LIBRIS | We know books

MINISTERUL EDUCAȚIEI ȘI CERCETĂRII

Armand Popescu

Aurel Popescu
Iulian Ioniță

Beatrice Alexandra Popescu
Maria Ioniță

FIZICĂ

manual pentru clasa a IX - a

EDITURA PETRION

SIGMA

LIBRIS We know books

CUPRINS

1. OPTICA GEOMETRICĂ 7

1.1. Momente din istoria opticii geometrice 7

1.2. Principiile opticii geometrice 8

1.3. Reflexia luminii 9

1.4. Refracţia luminii 10

1.5. Reflexia totală 11

1.6*. Dioptrul sferic 12

1.7. Oglinzi 15
1.7.1. **Oglinzi plane** 15
1.7.2. **Oglinzi sferice** 16

1.8. Refracţia luminii prin prisma optică 20

1.9. Lentile subţiri şi sisteme de lentile 21
1.9.1. **Tipuri de lentile** 21
1.9.2. **Construirea imaginilor** 22
1.9.3. **Formulele lentilelor** 23
1.9.4. **Asociaţiile de lentile subţiri** 28

1.10. Ochiul 29

1.11. Instrumente optice 31
1.11.1. **Aparatul fotografic** 31
1..11.2*. **Lupa** 33
1.11.3. **Microscopul optic** 34
1.11.4*. **Luneta** 35
1.11.5. **Telescopul** 36

Întrebări. Exerciţii şi probleme propuse 36

Test de evaluare sumativă 39

2. PRINCIPII ŞI LEGI ÎN MECANICA CLASICĂ 40

INTRODUCERE 40

2.1. Mişcare şi repaus 41

2.1.1. Noţiuni generale 41

2.1.2. Elemente de calcul vectorial 42
2.1.2.1. **Mărimi scalare şi mărimi vectoriale** 42
2.1.2.2. **Caracterizarea şi clasificarea vectorilor** 42
2.1.2.3. **Operaţii cu vectori** 43

Întrebări. Exerciţii şi probleme propuse 50

2.1.3*. Elemente de cinematica punctului material 52
2.1.3.1. **Vector deplasare. Viteză medie şi momentană** 53
2.1.3.2. **Acceleraţie medie. Acceleraţie momentană** 55
2.1.3.3. **Mişcarea rectilinie uniformă** 56
2.1.3.4. **Mişcările rectilinii uniform variate** 57
2.1.3.5. **Mişcarea circulară uniformă** 61

LIBRIS We know books

Întrebări. Exerciții și probleme propuse 64
2.2. Principiul I al dinamicii 66
2.3. Principiul II al dinamicii 67
2.4. Principiul III al dinamicii 69
2.5. Legea lui Hooke. Tensiunea în fire 71
2.5.1. Generalități. Modelul corpurilor perfect elastice 71
2.5.2. Tipuri de deformări elastice 72
2.5.3. Expresia forței elastice 72
2.5.4. Deducerea legii lui Hooke 79
2.5.5*. Diagrama tensiune – alungire 82
2.6. Legile frecării de alunecare 83
2.6.1. Generalități privind frecarea 83
2.6.2. Legile frecării de alunecare 84
2.6.3*. Frecarea statică și frecarea cinetică 86
2.7. Legea atracției universale 90
2.7.1. Considerații generale 90
2.7.2. Legile lui Kepler 91
2.7.3. Expresia legii atracției universale 92
2.7.4. Greutatea corpurilor ca forță de atracție universală 94
2.7.5*. Intensitatea câmpului gravitațional 96
2.7.6*. Sateliți artificiali. Viteze cosmice 99
Întrebări. Exerciții și probleme propuse 103
Test de evaluare sumativă 107
3. TEOREME DE VARIAȚIE ȘI LEGI DE CONSERVARE ÎN MECANICĂ 109
3.1. Lucrul mecanic. Putere 109
3.1.1. Lucrul mecanic al unei forțe constante 109
3.1.2. Lucrul mecanic al unei forțe cu modul variabil 110
3.1.3. Lucrul mecanic al unei forțe constante necoliniare cu deplasarea 111
3.1.4. Lucrul mecanic al greutății 113
3.1.5*. Lucrul mecanic al forței elastice 116
3.1.6. Puterea mecanică 118
3.1.7. Randamentul planului înclinat 121
3.2. Teorema variației energiei 123
3.2.1. Generalități privind energia 123
3.2.2. Energia cinetică 124
3.2.3. Teorema variației energiei cinetice 126
3.3. Energia potențială gravitațională și elastică 129
3.3.1. Generalități privind energia potențială 129
3.3.2. Energia potențială gravitațională 130
3.3.3. Energia potențială în cazul forțelor elastice 133
3.4*. Legea conservării energiei mecanice 135
3.4.1. Deducerea legii conservării energiei 136
3.4.2. Exemplificarea conservării energiei mecanice în câmp gravitațional 137
3.4.3. Exemplificarea conservării energiei mecanice elastice 139
3.5*. Teorema variației impulsului 141
3.5.1. Impulsul forței 141

LIBRIS Web Books

3.5.2. Impulsul unui punct material. Teorema variației impulsului 142
3.6*. Legea conservării impulsului 145
3.7*. Ciocniri 149
3.7.1. Generalități privind ciocnirile 149
3.7.2. Ciocniri perfect elastice 150
3.7.3. Ciocniri plastice 153
Întrebări. Exerciții și probleme propuse 156
Test de evaluare sumativă 162
4. ELEMENTE DE STATICĂ 164
4.1. Noțiuni generale 164
4.1.1. Principiile de bază ale staticii 164
4.1.2*. Corp liber. Corp supus la legături. Axioma legăturilor. Legăturile corpului solid 165
4.1.3. Compunerea forțelor 167
4.1.3.1. Forțe coliniare 167
4.1.3.2. Forțe concurente 167
4.1.3.3. Compunerea analitică a forțelor 167
4.1.3.4. Compunerea forțelor paralele 169
4.1.4. Descompunerea forțelor în componente 171
4.1.4.1. Descompunerea unei forțe în componente concurente 171
4.1.4.2. Descompunerea unei forțe în componente paralele 172
Întrebări. exerciții și probleme propuse 175
4.1.5. Momentul forței 177
4.1.5.1. Momentul unei forțe în raport cu un punct 177
4.1.5.2*. Momentul unei forțe în raport cu o axă 178
4.1.5.3. Cuplu de forțe. Momentul cuplului 179
4.1.5.4*. Sistem mecanic echivalent cu o forță 180
4.1.5.5*. Compunerea momentelor. Teorema lui Varignon 180
4.1.6. Centre de greutate 183
4.1.6.1. Definiții. Relații de calcul. Proprietăți 183
4.1.6.2. Determinarea centrului de greutate la corpuri omogene 185
4.1.6.3*. Metode experimentale de determinare a centrului de greutate a corpurilor 188
Întrebări. Exerciții și probleme propuse 191
4.2. Echilibrul solidului rigid 193
4.2.1. Condiții de echilibru pentru un solid rigid 193
4.2.1.1. Prima condiție de echilibru 193
4.2.1.2. A doua condiție de echilibru 194
4.2.1.3. Problemele staticii solidului 194
4.2.1.4. Algoritmul rezolvării problemelor de echilibru 195
4.2.2*. Echilibrul corpurilor în câmp gravitațional 196
4.2.2.1. Cazul unui corp rezemat liber pe o suprafață 196
4.2.2.2. Cazul unui corp suspendat într-un punct 197
4.2.2.3. Cazul unui solid care are o bază de sprijin 198
4.2.2.4*. Criterii energetice privind stabilitatea echilibrului corpurilor 199
4.2.3*. Randamentul unei mașini 201
Întrebări. exerciții și probleme propuse 201
Test de evaluare sumativă 205
Bibliografie 206

LIBRIS We know books

1. OPTICA GEOMETRICA

1.1. Momente din istoria opticii geometrice*

Optica este acea ramură a fizicii care studiază natura luminii, fenomenele legate de propagarea şi interacţia ei cu substanţa.

Cuvântul optică vine de la cuvântul grecesc *optikos*.

Fără să aibă argumente ştiinţifice oamenii au simţit din totdeauna că lumina este un fenomen foarte profund, primordial. Experimente senzaţionale de comunicaţie cuantică prin intermediul fotonilor, realizate la sfârşitul secolului al XX-lea, au dovedit că **lumina "este unul dintre cele mai adânci şi mai misterioase fenomene din fizică"** (Prof. John Coates, Universitatea Cambridge).

După ce a făcut cerul şi pământul, a zis Dumnezeu: "să fie lumină". (Vechiul testament, Facerea lumii)

Optica este una din primele ştiinţe, cu originea în antichitate, iar în dezvoltarea ei s-au conturat trei capitole mari, care sunt expresia a trei mari teorii apărute în dezvoltarea generală a fizicii: **optica geometrică, optica ondulatorie şi optica fotonică (cuantică).**

Optica geometrică studiază propagarea luminii prin diferite medii şi prin diferite suprafeţe, fără să ţină seama de natura luminii.

Deşi este limitată la descrierea cantitativă a unor fenomene optice simple, precum reflexia şi refracţia, acestea sunt fundamentale pentru înţelegerea funcţionării instrumentelor optice. Trasarea razelor de lumină printr-un instrument optic se face azi cu ajutorul calculatorului, dar folosind ecuaţii oferite de optica geometrică.

Cu 4000 de ani în urmă, egiptenii puteau realiza oglinzi, prin şlefuirea unor aliaje metalice, care s-au păstrat până azi. Lentilele fiind mult mai fragile, nu există dovezi arheologice ale vechimii lor, ci numai descrieri ale lor din perioada antichităţii greco-romane. Este sigur că meşterii romani puteau realiza mici sfere de sticlă care să focalizeze lumina soarelui.

Legile reflexiei, funcţionarea oglinzilor plane şi concave au fost descrise în "*Optica*" lui **Euclid** (300 î. Hr.). **Arhimede**, geniul antichităţii, a fost amintit de romani că ar fi folosit nişte oglinzi pentru incendierea flotei romane în asediul Siracuzei (214 î. Hr.). Euclid a făcut observaţia că, în medii omogene, lumina se propagă în linie dreaptă. **Heron** din Alexandria a afirmat că *lumina se propagă pe drumul cel mai scurt*. Optica a fost şi una din pasiunile marelui astronom al antichităţii **Ptolemeu**, care a studiat trecerea luminii din aer în apă (refracţia).

După o mie de ani, matematicianul arab **Alhazen** sintetizează observaţiile

---

* O istorie detaliată este prezentată într-un stil foarte atractiv de Acad. Prof. Dr. Ioan Iovit Popescu în "*Optica*", Editura Universităţii din Bucureşti, 1988

LIBRIS | We know books

grecilor în legile reflexiei și prima lege a refracției. Atrage atenția că proporționalitatea dintre unghiul de incidență și unghiul de refracție este corectă doar la unghiuri mici. Tot el a făcut prima descriere corectă a funcționării ochiului.

Au mai trecut încă 600 de ani până la enunțarea *legii fundamentale a opticii geometrice (legea refracției)*, deși în Europa se produceau de mult timp lentile pentru ochelari. În 1608 olandezii au inventat luneta, care a fost perfecționată de către **Galilei** și **Kepler**.

Legea refracției a fost scrisă într-o primă variantă, folosind funcțiile trigonometrice, de către olandezul **Snell**, dar a devenit cunoscută în varianta lui **Descartes** ($\sin i / \sin r = n$) în 1637, prin lucrarea "*La Dioptrique*". Marele enciclopedist francez, pasionat de optică, a elaborat o frumoasă teorie a curcubeului și a descoperit forma suprafețelor optice perfecte (stigmatice). **Fermat**, contemporan cu Descartes, formulează principiul care îi poartă numele și care, ulterior, a devenit un principiu fundamental al fizicii, nu doar al opticii.

Realizarea primului microscop în Olanda și, ulterior, a telescopului și a prismei, de către marele fizician **Newton**, au arătat oamenilor că optica nu este o știință pură, ci poate avea și numeroase aplicații practice.

În secolul XXI optica va juca un rol decisiv în dezvoltarea tehnologică, aflându-ne deja la începutul înlocuirii dispozitivelor și aplicațiilor electronice cu cele optice (de exemplu, cablurile optice, folosite pe scară largă în telecomunicații, sunt substituenți mult mai performanți ai celor metalice).

1.2. Principiile opticii geometrice

$c = 299792{,}458$ km/s

Lumina are o **viteză finită de propagare.**

Viteza de propagare nu are aceeași valoare în toate mediile. **Viteza luminii în vid** (c) are cea mai mare valoare și este o **constantă fundamentală.**

Definiție: **Indicele de refracție n al unui mediu este raportul dintre viteza luminii în vid și viteza luminii în acel mediu:**

$$n = \frac{c}{v} \quad (1.1)$$

Exemple de indici de refracție

Mediul	n	Mediul	n
vid	1	sticlă	1,55
aer	1,001	diamant	2,5
apă	1,33	benzen	1,5

Valorile date nu sunt foarte precise, pentru că n depinde de foarte mulți factori (temperatură, lungime de undă, compoziția materialului etc.)

Optica geometrică utilizează modelul **razei de lumină** pentru a explica fenomenele de reflexie și de refracție, formarea umbrelor și formarea imaginilor în instrumentele optice. Raza de lumină reprezintă traiectoria urmată de lumină. Este un concept abstract, care nu există în realitate.

LIBRIS | We know books

Fasciculul emis de o diodă laser („pointer") poate fi considerat, aproximativ, rază de lumină și folosit în multe experiențe optice.

1. Principiul propagării rectilinii: într-un mediu transparent și omogen lumina se propagă în linie dreaptă.

Deși pare firesc să fie așa, este un principiu care nu poate fi demonstrat. În practică, raza de lumină este luată ca etalon de linie dreaptă și folosită pentru alinierea cu mare precizie și la mari distanțe.

2. Principiul independenței razelor de lumină: razele de lumină care trec simultan prin același punct nu se influențează reciproc.

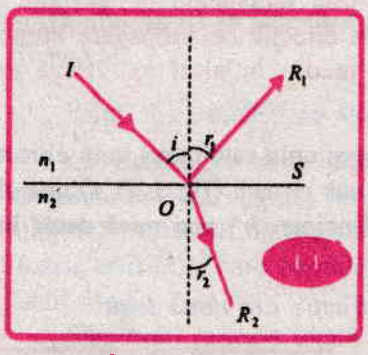
3. Principiul reversibilității drumului razelor de lumină: propagarea luminii în lungul unei raze nu depinde de sensul de propagare.

Urmăriți propagarea fasciculului laser prin aerul plin de praf sau ptrintr-un vas cu apă în care ați dizolvat puțin detergent.

4. Principiul fundamental al opticii geometrice (principiul lui Fermat): lumina se propagă între două puncte pe drumul pentru care timpul de propagare este minim.

Toate legile opticii geometrice pot fi obținute folosind principiul lui Fermat.

1.3. Reflexia luminii



Experiment

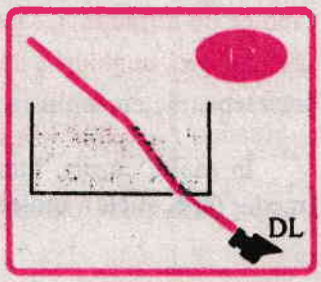
Luați o diodă laser (un pointer) și iluminați suprafața unei ape liniștite dintr-un vas. Veți vedea două pete luminoase: una pe fundul vasului și alta pe tavan.

Când o rază de lumină, numită incidentă I, întâlnește suprafața S de separație dintre două medii cu indici de refracție diferiți (fig. 1.1) se formează două raze:

– **reflectata (R_1), care se întoarce în mediul din care a venit;**

– **refractata (R_2), care se propagă în mediul al doilea.**

Prin urmare, apar două fenomene caracteristice undelor: **reflexia** și **refracția**. În unele medii, lumina incidentă este, în cea mai mare parte, reflectată. În cazul altor materiale, refracția predomină (fig. 1.2).



Exemple:

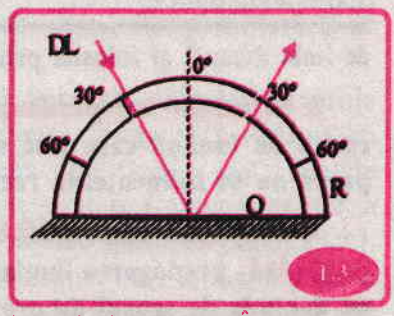
Toate suprafețele metalice sunt reflectătoare. Cele mai bune oglinzi sunt suprafețele metalice foarte netede. Suprafața de separație aer–apă este puțin reflectătoare, fenomenul de refracție fiind dominant.

LIBRIS | We know books

Definiție: **Reflexia** este fenomenul de întoarcere a razei de lumină în mediul din care a venit la întâlnirea suprafeței de separare dintre două medii.

Fenomenul de reflexie este cauza pentru care putem vedea obiectele care nu sunt luminoase. În jurul nostru majoritatea obiectelor nu emit lumină, ci numai reflectă o parte din lumina pe care o primesc. Există suprafețe cu multe neregularități care reflectă lumina în toate direcțiile. Acestea se numesc suprafețe difuzante.

În cele ce urmează vom considera doar suprafețele reflectătoare netede.



1.3

Legile reflexiei sunt:

1. Incidenta (I), normala (N) și reflectata (R_1) sunt coplanare.
2. Unghiul de reflexie ($\hat{r}_1$) este egal cu unghiul de incidență ($\hat{i}$).

Experiment

Puteți verifica foarte ușor cele două legi folosind o diodă laser (DL) ca sursă de lumină, un raportor (R) și o oglindă (O) sau o bucată de sticlă (fig. 1.3).

1.4. Refracția luminii

Legile refracției au fost descoperite în 1620 de Willebord Snell, astronom și matematician olandez, dar au devenit cunoscute în 1638, prin intermediul cărții *Optica* a lui Descartes.

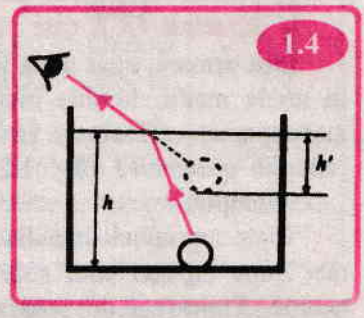
Definiție: **Refracția** este fenomenul de deviație a razei de lumină de la direcția de propagare atunci când trece dintr-un mediu în altul cu viteze de propagare diferite.

Un exemplu foarte simplu este cazul unui obiect situat pe fundul unui vas cu apă (fig. 1.4). Obiectul pare a se afla la o adâncime (h') mai mică decât în realitate (h).

Fenomenul de *refracție are două legi*:

1. Incidenta (I), normala (N) și refractata (R_2) sunt coplanare.
2. La trecerea luminii dintr-un mediu cu indice de refracție n_1, într-un mediu cu indice de refracție n_2, unghiurile de incidență $\hat{i}$ și, respectiv, refracție, $\hat{r}_2$, îndeplinesc relația Snell-Descartes:

$$n_1 \sin i = n_2 \sin r_2 \qquad (1.2)$$



1.4

În multe cazuri, lumina trece din aer în alt mediu (apă, sticlă). Indicele de refracție al aerului

LIBRIS We know books

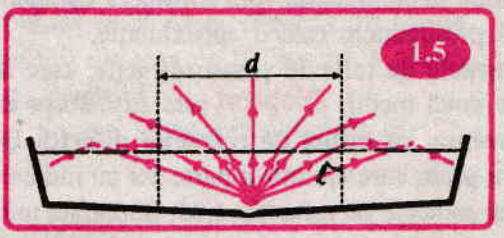
este aproximativ egal cu 1. În acest caz legea refracției se scrie:

$$\sin i = n \sin r_2 \Rightarrow n = \frac{\sin i}{\sin r_2} \qquad (1.3)$$

permițând determinarea ușoară a indicelui de refracție al unui material transparent.

Refracția este un fenomen foarte important pentru că el stă la baza funcționării majorității dispozitivelor optice.

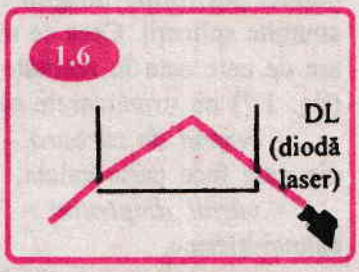
1.5. Reflexia totală



Experiment

Pe fundul unui vas larg, așezați o mică sursă de lumină (un bec de lanternă). Aprindeți becul și umpleți vasul cu apă (fig. 1.5). Veți constata că, dacă înainte de umplere ieșeau din vas toate razele de lumină, după umplere vor ieși numai razele ce ating suprafața apei între cele două linii punctate. Punând pe suprafața apei un disc cu diametrul egal cu distanța dintre liniile punctate, veți constata că din apă nu va mai ieși nici o rază de lumină.

Pe desen se observă că există un unghi (ℓ) pentru care unghiul de refracție este de 90°. Unghiul ℓ se numește **unghi limită.** Calcularea unghiului limită se face ușor folosind legea Snell-Descartes:



$$n \sin \ell = 1 \cdot \sin 90° \Rightarrow \sin \ell = \frac{1}{n} \qquad (1.4)$$

Cunoscând valoarea indicelui de refracție (n) se poate calcula unghiul limită. Dar relația se poate aplica și invers: măsurând unghiul limită se determină indicele de refracție al mediului. Este o metodă foarte sensibilă, care permite determinarea cu precizie a indicelui de refracție al unui mediu.

Observați reflexia totală folosind o diodă laser și un vas cu apă și detergent ca în figura 1.6.

Pentru unghiuri de incidență mai mari decât unghiul limită, raza de lumină se întoarce în mediul din care vine.

Fenomenul se numește **reflexie totală.**

A doua condiție necesară pentru producerea fenomenului de reflexie totală este ca trecerea luminii să se facă dintr-un mediu în alt mediu cu indicele de refracție mai mic.

Propagarea luminii prin *fibrele optice* mai largi, numite *multimod*, poate fi înțeleasă cu ajutorul fenomenului de *reflexie totală*.

LIBRIS We know books

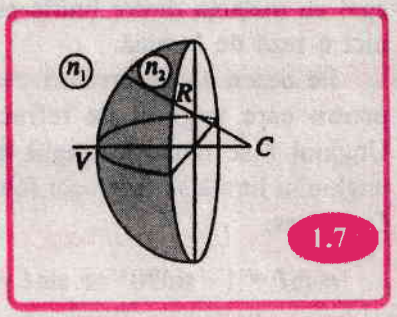
1.6*. Dioptrul sferic

Problema centrală a opticii geometrice este proiectarea instrumentelor optice, care formează imagini ale obiectelor, mărite sau micşorate. În acest scop, un instrument optic trebuie să preia razele de lumină emise de un punct obiect şi să le concentreze într-un punct imagine.

Sistemul optic care creează un punct imagine pentru un punct obiect se numeşte **sistem stigmatic**. Nu există sisteme care să asigure stigmatismul perfect. Aceasta înseamnă că imaginea unui punct este în general o pată, mai mare sau mai mică, în funcţie de calitatea sistemului. În continuare, vom considera sistemele optice perfect stigmatice, deşi această presupunere este o aproximaţie.

Orice aparat optic foloseşte fenomenele de reflexie şi/sau refracţie, care se produc la suprafaţa de separaţie dintre două medii. **Dioptrul** este **suprafaţa de separaţie dintre două medii transparente, cu indici de refracţie diferiţi.** De exemplu, suprafaţa apei este un **dioptru plan,** care are într-o parte aer cu indicele de refracţie 1 şi în cealaltă parte apă, cu indicele de refracţie 1,33. Suprafaţa unei lentile este un **dioptru sferic** care separă aerul, cu $n = 1$ şi sticla, cu $n = 1{,}5$.

Majoritatea pieselor optice sunt formate din dioptri sferici pentru că aceştia sunt mai uşor de realizat, deşi dioptrii parabolici sau eliptici pot forma imagini mult mai clare în anumite aplicaţii. Ceea ce se desenează ca un arc de cerc este în realitate **o calotă sferică** (fig. 1.7) cu următoarele elemente:



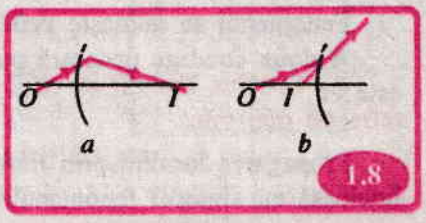
1.7

– *centrul de curbură* – C, centrul sferei din care face parte calota,

– *vârful dioptrului* – V, vârful (polul) calotei sferice,

– *axa optică principală* – CV, dreapta care trece prin C şi V.

Dintr-un punct luminos pleacă raze de lumină în toate direcţiile. Imaginea lui se obţine la intersecţia razelor de lumină care au trecut prin dioptru (s-au refractat). Aşa cum s-a constatat practic, imaginea unui punct nu este niciodată un punct, din diferite cauze numite aberaţii optice. Pentru ca pata imagine să fie cât mai mică, adică imaginea obiectului să fie cât mai clară, trebuie folosite **fascicule înguste formate din raze de lumină, aproape paralele cu axa optică (paraxiale).** Fasciculele care îndeplinesc aceste condiţii se numesc gaussiene (sau paraxiale) şi se spune că se lucrează în **aproximaţia gaussiană.**



1.8

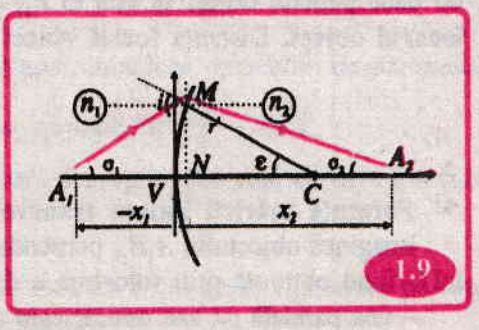
Dacă punctul imagine se formează la intersecţia razelor se numeşte **imagine reală** (fig. 1.8.a). Dacă se formează la intersecţia prelungirilor razelor se numeşte **imagine virtuală** (fig. 1.8.b).

LIBRIS We know books

Formula punctelor conjugate

Punctul obiect şi punctul imagine se numesc **puncte conjugate.**

Fie un dioptru sferic de rază $CV = R$. O rază de lumină pornită din punctul obiect A_1, aflat la distanţa x_1 faţă de dioptru, se refractă în punctul M şi formează imaginea în A_2, aflat la distanţa x_2 faţă de vârful dioptrului (fig. 1.9).



1.9

Alegem vârful dioptrului ca origine a unui sistem de coordonate ortogonal cu axa absciselor situată în lungul axei optice, sensul pozitiv fiind de la V spre dreapta. În aceste condiţii distanţa de la dioptru la obiect este negativă.

Scriem **legea refracţiei** în M:

$$n_1 \sin i = n_2 \sin r$$

Deoarece $\begin{cases} i = \varepsilon + \sigma_1 \\ r = \varepsilon - \sigma_2 \end{cases}$ Rezultă: $n_1 \sin(\varepsilon + \sigma_1) = n_2 \sin(\varepsilon - \sigma_2)$ şi

$$n_1(\sin\varepsilon\cos\sigma_1 + \cos\varepsilon\sin\sigma_1) = n_2(\sin\varepsilon\cos\sigma_2 - \cos\varepsilon\sin\sigma_2).$$

În continuare, vom folosi *aproximaţia gaussiană*, adică vom lucra în *aproximaţia unghiurilor mici*. În acest caz:

$$\begin{cases} \sin\sigma_1 \approx \operatorname{tg}\sigma_1 \\ \sin\sigma_2 \approx \operatorname{tg}\sigma_2 \end{cases} \text{ şi } \begin{cases} \cos\sigma_1 \approx 1 \\ \cos\sigma_2 \approx 1 \\ \cos\varepsilon \approx 1 \end{cases}$$

Legea refracţiei transformată devine:

$$n_1\left(\frac{MN}{MC}\cdot 1 + 1\cdot\frac{MN}{A_1N}\right) \approx n_2\left(\frac{MN}{MC}\cdot 1 - 1\cdot\frac{MN}{NA_2}\right) \Rightarrow \frac{n_2}{NA_2} + \frac{n_1}{A_1N} \approx \frac{n_2 - n_1}{MC}.$$

Înlocuim valorile segmentelor, ţinând cont de convenţia de semn, şi obţinem formula punctelor conjugate:

$$\frac{n_2}{x_2} - \frac{n_1}{x_1} = \frac{n_2 - n_1}{R} \qquad (1.5)$$

Prin rearanjarea termenilor se obţine invariantul Abbe:

$$n_2\left(\frac{1}{x_2} - \frac{1}{R}\right) = n_1\left(\frac{1}{x_1} - \frac{1}{R}\right).$$

Pe lângă punctele conjugate, pe axa principală a unui dioptru se găsesc alte două puncte importante, numite **focarele dioptrului.**

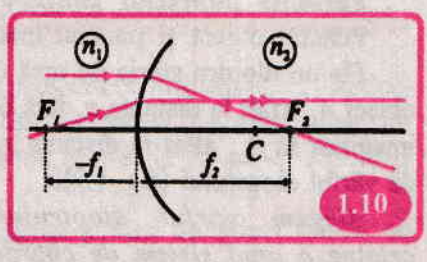
Dacă punctul obiect se depărtează la $-\infty$, imaginea lui se formează într-un punct F_2, numit **focarul imagine** (fig. 1.10). Poziţia lui, numită distanţă focală imagine, se obţine cu formula punctelor conjugate ($x_1 \to \infty$):

LIBRIS | We know books

$$f_2 = \frac{n_2}{n_2 - n_1} R \qquad (1.6)$$

De asemenea, imaginea se formează la ∞ dacă punctul obiect se află în F_1, numit **focarul obiect.** Distanța focală obiect este:

$$f_1 = \frac{n_1}{n_2 - n_1} R \qquad (1.7)$$



Formula măririi liniare transversale

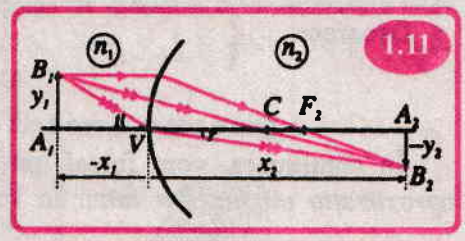
Imaginea obiectului A_1B_1, perpendicular pe axa optică, va fi A_2B_2 ca în figura 1.11, fiind obținută prin folosirea a două raze:

– una paralelă cu axa optică, care după refracție trece prin focarul imagine și

– alta care se propagă spre centrul de curbură, care va trece nedeviată.

Imaginea obținută în acest caz este o **imagine reală** și **răsturnată**. Conform convenției de semn, înălțimea imaginii se va lua cu semnul minus.

Ducem o a treia rază care se refractă în vârful dioptrului și o folosim pentru deducerea formulei **măririi liniare transversale**, care este raportul dintre dimensiunea imaginii și dimensiunea obiectului:



$$\beta = \frac{y_2}{y_1}. \qquad (1.8)$$

Aplicăm legea refracției în punctul V, pentru unghiuri mici:

$$n_1 \sin i = n_2 \sin r \Rightarrow n_1 \frac{A_1B_1}{A_1V} \approx n_2 \frac{A_2B_2}{VA_2} \Rightarrow$$

$$n_1 \frac{y_1}{-x_1} = n_2 \frac{-y_2}{x_2} \Rightarrow$$

$$\beta = \frac{n_1}{n_2} \cdot \frac{x_2}{x_1} \qquad (1.9)$$

Probleme rezolvate

1.1. Cunoscând adâncimea apei $h = 2$ m și indicele de refracție $n = \frac{4}{3}$, să se afle adâncimea aparentă h' la care se vede o piatră de pe fundul apei.

Soluție.

Scriem formula punctelor conjugate pentru dioptrul plan apă-aer, considerând un punct obiect A_1 de pe fundul apei (fig. 1.12).