

La propagazione della luce

In un mezzo omogeneo, la luce si propaga in linea retta con velocità costante; il valore della velocità dipende dalle caratteristiche del mezzo

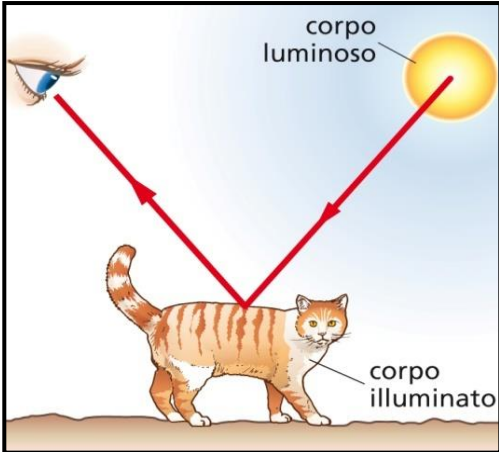
Propagazione rettilinea

La luce, in prima approssimazione (e in mezzi omogenei), si propaga lungo **linee rette** o **raggi**.

Lo studio della propagazione della luce tramite raggi si definisce **ottica geometrica** (ottica viene dal greco *optikè tèchne*: “arte riguardante la vista”).

In realtà le cose sono molto più complesse e la luce si può immaginare costituita da raggi solo in alcune situazioni particolari.

Lo vedremo meglio più avanti negli studi.



La propagazione della luce

I corpi che emettono la luce sono chiamati **corpi luminosi** o *sorgenti di luce*.

I raggi che essi emettono colpiscono gli altri oggetti (i **corpi illuminati**), sono diffusi in tutte le direzioni ed entrano, infine, nei nostri occhi.

Sorgenti di luce - Le sorgenti **primarie** (il Sole, le lampade, ...) emettono luce, le sorgenti **secondarie** (la Luna, ...) diffondono luce emessa da sorgenti primarie

Mezzi di propagazione - La luce emessa da una sorgente luminosa si comporta in modo diverso a seconda del materiale che compone i corpi che incontra.

Alcuni costituiscono una barriera impenetrabile al passaggio della luce e sono detti **opachi**; altri la lasciano passare e sono detti **trasparenti**;

altri ancora lasciano passare solo in parte della luce e non permettono di distinguere nitidamente gli oggetti dietro di loro e sono detti **traslucidi**.

La luce si propaga anche nel **vuoto**.

Ricevitori di luce - L'**occhio** è il **ricevitore naturale**: la luce che può essere rilevata dall'occhio è detta **visibile**. Una **pellicola** fotografica o il **sensore** elettronico di una fotocamera digitale sono ricevitori **artificiali**.

La propagazione della luce

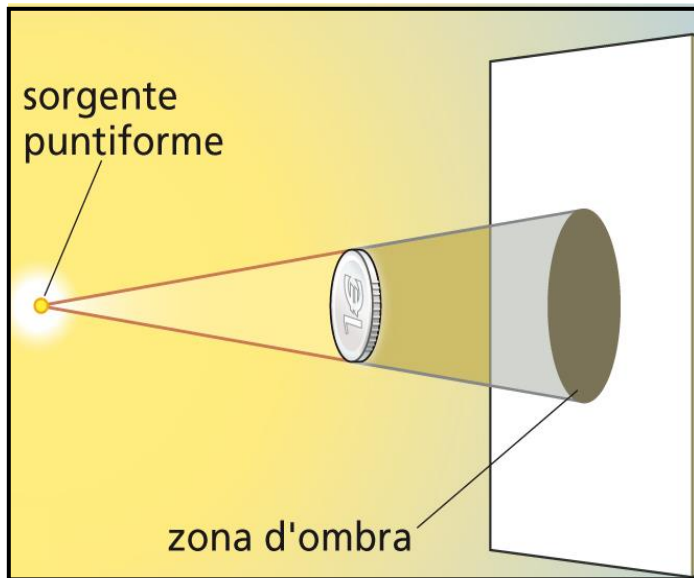
Nei mezzi omogenei e trasparenti, se non ostacolata la luce si propaga **in linea retta**.

Ostacoli che interrompono il cammino della luce generano **ombre**:

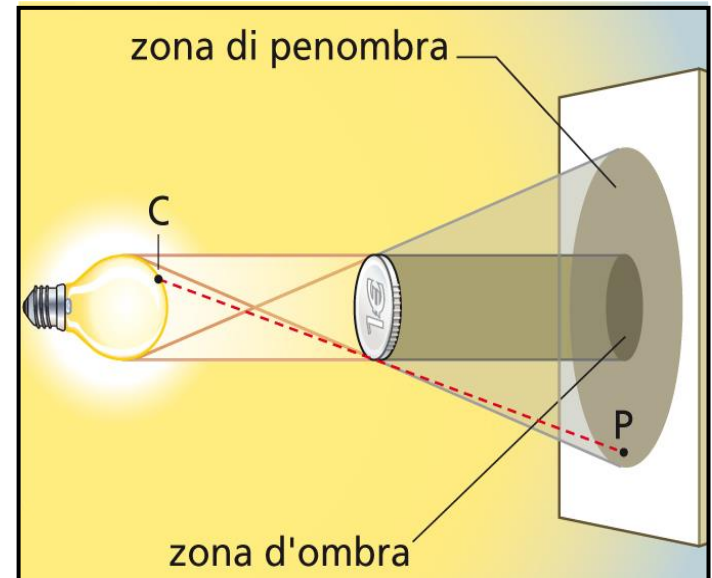
se la sorgente è **puntiforme** rispetto all'ostacolo, si ha un'ombra geometricamente ben definita e la loro forma riproduce la sagoma dell'oggetto illuminato.

se la sorgente è **estesa**, si hanno zone di **ombra** e di **penombra** la cui grandezza varia in funzione delle dimensioni della sorgente e della distanza fra l'oggetto e lo schermo sul quale l'ombra è proiettata.

Sorgenti **puntiformi**

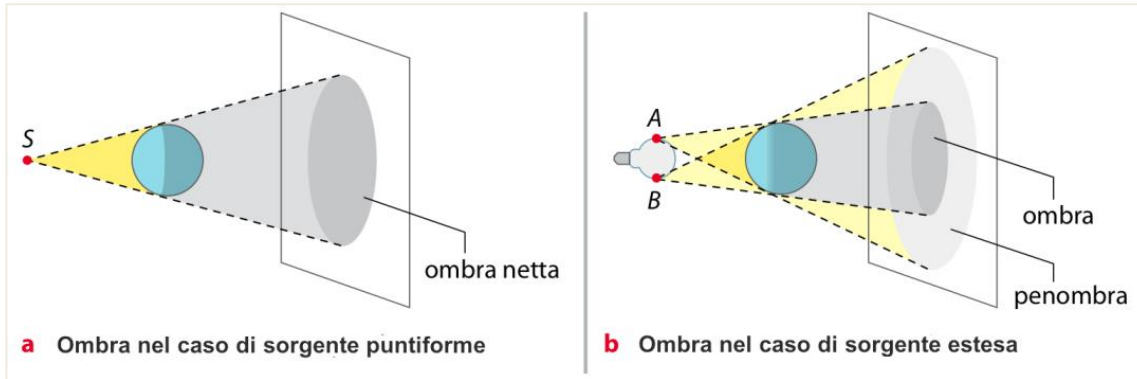


Sorgenti **estese**

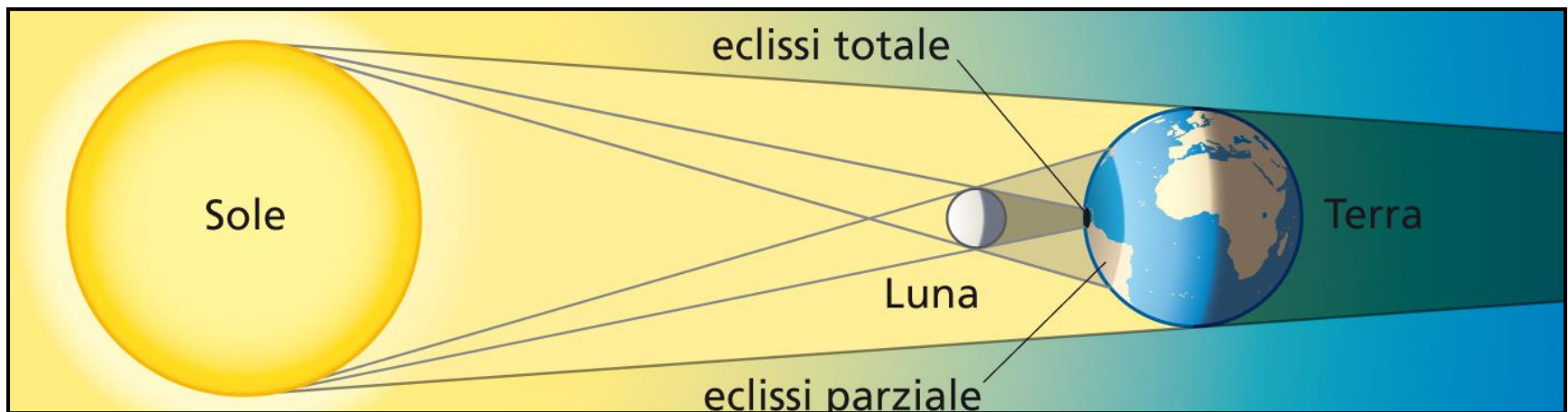


La propagazione della luce

Come si spiega un'**eclissi parziale**?



Il Sole è una sorgente estesa



La propagazione della luce

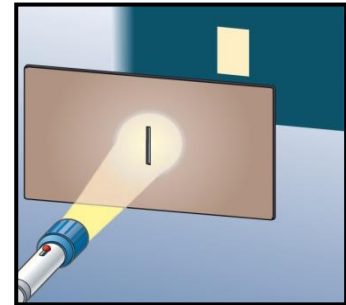
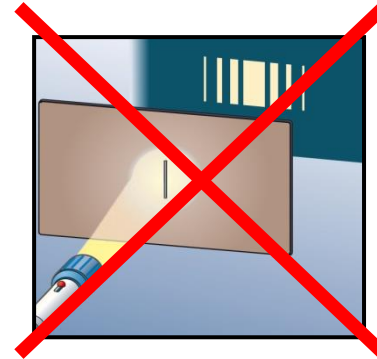
Onde o corpuscoli?



Se si formano le ombre, sono corpuscoli ...



... ma allora è un'onda?



La luce è un'onda **elettromagnetica**: la perturbazione è costituita da campi elettrici e magnetici oscillanti che si propagano anche nel vuoto.

Sia onda che corpuscolo

In certe situazioni la luce si comporta come un'onda, in altre come una pioggia di corpuscoli chiamati *fotoni*.

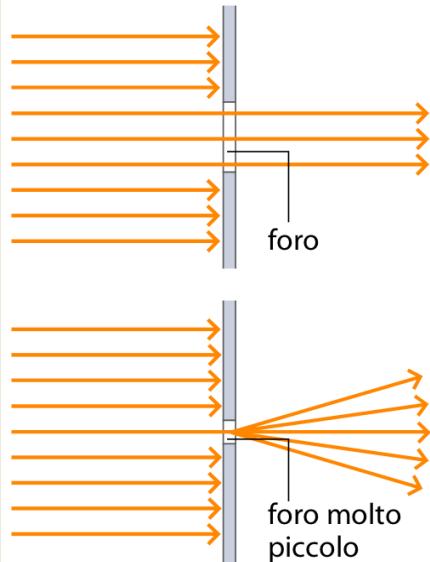


La propagazione della luce



I raggi di luce

Mediante un foro (sopra) si può restringere un fascio di luce; se le dimensioni del foro sono molto piccole (sotto), la luce si sparpaglia.



Un **raggio** luminoso è un fascio di luce molto sottile, che rappresentiamo con una retta. Essa individua il tragitto della luce e identifica la direzione di propagazione.

Un fascio di luce è l'insieme di più raggi emessi dalla stessa sorgente. Idealmente si può pensare di collimare un fascio mediante l'uso di schermi forati, per isolare un singolo raggio. In realtà il fenomeno della diffrazione fa sì che quando il foro diventa molto piccolo (dell'ordine di 10^{-6} m) la luce emerge dal foro in più direzioni e il fascio si sparpaglia.

Questo semplice modello della propagazione della luce è coerente sia con il modello corpuscolare (i raggi sono le traiettorie dei corpuscoli) sia con il modello ondulatorio (i raggi sono la direzione in cui si propaga l'onda).

La propagazione della luce

La luce si propaga nel vuoto con **velocità costante** c . Il valore di c è stato preso come costante universale:

$$c = 299792458 \text{ m/s} \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

La velocità della luce è la massima possibile in natura ed è sempre la stessa in tutti i sistemi di riferimento.

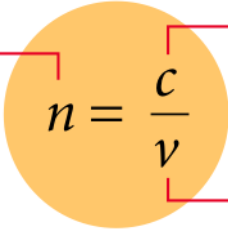
L'**indice di rifrazione** n di un mezzo trasparente è il **rapporto** tra la velocità della luce nel vuoto, c , e quella nel mezzo, v .
Nei mezzi **trasparenti** la velocità della luce è **minore** che nel vuoto.

Dato che $v \leq c$, si ha $n \geq 1$

Tabella 1 Indici di rifrazione di alcuni mezzi

Aria	1,00
Acqua	1,33
Glicerina	1,47
Vetro	1,50 ÷ 1,70
Diamante	2,43

indice di rifrazione
del mezzo


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

velocità della luce nel vuoto $\left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)$

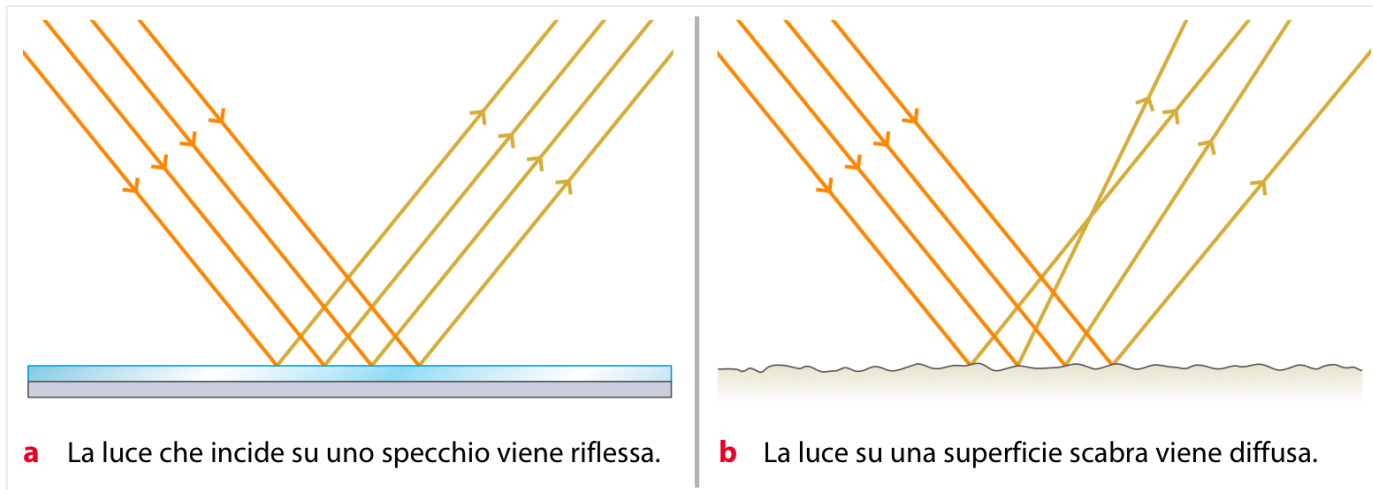
velocità della luce nel mezzo $\left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)$

La propagazione della luce

La luce che incide su un oggetto non trasparente può venire

- **riflessa**, se è deviata in una sola direzione
- **diffusa**, se è deviata in molte direzioni

In genere gli oggetti diffondono almeno parte della luce che li colpisce



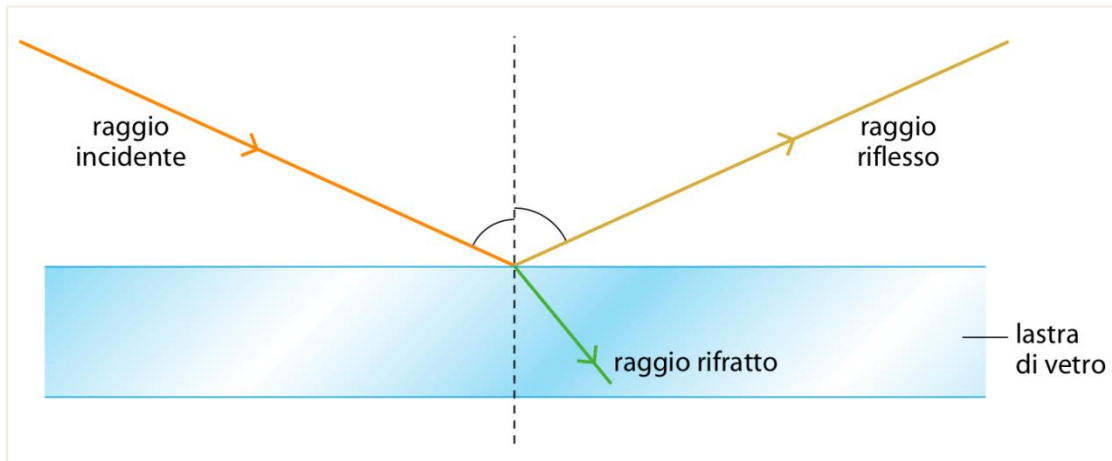
Per questo motivo gli oggetti risultano visibili

La riflessione della luce

Quando la luce si riflette l'angolo di incidenza è uguale a quello di riflessione; le immagini formate da uno specchio piano sono sempre virtuali

La riflessione della luce

Un **raggio** di luce incontra la **superficie di separazione tra due mezzi** trasparenti: una parte di luce si riflette e torna nell'aria (raggio **riflesso**); l'altra prosegue nel vetro cambiando direzione (raggio **rifratto**).



In uno **specchio**, sul vetro è depositata una superficie metallica lucida che **riflette quasi tutta** la luce che la colpisce.

Angolo di incidenza: l'angolo che il raggio incidente forma con la perpendicolare alla superficie riflettente, condotta nel punto di incidenza.

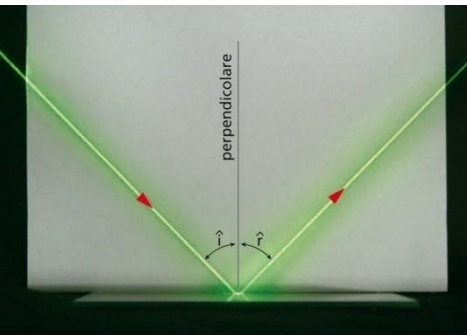
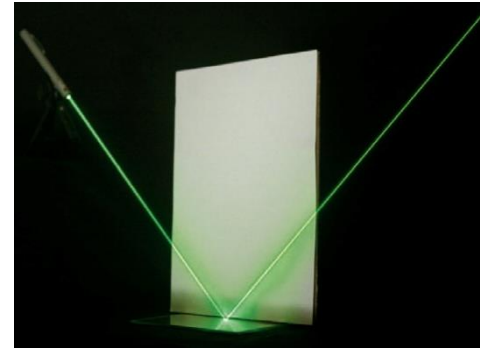
Angolo di riflessione: l'angolo formato tra il raggio riflesso e la perpendicolare stessa

La riflessione della luce

Leggi della riflessione (leggi di Descartes)

La prima legge della riflessione

Il raggio **incidente**, il raggio **riflesso** e la **normale** alla superficie riflettente nel punto di incidenza sono situati nello stesso piano, detto piano di incidenza.

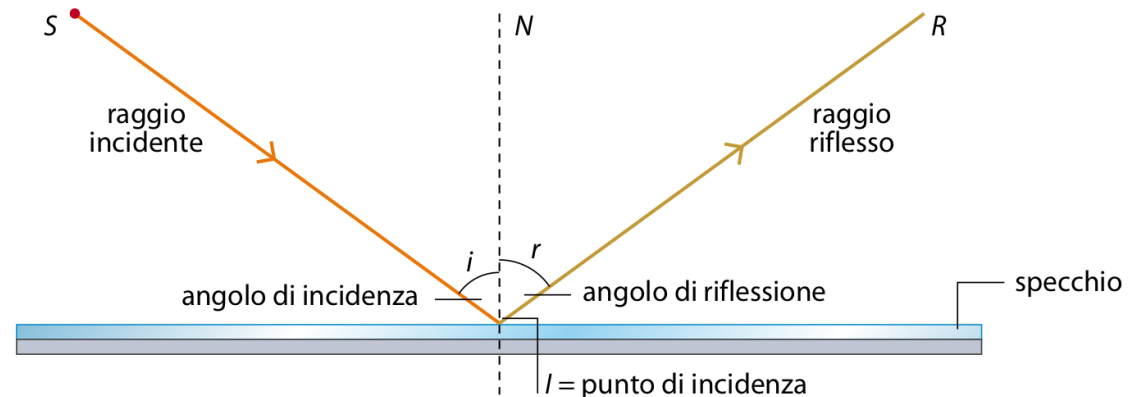


La seconda legge della riflessione

L'angolo di riflessione è uguale all'angolo di incidenza

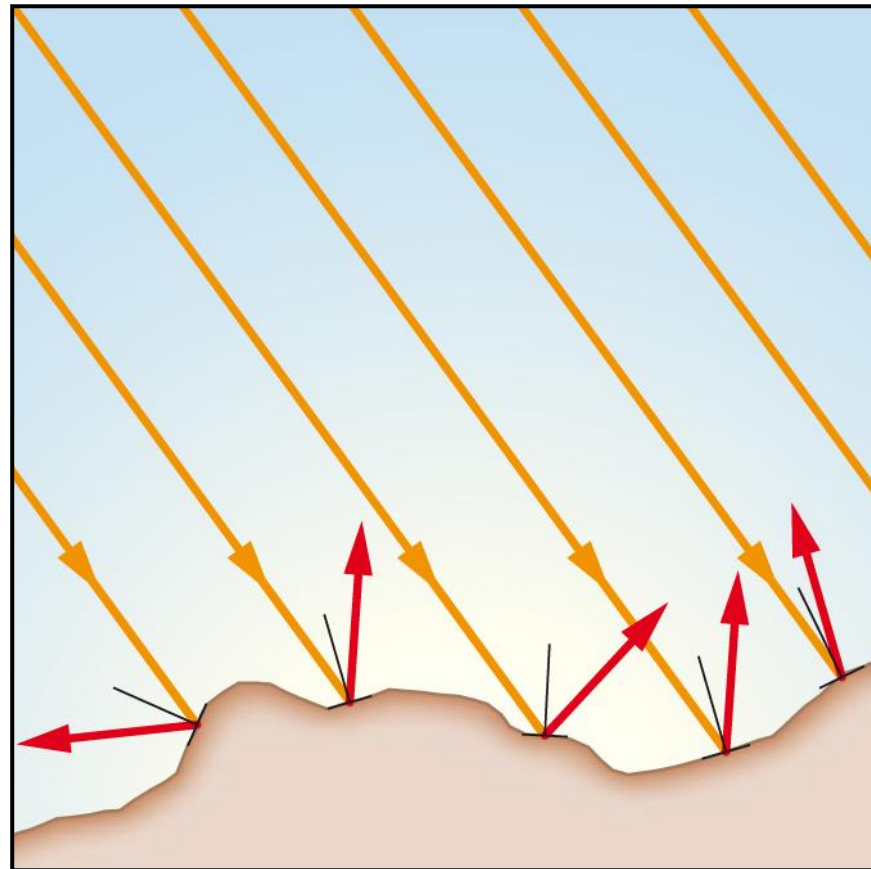
$$i = r$$

S è una sorgente di luce puntiforme. SI è il raggio incidente sullo specchio. NI è la normale al piano dello specchio nel punto di incidenza I . IR è il raggio riflesso.



La diffusione della luce riflessa

- la diffusione spiega cosa accade quando un fascio di raggi di luce colpisce una superficie non perfettamente riflettente.
- per via della non uniformità microscopica della superficie i raggi vengono riflessi in ogni direzione.



Grazie alle due leggi della riflessione possiamo spiegare il fenomeno della diffusione.

Se la superficie non è perfettamente liscia, può essere considerata come insieme di tante microsuperfici.

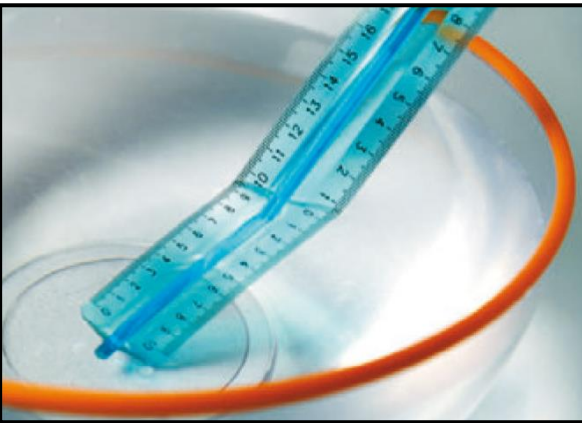
Ogni piccola porzione di superficie avrà un'orientazione diversa rispetto alla direzione dei raggi luminosi.

Perciò i singoli raggi riflessi sono orientati in maniera diversa e quindi sparpagliati in tutte le direzioni.

La rifrazione della luce

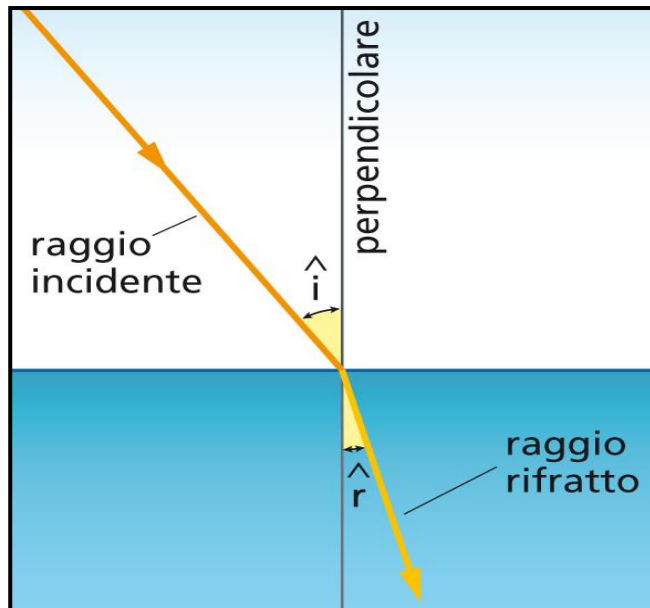
La luce che incide sulla superficie di separazione di due mezzi trasparenti cambia direzione, cioè si avvicina o si allontana dalla normale nel punto di incidenza

La rifrazione della luce

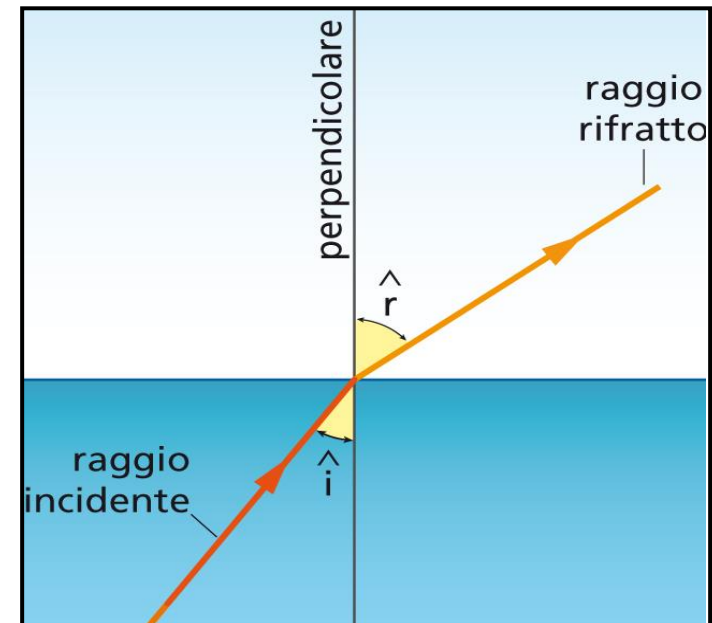


Osserviamo una riga immersa acqua: sembra spezzata.

Da cosa è provocata questa illusione ottica?
La velocità della luce nei due mezzi è diversa perché diversa è la loro densità: i raggi luminosi, nel passaggio da un mezzo meno denso (l'aria) a uno più denso (l'acqua) rallentano e vengono deviati: è il fenomeno della rifrazione della luce.



La rifrazione avviene ogni volta che un raggio attraversa la separazione tra due mezzi trasparenti nei quali la luce ha velocità diverse.



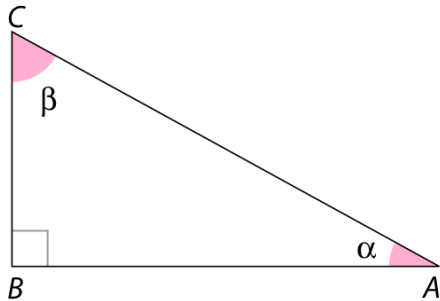
La rifrazione della luce

La funzione seno

Dato un triangolo rettangolo, il **seno** dell'angolo α è il rapporto tra il cateto opposto ad α e l'ipotenusa.

Analogamente si definisce il seno dell'angolo β .

Il cateto BC si oppone all'angolo α , AC è l'ipotenusa del triangolo.



$$\text{sen } \alpha = \frac{BC}{AC}$$

$$\text{sen } \beta = \frac{AB}{AC}$$

Tabella 1
Seno di alcuni angoli

Angolo	Seno
30°	0,500
45°	0,707
60°	0,866
75°	0,966
90°	1,00

La rifrazione della luce

Le Leggi sulla rifrazione

Prima legge della rifrazione: il raggio incidente, il raggio rifratto e la normale alla superficie di separazione dei due mezzi, nel punto di incidenza, sono situati nello stesso piano.

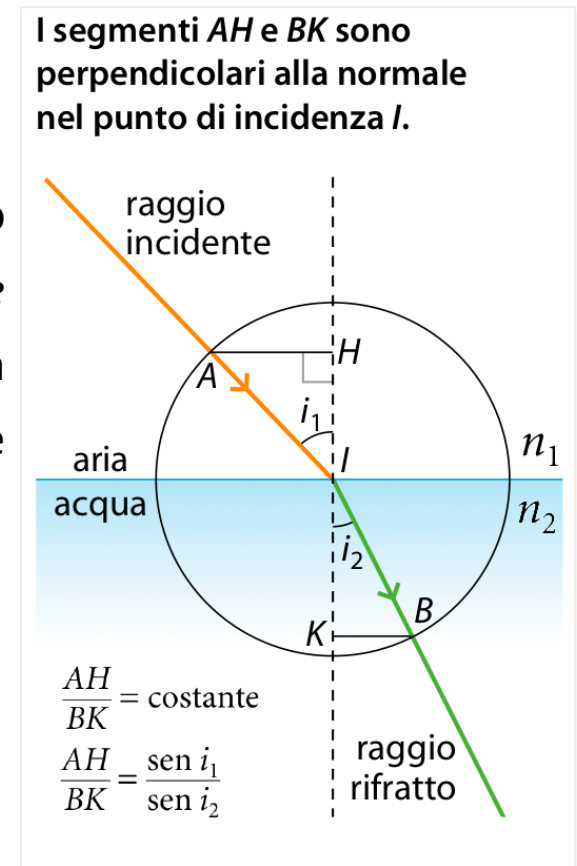
Seconda legge della rifrazione

Il rapporto fra il seno dell'angolo di incidenza e il seno dell'angolo di rifrazione è costante (*detto indice di rifrazione del secondo mezzo rispetto al primo*), ed è uguale rapporto fra l'indice di rifrazione del secondo mezzo e l'indice di rifrazione del primo mezzo

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

\longleftrightarrow

$$n_1 \cdot \sin i_1 = n_2 \cdot \sin i_2$$



Indice di rifrazione e velocità di propagazione

- Il rapporto della velocità della luce in due mezzi è uguale al rapporto inverso dei loro indici di rifrazione. $v_1 / v_2 = n_2 / n_1$
- n è il fattore numerico che esprime la riduzione della velocità di propagazione della luce, rispetto a quella nel vuoto. $n = c/v$
- n varia con la lunghezza d'onda della luce e ciò determina il fenomeno della dispersione.

Alcuni valori di n

- Aria = 1,0003
- Acqua = 1,3
- Vetro = valori compresi fra 1,5 e 1,8
- Sale (cloruro di sodio) = 1,5
- Diamante = 2,4
- Silicio = 3,4

La deviazione dipende dal colore: la luce violetta viene deviata maggiormente di quella rossa.

La rifrazione della luce

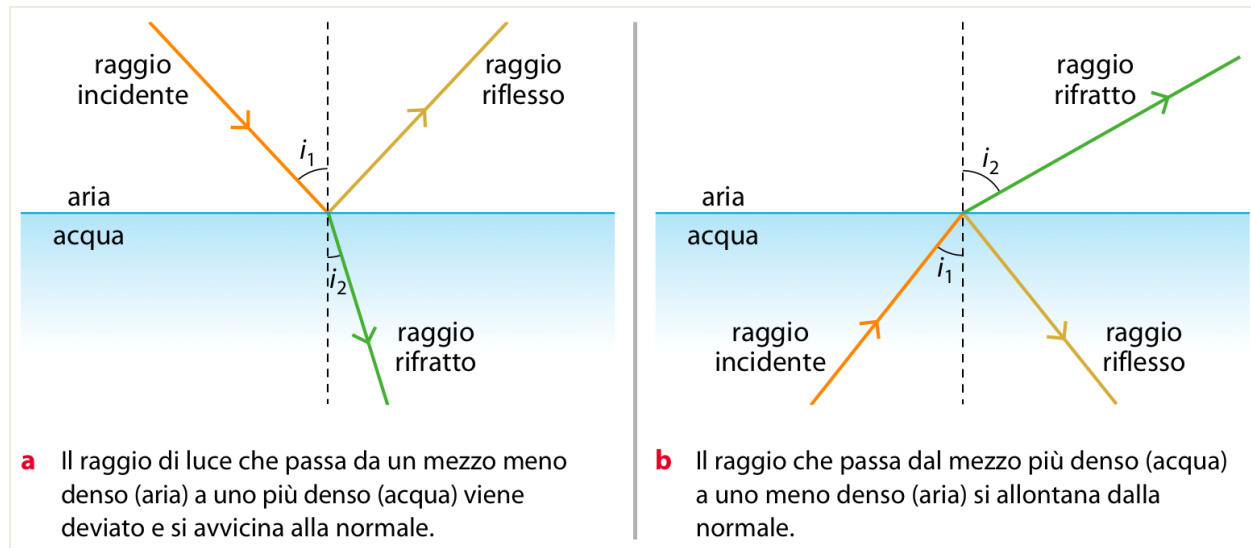
Calcolo dell'angolo di rifrazione

Conoscendo l'angolo di incidenza e gli indici di rifrazione, con la **legge della rifrazione** si può calcolare l'angolo di rifrazione i_2 :

$$\sin i_2 = \frac{\sin i_1 \cdot n_1}{n_2}$$

Passaggio **da** un mezzo **otticamente meno denso** a uno **più denso**, per esempio aria-acqua: $n_2 > n_1 \rightarrow \sin i_2 < \sin i_1 \rightarrow i_2 < i_1$ Il raggio **si avvicina** alla normale

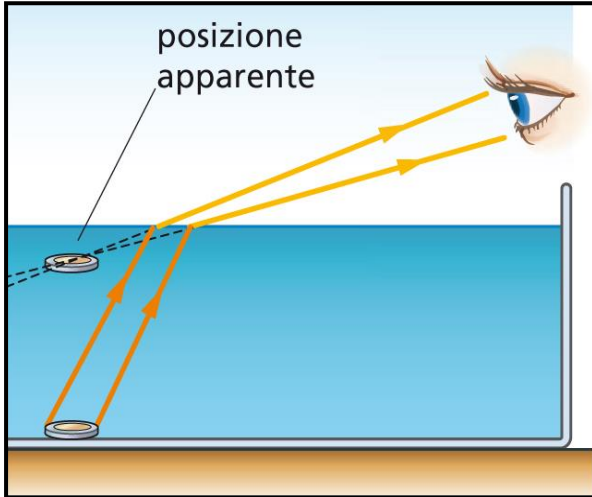
Passaggio **da** un mezzo **otticamente più denso** a uno **meno denso**, per esempio vetro-aria: $n_1 > n_2 \rightarrow \sin i_2 > \sin i_1 \rightarrow i_2 > i_1$ Il raggio **si allontana** dalla normale



La rifrazione della luce

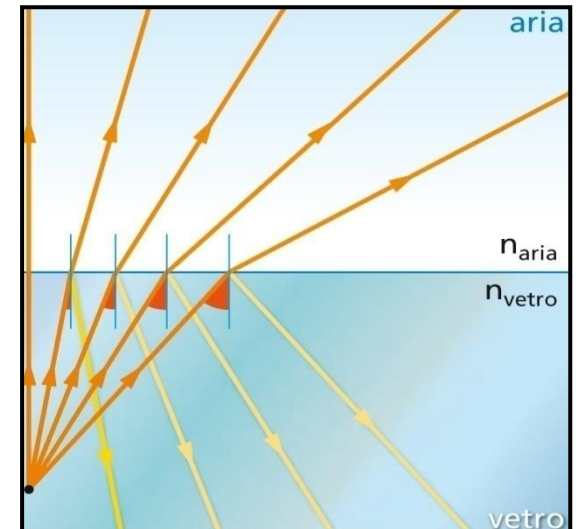
Esempi

La moneta sott'acqua



Oltre al raggio rifratto si forma anche un debole raggio riflesso dentro il vetro.

- Che cosa succede all'angolo di rifrazione quando aumenta l'angolo di incidenza?



La riflessione totale

Nel passaggio da un mezzo più denso a uno meno denso, la luce può anche non subire la rifrazione, ma essere riflessa totalmente

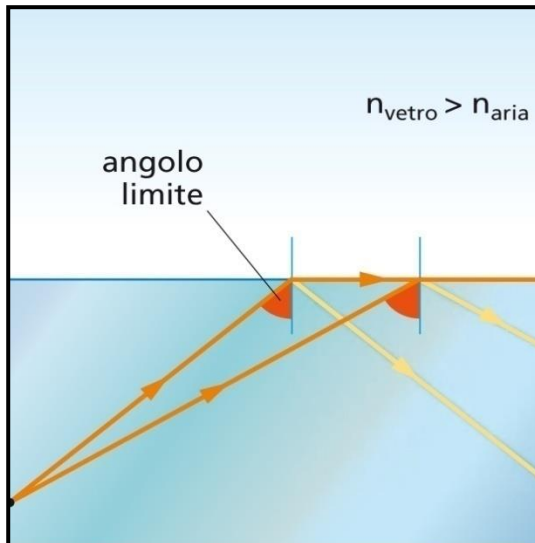
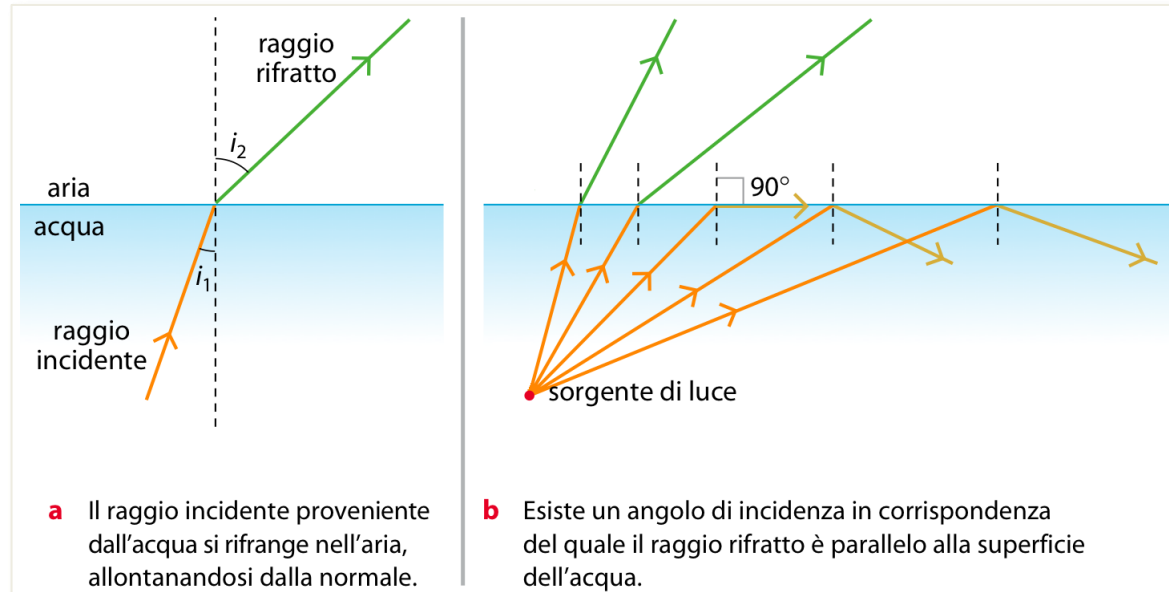
La rifrazione della luce – La riflessione totale

Se $n_1 > n_2$, il raggio rifratto si **allontana** dalla normale: $i_2 > i_1$.

Facendo crescere l'angolo di incidenza i_1 , cresce anche i_2

Quando $i_2 = 90^\circ$ il **raggio rifratto** diventa **radente** alla superficie di separazione.

allora i_1 arriva al valore i_L (angolo limite).



Si chiama **angolo limite** quel valore dell'angolo d'incidenza a cui corrisponde un angolo di rifrazione pari a 90° .

L'energia luminosa che, per angoli minori o uguali di quello limite, era suddivisa tra raggio rifratto e raggio riflesso, confluisce tutta nel raggio riflesso dentro il vetro.

La rifrazione della luce – La riflessione totale

- In condizioni di **angolo di incidenza limite** i_L si ha $i_2 = 90^\circ$:

$$\frac{\sin i_L}{\sin 90^\circ} = \frac{n_2}{n_1}$$

$$\sin i_L = \frac{n_2}{n_1}$$

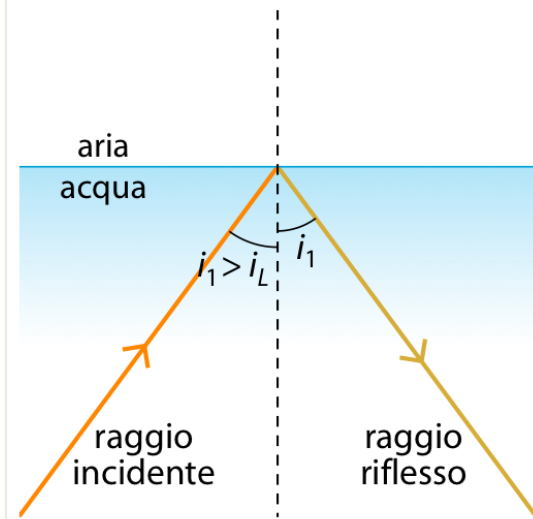
Per la coppia di mezzi vetro-aria ($n_1 = 1,5$, $n_2 = 1$) si ha:

$$\sin i_L = 0,67 \longrightarrow i_L = 42^\circ$$

Riflessione totale

Se l'**angolo di incidenza supera l'angolo limite**, non si ha più raggio rifratto e il **raggio incidente viene riflesso** nel primo mezzo

L'angolo di incidenza è maggiore dell'angolo limite. Non c'è rifrazione, ma riflessione totale perché il raggio rimane nel mezzo da cui proviene.



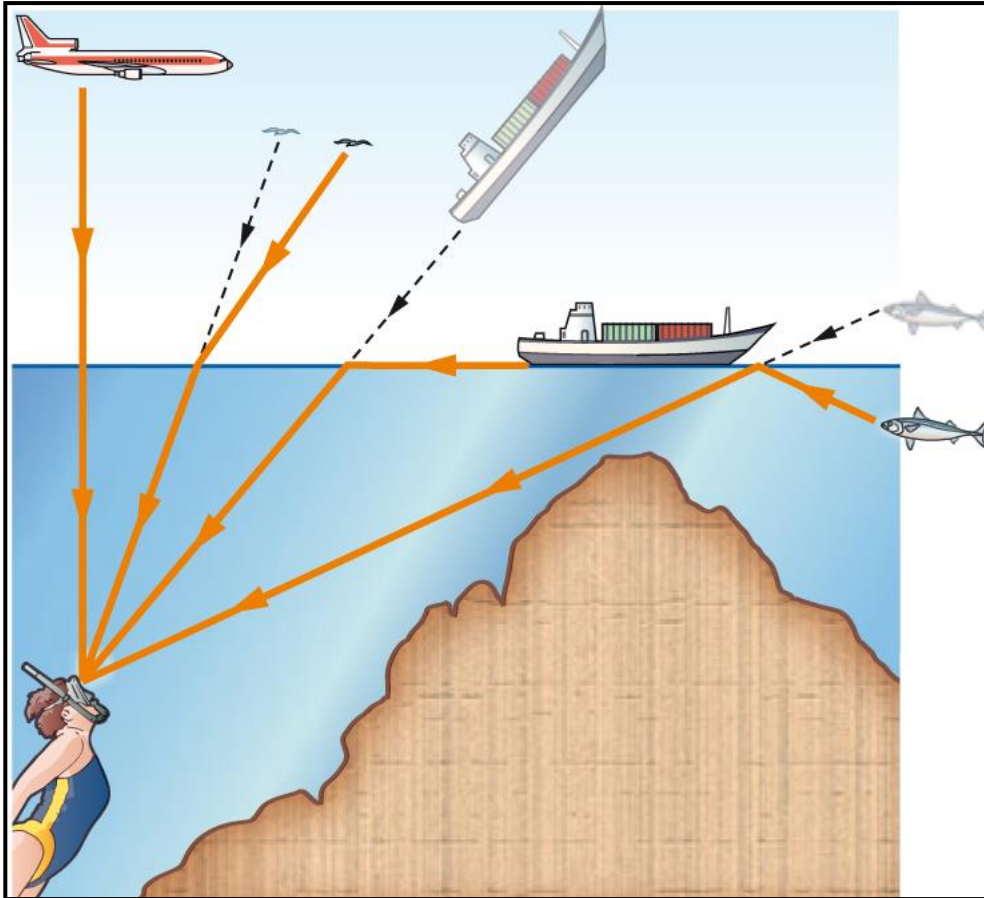
La rifrazione della luce – La riflessione totale

Angoli limite con l'aria

Sostanza	n^*	Angolo limite	Sostanza	n^*	Angolo limite
Ghiaccio	1,31	49,8°	Plexiglas	1,49	42,2°
Acqua	1,33	48,6°	Vetro	1,50-1,90	31,9-41,5
Alcol etilico	1,36	47,2°	Sale (cloruro di sodio)	1,54	40,5°
Glicerina	1,47	42,9°	Diamante	2,42	24,4°

La rifrazione della luce – La riflessione totale

Il punto di vista dei sub



La rifrazione della luce – La riflessione totale

- **Prisma a riflessione totale**

- Base del prisma: triangolo rettangolo isoscele.

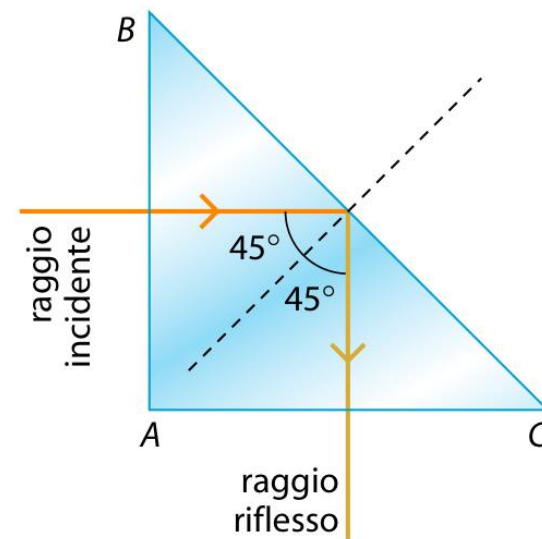
- Superficie *AB*: **aria-vetro**, **nessuna deviazione** (angolo di incidenza nullo)

- Superficie *BC*: **vetro-aria**, **riflessione totale** (angolo di incidenza $45^\circ >$ angolo limite 42°)

- Superficie *CA*: **vetro-aria**, **nessuna deviazione** (angolo di incidenza nullo)

- **Il raggio che emerge dal prisma è perpendicolare al raggio incidente**

Il prisma cambia di 90° la direzione di un raggio luminoso.



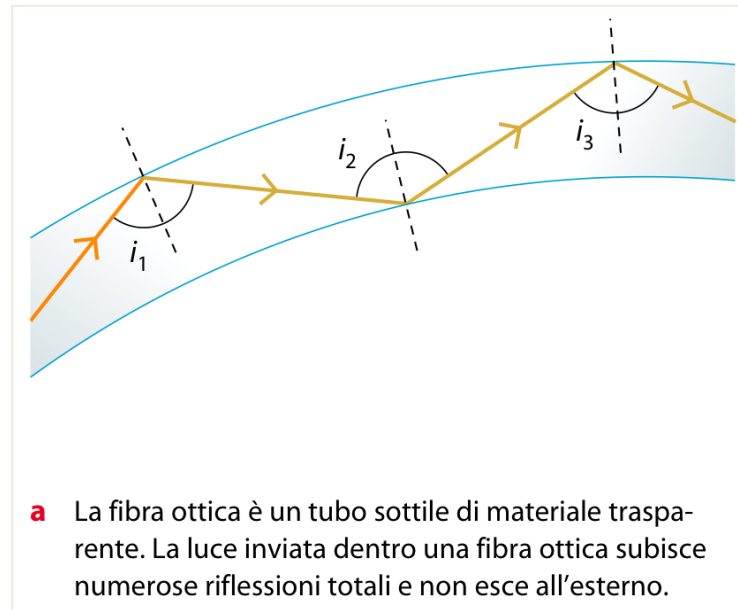
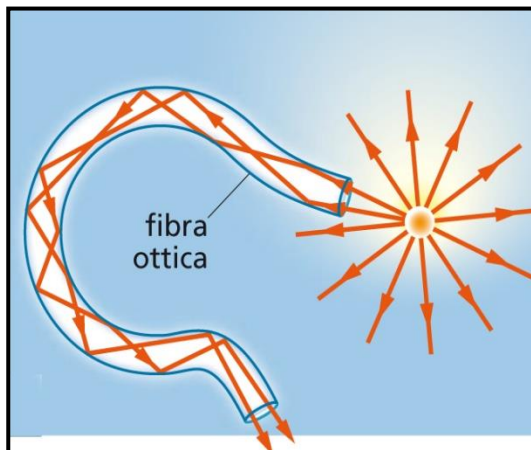
La rifrazione della luce – La riflessione totale

Le fibre ottiche

La luce che vi penetra si riflette all'interno della fibra moltissime volte, fino a uscire all'altra estremità.

Filo di materiale trasparente (vetro o plastica) rivestito da guaina opaca.

La luce introdotta nella fibra in una delle estremità si propaga subendo numerose **riflessioni totali** sull'interno delle pareti (incide sulle pareti con un angolo di incidenza maggiore dell'angolo limite).



a La fibra ottica è un tubo sottile di materiale trasparente. La luce inviata dentro una fibra ottica subisce numerose riflessioni totali e non esce all'esterno.

In questo modo si ha propagazione a grande distanza senza attenuazione.

La rifrazione della luce – La riflessione totale

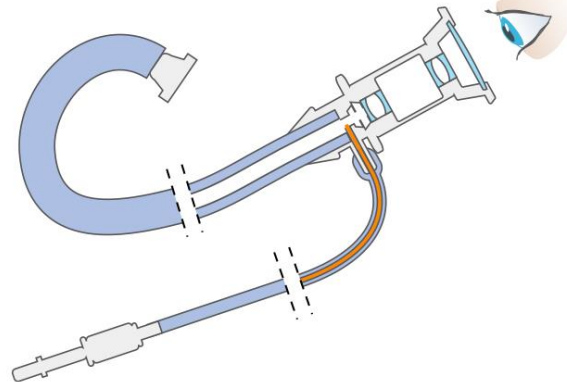
Le fibre ottiche

- Le fibre ottiche trovano le loro principali applicazioni nella trasmissione dati e nell'illuminazione e ispezione di luoghi difficilmente accessibili

Fibre ottiche usate
nelle telecomunicazioni.



TECHNOLOGY AND INDUSTRY, BRAND X, CULVER CITY 2002

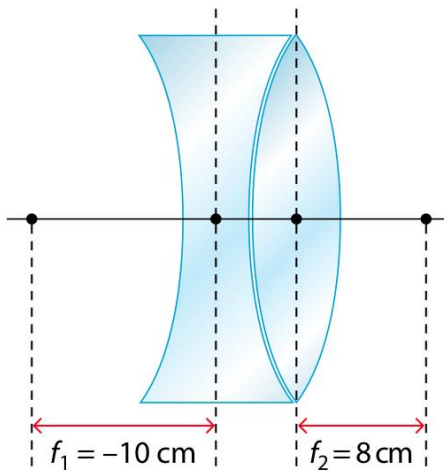


L'endoscopio serve per illuminare
e quindi ispezionare corpi non facilmente
raggiungibili.

Lezione 6 - Le lenti

- **Potere diottrico d :** reciproco della distanza focale f : $d = \frac{1}{f}$
- f è espressa in m; in unità SI d è espresso in m^{-1} (diottrie)

Due lenti sottili affiancate.

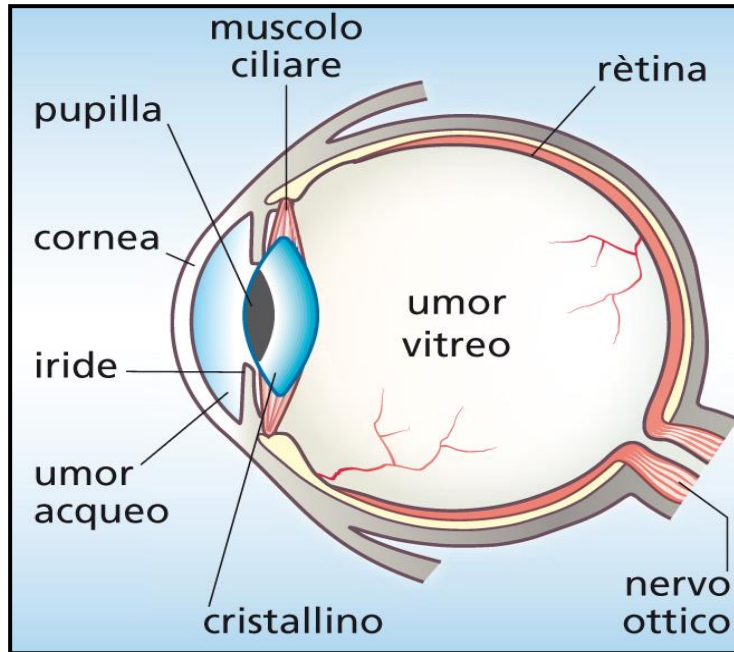


Una lente con una lunghezza focale di 20 cm (0,2 m) ha un potere diottrico di 5 diottrie, se è convergente, o di -5 diottrie, se è divergente

Il potere diottrico di un sistema di **due lenti sottili affiancate** è la **somma** dei singoli poteri diottrici

$$d = d_1 + d_2 \qquad \frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}$$

L'occhio

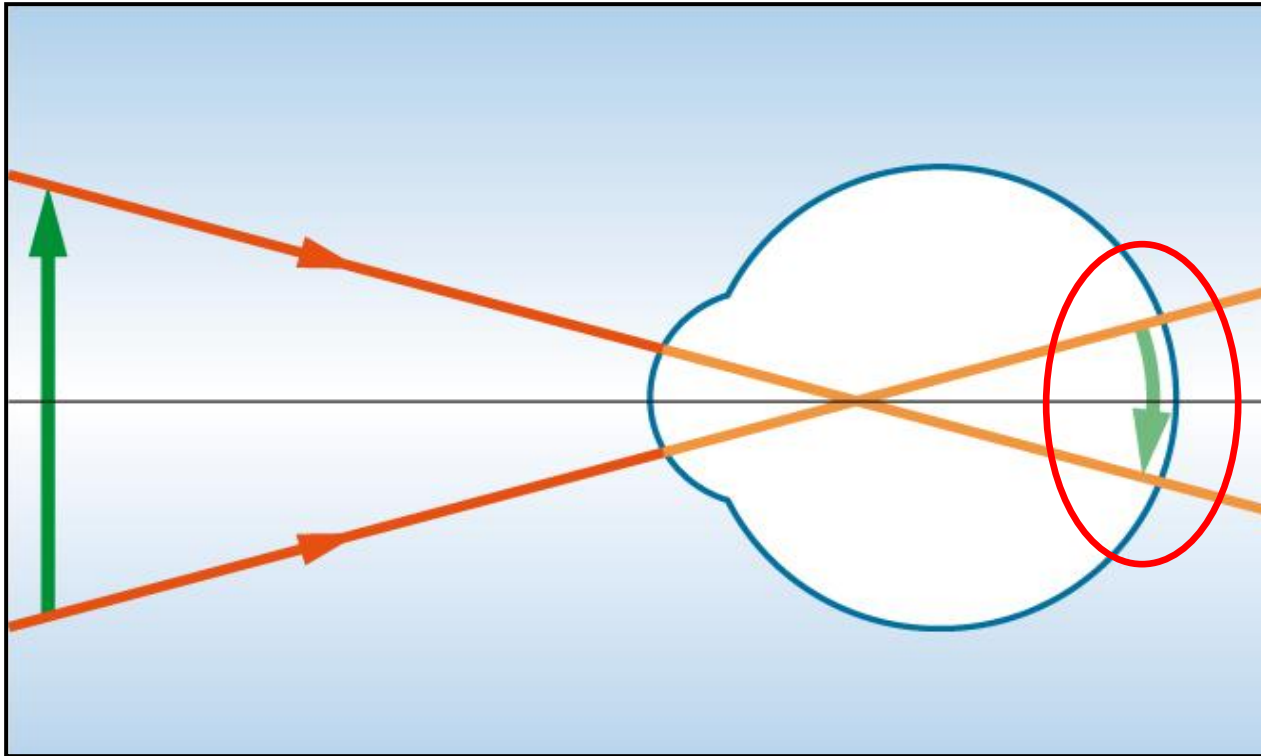


La pupilla è comandata, in modo inconscio, da un muscolo che ne fa variare il diametro a seconda dell'intensità della luce incidente.

Nell'occhio si susseguono tre mezzi rifrangenti:

1. la cornea e l'umor acqueo (un liquido trasparente tra la cornea e l'iride), entrambi con indice di rifrazione $n_1 = 1,346$;
2. il cristallino, con indice di rifrazione $n_2 = 1,437$;
3. l'umor vitreo (una sostanza gelatinosa trasparente all'interno dell'occhio), con indice di rifrazione $n_1 = 1,346$.

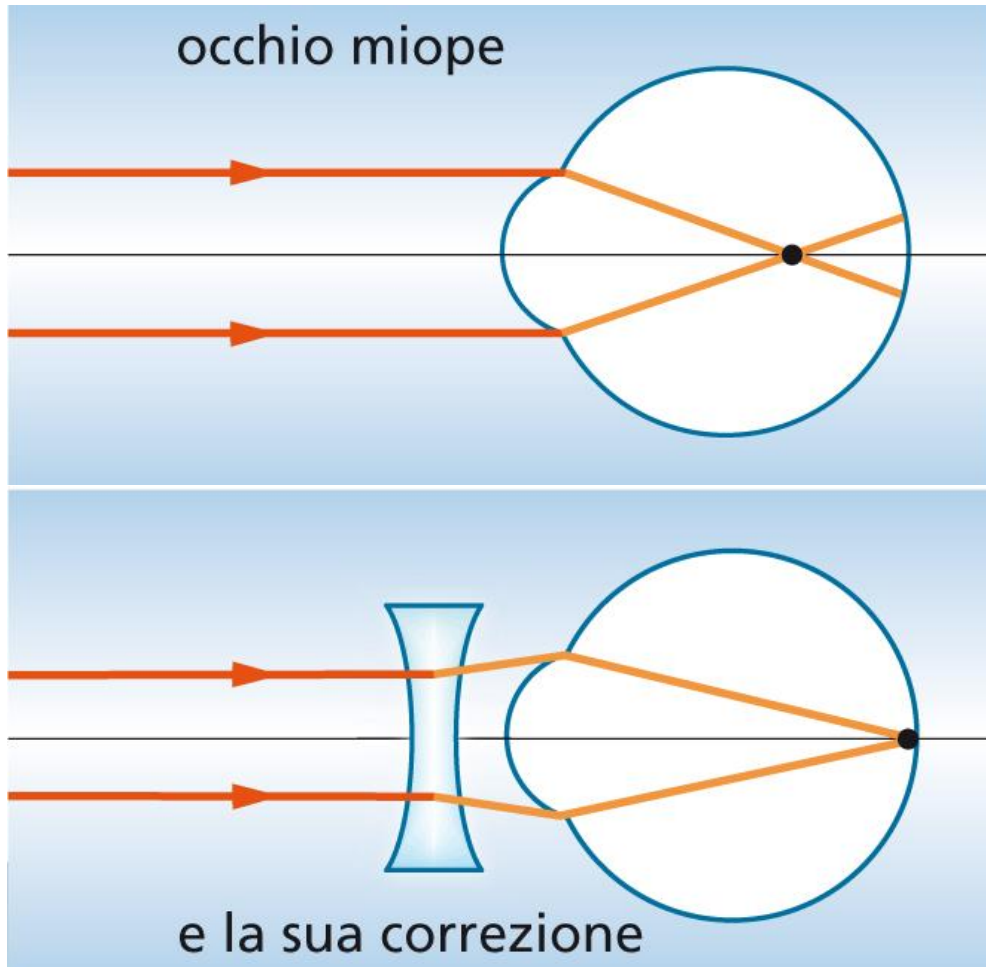
La **retina** e la formazione delle immagini



I raggi formano un'immagine reale e capovolta sul fondo dell'occhio, dove si trova una superficie coperta di elementi sensibili alla luce, la *retina*.

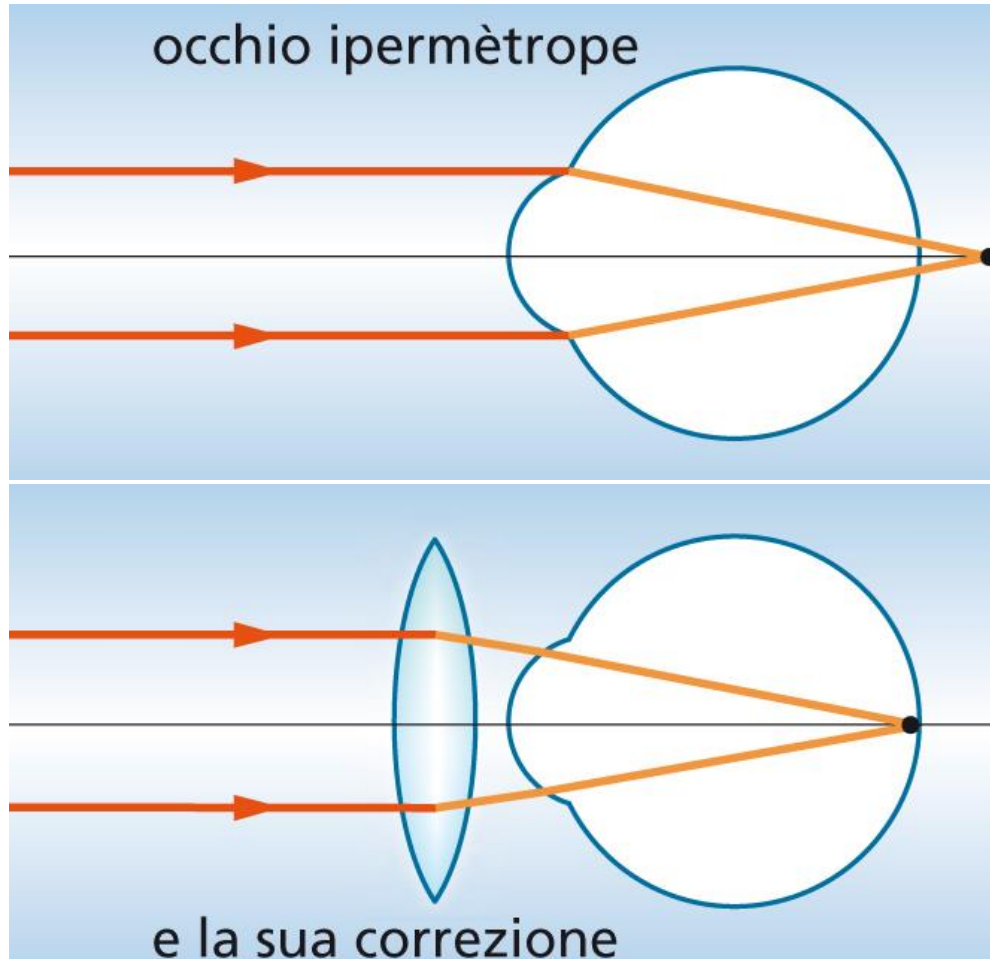
- L'occhio mette a fuoco gli oggetti modificando la curvatura del cristallino e, quindi, la sua distanza focale. È questo il meccanismo dell'*accomodamento*.

Miopia



Nell'occhio *miope*
l'immagine di un oggetto
distante si forma
prima della retina.

Ipermetropia



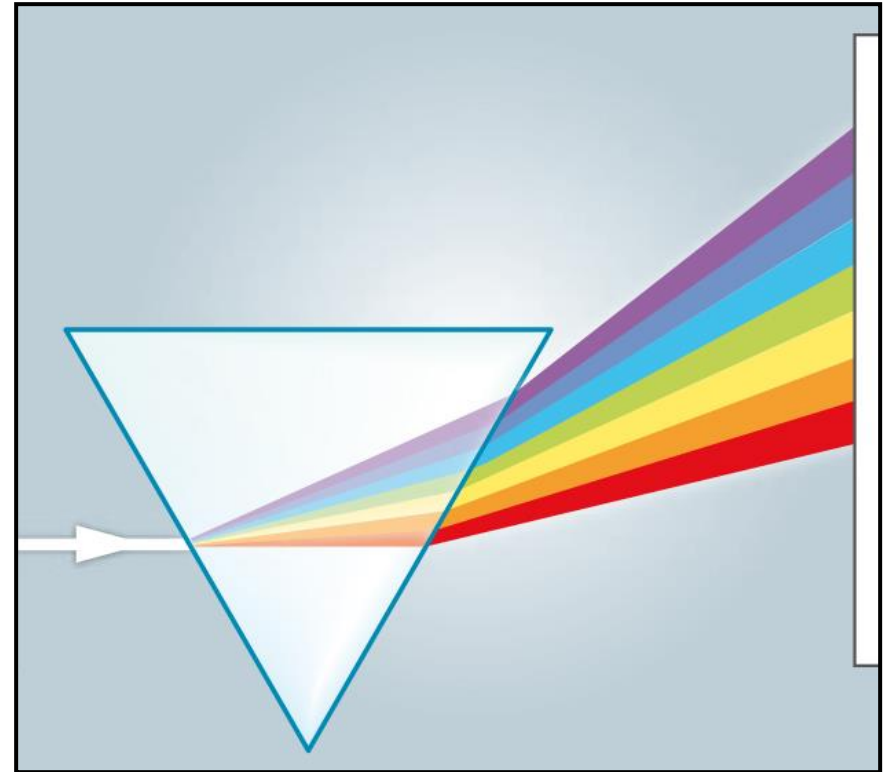
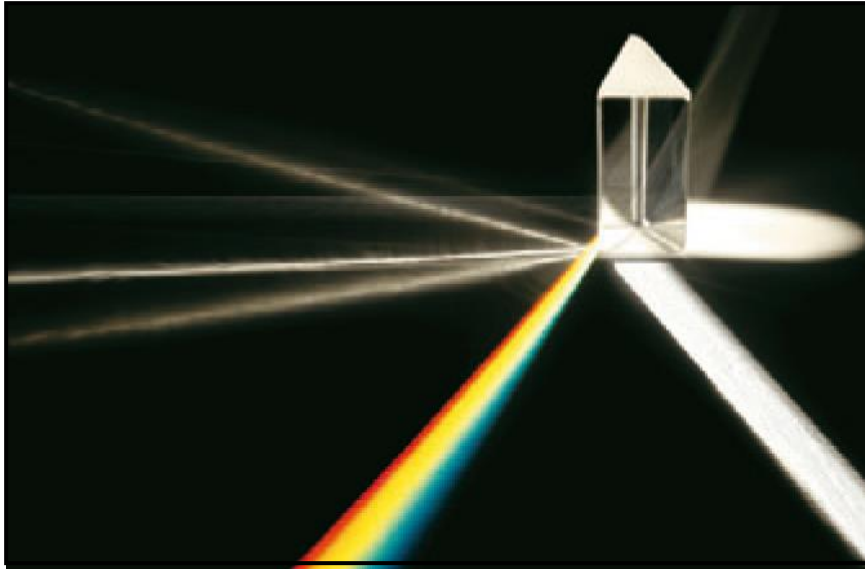
Nell'occhio *ipermetrope*
l'immagine di un oggetto
distante si forma
dietro la retina.

L'arcobaleno



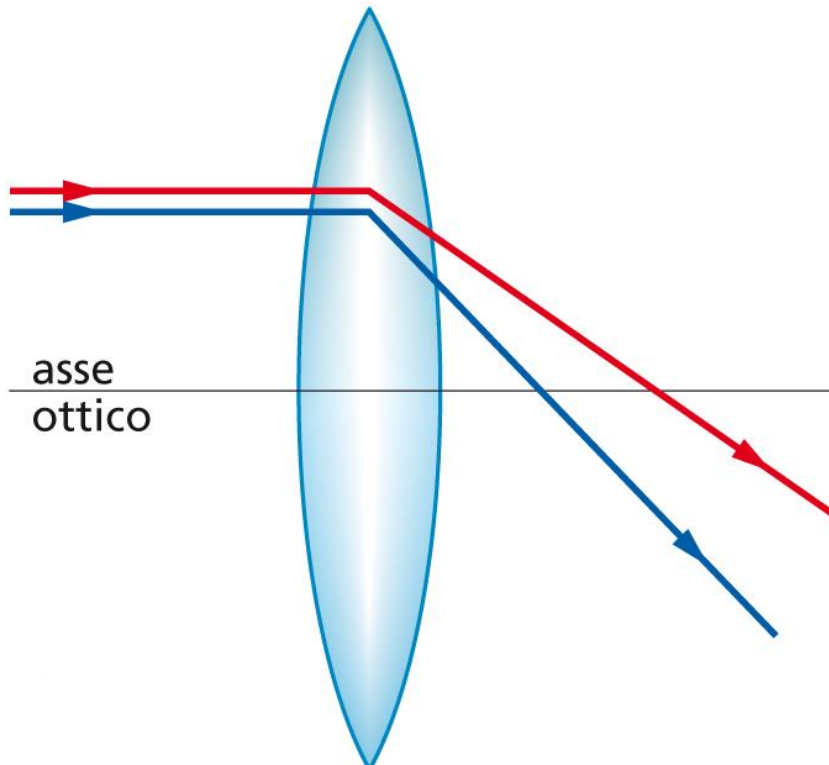
- A quali fenomeni fisici si deve la formazione dell'arcobaleno?

La **dispersione** della luce (1)



Un fascio di **luce bianca**, dopo che ha attraversato un prisma, si suddivide nei diversi colori che costituiscono lo spettro della luce.

La **dispersione** della luce (2)



Colore	Indice di rifrazione
Violetto	1,522
Blu	1,516
Giallo	1,510
Rosso	1,507

- La dispersione della luce è dovuta al fatto che l'indice di rifrazione di una sostanza trasparente dipende dal colore.

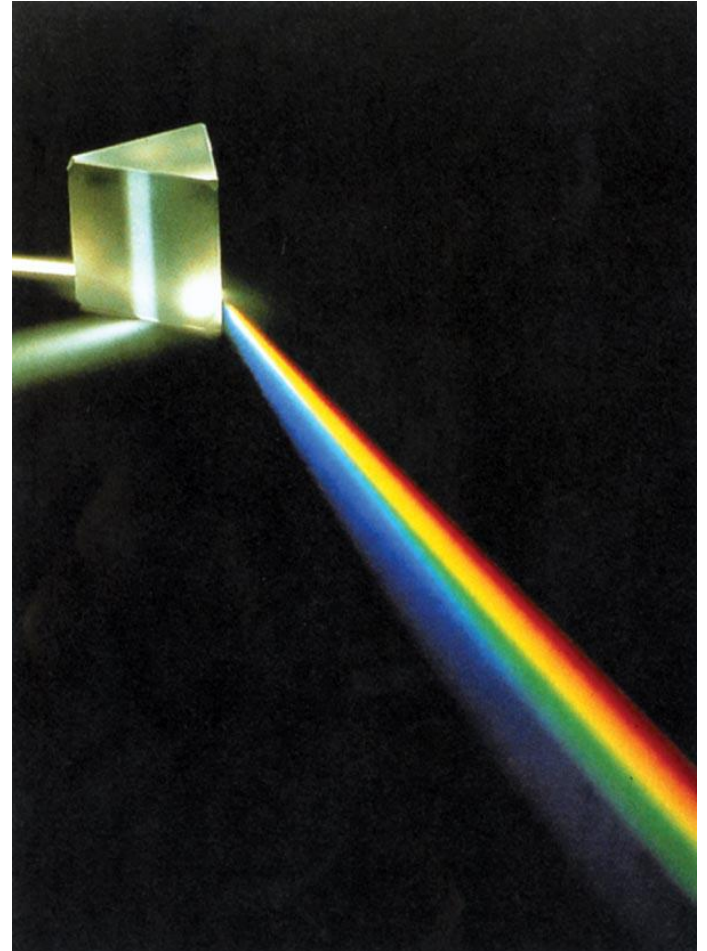
Dispersione

- La luce bianca, nel passaggio da un mezzo a un altro, essendo composta da diverse frequenze, subisce diverse rifrazioni: questo fenomeno determina la *dispersione* della luce bianca nei colori che la compongono.
- La luce **violetta** viene **deviata** maggiormente, mentre è la luce **rossa** a esser **deviata** di **meno**: da questo fatto deriva la disposizione dei colori in un fascio uscente da un **prisma**.

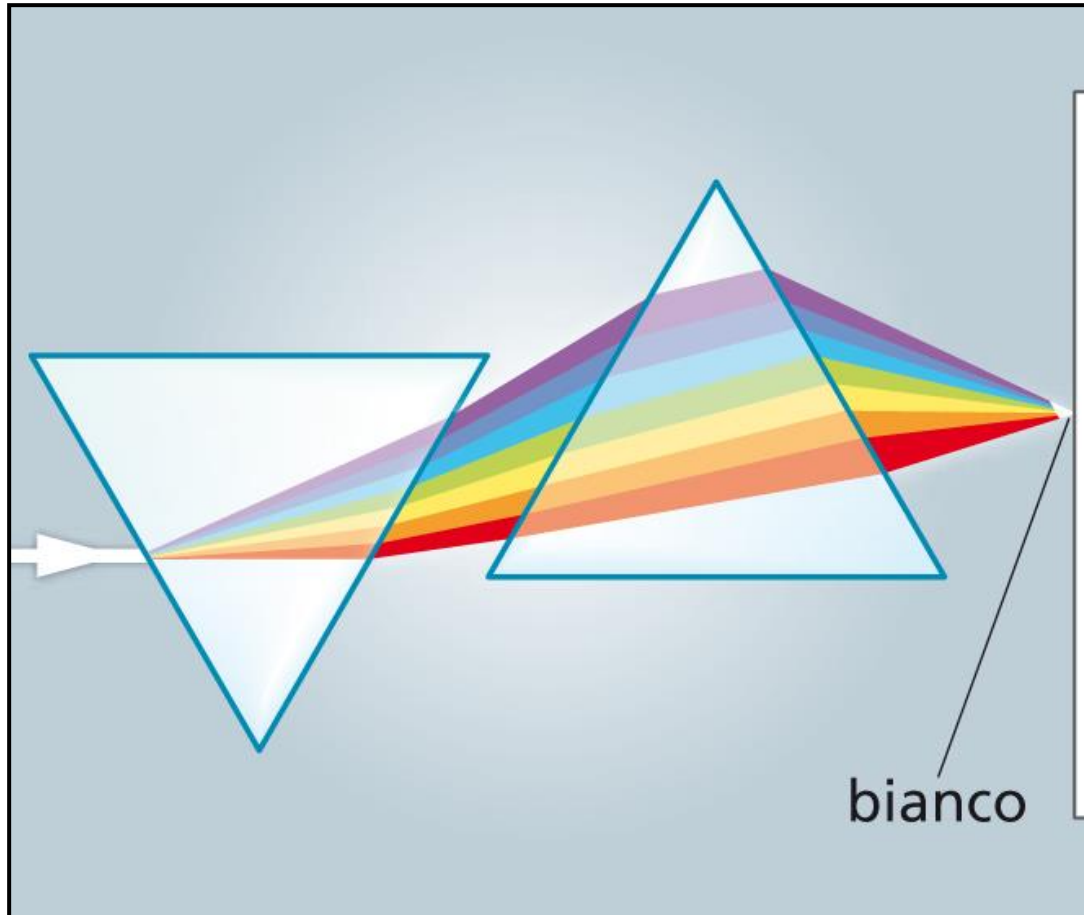
Il prisma

Come abbiamo visto n varia con la lunghezza d'onda della luce.

Pertanto un fascio di luce che attraversi un blocco di vetro a base triangolare, dopo aver subito due rifrazioni, viene disperso nelle sue componenti colorate.



La luce **bianca**



La **luce bianca** è la sovrapposizione dei diversi colori dello spettro.