, normale alla superficie di separazione e raggio riflesso giacciono sullo stesso piano;
- l'angolo di incidenza e l'angolo di riflessione sono uguali

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

La riflessione

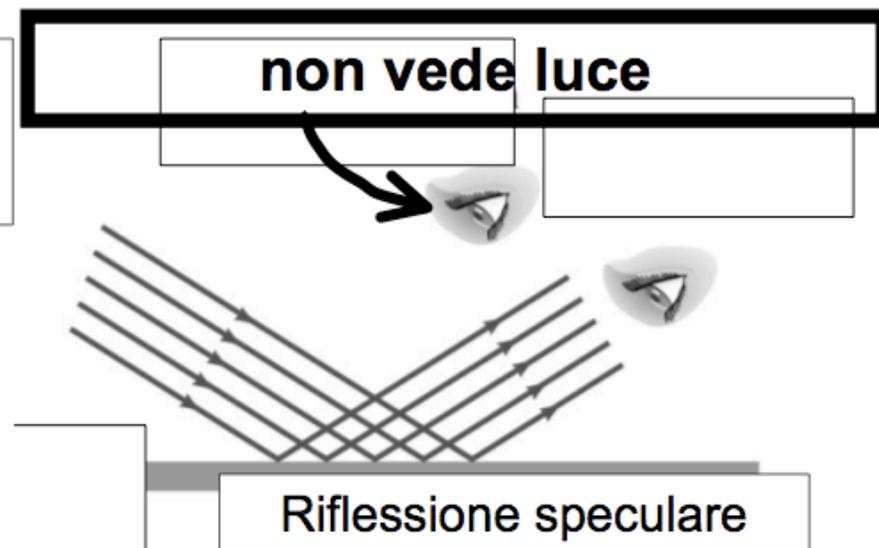
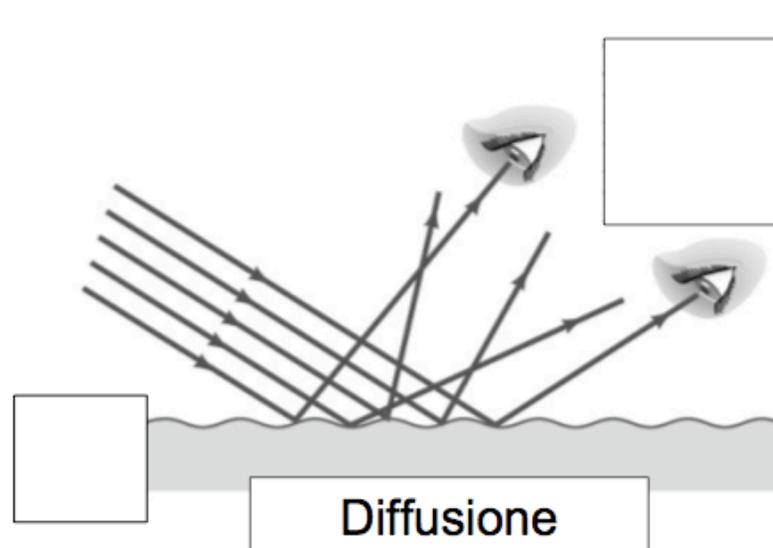


Riflessione speculare



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:

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

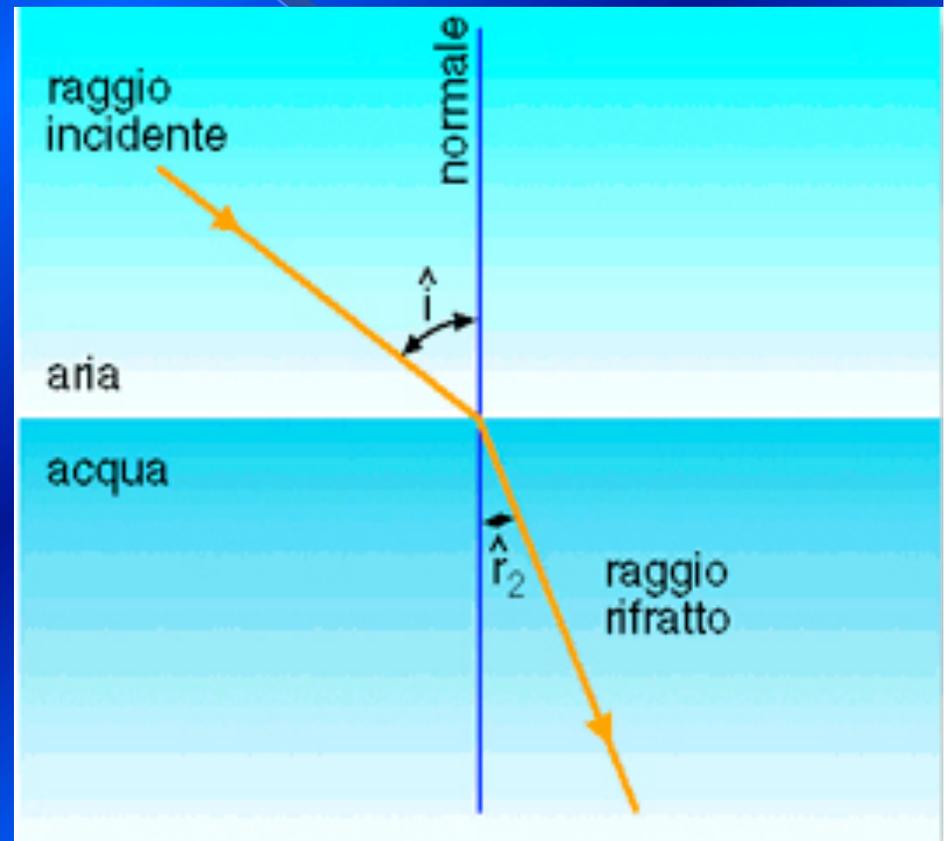
Il passaggio della luce attraverso mezzi ad indici di rifrazione n diversi provoca la variazione della sua traiettoria



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.

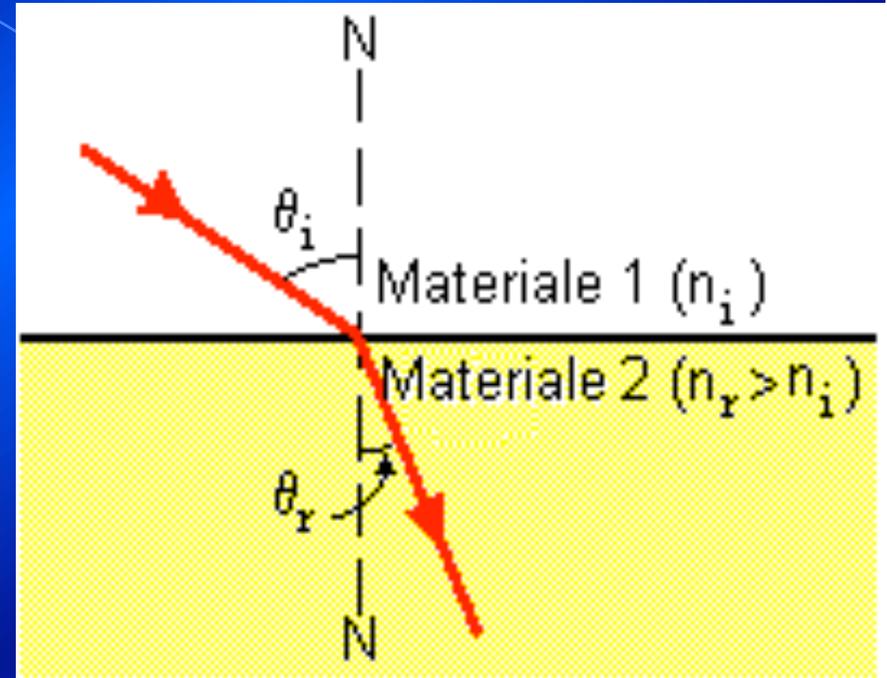


Rifrazione: legge di Snell

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

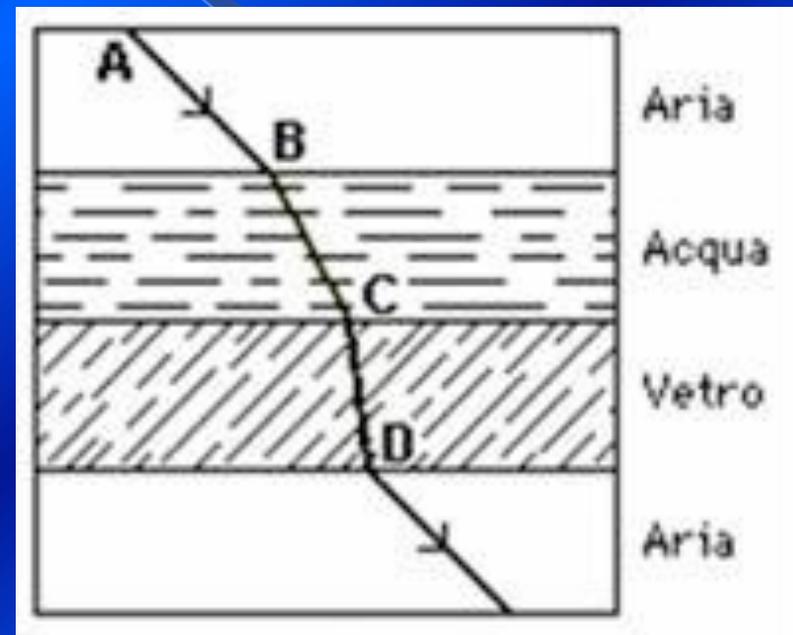
Se il secondo mezzo risulta più rifrangente ovvero

$$n_2 > n_1 \Rightarrow n_2 > n_1$$

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.

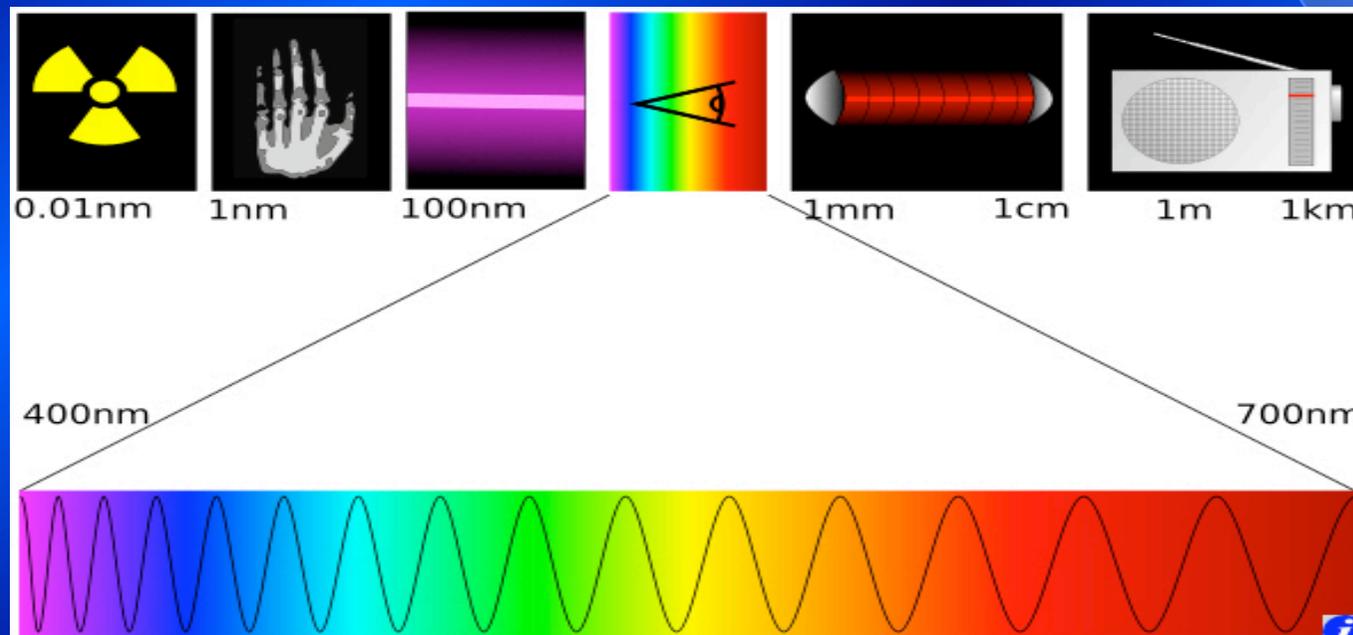
sostanza	n	velocità (unità c)
aria	1.000292	0.999708
anilina	1.586	0.631
acqua	1.332	0.751
benzene	1.501	0.666
tetraclorometano	1.599	0.625
cloroformio	1.446	0.692
glicerina	1.472	0.679
quarzo	1.425	0.702
vetro flint silicato	1.622	0.617
vetro crown silicato	1.517	0.659
diamante	2.417	0.414

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.

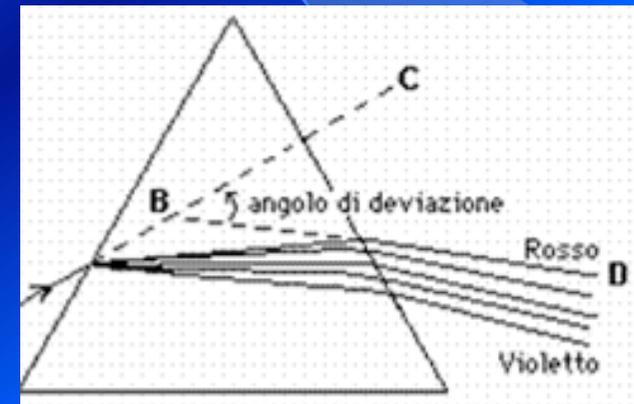


DISPERSIONE DELLA LUCE BIANCA: il prisma ottico

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

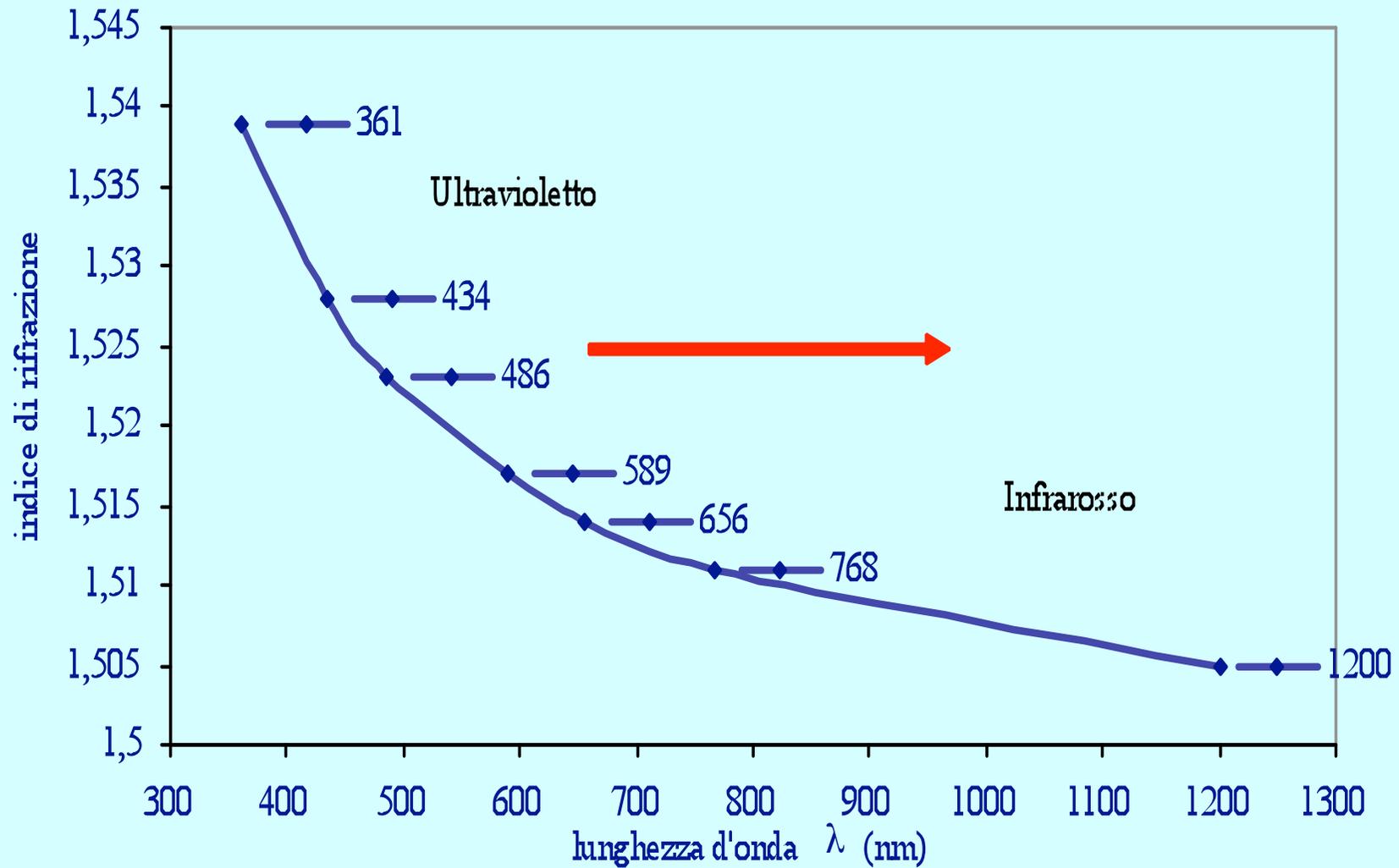
IL VETRO CROWN

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.

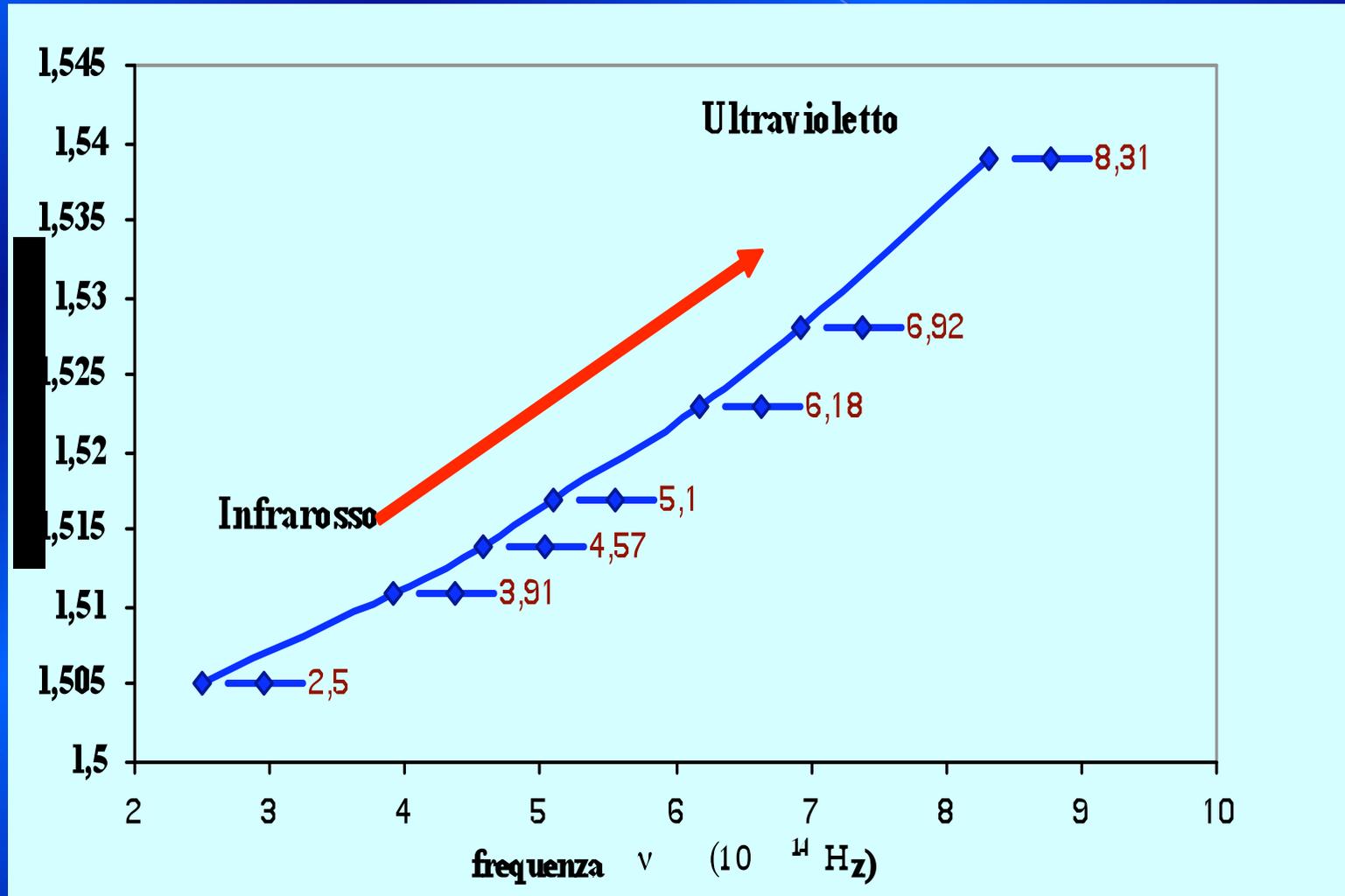
La variazione dell'indice **n** risulta comunque molto lenta, pari a circa 1%, ma tale da produrre il noto **fenomeno di dispersione**.

	Lunghezza d'onda λ (nm) nel vuoto	Frequenza ν (10^{14} Hz)	Indice di rifrazione n
Ultravioletto vicino	361	8.31	1.539
	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

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



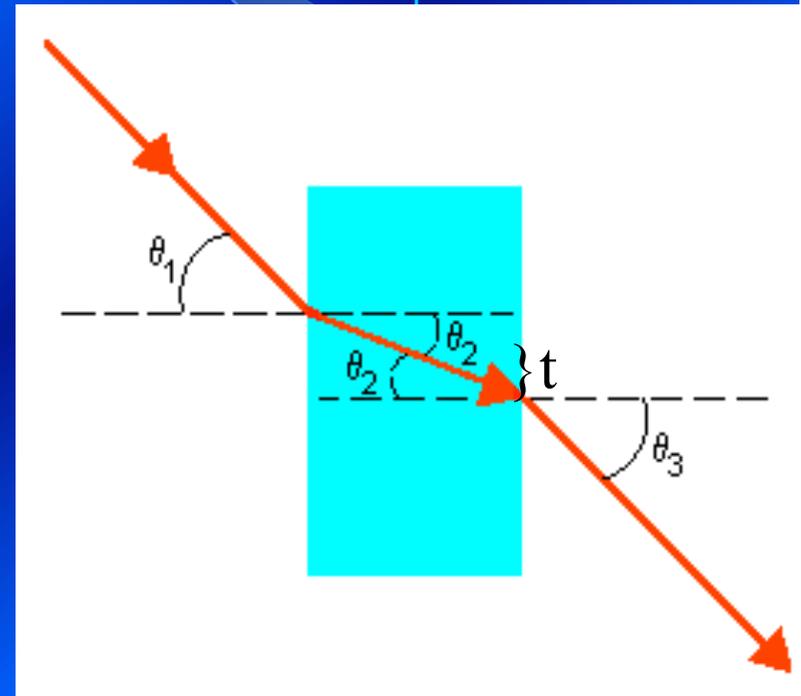
ANDAMENTO DEGLI INDICI DI RIFRAZIONE IN FUNZIONE DELLA FREQUENZA PER IL VETRO CROWN



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 finché 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 .

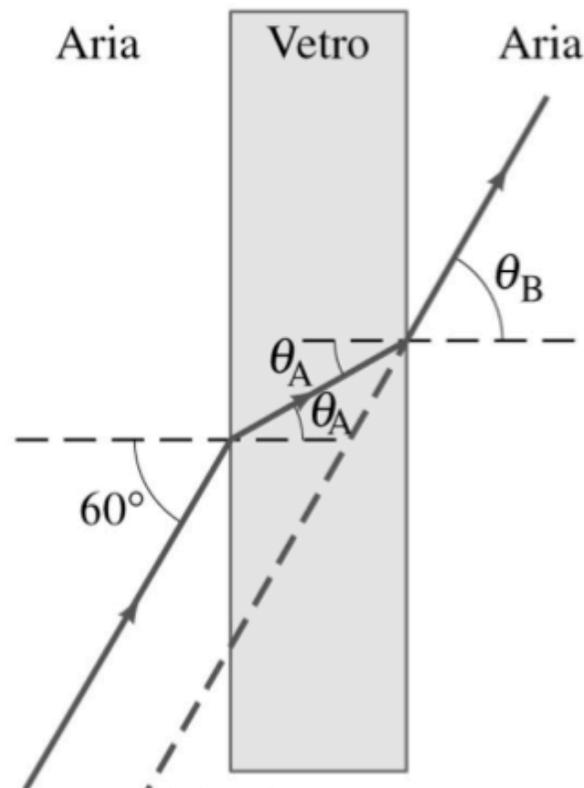


Il raggio che attraversa la lastra non è deviato dalla sua direzione. Esso è spostato parallelamente a se stesso

Esercizio

Problema. Un raggio di luce che si propaga in aria colpisce una lastra di vetro con un angolo di 60° . Sapendo che $n_{\text{vetro}} = 1.50$, calcolare:

1. L'angolo di rifrazione nel vetro θ_A
2. L'angolo θ_B con il quale emerge dalla lastra.



$$\text{Legge di Snell} \quad n_1 \text{sen} \theta_1 = n_2 \text{sen} \theta_2$$

$$n_{\text{aria}} \text{sen} 60 = n_{\text{vetro}} \text{sen} \theta_A$$

$$\text{sen} \theta_A = \frac{n_{\text{aria}} \text{sen} 60}{n_{\text{vetro}}} = 0.577 \quad \theta = 35.2^\circ$$

$$n_{\text{aria}} \text{sen} \theta_B = n_{\text{vetro}} \text{sen} \theta_A$$

$$\text{sen} \theta_B = \frac{n_{\text{vetro}} \text{sen} \theta_A}{n_{\text{aria}}} = \frac{1.5 \cdot 0.577}{1} = 0.866 \quad \theta = 60^\circ$$

PASSAGGIO DELLA LUCE ATTRAVERSO UNA LASTRA PIANO - PARALLELA

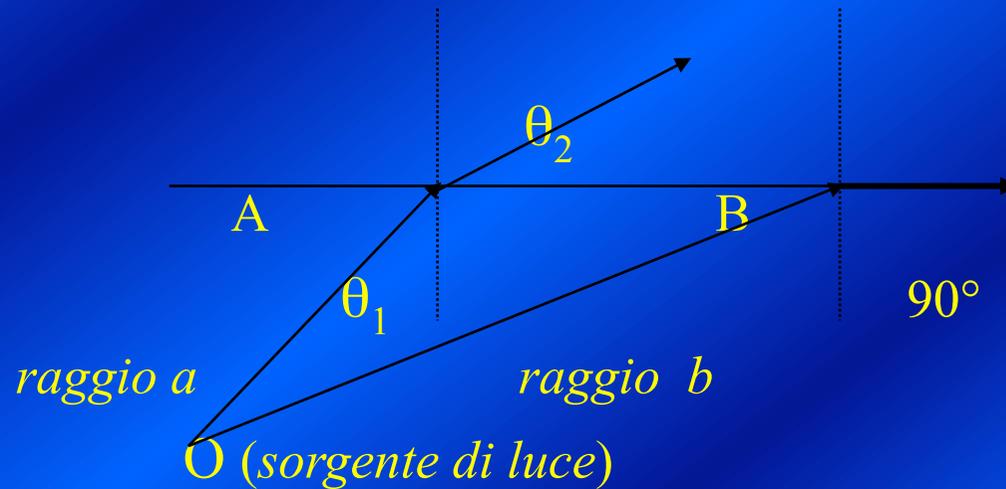
L'effetto della lastra sul raggio è solo quello di spostarlo parallelamente di una quantità pari ad Δ .

La entità di Δ risulta proporzionale allo spessore t , secondo la relazione:

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

RIFLESSIONE 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:

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

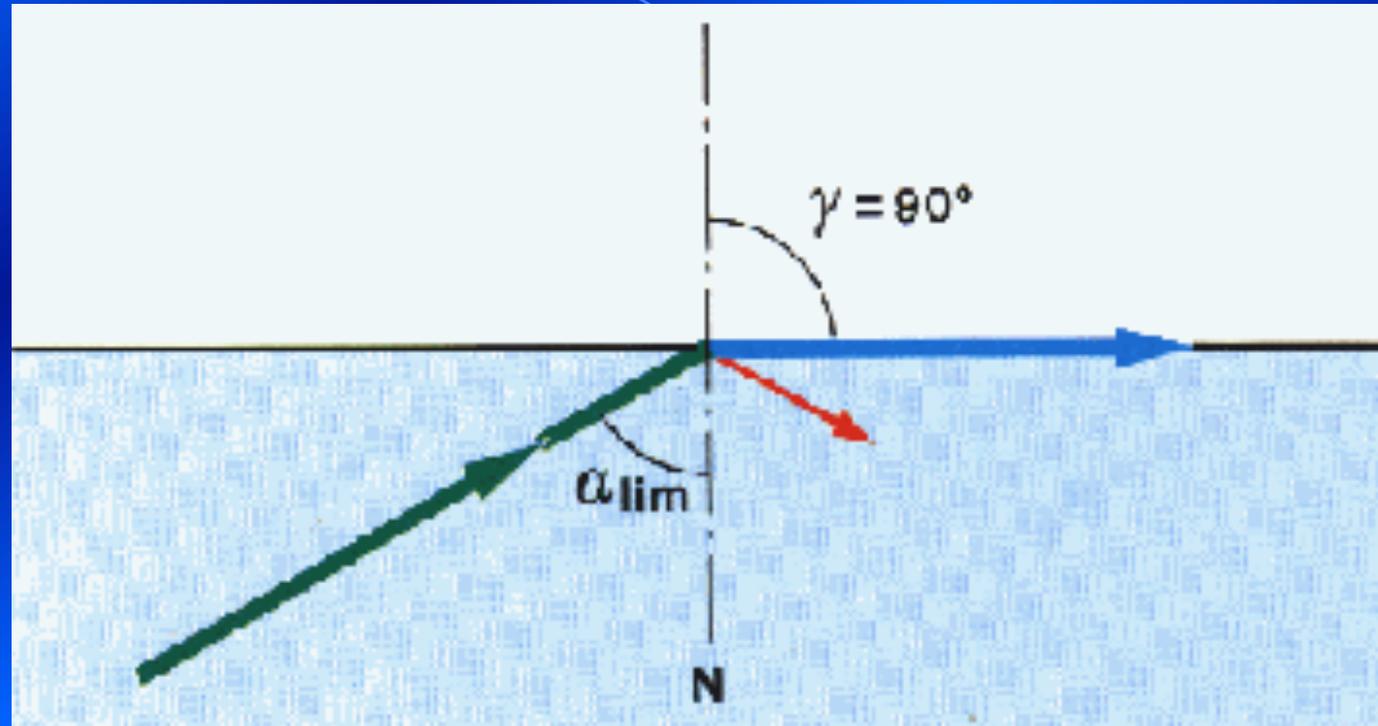
essendo $n_1 > n_2$

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° :

$$\sin \theta_{\text{limite}} = n_2 / n_1 \sin 90^\circ = n_2 / n_1$$

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

Riflessione interna totale



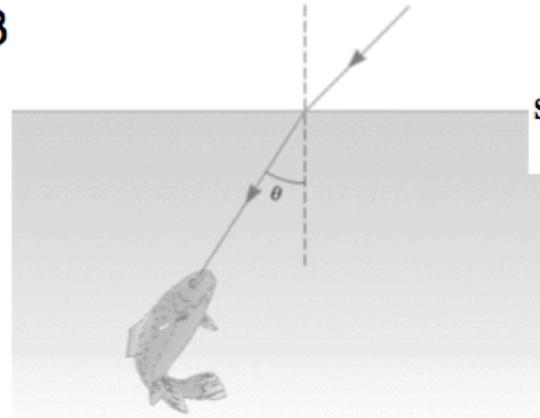
$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin 90$$
$$\sin \theta_1 = n_2 / n_1 < 1$$

Esercizio

Esempio. Trovare l'angolo limite per la superficie acqua-aria se l'indice di rifrazione dell'acqua e' 1.33

Angolo limite

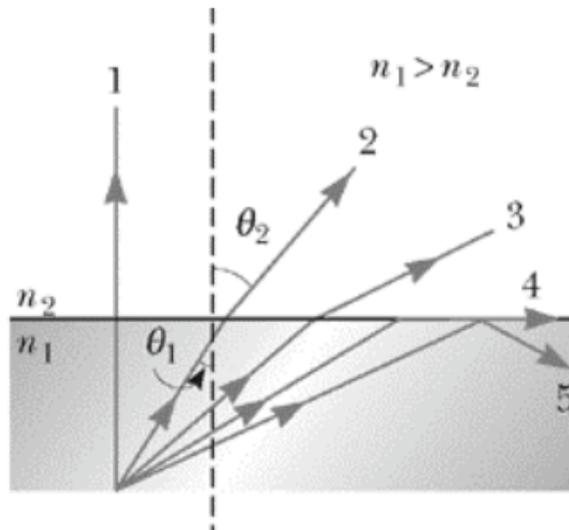
$$\text{sen } \theta_{\text{limite}} = \frac{n_2}{n_1}$$



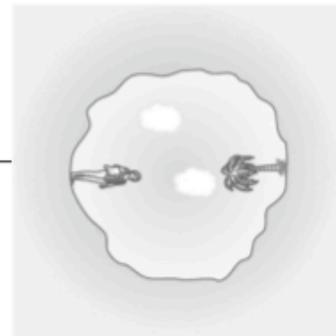
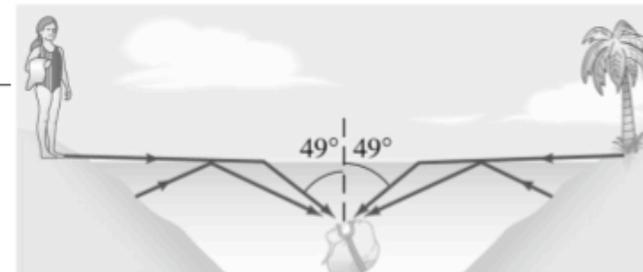
$$\text{sen } \theta_{\text{limite}} = \frac{n_{\text{aria}}}{n_{\text{acqua}}} = \frac{1}{1.33} = 0.752$$

$$\theta_{\text{limite}} = \text{arcsen}(0.752) = 49^\circ$$

Cosa vede il pesce guardando dal fondo dello stagno ?

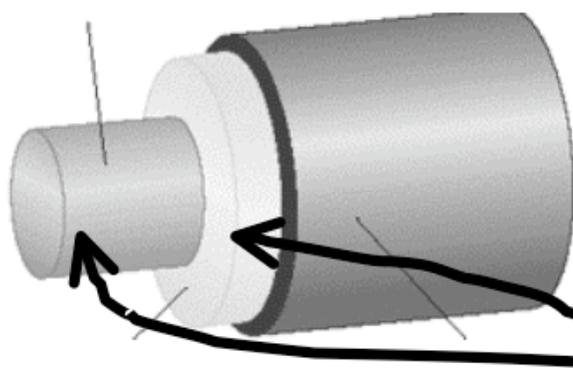
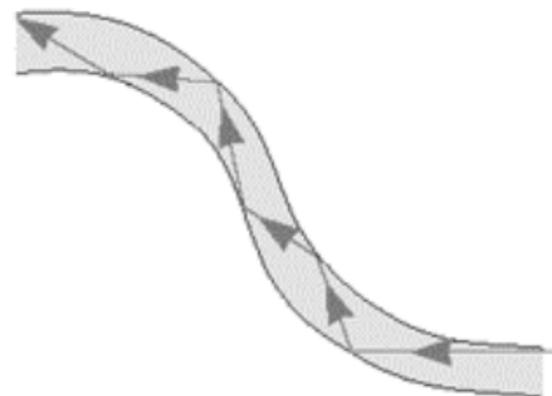


- Raggio 1: non e' deviato
- Raggi 2 e 3: si allontanano dalla normale
- Raggio 4: 'vede' a 90° rispetto alla normale
- Raggio 5: riflessione totale



Le fibre ottiche

- Applicazione della riflessione totale: guida di luce



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

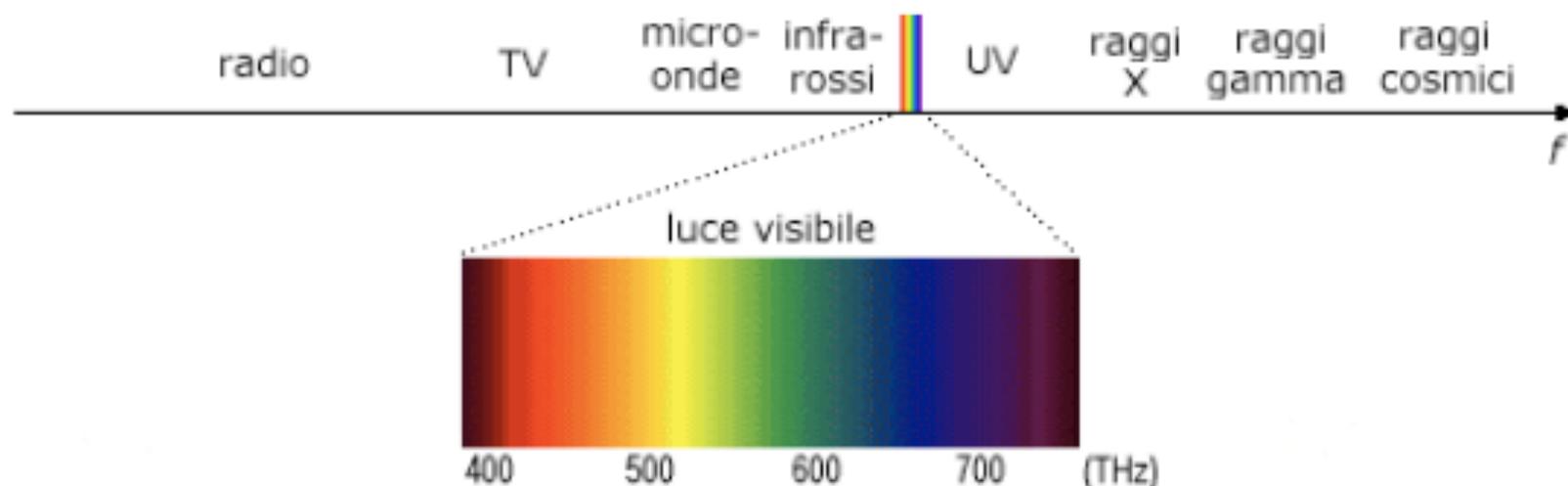
- Se uso un fascio di fibre sottili: fibre ottiche
- In genere il diametro di una fibra ottica e' di qualche decina di micron (20-100 μm)

- 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 $\theta_{\text{riflessione totale}}$

Colori

Il **colore** è la percezione visiva generata dai segnali nervosi che i fotorecettori della retina mandano al cervello quando assorbono radiazioni elettromagnetiche di determinate lunghezze d'onda e intensità. La luce visibile dall'occhio umano è un'onda elettromagnetica con una frequenza che va da circa 400 THz (rosso) a 780 THz (violetto), ovvero una lunghezza d'onda che va da 780 nm a 380 nm.



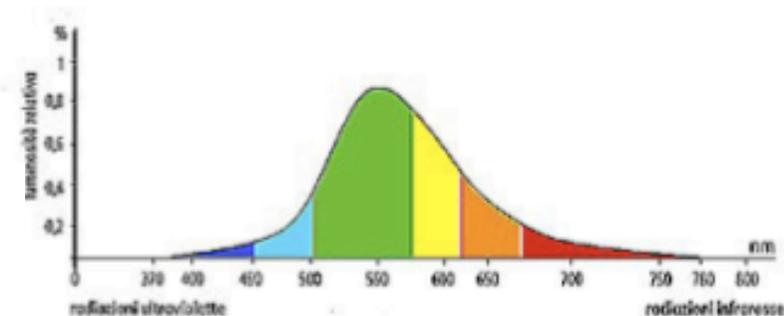
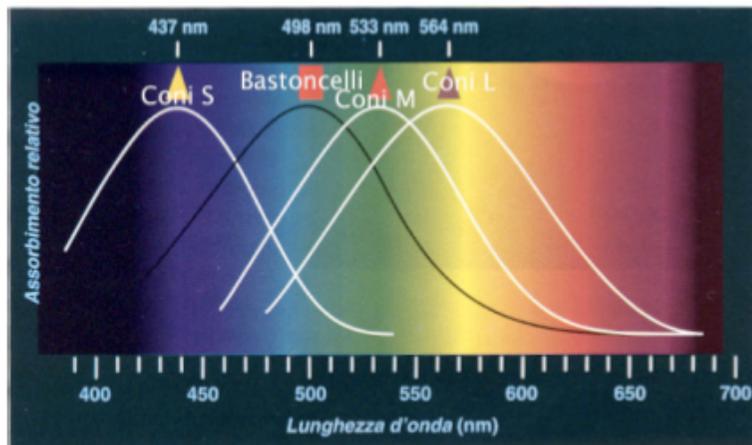
Colori

colore	intervallo di lunghezza d'onda	intervallo di frequenza
<u>rosso</u>	~ 750–630 nm	~ 430–480 THz
<u>arancione</u>	~ 630–590 nm	~ 480–510 THz
<u>giallo</u>	~ 590–560 nm	~ 510–540 THz
<u>verde</u>	~ 560–490 nm	~ 540–610 THz
<u>blu</u>	~ 490–450 nm	~ 610–670 THz
<u>viola</u>	~ 450–380 nm	~ 670–750 THz

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)

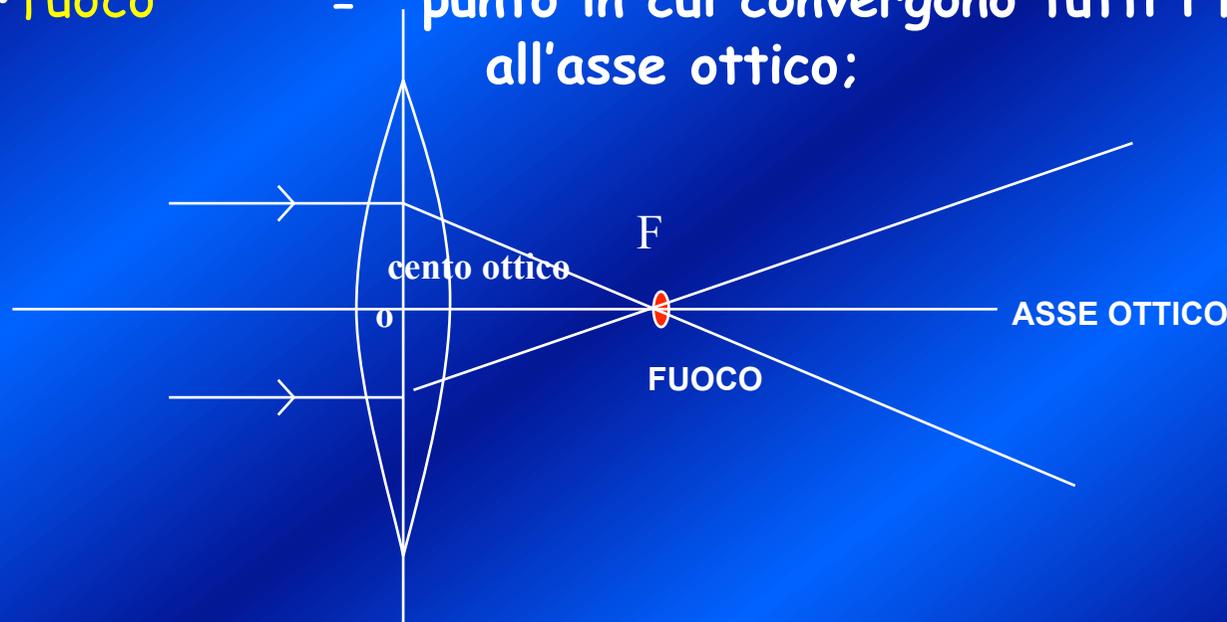


Quando un tipo di cono ha un difetto, la percezione del colore è imperfetta, e si parla allora di **daltonismo**.

LENTE: definizione e nomenclatura

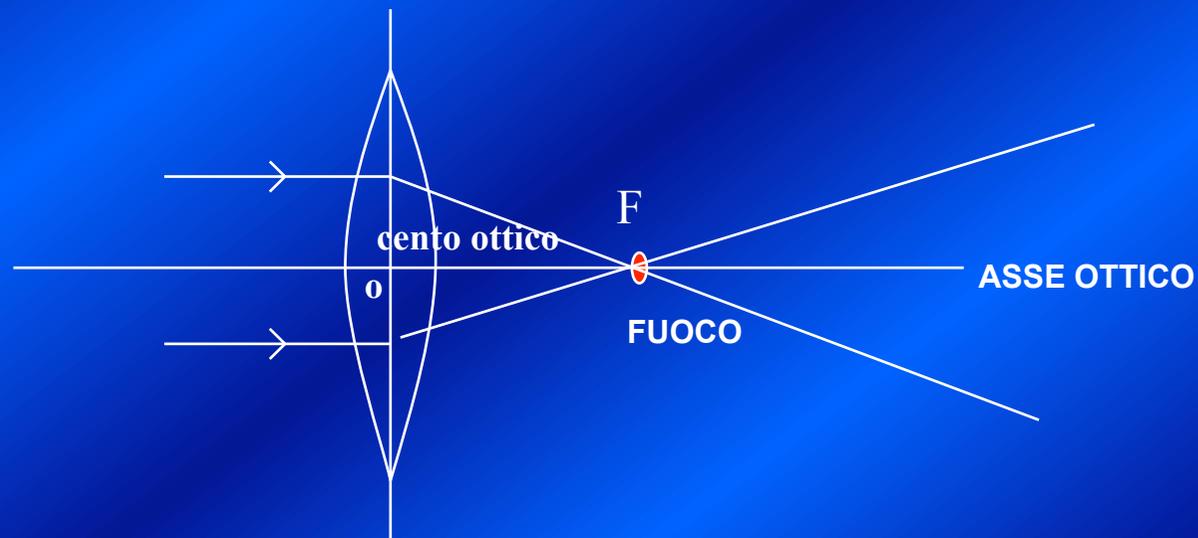
Lente → mezzo trasparente, limitato da due superfici ben levigate di cui almeno una è curva

- **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.

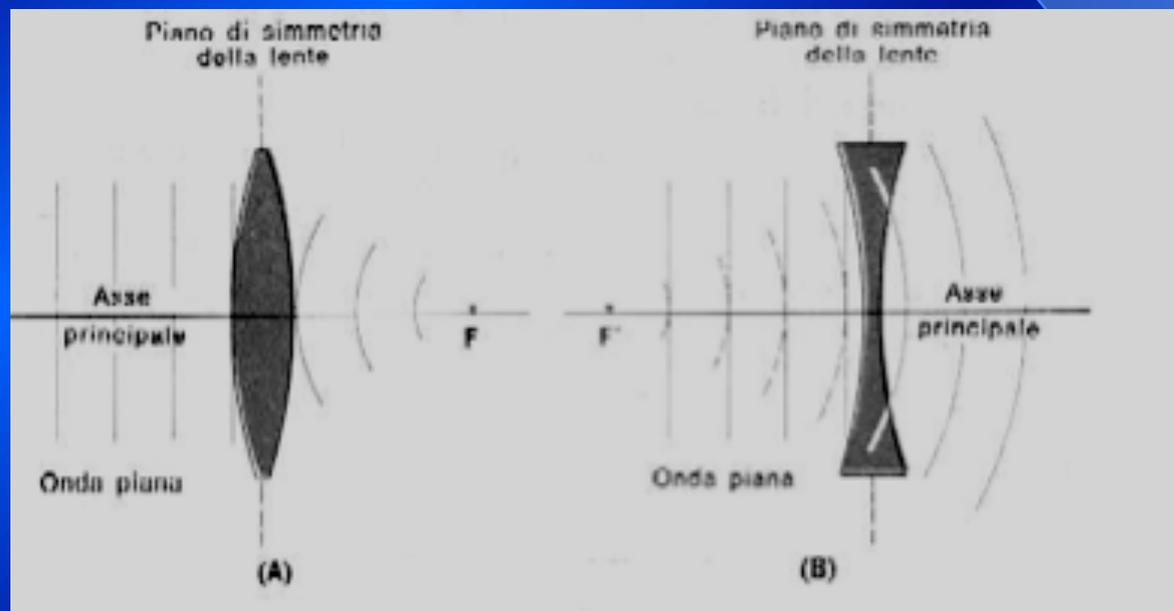


Classificazione delle Lenti

Posizione del fuoco

Convergenti

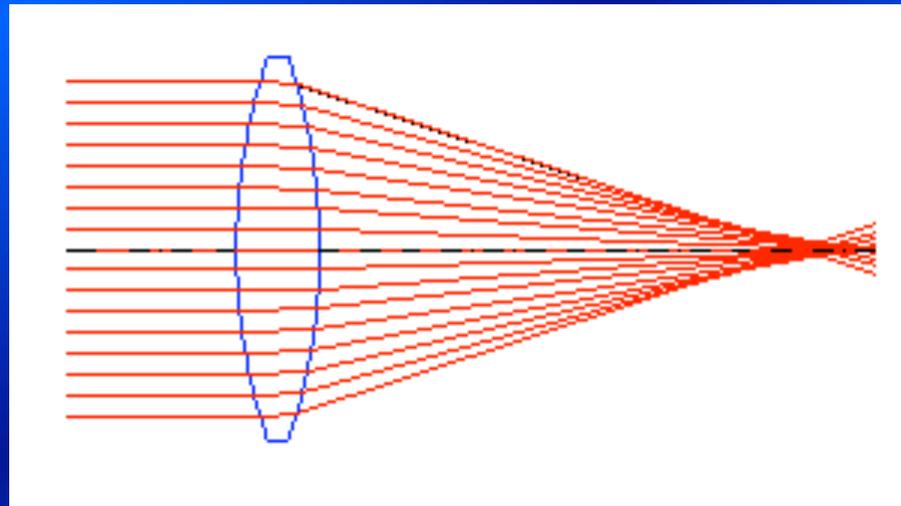
Divergenti



Lenti convergenti

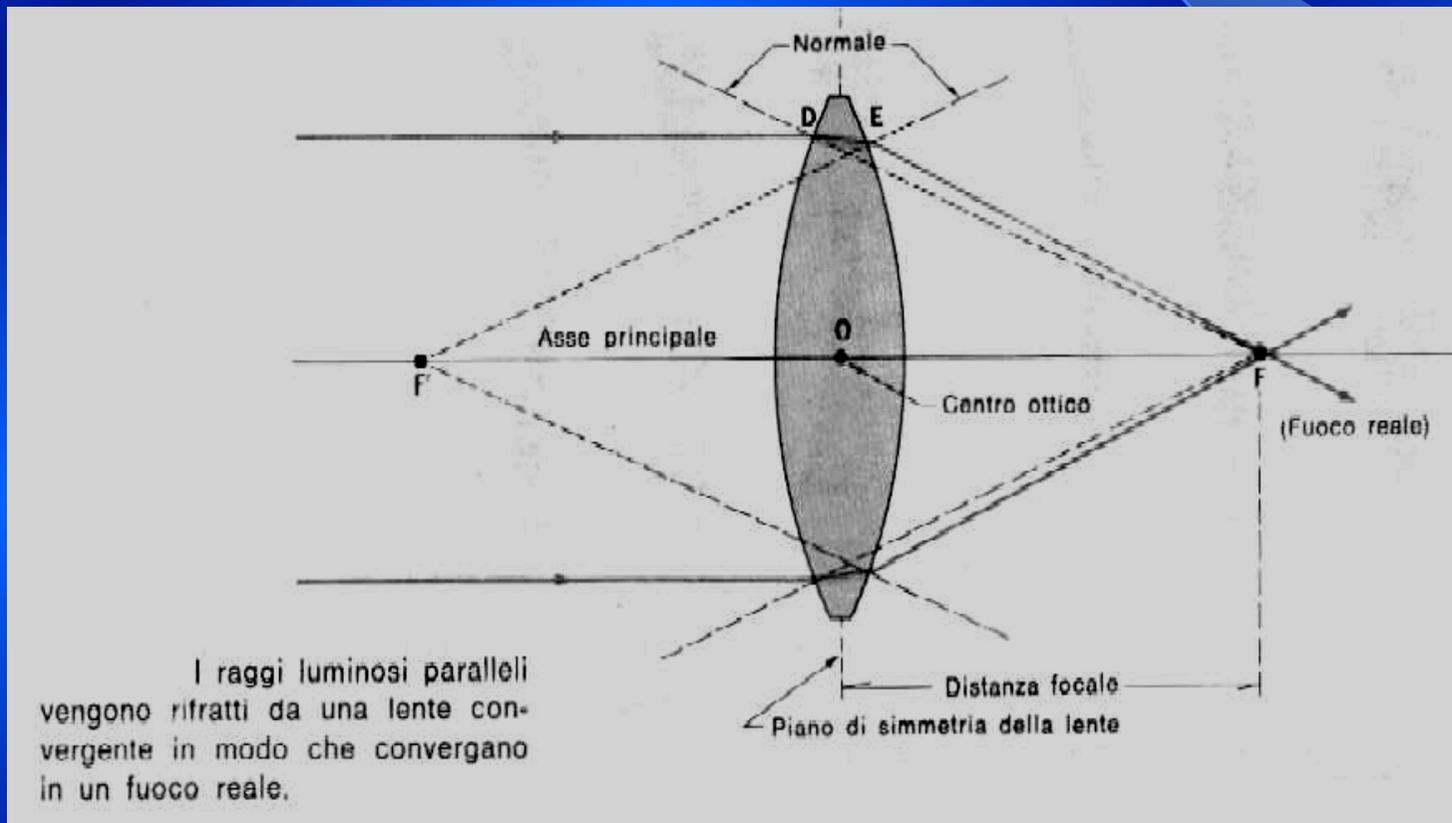
Sono lenti più spesse al centro che alla periferia

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

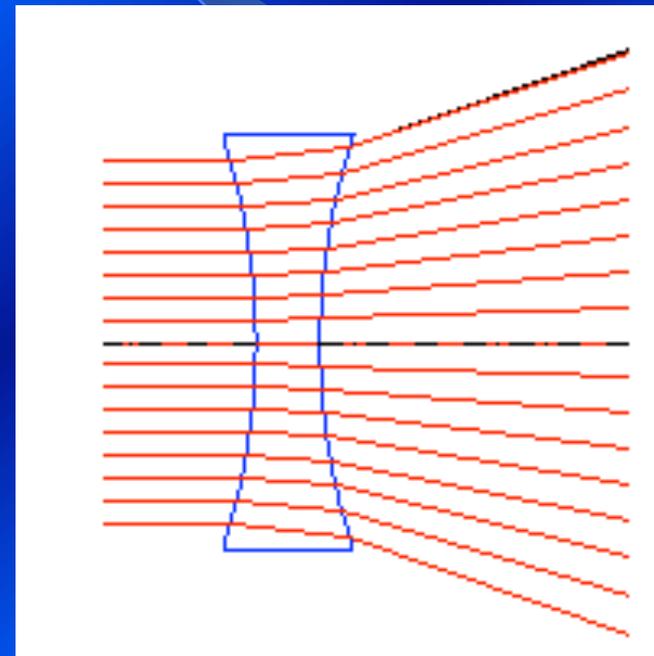
Un insieme di raggi che giungano con direzione parallela all'asse ottico vengano portati a convergere tutti in uno stesso punto detto FUOCO. Queste lenti danno immagini sia virtuali che reali a seconda della posizione dell'oggetto osservato rispetto all'asse ottico e della sua distanza dalla loro superficie.



Lenti Divergenti

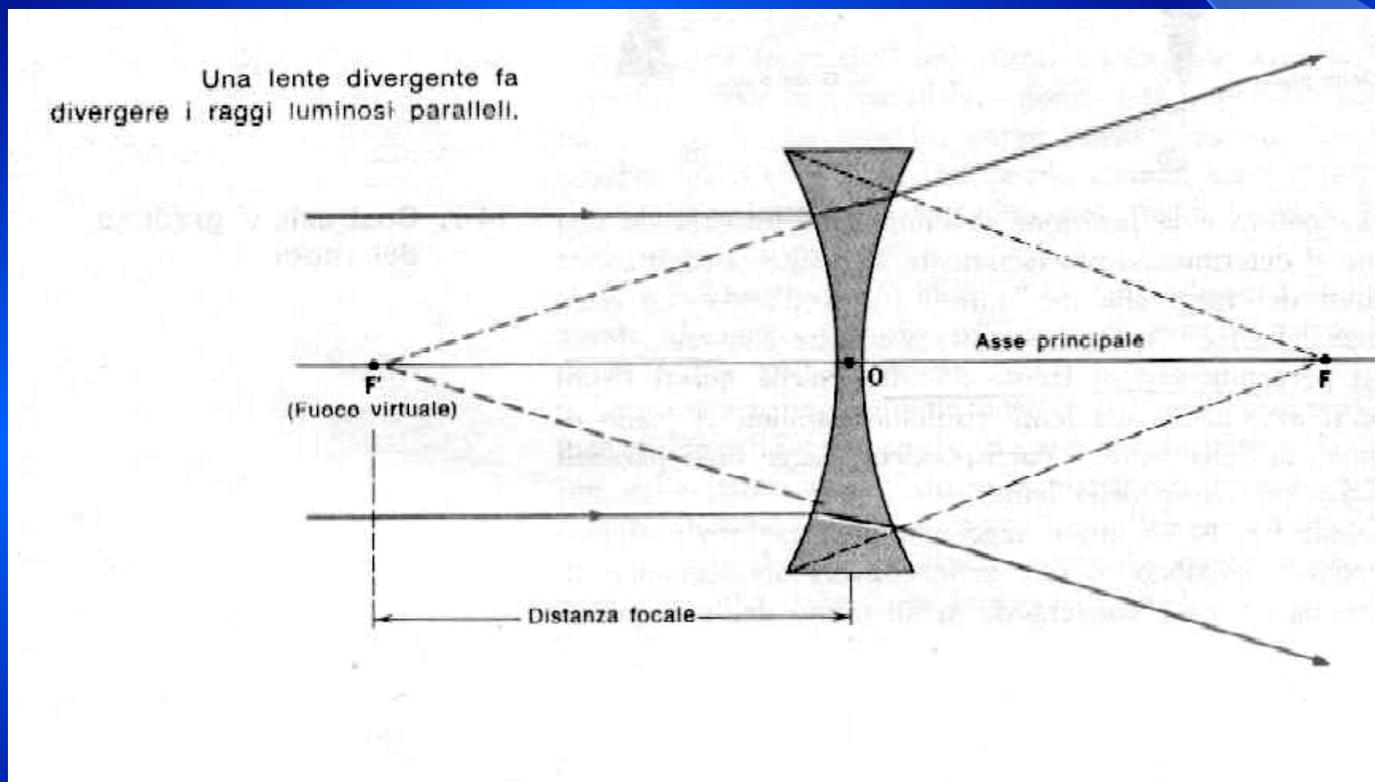
Sono lenti più spesse alla periferia che al centro

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.



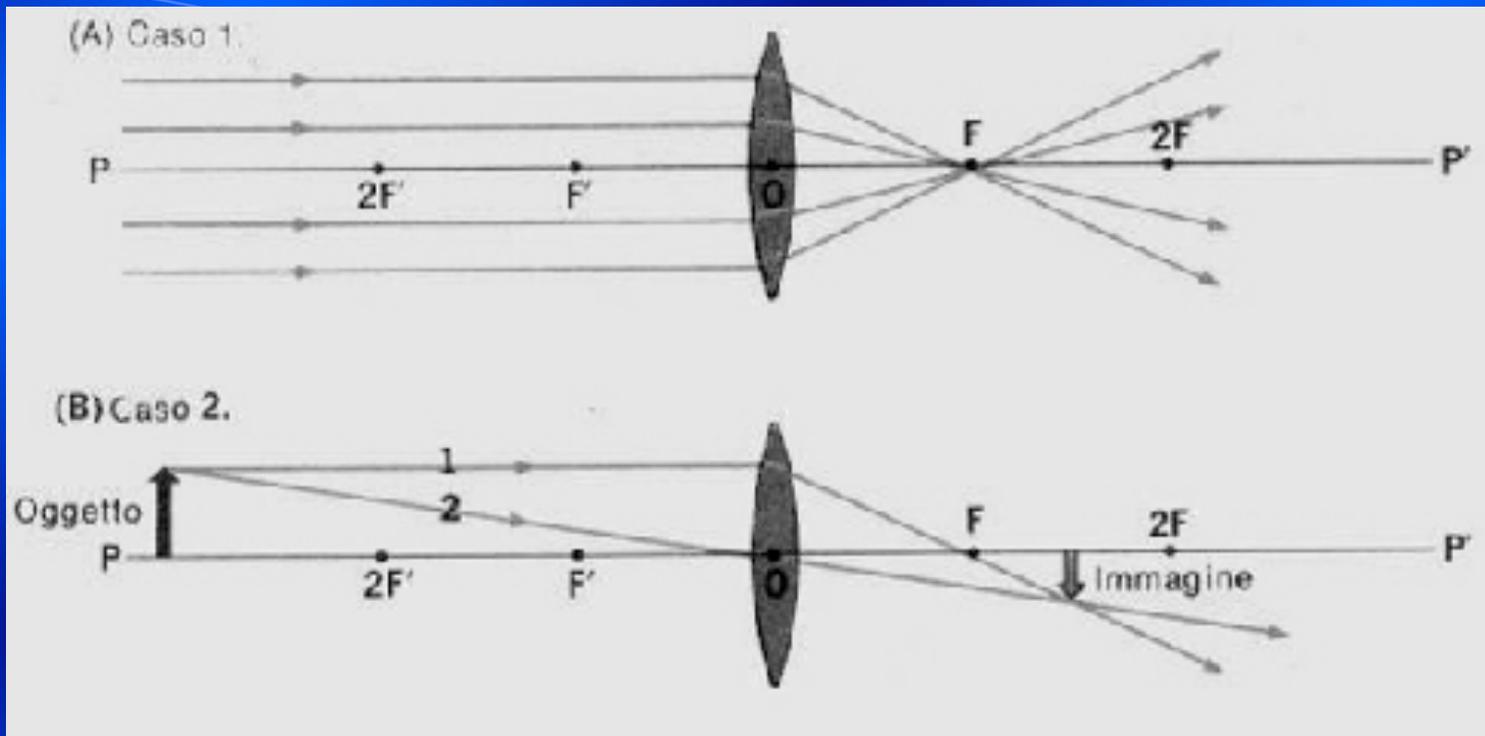
Lenti Divergenti

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.



IPOTESI 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.

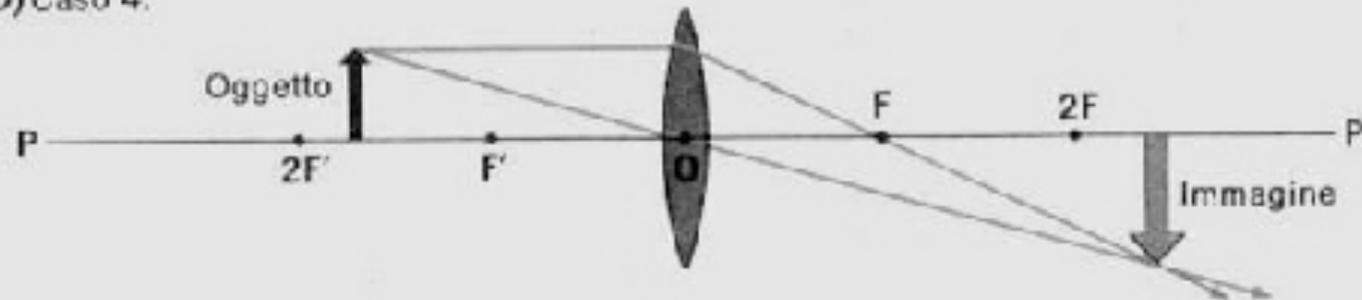


Posizione oggetto	Posizione immagine	Tipo di immagine	Applicazioni
$P \rightarrow \infty$	<i>Sul fuoco reale</i>	> <i>Un punto</i>	<i>Deteminaazione della distanza focale di una lente</i>
$P > 2F$	$F < q < 2F$	<ul style="list-style-type: none"> > Reale > Capovolta > Rimpicciolita 	<i>- Macchina fotografica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

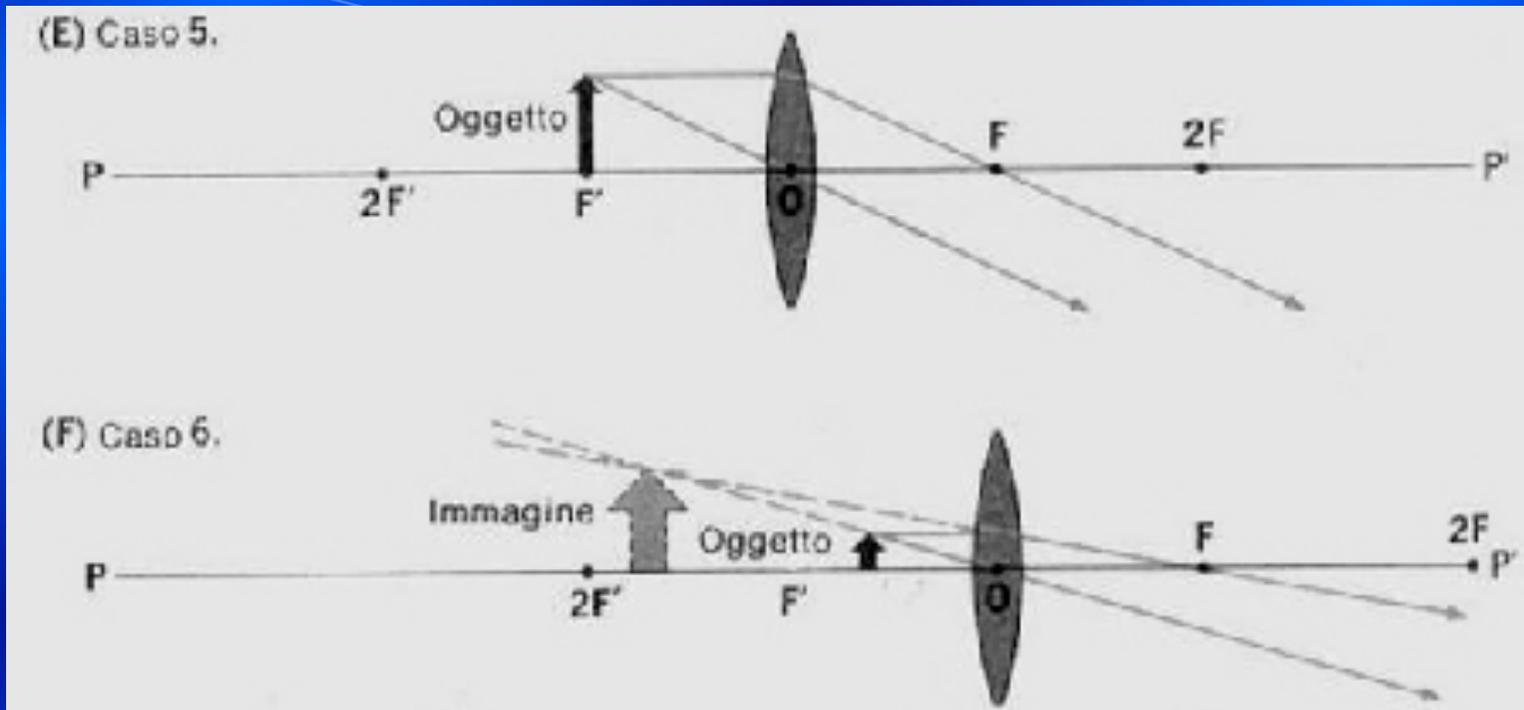
(C) Caso 3.



(D) Caso 4.

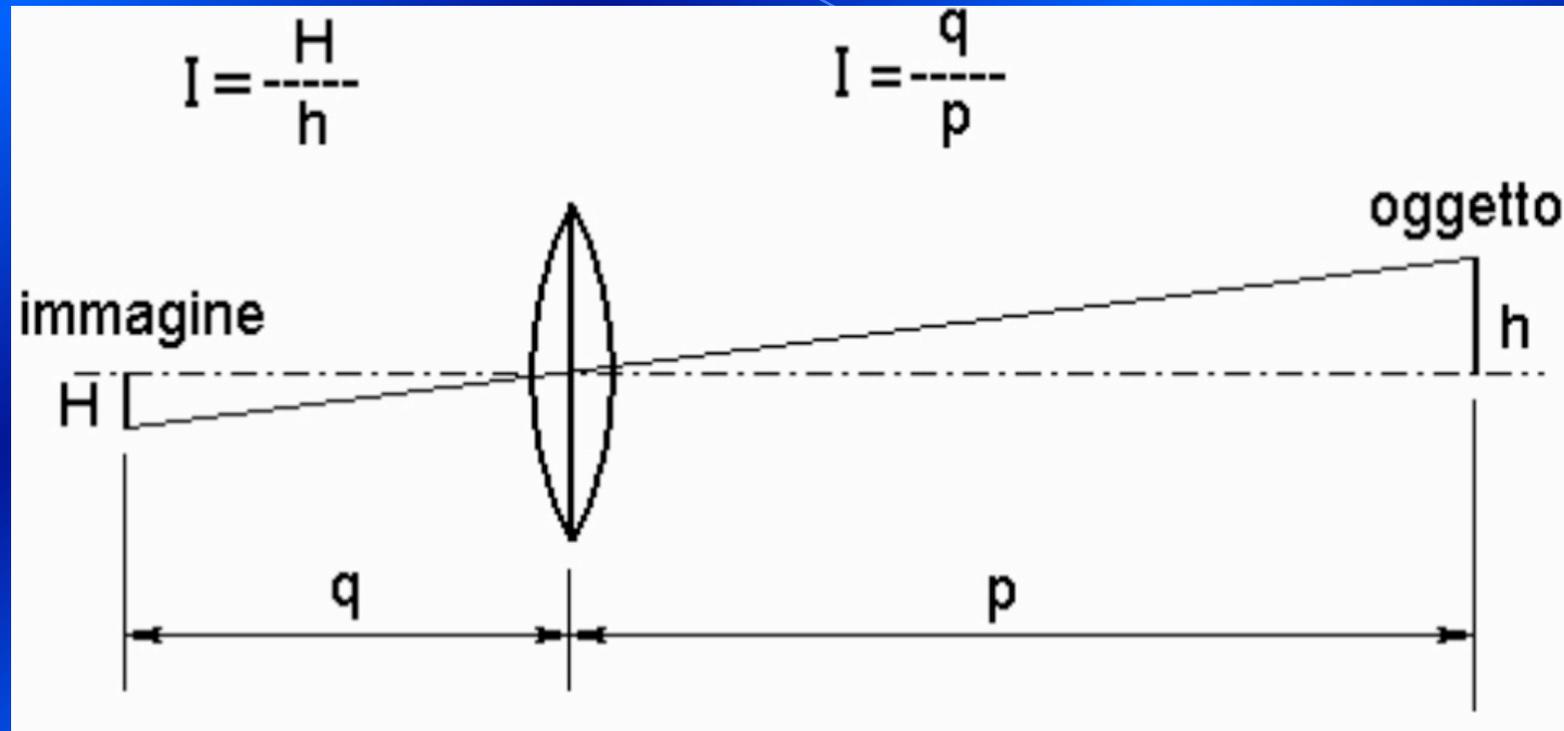


Posizione oggetto	Posizione immagine	Tipo di immagine	Applicazioni
$P = 2 F$	$q = 2 F$	-reale -capovolta -uguale	-cannocchiale terrestre
$2F > p > F$	$q > 2 F$	-Reale -Capovolta -ingrandita	Microscopio composto -Proiettore



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

Relazione oggetto-immagine



Formula della
lente:

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

Formula
dell'ingrandimento:

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