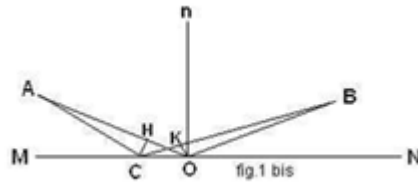
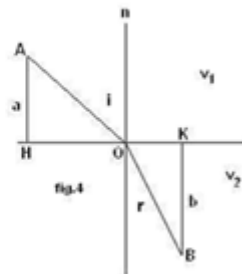
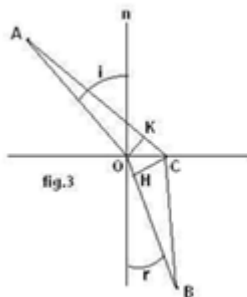


Ottavio Serra
Elementi di teoria della luce.

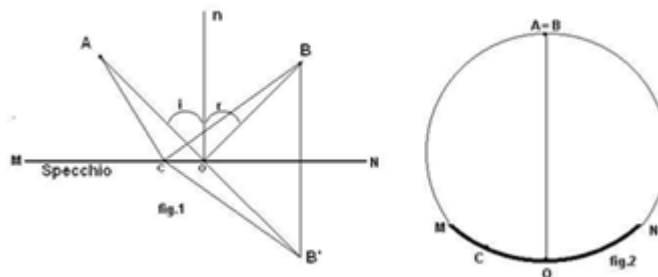
La luce consiste di onde o di particelle? L'uomo non può concepire ciò di cui non ha esperienza: perciò immagina oggetti localizzati nello spazio e nel tempo, particelle (sassi), oppure oggetti estesi, onde (onde del mare). Prima di procedere, vediamo come Fermat giustifica le leggi della riflessione e della rifrazione con il principio del *minimo tempo*.



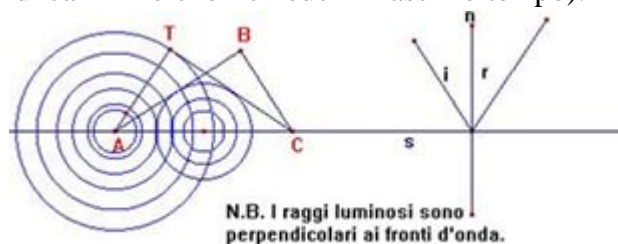
Se variamo il cammino effettivo AOB in ACB, il cammino aumenta di CK-OH e quindi il cammino AOB realizza il minimo spazio e, a parità di velocità, il minimo tempo. (Per la dimostrazione, si veda ad esempio il mio articolo *Principi estremali in fisica* sul mio sito o sull'annuario dello "Scorza". Segue l'uguaglianza degli angoli di riflessione e di incidenza, come nella teoria corpuscolare di Newton.



Qui è illustrata la dimostrazione di Fermat della legge di Snell: $\text{seni}/\text{senr} = n$ (indice di rifrazione) con $n = v_1/v_2$, come nella teoria ondulatoria di Huygens – Fresnel, contro la teoria corpuscolare di Newton che dava $n = v_2/v_1$. Newton dimostrava le leggi della riflessione e della rifrazione applicando la conservazione della quantità di moto ai suoi ipotetici *corpuscoli luminiferi*. In seguito Foucòlt verificò la legge $\text{seni}/\text{senr} = v_1/v_2$, misurando la velocità della luce nell'acqua, ma oramai nessuno più dubitava della teoria ondulatoria.

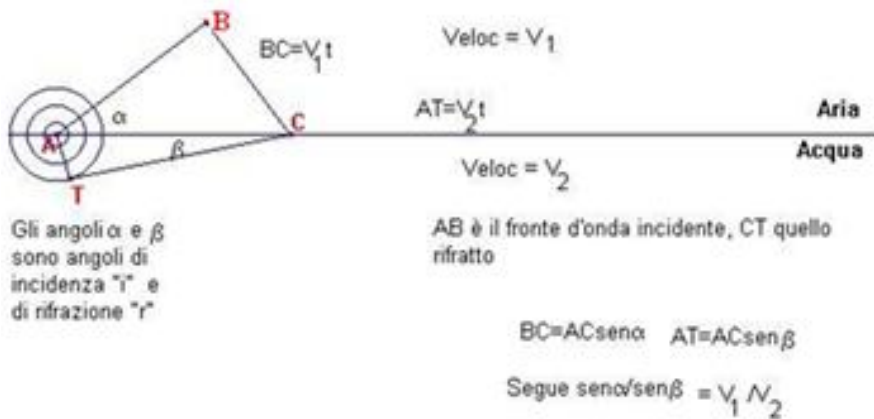


Qui sopra riporto la dimostrazione del minimo cammino per la riflessione, secondo Euclide. (Però a destra mostro un esempio di cammino che richiede il massimo tempo).



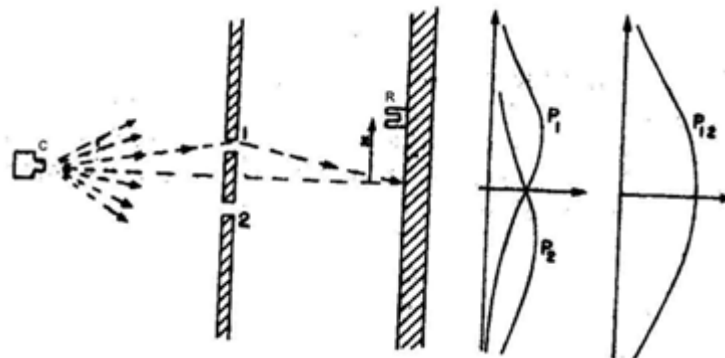
N.B. I raggi luminosi sono perpendicolari ai fronti d'onda.

Riflessione della luce secondo il principio ondulatorio di Huygens. (Si considerino solo le semisfere al disopra dello specchio s).

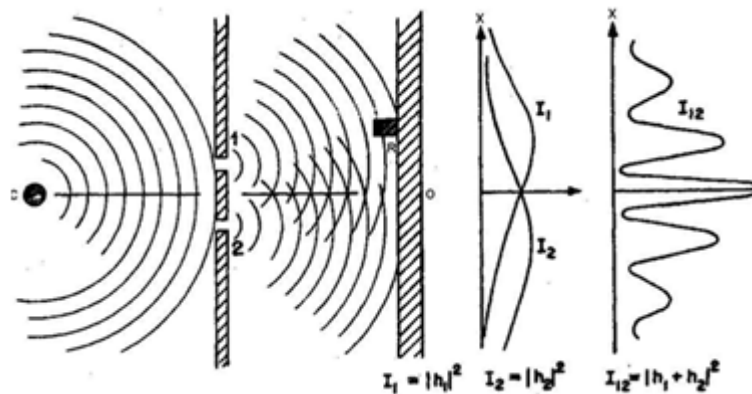


Rifrazione della luce secondo Huygens. Siccome i raggi luminosi sono perpendicolari ai fronti d'onda, $\alpha = i$ e $\beta = r$, perciò $\text{sen}\alpha / \text{sen}\beta = v_1/v_2 = \text{sen}i/\text{sen}r$.

Ma la luce consiste di onde o di particelle?



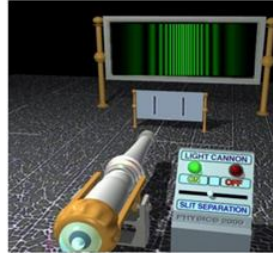
Passaggio di particelle attraverso due fenditure: non c'è interferenza. (Intensità = numero di particelle al secondo per probabilità di passaggio di una particella).



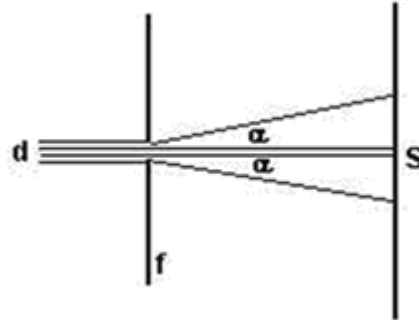
Onde (coerenti) attraverso due fenditure danno luogo a frange di interferenza.

Si hanno massimi di luminosità nei punti dello schermo in cui la differenza di cammino ottico Δl è un numero intero di lunghezze d'onda, o se vogliamo un numero pari di semilunghezze d'onda $\lambda/2$, minimi di luminosità nei punti in cui Δl è un multiplo dispari di $\lambda/2$. L'esperienza fu eseguita effettivamente da Young all'inizio del 1800 con un fascio di luce: **non c'erano dubbi, la luce consiste di onde.**

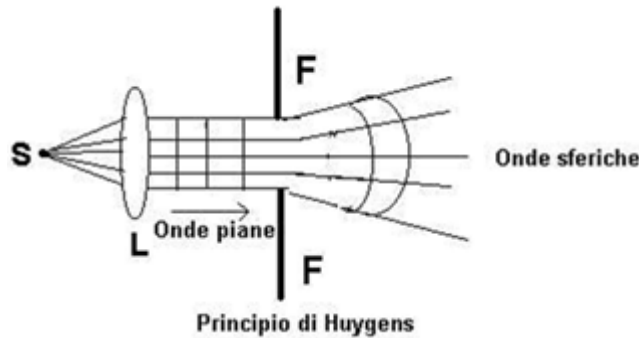
Ma anche un fascio di elettroni sparato attraverso due fenditure dà luogo a frange di interferenza. (Davisson e Germer): la cosa andrà approfondita.



(Interferenza di elettroni).



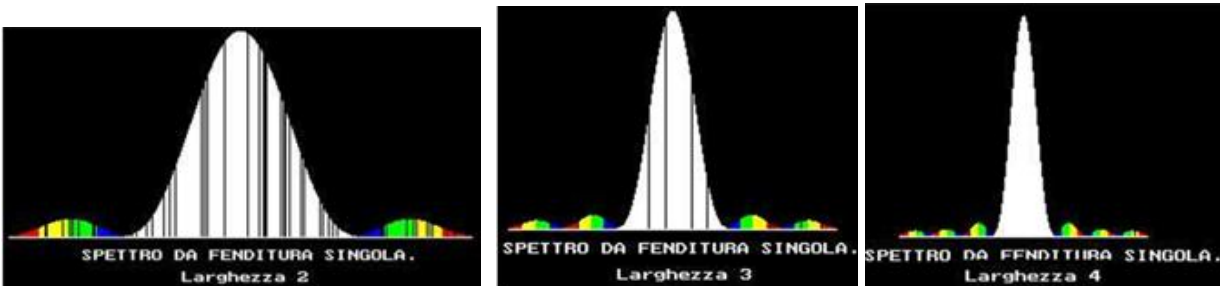
Diffrazione da una sola fenditura di un fascio di elettroni o di fotoni (pardon, di luce).



Come Huygens interpreta la diffrazione. Più la fenditura FF è stretta, più il fascio emergente si allarga. Se la fenditura è molto stretta, rispetto alla lunghezza d'onda, arriva un'onda piana ed emerge un'onda sferica. Man mano che la fenditura si allarga, cresce il numero di onde sferiche su di essa e il loro *inviluppo* tende a un'onda piana, come quella incidente. Al limite, per fenditure molto larghe si ha propagazione rettilinea. Le immagini seguenti sono una mia simulazione al computer.



Fenditura molto stretta



Fenditure sempre più larghe, al limite propagazione (quasi) rettilinea.

Principio di Huygens per le onde e principio di Heisenberg (per le particelle, materiali e di luce):
 Detta Δx la larghezza della fenditura (indeterminazione di posizione) e $\Delta \lambda$ l'indeterminazione di lunghezza d'onda, $\Delta \lambda$ deve essere differenza di almeno due lunghezze d'onda, λ_2 e λ_1 . Affinché si for-

minimo onde stazionarie occorre che Δx contenga un numero intero di lunghezze d'onda, come su una corda fissa agli estremi (numero intero di *fusi*):

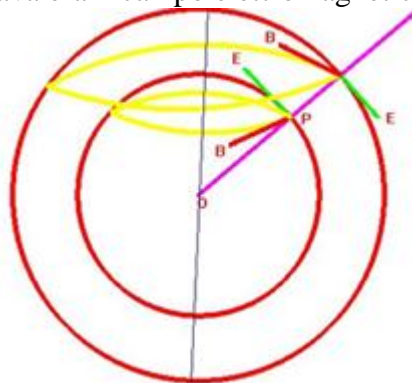
$$\Delta x = k\lambda_2, \Delta x = (k+N)\lambda_1, \text{ essendo } k \text{ ed } N \text{ numeri interi. Perciò } \frac{\Delta x}{\lambda_1} - \frac{\Delta x}{\lambda_2} = \Delta x \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right) = N \geq 1.$$

Questa si può interpretare in termini di particelle in base alla legge di de Broglie, che collega modello ondulatorio e modello corpuscolare: *ad ogni particella di quantità di moto p è associata una lunghezza d'onda $\lambda = h/p$, essendo h la costante di Plank ($6,6 \cdot 10^{-34}$ Js). Segue $\Delta x \cdot \Delta p \approx h$ (Principio di indeterminazione di Heisenberg).*

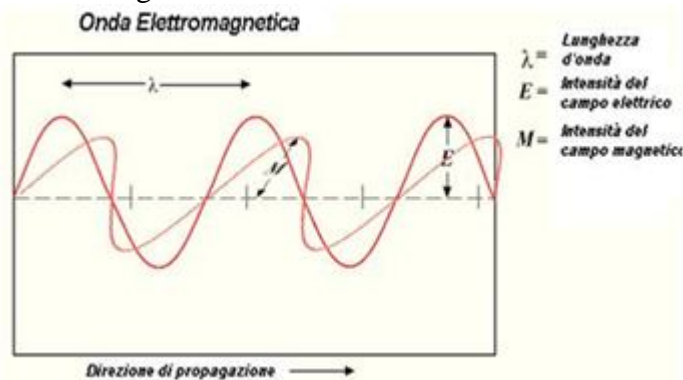
Per il momento continueremo a riferirci al modello ondulatorio di Huygens-Fresnel.

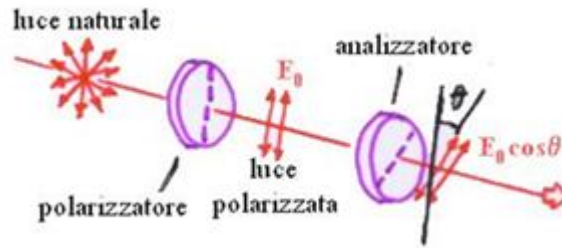
Le onde sonore possono essere longitudinali (onde di compressione e di rarefazione, parallele alla direzione di propagazione, dovute a elasticità di volume) e trasversali (onde di vibrazione perpendicolari alla direzione di propagazione dovute a elasticità di forma). Nei liquidi e nei gas si possono propagare solo onde longitudinali, nei solidi sia longitudinali che trasversali. Siccome la luce si propaga anche nel vuoto (anzi meglio che nei mezzi materiali trasparenti), si pensava che il vuoto fosse riempito di un mezzo onnipervasivo, detto etere luminifero, estremamente tenue perché non disturbava minimamente il moto dei pianeti. Pertanto, dato che l'etere non ha elasticità di forma, la luce doveva consistere di onde longitudinali. Ma poi si scoprì il fenomeno della polarizzazione della luce.

La luce, opportunamente preparata, si riflette con un'intensità che dipende dall'angolo di incidenza e, attraverso lamine di calcite o di plastica stirata, si trasmette con un'intensità che dipende dall'orientamento della lamina. Dunque la luce **deve** consistere di onde trasversali e, dato che la velocità della luce è estremamente elevata, l'etere luminifero dovrebbe avere una rigidità (elasticità di forma) immensamente grande, immensamente maggiore di quella dell'acciaio. Questo sembrava assolutamente inconcepibile. Ma dopo che Maxwell ebbe creato la teoria elettromagnetica della luce, le cose si chiarirono: ciò che vibrava era il campo elettromagnetico stesso.



Campo elettromagnetico irradiato da un dipolo verticale (antenna) : il campo elettrico **E** e il campo magnetico **B** sono perpendicolari tra di loro ed entrambi perpendicolari alla direzione di propagazione **r** = **OP** . Il campo elettromagnetico è trasversale





La luce naturale non è polarizzata, cioè il campo elettrico \underline{E} vibra in tutte le direzioni (perpendicolari alla direzione di propagazione). Il primo filtro, *polarizzatore*, costringe \underline{E} a vibrare in un'unica direzione, l'asse *facile* del polarizzatore, il secondo filtro, l'*analizzatore*, rivela lo stato di polarizzazione tramite l'intensità della luce trasmessa: l'intensità I è proporzionale al quadrato di $\underline{E} \rightarrow I = I_0 \cos^2 \theta$.

Se pensiamo alla luce come a una grandinata di fotoni, per un singolo fotone non ha senso parlare di intensità trasmessa, il fotone o passa o non passa. Occorre pensare I come probabilità che ha il fotone di attraversare l'analizzatore. Questa probabilità è $P = \cos^2 \theta$. L'intensità di un raggio di luce è l'energia di ciascun fotone per il numero di fotoni che attraversano l'unità di superficie nell'unità di tempo. (Se la luce non è monocromatica, occorre sommare su tutte le lunghezze d'onda **Integrare**). La polarizzazione si osserva anche per riflessione su una superficie vetrosa (specchio di materiale isolante). Per osservarla basta una sola lamina polaroide. La luce è riflessa prevalentemente con il campo elettrico parallelo alla superficie e ciò permette di determinare l'asse *facile* della lamina. Il grado di polarizzazione cresce da 0 ad 1 (al 100%) man mano che l'angolo di incidenza va da 0 all'angolo di *Brewster* = $\arctan(n)$, dove n è l'indice di rifrazione del vetro riflettente rispetto all'aria, e poi discende a 0 quando l'angolo di incidenza diventa di 90° (luce radente). Nel frattempo,

detta I_0 l'intensità della luce incidente, l'intensità della luce riflessa passa da $I = \left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2 I_0$

per incidenza normale ad I_0 per incidenza radente (la luce radente è riflessa al 100%). La teoria è dovuta a Fresnel ed è abbastanza complessa dal punto di vista matematico, ma le osservazioni qualitative sono molto facili. La teoria di Fresnel fu poi inglobata nell'elettromagnetismo di Maxwell.

Quesiti.

1) Sulla superficie dell'acqua si trasmettono onde trasversali; come si spiega? (avete sentito parlare di tensione superficiale?).

2) La diffrazione della luce richiede una fenditura molto stretta, mentre il suono si diffrange facilmente anche attraverso aperture larghe; i suoni, come le onde del mare, aggirano gli ostacoli, la luce va (o sembra andare) in linea retta; come mai?

3) Per avere interferenza luminosa da due fenditure (molto strette) occorre illuminarle con un unico fascio di luce; le sorgenti che danno luogo a interferenza sono le due fenditure; come mai non si ha interferenza con due sorgenti fisicamente diverse, per esempio, con due lampadine?

Si può avere interferenza con due sorgenti laser?

4) La luce diffusa dal cielo azzurro è polarizzata se la si guarda a 90° dal Sole; come mai?

Sperimentare

la tensione superficiale dell'acqua facendo galleggiare un ago d'acciaio,
 l'interferenza sonora con i due rebbi di un diapason,
 l'interferenza di onde elastiche con corde elicoidali d'acciaio,
 la polarizzazione della luce con polaroidi di plastica,
 la rotazione del piano di polarizzazione di un raggio luminoso polarizzato facendolo passare attraverso un campo magnetico (tra i poli di un elettromagnete). Il campo deve essere molto intenso e l'esperimento è molto difficoltoso. Il primo che lo realizzò fu Faraday.