

ELEMENTE DE OPTICĂ ONDULATORIE

1. Dispersia luminii

Lumina este un ansamblu de unde electromagnetice cu lungimea de undă cuprinsă între 750 nm și 400 nm. Aceste unde sunt numite culori: **Roșu**, **Orange**, **Galben**, Verde, **Albastru**, **Indigo**, **Violet** și sunt recepționate, „simțite” de noi cu ajutorul ochilor. Altfel spus, ochiul este un receptor și un organ de simț în același timp.

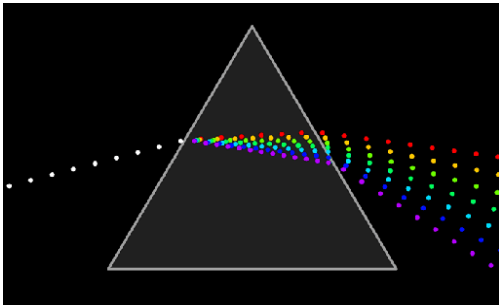


Fig. 1d



Fig. 2d

În mod obișnuit, toate aceste unde se propagă împreună, formând un „pachet”, pe care îl vom numi *lumină*. Când se propagă împreună, ca pachet, aceste culori nu se disting și formează ceea ce în mod obișnuit numim *lumină*. Din cele spuse până acum se poate deduce că ALBUL și NEGRUL nu sunt culori.

Atunci când acest pachet întâlnește un anumit mediu (de exemplu o prismă optică, Fig. 1d) se desface, iar culorile care îl compun se împrăștie, dispersează. Cuvântul provine din limba latină: *dispergo, -ere – a împrăștia, a risipi*.

Un fenomen care evidențiază fenomenul de dispersie a luminii este curcubeul, Fig. 2d.

Mediul în care lumina dispersează se numește *mediu dispersiv*. Toate mediile sunt dispersive, cu excepția vidului și a aerului, cu anumite aproximații. Acest lucru se datorează faptului că în vid și în aer toate undele electromagnetice se propagă cu aceeași viteză, indiferent de lungimea lor de undă.

În mediile dispersive undele, cu lungimi de undă diferite se propagă

cu viteze diferite, adică $v=v(\lambda)$.

Indicele de refracție a fost definit ca raportul:

$$n = \frac{c}{v}$$

unde c este viteza luminii în vid, iar v este viteza undei în mediul respectiv. Concluzionând cele de mai sus rezultă, în mod evident că indicele de refracție depinde de lungimea de undă: $n=n(\lambda)$.

Definim dispersia luminii fenomenul de variație a indicelui de refracție cu lungimea de undă.

În mod normal, indicele de refracție scade lent cu creșterea lungimii de undă. Acest fenomen se numește *dispersie normală*.

2. Interferența luminii

Două sau mai multe unde luminoase se pot suprapune într-un anumit loc din spațiu. Dacă intensitatea în domeniul de suprapunere variază trecând prin maxime și minime se spune că se produce *interferență*, vezi Unde mecanice, 4. Interferența undelor. Pentru explicarea condițiilor de producere a interferenței trebuie să ținem seamă că la suprapunerea undelor se adună elongațiile câmpurilor fiecărei unde (și nu intensitățile lor). *Undele*, care în acest caz interferă, se numesc *coerente* iar *sursele* care le emit sunt de asemenea *coerente*. Sursele reale de lumină nu sunt surse coerente (excludem aici sursele laser). Radiația emisă de aceste surse rezultă în urma tranzițiilor care au loc în atomii constituenți; aceștia emit independent unul de altul, fără nici o corelație între ei, orientarea vectorilor câmp electric fiind haotică.

Obținerea undelor coerente pentru realizarea interferenței se face separând din fluxul luminos emis de o sursă monocromatică două fascicule de lumină care ulterior se suprapun din nou în zona de interferență. În acest scop se utilizează numeroase dispozitive, care se încadrează în două metode:

- metoda divizării frontului de undă (exemplu: dispozitivul lui Young);
- metoda divizării amplitudinii (exemplu: lama cu fețe plan paralele).

Dispozitivul lui Young constă dintr-o sursă de lumină monocromatică (un bec cu incandescență având un filtru în fața sa) urmat de un paravan prevăzut cu două fante dreptunghiulare și paralele S_1 și S_2 și apoi un ecran pe care se observă interferența, Fig. 1i; 2i. Conform principiului lui Huygens, punctele de

pe frontul de undă care atinge fantele emit noi unde, cele două fante devenind surse coerente, deoarece undele emise de ele provin de pe aceeași suprafață de undă.

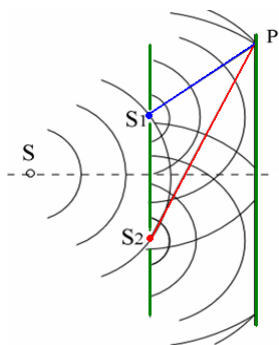


Fig. 1i

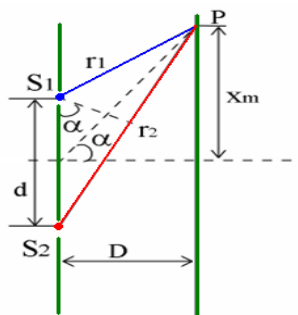


Fig. 2i

Fie d distanța dintre fante, r_1 și r_2 distanțele de la fante până la un punct oarecare de pe ecranul aflat la distanța D de paravan. Se observă că intensitatea luminoasă va fi maximă în punctul P

atunci când diferența de drum $\delta = r_2 - r_1 = 2k \frac{\lambda}{2}$, unde $k = 0; \pm 1; \pm 2; \dots$ și va fi minimă (în acest caz,

nulă) când diferența de drum $\delta = r_2 - r_1 = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$. Ca rezultat al interferenței, pe ecran vor apare

franje luminoase alternând cu altele întunecoase (maxime și minime) paralele cu fantele. Distanța dintre două franje luminoase (întunecoase) succesive se numește *interfranjă*. Distanța x_m a franjei luminoase de ordinul m față de planul de simetrie al dispozitivului se poate determina observând că $tga = x_m / D$ și $\sin \alpha = (r_2 - r_1) / d = k\lambda / d$.

Dar cum unghiul α este mic : $tga \cong \sin \alpha$, se obține:

$$x_m = \frac{kD\lambda}{d}$$



Fig. 3i

Interfranja este distanța dintre două maxime succesive, zone luminoase, sau întunecoase, ca în Fig. 3i.

$$i = x_{m+1} - x_m = \frac{D\lambda}{d}$$

Dacă spațiul dintre paravanul cu fante și ecran este un mediu cu indicele de refracție n , în locul drumului geometric r intervine drumul optic : $(r) = nr$.

Lama cu fețe plan-paralele. Fie o lamă de grosime d și indice de refracție n pe care cade o rază de lumină (1) sub unghiul de incidență i . (Fig. 3).

După reflexii pe fața superioară și pe cea inferioară a lamei, se obțin razele (2) și (3) care sunt coerente

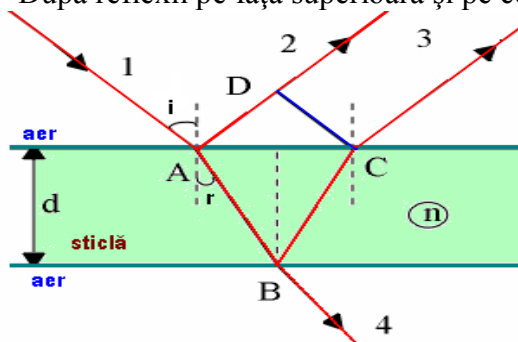


Fig. 4i

provenind din aceeași undă, dar sunt defazate deoarece parcurg drumuri optice diferite după separarea lor în punctul A și până la refacerea frontului de undă CD.

Diferența de drum optic este:

$$\delta = (L_3) - (L_2) = n(AB - BC) - (AD - \frac{\lambda}{2})$$

Raza (2) suferă reflexie pe un mediu mai dens și din această cauză "pierde" $\frac{\lambda}{2}$, adică suferă un salt de fază egal cu π .

Exprimând segmentele $AB=BC$ și AD în funcție de unghiul de incidență i , de unghiul de refracție r și de grosimea lamei d , se obține:

$$\delta = 2nd \cos r + \frac{\lambda}{2}$$

În cazul incidenței normale ($i = 0$) și din legea a doua a refracției $n_1 \sin i = n_2 \sin r$

rezultă $\cos r = 1$, astfel că diferența de drum optic devine:

$$\delta = 2nd + \frac{\lambda}{2}$$

Toate razele paralele pot fi adunate într-un loc cu ajutorul unei lentile convergente și vor interfera, producând maxime sau minime, după cum diferența de drum optic este un număr par sau impar de semilungimi de undă.

APLICAȚII

Interferența produsă de lame subțiri are multe aplicații dintre care amintim **straturile antireflex**, pe de o parte, și **straturile reflectătoare**, pe de altă parte. Straturile antireflex sunt pelicule subțiri depuse pe suprafața componentelor optice (lentile). Grosimea lor este astfel aleasă încât razele reflectate să fie stinse (diferența de drum dată de să corespundă unui minim de interferență). Dacă, dimpotrivă, diferența de drum între razele reflectate pe fețele stratului corespunde unui maxim de interferență atunci razele reflectate sunt “întărite” și stratul este puternic reflectător (oglină). O altă aplicație a interferenței în straturi subțiri se referă la realizarea filtrelor interferențiale, care permit trecere unei culori bine determinate prin filtru.

O altă aplicație a fenomenului de interferență este **holografia**.

Holografia este o tehnică pentru înregistrarea și reproducerea imaginilor obiectelor pe cale interferențială. Spre deosebire de imaginile bidimensionale realizate prin fotografie sau televiziune, imaginea holografică este tridimensională. O astfel de imagine poate fi cercetată din diferite direcții spre a vedea laturi diferite ale obiectului.

Pentru obținerea hologramei, obiectul este iluminat cu lumină monocromatică și coerentă, furnizată de o sursă laser, iar lumina reflectată de obiect ajunge pe o placă fotografică, unde se suprapune cu lumina care sosește direct de la sursă, producând interferență. Pe film se imprimă o imagine complexă de interferență, în locurile de maxim filmul fiind mai înnegrit. Pentru a vedea imaginea obiectului, filmul se iluminează cu aceeași lumină monocromatică și coerentă de la o sursă laser, ca și la înregistrare.

După dezvoltarea filmului și obținerea pozitivului, inelele de maxim vor corespunde zonelor transparente ale filmului. Pentru redare, se iluminează filmul (holograma) cu unde luminoase monocromatice plane, de aceeași lungime de undă ca la înregistrare.

3. Difracți luminii

Dacă lumina s-ar propaga sub forma unor raze rectilinii, ar trebui ca umbra unui corp opac iluminat cu un fascicul de raze paralele, să fie net delimitată iar trecerea de la umbră (0%) la lumina (100%) să se facă brusc.

În realitate, trecerea nu este câtuși de puțin bruscă! Zona întunecată începe să se lumineze treptat, încă înainte de linia de proiecție geometrică a corpului opac. Iar în zona de proiecție geometrică a regiunii luminate, apar o serie de zone alternativ mai intens și respectiv mai slab luminate. Aceste fenomene sunt determinate de difracția luminii, iar zonele alternative mai întunecate și mai luminoase poartă numele de **franje de difracție**. După cum se observă în Fig. 1D, franjele de difracție se deosebesc de

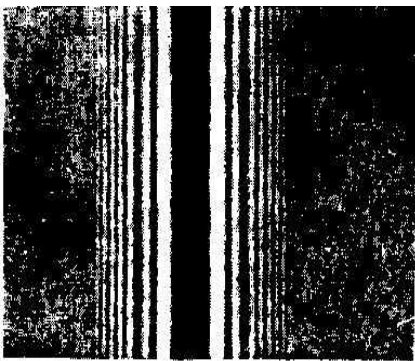


Fig.1D

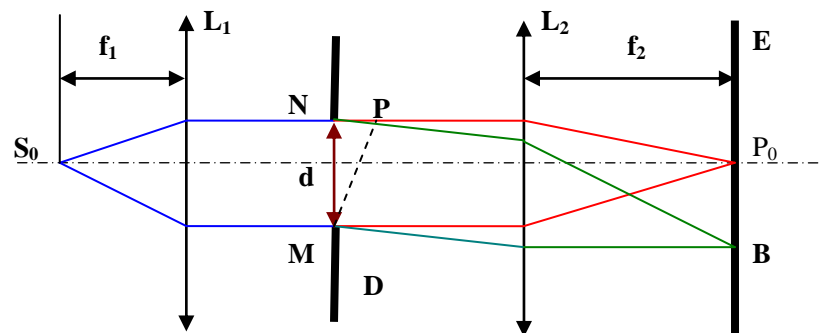


Fig. 2D

franjele de interferență, Fig. 3i.

Difracția este importantă în fotografie deoarece apare la trecerea luminii printr-o fantă și anume diafragma obiectivului. În studiul difracției, modelul experimental este chiar un obiectiv diaframat. O sursă de lumină S_0 , aflată în focarul lentilei L_1 , determina producerea unui fascicul de raze paralele care

traversează o fantă **D** (diafragma) cu o deschiderea **d**. O a doua lentilă, **L₂** proiectează imaginea pe un ecran **E**, Fig. 2D. Conform principiului lui Huygens, diafragma devine sursă secundară de lumină și emite raze în toate direcțiile.

Apariția difracției în obiectivele diafragate

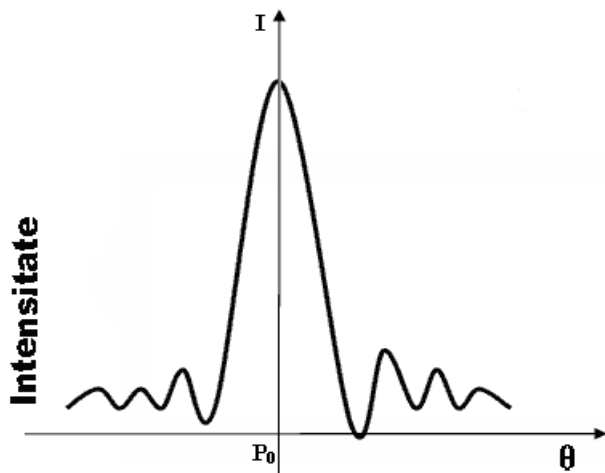


Fig. 3D

Analizând comportamentul razelor marginale (tangente la deschiderea **d**) care se proiectează în focarul lentilei **L₂**, **F**, adică pe axa optică, observăm ca nu implică diferențe de drum optic și deci nu există diferențe de fază, iar imaginea proiectată va fi cea așteptată. Dacă însă analizăm imaginea proiectată în punctul **B** pe ecranul **E**, observăm că apare o diferență de drum optic între raza superioară **BN** și raza inferioară **BM**, Fig. 2D. Aceasta creează la nivelul ecranului **E**, în punctul **B**, o iluminare a cărei variație este redată aproximativ în Fig. 3D.

Se poate demonstra că difracția este proporțională cu lungimea de undă a luminii și invers proporțională cu deschiderea **d**.

Rețeaua de difracție. O rețea de difracție este formată dintr-un ansamblu de **N** fante identice, paralele și echidistante (Fig. 4D). Distanța **l** dintre două fante succesive se numește **constanta rețelei**.

Cele **N** fante ale rețelei se pot interpreta ca fiind sursele a **N** fascicule coerente care au, pentru direcția

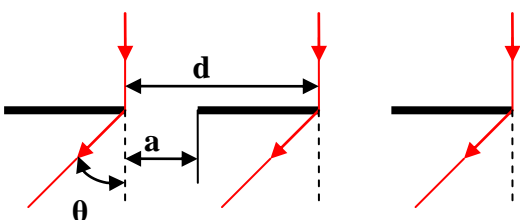


Fig. 4D

θ , diferența de fază între două unde succesive $\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} l \sin \theta$,

corespunzătoare diferenței de drum $d \sin \theta$.

Intensitatea fiecăreia din aceste unde, în direcția θ , este cea rezultată în urma difracției prin fanta de lățime **a**.

Rețeaua respectivă va avea un număr $n = \frac{N}{L}$ de trăsături

pe unitatea de lungime și o distanță $d = \frac{L}{N} = \frac{1}{n}$ între două

trăsături succesive. Această distanță se numește **constanta rețelei**.

În Fig. 5D și Fig. 6D este redată schematic experiența cu o rețea de difracție.

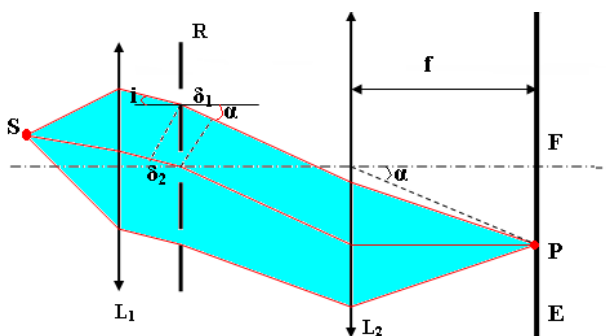


Fig. 5D

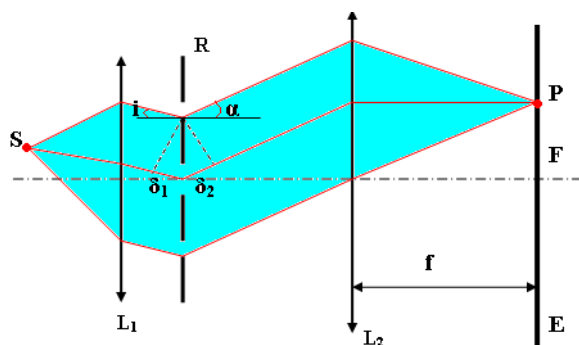


Fig. 6D

Un fascicul de lumină monocromatică, provenit de la un izvor **S**, transformat într-un fascicul paralel de către lentila **L₁**, cade sub un unghi de incidență **i** pe rețeaua **R**. Figura de difracție se va vedea în planul focal al lentilei **L₂**, pe ecranul **E**. Distribuția intensității luminoase în figura de difracție poate fi calculată pornind de la principiul Huygens – Fresnel, potrivit căruia fiecare fantă a rețelei devine sursă de unde secundare, pentru fiecare radiație monocromatică în parte.

După cum se vede în Fig. 5D și Fig. 6D, între două unde va exista mereu o diferență de drum optic $\delta = \delta_1 \pm \delta_2$, unde $\delta_1 = d \sin i$ reprezintă diferențe de drum optic între undele incidente pe rețea, iar $\delta_2 = d \sin \alpha$ reprezintă diferențe de drum optic difractate sub unghiul α . Deci:

$$\delta = d(\sin i \pm \sin \alpha)$$

În punctul P vom obține un maxim dacă $\delta = k\lambda$, respectiv un minim, dacă $\delta = (2k + 1)\frac{\lambda}{2}$.

În cazul incidenței normale ($i = 0$) $\delta = d \sin \alpha$.

4. Polarizarea luminii

Lumina, așa cum am spus deja, este un pachet de unde electromagnetice, cu lungimea de undă cuprinsă între aproximativ 400 și 750 nm. Unda luminoasă elementară, este emisă la dezexcitarea unui atom,

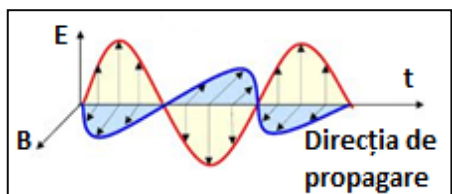


Fig. 1P

care se comportă analog unui dipol electric (ca o antenă). **Vectorul câmp electric al undei luminoase, numit și vector luminos** (deoarece determină senzația de lumină) **este perpendicular pe direcția de propagare a luminii**, la fel și vectorul câmp magnetic. Datorită acestei caracteristici spunem despre undele electromagnetice că sunt unde transversale (vezi [Unde mecanice](#)).

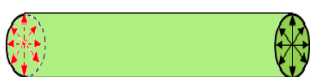


Fig. 2P

Vectorul câmp electric al undei elementare oscilează perpendicular pe direcția de propagare cu aceeași probabilitate în toate direcțiile, (Fig.1P). Mai intuitiv spus, lumina naturală se propagă ca un tub, ca un cilindru, a cărui rază este modulul vectorului **E**, Fig. 2P. Atunci când această rază de lumină se reflectă pe o suprafață, din infinitatea de suprafețe, de direcții de vibrație a vectorului luminos, se separă doar o suprafață care conține o direcție de vibrație, care va fi numită de acum direcție privilegiată de vibrație. Acest tip de polarizare se numește **polarizare prin reflexie**, Fig. 3P.

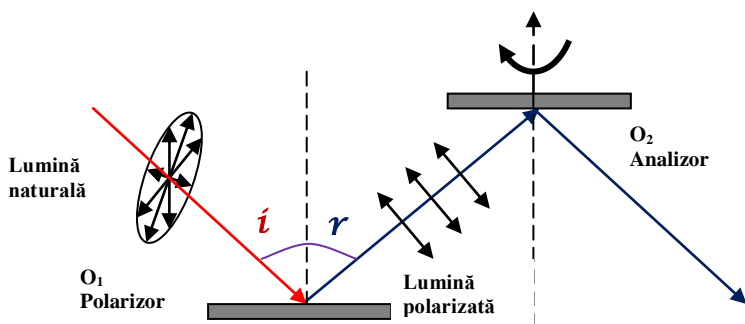


Fig. 3P

Din cele expuse până acum deducem că: **polarizarea luminii este fenomenul de separare a direcției privilegiate de oscilație a vectorului luminos, din infinitatea de direcții posibile de oscilație.**

Atențiune: direcția privilegiată de vibrație nu este aleasă întâmplător! Direcția privilegiată de vibrație este conținută în planul de reflexie – planul care conține razele incidentă, reflectată și normala, Fig. 3P.

Oglinda pe care se face reflexia de polarizare se numește **polarizor**. Fenomenul nu poate fi observat încă. Pentru a putea observa fenomenul de polarizare, lumina trebuie să mai sufere o reflexie pe o a doua oglindă. Această oglindă se numește **analizor**. De fapt, ce vom observa?

Vom observa că dacă rotim oglinda O_2 în jurul unui ax perpendicular pe planul său intensitatea luminoasă a razei reflectate crește sau scade. Intensitatea luminoasă a razei reflectată pe analizor este maximă atunci când planele reflexie ale celor două oglinzi coincid și este minimă sau zero atunci când cele două plane sunt perpendiculare. [D. Brewster](#) demonstrează că intensitatea luminoasă a undei reflectate este zero atunci când unghiul de incidență are valoarea i_B , numit unghi Brewster. Valoarea unghiului i_B este dată de relația:

$$\operatorname{tgi}_B = \frac{n_2}{n_1}$$

Cunoscută sub numele de [legea lui Brewster](#), unde n_1 este indicele de refracție al mediului de unde vine lumina, iar n_2 este indicele de refracție al mediului pe care se reflectă lumina. De exemplu, în cazul reflexiei aer-sticlă $i_B = 57^\circ$

OBSERVAȚIE:

1. Atunci când intensitatea luminoasă a undei reflectate este zero spunem că lumina este total polarizată, sau liniar polarizată. În acest caz există o singură direcție privilegiată de vibrație, Fig. 4Pc).

2. Atunci când intensitatea luminoasă a unei reflectate este minimă, dar diferită de zero spunem că lumina este parțial polarizată, Fig. 4Pb). În acest caz există o singură direcție predominantă de vibrație, dar nu unică. Despre lumina parțial polarizată putem spune că este un amestec de lumină naturală și lumină total polarizată.

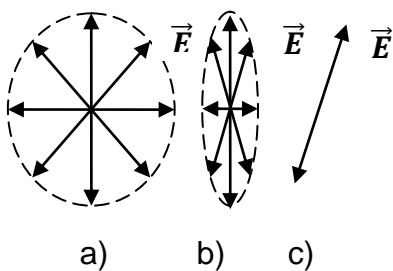


Fig. 4P

ACESTA ESTE FENOMENUL DE POLARIZARE, FENOMEN CARE DEMONSTREAZĂ TRANSVERSALITATEA UNDELOR ELECTROMAGNETICE!

Observație: 1. Dacă separarea direcției privilegiate se produce ca urmare a fenomenului de reflexie, fenomenul se numește *polarizare prin reflexie*.

Probleme

1. Frecvența unei radiații luminoase este $\nu = 5 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1}$. Să se calculeze lungimea de undă a acestei radiații în sticlă cu indicele de refracție $n = 1,5$.

REZOLVARE:

$\nu = 5 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1}$	$\lambda = \nu \cdot T = \frac{v}{\nu}, \quad n = \frac{c}{v} \Rightarrow v = \frac{c}{n}$
$n = 1,5$	Rezultă în continuare $\lambda = \frac{c}{n\nu} = 400 \text{ nm}$
$\lambda = ?$	

2. În experiența lui Young se lucrează cu o radiație monocromatică cu $\lambda = 6 \cdot 10^{-7} \text{ m}$. Distanța dintre fante este 1 mm, iar distanța de la fante la ecran 3 m. Să se găsească poziția primelor trei franje luminoase.

REZOLVARE:

$\lambda = 6 \cdot 10^{-7} \text{ m}$	$x_k = \frac{k\lambda D}{d}$. Înlocuind și dând lui k valorile 0,1,2, obținem:
$d = 1 \text{ mm}$	$x_1 = 0, \quad x_2 = 1,8 \text{ mm}$ și $x_3 = 3,6 \text{ mm}$
$D = 3 \text{ m}$	
$x_k = ?$	
$k = 0,1,2$	

1. M. Popescu, V. Tomescu, M. Strazzaboschi, M. Sandu – FIZICĂ, manual pentru clasa a XI-a, Editura Crepuscul – 2006.
2. G. Enescu, N. Gherbanovschi, M. Prodan, Șt. Levai – FIZICĂ, manual pentru clasa a XI-a, Editura Didactică și Pedagogică, București – 1994.
3. <http://dex-online.ro>
4. <http://wikipedia.org/>, <http://ro.wikipedia.org/>
5. <http://www.walter-fendt.de/ph14ro>

OBSERVAȚIE: Cuvintele de culoare albastră, subliniate conțin hyperlink-uri. Accesându-le obțineți informații suplimentare. De asemenea, dacă puneți prompterul pe anumite imagini vi se va deschide un link.