

**TARTU ÜLIKOOL
KESKKONNAFÜÜSIKA INSTITUUT**

**KESKKONNA- JA MEDITSIINIFÜÜSIKA
ALUSED**

**OPTIKA
I osa**

Loengukonspekt farmaatsia, geograafia, geoloogia ja
keskkonnatehnoloogia eriala üliõpilastele

Koostanud H. Ohvril

Aprill 2002

Tartu 2002

SISUKORD

1. VALGUSE OLEMUS	3
2. KIUDOPTIKA	7
2.1. Valgusjuhid	7
2.2. Valguskaabel	7
2.3. Endoskoop	8
3. VALGUSE NÕRGEMINE, KOLORIMEETRIA	9
3.1. Bouguer' seadus	9
3.2. Kolorimeetria	11
4. VALGUSE MURDUMINE, REFRAKTOMEETRIA	14
4.1. Valguse murdumine	14
4.2. Abbe refraktomeeter	15
4.3. Refraktsioon atmosfääris	16
4.4. Nähtused, mida põhjustab astronoomiline refraktsioon	17
4.5. Aluspinnalähedane refraktsioon – miraaž	18
5. VALGUSE INTERFERENTS	20
6. VALGUSE DIFRAKTSIOON	24
6.1. Huygeni printsiip difraktsiooninähtuste põhjendamisel	24
6.2. Fresneli täiendus Huygeni printsiibile	26
6.3. Poissoni täpp	28
6.4. Fresneli tsooni- ja faasiplaadid	28
6.5. Augustin Fresnel (1788–1827)	29
7. VALGUSE POLARISATSIION, SAHHARIMEETRIA	31
7.1. Ristlainete polarisatsioon	31
7.2. Valguse polarisatsioon	31
7.3. Brewsteri nurk	34
7.4. Polarisatsioonitasandi pööramine	35
7.5. Sahharimeeter	36

1. VALGUSE OLEMUS

Optika on õpetus valgusest – **valgusõpetus**.

Vanema ja klassikalisema osa optikast moodustab **geomeetiline e. kiirteoptika**. Selles on põhimõisteks valguskiir, mis võib peegelduda ja murduda. Geomeetrilise optika ajalooline areng oli aeglane, sõltudes optiliste riistade valmistamise tehnoloogia täiustumisest.

Kõige vanemaks optiliseks riistaks, mille inimene valmistas, oli ilmselt peegel. Ja lihtsaimaks koduseks peegliks anuma sees olev vesi. Võidi kasutada ka hangunud laava tükke.

Vanim tehismaterjal, klaas, leiutati V–IV a.-tuh. e. Kr. Egiptuses ja Mesopotaamias. Arvatavasti valmistati siis ka esimesed suurendusklaasid e. luubid.

Lihvitud metallpeeglid muutusid tarbeesemeteks Vana-Roomas 3. saj. e. Kr.

Pärast tahvelklaasi valmistamise leiutamist jäi üsna lühike samm metalli (hõbeda) aurustamiseni klaasi pinnale ja seega kvaliteetpeeglite tootmiseni (1. saj. p. Kr.).

Prillid võeti kasutusele 13 saj. Veneetsias. Seejärel kulus tervelt 300 aastat, et paigutada järjestikku kumerlääts (objektiiv) ja nõguslääts (okulaar) ning saavutada eemalolevate objektide suurendatud päripidine kujutis. Teleskoobi e. pikksilma leiutasid G. Galilei 1609. a. ja J. Kepler 1611. a. Selle, nn Galilei pikksilma puuduseks oli väike vaateväli. Vaateväli on suurem, kui kasutada järjestikku kahte kumerläätse, kuid siis tekib ümberpööratud kujutis. Pikksilma täiustatigi kahe prismaga, mis pöörasid kujutise päripidiseks.

Esimese mikroskoobi valmistas 1665. a. inglise teadlane Robert Hooke (1635–1703). Viis aastat varem (1660) oli ta avastanud tahke keha elastse deformatsiooni seaduse.

Geomeetiline optika on pinnapealsem ja lihtsam osa optikast. Ta ei oska vastata tervele reale suhteliselt lihtsatele küsimustele, näiteks: miks tekivad **difraktsioon ja interferents**, rääkimata keerulisematest: miks erineva temperatuuriga kehad kiirgavad erinevat värvi valgust jne.

Sügavamad osad optikast – **laineoptika, kvantoptika** – annavad vastuse ka enamusele keerukamatele küsimustele, kuigi mitte kõigile. Valguse olemuse, nagu kogu materiaalse olemuse tunnetusprotsess on lõputu.

Tehnoloogia arenenedes põimus optika esmalt keemiaga (fotograafia), seejärel elektroonikaga (optilist kujutise edastamine, töötlemine ja salvestamine elektroonika vahenditega):

- 1911. a. – elektronkiiretoru kasutamine kujutise tekitamiseks (vene leidur B. Rozing),
- 1925.–1926. a. – kujutise juhtmeteta edastamine (Inglismaa, USA),
- 1929. a. – must-valge kineskoop,
- 1930te II pool – must-valge TV (Inglismaa, NSVL, Prantsusmaa, Saksamaa),
- 1953 – värvi-TV (USA).

Nagu igasugune tehnika, on kõik optilised riistad leidnud viivitamatut militaarset rakendust, ning vastupidi, sõjanduse vajadused on stimuleerinud optiliste seadmete väljatöötlust – periskoop, mitmesugused sihtimise ja pimedas vaatlemise seadmed jne.

Tänapäeva optika tippsaavutuseks on laser, mis 1960te kohmakast laboriinstrumendist on laserplaadimängija, -kaardikepi ja -võtmeripatsi näol jõudnud olmetehnikasse.

Valguse olemus. Kuigi optika on teadus valgusest, ei osatud pikka aega rahuldavalt vastata küsimusele “mis on valgus?” Praegu arvavad füüsikud tundvat valguse olemust sedavõrd, et praegusi teooriaid uued avastused ümber ei lükka. Ometi on valguse olemuses ka ebaselget – näit. miks ühtedes nähtustes domineerivad valguse **ainelised (korpuskulaarsed)**, teistes **lainelised omadused – valguse dualism**.

17. s. lõpul tekkis peaaegu samaaegselt kaks teineteist näiliselt välistavat valguse teooriat.

Isaac Newton (1643–1727) esitas valguse **korpuskulaarteooria**, mille kohaselt valgus on eriliste valgusosakeste (terakeste) – korpuskulte voog. Helendav keha kiirgab korpuskulte, viimaste trajektoorid sirgjoonelised. Korpuskulaarteooria on lihtne ja arusaadav.

Christian Huygens ([höihens], 1629–1695, hollandi teadlane), lõi valguse laineteooria. Selle teooria kohaselt iga ruumi punkt, milleni jõuab valgus, muutub ise sekundaarsete valguslainete allikaks. Sekundaarlainete mähispind (tasapinnalisel joonisel mähisjoon) moodustabki kulgeva laine fronti järgmisel ajahetkel. Laineteooria on üsna abstraktne.

Nii korpuskulaar- kui laineteooriaga sai ära seletada peegeldumis- ja murdumiseseadused ning muud tol ajal tuntud geomeetrilise optika seadused. Kuid parema arusaadavuse ja Newtoni suurema autoriteedi tõttu oli korpuskulaarteoorial enam kui 100 a. vältel rohkem pooldajaid.

$$t \quad t + \Delta t$$

Joon. 1.1. Valguse levimine sekundaarlainetena.

1802 – interferentsikatse (Young).

19. s. alul täiendas A. J. Fresnel laineteooriat lihtsa mõistega – elementaarlainete koherentsus (lad. seostatus, kokkukuuluvus), mille all mõeldakse lainete faasivahe säilimist, ning seletas laineteooria abil ära interferentsi- ja difraktsiooninähtused:

- **interferents** – kahe laine koosmõjul uue laine tekkimine,
- **difraktsioon** – lainetuse (ka valguse) levimine tõkete taha geomeetrilise varju piirkonda.

Populaarsemaks muutus laineteooria, mõneks ajaks ununes korpuskulaarteooria.

19. s. keskel püstitas James Maxwell (1831–1879) hüpoteesi valguse elektromagnetilisest olemusest. Hilisem uurimine kinnitas, et valgus kujutabki endast elektromagnetlainetust sagedusvahemikus

$$\nu = (4.75-7.5) 10^{14} \text{ Hz.}$$

Sageduse järgi saab leida lainepikkuse vaakuumis

$$\lambda = \nu T = \frac{\nu}{\nu} .$$

Vaakuumis valguse kiirus

$$\nu = c = 3 \cdot 10^5 \text{ km/s} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s,}$$

$$\lambda = \frac{c}{\nu} ,$$

$$\lambda_{\min} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}}{\text{s} \cdot 7.5 \cdot 10^{14}} = 0.4 \cdot 10^{-6} \text{ m} = 0.4 \text{ } \mu\text{m} = \underline{\underline{400 \text{ nm}}} ,$$

$$\lambda_{\max} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}}{\text{s} \cdot 4 \cdot 10^{14}} = 0.75 \cdot 10^{-6} \text{ m} = 0.75 \text{ } \mu\text{m} = \underline{\underline{750 \text{ nm}}} ,$$

$$\lambda = \underline{\underline{400-750 \text{ nm}}} .$$

Vaatamata laineteooria edule ei saanud tema abil seletada kõiki kiirgamis- ja neeldumisahtusi (näit. spektrijooni).

M. PLANCK

A. EINSTEIN

N. BOHR

Need kolm teadlast panid 20. s. esimesel kolmandikul aluse valguse kvantteooriale, mis ühendab nii laine- kui korpuskulaarteooria.

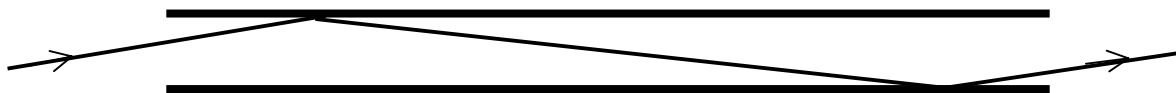
2. KIUDOPTIKA

2.1. Valgusjuhid

Valgusjuht (valguskiud) kujutab endast optiliselt hõredat (teatud lainepikkusele läbipaistvat) silindrit, mille sees valguskiir võib, siseselt peegeldudes, levida silindri ühest otsast teiseni.

Demo1: peegeldumine ja murdumine Hartley kettaga

Sisuliselt on valgusjuhiks ka igasugune, poleeritud sisepinnaga toru.



Joon. 2.1. Valguse levi poleeritud sisepinnaga torus.

Kui asendada metalltoru klaas- või läbipaistva plastiksilindriga, siis võib kiire teatavate langemisnurkade korral saavutada olukorra, kus valguskiir, jõudes silindrist seestpoolt pinnani, ei murdu sealt väliskeskkonda, vaid peegeldub tagasi silindri sisse.

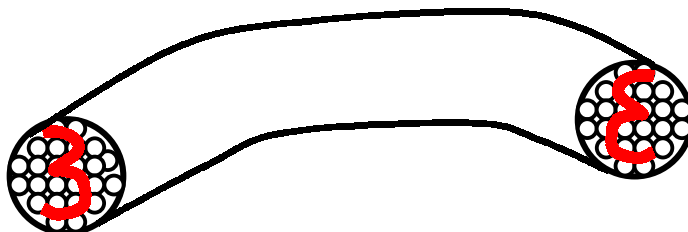
Et peegeldumiskoeffitsient täielikul sisepeegeldumisel on kõrge (**0.9999**), võib valguskiir valgusjuhis levida suurtele kaugustele (tuhanded kilomeetrid) ja edastada informatsiooni.

Valgusjuht ei pea olema sirge. Efektne on katse kõvera klaastoru või rulli keeratud sünteetilise kiuga, mille ühte otsa valgustatakse laseriga.

Demo2: kõver klaastoru ja sünteetiline kiud valgusjuhtidena

2.2. Valguskaabel

Valguskaabel e. kiudoptiline kaabel kujutab endast mitut paralleelset valgusjuhti. Sidetehnikas võib iga valguskaabli kiud olla üheks sidekanaliks. Meditsiinitehnikas edastatakse valguskaabli abil kujutisi – läätsede abil valguskaabli ühele otsale tekitatud kujutis kandub mööda kiudusid kaabli teise otsa.



Joon. 2.2. Kujutise (numbri 3) edasiandmine valguskaabliga. Kaabli teise otsa tekib kujutise peegelpilt (kujutist vaadeldakse otsekui tagumisest küljest).

Demo 3: kujutise edasiandmine valguskaabliga

2.3. Endoskoop

Endoskoop on kiudoptiline seade mingi objekti (harilikult inimorganismi) sisemuse vaatlemiseks. Alates 1970test on massilise leviku saanud meditsiinilised endoskoobid õhnes-elundite sisevaatlusteks.

Meditsiinilise endoskoobi kaabel:

- ca 30 000 kiudu mosaiikkujutise edasiandmiseks,
- valgustuslambi toitejuhtmed,
- toru gaasi (harilikult tavalise õhu), sissepumpamiseks,
- trossid minipintsettide juhtimiseks.

Meditsiinilise kaabli otsad:

- lamp,
- läätsed kujutise tekitamiseks,
- prisma kujutise pööramiseks,
- pintsetid kudetest proovide võtmiseks (mikroobide, bakterite ja kasvajate määramiseks).

Otstarbe järgi liigitatakse endoskoobid:

- farüngoskoop – neelu uurimiseks,
- bronhoskoop – kopsutorude uurimiseks,
- gastroskoop – mao uurimiseks,
- uretroskoop – uriiniteede uurimiseks,
- tsüstoskoop – põie uurimiseks,
- rektoskoop – pärasoole uurimiseks.

Inimese silma võrkkestas $130 \cdot 10^6$ kiudu – kaasaja keeruliseim kiudoptiline süsteem.

3. VALGUSE NÕRGEMINE, KOLORIMEETRIA

3.1. Bouguer' seadus

Mingis keskkonnas levides valguse intensiivsus nõrgeneb kahel põhjusel:

- 1) osa valgusest hajub, s.t. footon, põrkudes aine molekulidelt, kaldub kõrvale esialgsest levimissuunast; näit. atmosfääris toimub hajumine nii gaasimolekulidelt (nn. Rayleigh' hajumine, lühemad lainepikkused hajuvad rohkem, põhjustades taeva sinise värvuse) kui ka aerosoolilt (suitsud, tolmut, udud);
- 2) osa valgusest neeldub (gaasi molekulides, aerosooliosakestes (tolmus, suitsus, udus)).

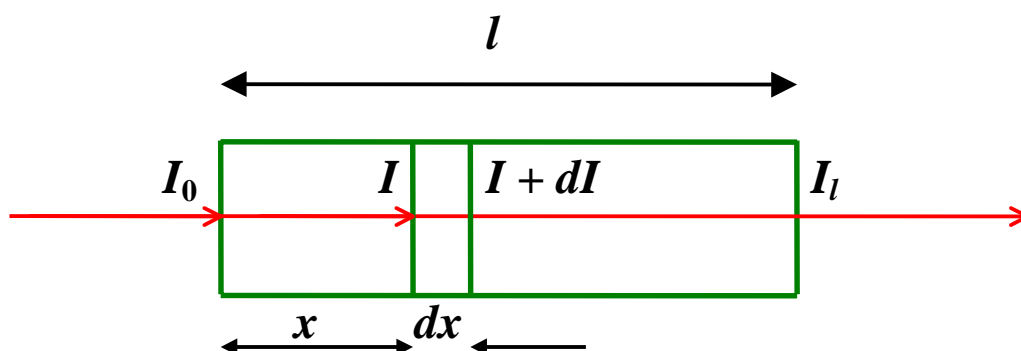
Kvantitatiivselt kirjeldab valguse nõrgenemist Bouguer' seadus. Tuletame selle.

Langegu valgus intensiivsusega I_0 ainekihile paksusega l .

Mis on valguse (üldisemalt igasuguse kiirguse) intensiivsus?

Kiirguse intensiivsus – kiirgusenergia, mis läbib kiirguse levikuga risti olevat

pinnaühikut ajaühikus, ühik $\frac{J}{m^2 \cdot s} = \frac{W}{m^2}$.



Joon. 3.1. Valguskiire intensiivsuse vähenemine ainekihis paksusega l .

Tähistame:

I_0 – valguse intensiivsus enne ainesse sisenemist,

I – valguse intensiivsus sügavusel x aines,

$I + dI$ – valguse intensiivsus sügavusel $x + dx$ ainekihi sees,

I_l – valguse intensiivsus pärast ainekihi l läbimist s.t. ainekihist väljumisel.

Oletame, et valguskiir on jõudnud ainekihis sügavusele x .

Katsed näitavad, et järgneva õhukese ainekihi dx läbimisel muutub valguse intensiivsus dI võrra järgmiselt:

$$dI = -\alpha I dx \quad | : I,$$

kus α – kiirguse nõrgenemiskoeffitsient. Jagades võrrandit I -ga, saame

$$\frac{dI}{I} = -\alpha dx .$$

Integreerime ainekihi ulatuses:

$$\int_{I_0}^{I_l} \frac{dI}{I} = -\alpha \int_0^l dx ,$$

$$[\ln I]_{I_0}^{I_l} = -\alpha [x]_0^l ,$$

$$[\ln I_l - \ln I_0] = -\alpha [l - 0] ,$$

$$\ln \frac{I_l}{I_0} = -\alpha l .$$

Natulaarlogaritmist vabanemiseks meenutame logaritmi definitsiooni

näit. $\log 0.001 = -3,$

$$0.001 = 10^{-3} .$$

Seega $\frac{I_l}{I_0} = e^{-\alpha l}$, millest

$$I_l = I_0 e^{-\alpha l} .$$

α - optiline paksus
[optiline tihedus]

Valem väljendab Bouguer' seadust valguse ja üldiselt mistahes kiirguse nõrgenemise kohta:

keskkonnas levides kiirgus nõrgeneb eksponentsiaalselt.

Pierre Bouguer (1698–1758), prantsuse füüsik, seadus eksperimentaalselt (1729) kujul $I_l = I_0 p^l$, koeffitsient p – keskkonna läbipaistvuskoeffitsient, sellisel kujul kasutatakse valemit ka praegu atmosfäärioptikas,

Johann Lambert (1728–1777), saksa füüsik, seadus teoreetiliselt (1760) kujul $I_l = I_0 e^{-\alpha l}$, kus asendus $e^{-\alpha} = p$, annab valemi Bouguer' kuju,

August Beer (1825–1863), saksa füüsik – valemi laiendus lahustele.

Rakendades seadust mittevedelatele keskkondadele, kasutatakse sünonüümidena termineid: **Bouguer' seadus, Bouguer'-Lamberti seadus, Bouguer'-Lambert-Beer'i seadus, Beer–Bouguer-Lamberti seadus.**

Lahuste (vedelike) korral: **Beeri seadus, Bouguer'-Beeri seadus.**

3.2. Kolorimeetria

Kolorimeetria on üks Bouguer' seaduse rakendusi ja kujutab endast optilist meetodit värviliste lahuste kontsentratsioonide määramiseks. Värvilise lahuse all mõistetakse sellist lahust, mis tumeneb kontsentratsiooni kasvades.

1. kolorimeeter

Kolorimeetrite jagamine erinevateks tüüpideks on muidugi suvaline. Teeme seda õppimise lihtsustamiseks. Nimetame 1. tüüpi kolorimeetriks maksimaalselt lihtsustatud kolorimeetrit, millega töötamiseks tuleb esmalt valmistada gradueerimisgraafik etalonlahuste abil ja mille korral ei kasutata Bouguer'-Beer'i seadust. Sellise kolorimeetri põhielementideks on:

valgusallikas, fotoelement, galvanomeeter, komplekt võimalikult identseid küvette (samast klaasipartiist, vastasel juhul tuleb kasutada üht küveti, milles lahuseid vahetatakse).

Joon. 3.2. Esimest tüüpi kolorimeetri skeem.

2. kolorimeeter

Keerulisema kolorimeetri korral ei vajata gradueerimisgraafikut, vaid kasutatakse valguse nõrgenemise Bouguer' seadust ja ainult üht etalonlahust.

Kirjutame Bouguer' seaduse kujus

$$I = I_0 e^{-\alpha l},$$

kus:

- I_0 – ainekihile pealelangeva valguse intensiivsus,
- I – ainekihist väljuva valguse intensiivsus,
- α – valguse nõrgenemiskoeffitsient antud aines (aine optiline paksus),
- l – ainekihi paksus.

Lahuste puhul saab Bouguer' valemile anda pisut teistsuguse kuju. Nimelt tegi saksa teadlane August Beer kindlaks, et kui on tegemist lahustega, siis valguse nõrgenemiskoeffitsient α on võrdeline lahustunud aine kontsentratsiooniga C :

$$\alpha \sim C,$$

$$\alpha = \chi C, \quad (\chi - \text{hii, väike täht kreeka tähestikust}),$$

kus χ on ainet iseloomustav võrdetegur. Võrdetegurit χ tõlgendatakse kui nõrgenemiskoeffitsienti ühikulise kontsentratsiooni korral.

Bouguer' seadusest ja Beer'i seadusest saab kokku Bouguer'-Beer'i seaduse

$$I = I_0 e^{-\chi C l},$$

mis ongi põhivalemiks vaadeldava kolorimeetri tüübi kavandamisel. Selline kolorimeeter kasutab ainult üht etalonlahust (joon. 3.3) ja kaht küvetti, kus vedelikukihi paksus on muudetav.

Ühesuguse intensiivsusega valguskiir I_0 juhitakse kahes eraldi suunas. Vasemale liikunud kiir läbib uuritavat lahust C_x , lahusekihi paksus on l_x . Paremale liikunud kiir läbib etalonlahust C_{et} , etalonkihi paksus on l_{et} .

Reguleerime lahusekihtide paksusi l_x ja l_{et} seni, kuni mõlemat lahust läbiva valguse intensiivsus on ühesugune, I . Vastavat olukorda aitab fikseerida nullgalvanomeeter, mille lahusekihtide paksuste muutmiselega tuleb saavutada nullnäit. Sellisel juhul võime avaldada vasemalt ja paremalt kulgeva valguskiire intensiivsused järgnevalt:

$$I_x = I = I_0 e^{-\chi C_x l_x},$$

$$I_{et} = I = I_0 e^{-\chi C_{et} l_{et}}.$$

Toodud võrrandite vasakute poolte võrdsusest järeldub nende paremate poolte võrdsus

$$I_0 e^{-\chi C_x l_x} = I_0 e^{-\chi C_{et} l_{et}}, \quad | : I_0$$

kus ilmselt astendajad on võrdsed

$$-\chi C_x l_x = -\chi C_{et} l_{et},$$

millest lõppvalem otsitava kontsentratsiooni C_x leidmiseks

$$C_x = \frac{C_{\text{et}} l_{\text{et}}}{l_x} .$$

Joon. 3.3. Bouguer'-Beeri seadust kasutav kolorimeeter.

Näeme, et otsitava kontsentratsiooni C_x leidmiseks on vaja teada etalonlahuse kontsentratsiooni ning etalonlahuse ja uuritava lahuse lahusekihtide paksusi.

3. kolorimeeter

Vaatleme veel üht võimalikku kolorimeetri skeemi.

Lähtume Bouguer'-Beerri seadusest kontsentratsiooni C_x ja lahusekihiga l_x lahuse jaoks

$$I = I_0 e^{-\chi C_x l_x} \quad | : I_0 ,$$

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\chi C_x l_x} ,$$

võtame võrrandi mõlemast poolest naturaallogaritmi

$$\ln \frac{I}{I_0} = \ln e^{-\chi C_x l_x} ,$$

$$\ln \frac{I}{I_0} = -\chi C_x l_x .$$

τ , tähistame lahuse suhteline optilise läbilaskvuse (*transmittance*)

$$\ln \tau = -\chi C_x l_x .$$

Avaldame siit valemist otsitava kontsentratsiooni C_x :

$$C_x = - \frac{1}{\chi l_x} \ln \tau$$

k , tähistame kolorimeetri konstandi antud aine lahuste jaoks, võttes $l_x = \text{const}$.

Lõppvalem kontsentratsiooni arvutamiseks kolorimeetri näidu järgi

$$C_x = k \ln \tau ,$$

kus:

k on riista konstant, määratakse antud kolorimeetri, antud küvettide ja antud lahuse-aine jaoks mõõtmisest etalonlahustega (1. lahus nullkontsentratsiooniga lahus kolorimeetri skaala korrigeerimiseks ja 2. lahus nullist erineva kontsentratsiooniga),

τ on mõõdetava lahuse suhteline optiline läbilaskvus, maksimaalselt **1** või **100%**).

Kaasaegsed kolorimeetrid on sageli varustatud arvutusprotsessoriga, millesse viimane valem on juba sisse programmeeritud. Sellisel juhul tehakse null-lahust (näit. vesi) kasutades üks testmõõtmine, mille järgi sisseehitatud kalkulaator korrigeerib skaalat suhtelise läbilaskvuse τ mõõtmisteks (null-lahuse korral $\tau = 1$ või $\tau = 100\%$). Teise testmõõtmisega (nullist erineva kontsentratsiooniga lahus) määratakse kolorimeetri konstant k .

4. VALGUSE MURDUMINE, REFRAKTOMEETRIA

refractus – lad. k. murtud

metreo – kr. k. mõõdan

refraktomeetria – ainete murdumisnäitajate mõõtmine

refraktomeeter – riist ainete murdumisnäitajate mõõtmiseks

(NB! – mitte segi ajada, *refraktor* – lääts teleskoop, kujutis saadakse valguse murdumisel läätsedes.)

Abbe refraktomeeter – optiline riist lahuste murdumisnäitajate mõõtmiseks

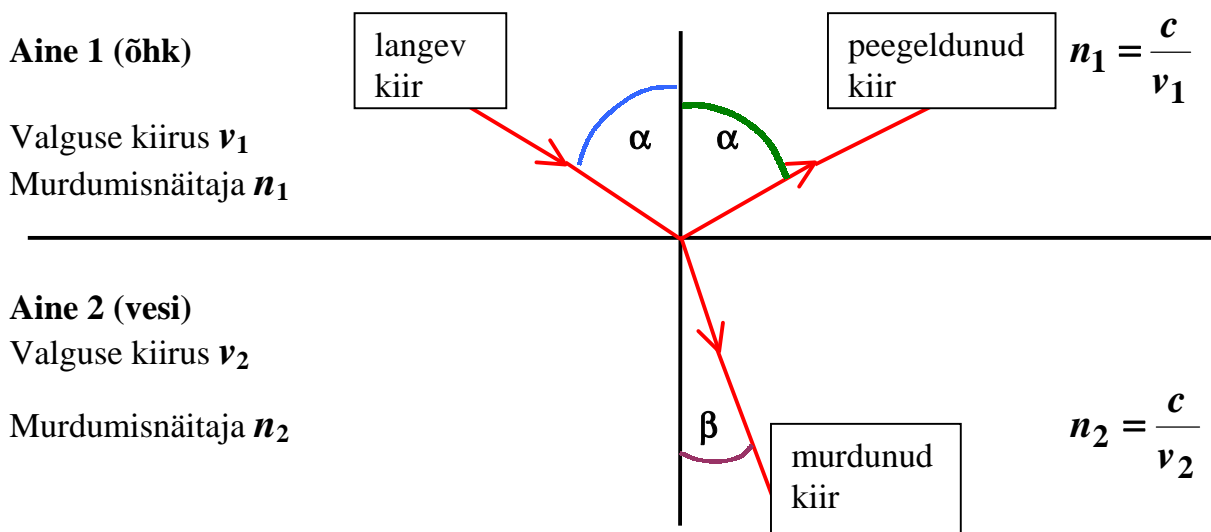
4.1. Valguse murdumine

Valguse kiirus on kõige suurem vaakuumis

$$c \approx 300\,000 \text{ km/s.}$$

Vaakuum on optiliselt kõige hõredam keskkond. Kõik teised keskkonnad on optiliselt tihedamad ning seal on valguse kiirus aeglasem.

Kahe erineva optilise tihedusega keskkonna eralduspiiril valguskiir osaliselt peegeldub tagasi esimesse keskkonda, osaliselt murdub teise keskkonda.



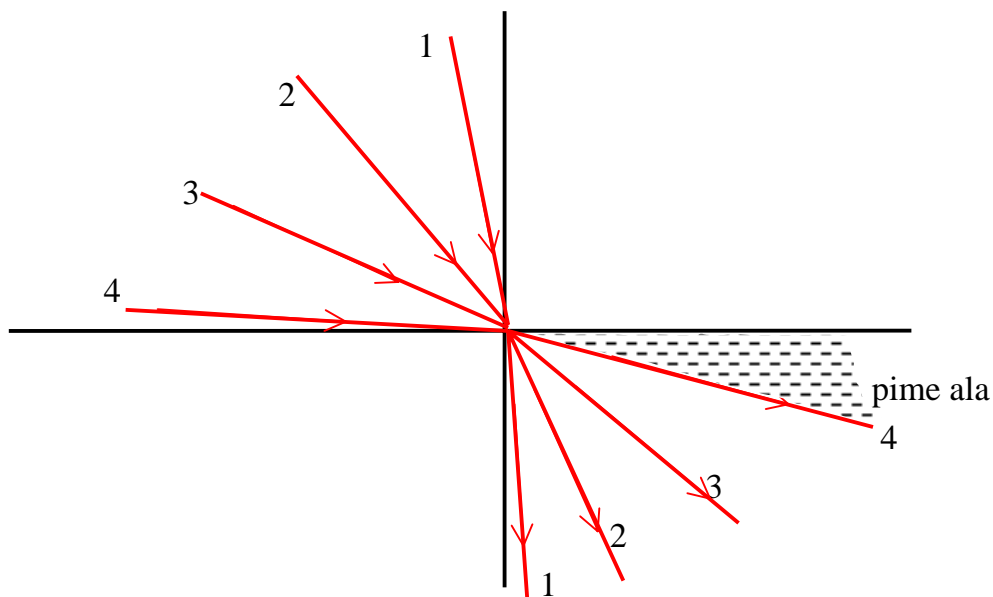
Joon. 4.1. Monokromaatse valguskiire murdumine optiliselt tihedamasse keskkonda (osa langevast valguskiirest peegeldub tagasi esimesse keskkonda, osa murdub teise).

Teise aine murdumisnäitaja esimese suhtes

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}.$$

Suuname nüüd kahe keskkonna lahutuspiirile ühe kiire asemel valgusvoo, mis koosneb kiirtest langemisnurkade $\alpha = 0^\circ$ kuni $\alpha = 90^\circ$ vahel.

Kus paikneb murdunud kiirtevoog? Esimesel pilgul võib tunduda, et murdumisnurkade $\beta = 0^\circ$ kuni $\beta = 90^\circ$ vahel. Tegelikult on murdumisnurkade vahemik väiksem.



Joon. 4.2. Maksimaalse murdumisnurka ja valgustamata ala selgitamiseks.

Analüüsime olukorda detailsemalt. Maksimaalne langemisnurk $\alpha_{\max} = 90^\circ$ (kiir 4). Sellele vastab maksimaalne murdumisnurk β_{\max} . Murdumisseaduse järgi võime kiire 4 jaoks kirjutada

$$n_{21} = \frac{\sin \alpha_{\max}}{\sin \beta_{\max}} = \frac{\sin 90^\circ}{\sin \beta_{\max}} = \frac{1}{\sin \beta_{\max}},$$

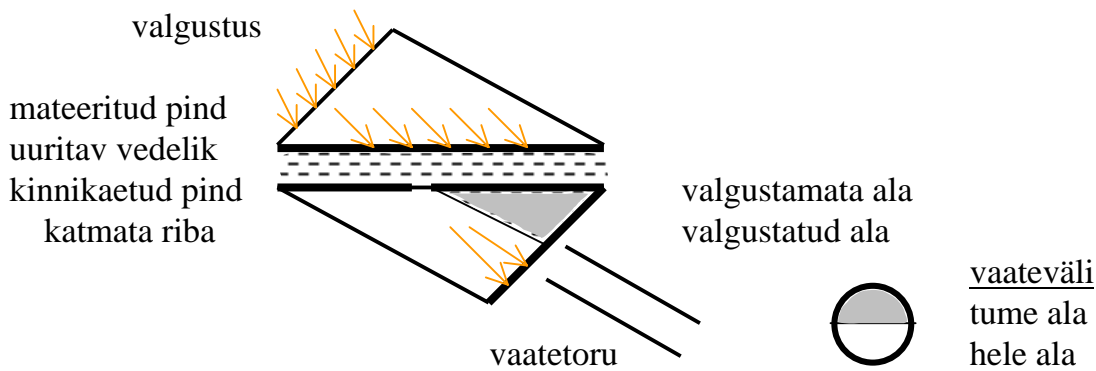
$$n_{21} = \frac{1}{\sin \beta_{\max}}.$$

Seega, teades maksimaalset murdumisnurka, e. valgustatud ja pimedada ala piiri, saame lihtsalt arvutada ühe keskkonna murdumisnäitaja teise suhtes.

Demo1: HARTLEY KETAS.

4.2. Abbe refraktomeeter

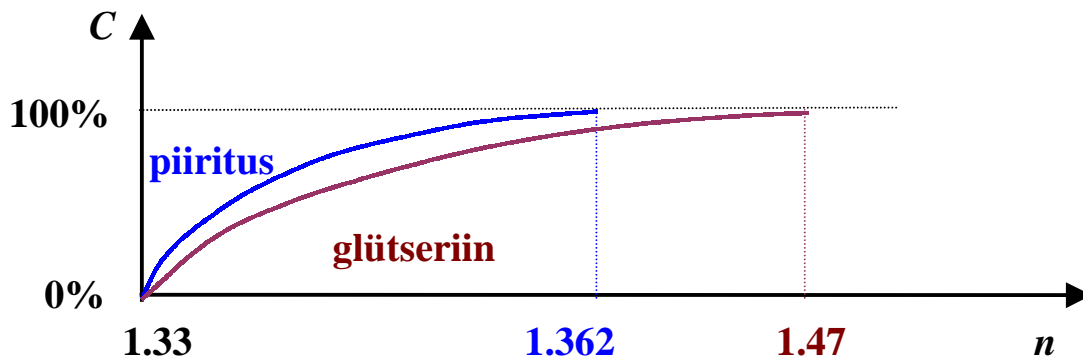
Et kompaktne ja kasutajasõbralik refraktomeeter (või mistahes optiline seade) valmis ehitada, on lisaks töö üldpõhimõttele vaja tervet rida teravmeelseid insenerilahendusi. Abbe refraktomeeter hämmastab oma väikeste mõõtude ja kaaluga. Refraktomeetris on kaks klaasprisma – valgustusprisma ja mõõteprisma. Valgustusprisma põhi on mateeritud, et saada igas suunas hajunud valgust. Uuritav vedelik (1–2 tilka) paikneb kahe prisma vahel.



Joon. 4.3. Abbe refraktomeetri põhimõtteline skeem.

Kui lahuse murdumisnäitaja sõltub kontsentratsioonist (ja see on sageli nii), siis võimaldab murdumisnäitaja teadmine määrata kontsentratsiooni, mis on eriti tähtis värvitute lahuste puhul (alkohol, glütseriin).

Üleminek murdumisnäitaja ühikutelt kontsentratsiooni ühikutele toimub jällegi gradueerimisgraafiku abil.



glütseriin (100 %)	$n = 1.47$
C_2H_5OH (100 %)	$n = 1.362$
H_2O (0 %)	$n = 1.33$

Joon. 4.4. Piirituse ja glütseriinilahuse gradueerimisgraafikud.

4.3. Refraktsioon atmosfääris

Valge valgus on liitvalgus, milles eristatakse järgmisi põhivärve:

- 1) punane, murdumisnäitaja õhus (**15 °C, 1013.25 mb**) **$n = 1.000275$**
- 2) oranž,
- 3) kollane,
- 4) roheline,
- 5) sinine,
- 6) violetne, **$n = 1.000283$**

Erinevat värvi kiirte murdumisnäitajad erinevad üksteisest väga vähe, küllalt suure täpsusega võib kõikide kiirte murdumisnäitajaid lugeda võrdseks ühega. Murdumisnäitajate erinevusest tingitud efektid on raskesti märgatavad ka vilunud loodusevaatlejatele. Kuid nad on olemas.

Ilmselt on hõredama õhu murdumisnäitaja väiksem kui tihedamal õhul. Saab näidata järgmise seose kehtivust

$$(n - 1) \sim \rho,$$

refraktsiooni-
indeks

õhu tihedus

Seega kõrgemale tõustes õhu murdumisnäitajad (igal värvusel oma murdumisnäitaja) vähenevad. Seega atmosfääri ülapiirile langenud kiired satuvad järjest tihedamatesse kihtidesse ja murduvad aluspinna poole. Punased kiired kõige vähem, violetsed kõige enam.

astronoomiline refraktsioon – kogu atmosfäärikihti läbinud valguskiire kõverdumine

aluspinnalähedane refraktsioon – aluspinnalähedaste õhukihtide anomaalsest temperatuurijaotusest põhjustatud valguskiire kõverdumine

Demo2: REFRAKTSIOON AKVAARIUMIS.

4.4. Nähtused, mida põhjustab astronoomiline refraktsioon

Roheline kiir

Kui päike loojub, siis viimastena peaksime nägema päikeseketta ülaservalt lähtuvaid violetseid kiiri. Mõnikord see ka nii on. Arvutuste järgi on violetsete ja punaste kiirte vaheline nurk 38”.

Kuid harilikult koosneb madalal asuva päikese korral päiksevalguse spekter siiski vaid **punastest** ja **rohelistest** kiirtest, sest:

- suurema osa kollasest ja oranžist valgusest neelavad veeaur ja osoon,
- lilla ja sinine valgus nõrgenevad tunduvalt hajumise tõttu.

Seega tegelikkuses on viimased nähtavad loojanguaegsed päiksekiired mõnikord rohelised, nn *roheline kiir*.

Nähtust on soodne jälgida merel, sest mere kohal on vähem pilvi ja horisont on ekraanierimata (pilvisus kasvab horisondi suunas). Samuti on mere kohal vähem tolmu. Maismaa kohal on õhk tavaliselt nii tolmuine, et ka rohelised kiired hajuvad ilma oodatud efekti tekitamata – kui loojuv päike on väga punane, ei ilmu roheline kiir peaaegu kunagi. Ka mägedes, kus õhk on puhtam, võib kannatlik loodusevaatleja elus mõne korra rohelist sähvatust näha.

Päikese tõusu ajal on olukord vastupidine, esimestena peaksime nägema rohelist päikeseketta ülaserava.

Demo3: ROHELINE KIIR (atmosfääri imiteerimine veevanni ja peegliiga).

Päeva pikkuse suurenemine

Astronoomilise refraktsiooni tõttu paistab, et taevakehad (Päike, Kuu, tähed) asuvad horisondist kõrgemal kui on seda tegelikult.

Refraktsiooni tõttu tuleb Päike hommikul nähtavale enne horisondini jõudmist ning on nähtav õhtul pärast loojumist horisondi taha. Päeva pikkuse suurenemine sõltub vaatluskoha geograafilisest laiuusest ning aastaajast.

Tallinna laiustel pikeneb päev kevadisel ja sügisel pööripäeval ca 8 min ja suvisel pööripäeval 12 min.

Poolusel on polaarpäev pikem polaarööst 14 ööpäeva võrra. Väga tugeva refraktsiooniga saab seletada Päikese lühiajalist (mõnest minutist poole tunnini) anomaalset ilmumist polaaröö ajal.

Novaja Zemljal on Päike tõusnud isegi 10–14 päeva enne polaaröö lõppu, ajal, mil Päike peaks asuma veel 4–5° allpool horisonti. Nähtust kutsutakse *Novaja Zemlja efektiks*.

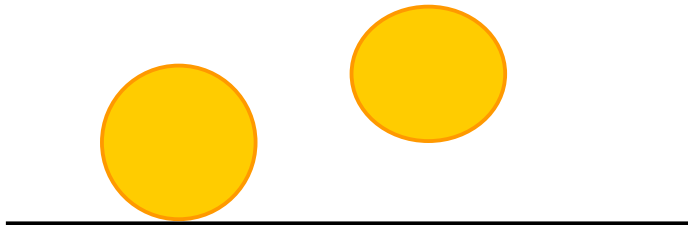
Päikese ja kuuketta deformeerumine

Päikeseketta nurkdiameeter on 32'.

Kui päikeseketta (kuuketta) alumine serv atmosfääri puudumisel puudutab horisonti, siis ülemine peaks olema 32' kõrgemal. Refraktsiooni tõttu tõuseb alumine serv 35' kõrgemale ja ülemine serv vaid 28'. Päikeseketta vertikaalne nurkmõõde on siis refraktsiooni tõttu

$$32' - (35' - 28') = 25'.$$

Talvel Siberi antitsükloni ajal või polaaraladel võib päikeseketta deformeerumine olla veelgi suurem.



Joon. 4.5. Päikese- või kuuketta deformeerumine horisondi kohal.

4.5. Aluspinnalähedane refraktsioon – miraaž

Miraaž – pr. *mirage*, kangastus, meelepete, terendus, õhupeegeldus – optiline atmosfäärinähtus, mille puhul on kas esemega samal ajal või eseme asemel (ese ise asub horisondi taga) nähtav selle eseme niisama suur, suurem, väiksem või mitmekordne kujutis, mis võib asetseda eseme all (*alumine miraaž*), eseme kohal (*ülemine miraaž*) või kõrval (*külgmiraaž*).

Miraaž tekib valguse peegeldudes ja murdudes erisuguse tihedusega õhukihtide piiril, näit. kõrbes, steppides, kus õhk on selge taeva korral öösel jahtunud ja soojeneb hommikul vaid maapinna lähedal; päikese käes kuumenenud maanteed, müüride ja vee kohal (alumine miraaž); sooja õhukihi asumisel väga külma veekogu kohal (ülemine miraaž) jne.

Joon. 4.6. Alumise miraaži korral paikneb optiline kujutis objektist allpool.

Joon. 4.7. Ülemise miraaži korral paikneb optiline kujutis objektist kõrgemal.

5. VALGUSE INTERFERENTS

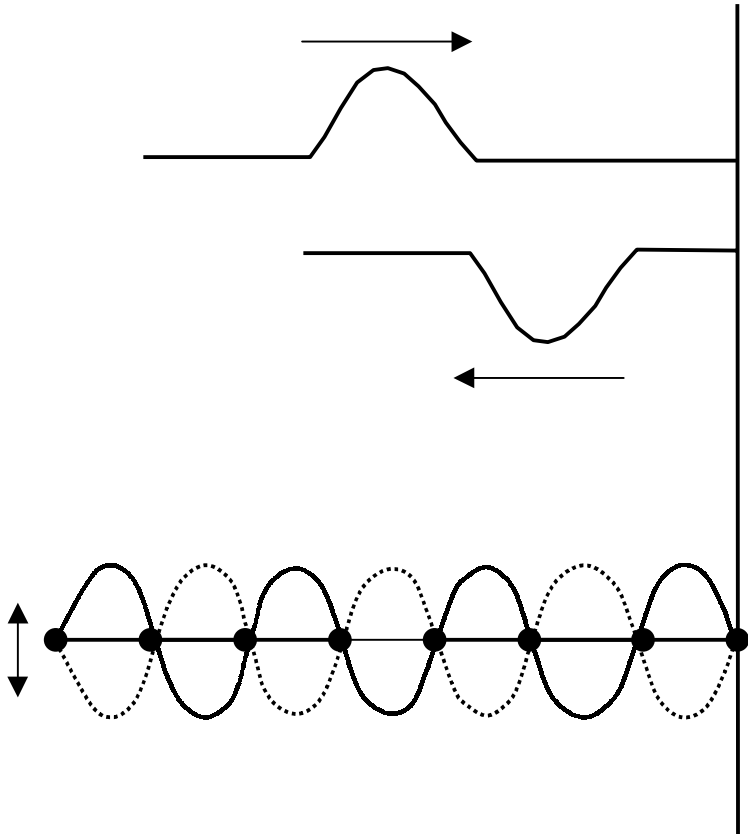
Interferentsiks nimet. mitme (harilikult kahe) kulgeva laine liitumisel uue, nn seisva laine tekkimist.

Mis on seisev laine? Selline laine, mille sõlmed on paigal.

Tüüpiline seisva laine näide on seinä külge kinnitatud võnkuv kumminöör. Kulgeva ja peegeldunud laine mehhanismi jälgimiseks tekitame kumminööri häirituse pikkusega $\frac{1}{2}$ lainepikkust. Häiritus levib seinani ja peegeldub sealt vastavalt peegeldumisseadustele tagasi vastasfaasis. Kui kumminööri vaba otsa sobivas rütmis pidevalt üles-alla liigutada, saame kaks vastassuunas liikuvat lainet – üks laine liigub seinä suunas, teine seinast eemale.

Saab teoreetiliselt tõestada ja ka katseliselt näidata, et teatud punktides, sõlmedes, on kulgev ja peegeldunud laine pidevalt vastasfaasis, mistõttu kustutavad teineteist (joon. 5.1).

Teatud punktides on liituvad lained jälle samas faasis ja tugevdavad üksteist, tekitades uue laine ekstreemumpunktid (e. maksimum- ja miinimumpunktid).



Joon. 5.1. Kulgeva ja peegeldunud laine liitumisel tekib nn seisev laine (sõlmpunktid paigal).

Demo1: Kulgeva ja peegeldunud laine tekitamine kumminööriaga.

Interferentsi tekkimiseks peavad liituvad lained olema koherentsed, st et igas liitumispunktis peab liituvatate lainete faasivahe jääma konstantseks (naabruses asuvas liitumispunktis on faasivahe loomulikult teistsugune).

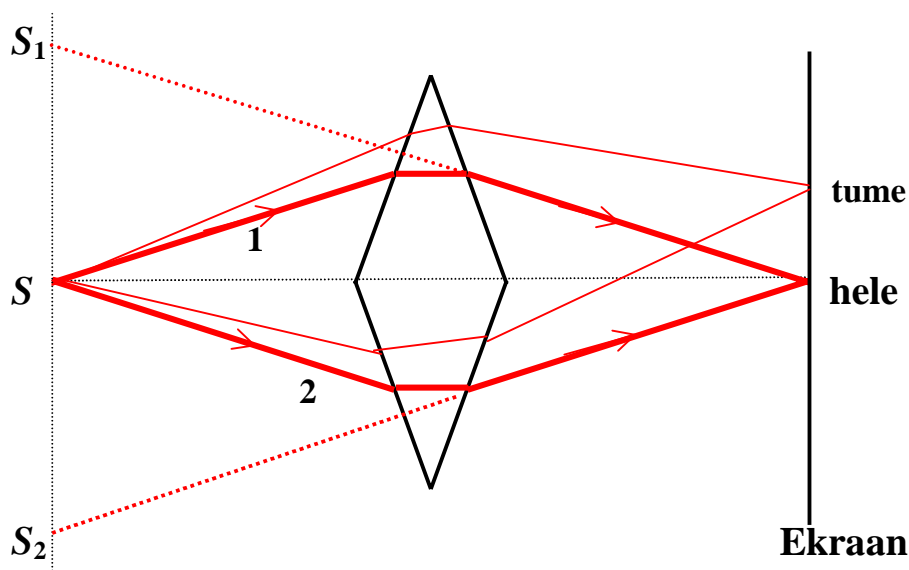
cohaerens – lad. k. tihedas seose olev, kokkukuuluv

Optiliselt homogeenne keskkonna puhul rahuldavad koherentsuse nõuet ühesuguse sagedusega lained.

Koherentsete lainete liitumisel tekibki interferents – osades punktides lained tugevdavad, osades nõrgestavad üksteist.

Pöördume tagasi valguslainete juurde, mille interferentsi paremaks jälgimiseks peavad liituvad lained olema monokromaatsed. Liitvalguse puhul on interferentsi jälgimine raskendatud tekkiva “vikerkaareefekti” tõttu.

Tänapäeval saab monokromaatset valgust tekitada laseri abil. Ajalooliselt tuli aga kõigepealt liitvalgusest filtri või prisma abil eraldada monokromaatne kiirtekimp, see lahutada kaheks osaks, millede uuesti kokkujuhitumisel interferentspilt saadi. Kirjeldame klassikalist katset Fresneli prisma abil, kus valgusallikas asub punktis S (joon. 5.2). Ekraanil interfereeruvad näivatest identsetest valgusallikatest S_1 ja S_2 lähtunud kiired.



Joon. 5.2. Interferentspilt Fresneli prisma.

Demo2: Interferentspilt Fresneli prisma

Meenutame interferentsikatset veevannis (joon. 5.3), kus:

$$\left. \begin{array}{l} \text{hari} + \text{hari} \\ \text{põhi} + \text{põhi} \end{array} \right\} = \text{tugevnemine} \qquad \left. \begin{array}{l} \text{hari} + \text{põhi} \\ \text{põhi} + \text{hari} \end{array} \right\} = \text{nõrgenemine}$$

Demo3: Interferents veevannis

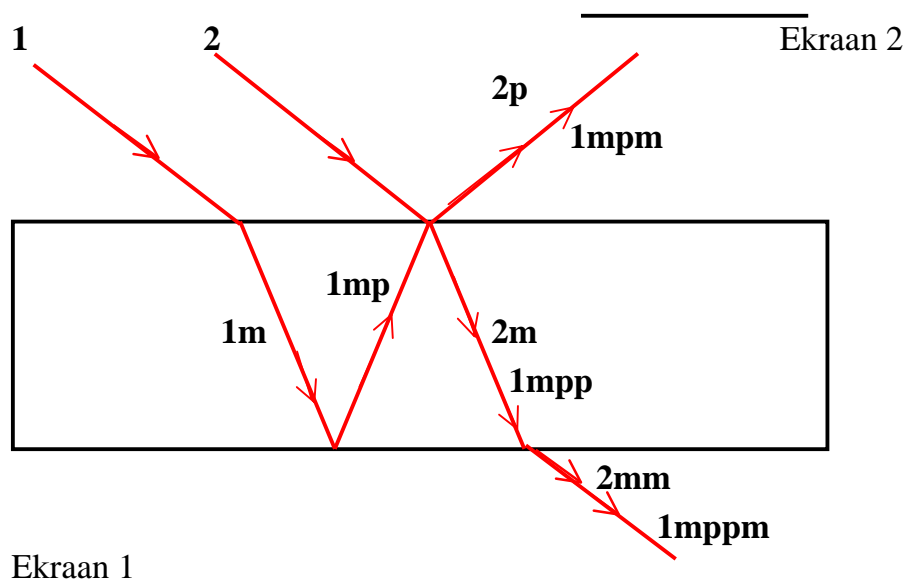
Joon. 5.3. Interferents veevannis (soovitav joonis iseseisvalt sirkliga joonestada).

Suure praktilise tähtsusega on nn samakalde interferentspildi tekkimine klaasplaadi abil. Joonisel 5.4 langeb klaasplaadile ülalt paralleelsete kiirte kimp. Konkreetselt on kujutatud kiiri **nr. 1** ja **nr. 2**. Kahe keskkonna lahuspiiril laguneb kumbki kiir kaheks – üks osa kiirest murdub edasi teise keskkonda, teine osa kiirest peegeldub tagasi lähtekeskkonda. Pärast plaadi läbimist liituvad kiired, mis on erinev arv kordi plaati läbinud ja seetõttu on erinevas faasis.

Kiirte teekonna markeerimiseks on kasutatud järgmisi tähistusi:

m – murdunud kiir, **p** – peegeldunud kiir.

Näit: **1mpp** = kiir nr. **1**, mis on **m**urdunud, **p**eegeldunud ja veelkord **p**eegeldunud.



Joon. 5.4. Samakalde interferentspildid klaasplaadi abil.

Demo4: samakalde interferents klaasplaadi ja laseriga

Ekraanil tekkivate interferentsrõngaste (või interferentsribade, vastavalt sellele, milline on esialgse kiirtekimbu ristlõige) läbimõõdu, plaadi paksuse, klaasi murdumisnäitaja ning ekraani kauguse järgi saab suure täpsusega määrata kasutatud valguse lainepikkust.

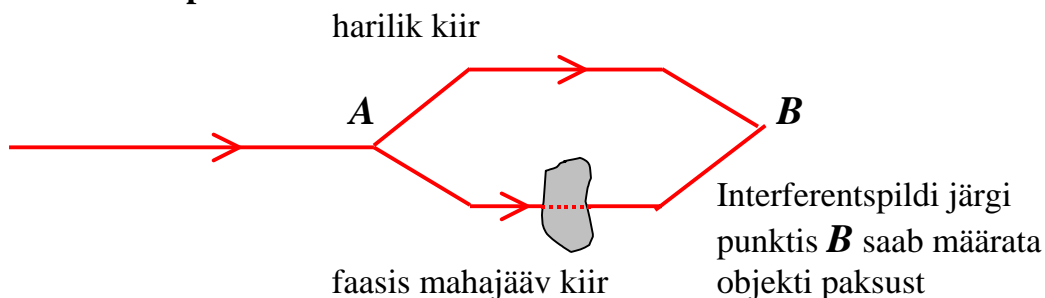
Teisalt, teades valguse lainepikkust (näit. monokromaatsete laserite lainepikkus on harilikult teada), saab interferentsrõngaste mõõtude järgi eksperimentaalselt määrata materjali (klaasi) murdumisnäitajat, mis on tähtis optiliste materjalide tootmisel.

Interferentsil on veel kolmas rakendus – teades nii valguse lainepikkust kui keskkonna murdumisnäitajat, saab kontrollida pikkusühiku etaloni pikkust või isegi rajada pikkusühiku (meetri) definitsioon mingi monokromaatse valguse lainepikkusele:

meeter on võrdne krüptooni isotoobi $^{86}_{36}\text{Kr}$ poolt vaakumis kiiratud oranži valguse 1 650 763. 73 kordse lainepikkusega.

Samakalde interferentspilti tekitavad ka õlilaigud veepinnal (vikerkaarevärvides laigud) – visuaalne informatsioon õlireostusest.

Interferentsmikroskoop



NB! Valguse interferents on üks nähtustest, mis tõestab valguse laineloomust.

6. VALGUSE DIFRAKTSIOON

6.1. Huygensi printsiip difraktsiooninähtuste põhjendamisel

Difraktsiooniks nimet. lainete paindumist tõkete taha.

Kui lainetus homogeeses (ühesuguses) keskkonnas levib sirgjooneliselt, siis kohtumisel tõkkega toimub kõrvalekaldumine sirgjoonelisest levikust ning lainetus paindub tõkke taha.

Difraktsioon nagu interferentski on omane kõigile lainetele. Mida väiksemad on tõkked, seda paremini lained (ka valguslained) nende taha levivad.

Näiteid difraktsiooni kohta:

- 1) hääle kandumine üksiku puu või maja taha,
- 2) veepinnal leviva laine paindumine tõkke, näit. paadi, ääre taha geomeetrilise varju piirkonda (joon. 6.1),
- 3) lainete leviku teel oleva takistuse ava muutumine laineallikaks (joon. 6.2).

Joon. 6.1. Difraktsiooni tõttu levib laine geomeetrilise varju piirkonda.

Joon. 6.2. Difraktsiooni tõttu muutub laine teele jääva takistuse väike ava laineallikaks.

Difraktsiooni tekkimist selgitab Huygeni printsiip (ei tõestata, samuti nagu Newtoni seadusi), mis võimaldab konstrueerida lainefronsti hetkel $t + \Delta t$ varasemale ajahetkele t vastanud lainefronsti järgi ja selgitada lainete levimist tõkete taha ning väikeste avade muutumist laineallikaks.

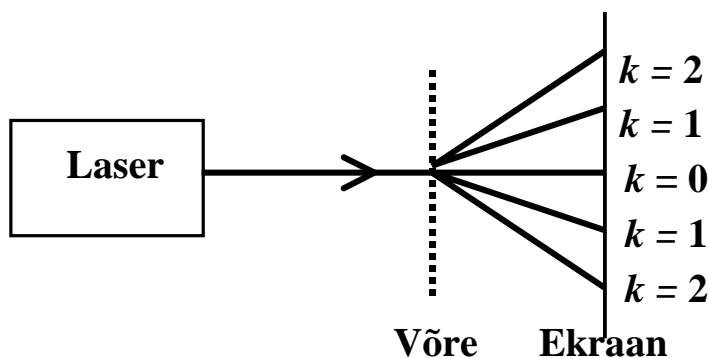
Uurime nüüd valguse difraktsiooni tihedal võrel, nn difraktsioonivõrel.

Difraktsioonivõre on läbipaistev plaadike, millele on võrdsete vahemike järel kantud kriipsud tihedusega 100–1800 joont/mm.

Kuidas seda tehniliselt teha? Enamlevinud võimalused:

- 1) mehhaaniline graveerimine teemantnõelaga klaasplaadile,
- 2) vähendatakse fotograafiliselt suurema võre kujutist.

Oletame, et meil on võre olemas, suuname sellele kitsa laserikiire (joon. 6.3).



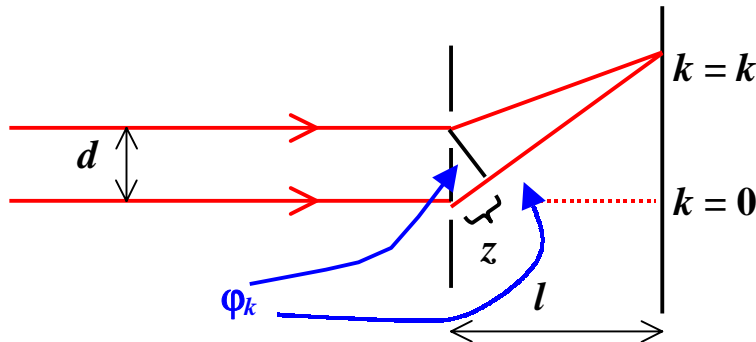
Joon. 6.3. Difraktsioon võrelt.

(Märkus: klassikalise skeemi järgi paigutatakse võre ja ekraani vahele paralleelseid kiiri koondav lääts. Kuid kitsa laserikiire puhul tekib hästi vaadeldav difraktsioonipilt ka ilma läätseta. Seepärast on demonstratsioonikatsetes loobutud läätsesest.)

Demo1: difraktsioon mitmesuguste võrede ja laseritega

Vastavalt Huygensi printsiibile muutuvad võre avad sekundaarlainete allikaks, mis kiirgavad valgust kõikides suundades. Vaatame võre suurendatud skeemil valguse levikut kahest naaberavast ja k -nda maksimumi teket (joon. 6.4).

Võrest paremale tekkisid vastavalt ristuvate haaradega nurgad φ_k , mille haarad määravad suurema ja väiksema täisnurkse kolmnurga. Suurema kolmnurga vertikaalne kaatet asub ekraanil (valgusmaksimumide $k = 0$ ja $k = k$ vahekaugus), horisontaalne kaatet on võrdne ekraani ja võre vahelise kaugusega l . Nurga φ_k tangens on võrdne vertikaalse ja horisontaalse kaateti jagatisena.



Joon. 6.4. Difraktsioonivõre suurendatud skeem, võrekonstant d .

Väiksema kolmnurga väiksema kaateti tähistame z -ga.

Maksimumi nr k tekkimiseks naaberavadelt lähtunud kiirtelt peab lõigule z mahtuma täisarv (k) laineid:

$$z \approx k\lambda, \quad (6.1)$$

Ligikaudne võrdus asendub täpsega, kui vaadeldakse võre naaberavadelt lähtuvaid paralleelseid kiiri, see on siis kui võre ja ekraani vahele on paigutatud paralleelseid kiiri koondav lääts. Täpsete difraktsioonmõõtmiste korral kasutatakse lääts, oletame edaspidi, et meil on katseskeemis ka lääts, seetõttu

$$z = k\lambda, \quad (6.2)$$

$$z = d \sin \varphi_k, \quad (6.3)$$

$$k \lambda = d \sin \varphi_k, \quad (6.4)$$

$$\lambda = \frac{d \sin \varphi_k}{k}. \quad (6.5)$$

Saadud valemit saab kasutada:

- 1) valguse lainepikkuse määramiseks, kui võrekonstant on teada,
- 2) võrekonstandi määramiseks, kui valguse lainepikkus on teada,

- 3) väikeste osakeste (näit. erütrotsüütide e. vere punaliblede) läbimõõdu määramiseks – tilk verd hõõrutakse õhukese kihina klaasplaadile, moodustub bioloogiline "difraktsioonivõre", juhtides sellest läbi laserikiire, saab tekkinud difraktsiooniringide mõõtmete järgi arvutada erütrotsüütide keskmise läbimõõdu.

6.2. Fresneli täiendus Huygeni printsiibile

Eespool öeldu tõendab, et difraktsiooninähtusi (lainete paindumist tõkete taha) saab esimeses lähenduses seletada Huygeni printsiibiga (lainefrondi iga punkt muutub sekundaarse keralaine allikaks. Kuid nimetatud printsiip annab vähe andmeid liitlaine amplituudi, seega ka erinevates suundades levivate lainete intensiivsuste kohta.

Selle puuduse kõrvaldas A. J. Fresnel, kes täiendas Huygeni printsiipi kujutlusega sekundaarlainete interferentsist – *lainefrondilt lähtuvad koherentsed (sama sageduse ja faasiga) sekundaarlained*. Sekundaarlainete amplituudide ja faaside arvestamine võimaldab leida liitlaine amplituudi igas ruumipunktis peegeldumisel, murdumisel jne.

Difraktsiooni uurimisel jaotas Fresnel sfäärilise lainepinna (lainefrondi) rõngakujulisteks tsoonideks, mis konstrueeritakse nii, et iga tsooni servast valguse leviku lõpp-punkti võetud kaugused erinevad üksteisest $\lambda/2$ võrra. Kahe naabertsooni vastavatest samaväärsetest punktidest (s.o. punktidest, mis asuvad tsoonide keskel, ühel või teisel välisserval jne) lõpp-punkti saabuvad võnkumised on vastasfaasides ja nõrgendavad üksteist (joon. 6.5).

Joon. 6.5. Lainefrondi jaotamine tsoonideks.

Kujutleme nüüd, et meil on difraktsiooni uurimiseks väike ringikujuline ava, mida läbib tsoonideks jagatud lainefront, selline nagu joonisel 6.5.

Ekraanil asuvas punktis **P** liituvad lainefrondi tsoonidest lähtunud lained. Kui tsoonide arv on paarisarv, siis tsoonide lained kustutavad üksteist. Tulemuseks on tume laik punktis **P**.

Kui aga tsoonide arv on paaritu, siis ühele tsoonile (näit. esimesele) ei ole paarilist ja see tsoon valgustab punkti P , tulemuseks on hele laik punktis P . Kogu lainepinna mõju punktile P on sisuliselt põhjustatud ühe tsooni poolt.

Tsooniteooriat kasutades saab tõestada, et ümmarguselt avalt tekkinud difraktsioonipilt koosneb vaheldumisi asetsevatest heledatest ja tumedatest kontsentrilistest rõngastest. Pildi keskel on kas hele täpp (ava läbinud laine fronti mahub paaritu arv Fresneli tsoone) või tume täpp (paarisarv tsoone).

Ekraani nihutamisel difraktsiooniavast eemale või lähemale vahelduvad difraktsioonipildid vastavalt Fresneli tsoonide arvule (joon. 6.6), difraktsioonipildi keskel vahetuvad nihutamisel hele ja tume laik. Ava suurenedes difraktsioonipildi kontrastsus väheneb, ekraanil jääb domineerima ava geomeetiline kujutis.

Joon. 6.6. Ringikujulise ava difraktsioonikujutise keskel võib olla hele või tume laik.

Demo2: difraktsioon avalt

6.4. Poissoni täpp

Kui tsoonideks jagatud laine front langeb läbipaistmatule väiksele kettale, siis ketas katab kinni osa laine fronti tsentraalseid tsoone. Heleduse jaotust ekraanil võib lihtsustatult selektada järgmise arutlusega.

Järelejäävate, katmata tsoonide mõju ekraani keskel oleva kujutise moodustumisel on kahanev tsooni mõõtmete suurenemisel – mida pikema tee läbib kiirus enne ekraani, seda väiksem on “kasulik” ruuminurk ja seda vähem valgusenergiat jõuab ekraanile. Kõige suurem mõju on esimesel vabal tsoonil, ülejäänud tsoonid enam-vähem kustutavad üksteist.

Seega – läbipaistmatult väikeselt kettalt saadud difraktsioonipildi keskel on alati hele täpp, nn *Poissoni täpp*.

Nimetus, *Poissoni täpp*, on seotud 19. s. alul Prantsuse TA poolt korraldatud konkursiga difraktsiooniteemasse selguse toomiseks. Võitis noore sõjaväeinsener Augustin Fresneli laineteooriale põhinev konkursitöö (1818. a.). Kuid Newtoni korpuskulaarteooria pooldajate kahtlused säilisid. Üks tuntuimatest Fresneli kriitikutest oli S. D. Poisson, kes pidas laineteooriat ekslikuks, kuna sellest järeldus “absurdse” heleda täpi olemasolu läbipaistmatu väikese ketta varju keskel.

Kuid D. F. Arago tegi kohe vastava katse, mille tulemusena ikkagi selgus, et selline täpp on tõepoolest olemas (ketta suurenedes difraktsioonipilt kaob, tõmbudes kokku ketta geomeetriliseks varjuks). Valguse laineteooria sai üldise tunnustuse.

Demo3: Poissoni täpp

6.4. Fresneli tsooni- ja faasiplaadid

Tsooniplaat

Paaris- ja paaritute Fresneli tsoonidest pärinevad võnkumised on vastasfaasides ja nõrgestavad üksteist. Kui difraktsiooniavasse, valguslaine teele, asetada plaat, mis katab kas

1) kõik paaristsoonid,
või

2) kõik paaritud tsoonid,

siis võnkumise amplituud ekraanil punktis P kasvab järsult (mitu korda). Sellist plaati nimetatakse *tsooniplaadiks*. Joonisel 6.7 on suurendatuna kujutatud tsooniplaat, mis katab paaristsoonid (teine, neljas jne tsoon on värvitud mustaks).

Joon. 6.7. Paaristsoone kattev tsooniplaat (esimene, e. tsentraalne tsoon on avatud).

Tsooniplaat läätsena

Kui *camera obscura* ava asendada tsooniplaadiga, paraneb kujutise kvaliteet. Tsooniplaat toimib läätsena.

Demo4: tsooniplaat läätsena

Faasiplaat

Veel suurema efekti kui paaris- või paaritud tsoone kattes võib saavutada sel teel, et kasutame ära ka kaetud tsoonidest pärinevad võnkumised, kuid muudame nende faasi π võrra. Seda saab teha läbipaistva plaadiga, mille paksus on erineb sobivalt valitud kohtades, mis vastavad paaris- ja paaritutele tsoonidele. Sellist plaati nimetatakse *faasiplaadiks*. Tsooniplaadiga võrreldes suurendab faasiplaat ekraani mingisse punktisse jõudva valguse amplituudi kaks korda (sest lainefrondi lähtepunktide arv kahekordistub), ekraanile ajaühikus jõudva valgusenergia kogus (valguse võimsus) aga neli korda.

6.5. Augustin Fresnel (1788–1827)

Prantsuse suurtükiväeinsener, kes optikaprobleemidega jõudis tegelda oma lühikesest elust vaid 12 aastat. Prantsuse TA (1823) ja Londoni Kuningliku Seltsi liige (1825).

Valguse laineteooriat kasutades uuris Fresnel interferentsi, difraktsiooni ja polarisatsiooni ning leiutas optikariistu.

Fresneli lääts. Sfääriliste pindadega läätsel asemel saab kujutise tekitada väikeste prisma-dega, mis lihtsaimal juhul on konstrueeritud esialgse läätsel jagamisel kontsentristeks tsoonideks. Selline konstruktsioon võimaldab läätsel paksust vähendada.

Kasutatakse prožektorite, majakatulede ja autolaternate katteklasises, grafoprojektorites, “tasapinnalises” suurendusklasises jne.

Demo5: Fresneli läätsed

Fresneli peegel. Analoogselt Fresneli läätsel idee saab vähendada nõgus- ja kumerpeeglite paksust, jaotades sfäärilise pinna osadeks ja asendades iga osa tasapinnale paigutatud peegलिएmendiga, mida pööratakse sobivalt, et saada samasugune peegeldus nagu algselt sfääri osalt. Lihtsaim sfäärilise pinna jagamine on kontsentristeks osadeks.

Fresneli peeglit kasutades õnnestus 1980tel oluliselt vähendada grafoprojektorite mõõtmeid. Vastavate portatiivsete grafoprojektorite levikut Eestis piirab esialgu nende kõrgem hind, võrreldes läätsprojektoritega.

NB! Difraktsioon on interferentsi kõrval teiseks tõendiks selle kohta, et valgus kujutab endast lainetust.

VALGUSE POLARISATSIOON, SAHHARIMEETRIA

7.1. Ristlainete polarisatsioon

Lainetus jaguneb kaheks eriliigiks:

- pikilainetus – võnkumine toimub tihenduste ja hõrendustena lainete leviku sihis,
- ristlainetus – võnkumine toimub risti laine levimissihiga.

Polarisatsioon tähendab lainetuse toimumist eelistatult mingis tasapinnas.

Polarisatsioon on omane ainult ristlainetele. Kuna valguslaine polariseerub, siis järelikult kujutab valgus endast ristlainetust.

Kui võnkumine toimub ainult ühes tasandis, nimet. võnkumist *täielikult e. tasapinnaliselt e. lineaarselt polariseerituks*. Vahepealne olukord polariseeritud ja polariseerimata olukorra vahel tähendab *osalist polariseeritust*.

Polarisatsiooninähtuse olemust on kõige lihtsam seletada mehhaaniliste ristlainete puhul, näiteks kummipaelal levivate võnkumiste abil.

Kumminöör võngub ühes tasandis, seega täielikult e. tasapinnaliselt polariseeritult. Selline võnkumine saab läbida vaid avasid, mis on orienteeritud võnkumisega samasse tasapinda.

Joon. 7.1: a) piki kummipaela leviv täielikult polariseeritud ristlaine läbib vabalt järjekust kahte kasti, sest kitsad avad kastide seintes on paralleelsed võnkumistega;

- b) teine kast summutab laine, sest tema pilu on risti tasandiga, milles võngub kummipael;
- c) kummipaela võnkumised toimuvad mitmes tasapinnas, kasti suudavad läbida vaid need võnkumised, mis toimuvad kasti avaga paralleelselt.

Seadist, mille läbimisel mittepolariseeritud laine muutub polariseerituks, nimetatakse *polarisaatoriks* joonisel 7.1 c on polarisaatoriks esimene kast.

Seadist, mis võimaldab kindlaks teha, kas teda läbiv laine on polariseeritud või mitte, nimetatakse *analüsaatoriks*, teine kast.

Polarisaator ja analüsaator ei erine mitte millegi poolest. Sama seadist võib kasutada nii polarisaatori kui analüsaatorina.

7.2. Valguse polarisatsioon

loomulik valgus – kuumade kehade poolt kiiratud valgus, soojuskiirguse nähtav osa

Loomulikus valguses toimub valguslaine võnkumine kõikides tasandites, ei ole eelistatud tasandit. Põhjuseks on loomuliku valguse laine koosnemine paljudest elementaarlainete lõikudest – lainejadadest.

Nimelt koosneb soojuskiirgusena saadud valguslaine väga suurest arvust üksikaatomite poolt kiiratud lainejadadest. Iga lainejada võnkumine on polariseeritud, st toimub mingis tasandis. Kuid tasandite asend on juhuslik ja liitlaines on erinevate sihtidega võnkumised esindatud võrdtöenäoselt.

Loomulikus valguses (päikesevalgus, kuumutatud kehade valgus) vahelduvad üksikute lainejadade erisihilised võnkumised üldkiiresti ja korrapäratult. Kokkuvõttes saadakse ajalise keskmisena nn polariseerimata valgus, kus võnkumine toimub kõikides ristsuundades.

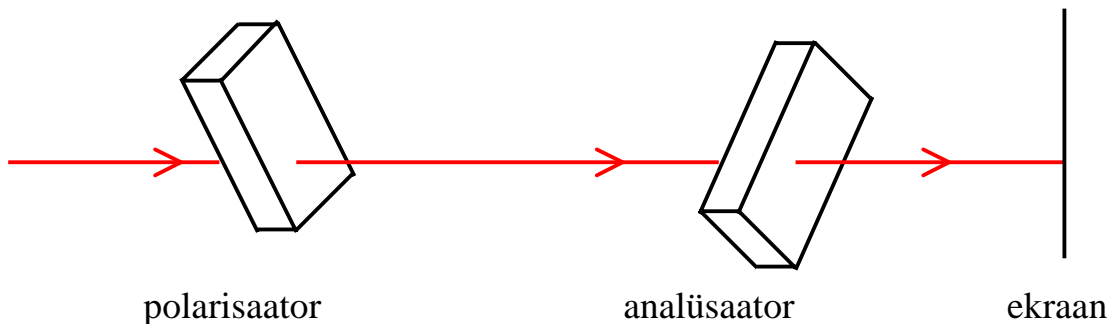
Võnkumistasandite polariseerimine tähendab mingite tasandite eelistamist.

Valgus muutub osaliselt või täielikult polariseerituks pärast interaktsiooni ainega – **pärast peegeldumist** (eriti dielektrikute lahutuspinnalt), **pärast murdumist**, **hajumist**, **pärast optiliselt aktiivse ainekihi läbimist**.

Esimesed valguse polarisaatorid tehti mineraali *turmaliin* kristallidest.

turmaliin – singali k., mineraal, täpsemalt – keeruka kujuga silikaat

Kui turmaliinist lõigata kaks plaati ja asetada need valguskiire teele, siis üht kristalli pöörates valguse intensiivsus ekraanil muutub (joon. 7.2).



Joon. 7.2. Turmaliniikristallide kasutamine valguse polarisatsiooni jälgimiseks.

Inimsilm ei ole võimeline eristama polariseeritud valgust polariseerimata valgusest. Vajalik on vastav filter, analüsaator, näiteks tükk turmalini või päevakivi, mida pöörates saab valguse intensiivsuse muutumise järgi hinnata valguse polariseeritust.

Demo: valguse polarisatsioon, polarisaator, analüsaator

Arvatakse, et polariseeritud valguse esmane praktiline kasutamine toimus muistsete viikingite poolt, kes peaaegu 500 aastat enne Kolumbust Ameerikasse jõudsid. Pilves ilma korral vaatasid nad taevast läbi vastava kristalli, mida pöörates määrasid Päikese asukoha taevas (pilvedes hajunud valgus on pisut polariseeritud). Sellises navigatsioonis on pilved polarisaatori ja kristall analüsaatori osas.

Viikingid. Põhiliselt Skandinaavia päritolu meresõitjad. Nimetus pärineb arvatavasti muinas-skandinaavia keelest, *vik* 'laht'. Lääne-Euroopas nimetati viikingeid normannideks Vana-Venes varjaagideks ja russideks. Praeguste teooriate järgi (sh T. Heyerdhali viimaste aastate sensatsioonilised väljakaevamised Rostovi lähedal) arvatakse neil olnud suur mõju Vana-Vene riikluse kujunemisel.

Viikingite retkede eesmärk oli piraatlus, kauplemine, maavallutus, kolonisatsioon. Kliima soojenemise ajal (9.s. p. Kr) tekkisid viikingite kolooniad Islandil, Gröönimaal (860), Venemaal, P.-Ameerikas.

Eirik Thorvaldsson, tuntud kui **Eirik Punane (Eirik the Red, Eric the Red)**, purjetas Gröönimaani (981) ja edasi piki Gröönimaa lõunaranikut läände ning avastas Baffini maa (Baffin Island, Labradori poolsaarest põhjas, kuulub praegu Kanadale). Ta pöördus tagasi Islandile (984), et juhatada viikingi kolonistide esimene laine Gröönimaale.

Bjarni Herjolfsson, Islandi kaupmees, alustas oma laevaga Islandilt Gröönimaa poole purjetamist 985. a., hiljem Eirik Punase juhitud kolonistidesst. Tugeva tormi tõttu Islandi ja Gröönimaa vahel kaldus ta liigselt lõunasse, möödus kaugel Gröönimaast, ja jõudis praeguse Newfoundlandi s. rannikuni. Seejärel pööras ta põhja poole ja purjetas piki Labradori ps rannikut 60nda paralleelini. Siis pöördus ta läände ja jõudis Gröönimaa lõunatippu (ca 60 °N), kus kohtus kolonistidega. Ta jutustas mägisest, paksude metsadega kaetud maast kaugel läänes. Seega oli Bjarni Herjolfsson arvatavasti esimene eurooplane, kes nägi Ameerika kontinenti, kuid tema maabumise kohta ei ole tõendeid.

Leiv Eirikssoni (Leif Eriksson, Leif Ericson), Eirik Punase poja sünniaeg ja koht ei ole selged, kuid arvatavasti kasvas ta Gröönimaal. Aastal 995 ostis ta Bjarni laeva. Nagu tol ajal oli kombeks Islandi prominentide poegadel, purjetas ta Norrassa (999. a.), et olla mõnda aega kuningas Olav Trygvassoni teenistuses. Aasta pärast saadeti ta tagasi, et viia Gröönimaale ristiusk. Tema edasiste rännakute kohta on kaks teooriat.

Esimese teooria järgi kaldus ta Gröönimaale tagasi purjetades kursist kõrvale ja sattus **aastal 1000** juhuslikult Ameerika rannikule.

Teise, teadlaste poolt rohkem toetatava teooria järgi, ei olnud tema avastus juhuslik. Nimelt üritas ta leida Bjarni Herjolfssoni poolt kirjeldatud mägist, paksude metsadega kaetud maad. Selleks purjetas ta vastupidises suunas Bjarni ekspeditsioonile. Ta randus kolmel korral (**aastal 1000**), esmalt Hellulandil (Labradori ps), siis tõenäoliselt Newfoundlandil. Kolmandale maabumiskohale andis ta nimeks *Vinland* – viinamarjade järgi, mis seal tol ajal kasvasid. Arvatavasti oli see samuti Newfoundland. Ta talvitas Vinlandil ja jõudis tagasi Gröönimaale 1001. a.

Kuigi paljud peavad praeguseni Kolumbust Ameerika esmaavastajaks (1492), edestas Leiv Eiriksson teda peaaegu 500 aastaga. Seega oli Leiv Eiriksson esimene P.-Ameerika kontinendil maabunud eurooplane ja teda võib pidada selle maailmajao avastajaks. Ametliku tunnustuse sai Leiv Eirikssoni ekspeditsioon 1964. a., mil USA president Lyndon B. Johnson, toetatuna üksmeelselt Kongressi poolt, nimetas **9. oktoobri Leif Ericsoni päevaks**, tunnustusena Ameerika pinnale esimese eurooplasena astumise eest.

Praegu tundub kummalisena, et Leiv Eiriksson ei pöördunud kunagi Vinlandile tagasi. Järgmist ekspeditsiooni Vinlandile juhtis tema vend Thorvald Eiriksson. Asunduse rajamine ebaõnnestus põlielanike raevuka vastupanu tõttu.

On ka hüpotees, et rändlinnud suudavad määrata Päikese asukohta läbi pilvekihi ja niiviisi navigeerida oma sesoonseid rändeid.

Polarisatsioonifiltrid fotograafias. Fotogaafidel tekib mõnikord vajadus pildistada läbi klaaspinna – läbi autoakna, läbi klaasakna või -vitriini, läbi näituseeksponaati (maali) katva klaaskatte jne. Objekti pildistamist võib segada klaasipinnalt lähtuv, ümbritsevas ruumis asuvate muude objektide peegeldus. Soovimatu peegelduse kõrvaldamiseks kasutatakse polarisatsioonifiltreid. Viimaseid kasutatakse eelistatult koos peegelkaameraga, sest viimastes on võimalus läbi objektiivi kujutist vaadata ning polarisatsioonifiltrit pöörates jälgida peegelduse vähenemist.

7.3. Brewsteri nurk

Šoti füüsik Brewster (1781–1868) avastas, et polarisatsioonaste sõltub kiire langemisnurgast ja on maksimaalne, kui langemisnurk rahuldab tingimust

$$\tan \alpha_B = n \quad (\text{Brewsteri seadus}), \quad (1)$$

kus n on teise keskkonna murdumisnäitaja esimese suhtes ja indeks B märgib Brewsteri nurka.

Oletame, et kiir langeb õhust vette ja arvutame Brewsteri nurga.

Vee murdumisnäitaja õhu suhtes

$$n = 1.33,$$

seega Brewsteri nurk valguse langemisel õhust vette:

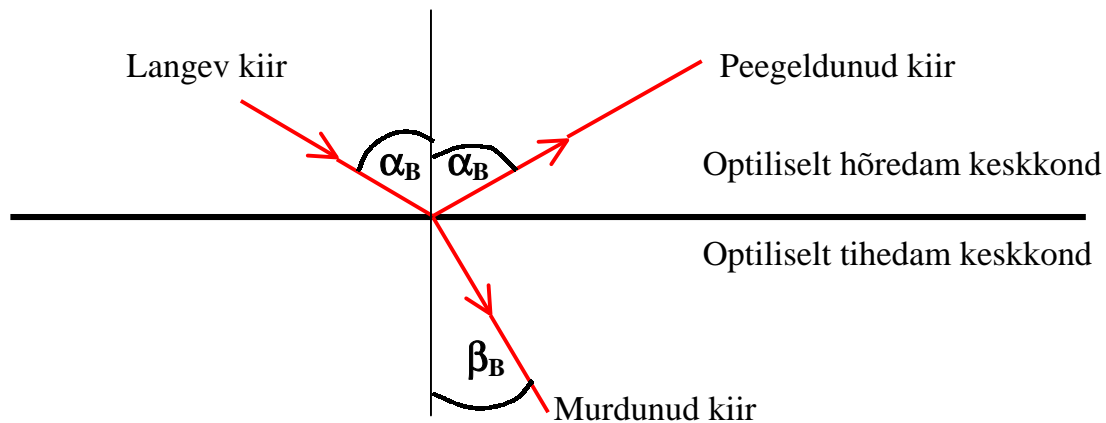
$$\alpha_B = \arctan n = \arctan 1.33 = 53.06^\circ \approx 53^\circ.$$

Brewsteri nurga korral:

- 1) peegeldunud kiir on täielikult polariseeritud, võnkumine toimub langemistasandiga risti (langemistasand on määratud langeva kiire ja pinnanormaliga),
- 2) murdunud kiir on polariseeritud osaliselt (elliptiliselt, mitte tasapinnaliselt, domineerivad võnkumised langemistasandis),
- 3) peegeldunud ja murdunud kiir on omavahel risti, st moodustavad täisnurga, seega ka

$$\alpha_B + \beta_B = 90^\circ. \quad (2)$$

Kiirte võimalik asend Brewsteri nurga korral on kujutatud joonisel 7.3.



Joon. 7.3. Brewsteri nurga korral on peegeldunud ja murdunud kiir omavahel risti.

Tõestame peegeldunud ja murdunud kiire ristseisu. Lähtume Brewsteri nurga korral kehtivast tingimusest

$$\tan \alpha_B = n$$

ja esitame selle murru kujul

$$\frac{\sin \alpha_B}{\cos \alpha_B} = n . \quad (3)$$

Kirjutame nurga α_B jaoks murdumiseseaduse

$$\frac{\sin \alpha_B}{\sin \beta_B} = n . \quad (4)$$

Võrdsustame valemite (3) ja (4) vasemad pooled

$$\frac{\sin \alpha_B}{\cos \alpha_B} = \frac{\sin \alpha_B}{\sin \beta_B} . \quad (5)$$

Võrdsete murdude korral järeldub lugejate võrdsusest ka nimetajate võrdsus, seega

$$\cos \alpha_B = \sin \beta_B , \quad (6)$$

teisendame parempoolset liiget

$$\sin \beta_B = \cos (90^\circ - \beta_B) , \quad (7)$$

asendades tulemuse valemisse (6), saame

$$\cos \alpha_B = \cos (90^\circ - \beta_B) , \quad (8)$$

millest

$$\alpha_B = (90^\circ - \beta_B) , \quad (9)$$

ehk

$$\alpha_B + \beta_B = 90 . \quad (10)$$

7.4. Polariseerimisastendi pööramine

On aineid, mis pööravad neile langenud lineaarselt polariseeritud valguse võnketasandit. Selliseid aineid nimetatakse *optiliselt aktiivseteks*. Võnketasandi pööramine on seda suurem, mida pikema teepikkuse valgus aines läbib.

Optiliselt aktiivsete ainete hulka kuuluvad:

- 1) mõned kristalsed ained (kvarts, kinaver);
kinaver (kr. *kinnabari* – punane värv), tähtsaim elavhõbedamaak, punane muldjas aine, tarvitatakse maalrivärvina;
- 2) mõned puhtad vedelikud (tärpentiin, nikotiin);
- 3) mõnede optiliselt aktiivsete ainete lahused mitteaktiivsetes lahustites (suhkrute ja viinhappe vesilahused).

Lahustes on polariseerimisastendi pöördenurk ψ võrdeline:

- 1) kiire teepikkusega l lahuses,
- 2) optiliselt aktiivse aine kontsentratsiooniga c :

$$\psi \sim c \cdot l,$$

$$\psi = [\alpha]_{\lambda, T} \cdot c \cdot l.$$

Võrdetegurit $[\alpha]_{\lambda, T}$ nimet. antud optiliselt aktiivse aine eripööranguks. Sõltub temperatuurist T ja lainepikkusest λ .

Temperatuuril $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja lainepikkusel 589 nm (Na D-joon) on suhkrulahuste eripöörangud järgmised:

roosuhkur e. sahharoos, $[\alpha]_{\lambda, T} = 66.52 \frac{\text{deg}}{\text{dm} \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}},$

viinamarjasuhkur e. glükoos, $[\alpha]_{\lambda, T} = 52.76 \frac{\text{deg}}{\text{dm} \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}},$

puuviljasuhkur e. fruktoos, $[\alpha]_{\lambda, T} = -91.50 \frac{\text{deg}}{\text{dm} \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}}.$

Sõltuvalt võnketasandi pööramise suunast jaotatakse optiliselt aktiivsed ained *paremale* või *vasemale* pööravateks.

Kui vaadata kiirele vastu, siis *paremale pöörduvas aines* pöörduv võnketasand kellaosuti liikumise suunas, *vasemale pööravas aines* kellaosuti liikumisele vastassuunas.

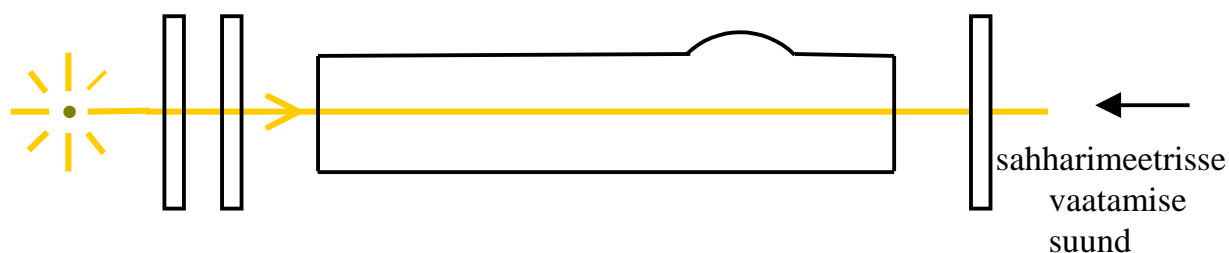
Optilisi riistu, millega mõõdetakse polariseeritud valguse võnketasandi pöördumist, nimet. *polarimeetriteks*.

7.5. Sahharimeeter

Polarimeetrit, mida kasutatakse suhkrulahuste kontsentratsiooni määramiseks, nimetatakse *sahharimeetriks*.

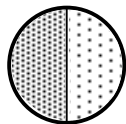
Sahharimeetri põhidetailid on:

valgusallikas, filter, polarisaator, küvett suhkrulahusega, analüsaator.



Joon. 7.4. Sahharimeetri põhimõtteline skeem.

Kasutamise hõlbustamiseks ja täpsuse suurendamiseks on tegelik sahharimeeter tunduvalt keerukam. On läätsed, vaatetoru jne. Kõige tähtsam täiustus – lisatakse skaalaga poolvarjuseade, mille abil ei otsita mitte minimaalset valgustatust, vaid vaatevälja mõlema poole võrdset valgustatust. Silm on väga tundlik märkama, kui kõrvuti asetsevate vaatevälja osade valgustatused erinevad. Seepärast saavutatakse polarisatsioonitasandi asendi määramisel poolvarjupolarimeetriga märksa suurem täpsus kui ainult polarisaatori pööramisega asendisse, kus valgustatus oleks minimaalne.



Joon. 7. 5. Vaateväli sahharimeetris.

NB! Polariseerimine tõendab valguse lainelist loomust ja seda, et valgus on ristlainetus.