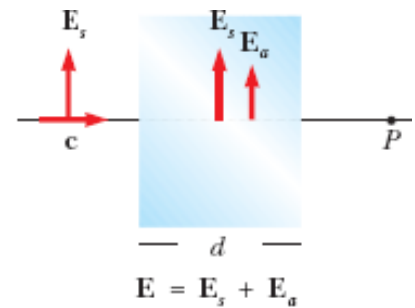


Riflessione e rifrazione delle onde:

Le velocità di propagazione delle onde, di qualsiasi natura esse siano, dipende dalle proprietà fisiche del mezzo in cui avviene la propagazione. Dobbiamo pertanto aspettarci che nel passaggio di un'onda da un mezzo ad un altro la velocità di propagazione cambi; si osserva che in corrispondenza cambia di norma la direzione di propagazione, fenomeno della *rifrazione* (o trasmissione), e che insieme alla rifrazione si verifica la *riflessione* dell'onda.

Le relazioni che legano la direzione dell'onda riflessa e quella dell'onda trasmessa alla direzione dell'onda incidente risultano indipendenti dalla natura dell'onda. Invece le relazioni che legano l'ampiezza dell'onda incidente ξ_i all'ampiezza dell'onda riflessa ξ_r e all'ampiezza dell'onda trasmessa ξ_t dipendono dalla natura dell'onda.

Supponiamo che un fascio di radiazione elettromagnetica attraversi una lastra di materiale dielettrico trasparente di spessore d prima di raggiungere un osservatore. In queste condizioni si osserva che la radiazione impiega un tempo $t' = d/v$ per percorrere la distanza d maggiore del tempo $t = d/c$ che avrebbe impiegato a percorrere la stessa distanza nel vuoto ($t = d/c$). Questa osservazione implica che $v < c$. Si definisce quindi una quantità *indice di rifrazione*, n , sempre maggiore dell'unità:



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

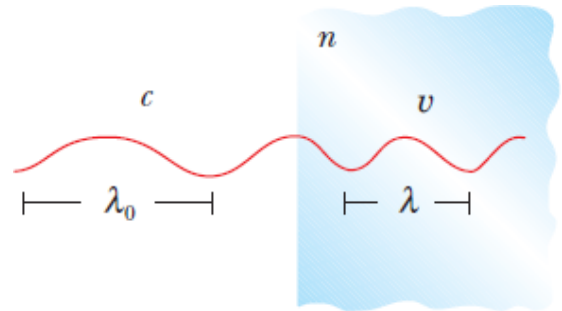
Una spiegazione qualitativa di tale effetto si può cercare nella circostanza che il campo E_s associato alla sorgente S agisce sugli elettroni legati degli atomi del dielettrico, ponendoli in oscillazione con la sua stessa pulsazione ω . Gli elettroni comportandosi come un sistema di dipoli elettrici oscillanti, producono, a loro volta, un campo elettrico E_a , correlato ad E_s in quanto da questo originato. Uno studio dettagliato dimostra che il campo elettrico risultante $E = E_s + E_a$ è modificato rispetto ad E_s e si propaga all'interno della lastra con velocità $v = c/n$, minore di c .

Nota: Non c'è alcuna ragione per ritenere che un atomo isolato nel vuoto emetta una radiazione che si propaga con velocità c , mentre un atomo circondato da altri atomi in un mezzo emetta una radiazione che si propaga con $v < c$: in ogni caso la velocità dell'onda è sempre c . La differenza sostanziale è che nel caso di un'onda che si propaga in un mezzo, l'onda incidente eccita l'emissione degli atomi, e pertanto il campo effettivo agente sul singolo atomo non è soltanto il campo incidente, bensì la sovrapposizione di tutti i campi emessi dagli atomi eccitati e di quello incidente. Dunque l'emissione del generico atomo non sarà in fase con l'onda incidente, e l'onda risultante sarà la sovrapposizione di un gran numero di onde tutte sfasate tra loro. L'effetto netto è quello di ottenere una variazione della fase dell'onda che si propaga nel mezzo rispetto all'onda incidente, che formalmente coincide con il dire che la velocità dell'onda nel mezzo è minore di c .

Nell'attraversamento di una superficie di separazione tra due mezzi la frequenza e la pulsazione non variano, mentre la lunghezza d'onda e il numero d'onda variano. Infatti mentre la frequenza, la pulsazione, è determinata dal meccanismo con cui la sorgente ha prodotto l'onda, la lunghezza d'onda, il numero d'onde, varia come conseguenza della variazione della velocità di propagazione. Dette v_1 e v_2 le velocità di propagazione dell'onda nei due mezzi abbiamo:

$$\omega = 2\pi\nu \quad , \quad \lambda_1\nu = v_1 \quad , \quad \lambda_2\nu = v_2 \quad ,$$

$$k_1 = \frac{\omega}{v_1} = \frac{2\pi}{\lambda_1} \quad , \quad k_2 = \frac{\omega}{v_2} = \frac{2\pi}{\lambda_2}$$



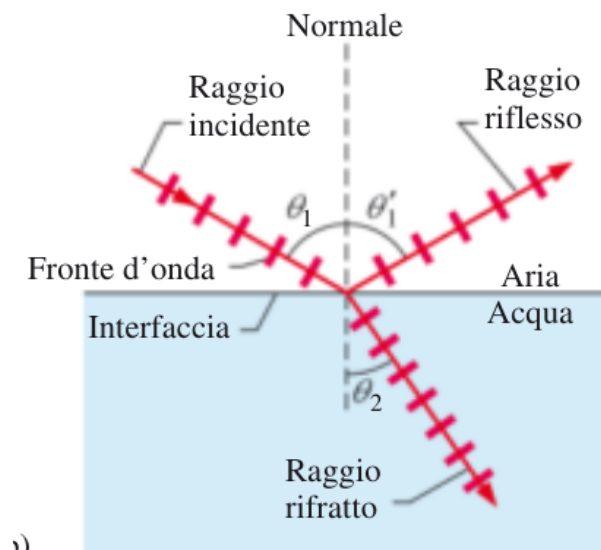
$$\Rightarrow \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{v_1}{v_2} \quad , \quad \frac{k_1}{k_2} = \frac{v_2}{v_1} \quad .$$

In particolare per un'onda e.m. che passi dal vuoto ad un mezzo trasparente vale la relazione:

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n} \quad , \quad k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{\lambda_0} n = k_0 n \quad ,$$

dove n è l'indice di rifrazione del mezzo, che supponiamo maggiore di 1, come avviene per la luce visibile. In questo caso, la lunghezza d'onda in un mezzo è minore della lunghezza d'onda nel vuoto.

Consideriamo ora la propagazione di un raggio incidente (monocromatico) con angolo θ_1 su una superficie semitrasparente (e.g. acqua). Parte della luce viene riflessa dalla superficie, cioè si propaga di nuovo come un raggio che si allontana dalla superficie, come se rimbalzasse su di essa. L'altra parte del raggio si propaga nel mezzo. L'attraversamento da parte della luce di una superficie di separazione (o interfaccia) tra due mezzi materiali è chiamato rifrazione, e la luce si dice rifratta. Salvo che nel caso particolare di incidenza normale alla superficie, la rifrazione provoca sempre una deviazione del raggio incidente, come se il raggio venisse «piegato» dalla rifrazione. Si



noti nella figura che la deviazione avviene solo al passaggio attraverso la superficie; all'interno del mezzo il raggio prosegue in linea retta. Le leggi che regolano la propagazione dei due raggi, riflesso e rifratto sono:

- Legge della riflessione: Il raggio riflesso giace sul piano di incidenza e forma un angolo di riflessione uguale a quello di incidenza, entrambi misurati rispetto alla normale.

$$\theta_1' = \theta_1 \quad (\text{riflessione})$$

- Legge della rifrazione: Il raggio rifratto giace nel piano di incidenza e forma un angolo di rifrazione legato all'angolo di incidenza dalla relazione

$$n_2 \sin \theta_2 = n_1 \sin \theta_1 \quad (\text{rifrazione})$$

(Legge di Snell)

Da cui segue:

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

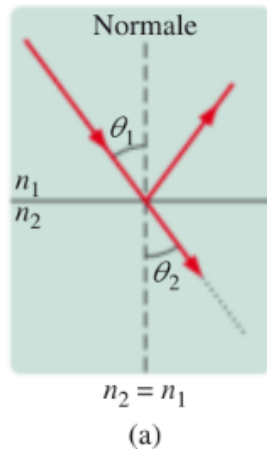
Possiamo riscrivere l'equazione per la rifrazione come:

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

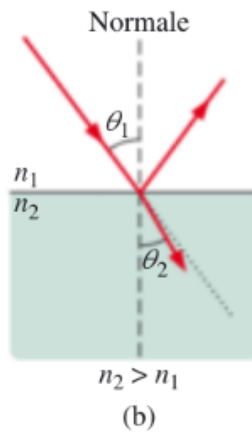
Si possono avere tre generi di risultati:

1. Se $n_2 = n_1$, allora $\theta_2 = \theta_1$. In questo caso la rifrazione non piega il fascio incidente, che prosegue senza deviazioni, come in figura a.
2. Se $n_2 > n_1$, allora $\theta_2 < \theta_1$. In questo caso la rifrazione piega il fascio incidente avvicinandolo alla normale, come in figura b.
3. Se $n_2 < n_1$, allora $\theta_2 > \theta_1$. In questo caso la rifrazione piega il fascio incidente allontanandolo dalla normale, come in figura c.

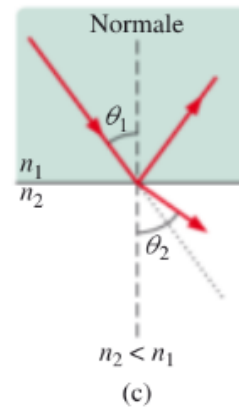
Se gli indici di rifrazione sono uguali, non si ha deviazione



Se l'indice del secondo mezzo è maggiore, il raggio si avvicina alla normale

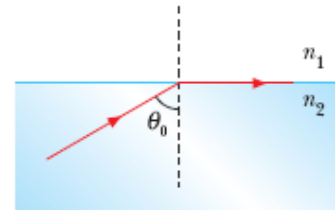
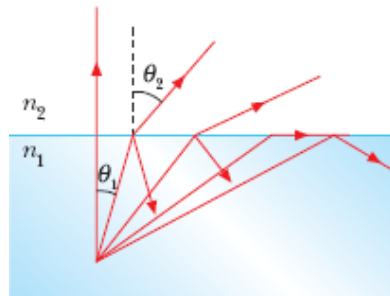


Se l'indice del secondo mezzo è minore, il raggio si allontana dalla normale



La terza situazione ($\theta_2 > \theta_1$) presenta un caso limite: al crescere dell'angolo di incidenza θ_1 l'angolo di trasmissione θ_2 , che cresce più rapidamente, raggiunge ad un certo punto il valore $\pi/2$ – per cui $\sin(\pi/2)=1$ – precisamente in corrispondenza al valore θ_0 dell'angolo di incidenza tale che:

$$\sin\theta_0 = \frac{n_2}{n_1} .$$



Per valori di θ_1 maggiori di θ_0 non esistono valori reali di θ_2 che soddisfino la legge di Snell e ciò significa che l'onda rifratta non si forma più, ovvero che l'onda incidente è totalmente riflessa all'interno del primo mezzo. Il fenomeno si chiama riflessione totale e l'angolo θ_0 è detto angolo limite.

Si noti che questa equazione può essere utilizzata solo quando n_1 è maggiore di n_2 . Cioè, la riflessione interna totale si verifica solo quando la luce si propaga da un mezzo di un dato indice di rifrazione a un mezzo di indice di rifrazione minore. Questo è il motivo per cui il termine interna viene aggiunto alla definizione – la luce deve essere inizialmente all'interno di un materiale di indice di rifrazione più alto rispetto a quello del materiale esterno. Se n_1 fosse minore di n_2 , l'Equazione darebbe $\sin\theta_0 > 1$, il che è un risultato assurdo poiché il seno di un angolo non può mai essere maggiore di uno.

Un'utilizzo interessante del fenomeno della riflessione totale si ha nel trasporto di un fascio luminoso lungo un determinato percorso; Le fibre ottiche, prodotte solitamente in quarzo o con resine plastiche sotto forma di cilindri del diametro inferiore al millimetro, sono strumenti utili per trasmettere luce e immagini tra due punti, lungo un cammino qualsiasi, sfruttando il fenomeno della riflessione totale. Un fascio di luce può entrare nella sezione di testa della fibra con un'angolazione tale che, per effetto della rifrazione, l'angolo di incidenza sulla parete laterale della fibra sia maggiore dell'angolo limite per quel materiale. In tal modo si ha la riflessione totale e la propagazione del fascio luminoso fino all'altra estremità della fibra. A questo scopo, solitamente le fibre ottiche sono rivestite di una guaina a minor indice di rifrazione della fibra stessa.

