

Interferența luminii

dispozitivul Young și alte dispozitive interferențiale studiate.



VIATA DE LICEU

se traieste o singura data!

Interferența luminii

Interferența undelor electromagnetice din domeniul vizibil presupune suprapunerea a două unde într-o zonă spațială. Însă pentru a înțelege fenomenul de interferență a luminii este necesar să se ia în considerare natura ondulatorie a acesteia.

În cazul surselor de lumină obișnuite atomii primesc energie prin efect Joule, trec în stări energetice excitate și se dezexcită complet aleator emitând radiație în mod nesincronizat. Sursele cu aceste caracteristici se numesc surse necoerente, iar ele emit unde necoerente. În cazul acestora nu se poate observa fenomenul de interferență.

Pentru a putea înțelege interferența luminii vom defini o serie de noțiuni necesare:

Numim **unde coerente** două sau mai multe unde care au aceeași pulsație și diferențe de fază constante.

Numim **interferență** fenomenul de superpoziție a două sau mai multe unde coerente.

Numim **câmp de interferență** regiunea din spațiu în care are loc interferența undelor.

Componenta electrică a unei electromagnetice este cea care îi se datorează efectele fiziologice luminoase.

Considerăm două surse coerente de lumină, S_1 și S_2 , care emit unde de aceeași frecvență, având amplitudini paralele și egale fiecare cu E_0 , cu o fază inițială presupusă nulă ($\varphi=0$). Presupunem faza inițială nulă pentru a nu îngreuna calculele. În cele două puncte intensitatea câmpului electric variază în timp conform legii:

$$E_1(t)=E_0\sin(\omega t), \quad E_2(t)=E_0\sin(\omega t).$$

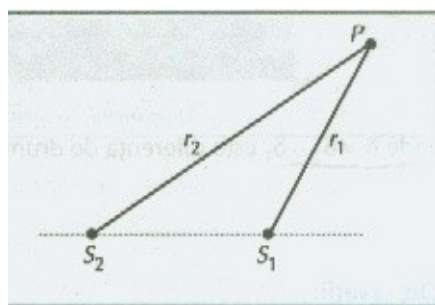
Cele două unde se propagă și ajung amândouă în punctul P situat la distanțele r_1 și, respectiv r_2 de cele două surse (fig.1). În acest punct au loc simultan două oscilații paralele descrise de ecuațiile:

$$E_1(t) = E_0 \cdot \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} \cdot r_1\right),$$

$$E_2(t) = E_0 \cdot \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} \cdot r_2\right).$$

Dar lungimea de undă λ poate fi exprimată astfel: $\lambda = v \cdot T = (c/n) \cdot T = \lambda_0/n$, iar λ_0 reprezintă lungimea de undă în vid. Corespunzător, ecuațiile celor două oscilații iau forma:

$$E_1(t) = E_0 \cdot \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot \delta_1\right), \quad E_2(t) = E_0 \cdot \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot \delta_2\right),$$



(fig.1)

Odată lămurite aceste noțiuni, putem introduce și defini o nouă noțiune.

D Numim **drum optic** δ corespunzător unui drum geometric d , produsul $n \cdot d$, unde n este indicele de refracție al mediului prin care se propagă lumina.

Pe scurt, se obține formula: **$\delta = n \cdot d$**

Observație: În mod curent, pentru desemnarea drumului optic asociat unui drum geometric d , se folosește și notația (d) .

Principiul superpoziției liniare

Este principiul care descrie fenomenele care au loc în orice punct în care ajung două sau mai multe unde.



VIATA DE LICEU

se traieste o singura data!

Enunț: Atunci când două sau mai multe unde se suprapun într-o regiune din spațiu, elongația rezultantă în orice punct din acea regiune și la orice moment de timp este egală cu suma algebrică a elongațiilor pe care le-ar produce în acel punct fiecare undă, dacă ar fi numai ea prezentă.

Observație:

- Acest enunț al principiului este valabil în cazul particular în care oscilațiile se fac pe aceeași direcție.
- Prin elongație se înțelege o deplasare spațială a punctului în mediu în cazul unei unde mecanice, un exces sau un deficit de presiune în cazul unei unde sonore. În cazul undelor electromagnetice prin elongație se înțelege mărimea intensității câmpului electric sau a inducției câmpului magnetic.

Atunci, conform principiului superpoziției liniare, cele două oscilații din P, având aceeași direcție, se compun algebric

$$E(t) = E_1(t) + E_2(t)$$

și rezultă o oscilație de aceeași frecvență. Amplitudinea A a oscilației rezultante este dată, în general. De relația

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1 A_2 \cos((2\pi/\lambda_0) \cdot \delta),$$

unde $\delta = \delta_2 - \delta_1$ este diferența de drum optic. În cazul particular studiat aici relația precedentă se reduce la forma

$$A = 2E_0 \cos((\pi/\lambda_0) \cdot (\delta_2 - \delta_1))$$

Observație:

- Expresia obținută arată că amplitudinea oscilației rezultante în orice punct din câmpul de interferență depinde nu numai de amplitudinile undelor care interferează, ci și de diferența de drum optic $\delta = \delta_2 - \delta_1$.

- Dacă diferența de drum este constantă în timp și amplitudinea rezultantă, A , este constantă în timp. Dacă aceasta este situația pentru toate punctele din câmpul de interferență, interferența este numită **staționară**.

Intensitatea luminoasă este proporțională cu fluxul luminos, $I \sim \Phi$, iar acesta este proporțional cu fluxul energetic, $\Phi \sim \Phi_e$; fluxul energetic este proporțional cu energia W , $\Phi \sim W$, iar aceasta este proporțională cu pătratul amplitudinii de oscilație, $I \sim A^2$. În cazul particular studiat aici:

$$I \sim 4E_0^2 \cos^2[(\Delta/\lambda_0)(\delta_2 - \delta_1)].$$

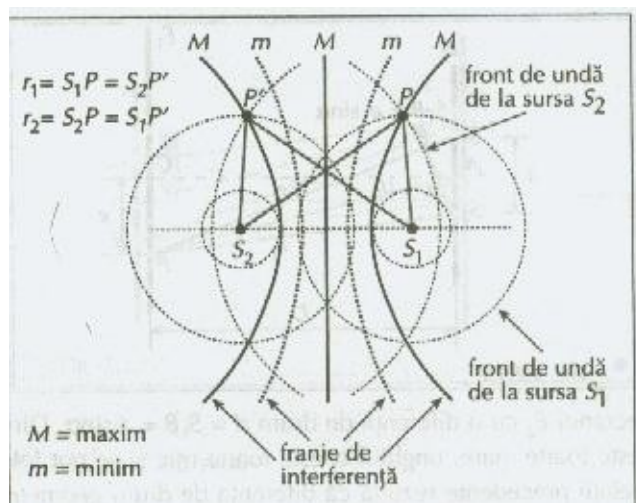
Deducem astfel că intensitatea luminoasă este maximă atunci când diferența de drum optic este egală cu un număr par de $\lambda_0/2$ (semilungimi de undă), $\delta = 2k\lambda_0/2$, și este minimă atunci când diferența de drum optic este egală cu un număr impar de $\lambda_0/2$, $\delta = (2k+1)\lambda_0/2$.

În concluzie, toate punctele din câmpul de interferență pentru care diferența de drum optic este un număr par de $\lambda_0/2$ oscilează cu amplitudine maximă $A=2E_0$; intensitatea luminoasă este proporțională cu $4E_0^2$ și este independentă de ordinul k al maximului de interferență: toate maximele figurii de interferență au aceeași intensitate luminoasă, iar toate punctele din câmpul de interferență pentru care diferența de drum optic este un număr impar de $\lambda_0/2$ oscilează cu amplitudine minimă 0.

D Se numesc **franje de interferență** curbele care unesc între ele puncte de maximă amplitudine, respectiv, puncte de minimă amplitudine.

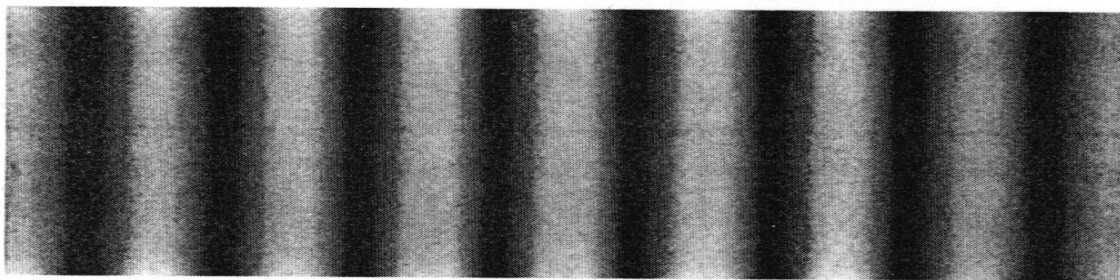
Dacă cele două surse sunt punctiforme, se poate arăta că:

- Pentru o valoare dată a diferenței de drum, există două franje de interferență, simetrice față de mediatoarea segmentului care unește cele două surse (fig.2);
- Franjele de interferență sunt hiperbole.



(fig.2)

În figura următoare se poate observa aspectul franjelor de interferență. Ele sunt echidistante. Franjele luminoase au aceeași intensitate indiferent de poziția lor.

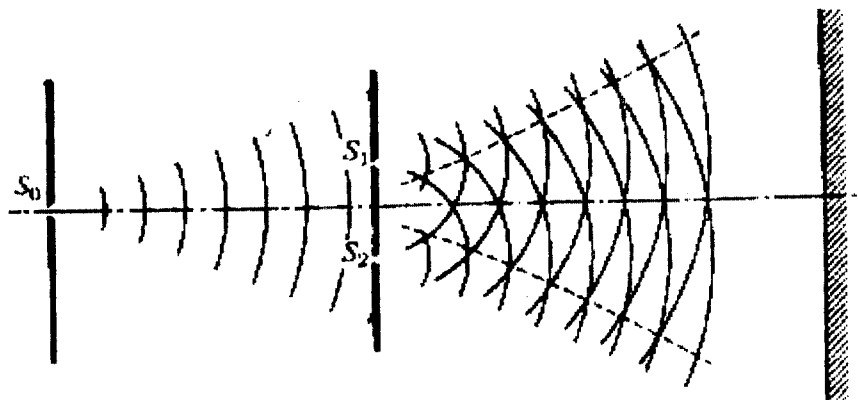


În continuare vom studia câteva aplicații ale interferenței.

1. Dispozitivul Young.

Una dintre cele mai vechi demonstrații ale faptului că lumina poate produce efecte de interferență a fost făcută în 1800 de către savantul englez Thomas Young.

Dispozitivul lui Young este prezentat în figura 3.



(fig. 3)

Lumina monocromatică, provenind de la fanta îngustă S_0 este împărțită în două cu ajutorul unui ecran în care sunt practicate două fante dreptunghiulare, înguste ($0,1 - 0,2 \text{ mm}$), foarte apropiate (distanța dintre fante $< 1 \text{ mm}$), S_1 și S_2 . Conform principiului lui Huygens, de la fanta S_0 pornesc unde cilindrice, care ajung la fantele S_1 și S_2 în același timp. Apoi, de la fiecare fantă, va porni câte un tren de unde Huygens; deci fantele se comportă ca surse coerente.

Fie d - distanța dintre fante și P - un punct pe ecranul de observare, într-o direcție care formează un unghi θ cu axa sistemului (figura 4). Cercul cu centrul în P , avînd raza PS_2 , intersectează PS_1 în B . Dacă distanța R de la fante la ecran este mare în comparație cu distanța d dintre fante, arcul S_2B poate fi considerat o dreaptă ce formează unghiuri drepte cu PS_2 , PA și PS_1 . Atunci triunghiul BS_1S_2 este un triunghi dreptunghic, asemenea cu POA , iar distanța S_1B este egală cu $d \sin \theta$. Această distanță este diferența de drum dintre undele de la cele două fante, care ajung în P . Undele care se propagă din S_1 și S_2 pornesc în concordanță de fază, dar pot să nu mai fie cu fază în P , datorită diferenței de drum. În punctul P se va obține un maxim dacă diferența de drum a celor două unde este egală cu un număr întreg de lungimi de undă, $m\lambda$.

$$d \sin \theta = m\lambda$$

unde $m = 0, 1, 2, 3$.

Franja centrală luminoasă din punctul O corespunde unei diferențe de drum nule, adică $\sin \theta = 0$. Distanța y_m dintre franja de ordinul zero și punctul P aflat în centrul celei de-a m -a franje este:

$$y_m = R \tan \theta_m$$

deoarece pentru toate valorile lui m unghiul θ este foarte mic, $\tan \theta_m \approx \sin \theta_m$ și rezultă:



VIATA DE LICEU

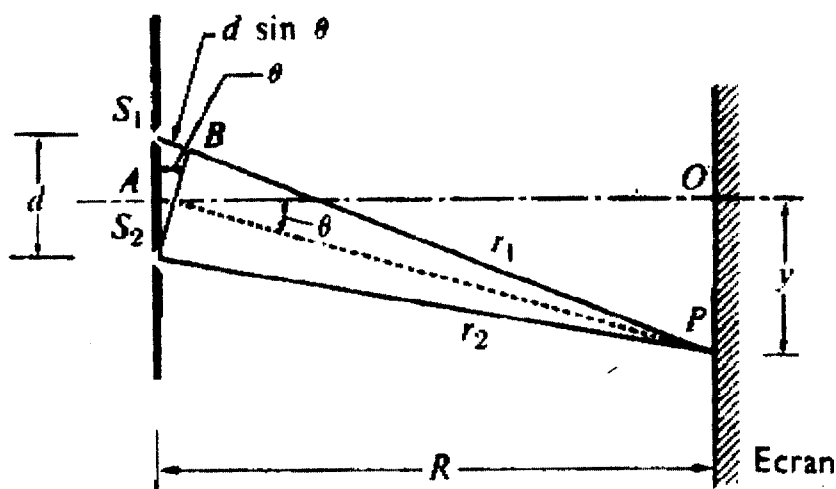
se traieste o singura data!

$$y_m = R \sin \theta_m = R \frac{m\lambda}{d}.$$

Știind că interfranja este distanța dintre două maxime (sau minime) consecutive rezultă că

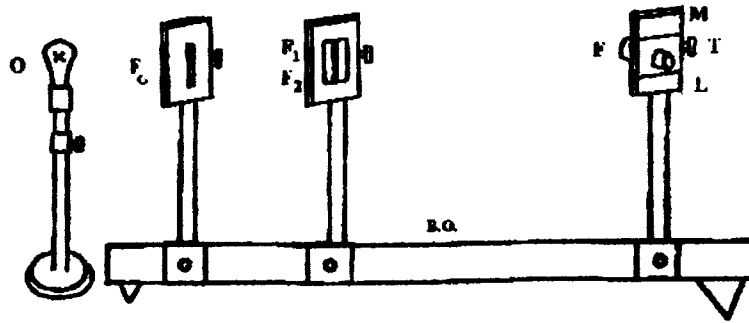
$$i = y_{m+1} - y_m = \frac{\lambda R}{d}.$$

Pe ecran se obține un sistem de franje ca acela prezentat în figura de mai jos, unde am prezentat și distribuția de intensitate luminoasă :



(fig.4)

Un montaj care demonstrează, experimental, cele spuse anterior se numeste dispozitivul lui Young (fig.5).



(fig.5).

Modul de lucru presupune parcurgerea următoarelor etape:

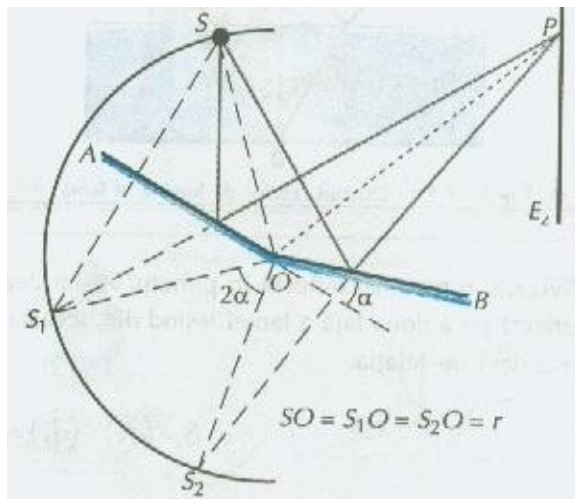
Se iluminează fanta F care este relativ deschisă (1 - 2 mm). Se reglează pozițiile fantelor F_1 și F_2 și poziția lupei, aducându-se în linie dreaptă cu fanta F, la aceeași înălțime, utilizând, eventual, o foaie de hârtie drept ecran. Privind prin lupă, se micșorează deschiderea fantei F, astfel încât franjele de interferență să fie clare. Se măsoară distanța R.

Se potrivește firul reticular pe centrul unei franje și se notează poziția x_1 a indicatorului rigletei și poziția y_1 a indicatorului tamburului. Se rotește tamburul trecând cu firul reticular peste un număr N de franje (5 - 8) după care se notează N și noile poziții ale indicatoarelor x_2 și y_2 .

Pentru a evita pasul mort al șurubului, se recomandă ca aducerea firului reticular la poziția inițială să se facă în același sens în care urmează să se facă ulterior parcurgerea franjelor.

2. Oglinzile lui Fresnel

Oglinzile lui Fresnel reprezintă un alt sistem de a realiza două surse coerente dintr-o singură sursă de lumină. (fig.6)



(fig.6)

În acest caz, cele două surse coerente S_1 și S_2 se obțin ca imagini virtuale ale unei surse S (sub formă de fantă perpendiculară pe planul figurii, cu două oglinzi plane OA și OB , care fac între ele un unghi foarte apropiat de 180°). În mod obișnuit se spune că cele două oglinzi fac între ele un unghi foarte mic (unghiul α din fig.6). Muchia comună a celor două oglinzi este paralelă cu fanta S folosită ca sursă, precum și cu cele două surse coerente. Imaginile virtuale S_1 și S_2 , împreună cu sursa S se află pe un cerc de rază r , cu centrul în punctul O , unde se află intersecția mediatoarelor segmentelor SS_1 și SS_2 .

Fenomenul de interferență se obține pe ecranul E_2 , paralel cu muchia comună. El constă din franje sub formă de dungi luminoase și întunecate paralele cu muchia și practic echidistante. Franja centrală din punctul P este un maxim, deoarece toate undele care se suprapun în acest punct sunt în fază ($\varphi=0$). Ecranul E_1 servește la ecranarea sursei S .

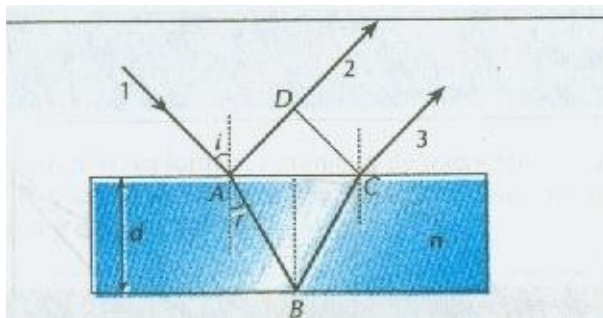
3. Lama cu fețe plane și paralele

Divizarea unui fascicul de lumină se poate face utilizând mai multe suprafețe reflectătoare de pe care o parte din fascicul se reflectă, iar cealaltă se transmite. În cazul lamei din fig.7, razele 2 și 3 sunt coerente, provenind din aceeași undă incidentă. Diferența de drum dintre razele 2 și 3 determină starea de interferență. Considerăm că lama, confecționată dintr-un material cu indice de refracție n , are o grosime d . Când raza incidentă 1 ajunge la suprafața lamei, ea este divizată: o parte se reflectă în punctul A , iar cealaltă parte pătrunde în lamă unde este refractată și apoi se reflectă pe a doua față a lamei ieșind din aceasta prin punctul C . Diferența de drum optic dintre razele 2 și 3 este dată de relația:

$$\delta = (d_3) - (d_2) = n(AB + BC) - (AD - (\lambda/2))$$

În cazul unei incidențe normale formula se modifică astfel:

$$\delta = 2nd + \lambda/2$$



(fig.7)



VIATA DE LICEU

se traieste o singura data!

4. Pana optică.

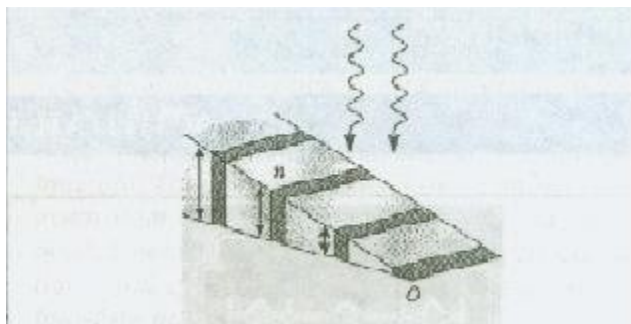
Constă din două suprafețe plane care fac un unghi mic între ele. Atunci când fasciculul incident atinge suprafața superioară a penei, se produce divizarea lui într-un mod asemănător cu cel de la lama cu fețe plane și paralele. Deosebirea constă în faptul că franjele de interferență sunt acum localizate într-un plan aflat în vecinătatea suprafeței inferioare a penei. Practic, se poate spune că franjele sunt localizate pe pană.

Condiția de maxim sau de minim de interferență devine în acest caz:

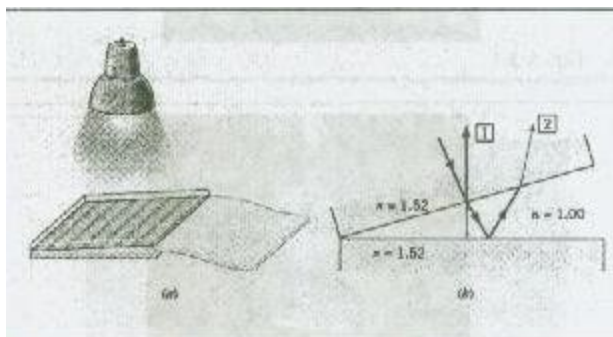
$2d_k \cdot n + \lambda/2 = k \cdot \lambda$, unde d_k este lungimea penei în zona respectivă.

Pentru maximum de ordinul d_{k+1} se obține formula: $2d_{k+1} \cdot n + \lambda/2 = (k+1) \cdot \lambda$

Interferența se poate calcula cu relația: $i = \lambda/2 \alpha n$



(fig.8 – pana optică)



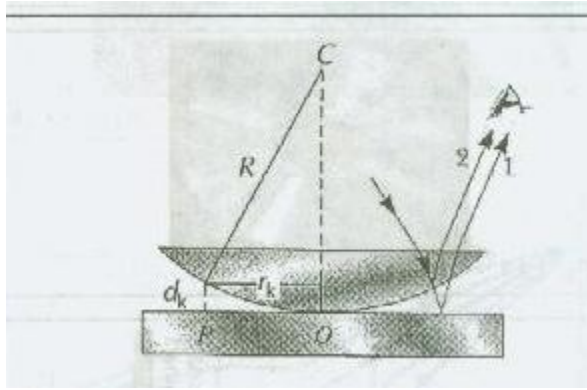
(fig.9 – interferența luminii pe

pana optică).

5. Inelele lui Newton

Dispozitivul constă dintr-o lentilă plan – convexă și o lamă cu fețe plane și paralele, așezate ca în fig. 10. Stratul de aer dintre lentilă și lamă are grosime din

ce în ce mai mică, pornind de la margine spre centru. Diferența de drum optic între razele 1 și 2 este: $\delta = 2d_k \cdot n_1 + \lambda/2$

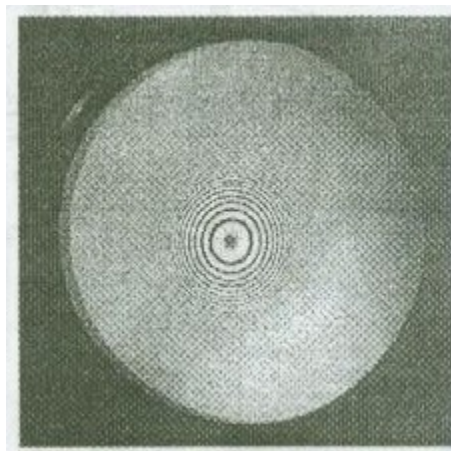


(fig 10)

Dacă d_k are valoare mult mai mică decât R a suprafeței lentilei, va rezulta că: $d_k = r_k^2 / 2R$ și

$$\delta = n_1 \cdot (r_k^2 / R) + \lambda / 2$$

Atunci când $\delta = 2k \cdot \lambda / 2$ se obțin maxime de interferență, iar când $\delta = (2k+1) \cdot \lambda / 2$ se obțin minime, ca în fig. 11



(fig. 11)

Exercițiu:

Aflați interferența i pentru un dispozitiv Young, cunoscând distanța, D , dintre ecranul de observație și planul celor două fante, distanța dintre fante, a , și lungimea de undă, λ , a luminii monocromatică folosite.

$$D = 100 \text{ cm}$$

$$i = (D/a) \cdot \lambda = 1000 \cdot 5 = 5000 = 0,5 \text{ mm}$$

$$a = 1 \text{ mm}$$

$$\lambda = 0,5 \mu\text{m} \quad i = ?$$