

ONDE

SCOPO: osservazione di fenomeni ondosi tramite l'ondoscopio.

MATERIALE UTILIZZATO:

- Ondoscopio;
- Accessori ondoscopio: 2 percussori a pallina, specchio parabolico, specchio piano, 2 ostacoli metallici grandi, un ostacolo piccolo, triangolo in plexiglass;
- Foglio A3;
- Trasformatore;
- Becker di vetro;
- Variac;
- Acqua;
- Righello.



PREMESSA TEORICA

Per andare ad effettuare questa esperienza è, innanzitutto, necessario introdurre i concetti base di onda. Onda è considerato ogni fenomeno periodico che si propaga trasmettendo energia e non materia. Queste possono essere divise secondo diversi criteri: in base alla loro dimensione e quindi si diranno *monodimensionali* (onda ottenuta per esempio quando si tira una molla), *bidimensionali* (quando si lancia un sasso nell'acqua) e *tridimensionali* (voce); oppure in base alla direzione in cui si propagano e quindi si diranno *onde longitudinali* cioè onde la cui oscillazione avviene nella stessa direzione della propagazione dell'onda (come la voce) e *onde trasversali* cioè onde la cui oscillazione avviene in direzione trasversa (perpendicolare) rispetto alla direzione in cui si propaga l'onda (come la luce). I **FRONTI D'ONDA** sono l'insieme dei punti dell'onda che oscillano nello stesso modo: quando questi hanno la forma di sfere concentriche si originano onde *sferiche* cioè che si propagano in tutte le direzioni e hanno raggi uscenti dall'origine; quando i fronti d'onda sono piani e paralleli si originano onde *piane* cioè che si propagano in un'unica direzione e hanno i raggi paralleli tra di loro e perpendicolari ai fronti d'onda. Per raggio si intende le rette che indica la propagazione dell'onda.

Considerata un'onda periodica cioè il cui profilo si ripete identico a distanze regolari, si dice onda armonica quell'onda il cui profilo è dato dall'unione tra il moto armonico (MA) lungo l'asse y e il moto rettilineo uniforme (MRU) lungo l'asse x. Il grafico sarà un'onda sinusoidale. Osservando quindi l'andamento dell'oscillazione in un istante di tempo, potremo notare che l'onda ha una *lunghezza* λ [m] cioè lo spostamento dopo cui l'onda si ripete (la distanza tra due creste, punto più alto dell'onda, o due ventri, punto più basso dell'onda). Se invece osserviamo l'andamento dell'oscillazione nel tempo, potremo notare che l'onda ha un *periodo* T [s] cioè la durata di un'oscillazione completa (tempo necessario per cui l'onda ritorna nel punto di partenza). La *frequenza*, misurata in Hertz [Hz], è il numero di cicli nell'unità di tempo e viene espressa dall'equazione:

$$f = \frac{1}{T} \text{ [Hz]}$$

Essendo l'onda armonica, possiamo introdurre il concetto di *pulsazione* dell'onda ω [rad/s] che indica la velocità con cui viene effettuata un'oscillazione completa nel moto armonico (MA); ω viene definita a partire dalla velocità angolare nel moto circolare uniforme (MCU). Viene espressa dalla formula:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$$

La *pulsazione spaziale*, anche detta numero dell'onda o vettore d'onda, è il numero di oscillazioni di un'onda nell'unità di lunghezza. Viene espressa dalla formula:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \left[\frac{rad}{m} \right]$$

L'onda si propaga sia nello spazio che nel tempo e quindi deve essere espressa in funzione di due variabili:

$$y = f(x, t) = A \sin(kx - \omega t)$$

Dove A è l'*ampiezza* d'onda cioè la differenza tra la cresta (valore massimo dell'onda) e il valore d'equilibrio dell'onda ($y=0$).

Dal concetto base di velocità possiamo ricavare la formula:

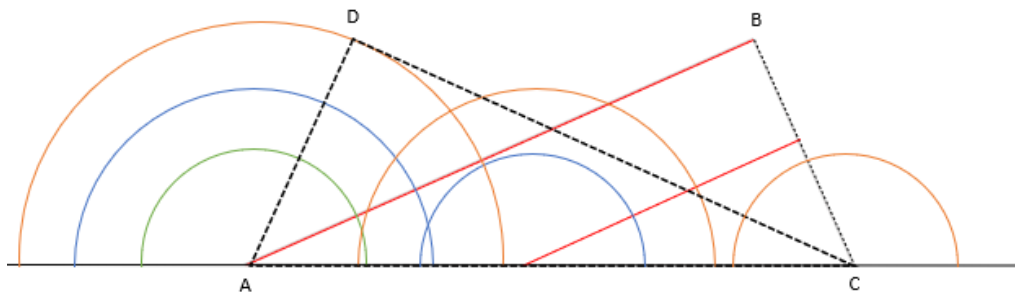
$$v = \frac{\omega}{k} \left[\frac{m}{s} \right]$$

Possiamo inoltre notare come la relazione tra ω e k influenzi la direzione dell'onda: si parla di *onda progressiva* quando $v > 0$ (ω e k concordi); di *onda regressiva* quando $v < 0$ (ω e k discordi).

Il **Principio di Huygens-Fresnel** afferma che ogni punto percusso da un'onda si trasforma a sua volta in sorgente di onde sferiche, tuttavia, perché ciò avvenga, è necessario che il mezzo sia *omogeneo*, cioè che la sua densità sia costante in ogni suo punto, e *isotropo*, cioè che sia uguale in ogni direzione. Quindi, si origineranno onde piane se i fronti d'onda erano piani, onde sferiche con raggio costante se i fronti erano sferici. Da questo principio possiamo ricavare tre fenomeni ondosi, che riguardano anche la luce.

La *propagazione rettilinea delle onde* cioè la propagazione di onde con raggi rettilinei.

La *riflessione delle onde* che dimostra che l'angolo di incidenza è pari a quello di riflessione: infatti, quando un fronte d'onda piano AB incide su una superficie riflettente, il punto A di incidenza diventa sorgente di onde sferiche che si propagano nello stesso mezzo e con la stessa velocità (il raggio dell'onda è uguale alla distanza tra due fronti d'onda); il punto B per giungere il punto C impiega lo stesso tempo del fronte d'onda a raggiungere il punto D tale che risulta essere $\overline{AD} = \overline{BC}$. I due triangoli originati sono dunque congruenti (sono rettangoli, hanno in comune \overline{AC} e $\overline{AD} = \overline{BC}$) e perciò ne consegue che $\hat{i} = \hat{r}$ dove $\hat{i} = \widehat{BAC}$ e $\hat{r} = \widehat{DCA}$



La *rifrazione delle onde* dimostra che $\frac{\sin \hat{i}}{\sin \hat{r}} = \frac{v_1}{v_2}$. Se consideriamo un fronte d'onda piano AB che incide su una superficie di separazione tra i mezzi 1 e 2, il punto A di incidenza diventa sorgente di onde sferiche che si propagano nel mezzo 2 con velocità diversa da quella che avevano nel mezzo 1 (il raggio dell'onda è minore della distanza di due fronti d'onda); l'onda nel primo mezzo percorre un tratto $\overline{BC} = v_1 t$, nel secondo mezzo un tratto $\overline{AD} = v_2 t$ con $v_2 < v_1$: ne consegue che l'inclinazione della seconda onda è diversa da quella della prima, infatti: $\overline{AD} = \overline{AC} \sin \hat{r}$ e $\overline{BC} = \overline{AC} \sin \hat{i}$ ($\hat{i} = \widehat{BAC}$ e $\hat{r} = \widehat{DCA}$).

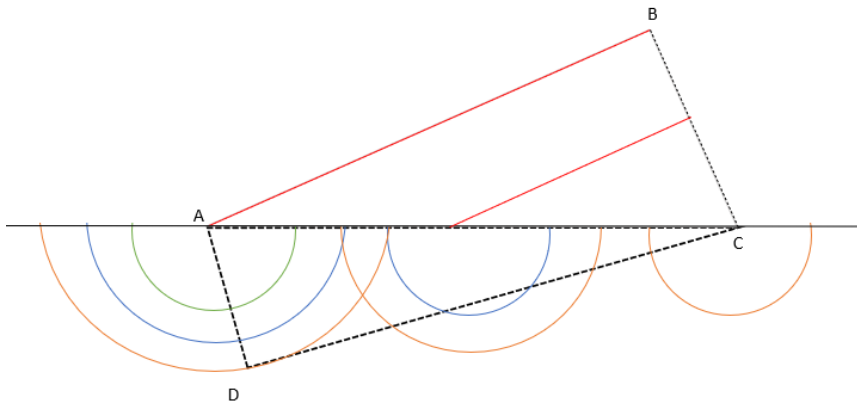
Facendo il rapporto tra \overline{BC} e \overline{AD} si ottiene

$$\frac{\sin \hat{i}}{\sin \hat{r}} = \frac{v_1}{v_2} = \text{cost}$$

Questa formula coincide con la legge di Snell, infatti, ponendo $n = \frac{c}{v}$ dove n è l'indice di rifrazione assoluto (cioè di un mezzo rispetto al vuoto) si ottiene $v = \frac{c}{n}$ quindi risulta:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

Ponendo $n_{21} = \frac{n_2}{n_1}$ si giunge al fatto che l'indice di rifrazione n_{21} è uguale al rapporto tra le velocità delle onde nei due mezzi.



Un altro fenomeno ondoso che si può ricavare dal principio di Huygens-Fresnel è la *diffrazione dell'onda*. Questa avviene per esempio quando un'onda piana si scontra su una parete con un foro e quest'ultima diventerà, quindi, sorgente di nuove onde sferiche. Il fenomeno è possibile solo se il foro è molto piccolo e risulta essere simile al valore della lunghezza d'onda (λ) al contrario, infatti, se il foro fosse tanto maggiore rispetto a λ allora si originerebbero nuove onde piane.

Quando due o più onde si sovrappongono danno origine ad un' *interferenza*. Considerando S_1 e S_2 due sorgenti coerenti cioè che emettono onde con la stessa ampiezza, frequenza, lunghezza d'onda e fase iniziale, e P il punto di intersezione delle due onde nel loro valore d'equilibrio ($y=0$). Chiamati S_1P e S_2P i rispettivi cammini ottici, quando le onde di S_1 e S_2 si incontrano si crea un' *interferenza costruttiva*:

$$|\overline{PS_1} - \overline{PS_2}| = n\lambda \text{ con } n \in \mathbb{N}$$

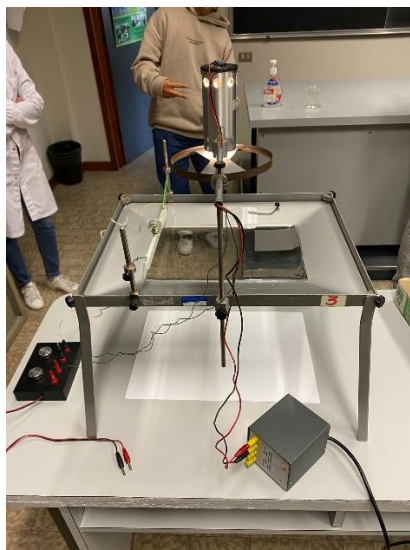
La differenza dei cammini ottici deve essere un numero intero di λ se no le due creste delle onde o le due gole non si incontrerebbero nell'interferenza costruttiva. Dopo il punto P, le due onde si sommano perciò λ raddoppia. Al contrario, se due onde si incontrano quando una è nella cresta e l'altra nella gola, l' *interferenza è distruttiva* e perciò le due onde si annullano:

$$|\overline{PS_1} - \overline{PS_2}| = n\lambda + \frac{\lambda}{2} = (2n + 1) \frac{\lambda}{2}$$

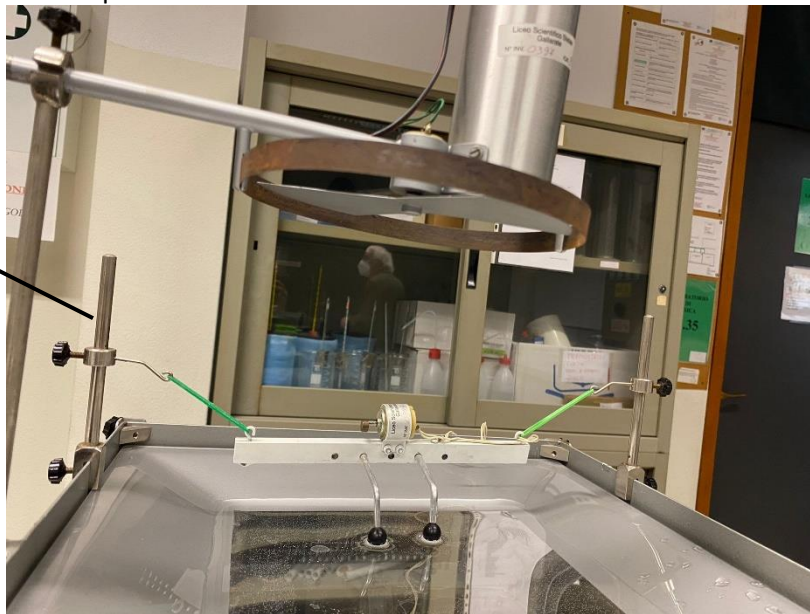
La differenza dei cammini ottici deve essere sempre un numero dispari di $\lambda/2$.

L'iperbole è la funzione che rappresenta le *figure di interferenza* cioè l'insieme dei punti d'interferenza che possono essere sia costruttivi che distruttivi, i fuochi di queste iperboli sono le sorgenti delle onde. Le frange d'interferenza sono l'insieme dei massimi e dei minimi dell'interferenza.

L'ondoscopio è lo strumento che permette lo studio dei fenomeni ondulatori grazie alla sua capacità di "fermare" le onde.



Esso è formato da un contenitore, retto su quattro zampe, con fondo in plexiglas trasparente, all'interno del quale viene inserita l'acqua.

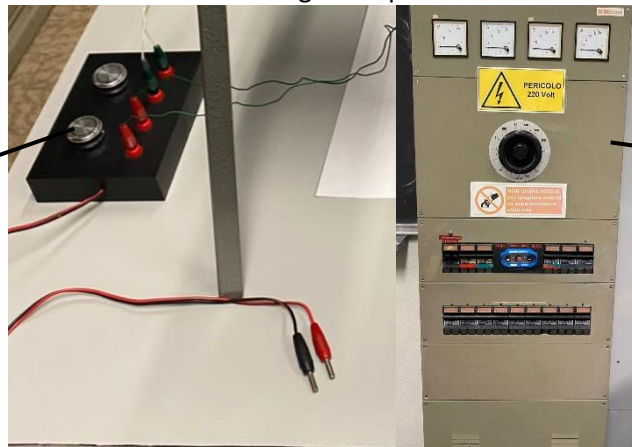


PIANTANA

Al bordo del contenitore giacciono 2 piantane che reggono un' asticella di metallo bianco, sospesa con l'ausilio di due elastici; sull'asta è collegato un motorino avente massa eccentrica (cioè il cui asse di rotazione non passa per il baricentro). Grazie al motorino che ruota per mantenere il baricentro, l'asta si muove su e giù facendo da percussore: colpendo l'acqua ripetutamente crea infatti delle onde piane.

L'asta è inoltre dotata di fori che permettono l'inserimento di uno o più percussori a pallina, che permettono la creazione di onde sferiche.

Il motorino è alimentato attraverso un cavo collegato ad una console elettrica: questa è formata da 2 manopole, chiamate areostati. Essi funzionano grazie alla corrente continua: hanno, quindi, due prese a banana con filo rosso e nero che vengono inserite rispettivamente nella presa del banco positiva e in quella negativa. Ogni banco del laboratorio di fisica è collegato e quindi alimentato da un variac centrale.

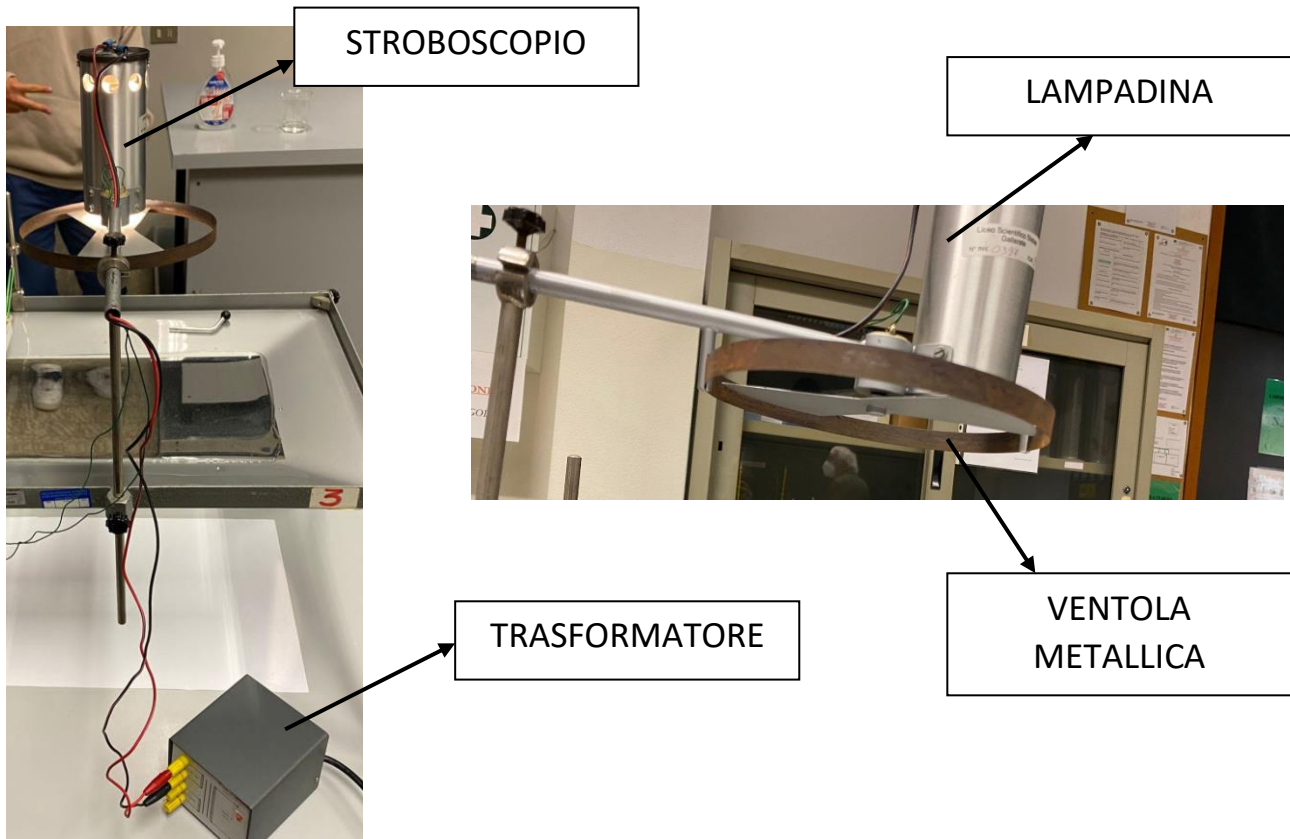


AEROSTATI

VARIAC

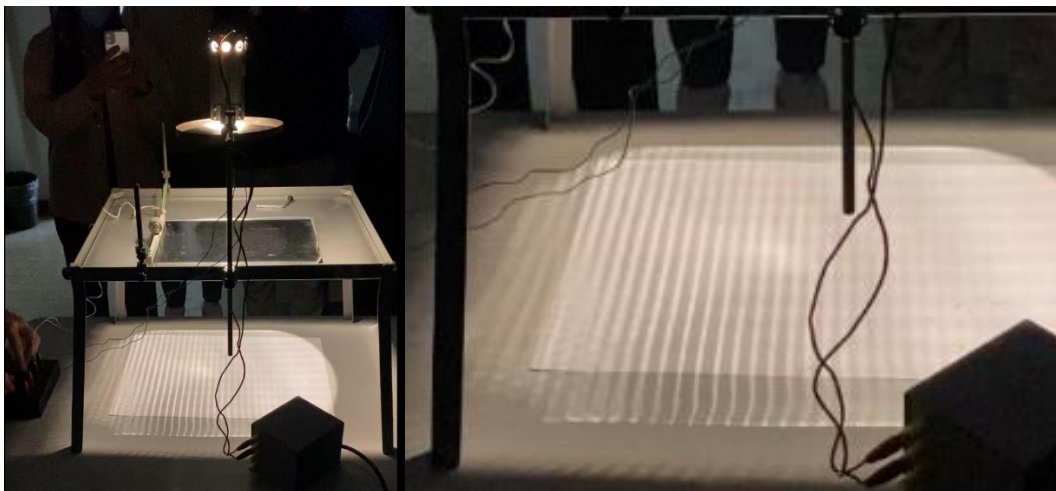
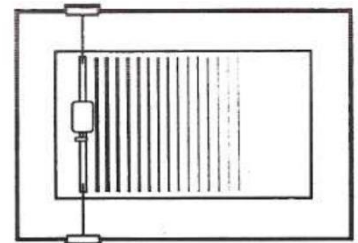
Il primo dei due areostati della console è collegato al motorino e permette di regolarne la velocità; il secondo invece permette di fare lo stesso con lo stroboscopio.

Lo stroboscopio è uno strumento che emette rapidi lampi di luce grazie a una lampadina al suo interno; questa è alimentata da corrente alternata a 220 V (volt) e collegata ad un normale alternatore. La luce viene interrotta ad intermittenza da un'elica metallica che viene azionata dalla console elettrica (sopra citata): lo stroboscopio, quindi, proietta la luce solo in certi istanti. Questo fa sì che se appoggiamo un foglio al banco di lavoro sotto la vaschetta dell'ondoscopio, regolando la frequenza dello stroboscopio uguale a quella del motorino ($f_s=f_M$), sul foglio si può osservare sempre un'onda ferma poiché vedo sempre e solo la cresta dell'onda (non vediamo il percorso perché la luce viene oscurata).

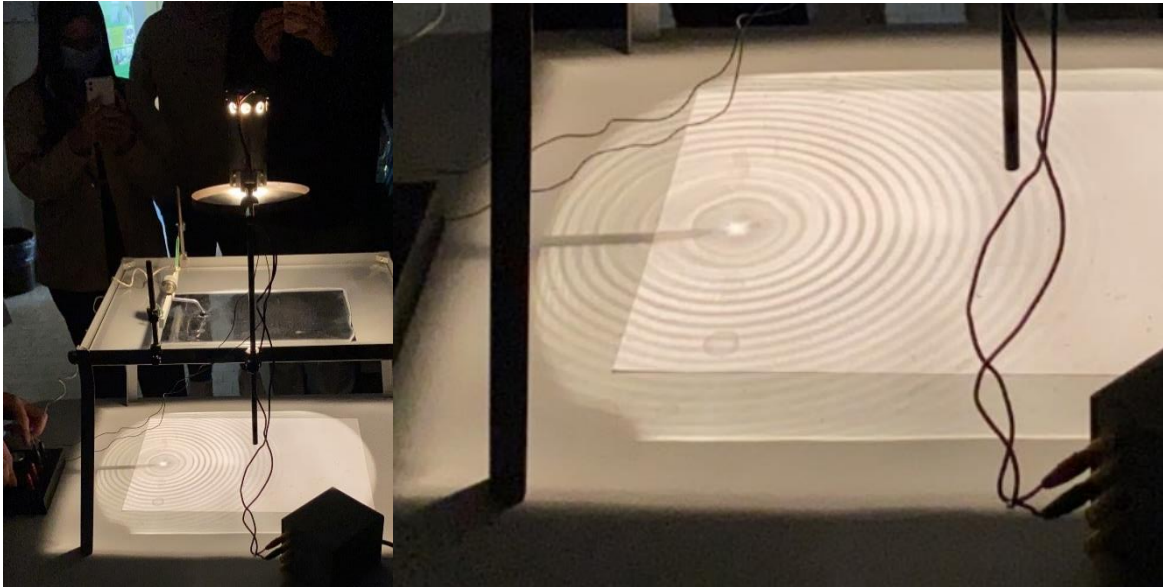
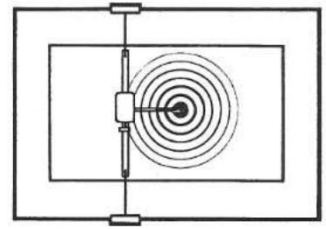


ESECUZIONE DELL'ESPERIENZA

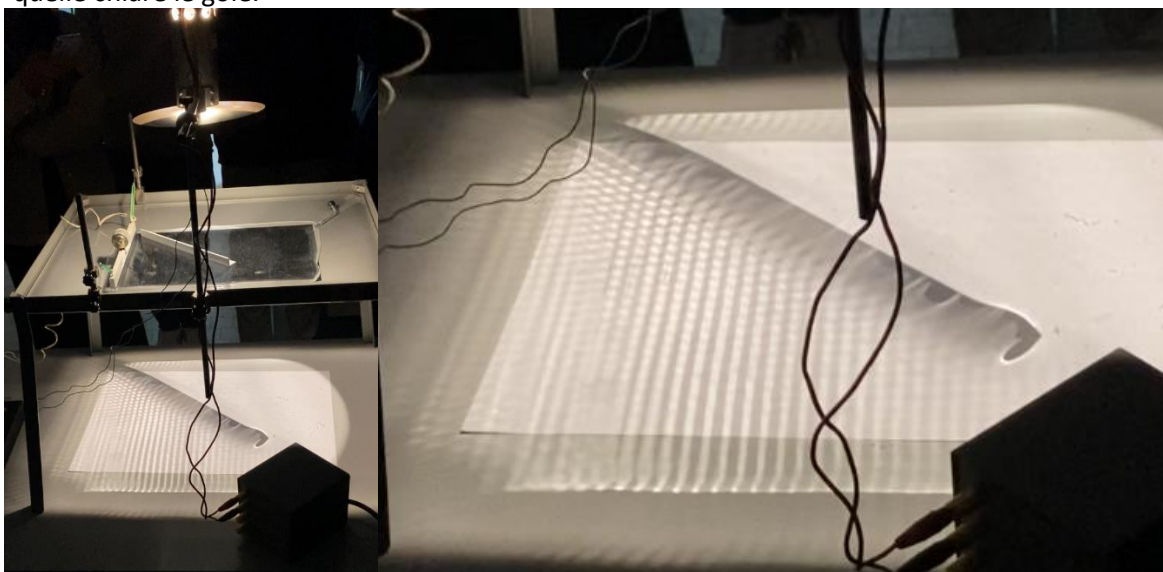
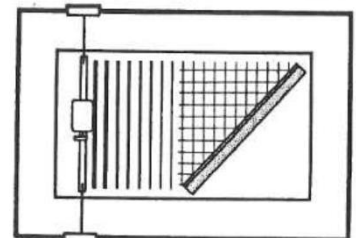
1. **ONDE PIANE:** dopo aver acceso l'ondoscopio collegandolo alla console elettrica e lo stroboscopio al trasformatore, posizionare l'asticella di metallo bianco a livello della superficie dell'acqua. Questa comincerà a produrre onde piane, ovvero onde aventi i fronti d'onda piani o retti. Facendo coincidere la frequenza dello stroboscopio con quella del motore, si può osservare che le onde risultano ferme e visibili sono da delle linee parallele e fisse, alternativamente in luce e in ombra. Le rette in ombra, più scure, rappresentano le creste dell'onda, mentre quelle in luce, cioè chiare, le gole. Inoltre, è ben visibile e misurabile la lunghezza d'onda λ , ovvero la distanza tra due linee scure o due chiare.



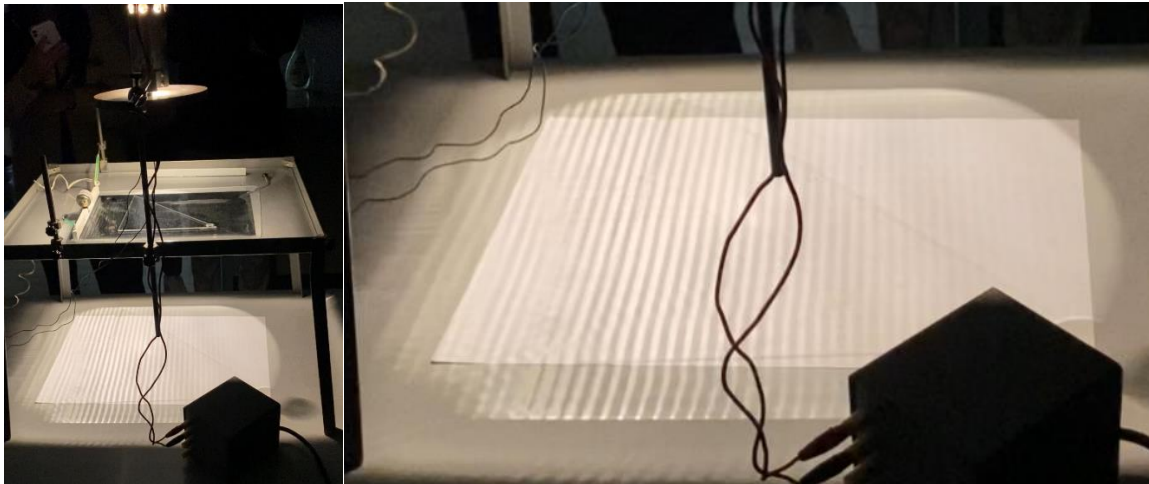
2. **ONDE SFERICHE:** agganciare al centro dell'asticella di metallo bianco il percussore a pallina e posizionarlo a livello dell'acqua, questo comincerà a produrre onde sferiche. Facendo coincidere la frequenza dello stroboscopio con quella del motore, le onde risulteranno ferme e vedremo soltanto delle circonferenze concentriche, che rappresentano i fronti d'onda, il cui centro corrisponde al percussore. Come nel fenomeno precedente, le circonferenze scure rappresentano le creste, quelle chiare le gole.



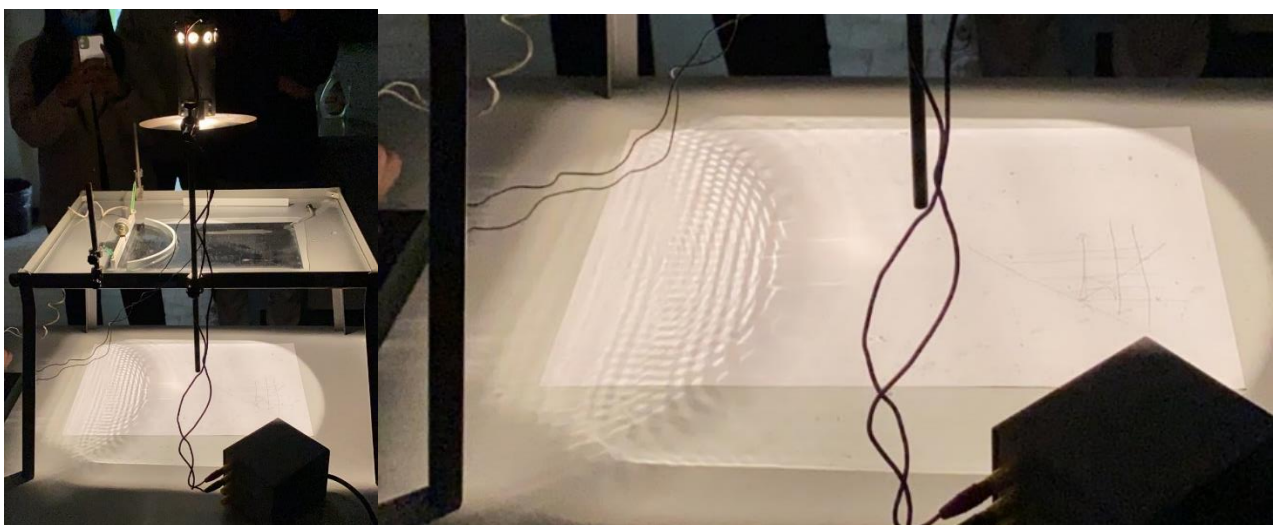
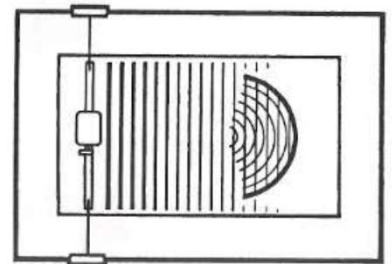
3. **RIFLESSIONE DI ONDE PIANE:** posizionare l'asticella di metallo bianco a livello della superficie dell'acqua: questa comincerà a produrre onde piane. Poi, posizionare nella vaschetta un'asta di metallo (inclinazione di circa 45°). Facendo coincidere la frequenza dello stroboscopio con quella del motore, le onde risulteranno ferme e vedremo proiettate le onde incidenti e quelle riflesse. Riportando i raggi sul foglio bianco sotto la vaschetta dell'ondoscopio, possiamo osservare come sia l'angolo d'incidenza che quello di riflessione risulta di 45° : quindi $\hat{i} = \hat{r}$. Come nei fenomeni precedenti, le linee scure rappresentano le creste, quelle chiare le gole.



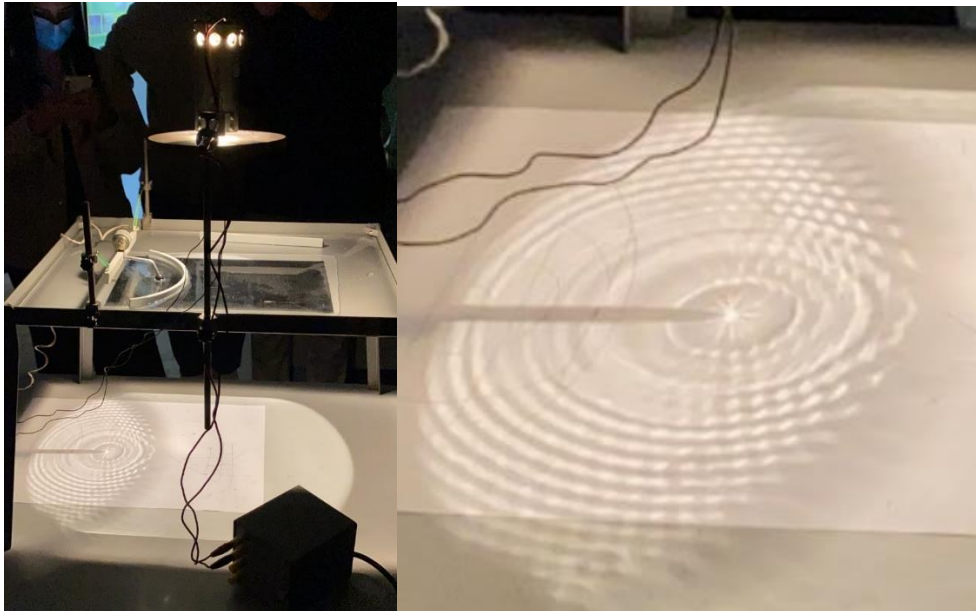
- 4. RIFRAZIONE:** posizionare l'asticella di metallo bianco a livello della superficie dell'acqua: questa comincerà a produrre onde piane. Poi, posizionare nella vaschetta un triangolo in plexiglass. Facendo coincidere la frequenza dello stroboscopio con quella del motore, le onde risulteranno ferme e vedremo proiettate le onde incidenti e quelle riflesse, che cambiano di qualche grado direzione rispetto alle prime. Il fenomeno è possibile perché l'acqua sopra il triangolo è molto meno profonda rispetto all'acqua nella vaschetta: la diversa profondità ci permette di distinguere due mezzi con diverso potere ottico. Come nei fenomeni precedenti, le linee scure rappresentano le creste, quelle chiare le gole.



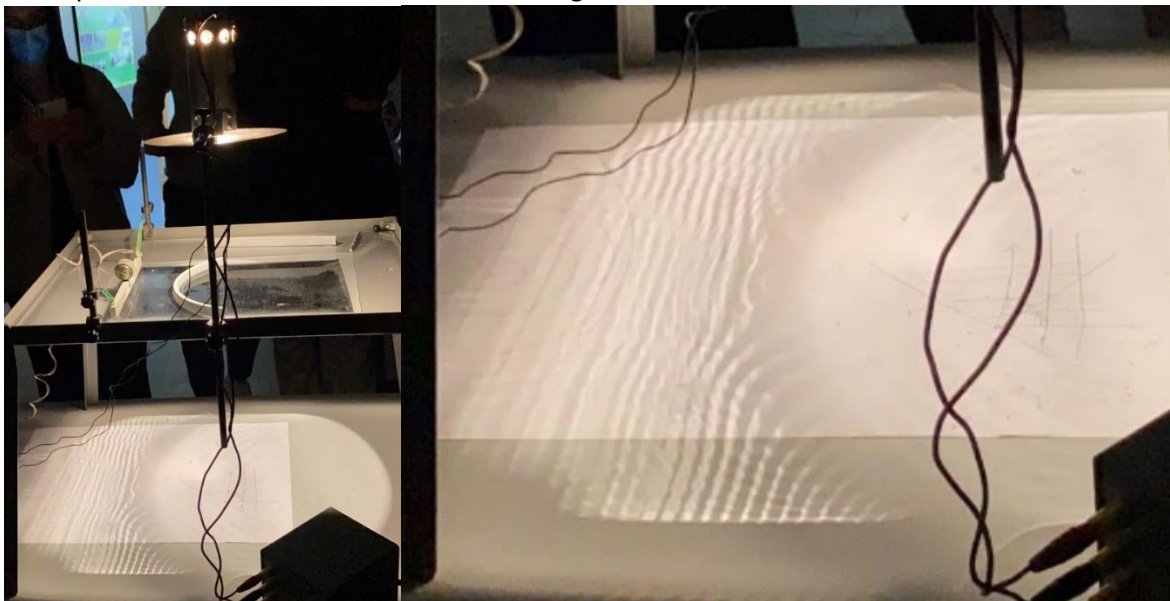
- 5. TRASFORMAZIONE DI ONDE PIANE IN ONDE SFERICHE:** posizionare l'asticella di metallo bianco a livello della superficie dell'acqua: questa comincerà a produrre onde piane. Poi, posizionare nella vaschetta uno specchio parabolico. Facendo coincidere la frequenza dello stroboscopio con quella del motore, le onde risulteranno ferme e notiamo che le onde piane prodotte dal percussore vengono riflesse dallo specchio e si trasformano in onde sferiche che convergono verso il fuoco della parabola. Onde piane incidenti → onde sferiche riflesse



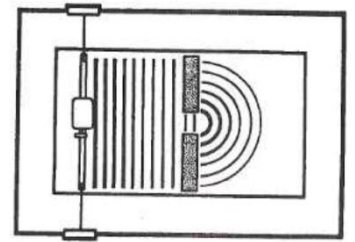
6. **TRASFORMAZIONE DI ONDE SFERICHE IN ONDE PIANE:** agganciare al centro dell'asticella di metallo bianco il percussore a pallina e posizionarlo a livello dell'acqua, questo comincerà a produrre onde sferiche. Poi, posizionare nella vaschetta uno specchio parabolico in modo tale che il percussore occupi il fuoco della parabola. Facendo coincidere la frequenza dello stroboscopio con quella del motore, le onde risulteranno ferme e notiamo che le onde sferiche prodotte dal percussore vengono riflesse dallo specchio e si trasformano in onde piane. onde sferiche incidenti → onde piane riflesse



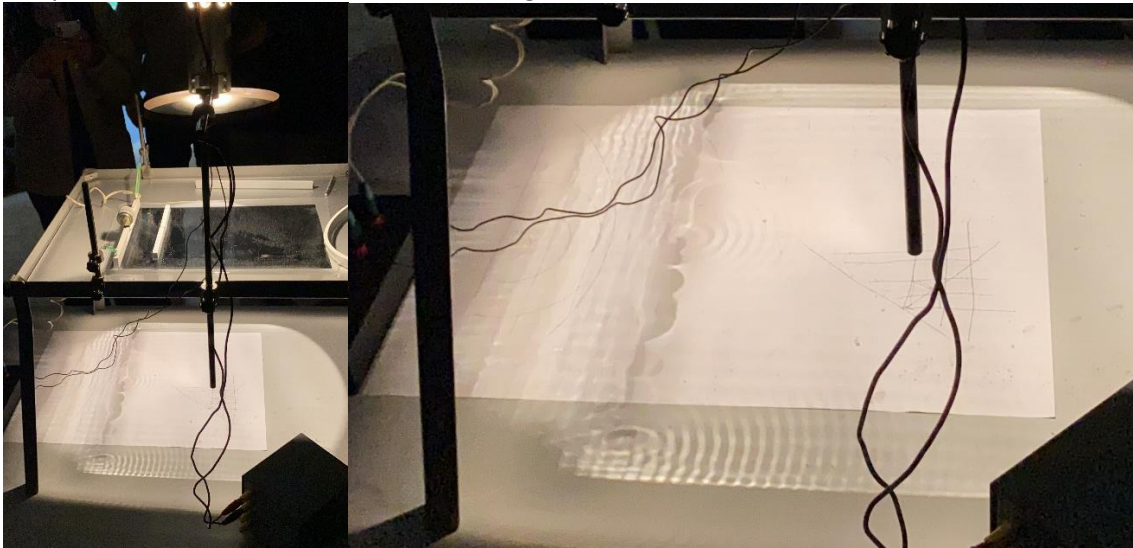
7. **ONDE CON SPECCHIO PARABOLICO GIRATO:** posizionare l'asticella di metallo bianco a livello della superficie dell'acqua: questa comincerà a produrre onde piane. Poi, posizionare nella vaschetta uno specchio parabolico girato (fuoco dalla parte opposta del percussore). Facendo coincidere la frequenza dello stroboscopio con quella del motore, le onde risulteranno ferme e notiamo che le onde piane prodotte dal percussore vengono riflesse dallo specchio e si trasformano in onde che divergono con sorgente nel fuoco, in questo caso virtuale in quanto non visibile. Onde piane incidenti → onde sferiche che divergono



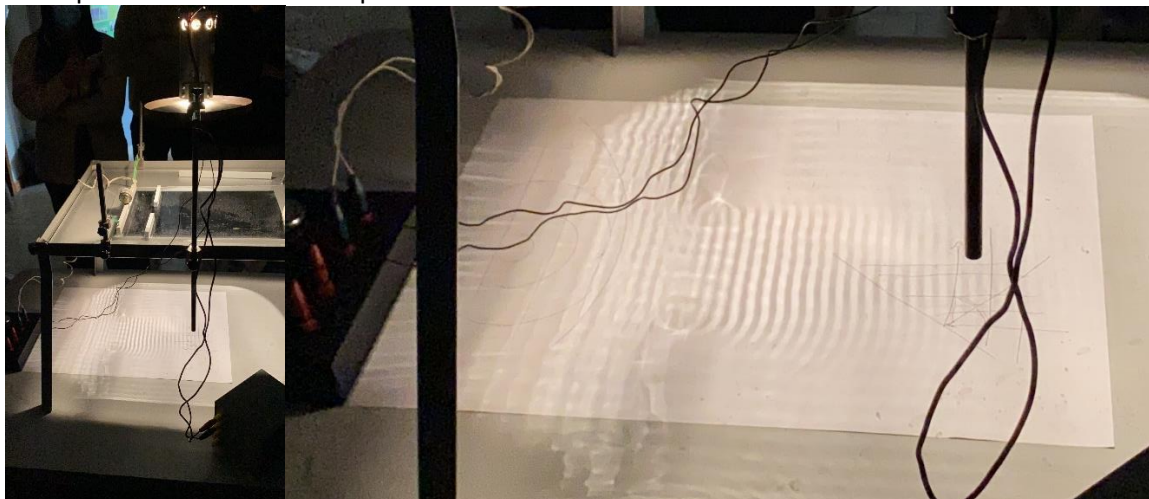
8. **DIFRAZIONE:** posizionare l'asticella di metallo bianco a livello della superficie dell'acqua: questa comincerà a produrre onde piane. Poi, posizionare nella vaschetta due asticelle di metallo con una fenditura tra un'asta e l'altra. Facendo coincidere la frequenza dello stroboscopio con quella del motore, le onde risulteranno ferme e vedremo proiettate le onde incidenti che, per aggirare l'ostacolo delle asticelle, si trasformano in onde sferiche. Infatti, la fenditura ma anche gli estremi delle asticelle diventano sorgenti di onde sferiche. Questo avviene se la fenditura è simile alla lunghezza d'onda. Nel caso in cui, invece, allontaniamo le due asticelle e, quindi, il foro risulta essere molto maggiore rispetto a λ , non si verificherà più il fenomeno della diffrazione se non vagamente ai bordi. In questo caso, l'onda piana passa l'ostacolo e rimane piana.



Onde piane incidenti → onde sferiche con sorgente la fenditura



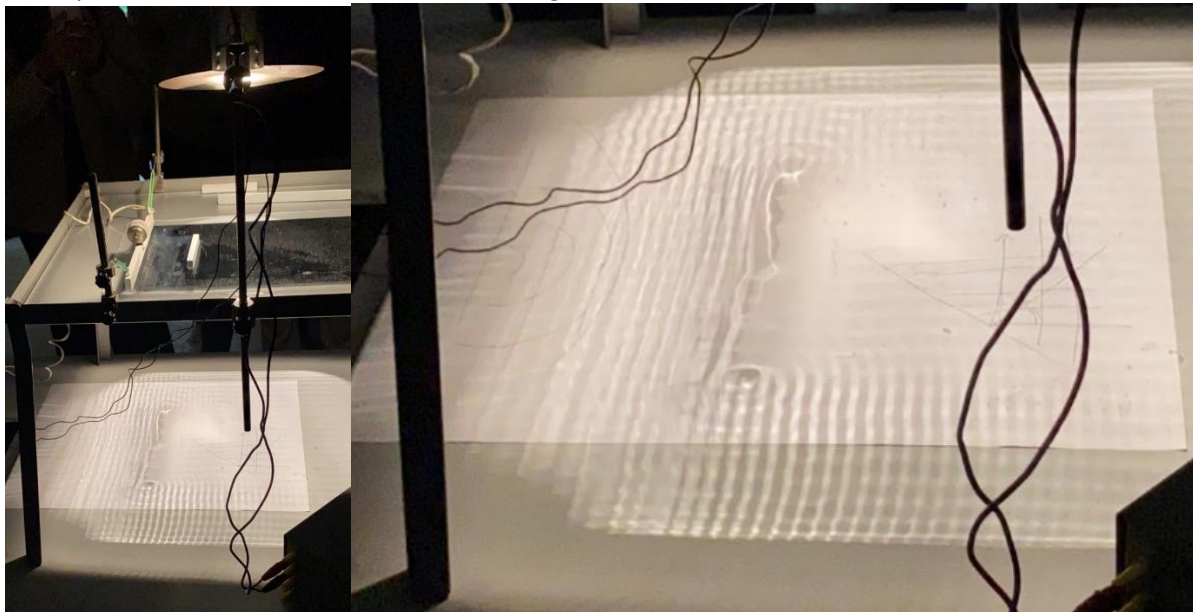
Onde piane incidenti → onde piane



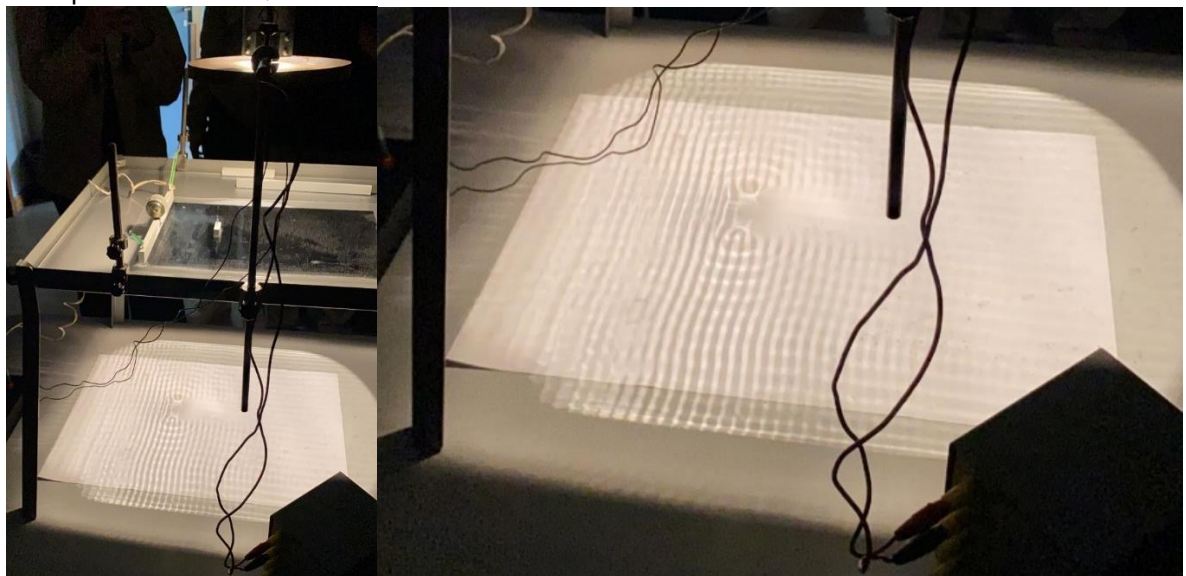
9. **ONDE PIANE CHE DIVERGONO E SUPERANO UN OSTACOLO:** posizionare l'asticella di metallo bianco a livello della superficie dell'acqua: questa comincerà a produrre onde piane. Poi, posizionare nella vaschetta una asticella di metallo. Facendo coincidere la frequenza dello stroboscopio con quella del motore, le onde risulteranno ferme e vedremo proiettate le onde piane incidenti che, in corrispondenza dell'ostacolo, si diffrangono ai suoi bordi. Le onde piane, quindi, si trasformano in onde sferiche per aggirare l'ostacolo ai due lati. Diversamente accade se l'ostacolo da superare è molto piccolo: in questo caso vedremo sempre la diffrazione ai lati dell'asticella però,

poi, le due onde sferiche create convergono al di là dell'ostacolo e interferiscono; il fenomeno di interferenza tra le due onde è dovuto al fatto che esse sono coerenti in quanto si tratta, in realtà, della stessa onda che è stata divisa in due per superare l'ostacolo.

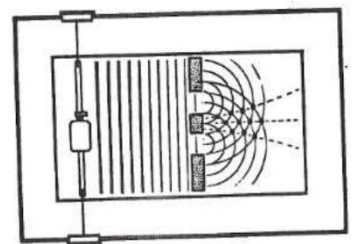
Onde piane incidenti → onde sferiche con sorgenti i bordi dell'asticella

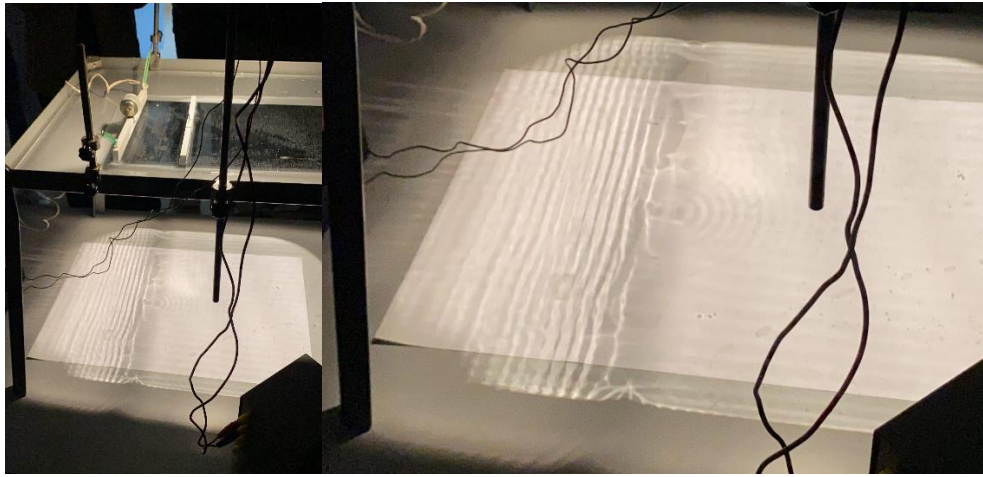


Onde piane incidenti → onde sferiche che interferiscono

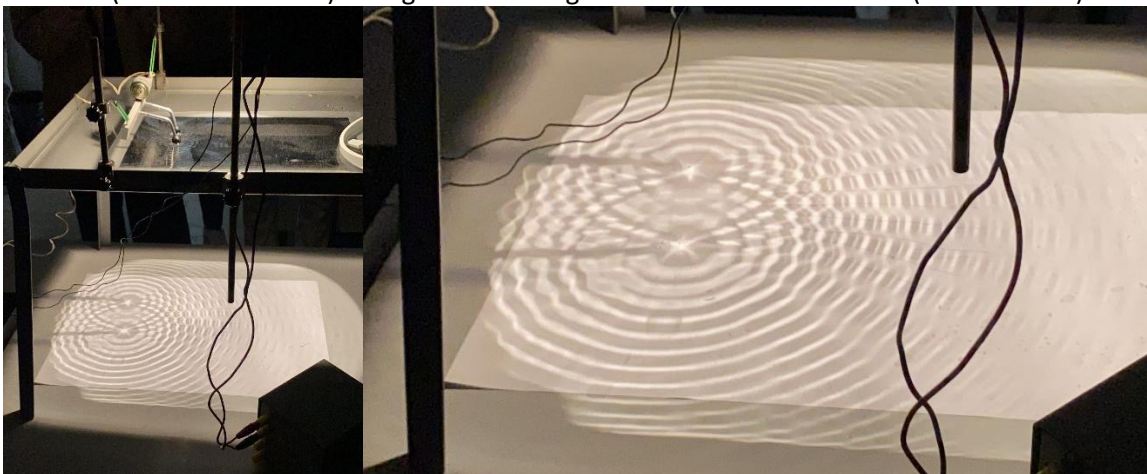
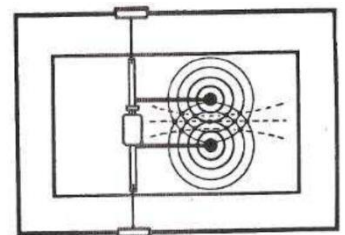


10. INTERFERENZA DI ONDE PIANE: posizionare l'asticella di metallo bianco a livello della superficie dell'acqua: questa comincerà a produrre onde piane. Poi, posizionare nella vaschetta tre asticelle di metallo con una fenditura tra un'asta e l'altra (due fenditure in totale). Facendo coincidere la frequenza dello stroboscopio con quella del motore, le onde risulteranno ferme e vedremo proiettate le onde incidenti piane che, per aggirare l'ostacolo delle asticelle, si trasformano in onde sferiche. Infatti, le due fenditure diventano sorgenti di onde sferiche coerenti (coerenti perché è la stessa onda) che interferiscono. L'interferenza la si può ben vedere proiettata sul foglio bianco sotto l'ondoscopio: le iperboli scure sono quelle d'interferenza distruttiva (l'onda non oscilla) mentre le iperboli a righe sono quelle d'interferenza costruttiva (l'onda oscilla).

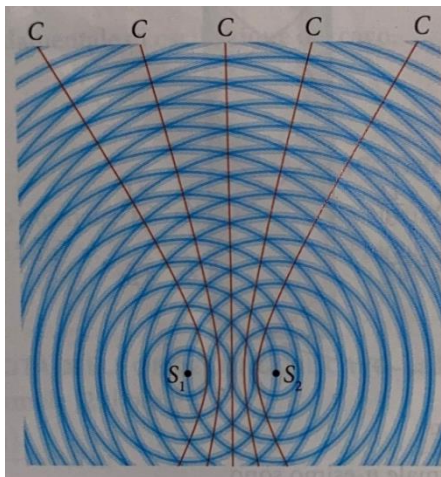




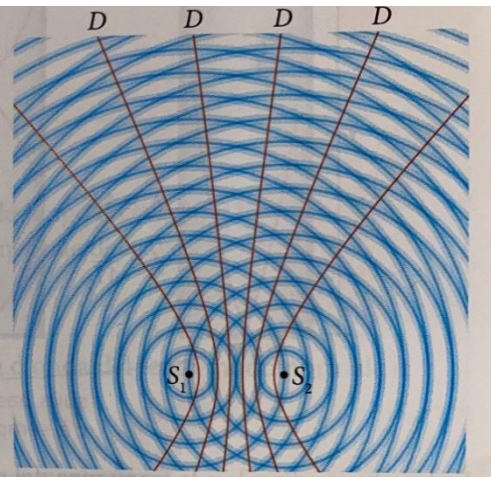
11. INTERFERENZA DI ONDE SFERICHE: agganciare al centro dell'asticella di metallo bianco due percussori a pallina e posizionarli a livello dell'acqua, questi cominceranno a produrre onde sferiche. Facendo coincidere la frequenza dello stroboscopio con quella del motore, le onde risulteranno ferme e vedremo proiettate le onde sferiche con centro le due sorgenti S_1 e S_2 (i due percussori). Poiché le onde sferiche sono coerenti è possibile vedere facilmente la loro interferenza. Le iperboli proiettate sul foglio bianco sotto l'ondoscopio risultano essere scure in corrispondenza delle frange d'interferenza distruttiva (l'onda non oscilla) e a righe delle frange d'interferenza costruttiva (l'onda oscilla).



INTERFERENZA COSTRUTTIVA:



INTERFERENZA DISTRUTTIVA:



Dopo aver disegnato le iperboli proiettate sul foglio bianco sotto l'ondoscopio, andiamo a misurare con il righello la distanza da un punto P appartenente ad un'iperbole d'interferenza costruttiva con le due sorgenti.

LUNGHEZZA D'ONDA	$0,8 < \lambda < 1$ cm
S_1P	13 cm
S_2P	11 cm

$$|\overline{PS_1} - \overline{PS_2}| = |13 - 11| = 2\lambda$$

Ripetiamo il procedimento considerando, invece, un punto P appartenente ad un'iperbole d'interferenza distruttiva.

LUNGHEZZA D'ONDA	$0,8 < \lambda < 1$ cm
S_1P	13,5 cm
S_2P	13 cm

$$|\overline{PS_1} - \overline{PS_2}| = |13,5 - 13| = 0,5\lambda$$

CONCLUSIONI

Durante quest'esperienza, abbiamo potuto osservare numerosi fenomeni ondosi. Infatti, grazie alla possibilità di far coincidere la frequenza dello stroboscopio con quella del motore, le onde sul foglio erano ferme e, quindi, più visibili (per esempio i fronti d'onda ben riconoscibili). Inoltre, abbiamo potuto verificare una particolare proprietà dello specchio parabolico: la parabola ha il potere di trasformare le onde sferiche in piane e, viceversa, quelle piane in sferiche (vedi fenomeni 5-6). Ci possiamo ritenere estremamente soddisfatti di essere riusciti, a meno di errori sperimentali, a dimostrare anche quantitativamente le interferenze delle onde (vedi fenomeno 11): infatti, la differenza dei cammini ottici nel caso dell'interferenza costruttiva è un numero pari di λ , nel caso dell'interferenza distruttiva è un numero dispari di $\lambda/2$.

In tutti i fenomeni sono presenti delle imprecisioni di bordo, per esempio, alcune onde piane scontrandosi con il bordo della vaschetta potevano essere alterate in una loro piccola parte risultando, così, non perfettamente piane.