

B. Interferența luminii

B.1. Interferența luminii

Am văzut în capitolul de unde mecanice (1C8) că atunci când două unde se propagă aproximativ pe aceeași direcție, oscilația rezultantă a fiecărui punct atins de cele două unde se poate explica prin simpla suprapunere a efectelor celor două unde. Ce se poate întâmpla, spre exemplu, cu undele de pe suprafața apei se poate întâmpla și cu undele luminoase. Starea de oscilație într-un punct în care avem două unde luminoase este guvernată de modul în care cele două unde se suprapun. Dacă putem aranja un sistem

experimental care să permită suprapunerea a două unde luminoase de aceeași frecvență și de fază constantă în timp, atunci suprapunerea lor va prezenta aceleași fenomene ca la interferența undelor mecanice: vor putea fi observate, în anumite locuri, maxime de intensitate luminoasă iar în altele, adiacente, minime de intensitate luminoasă.

Există multe dispozitive experimentale care permit observarea fenomenului de interferență a undelor luminoase. Vom examina în continuare unul din acestea.

B.2. Dispozitivul Young

Să presupunem că avem două surse de lumină O_1 și O_2 care emite unde de aceeași frecvență își mențin o diferență de fază constantă. (fig. 3.19.).

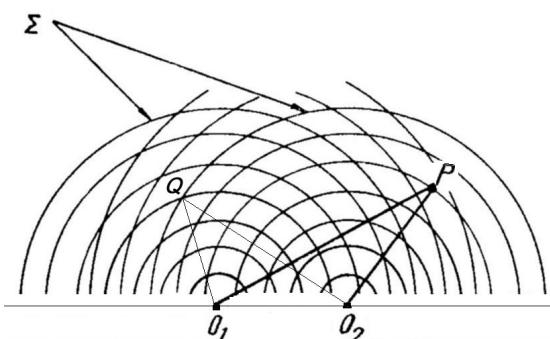


Fig. 3.19. Schița experimentului de suprapunere a două unde de lumină care provin de la două surse O_1 și O_2 . Prin S s-au notat suprafețele de undă elementare.

Fiecare sursă punctiformă (O_1 și O_2) emite unde sferice. În orice punct P sau Q din spațiul din jur undele se suprapun. Să urmărim drumul a două unde care ajung în P în care am pus un ecran (E) paralel cu cele două surse (fig. 3.20). Pentru a gândi în termeni de unde electromagnetice, ne vom referi în continuare la componenta electrică a undei. În punctul P , câmpul electric va fi rezultatul însumării (la fiecare moment) al câmpurilor electrice care provin din O_1 și din O_2 .

Folosind *principiul suprapunerii*, putem însuma cele două câmpuri electrice și obținem intensitatea totală a câmpului. Dacă sursele sunt destul de apropiate una de alta față de distanța D , atunci undele se propagă aproximativ pe aceeași direcție, iar vectorii electrici oscilează practic în același plan. Vom putea scrie:

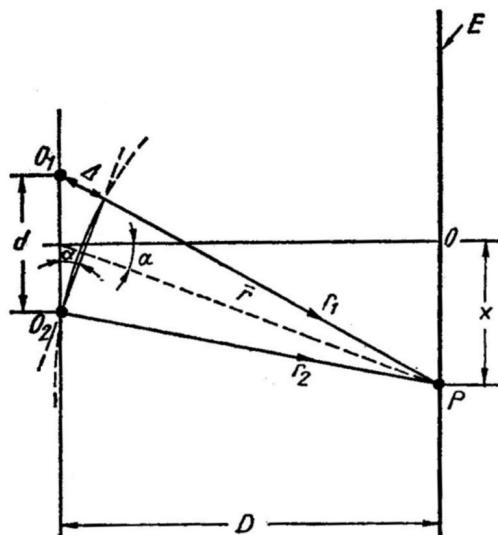


Fig. 3.20. Interferența produsă pe ecranul E prin suprapunerea radiațiilor care provin de la cele două surse O_1 și O_2 .

$$E_P = E_{o_1} \sin \omega \left(t - \frac{r_1}{c} \right) + E_{o_2} \sin \omega \left(t - \frac{r_2}{c} \right), \quad (3.5)$$

în care am notat $r_1 = \overline{O_1 P}$ și $r_2 = \overline{O_2 P}$.

Pentru simplificarea calculului, vom considera $E_{o_1} = E_{o_2}$, (aceasta nu modifică esența concluziilor generale la care vom ajunge). În acest caz, folosind transformarea :

$$\sin a + \sin b = 2 \sin \frac{a+b}{2} \cos \frac{a-b}{2}$$

obținem următoarea succesiune de calcule:

$$\begin{aligned} \sin\omega\left(t - \frac{r_1}{c}\right) + \sin\omega\left(t - \frac{r_2}{c}\right) &= \\ = 2\sin\frac{1}{2} \left[\omega\left(t - \frac{r_1}{c}\right) + \omega\left(t - \frac{r_2}{c}\right) \right] \times \\ \times \cos\frac{1}{2} \left[\omega\left(t - \frac{r_1}{c}\right) + \omega\left(t - \frac{r_2}{c}\right) \right] &= \\ = 2\sin\omega\left(t - \frac{r_1 + r_2}{2} \cdot \frac{1}{c}\right) \cdot \cos\omega\left(\frac{r_2 - r_1}{2} \cdot \frac{1}{c}\right). \end{aligned}$$

Dacă vom nota $\frac{r_1 + r_2}{2} = \bar{r}$ – distanța medie de la sursele O_1 și O_2 la P și $r_2 - r_1 = \Delta$ – diferența drumurilor străbătute de undele din O_1 și O_2 pentru a ajunge în P , unde rezultantă în P , va fi exprimată prin relația:

$$\begin{aligned} E_P &= \underbrace{2E_o \cos\omega\left(\frac{\Delta}{2c}\right)}_{\text{amplitudinea}} \underbrace{\sin\omega\left(t - \frac{\bar{r}}{c}\right)}_{\text{faza}} = \\ &= A \sin\omega\left(t - \frac{\bar{r}}{c}\right) \quad (3.6) \end{aligned}$$

Fluxul de energie transportat de undă luminoasă și care determină atât senzația luminoasă cât și iluminarea paravanului în acel punct este dată de pătratul intensității câmpului electric, adică:

$$\begin{aligned} \Phi_p \sim E_P^2 &= 4E_o^2 \cos^2\left(\frac{\Delta}{2c}\right) \cdot \sin^2\omega\left(t - \frac{\bar{r}}{c}\right) \\ &= 4\Phi_o \sin^2\omega\left(t - \frac{\bar{r}}{c}\right) \quad (3.7) \end{aligned}$$

unde Φ_p este fluxul energetic în P , și Φ_o este:

$$\Phi_o = E_o^2 \cos^2\omega\left(\frac{\Delta}{2c}\right) \quad (3.8)$$

Următoarele observații sunt foarte importante. **a)** În relația (3.6) amplitudinea conține termenul în cosinus deoarece este o mărime independentă de timp.

b) Deoarece în Φ_o (relația 3.8) intervine Δ – diferența de drum între undele pornite din cele două puncte (O_1 și O_2), rezultă că amplitudinea rezultantă, Φ_o , va depinde de diferența de drum Δ . Analizând condițiile în care mărimea

$\cos^2\omega\left(\frac{\Delta}{2c}\right)$ ia valorile maxime respectiv minime, și

ținând cont că $\omega = \frac{2\pi c}{\lambda}$ obținem:

maxim

$$1 = \cos^2\omega\left(\frac{\Delta}{2c}\right) \rightarrow \pi \frac{\Delta}{\lambda} = m\pi$$

sau $\Delta = m\lambda$ (3.9)

minim

$$0 = \cos^2\omega\left(\frac{\Delta}{2c}\right) \rightarrow \pi \frac{\Delta}{\lambda} = (2m+1)\frac{\pi}{2}$$

sau $\Delta = (2m+1)\frac{\lambda}{2}$ (3.10)

unde $m = 0, 1, 2, 3, 4, \dots$,

Această diferență de drum poate fi exprimată în funcție de diferența de fază dintre unde ($\Delta\phi$), sau în funcție de intervalul de timp dintre momentele de emisie a celor două surse (Δt). Pentru a obține aceste relații observăm că o diferență de drum egală cu λ corespunde unei diferențe de fază de 2π . În acest caz, relația dintre diferența de fază și diferența de drum va fi

$$\Delta\phi = 2\pi \cdot \frac{\Delta}{\lambda} = 2\pi \cdot \frac{\Delta}{v} = \omega \cdot \frac{\Delta}{v} = \omega \cdot \frac{\Delta n}{c}, \quad (3.11)$$

unde $\lambda = \frac{v}{n} = \frac{c}{nv}$ și $v = \frac{c}{n}$. Vom obține pentru condițiile de maxim și de minim:

$$(\Delta\phi)_M = m2\pi \text{ și } (\Delta\phi)_m = (2m+1)\pi.$$

Diferența de timp corespunzătoare acestei diferențe de fază va fi:

$$\Delta t = \frac{\Delta}{v} = \frac{\Delta \cdot n}{c} \text{ și deci } \Delta\phi = \omega\Delta t \quad (3.12)$$

În punctele în care este îndeplinită condiția (3.9), fluxul va fi (fig. 3.21 și fig. 3.22):

$$\Phi_M \sim 4E_o^2 \sin^2\omega\left(t - \frac{\bar{r}}{c}\right) \quad (3.13)$$

iar în punctele în care este îndeplinită condiția (3.10), fluxul va fi $\Phi_m = 0$.

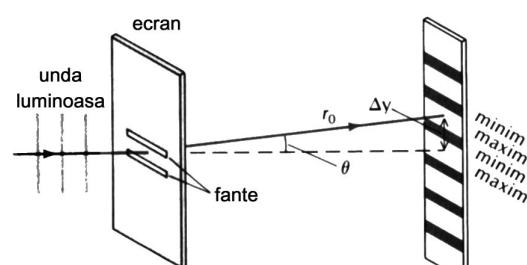


Fig. 3.21. Experiment de tip Young cu fante.

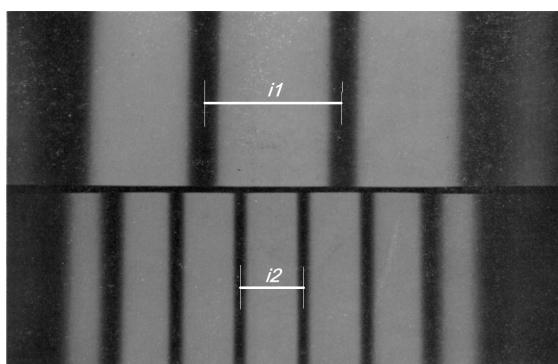


Fig. 3.22. Franje de interferență obținute cu un dispozitiv cu fante pentru două distanțe diferite d dintre surse. Interfranjele sunt notate cu i1 și i2.

c) Deoarece *intensitatea luminoasă*, pentru un θ dat, este proporțională cu fluxul de energie luminoasă, condițiile de maxim respectiv de minim vor exprima, de asemenea, condițiile de maxim și de minim de iluminare.

Există astfel puncte în spațiul din spatele paravanului în care intensitatea luminoasă rămâne în continuu zero, și altele în care poate atinge valori maxime. Zonele de maxim alternează cu zone de minim de iluminare. Această structură se numește *figură (sau imagine) de interferență*, liniile de egală intensitate luminoasă se numesc *franje de interferență*, iar fenomenul de suprapunere a undelor cu formare de maxime și de minime de iluminare se numește *interferență*. Atunci când suprapunerea undelor conduce la un maxim, spunem că avem de-a face cu interferență *constructivă*, iar în caz contrar, *distructivă*. Valoarea l_i pentru o franje de interferență dată se numește *ordinul franjei*.

d) Distanța dintre două maxime sau minime consecutive pe ecran se numește *interfranță*, și depinde printre altele și de distanța de la surse la ecran, D . Dacă unghiul θ (figura 3.9) este mic, atunci se vede că $\frac{\Delta}{d} = \frac{x}{D}$ și deci interfranța va fi

$$\delta x = D/d. \quad (3.14)$$

Se vede că interfranța nu depinde de ordinul de interferență (din cauza unghiului θ mic).

e) Un alt aspect fundamental pleacă de la următoarea observație practică: am avut ocazia să stăm la o masă iluminată de două sau mai multe becuri (candelabru). Si totuși nu am observat pe tăblia mesei zone alternante de lumină și întuneric (franje). Ori, conform celor discutate mai sus, fenomenul ar trebui să fie observabil curent. Faptul că nu observăm figura de interferență înseamnă că

am omis probabil ceva. Putem să ne punem întrebarea dacă fenomenul de interferență poate fi oricând observat. Deci, *care ar fi condițiile ca interferența produsă de două surse să se observe?* Să examinăm mai atent condițiile de interferență ce au fost deduse din formula (3.6), lată o serie de observații.

i Conform celor discutate, cele două surse trebuie să aibă aceeași frecvență, ceea ce nu se întâmplă în cazul a două becuri cu incandescentă, căci ele dau o lumină aproximativ albă, care conține un spectru larg de frecvențe (este policromatică). Am putea remedia acest aspect utilizând becuri prevăzute cu filtre colorate. Dar nici în acest caz nu se observă fenomenul de interferență. Trebuie să mai existe și alte motive.

j S-ar putea ca interfranța să fie prea mică și deci figura de interferență să nu poată fi observată. În adevară, dacă luăm niște valori rezonabile ($D = 2\text{ m}$, $d = 0,1\text{ m}$, $l = 550\text{ nm}$) rezultă o interfranță de aproximativ $0,01\text{ mm}$, ceea ce este greu de observat. Si totuși, dacă facem experimentul mai cu grijă, adică aranjăm astfel încât interfranța să fie suficient de mare, fenomenul tot nu se observă! Aceasta este un fapt experimental.

k Dacă analizăm formula (3.6), observăm că mai există ceva care ar putea să ne împiede să observăm interferență. Acest "ceva" se află în termenul în care intră amplitudinea undei compuse (suprapuse). Să analizăm afirmația făcută mai sus: „În punctul P , câmpul electric va fi rezultatul însumării (la fiecare moment) al câmpurilor electrice care provin din O_1 și din O_2 ”. Cu alte cuvinte, dacă undele care se însumează ajung într-un punct dat pe ecran în fiecare clipă cu altă diferență de fază, atunci în acel punct amplitudinea undei rezultante va varia rapid și ochiul nu va fi capabil să urmărească această variație. Figura de interferență va fi astfel inobservabilă. Pentru ca ea să fie observabilă este necesar ca cele două surse care emit lumină să rămână cu o diferență constantă de fază. Dacă două unde au o diferență de fază care nu depinde de timp, atunci ele se numesc *coerente*. În caz contrar, undele sunt *necoerente*.

Coerența este unul din cele mai importante concepte din fizica. Conceptul exprimă o serie de aspecte fundamentale pentru natura fenomenelor ondulatorii (și mai ales cuantice, care nu vor fi discutate aici) dar și pentru aplicațiile practice pe care le-a generat. Cea mai simplă aplicație este aceea auditiei stereofonice, cu două sau mai multe difuzoare care emit sunete coerente, adică cu o diferență de fază constantă în timp. Este adevărat că este un exemplu din domeniul undelor sonore dar este reprezentativ. În domeniul undelor

electromagnetice aplicații bazate pe coerentă sunt de exemplu RADAR-ele interferențiale (**R****A**dio **D**eTECTing **A**nd **R**anging – detectare și măsurarea distanțelor prin unde radio, radiotelescoapele interferențiale) (fig. 3.23), MASER-ul (**M**icrowave **A**mplification by **S**timulated **E**mision of **R**adiation – Amplificarea microundelor prin emisie stimulată a radiației) etc. (fig. 3.24).



Fig. 3.23. Radio interferometru astronomic.

În domeniul optic, cea mai neașteptată prezență este la banala lentilă (vom discuta puțin despre aspect ale coerentei la „*Alte provocări*”), dar domeniul cel mai bine cunoscut în care coerentă joacă un rol important este cel al acestui numit domeniu de *Optică neliniară*, care cuprinde printre altele și aplicațiile cunoscute sub numele de LASER (**L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mision of **R**adiation – amplificarea luminii prin emisie stimulată) (fig. 3.26 și 3.27), holografia și de fapt toate fenomenele optice bazate pe proprietățile cuantice ale luminii. În domeniul fizicii cuantice, coerentă este un concept fundamental.



Fig. 3.24. Masere utilizate la cele mai precise ceasuri atomice (Institutul Astronomic al Academiei Române) și cel al Biroului de Standarde din Statele Unite ale Americii.

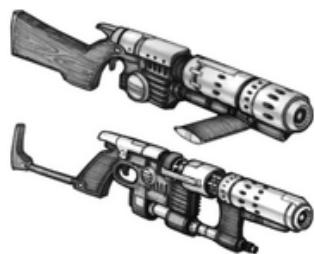


Fig. 3.25. Două modele de arme MASER denumite *charric* folosite de către rasa *Chiss* în filmul SF „Războiul stelelor”. Charric, produce o descărcare care ghidează prin efect maser particule. Acestea, prin energia lor cinetică și prin efect termic, penetreză orice fel de armură. La contactul cu o armură metalică produce un puternic soc electric. Atât imaginile cât și conceptul este de domeniul SF, chiar dacă unele aspecte pot fi argumentate fizic.

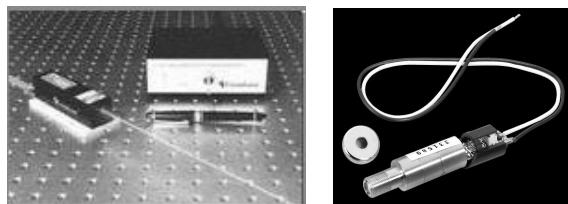


Fig. 3.26. Laser de cercetare și diodă laser.



Fig. 3.27. Laser de buzunar (indicator) și spectacolele de lumină și muzică care folosesc fascicule laser.

Experimentului de interferență pe care l-am examinat a fost realizat în 1802 de către fizicianul englez Thomas Young (1773 - 1829) și este prezentat în figura 3.28. Dificultatea principală în acest experiment este slaba iluminarea care se obține pe ecran din cauza necesității de a face orificii cât mai mici.

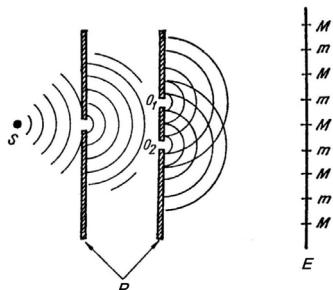


Fig. 3.28. Schema experimentului lui Young.

Prin *M* și *m* sunt notate pozițiile maximelor și respectiv ale minimelor pe ecran.



Putem realiza practic un astfel de dispozitiv folosind un tub mai lung de medicamente, la care am făcut un orificiu foarte mic (cam de 1mm diametru), iar în partea dopului se prinde o foită de aluminiu în care s-au făcut două mici găuri, la o distanță de aproximativ 2 – 3 mm una de alta.

Pentru ca aceste orificii să fie foarte mici (mai mici ca cele din fundul tubului) se procedează astfel. Se pune foită de aluminiu pe un suport dur și se întepătușă cu un ac ascuțit. Din cauza suportului dur acul nu va pătrunde în foită decât foarte puțin, astfel încât gaura făcută va fi foarte mică. Privind o sursă de lumină, de exemplu un

bec puternic, prin orificiul din tub (becul, cele două orificii și gaura din tub trebuie să fie aproximativ coliniare) vom vedea cele două orificii luminoase în conjurare de inele concentrice luminoase și întunecoase, adică exact ceea ce se vede din figura 3.29.

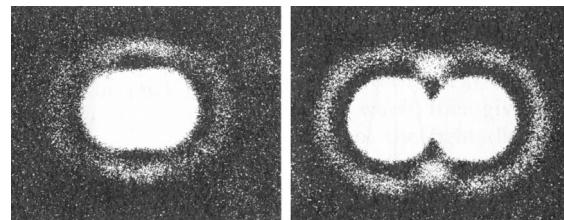


Fig. 3.29. Imaginele celor două orificii (mai apropiate sau mai depărtate). Din cauza iluminării slabe, se vede bine doar o franjă de interferență.

B.3. Localizarea franjelor de interferență

Putem observa franje de interferență ori de câte ori reușim să suprapunem două (sau mai multe) unde de aceeași frecvență și diferență de fază constantă în timp. Spre exemplu, dacă privim o pată de ulei sau de motorină pe apă, vom vedea uneori pe suprafață contururi colorate (fig. 3.30). Asemănător, putem observa contururi sau irizații luminoase pe balonașele de săpun pe care le putem produce ușor (figura 3.31).



Fig. 3.30. Contururi luminoase produse de o pată de ulei pe apă.



Fig. 3.31. Contururi luminoase ce pot fi văzute pe suprafața balonașelor de săpun.

ACESTE FIGURI COLORATE SE DATOREAZĂ UNOR FENOMENE DE INTERFERENȚĂ PRODUSE ÎN PELICULE SUBTIRE. ELE SE NUMESC *CULORILE PELICULELOR* (SAU *FILMELOR*) *SUBTIRI*. SĂ VEDEM CUM APAR ACESTE CULORI.

Când un fascicul de lumină cade pe un film subtire, plan paralel, o parte se reflectă pe partea superioară (fig. 3.32) și alta pătrunde în interior și se reflectă din nou pe cealaltă suprafață. Se poate în acest fel să se suprapună două unde coerente cu o anumită diferență de drum. În funcție de grosimea peliculei, de unghiul de incidentă și de lungimea de undă, se realizează un fascicul emergent (reflectat) care prezintă maxime și minime de interferență.

Se poate calcula condiția de interferență în lame subtiri (interferență obținută prin reflexia pe cele două fețe ale peliculei, geometria este desenată în figura 3.32) și relația obținută este:

$$2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i} = \frac{k\lambda}{2} \quad (3.15)$$

Aici $k = 2m$, pentru minime și $k = 2m+1$ pentru maxime, unde m este un număr întreg.

Dacă filmul este suficient de subtire, în anumite condiții ce depind de condițiile de observare, se pot vedea franje de interferență. Din cauză că poziția franjelor depinde și de lungimea de undă, la iluminarea cu lumină albă, diferitele culori produc franje colorate în locuri diferite, astfel încât franjele au succesiunea de culori a curcubeului (fig. 3.33). Acest tip de figuri de interferență se observă și cu surse extinse.

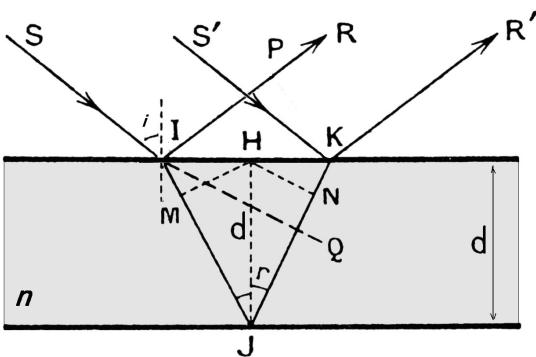


Fig. 3.32. Mersul razelor de lumină care produc franje de interferență în lame subțiri. Pe imagine sunt noteate toate punctele necesare calculului interfranjei. Încercați să faceți acest calcul. Problema nu este însă simplă.

Figura de interferență nu se vede dacă dorim să o proiectăm pe un ecran, folosind o lentilă. Dacă însă lentila este astfel plasată încât să proiecteze chiar imaginea peliculei, atunci franjele se pot vedea pe ecran. Aceste franje se numesc *localizate*.

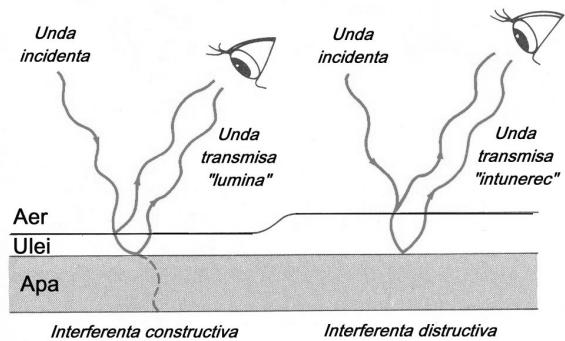


Fig. 3.33. Schema formării franjelor luminoase și a celor întunecoase. Filmul subțire este pelicula de ulei.

Deoarece diferența de drum a undelor care interferă depinde și de grosimea filmului, locul geometric al punctelor ce corespund grosimilor egale ale filmului vor scoate în evidență variațiile de grosime a peliculei. Figura poartă numele de *franje de egală grosime*. Nenumărate aplicații rezultă din această observație. Ele au determinat aparitia unui domeniu întreg, denumit *interferometrie aplicată*.

B.4. „Optica albastră”

Dacă ati fost atenți la obiectivele unor aparate de fotografiat de foarte bună calitate, ati putut să sesizați că au o irizatie albăstruie. Ea nu este întâmplătoare. Ea poartă denumirea de „optică albastră”. Pentru a înțelege rostul acestei tehnici, să privim imaginea de mai jos a trecerii luminii printr-un bloc paralelipipedic de lumină. Pe lângă imaginea fenomenelor de reflexie și de refracție se vede o scădere a intensității luminoase pe măsură ce lumina suferă tot mai multe reflexii și refracții.

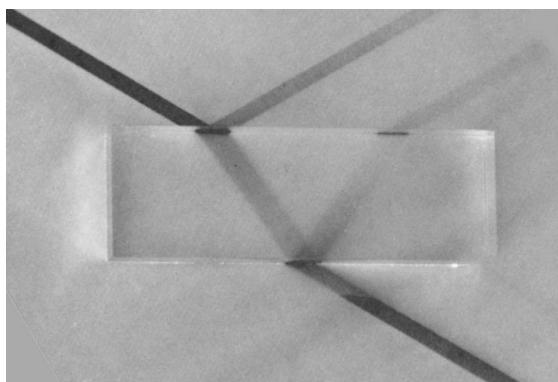


Fig. 3.34. Mersul unui fascicul de lumină printr-o lamă plan paralelă reală.

Din cauză că și pentru unda luminoasă din fascicul trebuie să se conserve energia putem să scriem că suma intensităților undei reflecte (I_{refl}), refractată (I_{refr}) și cea absorbită în sticlă (I_{abs}) este constantă și egală cu intensitatea undei incidente (I_0):

$$I_0 = I_{refl} + I_{refr} + I_{abs} \quad (3.16)$$

Dacă se împart ambii termeni din relația de mai sus cu I_0 , obținem

$$1 = R + T + A \quad (3.17)$$

În care termenii R , T și A reprezintă *coeficientul de reflexie*, *coeficientul de transmisie* și respectiv *coeficientul de absorbție* (valorile lor numerice sunt cuprinse între 0 și 1 sau, în procente, între 0% și 100%).

Dacă sticla este destul de transparentă, putem considera că $A = 0$, și deci $R + T = 1$.

Această relație ne spune că dacă reflexia este mare, atunci transmisia este mică și reciproc. Pentru un aparat de fotografiat este important ca în aparat să intre (prin obiectiv) cât mai multă lumină, deci ca lentila obiectiv să fie cât mai transparentă. Dar această transparentă depinde

de indicii de refacție a aerului (n_1) și a sticlei (n_2), după o formulă stabilită de către Augustin Fresnel (1788 – 1827):

$$R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 = \left(\frac{n_1 / n_2 - 1}{n_1 / n_2 + 1} \right)^2 \quad (3.18)$$

De aici rezultă un lucru interesant și neașteptat la prima vedere: chiar dacă sticla este perfectă și nu absoarbe lumina, ceea ce trece prin ea este mai puțin intensă, din cauza fenomenului de reflexie. Raportul indicilor de refracție ai celor două medii este cel care dictează intensitatea luminii transmise. Dacă $n_{12} = n_1/n_2$, este 1, coeficientul de reflexie este zero și deci lumina trece nestânjenit mai departe, așa cum este normal. Dacă însă n_{12} este 0, reflexia este 100%, deci nu se mai transmite nimic. Acesta este cazul oglinzelor metalice, pentru care $n_2 = \infty$. (Încercați să „cugetați” relativ la această valoare!).

Putem îmbunătăți transmisia dacă interpunem între aer și sticla un strat subțire dielectric, neabsorbant, care să aibă un indice de refracție (n) între cele două valori, n_1 și n_2 (fig. 3.35), care se calculează din relația:

$$n = \sqrt{n_1 \cdot n_2}$$

Iar reflexia va fi dată de relația:

$$R' = \left[\frac{2(n_2 - n^2)}{(n_2 + n)(n + 1)} \right]^2$$

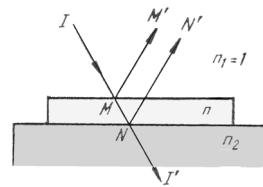


Fig. 3.35. Strat dielectric, neabsorbant, intermediar, care îmbunătățește transmisia.

De exemplu, dacă $n_1 = 1$ (aer), n va putea fi ales funcție de indicele de refracție al sticlei, conform graficului din figura 3.36.

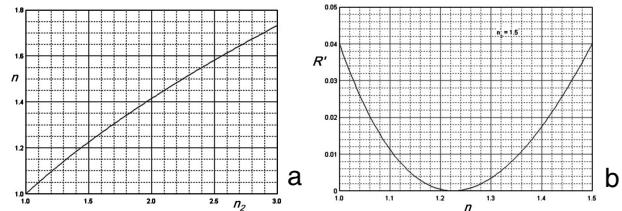


Fig. 3.36. (a) – Graficul dependenței indicelui de refracție al filmului intermediar de indicele de refracție a sticlei pentru a reduce reflexia; (b) factorul de reflexie al ansamblului, funcție de indicele de refracție al filmului (pentru $n_2 = 1,5$).

Materiale folosite pentru astfel de straturi intermediare care să îmbunătățească transparenta unor lentile sunt de exemplu fluorura de magneziu ($n = 1,38$), oxidul de siliciu ($n = 1,65$), sulfura de zinc ($n = 2,3$) s.a.m.d.

Alte provocări

1. Coerentă

Radiatia luminoasă este emisă de atomi (sau molecule) și se face prin „portii” de scurtă durată, denumite *trenuri de unde* care durează foarte puțin ($\sim 10^{-8}$ s). Radiatia din acest tren de unde este coerentă. Trenul de unde emise în acest interval de timp va avea o extindere spațială de aproximativ $\Delta r = c\Delta t \sim 3 \cdot 10^8 \cdot 10^{-8} = 3$ m, distanță care se numește *lungimea de coerentă*.

Dacă încercăm să obținem interferență cu unde a căror diferență de drum crește treptat până la câțiva metri, vedem cum *treptat figura de interferență se estompează, se șterge*. Ea este înlocuită de o iluminare continuă. Efectul este rezultatul unei valori finite a lungimii. Pentru diferențe de drum foarte mari se suprapun unde care provin de la trenuri diferite, care nu sunt coerente și care își modifică continuu (aleator) diferența de fază. Figura de interferență se schimbă foarte rapid, iar în medie observăm o iluminare

continuă. O sursă de lumină extinsă, cum este un bec, sau tubul fluorescent, este o colecție mare de centre emițătoare de unde care acționează independent. Așa încât sursele extinse vor da totdeauna lumină necoerentă. Sursele punctiforme de lumină dau lumină coerentă.

Experimentul lui Young și cel propus să-l faceti, permite astfel obținerea unor radiatii cu un grad destul de mare de coerentă, utilizând ca surse punctiforme orificii mici ca.

Spre deosebire de cazul luminii, în acustică sau în radiotehnică sursele sunt practic coerente și, de aceea, fenomenele de interferență pot fi mai ușor observate sau utilizate. Spre exemplu, antenele de radio și televiziune sunt surse coerente. Putem astfel să le aranjăm ca să producă maxime sau minime acolo unde dorim. Așa numitele *antene Yagi* pentru receptia emisiunilor de televiziune, au mai mult elemente care creează un maxim într-unul din elemente (dipolul radiant) pentru radiatia care vine din față

ei. În figura 3.37 se prezintă schema unei astfel de antene. Elementul central este dipolul de la care unda electromagnetică este dusă prin cablu la receptor. Prin efecte de interferență constructivă cele patru directoare și reflectorul fac ca în dipol câmpul electric să crească pentru unde care vin din stânga figurii, perpendicular pe elementele antenei. Tot efect de interferență, determinat ca în experimentul lui Young, îl avem atunci când recepționăm radiată cu o antenă de televiziune improvizată sau „prost poziționată”. Cu o astfel de antenă, imaginea la televizor va depinde de locul ei în sensul că se vor „prinde” unde care vin direct de la sursă (post) dar și prin reflexie pe clădiri, copaci, sau alte forme de relief.

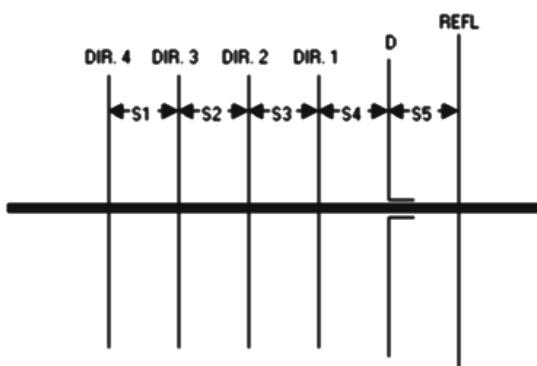


Fig. 3.37. Antena Yagi cu 6 elemente: un reflector, un dipol și patru directoare.

În concluzie, pentru a obține o figură de interferență observabilă, trebuie ca radiațiile luminoase să aibă aceeași frecvență și să fie coerente. Pentru a fi coerente va fi trebui ca radiațiile să provină din același punct al sursei și ca diferența de drum dintre ele să fie mică în comparație cu lungimea de coerență (pentru lumină < 3 m). Metoda de a separa două fascicule ce provin de la aceeași sursă și de a le suprapune ulterior este metoda cea mai des folosită pentru a obține interferență.

2. Lentila ca dispozitiv interferențial

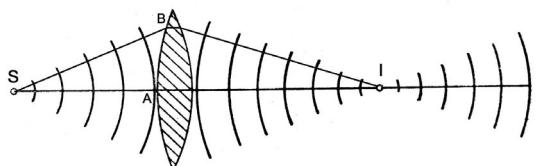


Fig. 3.38. Lentila ca dispozitiv interferențial.

Să analizăm pe scurt modul în care am construit imaginea într-o lentilă (figura 3.38). Razele de lumină care

merg de la sursa S , trec prin lentilă și ajung în focar unde dau o imagine I . În acest scop razele pot merge pe nenumărate drumuri ce leagă S de I , cum ar fi SAI sau SBI . În virtutea celor discutate mai sus ne putem pune problema „de ce cele două raze care se întâlnesc în I , nu interferă dând spre exemplu un minim”? În fond, această condiție de minim ar putea fi îndeplinită de foarte multe perechi de raze (unde) ce pleacă din sursa S și traversează lentila. Am ajunge la concluzia, evident eronată, că este posibil ca în focar să avem întuneric! Răspunsul la această întrebare este relativ simplu. Cele două raze (unde) pe care le-am luat în considerație fac în adevăr drumuri geometrice diferite. SAI este evident mai scurt decât SB . Dar condiția de interferență (3.9) sau (3.10) implică diferență de drum, deoarece deplasarea undelor s-a făcut într-un mediu omogen. De fapt, condiția de interferență cere că în punctul de întâlnire cele două unde să vibreze în fază sau antifază. Dar dacă o undă trece printr-un mediu de indice de refracție diferit de 1, ea va „întârzie” față de una care se propagă prin vid, căci viteza de propagare va fi $v = c/n$. Cele două unde SAI și SB ajung de fapt în fază și dau totdeauna un maxim, căci SAI este mai scurt geometric dar unda parcurge o distanță mai mare prin sticlă, iar unda SB este mai lungă geometric, dar unda parcurge o distanță mai mică prin aer. În ansamblu drumul mai lung geometric este compensat de o distanță mai mică parcursă prin mediul de indice de refracție n . În concluzie, putem face afirmația interesantă că *lentila este acel dispozitiv care aduce în fază, în punctul I, toate undele ce pleacă din punctul S*. Altfel spus suprafața lentilei este astfel concepută încât pe oriunde ar merge o rază (o undă) ea va ajunge în focar, în fază cu toate celelalte. Această suprafață este o calotă sferică (pentru unde ce fac unghi mic față de direcția de propagare – raze paraxiale). Punctul în care toate razele (unde) ajung în fază, indiferent de drumul parcurs, se numește *focar*. Același raționament este valabil pentru oglinzi sferice.

Putem ține cont de efectul mediului asupra fazei undei care se propagă și care va trebui să fie folosit totdeauna când vom calcula condiția de interferență, folosind în locul lungimii drumului geometric (d), o mărime denumită *drum optic* (s), care se obține din produsul

$$s = n \cdot d$$

$$(n) \times (\text{drumul geometric}) = (\text{drum optic})$$

Luând în calcul drumul optic obținem totdeauna în mod corect condiția de interferență.

3. Dispozitiv Young cu mai multe fante

Încercați să descrieți și să comentați figura de interferență ce apare într-un experiment de tip Young, în care aveti trei fante egale și simetrice. Pentru comoditate, exprimați distanțele până la punctele în care vreți să aflați starea undei (maxim, minim sau intermediar) în unități de lungimi de undă, ca în figură. În figura 3.39 sunt date spre exemplu două astfel de puncte, P și Q .

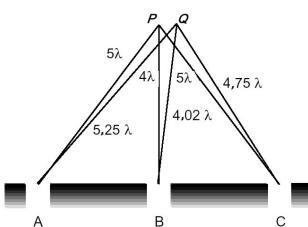


Fig. 3.39. Experiment Young cu trei fante.

Dacă multiplicăm fantele într-un dispozitiv de tip Young, obținem aşa-numita *rețea de difracție* prezentată în figura de jos (figura 3.40). Cazul acesta îl vom discuta mai departe.

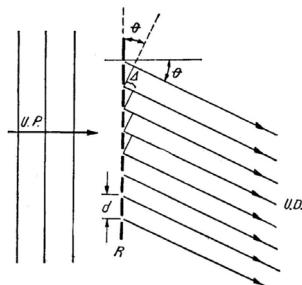


Fig. 3.40. Schița unei rețele de difracție, echivalentă cu un dispozitiv Young, având o multitudine de fante identice, echidistante

4. Culorile fluturilor

In natură puteți găsi nenumărate exemple, care mai de care mai neașteptate, în care fenomenul de interferență să fie prezent. Spre exemplu, merită de știut că acele minunate culori ale aripilor fluturilor sunt rezultatul unor fenomene

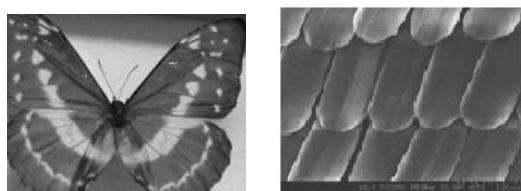


Fig. 3.41. Imagine aripilor unui fluture și a unei porțiuni de aripă mult mărită.

de interferență și nu datorită unor pigmenti colorați. În figura 3.41 se văd aripile unui fluture și imaginea corespunzătoare la microscopul electronic. Structura geometrică repetitivă este cea care dă culoarea aripilor.

5. Măsurarea unghiurilor foarte mici

Dacă în loc de o lămă plan paralelă caea din figura 3.17 avem una cu fețe neparalele (o pană), atunci figura de interferență se va schimba.

Urmărind pe figura radiațiile care pornesc de la sursa S, putem observa două posibile situații în care undele pot interfera. Dacă sursa este punctiformă, radiațiile care pleacă sunt în fază, iar pană optică nu face altceva decât să formeze la cele două suprafețe reflectante, două unde care vor avea o diferență de fază ce depinde de drumul celor două radiații. În cazul (a) din figură undele pot forma prin suprapunere directe franje de interferență localizate în P. În cazul (b), undele reflectate nu se vor suprapune (fiind divergente), dar dacă ele trec printr-o lentilă care adună razele în focar, ele pot să se suprapună. Această lentilă poate fi cristalinul ochiului, aşa încât focalizând ochiul pe pană optică putem vedea franje de interferență. Franjile vor avea o origine la prelungirea razelor, în spatele penei, și astfel vor fi denumite „virtuale” (ca la imaginile în lentile, acestea nu pot fi „prinse” pe un ecran).

Fig. 3.41. Franje de interferență produse pe o pană optică

Calculele condițiilor de realizare a maximelor și a minimelor de interferență sunt mai complicate și nu le vom detalia. Dar este sigur că zonele care au condiții de a da maxime (sau minime) depind de grosimea penei în locul în care a ajuns lumina. Ca atare, se vor forma benzi luminoase și întunecoase (franje) care vor urmări zonele de egală grosime. Se obțin ceea ce se numește *franje de egală grosime*.

Această observație ne permite să examinăm suprafețe cu o precizie foarte mare. Dacă facem un dispozitiv ca cel din figura 3.42 (a), punând peste o suprafață

reflectătoare (de exemplu, din metal) o placă de sticlă foarte puțin înclinată, obținem o pană optică „de aer”.

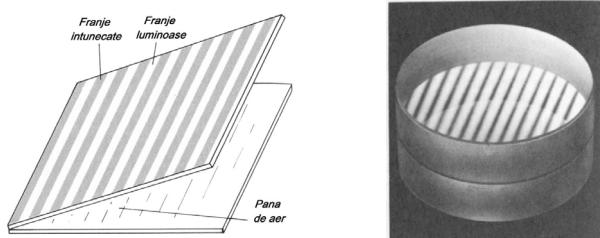


Fig. 3.42. (a) Realizarea unei pene optice așezând o placă de sticlă plană peste suprafață de studiu. În acest desen unghiul penei optice este exagerat de mare. (b) Fotografia unui sistem de franje obținut prin procedeul penei optice.

De obicei, se poate obține o pană optică dacă între placă de sticlă și suprafață de studiu se introduce într-o parte o foită de cel mult 0,5 mm grosime. dacă suprafața metalului este perfect plană, atunci franjele de interferență vor forma un sir de benzi paralele. În figura 3.42 (b) se vede fotografia unui astfel sistem de benzi.

Un alt exemplu este prezentat în figura 3.43. Zona de franje paralele indică regiuni de suprafață plană iar partea din mijloc indică prezența unei adâncituri. Din distanțele dintre franjele succesive se pot calcula, în fiecare regiune, mărimea denivelărilor (abaterea de la planeitate).

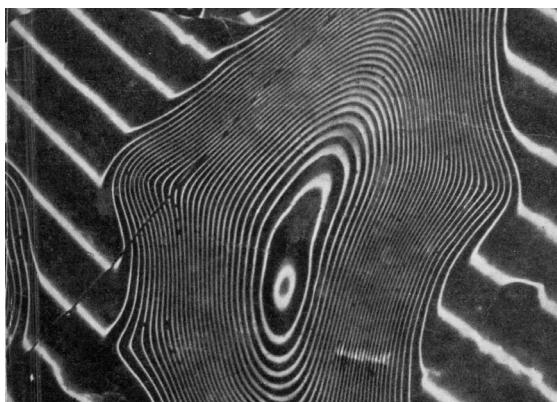


Fig. 3.43. Imagine a franjelor de interferență pentru o suprafață cu diferite neregularități.

6. Simulare fenomenelor de interferență

Există programe de calcul care simulează toate condițiile unui experiment de interferență. În figura următoare (3.44) se poate vedea un astfel de exemplu.

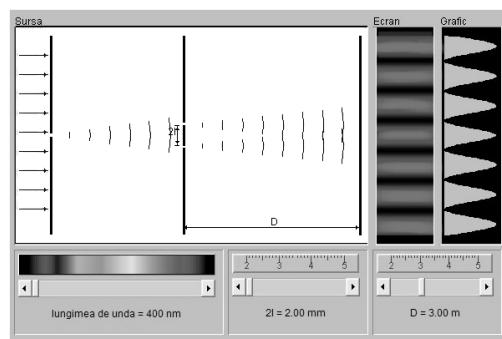


Fig. 3.44. Imagine de pe ecranul unui calculator a imaginii de interferență de tip Young în care se pot alege parametrii doriti $2l$, D și λ) pentru a vedea cum apare figura de interferență.

7. Filtre interferențiale

De multe ori avem nevoie de lumină monocromatică. Ea se poate obține de exemplu, prin interpunerea în calea fasciculului de lumină albă a unei substanțe colorate, care prin absorția unei părți din spectrul luminii albe, transmite doar o mică zonă a acestuia. Astfel sunt foliile colorate de plastic, de celofan, sau plăci de sticlă colorate. Acestea sunt utilizate în laboratoarele fotografice, la aparatelor de fotografiat, pentru iluminatul color etc. Dar lumina filtrată de aceste obiecte colorate conține de fapt un spectru relativ larg de lungimi de undă. O altă metodă care este mult mai bună este cea a *filtrelor interferențiale*.

Un filtru interferențial se realizează depunând peste un material transparent (sticlă) un strat subțire (peliculă) de material dielectric. Din relația (3.), care ne dă condiția de interferență pentru o peliculă subțire, la incidentă normală vom obține:

$$2dn = \frac{k\lambda}{2} \quad (3.26)$$

unde $k = 2m$, pentru minime și $k = 2m+1$ pentru maxime. De aici se vede că dacă alegem o peliculă de grosime și indice de refacție dat, radiația de lungimea de undă dată de formula anterioară poate să dea maxime sau minime. Ca atare, putem face ca să treacă (transmită) sau să se reflecte doar radiații de o lungime de undă foarte precisă. Filtrele interferențiale sunt mult mai bune dar sunt și mai scumpe. Pe același principiu se pot face filtre care să lase să treacă numai acele lungimi de undă de care avem nevoie, astfel încât putem „croi” un fascicul emergent a cărei compoziție spectrală să fie cea dorită.

Acum putem înțelege de ce se numește optica discutată mai sus ca fiind „albastră”. Filmul depus pe obiectiv este

foarte subțire și realizează îmbunătățirea luminii transmise dar, în același timp, elimină o parte din radiația albastru-violet din spectru, prin efect de filtru interferențial. Indicele de refracție al peliculei depuse îmbunătășește transmisia iar grosimea peliculei realizează filtrarea. Astfel, obiectivul

are o tentă albăstruie corespunzător unei reflexii crescute în domeniul albastru. Din acest motiv, un astfel de obiectiv nu se șterge de obicei de praf cu un material oarecare, ci cu unul special – moale – pentru a nu îndepărta stratul subțire de pe obiectiv.

C. Difracția luminii

C.1.* Difracția luminii

Principiul lui Huygens

Uneori avem ocazia să vedem imagini interesante. Spre exemplu, în figura 3.45 a și b, dacă ne uităm atent, observăm în jurul conturului negru al obiectelor o serie de contururi luminoase. Nu este sigur că le-am sesizat aşa încât să ne punem întrebarea „ce reprezintă sau cum apar”?

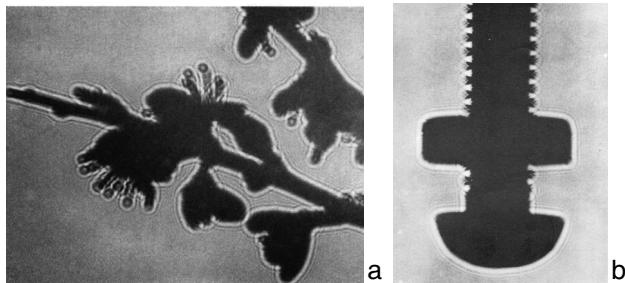


Fig. 3.45. Contururi de difracție în jurul marginilor umbrei unor frunze (a) și a unui șurub (b), iluminate cu o sursă punctiformă.

Dacă am face un experiment controlat, ca cel din figura 3.46, am constată că în jurul umbrei paravanului (O), apar pe perete, între A și B ca și între D și F cercuri concentrice luminoase și întunecoase. Ele se datorează fenomenului de *difracție* de care ne vom ocupa acum.

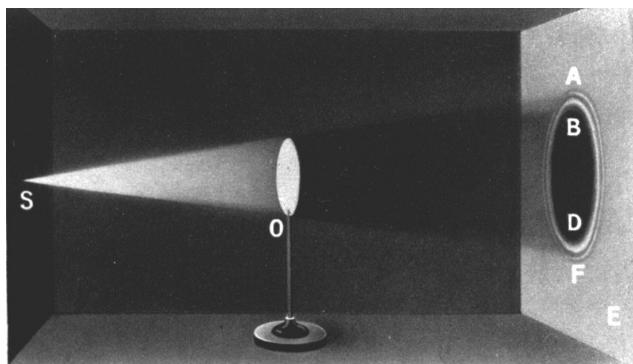


Fig. 3.46. Imagini de difracție în jurul umbrei unui paravan.

Ne putem acum întoarce la discuția referitoare la dificultatea de a dovedi propagarea în linie dreaptă a luminii cu ajutorul paravanelor prevăzute cu o fântă (figura 3.47). Am afirmat că micșorând orificiul, pata luminoasă de pe ecran devine tot mai “difuză”.

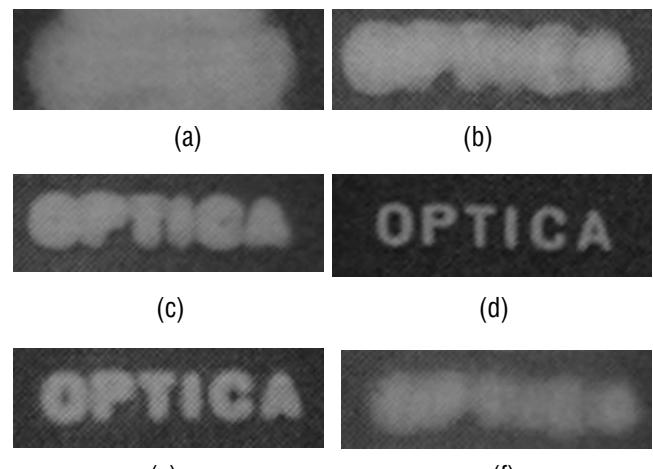


Fig. 3.47. Imagini succesive pe un ecran ale unei fante circulare iluminate cu o sursă punctiformă. Imaginile de la (a) la (f), corespund unor fante de diametre tot mai mici.

Acest lucru este în contradicție cu ideea de propagare a luminii în linie dreaptă, deoarece unicul lucru pe care-l aşteptăm atunci când micșoram fanta este o micșorare în mod proporțional a petei de lumină. Este surprinzător faptul că de la o limită de micșorare în jos, pata de lumină nu numai că nu scade, ci începe să crească din nou ca dimensiune, marginile ei nefiind însă bine delimitate.

Acest fenomen a fost observat de Leonardo da Vinci, însă primul care l-a studiat sistematic a fost F. M. Grimaldi (1640) care a denumit fenomenul *difracție*. Mult timp, difracția nu a putut fi explicată. În 1690, C. Huygens a reușit să explice acest fenomen cu ajutorul principiului introdus de el:

Orice punct de pe frontul de undă poate fi considerat, la un moment dat, ca fiind o sursă de unde sferice secundare, cu aceeași frecvență ca și unda incidentă, emise de fiecare punct al frontului. Undele secundare sunt toate în fază. Frontul de undă este dat la un moment ulterior de înfășurătoarea tuturor undelor secundare.

Observație. După cum știi, acest principiu a fost utilizat și la construirea frontului de undă pentru undele de suprafață studiate în capitolul 1.C.

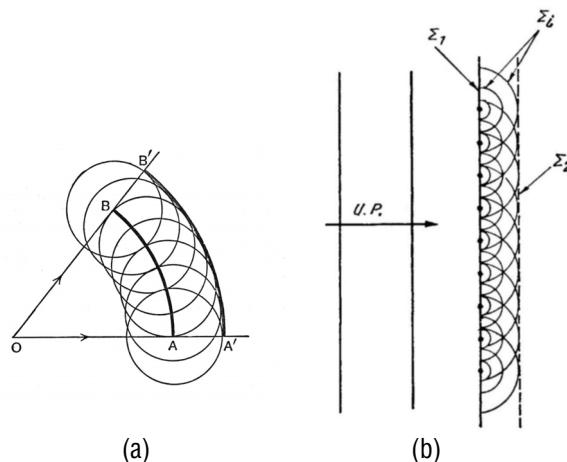


Fig. 3.48. Propagarea rectilinie în construcția lui Huygens, pentru o undă sferică (a), și pentru o undă plană (b). În figura U.P. – undă plană; Σ_1 – frontul undei la un moment dat; Σ_2 – noul front de undă ; Σ_i – unde sferice secundare.

În figura 3.49 se vede modul de construire a frontului de undă pentru o undă plană.

Dacă mediul este izotrop și omogen, forma suprafetei de undă se păstrează, se reproduce. La trecerea dintr-un mediu în altul, viteza de propagare a undei se schimbă, și deci frontul de undă se va deformă. Obținem, în acest fel, posibilitatea de a explica pe baza unui model ondulator fenomenele de reflexie și refracție pentru undele electromagnetice, aşa cum le cunoaștem de la undele elastice.

Tot aici, avem un argument esențial privind propagarea luminii în linie dreaptă: raza de lumină este un concept definit ca direcție de propagare a frontului de undă și a suprafetelor de undă. Pentru undele plane, suprafetele de undă sunt plane paralele, și deci raza de lumină va descrie o linie dreaptă, perpendiculară pe toate suprafetele de undă.

Putem forma frontul de undă și deci abate propagarea luminii de la o linie dreaptă deformând frontul undelor secundare, de exemplu, cu ajutorul unui paravan (fig. 3.49).

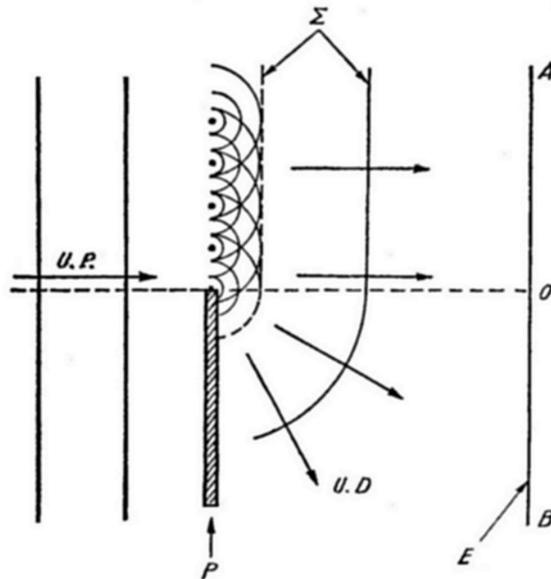


Fig. 3.49. Deformarea frontului undei plane în preajma unui obstacol P ; $U.P.$ - undă plană incidentă; $U.D.$ - undă difractată; Σ - nouă suprafață de undă; E - ecran; OA zona de lumină; OB - zona de umbră geometrică, după modelul razei.

Introducerea paravansului împiedică formarea undelor sferice secundare și astfel se deformează frontul de undă, după cum se vede în figură. Un ecran pus în spatele acestui paravan va fi luminat în portiunea OA , dar va fi luminat și în regiunea OB , regiune de umbră „geometrică”. Iluminarea în regiunea de umbră este slabă și devine nesemnificativă la o distanță ceva mai mare de punctul de separație O . Dar importantă este existența ei în zona interzisă de teoria geometrică a umbrei. Această comportare este cea care împiedică observarea experimentală a propagării în linie dreaptă cu ajutorul paravanelor cu orificii. Vom vedea mai târziu cum depinde iluminarea zonei de umbră de paravan sau de orificiul pe care-l facem în paravan.

Fenomenul de pătrundere a luminii în zona de umbră geometrică sau abaterea de la propagarea rectilinie a luminii se numește difracție.

Se spune, uneori, că este o ocolire aparentă, deoarece apare ca o abatere de la o comportare pe care o presupunem a fi cea corectă. În realitate, situația este inversă, în sensul că propagarea în linie dreaptă este o aproximare. Lumina (și, în general, orice undă electromagnetică) nu urmărește întotdeauna o linie dreaptă, ci este capabilă să se deformeze și să se întoarcă în direcția unei surse de undă sau de un obstacol.

netică) are un caracter ondulatoriu, și deci fenomenul de difracție apare ca fenomen normal, propagarea în linie dreaptă fiind un caz particular de propagare.

Putem trage de aici o concluzie deosebit de importantă și anume că înțelegerea corectă a fenomenelor presupune, de multe ori, depășirea impresiilor și observațiilor directe, care pot fi încadrate în termenul de „experiență omenească” sau „bun simț experimental”.

Realitatea este ceva mai complexă decât pare la prima vedere. Putem spune astfel că acest concept de *rază de lumină* este utilizabil în mod aproximativ, că este un model simplu pentru descrierea fenomenelor de propagare a luminii, la fel cum conceptul de punct material este utilizabil în mecanică ca un model de primă approximație. Așa cum în realitate nu există punct material, nu există nici rază de lumină.

Un experiment convingător, în acest sens, este cel pentru *observarea umbrei produse de un disc* (fig. 3.50). Dacă un disc este iluminat cu lumină provenită de la o sursă foarte îndepărtată (pentru a avea unde plane) în mijlocul umbrei apare o zonă luminoasă! Ocolirea este astfel evidentă.

C.2. Rețele de difracție

Spectrometru cu rețea

Pentru a obține un maxim de interferență este necesară îndeplinirea condiției (3.6):

$$\Delta = m\lambda$$

Această relație ne arată că, pentru diverse lungimi de undă, condiția de maxim de interferență se realizează pentru diferențe de drum diferite. Observația aceasta ne sugerează posibilitatea utilizării relației (3.6) pentru construirea unor dispozitive care să separe în fascicule monocromatice o radiație compusă. Un astfel de dispozitiv este, de exemplu, *rețeaua de difracție*. Prințipiu de funcționare al unei rețele de difracție, *prin transmisie*, este arătat în figura 3.51. Constructiv, rețeaua de difracție constă dintr-o placă de sticlă sau alt material transparent pe care sunt trasate fâșii opace, echidistante. Se realizează, astfel, o serie de fante paralele aflate la distanță d una de alta.

Să presupunem că perpendicular pe rețea cade un fascicul paralel de lumină (undă plană). Unda plană, care rezultă din însumarea undelor care provin de la toate fantele, va avea direcția é fiată de unda incidentă (difracție). Pentru a obține o figură de interferență ele trebuie să se suprapună. Acest lucru se realizează cu ajutorul unei lentile așezate

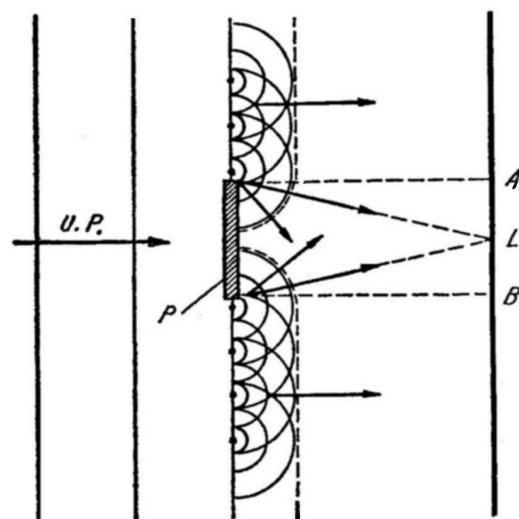


Fig. 3.50. Difracția undelor în spatele unui paravan P . Pe ecran apare o zonă luminoasă L în regiunea de umbră geometrică AB .

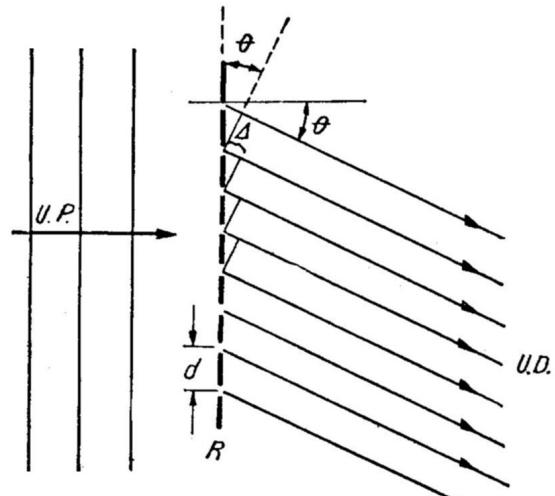


Fig. 3.51. Mersul razelor într-o rețea de difracție, R , prin transmisie. $U.P.$ – undă incidentă (plană); $U.D.$ – undă difracționată.

paralel cu rețeaua, lentilă care va strânge într-un punct dat din planul focal toate undele care au fost difracționate sub același unghi θ . Maximul de interferență se va obține pentru:

$$\sin \theta = \frac{\Delta}{d} = \frac{m\lambda}{d} \quad (3.18)$$

De aici rezultă că pentru o rețea dată și un ordin dat de interferență, unghiul θ va depinde de λ . Spunem că rețeaua de difracție poate să realizeze *dispersia luminii*. Același efect poate fi obținut cu ajutorul unei prisme, în care caz dispersia este determinată de dependența indicelui de refracție n_2 de λ . Dependența unghiului de deviație pentru o rețea (sau prismă) de lungimea de undă a radiatiei se exprimă prin mărimea denumită *dispersie unghiulară* (δ) a rețelei (sau prismei) definită prin relația:

$$\delta = \frac{d\theta}{d\lambda} \quad (3.19)$$

Pentru a determina dispersia unei rețele, vom deriva relația (3.19):

$$\lambda = \frac{d}{m} \sin \theta; \quad \frac{d\lambda}{d\theta} = \frac{d}{m} \cos \theta$$

și deci:

$$\delta = \frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{m}{d \cdot \cos \theta} \quad (3.20)$$

Se vede că dispersia δ a unei rețele este cu atât mai mare cu cât d este mai mic, m mai mare sau θ mai mare. Mărimea d este astfel o caracteristică importantă a unei

rețele și se numește *constanta rețelei*. Rețelele actuale pot avea în mod ușor $\sim 4\ 000$ fante pe centimetru.

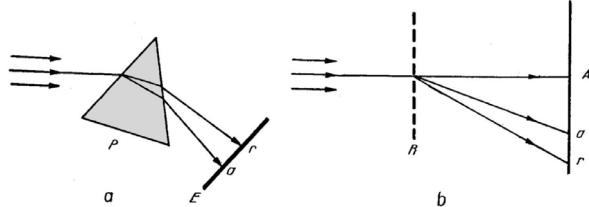


Fig. 3.52. Comparație între spectrele obținute cu ajutorul unei prisme (a) și cu ajutorul unei rețele de difracție (b). P – prismă; R – rețea de difracție; E – ecran; A – radiatie nedecomponsa; r – roșu; a – albastru.

Dispersia δ a unei rețele este mult mai mare decât aceea a unei prisme, ceea ce face ca spectrografele cu rețea să permită o mai bună separare unghiulară a radiatiilor de lungimi de undă apropiate.

O altă deosebire dintre spectrele obținute folosind rețeaua de difracție și cele obținute folosind prisma reiese din figura 3.52: cele două dispozitive ordonează radiatiile după lungimile de undă, în sensuri contrare.

Din punct de vedere constructiv, un spectrometru cu rețea nu se deosebește esențial de un spectrometru cu prismă: ambele conțin câte un colimator prevăzut cu o fântă de intrare și cu câte o lunetă cu care se va putea observa spectrul și determina lungimea de undă.

C.3.* Aplicații ale difracției luminii

Experiment pe calculator

Simularea fenomenului de difracție pentru condiții date.

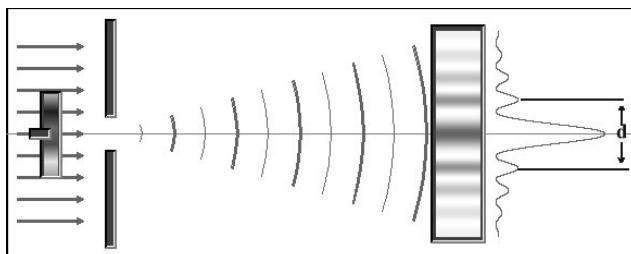


Fig. 3.53. Imagine a figurii de difracție utilizând simularea pe calculator.

Relația dintre fenomenele de difracție și cele de interferență

Ne putem întoarce acum să discutăm structura câmpului luminos din spatele fantei sau orificiului din experimentul de difracție (fig. 3.54).

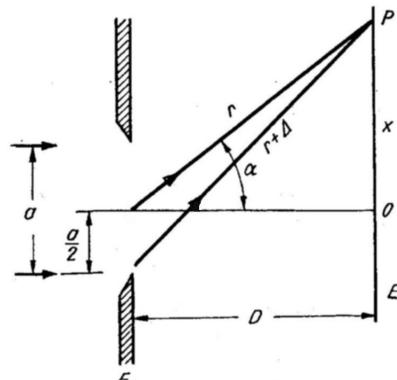


Fig. 3.54. Difracția în spatele unei fante F . Câmpul de interferență este studiat pe ecranul E .

Dacă orificiul este foarte mic, atunci radiatiile care provin de la diversele porțiuni ale orificiului vor fi difracționate, iar apoi vor interfeiera. Interferența radiatiilor difracționate face ca în spatele orificiului să nu apară un câmp cu o luminozitate

treptat mai slabă pe măsura îndepărterii de axa optică, ci un câmp cu o luminozitate oscilantă (cu maxime și minime).

Putem determina această structură dacă luăm în considerare geometria figurii 3.54. Pentru a face calculul concret trebuie să precizăm și fazele undelor care provin din diversele zone ale fantei.

În acest scop, se face o ipoteză care completează principiul lui Huygens, și anume că *toate undele secundare (sferice) care se emit de pe frontul (sau suprafața) de undă sunt în fază*, deci sunt *coerente*. Această completare a fost făcută de Fresnel, din care cauză principiul se mai numește Huygens - Fresnel. Pentru radiațiile care ajung într-un punct oarecare P, diferența de drum maximă este cea pentru razele care pornesc de la extremitățile diametrului orificiului. Folosind condițiile de producere a maximelor și minimelor (3.6 și 3.7), putem calcula structura figurii de interferență produsă de o fantă suficient de largă.

Fenomenul de difracție care apare la interpunerea unui paravan în calea undelor este arătat în figura 3.55. Paravanul se află la distanța a de sursa S și la distanța b de un ecran de observare. Structura câmpului luminos de pe ecran este dată în figura 3.55, b. Se vede că în zona de umbră geometrică ($x < 0$) iluminarea scade treptat dar este diferită de zero. În zona de lumină geometrică ($x > 0$), iluminarea nu crește brusc la valoarea prevăzută de optica geometrică ($\sim \Phi_0$) ci crește treptat, până atinge un maxim ($\Phi > \Phi_0$) iar apoi are o comportare oscilantă, amplitudinea scade treptat către o valoare constantă pe măsură ce x crește. În figură sunt date pozițiile de maxim în funcție de parametrul adimensional ξ

$$\begin{aligned} \xi = x \cdot \sqrt{\frac{2a}{b(a+b)\lambda}} = \\ = 1,22; 2,34; 2,08; 3,67; 4,18; 4,66; \dots \quad (3.21) \end{aligned}$$

Aceste poziții au fost calculate conform unei teorii riguroase a fenomenelor de difracție și interferență a undelor electromagnetice (teoria lui Maxwell). Să vedem de ce cunoștințele pe care le avem până acum nu ne permit să obținem, în acest caz, structura figurii de difracție.

Sursele secundare în fază (coerente) pe care trebuie să le luăm în considerare sunt acelea care se află pe sfera (C) cu centrul în S și raza SM (fig. 3.55, a). Astfel, punctele M, N, O, sunt tot atâtea centre de emisie a unor unde coerente. Maximele succeseive se obțin în P, P', ... iar minimele în Q, Q', ... Spre deosebire de cazurile anterioare, aici putem observa câteva aspecte deosebite:

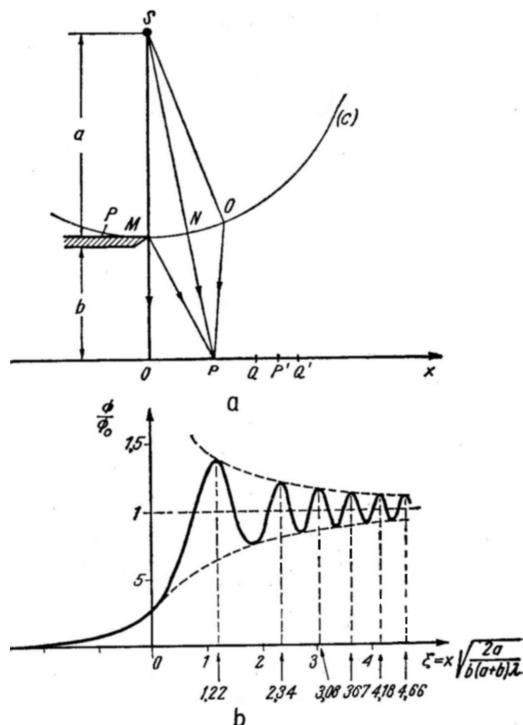


Fig. 3.55 a și b. Difracția în spatele unui paravan P.

– În primul rând, în punctul $x = 0$, nu avem un maxim aşa cum ar fi fost de așteptat;

– În al doilea rând, minimele nu corespund unei iluminări nule;

– În al treilea rând, interfranja scade pe măsură ce crește ordinul de interferență.

Toate aceste aspecte caracteristice sunt determinate de suprapunerea, într-un punct al ecranului, a undelor care provin de la diferitele puncte de pe sferă C. Cum ele interferă succesiv, constructiv și distructiv, maximul principal va fi deplasat de la $x = 0$ deoarece în acel punct o parte din undele care ar fi interferat constructiv sunt obturate de paravanul din M. Minimele nu sunt nule deoarece în punctele respective ajung și unde care se compun constructiv, dar cu amplitudine mai mică. Deoarece de fiecare dată trebuie să ținem cont de toate undele provenite de pe sferă G, descrierea cantitativă a iluminării existente în spatele paravanului este mai dificil de obținut. Folosind însă rezultatele obținute prin calcul și exprimate prin parametrul dat în figura 3.55,b, putem aprecia cantitativ figura de interferență.

Ajungem astfel la concluzia că fenomenul de difracție, care determină suprapunerea undelor provenite de la diverse puncte, va fi însotit aproape întotdeauna de o figură de interferență.

Să revenim la problema determinării liniei drepte cu ajutorul unui fascicul de lumină delimitat de paravane cu fante. După ieșirea dintr-o fantă, fascicul va fi divergent din cauza difracției. Știm că radiațiile provenite de la marginile opuse ale unei fante interferă. Dacă diametrul fantei este d , iar unghiul până la maximul de ordinul întâi este α , atunci putem scrie, conform relațiilor (3.12) și (3.16):

$$\sin \alpha = \frac{\Delta}{d} = \frac{\lambda}{d} \quad (3.21)$$

Deci, un fascicul perfect paralel până la o fantă, va deveni divergent, unghiul de divergență fiind $\alpha \approx \frac{\lambda}{d}$. Doar dacă $\lambda \rightarrow 0$ nu va exista o lărgire apreciabilă a fasciculului. În acest caz, putem vorbi de „raza de lumină” ca fiind o linie geometrică. Astfel, putem descrie fenomenele de propagare cu ajutorul opticii geometrice doar în cazurile în care $d \gg \lambda$.

Interferență și difracția în natură

În natură, fenomenele de difracție și de interferență pot fi observate în multe cazuri. Vom trece în revistă astfel de cazuri fără a le explica în amănunt, deoarece unele dintre ele vor fi discutate mai târziu pe cazuri particulare, ceva mai simple.

Astfel, în serile reci de iarnă, dacă privim prin geamurile acoperite de figuri de gheăță ale tramvaielor sau autobuzelor

către felinarele de pe stradă, putem vedea jocuri de culori. Nuantele de albastru, roșu sau verde observate prin transmisie sunt deosebit de frumoase și de pure. Culorile pot fi observate numai atunci când stratul de gheăță depus prin înghețarea vaporilor de apă (din respirație) pe geamul rece îndeplinește anumite condiții. În cazul în care stratul de gheăță depus nu este continuu, ci este încă format din mici zone, locurile libere, transparente, acționează ca mici fante prin care lumina albă se difractă și interferă dând acele jocuri de culori.

Un alt caz de difracție este acela al aureolei care încurjă silueta unui om (sau obiect) când acesta se interpune în calea unei surse punctiforme, puternice, de lumină. O astfel de sursă o reprezintă farurile unei mașini aflată în depărtare, noaptea. Efectul este mai bine evidențiat dacă obstacolul este, la rândul lui, destul de departe de noi.

Putem spune, în încheiere, că fenomenele de difracție și de interferență scot în evidență caracterul ondulator al luminii și că optica geometrică, în care raza de lumină reprezintă conceptul fundamental, este doar o primă aproximatie. Aproximația razei de lumină este valabilă pentru cazul în care deschiderile prin care trece lumina sunt mult mai mari decât λ , astfel încât fenomenele de difracție și de interferență să fie neglijabile.

Alte provocări

Problemă rezolvată

Într-un experiment de ocultare* a unei stele de către Lună, s-a observat o variație a luminozității stelei, de forma dată în figura 3.56. Să se determine:

- dacă înregistrarea a fost făcută în momentele acoperirii stelei de către Lună sau în cel al ieșirii ei din eclipsă;
- momentul pe care îl putem considera ca început (sau) sfârșit al ocultării, în aproximarea opticii geometrică;
- lungimea de undă a radiației utilizate.

Rezolvare

Pentru a descrie fenomenul ne vom referi la figurile 3.13, a și b. Vom considera că observatorul de pe Pământ se află în punctul O , iar paravanul M simbolizează Luna. Într-un experiment obișnuit de difracție pe un paravan, deplasând pe axa Ox un detector, se vor pune în evidență

Ocultație: eclipsare temporară, pentru un observator de pe Pământ, a unui astru de către un altul, datorită mișcării lor relative.

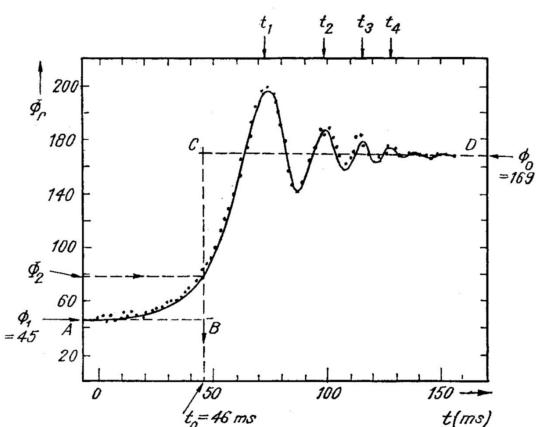


Fig. 3.56. Variația luminozității unei stele în timpul ocultării.

maxime și minime succesive: P, Q, P', Q' . În experimentul de față, paravanul (Luna) se mișcă cu viteza relativă v , perpendicular pe direcția stea-observator.

În acest caz, pozițiile de maxim și minim vor defila prin față observatorului. Pentru a ține cont de această mișcare relativă vom trece de la variabila x la variabila t legată de mișcarea paravanului. Din asemănarea triunghiurilor SMN și SOP obținem:

$$\frac{MN}{a} = \frac{\overline{OP}}{a+b} \text{ sau } \frac{vt}{a} = \frac{x}{a+b}$$

Înlocuind în parametrul ζ valoarea lui x de mai sus:

$$\zeta = v \frac{a+b}{a} t \sqrt{\frac{2a}{b(a+b)\lambda}} = vt \sqrt{\frac{2(a+b)}{ab\lambda}} \approx v \sqrt{\frac{2}{b\lambda}} \cdot t.$$

Ultima egalitate aproximativă s-a obținut observând că $a \gg b$. Cunoscând constantele v , a și λ putem găsi momentul de maxim, pornind de la valorile lui ζ date în (3.21) și de la relația dedusă anterior. Pentru rezolvarea problemei avem nevoie de valorile lui v și a (distanța Pământ - Lună): $v = 450$ m/s și $a = 384400$ km. Calculele ne conduc la:

$$\xi = 3,24 \cdot 10^{-2} \frac{t}{\sqrt{\lambda}} (s \cdot m^{-1/2})$$

Să răspundem acum la întrebările problemei.

a) Din succesiunea umbră-îlumină (fig. 3.56) tragem concluzia, că se observă sfârșitul ocultației (ieșirea din eclipsă).

b) Din figura 3.55, b observăm că raportul dintre fluxul în poziția $x = 0$ (începutul, umbrei geometrice) și $x \rightarrow \infty$ (îlumină) este 0,25. Deci, putem determina valoarea t_o corespunzătoare acestui moment dacă determinăm fluxurile în zona de umbră geometrică (Φ_1) și în cea de îlumină (Φ_0), și luăm momentul corespunzător creșterii lui Φ_1 egal cu $\frac{1}{4}(\Phi_0 - \Phi_1)$. Din grafic:

$$\Phi_1 = 45, \Phi_0 = 169; \frac{1}{4}(\Phi_0 - \Phi_1) = 31. \text{ Deci}$$

$$\Phi_2 = \Phi_1 + \frac{1}{4}(\Phi_0 - \Phi_1) = 45 + 31 = 76.$$

Această valoare a intensității relative se atinge la momentul $t_o = 46$ s. S-au desenat pe grafic segmentele AB , BC , CD care ar corespunde modului în care ar decurge variația de flux luminos la ieșirea din eclipsă, dacă fenomenul ar avea loc conform opticii geometrice.

ξ	t (ms)	$t-t_o$ (ms)	$\frac{t-t_o}{\xi}$ (ms)
1,22	72	26	21,3
2,34	99	53	22,6
3,08	115	69	22,4
3,67	128	82	22,3
4,18	-	-	-
4,66	-	-	-

$$\text{media} = 22,2 \cdot 10^{-3}\text{s}.$$

c) Determinăm din figură momentele de maxim t_1 , t_2 , t_3 , t_4 și alcătuim un tabel de date. Pentru determinarea lui λ utilizăm parametrul ζ :

$$\lambda = \left(3,24 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{t-t_o}{\xi} \right)^{\zeta}$$

Pentru valoarea medie a raportului $\frac{t-t_o}{\xi}$ obținem:
 $\lambda = 516,2$ nm.

Această radiație, fiind radiația cea mai intensă din întregul spectru al stelei, face ca steaua să aibă o culoare albăstruie. Din această informație putem să determinăm, în continuare, și temperatura superficială a stelei.

D. Polarizarea luminii

Unda luminoasă ca și orice undă electromagnetică (radio, X etc.) are proprietatea de a fi polarizată transversal. Am văzut ce înseamnă această polarizare atunci când am discutat despre unde elastice (mecanice). Am văzut de asemenea că undă electromagnetică este transversală în sensul că vectorii câmp electric și câmp magnetic, care compun undă, vibrează pe direcții reciproc perpendiculare dar perpendicular (ambele) și pe direcția de deplasare.

Senzatia de lumină provine de la componenta electrică a unei luminoase, adică de la câmpul electric.

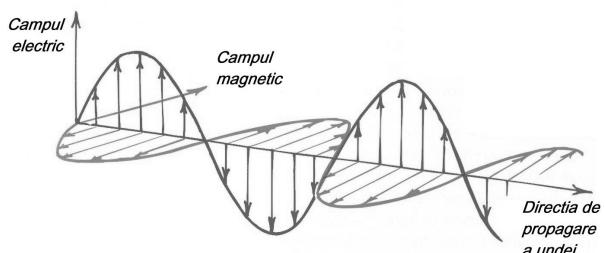


Fig. 3.57. Unda luminoasă ca undă electromagnetică.

D.1.* Polarizarea luminii

Dacă privim unda luminoasă din față, putem să ne imaginăm diferite situații pe care le putem vedea în figura 3.58 a și b.

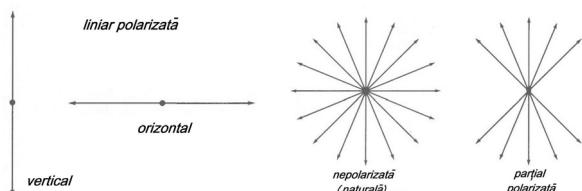


Figura 3.58, a și b. Diferite posibilități de polarizare a unei luminoase.

In figura 3.58, a vedem componenta câmpului electric (singura pentru care retina este sensibilă) exact ca în imaginea din figura 3.58 cu direcția de oscilație a câmpului electric pe verticală. Împreună cu direcția de propagare, această direcție de vibrație formează un plan numit *plan de polarizare*. Spune vă această undă este *liniar polarizată vertical*. Dacă rotim unda în jurul direcției de propagare astfel încât acest plan să fie orizontal, atunci obținem o undă *liniar polarizată orizontal*. In figura 3.58 b, am complicat lucrurile. Am considerat că pe direcția de propagare se mai multe unde polarizate liniar care fie că sunt uniform repartizate în jurul direcției de propagare, *undă nepolarizată*, fie că pe o direcție (de exemplu, pe verticală) sunt „mai multe unde” decât pe orizontală. Spunem că unda este *partial polarizată*.

De obicei, sursele de lumină (Soarele, becul electric, lumânarea) pe care le avem, produc o lumină nepolarizată, de unde și denumirea de „naturală”. Dar există niște fenomene fizice care pot să modifice polarizarea unei naturale și să le aducă la o formă de polarizare diferită (liniară sau parțial polarizată). Astfel de fenomene pot fi *reflexia* (figura 3.59), *refractia* (pe cristale speciale, fenomen denumit *dicroism*, figura 3.60), *împrăștierea* luminii pe diferite substanțe (solide, lichide sau gazoase, figura 3.61). Fiecare fenomen din fizică, care produce polarizarea luminii naturale, are o explicație legată de modul în care atomii substanței interacționează cu lumina.

Pe fiecare din aceste schițe se văd lumina incidentă nepolarizată și lumina polarizată care rezulta. Prin săgeată dublă se simbolizează polarizarea liniară și planul ei, iar prin săgeți în cruce se simbolizează lumina nepolarizată. Unele din fenomenele care duc la această polarizare sunt complicate, de aceea nu le discutăm aici. Vom discuta calitativ doar polarizarea prin reflexie.

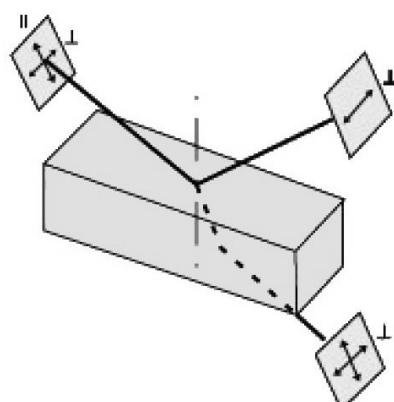


Figura 3.59. Polarizare prin reflexie.

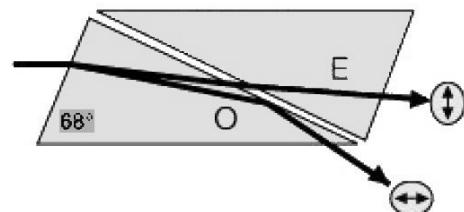


Figura 3.60. Polarizare prin fenomenul de dicroism.

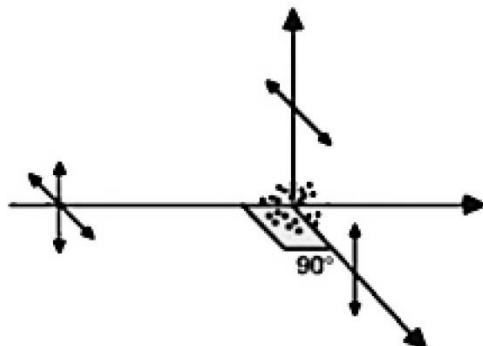


Figura 3.61. Polarizare prin împrăștierea luminii pe pulberi sau neregularități din material.

D.2.* Polarizarea prin reflexie

Coefficientul de reflexie al luminii pe un material este diferit dacă unda este polarizată paralel cu planul de reflexie (notată de obicei cu II) sau dacă este polarizată perpendicular pe planul de reflexie (notată cu \perp). Din această cauză și coeficientul de reflexie se modifică și se poate calcula că la un anumit unghi, denumit *unghi Brewster*, undă polarizată perpendicular pe planul de reflexie este singura care este reflectată. Componenta undei care este polarizată în planul de reflexie se va atenua complet și va lipsi din undă reflectată. Ca urmare unde reflectată va fi liniar polarizată (figura 3.62). Pe un grafic (figura 3.62) această comportare se vede clar. Undă cu polarizare \perp va fi singura regăsită un undă reflectată la unghiul Brewster.

Acest fenomen se întâmplă pentru reflexia pe un dielectric. Cazurile acestea sunt de exemplu reflexia pe luciu apelor (lacuri sau pe șoseaua umedă), Reflexia pe o oglindă metalică nu produce acest efect.

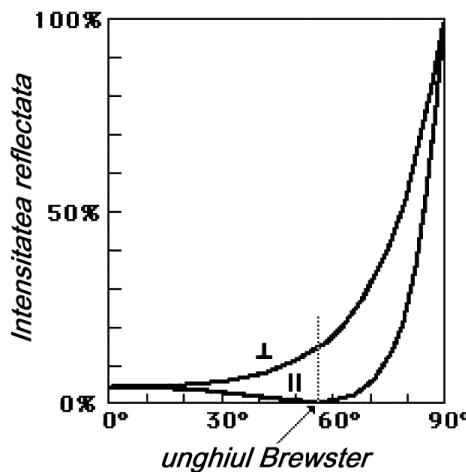


Fig. 3.62. Dependența de unghiul de incidentă la reflexia pe un dielectric, a intensității reflectate a celor două unde polarizate liniar (II și \perp).

D.3.* Aplicații ale polarizării luminii

Există multe substanțe care sunt utilizate pentru a produce polarizarea liniară a luminii naturale. Dintre cele utilizate în practica curentă sunt o serie de materiale plastice, transparente, care se numesc *polaroizi*. Polaroizii se găsesc sub formă de folii destul de groase din care se pot tăia bucăți utilizabile în diferite scopuri. Din polaroid se pot face ochelari care să înălțe efectele de polarizare ale reflexiei luminii în apă râurilor și sunt uneori folosiți de pescari pentru a putea vedea peștele în apă (fig. 3.63 și 3.64).

O altă utilizare a acestor ochelari (fig. 3.63) este diminuarea luminii farurilor mașinilor, reflectate de șoseaua udă în timpul noptii (fig. 3.65).



Figura 3.63. Ochelari cu polaroizi pentru a diminua reflexia produsă de suprafetele umede sau apă. Pe figura s-a desenat planul de polarizare a luminii care poate să treacă cu ușurință. Lumina polarizată perpendicular va fi mult atenuată.

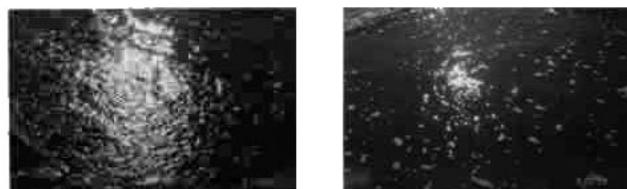


Fig. 3.64. Luciu de apă (stânga) este atenuat dacă privim prin ochelari cu polaroid.



Fig. 3.65. Farurile mașinilor pot fi făcute astfel încât să emite lumină polarizată. Un privitor fără ochelari polarizanți va fi orbitor (stânga) dar cel care are ochelari polarizanți va vedea bine (dreapta).

Pentru aplicații științifice, polarizarea este foarte utilă. Putem face o serie de experimente cu folii de polaroid care ne vor lămuri asupra utilizării fenomenului de polarizare. În figurile care urmează sunt date câteva experimente pe care le puteți face cu folia de polaroid.

Din doi polaroizi putem realiza un instrument care să studieze schimbarea stării de polarizare a luminii de către unele substanțe (transparente). În figura 3.66. se vede dispozitivul. Primul polaroid polarizează lumina (se numește *polarizor*) iar cel de al doilea analizează lumina transmisă de primul polarizor (se numește *analizor*). În poziția din figură, primul polarizează liniar lumina naturală cu planul de polarizare vertical. Al doilea, analizorul, se poate rota în jurul direcției razei de lumină și dacă direcția lui de polarizare este perpendiculară cu cea a luminii polarizate incidente, nu va mai transmite nimic.

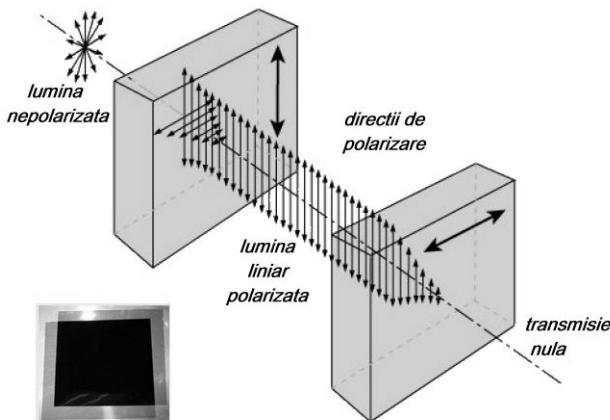


Figura 3.66. Dispunerea celor doi polaroizi în aşa fel încât primul să polarizeze lumina (se numește *polarizor*) iar cel de al doilea să analizeze lumina transmisă de primul polarizor (se numește *analizor*).



2. Să facem un experiment. Tăiem câteva bucăți de polaroid și le suprapunem. Iată ce constatăm.

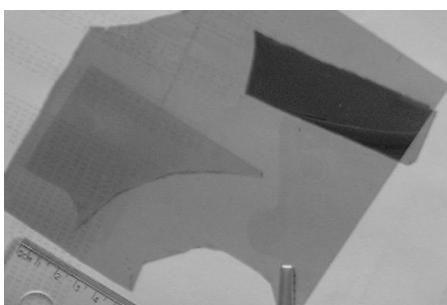


Figura 3.67. Placa mare de polaroid, polarizează lumina care vine din partea de jos. Cele două bucate de polaroid, tăiate din placa mare, sunt aranjate astfel încât unul este paralel și altul este perpendicular cu direcția de polarizare a bucatii mari de polaroid. Una indică extincție (negru, lipsă de lumină) iar a doua lumină, adică lasă să treacă lumina.



Fig. 3.68. Dacă cele două bucatele au aceeași direcție de polarizare dar perpendiculară pe placă mare, lumina nu mai trece prin nici una.

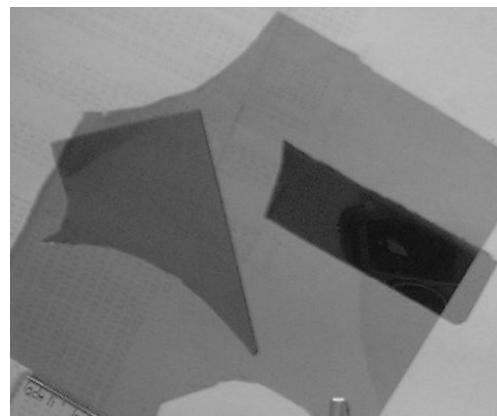


Fig. 3.69. Dacă însă rotim una din plăcuțe cu un unghi de aproximativ 45° , atunci o parte din lumină va trece, o parte nu astfel încât se obține o transparentă intermedia.



Fig. 3.70. Dacă acum între placă mare (polarizor) și una din plăcuțe (analizor) se pune un echer de plastic transparent, din cauza purcesului de fabricație plasticul va avea proprietăți diferite de polarizare a luminii în diferite zone. Acestea se pot vedea ca niște contururi luminoase sau întunecoase, în funcție de locul de pe echer. O astfel de analiză este foarte importantă pentru analiza proprietăților materialului transparent.

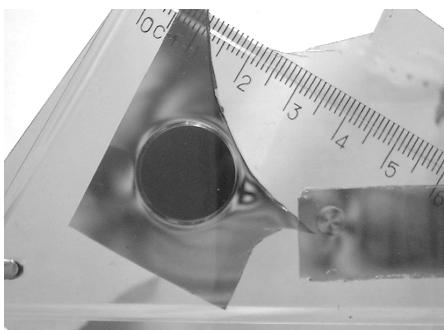


Fig. 3.71. O altă poziție pentru experimentul de mai sus în care s-a vizualizat și gaura echerului, arată clar că polarizorul și analizorul sunt cu direcții perpendiculare de polarizare, gaura fiind neagră. Echerul schimbă starea de polarizare a luminii ce vine de la polarizor și apar acele benzi luminoase și întunecoase. Uneori această modificare de stare de polarizare este produsă de tensiunile mecanice din materialul studiat, astfel încât prin intermediul luminii polarizate putem să depistăm zone mai tensio-nate sau mai puțin tensionate, respectiv să putem vedea defectele interne ale materialului. Această metodă poartă numele de *fotoelasticitate*.

Puteti să refaceti experimentul punând între polaroizi în loc de echer o foită de celofan. Așezați inițial cei doi polaroizi astfel încât să obțineți întuneric (extincție). Apoi introduceți folia de celofan. Imediat va apărea o imagine de contururi luminoase și întunecoase tipice pentru schimbarea stării de polarizare a luminii determinată de foia de celofan. Dacă înțindeti celofanul pe diferite direcții contururile de polarizare se vor schimba.



3. Un alt experiment interesant este prezentat în figura de mai jos.

Cele două plăcuțe de polaroid sunt așezate astfel încât să se privească cerul cu ele. În zona de suprapunere, cele

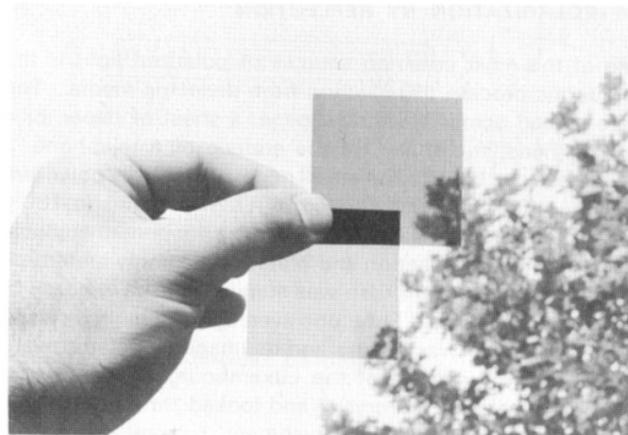


Fig. 3.72. Dacă însă rotim una din plăcuțe cu un unghi de aproximativ 45° , atunci o parte din lumină va trece, o parte nu astfel încât se obține o transparentă intermediară.

două sunt aranjate astfel încât putem vedea extincția (zona neagră). Dar cu puțin spirit de observație mai facem o descoperire. Plăcuța superioară este mai întunecată decât ce inferioară. Explicația este că „cerul” la rândul lui polarizează parțial lumina împrăștiată de la Soare. În adevară, atmosfera terestră este plină de praf și de neomogenități care face ca să apară o polarizare parțială a luminii împărtășiate. Fenomenul nu poate fi observat cu ochiul liber (fără un analizor al stării de polarizare care este o plăcuță de polaroid) căci ochiul omului nu sesizează polarizarea luminii, doar intensitatea ei și culoarea.

Dar multe viețuitoare au ochi cu care pot „vedea” starea de polarizare a luminii împărtășiate de atmosferă, și care depinde de poziția Soarelui pe cer, ceea ce le permite să se orienteze chiar și atunci când soarele este ascuns de nori. În acest mod ele se pot orienta, pot naviga pe distanțe lungi, polarizarea furnizând informații la fel ca busola pentru navigatori.

Alte aplicații

Nenumărate sunt cazurile în care lumina polarizată ne dă informații științifice. În continuare sunt prezentate câteva cazuri, o întreagă galerie de aplicații.

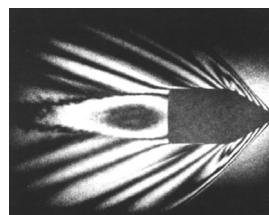


Fig. 3.73. Imagine prin polarizare a undelor de soc provocate de un glonț ce trece prin aer. Schimbarea provocată de undele de presiune din aer apar evidente între două plăci de polaroizi.



Fig. 3.74. Imagine a suprafeței șlefuite a unui mineral observat cu ajutorul unui microscop polarizant. Structurile de lumină și întuneric sunt date de diferitele stări de polarizare a luminii reflectate de componentii mineralogici.

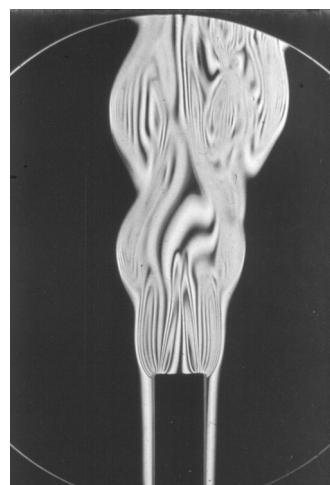


Fig. 3.75. Imagine a curgerii gazului cald la un bec Bunsen. Din nou variațiile proprietăților determinate de temperaturile diferite din gaz sunt evidențiate prin analiza de polarizare.

*Sinteză capitolului
Teste*