

Optica ondulatorie

3

Orice teorie care dorește să explice fenomenele luminoase trebuie să explice fenomenele de propagare a luminii. Una dintre teoriile acceptate la un moment dat asupra *naturii luminii* era cea *corpusculară* a lui I. Newton (1642 – 1727). „Corpusculii” lui Newton, mișcându-se conform legilor mecanicii clasice, puteau explica ușor *propagarea în linie dreaptă a luminii* (ca urmare a inerției lor) și *reflexia luminii* (ca urmare a conservării impulsului). Refracția nu putea fi însă explicată ușor. Dar odată cu descoperirea *fenomenelor de difracție și interferență* și

cu teoriile elaborate de C. Huygens (1629 – 1695) și A. Fresnel (1788 – 1827), *caracterul ondulator al luminii a devenit teoria dominantă*. Mai mult, *fenomenele de interferență și de difracție* au permis să se determine în mod direct *lungimea de undă a radiației*, mărimea ondulatorie cea mai importantă care caracterizează undele electromagnetice. În acest fel, s-a ajuns la corespondența dintre culoare și lungimea de undă, s-a determinat natura ondulatorie a radiațiilor X și gama, iar mai târziu, a fost pus în evidență caracterul ondulator al mișcării particulelor.

A. Dispersia luminii

A.1. Dispersia luminii. Culoarea

Cu toții am văzut nenumărate irizații colorate la marginea unor oglinzi sau a unor obiecte din sticlă șlefuită (pahare, vase sau statuete de sticlă). Newton a fost cel care a deslușit pentru prima dată originea acestor culori. Newton nu numai că a fost un extraordinar teoretician, așa cum îl cunoaștem din formularea mecanicii, dar a fost și un foarte bun observator al naturii și un extraordinar experimentator. El a fost cel care a studiat proprietățile luminii care traversează o prismă (fig. 3.1) și a arătat că lumina (albă) este, de fapt, un amestec de radiații pe care le numim *culori*.

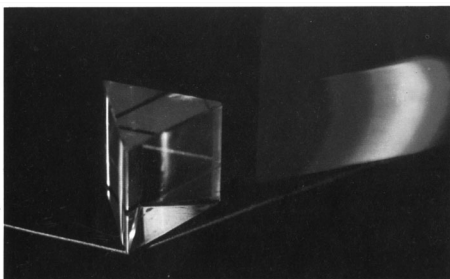


Fig. 3.1. Prisma și spectrul de culori care apare.

Tot Newton a arătat experimental că există în total șapte culori și că aceste culori sunt „elementare”, adică o culoare nu mai poate fi descompusă, la rândul ei, în alte culori

„mai elementare”. El a arătat, de asemenea, că suprapunerea tuturor culorilor descompuse de o prismă conduce din nou la culoarea albă. Fenomenul de desfacere a luminii albe în culorile componente se numește *dispersie a luminii*. Imaginea colorată obținută pe un ecran se numește *spectru*. Utilizând culorile elementare putem produce orice nuanță de culoare dorim, prin amestecul lor. Cum se face acest amestec și câte feluri există, este un alt capitol larg care poate fi experimentat, dacă vă place pictura sau dacă aveți un calculator cu care să vă jucați (fig. 3.2).

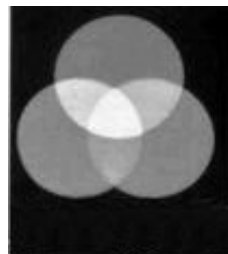


Fig. 3.2. Suprapunerea culorilor poate produce toate nuanțele de culoare.

A.2. Dispersia luminii în natură și aplicații ale dispersiei luminii

Nenumărate fenomene naturale se pot explica prin fenomenul de dispersie a luminii. Iată câteva exemple: scipirile colorate ale diamantului sau ale altor cristale prețioase sunt determinate de fenomenul de dispersie. Cunoașterea precisă a dependenței indicelui de refracție de lungimea de undă permite șlefuitorului să realizeze cea mai bună tăiere (șlefuire), astfel încât cristalul să-și etaleze întregul spectru luminos (fig. 3.3).

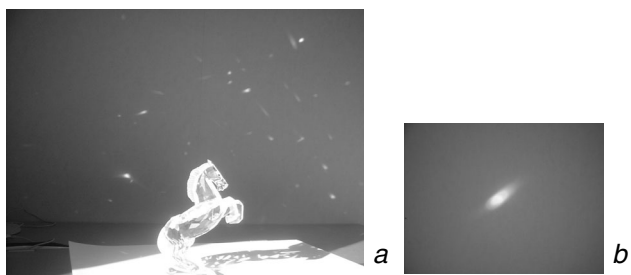


Fig. 3.3. Spectre colorate formate în jurul unui obiect de sticlă șlefuită (căluț de sticlă) (a). Pată colorată de pe perete (b).

Irizațiile colorate ale boabelor de rouă, dimineața, se datorează aceluiași fenomen, doar că în acest caz în loc de prismă avem un mers al razelor de lumină prin bobita sferică de apă. Același efect îl putem vedea în luminile colorate ale curcubeului. Modul în care se propagă lumina printr-o sferă și care determină dispersia luminii este arătat în figura 3.4.

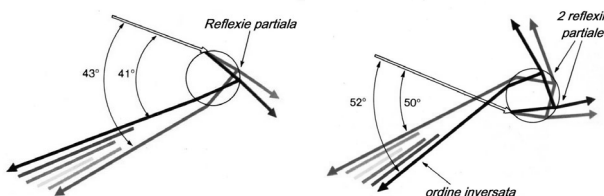


Fig. 3.4. Cele două posibilități de a se obține dispersia luminii la trecerea razelor de lumină printr-o picătură de apă.

Un alt fenomen care poate fi explicat prin fenomenul de dispersie a luminii este cel pe care-l observăm uneori privind cerul plin de stele (mai ales la munte). Dacă suntem atenți, vom vedea că stelele au o licărire care scoate în evidență unele irizații colorate. Acestea sunt determinate de modul în care razele de lumină străbat atmosfera

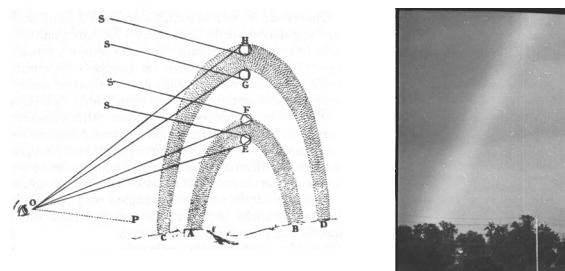


Fig. 3.5. Schiță din cartea lui Newton în care explică formarea culorilor curcubeului (a) și fotografia unui curcubeu real (b).

Pământului și care, din cauză că aerul are mici variații ale indicelui de refracție cu densitatea (deci cu altitudinea), la observator ajung în mod aleatoriu raze de o culoare sau alta, dând acea licărire.

Bazat pe acest fenomen de descompunere a luminii albe în culori, doi oameni de știință (Kirchhoff și Bunsen) au pus bazele *spectroscopiei*. Spectroscopia este o metodă de analiză a compoziției chimice a unor substanțe atunci când ele emit lumină. Metoda se bazează pe observația că lumina produsă de unele substanțe încălzite are o colorație specifică. Pentru a emite lumină, substanțele fie se încălzesc foarte tare, fie se introduc în tuburi cu descărcare în gaze (cum sunt tuburile care emit lumină de culori diferite, uneori denumite „tuburi cu neon”). Dacă lumina emisă de substanțele emițătoare se privește printr-o prismă se vede că ea este descompusă în culori diferite (figura 3.6). Culorile sunt caracteristice pentru fiecare substanță și astfel, substanțele pot fi identificate

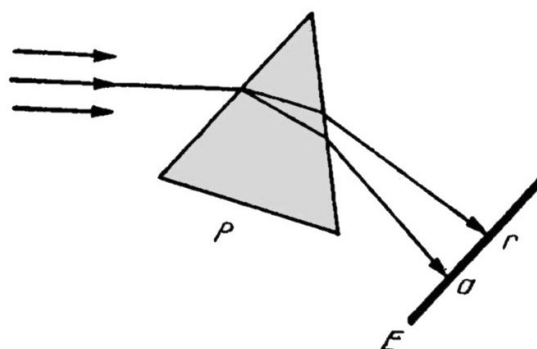


Fig. 3.6. Dispersia prin prismă și culorile de pe ecran, așa cum se utilizează într-un spectroscop. (r – roșu, a – albastru).

A.3. Interpretarea electromagnetică a dispersiei luminii

Trebuie aici să facem observația că noțiunea de *culoare* este, de fapt, legată nu numai de radiația incidentă ci și de proprietățile ochiului și de modul în care creierul interpretează semnalele provenite de la ochi și le transformă în senzații luminoase, pe care noi le conștientizăm. În consecință, numai o parte din fenomenele care implică senzația de culoare pot fi explicate în cadrul fizicii, iar o bună parte din fenomene își au originea în fiziologia vederii (de exemplu, defectele de vedere a culorilor, cum ar fi *daltonismul*, schimbă pentru unii oameni senzația de culoare).

Așa s-a ajuns la alcătuirea „spectrului” luminii, în care culorile sunt puse în corespondență cu lungimea de undă a luminii (fig. 3.7).

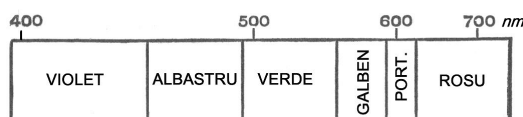


Fig. 3.7. Spectrul luminos și lungimile de undă corespunzătoare.

Dacă ne aducem aminte de mersul razelor de lumină într-o prismă, studiat la optica geometrică, vom putea înțelege ce se întâmplă în acest caz. În figura 3.8 este prezentat mersul unei raze de lumină printr-o prismă optică.

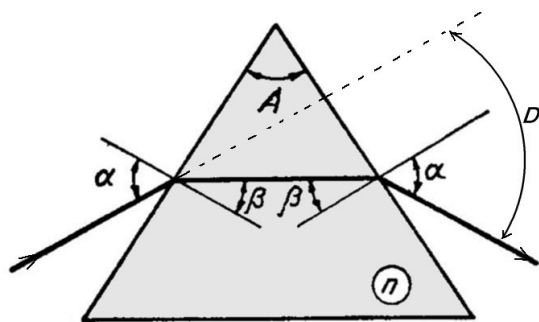


Fig. 3.8. Mersul unei raze de lumină printr-o prismă.

Deoarece mersul razelor de lumină presupune trecerea de două ori (la intrare și la ieșire) a razei de lumină prin suprafața de separare a prisme de aer, în relația de deviere apare și indicele de refracție relativ, n , al sticlei (*legea lui Snellius*). Dispersia se explică prin dependența indicelui de refracție de lungimea de undă (sau frecvența) a luminii. Experimentele arată că *indicele de refracție scade odată cu creșterea lungimii de undă*. În figura 3.9 se arată grafic această dependență pentru câteva tipuri de sticlă

Această scădere face ca deviația unei raze de lumină (albă) de către prismă să se sfârșească cu unghiuri de emergență diferite, care depind de lungimea de undă. În figura 3.6 se vede că deoarece lungimile de undă mai mari au un indice de refracție mai mic și deci sunt deviate mai puțin la trecerea prin prismă; pe ecranul E, se văd culorile de la roșu (r) spre albastru - violet (a), roșul fiind mai puțin deviat iar albastrul mai mult.

Faptul că lumina de diferite lungimi de undă posedă indici de refracție diferiți a fost explicat de către *teoria electromagnetică a luminii*, dezvoltată de Maxwell. Această teorie a dovedit nu numai că lumina prezintă aspecte de natură ondulatorie dar și că face parte dintr-o categorie extrem de vastă, aceea a *undelor electromagnetice*. Prin urmare, lumina se propagă la fel ca și undele radio, radiațiile termice (infraroșii), cele ultraviolete, radiațiile X sau gama.

Așa cum am văzut mai înainte, unda electromagnetică este compusă din două tipuri de oscilații, electrice și magnetice, care se propagă împreună (ca un tot unitar) prin spațiu. Deoarece substanțele sunt constituite din atomi și molecule, care la rândul lor au în componență electroni negativi și nuclee pozitive, vor fi influențate de câmpul electric și magnetic al unei electromagnetice care străbate substanța. Această influență se manifestă prin modificarea vitezei luminii (a undelor electromagnetice) care străbate acel mediu și, de aici, se va modifica și indicele de refracție $n = c/v$.

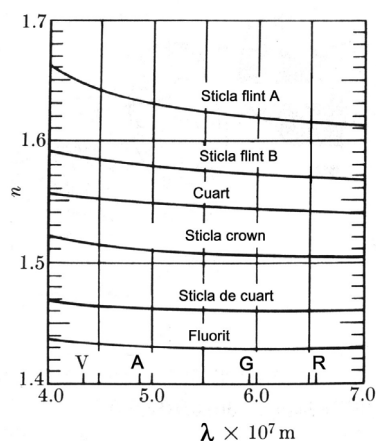


Fig. 3.9. Indicele de refracție scade odată cu creșterea lungimii de undă.

Deoarece $v < c$ pentru orice mediu, va rezulta un indice de refracție >1 , valoare care va depinde de lungimea de undă a radiației luminoase.

Dacă vom calcula mersul razelor de lumină prin prismă obținem o relație care leagă unghiul prisme A , de unghiul de deviație minim D (fig. 3.8) și de indicele de refracție al prisme față de aer:

$$\sin\left(\frac{A+D}{2}\right) = n \sin\left(\frac{A}{2}\right) \quad (3.1)$$

De aici se vede că dacă n depinde de lungimea de undă, atunci și unghiul D se va modifica în sensul că o creștere a lui n va fi acompaniată de o creștere a lui D , după relația de mai sus. Din graficul din figura 3.9 se vede că pentru sticlele prezentate, la creșterea lungimii de undă indicele de refracție scade. Putem observa uneori spectre de dispersie la imaginile obținute prin lentile, deoarece lentila se comporta ca o prismă (fig. 3.10), sau la trecerea luminii soarelui printr-un pahar cu apă (fig. 3.11).

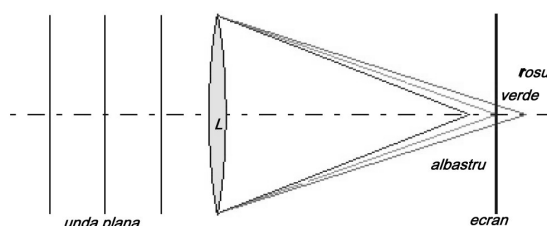


Fig. 3.10. Margini colorate ale imaginilor obținute cu lentile de ochelari.

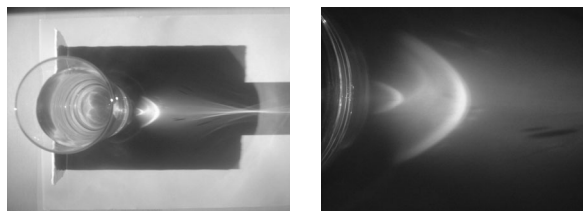


Fig. 3.11. Imagini colorate la trecerea luminii soarelui printr-un pahar cu apă (fotografie de ansamblu și zona mărită a imaginii color).

A. Alte provocări

1. Culorile în natură

Printre fenomenele luminoase pe care le putem vedea în natură, ne încântă întotdeauna culorile. Vă propunem să vă gândiți dacă următoarele fenomene pe care le putem vedea în mod curent pot fi atribuite sau nu fenomenului de dispersie a luminii (adică a descompunerii luminii albe în culorile primare, descompunere determinată de dependența indicelui de refracție de lungimea de undă)? Iată câteva cazuri:

- Răsăritul și apusul de soare este roșcat. De ce?
- Cerul văzut de pe Pământ este albastru iar cel văzut de pe Lună este negru. De ce?
- Marte este cunoscută ca *planeta roșie*. De unde credeți că provine această colorație atribuită planetei?

2. „Culori” care nu sunt culori!

De multe ori spunem că purtăm o îmbrăcămințe de culoare albă sau neagră. Este corectă afirmația aceasta? Dacă nu, de ce?

3. Diferite feluri de culori

Știm că apa este transparentă. Totuși ea apare colorată, în multe cazuri. Încercați să explicați următoarele cazuri:

- Valurile și spuma lor sunt albe și nu transparente, de ce?

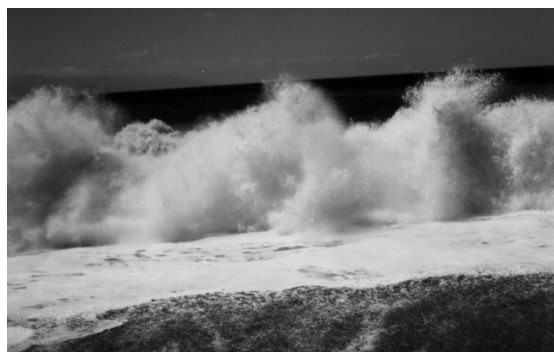


Fig. 3.11. Apa este transparentă dar spuma este albă.

- Există diverse mări și întinderi de apă „colorate”: Marea Neagră, Marea Roșie, Grota de Azur, Lacul Roșu.

4. Valențe ale culorilor

Culoarea reprezintă o mărime fizico-fiziologică. Din această cauză, culoarea poate avea o influență asupra psihicului nostru. Interpretarea „data” culorilor de către psihologi, dar și de către artiști, corespunde unei deosebiri între culorile calde și cele reci. Culorile *calde* (roșu, portocaliu, galben) favorizează procesele de adaptare și ne produc un tonus ridicat (voie bună, favorizarea

exploziilor etc.). Culoarele *reci* (albastru, indigo, violet) sunt cele care favorizează procesele de opoziție, de cădere, uneori de liniște, având un efect sedativ și calmant. Aceste aprecieri au fost deseori folosite în decorarea apartamentelor, birourilor și atelierelor, dovedindu-se utile în crearea unei ambiante corespunzătoare. Analizați și utilizați efectele culorilor asupra voastră.

În pictură, culoarea joacă un rol fundamental. Care sunt pictorii voștri preferați și ce rol joacă culoarea în această preferință?

Există un stil de pictură (modern) care se bazează pe faptul că senzația de culoare se poate obține prin combinarea culorilor. Acest stil denumit *pointilisme* fost introdus în pictură de către pictorul francez Georges Seurat, (1859 - 1891). Tehnica se reduce la un mozaic de puncte colorate, care privite de la distanță dau o senzație de culoare care este diferită de culorile elementare care constituie mozaicul. La o privire de ansamblu acest lucru nu se observă ușor (fig. 3.13).



Fig. 3.13. G. Seurat *Farul din Honfleur (The Lighthouse at Honfleur)*.

5. Senzația de culoare obținută prin combinare. Imaginea obținută prin puncte luminoase.

Creasta cocoșului apare roșie aprinsă dar, de fapt, este formată din multe puncte roșii amestecate cu puncte albastre și verzi care în ansamblu dau culoarea roșie (fig. 3.14). În schimb, coada cocoșului este de un albastru sidefiu, care, de fapt, este tot un amestec de aceleași trei tipuri de puncte colorate, dar în care majoritatea sunt albastre iar ansamblul se vede ca fiind albastru.

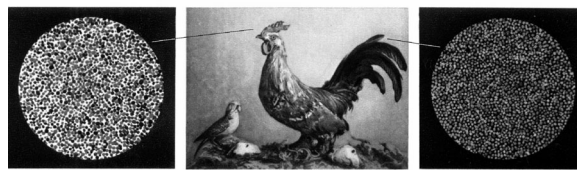


Fig. 3.14. Creasta și coada cocoșului și cum apar ele privite prin lupă.

Acest mozaic de puncte este, de fapt, prezent și în modul în care apar imaginile în paginile de ziar (fig. 3.15), sau imaginea color pe ecranul monitorului de calculator sau a televizorului.

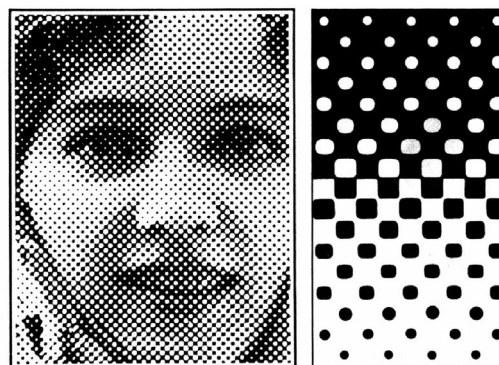


Fig. 3.15. Formarea imaginilor din puncte.

Tubul color al televizorului sau al monitorului de calculator are o „mască” și un strat de substanțe fluorescente, sub forma unor puncte (pixeli) care pot da cele trei culori de bază: roșu, verde și albastru (RGB – Red, Green, Blue, în engleză). Prin combinarea lor, se poate obține orice nuanță de culoare. Dacă vă uitați de aproape la ecranul TV cu ajutorul unei lupe veți vedea aceste trei puncte colorate (fig. 3.16).

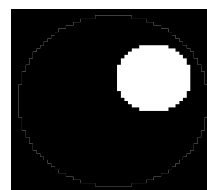


Fig. 3.16. O schiță a modului de dispunere a celor trei puncte de culoare care formează un element de imagine (pixel) pe ecranul TV.

Fasciculul de electroni care cade pe acest pixel, face ca fiecare dintre aceste trei puncte luminoase să emită lumină de culoarea lui. Dacă însă fasciculul de electroni cade cu intensități diferite pe cele trei componente, senzația de culoare poate fi modificată, așa cum se întâmplă la creasta

cocoșului. Combinația celor trei culori poate da orice senzație de culoare dorim.

Pentru ecranele color de la monitoarele cu *cristale lichide* sau pentru tuburile de televiziune denumite cu „*plasmă*”, culoarea se obține prin alte fenomene fizice, pe care le vom înțelege mai târziu.

6. Ce este și cum se obține culoarea „maro”?

Nuanța denumită convențional „maro” este, de fapt, un amestec de culori (primare: roșu, verde și albastru). Cu ajutorul calculatorului, care vă permite să realizați ce *paletă* de culori doriți (în programele de desenat *Panitbrush*, *Paintshop* etc.) alegeți următoarea combinație de numere: roșu (Red): 164, verde (Green): 84 și albastru (Blue): 30, și veți obține o nuanță care poate fi considerată maro. Un maro deschis se poate obține prin creșterea conținutului de roșu și așa puteți experimenta obținerea tuturor nuanțelor dorite. Aceste trei culori cu care ne putem juca pe calculator sunt și culorile cu care pictorii „se joacă” creând operele de artă care ne încântă ochiul și sufletul.

7. Raza verde

După o veche legendă scoțiană, aceia care au văzut măcar o singură dată raza verde nu vor greși niciodată când își vor alege iubita. Pe insula Man (Marea Britanie), raza verde este denumită „lumina vie” (*Ghidul turistului în insula Man*).

Apariția razei verzi este tot un rezultat al modificării compoziției luminii care vine de la Soare, prin fenomenul de dispersie în straturile atmosferei terestre. O fotografie a razei verzi poate fi văzută în figura 3.17.



Fig. 3.17. Raza verde.

„Ați văzut vreodată Soarele apunând la orizont? Desigur că da! Ați urmărit cum atinge el linia orizontului și dispare apoi complet dincolo de orizont? Probabil că da! Dar ați observat, oare, cum apare și se stinge ultima rază solară atunci când dispare ceața și atmosfera devine transparentă? Probabil ca nu! Când veți avea ocazia să vedeți acest fenomen, ceea ce se întâmplă de altfel foarte rar, veți observa că această ultimă rază nu este roșie, ci verde. Da, da, ea are o culoare verde minunată, un astfel de verde pe care nu-l poate reda nici un pictor pe paleta sa, care nu poate fi întâlnită nicăieri în natură; ea nu poate fi găsită în lumea plantelor, cu toată mulțimea și varietatea ei de culori și nuanțe, ea nu poate fi găsită nici în mările cele mai strălucitoare”

(Jules Verne. *Raza verde*)

Dacă nu ați citit romanul, citiți-l!



Fig. 3.18. Coperta cărții lui Jules Verne în care apare și povestirea despre raza verde.