

# Complementi di Fisica - XXI Lezione

Ottica: riflessione e rifrazione della luce

---

Andrea Bettucci

23 maggio 2024

Dipartimento di Scienze di Base e Applicate per l'Ingegneria  
Sapienza Università di Roma

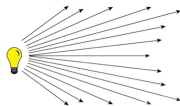
## Raggi di luce

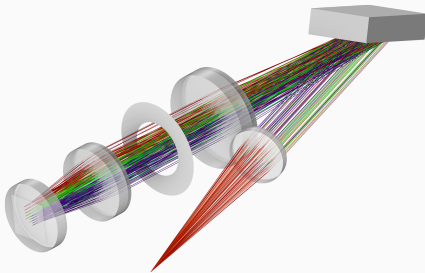
---



- Molte evidenze sperimentali suggeriscono che **la luce viaggia in linea retta in un'ampia varietà di circostanze.**
- Ad esempio, la luce del Sole genera zone illuminate e zone d'ombra ben distinte, così come il fascio di un puntatore laser appare come una linea retta.
- **Noi deduciamo la posizione degli oggetti attorno a noi assumendo che la luce si muova da essi verso i nostri occhi su traiettorie rettilinee.**

- Questo presupposto costituisce la base del **modello a raggi della luce** nel quale si assume che la luce su cammini rettilinei chiamati **raggi di luce**.
- Il raggio di luce è un'idealizzazione; **si può intendere un raggio di luce come un fascio di luce molto sottile**.
- Secondo il modello a raggi, quando vediamo un oggetto, la luce raggiunge i nostri occhi da ciascun punto dell'oggetto.
- Sebbene i raggi partano da ogni singolo punto dell'oggetto dirigendosi in tutte le direzioni, solo una piccola parte di essi raggiunge l'occhio dell'osservatore.

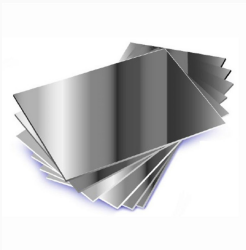




- Il modello a raggio non tiene conto direttamente che la luce è un'onda elettromagnetica.
- Tuttavia il modello a raggi può essere utile impiegato nella descrizione di molti aspetti della propagazione della luce come la riflessione, la rifrazione e la formazioni di immagini da lenti e specchi.
- Questa spiegazione dei fenomeni basata sulla analisi delle direzioni e degli angoli di propagazione dei raggi di luce prende il nome di **ottica geometrica**.

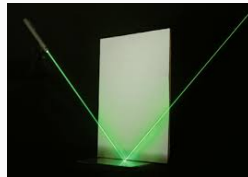
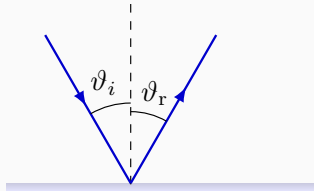
# La riflessione della luce: I legge di Snell

---



- Quando la luce colpisce la superficie di un oggetto viene parzialmente riflessa.
- La parte rimanente può essere assorbita dall'oggetto e trasformata in energia termica; oppure, se l'oggetto è costituito da materiale trasparente alla luce (acqua, vetro, etc.) può essere trasmessa.
- Per un oggetto con la superficie molto liscia e lucente (**specchio**) la percentuale di luce riflessa può superare il 95%.

## LEGGE DELLA RIFLESSIONE - I LEGGE DI SNELL

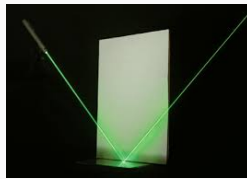
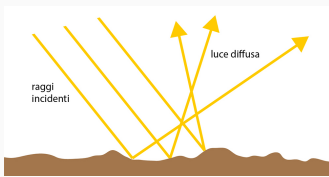


Nel caso in cui un raggio luminoso molto stretto colpisca una superficie piana riflettente (**riflessione speculare**) si verifica sperimentalmente che:

1. **il raggio incidente, quello riflesso e la normale alla superficie nel punto di incidenza giacciono nello stesso piano;**
2. **gli angoli formati con la normale alla superficie nel punto di incidenza dal raggio incidente ( $\vartheta_i$ ) e dal raggio riflesso ( $\vartheta_r$ ) sono uguali:**

$$\vartheta_i = \vartheta_r$$

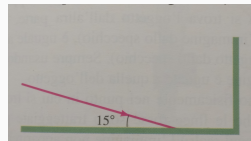




- Se la luce incide su una superficie scabra, anche solo a livello micrometrico (la lunghezza d'onda della luce visibile è compresa tra 380 e 750 nm) essa viene diffusa in molte direzioni e si ha il fenomeno della **diffusione**.
- **In questo caso la legge della riflessione continua a valere ma solo se applicata a porzioni infinitesime di superficie tali da potersi considerare piane.**
- Grazie alla diffusione della luce in tutte le direzioni un oggetto non perfettamente liscio può essere visto da angolazioni differenti: se si avessero solo riflessioni speculari, la luce riflessa non raggiungerebbe l'occhio a meno che esso non si trovi nella giusta direzione determinata dalla legge della riflessione.

## Esercizio

Due specchi piani sono perpendicolari tra loro. Un fascio di luce incidente su primo specchio con un angolo di  $15^\circ$  rispetto all'orizzontale. Quale angolo formerà con l'orizzontale il fascio uscente dal secondo specchio?

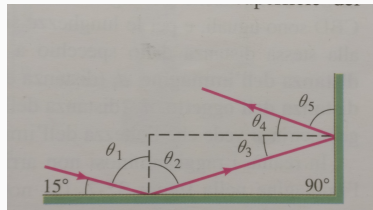


$$\theta_1 + 15^\circ = 90^\circ \Rightarrow \theta_1 = 75^\circ$$

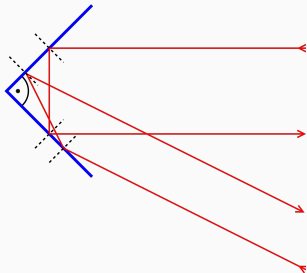
e dalla I legge di Snell:  $\theta_2 = 75^\circ$ .

$$\theta_3 = 180^\circ - 90^\circ - 75^\circ = 15^\circ$$

e dalla I legge di Snell:  $\theta_4 = 15^\circ$ .



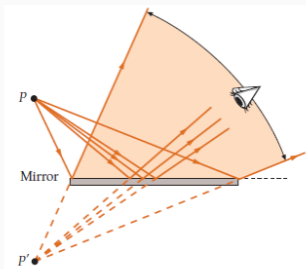
**Il fascio riflesso è parallelo a quello incidente per qualsiasi angolo di incidenza**



Sulla riflessione della luce da due specchi disposti perpendicolarmente l'uno rispetto all'altro funzionano i catarinfrangenti montati sulle nostre automobili e biciclette.

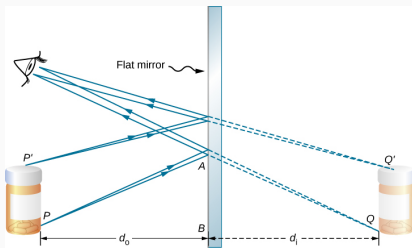
## FORMAZIONE DELLE IMMAGINI PER RIFLESSIONE SPECULARE DA UNA SUPERFICIE PIANA

Un fascio di raggi luminosi provenienti da una sorgente puntiforme  $P$  viene riflesso da una superficie piana perfettamente riflettente (specchio).



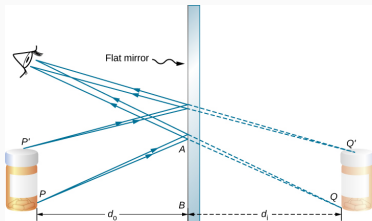
- Dopo la riflessione, i raggi divergono esattamente come se provenissero da un punto  $P'$  posto dietro la superficie.
- Il punto  $P'$  è **chiamato immagine di  $P$**  si trova all'intersezione dei raggi riflessi tracciati all'indietro (linee tratteggiate).
- Quando i raggi entrano nell'occhio, non possono essere distinti da raggi effettivamente divergenti da una sorgente in  $P'$ : il nostro cervello li interpreta come raggi provenienti in linea retta da  $P'$ .

## FORMAZIONE DELLE IMMAGINI PER RIFLESSIONE SPECULARE DA UNA SUPERFICIE PIANA

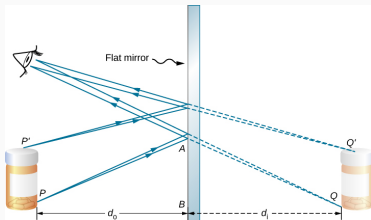


- I due raggi che divergono dal punto  $P$  dell'oggetto si riflettono sullo specchio seguendo la I legge di Snell ( $\vartheta_r = \vartheta_i$ ): l'occhio li percepisce come se provenissero divergendo dal punto  $Q$  immagine di  $P$ .
- I triangoli  $PBA$  e  $QBA$  sono congruenti (stessa forma e stesse dimensioni),  $PB = QB$ : l'immagine appare dietro allo specchio a una distanza  $d_i$  uguale a quella dell'oggetto dallo specchio  $d_o$ .
- Le dimensioni dell'immagine e dell'oggetto sono uguali.

## FORMAZIONE DELLE IMMAGINI PER RIFLESSIONE SPECULARE DA UNA SUPERFICIE PIANA



- L'immagine dell'oggetto che i nostri occhi vedono riflessa nello schermo è **un'immagine virtuale**: l'immagine non apparirebbe su uno schermo o su una pellicola piazzati là dove l'immagine si trova.
- I raggi tratteggiati sono interpretazioni della nostra mente, non raggi luminosi reali!
- **Uno specchio piano può creare solo immagini virtuali.**



- Le **immagini reali**, all'opposto, possono apparire su una superficie bianca, su una pellicola o su un sensore elettronico posto in corrispondenza della posizione dell'immagine: **l'immagine che state ora vedendo (prodotta dal videoproiettore) è un'immagine reale.**
- I nostri occhi possono vedere sia immagini reali sia virtuali, purché raggi luminosi divergenti entrino nelle pupille.
- Uno specchio piano può creare solo immagini virtuali; specchi curvi e lenti possono creare sia immagini reali che virtuali; L'obiettivo del proiettore, ad esempio, produce un'immagine reale visibile sullo schermo.

# Rifrazione della luce: Il legge di Snell

---



- La velocità della luce nel vuoto è:

$$c = 2,997\,924\,58 \times 10^8 \text{ m/s} \quad \Rightarrow \quad c \simeq 3 \times 10^8 \text{ m/s},$$

- Nell'aria la velocità della luce è leggermente inferiore a  $c$ .
- **Si verifica sperimentalmente che nei materiali trasparenti, come vetro o acqua, la velocità della luce è sempre inferiore a quella nel vuoto.**

Si definisce **indice di rifrazione  $n$  di un materiale** il rapporto tra la velocità della luce nel vuoto  $c$  e quella nel materiale  $v$  :

$$n = \frac{c}{v}$$

L'indice di rifrazione di un materiale è sempre maggiore a 1; è uguale a 1 solo per il vuoto.

## Indici di rifrazione per alcuni materiali e sostanze

Materiale	$n = \frac{c_1}{v}$
Vuoto	1.0000
Aria	1.0003
Ghiaccio	1.31
Acqua	1.33
Vetro	da 1.5 a 1.9
Plexiglas	1.51
Diamante	2.419

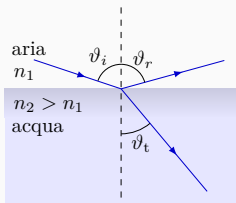
---

$$^1\lambda = 589,3 \text{ nm}$$



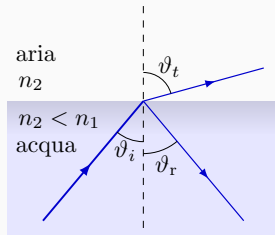
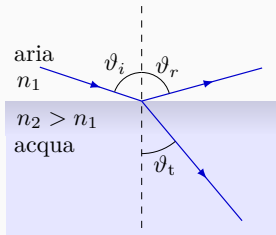
- Quando la luce incide sulla superficie di separazione tra due mezzi aventi diverso indice di rifrazione, parte della luce è riflessa nel mezzo da cui proviene nella direzione data dalla legge di Snell ( $\vartheta_r = \vartheta_i$ ) e parte viene trasmessa nel nuovo mezzo.
- Se un raggio incide con un certo angolo (diversamente dal caso in cui incida perpendicolarmente) esso cambia direzione quando passa dal primo al secondo mezzo.
- Questo cambio di direzione è detto **rifrazione**.

## LEGGE DELLA RIFRAZIONE - II LEGGE DI SNELL



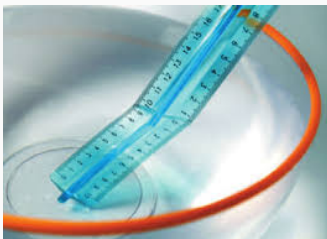
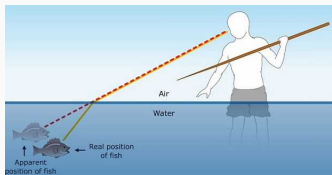
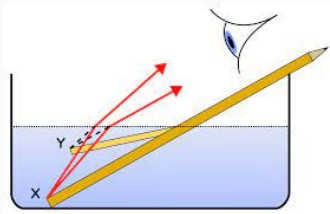
1. il raggio incidente, quello rifratto e la normale alla superficie nel punto di incidenza giacciono nello stesso piano;
2. gli angoli formati con la normale alla superficie nel punto di incidenza dal raggio incidente  $\vartheta_i$  (proveniente dal mezzo con indice di rifrazione  $n_1$ ) e dal raggio rifratto  $\vartheta_t$  (trasmesso nel mezzo con indice di rifrazione  $n_2$ ) soddisfano la relazione:

$$n_1 \sin \vartheta_i = n_2 \sin \vartheta_t \quad \Rightarrow \quad \frac{\sin \vartheta_i}{\sin \vartheta_t} = \frac{n_2}{n_1}$$



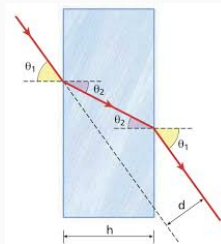
- Se la luce viene rifratta da un mezzo 1 a un mezzo 2 dove la velocità di propagazione della luce è inferiore ( $n_2 > n_1$ , incidenza aria-acqua, ad esempio), il raggio rifratto si avvicina alla normale alla superficie di separazione dei due mezzi:  $\vartheta_t < \vartheta_i$
- Se la luce viene rifratta da un mezzo 1 a un mezzo 2 dove la velocità di propagazione della luce è superiore ( $n_2 < n_1$ , incidenza acqua-aria, ad esempio), il raggio rifratto si allontana dalla normale alla superficie di separazione dei due mezzi:  
 $\vartheta_t > \vartheta_i$

## Il fenomeno della rifrazione è responsabile dei più comuni effetti di illusione ottica



## Esercizio

Un raggio di luce che si propaga in aria colpisce una lastra di vetro con un angolo di incidenza  $\theta_1 = 60,0^\circ$ . Sapendo che l'indice di rifrazione del vetro è 1.50 e supponendo uguale a 1.00 l'indice di rifrazione dell'aria, si determini l'angolo  $\theta_2$  di rifrazione del vetro e l'angolo di uscita con il quale il fascio emerge dalla lastra.



Dalla seconda legge di Snell per l'incidenza aria-vetro si ha:

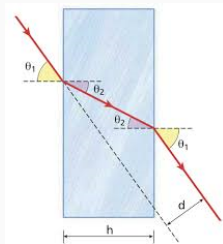
$$\sin \theta_2 = \frac{1.00}{1.50} \sin 60^\circ = 0,577 \quad \Rightarrow \quad \theta_2 = 35,2^\circ.$$

Il raggio rifratto viaggerà nel vetro e inciderà l'interfaccia vetro-aria con un angolo  $\theta_2$  rispetto alla normale alla superficie di separazione tra vetro e aria.

Per il raggio uscente dalla lastra di vetro, sempre per la seconda legge di Snell, indicando con  $\theta_u$  l'angolo di uscita rispetto alla perpendicolare alla superficie di separazione tra aria e vetro si ha:

$$\sin \theta_u = \frac{1.50}{1.00} \sin \theta_2 = 0.866 \quad \Rightarrow \quad \theta_u = 60^\circ = \theta_1.$$

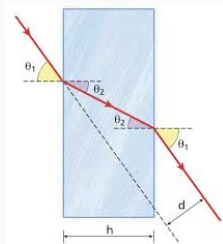
**Il raggio esce dalla lastra di vetro parallelamente al raggio incidente, ma spostato lateralmente di una distanza  $d$ .**





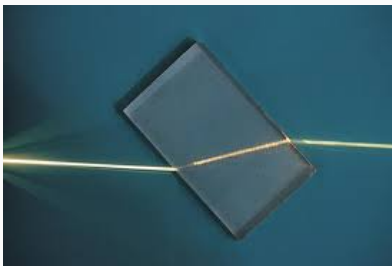
Per il raggio uscente dalla lastra di vetro, sempre per la seconda legge di Snell, indicando con  $\theta_u$  l'angolo di uscita rispetto alla perpendicolare alla superficie di separazione tra aria e vetro si ha:

$$\sin \theta_u = \frac{1.50}{1.00} \sin \theta_2 = 0.866 \quad \Rightarrow \quad \theta_u = 60^\circ = \theta_1.$$

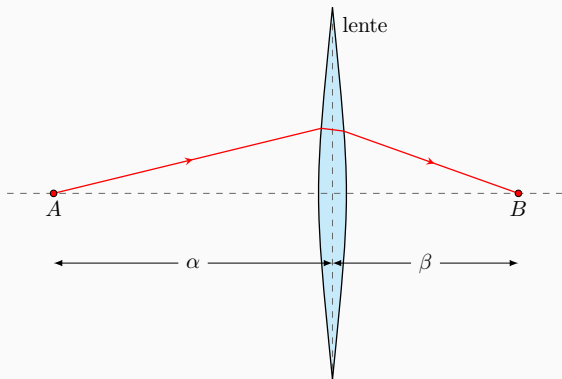


**Il raggio esce dalla lastra di vetro parallelamente al raggio incidente, ma spostato lateralmente di una distanza  $d$ .**

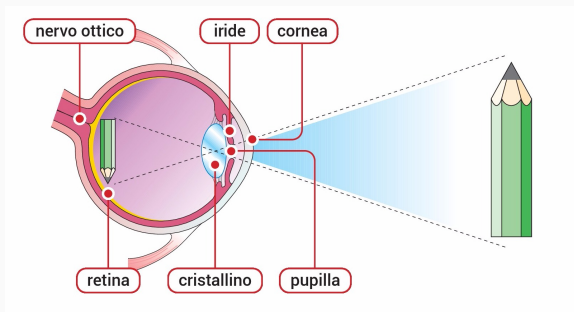
È possibile trovare  $d$ ?

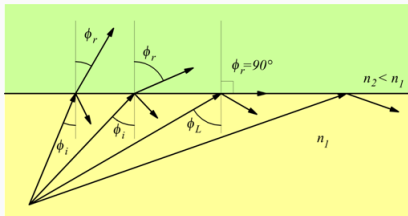


Il fenomeno della rifrazione della luce è alla base del funzionamento delle lenti e di tutti i sistemi ottici



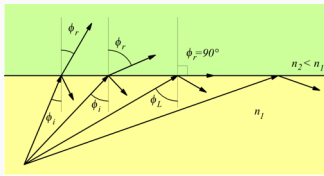
Il fenomeno della rifrazione della luce è alla base del funzionamento delle lenti e di tutti i sistemi ottici  
OCCHIO COMPRESO!



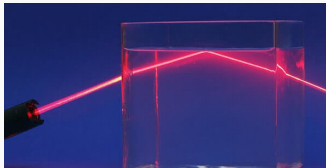


- Se la luce viene rifratta da un mezzo 1 a un mezzo 2 dove la velocità di propagazione della luce è superiore ( $n_2 < n_1$ , incidenza acqua-aria, ad esempio), il raggio rifratto si allontana dalla normale alla superficie di separazione dei due mezzi:  
 $\Phi_r > \Phi_i$ .
- In corrispondenza di un particolare angolo di incidenza  $\Phi_L$  (**angolo limite**), l'angolo di rifrazione sarà di  $\Phi_r = 90^\circ$ : il raggio rifratto si propaga parallelamente la superficie di separazione i due mezzi. Deve essere:

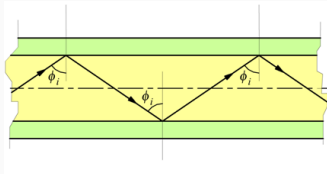
$$n_1 \sin \Phi_L = n_2 \sin 90^\circ \quad \Rightarrow \quad \sin \Phi_L = \frac{n_2}{n_1} \quad \Rightarrow \quad \Phi_L = \arcsin \frac{n_2}{n_1}$$



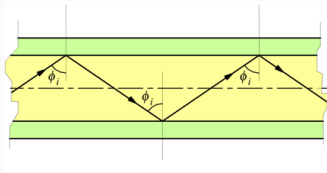
- Per angoli di incidenza inferiori a  $\Phi_L$  è sempre presente il raggio rifratto.
- Per angoli di incidenza uguali a  $\Phi_L$  il raggio rifratto viaggia parallelamente alla superficie di separazione i due mezzi.
- Per angoli di incidenza superiori a  $\Phi_L$  il raggio rifratto non è presente: tutta la luce è riflessa. Questo effetto è noto come **riflessione totale**.



## La riflessione totale è il principio fisico su cui si basano le fibre ottiche



- Le fibre ottiche sono costituite da fibre di plastica o di vetro del diametro di pochi micron; un fascio di tali fibre forma un **cavo in fibra ottica**.
- Nelle fibre ottiche la luce si propaga per riflessione totale senza perdite apprezzabili.
- La figura mostra in giallo nucleo della fibra (*core*) e in verde il rivestimento (*cladding*); la riflessione totale si verifica perché l'indice di rifrazione del rivestimento è inferiore a quello del nucleo.



- La luce viene introdotta nella fibra in modo che viaggi riflettendosi sulle pareti del nucleo ad angoli radenti tali che la condizione di riflessione totale sia verificata.
- Anche se il cavo è piegato e assume forme complicate, gli angoli di riflessione interna non scendono mai sotto l'angolo limite.

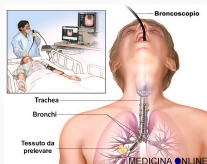
## Le fibre ottiche nelle telecomunicazioni



- Le fibre ottiche vengono utilizzate al posto dei cavi metallici per trasportare comunicazioni telefoniche, segnali video e dati informatici: le informazioni (dati) sono trasportati modulando in intensità il fascio luminoso.
- I dati sono trasmessi a una frequenza più elevata, con minori perdite e interferenze rispetto a un segnale elettrico trasmesso in un cavo di rame.
- Sono state sviluppate cavi in fibra ottica capaci di trasmettere centinaia di lunghezze d'onda distinte, ciascuna modulata in modo tale da portare 10 gigabit ( $10 \times 10^{10}$  bit) di informazioni per secondo per un ammontare complessivo di un terabit ( $10 \times 10^{12}$  bit) per secondo su centinaia di lunghezze d'onda.

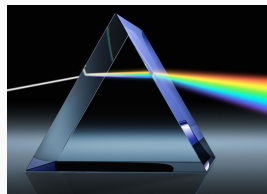
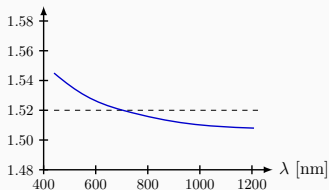


## Le fibre ottiche in medicina



- Le fibre ottiche vengono impiegate per ottenere **in tempo reale** immagini chiare e definite dell'interno di organi del corpo umano.
- Broncoscopi, colonoscopi, endoscopi sono alcuni esempi di apparecchiature di utilizzo comune nelle indagini ospedaliere.
- **Sono relativamente poco invasivi per il paziente e permettono anche prelievi biotipici mirati.**
- È anche possibile inviare fasci laser di potenza per cauterizzare i vasi e interrompere un'emorragia o eseguire interventi di vaporizzazione sulle placche aterosclerotiche e sui trombi delle arterie periferiche.

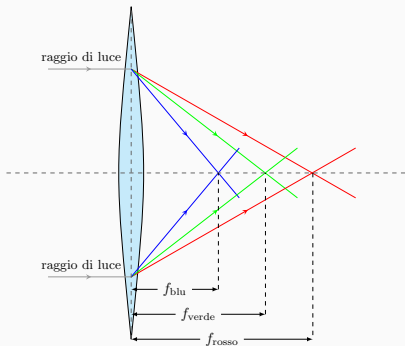
## Dispersione della luce



Variazione con la lunghezza d'onda dell'indice di rifrazione del vetro

- In generale, **l'indice di rifrazione dei mezzi trasparenti è funzione della lunghezza d'onda.**
- La luce bianca è una miscela di tutte le lunghezze d'onda visibili: quando incide sulla faccia di un prisma di vetro, le differenti lunghezze d'onda vengono rifratte con angoli diversi.
- Poiché l'indice rifrazione è più elevato per le lunghezze d'onda inferiori, la luce violetta è rifratta sotto un angolo maggiore rispetto alla luce rossa.

## La dipendenza dell'indice di rifrazione dalla lunghezza d'onda genera il fenomeno dell'aberrazione cromatica



L'aberrazione cromatica si verifica quando la lente non riesce a far coincidere tutte le lunghezze d'onda dei colori sullo stesso punto focale, o quando ogni raggio di colore che compone la luce è condotto su posizioni diverse del punto focale.