FASE O. FASCICOLO TEORICO

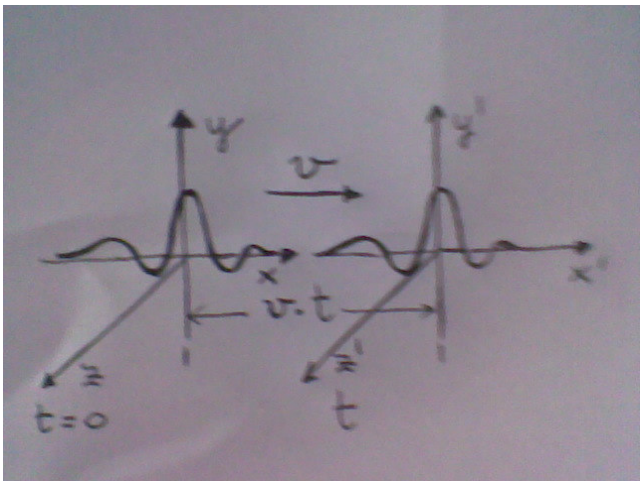
Prima parte O1. Le onde

ONDE MECCANICHE

Un'onda meccanica è la propagazione di una perturbazione in un mezzo (gassoso, liquido o solido).
Per formare un'onda meccanica occorrono una sorgente della perturbazione, un mezzo che subisca la perturbazione, una connessione tra la materia perturbata e quella adiacente che propaghi la perturbazione. Al passaggio di un'onda meccanica la materia subisce una deformazione elastica: le particelle che costituiscono il mezzo materiale si spostano rispetto alla loro posizione di riposo e poi vi ritornano.
Il moto dell'onda è distinto dal moto degli elementi di volume del mezzo: al passaggio dell'onda le particelle del mezzo oscillano intorno alla loro posizione di equilibrio e non vengono trasportate dall'onda.
Durante la propagazione di un'onda, lo spostamento, la velocità e l'energia meccanica (cinetica e potenziale elastica) di un elemento di volume del mezzo vengono trasmessi a quello adiacente. In questo modo le onde trasportano energia meccanica attraverso la materia. Se il mezzo non è dissipativo, l'onda, man mano che si propaga, continua ad eccitare sempre nuovi punti materiali: ogni molecola del mezzo elastico, eccitando quella adiacente, trasferisce ad essa la sua energia. La quantità totale di energia contenuta nel mezzo rimane costante fino a quando l'onda si infrange su qualche ostacolo lontano e quindi l'energia viene rimossa dal mezzo.
Si definisce *potenza* trasmessa dall'onda l'energia trasferita nell'unità di tempo. Si definisce *intensità dell'onda* l'energia che nell'unità di tempo attraversa una superficie unitaria nella direzione di propagazione.
Un'onda per cui lo spostamento delle particelle del mezzo in cui si propaga è perpendicolare alla direzione del moto dell'onda si dice onda *trasversale*. Un'onda si dice, invece, *longitudinale* se le particelle del mezzo oscillano lungo la direzione di propagazione dell'onda.
Le onde sull'acqua costituiscono un esempio di onde approssimativamente trasversali, essendo in realtà una combinazione di onde trasversali e longitudinali. Se si lascia cadere un sasso in un lago si origina una serie di onde concentriche che si propagano circolarmente sull'acqua. Ciò può essere riprodotto in un ondoscopio, in cui per visualizzare il movimento dell'acqua si può appoggiare un piccolo pezzo di sughero sulla superficie. Si osserva che il sughero, riproducendo il moto delle particelle d'acqua mentre l'onda si propaga in direzione orizzontale, si muove lungo un percorso approssimativamente circolare ritornando al suo punto di partenza.
Esempio di onda elastica longitudinale è il suono. Le onde sonore, dalla sorgente, si propagano in aria in tutte le direzioni attraverso successive compressioni e rarefazioni degli strati d'aria. Le molecole d'aria oscillano lungo la direzione di propagazione dell'onda e il loro movimento è associato alle variazioni di densità e di pressione dell'aria.
In un solido la propagazione dell'onda sonora avviene attraverso la vibrazione delle particelle del solido e dipende dalle caratteristiche di rigidità del materiale stesso.
Possiamo visualizzare la propagazione di onde anche lungo una molla o una corda, dopo che è stato dato un *impulso* ad un estremo della molla. Si ottengono così onde unidimensionali. Se si osserva un singolo punto della molla, si può notare come esso si muova longitudinalmente o

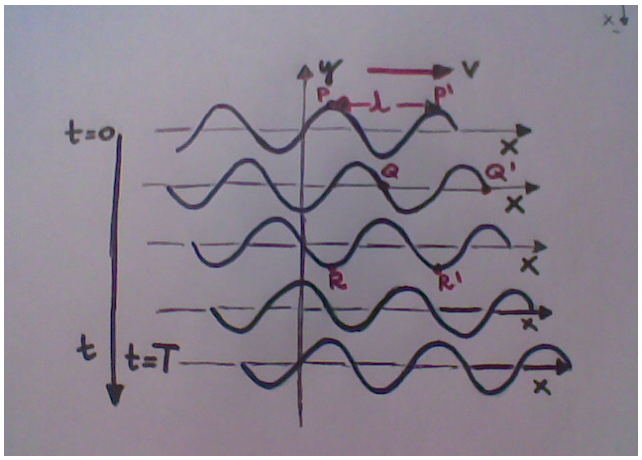
trasversalmente a seconda di come viene comunicato tale impulso. Le onde che si propagano longitudinalmente lungo una molla possono rappresentare un modello meccanico dell'onda sonora, in quanto lungo la molla si alternano zone in cui le spire sono compresse a zone in cui sono meno addensate in analogia all'alternanza di strati d'aria più densi e più rarefatti interessati dal passaggio dell'onda sonora.
Nel caso di una perturbazione trasversale a seguito di un impulso, possiamo rappresentare lo spostamento delle particelle del mezzo rispetto alla posizione imperturbata con una funzione della posizione e del tempo $y = f(x,t)$ dove x è la direzione di propagazione dell'onda. Ad un certo istante di tempo tale funzione rappresenta la *forma dell'onda*, cioè il profilo o l'intersezione dell'onda nel piano xy. Supponiamo, per semplicità, che la forma dell'onda non vari nel corso della propagazione dell'onda nel mezzo. In Fig. 1, v rappresenta la velocità dell'impulso che si propaga verso destra.

Figura 1



Se la perturbazione provocata dalla sorgente si ripete in modo regolare, si ottiene un'onda periodica. Assumendo oscillazioni armoniche, l'espressione analitica della funzione $f(x,t)$ è tipicamente sinusoidale. Le grandezze caratteristiche dell'onda periodica sono: l'*ampiezza A,* la *lunghezza d'onda* λ e la *frequenza f*. Definiamo ampiezza A dell'onda il massimo spostamento dell'elemento del mezzo dalla posizione di riposo. Definiamo λ = distanza dopo la quale un'onda si ripete, ovvero minima distanza fra due punti che oscillano in *fase*. Possiamo misurare λ come distanza, per es, tra due creste (P e P'), punti di massimo spostamento positivo, o tra due gole successive (R e R'), punti di massimo spostamento negativo (vedi Fig.2). Come in tutti i fenomeni periodici, definiamo *periodo T* dell'onda, il tempo necessario affinché un'onda si ripeta, ovvero la durata di un'oscillazione completa, e la frequenza f come il numero di cicli nell'unità di tempo. Risulta, pertanto, $f = 1/T$. Poiché l'onda percorre una distanza λ in un tempo T, ne risulta la seguente relazione tra la velocità di propagazione dell'onda e la sua frequenza: $v = \lambda/T = \lambda f$. In Fig.2 è rappresentata un'onda propagantesi lungo x, a intervalli temporali regolari lungo l'asse dei tempi t: $1/4T$; $1/2T$; $3/4T$ e T dove T è il periodo.

Figura 2



Diciamo che i punti P e P', come anche Q e Q' e R e R' sono *in fase*, in quanto le loro posizioni differiscono di una quantità pari a λ; i punti P e Q sono sfasati di $\lambda/4$; i punti P e R sono in *opposizione di fase*, in quanto sfasati di $\lambda/2$.
Si chiama *fronte d'onda* l'insieme dei punti che, ad un dato istante oscillano in *fase*. Il fronte d'onda, a seconda del tipo di sorgente, può avere forme diverse: per es., in

riferimento alle onde sull'acqua dell'ondoscopio, *circolare* (sorgente puntiforme) o *piano* (sorgente a forma di lamina) o *sferico* per onde che si propagano nelle tre dimensioni, come le onde sonore in aria.
E' possibile misurare la lunghezza d'onda di onde piane nell'ondoscopio, allineando un foglio di carta millimetrata trasparente sotto la vaschetta d'acqua ed un righello trasparente nella direzione di propagazione delle onde, contando la distanza, per es., tra creste successive (vedi Fig.3).

Figura 3

La *velocità di propagazione* delle onde dipende dalle proprietà del materiale attraverso cui viaggiano e dalla natura della perturbazione. La velocità di propagazione delle onde trasversali superficiali a cui le onde sull'acqua possono essere assimilate, dipende, in generale, dalla profondità dell'acqua e dalla lunghezza d'onda dell'onda secondo la seguente espressione:

$$v = \sqrt{(g\lambda/2\pi)}\tanh(2\pi h/\lambda)$$

dove h è la profondità e λ la lunghezza d'onda. La funzione tanh, tangente iperbolica, è una combinazione di esponenziali.
Se l'acqua è profonda, cioè per $h \gg \lambda$, l'espressione sopra può essere semplificata e la velocità dell'onda risulta essere proporzionale a $\sqrt{\lambda}$; d'altra parte, per acque poco profonde, cioè per $h \ll \lambda$, come è il caso nell'ondoscopio, si può approssimare $v = \sqrt{gh}$, dove h è la profondità misurata dalla superficie dell'acqua al fondo della vaschetta. Quindi, mentre in acque profonde il fondo non produce effetto sull'onda, in acque basse la presenza dell'attrito con il fondo deve essere presa in considerazione.
Le onde superficiali nell'acqua (cioè per acque profonde) sono un esempio di propagazione di onde in un mezzo *dispersivo*. Un mezzo viene definito dispersivo per un certo tipo di onde se la loro velocità in esso non è costante ma dipende dalla lunghezza d'onda della perturbazione. Le onde con lunghezze d'onda diverse, anche se prodotte simultaneamente, a causa delle differenti velocità associate alle diverse lunghezze d'onda, tendono a *disperdersi* nel tempo. In generale le onde non sono singole onde sinusoidali, piuttosto combinazioni di onde con diversa λ, quindi la forma di un'onda reale in un mezzo dispersivo tende a modificarsi man mano che le sue diverse componenti si propagano. Ne risulta, pertanto, una dipendenza tra la lunghezza d'onda λ e la frequenza f. Per esempio, per onde superficiali sull'acqua, $v = \sqrt{g\lambda/2\pi}$ e dalla relazione $v = \lambda f$, risulta $f^2 = g/2\pi\lambda$, quindi λ risulta essere inversamente proporzionale al quadrato della frequenza. Questo non avviene per le onde sonore nell'aria e le onde in una molla.

Nelle molle e nelle corde, la velocità di propagazione delle onde dipende dalla tensione con cui sono tese, dalla densità lineare, e dalla rigidità della molla. Una corda di *densità lineare* (massa/lunghezza) più bassa risponde più velocemente ad una data perturbazione rispetto ad una corda di densità lineare maggiore; più la corda è tesa, più velocemente si propagano le onde.

L'energia trasmessa dall'onda risulta direttamente proporzionale al quadrato della sua ampiezza A^2 e al quadrato della sua frequenza f^2 ed è inversamente proporzionale al quadrato della lunghezza d'onda λ^2.
Per onde sferiche, cioè per onde che si propagano radialmente (come le onde sonore), l'intensità dell'onda risulta inversamente proporzionale al quadrato della distanza dalla sorgente; la sua ampiezza, invece, è inversamente proporzionale alla distanza dalla sorgente.

I principali fenomeni ondulatori che vogliamo osservare sono: *riflessione*, *rifrazione*, *interferenza* e *diffrazione*.

Riflessione

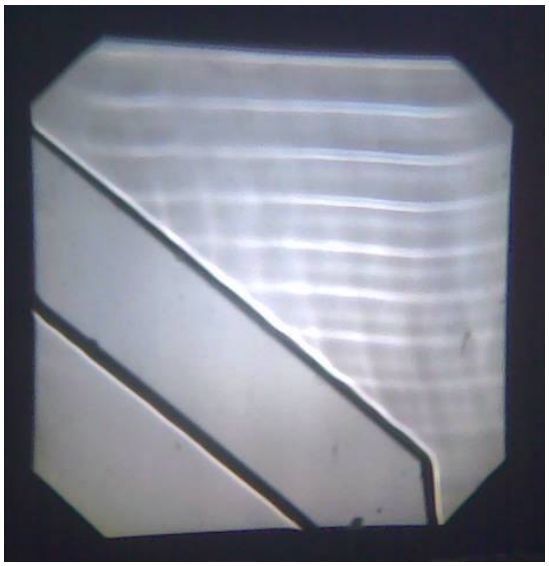
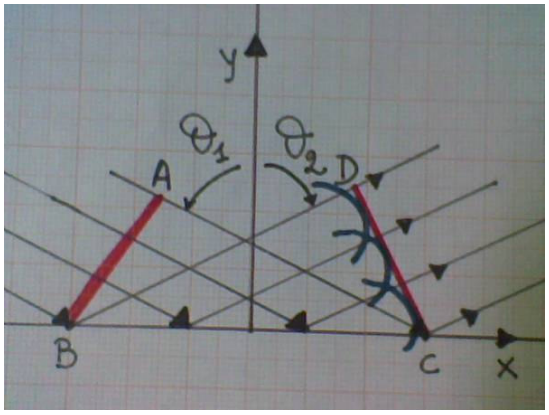


Figura 4

Parliamo di *riflessione* quando l'onda incontra un ostacolo sul suo percorso di propagazione e "torna indietro". Questo può essere visualizzato sia sull'ondoscopio, ponendo un ostacolo (lamina) nella vaschetta (Fig.4) sia sulla molla (o corda) osservando l'onda (unidimensionale) che viaggiando lungo la molla, raggiunto l'altro estremo si riflette indietro (Fig.5). La riflessione avviene secondo precise leggi: l'angolo di incidenza, tra la direzione di propagazione dell'onda e la perpendicolare alla superficie dell'ostacolo, e l'angolo di riflessione tra la direzione di propagazione dell'onda riflessa e la perpendicolare alla superficie dell'ostacolo, sono uguali; le rette costituite dalla direzione di incidenza, la normale alla superficie dell'ostacolo e la direzione di riflessione sono complanari. Di solito si usa il termine di *raggio* per indicare la direzione di propagazione delle onde. In un mezzo isotropo la direzione dei raggi è sempre perpendicolare al fronte d'onda. Il principio di Huyghens (1690) permette di costruire i fronti d'onda dell'onda riflessa in un determinato istante a partire dalla conoscenza della velocità di propagazione e della configurazione dell'onda incidente in un istante antecedente quello considerato. Secondo tale principio ogni punto del fronte d'onda di una perturbazione può essere equiparato ad una sorgente puntiforme di onde sferiche secondarie che si propagano verso l'esterno in tutte le direzioni. L'inviluppo, cioè la sovrapposizione, di queste onde secondarie dà il nuovo fronte d'onda. Nello schema seguente (schema1) è illustrata l'applicazione del principio di Huyghens per la determinazione dei raggi riflessi da una superficie riflettente. AB è il fronte d'onda incidente e DC è il fronte d'onda riflesso, θ_1 e θ_2 sono gli angoli di incidenza e di riflessione rispettivamente.



Schema 1

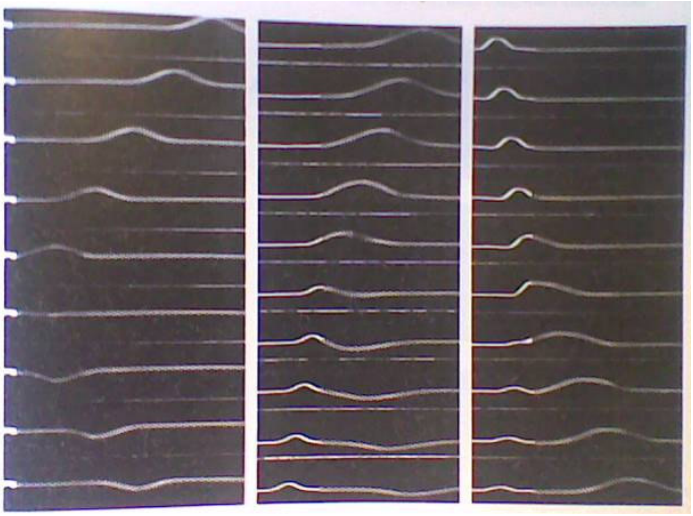


Figura 5 a);b);c)

E' interessante osservare il profilo dell'onda riflessa dal secondo estremo della corda, nel caso in cui tale estremo è tenuto fisso e nel caso in cui è libero di muoversi: nel primo caso l'onda riflessa è ribaltata (per la legge di azione-reazione, la forza del vincolo è uguale ed opposta); nel secondo l'onda riflessa non subisce inversione. In Fig.5 a) è raffigurata la riflessione di un impulso che si propaga (da destra verso sinistra) lungo una corda tesa con l'estremo vincolato: l'impulso riflesso è rovesciato.

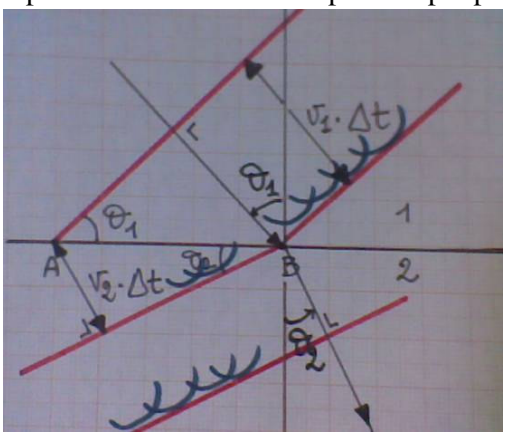
Rifrazione

Le onde possono trasmettersi da un mezzo materiale ad un altro diverso adiacente al primo. Nell'ondoscopio i due mezzi corrispondono a due zone della vaschetta di diversa profondità dello strato d'acqua (per realizzare lo strato meno profondo si adagia sul fondo della vaschetta uno spessore di vetro trasparente). Nell'ondoscopio al passaggio dell'onda da una zona all'altra si osserva, in generale, una debole onda riflessa e un netto cambio di direzione, rispetto alla direzione incidente, dell'onda trasmessa (Fig.6). Chiamiamo questo fenomeno *rifrazione*. Perché l'onda al passaggio nella seconda zona si propaga in direzione diversa?

Figura 6

Il fenomeno è dovuto al cambiamento della velocità dell'onda, che è diversa nei due strati d'acqua. Per analogia: come un'automobile che, procedendo a grande velocità sulla strada asfaltata incontra in un taglio netto, trasversale rispetto alla direzione del moto, la strada che improvvisamente si fa sterrata, decelera bruscamente, e cambia direzione di moto. Il cambio di velocità determina una variazione della lunghezza d'onda dell'onda rifratta rispetto a quella incidente, visibile osservando la diversa separazione tra le creste (o le gole) dell'onda nello strato d'acqua meno profondo rispetto allo strato d'acqua più profondo. La relazione tra il cambio di velocità e il cambio di direzione di propagazione può essere illustrata applicando il principio di Huyghens: Con θ_1 , θ_2 e v_1, v_2 indichiamo gli angoli di incidenza e di rifrazione e le velocità dell'onda nel primo e nel secondo mezzo rispettivamente. Nell'intervallo di tempo Δt, il fronte d'onda percorre un tratto $v_1\Delta t$ nel primo mezzo e un tratto $v_2\Delta t$ nel secondo. Poiché le onde elementari che si producono alla superficie rifrangente si propagano più lentamente di quelle che si formano nel primo mezzo, le onde secondarie provenienti dalle zone del fronte d'onda che progressivamente entrano nel mezzo rifrangente hanno raggi più piccoli di quelle che in quel

momento si stanno ancora propagando nel primo mezzo. Il nuovo fronte d'onda forma un angolo θ_2 rispetto alla normale alla superficie più piccolo di θ_1. Con riferimento allo schema 2 si ha:



$sin\theta_1 = v_1\Delta t/AB$ e $sin\theta_2 = v_2\Delta t/AB$

da cui dividendo membro a membro e semplificando il fattore comune $\Delta t/AB$ si ottiene:

$sin\theta_1/sin\theta_2=v_1/v_2$

che costituisce la legge di Snell della rifrazione (o dei seni) : il rapporto tra il seno dell'angolo di incidenza e il seno dell'angolo di rifrazione è uguale al rapporto tra la velocità dell'onda incidente e la velocità dell'onda rifratta.

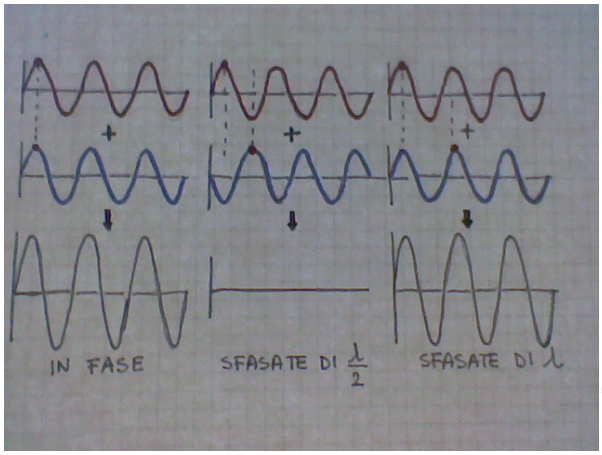
Schema 2

In generale, il valore di tale rapporto cambia al variare della frequenza dell'onda, per cui il cambiamento di direzione dell'onda è differente per frequenze differenti.
La legge dei seni può essere verificata utilizzando l'ondoscopio. Misurando con un goniometro gli angoli di incidenza e di rifrazione e le velocità dell'onda nei due strati di acqua di diversa profondità, si può, inoltre, confrontare il rapporto tra le due velocità con il rapporto tra le corrispondenti lunghezze d'onda.

Nel caso delle molle e corde mezzi diversi corrispondono a molle o corde di diversa densità e costante elastica collegate in serie tra loro.
L'unidimensionalità delle molle lineari o delle corde non permette di visualizzare per le onde che viaggiano lungo di esse il cambio di direzione della velocità, mentre è ben visibile la variazione della lunghezza d'onda e del modulo della velocità dell'onda e la diminuzione dell'ampiezza dell'onda, che indica una perdita di energia meccanica trasportata dall'onda. In Fig.5b) sono raffigurate la riflessione e la trasmissione parziali nel passaggio dell'impulso da una corda leggera (a destra) ad una pesante (a sinistra). Si può osservare che l'impulso riflesso è rovesciato. In Fig.5c) l'impulso che si propaga da una corda pesante ad una leggera si riflette parzialmente e si trasmette nel passaggio da una all'altra. In questo caso l'impulso non è rovesciato.

Interferenza

Figura 7



Quando nella stessa regione di spazio si trovano più onde, esse si combinano sovrapponendosi. Se le onde sono di piccola ampiezza, combinandosi, danno luogo ad un'onda risultante in cui la perturbazione è pari alla somma algebrica delle perturbazioni delle onde componenti, senza influenzarsi reciprocamente. Le onde che si propagano in un mezzo, pur potendo sempre sovrapporsi, non producono comunque un'onda risultante con un andamento

regolare e prevedibile. Perché questo avvenga dipende dalle relazioni tra le fasi delle onde componenti nei diversi punti dello spazio. Nel caso di combinazione di onde *coerenti*, cioè prodotte da sorgenti con un frequenza ben definita e quindi tali che la differenza tra le fasi iniziali delle onde componenti non varia nel tempo, la sovrapposizione di onde produce figure di interferenza in cui si possono avere zone di *interferenza costruttiva* in cui l'ampiezza dell'onda risultante è aumentata, fino ad essere in alcuni punti uguale alla somma delle ampiezze delle onde componenti e da altre, di *interferenza distruttiva*, in cui l'ampiezza dell'onda risultante è diminuita fino a essere nulla. In Fig.8 è raffigurata la combinazione di due onde coerenti e l'onda risultante nel caso di differenza di fase nulla; di mezza lunghezza d'onda; e di un'intera lunghezza d'onda. Nel primo e nel terzo caso, l'onda risultante ha ampiezza pari alla somma delle ampiezze delle onde componenti e risulta massima (interferenza costruttiva); nel secondo caso l'ampiezza risultante è nulla (interferenza distruttiva). Il fenomeno di interferenza tra le onde può essere osservato nell'ondoscopio, utilizzando due sorgenti collegate tra loro che vengano fatte vibrare in modo sincrono in modo da generare onde coerenti e in fase, di uguale frequenza e di uguale lunghezza d'onda.

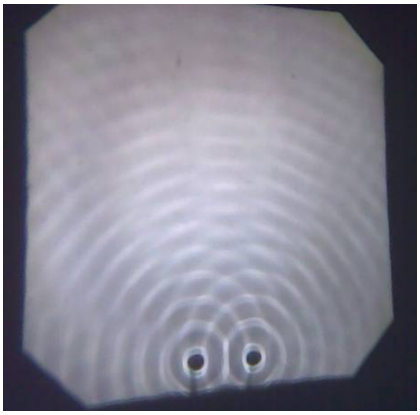


Figura 8

Nel caso si utilizzino due sorgenti puntiformi (pennini) si visualizza una tipica figura di interferenza, che si forma dalla sovrapposizione delle onde circolari generate. E' possibile osservare dall'immagine proiettata sullo schermo zone chiare, di acqua calma, corrispondenti a interferenza distruttiva e zone scure, di acqua più mossa, associate alla situazione di interferenza costruttiva (Fig.8). In generale, la fase dell'onda risultante dalla sovrapposizione di due onde in un punto del mezzo in cui le onde viaggiano, dipende dalla differenza di fase delle onde componenti, dipendendo quest'ultima dalla differenza dei cammini percorsi dalle onde dalla sorgente a quel punto. Se le onde hanno percorso la stessa distanza, cioè lo stesso numero di lunghezze d'onda, sono ancora in fase e in quel punto ci sarà un'interferenza costruttiva. Se la differenza dei cammini è comunque un numero intero di lunghezze d'onda, si avrà un'interferenza costruttiva e dunque un rafforzamento dell'onda. Se la differenza dei cammini delle onde è, invece, mezza lunghezza d'onda o un multiplo dispari di mezza lunghezza d'onda, il risultato è una situazione di compensazione tra le onde, poiché la differenza di fase corrisponde ad un'opposizione di fase e si ha interferenza distruttiva.

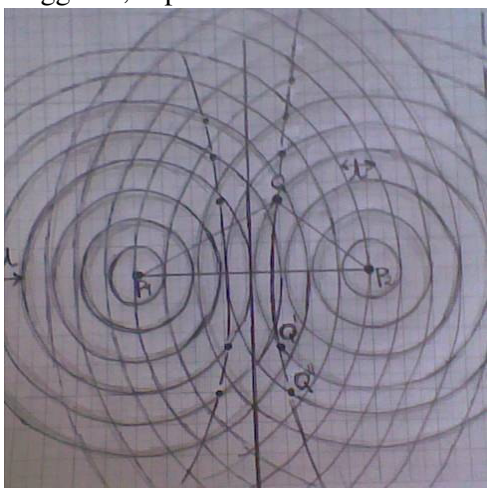


Figura 9

Con differenze di fase qualsiasi, si hanno risultati di interferenza intermedi. Con riferimento alla Fig.9, in cui P_1 e P_2 sono le posizioni delle sorgenti e sono stati rappresentati i fronti d'onde circolari a distanza di una lunghezza d'onda λ, i punti di interferenza costruttiva sono tali da soddisfare alla seguente condizione:

$$\left| r_2 - r_1 \right| = m\lambda \quad \text{con } m = \textit{numero intero relativo} \qquad 1)$$

dove con r1 e r2 si intendono le distanze tra le sorgenti P1 e P2 e il punto rispettivamente, mentre i punti di interferenza distruttiva, come i punti Q, Q', Q''..soddisfano alla seguente relazione:

$$\left| r_2 - r_1 \right| = (2m-1)\,\lambda/2 \quad \text{con } m = \textit{numero intero relativo} \qquad 2)$$

dove r_2 e r_1, per esempio per il punto Q, coincidono con P_1Q e P_2Q. Il luogo geometrico dei punti del mezzo in cui l'onda si propaga che soddisfano alla condizione 1) o 2) è un'iperbole (luogo dei punti per cui la differenza tra le loro distanze da due punti fissati, detti fuochi, è costante) i cui fuochi coincidono con le posizioni delle sorgenti. I punti come Q, vengono detti *nodi*, e la linea formata dai punti Q è detta linea nodale. Nella figura 9 sono rappresentati i due rami della linea nodale dell'iperbole corrispondente a $m = 1$ nella relazione 2). Nella figura 8 sono visibili tratti di alcune linee nodali.

E' possibile osservare anche la sovrapposizione di due impulsi che viaggiano lungo una molla o una corda, e notare come le onde non siano modificate dalla loro interazione: le onde dopo essersi sovrapposte nel punto d'incontro, proseguono nel loro moto.
Un effetto dell'interferenza tra le onde sono le *onde stazionarie*. Per onda stazionaria, a differenza di onda viaggiante che si propaga, si intende un'onda che oscilla nel tempo, ma rimane ferma nella sua posizione. Un'onda stazionaria può essere considerata come il risultato di un'interferenza costruttiva di un'onda con se stessa, perciò le onde stazionarie sono prodotte solo quando sono soddisfatte opportune condizioni. Per esempio possono essere prodotte ed osservate in una corda o in una molla, con gli estremi tenuti fissi, se sollecitate opportunamente. I punti di un'onda stazionaria che rimangono fissi (come gli estremi) sono detti nodi. I punti a metà strada tra due nodi, corrispondenti allo spostamento massimo, sono chiamati anti-nodi. Se indichiamo con D la distanza tra gli estremi della molla, la vibrazione fondamentale o *prima armonica* corrisponde ad avere i nodi agli estremi e uno spostamento massimo centrale, dunque a mezza lunghezza d'onda dell'onda tipica della molla. Poiché $D = \lambda/2$, la frequenza fondamentale risulta $f_0 = v/2D$ dove v è la velocità dell'onda. In una molla (o corda) esistono infinite altre onde stazionarie, o *armoniche*, con frequenze che sono multipli interi della frequenza fondamentale $f_n = nf_0$. Le lunghezze d'onda corrispondenti risultano $\lambda_n = \lambda_0/n$ con n intero, dove λ_0 è la lunghezza d'onda fondamentale.

Diffrazione

L'ultimo fenomeno che prendiamo in considerazione, peculiare della propagazione ondulatoria, è il fenomeno di diffrazione che consiste nella deviazione dell'onda dalla direzione rettilinea di propagazione con aggiramento di aperture o di ostacoli. La condizione affinché le onde diffrangano è che le dimensioni dell'ostacolo o dell'apertura siano confrontabili con la lunghezza d'onda dell'onda. Il fenomeno è talvolta visibile anche lungo litorali marini rocciosi in cui le onde del mare, pur arrivando allo scoglio come onde piane, se questo è di opportune dimensioni, lo aggirano con una serie di onde circolari, per cui al di qua dello scoglio l'acqua non è calma ma presenta comunque un moto ondoso. Nell'ondoscopio il fenomeno della diffrazione è facilmente visibile disponendo, parallelamente ai fronti d'onda delle onde piane generate dalla sorgente a lamina, un ostacolo dotato di fenditura di dimensioni variabili. Se l'apertura è grande rispetto alla lunghezza d'onda dell'onda, il profilo del fronte d'onda non è sostanzialmente modificato e le onde rimangono piane, anche dopo l'ostacolo, con fronti d'onda paralleli (vedi Fig.10a). Se la larghezza dell'apertura ha valore confrontabile con la lunghezza d'onda dell'onda, la forma del fronte d'onda,

dopo l'ostacolo, cambia drasticamente, da piana diventa circolare (vedi Fig.10b), e si osserva una serie di onde circolari concentriche con centro approssimativamente coincidente con la posizione dell'apertura. La diffrazione delle onde data da una fenditura è prevista dal principio di Huyghens: ogni punto della porzione del fronte d'onda che investe la fenditura può essere considerato come sorgente di onde sferiche secondarie il cui inviluppo rappresenta un fronte d'onda sferico. Per una data lunghezza d'onda λ, l'onda diffratta si allarga al diminuire della larghezza della fenditura.

Figura 10a

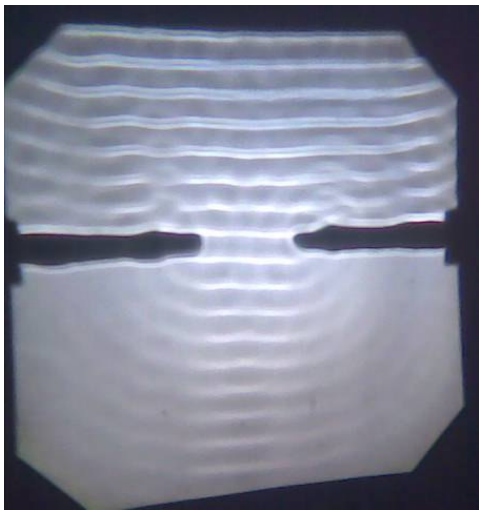
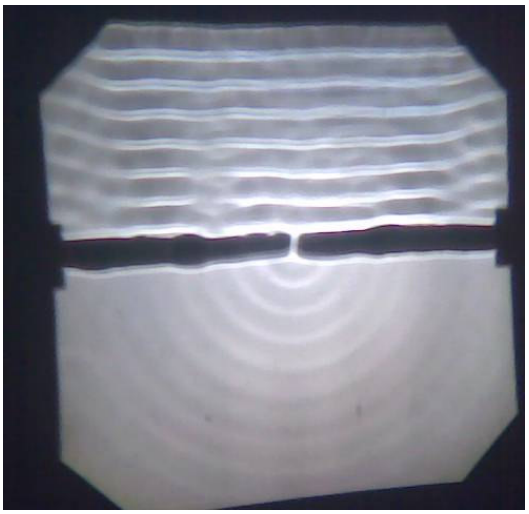


Figura 10b



In Fig.11 è rappresentata la figura risultante dalla sovrapposizione di onde componenti generate da una sorgente a "pettine". In essa è possibile osservare sia il fenomeno di diffrazione in corrispondenza alle aperture del pettine, che il successivo fenomeno di interferenza tra le onde secondarie provenienti da ogni apertura.

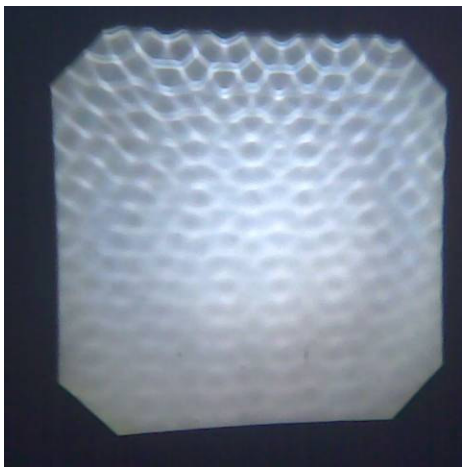


Figura 11

Seconda parte O2 - LA LUCE

ONDE LUMINOSE

La luce è radiazione elettromagnetica a cui il nostro occhio è organo sensibile. In realtà noi non vediamo la luce direttamente, bensì in seguito agli effetti prodotti dall'interazione luce-oggetti. Il fenomeno della visione e successivamente la questione della sostanza della luce fu argomento di accesi dibattiti lungo il corso della storia della scienza allo scopo di decidere se la luce fosse costituita da un fascio di corpuscoli o particelle o fosse un fenomeno di propagazione per onde. Storicamente non è stato facile concludere che la luce si propaga per onde poiché come riteneva Newton, sostenitore della teoria corpuscolare, la luce era originariamente immaginata come insieme di particelle o corpuscoli.
Oggi sappiamo che nella sua trasmissione la luce presenta caratteristiche ondulatorie, in quanto dà luogo a tutti i fenomeni peculiari della propagazione per onde, mentre nell'interazione con la materia manifesta anche caratteristiche corpuscolari; i due aspetti, nella nostra esperienza quotidiana, sono mutuamente esclusivi ma, ovviamente, sono strettamente correlati; pertanto i due modelli, corpuscolare e ondulatorio, coesistono e sono atti ad inquadrare la duplice natura di onda e particella della luce. Per esempio spieghiamo il funzionamento di una sorgente laser parlando di emissione di fotoni, particelle o quanti di luce, da parte di atomi eccitati a livelli energetici superiori; mentre spieghiamo il fenomeno della interferenza della luce utilizzando termini tipici dei fenomeni ondulatori: fronte d'onda, frequenza e lunghezza d'onda.
Scopo della seconda fase O2 del percorso è evidenziare la natura ondulatoria della luce attraverso l'osservazione e lo studio dei fenomeni caratteristici delle onde osservati nella fase precedente: riflessione, rifrazione, interferenza e diffrazione, ai quali anche la luce dà luogo. Il fatto che tali fenomeni si verificano anche per la luce permette di considerare la luce come un insieme di onde, per quanto di natura diversa dalle onde meccaniche. Mentre le onde meccaniche necessitano di un mezzo materiale per propagarsi, la luce può propagarsi anche nel vuoto, come la luce del Sole che arriva a noi attraverso lo spazio.
Nella descrizione dei fenomeni luminosi usiamo il termine *fronte d'onda* e il termine *raggio,* come retta perpendicolare al fronte d'onda e rappresentante la direzione lungo cui la luce viaggia, già introdotti per le onde meccaniche. Nell'affermare "la luce viaggia" si intende la conoscenza della velocità finita della luce, che nel vuoto è pari a c.
Secondo il modello ondulatorio, anche per la luce vale la relazione $v = \lambda f$ dove v è la velocità della luce, λ e f sono rispettivamente la lunghezza d'onda e la frequenza della luce.

Riflessione

Parliamo di *riflessione* della luce quando la luce incontra un ostacolo sul suo percorso di propagazione e "torna indietro" in una direzione ben precisa (vedi fase O1). Nel caso della luce l'ostacolo è rappresentato tipicamente da uno specchio, o da una superficie lucida.
Le leggi della riflessione studiate per le onde meccaniche sono facilmente verificabili nel caso della luce: 1) la complanarità tra raggio incidente, raggio riflesso e normale alla superficie dello specchio; 2) l'uguaglianza tra angolo di incidenza e angolo di riflessione.
Il fenomeno può essere visualizzato utilizzando una sorgente di luce, come la lampada di un proiettore, da cui, attraverso un opportuno sistema di collimazione, si preleva un fascio luminoso, *pennello*, che viene direzionato su di uno specchio. Applicando i vari strumenti, mediante supporti

magnetici, al piano verticale di una lavagna il fascio di luce risulta radente parallelamente a tale piano e, poiché diffuso, visibile nel suo cammino (vedi Figg.1e 2). Dalle misure dell'ampiezza degli angoli di incidenza e di riflessione sul goniometro, applicato anch'esso alla lavagna, mediante calamite, si verifica la legge 2). L'uguaglianza tra angolo di incidenza e angolo di riflessione è sempre verificata qualunque sia la direzione dei raggi incidenti.

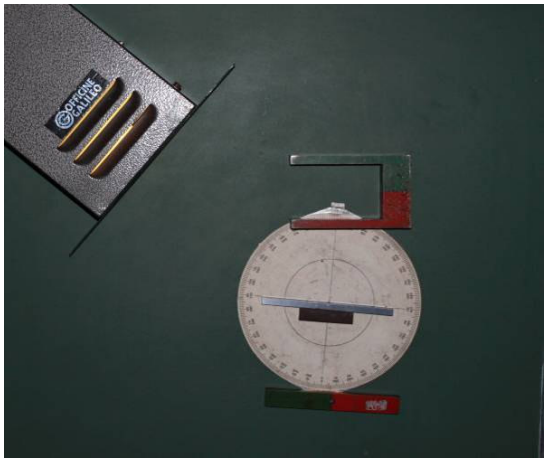
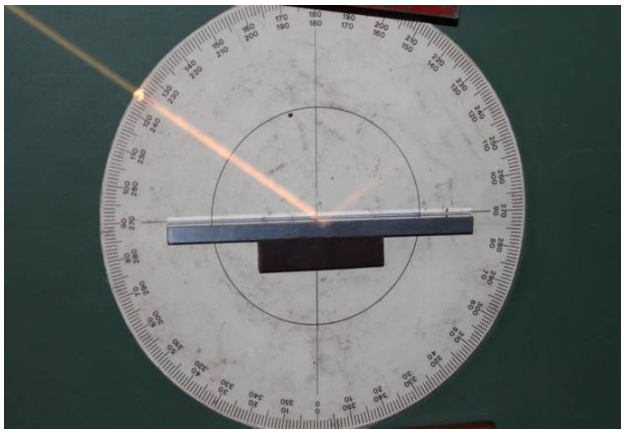


Figura 4



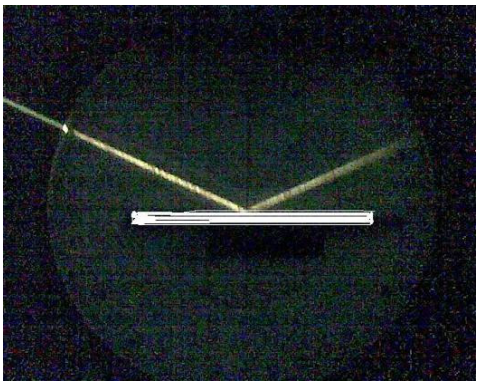
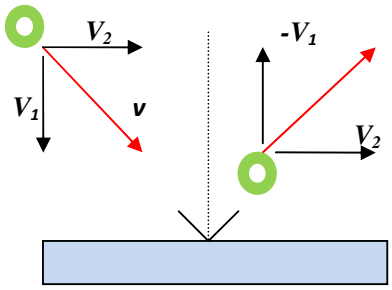


Figura 5

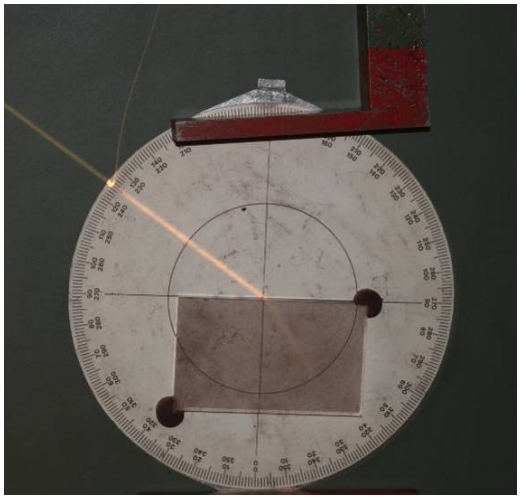


Newton riuscì a ben interpretare il fenomeno della riflessione descrivendo la luce in termini di corpuscoli: il comportamento di un raggio luminoso che si riflette su uno specchio piano è analogo al comportamento di una pallina che urta elasticamente contro una superficie rigida. Rappresentiamo una pallina che si muove verso una parete rigida con velocità $\boldsymbol{v}$ e consideriamo le due componenti in cui il vettore $\boldsymbol{v}$ può essere scomposto, perpendicolare e parallela alla parete, $\boldsymbol{v_1}$ e $\boldsymbol{v_2}$, rispettivamente. Se l'urto è perfettamente elastico, la componente della velocità perpendicolare alla parete subisce

un'inversione, $-v_1$, mentre v_2 rimane inalterata. La velocità risultante dopo l'urto avrà, pertanto, una direzione che forma, con la normale alla parete, un angolo uguale all'angolo formato dalla direzione della velocità incidente. Tale ipotesi corpuscolare, sostenuta da Newton in un suo trattato del 1704, si opponeva alla teoria ondulatoria precedentemente elaborata da Huyghens (vedi FASE O1).
Possiamo verificare il fenomeno della riflessione luminosa, utilizzando, anziché la lampada di un proiettore, una sorgente laser, per es. un laser a gas He-Ne: se sbattiamo leggermente la polvere di gesso di un cancellino, il cammino luminoso della luce rossa del laser è reso evidente dalla riflessione da parte delle particelle di gesso.
Parliamo di riflessione anche quando la luce incontra un ostacolo che non sia uno specchio o una superficie lucida, per es. un foglio di carta. A differenza dal caso di una superficie perfettamente riflettente, in questo caso, la luce che colpisce la carta, la cui superficie non è perfettamente liscia, viene in parte assorbita, in parte trasmessa e in parte riflessa. A causa della ruvidezza della superficie, la riflessione dei raggi non avviene in una direzione precisa, come per lo specchio, ma i raggi riflessi sono distribuiti in tutte le direzioni. Questo è il fenomeno della *riflessione diffusa* o *diffusione* della luce.

Rifrazione (trasmissione)

La rifrazione è il fenomeno a cui la luce dà luogo nella trasmissione da un mezzo ad un altro adiacente al primo. Se disponiamo di fronte al raggio luminoso della lampada o del laser una lastra di vetro o di plastica, nel passaggio dall'aria al vetro della lastra e successivamente dal vetro all'aria, la luce subisce un cambiamento di direzione di propagazione, come già abbiamo osservato per le onde meccaniche nell'ondoscopio quando la perturbazione ondosa attraversa zone a diversa profondità (vedi Fig.3). Passando dall'aria alla sostanza più densa, il raggio si avvicina alla normale alla superficie di separazione, mentre, quando emerge dalla sostanza più densa la sua direzione si allontana dalla normale.
Più "faticosa" fu per Newton l'interpretazione che egli diede, secondo il modello corpuscolare, del fenomeno della rifrazione della luce, ipotizzando la presenza lungo i raggi di luce di particelle aventi massa estremamente piccola e capaci di muoversi a velocità elevatissima.
D'altra parte, interpretando la luce che incide sulla superficie di separazione tra i due mezzi in termini di fronti d'onda, in accordo al modello di Huyghens, facilmente si giustifica il cambio di direzione come effetto della differenza delle velocità della luce nei due mezzi materiali, in uno schema analogo a quello visto per le onde meccaniche. La rifrazione della luce avviene secondo le leggi: 1) la complanarità dei raggi incidente e rifratto, cioè trasmesso nel secondo mezzo, con la normale alla superficie di separazione tra i due mezzi; 2) la legge di Snell che descrive la direzione di propagazione nei due mezzi: $sen\theta_1/sen\theta_2= v_1/v_2$, dove θ_1 e θ_2 sono rispettivamente l'angolo di incidenza e l'angolo di rifrazione e v_1 e v_2 le velocità della luce nei due mezzi rispettivamente.
Si definisce indice di rifrazione n di un materiale il rapporto $\sin\theta_o/\sin\theta_1$ relativo al passaggio della luce dal vuoto al materiale considerato. Si ha quindi $n=c/v$ dove c è la velocità della luce nel vuoto e v è la velocità della luce nel materiale considerato. Si ha sempre $n>1$, cioè la velocità della luce nei mezzi materiali è sempre minore della velocità nel vuoto, e più grande è n più il mezzo è rifrangente e dunque più bassa è la velocità della luce in esso. Pertanto la luce passando dall'aria al vetro rallenta. Per il passaggio da un mezzo materiale ad un altro, la legge della rifrazione si può allora scrivere: $sen\theta_1/sen\theta_2= n_2/n_1$, dove n_2 e n_1 sono gli indici di rifrazione delle due sostanze adiacenti.
In generale la velocità della luce in una sostanza dipende dalle proprietà della sostanza stessa e dalla frequenza f della luce incidente attraverso l'indice di rifrazione, $n(f)$, che, in generale varia con la frequenza.



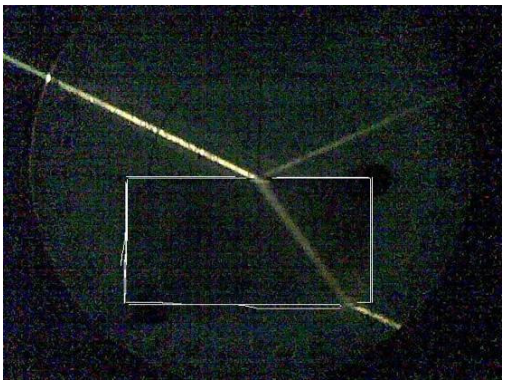
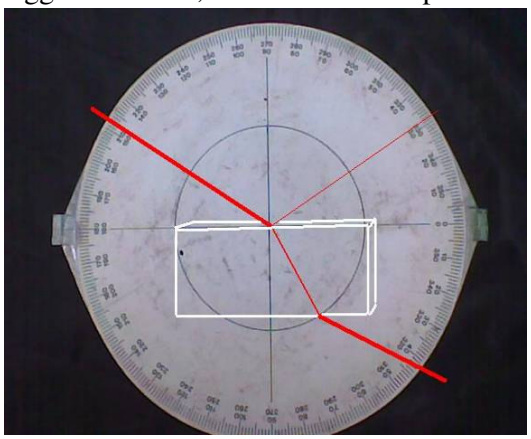


Figura 6

Nella foto a sinistra della Fig.3 è visibile il raggio trasmesso attraverso la lastra di vetro e il corrispondente cambio di direzione rispetto alla normale alla superficie di separazione aria-vetro; nella foto a destra (scattata con un cellulare), è possibile anche osservare il raggio riflesso dalla superficie della lastra. Se confrontiamo la luminosità del raggio trasmesso relativamente a quella del raggio incidente, notiamo come la prima sia sensibilmente più debole. L'intensità luminosa è legata all'energia trasportata dall'onda. Interpretiamo la diminuita intensità del raggio di luce nel vetro, come dovuta sia alla presenza del raggio riflesso sia all'assorbimento da parte del mezzo materiale dell'energia trasportata dalla luce. L'assorbimento della luce può essere meglio messo in evidenza, aumentando lo spessore della lastra attraversata dalla luce (per es. affiancandone due) e osservandone la luminosità lungo il percorso.
Nello schema 2 è raffigurata la situazione complessiva dei fenomeni di riflessione e di rifrazione.



Schema 2

Interferenza

Come per le onde elastiche (vedi FASE O1), anche le onde luminose danno luogo a fenomeni di interferenza, nel senso che si producono variazioni nell'intensità totale della luce per effetto della sovrapposizione, nella stessa regione di spazio, di due o più onde indipendenti che si propagano in linea retta. Come per le onde meccaniche, condizione necessaria per l'interferenza è che le onde interferenti siano generate da sorgenti coerenti, che presentano cioè una relazione ben definita tra le rispettive fasi. E' possibile osservare l'interferenza luminosa, riproducendo l'esperimento, dapprima ideato da T. Young nel 1802: allineando una sorgente di luce di fronte ad una doppia fenditura si raccoglie l'immagine che si forma su di uno schermo posto dietro alle due fenditure. La foto della Fig.4 riproduce la strumentazione usata nel nostro esperimento: un sostegno con doppia fenditura a

distanza regolabile mediante la vite micrometrica, costruito su un modello francese della metà del XIX secolo (Museo di fisica).

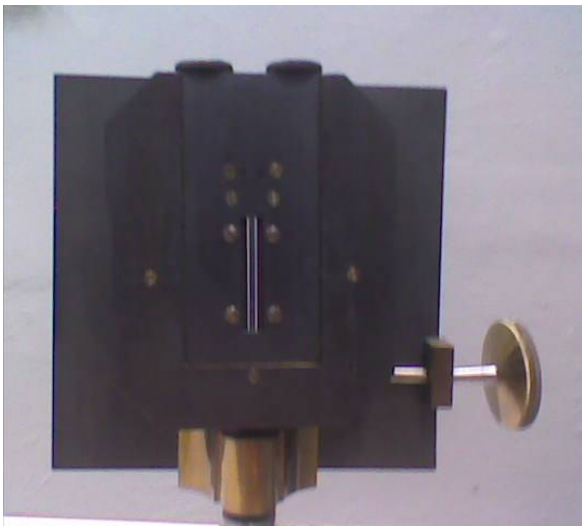
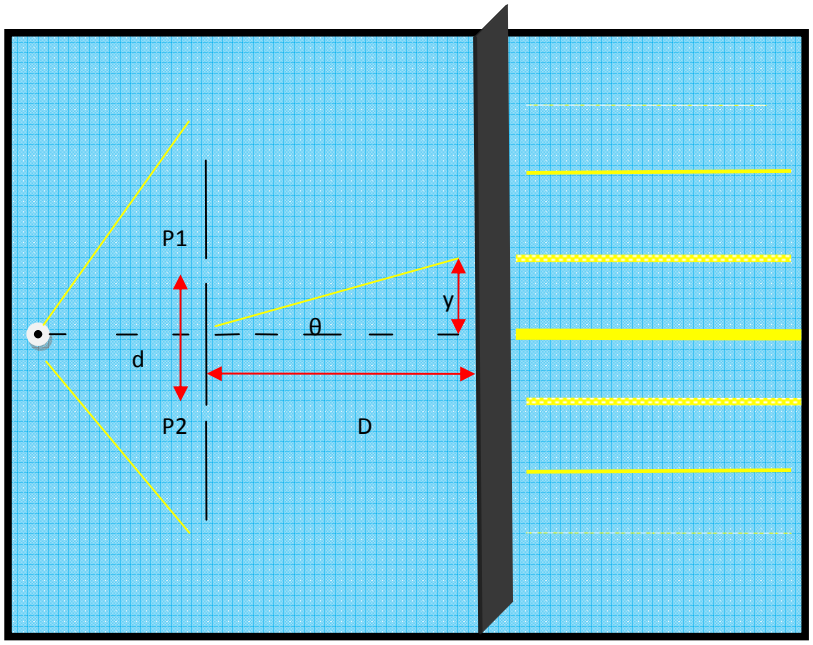


Figura 7

Se si copre una delle due fenditure, sullo schermo appare l'immagine della luce diffusa dall'unica fenditura illuminata, ma se entrambe sono illuminate, sullo schermo si forma una figura di interferenza che, nel caso in cui la sorgente è di luce monocromatica, come per la luce laser, consiste di un'alternanza di zone (*frange*) chiare e scure, che riproducono la forma delle fenditure e che corrispondono alle zone di interferenza costruttiva e distruttiva rispettivamente, per la cui formazione valgono le condizioni analoghe alle equazioni 1) e 2) di O1 per le differenze di cammino delle onde.
Le due fenditure (nello schema 3 indicate con P_1 e P_2) sono l'analogo dei due pennini pescanti nell'ondoscopio (vedi interferenza onde meccaniche FASE O1) in quanto si comportano come sorgenti di onde secondarie che si propagano in ogni direzione e che si sovrappongono nello spazio antistante lo schermo. Il fenomeno è tanto più evidente quanto più le fenditure sono sottili e vicine tra loro. Questa è l'interpretazione, analoga a quella data per l'interferenza delle onde elastiche, in accordo al modello ondulatorio di Huyghens. D'altra parte la teoria corpuscolare della luce non è in grado di spiegare né le figure di interferenza né le figure di diffrazione (vedi paragrafo successivo): da due sorgenti "corpuscolari" che inviano particelle di luce in tutte le direzioni ci si aspetterebbe la formazione di un'immagine luminosa in corrispondenza della zona centrale e una graduale riduzione della luminosità verso i bordi dello schermo. Un esperimento come questo consente di scegliere tra i due modelli della luce corpuscolare e ondulatorio. Con riferimento allo schema 3, in cui il diagramma riproduce la figura di interferenza, la frangia centrale luminosa è a metà tra le due fenditure, zona in cui la lunghezza del cammino della luce è uguale: poiché la luce proveniente dalle due fenditure viaggia verso lo schermo lungo cammini che possono essere considerati tra loro paralleli ed è in fase, lo sarà anche nella zona centrale che, pertanto, risulta di interferenza costruttiva. La successiva frangia luminosa si ha quando la differenza di cammino della luce proveniente dalle due fenditure è uguale ad una lunghezza d'onda; in generale le frange luminose di interferenza costruttiva hanno luogo quando la differenza di cammino è un multiplo intero di una lunghezza d'onda: $d\ sen\theta = m\lambda$ dove d è la distanza tra le fenditure; $d\ sen\theta$ è la differenza di cammino e m può avere valori interi relativi, con i valori positivi corrispondenti alle zone sopra e i valori negativi indicanti le zone sotto la frangia centrale rispettivamente.



Schema 3

Pertanto la zona luminosa più vicina al punto centrale si verifica ad un angolo θ dato dalla condizione sopra per $m = 1$ o $m = -1$. Poiché $sen\theta$ è minore o uguale a 1, risulta che d deve essere maggiore o uguale a λ per mostrare tali frange luminose.
Analogamente alla condizione 2) di O1, le zone scure di interferenza distruttiva si trovano in corrispondenza a differenze di cammino della luce uguali a multipli dispari di mezza lunghezza d'onda: $d\ sen\theta = (m-1/2)\lambda$.
Dalla figura di interferenza è possibile misurare la lunghezza d'onda della luce incidente. Indicando con y, la distanza lineare tra la frangia centrale e la prima frangia luminosa (vedi schema 3), si ha $y = D\ tg\theta$, dove D è la distanza tra le fenditure e lo schermo, se D, come accade, è molto più grande della distanza d tra le due fenditure. Dalle misure di y e D si ricava θ e, nota d, si può calcolare λ.
Nel caso in cui la luce incidente sia quella di una lampada, composta da onde di diversa lunghezza d'onda (vedi FASE R), ogni radiazione luminosa di data lunghezza d'onda forma linee di interferenza costruttiva in posizioni precise, con l'immagine centrale bianca e con bande colorate su entrambi i lati. Avendosi $sen\theta = m\lambda/d$, fatta eccezione per la frangia centrale, la posizione angolare delle diverse immagini risulta proporzionale alla lunghezza d'onda. La banda di colori che così si ottiene si chiama *spettro* e l'effetto è noto come *dispersione* (vedi FASE R). Il fenomeno è alla base, per es., della luce iridescente riflessa da un compact disk C.D.: sulla superficie metallica del C.D. sono incise sottilissime tracce concentriche che, se illuminate da una sorgente di luce, si comportano come tante sorgenti di luce identiche. Il numero di zone di interferenza costruttiva osservabili dipende dall'angolo che la luce incidente forma con la superficie del C.D.; se si inclina leggermente il disco, si osserva uno spostamento delle zone di interferenza costruttiva e distruttiva.

Diffrazione

Nell'esperimento di diffrazione delle onde superficiali dell'acqua nell'ondoscopio visto nella Fase O1, era stato posto un ostacolo sul percorso delle onde che lasciava però un'apertura, di cui poteva essere variata l'ampiezza, per consentire un parziale passaggio delle onde. Restringendo progressivamente l'apertura, la forma dell'onda che si propaga al di là dell'ostacolo cambia.

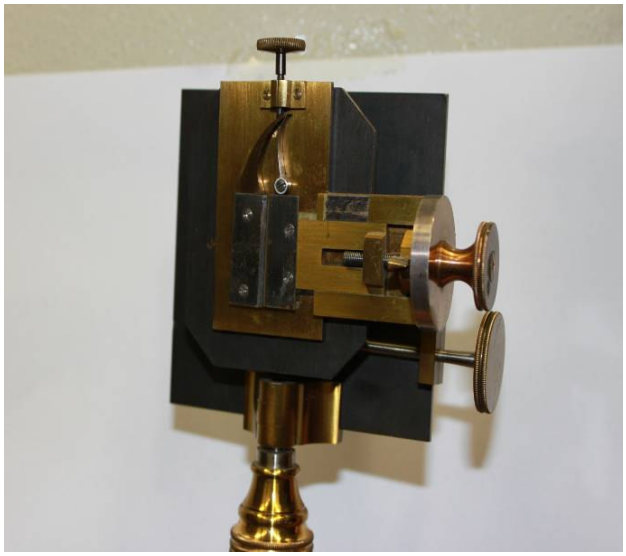


Figura 8

Quando la larghezza della fenditura è dello stesso ordine di grandezza della lunghezza d'onda, la fenditura si comporta come una nuova sorgente e l'onda non si propaga secondo il raggio individuato dalla fenditura, ma si allarga e tende ad interessare tutta la regione al di là dell'ostacolo.
Tale fenomeno, tipicamente ondulatorio, è spiegabile, secondo il modello di Huyghens, tenendo presente che ogni zona del mezzo di propagazione che viene raggiunta dall'onda è sollecitata ad oscillare come la sorgente da cui l'onda proviene, dando così origine ad onde secondarie dalla cui sovrapposizione prende forma un nuovo fronte d'onda. La luce dà luogo allo stesso fenomeno quando un ostacolo o un'apertura intercettano il suo cammino e, benché non siano direttamente visibili gli inviluppi dovuti all'interferenza delle onde secondarie generate dai punti dell'ostacolo o dell'apertura, possono essere bene evidenziati gli effetti di tale interferenza raccogliendo la corrispondente figura su uno schermo posto a distanza grande rispetto alle dimensioni dell'ostacolo o alla larghezza della fenditura.
Per studiare la diffrazione della luce, si esamina il comportamento su uno schermo di un fascio di luce monocromatica (luce laser) che attraversa una singola piccola fenditura. In Fig.5 è riportata la foto dell'apertura ad ampiezza variabile utilizzata nell'esperimento (modello del XIX secolo, conservato nel Museo di fisica).

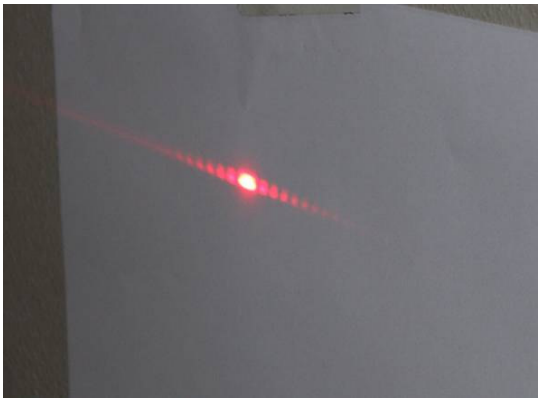
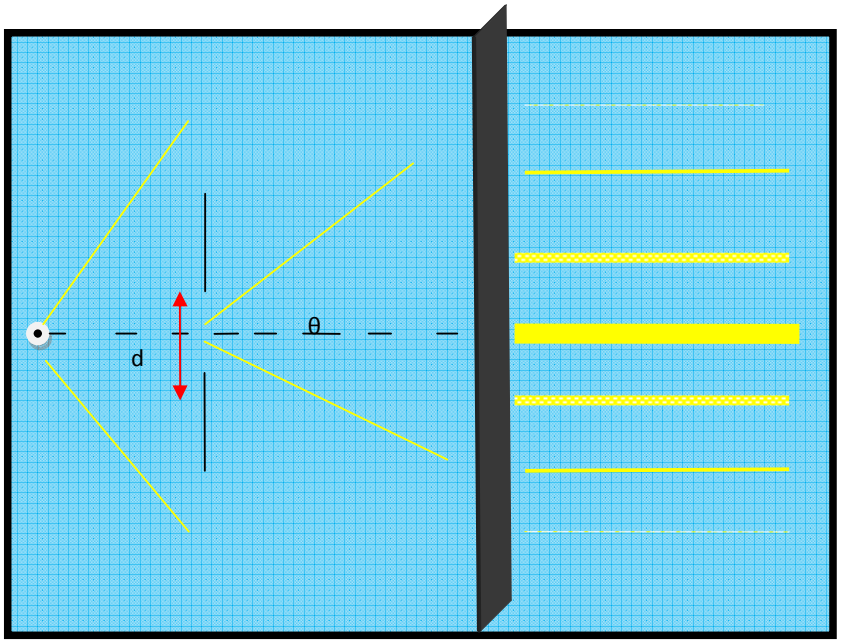


Figura 9

La figura di diffrazione, generata dall'interferenza tra le onde secondarie, mostra l'alternanza di frange luminose e frange scure, con la frangia centrale luminosa e le altre zone luminose disposte simmetricamente ai lati della centrale e di intensità decrescente verso i bordi dello schermo (Fig.6). L'effetto è tanto più evidente se si restringe progressivamente la fenditura a dimensioni confrontabili con la lunghezza d'onda della luce incidente. Se la fenditura è larga, l'onda che arriva l'attraversa con una piccola deflessione, se invece è stretta, agisce come una sorgente puntiforme e la luce si propaga su un intervallo di angoli più ampio, pertanto una fenditura minore produce una frangia centrale più larga ed una più ampia figura di diffrazione.



Schema 4

Con riferimento allo schema 4, la posizione della prima frangia scura può essere determinata considerando la differenza di cammino percorso da coppie di onde interferenti provenienti dalla parte alta e dalla parte bassa della fenditura. La condizione per le frange scure risulta: $d\ sen\theta = m\lambda$, dove d è l'ampiezza della fenditura, m numero intero relativo che conta simmetricamente le zone scure a partire dalla frangia centrale e λ è la lunghezza d'onda della luce incidente. All'aumentare di λ, aumenta l'angolo del quale si incurvano le onde.
Gli effetti della diffrazione della luce sono generalmente molto piccoli, se paragonati a quelli prodotti dagli altri tipi di onde quali le onde sonore o le onde sull'acqua. Ciò è dovuto alla differenza significativa tra i valori di lunghezza d'onda delle onde sonore, per esempio, e delle onde luminose: circa un metro per il suono e circa 10^{-7} m per la luce.

Nel seguito, allo scopo di studiare gli effetti termici della luce, ci riferiremo alla sua natura ondulatoria, utilizzando il concetto di raggio per descriverne la propagazione in linea retta e trascurando gli effetti di interferenza e diffrazione, poiché l'ordine di grandezza delle lunghezze d'onda considerate è piccolo in confronto alle dimensioni degli oggetti utilizzati.