

Interferența luminii

Cuvinte cheie: lungime de undă(λ), fază (φ), biprismă Fresnel, oglinzi Fresnel, sursă virtuală de lumină, defazaj ($\Delta\varphi$), diferență de drum (Δr), figură de interferență, maxim de interferență, minim de interferență, interfranță (i)

Principiu

Divizând frontul de undă al unui fascicul laser cu ajutorul oglinzilor Fresnel sau biprismei Fresnel, se produce fenomenul de interferență. Lungimea de unda va fi determinată din figura de interferență.



Figura 1: Montajul experimental pentru producerea interferenței cu oglinzi Fresnel

Echipament

Biprismă Fresnel	1
Suport cu masă pentru biprismă	1
Oglindă Fresnel	1
Lentilă, $f=+20\text{mm}$	1
Lentilă, $f=+300\text{mm}$, acrom.	1
Suporturi lentilă	2
Tijă de articulație	1
Profil de banc optic, $l=1000\text{mm}$	1
Suport mobil pentru element optic, $h=30\text{mm}$	2
Suport mobil pentru element optic, $h=80\text{ mm}$	2
Bază profil banc optic	2
Laser, He-Ne, 1.0 mW, 220 V CA	1
Ruletă, $h=2\text{m}$	1

Obiective

Determinarea lungimii de undă a luminii prin interferență

1. cu oglinzi Fresnel
2. cu birprisma Fresnel

Montaj și mod de lucru

Montajul experimental pentru producerea interferenței cu oglinzile Fresnel este reprezentat în Fig.1. Laserul (2cm), suportul de lentilă și lentilă cu distanța focală $f = 20\text{mm}$ ($23, 3\text{cm}$) și suportul oglinzii Fresnel ($43, 2\text{cm}$) sunt montate pe bancul optic. O suprafață de proiecție este folosită drept ecran și situată la distanța de 2 până la 5m .

Înainte de a începe experimentul, partea mobilă a oglinzilor Fresnel este reglată în așa fel încât cele două jumătăți de oglindă să fie aproximativ paralele.

Suprafața oglinzii este acum aliniată paralel cu bancul optic. Laserul este reglat astfel încât fasciculul larg de raze să cadă în mod egal pe ambele oglinzi.

Două pete luminoase, separate de o zonă întunecată, ar trebui să fie acum vizibile pe ecran. Reglând șuruburile oglinzii Fresnel, partea mobilă a oglinzii este înclinată până când cele două zone luminoase se suprapun. Figura de interferență și relația cu unghiul de înclinare a oglinzilor este observată pe ecran. Figura de interferență ar trebui să arate ca în Fig.6.

Montajul experimental folosind biprisma Fresnel este asemănător cu cel din Fig. 1.(dreapta). Bancul optic, în plus față de laser și de prima lentilă, are și un suport cu masă pentru biprismă și o biprismă (45cm), și un suport de lentilă cu distanța focală de 300mm (aprox. 60cm). Fasciculul lărgit lovește central muchia biprisme. Cu ajutorul lentilei plasată la 60cm , cele două surse virtuale de lumină proiectează o imagine pe ecran la depărtarea de 3m depărtare. Distanțele între cele două surse de lumină, distanța dintre lentila prin

care se formează imaginea și imagine, și distanța obiect(distanța dintre poziția lentilei 1 și poziția lentilei 2, pe bancul optic, minus distanța focală a lentilei 1) sunt măsurate. Dacă lentila 2 este îndepărtată, se observă figura de interferență. Distanța dintre m franje luminoase de interferență este măsurată.

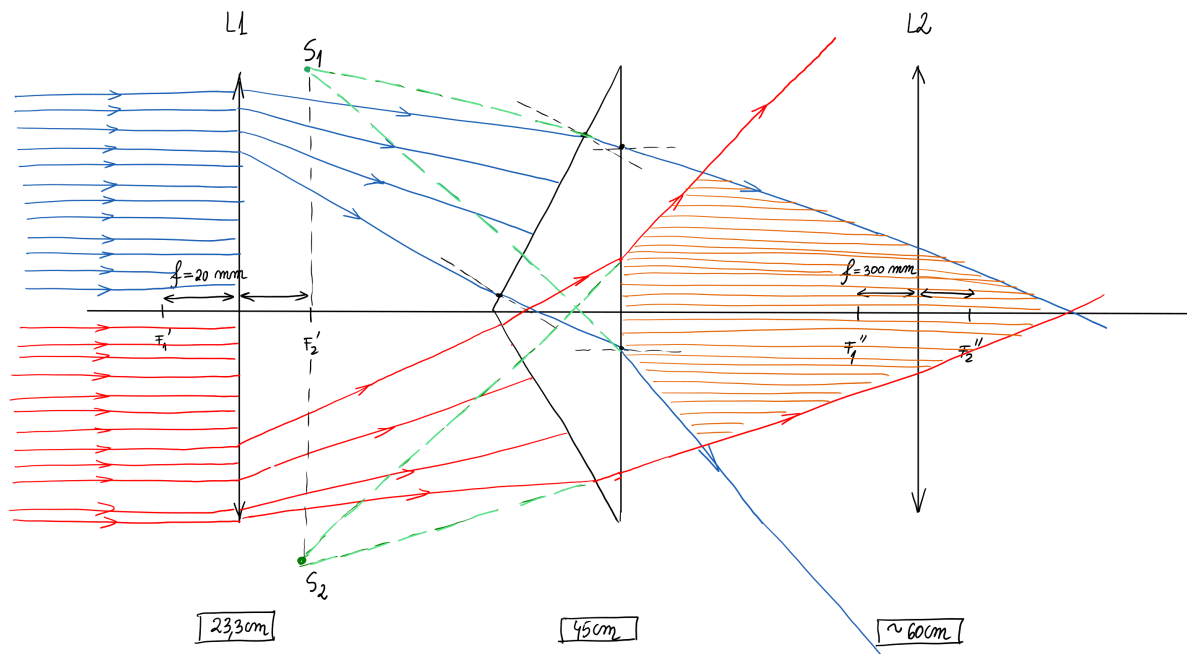


Figura 2: Mersul razelor de lumina prin lentila 1 ($f = 20mm$), biprisma Fresnel, lentila 2 ($f = 300mm$), evidențiind sursele virtuale S_1 și S_2 și zona de interferență în spatele biprisme.

Distanța dintre sursele S_1 și S_2 o notăm cu d . Distanța de la planul surselor la ecranul pe care prindem figura de interferență cu franje luminoase și franje întunecate o notăm cu D . Distanța dintre două franje luminoase poartă numele de interfranjă, i , iar lumina are lungimea de undă λ .

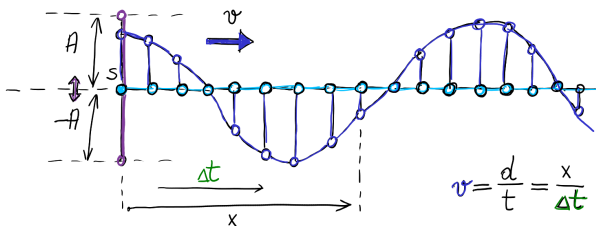
$$i = \lambda \frac{D}{d}$$

Teoria lucrării

În cele ce urmează este prezentată o schiță cu noțiuni de liceu despre interferența undelor.

INTERFERENȚA UNDELOR

S - sursă de perturbații
 $y_s(t) = A \sin(\omega t)$



$y(x,t) = A \sin[\omega(t - \Delta t)]$, legea de mișcare a oscilatorului aflat la x față de sursa de perturbații S.

Obs1 Oscilatorul aflat la distanța x de sursă, intră cu întârzierea Δt în oscilație.

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

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

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

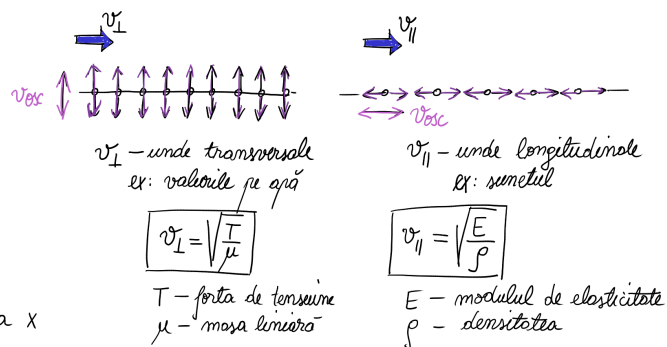


$$y(x,t) = A \sin\left[\frac{2\pi}{T} \cdot t - \frac{2\pi}{\lambda} \cdot x\right]$$

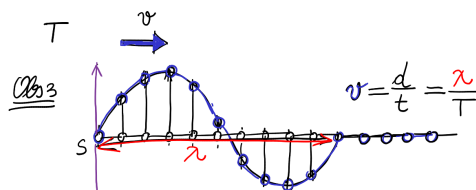
ecuația dinamică de mișcare a tuturor oscilatorilor de pe poziția x, în timp

ECUAȚIA UNDEI PLANE
 (ecuația valului)

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



Obs2 v_{\perp}, v_{\parallel} depind doar de mediul prin care se propaga unda.



Obs3

Obs Intr-o oscilație completă a sursei de perturbație S valul avansează până la poziția λ .

λ = lungimea de undă

COMPUNEREA UNDELOR (INTERFERENȚA UNDELOR)

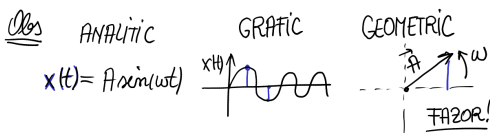
În punctul P din spațiu se suprapun două valuri:

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

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

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

y_P - înălțimea valului rezultat în P



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

$$\Delta\varphi = \text{defazaj}$$

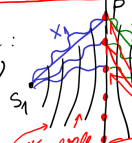
$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot (x_2 - x_1)$$

Δx - diferența de drum

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

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

CAZ PARTICULAR: (exemplificare)



În punctele P de pe mediatoarea S_1S_2

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

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

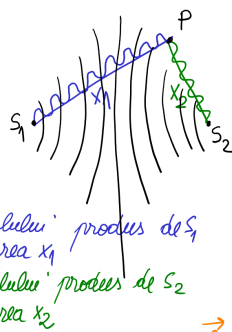
$$A = A_{\max} = A_1 + A_2 \Rightarrow \text{creastă}$$

$$\Delta\varphi \propto t$$

CONDITIE DE PRODUCERE A INTERFERENȚEI

creastă (maxim)

val (minim)



S_1, S_2 - două surse de perturbații 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

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

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

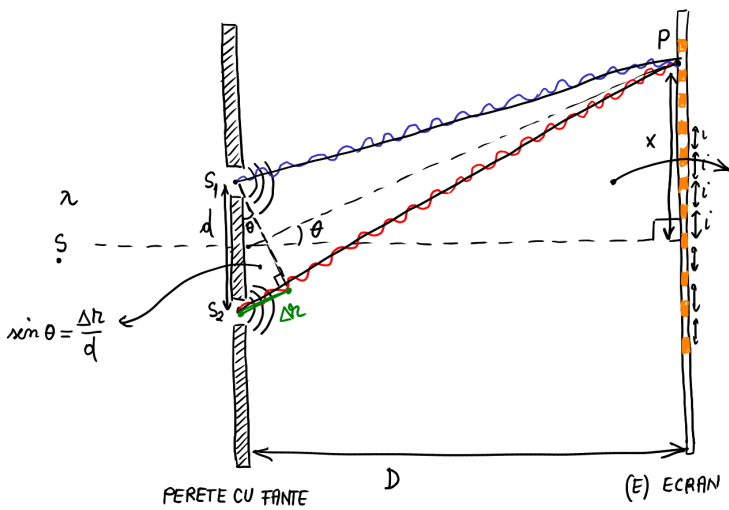
$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 - 2A_1A_2}$$

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

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

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

DISPOZITIVUL YOUNG



Δr - diferența de drum dintre unde S_1P și S_2P

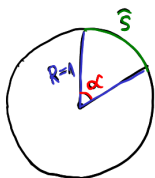
$$\Delta \varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Delta r$$

$$\tan \theta = \frac{x}{D}$$

$$\sin \theta = \frac{\Delta r}{d}$$

Pentru unghiuri $\theta \ll 5^\circ$, figura de interferență manifestându-se pe ecran central pe o porțiune îngustă:

$$\theta \approx \sin \theta \approx \tan \theta$$



\hat{S} - arc subîntins unghiului α

$$R \cdot \alpha = \hat{S}$$

Definiție: 1 radian $\stackrel{\text{def}}{=}$ unghiul α pentru care arcul subîntins unghiului α este egal cu raza R.

$$1 \text{ radian} = 57,2958...^\circ \text{ grade} \Rightarrow \alpha = 1 \text{ radian} \Rightarrow R = \hat{S}$$

$$2\pi \text{ radiani} = 360^\circ \text{ grade} \Rightarrow \alpha = 2\pi \text{ radiani} \Rightarrow 2\pi R = \hat{S}$$

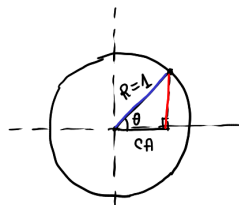


$$\alpha = \frac{\hat{S}}{R}$$

dacă $R=1$ (cerc de rază $R=1$) $\Rightarrow \alpha = \hat{S}$

$$\Rightarrow \theta = \hat{S}$$

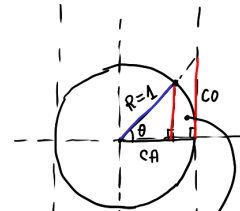
unghiul θ = lungimea arcului subîntins



$$\sin \theta = \frac{CO}{IP}$$

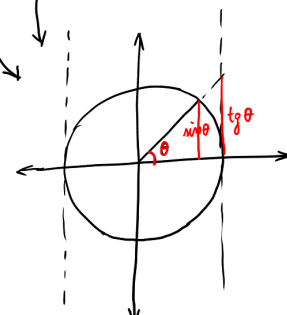
$$\sin \theta = \frac{CO}{1}$$

$$\sin \theta = CO$$



$$\tan \theta = \frac{CO}{CA}$$

$$\tan \theta = CO$$



$$\Rightarrow \theta \ll 5^\circ \quad \theta \approx \sin \theta \approx \tan \theta$$

$$\theta \approx \sin \theta \approx \tan \theta$$

$$\Rightarrow \frac{x}{D} = \frac{\Delta r}{d}$$

$$\Rightarrow x_{\max} = \frac{D}{d} \cdot \Delta r_{\max}$$

pozițiile maximelor pe ecran

$$\Rightarrow x_{\max} = \frac{D}{d} \cdot \left(2k \cdot \frac{\lambda}{2}\right) \Rightarrow x_{\max} = k \cdot \left(\lambda \cdot \frac{D}{d}\right)$$

$$x_{\max} = k \cdot i \quad k \in \mathbb{Z}$$

$$i = \frac{\lambda \cdot D}{d} = \text{const.}$$

Teorie și evaluare

Dacă lumină de lungime de undă λ provine din două puncte luminoase a căror diferență de fază este constantă în timp (coerență) și cade în punctul P , atunci cele două fascicule luminoase vor interfera.

Dacă cele două amplitudini ale câmpului electric ale celor două fascicule de lumină care se propagă în direcția x sunt reprezentate în scrierea exponențială de:

$$s_i = a_i \cdot e^{i(Z/\lambda - \delta_i)} \quad (1)$$

unde δi reprezintă faza, intensitățile fiecărui fascicul sunt date de:

$$I_i = s_i \cdot s_i^* \quad (2)$$

din principiul superpoziției:

$$I = I_1 + I_2 + 2 \cdot \sqrt{I_1 I_2} \cos \delta \quad (3)$$

unde $\delta = \delta_1 - \delta_2$

Conform ecuației (3), I prezintă maxime și minime în funcție de defazajul δ . În cazul oglinzilor Fresnel o undă de la sursa Q cade incident pe cele două oglinzi înclinate sub un unghi α . Figura de interferență este observată pe ecranul S . Oglinda cu sursa de lumină Q , poate fi înlocuită de două surse de lumină coerentă Q_1 și Q_2 , separate de distanța d .

Dacă r este distanța dintre Q și punctul A la care oglinzile se ating, atunci din Fig. 5:

$$AQ_1 = AQ_2 = r$$

Si

$$d = 2r \sin \alpha$$

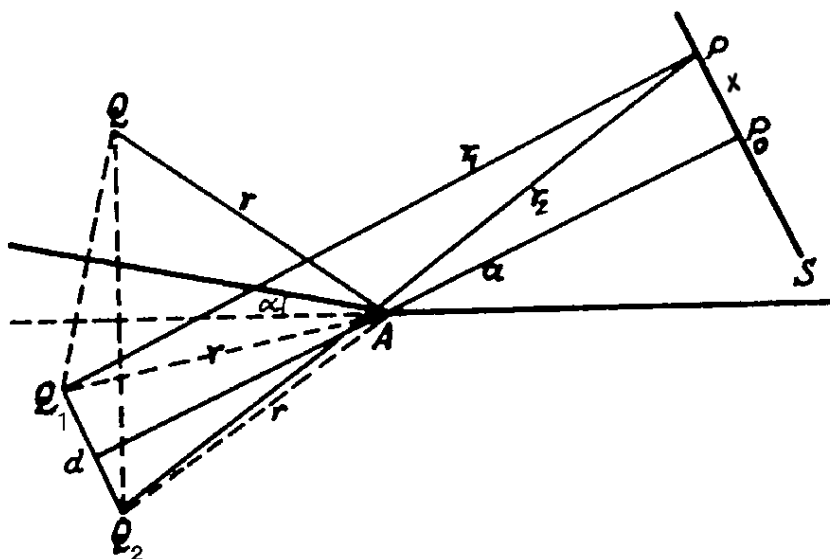


Figura 5: Schiță geometrică a montajului folosind oglinzi Fresnel

Dacă distanța D dintre ecran și oglinzi este mare ($2 - 5m$) în comparație cu distanța dintre două maxime de interferență adiacente, atunci se aplică următoarea relație:

$$\begin{aligned} r_2 &= r_1 = D \\ r_2 - r_1 &= \frac{xd}{D} \end{aligned}$$

Deoarece

$$(r_2 - r_1) + (r_2 + r_1) = 2xD$$

Deci diferența de fază este

$$\delta = 2\pi \frac{r_2 - r_1}{\lambda} = \frac{2\pi xd}{\lambda D}$$

Conform ecuației (3) maximele se produc pe ecran când distanțele p sunt egale cu:

$$\cos \delta = 1 \Rightarrow \delta = (2n)\pi \Rightarrow x_{max} = n \cdot \frac{\lambda D}{d} \quad (4)$$

Conform ecuației (3) minimele se produc pe ecran când distanțele p sunt egale cu:

$$\cos \delta = -1 \Rightarrow \delta = (2n + 1)\pi \Rightarrow x_{min} = (n + \frac{1}{2}) \cdot \frac{\lambda D}{d} \quad (5)$$

unde $n = 0, 1, 2, \dots$

Distanța d dintre cele două surse virtuale Q_1 și $Q_2(y_1)$ este determinată proiectând o imagine cât mai clară a lor pe ecran, folosind lentile de distanță focală f și măsurând mărimea imaginii y_2 :

$$\frac{1}{x_1} + \frac{1}{x_2} = \frac{1}{f} \quad (6)$$

$$\frac{x_1}{x_2} = \frac{y_1}{y_2} \quad (7)$$

unde x_1 reprezintă distanța obiect - lentilă 2
(obiectul fiind sursele S_1, S_2 aflate în planul focal al lentilei 1)
iar x_2 reprezintă distanța lentilă 2 - imagine
din ecuațiile (6), (7)

$$y_1 = \frac{y_2 \cdot f}{x_2 - f} \quad (8)$$

Din ecuațiile (4), (5), (8) se determină lungimea de undă λ ca o medie a mai multor măsurători, folosind diferite unghiuri de înclinare ale oglinzii.
 $n = 1$ atunci ecuația (4):

$$i = \frac{\lambda D}{d}$$

sau

$$\lambda = \frac{d \cdot i}{D}$$

Unde i este **interfranja**, D -**distanța de la planul surselor** Q_1, Q_2 la ecran, d - **distanța dintre cele două surse** Q_1, Q_2 (distanța d numită și y_1 în ecuația (8))

$$y_1 = \frac{y_2 \cdot f}{x_2 - f} \quad (9)$$

$$\lambda = \frac{y_2 \cdot f}{x_2 - f} \cdot \frac{i}{D} \quad (10)$$

$D = (60cm - 23.3cm) - 20mm$ (cu oglinzi Fresnel)

i - interfranja de pe ecran

f - distanța focală $20mm$

y_2 - înălțimea imaginii prin biprismă (cu lentila 2 montată)

x_2 - distanța de la lentila 2 la ecran

Interferența se observă fără lentila 2 în montaj.

Cu lentila 2 în montaj se observă imaginea reală a Q_1, Q_2 virtuale prin lentilă.

Rezultă astfel valoarea determinată:

$$\lambda = 626.5nm$$

În cazul biprismei Fresnel distanța $d = y_1$ este determinată exact ca în cazul oglinzilor Fresnel, folosind ecuația (8).

Ecuațiile (4), (5), în mod asemănător, se aplică pentru interfranje p dacă indicele de refracție al prisme și grosimea prisme sunt neglijate. Folosind ecuațiile (4), (5), (8), valoarea determinată λ rezultă:

$$\lambda = 624.0nm$$

Valoarea din literatură: $632.8nm$

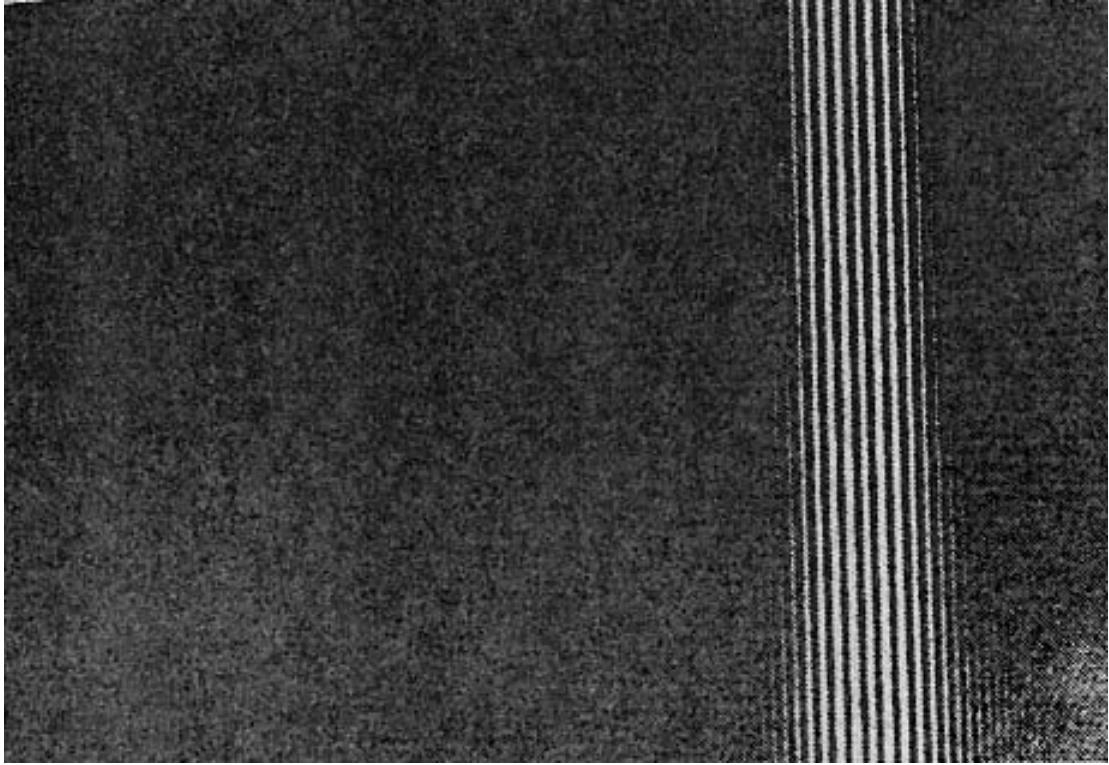


Figura 6: Interferența luminii prin oglinzi Fresnel

Determinați lungimea de undă a fasciculului laser cu ajutorul oglinzilor și biprisme Fresnel:

$$\lambda = \frac{y_2 \cdot f}{x_2 - f} \cdot \frac{i}{D} \quad (11)$$

$f=20mm$	$D(m)$	$i(mm)$	$x_2(mm)$	$y_2(mm)$	lungimea de undă λ