



Complementi di Fisica - XVII Lezione

Ottica: riflessione e rifrazione della luce

Andrea Bettucci

21 maggio 2024

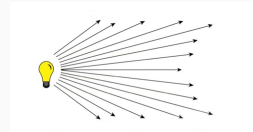
Dipartimento di Scienze di Base e Applicate per l'Ingegneria
Sapienza Università di Roma

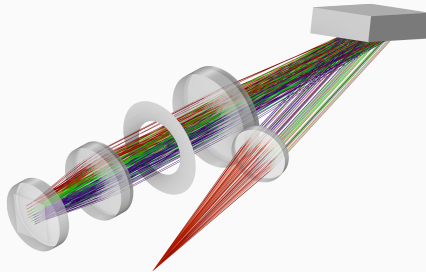
Raggi di luce



- 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.**

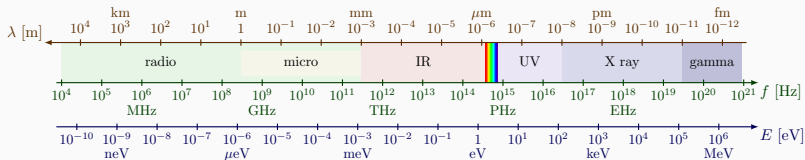
- Questo presupposto costituisce la base del **modello a raggi della luce** nel quale si assume che la luce su cammini rettilinei chiamati **raggi di luce**.
- Il raggio di luce è un'idealizzazione; **si può intendere un raggio di luce come un fascio di luce molto sottile.**
- Secondo il modello a raggi, 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.



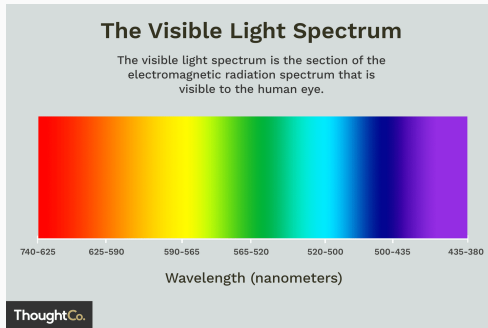
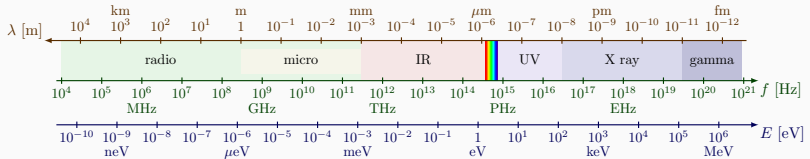


- Il modello a raggio non tiene conto direttamente che la luce è un'onda elettromagnetica.
- Tuttavia il modello a raggi può essere utilmente impiegato nella descrizione di molti aspetti della propagazione della luce come la riflessione, la rifrazione e la formazioni di immagini da lenti e specchi.
-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

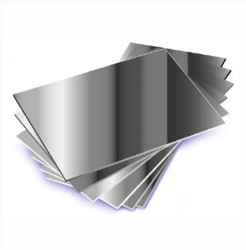
SPETTRO DELLE ONDE ELETTROMAGNETICHE



SPETTRO DELLE ONDE ELETTROMAGNETICHE

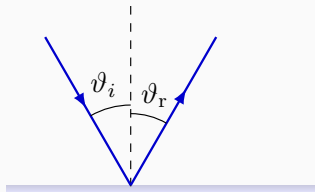


La riflessione della luce: I legge di Snell



- 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%.

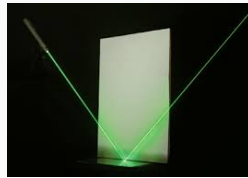
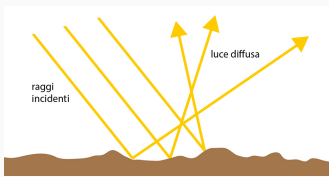
LEGGE DELLA RIFLESSIONE - I LEGGE DI SNELL



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 (ϑ_i) e dal raggio riflesso (ϑ_r) sono uguali:**

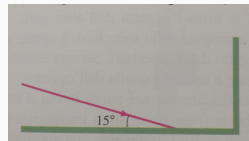
$$\vartheta_i = \vartheta_r$$



- 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° rispetto all'orizzontale. Quale angolo formerà con l'orizzontale il fascio uscente dal secondo specchio?

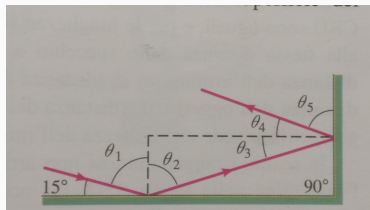


$$\theta_1 + 15^\circ = 90^\circ \Rightarrow \theta_1 = 75^\circ$$

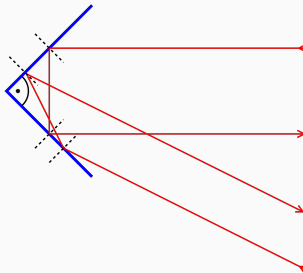
e dalla I legge di Snell: $\theta_2 = 75^\circ$.

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

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



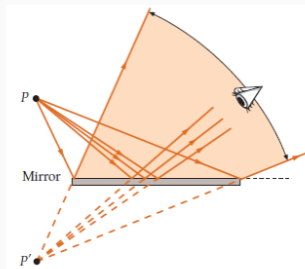
**Il fascio riflesso è parallelo a quello incidente
per qualsiasi angolo di incidenza**



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

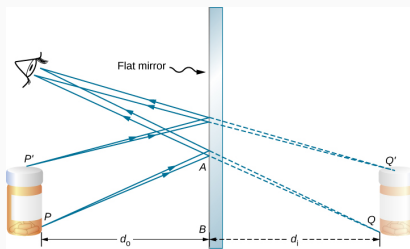
FORMAZIONE DELLE IMMAGINI PER RIFLESSIONE SPECULARE DA UNA SUPERFICIE PIANA

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



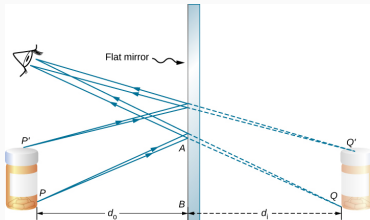
- Dopo la riflessione, i raggi divergono esattamente come se provenissero da un punto P' posto dietro la superficie.
- Il punto P' è chiamato **immagine di P** si trova all'intersezione dei raggi riflessi tracciati all'indietro (linee tratteggiate).
- Quando i raggi entrano nell'occhio, non possono essere 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

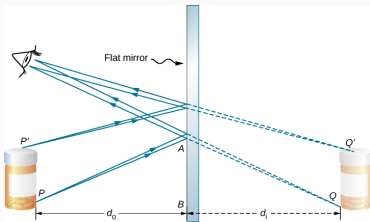


- I due raggi che divergono dal punto P dell'oggetto si riflettono sullo specchio seguendo la I legge di Snell ($\vartheta_r = \vartheta_i$): l'occhio li percepisce come se provenissero divergendo dal punto Q immagine di P .
- I triangoli PBA e QBA sono congruenti (stessa forma e stesse dimensioni),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

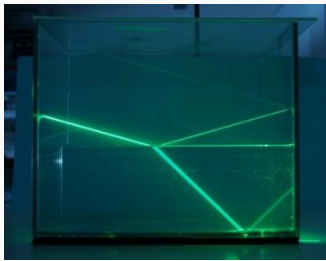
$$n = \frac{c}{v}$$

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

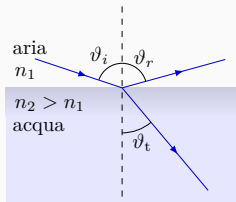
Materiale	$n = \frac{c}{v}$ ¹
Vuoto	1.0000
Aria	1.0003
Ghiaccio	1.31
Acqua	1.33
Vetro	da 1.5 a 1.9
Plexiglas	1.51
Diamante	2.419

¹ $\lambda = 589,3 \text{ nm}$



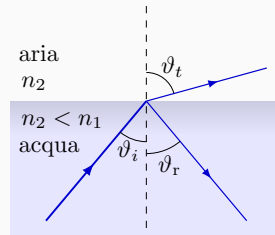
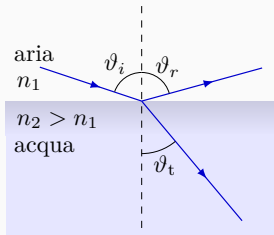
- Quando la luce incide sulla superficie di separazione tra due mezzi aventi diverso indice di rifrazione, parte della luce è riflessa nel mezzo da cui proviene nella direzione data dalla legge di Snell ($\vartheta_r = \vartheta_i$) e parte viene trasmessa nel nuovo mezzo.
- Se un raggio incide con un 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



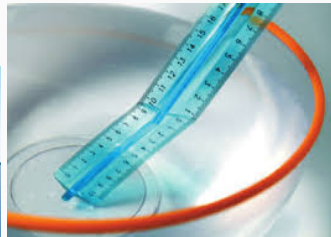
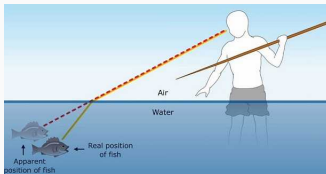
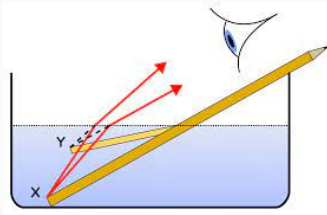
1. il raggio incidente, quello rifratto e la normale alla superficie nel punto di incidenza giacciono nello stesso piano;
2. gli angoli formati con la normale alla superficie nel punto di incidenza dal raggio incidente ϑ_i (proveniente dal mezzo con indice di rifrazione n_1) e dal raggio rifratto ϑ_t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

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



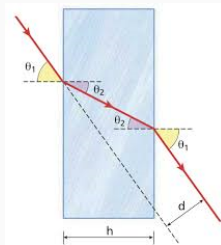
- Se la luce viene rifratta da un mezzo 1 a un mezzo 2 dove la velocità di propagazione della luce è inferiore ($n_2 > n_1$, incidenza aria-acqua, ad esempio), il raggio rifratto si avvicina alla normale alla superficie di separazione dei due mezzi: $\vartheta_t < \vartheta_i$
- Se la luce viene rifratta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

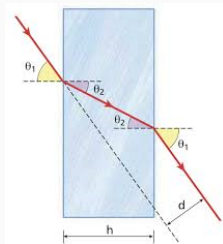
$$\sin \theta_2 = \frac{1.00}{1.50} \sin 60^\circ = 0,577 \quad \Rightarrow \quad \theta_2 = 35,2^\circ.$$

Il raggio rifratto viaggerà nel vetro e inciderà l'interfaccia vetro-aria con un angolo θ_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 θ_u l'angolo di uscita rispetto alla perpendicolare alla superficie di separazione tra aria e vetro si ha:

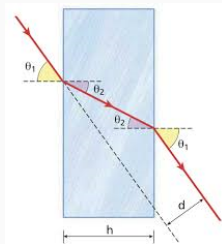
$$\sin \theta_u = \frac{1.50}{1.00} \sin \theta_2 = 0.866 \quad \Rightarrow \quad \theta_u = 60^\circ = \theta_1.$$

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



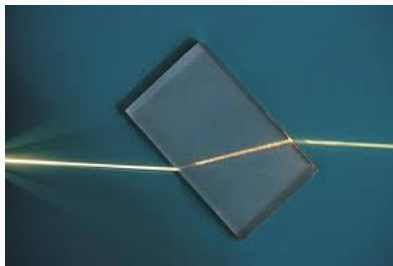
Per il raggio uscente dalla lastra di vetro, sempre per la seconda legge di Snell, indicando con θ_u l'angolo di uscita rispetto alla perpendicolare alla superficie di separazione tra aria e vetro si ha:

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

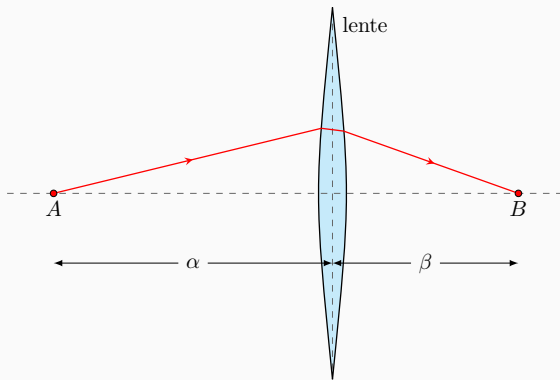


Il raggio esce dalla lastra di vetro parallelamente al raggio incidente, ma spostato lateralmente di una distanza d .

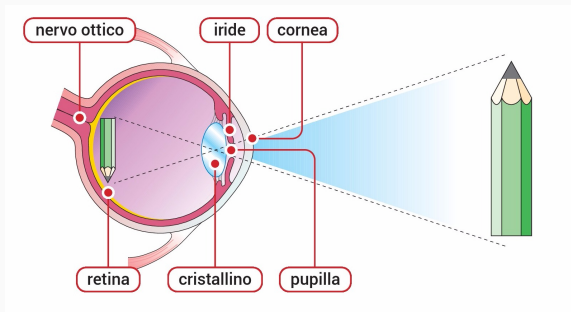
È possibile trovare d ?

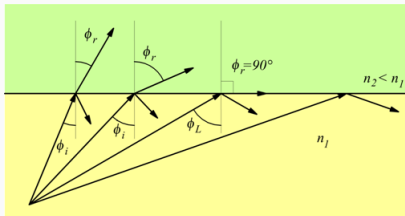


Il fenomeno della rifrazione della luce è alla base del funzionamento delle lenti e di tutti i sistemi ottici



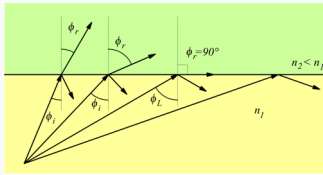
Il fenomeno della rifrazione della luce è alla base
del funzionamento delle lenti e di tutti i sistemi ottici
OCCHIO COMPRESO!



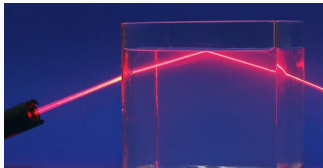


- Se la luce viene rifratta da un mezzo 1 a un mezzo 2 dove la velocità di propagazione della luce è superiore ($n_2 < n_1$, incidenza acqua-aria, ad esempio), il raggio rifratto si allontana dalla normale alla superficie di separazione dei due mezzi:
 $\Phi_r > \Phi_i$.
- In corrispondenza di un particolare angolo di incidenza Φ_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:

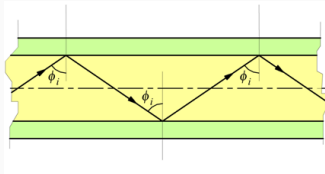
$$n_1 \sin \Phi_L = n_2 \sin 90^\circ \quad \Rightarrow \quad \sin \Phi_L = \frac{n_2}{n_1} \quad \Rightarrow \quad \Phi_L = \arcsin \frac{n_2}{n_1}$$



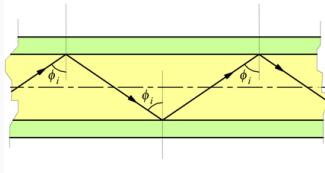
- Per angoli di incidenza inferiori a Φ_L è sempre presente il raggio rifratto.
- Per angoli di incidenza uguali a Φ_L il raggio rifratto viaggia parallelamente alla superficie di separazione i due mezzi.
- Per angoli di incidenza superiori a Φ_L il raggio rifratto non è presente: tutta la luce è riflessa. 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.



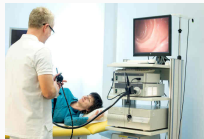
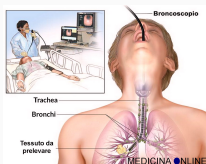
- La luce viene introdotta nella fibra in modo che viaggi riflettendosi sulle pareti del nucleo ad angoli radenti tali che la condizione di riflessione totale sia verificata.
- Anche se il cavo è piegato e assume forme complicate, gli angoli di riflessione interna non scendono mai sotto l'angolo limite.

Le fibre ottiche nelle telecomunicazioni



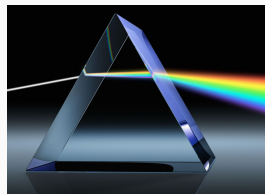
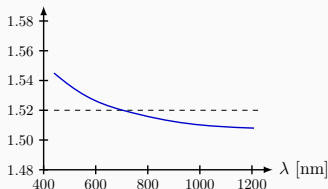
- Le fibre ottiche vengono utilizzate al posto dei cavi metallici per trasportare comunicazioni telefoniche, segnali video e dati informatici: le informazioni (dati) sono trasportati modulando in intensità il fascio luminoso.
- I dati sono trasmessi a una frequenza più elevata, con minori perdite e interferenze 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 (10×10^{10} bit) di informazioni per secondo per un ammontare complessivo di un terabit (10×10^{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 bioptici 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.

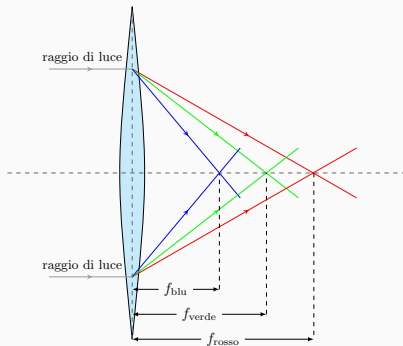
Dispersione della luce



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.