

Interferența și difracția undelor mecanice

Cuvinte cheie: undă mecanică, amplitudine (A), pulsație (ω), frecvență(ν), fază (φ), fază inițială (φ_0), ecuația unei unde plane $y(x, t)$, defazaj ($\Delta\varphi$), fazor, diagramă fazorială, compunerea undelor, Principiul superpoziției, oscilații în fază, oscilații în opoziție de fază, interferență, difracție, Principiul lui Huygens, principiul ”antelor defazate”

Principiu

Simultan sunt produse un număr de unde circulare pe apă și rezultatul interferenței lor este observat pe suprafața apei. Crescând numărul de unde care interferează, poate fi verificat Principiul lui Huygens. Este investigată difracția undelor de apă la întâlnirea unor obiecte (fantă, fantă dublă, margine). Apoi, într-un experiment poate fi verificat principiul ”antelor defazate”. Pentru a face asta, sunt generate două unde circulare pentru a interfera și figura de interferență va fi deplasată variind faza uneia dintre undele circulare față de faza celeilalte unde circulare.

Echipament

Bazin cu sursă de lumină LED	1
Sursă de alimentare 12V CC/ 2A	1
Set de accesorii	1
Masă suport	1
Tavă cu apă	1
Hârtii transparente	2
Generator de unde extern	1
Cablu de legătură, 32A, 500 mm, negru	1



Figura 1: Montaj experimental

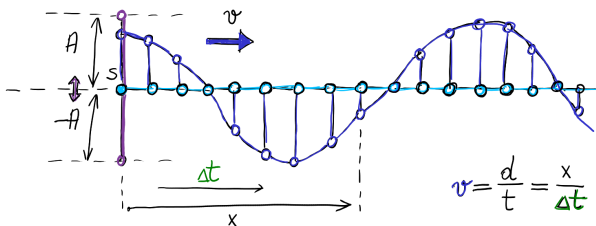
Obiective

1. Folosiți *pieptenele* pentru a genera două unde circulare și observați rezultatul interferenței. Măriți numărul de unde circulare care interferează (până la zece unde) folosind toți *dinții* pieptenelui pentru a demonstra Principiul lui Huygens.
2. Generați unde plane pe apă și folosiți un obstacol în calea acestora pentru a evidenția fenomenul de difracție la marginea obiectelor. Formați o fantă și observați fenomenul de difracție în spatele fantei. Repetați experimentul pentru o fantă dublă.
3. Folosind generatorul din bazin și generatorul de unde extern, generați unde și observați interferența acestora. Variați faza generatorului extern și observați efectul asupra figurii de interferență (principiul antenelor defazate)

În cele ce urmează este prezentată o schiță cu noțiuni de liceu de interferență.
Să ne reamintim!

INTERFERENȚA UNDELOR

S - sursa de perturbare
 $y_s(t) = A \sin(\omega t)$



$$v = \frac{d}{t} = \frac{x}{\Delta t}$$

$y(x,t) = A \sin[\omega(t - \frac{x}{v})]$, legea de mișcare a oscilatorului aflat la x față de sursa de perturbare S.

Obs 1 Oscilatorul aflat la distanța x de sursă, intră cu întârzierea Δt în oscilație.

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

$$y(x,t) = A \sin\left[\frac{2\pi}{T}\left(t - \frac{x}{v}\right)\right], \text{ dar } v = \frac{\lambda}{T}$$

$$y(x,t) = A \sin\left[\frac{2\pi}{T} \cdot t - \frac{2\pi}{T} \cdot \frac{x}{\frac{\lambda}{T}}\right]$$

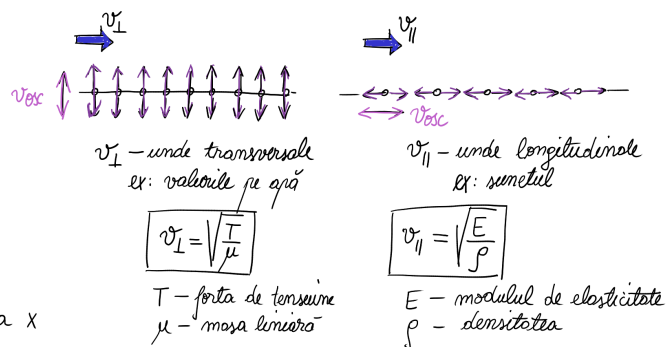


$$y(x,t) = A \sin\left[\frac{2\pi}{T} \cdot t - \frac{2\pi}{\lambda} \cdot x\right]$$

ECUAȚIA UNDEI PLANE

ecuația dinamică de mișcare a tuturor oscilatorilor de pe poziția x, în timp

CAZ PARTICULAR: $x=0 \Rightarrow y(0,t) = A \sin\left[\frac{2\pi}{T} \cdot t\right]$ ecuația de oscilație în sursele S, $x=0$



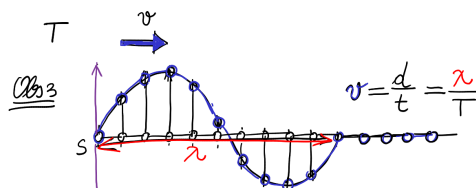
$$v_{\perp} = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

T - forța de tensiune
 μ - masa liniară

$$v_{\parallel} = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

E - modulul de elasticitate
 ρ - densitatea

Obs 2 $v_{\perp}, v_{\parallel}$ depind doar de mediul prin care se propaga unda.



Obs 3

$$v = \frac{d}{t} = \frac{\lambda}{T}$$

Obs Intr-o oscilație completă a sursei de perturbare S valoarea avansă până la poziția x.

λ = lungimea de undă

COMPUNEREA UNDELOR (INTERFERENȚA UNDELOR)

În punctul P din spațiu se suprapun două valuri:

$$y_1(x_1,t) = A_1 \sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t - \frac{2\pi}{\lambda} \cdot x_1\right) - \text{înălțimea valului produs de } S_1 \text{ la depărtarea } x_1$$

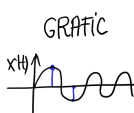
$$y_2(x_2,t) = A_2 \sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t - \frac{2\pi}{\lambda} \cdot x_2\right) - \text{înălțimea valului produs de } S_2 \text{ la depărtarea } x_2$$

$$y_p = y_1 + y_2 \text{ PRINCIPIUL SUPERPOZIȚIEI}$$

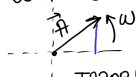
y_p - înălțimea valului rezultat în P

Obs ANALITIC

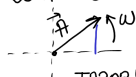
$$x(t) = A \sin(\omega t)$$



GRAFIC



GEOMETRIC



FAZOR!

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = \left(\frac{2\pi}{T} \cdot t - \frac{2\pi}{\lambda} \cdot x_2\right) - \left(\frac{2\pi}{T} \cdot t - \frac{2\pi}{\lambda} \cdot x_1\right)$$

$\Delta\varphi$ - defazaj

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot (x_2 - x_1)$$

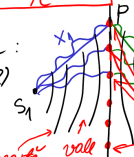
Δx - diferența de drum

nu depinde de timp

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Delta x$$

Δx = distanța cu cât parcurge mai mult un val decât celălalt val

CAZ PARTICULAR: (exemplificare)



În punctele P de pe mediatoarea S_1S_2

$$\Delta x = x_2 - x_1 = 0$$

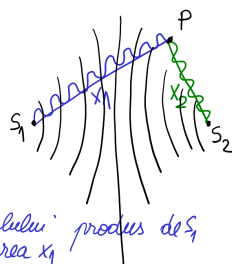
$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Delta x \Rightarrow \Delta\varphi = 0$$

$$A = A_{\max} = A_1 + A_2 \Rightarrow \text{creastă}$$

CONDITIE DE PRODUCERE A INTERFERENȚEI

creastă (maximă)

val (minimă)



S_1, S_2 - două surse de perturbare de aceeași frecvență

$$v_1 = v_2 = v$$

CONDITIE DE PRODUCERE A INTERFERENȚEI

$$T_1 = T_2 = T$$

$$\omega_1 = \omega_2 = \omega$$

$$v_1 = v_2 = v \text{ (același material)}$$

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$$

MAXIME - INTERFERENȚĂ CONSTRUCTIVĂ

$$\Delta\varphi = 0, 2\pi, 4\pi, \dots, 2k\pi$$

$$\cos \Delta\varphi = 1$$

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos \Delta\varphi}$$

$$A = A_{\max} = A_1 + A_2$$

$$2k\pi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Delta x$$

$$\Rightarrow \Delta x = 2k \cdot \frac{\lambda}{2}$$

MINIME - INTERFERENȚĂ DISTRUCTIVĂ

$$\Delta\varphi = \pi, 3\pi, 5\pi, \dots, (2k+1)\pi$$

$$\cos \Delta\varphi = -1$$

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 - 2A_1A_2 \cos \Delta\varphi}$$

$$A = A_{\min} = |A_1 - A_2|$$

$$(2k+1)\pi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Delta x$$

$$\Rightarrow \Delta x = (2k+1) \cdot \frac{\lambda}{2}$$

Mod de lucru

Obiectiv 1 - Unde staționare și Principiul lui Huygens

Montați doi dinți la capetele pieptenului, fixați-i pe suportul liniar și plasați astfel montajul în mijlocul tavei cu apă.(Fig.2). Asigurați-vă că dinții iau contact cu apa în mod egal. Observați figura de interferență pentru diferite frecvențe (între 15Hz și 40Hz) în modul de iluminare normal. Modificările sunt controlate din tastatura bazinului cu apă (Fig.3).

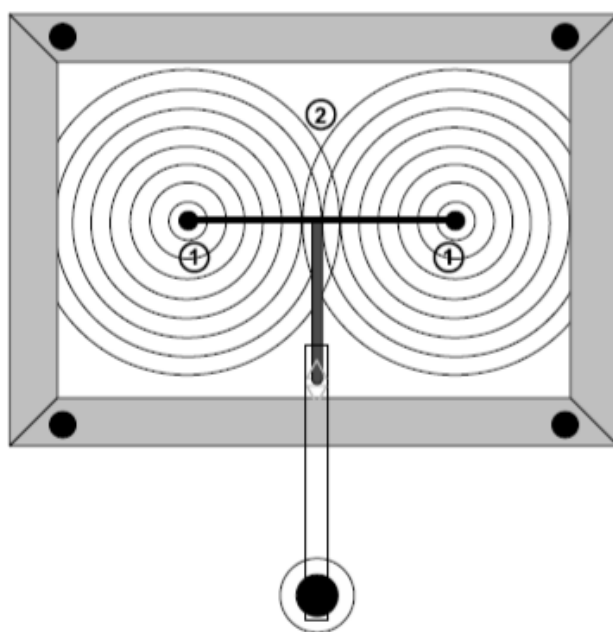


Figura 2: Montajul pentru interferența a două fronturi de unde circulare care vin din direcții opuse. Pe pieptene sunt montați doi dinți(1) pentru a obține o figură de interferență coerentă(2)

Dacă este nevoie, reglați amplitudinea pentru frecvența stabilită, pentru a obține o figură de interferență clară. Comparați lungimea de undă în apropierea celor doi dinți - unde este vizibil cum undele avansează- cu spațiul dintre liniile care se formează la jumătatea distanței dintre dinți. Se recomandă să folosiți hârtiile transparente peste care să desenați distanța dintre creste pentru a face mai ușor comparația.

Schimbați apoi, pe modul de iluminare stroboscopică (butonul LED) și selectați diferența de frecvență $\Delta\nu$ între frecvența luminii stroboscopice și frecvența generatorului de unde între 0.5Hz și 1.5Hz. Notați observațiile.

Apoi, schimbați înapoi la modul de iluminare normală. Fixați fiecare dintre cei doi dinți foarte aproape pe suportul liniar ca în Fig.4.

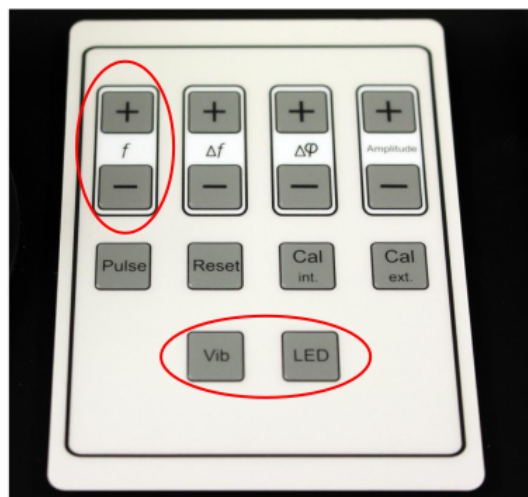


Figura 3: Tastatura de control pe bazinul cu apă

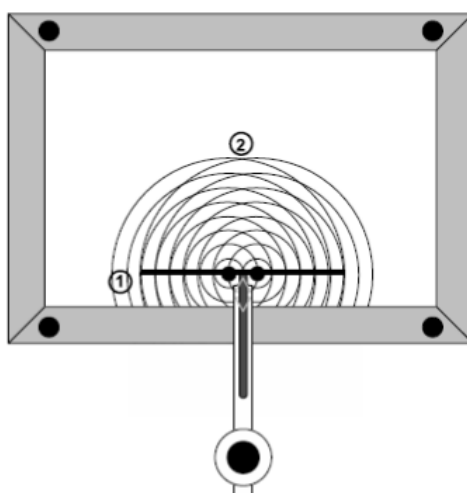


Figura 4: Montaj demonstrând interferența folosind două surse de unde. Undele circulare generate de suportul orizontal cu cele două surse (1) se suprapun și formează o figură de interferență caracteristică (2).

Alegeți o frecvență de excitație între 20Hz și 25Hz în bazinul cu apă și reglați amplitudinea astfel încât figura de interferență să devină clară.

Variați frecvența de excitație și investigați efectul schimbării frecvențelor asupra figurii de interferență. Notați observațiile.

Apoi, observați efectul îndepărtării dinților unul de celălalt, observând efectul asupra figurii de interferență pentru o frecvență constantă (în jur de 20Hz - 30Hz). În mod succesiv mișcați fiecare dintre câte o poziție, pe rând, mai excentric către capete. Trebuie să vă asigurați mereu că cei doi dinți se află la aceeași distanță față de centrul pieptenului. Notați observațiile.

În final, investigați Principiul lui Huygens. Pentru a face acest lucru, atașați din nou cei doi dinți central pe pipetene unul lângă celălalt. Atașați apoi un al treilea dinte în

imediată apropiere, un al patrulea și tot așa, ca în Fig.5.

Alegeți o frecvență de excitație între 20Hz și 25Hz și amplitudinea în așa fel încât să puteți observa o figură de interferență clară. Frecvența aleasă trebuie să rămână aceeași pe parcursul acestei observații. Observați figura de interferență pentru patru, șase, opt și zece dinți și comparați figurile de interferență. Asigurați-vă că distanța dintre dinți rămâne constantă.

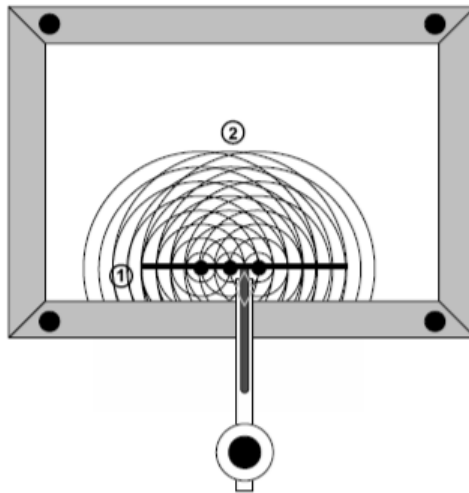


Figura 5: Montajul de interferență cu trei surse de unde. Cele trei unde circulare generate de pe suportul orizontal(1) interferează pentru a forma o figură de interferență (2)

Obiectiv 2 - Interferența și difracția pe diferite obiecte

Înlocuiți pieptenele cu o bară orizontală excitatoare. Cu ajutorul șuruburilor, reglați înălțimea tavei cu apă, astfel încât apa să atingă în mod egal pereții. Reglați bara orizontală în așa fel să fie paralelă cu suprafața apei. Acest reglaj este important, și dacă nu este făcut nu se vor obține unde plane. Apoi, plasați o barieră de 71mm în tava cu apă și încercați să respectați configurarea din Fig.6. Alegeți o frecvență de excitație între 18Hz și 25Hz, și reglați amplitudinea în așa fel încât să se distingă o figură clară.

După observarea figurii de pe apă, repetați experimentul cu o undă plană generată apăsând butonul "Puls" (vezi Fig.3). Din nou, observați tiparul figurii rezultate. După investigarea difracției pe marginea unui obiect, investigați difracția pe o fantă largă. Plasați o a doua barieră de 71mm în tavă la o depărtare de 3cm față de cealaltă pentru a forma o fantă largă ca în Fig.7. Alegeți o frecvență de excitație între 18Hz și 25Hz și o amplitudine ca să puteți distinge figura care se formează.

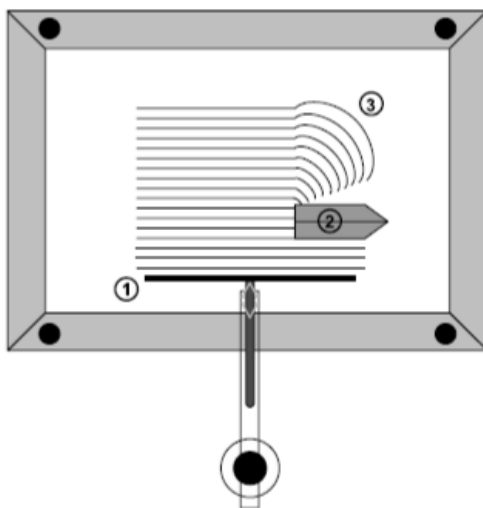


Figura 6: Montaj experimental pentru demonstrarea difracției pe o margine. Frontul de undă plan (1) generat de către bara orizontală oscilatoare atinge obstacolul de 71 mm (2), care joacă rolul de margine în acest caz. Undele circulare formate sunt produse de această margine, frontul pătrunzând în umbra geometrică a obstacolului (3).

În următorul experiment, interferența și difracția pe o fantă dublă sunt investigate. Pentru a face acest lucru, așezați două obstacole de 71 mm și între cele două un obstacol de 30 mm ca în Fig. 9. Fantele create ar trebui să aibă aceeași lărgime (1cm).

Alegeți o frecvență de oscilație între 15Hz și 30Hz și potriviți inițial amplitudinea în așa fel încât undele plane să poată fi văzute în fața fantei duble. Apoi, măriți amplitudinea până când se poate distinge figura de interferență în spatele fantei duble. (Fig.9) Observați caracteristicile figurii de interferență.

Repetăm experimentul la aceeași frecvență, dar cu o distanță mai mică a fantelor, folosind și un obstacol de 10 mm ca în Fig.10. Apoi, mișcați cele două obstacole de 71mm mai aproape de obstacolul din mijloc de 10mm pentru a forma fanta dublă (de aproximativ 1 cm). Observați tiparul de interferență și difracție pentru a investiga și a vedea diferența față de cazul în care fantele duble erau mai largi.

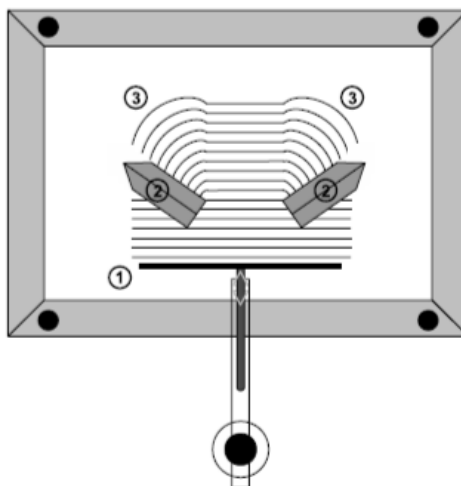


Figura 7: Montaj experimental pentru demonstrarea difracției pe o fantă largă. Frontul de undă plan (1) generat de bara orizontală oscilantă ajunge la fanta de 3 cm formată din două obstacole de lărgimea de 71 mm (2). Frontul de undă este difractat: undele circulare se propagă în umbra lor geometrică a obstacolelor (3).

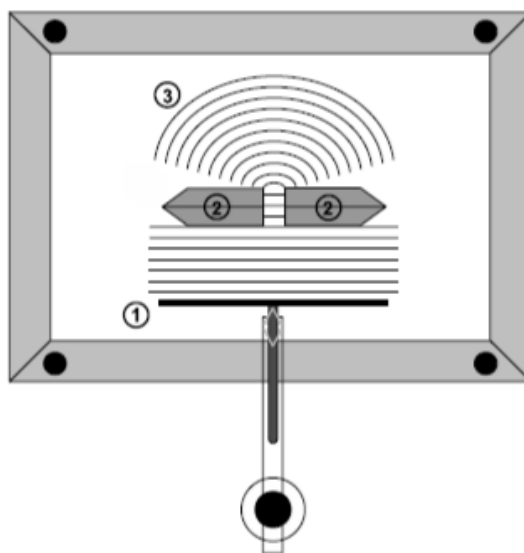


Figura 8: Montaj experimental pentru demonstrarea difracției pe o fantă îngustă. Frontul de undă plan (1) generat de bara orizontală ajunge la fanta îngustă de 1cm (2) formată din cele două obstacole. Undele circulare emanate de fantă (3) se propagă în umbra geometrică în spatele obstacolelor.

În final, variați frecvența de oscilație și observați tiparele de interferență și difracție pentru a investiga influența lungimii de undă asupra figurii de interferență. Când ați terminat, scoateți obstacolele din tava cu apă.

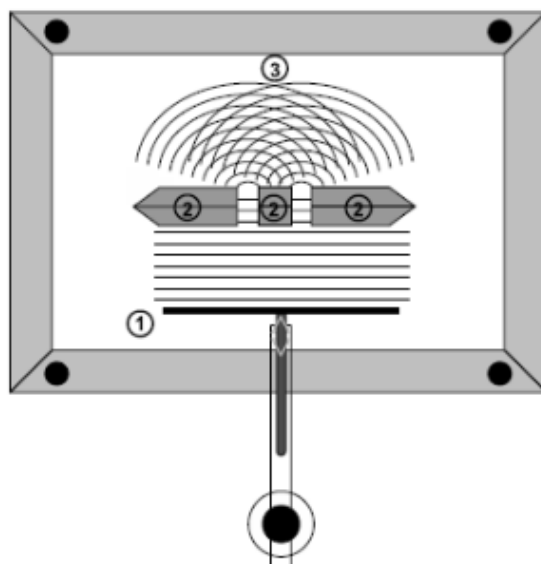


Figura 9: Montaj experimental pentru demonstrarea difracției pe o fantă fantă dublă. Frontul de undă plan generat de bara orizontală oscilantă (1) atinge fanta dublă formată din obstacole (2). Undele circulare sunt emanate din ambele fante și interferează în spatele fantei duble (3)

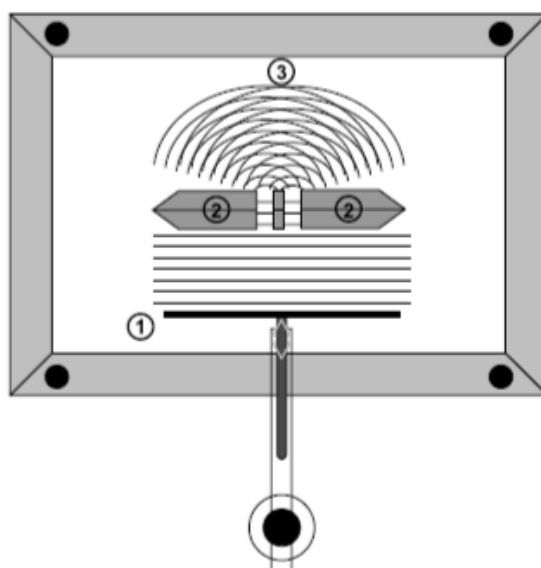


Figura 10: Montaj experimental pentru demonstrarea interferenței și difracției pe o fantă dublă și pe o fantă dublă îngustată. Frontul de undă plan generat de bara orizontală oscilantă (1) atinge fanta dublă, care este formată din trei obstacole (2). Sunt emanate unde circulare din ambele fante care interferează în spatele fantei duble (3)

Obiectivul 3 - Principiul antenelor defazate

În acest obiectiv este investigat principiul antenelor defazate. Folosiți cele două cabluri de legătură pentru a lega la bazinul cu generator încorporat generatorul de oscilații extern. Cele două generatoare sunt poziționate relativ unul de celălalt ca în Figura 11.

Alegeți frecvența de oscilație între 20Hz și 25Hz și treceți la modul de iluminare stroboscopic. Amplitudinea ar trebui aleasă în așa fel încât figura de interferență să devină clară (se formează o undă staționară). În acest moment, ambele generatoare oscilatoare sunt în fază ($\Delta\varphi = 0$) la aceeași frecvență.

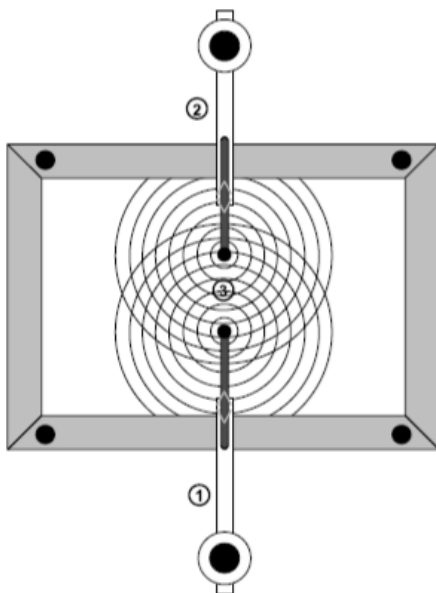


Figura 11: Montajul experimental care demonstrează efectul diferenței de fază $\Delta\varphi$ ale celor două generatoare de unde circulare asupra figurii de interferență. Undele circulare generate de generatorul încorporat (1) și de către generatorul de oscilații extern (2) se suprapun, interferează și formează o undă staționară între cei doi oscilatori (3).

Folosiți un creion pentru a desena ventrele (benzile luminoase) pe o foaie de hârtie așezată pe masa de plastic transparentă pe care se proiectează imaginea suprafeței apei cu unda staționară. Ar fi o idee bună să fixați hârtia transparentă pe masa de desen cu ajutorul unei benzi adezive.

Acum, alegeți diferența de fază $\Delta\varphi$ (vezi Fig.3) de 45° , 90° , 135° , 180° , 225° , 270° , 315° și $360^\circ = 0^\circ$, una după cealaltă pe rând, observând deplasarea figurii de interferență (a unei staționare) după fiecare caz. În cazul defazajului $\Delta\varphi = 180^\circ$ comparați poziția ventrelor figurii de interferență cu poziția ventrelor figurii de interferență din cazul 0° .

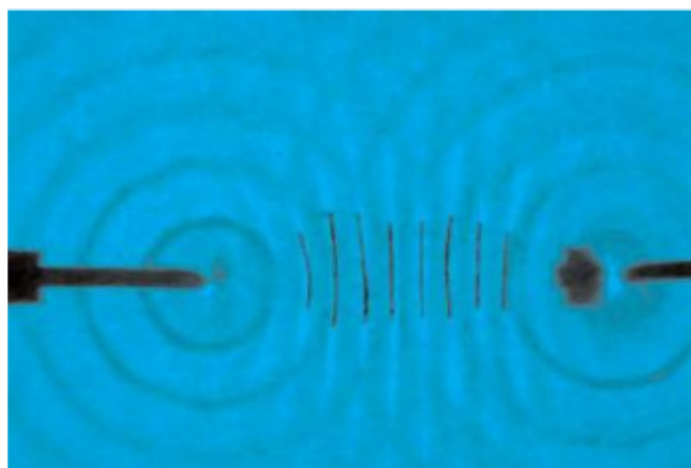


Figura 12: Captură ca în Fig.11 la un defazaj de 0^0 între generatorul încorporat și generatorul extern de oscilații. Sunt notate pozițiile ventrelor unei staționare (a figurii de interferență)

UNDE STATIONARE

Unda staționară – undă obținută prin suprapunerea a două unde plane de aceeași frecvență și de aceeași amplitudine, care se propagă în sensuri opuse

$$y_s(t) = A \sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t\right) \text{ ecuația de oscilație a sursei (S)}$$

$$y_d(x_1, t) = A \sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t - \frac{2\pi}{\lambda} \cdot x_1\right) \text{ ecuația unde directe}$$

$$y_r(x_2, t) = A \sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t + \frac{2\pi}{\lambda} \cdot x_2\right) \text{ ecuația unde reflectate}$$

$$x_1 = l - x$$

$$x_2 = l + x - \frac{\lambda}{2}$$

Obs. Reflexia se produce cu pierdere de similitudine de undă.

$$\Delta x = x_2 - x_1 = (l + x - \frac{\lambda}{2}) - (l - x) = 2x - \frac{\lambda}{2} \text{ diferența de drum}$$

$$\Delta \varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Delta x = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot (2x - \frac{\lambda}{2}) \text{ defazajul, nu depinde de timp}$$

$$y_p = y_d + y_r \text{ Principiul superpoziției}$$

$$y_p = A_p \sin(\varphi_p)$$

$$y_p = 2A \cos\left(\frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2}\right) \sin\left(\frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}\right)$$

$$\varphi_p = 2A \cos\left[\frac{2\pi}{2\lambda} \left(2x - \frac{\lambda}{2}\right)\right] \cdot \sin\left[\frac{2\pi}{T} \cdot t - \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{(x_1 + x_2)}{2}\right]$$

$$x_1 + x_2 = (l - x) + (l + x - \frac{\lambda}{2}) = 2l - \frac{\lambda}{2}$$

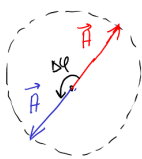
$$y_p = 2A \cdot \cos\left[\frac{2\pi}{2\lambda} \left(2x - \frac{\lambda}{2}\right)\right] \sin\left[\frac{2\pi}{T} \cdot t - \frac{2\pi}{2\lambda} \cdot (2l - \frac{\lambda}{2})\right]$$

$$y_p = A(x) \cdot \sin(\varphi_p(t))$$

Obs. Amplitudinea punctului P nu depinde de timp, ci doar de poziția x.

2. POZIȚIILE NODURILOR

$$A_p = A_{max} = A - A = 0$$



$$\Delta \varphi = \pi, 3\pi, 5\pi, \dots$$

$$\Delta \varphi = (2k-1)\pi$$

$$\frac{2\pi}{\lambda} \left(2x - \frac{\lambda}{2}\right) = (2k-1)\pi$$

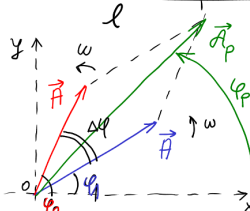
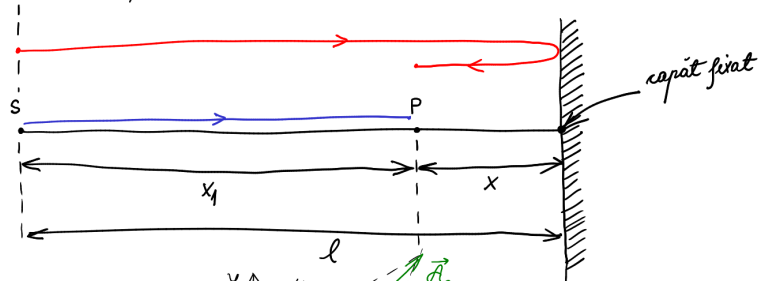
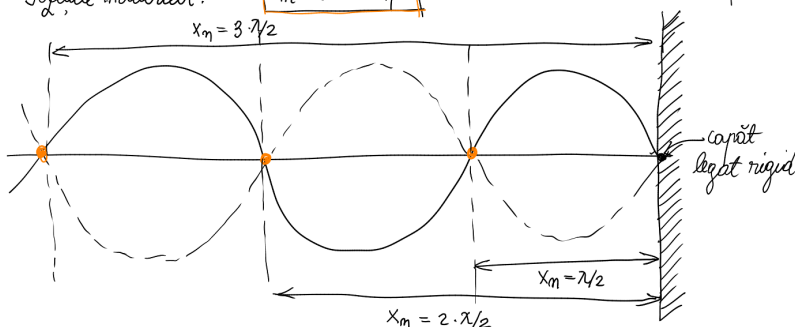
$$2x - \frac{\lambda}{2} = (2k-1) \cdot \frac{\lambda}{2}$$

$$2x = (2k) \cdot \frac{\lambda}{2}$$

Pozițiile nodurilor:

$$x_n = (2k) \cdot \frac{\lambda}{4}$$

$$x_n = 3 \cdot \frac{\lambda}{2}$$



$\Delta \varphi = \text{constant în timp}$

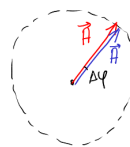
$$A_p = \sqrt{A^2 + A^2 + 2AA \cos \Delta \varphi}$$

$$A_p = A \sqrt{2 + 2 \cos \Delta \varphi} = 2A \sqrt{\frac{1 + \cos \Delta \varphi}{2}}$$

$$A_p = 2A \cos \frac{\Delta \varphi}{2}$$

1. POZIȚIILE VENTRELOR

$$A_p = A_{max} = A + A$$



$$\Delta \varphi = 0, 2\pi, 4\pi, \dots$$

$$\Delta \varphi = 2k\pi$$

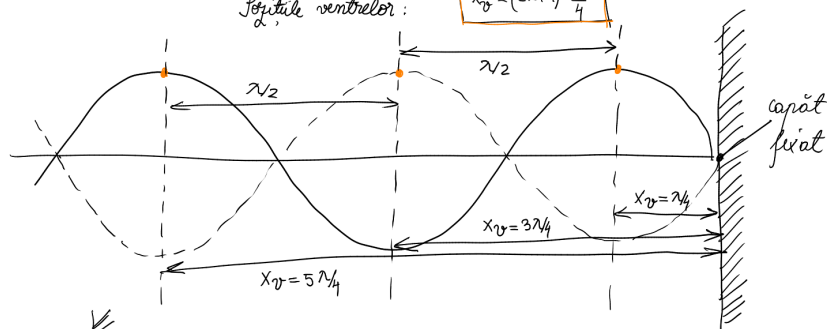
$$\frac{2\pi}{\lambda} \left(2x - \frac{\lambda}{2}\right) = 2k\pi$$

$$2x - \frac{\lambda}{2} = k \cdot \lambda$$

$$2x = (2k+1) \cdot \frac{\lambda}{2}$$

$$x_v = (2k+1) \cdot \frac{\lambda}{4}$$

Pozițiile ventrelor:



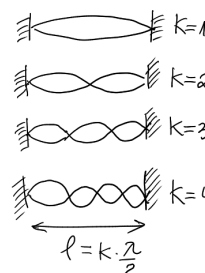
Obs. Oscilațiile corzilor fixate la ambele capete:

$$l = k \cdot \frac{\lambda}{2}$$

$$\lambda = v \cdot T = v \cdot \frac{1}{f} \Rightarrow l = \frac{k \cdot v}{2 \cdot f}$$

$$v = \sqrt{\frac{F}{\mu}} \Rightarrow \lambda_k = \frac{k}{2l} \sqrt{\frac{F}{\mu}} \quad k \in \mathbb{N}$$

frecvența armonurilor



Analiză

Obiectiv 1 - Undele staționare și Principiul Huygens

Unde staționare

O undă staționară se formează între două generatoare de unde (dini). Distanța dintre franjele luminoase și franjele întunecate de-a lungul mediatoarei dintre cele două generatoare de unde care ating apa este jumătate de lungime de undă față de lungimea de undă care avansează și poate fi văzută în apropierea celor două centre de oscilație (Fig. 13). Formarea unei staționare poate fi de asemenea văzută în Fig. 14.

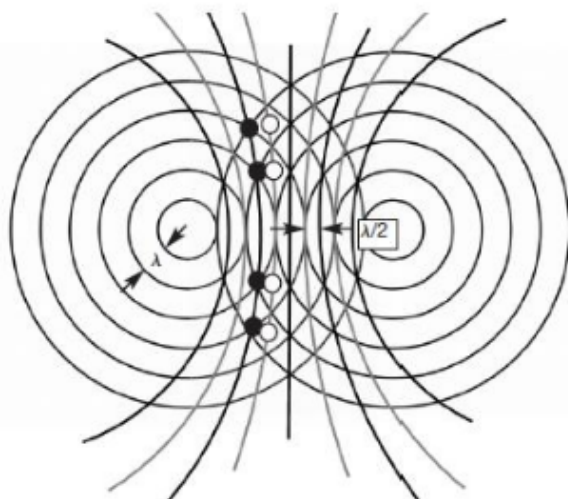


Figura 13: Schiță care ilustrează suprapunerea câmpurilor a două unde, generate de două surse, cu lungimea de undă λ . Locațiile la care trenurile de undă interferează constructiv (cercurile evidențiate) sunt schițate cu linii luminoase intens; locațiile la care trenurile de undă interferează distructiv (cercurile neevidențiate) sunt schițate cu linii negre închise. Împreună ele formează tiparul de undă staționară. Hiperbolele de interferență constructivă apar în figura de interferență cu linii luminoase, hiperbolele de interferență distructivă apar în figura de interferență cu linii colorate închise. Pe mediatoare unda staționară generată are o lungime de undă $\lambda/2$

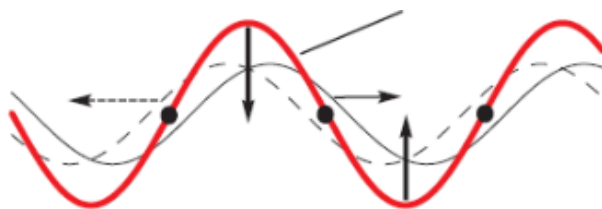


Figura 14: Formarea unei staționare. Două unde cu aceeași frecvență și aceeași amplitudine se propagă în direcții opuse (linia întreruptă și linia continuă). Când aceste două unde interferează, o undă staționară se va forma (linia roșie) ca o interferență a celor două. Nodurile sunt puncte de nemișcare unde unda rezultantă are mereu amplitudinea zero (cele două valuri se anulează unul pe celălalt). Punctele de la jumătatea distanței între două noduri sunt numite ventre. Aceste puncte sunt rezultatul interferenței constructive a celor două unde.

În modul de lumină stroboscopică, în care diferența de frecvență $\Delta\nu$ dintre lumina stroboscopică și frecvența de oscilație permite vizualizare undelor cu o viteză substanțial redusă, aceeași lungime de undă este observată între generatorii de unde și zona din jurul generatorilor. Această schimbare este explicată în Fig.14.

Cum cei doi generatori oscilează în fază, se formează maxime de amplitudini (interferență constructivă) la toate locațiile pentru care diferența de drum Δl de la cele două generatoare de unde este:

$$\Delta l = m \cdot \lambda \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots)$$

Iar la locațiile unde diferența de drum este Δl :

$$\Delta l = \frac{2m+1}{2} \cdot \lambda \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots)$$

cele două unde se anulează.

În cazul undelor staționare în apă, nodurile apar ca linii de o luminozitate mare constantă. Locațiile ventrelor pe de altă parte, în clipa în care crestele se formează, apar ca linii de o luminozitate mică constantă. În timpul existenței unei staționare, intensitatea ei variază. Ochiul uman nu poate diferenția între fazele particulelor de apă oscilante din cauza capacității sale de rezoluție limitată. Ochiul poate diferenția ventrelor de luminozitate mică de nodurile de luminozitate mare mediat pe un interval de timp. Distanța dintre două noduri sau două ventre adiacente este - după cum se poate observa și din experiment - $\lambda/2$.

În lumina stroboscopică este posibil să vizualizăm în captura unei staționare că lungimea de undă este egală cu lungimea de undă a undelor care se propagă în tava cu apa mai departe. Dacă diferența de frecvență a stroboscopului față de generatori este diferită de zero și este reglată fin, oscilațiile par încetinite pentru ochi în așa fel încât, într-o oarecare măsură, ochiul poate distinge schimbarea dintre creste și văi, zonele pot fi recunoscute în zona ventrelor unei staționare.

Observație: Undele staționare pot fi de asemenea produse prin reflexie. O demonstrație convingătoare poate fi obținută cu un singur generator de oscilații localizat în centrul de curbură al obstacolului concav din setul de accesorii. Undele staționare pot fi cel mai bine observate în apropierea aceste suprafețe concave reflectătoare.

Principiul Huygens

Câteva din figurile de interferență observate sunt prezentate în figurile următoare. Cu două surse punctiforme generatoare de unde (Fig. 15), se obțin trei benzi largi aproape de aceeași lărgime. Aceste benzi pot fi observate cu trei surse punctiforme de generatoare de unde în aceeași locație; oricum toate benzile sunt mai înguste și în plus, benzi și mai înguste pot fi observate între aceste benzi (Fig.16). una dintre benzi este clar separată față de celelalte benzi principale, de benzi mai mici și înguste.

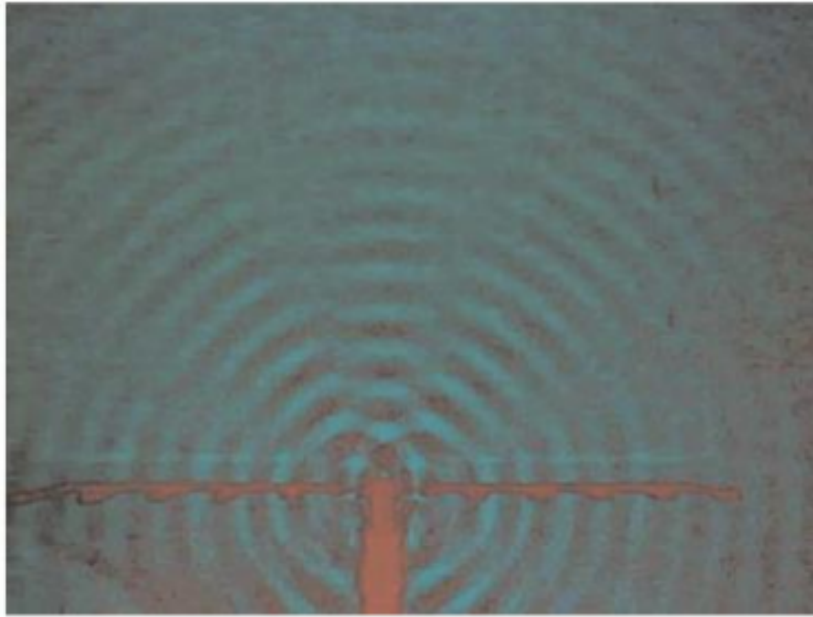


Figura 15: Două surse de oscilații - captură după Fig.4. Se formează trei benzi de aproximativ aceeași lărgime, care sunt separate unele de celălalte prin două zone de modulație (amplitudine neglijabilă)

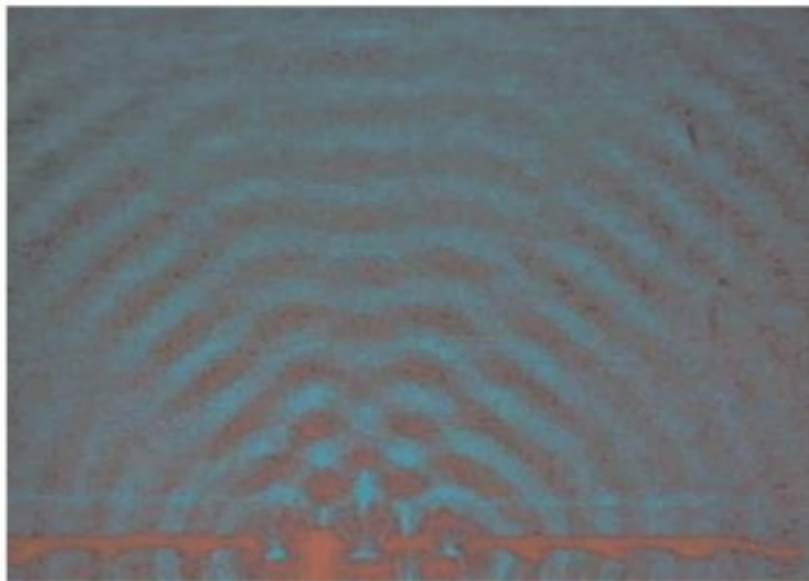


Figura 16: Trei surse de oscilație - captură după Fig. 5. O bandă adițională poate fi identificată în mijlocul benzii din mijloc față de Fig.15. Benzile apar toate mai înguste.

Cu patru surse de generatori de unde (Fig. 17) două noi benzi adiționale pot fi observate, pentru fiecare bandă din Fig.15. Benzile principale devin și mai înguste.

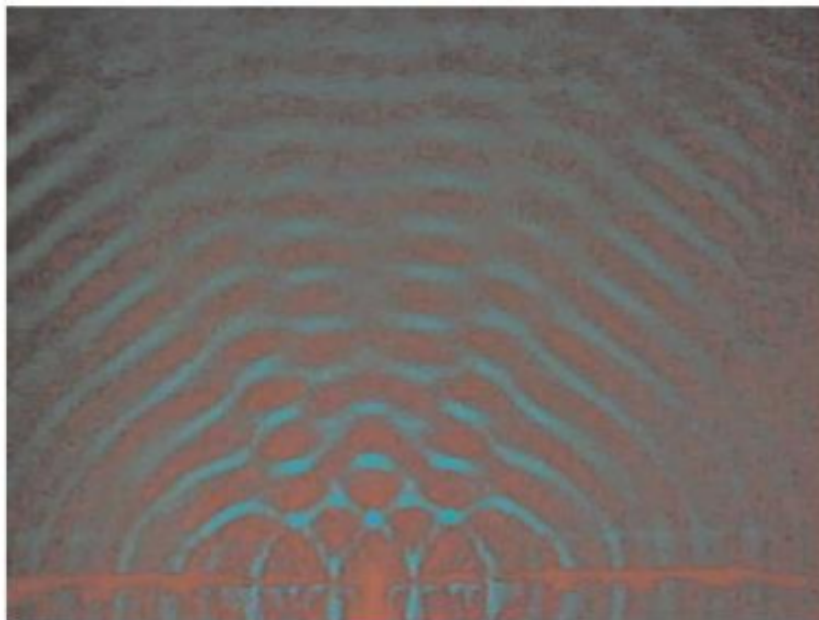


Figura 17: Patru surse punctiforme generatoare de unde. Numărul benzilor a crescut și acestea s-au îngustat față de cazul interferenței a două unde circulare. Undele nu mai sunt circulare ca în cazul cu două surse punctiforme generatoare de unde (Fig.15)

Dacă în continuare crește numărul de surse punctiforme, numărul de benzi va crește în continuare și ele vor deveni și mai înguste. Figura de interferență cu zece surse punctiforme (Fig.18) aproape de sursele punctiforme este asemănătoare cu o undă plană (Fig.19).

Cele trei benzi identificate în Fig. 15 (cele două surse punctiforme) sunt : banda din mijloc reprezintă interferența de ordin $m = 0$, iar benzile dispuse simetric, sunt interferențele de ordin $m = 1$. Din motive de simplificare dorim să excludem împrejurimile imediat apropiate pentru a clarifica apoi formarea benzi adiționale între cea de ordin $m = 0$ și $m = 1$ când numărul de generatori este mai mare. Pentru distanțe care sunt mari față de sursele generatoare de unde în comparație cu distanța d dintre generatori, se aplică următoarea regulă pentru cazul a două surse punctiforme generatoare (Fig.20):

$$\Delta l = d \cdot \sin \alpha$$

Pentru primul ordin de interferență constructivă (indiferent de numărul de surse punctiforme oscilante), $\Delta l = \lambda \Rightarrow \sin \alpha = \frac{\lambda}{d}$

În mod corespunzător, unghiul dintre ordinul zero de interferență distructivă și ordinul unu de interferență distructivă (unde undele se anulează): $\Delta l = \lambda/2 \Rightarrow \sin \alpha = \frac{1}{2} \cdot \frac{\lambda}{d}$

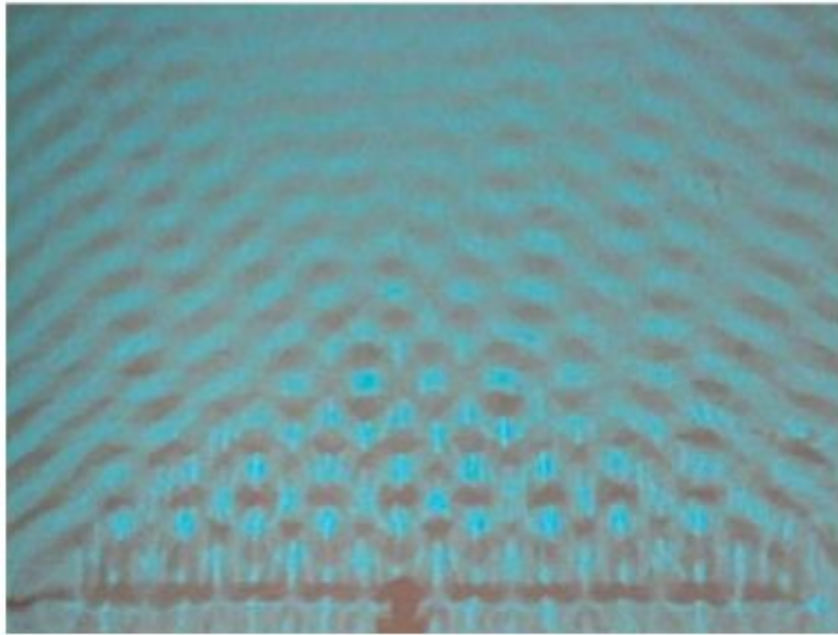


Figura 18: Zece surse de oscilație. Poate fi observată figura de interferență a celor zece unde circulare. Numărul de benzi a crescut din nou, frontul de undă începând să se asemene cu un front de undă plană

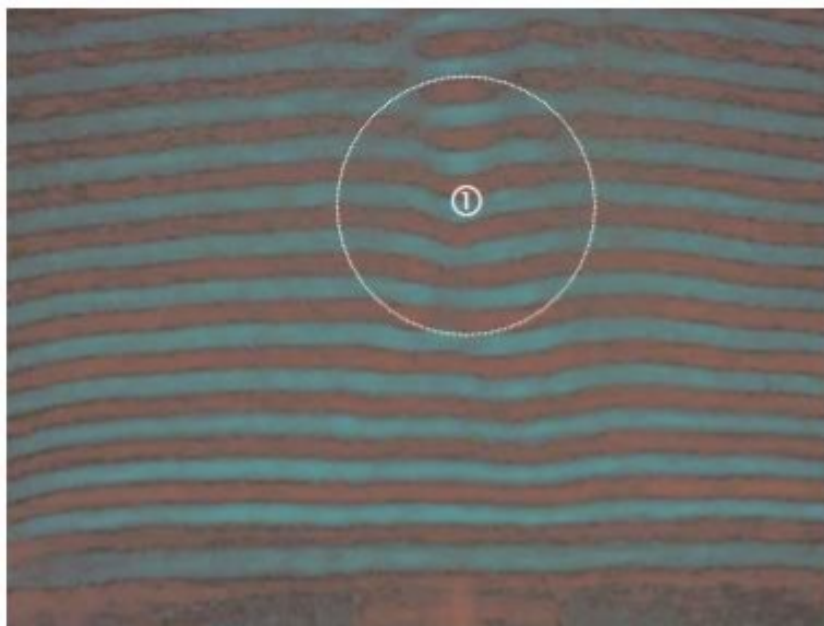


Figura 19: Tiparul unei unde plane. În zona (1) se poate vedea o zonă provenită din compunerea undelor circulare primare

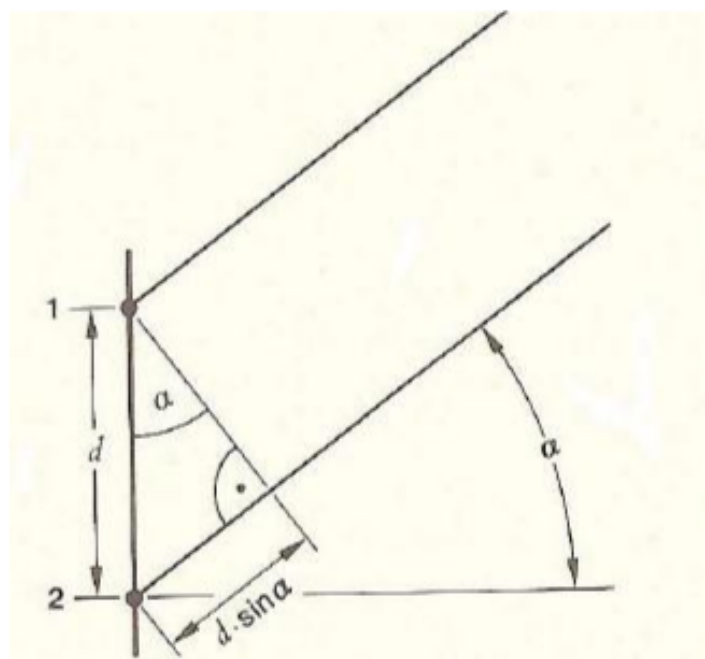


Figura 20: Diagrama formării maximelor și minimelor folosind două surse punctiforme de unde

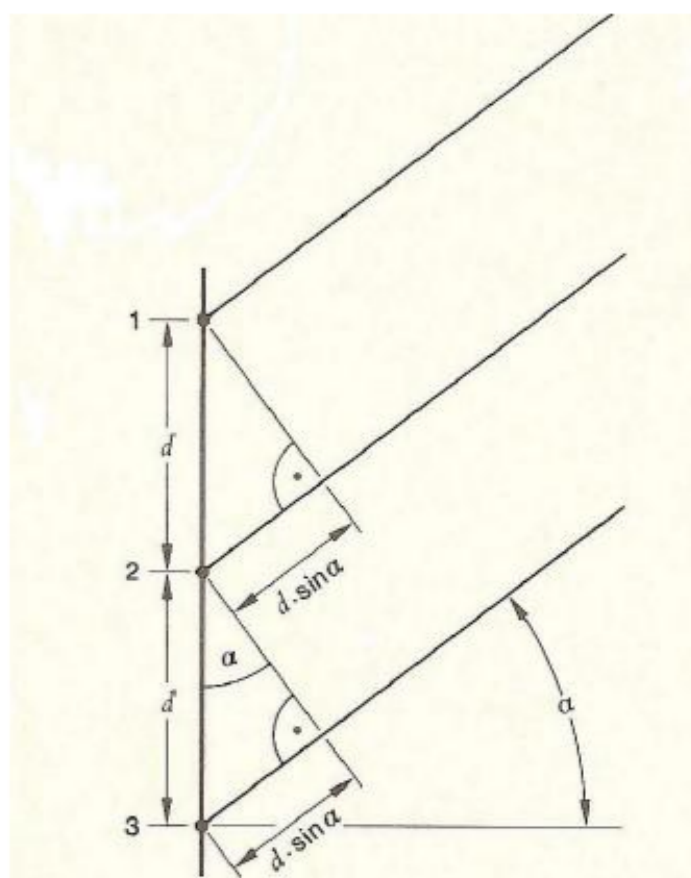


Figura 21: Diagramă formării maximelor și minimelor cu trei surse punctiforme de unde

Din Fig. 21, se poate vedea că interferența distructivă se petrece un unghi α diferit în cazul cu trei surse punctiforme față de două surse punctiforme. Rezultă, interferența distructivă a fronturilor de undă de la sursa punctiformă (1) și (2) conduc la o figură de interferență neperturbată de către sursa punctiformă (3). Oricum, trei forme armonice sinusoidale se anulează complet dacă sunt defazate fie cu $\frac{1}{3}$ sau cu $\frac{2}{3}$ din perioadă. Acest lucru se poate vedea clar în modul grafic în diagrama fazorială.

Deci, rezultă două minime secundare, după cum se poate vedea în Fig. 16:

Primul minim secundar:

$$d \cdot \sin \alpha = \frac{1}{3} \lambda \Rightarrow \sin \alpha = \frac{1}{3} \cdot \frac{\lambda}{d}$$

Al doilea minim secundar:

$$d \cdot \sin \alpha = \frac{2}{3} \lambda \Rightarrow \sin \alpha = \frac{2}{3} \cdot \frac{\lambda}{d}$$

Formarea a trei minime secundare cu patru surse de oscilație (Fig.17) poate fi explicată folosind Fig.22. Anularea se produce dacă undele emanate de sursele punctiforme de unde (1) și (2) se vor compensa cu undele emanate de sursele punctiforme de unde (3) și (4). Pe de altă parte undele emanate de sursele punctiforme (1) și (3) și cele ale surselor (2) și (4), de asemenea, se anulează.

Deci, începând de la ordinul zero de interferență distructivă, se formează următoarele minime:

Primul minim:

$$2d \cdot \sin \alpha = \frac{1}{2} \lambda \Rightarrow \sin \alpha = \frac{1}{4} \cdot \frac{\lambda}{d}$$

Al doilea minim:

$$d \cdot \sin \alpha = \frac{1}{2} \lambda \Rightarrow \sin \alpha = \frac{1}{2} \cdot \frac{\lambda}{d}$$

Al treilea minim:

$$2d \cdot \sin \alpha = \frac{3}{2} \lambda \Rightarrow \sin \alpha = \frac{3}{4} \cdot \frac{\lambda}{d}$$

Dacă numărul de surse punctiforme de unde este mărit în continuare, undele circulare interferează în acord cu principiul descris mai sus. Cu cât sunt mai multe unde circulare cu atât figura de interferență se aseamănă mai mult unei unde plane. În această lucrare acest fenomen descris adineauri este reprezentat de pieptenele cu zece dinți, zece surse punctiforme care produc unde pe apă (Fig. 18). Bineînțeles, acest număr nu e suficient pentru a obține o undă plană, dar în baza Fig.18 și Fig.19 devine mai ușor a extrapola cum figura de interferență ar arăta dacă un număr și mai mare de surse punctiforme ar fi adăugate. Atunci, imaginea care rezultă ar fi a unei unde plane (Fig. 19). Tocmai acest lucru este enunțat de Principiul Huygens.

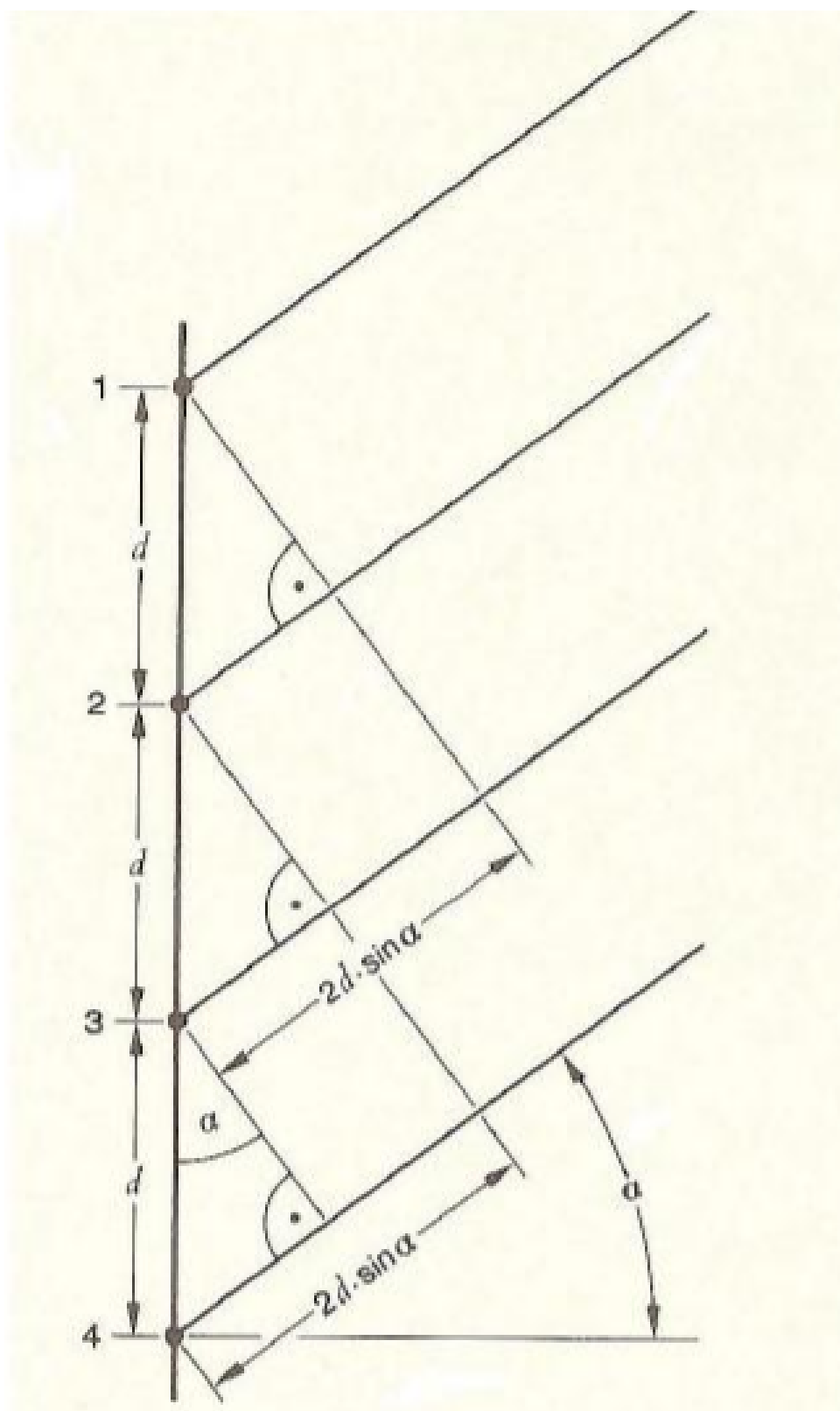


Figura 22: Diagrama formării maximelor și minimelor cu patru surse punctiforme de unde

Obiectiv 2 - Interferența și difracția pe diferite obstacole

Difracția pe marginea unui obstacol și pe o fantă largă

Unda plană întâlnește un obstacol. O undă circulară se propagă în spatele marginii obstacolului în umbra geometrică a obstacolului. (Fig.23)

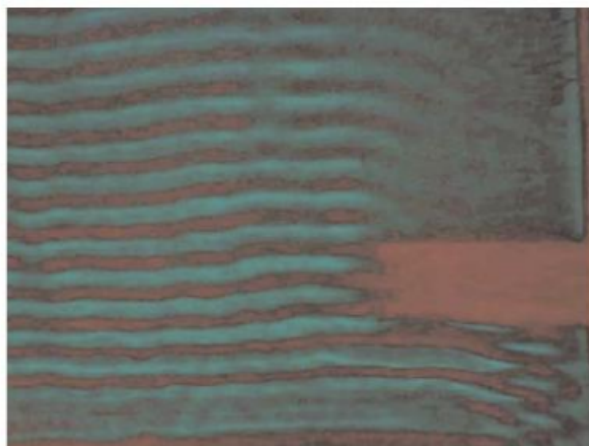


Figura 23: Difracția pe o margine a unui obstacol. Sunt emanate unde circulare în spatele obstacolului, și pot fi clar recunoscute în umbra geometrică a obstacolului.

Partea de unde care lovește frontal obiectul se reflectă, astfel rezultând o undă staționară în fața obstacolului. Când lucrăm cu trenuri de undă cu lungime de undă scurte putem observa că undele circulare emanate de pe marginea obiectului se propagă în toate direcțiile.

Din cele două obstacole care formează o fantă largă de 3 cm, unde circulare sunt eminate în umbra geometrică a obstacolelor (Fig.24). În mijlocul, în spatele fantei, poate fi observat că interferența de ordin zero este substanțial mai largă decât interferențele de ordin superior. Rezultatul ambelor experimente poate fi explicat cu ajutorul Principiul Huygens. În timp ce un număr infinit de unde elementare interferează în zona neperturbată unde se formează o undă plană, undele elementare care sunt eminate de pe marginea obstacolelor în umbra geometrică a obstacolelor nu interferează cu alte unde și pot fi observate direct în această zonă. Deschiderea fantei poate fi considerată o locație cu număr infinit de surse punctiforme generatoare de unde. Undele elementare emanate de la acești generatori interferează în spatele fantei pentru forma un tipar caracteristic.

Obs: Figura de interferență pe o fantă largă diferă de figura de interferență pe o fantă dublă într-un mod caracteristic. La o distanță mare de montajul cu o singură fantă interferența de ordin zero este dublă ca lărgime față de ordinele superioare de interferență. În cazul cu fantă dublă se prezintă aceeași lărgime pentru toate benzile, pentru toate ordinele de interferență.

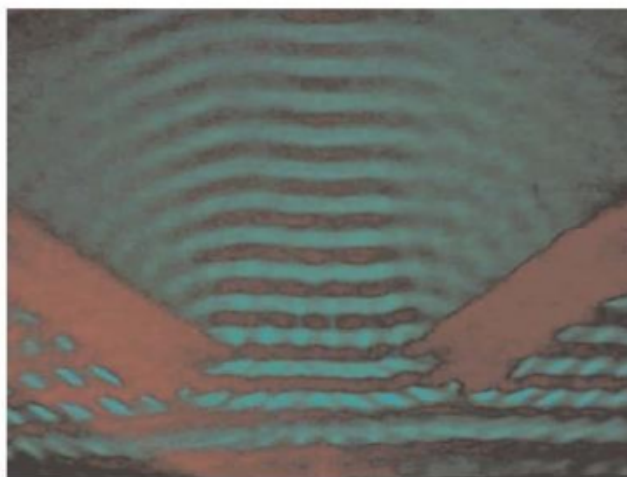


Figura 24: Interferența pe o fantă largă. În figura de interferență se poate observa că interferența de ordin zero este substanțial mai largă față de interferențele de ordin superior. Se observă că sunt emanate unde circulare la contactul cu cele două obstacole, în umbra geometrică a obstacolelor

Difractia pe o fantă îngustă

Unde circulare sunt emanate din fantă îngustă și pătrund în umbra geometrică a obstacolelor (Fig. 25). Fanta, care este îngustă comparând cu lungimea de undă care avansează pe apă, este punctul de plecare pentru o undă elementară (conform principiului lui Huygens). Se poate observa difracția în formă pură, și anume fără interferențe suprapuse. Când este realizat experimentul analog cu unde luminoase, trebuie folosită o fantă care este mai largă decât lungimea de undă a luminii pentru a obține o intensitate luminoasă semnificativă. În acest caz, nu se poate observa difracția în stare pură, din moment ce interferența are loc (vezi mai sus), care întrerupe tiparul de difracție. *Deci, observarea difracției pure pe o fantă îngustă este posibilă doar cu unde pe apă.*

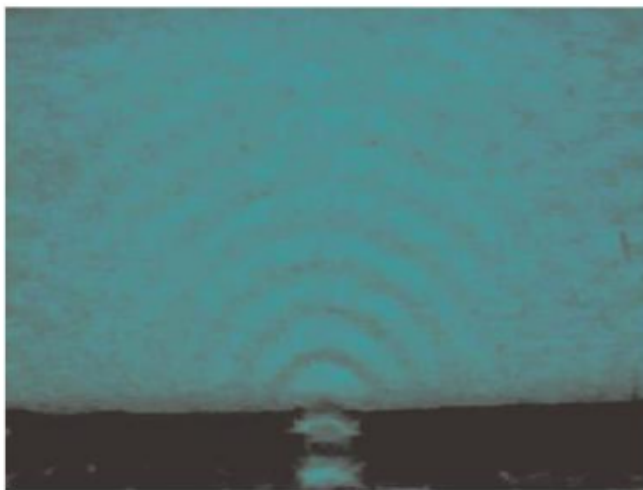


Figura 25: Difractia pe o fantă îngustă. Sunt emanate unde circulare din fantă precum și pot fi recunoscute în zona de umbră geometrică a obstacolelor

Difracția pe o fantă dublă

Pe mediatoarea segmentului care unește cele două surse punctiforme (cele două fante) este observată chiar în spatele obstacolului o zonă de interferență constructivă. Simetric, față de această bandă centrală, de-a dreapta și de-a stânga ei sunt prezente echidistant benzi de interferență constructivă și interferență distructivă. (Fig.26)

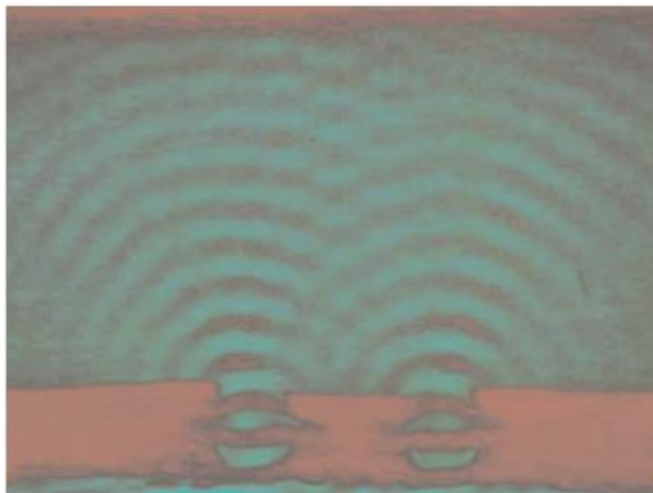


Figura 26: Interferența pe o fantă dublă. Sunt emanate unde circulare din ambele fante și se formează o figură de interferență caracteristică.

Dacă este micșorată distanța dintre fante, menținând aceeași frecvență și implicit lungime de undă, distanța dintre două benzi largime de interferență constructivă se mărește (Fig. 27). Același efect se petrece la creșterea lungimii de undă, dacă menținem distanța între fante constantă.



Figura 27: Interferența pe fantă dublă cu distanța scurtată dintre fante. În comparație cu Fig. 26 distanțele dintre benzile adiacente devin mai mari

Ambele fante devin surse de oscilații în acord cu Principiul lui Huygens. Aceste unde circulare interferează în spatele fantei duble în același fel în care interferează două unde provenite de la două surse punctiforme de unde. (Obs. din cauza intensității mici, pentru undele luminoase nu poate fi observată difracția în formă pură ca în cazul undelor pe apă)

Obiectiv 3 - Principiul antenelor defazate

Se poate observa că pentru o diferență de fază variabilă $\Delta\varphi \neq 0$ între doi generatori de undă, pozițiile ventrelor desenate pe hârtia de desen nu se mai potrivesc cu pozițiile ventrelor în cazul când defazajul este $\Delta\varphi = 0 = 360^\circ$ (Fig. 28). *Figura de interferență este translatată cu totul. Translația e cu atât mai mare cu cât defazajul $\Delta\varphi$ crește.*

Când defazajul este 180° , pe pozițiile ventrelor din figura de interferență se formează noduri, iar pe pozițiile nodurilor din figura de interferență se formează ventre (Fig. 30). Figura de interferență este inversată.

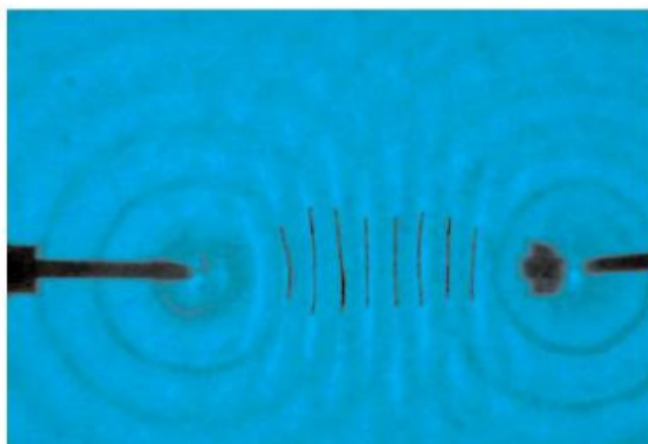


Figura 28: Captură din experimentul cu defazajul $\Delta\varphi = 360^\circ$. Pentru defazajul $\Delta\varphi = 360^\circ$ pozițiile ventrelor coincid cu pozițiile nodurilor când $\Delta\varphi = 0^\circ$

Dacă diferența de fază este în continuare mărită figura de interferență este translatată mai mult (Fig.29 și Fig.31) până când, la diferența de fază $\Delta\varphi = 360^\circ = 0^\circ$ noua figură de interferență revine la poziția figurii de interferență inițială. (Fig.28)

Cu creșterea diferenței de fază ale celor două unde generate pe suprafața apei, fazele sunt modificate una față de cealaltă, cazul în care defazajul este $\varphi = 180^\circ$ corespunde unei translații de $\lambda/2$. Unui defazaj de $\varphi = 360^\circ$ îi corespunde o translație pe a figurii de interferență pe o distanță λ , prezentată în Fig.30 și Fig.28.

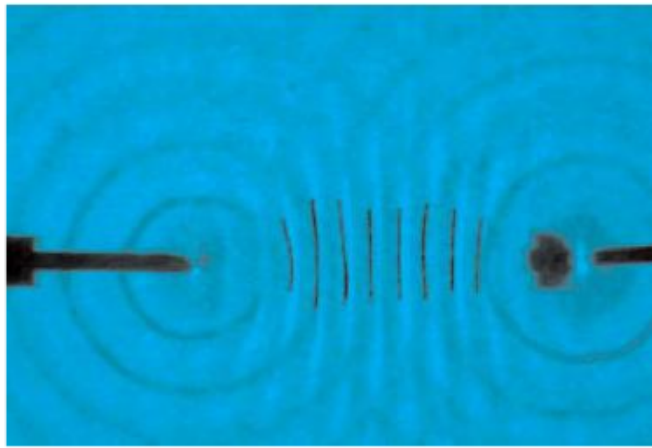


Figura 29: Captură cu o diferență de fază de $\Delta\varphi = 90^0$. Se poate vedea că figura de interferență este translatată, observând fostele poziții ale ventrelor desenate pe hârtie

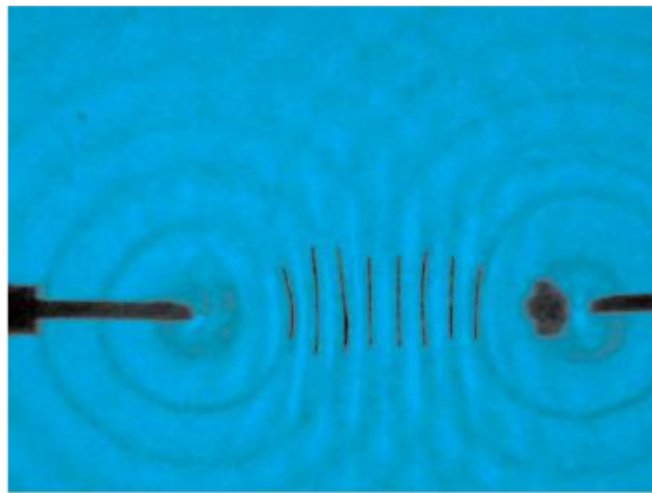


Figura 30: Captură la o diferență de fază de $\Delta\varphi = 180^0$. Se poate vedea că nodurile figurii de interferență acum se alină la pozițiile desenate ale fostelor ventre, și vice-versa

Când două unde circulare în fază interferează, apare o figură de interferență caracteristică - rezultă o undă staționară, cu zone de interferență constructivă și zone de interferență distructivă. Locațiile zonelor de interferență constructivă se așează pe hiperbole, care se alină la distanța $\Delta l = \lambda \cdot m$, ($m = 1, 2, 3, \dots$) față de sursele punctiforme care generează undele; locațiile de interferență distructivă se așează pe hiperbole la distanța la distanța $|\Delta l| = \frac{1}{2} \cdot \lambda, \frac{3}{2} \cdot \lambda, \frac{5}{2} \cdot \lambda, \dots$ față de sursele punctiforme care generează undele. (Obiectivul 1)

Dacă o zonă de interferențe constructivă (ventre) apare în figura de interferență a două unde circulare în fază, și o comparăm cu figura de interferență a două unde circulare în opoziție de fază, acest defazaj $\Delta\varphi = 180^0$ cauzează acum formarea ventrelor în locuri unde erau noduri, și formarea nodurilor acolo unde erau ventre față de cazul "în fază".

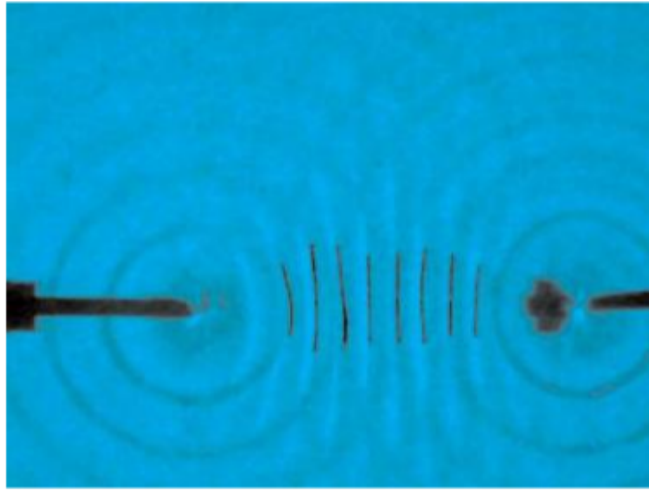


Figura 31: Captură din cazul cu un defazaj $\Delta\varphi = 270^0$. Se observă o translație și mai mare a figurii de interferență.

La un defazaj de 360^0 figura de interferență revine la forma inițială. Efectul controlării figurii de interferență este folosit pentru a construi așa numitul *grup de antene defazate* ("phased array antennas"). Acest set de antene constă din mai mulți emițători singulari, care sunt așezați în grupuri. Variind fazele unora dintre grupuri, este posibilă potențarea intensității semnalului (interferență constructivă) într-o direcție preferențială și slăbirea intensității semnalului (interferență distructivă) în alte direcții. Antenele defazate sunt folosite ca antene de radar, de exemplu, în sistemele de apărare anti-rachete, pentru cercetări meteorologice, în sateliți, etc.

Ca o concluzie, acest experiment arată posibilitățile folosirii undelor pe apă pentru a ilustra fenomenele de difracție și interferență. Undele pe apă prezintă mai multe avantaje în comparație cu undele luminoase în ceea ce privește difracția, difracția pură fiind posibil de observat doar în cazul undelor pe apă. Mai mult, am văzut și explicat un exemplu practic (antenele defazate) de folosire a controlului translatării figurii de interferență, folosind undele pe apă. Deci, experimentul poate ajuta la o mai bună înțelegere a difracției și a interferenței undelor și al uzului practic al acestora.