



FISICA II

Lez. 13 – La natura della luce e
le leggi dell'ottica geometrica

Prof. Giovanni Mettivier



Prof. Giovanni Mettivier, PhD

Dipartimento Scienze Fisiche

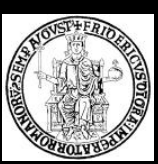
Università di Napoli "Federico II"

Compl. Univ. Monte S. Angelo

Via Cintia, I-80126, Napoli

mettivier@na.infn.it

+39-081-676137



Prima dell'inizio del XIX secolo si riteneva che la luce fosse costituita da un fascio di particelle emesse dall'oggetto che si stava osservando oppure emesse dagli occhi dell'osservatore. Nel 1678, il fisico ed astronomo olandese Christian Huygens mostrò che anche un modello ondulatorio della luce poteva spiegarne la riflessione e la rifrazione.

La prima chiara dimostrazione sperimentale della natura ondulatoria della luce fu fornita nel 1801 da Thomas Young, il quale mostrò che, sotto opportune condizioni, i raggi di luce interferiscono tra loro come onde secondo il modello che ne descrive l'interferenza.

Il più importante sviluppo fu il lavoro di Maxwell, che nel 1873 affermò che la luce era una forma di onda elettromagnetica di alta frequenza.



Photo Researchers, Inc.

Christian Huygens
Fisico e astronomo olandese
(1629–1695)

Huygens è noto principalmente per i suoi contributi nei campi dell'ottica e della dinamica. Secondo lui, la luce era un tipo di moto di vibrazione che si propagava e che produceva la sensazione luminosa quando raggiungeva l'occhio. Sulla base di questa teoria, dedusse le leggi della riflessione e della rifrazione e spiegò il fenomeno della doppia rifrazione.



Il modello ondulatorio e la teoria classica dell'elettricità e del magnetismo non poterono fornire un'interpretazione dell'effetto fotoelettrico.

Una spiegazione di questo effetto fu proposta da Einstein nel 1905 sulla base del concetto di quantizzazione introdotto nel 1900 da Max Planck. Il modello di quantizzazione ipotizza che l'energia di un'onda luminosa è distribuita in particelle chiamate *fotoni*; quindi l'energia si dice quantizzata. Seguendo la teoria di Einstein, l'energia di un fotone è proporzionale alla frequenza dell'onda elettromagnetica:

$$E = hf$$

dove la costante di proporzionalità $h=6.63 \times 10^{-34} \text{Js}$ è la *costante di Planck*.

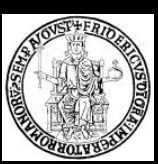


Photo Researchers, Inc.

Christian Huygens

Fisico e astronomo olandese
(1629–1695)

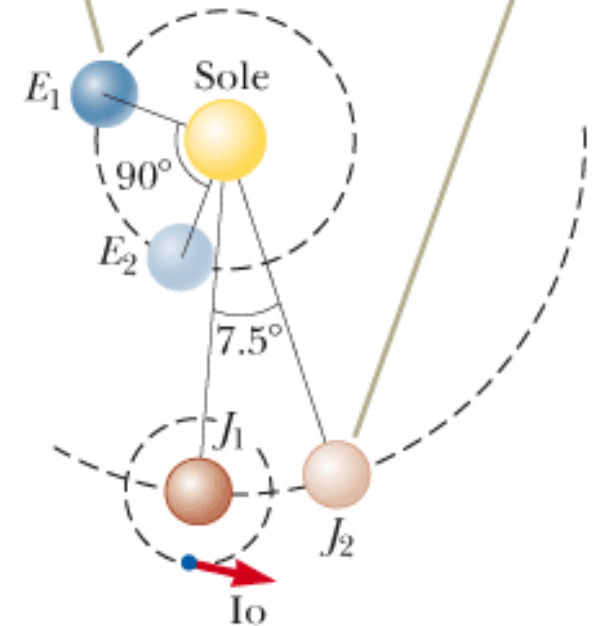
Huygens è noto principalmente per i suoi contributi nei campi dell'ottica e della dinamica. Secondo lui, la luce era un tipo di moto di vibrazione che si propagava e che produceva la sensazione luminosa quando raggiungeva l'occhio. Sulla base di questa teoria, dedusse le leggi della riflessione e della rifrazione e spiegò il fenomeno della doppia rifrazione.

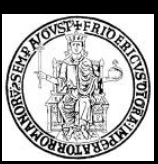


Nel 1675, l'astronomo danese Ole Roemer ottenne una prima stima realistica della velocità della luce. La sua tecnica si basava sulle osservazioni astronomiche di una delle lune di Giove, Io, che ha un periodo di rivoluzione intorno a Giove di circa 42.5 h.

Usando il moto orbitale di Io come un orologio, ci si aspettava che la sua orbita avesse un periodo costante. Tuttavia, Roemer, raccogliendo dati per più di un anno, osservò una variazione sistematica del periodo di Io. Egli trovò che i periodi erano più lunghi della media quando la Terra si allontanava da Giove. Roemer attribuì questa variazione di periodo al fatto che la distanza tra la Terra e Giove fosse diversa da un'osservazione all'altra.

Nell'intervallo di tempo in cui la Terra percorre un arco di 90° nel suo moto intorno al Sole (tre mesi), Giove ne percorre uno di soli 7.5° .

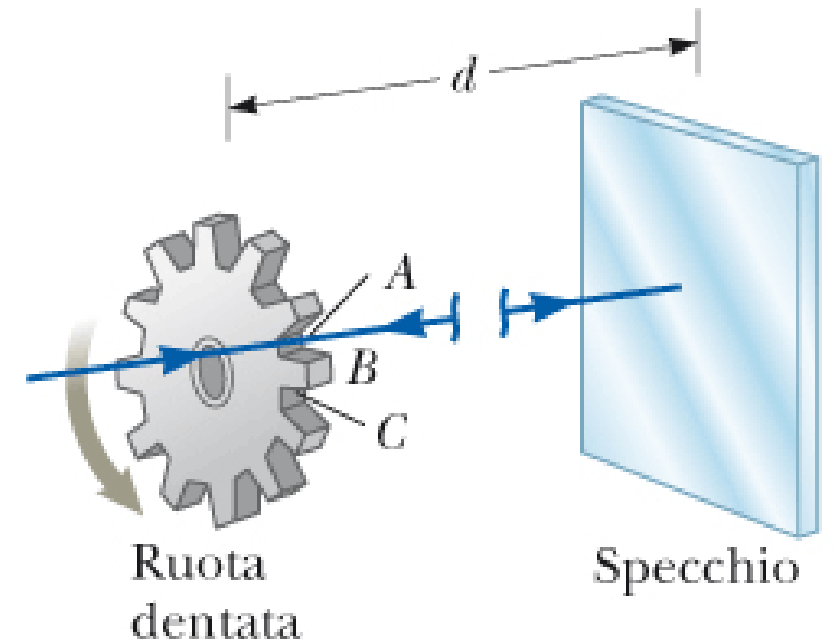




La procedura consiste nel misurare il tempo totale impiegato dalla luce per andare da un certo punto ad uno specchio lontano e tornare nel punto di partenza. Se d è la distanza tra la sorgente di luce (che si considera sulla ruota) e lo specchio e se Δt è l'intervallo di tempo per andata e ritorno, la velocità della luce è $c=2d/\Delta t$.

Per misurare l'intervallo di tempo totale, Fizeau usò una ruota dentata in rotazione, che trasforma un fascio continuo di luce in una serie di impulsi luminosi.

Conoscendo la distanza d , il numero di denti della ruota e la velocità angolare della ruota e la velocità angolare della ruota, Fizeau giunse a misurare un valore di 3.1×10^8 m/s.

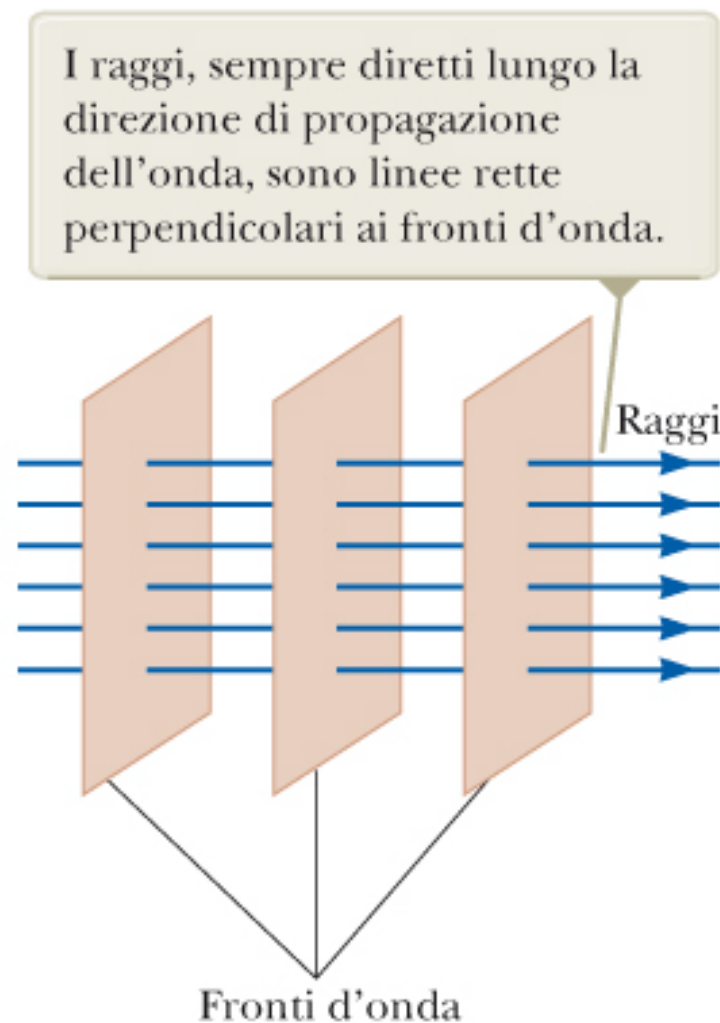


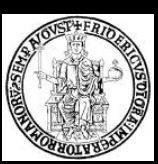


L'**ottica geometrica** studia la propagazione delle onde luminose assumendo che la luce che viaggia in un mezzo omogeneo si propaghi in linea retta e che cambi direzione quando incontra la superficie di un mezzo differente oppure quando le proprietà ottiche del mezzo non sono uniformi nello spazio o nel tempo.

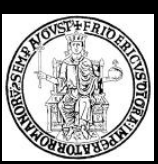
Approssimazione dei raggi

Nell'approssimazione dei raggi si fa l'ipotesi che un'onda che attraversa un mezzo si propaghi in linea retta lungo i suoi raggi.





- Mostrare attraverso un disegno la riflessione che subisce un raggio di luce che incide sull'interfaccia di separazione tra due mezzi materiali diversi, individuando il raggio incidente, quello riflesso, l'asse normale alla superficie di separazione, l'angolo d'incidenza e quello di riflessione.
- Mettere in relazione l'angolo di incidenza con quello di riflessione.
- Mostrare attraverso un disegno la rifrazione che subisce un raggio di luce che incide sull'interfaccia di separazione tra due mezzi materiali diversi, individuando il raggio incidente, quello rifratto, l'asse normale alla superficie di separazione, l'angolo d'incidenza e quello di rifrazione.
- Applicare, in relazione al fenomeno di rifrazione della luce, la legge di Snell che lega l'indice di rifrazione e l'angolo di incidenza su una faccia con le analoghe quantità sull'altra faccia.
- Indicare, tracciando una retta su un disegno che prolunghi il raggio incidente, la rifrazione della luce quando passa da un materiale a un altro con indice di rifrazione maggiore, minore o uguale, descrivendo il fenomeno del raggio che si avvicina alla normale, se ne allontana o non subisce deflessione.
- Capire che la rifrazione si manifesta solo all'interfaccia di separazione tra due materiali diversi e non entro materiali omogenei.
- Spiegare la dispersione cromatica.
- Descrivere come si forma l'arcobaleno primario e secondario e spiegare perché si tratta di archi di circonferenza.



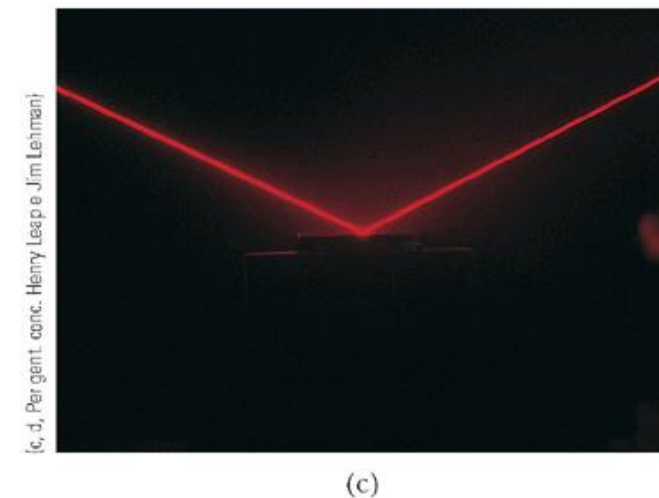
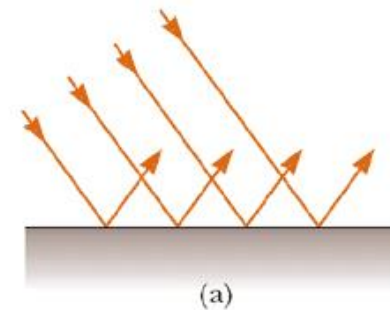
Nel nostro studio dell'**ottica**, useremo un modello semplificato chiamato **modello a raggi luminosi** oppure **approssimazione dei raggi luminosi** (o **approssimazione geometrica**) .

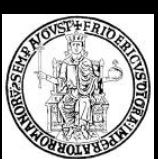
Un raggio è una linea retta tracciata lungo la direzione di propagazione.

L'approssimazione dei raggi luminosi coinvolge modelli geometrici basati su queste linee rette.

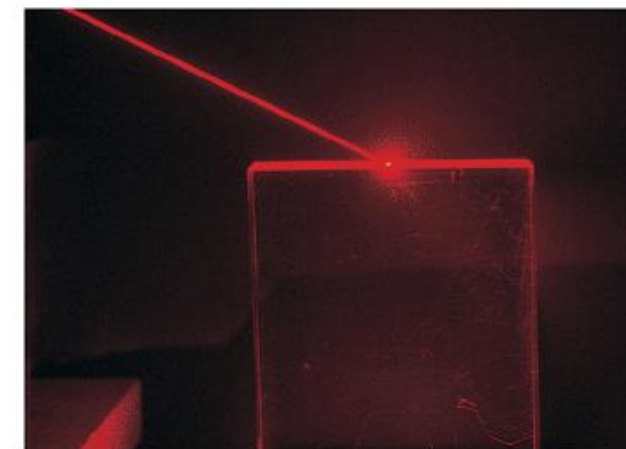
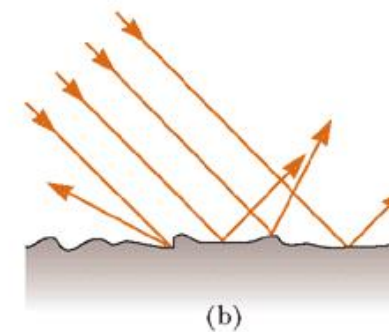


La fig. mostra dei raggi luminosi di un fascio di luce incidenti su una superficie. A meno che la superficie sia perfettamente assorbente, una certa parte della luce è riflessa dalla superficie. Se la superficie è molto liscia, i raggi riflessi saranno paralleli come è indicato in fig. La riflessione della luce da una superficie liscia è chiamata **riflessione speculare**.





D'altro canto se la superficie riflettente è ruvida, la superficie rifletterà i raggi in varie direzioni. La riflessione di qualsiasi superficie ruvida è nota come **riflessione diffusa**.

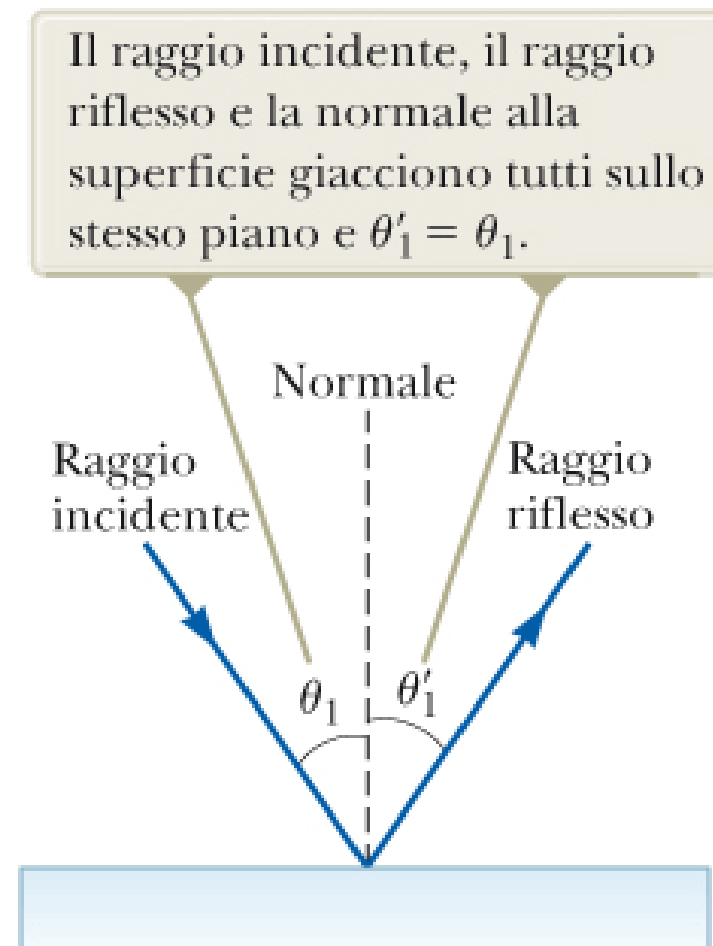


(d)



Consideriamo un raggio luminoso che viaggia in aria ed incide con un certo angolo su una superficie piana e liscia, come in fig. I raggi incidente e riflesso formano angoli θ_1 e θ'_1 , rispettivamente, rispetto a una linea tracciata perpendicolarmente alla superficie nel punto dove il raggio incidente colpisce la superficie. Gli esperimenti mostrano che **l'angolo di riflessione è uguale all'angolo di incidenza (Legge della riflessione)**:

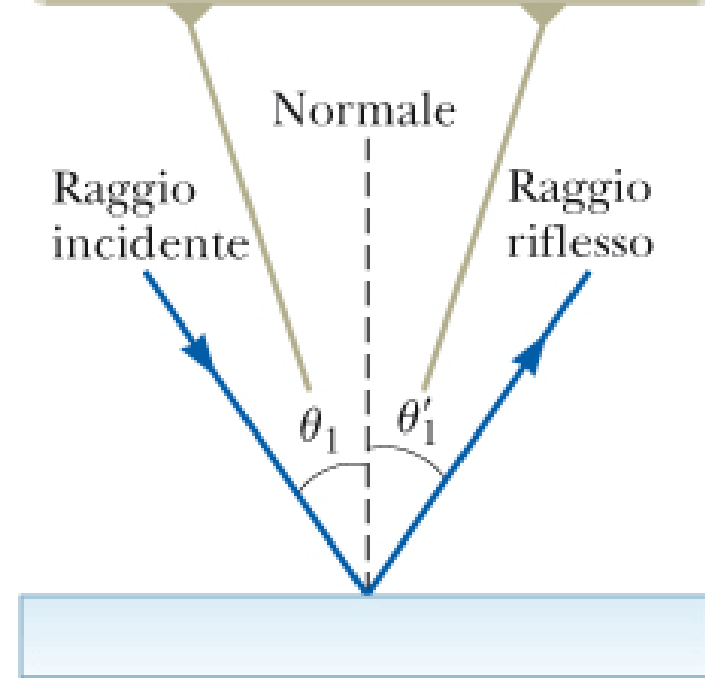
$$\theta'_1 = \theta_1$$





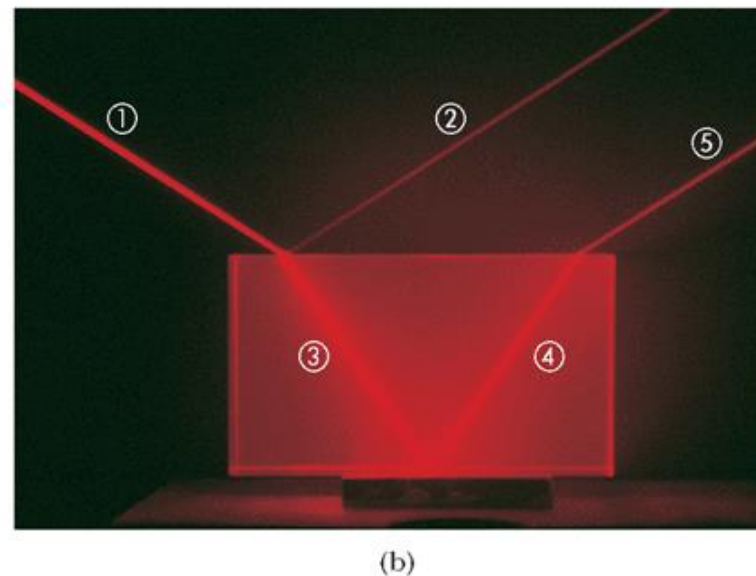
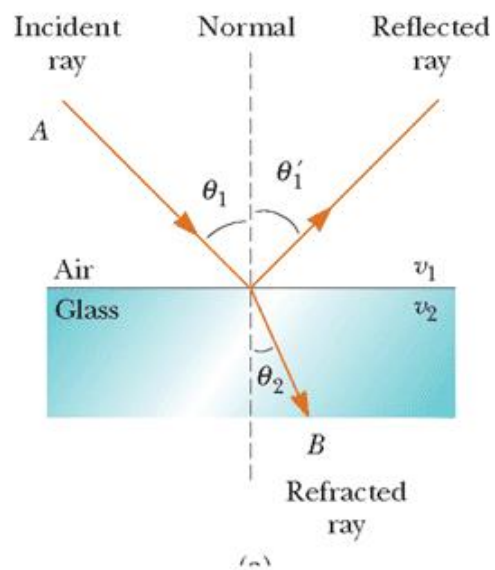
Il cammino di un raggio di luce è reversibile. Per esempio, il raggio in figura viaggia dalla sinistra in alto, si riflette sullo specchio e poi va verso un punto in alto a destra. Se il raggio partisse dallo stesso punto in alto a destra, seguirebbe lo stesso percorso per raggiungere lo stesso punto in alto a sinistra.

Il raggio incidente, il raggio riflesso e la normale alla superficie giacciono tutti sullo stesso piano e $\theta'_1 = \theta_1$.





Quando un raggio di luce che viaggia in un mezzo trasparente incide obliquamente su una superficie di separazione con un altro mezzo trasparente, parte del raggio è riflessa ma parte è trasmessa nel secondo mezzo. Il raggio luminoso che entra nel secondo mezzo subisce una variazione di direzione sul confine dei due mezzi e si dice che è **rifratto**.

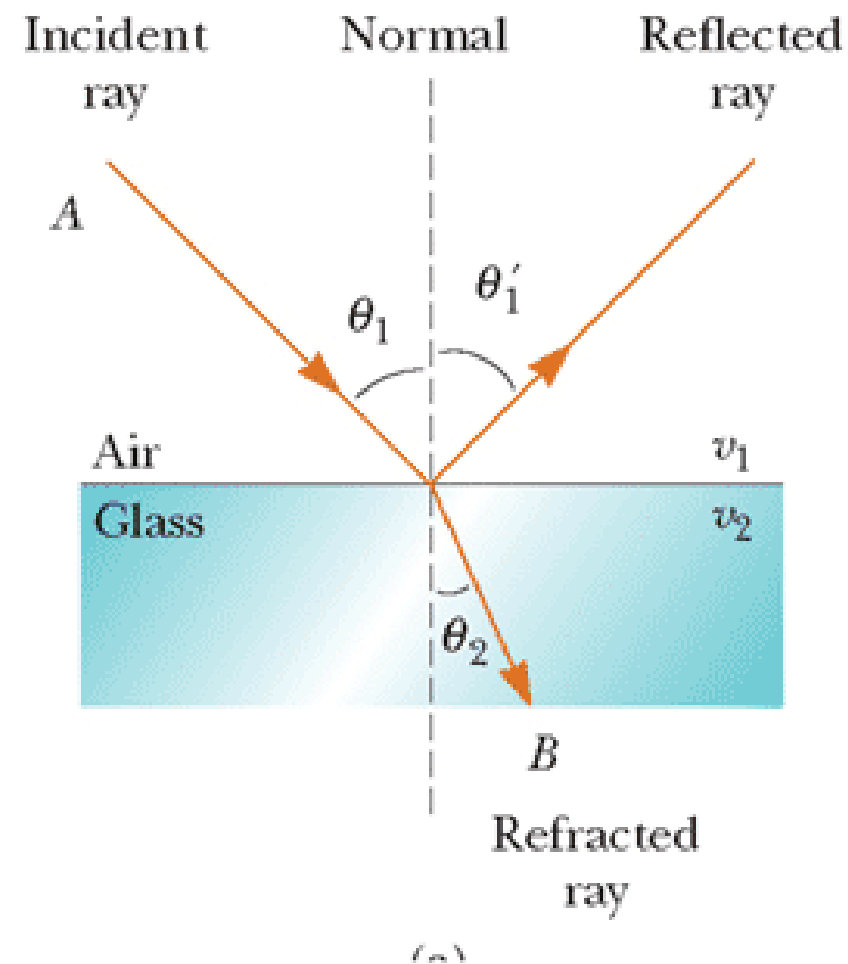




Il raggio incidente, il raggio riflesso ed il raggio rifratto giacciono sullo stesso piano. L'**angolo di rifrazione** θ_2 dipende dalle proprietà dei due mezzi e dall'angolo di incidenza secondo la relazione

$$\frac{\sin\theta_2}{\sin\theta_1} = \frac{v_2}{v_1} = \text{costante}$$

dove v_1 è la velocità nel mezzo 1 e v_2 è la velocità nel mezzo 2.

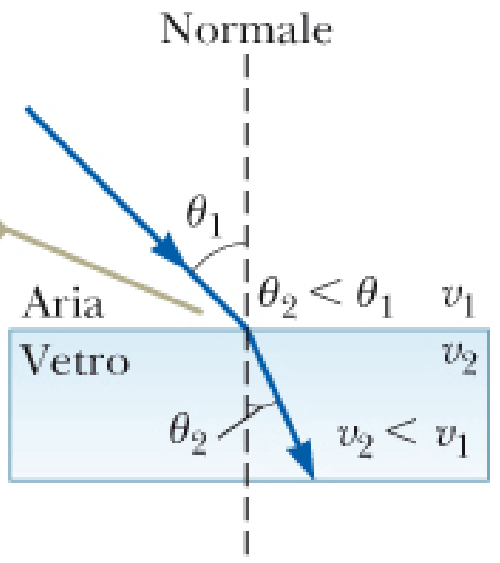




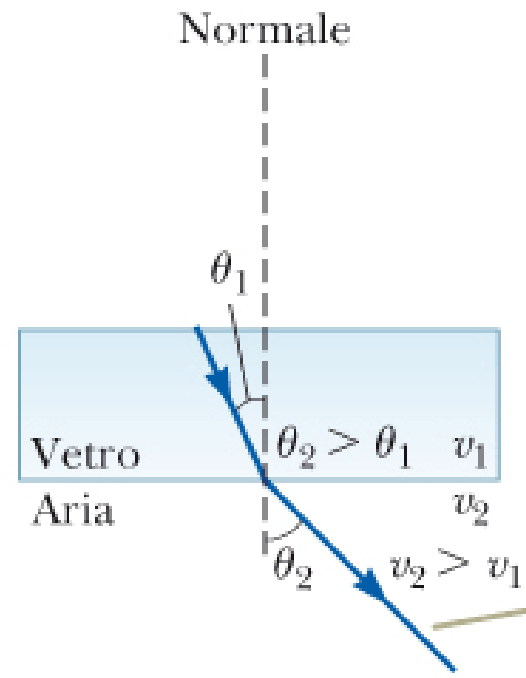
La traiettoria di un raggio luminoso attraverso una superficie rifrangente è reversibile, come nel caso della riflessione.

L'eq. $\frac{\sin\theta_2}{\sin\theta_1} = \frac{v_2}{v_1}$ mostra che quando la luce passa da un materiale in cui la sua velocità è maggiore a un materiale in cui la sua velocità è minore. Il raggio rifratto quindi si avvicina alla normale.

Quando il fascio luminoso proviene dall'aria ed entra nel vetro, la luce rallenta e il suo cammino si avvicina alla normale.



Quando il fascio luminoso proviene dal vetro ed entra in aria, la luce accelera e il suo cammino si allontana dalla normale.





E' conveniente definire l'indice di rifrazione n di un mezzo come il rapporto

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

Siamo ora in grado di esprimere la legge di Snell in una forma alternativa.

$$n_1 \operatorname{sen}\theta_1 = n_2 \operatorname{sen}\theta_2$$

Questa equazione è nota come **legge della rifrazione** o **legge di Snell**.



L'indice di rifrazione di qualsiasi mezzo può essere espresso come il rapporto

$$n = \frac{\lambda_0}{\lambda_n}$$

dove λ_0 è la lunghezza d'onda della luce nel vuoto e λ_n è la lunghezza d'onda nel mezzo il cui indice di rifrazione è n .



Mezzo	Indice	Mezzo	Indice
Vuoto	1 esatto	Vetro comune crown	1,52
Aria (condizioni standard)	1,00029	Cloruro di sodio	1,54
Acqua (20 C)	1,33	Polistirene	1,55
Acetone	1,36	Bisolfuro di carbonio	1,63
Etanolo	1,36	Vetro flint pesante	1,65
Soluzione di glucosio (30%)	1,38	Zaffiro	1,77
Quarzo fuso	1,46	Vetro flint pesantissimo	1,89
Soluzione di glucosio (80%)	1,49	Diamante	2,42



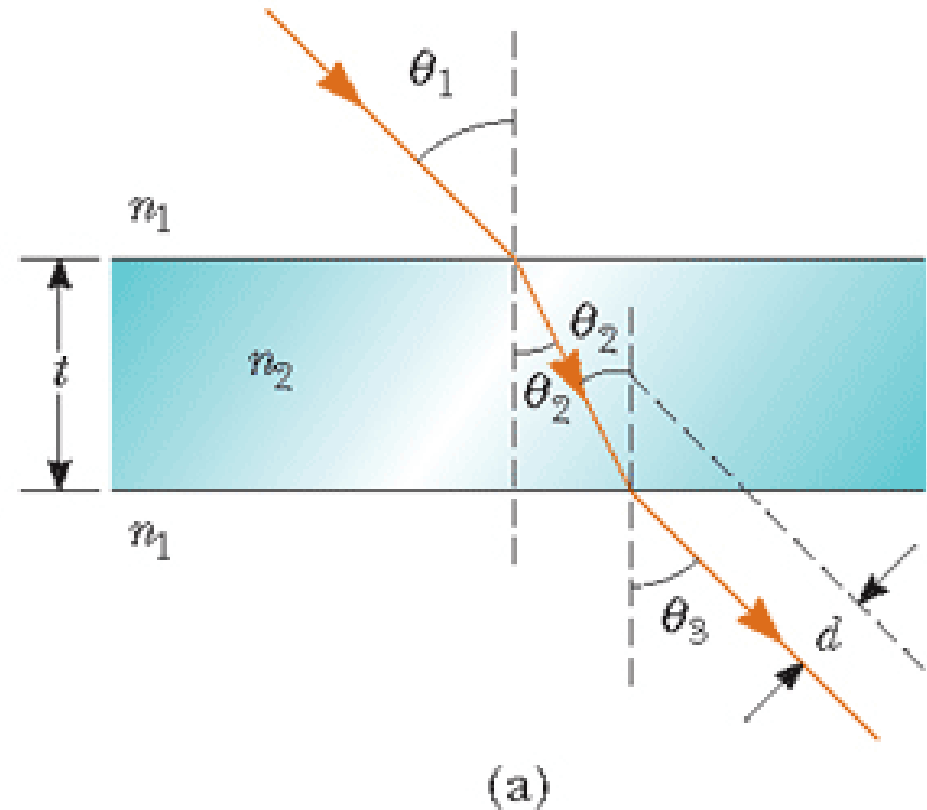
Un fascio di luce passa dal mezzo 1 al mezzo 2 attraverso una spessa lastra di materiale il cui indice di rifrazione è n_2 .

a) Mostrare che il fascio emergente è parallelo al fascio incidente.

$$\text{sen}\theta_2 = \frac{n_1}{n_2} \text{sen}\theta_1$$

$$\text{sen}\theta_3 = \frac{n_2}{n_1} \text{sen}\theta_2$$

$$\text{sen}\theta_3 = \frac{n_2}{n_1} \left(\frac{n_1}{n_2} \text{sen}\theta_1 \right) = \text{sen}\theta_1$$

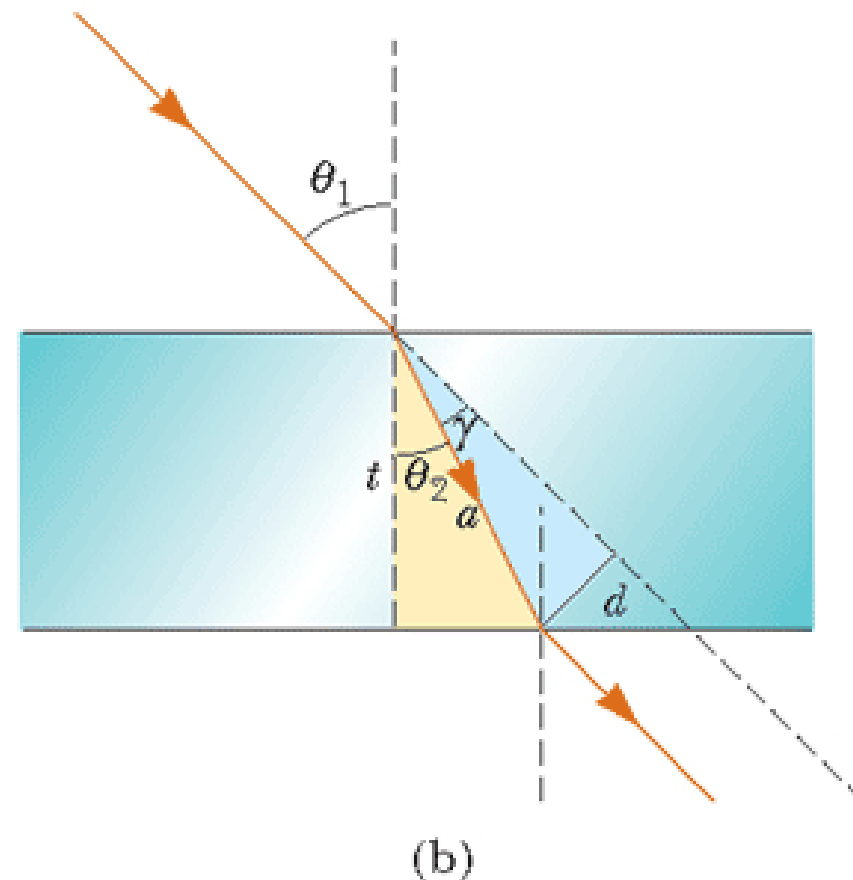




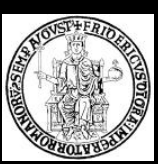
b) Cosa accade se viene raddoppiato lo spessore t della lastra? Si raddoppia anche lo spostamento laterale d ?

$$a = \frac{t}{\cos \theta_2}$$

$$d = a \sin \gamma = a \sin(\theta_1 - \theta_2) = \frac{t}{\cos \theta_2} \sin(\theta_1 - \theta_2)$$



Esempio

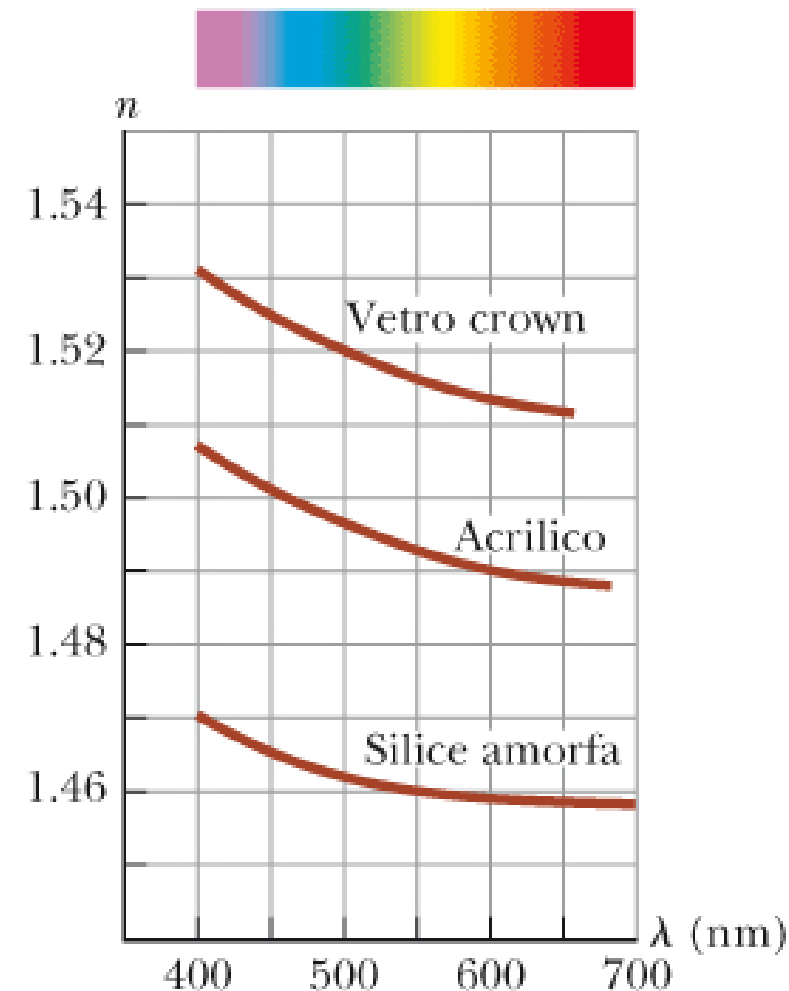


L'indice di rifrazione n in qualsiasi mezzo, eccetto il vuoto, dipende dalla lunghezza d'onda della luce. Quindi, quando un raggio di luce è formato da componenti con lunghezze d'onda differenti, la rifrazione del raggio alla superficie ne separa le componenti così che esse assumono direzioni diverse. Questo effetto si chiama **dispersione cromatica**; il termine «cromatico» si riferisce ai colori associati a ogni lunghezza d'onda, e «dispersione» si riferisce alla separazione delle lunghezze d'onda o dei colori.



Una proprietà importante della rifrazione n è che, per un dato materiale, dipende dalla lunghezza d'onda della luce che si propaga nel materiale. Questo comportamento è chiamato **dispersione**. Poiché n è una funzione della lunghezza d'onda, la legge della rifrazione di Snell indica che i raggi di luce di lunghezza d'onda differente, quando incidono su un materiale, vengono deviati di angoli differenti.

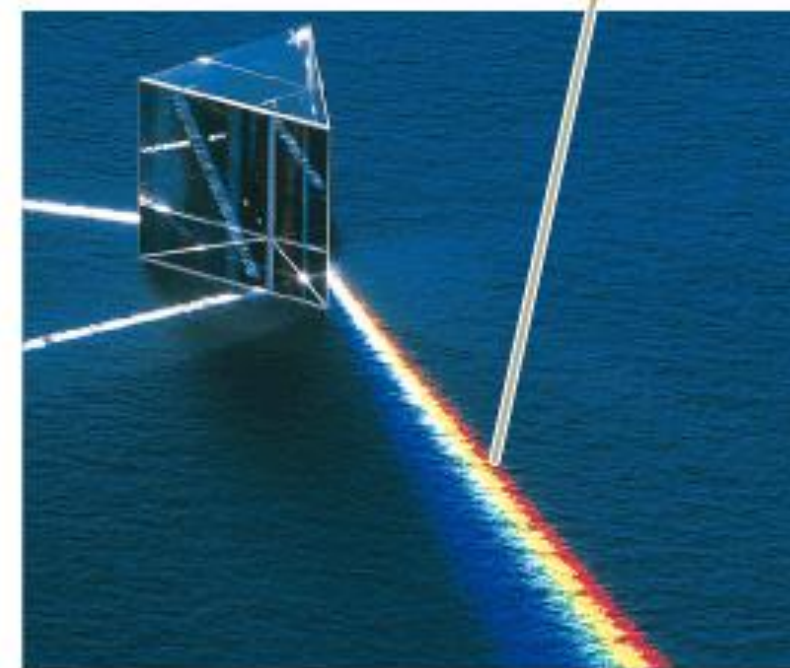
In generale, come si vede nella figura, l'indice di rifrazione diminuisce all'aumentare della lunghezza d'onda. Questo significa che, nel passare in un mezzo, la luce violetta viene deviata più della luce rossa.





Ora supponiamo che un fascio di *luce bianca* (la combinazione di tutte le lunghezze d'onda visibili) incida su un prisma. Chiaramente, l'angolo di deviazione d dipende dalla lunghezza d'onda. I raggi emergenti dal prisma si sparpagliano in una serie di colori chiamata **spettro visibile**. Questi colori, in ordine di lunghezza d'onda decrescente, sono il rosso, l'arancione, il giallo, il verde, il blu e il violetto.

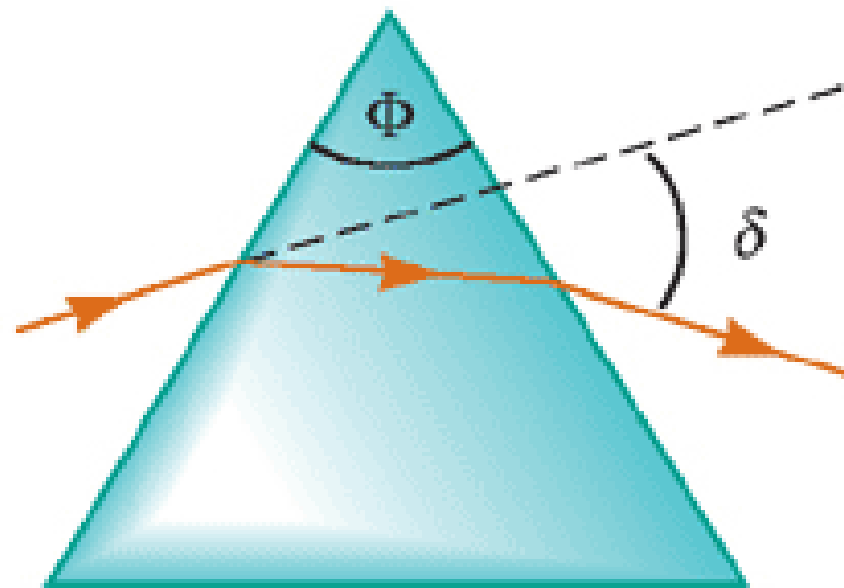
I colori nel fascio rifratto sono separati perché la dispersione nel prisma fa sì che i raggi di diversa lunghezza d'onda vengano rifratti secondo angoli diversi.





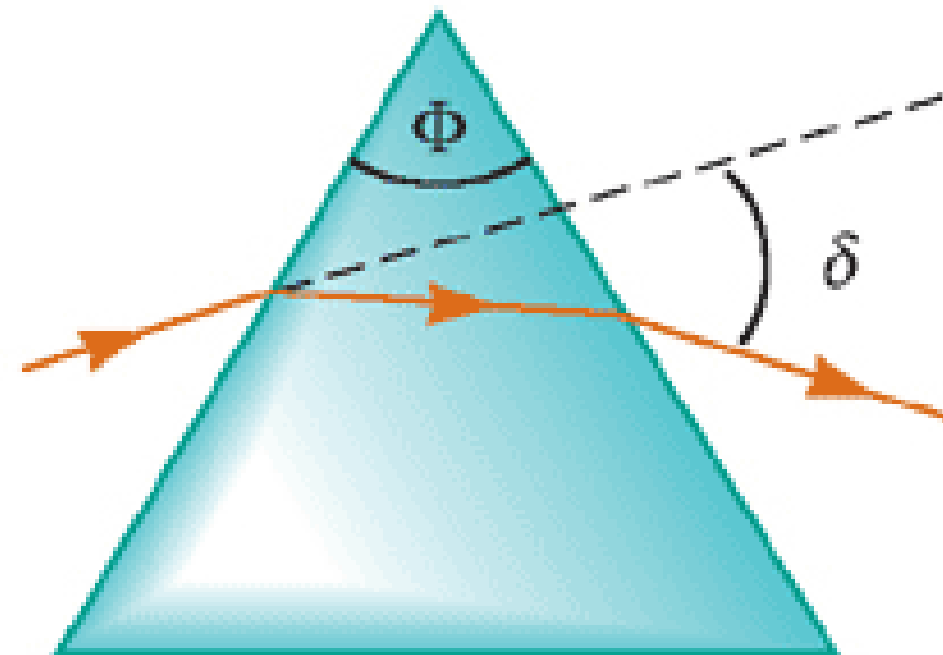
Troviamo che il valore dell'indice di rifrazione in un qualunque mezzo che non sia il vuoto dipende dalla lunghezza d'onda della luce. La dipendenza dell'indice di rifrazione dalla lunghezza d'onda, si chiama **dispersione**. Poiché n è una funzione della lunghezza d'onda, la legge di Snell indica che ***l'angolo di rifrazione quando la luce entra in un materiale dipende dalla lunghezza d'onda della luce.***

La luce viola ($\lambda \approx 400$ nm) viene rifratta di più della luce rossa ($\lambda \approx 650$ nm) quando passa dall'aria a un materiale



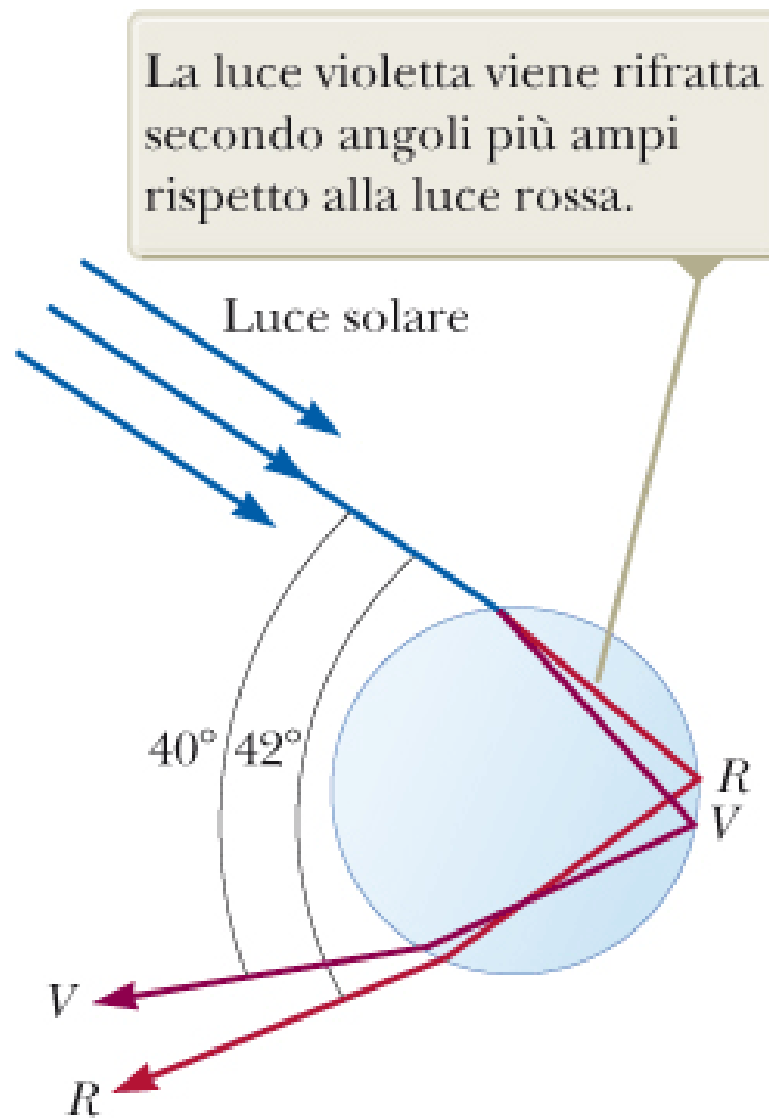


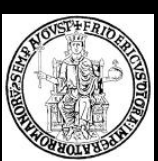
Per capire gli effetti della dispersione della luce, consideriamo ciò che accade quando la luce incontra un prisma. L'angolo al vertice, o **angolo di rifrangenza** Φ del prisma è definito come mostrato in fig. Un raggio di luce di una sola lunghezza d'onda che incide sul prisma da sinistra emerge deviato dalla sua originale direzione di un **angolo di deviazione** δ .





Dispersione



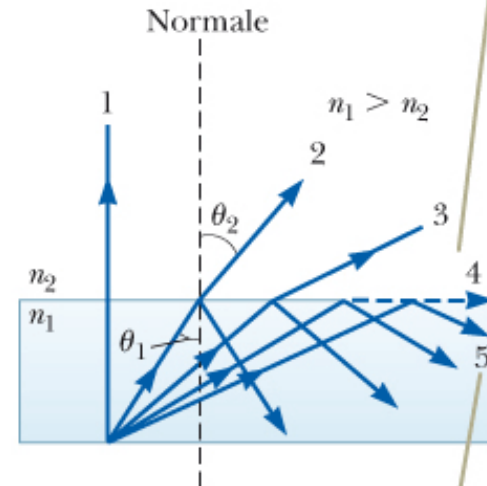


La **riflessione interna totale** può verificarsi quando la luce passa da un mezzo con un dato indice di rifrazione ad uno con un indice di rifrazione minore. Nella figura, si indicano da 1 a 5 le varie direzioni possibili del raggio. Il raggio di luce rifratto si propaga parallelamente alla superficie, cosicché $\theta_2=90^\circ$. Possiamo usare la legge della rifrazione di Snell per trovare l'angolo critico. Quando $\theta_1=\theta_c$, $\theta_2=90^\circ$ e l'eq. di Snell dà

$$n_1 \sin \theta_c = n_2 \sin 90^\circ = n_2$$

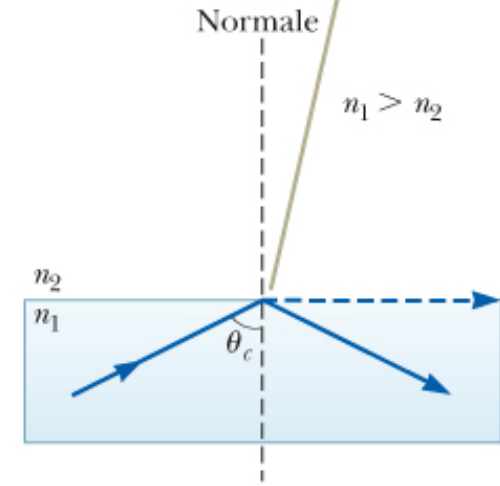
$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \quad (\text{per } n_1 > n_2)$$

All'aumentare dell'angolo di incidenza θ_1 , l'angolo di rifrazione θ_2 aumenta finché raggiunge il valore 90° (raggio 4). La linea tratteggiata indica che in realtà lungo questa direzione non si propaga energia.



Per angoli di incidenza ancora maggiori, si ha riflessione interna totale (raggio 5).

L'angolo di incidenza a cui corrisponde l'angolo di rifrazione di 90° è l'angolo critico θ_c . Per angoli maggiori di θ_c , tutta l'energia della luce incidente viene riflessa.

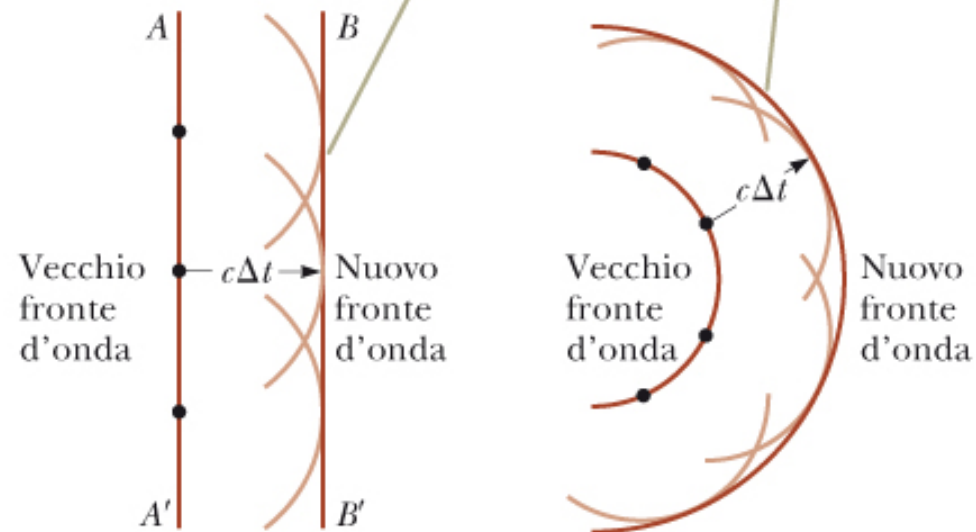


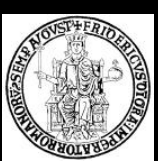


Il ***principio di Huygens*** è una costruzione geometrica che permette di determinare la posizione del fronte d'onda in un certo istante precedente:

Tutti i punti di un dato fronte d'onda possono essere considerati come sorgenti puntiformi di onde sferiche secondarie che si propagano nel mezzo circostante con la velocità caratteristica delle onde in quel mezzo. Dopo un certo intervallo di tempo, la nuova posizione del fronte d'onda è la superficie tangente alle onde secondarie.

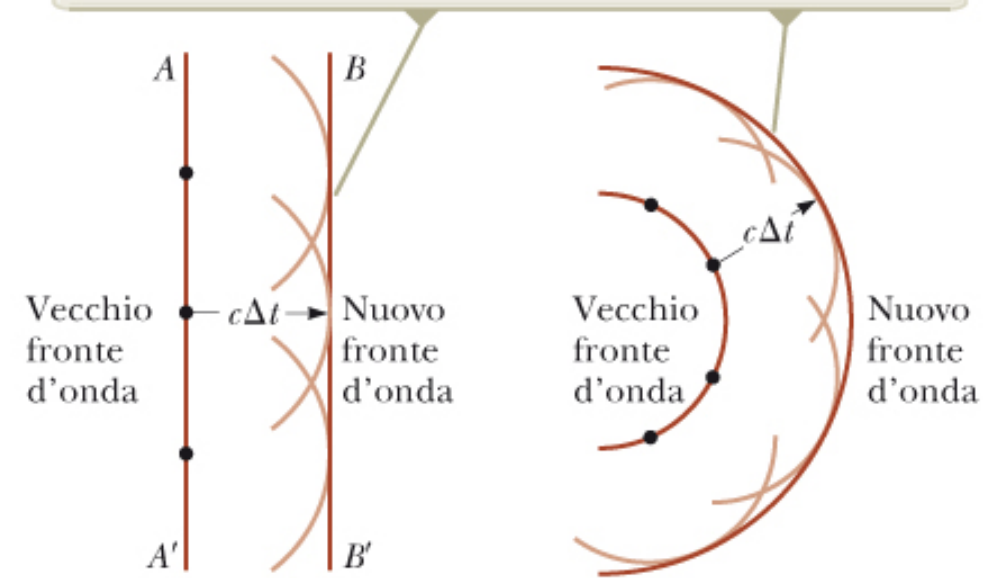
Il nuovo fronte d'onda è tracciato tangente alle onde sferiche secondarie che originano dai punti del fronte d'onda originario considerati come sorgenti puntiformi.

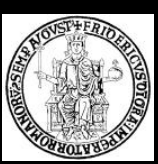




Si consideri, per prima cosa, un'onda piana che si propaga nel vuoto. All'istante $t=0$, il fronte d'onda è indicato dal piano AA' . Nella costruzione di Huygens, ciascun punto di questo fronte d'onda viene considerato una sorgente puntiforme. Utilizzando questi punti come sorgenti di onde secondarie, tracciamo degli archi di raggio $c\Delta t$, dove c è la velocità della luce nel vuoto e Δt è l'intervallo di tempo durante il quale l'onda si propaga. La superficie disegnata come tangente a queste onde secondarie è il piano BB' , che rappresenta il fronte d'onda in un istante di tempo successivo e che è parallelo ad AA' . In modo analogo, viene rappresentata la costruzione di Huygens per un'ora sferica.

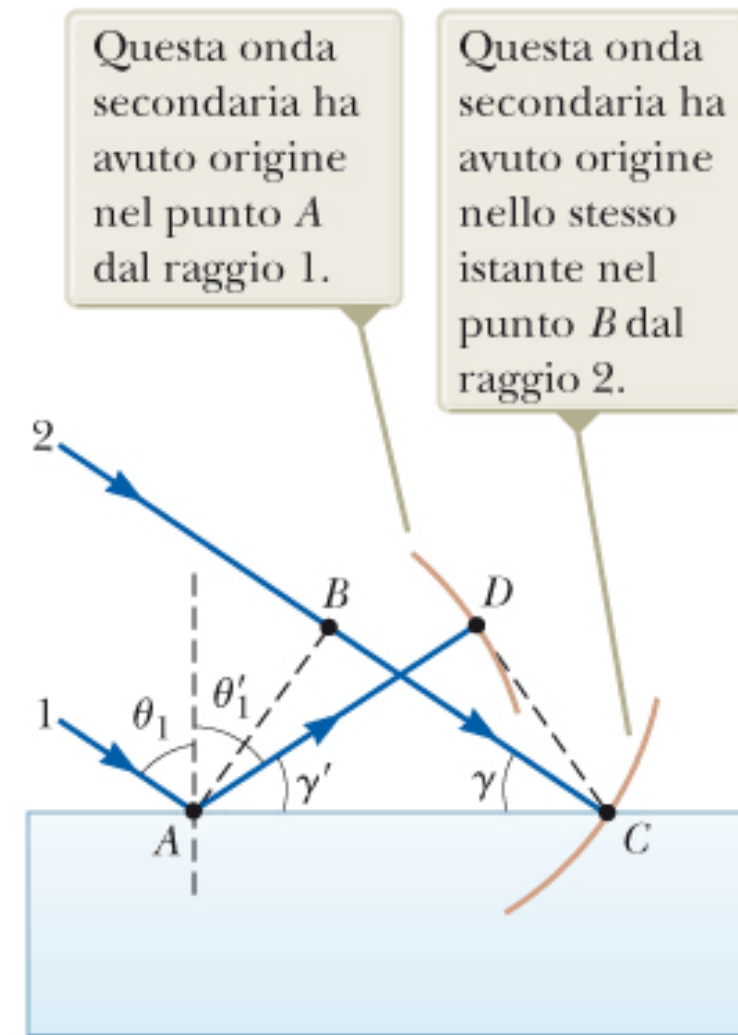
Il nuovo fronte d'onda è tracciato tangente alle onde sferiche secondarie che originano dai punti del fronte d'onda originario considerati come sorgenti puntiformi.

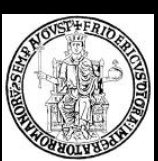




La linea AB rappresenta un fronte d'onda piano della luce incidente nel momento in cui il raggio 1 incide sulla superficie. In questo istante, l'onda in A origina un'onda di Huygens secondaria (il cui fronte d'onda in un istante successivo è rappresentato dall'arco marrone chiaro che passa per il punto D); l'onda riflessa forma un angolo γ' con la superficie. Nello stesso tempo, l'onda in B origina un'onda di Huygens secondaria (l'arco marrone chiaro che passa per il punto C) che incide sulla superficie con un angolo γ . La figura mostra le onde secondarie dopo un intervallo di tempo Δt , quando il raggio 2 colpisce la superficie. Dato che i raggi 1 e 2 si propagano con la stessa velocità, deve essere $AD=BC=c\Delta t$.

Il resto della dimostrazione dipende dalla geometria.





Si noti che i due triangoli rettangoli ABC e ADC sono simili, poiché hanno la stessa ipotenusa AC e poiché $AD=BC$. Dalla figura si ha

$$\cos \gamma = \frac{BC}{AC} \quad e \quad \cos \gamma' = \frac{AD}{AC}$$

dove $\gamma = 90^\circ - \theta_1$ e $\gamma' = 90^\circ - \theta_1'$. Poiché $AD=BC$,

$$\cos \gamma = \cos \gamma'$$

Perciò

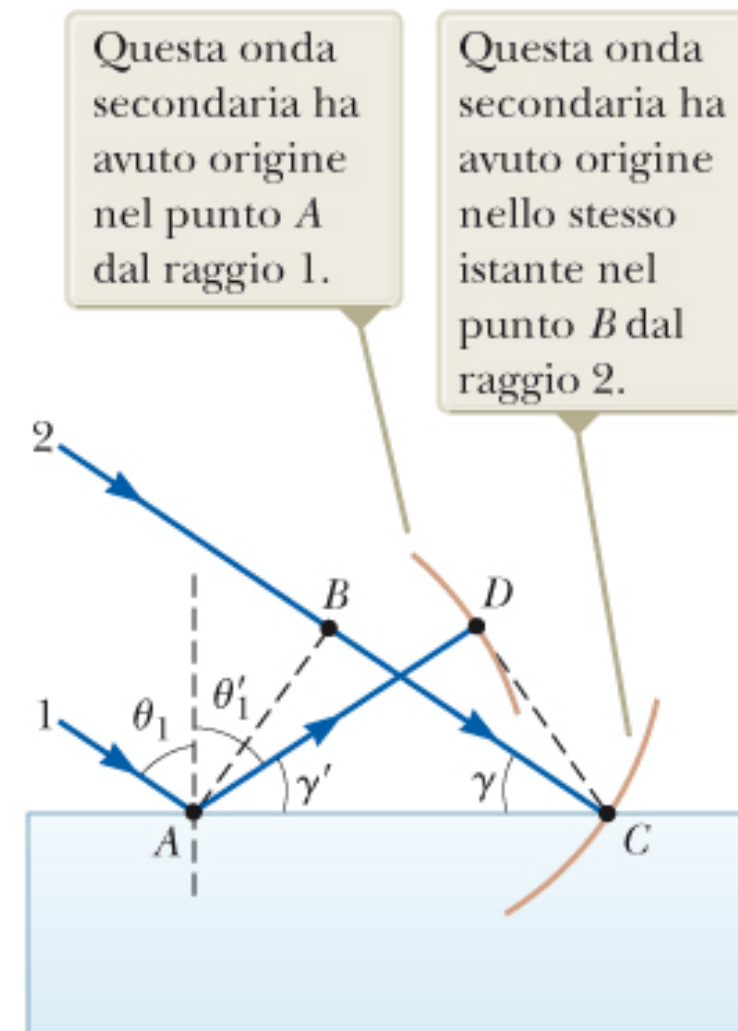
$$\gamma = \gamma'$$

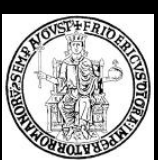
$$90^\circ - \theta_1 = 90^\circ - \theta_1'$$

e

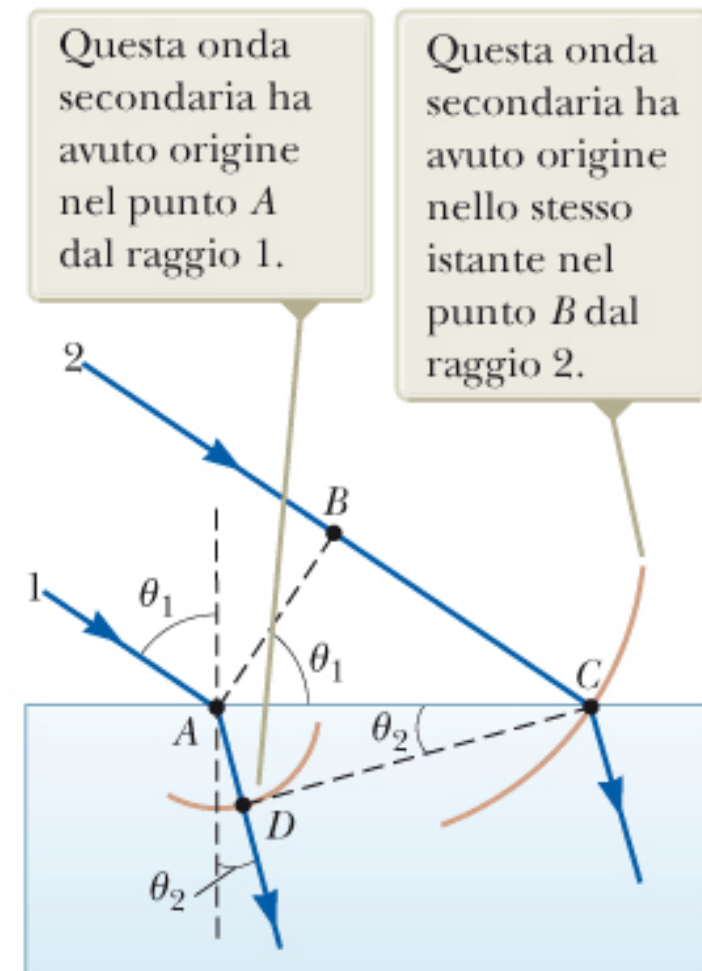
$$\theta_1 = \theta_1'$$

che è la legge della riflessione.





Usiamo ora il principio di Huygens e la figura per derivare la legge della rifrazione di Snell. Focalizziamo la nostra attenzione all'istante nel quale il raggio 1 incide sulla superficie e all'intervallo di tempo successivo, impiegato dal raggio 2 a raggiungere la superficie. Durante questo intervallo di tempo, l'onda in A origina un'onda di Huygens secondaria (l'arco rosso che passa per D) e la luce si rifrange nel materiale formando un angolo θ_2 con la normale alla superficie. Nello stesso intervallo di tempo, l'onda in B origina un'onda di Huygens secondaria (l'arco rosso che passa per C) e continua a propagarsi nella stessa direzione. Dato che queste due onde secondarie viaggiano in mezzi diversi, i loro cammini sono differenti. Il cammino dell'onda secondaria originaria in A è $AD=v_2\Delta t$ dove v_2 è la velocità dell'onda nel secondo mezzo. Il cammino dell'onda secondaria originaria in B è $BC=v_1\Delta t$, dove v_1 è la velocità dell'onda nel mezzo iniziale.





Dai triangoli ABC e ADC , otteniamo che

$$\sin \theta_1 = \frac{BC}{AC} = \frac{v_1 \Delta t}{AC} \quad \text{e} \quad \sin \theta_2 = \frac{AD}{AC} = \frac{v_2 \Delta t}{AC}$$

Se dividiamo queste due equazioni membro a membro, otteniamo

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

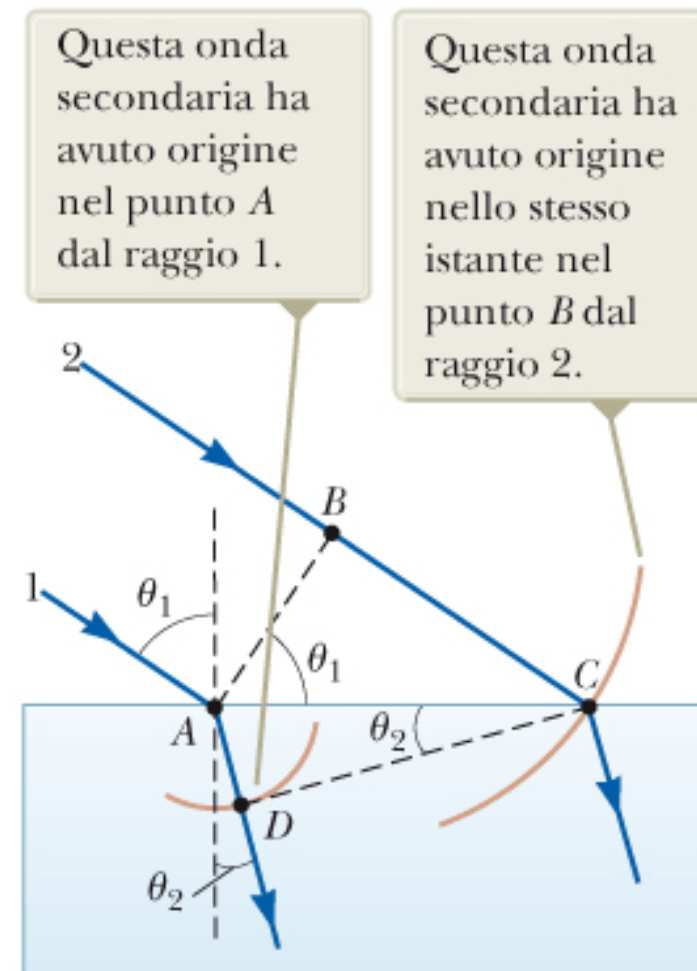
Ma sappiamo che $v_1 = c/n_1$ e $v_2 = c/n_2$. Perciò,

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{c/n_1}{c/n_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

e

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

che è la legge di rifrazione di Snell.





- L'ottica geometrica è una trattazione approssimativa dei fenomeni in cui le onde di luce sono rappresentate come raggi.
- Quando un raggio di luce incide su una superficie di separazione di mezzi materiali trasparenti, normalmente appaiono un raggio riflesso e uno rifratto. Entrambi giacciono su un piano assieme al raggio di incidenza. L'angolo di riflessione è uguale a quello di incidenza, mentre, posti n_1 ed n_2 gli indici di rifrazione dei due mezzi, rispettivamente di incidenza e di rifrazione, l'angolo di rifrazione è legato a quello d'incidenza dalla legge di Snell:

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