Esperienza 6: riflessione e rifrazione della luce

L'ottica è la branca della fisica che si occupa di studiare le proprietà della luce, il suo comportamento, la sua propagazione attraverso i materiali.

Queste caratteristiche dipendono dalla sua natura ma capire cosa sia la luce non è stato facile: a partire dal 1600 sono state date due risposte diverse, dalle quali si sono originati due modelli:

- il **modello corpuscolare**, proposto da Isaac Newton, secondo il quale la luce è costituita da particelle in movimento che verranno chiamate a partire dal '900 *fotoni*;
- il **modello ondulatorio**, sostenuto da Christian Huygens, secondo il quale la luce è un'onda (con un'analogia a quella del mare): trasporta energia ma non materia.

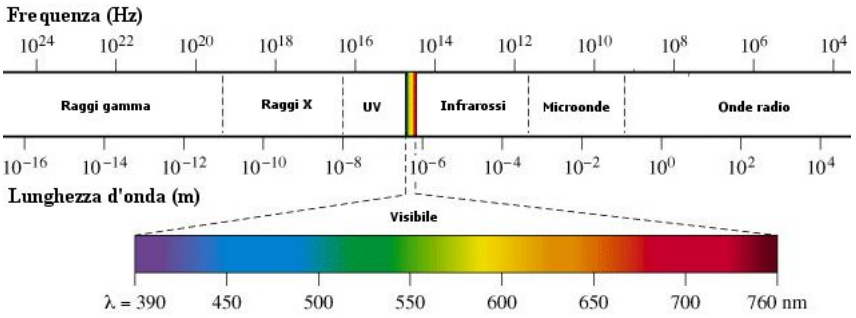
Quello che sappiamo oggi è che la luce è entrambe le cose ossia, a seconda dell'esperimento che stiamo conducendo, manifesta un comportamento corpuscolare o ondulatorio. Ma in entrambi i casi, che sia un'onda o un insieme di particelle, la sua velocità c nel vuoto è di circa $c \simeq 300.000\ km/s$.

Un'altra caratteristica che rimane uguale in entrambi i modelli è il fatto che la luce è costituita da diverse *frequenze* (che si indica con il simbolo ν), come un'onda sonora che è caratterizzata da diverse frequenze sonore (anche se sono due tipologie di onde diverse) che noi associamo a suoni differenti (suoni gravi, acuti, etc…). Ma quando si affronta lo studio della luce si è soliti parlare di *lunghezza d'onda* λ. Similmente all'associazione per le onde sonore tra frequenza e suono, la lunghezza d'onda della luce può essere associata al *colore* della luce: in particolare la luce che ha un colore tendente al rosso ha una lunghezza d'onda che maggiore della luce che tende al colore blu.

Tra il colore blu ed il colore rosso vi sono tutti gli altri colori che possiamo vedere nel fenomeno dell'arcobaleno e che avranno una lunghezza d'onda crescente con l'andare dal blu verso il rosso: tutti insieme costituiscono lo *spettro visibile* della luce.

Se poi la lunghezza d'onda della luce continua ad aumentare oltre quella associata al colore rosso o a diminuire oltre quella associata al colore blu si hanno altri "colori" che l'occhio umano non riesce a percepire (raggi X, raggi Gamma, raggi infrarossi, etc…).

L'insieme della luce visibile e luce non visibile costituisce lo *spettro della radiazione elettromagnetica*.



L'ottica si divide in:

- ottica geometrica: si occupa di descrivere la propagazione della luce assumendo che questa si propaghi per mezzo di raggi rettilinei secondo precise leggi
- ottica fisica: si occupa di spiegare fenomeni più complessi per i quali non sono più sufficienti le ipotesi dell'ottica geometrica

Ottica geometrica:

L'ottica geometrica descrive i comportamenti della luce sulla base della sua propagazione avendo assunto che essa possa essere vista come costituita da un insieme di *raggi luminosi*:

un **raggio luminoso** è una schematizzazione della luce come un fascio molto sottile che indica la direzione di propagazione della luce



La direzione di propagazione della luce è assunta essere *rettilinea*: così può essere facilmente individuata da una semiretta che indica il percorso da un punto ad un altro.
Questo modo di ragionare è facilmente riscontrabile nella vita quotidiana quando si osserva la luce del Sole che fuoriesce da una coltre di nubi come raggi luminosi.
Quest'assunzione è inoltre in accordo tanto con il modello corpuscolare, in quanto i raggi costituiscono le traiettorie dei fotoni, tanto con il modello ondulatorio dove i raggi luminosi indicano la direzione di propagazione dell'onda.
Quando un raggio di luce incontra un mezzo può attraversarlo (e si parlerà di mezzo *trasparente*) oppure no (mezzo *opaco*): quando si ritrova ad incidere sulla superficie di separazione tra due mezzi trasparenti, come per esempio tra aria e vetro, si verificano contemporaneamente due fenomeni differenti:

- *riflessione*
- *rifrazione*

La riflessione:

Il primo fenomeno di cui tratta l'ottica geometrica è la riflessione della luce: un raggio luminoso in un certo mezzo incide in un punto di una superficie, viene riflesso e ritorna nel mezzo di partenza.

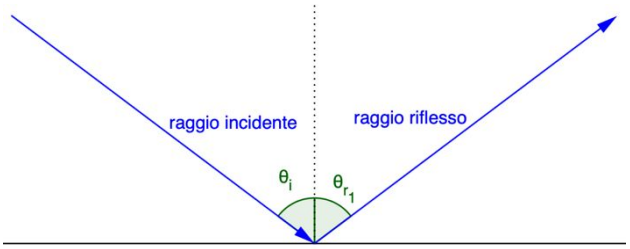
La retta perpendicolare al punto di incidenza viene detta *normale* nel punto di incidenza; vi sono poi due angoli che caratterizzano il fenomeno: il primo è l'angolo θ_i, detto *angolo di incidenza*, tra il raggio incidente e la normale e l'angolo θ_{r_1}, detto *angolo di riflessione*, tra il raggio riflesso e la normale.

Le leggi che regolano questo fenomeno furono enunciate da René Descartes e sono due:

Prima legge: il raggio incidente, il raggio riflesso e la normale appartengono allo stesso piano.

Seconda legge: l'angolo di incidenza è uguale all'angolo di riflessione:

$$\theta_i = \theta_{r_1}$$



La rifrazione:

Il secondo fenomeno affrontato dall'ottica geometrica riguarda la propagazione della luce quando questa attraversa due materiali differenti. Ciò che contraddistingue i materiali nell'ambito dell'ottica è l'*indice di rifrazione* n che descrive la diversa velocità di propagazione v della luce nel materiale:

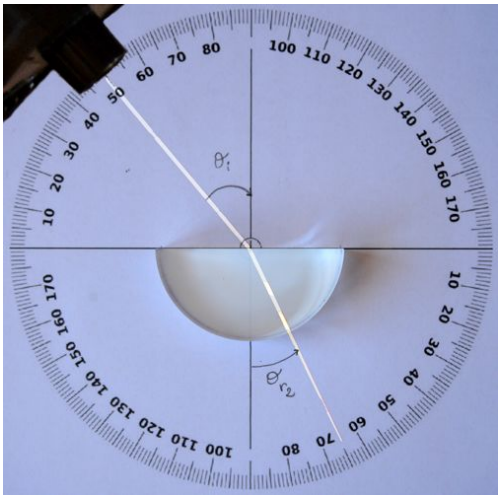
$$n = \frac{c}{v}$$

Consideriamo quindi un raggio luminoso che passa da un materiale con un indice di rifrazione n_1 ad un altro con indice di rifrazione n_2: la superficie che separa i due mezzi è detta *interfaccia*.

Il raggio che penetra all'interno del secondo mezzo è detto *raggio rifratto* e l'angolo θ_{r_2} che forma con la normale all'interfaccia è detto *angolo di rifrazione*.

C'è una relazione che lega l'angolo di incidenza a quello di rifrazione e che porta il nome di **legge di Snell**:

$$n_1 \sin sin\ \theta_i = n_2 \sin sin\ \theta_{r_2}$$

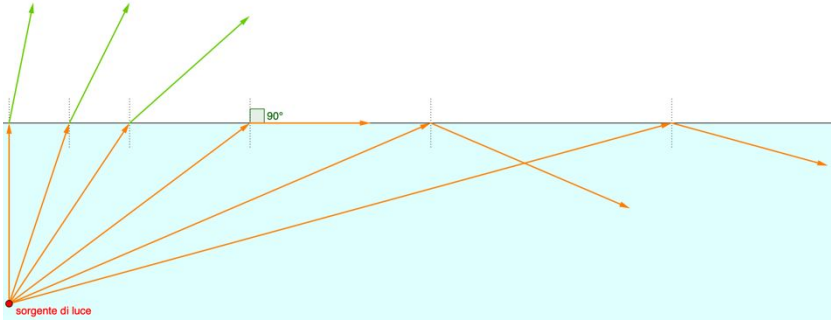


In particolare da questa legge si può dedurre che:

- se $n_1 < n_2$ il raggio rifratto si avvicina alla normale
- se $n_1 > n_2$ il raggio rifratto si allontana dalla normale.

Poiché quando un raggio di luce si propaga da un mezzo con un certo indice di rifrazione n_2 ad un altro meno denso con indice di rifrazione n_1 minore il raggio rifratto si allontana dalla normale, aumentando progressivamente l'angolo di incidenza il raggio rifratto si avvicina sempre più all'interfaccia.

Esiste un valore dell'angolo θ_i per il quale il raggio rifratto è radente alla superficie di separazione: questo angolo è detto *angolo limite* θ_L.



Per angoli di incidenza maggiori, il raggio rifratto manca dal tutto e c'è solo il raggio riflesso: il fenomeno è noto come ***riflessione interna totale***.

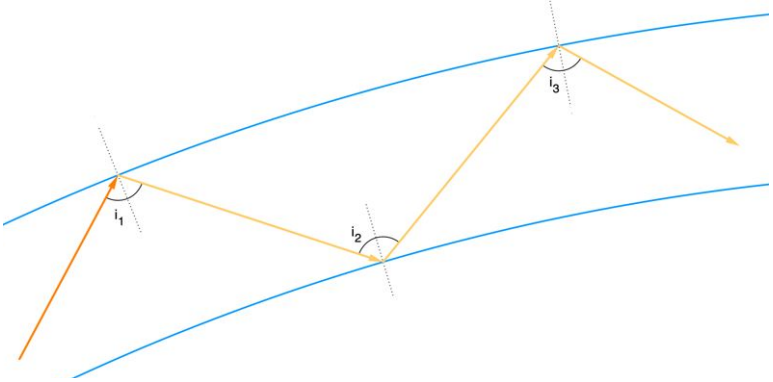
Tale valore limite dell'angolo può essere calcolato a partire dalla legge di Snell: tenendo presente che per un angolo di incidenza pari a θ_L, l'angolo rifratto θ_{r_2} è 90° e che $\sin sin\ 90° = 1$, allora:

$$n_1 \sin sin\ \theta_L = n_2 \cdot 1 \rightarrow \theta_L = \arcsin arcsin \left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$

dove $\arcsin arcsin\ x$ (o x) è la funzione inversa del $\sin sin\ x$ ovvero la funzione che restituisce qual è l'angolo per il quale la funzione *seno* vale $\sin sin\ x$.

Dal punto di vista energetico, il raggio riflesso internamente trasporta la stessa energia del raggio incidente in quanto l'energia di quest'ultimo non deve essere suddivisa tra raggio riflesso e raggio rifratto, non essendoci quest'ultimo.

Questo fenomeno ha un riscontro pratico nella *fibra ottica*: questo oggetto è costituito da un materiale trasparente rivestito da un altro più opaco. La luce viene fatta entrare con un angolo di incidenza maggiore di quello limite: ciò comporta una riflessione interna totale da parte della luce all'interno



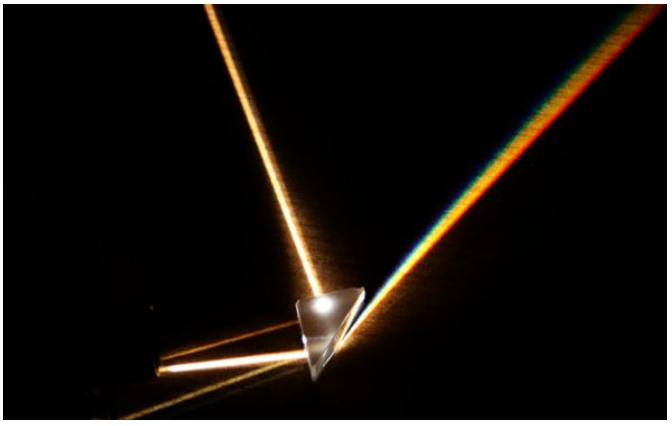
della fibra e quindi di una serie successiva di riflessioni interne totali, arrivando così fino all'altro capo della fibra.

Due sono le applicazioni delle fibre ottiche:

- vengono impiegate in strumenti come l'endoscopio per esplorare zone difficilmente osservabili come parti interne del corpo umano o pozzi, cisterne, condotte sfruttando la veicolazione della luce da una parte all'altra dello strumento;
- vengono utilizzate nel settore delle telecomunicazioni in quanto consentono di trasmettere dati ad una velocità molto maggiore rispetto ai tradizionali cavi coassiali telefonici. Infatti le fibre ottiche attenuano molto poco il segnale (in quanto trasportano la stessa energia del raggio incidente) senza bisogno di dover amplificarlo in lettura una volta raggiunto l'altro estremo.

La dispersione:

La luce, in quanto onda, è costituita da diverse lunghezze d'onda: ma il colore bianco che lunghezza d'onda ha, dal momento che nei colori dell'arcobaleno non è presente?



La luce bianca è costituita dalla sovrapposizione di tutti i colori: quando infatti si invia un fascio di luce bianca verso un prisma questo lo decompone nei suoi costituenti ovvero i 7 colori visibili nell'arcobaleno.

Questo fenomeno prende il nome di **dispersione cromatica** e fu studiato da Newton il quale diede il nome di *spettro* alla distribuzione dei colori.

La spiegazione risiede nel fatto che il prisma ha un indice di rifrazione che dipende dalla lunghezza d'onda della luce che incide: di conseguenza per la legge di Snell ciascuno dei componenti della luce bianca (cioè ciascuno dei colori) viene rifratto ad un angolo diverso da quello degli altri colori e perciò viene separato dagli altri.

Il colore rosso è quello che viene rifratto meno rispetto agli altri colori e perciò è molto più vicino alla normale di quanto non sia il colore blu che invece viene molto rifratto.



Il fenomeno della dispersione cromatica è ben visibile negli ***arcobaleni***: ogni goccia di acqua in sospensione nell'atmosfera si comporta come un prisma, scomponendo la luce bianca che proviene dal Sole.

Il raggio incidente subisce una rifrazione entrando all'interno della goccia e le sue componenti cromatiche vengono disperse.

Queste quindi incidono nella superficie interna della goccia con un angolo maggiore dell'angolo limite e di conseguenza vengono riflesse totalmente per poi uscire nuovamente nell'aria.

Il miraggio:

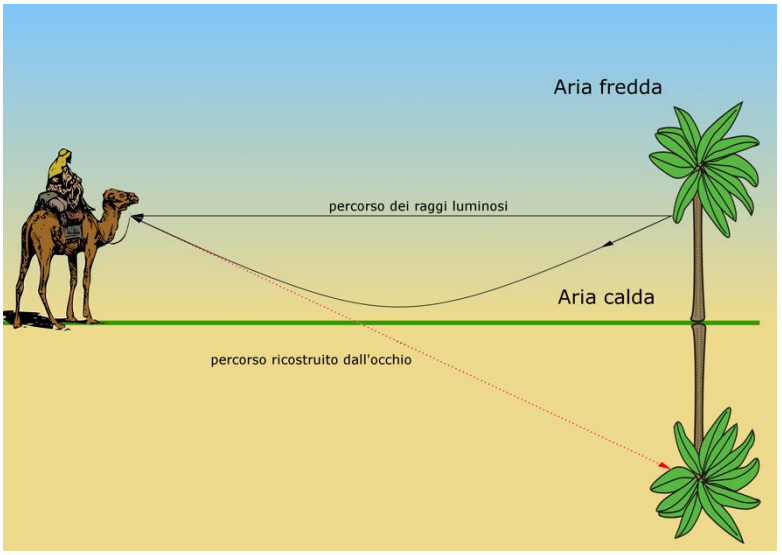
Un fenomeno interessante da analizzare con le leggi dell'ottica è il *miraggio*: quando fa molto caldo, il suolo si scalda notevolmente e l'aria immediatamente sopra ad esso diventa anch'essa molto calda e di conseguenza meno densa. Lo strato sovrastante poi sarà meno caldo, quindi l'aria più densa, e così via.

Si formano quindi degli strati di aria tali per cui, andando verso l'alto, diminuisce la temperatura ed aumenta la densità.

Ma essendo l'indice di rifrazione legato alla densità, gli strati sono via via sempre più rinfrangenti: lo strato inferiore più caldo ha l'indice di rifrazione più basso ed è il meno rifrangente di tutti mentre quelli sovrastanti avranno un indice di rifrazione sempre più alto.

Quando osserviamo un qualsiasi oggetto lontano, i raggi luminosi che questo ci invia e che ci permettono di vederlo compiono un percorso parallelo al suolo giungendo direttamente a noi.

Ma possono esserci dei raggi che non viaggiano orizzontalmente ma che partono leggermente inclinati dall'oggetto: questi raggi viaggiano dall'alto verso il basso attraversando strati ad indice di rifrazione decrescente e perciò, a seguito della rifrazione, si allontaneranno sempre più dalla normale, fino ad essere riflessi totalmente. Il raggiò risulta così incurvato verso l'alto fino a giungere ai nostri occhi.



Di conseguenza, poiché l'occhio per ricostruire l'immagine prolunga in

direzione rettilinea il raggio luminoso fino ad identificare un punto che ne costituisce la sorgente, prolunga il raggio riflesso senza tener conto dell'effetto di deviazione come mostrato in figura.

L'immagine sembrerà così provenire dal suolo e si avrà l'impressione che ci sia uno specchio d'acqua.