

Caracteristicile undelor electromagnetice

Din cei doi termeni ai forței Lorentz: $\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$

cu care acționează unda electromagnetică asupra unei sarcini, se poate arăta că componenta electrică este de c/v ori mai mare decât cea magnetică, în care este viteza de mișcare a sarcinii, iar c este viteza luminii în vid.

Rezultă că vectorul câmp electric al undei electromagnetice este cel care determină fenomenele luminoase și de aceea i se spune și vector luminos.

Fenomene cum sunt:

- reflexia,
- refracția,
- interferența,
- difracția,
- dispersia,
- polarizarea

se explică ținând seama de **natura ondulatorie electromagnetică a luminii**.

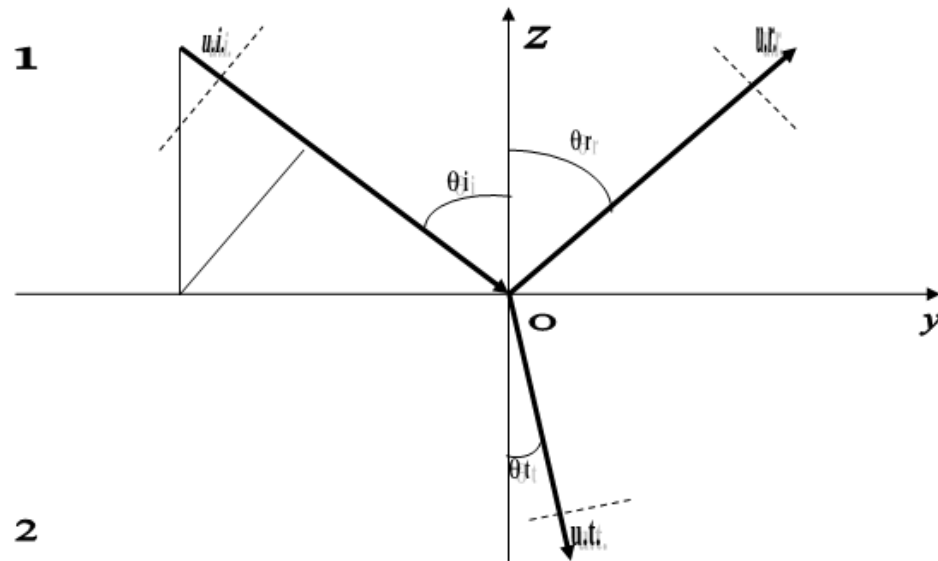
- emisia și absorbția luminii,

se explică ținând seama de manifestarea **corpusculară, fonică** a acesteia.

Reflexia și refracția undelor electromagnetice

Reflexia reprezintă schimbarea direcției de propagare a unei unde atunci când, propagându-se printr-un mediu, notat generic cu 1, întâlnește o discontinuitate (sau un alt mediu de propagare, notat generic cu 2), fenomen în urma căruia unda se întoarce în mediul inițial 1.

Refracția (sau *transmisia*) reprezintă tot o schimbare a direcției de propagare a unei unde, dar ea nu se mai întoarce în mediul 1, ci pătrunde în mediul 2.



Reflexia și refracția undelor electromagnetice

Să alegem originea sistemului de referință O chiar în punctul unde direcția vectorului de undă intersectează planul de separație. În acest caz axa Oz joacă și rolul de normală la suprafața de separație. Unda incidentă (u.i.) se va despică în două unde: unda reflectată (u.r.) și unda transmisă (u.t.), care, în general, nu oscilează în fază. Vectorii electrici ai acestor trei unde sunt de forma :

$$\vec{E}_i = \vec{E}_{0i} \exp[i(\omega_i t - \vec{k}_i \cdot \vec{r})]$$

$$\vec{E}_r = \vec{E}_{0r} \exp[i(\omega_r t - \vec{k}_r \cdot \vec{r} + \varphi_r)]$$

$$\vec{E}_t = \vec{E}_{0t} \exp[i(\omega_t t - \vec{k}_t \cdot \vec{r} + \varphi_t)]$$

unde, φ_r și φ_t sunt fazele relative ale undelor reflectate, respectiv transmise, față de faza undei incidente pe care am luat-o egală cu zero, $\varphi_i = 0$, cu scopul simplificării calculelor. Ținând cont de condițiile de conservare a fluxului energetic la trecerea din mediul 1 în mediul 2, între care există o discontinuitate (un salt) a mărimilor ε și μ , se poate demonstra că se conservă doar componentele paralele ale vectorului electric (deoarece proiecția se face pe axa Oy , nu este nevoie să scriem relația vectorială): $E_i = E_r + E_t$

Reflexia și refracția undelor electromagnetice

adică sub formă complexă :

$$E_{oi_p} \exp[i(\omega_i t - \vec{k}_i \cdot \vec{r})] = E_{or_p} \exp[i(\omega_r t - \vec{k}_r \cdot \vec{r} + \varphi_r)] + E_{ot_p} \exp[i(\omega_t t - \vec{k}_t \cdot \vec{r} + \varphi_t)]$$

Această relație trebuie să fie valabilă pentru orice valoare a vectorului de poziție \vec{r} și pentru orice moment t . Din punct de vedere practic, aceasta înseamnă că legile fenomenelor de reflexie și refracție trebuie să fie aceleleași indiferent de poziția observatorului și indiferent de momentul observării. Cele două variabile, \vec{r} și t sunt independente, ceea ce, din punct de vedere matematic înseamnă că exponențialele nu trebuie să conțină aceste două variabile.

Pentru a elimina variabila timp, observăm că trebuie îndeplinită condiția :

$$\omega_i = \omega_r = \omega_t$$

adică pulsațiile (sau, echivalent, frecvențele) undelor reflectată și transmisă trebuie să fie egale cu pulsația (frecvența) undei incidente. Prin urmare, pentru medii omogene frecvența undelor electromagnetice este invariantă în raport cu fenomenele de reflexie și de refracție. În optică acest rezultat înseamnă că, prin reflexie sau refracție (transmisie), o undă incidentă nu își schimbă frecvența.

2.4. Reflexia și refracția undelor electromagnetice

Pentru ca relația să nu depindă nici de poziția observatorului, deci de vectorul lui de poziție , care este deci un vector arbitrar, trebuie să fie îndeplinite relațiile:

$$\vec{k}_i \cdot \vec{r} = \vec{k}_r \cdot \vec{r} = \vec{k}_t \cdot \vec{r}$$

Prin urmare produsele scalare dintre vectorii de undă ai celor trei unde și, respectiv, vectorul de poziție al observatorului trebuie să fie egale, iar de aici nu poate să rezulte că și vectorii de undă ai celor trei unde ar fi egali (căci acești trei vectori nu sunt coliniari).

Dacă considerăm că vectorul de undă are versorul \vec{n} , să-l scriem sub forma :

$$\vec{k} = k \vec{n} = \frac{2\pi}{\lambda} \vec{n} = \frac{\omega}{v} \vec{n}$$

astfel că, ținând cont că unda incidentă și cea reflectată se află în mediul 1 și au viteza de propagare v_1 , iar unda refractată (transmisă) se află în mediul 2 și are viteza v_2 , ultimele egalități se pot scrie sub forma:

$$\frac{\omega}{v_1} \vec{n}_i \cdot \vec{r} = \frac{\omega}{v_1} \vec{n}_r \cdot \vec{r} = \frac{\omega}{v_2} \vec{n}_t \cdot \vec{r}$$

$$\vec{n}_{i,t} = \sin\theta_{i,t} \vec{j} - \cos\theta_{i,t} \vec{k}$$

$$\vec{n}_r = \sin\theta_r \vec{j} + \cos\theta_r \vec{k}$$

Reflexia și refracția undelor electromagnetice

Prima lege a reflexiei, respectiv a refracției : direcțiile de propagare (determinate de direcția vectorului de undă) ale celor trei unde (incidentă, reflectată, refractată sau transmisă) se găsesc în același plan (yOz) numit plan de incidență.

Pe de altă parte, dacă alegem ca poziția observatorului să fie în planul de incidență, chiar pe axa Oy , adică să avem $\vec{r} = y \vec{j}$ efectuând produsele scalare, vom ajunge la egalitățile :

Vom avea :

$$\vec{n}_i \cdot \vec{r} = r \sin \theta_i \quad ; \quad \vec{n}_r \cdot \vec{r} = r \sin \theta_r \quad ; \quad \vec{n}_t \cdot \vec{r} = r \sin \theta_t$$

$$\frac{\omega}{v_i} r \sin \theta_i = \frac{\omega}{v_1} r \sin \theta_r = \frac{\omega}{v_2} r \sin \theta_t$$

Indicele de refracție al unui mediu se definește, în general, ca raportul dintre viteza undei într-un mediu de referință (în optică acest mediu se ia a fi vidul) și viteza undei în mediul respectiv :

$$n = \frac{c}{v} = \frac{\frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}}{\frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}}} = \sqrt{\epsilon_r \mu_r} > 1$$

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{v}{c / \lambda_o} = \frac{\lambda_o}{n}$$

Reflexia și refracția undelor electromagnetice

astfel încât, amplificând cu c , relațiile devin :

$$n_1 \sin \theta_i = n_1 \sin \theta_r = n_2 \sin \theta_t$$

Aceste relații conțin *legea a doua a reflexiei, respectiv a refracției*.

Din prima egalitate rezultă *legea a doua a reflexiei* :

$$\theta_i = \theta_r$$

care spune că reflexia undelor are loc în așa fel încât unghiul de incidență θ_i este egal cu unghiul de reflexie θ_r .

Prima și a treia egalitate ne conduc la *legea a doua a refracției sau a transmisiei* :

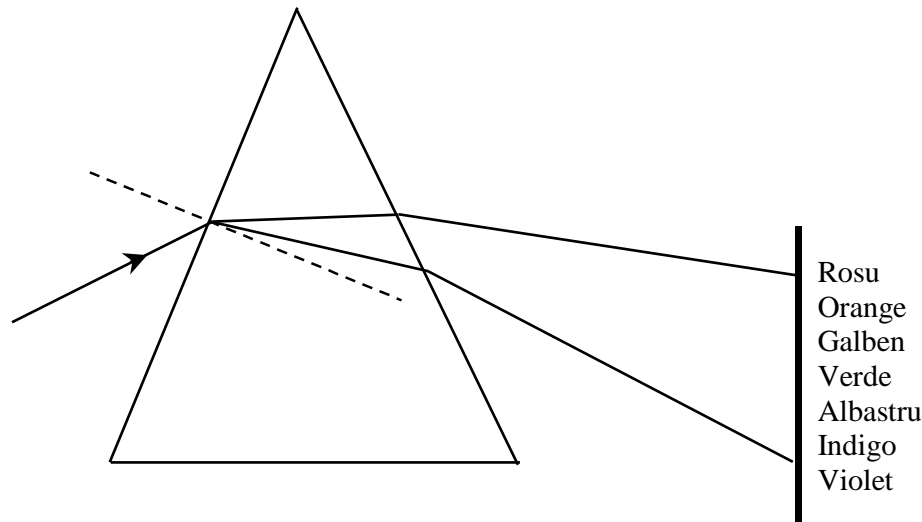
$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t$$

care precizează că refracția (transmisia) undelor se face în așa fel încât produsul dintre indicele de refracție și sinusul unghiului de refracției este constant pentru ambele medii. Această ultimă relație mai poartă denumirea și de legea lui Snellius.

Dispersia luminii

*Fenomenul determinat de dependența indicelui de refracție al mediului de lungimea de undă a luminii (sau, corespunzător, de frecvență) se numește **dispersie a luminii**.*

Fenomenul de dispersie a fost studiat pentru prima oară de către Newton, observând trecerea unui fascicul de lumină albă (naturală) printr-o prismă, având ca rezultat descompunerea luminii în culorile componente:



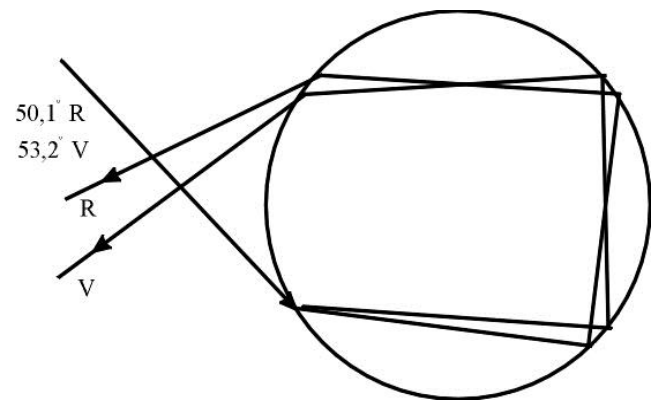
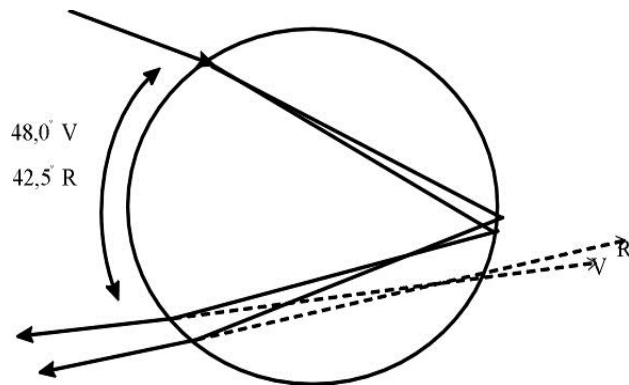
Dispersia luminii

Dependența indicelui de refracție de lungimea de undă poate fi reprezentată, într-o aproximație suficient de bună, prin *relația lui Cauchy* :

$$n = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4}$$

unde constantele A , B , C pot fi obținute din măsurători experimentale ale lui n pentru trei lungimi de undă (culori) diferite.

Fenomenul de dispersie are, între altele, aplicație la realizarea aparatelor spectrale, care descompun lumina albă în culorile componente prin dispersia produsă de o prismă. De asemenea, producerea curcubeului la reapariția soarelui după ploaie, se explică prin combinarea efectelor de dispersie, reflexie și refracție a luminii în picăturile fine de apă din atmosferă:



Absorbția undelor electromagnetice în medii conductoare

Dacă o undă electromagnetică întâlnește o suprafață de separație cu un mediu conductor, intensitatea undei (modulul vectorului lui Poynting electromagnetic) este proporțională cu pătratul amplitudinii:

$$I(d) = S_p = \varepsilon E^2 v = I(0) \exp\left(-\frac{1}{\delta} \cos \theta_i \cdot d\right)$$

unde am notat: $\frac{1}{\delta} = 2 \frac{\omega}{c} \kappa$

Pentru o incidență normală (perpendiculară pe suprafața materialului conductor), adică atunci când $\theta_i = 0$, iar din legea refracției (transmisiei) rezultă, astfel că relația pentru intensitate se scrie sub forma:

$$I(d) = I(0) \exp\left(-\frac{1}{\delta} d\right)$$

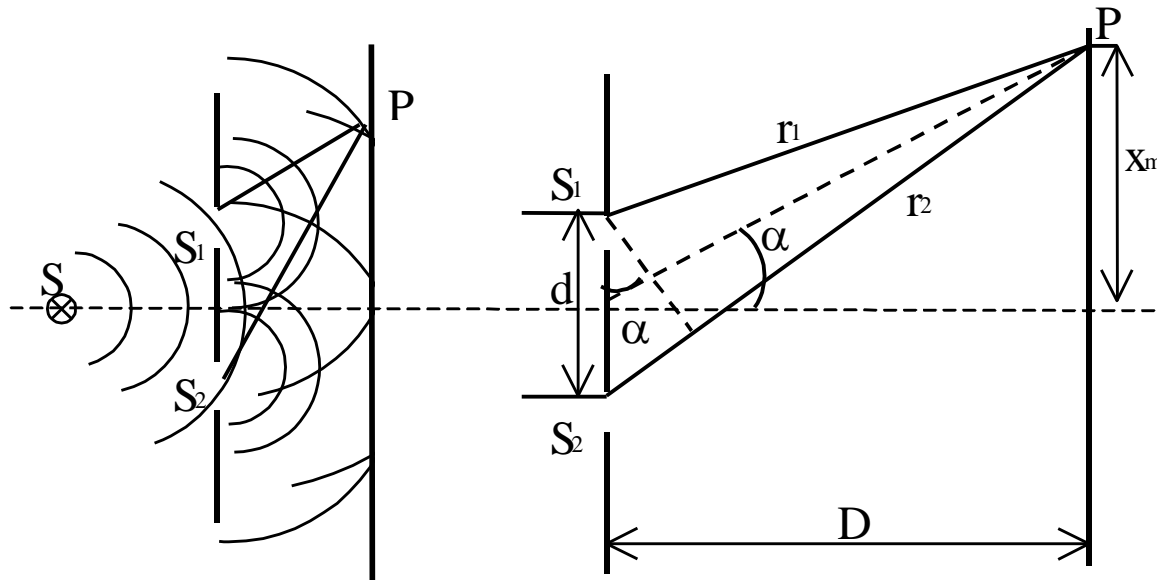
Această relație se numește *legea de absorbție a lui Beer* și arată că, la o pătrundere perpendiculară a undei în materialul conductor (în general, într-un material absorbant), intensitatea undei scade exponențial cu distanța parcursă de undă.

Prin urmare, pătrunderea undei electromagnetice în mediul conductor este condiționată atât de pulsația undei ω , cât și de conductibilitatea σ a materialului conductor.

Interferența luminii

Dispozitivul lui Young constă dintr-o sursă de lumină monocromatică S (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.

Principiul lui Huygens: punctele de pe frontul de undă care ating fantele emit noi unde, cele două fante devenind surse coerente.



Interferența luminii

Dispozitivul lui Young

$$E_1 = E_o \sin(\omega t - kr_1)$$

$$E_2 = E_o \sin(\omega t - kr_2)$$

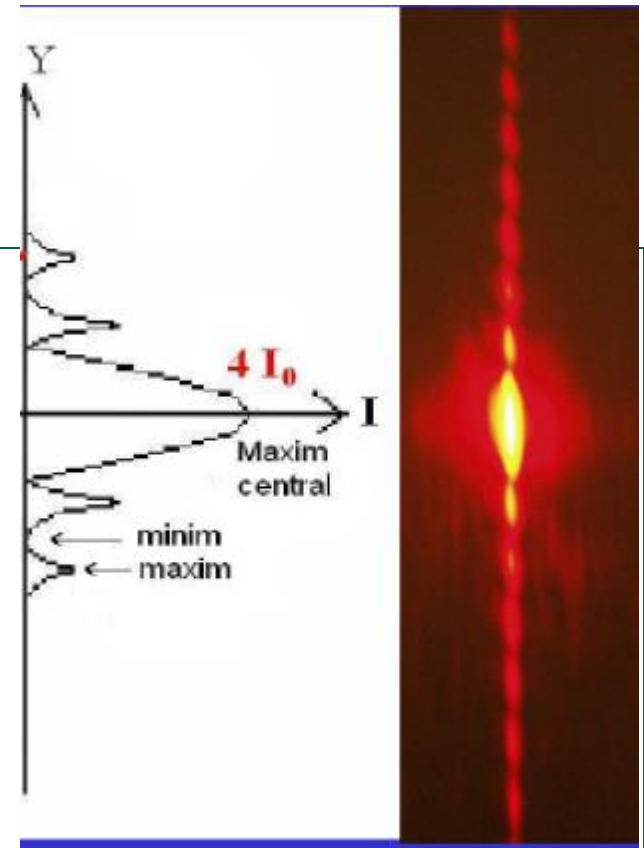
$$\begin{aligned} E &= E_1 + E_2 = E_o [\sin(\omega t - kr_1) + \sin(\omega t - kr_2)] = \\ &= 2E_o \cos \frac{2\pi}{\lambda} \frac{r_2 - r_1}{2} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} \frac{r_1 + r_2}{2}) \end{aligned}$$

Intensitatea luminoasă în punctul P va fi:

$$I \sim A^2 = 4E_o^2 \cos^2 \frac{\pi(r_2 - r_1)}{\lambda}$$

Intensitatea luminoasă va fi maximă în punctul P: $r_2 - r_1 = 2m \frac{\lambda}{2} \quad m = 0; \pm 1; \pm 2; \dots$

Intensitatea luminoasă va fi minimă în punctul P: $r_2 - r_1 = (2m + 1) \frac{\lambda}{2}$



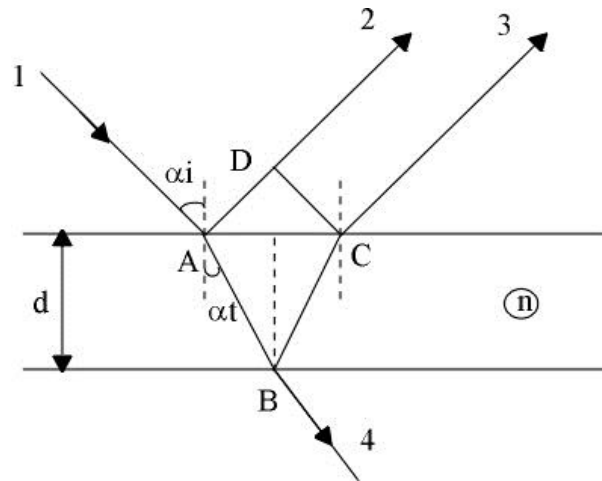
Interferența luminii

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**.

Interfranja este distanța dintre două maxime succesive:

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

Lama cu fețe plan-paralele



Interferența luminii

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” $\lambda / 2$
adică suferă un salt de fază egal cu π

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

În cazul incidenței normale:

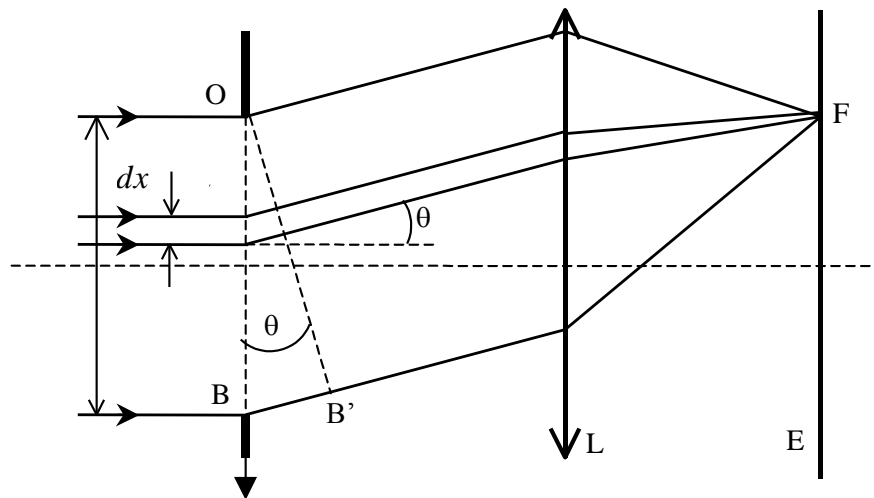
$$\delta = 2nd + \frac{\lambda}{2}$$

Aplicații:

- **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 să corespundă unui minim de interferență).
- **Straturile reflectătoare**: Dacă 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).
- **Filtrele interferențiale** permit trecerea unei culori bine determinate prin filtru.

Difracția luminii

Obstacolele întâlnite de frontul de undă determină deformări ale acestuia și, ca rezultat, undele luminoase pătrund și în domeniul umbrei geometrice.



E_o amplitudinea vibrațiilor luminoase corespunzătoare întregului fascicul ce cade pe fanta considerată infinit de lungă, de lățime a .

. Divizând suprafața de undă din dreptul fantei în fâșii paralele cu marginea fantei, amplitudinea undelor secundare provenind de la o fâșie de lățime dx aflată la distanța x

de marginea fantei, va fi:

$$dE = \frac{E_o}{a} \cos(\omega t - kx \sin \theta) dx$$

Difracția luminii

$$E_{\theta} = \int_0^a dE = \int_0^a \frac{E_o}{a} \cos(\omega t - kx \sin \theta) dx =$$

$$= \frac{E_o}{a} \frac{\sin \omega t - \sin(\omega t - ka \sin \theta)}{k \sin \theta} =$$

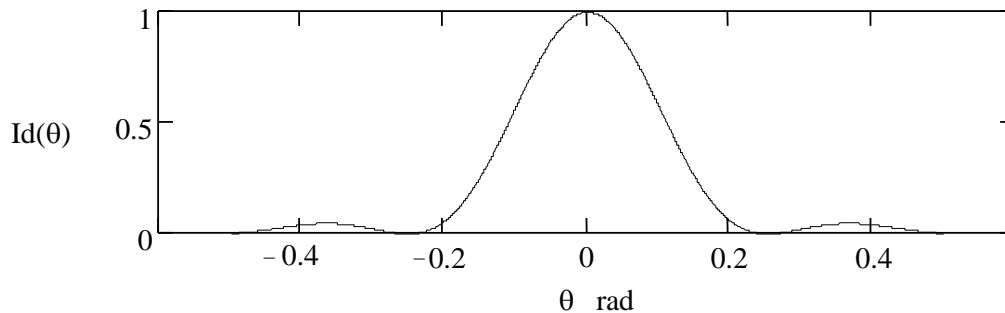
$$= \frac{E_o}{a} \frac{\sin \frac{ka \sin \theta}{2}}{\frac{k \sin \theta}{2}} \cos \left(\omega t - \frac{ka \sin \theta}{2} \right)$$

$$I_d(\theta) = I_o \frac{\sin^2 \left(\frac{\pi a}{\lambda} \sin \theta \right)}{\left(\frac{\pi a}{\lambda} \sin \theta \right)^2}$$

$$\frac{\pi a}{\lambda} \sin \theta = m\pi \quad m = 0 ; \pm 1 ; \pm 2 \dots$$

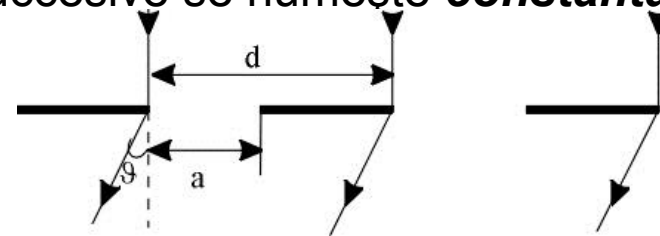
Pentru direcțiile care satisfac condiția: $a \sin \theta = m\lambda$
 intensitatea luminii este zero. Intre minime se dispun maximele de difracție, a căror
 poziție poate fi găsită prin anularea derivatei intensității.

Difracția luminii



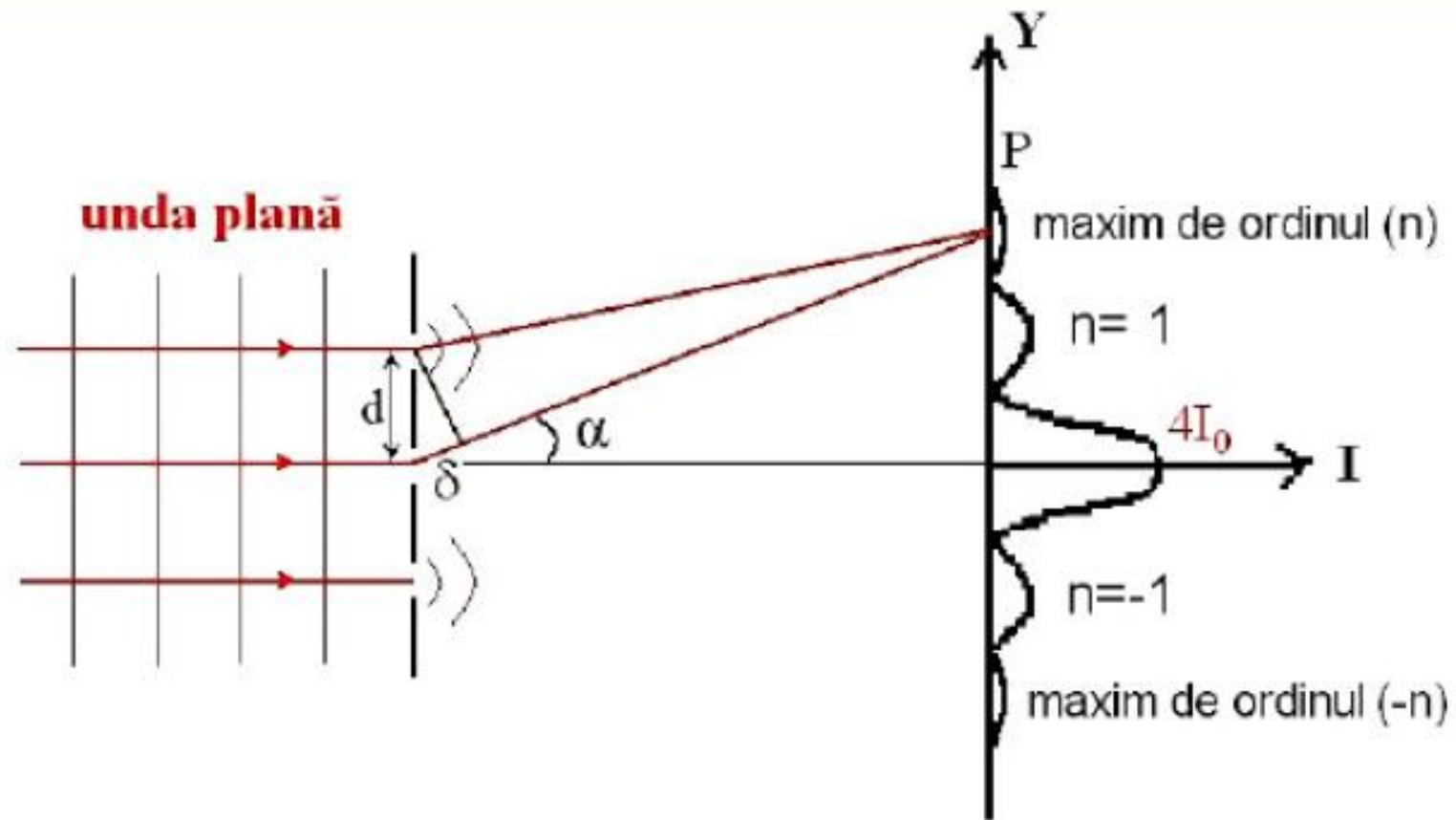
Rețeaua de difracție: este formată dintr-un ansamblu de N fante identice, paralele și echidistante. Distanța d dintre două fante succesive se numește **constantă rețelei**.

$$I_{\theta} = I_o \frac{\sin^2\left(\frac{\pi a}{\lambda} \sin \theta\right)}{\left(\frac{\pi a}{\lambda} \sin \theta\right)^2} \frac{\sin^2\left(\frac{N\pi d}{\lambda} \sin \theta\right)}{\sin^2\left(\frac{\pi d}{\lambda} \sin \theta\right)}$$



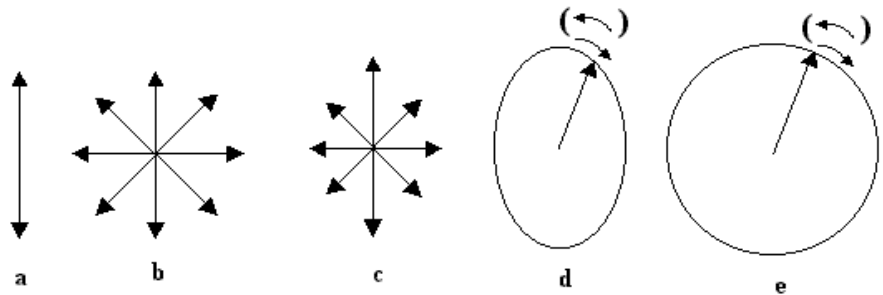
“Curcubeul” care se vede privind suprafața unui CD este efectul difracției produsă prin reflexie de rețeaua formată de “șanțurile” circulare acestea fiind de fapt o succesiune de adâncituri a căror lungime variabilă codifică informația, adâncimea lor fiind de cca $0,1 \mu\text{m}$. Rețeaua de difracție este piesa principală a spectrografelor cu rețea, utilizate pentru cercetarea radiației emise de diferite substanțe.

Rețeaua de difracție



Polarizarea luminii

- Este o caracteristică a tuturor undelor transversale. Lumina, ca radiație electromagnetică, este și ea o undă transversală, direcțiile de oscilație ale vectorilor câmp electric și magnetic fiind perpendiculare pe direcția de propagare a luminii.
- Numim *plan de polarizare* a luminii planul ce conține direcția de vibrație a vectorului \vec{E} și direcția de propagare.
- Unda luminoasă al cărui vector intensitate a câmpului electric este conținut mereu într-un singur plan se numește *liniar polarizată*. (a)
- Lumina *naturală* nu conține nici o direcție privilegiată de vibrație, de aceea se numește *nepolarizată*. (b)
- La trecerea luminii prin anumite medii se constată că anumite direcții de vibrație sunt favorizate față de dir
că lumina este *parțial polarizată*. (



Polarizarea luminii

■ *Gradul de polarizare:*
$$P = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2}$$

Pentru lumina naturală: $I_1 = I_2$ $P = 0$

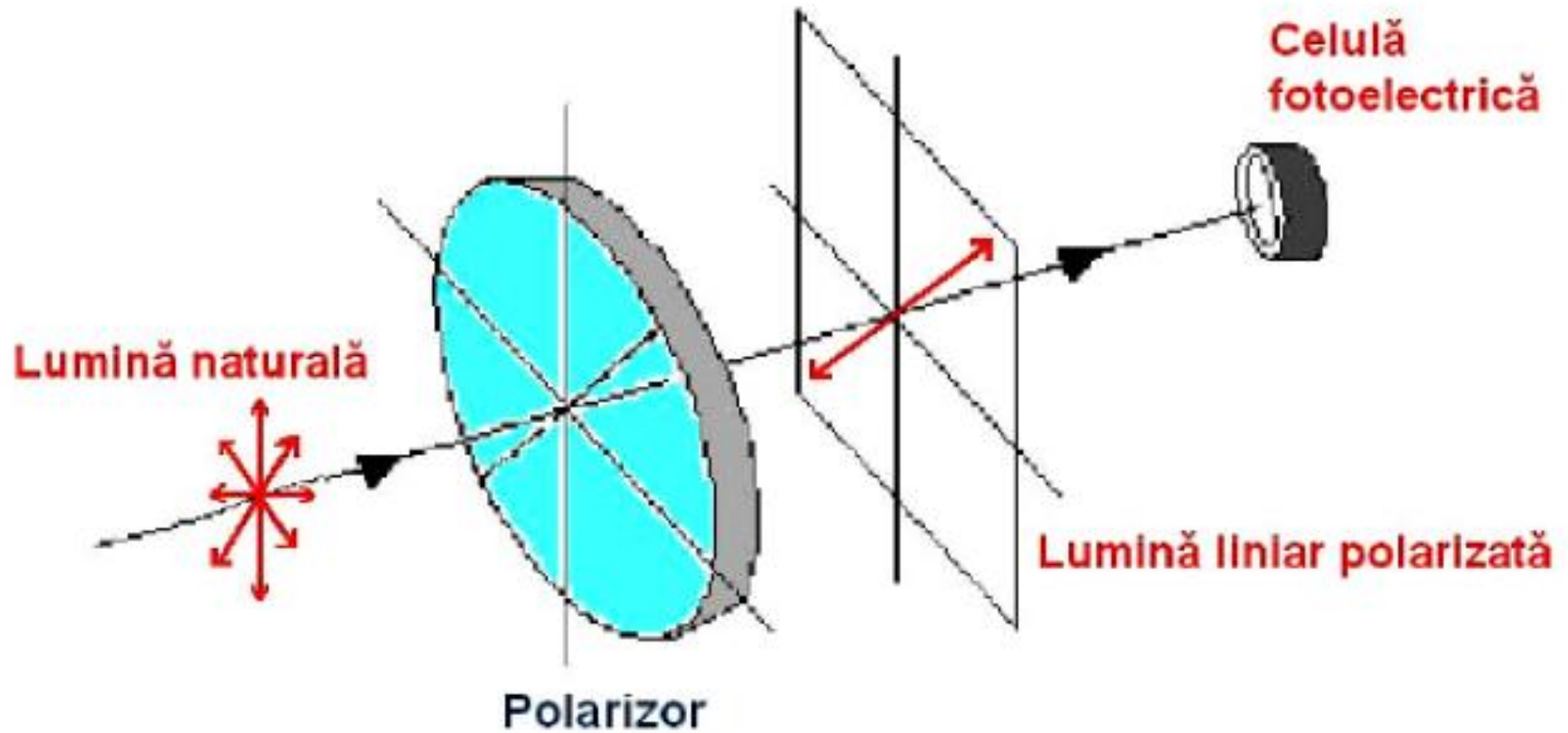
Pentru lumina total polarizată: $P = 1$

Pentru lumina este parțial polarizată: $0 < P < 1$

Metode de obținere a luminii polarizate:

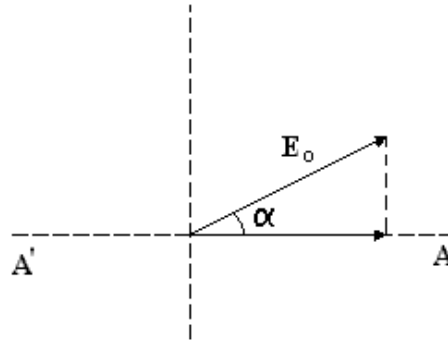
• **Polarizarea prin dicroism (absorbție selectivă):** Proprietatea unor materiale de a absorbi în mod diferit vibrațiile luminoase care se efectuează pe direcții diferite. Astfel de materiale sunt utilizate pentru confecționarea filtrelor polarizatoare pentru lumină, ***polaroizi- analizori***.

Polarizarea luminii transmise prin polarizor



Polarizarea luminii

- **Polarizarea prin dicroism (absorbție selectivă):**



$$I = I_o \cos^2 \alpha$$

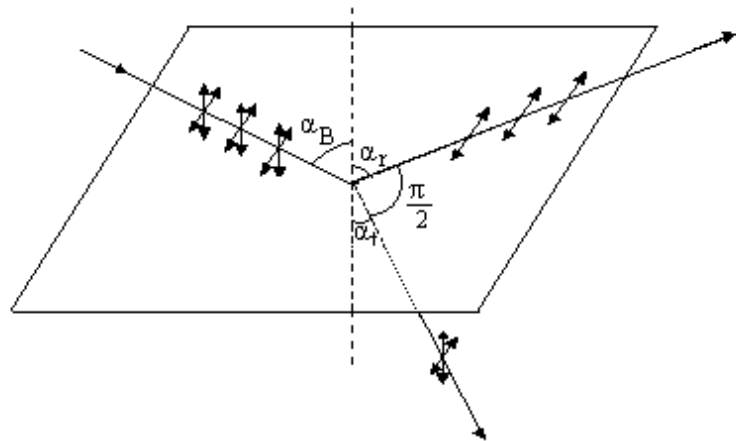
legea lui Malus.

- **Polarizarea prin reflexie:**

Fie o undă luminoasă plană monocromatică, incidentă pe suprafața de separație plană dintre două medii transparente. Față de planul de incidență, orientarea vectorului luminos este oarecare, dar acest vector poate fi descompus după o direcție perpendiculară pe plan și alta paralelă cu planul. Experiența arată, iar teoria electromagnetică poate descrie acest fapt, că cele două componente, în general, nu rămân egale în urma reflexiei și refracției luminii. Ca urmare a acestei asimetrii, lumina reflectată, ca și cea transmisă (refractată), este polarizată.

Polarizarea luminii

- Dacă unghiul de incidență al luminii naturale (nepolarizate) este astfel ca raza reflectată să fie perpendiculară pe cea transmisă, se constată că raza reflectată este total polarizată (polarizată liniar în urma reflexiei nu rămân decât vibrațiile luminoase perpendiculare pe planul de incidență; raza transmisă este parțial polarizată:



Unghiul de incidență pentru care se întâmplă aceasta se numește unghi Brewster α_B

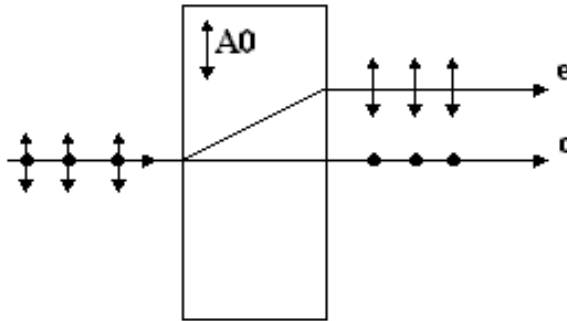
$$\frac{\sin \alpha_i}{\sin \alpha_t} = \frac{\sin \alpha_B}{\sin(\frac{\pi}{2} - \alpha_B)} = \operatorname{tg} \alpha_B = \frac{n_2}{n_1}$$

Polarizarea luminii

■ Polarizarea prin dublă refracție (birefringența)

În general, lichidele, solidele amorse de tipul sticlei, solidele cristaline cu structură cu simetrie cubică sunt *optic izotrope*, adică proprietățile lor optice (viteza de propagare a luminii, deci și indicele de refracție) sunt independente de direcție sau de starea de polarizare.

Multe alte solide cristaline sunt *optic anizotrope*. Cristalele ale căror proprietăți prezintă o simetrie de rotație în raport cu o axă se numesc *uniaxiale*. De-a lungul acestei axe, viteza de propagare a luminii nu depinde de orientarea vectorului luminos, iar axa se numește *axă optică*. Astfel de cristale sunt spatul de Islanda (calcit, varietate de CaCO_3), cuarțul, azotatul de sodiu, gheața etc.



Polarizarea luminii

■ Polarizarea prin dublă refracție (birefringența)

Se constată experimental că dacă o rază de lumină naturală cade pe fața unui cristal uniaxial apare fenomenul de *birefrință* sau *dublă refracție*, care constă în apariția a două raze care se refractă pe direcții diferite: una, numită *rază ordinară*, care respectă legile refracției, iar a doua, deviată se numește *rază extraordinară*.

Cele două raze sunt polarizate în plane perpendiculare: în raza ordinară oscilațiile au loc perpendicular pe planul principal, iar în cea extraordinară oscilațiile au loc în plan paralel cu cel al secțiunii principale.

Pentru explicarea birefrinței se ține seamă că cristalul poate fi considerat drept un ansamblu de oscilatori elementari, excitați de câmpul electric al undei.

În practică, pentru obținerea luminii liniar polarizate se construiesc dispozitive de polarizare bazate pe birefrință, sub forma unor prisme (Nicol sau alte tipuri), care elimină una din cele două componente.

Polarizarea luminii

■ Birefringența mecanică.

Un mediu optic izotrop care suferă o deformare (elastică) devine anizotrop, comportându-se ca un cristal uniaxial. Mărimea birefringenței indusă mecanic este dată de:

$$|n_o - n_e| = k \cdot \lambda \cdot p$$

p este presiunea exercitată, λ este lungimea de undă a luminii, iar k este o constantă ce depinde de natura substanței.

Birefringența electrică

În prezența unui câmp electric are loc schimbarea caracteristicilor de propagare a undelor luminoase în anumite medii, care determină apariția sau modificarea birefringenței acestora, fenomen denumit *electrooptic*.

$$n_e - n_o = B\lambda E^2$$

Polarizarea luminii

B- este constanta lui Kerr, care depinde de natura substanței, de lungimea de undă a luminii și de temperatură. Dintre substanțele care au constanta Kerr mare, sunt de menționat nitrobenzenul, sulfura de carbon, apa.

Birefrința magnetică

Este indusă într-un mediu de un câmp magnetic exterior, care interacționează cu momentele magnetice moleculare, determinând orientarea acestora.

Efectul magnetooptic pătratic (efect Cotton-Mouton), analog efectului electrooptic Kerr, constă în apariția birefrinței într-un mediu izotrop. Direcția câmpului magnetic aplicat devine axă optică a mediului. Mărimea birefrinței este dată de :

$$n_e - n_o = C\lambda B^2$$

C- Cotton-Mouton, ce depinde de natura substanței, de lungimea de undă a luminii și de temperatură.

Birefrința circulară magnetică (efectul Faraday): La substanțe formate din molecule simetrice se poate crea o disimetrie prin plasarea acestora într-un câmp magnetic, ale cărui linii de câmp coincid cu direcția de propagare a luminii polarizate liniar; rotirea planului de polarizare în acest caz constituie efectul Faraday.

Bibilografie selectivă

- [1] Dușan POPOV, Ioan DAMIAN, *Elemente de Fizică generală*, Editura Politehnica, Timișoara, 2001.
- [2] Minerva CRISTEA, Dușan POPOV, Florica BARVINSCHI, Ioan DAMIAN, Ioan LUMINOSU, Ioan ZAHARIE, *Fizică – Elemente fundamentale*, Editura Politehnica, Timișoara, 2006.
- [3] I. Luminosu, *Fizica – elemente fundamentale*, Editura Politehnica, 2002.
- [4] O. Aczel, *Mecanică fizică. Oscilații și unde*, Ed. Universității Timișoara, 1975.
- [5] A. Hristev , *Mecanică și acustică*, Ed. Did. și Pedag., București, 1982
- [6] H. Kittel, *Cursul de fizică Berkeley*, Vol. I, II, Ed. Did. și Pedag., București, 1982.
- [8] E. Luca, Gh. Zet și alții – *Fizică generală*, Ed. Did. și Pedag., București, 1981.
- [9] T. Crețu – *Fizică generală*, Vol. I și Vol.II, Ed. Tehnică, București, 1984 și 1986.