

TARTU ÜLIKOOL
LOTE FI KOOLIFÜÜSIKA KESKUS

H. VOOLAIID

OPTIKA

LOENGUKURSUSE LOFY.01.089 KONSPEKT

TARTU 2012

1. Sissejuhatus.....	3
1.1. Optika aine ja mudelid	3
Ülevaade optika ajaloo tähtsündmustest.....	3
1.2. Elektromagnetlainete skaala.....	6
2. Fotomeetria	9
2.1. Valguse kiirus.....	9
2.2. Fotomeetrilisi ühikuid.....	10
2.3. Fotomeeter.....	14
3. Laineoptika	14
3.1. Elektromagnetlainet ja valguslainet.....	14
Valguslainet iseloomustavad suurused	16
3.2. Valguse levimine ja Huygens-Fresneli printsiip	17
3.3. Lainete liitumine ja koherentsus.....	18
3.4. Valguse difraktsioon.....	22
3.5. Interferentsi ja difraktsiooni rakendusi.....	25
3.6. Valguse polarisatsioon	28
Polarimeetria	32
4. Geomeetriline optika	34
4.1. Põhimõisted ja definitsioonid.....	34
4.2. Geomeetrilise optika põhiseadused	35
4.3. Fermat' printsiip	37
4.4. Valguse täielik peegeldumine (sisepeegeldus).....	39
4.5. Kujutise tekitamine läätsede ja peeglitega	40
4.5.1. Kujutise tekitamine kumerläätsel.....	40
4.5.2. Kujutise tekitamine nõgusläätsel.....	42
4.5.3. Kujutise tekitamine nõguspeeglil.....	43
4.5.4. Kujutise tekitamine kumerpeeglil	44
4.6. Silm.....	44
4.7. Luup ehk suurendusklaas	46
4.8. Mikroskoop	46
4.9. Pikksilm	48
5. Valguse ja aine vastastikmõju.....	49
5.1. Valguse dispersioon.....	49
5.2. Valguse neeldumine.....	51
6. Kvantoptika.....	53
6.1. Footon	53
6.2. Fotoefekt	53
6.3. Teisi nähtusi, kus avaldub valguse kvantiseerumine.....	56
7. Kiirgused.....	58
7.1. Spektrid	58
7.2. Soojuskiirgus	60
7.3. Luminestsents.....	61
7.4. Laserkiirgus.....	64
Optika eksamiküsimused	65

1. Sissejuhatus

1.1. Optika aine ja mudelid

Optikaks nimetatakse teadust, mis käsitleb elektromagnetkiirguse levimist ning ainega vastastikmõjusid lainepikkuste vahemikus $1 \dots 10^5$ nm. Meie piirdume peamiselt nähtava piirkonnaga (380.....760 nm).

Optikas kasutatakse kolme valguse mudelit: valguskiir, valguslaine, valguskvant.

Valguskiirt kasutatakse siis, kui on ainult oluline valguse levimise suund (näiteks peegeldumine, murdumine, jms.) ja pole oluline, milline on valguse olemus. Valgust kujutatakse koosnevat üksikutest pidevatest kiirtest. Sellise valgusekirjelduse võttis kasutusele Eukleides III sajandil e.m.a. Valguskiir on geomeetrilise optika (kiirteoptika) põhimõiste.

Valguskiire mudeliks on nool, mis näitab valguse levimise suunda.

Valguslaine mõiste võttis kasutusele C. Huygens 1678.a. pannes aluse valguse laineteooriale. Tollal arvati, et valguslained on mingid pikilained nagu helilained ja et need levivad mingis erilises nähtamatus aines – eetris, mis peitub kõikides teistes ainetes. 1865.a. püstitas J. Maxwell hüpoteesi, et valgulained on elektromagnetlained, mis levivad tühjuses valguse kiirusega c . Aluse selleks andis tema poolt loodud elektromagnetlainete teooria ja fakt, et arvutused andsid elektromagnetlaine levimiskiiruseks ka ca 300 000 km/s nagu oli määratud valguse kiirus. 1888.a. tõestas H. Hertz katseliselt, et valgulained on elektromagnetained.

Valguslaine mudeliks on elektromagnetlaine E - vektori ajaline ja ruumiline muutumine.

Valguskvandi mõiste võttis kasutusele I. Newton 1675.a. korpuskli nime all.

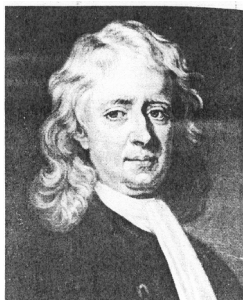
Korpuskliteks nimetas ta silmale nähtamatuid valguse osakesi. 1900. a. võttis M. Planck puhtformaalsetest asjaoludest lähtudes valguskvandi mõiste, mis aitas tal leida valemi absoluutselt musta keha kiirgusspektri arvutamiseks. Valguskvantide ehk footonite reaalsuse tõestas 1905.a. A. Einstein, andes seletuse fotoefekti katsetele.

Valguskvandi mudeliks on osake, millel pole seisumassi ja mis liigub kiirusega c . Osutub, et erinevate valgusnähtuste seletamiseks kasutatakse kas valguse lainemudelit või kvantmudelit. Mõningaid nähtusi (difraktsioon, interferents, murdumine, dispersioon) seletatakse lainemudeli abil, teisi (fotoefekt, Comptoni efekt, fotokeemilised reaktsioonid) kvantmudeli abil ja kolmandaid nii laine- kui ka kvantmudeli abil (valguse peegeldumine, valguse rõhk, kehade värvus). Sellepärast räägitakse valguse **dualismist** (omaduste kahesusest). valitseb seaduspärasus, et suuremate sageduste korral avalduvad rohkem valguse kvantomadused ja väiksemate sageduste korral laineomadused.

Õigem oleks rääkida valguse dualistlikust kirjeldamisest. Valgus on üks kindel loodusnähtus, mille kirjeldamiseks inimene kasutab kord lainemudelit, kord kvantmudelit.

Ülevaade optika ajaloo tähtsündmustest

*Valgusnähtuste teaduslik käsitlus sai alguse 17. sajandil, kui I. Newton püstitas hüpoteesi valgusest kui silmale nähtamatute osakeste voost, mis levivad ühtlases keskkonnas sirgjooneliselt. Neid osakesi nimetas ta **korpuskuliteks**, mida võib pidada nüüdisaegsete kvantide eelkäijateks.*



I. Newton

Isaac Newton [njuuton] (04.01.1643 – 31.03.1727) oli inglise teadlane. Avaldanud töid füüsikast, astronoomiast, matemaatikast. Tema formuleeritud on mehaanika kolm põhiseadust ja ülemaailmne gravitatsiooniseadus. Töötas välja diferentsiaal- ja integraalarvutuse.

Optikas on Newtoni panuseks valge valguse lahutamine **spektri**ks kolmetahulise prisma abil 1666.a. Avastas **kromaatilise aberratsiooni**. Konstrueeris peegelteleskoobi. Uuris valguse interferentsi ja difraktsiooni, avastas nn **Newtoni rõngad**. Pani 1675.a. aluse valguse korpuskulaarteooriale. Oma teenete eest omistati talle aadlitiitel.

Mõned aastad pärast Newtonit püstitas C. Huygens teise hüpoteesi, mille kohaselt valgus levib lainetena. Ta arvas, et valguslaine levimiseks on vajalik mingi eriline keskkond, mis täidab kogu universumi. Seda ainet nimetati **eetri**ks. Tänapäeval on teada, et mingit erilist, valguse levimiseks vajalikku keskkonda ei eksisteeri ja valgus levib ka tühjuses.



C. Huygens

Christiaan Huygens [h'öihens] (14.04.1629 – 08.07.1695) oli hollandi teadlane. Avaldanud töid füüsikast, astronoomiast ja matemaatikast. Avastas 1678.a. valguse **polarisatsiooni**. Pani aluse valguse laineteooriale 1678.a. Ja sõnastas valguse levimist seletava printsiibi – **Huygensi printsiibi**. Konstrueeris teleskoobile uut tüüpi okulaari (Huygensi okulaar) ja avastas Saturni rõngad 1655. Matemaatikas tegeles tõenäosusteooria rajamisega. Leiutas pendelkella.

Aastal 1802 tegi T. Young katseid, mis näitasid, et kitsast avast läbi minnes kaldub valgus oma esialgsest levimissuunast kõrvale, valguse teel oleva tõkke taha. Kuna veelained levivad ka tõkete, näiteks kivide taha, siis Youngi katse näitas, et valgusel on laineline olemus.

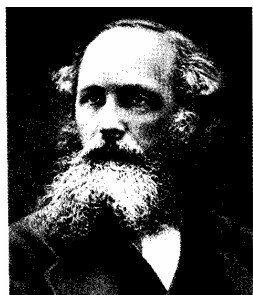


T. Young

Thomas Young (13.06.1773 – 10.05.1829) oli inglise teadlane. Avaldanud töid füüsikast, meditsiinist, egiptoloogiast.

*Tegi 1802.a. katse, millega tõestas valguse lainelise olemuse. Katsetulemuste seletamiseks võttis kasutusele termini “**interferents**”. Avastas ka helilainete interferentsi ja seletas seda lainete **superpositsiooniga**. Uuris materjalide elastseid omadusi ja võttis elastuse kirjeldamiseks kasutusele uue füüsikalise suuruse, mida tänapäeval kutsutakse **Youngi mooduliks**. Uuris ka Egiptuse hireoglüüfe ja värvusnägemist.*

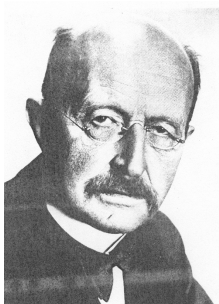
Järgmise olulise sammu valguse laineteoorias tegi J. C. Maxwell, kes 1865.a. tõestas teoreetiliselt, et on olemas elektromagnetlained, mis levivad ka tühjuses ja seda kiirusega $3 \cdot 10^8$ m/s. See tulemus langes küllalt hästi kokku tolleks ajaks määratud valguse kiirusega. Sellest järeldas Maxwell, et valgus on elektromagnetlaine.



J. C. Maxwell

James Clerk Maxwell (13.06.1831 – 05.11.1879) oli inglise füüsik. Avaldanud töid elektrodiinaamikast, molekulaarfüüsikast, mehaanikast. Formuleeris 1859.a. seaduse, mis kirjeldab gaasi molekulide jaotust kiiruste järgi. On elektromagnetvälja teooria rajaja. Formuleeris nn Maxwelli võrrandid, mis kirjeldavad kõiki elektromagnetnähtusi.

*Nüüdisaegsele valguse kvantteooriale pani aluse 1900.a. M. Planck, kes loobus valguse laineteooriast ja võttis kasutusele valgusosakesed ehk **kvandid**. Muidu ei suutnud ta teoreetiliselt seletada tahkete kehade **kiirgusspektreid**. Planck pidas kvante vaid teooriat lihtsustavateks abivahenditeks.*



M. Planck

Max Karl Ernst Ludwig Planck (23.04. 1858 – 04.09.1947) oli saksa füüsik, kvantteooriale alusepanija. Avaldanud töid ka **termodünaamikast**, soojuskiirgusest, relatiivsusteooriast. Võttis kasutisele kvandi mõiste ja sidus selle energia E ja vastava laine sageduse f võrrandiga: $E = hf$, kus esinevat võrdetegurit h tuntakse tänapäeval **Plancki konstandina**. Tuletas kvandi mõiste abil absoluutselt musta keha kiirgust kirjeldava valemi ja sai selle eest **Nobeli füüsikapreemia** 1918.a.

A. Einstein näitas 1905.a., et kvandid on reaalselt olemas, sest ta seletas nende abil ära **fotoefekti** katsed, mida laineteooria ei suutnud seletada.



A. Einstein

Albert Einstein (14.03.1879 – 18.04. 1955) oli saksamaal sündinud ning hiljem Šveitsi ja Ameerika Ühendriikide kodakondsusega juudi füüsik. Avaldanud töid **üld- ja erirelatiivsusteooriast**, **statistilisest füüsikast**, valguse kvantteooriast. Sai **Nobeli füüsikapreemia** 1921.a.

Kui eelnevat kokku võtta, siis tuleb välja, et valgusnähtusi pole võimalik kirjeldada **ainult** lainete või **ainult** osakeste (kvantide) abil. On nähtusi, mida saab seletada lainete abil ja teisi nähtusi saab seletada kvantide abil. On ka selliseid nähtusi, mida saab seletada nii lainete kui kvantide abil. Sellepärast öeldaksegi, et valgust saab kirjeldada kaheti või nagu füüsika keeles öeldakse: valgusele on omane **dualism**.

1.2. Elektromagnetlainete skaala

Elektromagnetlainetel võivad olla väga erinevad omadused ja seepärast on neil ka erinevad nimed. Suurt osa elektromagnetlaineid kutsutakse **kiirgusteks**. Ühe osa neist lainetest on inimene tekitanud ja pannud need ennast teenima. Näiteks raadiolained kannavad edasi infot, lambivalgus lubab inimestel pimedal ajal näha, infrapunakiirgus ehk infravalgus aitab teleka puldiga tööle panna. Aga ka vahelduvvool juhtmes tekitab enda ümber elektromagnetlaineid.

Teine osa lainetest aga tekib niisama, ilma inimese osaluseta. Näiteks Päikeselt tulev ultraviolettkiirgus ehk ultravalgus päevitab meid kenasti pruuniks, radioaktiivne kiirgus, mis tekib radioaktiivsete ainete lagunemisel ohustab meie tervist, jaaniusside salapärase kuma rõõmustab meid suveööl.

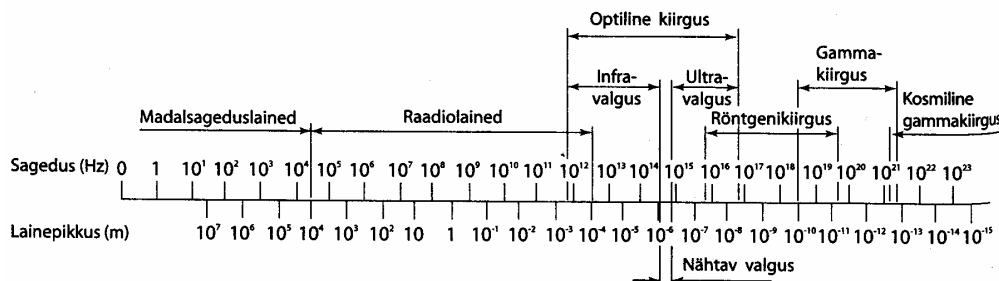
Kogu meid ümbritsev ruum on täidetud elektromagnetlainetega. Kõikidest elektromagnetlainetest näeb inimese silm ainult seda osa, mida nimetatakse **valguseks** ja mille sagedus jääb vahemikku $10^{14} \text{ s}^{-1} \dots 10^{15} \text{ s}^{-1}$.

Teistel elusolendel võivad tekitada nägemisaistingu aga tesitsuguste sagedustega elektromagnetlained. Näiteks maod tajuvad hästi infravalgust, aga mesilased ultravalgust.

Elektromagnetlaineid tajub inimene lisaks nägemisele ka **soojusena**. Seda tunnet tekitavad elektromagnetlained, mille sagedus jääb vahemikku $10^{12} \text{ s}^{-1} \dots 10^{15} \text{ s}^{-1}$.

Kõik elektromagnetlained levivad vaakumis ühesuguse kiirusega $c \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$. Tähis c tuleb ladina keelsest terminist *celeritas*, mis tähendab kiirust. Laine üleminekul ühest keskkonnast teise võib laine kiirus muutuda. See kutsus esile ka lainepikkuse muutumise, kuid laine sagedus sealjuures ei muutu kunagi.

Kui panna kõik elektromagnetlained üksteise kõrvale ritta sageduse muutumise järjekorras, siis saame nn **elektromagnetlainete skaala**. Samahästi võib laineid reastada lainepikkuste järgi.



Elektromagnetlained

Nimetus	Liik	Lainepikkus	Allikad
<i>Raadiolained</i>	- Ülipikad lained (VLF) - Pikad lained (LF) - Kesklained (MF) - Lühilained (HF) - Ultralühilained - meeterlained (VHF) - detsimeeterlained (UHF) - sentimeeterlained (SHF) - millimeeterlained (EHF)	$\infty \dots \dots \dots 10 \text{ km}$ $10 \text{ km} \dots 1 \text{ km}$ $1 \text{ km} \dots \dots 100 \text{ m}$ $100 \text{ m} \dots \dots 10 \text{ m}$ $10 \text{ m} \dots \dots 1 \text{ m}$ $1 \text{ m} \dots \dots 0,1 \text{ m}$ $10 \text{ cm} \dots \dots 1 \text{ cm}$ $1 \text{ cm} \dots \dots 1 \text{ mm}$	- Muutuv elektrivool, - generaatorite võnkeringid,
<i>Optiline kiirgus</i>	Infravalgus (IR)	$1 \text{ mm} \dots 760 \text{ nm}$	Soojad kehad
	Valgus	$760 \text{ nm} \dots 380 \text{ nm}$	Valgusallikad
	Ultravalgus (UV)	$380 \text{ nm} \dots 10 \text{ nm}$	Kuumad kehad

Röntgenikiirgus	X - kiired	10 nm ...0,01 nm	Kiired elektronid, aatomid
Gammakiirgus	γ – kiired	< 0,01 nm	Aatomituumad

Raadiolained tekivad antennis, kui sinna tulevad elektromagnetvõnkumised vastavast generaatorist. Antenn on seade, mis on loodud elektromagnetlainete kiirgamiseks ja vastuvõtmiseks.

Opiline kiirgus tekib aatomite valentselektronide siirdeil madalamatele energiatasemetele (ultravalgus, valgus, infravalgus), kuid ka molekulides olevate aatomite võnkumisel või pöörlemisel (infravalgus).

Ultravalgust kirjeldab **UV indeks**, mis näitab ultravalguse intensiivsust ja mille mõõtühikuks on 1 mW/m^2 . Kui UV-indeksi väärtus on 1, siis on intensiivsus 25 mW/m^2 , väärtusele 2 vastab 50 mW/m^2 , väärtusele 3 vastab 75 mW/m^2 jne. Indeksi suuremate väärtuste korral on ohud suuremad kui väiksemate puhul. Ultravalgust indeksiga alla 2 võib pidada inimesele ohutuks, väärtustel 3-5 on mõistlik esmakordsel päevitamisel piirduda 30-60 minutiga. Kui indeksi väärtus on üle 5, tuleb päevitamise ja päikese käes töötamisega olla ettevaatlik.

Nähtav valgus sisaldab erineva värvusega piirkondi. Toome need ära lainepikkuste järgi.

Värvus	Lainepikkus, nm
Punane	760.....630
Oranž	630.....600
Kollane	600.....570
Roheline	570.....520
Helesinine	520.....470
Sinine	470.....420
Violetne	420.....380

Kõiki värvilisi valgusi saab kokku segada kolmest põhivärvusest: punane ($\lambda = 700 \text{ nm}$), roheline ($\lambda = 546,1 \text{ nm}$) ja sinine ($435,8 \text{ nm}$). Põhivärvustest on võimalik saada ka valget valgust, kui liita punast, rohelist ja sinist valgust nii, et nende intensiivsuste suhe oleks 1 : 4,6 : 0,06.

Röntgenikiirgus tekib aatomi sisekatete elektronide siiretel madalamatele energiatasemetele või kiirete elektronide järsul pidurdumisel metallides.

Gammakiirgus tekib aatomituumade radioaktiivsel lagunemisel, täpsemalt ergastatud tütartuumade siiretel madalamatele energianivooodele..

Peab lisama, et erinevate lainepiirkondade vahel puuduvad täpsed piirid. Jaotuse aluseks on eelkõige laineallikad, kusjuures erinevate laineallikate poolt tekitatud lainete sagedused kattuvad. Kuid kehtib kindel **seaduspära**: mida väiksemad on laineallika mõõtmed, seda lühem on kiirguva laine pikkus.

Elektromagnetlaineid kasutab inimene väga paljudes eluvaldkondades. Järgnev loetelu näitab valdkondade kaupa seadameid või meetodeid, kus kasutatakse elektromagnetlaineid.

Loodusteadused (bioloogia, füüsika, geoloogia, geograafia, keemia) :

mikroskoobid, pikksilmad, spektroskoopia, refraktomeetria, interferomeetria, difraktomeetria, polarimeetria, röntgendifraktsioon, luminesentsanalüüs, georadarid.

Astronoomia: raadioteleskoobid, optilised teleskoobid, röntgenteleskoobid, gammateleskoobid, spektroskoopia.

Meditiin: röntgendiagnostika, kiiritusravi, laserteraapia, laserkirurgia, laserskalpellid, endoskoopia, infrapunasaun, IP steriliseerimine, UV desinfitseerimine.

Kultuur, kunst, sport: fotoaparaat, filmikaamera, TV kaamera, CD ja DVD mängijad, LCD teler, valgustusseadmed, värvusmuusika, luminesentsvärvid, UV “must valgus”, holograafia, fotofiniš, laserpüssid, kaugusmõõdikud.

Tehnika: raadioja TV levi, mobiilside, telefonside, internet, GPS¹, radarid, päikesepatareid, mikrolaineahjud, kaugjuhtimispuldid, liikumisandurid, laserprinterid, skännerid, arvutihiired, digilauad, laserloodid, pointerid, kaugusmõõdikud, valeraha kontroll, vöötkoodide lugemine, pagasikontroll, termograafia, röntgendefektoskoopia, laserlöikus ja -puurimine, laserkeevitus ja -jootmine, püromeetria, saharimeetria, gaasianalüsaatorid, elektronoptilised muundurid, kunstteemantite valmistamine mikrolainete abil, laserkülmutus, lasersüüteküünlad autodele, laserablatsioon, infrapunakuivatus.

Sõjandus: lasersihikud, pimestavad laserrelvad, öönägemisseadmed, metalliotsijad, ründelaserid.

2. Fotomeetria

2.1. Valguse kiirus

Nagu räägitud, püüdis esimesena määrata valguse kiirust **Galileo Galilei 1600.a.** Tulemuseks oli, et valgus levib väga kiiresti, nii kiiresti, et tavalise kellaga seda mõõta ei saa. Valguse kiirust vaakumis tähistatakse tähega *c*, mis tuleneb ladinakeelsest sõnast *celeritas*, miseesti keeli on *kiirus*.

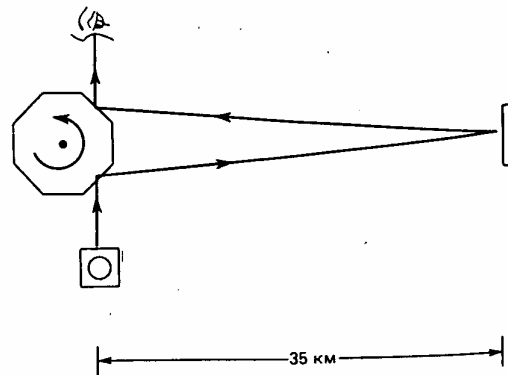
Esimese arvulise hinnangu sai valguse kiirusele **O.Roemer 1676.a.** Tema kasutas selleks Jupiteri kuu Io planeedi taga olemise aegade ebahütlust. Seda seletatakse Maa ja Jupiteri vahekauguse muutumisega nende liikumisel. See aga muudab valguse levimise aega Iolt Maale. Tema tulemus oli **$2,14 \cdot 10^8$ m/s.**

Tunduvalt täpsema tulemuse sai 1879.a. A.Michelson, kes kasutas pöörlevat peeglit.

$$c^2 = l/t ; \quad t = T/8 ; \quad l = 35,426 \text{ km}$$

¹ GPS – Global Positioning System, eesti keeles: Globaalne Punkti Seire.

² Esitähth ladina keelsest sõnast *celeritas*, mis tähendab *kiirus*



Tema sai tulemuseks $2,99798 \cdot 10^8$ m/s.

Hiljem on valguse kiirust palju mõõdetud ja täpsus on kogu aeg kasvanud, alates 1983. a. loetakse valguse kiirust täpselt (ilma veata) suuruseks: $c = 2,99792458 \cdot 10^8$ m/s.

See tulemus saadi arvutuste teel valemist $v = f \cdot \lambda$. Selleks määrati laserkiirguse sagedus ja lainepikkus interferentsimeetodil.

Kui mõõta valguse levimiseks kulunud aega vaakumis või õhus (seal erineb valguse kiirus c -st ainult mõne sajandiku protsendi võrra), siis selle abil saab määrata kaugusi.

Valguse kiirus on erinevates keskkondades erinev. Kehtib seaduspärasus, et mida suurem on keskkonna tihedus, seda väiksem on seal valguse kiirus. Näiteks õhus normaaltingimustel on valguse kiirus $v = 2,9970 \cdot 10^8$ m/s, mis on praktiliselt võrdne valguse kiirusega vaakumis. Seevastu ühes suurema tihedusega läbipaistvas aines, teemandis, on valguse kiirus $1,2403 \cdot 10^8$ m/s.

Tänapäeval on välja töötatud sellised ained, millel on negatiivne murdumisnäitaja ja sellistes ainetes võib valguse kiirus muutuda väga väikeseks, ainult mõne meetrini sekundis ja on õnnestunud ka valguslaine täiesti seisma panna.

Sellest teatasid 2001.a. USA füüsikud /D. Phillips, Physics Review Letters, 29 January, 2001/. Asjahuvilised võiksid täpsemat infot otsida internetist märksõnade "stopping light" või "halting light" järgi.

2.2. Fotomeetrilisi ühikuid

Inimene vajab elamiseks ja töötamiseks valgust. Hämaras on halvem lugeda või kirjutada kui valgus. Seepärast peabki auditorium valge olema. On olemas isegi normid, mis ütlevad kui palju valgust peab miski töö jaoks olema, sest valgustatusest sõltub töö kiirus ja kvaliteet. Näiteks nõukogude ajal pidi õppimiseks laual olema valgustatus vähemalt 75 lx, aga tahvil 200 lx, nüüd aga vastavalt 300 lx ja 500 lx. Aga mis see luks on?

See on üks fotomeetriline ühik, mis näitab kui palju valgust pinnahüki kohta tuleb. Valguse hulk, aga mis meie lauale jõuab, oleneb lambist, mis valgustis on. Lampe kirjeldatakse tavaliselt nende elektrilise võimsuse abil: näiteks 100 W. Aga kui palju see 100 W lamp valgust annab? Kogu eralduv energia ei ole nähtavas piirkonnas,

enamus sellest jääb infravalguse piirkonda. Lisaks oleneb kiiratud valguse hulk ka lainepikkusest (valguse värvusest): punast valgust kiirgab elektripirn rohkem kui sinist.

Valguse mõõtmise alguseks võib lugeda aastat 1729, mil Pierre Bouguer ehitab esimese fotomeetri ja võtab kasutusele valgustugevuse ühikuna **standardküünla**. See oli etalonallikas, mis põledes andis alati ühepalju valgust. Sellel oli kindel konstruktsioon ja materjal,. Millised need olid, pole õnnestunud välja uurida.

Hiljem on olnud erinevaid valgusallika etalone.

Aastal 1879 paneb Prantsuse füüsikaproffessor Jules Violle ette kasutada valgustugevuse etalonina 1 cm² suurust plaatina plaatinahangumistemperatuuril (2042 K) , nn Violle'i ühik. Kaks aastat hiljem see võetaksegi kasutusele.

*Aastal 1884 võttis saksa insener F. von Hefner – Alteneck kasutusele omakonstrueeritud lambi, milles põletati 3metüülbutüületenaati (isopentüülatsetaati). Seda hakati kutsuma **Hefneri küünlaks** (1 H.k. = 0,9 cd). See võeti aastal 1893 kasutusele Keskeuroopa etalonina.*

*Inglismaa, Prantsusmaa ja USA kehtestavad 1909.a. **rahvusvahelise küünla**, mille etaloniks on komplekt süsiniit-hõõglampe.*

Aastal 1948 Kehtestub Rahvusvahelise Mõõtude ja Kaalude Komitee otsus aastast 1946,

*mille järgi valgustugevuse ühik nimetatakse **kandelaks** ja määratletakse kui 1/60 mustkiirguri valgustugevusest pinnalt 1 cm² plaatina tahkustumistemperatuuril.*

Mõõtude ja Kaalude 16. Peakonverents kehtestas 1977.a. kandelale uue Määratluse, kus fikseeriti nii valguse sagedus kui kiirgustugevus. (Andmed E. Risthein. Elektrivalgustuse ajalooline ülevaade. TTÜ, Tallinn, 2008).

Tänapäeval on valgusallika **valgustugevuse** ühikuks ikka **1 kandela** (SI põhiühik) ja tähiseks *I*. Kuid definitsiooni on täpsustatud: **1 kandela (cd) on valgustugevus, kui allikas kiirgab monokromaatset kiirgust sagedusega 540 · 10¹² Hz ja ta kiirgab ruuminurka 1 sr igas sekundis energiat 1/683 J** . Selline sagedus vastab rohelisele valgusele ja 1/683 tuleb inimese silma valgustundlikkusest ning soovist mitte väga palju erinevat uut ühikut luua.

Jämedalt võttes on 100 vatise lambi valgustugevus ka 100 kandelat.

Valgus levib allikast aga igas suunas ja ainult osa sellest jõuab meieni. Levivat valgust kirjeldatakse **valgusvooga**. Valgusvoog Φ_L^3 on määratud valgusallika valgustugevuse ja selle ruuminurga ω korrutisega, milles valgus levib:

$$\Phi_L = I \cdot \omega .$$

Valgusvoo ühikuks on **1 lumen (1 lm)**: see on valgusvoog, mille korral allikas tugevusega 1 cd täidab valgusega ühtlaselt ruuminurga 1sr.

Mingile pinnale langeva valguse hulka kirjeldatakse suurusega, mida varem nimetati **valgustatuseks E** , tänapäeval – **valgustustiheduseks**, mis näitab pinnaühikule langeva valgusvoo suurust

³ Indeks *L* näitab, et tegemist on just valgusvooga (*luminous*) ja eristada seda kiirgusvoost Φ_R (*radiation*)

$$E = \Phi_L / S.$$

Valgustiheduse ühikuks on **1 luks (lx): valgustustihedus on 1 luks, kui valgusvoog 1 luumen jaotub ühtlaselt 1 m² suurusel pinnal.**

Päikesevalgus suvel keskpäeval on umbes 10⁵ lx; täiskuu 0,2 lx, tähistaevas 0,0003 lx.

Praktika näitab, et valgustatus (valguse hulk) oleneb nii lambi võimsusest (valgustugevusest), lambi kaugusest kui ka valguse pinnale langemise nurgast. Langegu valgus väikesele pinnale OB kaugelasuvast punktallikast. Sellisel juhul võib kiirtekimpu lugeda paralleelseks. Kimbu laius olgu OA ja langemisnurk α . Leiame, kuidas valgustatus oleneb valgusallika valgustugevusest I , kaugusest pinna ja allika vahel r ning valguse langemisnurgast α .

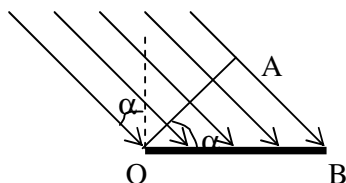
Lähtume seosest $E = \Phi_L / S$. Olgu mõttelise pinna OA, mis on risti kiirtega valgustatus $E_0 = \Phi_L / OA$ (siin on OA kiirtekimpu ristlõikepindala). Sel juhul on pinna OB valgustus $E = \Phi_L / OB$.

Jooniselt on näha, et $E/E_0 = OA/OB$ ja siit saame $E = E_0 \cos \alpha$.

Definitsiooni kohaselt on $\Phi_L = I \omega$ Kui on tegemist punktvalgusallikaga, siis $\omega = 4\pi$ ja pind, millele valgus langeb tegelikult on kera pind (mille väikest osa vaatleme tasandina OA). Sel juhul pinna valgustatus $E_0 = \Phi_L / S$, kus $S = 4\pi r^2$ (kera pindala).

Asendades E_0 avaldisse Φ_L ja S , saame $E_0 = I/r^2$.

Pinnale OB langevaks valgustatuseks saame $E = \frac{I \cos \alpha}{r^2}$

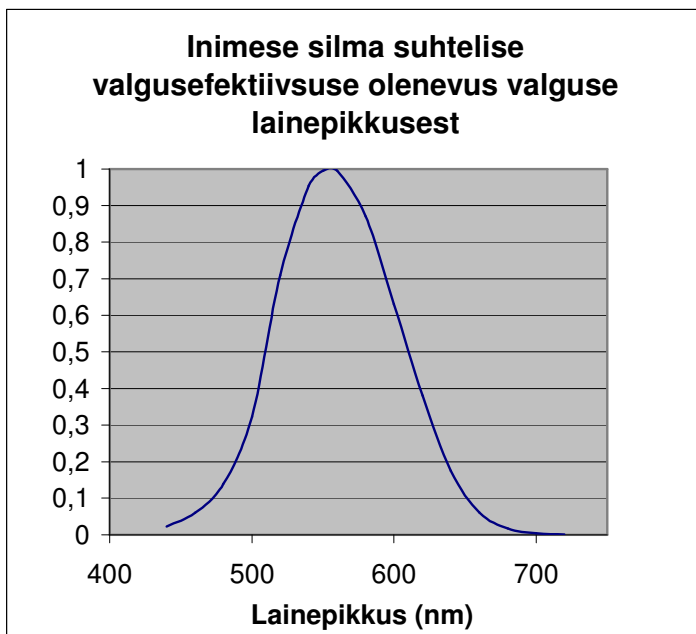


Lisaks valgustihedusele ehk pinnavalgustusele kasutatakse ka sellist mõistet nagu **pinna heledus (B)**, mis näitab millise valgustugevusega valgusallikana võib antud pinna ühikut käsitleda.

$$B = I / S \cos \alpha$$

Heleduse ühik on **1 nitt (1 nt):** $1 \text{ nt} = 1 \text{ cd} / 1 \text{ m}^2$.

Asi on nagu selge, kuid häda on selles, et need suurused on **subjektiivsed**, need sest sõltuvad inimesilma tundlikkusest (see kordaja 1/683). Silma tundlikkus (suhteline valgusefektiivsus) V_λ omab väärtusi 0 ja 1 vahel.



Silma tundlikkus, mida nimetatakse **suhteliseks valgusefektiivsuseks** V_λ on määratud valgusaistingu tugevusega, mida tekitab ühikuline valgusvoog. Kõver on koostatud katseliselt, paljude inimeste uurimisel ja sellest nähtub, et kõige tundlikum on silm 555 nm juures.

Sellega pole veel kõik hädad murtud, valgusefektiivsus oleneb veel valgustustingimustest. Selline kuju on kõveral päevavalguses. Kui on tegu videvikuga, siis tundlikkuse kõver nihkub lühemate lainepikkuste poole: maksimum satub 510 nm ja 640 nm pikemaid valguslaineid me enam ei näe. Seega videvikus paistavad meile oranžid ja punase toonid hallidena.

Sellest ka ütlemine, et "pimedas on kõik kassid hallid ja kõik naised kallid" (st ka punased kassid paistavad hallidena).

Valguse **objektiivseks** mõõtmiseks kasutatakse eriseadmeid, mis mõõdavad ühtviisi igasuguse värvusega valgusenergiat. Selliseks riistaks võib olla termosammas, st mitu termoelementi jadamisi ühendatult. Termosambas muutub valgusenergia, olenemata lainepikkusest (ehk värvusest) soojusenergiaks, mida mõõdetakse temperatuuri muutuse abil. Tegelikult on ka siin terve rida probleeme, kuid seda me ei käsitle. Objektiivsetel mõõtmistel tehakse kindlaks, kuipalju kiirgusenergiat kandub ajaühikus läbi mingi pinna. Vastavat suurust nimetatakse **kiirgusvooks** Φ_R ja seda mõõdetakse ühikutes $1 \text{ J/s} = 1 \text{ W}$.

Milline on seos valgusvoo ja kiirgusvoo vahel? Arvata võib, et seos on võrdeline ja nii ongi:

$$\Phi_L = K_\lambda \cdot \Phi_R, \text{ kus } K_\lambda = 683 \cdot V_\lambda (\text{lm/W}).$$

Kordaja 683 tuleneb inimsilma omadustest ja on leitud eksperimentaalselt paljusid inimesi uurides.

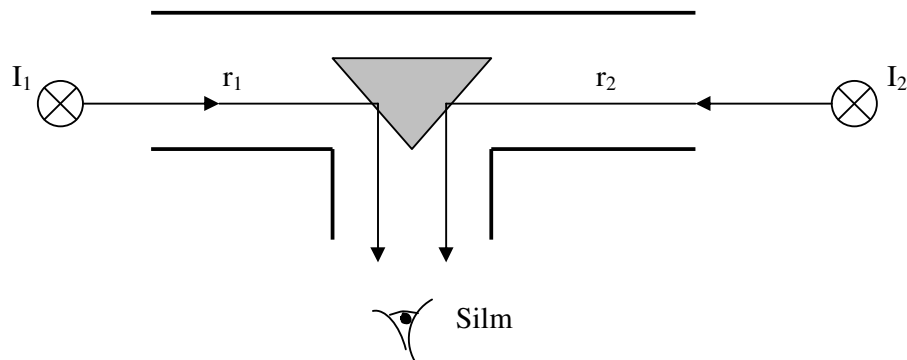
Siit tuleb välja, et rohelises valguses, kus $V_\lambda = 1$, vastab 1 vatilisele kiirgusvoole valgusvoog 1 luumen.

Fotomeetria ühikuid eesti, inglise ja vene keeles

Valgustugevus I (cd)	Light intensity	Сила света
Valgusvoog Φ_L (lm), cd·sr	Light flux	Световой поток
Valgustatus, valgustustihedus E (lx), lm/m ²	Illuminance	Освещенность
Heledus B (nt), cd/m ²	Luminance	Яркость
Suhteline valgusefektiivsus V_λ	Luminous efficiency	Относительная световая эффективность
Valgusefektiivsus K_λ , lm/W	Luminous efficacy	Видность
Kiirgusvoog Φ_R , W	Radiant flux	Лучистый поток

2.3. Fotomeeter

Fotomeeter on riist valguse mõõtmiseks. Meie vaatleme ainult valgustustiheduse mõõtmiseks ettenähtud fotomeetrit. Selle põhimõtteline skeem on järgmine.



Riistas kasutatakse üht tuntud valgustugevusega allikat, näiteks I_1 . Mõõtmisel saavutatakse olukord, kus valgustustihedused on võrdsed, st. kui ekraani mõlemad osad on ühesuguse heledusega. See saavutatakse valgusallikate kauguse muutmisega. Kui ühe allika valgustugevus on teada ja mõõta allikate kaugused ekraanist, saab määrata ka teise allika valgustugevust.

$$E_1 = E_2,$$

$$I_1 \cos \alpha_1 / r_1^2 = I_2 \cos \alpha_2 / r_2^2$$

$\alpha_1 \approx \alpha_2$; Langemisnurki võib pidada ligikaudu võrdseteks, sest fotomeetri õlad (kaugused r_1 ja r_2) on küllalt suured võrreldes sisenemisavade läbimõõduga.

Saame
$$I_2 = \frac{I_1 r_2^2}{r_1^2}.$$

3. Laineoptika

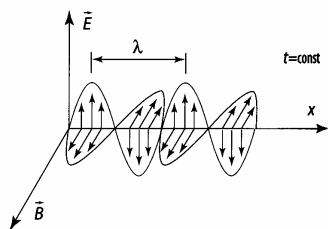
3.1. Elektromagnetlaine ja valguslaine

Elektromagnetlainet kirjeldavad 2 võrrandit, üks elektrivälja ja teine magnetvälja muutumise kohta

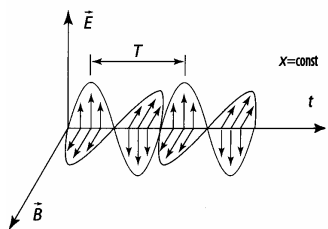
$$E = E_0 \sin \omega(t - x/v)$$

$$B = B_0 \sin \omega(t - x/v), \quad \text{kus} \quad v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}}.$$

Graafiliselt saab laineid esitada kahel kujul, kus näidatakse elektrivälja tugevuse (E) ja magnetinduktsiooni (B) kas sõltuvust ajast või ruumikoordinaadist⁴.



Joon. 6.1. Elektromagnetlaine komponentide hetkväärtused piki x-telge

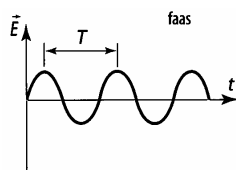


Joon. 6.2. Elektromagnetlaine komponentide muutumine ajas

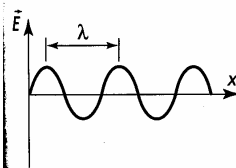
Kui räägitakse valguslaineist, siis jäetakse magnetväli mängust välja. Räägitakse E -vektorist kui **valgusvektorist**. Põhjendus: muidu on raske lainet kujutada, sest tihti on vaja laineid graafiliselt liita või lahutada.

Selline valik on põhjendatud, sest valgusaistingu tekitab just elektriväli, mõjudes retseptorites olevatele elektronidele.

Valguslainet kirjeldatakse samuti kaht liiki graafikutega: E -vektori ajalise või ruumilise muutusena:



Joon. 6.3. Valguslaine E-vektori muutumine ajas



Joon. 6.4. Valguslaine E-vektori muutumine piki x-telge

⁴ Jooniste allkirjade numbrid pole mõnikord kooskõlas antud konspektiga

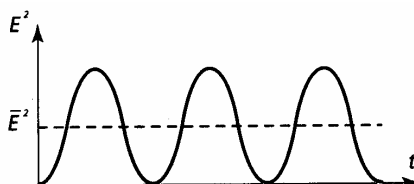
Valguslainet iseloomustavad suurused

Valguslainet iseloomustav suurus	Tähis	Ühik	Väärtus
Lainepikkus vaakumis	λ	1 nm	380....760 nm
Periood	T	1 s	$1,2 \cdot 10^{-15} \dots 2,5 \cdot 10^{-15}$ s
Sagedus	f	1 Hz	$8 \cdot 10^{14} \dots 4 \cdot 10^{14}$ Hz
Kiirus	v, c	1 m/s	$1,2 \cdot 10^8 \dots 3 \cdot 10^8$ m/s

Lisaks kasutatakse veel **lainearvu** k , mis on defineeritud kui $2\pi/\lambda$ (spektroskoopias kasutatakse ka lainearvu, mis on võrdne $1/\lambda$ ja mida tavaliselt antakse pöördsentimeetrites, cm^{-1}).

Valguslaine tugevus ehk **intensiivsus** I näitab energia hulka, mis ajaühikus läbib pinnauhikut (või langeb sellele). Selle suuruse mõõtühikuks on 1 W/m^2 . Valguse intensiivsust määratakse E -vektori ruudu keskvaertuse abil, sest E -vektori keskvaertust ei saa kasutada, kuna see on alati võrdne nulliga. Seega intensiivsus

$$I \propto E_{\text{kesk}}^2 = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} E^2 dt$$



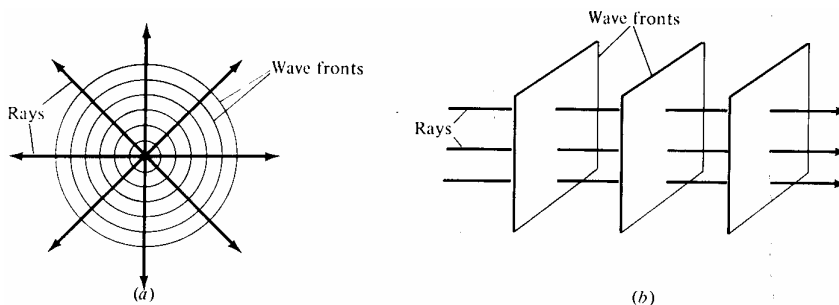
Nagu mehaaniliste lainete korral, kasutatakse ka valguslainete korral lainefrondi ja lainepinna mõisteid. **Lainefrondiks** nimetatakse pinda, mis eraldab selle ruumi osa, kust valgus on läbi läinud sellest ruumiosast, kuhu valgus pole veel jõudnud. Kõikides lainefrondi punktides on valguslaine E -vektorid samas faasis. Laine poolt läbitud ruumiosas nimetatakse samafaasipindu lainepindadeks. Aga ega põhimõttelist erinevust pinna ja frondi vahel pole.

Laineid jaotatakse ka optikas lainepinna kuju järgi sfäärilisteks- ja tasalaineteks.

Sfäärilise laine korral on lainefrondiks sfäär, mida joonisel kujutab ringjoon.

Tasalaine korral on lainefrondiks tasand, mida joonisel kujutab sirgjoon.

Joonistel näidatakse lainefrondi aukohti iga perioodi järel. Seega on joonisel frontide vaheline kaugus võrdne valguse lainepikkusega. Seesmissi lainefronte nimetatakse **lainepindadeks**. Lainefrondi normaale (ristsirgeid) nimetatakse **kiirteks**.



Joonisel a) on keralaine ja joonisel b) tasalaine.

3.2. Valguse levimine ja Huygens-Fresneli printsiip

Siiani oleme rääkinud laine levimisest, pööramata tähelepanu sellele **kuidas** see toimub. Valguse levimisel mingis keskkonnas jäävad valguse tee mitmesugused laetud osakesed: ioonid, tuumad, elektronid. Tuumad ja ioonid on valguslaine elektrivälja jaoks liiga rasked, aga elektronid on piisavalt kerged, et neid valguse sagedusega võnkuma panna ($\approx 10^{15}$ Hz).

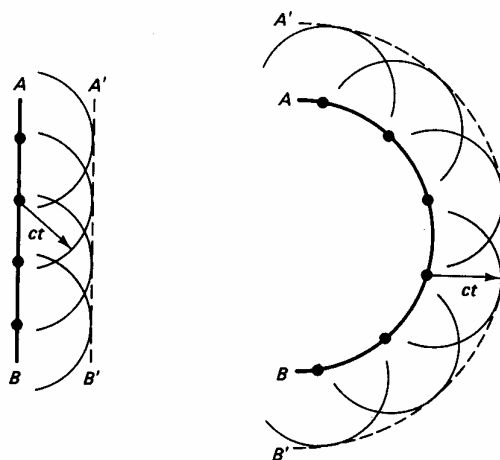
Seejärel kiirgab elektron hetkeks just täpselt sama sagedusega valgust. See levib järgmise elektronini ja paneb selle võnkuma ja kiirgama. Nii see kordub ja valgus levib ruumis edasi. Kahe elektroni vahel liigub valgus kiirusega c , aga elektroni võnkuma panekuks ja kiirguseks kulub aega, sellepärast ongi valguse kiirus aines väiksem kui vaakumis.

Sellise valguse levimise tabas ära Ch. Huygens juba 17. sajandi lõpul, kui elektronist ega elektromagnetlainest osatud undki näha.

Valguse tee võivad jääda ka elektronid, mis pole aatomi koosseisus, vaid on nn. vabad elektronid. Ka need paneb valguslaine elektrivälja võnkuma, kuid need elektronid ei kiirga selle tulemusena valgust. Neile juurdeantud energia muutub aine siseenergiaks ehk soojuseks. Selliselt muutub valguslaine energia soojusenergiaks ja füüsikas öeldakse, et valgus neeldub aines.

Huygensi printsiip (1690.a.) : lainefrondi iga punkt on uue, sekundaarse laine allikaks ja sekundaarlainete mähispind on uueks lainefrondiviks.

Joonistel on algne front AB, uus A'B'.



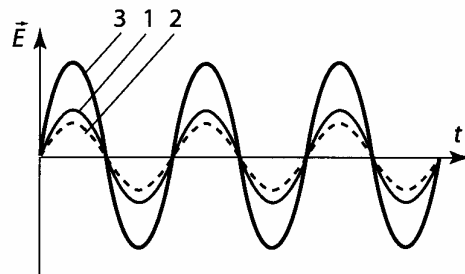
Tõkestamata laine levib ainult frondi esialgsel levimise suunas. Teistes suundades lained kustutavad üksteist, st alati leidub mingi sekundaarne allikas, kus võnkumised on vastandfaasis sinna jõudva lainega ja lained kustuvad.

Elektronteooria kohaselt summutab elektroniga vastandfaasis võnkuv elektrivälja elektroni võnkumise ja lõpetab selle kiirguse. (Kiikumine, vastandfaas). See printsiip ei öelnud aga midagi valguse intensiivsuse kohta. T. Youngi poolt 1801.a. tehtud katsed said korraliku seletuse, kui

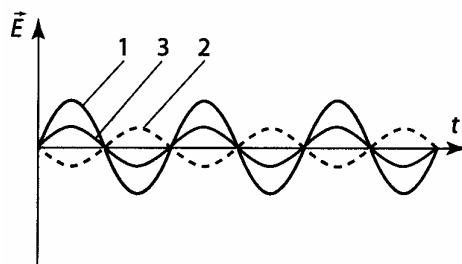
1815.a. A. Fresnel täiendas printsiipi ja nüüd räägitakse **Huygens – Fresneli printsiibist**: iga lainefronkti punkti võib vaadelda sekundaarlaine allikana, kusjuures valguse intensiivsus on määratud sekundaarlainete liitumisega.

3.3. Lainete liitumine ja koherentsus

Valguslainete liitumist nimetatakse ka **interferentsiks**. Vaatame, kuidas lained võivad liituda. Piirdume kahe piirjuhuga. Ühel juhul olgu lained, mis mingis ruumipunktis liituvad, samas faasis, teisel vastandfaasis.



Joon.6.9. Liituvad lained (1) ja (2) tugevdavad üksteist. Liitlaine (3) amplituud on võrdne lainete (1) ja (2) summaga



Joon.6.10. Liituvad lained (1) ja (2) nõrgendavad üksteist. Liitlaine (3) amplituud on võrdne lainete (1) ja (2) vahega

Samas faasis olevad lained tugevdavad liitumisel üksteist.

Vastandfaasis olevad lained nõrgendavad või kustutavad üksteist liitumisel.

Kui valguslainete liitumist täpsemalt uurida, siis selgub, et lainete kohtumispunktis liituvad lainete E -vektorid. Sellist nähtust nimetatakse elektriväljade **superpositsiooniks**. Selle kohaselt võib mingis ruumipunktis olla kuitahes palju erinevaid elektrivälju. Summaarne elektrivälja tugevus on võrdne kõikide E -vektorite

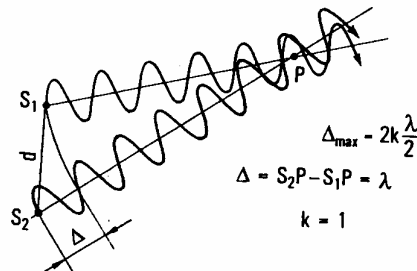
summaga. Superpositsiooniprintsiibi kehtivus on eksperimentaalne fakt, mis iseloomustab looduse omapära ja seda pole võimalik põhjendada.
Joonisel 6.9. toodud juht on kirjeldatav ka E -vektorite abil:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 \text{ ehk kui } \vec{E}_1 = \vec{E}_2, \text{ siis } \vec{E} = 2\vec{E}_1 \text{ ja } I = 4I_1.$$

Joonisel 6.10. toodud juhul on

$$\vec{E} = \vec{E}_1 - \vec{E}_2 \text{ ehk kui } \vec{E}_1 = \vec{E}_2, \text{ siis } \vec{E} = 0 \text{ ja } I = 0.$$

Vaatleme kahest punktallikast lähtuvate valguslainete liitumist.



Valguslained läbivad liitumispunkti jõudmiseks erinevad teepikkused. Teepikkuste erinevust (vahet) nimetatakse **käiguvaheks**. Optikas tähistatakse käiguvahet kreeka tähega Δ (delta). Interferentsi tulemus punktis P on määratud käiguvahega.

Mehaanikakursusest on teada, et **interferentsi maksimumiga** on tegemist, kui liituvad samas faasis olevad lained. Sel juhul on käiguvahe Δ võrdne paarisarv poollainepikkusega:

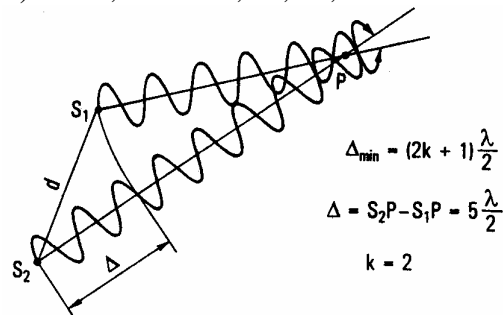
$$\Delta_{\max} = 2k \cdot \lambda/2, \text{ kus } k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

Täisarvu k nimetatakse **interferentsijärguks**.

Interferentsi miinimumiga on tegemist, kui liituvad vastasfaasides olevad lained.

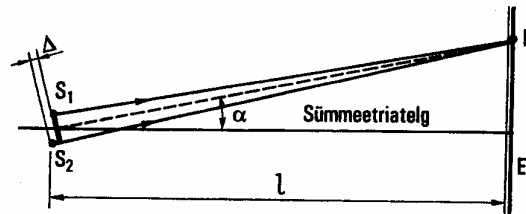
Sel juhul on käiguvahe Δ võrdne paaritu arvu poollainepikkusega:

$$\Delta_{\min} = (2k + 1) \cdot \lambda/2, \text{ kus } k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

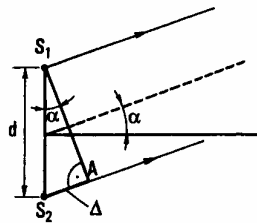


Samad seosed kehtivad ka valguslainete korral. Kuna valguse lainepikkus on väike, siis on väike ka allikatevaheline kaugus d . Reaalseis katseis on see alati palju väiksem, kui allikate kaugus ekraanist, s.t. $d \ll l$. Seepärast võib lainete levimissuundi lugeda paralleelseiks. Levimissuund moodustab sümmeetriateljega

nurga α . Sellel joonisel on lainefrontide asemel toodud lainete levimissuund - kiired.



Meie juhul on käiguvahe $\Delta = S_2 P - S_1 P$. Käiguvahe suuruse leiame jooniselt, kus on suuremalt näidatud allikate S_1 ja S_2 ümbrus.



Nurk $S_2 S_1 A$ ja nurk α on võrdsed kui ristuvate haaradega nurgad. Täisnurksest kolmnurgast $S_1 A S_2$ leiame:

$$\Delta = d \sin \alpha .$$

Seega **interferentsi maksimumid** (valguse tugevnemine) esinevad neis ekraani punktides, mis on määratud tingimusega

$$d \sin \alpha = 2k \cdot \lambda / 2 = k \lambda .$$

Interferentsi miinimumid (valguse nõrgenemine) esinevad neis punktides, kus

$$d \sin \alpha = (2k + 1) \cdot \lambda / 2 = (k + 1/2) \lambda .$$

Meenutame mehaaniliste lainete interferentsi. Püsiv interferentspilt tekib ainult siis, kui liituvate lainete allikad võnguvad täiesti ühesuguselt. See tähendab, et liituvatel lainetel peavad olema ühesugused lainepikkused. Samuti ei tohi ühe allika võnkumine muutuda teise suhtes, näiteks hetkeks lakata. Teisiti öelduna, lainete kuju ei tohi aja jooksul muutuda. Selliseid laineid nimetatakse **koherentseteks laineteks**. Interferentsi korral liituvad (interfereeruvad) koherentsed lained. Kui aga tühjas toas tekitada kaks ühesugust valgusallikat, näiteks süüdata korraga kaks ühesugust laelampi, ei teki kusagil valguslainete tugevnemist (heleda valgusega kohti) ega nõrgenemist (pimedaid kohti). See tähendab, et lampidest tulevad valguslained ei interfereeru, sest nad pole koherentsed. Aga miks?

Vaatleme valguslainete koherentsust lähemalt. Joonisel 7.1 on toodud kahe sama lainepikkusega (monokromaatse) valguslaine graafikud. Nagu näha, nende lainete kuju (amplituud, kestus) ei muutu aja jooksul. Need lained liiguvad edasi samas faasis. Mõlemal lainel on näiteks ajahetkel t_1 maksimum. Mingil teisel ajahetkel t_2 läbivad mõlemad lained tasakaaluasendit, ajahetkel t_3 on aga

mõlemal lainel miinimum jne. Need lained on koherentsed ja saavad interfereeruda ja difrakteeruda.

Interfereeruda saavad ainult samas suunas levivad lained. Joonisel 7.2 on esitatud kaks mittekoherentset lainet. Mittekoherentsus on tingitud sellest, et lainetel on erinevad lainepikkused. Nüüd on lained ajahetkel t_1 samas faasis, aga ajahetkel t_2 vastasfaasis.

Kuid ka monokromaatsed lained ei pruugi alati olla koherentsed. Põhjuseks võib olla lainete ajutine katkemine, kusjuures pauside kestused ei ole võrdsed (joon. 7.3). Siin on lained algul vastasfaasides. Pärast pause hakkasid lained levima aga erinevaid ajahetkedel. Selle tulemusena on lained nüüd samas faasis.

Lainete mittekoherentsus on tingitud kas lainepikkuste erinevusest või erineva kestusega pausidest lainetes. Miks aga peaks valguslained katkema või nende lainepikkus muutuma? Valguslainet kirjeldab ju pidev siinusfunktsioon, mille kuju ajas ei muutu.

Tuleb välja, et meie mudel ei kajasta valguse kiirgumisega seotud asjaolusid. Nagu teame, tekib valgus aatomeis. Valguslained kannavad aatomist energiat ära ja aatomi energia väheneb. Valgus ei kiirgu aatomeist pidevalt. Kiirgus kestab teatava aja, mille vältel aatomist väljub valguslaine, mida nimetatakse **lainejädaks**.

Soojuslikes valgusallikates kestab ühe aatomi kiirgus keskmiselt 10^{-9} - 10^{-8} s. Pärast kiirgamist aatom "kustub", s.t. ei kiirga enam valgust. Aatom kogub mingi aja jooksul energiat, mida näiteks hõõglampi toob elektrivool, et siis jälle hetkeks valgust kiirata. Olukorra täpsema kirjeldamise teeb võimatuks asjaolu, et pole ette teada, millal kiirgusakt algab, kui kaua ta kestab ja millise lainepikkusega lainejada kiiratakse. Piltlikult võib kiirgavaid aatomeid ette kujutada kui plinkivaid majakaid. Ainult "aatomimajakate" puhul pole teada, kui kaua ta kiirgab, kui pikk on paus või mis värvi on kiirguv valgus. Kõik oleneb sellest, milliselt energiatasemelt elektron vabaneb ja millisele energiatasemele ta siirdub. Need protsessid on soojuslikes valgusallikais täiesti juhuslikud. Soojuslike valgusallikate kiirgus on mittekoherentne. Valguse kiirgumise mehhanismist järeldub, et difraktsiooni ja interferentsi korral ei liitu mitte kaks pidevat lainet, vaid kaks erinevat lainejada. Kui muutuvad lainejadad, muutub ka liitumise tulemus. Soojuslike valgusallikate korral tähendab see, et muutused toimuvad iga 10^{-9} - 10^{-8} s järel. Kui näiteks interferentspildis muutuvad miinimumide ja maksimumide asukohad sellises tempos, siis inimsilm ei suuda neid muutusi jälgida.

Siit saamegi vastuse oma küsimusele. Lampidest kiirguvad lainejadad ja nende liitumine ehk interferents muutub nii kiiresti ja juhuslikult, et meile tundub, nagu oleksid toa põrand, lagi ja seinad ühtlaselt valgustatud. Sarnast nähtust saab jälgida, kui näiteks mingi pilt kinnitada käia ketta külge. Niikaua kui käiaketas seisab paigal, on pilt selge. Kui käi käima panna, läheb pilt segaseks, sest iga natukese aja tagant on pilt uues kohas ja meie silmas ei jõua tekkida pildi kujutist. Me näeme mingit ühtlast valgusriba.

Kuid on olemas ka valgusallikaid, kus valguse kiirgumisel ei valitse selline kaos. Nii kiirgab laser ühevärvilist, monokromaatset valgust, kusjuures lainete kiirgumine on omavahel rangelt kooskõlastatud. **Laser kiirgab koherentseid valguslaineid** Mõnevõrra halvem on olukord koherentsusega gaaslahenduslampide puhul, kuhu kuuluvad ka Hg või Na täitega tänavavalgustuslambid, neonreklaam jne. Sellised allikad kiirgavad kas ühe lainepikkusega valgust (Na-lamp) või mitut kindla lainepikkusega valgust (Hg-lamp). Kuid gaaslahenduslampides on kiirgusaktid omavahel kooskõlastamata, lainejadad ei "pea takti". Nende lampide valguslained on osaliselt koherentsed.

Difraktsiooni või interferentsi jälgimiseks peavad valguslained olema koherentsed. Kokkuvõttes võib öelda, et kõige paremini sobib difraktsiooni- ja interferentsikatseteks laserivalgus. Ka gaaslahenduslambid koos ühevärvilist valgust läbilaskvate valgusfiltritega annavad häid tulemusi. Hoopis raskem on valguse laineefekte näha soojuslike allikate valguses (Päike, hõõglamp, küünal jne.).

3.4. Valguse difraktsioon

KATSE DIFRAKTSIOON TÄPPIDELT, TRAADILT, PILULT

KATSE: mustas paberis või filmis olev pragu

Difraktsioon on nähtus, mis seisneb lainete kandumises varju piirkonda.

Varju piirkonnaks nimetatakse seda ruumi piirkonda, kuhu valgusallikast sirgjooneliselt eemalduv valgus ei saa sattuda.

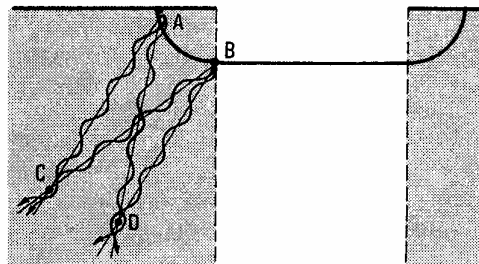
Katses aga nägime, et valgus võib pärast kitsa pilu läbimist või väikesest tõkkest möödudes sattuda varju piirkonda. Ja mida väiksem ava või tõke on, seda rohkem valguslained kanduvad varju piirkonda.

Varju piirkonnas valguslained liituvad ja see võib tugevdada või nõrgendada. Kõik oleneb liituvate lainete käiguvahest või faasivahest.

Käiguvahe Δ on võrdne kahe, algselt samas faasis olnud lainete poolt liitumispunkti jõudmiseks läbitud teepikkuste vahe. Näiteks joonisel on $\Delta = |AC - BC|$. **Faasivahe** δ näitab liituvate lainete faaside erinevust ja seda saab leida käiguvahe kaudu:

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta.$$

Järgnev joonis kirjeldab juhtu, kus pilule langeb tasalaine (selle front on tasand).



Siin on tegu juhuga, kus meil pole tõkestamata laine. Laine on servadest piiratud ja äärmistel sekundaarallikail pole ühel pool naabreid.

Vaatleme avast läbiläinud laine fronti ühest "servast" lähtuvate elementaarlainete liitumist erinevais suundades. Valime näiteks elementaarlainete allikaiks punktid A ja B. Neist punktidest hakkavad levima keralained kõikides suundades (joonisel on näidatud ainult kahes suunas levivad lained). Vaatame nende lainete liitumist punktis C. Selleks, et aru saada, kas lained seal üksteist kustutavad või tugevdavad, kujutame laineid sinusoididena. Nagu näeme, jõuavad mõlemad lained punkti C samas faasis. Järelikult selles kohas lained tugevdavad üksteist ja seal näeme valgust.

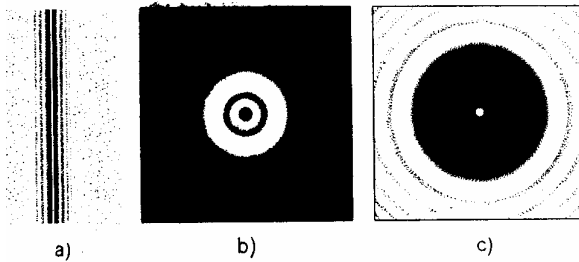
Punkti D jõuavad lained aga vastandfaasis. Lained kustutavad üksteist ja selles kohas pole valgust näha (on pimedus).

Tegelikult on elementaarallikaid lõpmata palju. Seepärast ei näe me katses mitte heledaid ja tumedaid punkte, vaid ribasid.

See lubab seletada ka difraktsioonpilti täpilt, kus täpi varju keskel oli näha **hele laik**. Kui täpp on ümmargune, siis kõikide täpi servast tulevate lainete käiguvahe on v arju keskel null. See tähendab, et lained liituvad samas faasis ja tugevdavad üksteist

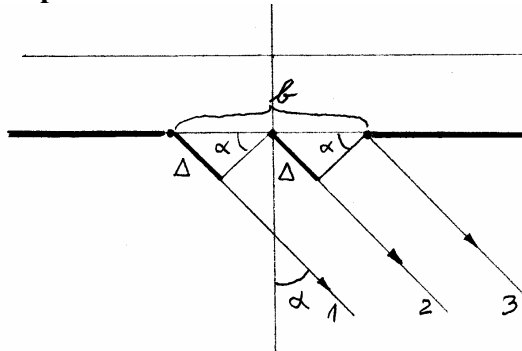
Ajaloost on teada, et kui Fresnel esitas oma difraktsiooniteooria Prantsuse TA - le preemia saamiseks, tuli Simeon Poisson välja vastuväitega, et sellisel juhul peaks olema varju keskel hele täpp. See on aga absurdne ja järelikult Fresneli teooria on vale. Dominique Arago ei hakanud vaidlema, korraldas katse ja tõesti oli keskel hele täpp. Seega oli õigus Fresnelil. Seda heledat täppi varju keskel aga tuntakse siiani Poissoni täpina.

Difraktsioon tekitab väikeste esemete ümber rea heledaid-tumedaid rõngaid. Need rõngad segavad optilistes riistades jälgimast kuitahes lähedaste objektide kujutisi. Öeldakse, et valguse difraktsioon piirab riistade **lahutusvõimet**, so võimet vaadelda lähedasi punkte eraldiseisvaina.



Joonisel difraktsioonipildid: a) peenike traat, b) ringikujuline ava, c) ringikujuline ekraan.

Ühe pilu difraktsioon



Pilule laiusel b langeb tasalaine lainepikkusega λ . Vaatleme lainete liitumist, mis väljuvad pilu servadest ja keskelt ning moodustavad sümmeetriateljega nurga α . Lainete asemel on joonistatud nende levimissuunad.

Pilu servast ja keskelt lähtuvate lainete 1 ja 2 vahel on käiguvahe Δ , kusjuures

$$\Delta = \frac{b}{2} \sin \alpha. \text{ Sama kehtib ka lainete 2 ja 3 korral.}$$

Kui käiguvahe on $(2k + 1) \frac{\lambda}{2}$, siis esinevad interferentsi miinimumid (valguse

kustumine). Siit saame leida, milliste $\sin \alpha$ väärtuste korral esinevad miinimumid:

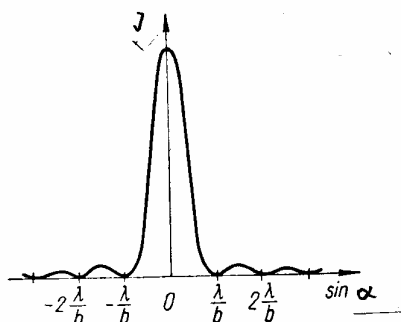
$\sin \alpha = (2k + 1) \frac{\lambda}{b}$. Seega suundades, mis rahuldavad seda seost esinevad miinimumid, näiteks lained 1, 2 ja 2, 3 kustutavad üksteist.

Kui käiguvahe on $k\lambda$, siis esineksid interferentsi maksimumid (valguse tugevnemine).

Need esinevad suundades, kus $\sin \alpha = k \frac{\lambda}{b}$.

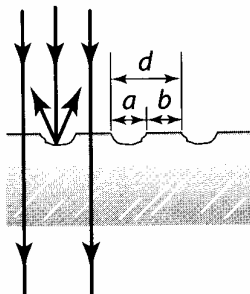
Saadud valemitest on näha, et mida suurem on pilu laius b , seda väiksemaks jäävad nurga α väärtused, mis vastavad miinimumidele ja maksimumidele. See tähendab, et difraktsioonipilt surutakse keskele kokku nagu katseski nägime.

Tegelikult ei ole sekundaarsed laineallikad pilus üksteisest selliselt eraldatud nagu meie näites, vaid nendevahelised kaugused on palju väiksemad valguse lainepikkusest, praktiliselt täidavad nad pidevalt kogu pilu. Sellepärast annab meie poolt kasutatud võte vaid nähtuse kvalitatiivse kirjelduse. Täpsemaks valguse intensiivsuse jaotuse leidmiseks tuleks meil liita kõikidest sekundaarsetest valgusallikatest tulevad valguslained. Sellist pidevalt jaotunud suuruste liitmist nimetatakse integreerimiseks. Järelikult tuleks meil integreerida kõikidest allikatest tulevate valguslainete E – vektorid. Tulemuseks saaksime sellise intensiivsuse I jaotuse kõrvalekalde nurga α järgi nagu on toodud joonisel.



Difraktsioonivõre

Praktikas kasutatakse valguse difraktsiooni **difraktsioonivõredes**. Võre on pilude süsteem, kus näiteks pilu laius on b ja pilude vahekaugus on a . Sellist võret saab teha, graveerides klaasplaadile teemantnoaga kriipse: kriimustatud kohtadest valgus ei läbi võret, mujalt läbib. Tänapäeval valmistatakse võresid holograafiliselt.



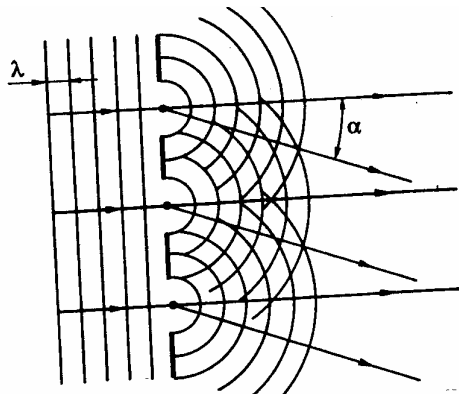
Võret iseloomustab nn **võrekonstant** $d = a + b$.

Vaatame, mis juhtub, kui võrele langeb tasalaine lainepikkusega λ . Oletame, et pilud on nii kitsad, et sinna mahub ainult üks elementaarlane allikas. Sel korral $b \approx 0$ ja

pilude (valgusallikate) vahekaugus $a \approx d$. Kahe naaberpilu korral esineb valguse tugevnemine (maksimaalne valguse heledus) suunas, mis on määratud seosega

$$d \sin \alpha = k\lambda,$$

kus $k = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ ja seda täisarvu nimetatakse difraktsiooni järguks.



Kui valem on õige pilude paari korral, siis on ta õige suvalise pilude paari korral (a' la sõdurite marssimine: kui suvalised kaks naabersõdurit käivad üht jalga, siis ka kogu kolonn käib üht jalga). Kui aga nii, siis kehtib antud seos ka võre korral, sest täpsemad uuringud näitavad, et kõik kehtib ka siis kui pilusse mahub rohkem kui üks elementaarallikas.

Seda võre omadust kasutatakse spektrite saamiseks spektraalaparaatides.

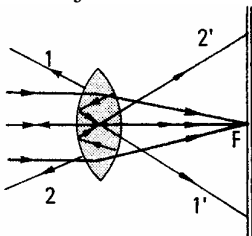
KATSE: Hg spekter võrega.

3.5. Interferentsi ja difraktsiooni rakendusi

Selgendavad katted

Valguse interferentsi kiles kasutatakse peegelduskadude vähendamiseks optilistes süsteemides. On kindlaks tehtud, et puhtalt klaasipinnalt peegeldub tagasi umbes 4% langevast valgusest, kui langemissuund on risti pinnaga. Suuremate langemismurkade korral on peegeldunud valguse hulk suurem, näiteks 60° langemismurga korral on peegeldunud valguse hulk juba ca 20%..

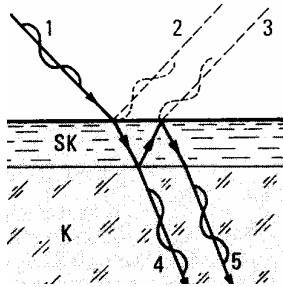
Selleks, et optilist süsteemi läbiks võimalikult palju valgust, kaetakse optiliste detailide pinnad peegeldamist vähendavate katetega. Sel juhul tekib esemest ka selgem kujutis, sest valgus ei haju laiali.



Jooniselt on näha, et peegeldumine laiendab kiirtekimpu, mis tähendab, et kujutis muutub ebaselgemaks. Sellepärast nimetataksegi peegeldamisvõimet vähendavaid katteid selgendavateks kateteks.

KATSE: läbi klaasplaadi, millel on selgendava katte laik lastakse valgust seinale. Teises seinas on näha peegeldumise puudumine.

Vaatame lähemalt, kuidas selgendavad katted "töötavad". Klaasi pinnale on kantud õhukene kile, selgendav kate. Valgus peegeldub kile mõlemalt pinnalt. Kile paksus on valitud nii, et tema pindadelt peegeldunud lained 2 ja 3 on vastasfaasides.



Interfereerudes nad kustutavad teineteist ja peegeldunud valgust ei esine. Kui klaas valgust ei neela, siis suureneb klaasist läbi läinud valguse intensiivsus nii palju, kui muidu oleks tagasi peegeldunud.

Selgendavad katted ei võimalda kõrvaldada kogu peegelduvat valgust, kuna interferentsi miinimumi tingimus on täpselt täidetud vaid ühe kindla lainepikkuse jaoks.

Selgendavaid katteid võib näha, kui vaadata näiteks fotoaparaadi objektiivi. Lillakas või kollakas kile objektiivi pinnal ongi selgendav kate. Need katted on väga õhukesed. Kilede paksus on ainult mõni tuhandik millimeetrit. Sellepärast ei tohi tolmunud objektiivi puhastada lapiga hõõrudes, nii võime kalli objektiivi jäädavalt rikkuda. Puhastada võib ainult õrnalt puhudes või pehme pintsliga ettevaatlikult pühkides.

Selgendavate katete alal on oma töödega saavutanud maailmakuulsuse Tartu Ülikooli füüsikud prof. Paul Kard (1914-1985) ja tema õpilane Lembit Sossi (1943).

Holograafia

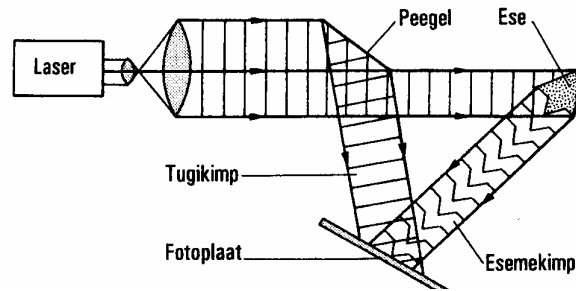
Holograafia on esemete ruumilise kujutise fotografeerimine. Selle tulemusena saadakse hologramm, mis erineb mitmeti tavalisest fotost. Fotol jäädvustatakse eseme **tasapinnaline, mitteruumiline** kujutis, mille me **mõtleme** ruumiliseks. Sealjuures aitavad meid ka varjud fotol, perspektiiv jne. Kuid fotol on võimatu näha eseme mingit osa, mis jääb teise varju. Ei aita siin ka pea liigutamine, mis ikka on "nurga taga", see sinna ka jääb.

Hologrammil on aga jäädvustatud eseme ruumiline, kolmemõõtmeline kujutis. See tähendab, et hologrammi vaatamisel pead liigutades võib eset näha ka teistest külgedest. Kui ühest kohast hologrammi vaadates jäi mingi ese teisele osaliselt ette, siis teisalt vaadates võib näha ka segava detaili taha.

DEMONSTRATSIOON

Vaatame lähemalt hologrammi valmistamist fotograafilisel meetodil ehk holografeerimist. Mingi eseme holografeerimiseks kasutatakse kahe koherentse valguslainekimbu interferentsi. Selleks juhitakse laserikiir läbi optilise süsteemi, mis tekitab laia paralleelse kiirtekimbu ehk tasalaine. Üks osa sellest, nn. **tugikimp**

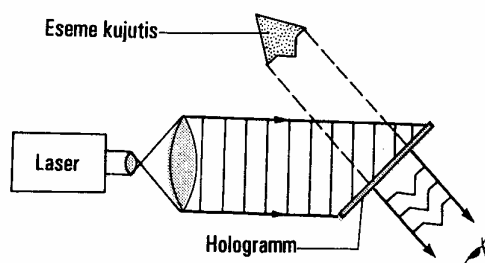
juhatakse peegliga fotoplaadile⁵ või filmile. Teine osa suunatakse sinna pärast holografeeritavalt esemelt peegeldumist. See on **esemekimp**.



Kõik tugikimbus olevad lained jõuavad fotoplaadini samas faasis. Kuid esemekimbu lainepinna kuju muutub holografeeritavalt esemelt peegeldumisel, sest eseme pind ei ole tasapind. Esemekimbu lainepinna kuju kajastab holografeeritava eseme kuju. Niisugusel juhul läbivad esemelt peegelduvad valguslained fotoplaadini jõudmiseks erinevad teepikkused, sest mõned eseme osad on fotoplaadile lähemal kui teised. Sellepärast on käiguvahe esemekimbu ja tugikimbu lainete vahel fotoplaadi erinevais kohtades erinev.

Kuna laserivalgus on koherentne, siis eseme- ja tugikimbu lained interfereeruvad, s.t. nõrgendavad või tugevdavad üksteist. Tulemuseks on keeruline interferentsipilt, milles on peidus holografeeritava eseme kuju. See jäädvustatakse fotoplaadile ja pärast fotograafilist töötlemist (ilmutamine, kinnitamine, kuivatamine) ongi hologramm valmis.

Hologrammi vaatlemiseks kasutatakse ainult tugikimpu. Selle difraktsioon hologrammi interferentsipildil tekitab täpselt samasuguse lainekimbu nagu oli esemekimp. Kui see kimp silma juhtida, tekib silmas esemega sarnane kujutis. Tekkiv kujutis on ruumiline, s.t. silma asendit muutes nihkub vastavalt ka kujutis.



Holograafial on mitmeid rakendusi teaduses, tehnikas, meditsiinis. Loomisel on holograafiline kino ja televisioon. Holograafiast on huvitavalt kirjutanud H. Käämbre oma "Laseriraamatus" (Tln: Valgus, 1978, § 25).

Hologramm erineb fotost mitmeti:

- purunemisel säilitab iga tükk info kogu objekti kohta, sest pole kasutatud koondavat optikat, "pilt" on laiali üle kogu kaadri;
- pole erinevust positiivi ja negatiivi vahel;
- kujutise suurus oleneb kasutatava valguse lainepikkusest: mida suurem λ , seda suurem kujutis;
- ühele fotoplaadile saab jäädvustada palju hologramme, piisab, kui iga kord enne holografeerimist fotoplaati pisut pöörata.

⁵ Fotoplaadiks nimetatakse klaasplaati, mis on kaetud valgustundliku materjaliga (fotoemulsiooniga).

Holograafia leiutas 1947.a. ungari päritolu füüsik D. Gabor, kes sai selle eest 1971.a. Nobeli füüsikapreemia. Hologrammile andis nime samuti D. Gabor, lähtudes kreekakeelsetest sõnadest "holos" - täielik ja "gramma" - üleskirjutus.

Seega tähendab "hologramm" täielikku üleskirjutust.

Hologramm annab esemest tunduvalt täielikuma kujutise kui foto. Tõeliselt "täielikuks üleskirjutuseks" aga ei saa ka hologrammi pidada, sest see ei kajasta näiteks eseme kuju või asukoha muutusi.

1963.a. tegid E. Leith ja J. Uptanieks (lätlane) USA-s maailma esimese hologrammi. Eestis olid esimesed P. Paris ja H. Voolaid 1979 (TRÜ).

Hologramm selle sõna otseses tähenduses annab nn. **aegruumiline ehk 4D holograafia**. See meetod lubab salvestada lisaks keha kujule ka selle liikumist, heleduse või värvuse muutumist jne. Aeg-ruumilise holograafia avastasid 1983.a. Eesti TA Füüsika Instituudi teadlased akadeemik P. Saari (1945) juhtimisel.

Optiliste riistade lahutusvõime

Mikroskoobiga vaadeldakse väikesi objekte, selliseid, mida palja silma või luubiga ei näe, näiteks baktereid, seene eoseid jne. Kuid kas mikroskoobis on näha ka molekule või aatomeid? Ei ole, ja mitte seepärast, et mikroskoobid on kehvad. Põhjuseks on valguse lainelised omadused.

Mida väiksemaid objekte mikroskoobis vaadelda, seda rohkem hakkab meid segama valguse difraktsioon. Objekti valgustamiseks kasutatav valgus hakkab painduma objekti taha, varju piirkonda. Selle tulemusena muutuvad objekti kontuurid ähmasteks ja kujutis uduseks.

Teleskoobiga vaadatakse taevatahti. Need asuvad meist nii kaugel, et paistavad taevas helenduvate punktidenä. Teleskoobis tekkinud tähe kujutis koosneb heledast täpist, mille ümber on palju väiksema heledusega rõngad. Neid rõngaid me tavaliselt ei näe, kui teleskoobiga tähti vaadata. Küll ilmnevad nad astronoomilistel vaatlustel, kui tähtede kujutisi pika aja jooksul fotografeeritakse.

Nähtuse põhjuseks on valguslainete difraktsioon teleskoobi objektiivi raamil. Ümmarguse ava korral on difraktsiooniribad rõngakujulised.

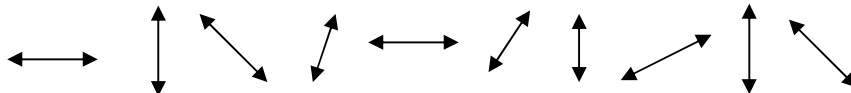
Kui kaks tähte paistavad taevavõlvil väga lähestikku, siis teleskoobis nende difraktsioonipildid kattuvad. Enam ei ole võimalik eristada, kas on tegemist ühe või kahe kujutisega.

Tähtede paremaks vaatlemiseks tuleb kasutada suurema läbimõõduga objektiive. Siis paiknevad difraktsioonirõngad tähe kujutisele (heledale täpile) lähemal ja meil on parem tähti eristada. Selles, et ava suurendamisel difraktsioonipilt "kitseneb", veendusime ise filmitükis oleva pilu laiust muutes.

Lahutusvõime suurendamine on keeruline probleem ja selle lahendamine kallis. Maailma suuremate teleskoopide objektiivide läbimõõdud ulatuvad 10 m. Projekteeritakse 100 m läbimõõduga peeglobjektiiv. Sellised objektiivid on väga kallid. Eestis on suurima objektiiviga teleskoop Tõravere observatooriumis (objektiivi diameeter 1,5m).

3.6. Valguse polarisatsioon

Mingi valguslainete E -vektor võib võnkuda suvalises sihis. Kui me näeksime E -vektoreid, siis vastu valguse levimissuunda vaadates oleks pilt selline.



See on nn. loomulik valgus.

Kui sellise valguse teele asetada seade, mis laseb läbi ainult kindlas sihis võnkuvaid E -vektoreid, siis näeksime järgmist pilti.



Sellist valgust nimetatakse **polariseeritud valguseks**⁶ ja E -vektori võnketasandit **polarisatsioonitasandiks**. Polariseeritud valguse saamise seadet nimetatakse **polaroidiks** või **polarisaatoriks**. Tasandit, milles võnkuvaid E -vektoreid polaroid läbi laseb, nimetatakse polaroidi **läbilasketasandiks**.

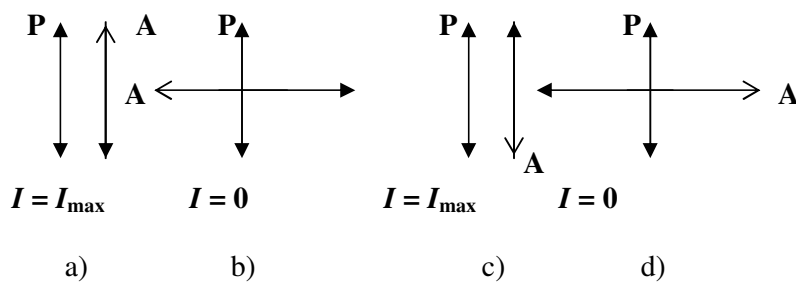
Kui polariseeritud valguse ette asetada teine polaroid, mille läbilasketasand on E -vektori võnketasandiga risti, mis siis juhtub?

Valgus ei läbi teist polaroidi.

KATSE

Uurime lähemalt, kuidas muutub polariseeritud valguse intensiivsus, kui seda valgust vaadata läbi analüsaatori, mida pööratakse ümber vaatesihi. Selleks hoiame polaroidi ühes kindlas asendis ja vaatame sealt tulnud valgust läbi analüsaatori. Pöörame analüsaatorit ümber vaatesihi, näiteks vastupäeva, ühe täisringi. Olukorda aitab mõista joonis 3.4.1.3, kus on näidatud polarisaatori P ja analüsaatori A neli asendit.

Kui polarisaatori läbilasketasand on vertikaalne ja analüsaatori läbilasketasand on ka vertikaalne, siis on analüsaatorist väljunud valguse intensiivsus maksimaalne (olukorrad a ja c). Kui läbilasketasandid on omavahel risti, siis ei pääse valgus üldse analüsaatorist läbi (olukorrad b ja d). Seega ühe täisringi jooksul esineb kaks intensiivsuse I maksimumi ja kaks miinimumi.

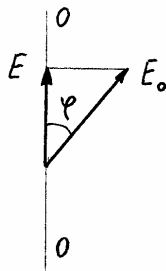


KATSE valguse läbiminekest kahest järjestikusest polaroidist. Algul on ainult üks polaroid. Loomulik valgus suunatakse esimesele polaroidile, kus see polariseerub. Kui seda polaroidi keerata ümber valguse levimissuuna, siis ekraanil valguse intensiivsus ei muutu. Kui asetada esimese polaroidi ja ekraani vahele teine polaroid ja seda keerata, siis on näha, kuidas ekraanil valguse intensiivsus muutub.

Valguse intensiivsuse sõltuvust valguse polarisatsioonitasandi ja analüsaatori läbilasketasandi vahelisest nurgast seletatakse järgmiselt.

Langegu polariseeritud valgus analüsaatorile, mille läbilasketasand OO on vertikaalne ja valguse E -vektor E_0 moodustab läbilasketasandiga nurga φ . Sel juhul saab analüsaatorit läbida ainult E_0 komponent $E = E_0 \cos \varphi$.

⁶ Täpsemalt öeldes – **lineaarselt polariseeritud valguseks**. Esineb ka ellipüütiliselt polariseeritud valgust, mida meie ei käsitle.



Kuna valguse intensiivsus $I \propto E^2$, saame intensiivsuse avaldiseks $I = I_0 \cos^2 \varphi$. Selle seaduse avastas prantsuse füüsik E. Malus 1808.a.

Valgust saab polariseerida mitmeti. Meie vaatame polariseerumist **peegeldumisel** ja **neeldumisel**.

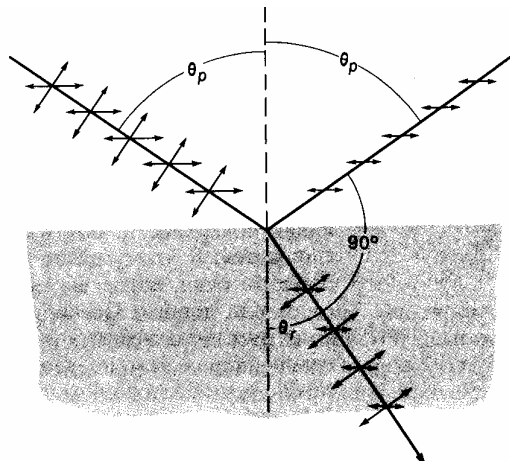
Kui loomulik valgus peegeldub dielektriku pinnalt, siis peegeldunud ja murdunud laine on osaliselt polariseeritud.

KATSE :vaadata läbi polaroidi laualt peegeldunud valgust.

Ühe kindla langemisnurka korral on peegeldunud laine täielikult polariseeritud.

Sellele olukorrale vastavat langemisnurka nimetatakse **Brewsteri nurgaks** šoti füüsiku David Brewsteri auks, kes selle efekti avastas aastal 1815.

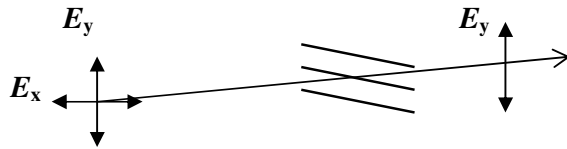
Brewsteri nurk (joonisel Θ_p) on selline langemisnurk, mille korral peegeldunud ja murdunud kiir on omavahel risti.



Sellist olukorda saab seletada, kasutades valguse levimise dipoolmudelit ja dipooli elektrivälja jaotust (telje suunas on $E = 0$, ristsuunas aga maksimaalne). Meie seda nähtust lähemalt ei käsitle.

Valgust saab polariseerida, lastes seda läbi aine, mis ei neela teatava polarisatsioonitasandiga laineid, kuid teisi neelab. Sellist nähtust nimetatakse **dikroismiks**.

Nähtuse seletamisel kasutame mudelit, milles loomulik valgus langeb lõpmata peenikestest paralleelsetest metalltraatidest võrele.



Valguslaine E-vektori x-komponent paneb vabad elektronid metallis liikuma piki traate. Sealjuures elektrivälja energia muutub traadi soojusenergiaks ja võrest sellised lained läbi ei lähe.

E-vektori y-komponent ei neeldu, sest y-telje suunas elektronid ei saa nihkuda (traat on lõpmata peenike). Tegelikult asendavad sellist võret pikad ja paralleelsed molekulid. Polariseeriva toimega on joodpolüvinüülkile, turmaliin, gerapatiit jne.

NÄIDE: nööri võngutamine tooli seljatoe ribide vahel: piki ja risti ribisid.

Valgus polariseerub ka sellise nähtuse korral nagu on **kaksikmurdumine**.

Kaksikmurdumise korral jaotub ainele langev valguslaine kaheks laineks: tavaliseks ja ebataavaliseks. Need lained on polariseeritud ristiolevates tasandites. Tavalise laine korral kehtib valguse murdumiseadus, ebataavalise korral ei kehti, st

$$\sin\alpha / \sin\gamma \neq \text{const.}$$

Kaksikmurdumine esineb ainetes, mis on **anisotroopsed**, st ainetes, kus dielektriline läbitavus on erinevates suundades erinev. Põhjuseks on kristalli aatomite erinevad vahekaugused erinevates suundades.

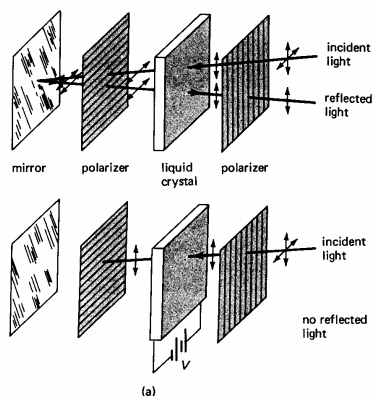
Anisotroopiat saab tekitada ka kunstlikult, kas mehaanilise surve või elektrivälja abil. Mehaanilise pinge toimel tekkiva deformatsiooni uurimine polariseeritud valguse abil on nn. **fotoelastsusmeetod**.

KATSE kahe polaroidi ja karbikaanega

Anisotroopia tekitamine elektrivälja abil kannab nimetust **Kerri efekt** (šoti füüsik John Kerr 1875). Vedelikuga täidetud küvett pannakse kahe ristioleva polaroidi vahele. Küvetis on kaks elektroodi, mille abil on võimalik tekitada vedelikus elektrivälja. Selle tulemusena muutub vedelik anisotroopseks ja valgus hakkab rakku (nii nimetatakse küvetti koos polaroidide ja elektroodidega) läbima. Efekt tekib väga kiiresti, ca $10^{-12} \dots 10^{-10}$ sekundi jooksul. Kerri efekti kasutatakse valguse moduleerimisel.

KATSE Kerri efektist

Anisotroopsed on ka nn. **vedelad kristallid**. Need koosnevad pikkadest peenikestest molekulidest, mille otstes on erinimelised laengud. Sellised molekulid asuvad ka vedelas olekus teatava korrapära järgi. Neid kasutatakse näiteks mitmesugustes tabloodes, kus on elektroodidega varustatud segmendid, millele saab rakendada pinge ja sellega muuta molekulide orientatsioon ning sellega ka polariseeritud valguse läbilasketasandit. Need segmendid on polaroidide vahel ja kõige selle tulemusena valgus neeldub segmentides ja me näeme tumedaid numbreid või tähti hallil taustal.



Polarimeetria

On olemas ka aineid, millest läbiminekul valguse polarisatsioonitasand pöörduv. Selliseid aineid nimetatakse **optiliselt aktiivseteks**. Pöördenurga suurus oleneb ainekihi paksusest ja lahuste korral ka lahuse **konsentratsioonist** - konsentratsiooni suurenedes suureneb ka tasandi pöördenurk. Pöördumise suurust kirjeldatakse **eripöörangu abil**, mis näitab, kui suure nurga võrra polarisatsioonitasand pöörduv ühikulise ainekihi paksuse ja ühikulise konsentratsiooni korral.

Lahuste korral kehtib seos:

$$\varphi = [\alpha]cl,$$

kus φ on polarisatsioonitasandi pöördenurk, $[\alpha]$ - eripöörang, c – lahuse konsentratsioon ja l – lahusekihi paksus.

Näiteks suhkrulahuse puhul on pöördenurk umbes 60 kraadi, kui kihi paksus on 10 cm ja konsentratsioon 1 g/cm³. Umbes sellepärast, et tulemus sõltub suhkru sordist ja lahuse temperatuurist.

Riistu, mis mõõdavad aines oleva suhkru konsentratsiooni polarisatsioonitasandi pöördenurga järgi, nimetatakse **sahharimeetriteks**.

Sellega tutvume praktikumis täpsemalt.

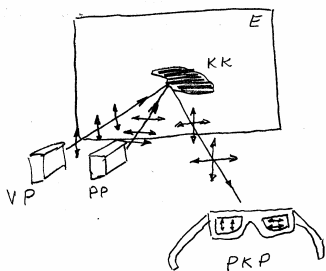
KATSE sahharimeetriga

Polaroidprillid

Nagu eespool räägitud, polariseerub valgus dielektrikutelt peegeldumisel. Järelikult mere- või järveveelt peegeldunud päikesevalgus on polariseeritud. Sellepärast kasutatakse mõnedes päikeseprillides silmade kaitseks klaasidele kantud polaroidkilesid. Need vähendavad oluliselt veepinnalt, lumelt või märjalt asfaldilt peegeldunud valguse tugevust. Sellepärast kasutavad polaroid-päikeseprille peamiselt kalamehed, mäesuusatajad või autojuhid. Teistel on nad rohkem edevuse asjad.

Polaroide kasutatakse ka 3D filmide vaatamiseks.

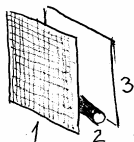
Filmi tegemisel kasutatakse filmimiseks kaht kaamerat üheaegselt. Kaamerad asuvad kõrvuti nagu meie silmadki. Filmi näitamisel kasutatakse kaht projektorit, millest üks näitab vasakpoolse kaameraga tehtud filmi ja teine parempoolse kaameraga tehtud filmi. Mõlemad projektorid on suunatud ekraani ühte kohta. Ruumilise kujutise tekkimiseks peab vaataja nägema vasaku silmaga vasakpoolse kaamera filmitut ja parema silmaga parempoolse kaameraga filmitut. Selle saavutamiseks kasutatakse projektorite ees risti olevate läbilasketasanditega polaroide. Ja vaatajal on ka ees polaroidklaasidega prillid, mille vasaku klaasi läbilasketasand on sama mis vasakpoolsel projektoril ning parempoolsel sama mis parempoolsel projektoril.



3D filmi vaatamine. E – ekraan, KK –kujutis, VP - vasakpoolne projektor, PP – parempoolne projektor; PKP – polaroidklaasidega prillid.

LCD kuvar

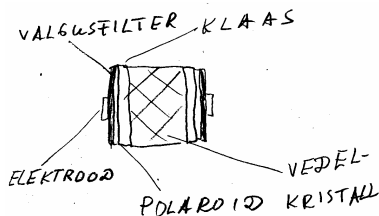
LCD kuvareid kasutatakse televiisorites ja arvutites pildi nähtavaks tegemiseks ehk kuvamiseks. LCD (Liquid Crystal Display) kuvari põhiosad on ekraan pikslitega, valge taustvalguse allikas ja valguse hajutaja. Sellelt tulev valgus juhitakse läbi pikslite, mis tekitavad soovitud pildi ekraanile. Pikslid on paigutatud kindlatesse ridadeks ja veergudeks ning igaüks neist laseb läbi kas punast, rohelist või sinist valgust. Neid värvusi kombineerides on võimalik saada igasuguseid värvitoone.



LCD kuvari põhiosad. 1 – pikslitega ekraan, 2- taustvalguse allikas (päevavalguslamp), 3 – taustvalguse hajutaja (valge mattekraan).

Piksli nimi tuleb ingliskeelsetest sõnadest *picture* ja *element*, seega eesti keeles oleks nimi *pildielement*.

Pikslid on imeväikesed, palja silmaga eristamatud. Iga piksel koosneb klaasplaatide vahele pandud vedelkristallist. Plaatide pinnad on kaetud polaroidkile ja kas punase, rohelse või sinise valgusfiltriga (ainega, mis laseb läbi ainult vastavat värvi valgust). Kummalgi pinnal on ka läbipaistvast materjalist elektrood, mis lubab tekitada pikslis elektrivälja. Piksli pindadel olevate polaroidide läbilasketasandid on omavahel risti ja pingestamata elektroodide korral valgus pikslit ei läbi. Selline piksel paistab ekraanil musta täpina.



Kui piksel pingestada, siis selles olev vedelkristall pöörab teda läbiva valguse polarisatsioonitasandit. Järelikult pingestatud pikslis ei ole enam polaroidide läbilasketasandid omavahel risti ja pikslit hakkab valgus läbi minema.

Polarisatsioonitasandi pöördenurk oleneb kasutatud pinge suuruselt ja nii saab muuta pikslit läbinud valguse hulka. Selliselt on võimalik tekitada ekraanile erineva heleduse ja värvusega punkte, mis kokku annavad soovitava värvilise kujutise.

4. Geomeetriline optika

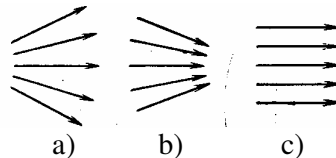
4.1. Põhimõisted ja definitsioonid

Geomeetriline optika on selline optika osa, kus valguse levimist kirjeldatakse valguskiirte abil. **Valguskiir** on joon, mis näitab valgusenergia levimise suunda ja selleks on lainefrondi normaal. Lõikumisel kiired üksteist ei mõjusta, ei sega.

Millal võime kasutada geomeetrilise optika seadusi? St, millal võib kasutada valguskiiri, arvestamata valguse lainelisi omadusi? Siis, kui avade mõõtmed on lainepikkusest palju suuremad, ehk teisiti öelduna siis, kui $\lambda \rightarrow 0$. Sel juhul ei esine valguse difraktsiooni ja valgus levib alati sirgjooneliselt.

Geomeetrilises optikas loetakse valguse lainepikkus võrdseks nulliga.

Kiirte kogumit nimetatakse **kiirtekimbuks**. Kiirtekimpe jaotatakse kolmeks: a) hajuv, b) koonduv, c) paralleelne



Kui kiirte pikendused lõikuvad ühes punktis (joonisel kimp a), on kiirtekimp **homotsentriline**. Sellele punktile vastab valguspunkt, ehk **punktvalgusallikas**.

Iga optiline süsteem muudab kiirtekimpu. Näiteks paralleelse kiirtekimbu läbimine käärtsest kitsa ja laia kimbu korral.

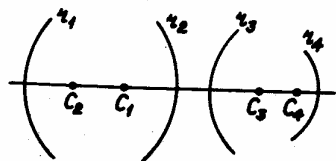
KATSE

Kui süsteem ei riku homotsentrilisust, siis punktallikast väljunud kiired lõikuvad kah ühes punktis ning räägitakse **stigmaatilisest** ehk **punktkujutisest**. Kui valguspunktist ei teki punktkujutist, räägitakse astigmaatilisest kujutisest. Seda me ei käsitle.

Meie käsitleme **ideaalseid optilisi süsteeme**, mis annavad esemest sellega sarnase punktkujutise.

Täpsemalt öelduna, meie räägime ainult **tsentreeritud ideaalsetest süsteemidest**.

Süsteem on tsentreeritud, kui optiliste pindade kõveruskeskused C_1, C_2, C_3 ja C_4 asuvad ühel teljel, mida nimetatakse optiliseks **peateljeks**.



Joonisel on tähistatud ka pindade kõverusraadiused r_1, r_2 , jne.

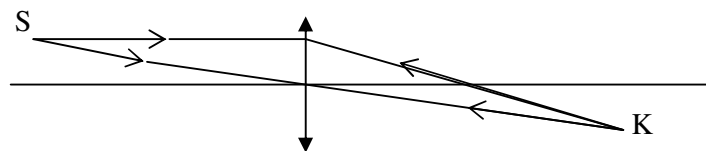
Seda ruumipiirkonda, kus asub ese ja sellest väljunud kiired, nimetatakse **esemeruumiks**, seda piirkonda, kus asub kujutis ja süsteemist väljunud kiired nimetatakse **kujutise ruumiks**.

Kujutisi jaotatakse **tõelisteks ja näivateks**. Tõeline kujutis tekib siis, kui lõikuvad kiired. Seda on võimalik tekitada ekraanile. Näivast kujutisest räägitakse siis, kui kiired ise ei lõiku, küll aga lõikuvad nende pikendused. Mingi teine optiline süsteem, näiteks silm, võib selle näiva kujutise teha tõeliseks.

Geomeetrilises optikas kasutatakse nn. **paraksiaalseid kiiri**, st kiiri, mis asuvad optilise peatelje lähedal või moodustavad sellega väikese nurga. Sel juhul $\tan \alpha \approx \sin \alpha \approx \alpha$.



Geomeetrilises optikas kehtib nn. **kiirte pööratavuse printsiip**, st. kiir läbib süsteemi päri ja vastasuunas ühte teed mööda. Seetõttu võib vajadusel vahetada valgusallika ja selle kujutise asukohti. Punktid S ja K on kaaspunktid.



4.2. Geomeetrilise optika põhiseadused

1. Valguse sirgjoonelise levimise seadus

Homogeenses ja isotroopses keskkonnas levib valgus sirgjooneliselt.

Kuidas seda tõestada? Tavaliselt öeldakse, et terav vari punktvalgusallika teele pandud eseme taga ongi tõestus. Kas on?

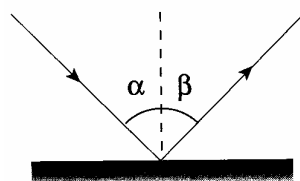
2. Kiirtekimpude sõltumatuse seadus

Kiirtekimbud läbivad teineteist mõjustamata.

3. Valguse peegeldumisseadus

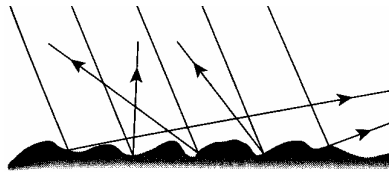
Mis on üldse peegeldumine? See on valguse tagasipöördumine kahe keskkonna lahutuspinna sinna keskkonda, kust valgus tuli. Peegeldumise korral võivad eseme- ja kujutise ruumid kattuda.

Peegeldumisel on langemisnurk võrdne peegeldumisnurgaga ja langenud kiir, peegeldunud kiir ning langemispunkti tõmmatud pinnanormaal asuvad ühes tasandis.



Joonis. 6.35. Valguse peegeldumine

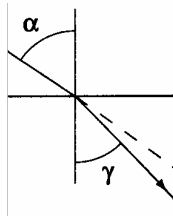
Kas peegeldumisseadus kehtib ka karedalt pinnalt peegeldudes? Jah, sellist peegeldust nimetatakse difuusseks peegeldumiseks ehk hajumiseks.



Joon. 6.37. Paralleelse kiirtekimbu difuusne peegeldumine karedalt pinnalt

4. Valguse murdumise seadus

Valguse üleminekul ühest keskkonnast teise valguskiire murdub nii, et langemisnurga ja murdumisenurga siinuste suhe on jääv suurus. Langenud kiir, murdunud kiir ja langemispunkti tõmmatud pinnanormaal asuvad ühes tasandis. KATSE

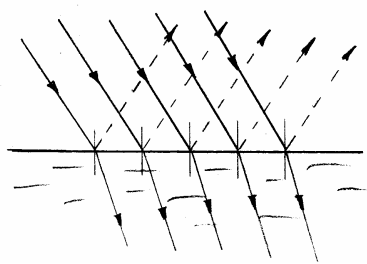


Seda siinuste suhet nimetatakse murdumisnäitajaks $\sin \alpha / \sin \gamma = n_2 / n_1$, kus n on keskkonna **absoluutne murdumisnäitaja**: $n = c / v$, kus c on valguse kiirus vaakumis ja v valguse kiirus keskkonnas. Suurim absoluutne murdumisnäitaja on teemantil: 2,4 väikseim aga vaakumil: 1. Õhu murdumisnäitaja on 1,0003.

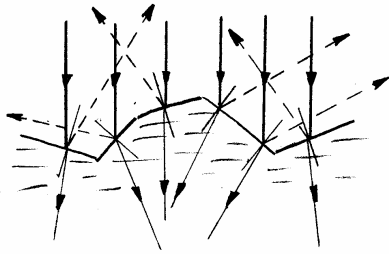
Suhet n_2 / n_1 nimetatakse **suhteliseks murdumisnäitajaks** n_s , mis näitab, mitu korda erineb teise keskkonna absoluutne murdumisnäitaja esimese keskkonna absoluutsest murdumisnäitajast. Esimeseks keskkonnaks nimetatakse seda keskkonda, kust kiir tuleb, teiseks seda, kuhu kiir läheb.

$$n_s = n_2 / n_1 = v_1 / v_2 .$$

Läbipaistvate kehade korrale esinevad peegeldumine ja murdumine korraga. Kui pind on sile, siis jääb peegeldumisel ja murdumisel paralleelne kiirtekimp ikka paralleelseks.



Kui pind ei ole sile, siis paralleelne kiirtekimp ei jää paralleelseks ei peegeldumisel ega murdumisel.



Aga milline pind on sile? On kindlaks tehtud, et pinda võib siledaks lugeda, kui pinna konaruste mõõtmed on väiksemad kui valguse lainepikkus. See tähendab, et pinnal ei või olla muhkusid ja lohke, mille sügavus on suurem kui ca 100 nm ehk kümnetuhandik millimeetrit.

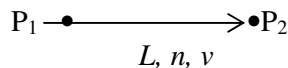
Aga alati ei pea sile peegel olema nii väikeste konarustega. Vaadake või TV paraboolantenne. Need pole sugusi väga siledad. Aga seal on konarused ikka palju väiksemad antennile langevate elektromagnetlainete lainepikkusest, mis on detsimeetri suurusjärgus

4.3. Fermat' printsiip

Valguse murdumise ja peegeldumise seadused tulenevad ühest printsiibist, mille esimesena sõnastas ca 2000 a tagasi **Heron**, kes väitis, et **valgus levib ühest punktist teise lühimat teed pidi**.

1662.a. **Fermat'** täpsustas seda, väites, et valgus **levib teed mööda, mille läbimiseks kulunud aeg on minimaalne**.

Seega homogeense keskkonna korral on printsiibid samaväärsed, muidu mitte.



Siin levib valgus punktist P_1 punkti P_2 . Punktide vaheline kaugus on L ja valgus levib keskkonnas murdumisnäitajaga n kiirusega v .

Valguse levimise aja leiame järgmiselt: $t = L/v$, aga $v = c/n$, seega $t = \frac{L \cdot n}{c}$, kus

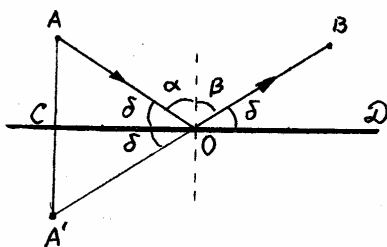
korrutist $L \cdot n$ nimetatakse **optiliseks teepikkuseks**.

Seega võib Fermat' printsiipi sõnastada ka nii: **valgus levib ühest ruumpunktist teise nii, et optiline teepikkus oleks minimaalne**.

Tuletame Fermat' printsiibi abil valguse peegeldumise ja murdumise seaduse.

Peegeldumisseadus

On vaja leida kiirte tee punktist A punkti B nii, et see peegelduks peegli pinnalt CD punktis O ja levimise aeg oleks minimaalne.



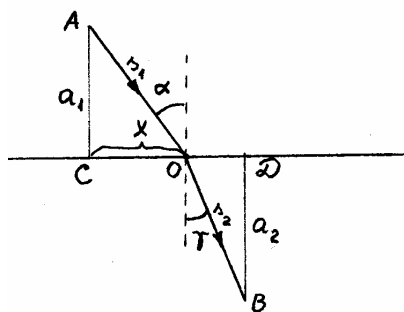
Kuna kiir liigub kogu aeg ühesuguses keskkonnas, võime leida minimaalse aja asemel minimaalse teepikkuse AOB.

Selleks konstrueerime peegli taha punkti A' nii, et $AC = CA'$. Sel juhul ka $AO = A'O$, sest $\triangle ACO = \triangle A'CO$. Seega ka teepikkus $AOB = A'OB$.

Teepikkus A'BO on minimaalne, kui see on sirge. Sel juhul on $\angle A'OC = \angle BOD$ ja järelikult ka $\angle AOC = \angle BOD$. Siit on näha, et

$$\alpha = \beta.$$

Murdumiseseadus



$$CD = b$$

$$CO = x$$

Valguse levimiseks punktist A punkti B kuluv aeg $t = t_1 + t_2$, kus $t_1 = s_1/v_1$ ja $t_2 = s_2/v_2$ ning $v_1 = c/n_1$ ja $v_2 = c/n_2$.

$$\text{Seega } t = \frac{\sqrt{a_1^2 + x^2}}{\frac{c}{n_1}} + \frac{\sqrt{a_2^2 + (b-x)^2}}{\frac{c}{n_2}}. \text{ Selleks, et valguse levimisaeg oleks}$$

minimaalne, tuleb leida saadud avaldise tuletis x järgi, võrdsustada see nulliga ja kontrollida, kas teine tuletis on positiivne.

Leiame tuletise

$$\frac{dt}{dx} = \frac{2n_1x}{2c\sqrt{a_1^2 + x^2}} + \frac{2n_2(b-x)(-1)}{2c\sqrt{a_2^2 + (b-x)^2}} = 0.$$

Siit saame

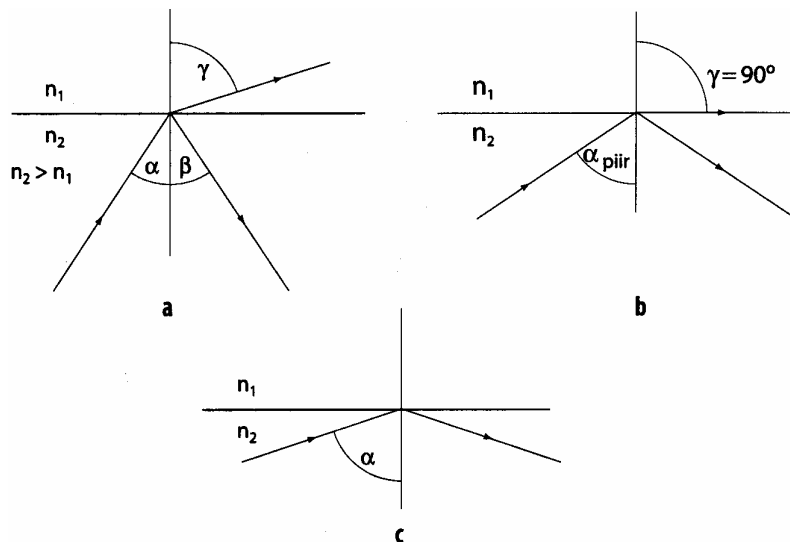
$$\frac{n_1x}{s_1} - \frac{n_2(b-x)}{s_2} = 0, \text{ aga kuna } \frac{x}{s_1} = \sin \alpha \quad \text{ja} \quad \frac{b-x}{s_2} = \sin \gamma, \text{ saame}$$

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{n_2}{n_1}.$$

4.4. Valguse täielik peegeldumine (sisepeegeldus)

Teatavatel tingimustel võib valgus kahe keskkonna lahutuspinnalt täielikult tagasi peegelduda. See võib juhtuda siis, kui valgus läheb tihedamast keskkonnast hõredamasse (sinna, kus murdumisnäitaja on väiksem)

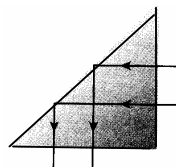
A.Eichenwald tõestas esimesena teoreetiliselt, et täielikul peegeldumisel tungib valgus siiski pisut ka teise keskkonda (umbes λ võrra), kuid siis pöördub tagasi. Hiljem on see leidnud katselist kinnitust.



Joon. 6.43. Valgus tuleb optiliselt tihedamast keskkonnast ja langeb keskkondade lahutuspinnale. Kui langemisnurk $\alpha < \alpha_{\text{piir}}$, siis osa valgust peegeldub piirpinnalt, osa murdub (a); kui $\alpha = \alpha_{\text{piir}}$, siis, osa valgust peegeldub piirpinnalt, osa libiseb piki piirpinda (b); kui $\alpha > \alpha_{\text{piir}}$, siis kogu valgus peegeldub piirpinnalt (c)

Piirnurga korral kehtib seos $\sin \alpha_p = n_1/n_2 \sin 90^\circ = n_1/n_2 = n_{12}$. Siit järeldub, et mõõtes piirnurga ja teades ühe aine murdumisnäitajat, on võimalik määrata teise aine murdumisnäitaja. Seda kasutatakse refraktomeetrites.

Täielikul peegeldusel on mitmeid rakendusi, sest siis ei esine energia kadusid: kiirte suunda muutvad prismad, valgusjuhid, kiudoptika (kiu läbimõõt ca 1 mikromeeter - meditsiin, side, TV)



Joon. 6.44. Valguse suuna muutmine prisma abil

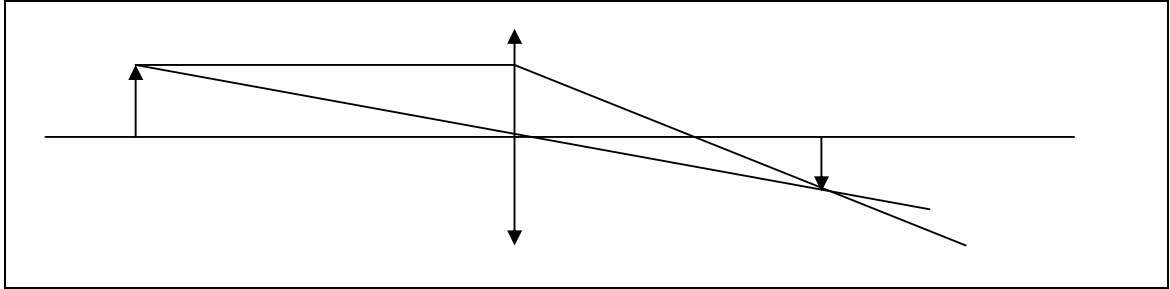


Joon. 6.45. Valguse levimine valgusjuhis

4.5. Kujutise tekitamine läätsede ja peeglitega

4.5.1. Kujutise tekitamine kumerläätses

KATSE: Eseme (hõõglambi) kujutise tekitamine ekraanil. Varieerida eseme ja lääts vahemaad, vaadata, mis juhtub kujutisega. Alata suurest kaugusest. Mingil kaugusel kujutis kaob.



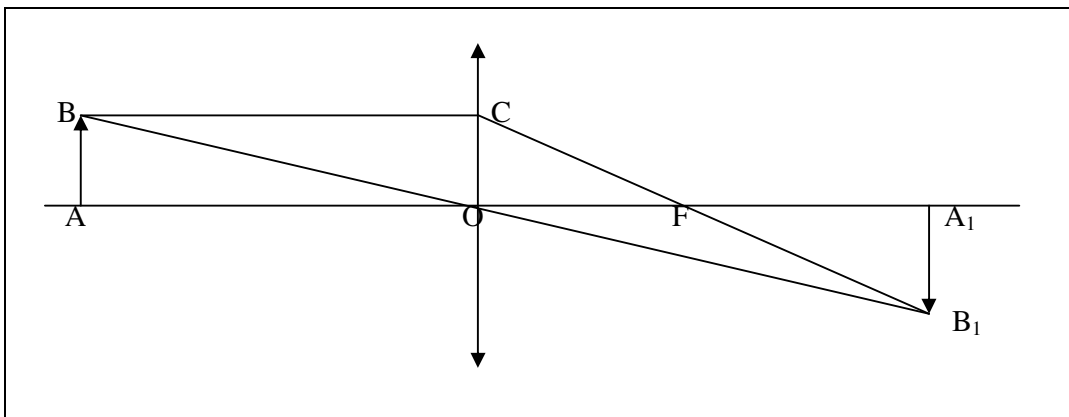
Miks valitakse kujutise leidmiseks just need 2 kiirt? Miks nad nii käituvad?

Teeme teise joonise, kus ese on läätsel lähemal. (Joonisel peab f ja ese olema samasuured kui eelmisel joonisel). Mis juhtub kujutisega? Suureneb. Aga Katses?

Kah suurenes.

Kui ese veel lähemale viisime, ei tekkinud kujutist. Teeme joonise.

Aga lihtsam on tuletada lääts valem ja seda analüüsida, kui iga olukorra jaoks joonis teha. Tuletame valemi.



Tuletame seose a , k ja f vahel, kus:

a on esemekaugus, st kaugus AO eseme ja lääts keskpunkti vahel;

k on kujutisekaugus, st kaugus OA₁ lääts keskpunkti ja kujutise vahel;

f on fookuskaugus, st kaugus OF lääts keskpunkti ja fookuse vahel.

Lähtume kolmnurkade AOB ja A₁OB₁ sarnasusest. (Miks nad on sarnased?)

$$AB/A_1B_1 = AO/A_1O = a/k \quad (1).$$

Fookuskauguse sissetoomiseks vaatame kolmnurki COF ja B₁FA₁. Ka need on sarnased (miks?)

$$CO/A_1B_1 = OF/A_1F. \text{ Kuna } AB = OC, \text{ siis } AB/A_1B_1 = OF/A_1F = (1) = a/k.$$

$$OF = f \text{ ja } A_1F = k - f, \text{ siis } f/(k - f) = a/k.$$

$$kf = ak - af \quad /: fka$$

$$1/a + 1/k = 1/f$$

Analüüsime läätse valemite:

- 1) Kui $a = f$, siis $1/k = 0$, st $k = \infty$
- 2) Kui $a = \infty$, siis $k = f$
- 3) Kui $a < f$, peab k olema negatiivne, see vastab **näivale kujutisele**.

Sageli kasutatakse fookuskauguse asemel **optilist tugevust** $D = 1/f$. Ühikuks on **1 dioptria (dptr)**, see on läätse optiline tugevus, mille fookuskaugus $f = 1 \text{ m}$, st $1 \text{ dptr} = 1 \text{ m}^{-1}$.

Katses nägime, et kujutis võib olla nii suurendatud kui vähendatud. Selle iseloomustamiseks kasutatakse suurenduse mõistet, täpsemalt **joonsuurendust**, mis näitab, mitu korda erinevad kujutise mõõtmed eseme vastavatest mõõtmetest.

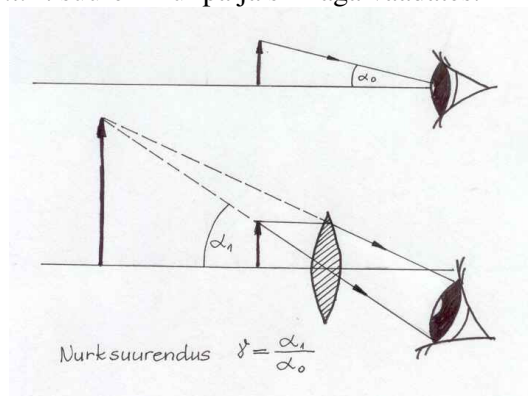
Seega suurendus $s = A_1B_1/AB$. Kuid seosest (1) näeme, et $A_1B_1/AB = k/a$. Seega suurendus $s = k/a$

Siit on näha, et kui $k = a$, siis on $s = 1$. Läätse valemist on näha, et sel juhul

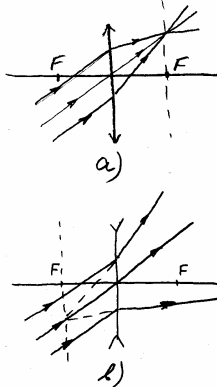
$$\frac{1}{a} + \frac{1}{a} = \frac{1}{f} \Rightarrow \frac{2}{a} = \frac{1}{f} \Rightarrow a = 2f.$$

See tähendab, et koondava läätse korral on kujutis samasuur kui ese siis, kui esemekaugus on võrdne kahekordse fookuskaugusega.

Kasutatakse ka **nurksuurendust**, mis näitab, mitu korda on läbi läätse või optilise riista vaadates *vaatenurk* suurem kui palja silmaga vaadates.



Mis juhtub aga siis, kui läätsel langeb paralleelsete kiirte kimp, mis ei ole paralleelne optilise peateljega? Kumerläätsel korral see kiirtekimp koondub fokaaltasandi punktis, mis on määratud läätse keskpunkti läbiva kiirega. Nõgusläätsel korral selline kiirtekimp hajub nii, et kiirte pikendused lõikuvad fokaaltasandi punktis, mis on samuti määratud läätse keskpunkti läbiva kiirega..



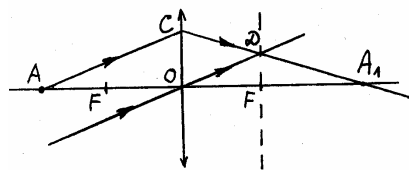
Läätsel kaldu langeva paralleelsete kiirte kimbu läbimine kumerläätsel (a) ja nõgusläätsel (b). Fokaaltasand on kujutatud katkendliku joonega.

Vaatleme, kuidas saab leida optilisel peateljel asuva punkti kujutist kumerläätsel korral.

Sel juhul võtame etteantud punktist A mingi suvalise kiire läätsel, näiteks AC ja joonistame sellele kiirele paralleelse kiire, mis langeb läätse keskpunkti O. Nüüd on meil kahekiireline paralleelne kiirtekimp, mis langeb läätsel kaldu. Selline kimp koondub fokaaltasandi punktis D. Järelikult sellest punktist läheb läbi ka punktist A väljunud ja läätsel punktis C langenud kiir.

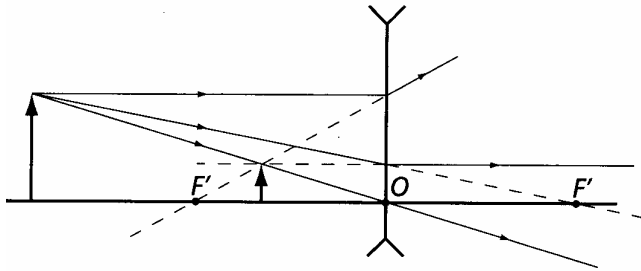
Kujutise asukoha leidmiseks on vaja teada kahe esemest väljunud kiire lõikepunkti teisel pool läätsel. Valime teiseks kiireks piki optilist peatelge liikuva kiire AO, mis läbib läätse keskpunkti. See kiir läätse läbimisel oma levimissuunda ei muuda ja levib ikka piki optilist peatelge.

Nii saamegi kujutise asukohaks punkti A_1 .



4.5.2. Kujutise tekitamine nõgusläätsel

KATSE Kordame kumerläätsel katset nõgusläätsel. Kujutist ekraanile ei teki, aga silmaga vaadates midagi näeme – lambi vähendatud kujutist.



Nõguslääts tekitab alati vähendatud kujutise.

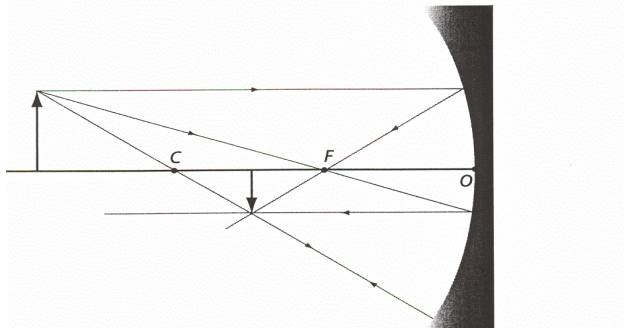
Lääts valem nõguslääts korral omab kuju: $1/a - 1/k = -1/f$, sest näivat fookuskaugust ja näivat kujutisekaugust tõlgendatakse kui negatiivset suurust..

KATSE kumera õhkläätsiga . Milline kiirte käik sellele vastab?

4.5.3. Kujutise tekitamine nõguspeegli

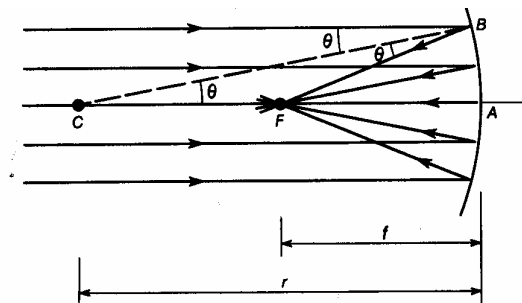
KATSE: Kordame katset, mida tegime kumerläätsiga. Tulemus on analoogiline.

Kujutise konstrueerimine.



Kehtib valem $1/a + 1/k = 1/f$

Leiame seose peegli fookuskauguse f ja kõverusraadiuse r vahel.



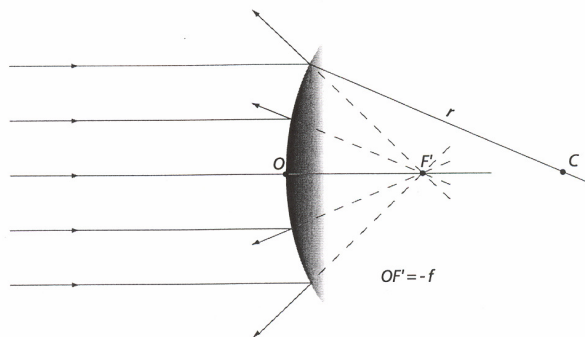
$\triangle CBF \Rightarrow CF = FB$. Kui $\theta \rightarrow 0$, siis $FB = r = FA$ ehk $CF = FA$.

Siit saame, et $CA = CF + FA$ ehk $r = f + f$, millest $r = 2f$.
See tähendab, et nõguspeegli fookuskaugus on võrdne poolega selle kõverusraadiusest.

4.5.4. Kujutise tekitamine kumerpeegliga

KATSE: Kordame katset, mida tegime kumerläätsesega. Tulemus sarnane sellele, mida saime nõgusläätsesega.

Kujutise konstrueerimine.



Kumerpeegli valem $1/a - 1/k = -1/f$

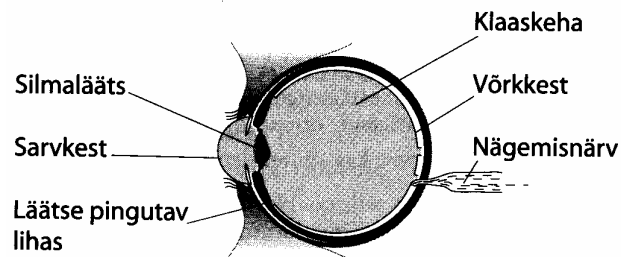
Kokkuvõte:

Läätsede ja peeglite korral kehtib üks ja sama valem $1/a + 1/k = 1/f$, milles tuleb arvestada märke: miinusmärk pannakse näiva kujutise ja näiva fookuse puhul.

Probleem: Kuidas leida optilisel peateljel oleva punkti kujutist?

4.6. Silm

Silm on optiline süsteem, mis koosneb mitmetest osadest. Kujutise tekitamise seisukohalt on olulisim silmalääts, mis normaalse silma korral tekitab esemest kujutise silma võrkkestale.



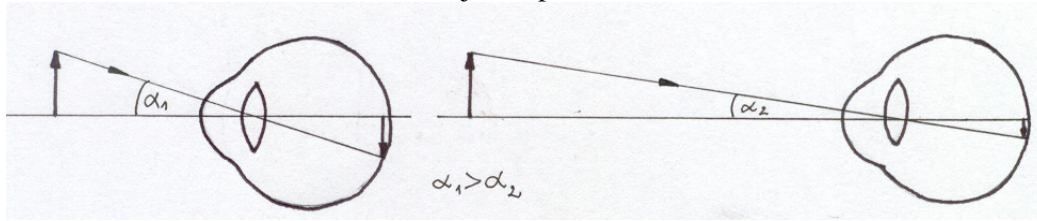
Silma lihased muudavad silmaläätse kumerust ja see võimaldab näha nii lähedasi kui kauged esemeid. Seda nimetatakse **akkommodatsiooniks**. **Parima nägemise kauguseks** loetakse täiskasvanul 25 cm, siis tuleb silma kõige vähem pingutada.

Valgust tunnevad silma **retseptorid**: kolvikesed ja kepikesed. Kepikesed töötavad nõrgas valguses ja ei tunne värvusi, kolvikesed tunnevad värvusi ja töötavad tugevas valguses. Vanemas eas võivad retseptorid osaliselt hävida, eriti siis, kui varem, isegi üle 10 aasta tagasi on peetud rasvavaba dieeti!

Üks silm on **juhtsilma**: meie nägemistaju on määratud juhtsilmas tekkiva kujutisega, teine silm tekitab ruumilisuse efekti. Kuidas kindlaks teha? Vaatame kahe silmaga ja sihime sõrmega mingit kauget eset. Kui kordamööda silmi kinni pigistada, siis ühel juhul jääb sõrm eseme kohale (see on juhtsilma). Teisel juhul hüppab sõrm esemest kõrvale.

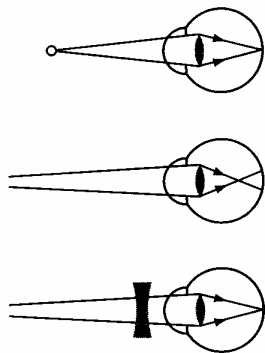
Kui kujutis langeb kohale, kust nägemisnärv silmast välja läheb, ei teki kujutist, sest seal pole retseptoreid. See on nn. **pimetäpp**. Vaatame ühe silmaga kaugusse ja nihutame väljasirutatud käes olevat pliiatsit otse eest küljele. Mingis kohas kujutis kaob. Siis satubki kujutis pimetäpile.

Vaatenurk on nurk eseme äärmistest punktidest silma tulevate kiirte vahel. Sama eset lähedalt vaadates on see nurk suurem ja ese paistab suuremana.

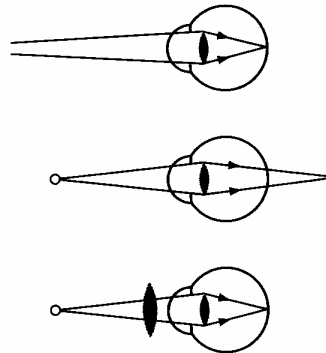


Nägemisdefektide kõrvaldamiseks kasutatakse prille. Lühinägilal tekib kaugete esemete vaatamisel kujutis võrkkesta ette. Korrigeerimiseks kasutatakse nõgusläätsesid ("miinusprille", mille tugevust kirjeldav arv näitab läätse optilist tugevust dioptriates).

Kaugnägilal tekib lähedase eseme vaatamisel kujutis võrkkesta taha. Korrigeerimiseks kasutatakse kumerläätsesid ("plussprille").



Joon. 6.55. Kujutise tekkimine lühinägilja silmas

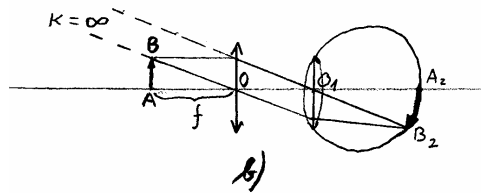
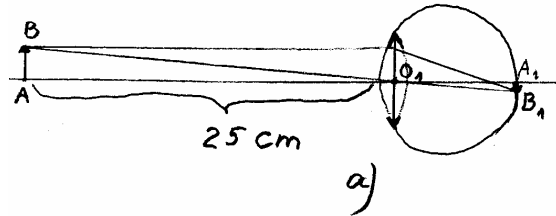


Joon. 6.56. Kujutise tekkimine kaugnägilja silmas

4.7. Luup ehk suurendusklaas

Luubina töötab iga koondav lääts, kui ese panna läätsel lähemale kui fookuskaugus. Tavaliselt on luubi $f = 1 \text{ cm} \dots 10 \text{ cm}$.

Vaatame, kuidas tekib kujutis silmas, kui me ese asub **parima nägemise kaugusel (25 cm)** ja läbi luubi vaadates. Luubi korral on ese luubi fookuses.



Kasutades ülaltoodud joonist, tuletame luubi suurenduse valemi.

Luubi suurendus näitab, mitu korda on luubiga vaadates kujutis meie silmas suurem,

kui palja silmaga vaadates, seega $s = \frac{A_2B_2}{A_1B_1}$.

Kui silma põhja kujutise piirkonnas lugeda tasandiks, siis saame sarnastest

kolmnurkadest ABO_1 ja $A_1B_1O_1$ joonise a) osas: $A_1B_1 = \frac{AB \cdot A_1O_1}{25}$.

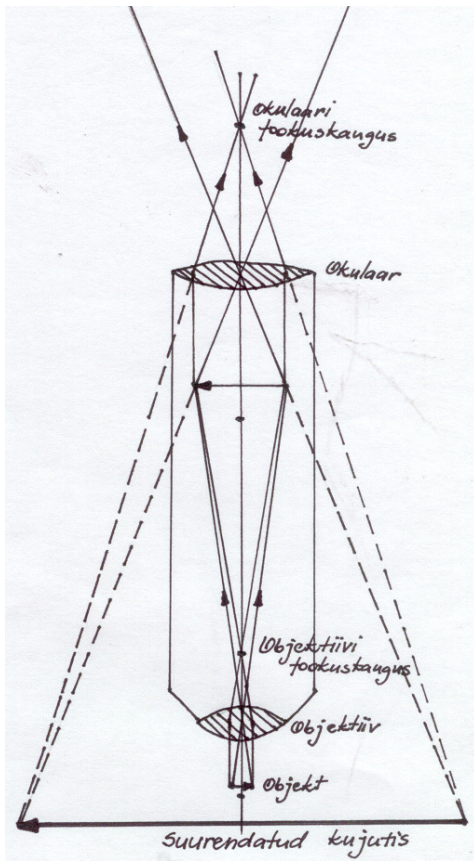
Teistest sarnastest kolmnurkadest ABO ja $A_2B_2O_1$ joonise b) osas saame:

$$A_2B_2 = \frac{AB \cdot A_2O_1}{f}$$

ühesugune, seega $A_1O_1 = A_2O_1$. Nüüd saame

$$s = \frac{A_2B_2}{A_1B_1} = \frac{AB \cdot A_2O_1}{f} \cdot \frac{25}{AB \cdot A_1O_1} = \frac{25}{f}$$

Seega luubi suurendus $s = 25/f$.



4.8. Mikroskoop

Mikroskoop on seade väikeste esemete vaatamiseks, mis koosneb kahest koondavast läätsel. Esemepoolset läätsel kutsutakse objektiiviks, silmapoolset okulaariks.

Mikroskoobi suurendus võrdub objektiivi ja okulaari suurenduste korrutisega.

Suurendused on märgitud nii objektiivile kui okulaarile, näiteks: 10x.

Optiliste mikroskoopidega võib saada suurendusi kuni 2000 korda ja eristada detaile, mille mõõtmed on suuremad kui 200 nm. Mikroskoobi korral kirjeldab väikseimat kaugust kahe veel eristatava punkti vahel **piirlahutus**.

Mida väiksem on see kaugus, seda suurem on lahutusvõime.

Piirlahutuse pöördväärtust nimetatakse **lahutusvõimeks**. See on määratud mikroskoobi objektiiviga. Okulaar ei too esile mingeid objekti täiendavaid detaile, ta ainult suurendab mikroskoobi suurendust. Lahutusvõimele paneb piiri valguse difraktsioon. Mida lühem on kasutatava valguse lainepikkus, seda suurem on lahutusvõime.

Täpsemad uurimused näitavad, et mikroskoobi lahutusvõime $R = \frac{1}{d} = \frac{n \cdot \sin \alpha}{0,6 \cdot \lambda}$,

kus **d** on piirlahutus, **n** objektiivi ja eseme vahel oleva keskkonna murdumisnäitaja, **α** nurk optilise telje ja vaadeldava eseme tsentrist objektiivi äärel tuleva kiire vahel (nn. apertuurnurk), **λ** kasutatava valguse lainepikkus. Suurust **$n \cdot \sin \alpha$** nimetatakse **apertuurarvuks**, mille tähiseks on **A**.

Mikroskoobi lahutusvõime suurendamiseks tuleb kasutada võimalikult lühilainelist valgust. Teine võimalus lahutusvõime suurendamiseks on apertuurarvu suurendamine. Selleks kasutatakse immersioonobjektiive, kus eseme katteklaasi ja objektiivi vaheline ruum täidetakse vedelikuga. Kuna vedeliku murdumisnäitaja on suurem kui õhul, siis suureneb ka apertuurarv ja seega ka lahutusvõime.

Suurema lahutusvõime saamiseks kasutatakse teist tüüpi mikroskoobe.

Elektronmikroskoobid annavad suurendusi kuni 200 000 korda. Nendes kasutatakse valguse asemel elektronide kimpe (elektronkiiri), millele vastav lainepikkus on palju väiksem valguse lainepikkusest. Sel juhul segab difraktsioon vähem teravate kujutiste saamist ja on võimalik eristada hoopis pisemaid detaile kui optilise mikroskoobiga (kuni 2 nm), näiteks eristada aatomeid teineteisest. Elektronkiire koondamiseks kasutatakse elektronmikroskoobis elektrostaatilisi ja magnetläätsi. Elektronkiire suunda muudetakse neis elektri- või magnetvälja abil.

Teravikmikroskoobid annavad veel suuremaid suurendusi. Nende abil on võimalik eristada detaile mõõtmetega kuni 0,2 nm. See võimaldab näha ka, kuidas mingi aine pinnal aatomid paiknevad ja ka seda, kui suured nad on. Sellistes mikroskoopides kasutatakse metallteravikku, mis viiakse uuritava pinna lähedale. Kui teravik asub uuritava objekti pinnale lähemal kui 0,1 nm, siis saavad elektronid üle minna uuritava objekti pinnast teravikku, ilma et teravik oleks kokkupuutes objektiga (toimub nn. *tunnelepekt*). See tekitab teravikus elektrivoolu, mille tugevus oleneb teraviku ja objekti pinna vahelisest kaugusest. Teravikku liigutatakse objekti pinna kohal nii, et voolu tugevus oleks alati ühesugune. Kuna objekti pind pole sile, tuleb voolutugevuse säilitamiseks teravikku üles-alla liigutada. See liikumine kordab pinna reljeefi, mis edastatakse arvuti ekraanile.

Teravikmikroskoobe valmistatakse ka Tartus, TÜ Füüsikainstituudis.

Teravikmikroskoobe võib kasutada uute materjalide ja struktuuride väljatöötamiseks, samuti erinevate füüsikaliste ja keemiliste protsesside jälgimiseks tahkiste pinnal või vedelikes. Viimane on oluline näiteks meditsiinitööstuse jaoks, sest see võimaldab jälgida elusa koe ja bioloogiliselt sobiva materjali (näiteks proteesi) kokkukasvamist. Tööstuses määratakse teravikmikroskoobiga täppispindade, uute kattematerjalide ja värvide kvaliteeti.

Teravikmikroskoobe saab kasutada ainult elektrit juhtivate materjalide uurimiseks.

Kuid on välja mõeldud ka sellised tunnelmikroskoobid, mis töötavad igasuguste

ainete korral. Need on nn. **aatomjõu mikroskoobid**. Neis kasutatakse piesoeefekti, mis seisneb elektrilise pinge tekkimises mõnedes materjalides rõhumisjõu toimel. Neis mikroskoopides on samuti teravik, mida liigutatakse pinna kohal. Seal hoitakse jäävana jõudu, millega teravik pinda surub.

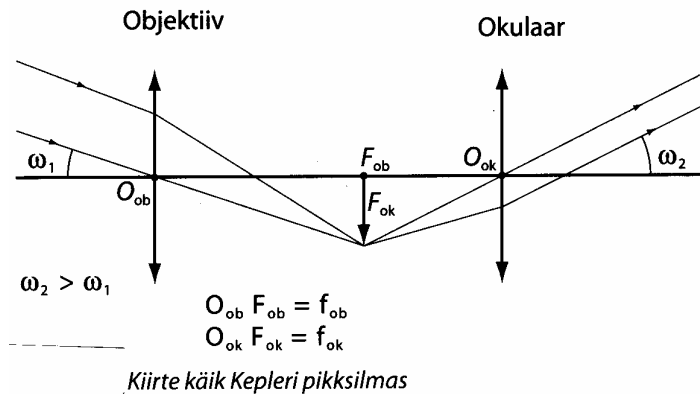
4.9. Pikksilm

Pikksilm on optikariist kaugete esemete vaatlemiseks. See koosneb nagu mikroskoopki objektiivist ja okulaarist. Kaugetest esemetest tuleb pikksilma praktiliselt paralleelne kiirtekimp, mis tekitab kujutise objektiivi fookuses. Seda kujutist vaadeldakse okulaari kui luubiga. Niisugusel juhul langevad pikksilma objektiivi ja okulaari fookused praktiliselt kokku ja pikksilmast väljub paralleelne kiirtekimp. Selliseid optilisi süsteeme nimetatakse **teleskoopilisteks**. Selline süsteem suurendab vaatenurka ja süsteemi nurksuurendus avaldub järgmiselt:

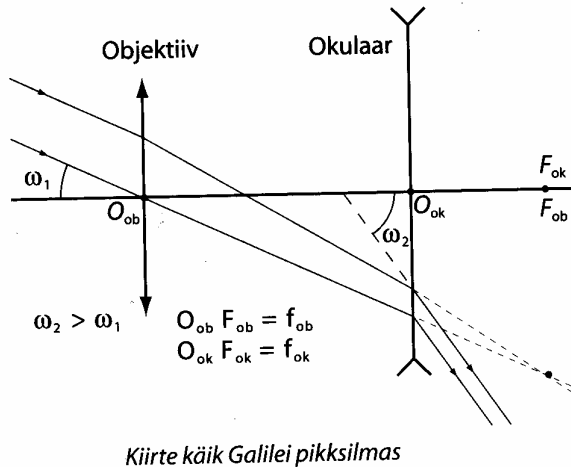
$$s_n = f_{ob}/f_{ok},$$

kus f_{ob} on objektiivi fookuskaugus ja f_{ok} okulaari fookuskaugus.

Kui objektiivi ja okulaarina kasutatakse kahte kumerlääts, siis saadakse esemest ümberpööratud kujutis. See on nn. **Kepleri pikksilm**, mis sobib kasutamiseks taevavaatlustel.



Maapealsetel vaatlustel kasutatakse nn. **Galilei pikksilma**, kus okulaariks on nõguslääts. Selline pikksilm annab esemest päripidise kujutise.



Kujutise konstrueerimise 10 käsku

1. Paneme paika läätsed ja optilise telje.
2. Valime fookuste asukohad nii, et mõlemal pool läätsed oleks need võrdsel kaugusel läätsedest, st $f_1 = f_2$.
3. Paneme paika eseme.
4. Võtame eseme tipust optilise teljega paralleelse kiire.
5. Kumerläätsed korral murdub kiir suunas, mis läbib tagumist fookust.
6. Nõgusläätsed korral murdub kiir nii, et selle pikendus läbib eesmist fookust.
7. Võtame eseme tipust kiire, mis läbib läätsed keskpunkti.
8. Selline kiir läbib läätsed suunda muutmata.
9. Leian eseme tipu kujutise asukoha, milleks on punkt, kus lõikuvad kiired või nende pikendused.
10. Esemekujutise leidmiseks tõmban kujutise tipust ristsirge optilise teljeni

5. Valguse ja aine vastastikmõju

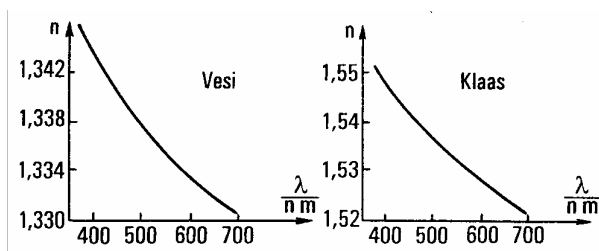
5.1. Valguse dispersioon

KATSE: prisma spektri saamine

Miks saab prisma abil valguse lahutada komponentideks? Sellepärast, et aine murdumisnäitaja on lainepikkuse funktsioon:

$$n = f(\lambda)$$

Enamikul ainetest murdumisnäitaja väheneb nähtavas piirkonnas lainepikkuse kasvades.



Murdumisnäitaja sõltuvust valguse lainepikkusest nimetatakse **dispersiooniks**.

Muutused on küllalt väikesed, ca 1 – 2 %. Näiteks H_2O korral on 400 nm juures $n = 1,342$, aga 700 nm juures 1,330.

Miks on olemas murdumisnäitaja lainepikkusest?

Vastuse saab kõige lihtsamalt **dispersiooni elektronteooriast**. Me ei kasuta selle teooria matemaatilist aparatuuri, vaid ainult mõttekäike.

Aine absoluutne murdumisnäitaja $n = \sqrt{\epsilon\mu}$. Enamikul ainetel on magnetiline läbitavus võrdne ligikaudselt 1-ga. Seega on murdumisnäitaja määratud aine dielektrilise läbitavusega: $n \approx \sqrt{\epsilon}$.

Elektrikursusest on teada, et aine dielektriline läbitavus ϵ on lineaarses seoses dipoolmomendiga p , mis on võrdne dipooli laengu q ja dipooli õla x korrutisega: $p = qx$ (dipooli õlg on kaugus dipooli laengute vahel).

Missugused dipoolid siis valgust läbilaskvas aines on? Klassikaline dispersiooniteooria loeb dipooli kuuluvaks ühe valentselektroni (miinuslaeng) ja tuum koos ülejäänud elektronidega (plusslaeng).

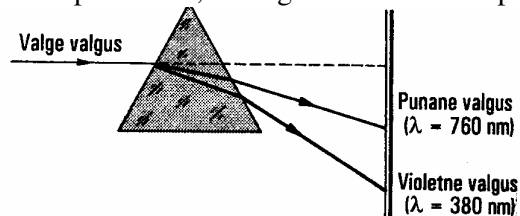
Sellisele süsteemile langedes paneb valguslaine E -vektor valentselektroni võnkuma valguslaine sagedusega. Elektron võngub aga juba aatomis omavõnkesagedusega.

Probleem: kuidas on omavahel kooskõlas elektronide võnkumine aatomis ja Bohri järgi tiirlemine ümber tuuma?

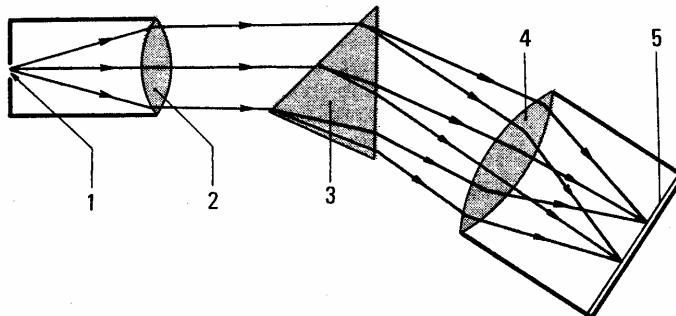
Mida lähemal elektroni omavõnkesagedusele on valguslaine sagedus, seda suurema amplituudiga sundvõnkumised tekivad (resonants). See viib aga x suurenemisele, sest võnkumised pole harmoonilised, amplituudid pole võrdsed. See suurendab valentselektroni keskmist kaugust x tuumast. Kui suureneb x , siis suureneb ka p ja ϵ ning seega ka murdumisnäitaja. Kuna elektronide omavõnkesagedused on tavaliselt UV piirkonnas, siis nähtavas piirkonnas murdumisnäitaja suureneb UV piirkonnale lähenedes, ehk lainepikkuse vähenedes.

Dispersiooni olemust võib seletada ka ilma elektriliste suuruste abita. Teame, et valgus levib aines korduvate neeldumiste ja kiirgumistega aatomites. Valguse kiirus aines oleneb ajast, mis kulub valguse neeldumiseks ja kiirgumiseks aatomis. See on nõ. "peatuseks" kulunud aeg. Mida lähemal elektroni omavõnke sagedusele on valguslaine sagedus, seda suurema amplituudiga pannakse elektron aatomis sooritama sundvõnkeid. Selle tekitamine ja lõppemine võtavad üha rohkem aega. See tähendab "peatuste" pikenemist ehk levimiskiiruse vähenemist, järelikult absoluutse murdumisnäitaja suurenemist ($n = c/v$). Kuna enamikul läbipaistvatel ainetel on elektronide omavõnkesagedused ultravalguse piirkonnas, siis sellele lähenedes nähtava piirkonna poolt hakkab murdumisnäitaja suurenema.

Dispersiooni kasutatakse prismades, et valgust lahutada komponentideks.



Prismat kasutatakse spektraalriistades. Prisma asemel võib kasutada ka difraktsioonivõret ja seda viimasel ajal peamiselt tehaksegi, sest võred on palju odavamad kui prismad.



1 – sisenemispilu, 2 – kollimaatori lääts, 3 – prisma, 4 – koondav lääts, 5 – fotoplaat.

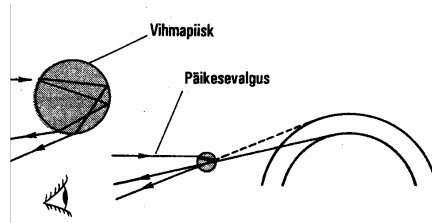
Spektraalriistu nimetatakse erinevalt vastavalt oma otstarbele.

Spektroskoobis vaadatakse spektrit pikksilmaga, **spektromeetris** registreeritakse elektriliselt, **spektrograafis** fotografeeritakse, **monokromaatoris** lastakse valgus riistast väljuda läbi pilu.

Spektraalriistu kasutatakse **spektraalanalüüsi** korral: so. ainete keemilise koostise kindlakstegemiseks. Selleks kasutatakse aatomist või molekulist kiirgunud või neeldunud valgust. **Kiirgusspektri** saamiseks tuleb aine panna helenduma (soojuskiirgus, sädelahendus, luminesents, jne). Tekkinud valgus juhitakse spektraalriista ja registreeritakse spekter. Kiirgusspektrid võivad olla kas pidevad või joonspektrid. Pidevaid spektreid annavad hõõguvad tahkised, vedelikud ja väga tihedad gaasid. Joonspektri annavad hõredad hõõguvad gaasid. Kiirgusspekter näitab kiirgunud valguse intensiivsuse jaotust lainepikkuste järgi.

Neeldumisspektri saamiseks kasutatakse pideva kiirgusspektriga valgusallika valgust, pannes uuritava aine valgusallika ja spektraalriista sisenemispilu vahele. Ka neeldumisspektrid võivad olla pidevad või joonspektrid. Neeldumisspekter näitab ainest läbiläinud valguse intensiivsuse jaotust lainepikkuste järgi.

Dispersiooniga seletub ka vikerkaar.



Kõrgemat järku vikerkaared on ka olemas, näiteks laboris on saadud kolmteist vikerkaare järku. Aga looduses pole lootust neid näha, sest nad on väga nõrgad ja mõned (näiteks 3. järku vikerkaar) tekivad päikese ümber, kust on neid võimatu näha heleda päikesevalguse taustal.

5.2. Valguse neeldumine

KATSE: pideva spektri erinevatesse kohtadesse paneme punase paberi. Mujal paistab paber must, ainult punases piirkonnas on punane. **MIKS?**

Kui valgus langeb ainele, siis võib sellega juhtuda kolm asja: see kas peegeldub, läheb läbi või neeldub.

Neeldumine on protsess, mille käigus valgusenergia muutub aine siseenergiaks – soojuseks.

Ei neeldu seda värvi valguslained, millist värvi keha ise on valges valguses. Need lained peegelduvad tagasi. Sellist peegeldumist nimetatakse valikuliseks ehk **selektiivseks peegeldumiseks**.

Kuidas tekib selektiivne peegeldumine? Jälle tuleb põhjust otsida valentsielektronides, mis on kõige nõrgemini seotud tuumaga ja seetõttu reageerivad kõige paremini valguse E -vektorile. Kui kehale langevas valguses on selliseid laineid, mille sagedus vastab mõne valentsielektroni omavõnkesagedusele, siis paneb see elektroni tugevamini võnkuma ja elektron kiirgab sama sagedusega valgust. Nii tekibki peegeldunud valgus: keha neelab teatud sagedusega valgust ja kiirgab sama sagedusega valgust, tegemist on **optilise resonantsiga**. Teiste sagedustega

valguslainete poolt tekitatud elektroni võnkumised sumbuvad (lakkavad) ja see energia muutub siseenergiaks – soojuseks.

KATSE: Optilise resonantsi analoog – akustiline resonants. On kaks ühesugust heliharki, üks helisema, paneb ka teise helisema (see on peegeldunud valgus). Kui helihargid on erinevad, ei teki helinat.

Kas praegu ei teki vastuolu dispersioonijutuga. Seal oli jutt, et elektronide omavõnkesagedus on UV piirkonnas, nüüd aga räägime, et hoopis nähtavas piirkonnas? Vastuolu ei ole, sest enne olid meil vaatluse all valgust läbilaskvad ained, nüüd mitte.

Valguse neeldumine on tegelikult keerulisem protsess, sest valgust ei neela mitte ainult valentselektronid, vaid ka vabad elektronid ja ioonid (ioonkristallides). Neid nähtusi me ei käsitle.

Üldiselt võib öelda, et kui elektronid saavad sooritada sundvõnkeid igasuguse nähtavasse piirkonda kuuluva sagedusega, siis on keha **valge**. Kui elektronid ei saa sooritada sundvõnkeid mitte ühegi nähtavasse piirkonda kuuluva sagedusega, siis on keha **must**.

Ka läbipaistvad ained võivad olla värvilised. Näiteks punane klaas laseb läbi ainult punast valgust, kõik teised värvused (neile vastavad lained) neelduvad aines.

Värvus on tingitud mingi aine aatomitest, mille valentselektronide omavõnkesagedus langeb kokku antud värvusele vastava valguslaine sagedusega. Need tekitavad jällegi optilise resonantsi, mille tulemusena vastava sagedusega lained levivad aines. Neid aineid nimetatakse värvaineteks.

Teiste sagedustega valguslained aga neelduvad aines, soojendades seda. Eriti hästi neelavad valgust metallid (pole läbipaistvad). Seal paneb valguslaine E -vektor vabad elektronid liikuma, tekitades kõrge sagedusega elektrivoolu väikestes ruumiosades. Sellega kaasneb aga Joule- Lenzi soojuse eraldumine.

Valguse intensiivsus väheneb alati mingit ainet läbides. Seda kirjeldab **Bougueri seadus**

$$I = I_0 e^{-kl},$$

Kus I on ainet läbinud valguse intensiivsus, I_0 ainele langeva valguse intensiivsus, l ainekihi paksus ja k – neeldumiskoeffitsient, mis oleneb aine ehitusest ja ka valguse lainepikkusest.

Neeldumist kirjeldatakse neeldumiskoeffitsiendi abil. **Neeldumiskoeffitsient** näitab, kui suur osa valguse energiast jääb ainesse, mida valgus läbib. See oleneb kindlasti ka ainekihi paksusest. Bougueri seadusest saame avaldada neeldumiskoeffitsiendi

$$k = \frac{1}{l} \ln \frac{I_0}{I}, \text{ kui } \frac{I_0}{I} = e, \text{ siis } k = \frac{1}{l} \text{ ja võime öelda, et neeldumiskoeffitsient on}$$

arvuliselt võrdne pöördväärtusega ainekihi paksusest, millest läbiminekul valguse intensiivsus väheneb e korda (umbes 2,7). Neeldumiskoeffitsiendi mõõtühikuks on m^{-1} .

Kui valgus ei neeldu, siis on $I = I_0$ ja $k = 0$. Kui valgus neeldub täielikult, st $I = 0$, siis $k = \infty$.

6. Kvantoptika

6.1. Footon

Valgust saab kirjeldada lisaks lainele ka kui osakest – **footonit** (nii nimetatakse elektromagnetvälja kvanti). Footonite olemasolu tõestati katseliselt fotoefekti abil.

Footon eksisteerib ainult liikudes ja selle kineetiline energia on $E = mc^2$.

Kuhu on jäänud $\frac{1}{2}$, sest oleme ju õppinud, et $E_k = \frac{1}{2}mv^2$.

Tuletame meelde, kust üldse tuleb $\frac{1}{2}$. Energia leitakse töö kaudu, mis tuleb teha, et panna keha liikuma kiirusega v .

Seega $E_k = A = Fs = mas$, aga kiirendus $a = v/t$ ja läbitud teepikkus $s = v/2 \cdot t$, kus v on keskmine kiirus). Siit saamegi, et $E_k = \frac{1}{2}mv^2$.

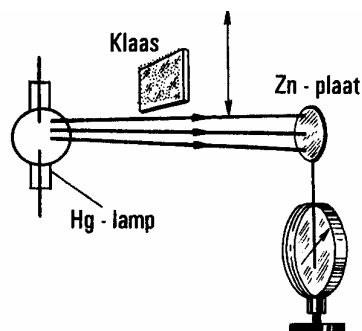
Kuid footon liigub alati ühesuguse kiirusega c ja nüüd $\frac{1}{2}$ ei tule.

Footoni energia $E = hf$, kus võrdetegur kvandenergia E ja valguse sageduse f vahel on nn **Plancki konstant** $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$

Footon on osake, millel massi tavalises mõttes pole, st kaaluda teda ei saa. Footoni massi saab leida tema energia kaudu: $m = E/c^2 = hf/c^2$. Näiteks rohelise valguse footoni mass on $4,4 \cdot 10^{-36} \text{ kg}$

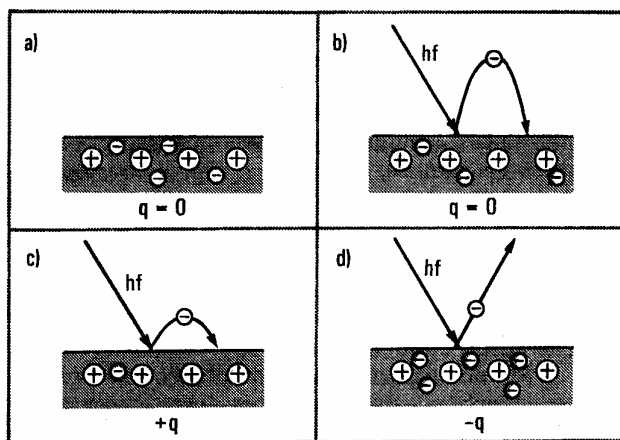
6.2. Fotoefekt

KATSE: valgustame elektroskoobiga ühendatud laadimata tsinkplaati, siis laeme selle negatiivselt, siis positiivselt. Paneme valguse teele klaasplaadi.



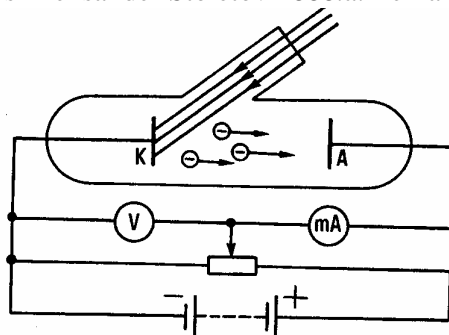
Kui plaat oli laadimata, ei tekkinud valguse toimel elektrilaengut. Kui plaat oli laetud positiivselt, laeng ei muutunud valguse toimel. Kui plaat oli laetud negatiivselt, siis laeng kadus valguse toimel. Kui negatiivselt laetud plaadi ette pandi klaas, siis laeng ei kadunud.

Püüame katsetulemusi seletada.



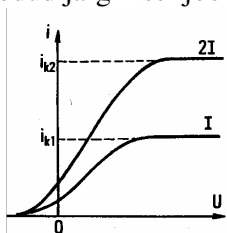
Joon. 13.2. Välise fotoefekti tekkimine: a) valgustamata ja laadimata keha; b) laadimata kehast väljalöödud elektron tõmmatakse tagasi; c) positiivselt laetud kehast väljalöödud elektron tõmmatakse tugevamalt tagasi; d) negatiivselt laetud kehast väljalöödud elektron lükatakse kehast eemale.

Efekti avastas 1887.a. H. Hertz, kui ta uuris elektroomide vahel tekkivat sädelahendust. Ta märkas, et säde tekkis paremini, kui elektroode valgustada. Põhjalikumalt uuris Aleksander Stoletov 1888.a. Tema katseseade oli selline.



Vakumeeritud torus olid kaks elektroomi, mis olid ühendatud vooluallikaga. Sai muuta ja mõõta pinget elektroomide vahel ning mõõta ka torus tekkiva voolu tugevust. Vool tekkis ainult katoodi valgustamisel.

Katsetulemused on toodud järgmisel joonisel.



Pinge suurenedes voolutugevus algul kasvab kuni mingist pinge väärtusest alates jääb muutumatuks. Seda voolutugevust nimetatakse **küllastusvooluks**.

Küllastusvool oleneb katoodile langeva valguse intensiivsusest. Nõrga välja (madala pinge) korral on katoodi ümber elektronpilv, mis koosneb väljalöödud elektronidest ja need takistavad teiste elektronide liikumist anoodile. Suurema tugevusega väli aga viib neid väljalöödud elektrone järjest rohkem anoodile ning mingist pingest alates jõuavad kõik sinna – tekib küllastusvool.

Efekti ei osatud kaua aega seletada, isegi pärast seda kui tehti kindlaks, et ainet lüüakse välja elektronid. Laineteooria kohaselt oleks pidanud elektronid ainet eralduma ca 1 tund pärast valgustamise algust, aga vool tekkis silmapilkselt.

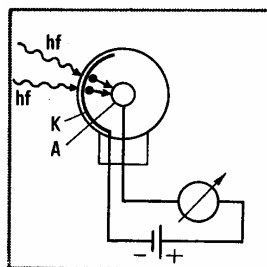
Nähtusele andis seletuse A. Einstein 1905.a., kasutades valguskvandi mõistet. Tema järgi kvandenergia kulub elektroni väljalöömiseks ning selle liikumapanemiseks:

$$hf = A + \frac{mv^2}{2}$$

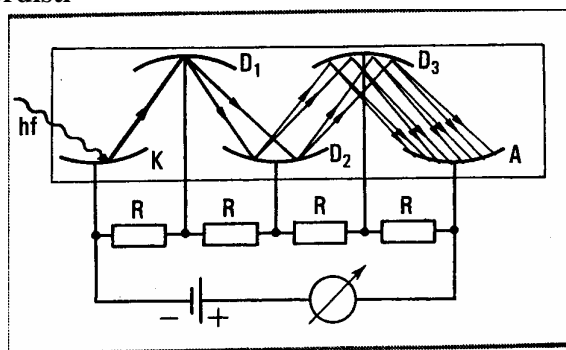
kus A on **väljumistöö** – vähim energiahulk, mis on vajalik elektroni väljalöömiseks aimest. Kui $hf < A$, siis pole fotoefekt võimalik. See on nn **punapiir**. See on valguse lainepikkus, millest suuremad lainepikkused fotoefekti ei tekita. Tavaliselt on see UV piirkonnas, tsingil näiteks 300 nm.

Väljumistöö kulub elektronil pinna kohal olevast elektronpilvest läbitungimiseks ja positiivsete ioonide mõjust vabanemiseks.

Vaakumfotoelement



Fotoelektronkordisti



Sellist fotoefekti, kus elektrone lüüakse aimest välja, nimetatakse ka **väliseks fotoefektiks**. Kuid on ka teistsugust valguse toimet elektronidele, mida nimetatakse **sisefotoefektiks**.

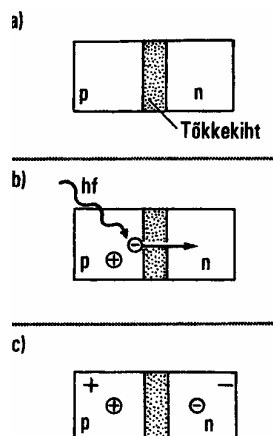
Väline fotoefekt esineb metallide korral, kus on palju suhteliselt nõrgalt seotud elektrone. Kuid valgus võib mõjuda ka pooljuhtides olevaile elektronidele, valguskvandi neelanud valentsielektron võib selle tulemusena vabaneda oma aatomist ja muutuda vabaks elektroniks – juhtivuselektroniks. Tsooniteooria kohaselt: toimub elektroni üleminek valentsitsoonist juhtivustsooni.

Selle tulemusena väheneb aine elektritakistus. Vastavaid seadmeid nimetatakse **fototakistiteks**.

KATSE Valguse toimet suureneb voolutugevus läbi pooljuhtidiodi. See näitab takistuse vähenemist.

Seeletada saab nähtust valguse mõjuga pooljuhi aatomitele.

Pooljuhtidiodi oluline osa on ***p-n* siire**. See esineb kahe erineva juhtivusega pooljuhi (*n*-pooljuht ja *p*-pooljuht) kontaktil, kus tekib piirkond, mis takistab vabade laengukandjate liikumist ühest pooljuhist teise ja mida nimetatakse **tõkkekihiks**.



Kui näiteks n - pooljuhti valgustada, siis tekivad selles vabad elektronid ja augud. Läbi tõkkekihi saavad minna ainult augud, liikudes piki tõkkekihi elektrivälja. Elektronid jäävad n - pooljuhti ja see laadub negatiivselt. Seda nähtust nimetatakse

fotogalvaaniliseks efektiks .

Nii töötab ka **fotorakk**. Kui neid rakke ühendada palju jadamisi, siis saadakse nn.

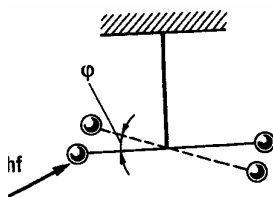
päikesepatarei, mis muudab otseselt valgusenergiat elektrienergiaks. Kasutegur on küllalt väike, tavaliselt ca 20 % , kuigi viimasel ajal (2008) on saadud ka 35% . Seega võib Päikese valgus anda kuni 300 W/m^2 (kui lähtuda solaarkonstandi väärtusest 1350 W/m^2).

Esineb ka pöörddefekt, st diodist voolu läbiminekul tekib valgus. Nii töötavad **LED lambid** (Light Emission Diod)

6.3. Teisi nähtusi, kus avaldub valguse kvantiseloom

Valguse rõhk

Valguse rõhu avastas katseliselt Pjotr Lebedev (1899). Tema katseseade koosnes kvartsniiidi otsa riputatud kergest vardast, mille otstes olid kerged kettad. Seade asus vaakumis. Kui ühte ketast valgustada, siis varras pöördub ja pöördenurga järgi on võimalik arvutada valguse rõhk.



Valguse rõhk on võrdeline valguse intensiivsusega : $p = \frac{I(1 + R)}{c}$,

Kus I on pinnale langeva valguse intensiivsus, c valguse kiirus vaakumis ja R peegelduskoeffitsient: $R = I_p / I$ (I_p –peegeldunud valguse intensiivsus ja I – langenud valguse intensiivsus).

Seega rõhk valgele pinnale on suurem kui mustale pinnale.

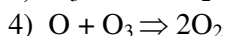
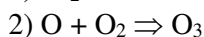
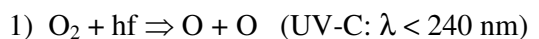
Fotokeemilised reaktsioonid

Terve rida keemilise reaktsioone toimub ainult valguse osalusel. Selliseid reaktsioone nimetatakse **fotokeemilisteks** . Footoni energia on piisav, et lõhkuda aatomeid ja molekule, nende osad aga võivad siis keemiliselt reageerida.

Klassikaline näide on fotosüntees, kus anorgaanilistest ainetest tekivad orgaanilised ained.

Fotokeemiliselt tekib ja ka laguneb osoon.

Osoonikiht tekib atmosfääri ülaosas tänu UV-C le (reaktsioonid 1 ja 2). UV-B neeldub osooni molekulides, lõhkudes neid (reaktsioon 3). Atomaarne hapnik ühineb osooni molekuliga ja tekib 2 hapniku molekuli.



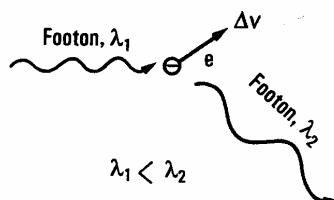
Ultravalgust käsitledes tuleks kindlasti rääkida ka UV indeksist, mis näitab ultravalguse intensiivsust ja mille mõõtühikuks on 1 mW/m^2 . UV-indeksi väärtusele 1 vastab 25 mW/m^2 , väärtusele 2 vastab 50 mW/m^2 , väärtusele 3 vastab 75 mW/m^2 jne. Indeksi suuremate väärtuste korral on ohud suuremad kui väiksemate puhul.

Ultravalgust indeksiga alla 2 võib pidada inimesele ohutuks, väärtustel 3-5 on mõistlik esmakordsel päevitamisel piirduda 30-60 minutiga. Kui indeksi väärtus on üle 5, tuleb päevitamise ja päikese käes töötamisega olla ettevaatlik.

Osoon tekib ka gaaslahenduse käigus, aga ka näiteks laserprinteris ja kopeerimismasinais.

Comptoni efekt

1922.a. avastas Arthur Compton (USA), et röntgenikiirguse hajumisel ainetel, mis sisaldavad vabu elektrone muutub kiirguse lainepikkus, nimelt lainepikkus suureneb. Lainepikkuse muutumist saab seletada kvantteooriaga, mitte laineteooriaga. Laineteooria kohaselt tekiks sekundaarallikais sama sagedusega laine nagu neelduski. Seletuse annab kvantteooria, mille kohaselt footon, põrkudes elektroniga, annab osa oma energiat sellele ja footoni energia väheneb seejuures. Kuna $E = h f$, siis energia



vähenedes tähendab sageduse vähenemist, ehk lainepikkuse suurenemist.

Kombinatsioonhajumine

Kuid valguse hajumisel võib muutuda ka selle lainepikkus. 1928.a. avastasid sellise nähtuse nõukogude füüsikud G. Landsberg ja L. Mandelstam ning India füüsikud Ch. V. Raman ja K.S. Krishnan. Tänapäeval tuntakse seda nähtust **Ramani efekti** nime all.

Nimelt selgus, et valguse läbiminekul gaasidest, vedelikest või kristallidest tekivad lisaks primaarsele valgusele sagedusega f_0 veel teiste sagedustega valgust, kusjuures $f = f_0 \pm f_i$, kus f_i on hajutavate molekulide võnkumise või pöörlemisenergiatele vastav sagedus.

Nähtust saab seletada jälle kvantide abil. Hajumist võib vaadata kui footonite mitteelastset põrget molekuliga. Kui footon annab põrkel energiat molekulile, siis tekkival kiirgusel on väiksem sagedus (footoni energia vähenes). Kui põrkel footoni energia suureneb, siis tekivad suurema sagedusega kiirgused.

Kokkuvõtteks võib öelda, et osa valgusnähtusi seletub kui valgust käsitleda lainena, teine osa seletub, kui valgust käsitleda osakesena. Sellist valgusnähtuste kahest kirjeldamist nimetatakse **valguse dualismiks**.

Mitte valgus pole dualistlik, vaid tema kirjeldamine. Mida suurem on kiirguse sagedus (energia), seda rohkem sarnaneb kiirgus osakeste voole. Väiksema sagedusega kiirgus sarnaneb rohkem lainele.

7. Kiirgused

Meie vaatleme soojus-, luminescents- ja laserkiirgust. Kõik need kiirgused võivad esineda inimesele nähtavas piirkonnas, kuid nende tekkemehanismid on erinevad. Ühine on aga see, et kiirguse tekkimiseks on vaja anda kiirgavale kehale juurde energiat, mis kindlate protsesside käigus muutub valguseks.

7.1. Spektrid

Kõiki neid kiirgusi kirjeldavad mingid spektrid.

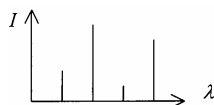
Spekter tähendab ladina keeles: *nägemus*, *kujutus*. Spekter üldisemas mõttes on mingi mõõdetava suuruse või omaduse arväärtuse jaotus mingi tunnuse järgi.

Meie räägime **kiirgusspektrist** ja **neeldumisspektrist**. Kiirgusspekter on diagramm, mis näitab, kuidas kiirguse intensiivsus (ajaühikus pinnaühikult kiirgunud energia) oleneb lainepikkusest või sagedusest. Neeldumisspekter näitab, kuidas oleneb neeldunud kiirguse intensiivsus lainepikkusest või sagedusest.

Iseloomult on spektrid kas joonspektrid või pidevspektrid.

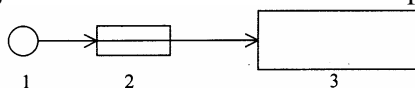
Joonspektrid

Kiirguse joonspektrit käsitlesime Füüsikalise maailmapildi kursuses vesiniku aatomi korral. Sellise spektri annavad isoleeritud ergastatud aatomid (näiteks gaasid madalal rõhul). Sel juhul on igal elektronil kindel, ainult sellele aatomile iseloomulik energia ja kiirgus on samuti iseloomulik just sellele ainele. Nimetatakse ka **aine sõrmejäljeks**.



Miks spektrijooned on kriipsukujulised? Tuletame meelde, kuidas saadakse joonspektreid. Spekter saadakse spektraalriista abil, mille sisenemisavaks on vertikaalne pilu. Spektrijooned on selle pilu kujutised.

Neeldumisspekter võib ka olla joonspekter, ainult siis on pideva spektri taustal mustad jooned. Miks mõned kohad (jooned) on mustad? Sellepärast, et sellise lainepikkusega valgus pole vastuvõtjasse sattunud. Kuidas neeldumisspektrit saadakse?

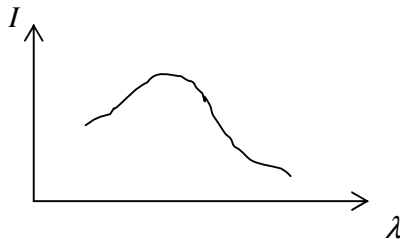


Toodud joonisel on 1 pideva kiirgusspektriga valgusallikas, 2 - valgust neelav (uuritav) aine ja 3 – spektraalriist.

Tumedatele kohtadele vastav valgus on gaasis neeldunud. Kui on tegemist sama gaasiga, mille kiirgust enne vaatasime, siis on kiirgus- ja neeldumiskohtade peal. Öeldakse ka nii, et neeldumisspekter on kiirgusspektri negatiiv. Aga kui jaheda gaasi aatom neelab sobiva valguskvanti, siis ta saab ju kiirata sama lainepikkusega kvanti ja ei ole mingit neeldumist! Just nimelt, et **saab** kiirata, aga **ei pea**. Madalamale tasemele üleminek võib toimuda ka kuidagi teisiti, teiste tasemete kaudu või põrgetel. Taaskiirgumine esineb ka, kuid valgus levib kiirgumisel igas suunas ja meie silma satub ainult tühi osa sellest. See vähendab oluliselt valguse intensiivsust ja heleda fooni taustal tekib tume joon.

Pidevspekter

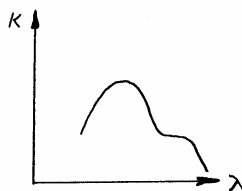
Pideva kiirgusspektri annavad hõõguvad vedelikud või tahkised.



Kuidas tekib pidev spekter? Miks nüüd iga aatom ei kiirga ühe kindla lainepikkusega valgust? Kiirgab küll, ainult nüüd pole aatomid isoleeritud, st pole üksteisest sõltumatud. Mida see tähendab? See tähendab, et elektronide energianivood ei ole iga aatomis täpselt sellised nagu nad üksikus, “normaalses” aatomis. Teiste aatomite elektronide laengud nihutavad natuke vaadeldava elektroni kaugust tuumast ja see muudab elektroni energiat. Miks? Sest elektronid on laetud osakesed. Me teame, et kui laetud kehale lähendada teine sama laenguga keha, siis tekib nende vahel tõukejõud ja kehad nihkuvad teineteisest kaugemale. Nii on ka elektronidega aatomis: nende kaugus tuumast muutub teiste aatomite toimel. Kui aga muutub kaugus tuumast, muutub ka elektroni energia. Asja teeb veel keerulisemaks soojusliikumine: naaberaatomid lähenevad ja kaugenevad juhuslikult ja kogu aeg! Ja elektron võib ergastatud olekus minna üle hoopis teisele aatomile.

Seega ühes konkreetses aatomis muutub näiteks peakvantarvule 3 vastava energianivoo väärtus kogu aeg ja kui toimubki sealt üleminek nivoole peakvantarvuga 2 (mille väärtus ka kogu aeg muutub), siis tulemuseks pole sugugi ühe kindla lainepikkusega valgus, vaid paljude erinevate valguste summa. Kuna tahkise 1 cm^3 on ca 10^{22} valentselektroni, siis on ka samapalju erineva lainepikkusega kiirguskvante. Täpsem uurimine näitab, et tahkises on elektronide energiaseisundid omavahel mingil viisil seotud. Ja just nimelt nii, et seal pole kunagi kaht elektroni täpselt ühesuguse energiaga. Pidev spekter on ka põhimõtteliselt joonspekter, aga seal on spektrijooni väga palju (10^{22}) ja neid ei suuda eristada ükski spektraalriist.

Ka neeldumisspekter võib olla pidev. Neeldumisspekter võib olla kas neeldunud kiirguse intensiivsuse või neeldumiskoeffitsiendi sõltuvus lainepikkusest või sagedusest.



7.2. Soojuskiirgus

Kõik kehad, mille temperatuur on kõrgem kui 0 K, kiirgavad elektromagnetilist kiirgust, mille tugevus oleneb keha temperatuurist. Sellepärast nimetatakse seda kiirgust ka **soojuskiirguseks**. Kiirguse põhjuseks on molekulide soojusliikumine. Selle käigus toimuv molekulide (aatomite) pörkimine viib elektrone ergastatud olekusse ja sealt madalama energiaga tasemetele üle minnes kiiratakse elektromagnetilist kiirgust, mida nimetatakse soojuskiirguseks.

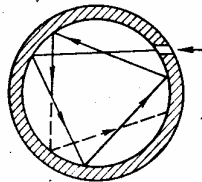
Kiirgust iseloomustab **kiirgusvõime** M_e , mis näitab kui palju energiat kiiratakse ajaühikus pinnahühikult.

Absoluutselt musta keha (AMK) korral kehtib **Stefani – Boltzmanni seadus**

$$M_e = \sigma T^4,$$

kus σ on Stefan-Boltzmanni konstant, mille väärtus $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$ ja T on keha absoluutne temperatuur.

Milline keha on absoluutselt must? See, mille **neelamisvõime** $A = 1$, kus $A = E_a/E$ ja E_a on keha poolt ajaühikus neelatud energia hulk ja E ajaühikus pinnale langev energia hulk. Sellise keha mudel on õõnes kera, milles on ava valguse sissepääsemiseks. Valgus peegeldub õõnsuse seintel ja neeldub enne kui välja pääseb.



Reaalsete kehade jaoks kehtib Stefan – Boltzmanni seadus kujul $M_e = a\sigma T^4$, kus a on nn **halluse tegur** või kiirgustegur ja $0 < a < 1$. On aga väga palju kehi, mille puhul ei kehti seadus ka sellisel kujul.

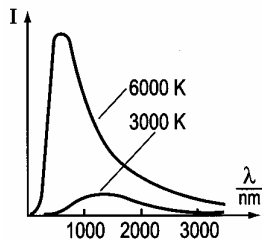
Kuid kõikidel juhtudel kehtivad kaks seaduspärasust:

1. Mida tumedam pind, seda rohkem see pind kiirgab või neelab soojuskiirgust
2. Mida kõrgem temperatuur, seda rohkem keha kiirgab soojuskiirgust.

KATSE Leslie kuubiga (John Leslie, šotlane, 1766 – 1832)

Kas AMK on alati must? Ei ole, kõik oleneb keha ja ümbruskonna temperatuurist. Olgu meil keha temperatuuriga T_1 ruumis, mille seinte temperatuur on T_2 . Sel juhul on keha kiirgusvõime $M'_e = \sigma T_1^4$ ja seinte kiirgusvõime $M''_e = \sigma T_2^4$. Kui $T_1 > T_2$, siis on ka $M'_e > M''_e$ ja keha annab energiat ära rohkem kui juurde saab (ta ei saa rohkem energiat juurde saada, kui ruumi seinad kiirgavad). Selline keha näib seina taustal heledana. Kui keha temperatuur on madalam kui ruumi seintel, siis näib keha tumedana. Kõik see kehtib ühesuguse hallusega kehade korral.

Soojuskiirguse spekter on pidev ja maksimumiga.



Spektritelt on näha, et kiirgusmaksimum nihkub temperatuuri tõusuga lühemalainelisse spektripiirkonda. Näiteks temperatuuril 3000 K on pea kogu kiirgus IR piirkonnas, aga 6000 K korral on märgatav osa ka UV piirkonnas. Seega soojuskiirguse kätkeb endas nii infravalgust, valgust kui ultravalgust.

Kehtib seos

$$T \lambda_{\max} = b,$$

kus konstant $b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$. See on **Wieni nihke seadus** (Wilhelm Wien, sakslane, 1864 – 1928)

Keha kiirgust saab kasutada ka keha temperatuuri mõõtmiseks. Vastavat riista nimetatakse **optiliseks püromeetriks** (*pyr* kreeka keeles – tuli). Seda kasutatakse hõõguvate kehade temperatuuri mõõtmiseks, kus muud riistad enam hästi ei tööta. Neid on mitut liiki, meie käsitleme ainult kaduva niidiga püromeetrit. Püromeetris on reguleeritava helkedusega hõõgniit, läbi mille vaadatakse uuritavat keha. Kui hõõgniit uuritava keha taustal kaob, on hõõgniidi ja keha temperatuurid võrdsed. Riist on gradueeritud kraadides ja sealt saame teada keha temperatuuri. Kuidas aga gradueeritakse? Vaadatakse sama riistaga AMK-d, aga selle temperatuuri saab kindlaks teha kiirgusmaksimumi lainepikkuse järgi. Nii saame teada AMK temperatuurid.

Reaalsete kehade kiirgusvõime on väiksem kui AMK-l. Seepärast peab sama helkeduse korral olema reaalse keha temperatuur kõrgem kui AMK-l. Järelikult püromeeter ei näita meile keha termodünaamilist temperatuuri. Öeldakse, et püromeeter näitab **heledustemperatuuri**.

Heledustemperatuur on keha temperatuur, mille puhul antud keha ja AMK heledused on võrdsed (seda mingil kindlal lainepikkusel).

Et heledustemperatuurist kätte saada termodünaamilist temperatuuri, peab teadma keha halluse tegurit, siis saab soovitud temperatuuri arvutada.

Püromeetriga tutvume lähemalt praktikumis.

7.3. Luminestsents

Lisaks soojuskiirgusele on ka teisi elektromagnetilisi kiirgusi, st selliseid kiirgusi, mille tekkemehhanism on teistsugune kui soojuskiirgusel. Samas spektri piirkonnas kui soojuskiirgus, esineb ka **luminestsents**. Soojuskiirguse korral on kiirguse värvus keha temperatuurist: punane kiirgus tekib, kui keha temperatuur on ca 700 – 800 °C, kollane temperatuuril 3000 °C, roheline 6000 °C jne. Kuid sama värvi kiirgust võib saada ka toatemperatuuril. Näiteks teleri kineskoobi või arvuti monitori ekraanil. Selle tõttu nimetatakse luminestsentsi hellitlevalt ka “külmaks valguseks”.

Kuidas tekib luminesentskiirgus? Ka nüüd peab aatomis olev elektron saama juurde energiat, minema siis suurema energiaga olekusse ja sealt vabanedes tekibki kiirgus. Suurema energiaga olek on selline, kus mõni aatomi elektronidest on tuumast kaugemal kui tavaliselt. Oma algolekusse, väiksema energiaga olekusse tagasi tulles kiiratakse ülejäänud energia välja valguskvandina.

Kehtib seaduspärasus, et kiirguva valguse kvandi energia on alati väiksem, kui ergastava kvandi energia. Luminesentskiirguse tekkemehhanisme on palju. Oleneb millises olekus on aine: gaas, vedel või tahke. Samuti oleneb, kuidas energiat juurde antakse, ehk kuidas toimub **ergastamine**.

Ergastamisviiside järgi jaotatakse luminesentsi nii

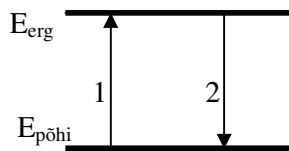
- fotoluminesents (ergastamine UV-ga)
- radioluminesents (alfa, beeta ja gamma kiired)
- katoodluminesents (elektronid)
- elektroluminesents (elektriväli)
- kemoluminesents (keemilised reaktsioonid)
- bioluminesents (biokeemilised reaktsioonid)

Luminesentskiirguseks nimetatakse elektromagnetilist kiirgust, mis ei ole soojusliku päritoluga ja mis kestab ka pärast ergastamise lõppu, st esineb **järelhelendus**.

Järelhelenduse kestuse järgi jaotatakse luminesentsi **fluorstsentsiks** (järelhelenduse aeg on väiksem kui 10^{-8} s) ja **fosforestsentsiks** (järelhelenduse aeg on suurem kui 10^{-8} s).

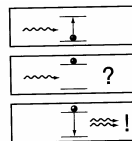
Tekkeprotsesside järgi eristatakse kolme luminesentsi liiki.

Spontaanse luminesentsi korral läheb ergastatud elektron mingil hetkel iseenesest ergastatud olekust (E_{erg}) põhiolekusse ($E_{\text{põhi}}$) tagasi.



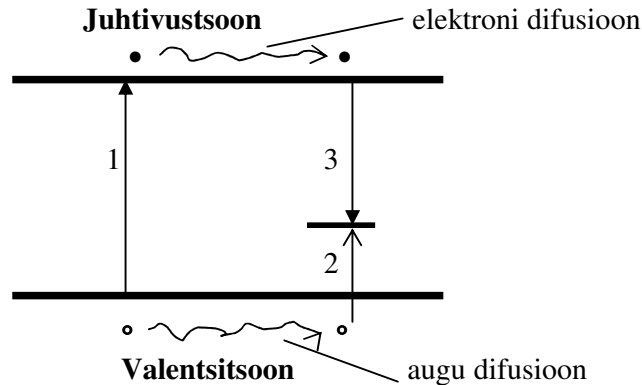
Stimuleeritud luminesentsi korral läheb ergastatud elektron põhiolekusse siis, kui teda tabab valguskvant, mille energia on võrdne ergastatud oleku ja põhioleku energiatega.

Mis juhtub, kui foton tabab ergastatud aatomit?



Rekombinatsioonilise luminesentsi korral lüüakse elektron ergastamisel välja oma aatomist või molekulist, muutudes vabalt liikuvaks osakeseks. Taasühinemisel oma või mõne teise iooniga vabanenud energia tekitabki kiirguse. See luminesentsiliik esineb peamiselt tahkistes. Seal on luminesents määratud väga väikeste

lisandihulkadega (**aktivaatoriga**), mis asendavad mõnedes võresõlmedes põhiaine aatomeid. tavaliselt piisab 0,01....1 mg lisandist 1 g põhiaine kohta. Luminestsents tekib vaba elektroni ühinemisel ioniseeritud aktivaatori aatomiga. Seda protsessi nimetatakse rekombinatsiooniks.



1 – ergastamine, 2 – augu haaramine aktivaatori poolt, 3 - luminestsents

Mille poolest siis luminestsents erineb soojuskiirgusest? Soojuskiirguse korral antakse ergastav energia ainele tervikuna, st. pannakse kiiremini liikuma kõik aine aatomid. Osa sellest energiast läheb elektronide ergastamiseks. Kuna aatomid on palju massiivsemad elektronidest, siis selliseks kiirguse tekitamiseks kulub palju energiat. Luminestsentsi korral antakse aga ergastav energia otse elektronidele ja seda on tarvis palju vähem. Sealjuures aatomite energia ei suurene ja aine ei soojene. Siin võib kasutada analoogiat õuna puust kättesaamisega. Võib puud raputada (soojuskiirgus), aga võib ka õuna kepiga torgata (luminestsentskiirgus).

Luminestsentsi kasutatakse näiteks päevavalguslampides ja kompaktpirnides ehk säästupirnides. Neis on lambi sisepind kaetud luminestseeriva aine ehk **luminofooriga**. Torus on elavhõbeda aur, millest elektrivoolu toimel kiirgub ultravalgust, mis ergastab luminofoori aatomeid ja tekib luminestsentskiirgus, mis valgustab ümbrust. Sellistes lampides muudetakse valgusenergiaks kuni 80 % kulutatud elektrienergiast. Hõõglampide korral muutub valguseks kuni 15 % elektrienergiast.

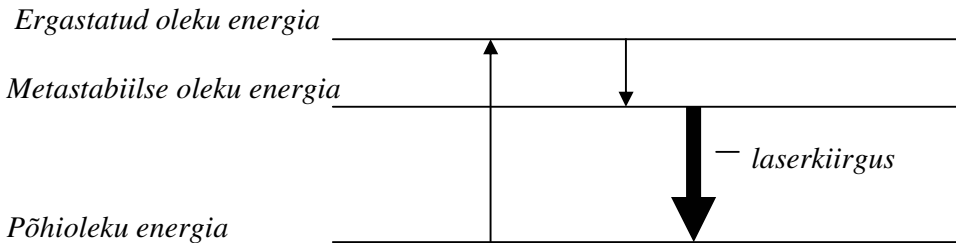
Luminestsentskiirgus on ka näiteks kollaste tänavalaternate valgus, kus kiirgab naatriumi aur. Aga ka vanemate televiisorite ja arvutite kineskoopkuvarid annavad luminestsentskiirgust, mis tekib nende sisepinnal oleva luminofoori pommitamisel kiirete elektronidega.

Luminestsents leiab kasutamist veel paljudes eluvaldkondades: ainete kristallstruktuuri ja keemilise koostise analüüsimisel, laserites, haiguste diagnoosimisel proovide põhjal, dokumentide ja rahade turvaelementides, toiduainete kvaliteedi kontrollimisel, mere naftareostuse uurimisel, süvamereloomadel vaenlaste peletamiseks või saagi ligimeelitamiseks, jne.

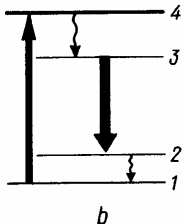
7.4. Laserkiirgus

Laser on tugeva, monokromaatse ja koherentse kiirguse allikas. Nimi tuleb ingliskeelse nimetuse esitähtedest: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (valguse võimendumine stimuleeritud kiirguse abil).

Laserkiirgus saab tekkida, kui aine aatomitel on elektronide jaoks sobivad energeetilised olekud: põhiolek, ergastatud olek ja metastabiilne olek. Ergastamisel viiakse elektronid ergastatud olekusse, kust nad kohe siirduvad väiksema energiaga, aga **metastabiilsesse olekusse**, olekusse, kus elektron saab olla suhteliselt pikka aega. Kuna metastabiilses olekus viibivad elektronid kaua, ja ergastamine toimub pidevalt, siis peagi on ergastatud olekus elektrone rohkem kui neid on põhiolekus. Sellist olukorda nimetatakse **pöördhõiveks**, sest tavaliselt on elektrone põhiolekus rohkem kui ergastatud olekuis. Kui nüüd tuleb kusagilt valguskvant, mille energia vastab metastabiilse oleku ja põhioleku energiatega vahel, siis tekib stimuleeritud kiirgus (a' la stimuleeritud luminesents) ja metastabiilses olekus elektronid lähevad korraga põhiolekusse. Sellega kaasneb ka tugev kiirgus.



Kasutatakse ka aineid, kus on 4 sobivat energianivood. See loob paremad võimalused pidevas režiimis töötavaks laseriks, sest nivoo 2 tühjeneb kogu aeg ja täidab põhiniivood 1, kust toimub ergastus (ergastus ja kiirgus on selgelt eristatud).



Stimuleeritud kiirguse korral on kõikidel tekkinud lainetel ühesugune faas, mis on määratud selle laine faasiga, mis tekitas kiirguse. Siit tuleneb kiirguse **koherentsus**. Kuna elektronide üleminek toimub ainult kahe energiataseme vahel, siis on tekkiv kiirgus ka **monokromaatne**. Üleminevate elektronide suur arv põhjustab kiirguse suure **intensiivsuse**.

Ainet, kus saab tekitada pöördhõive, nimetatakse **aktiivaineks**. Laseris on aktiivaine pandud kahe paralleelse peegli vahele, millest üks on osaliselt läbilaskev ja sellest tuleb laserivalgus välja. Peegleid nimetatakse **optiliseks resonatoriks**. Peeglid sunnivad valgust aktiivainest läbi käima mitu korda ja see tagab elektronide täielikuma ja kiirema vabastamise metastabiilselt nivoolt.

Laseri leiutasid Nikolai Bassov, Aleksander Prokhorov ja Charles Townes 1950-te lõpus ja saais selle eest 1964.a. Nobeli füüsikapreemia. Tänapäeval on olemas nii impulsslasereid kui pidevas režiimis töötavaid lasereid. Aktiivaineks kasutatakse nii gaase, vedelikke kui tahkiseid.

Laserite rakendusi:

- teaduses valgusallikas;
- tehnikas puurimine, lõikamine, keevitamine;
- meditsiinis skalpell, kosmeetiline vahend;
- optiline side, infotöötlus;
- sõjandus
- laserpuhastamine
- ulmeprojektid

Kirjandus:

1. H. Voolaid. Füüsika XI klassile. Tallinn, Koolibri, 2008.
2. K. Tarkpea, H. Voolaid. Füüsika käsiraamat. Tallinn, Koolibri, 2002.
3. I. Saveljev. Füüsika üldkursus III. Tallinn, 1979.
4. Füüsika põhivara mittefüüsika erialade üliõpilastele. Optika. Aatomifüüsika. Tuuma- ja elementaarosakeste füüsika. TÜ, 1990.
5. <http://hypertextbook.com/facts/>
6. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hph.html>

Optika eksamiküsimused

1. Elektromagnetlainete skaala (raadiolained, infravalgus, valgus, ultravalgus, röntgenikiirgus, γ -kiirgus: orienteeruv lainepikkus, omadused)
2. Fotomeetrilised ühikud (tuletada seos valgustugevuse ja pinnavalgustuse vahel)
3. Fotomeetri ehitus ja töö
4. Elektromagnetlaine ja valguslaine (käsitluste erinevused, E -vektori graafiline esitamine nii aja kui koordinaadi funktsioonina)
5. Huygens-Fresneli printsiip (sõnastus ja näited tasalaine ning keralaine korral)
6. Valguse difraktsioon (kirjeldus)
7. Difraktsioonivõre (kirjeldus ja kasutamine)
8. Valguse interferents (kirjeldus ja min- ning max tingimused koos seletusega)
9. Valguse difraktsioon ja interferents kui valguslaine elektrivälja superpositsioon (kirjeldus)
10. Valguse difraktsioon ühe pilu korral (kirjeldamine)
11. Valguse polarisatsioon (polariseeritud valguse saamine, selle kasutamine)
12. Optiline aktiivsus, sahharimeetria (kirjeldus)
13. Geomeetrilise optika põhiseadused (valguse sirgjooneline levik, kimpude sõltumatus, peegeldumine, murdumine)
14. Valguse peegeldumisseaduse tuletamine Fermat' printsiibist lähtudes
15. Valguse täielik peegeldumine (mõiste, piirnurga seos murdumisinäitajaga, rakendused)
16. Läätsede valem (tuletamisega)
17. Kujutise tekitamine läätsedega (kujutise konstrueerimine)
18. Kujutise tekitamine peeglitega (kujutise konstrueerimine)

19. Silm ja prillid (kujutise konstrueerimine)
20. Luup (kujutise konstrueerimine)
21. Mikroskoop (kujutise konstrueerimine)
22. Valguse dispersioon (kirjeldus, kasutamine)
23. Spektraalriista ehitus (optiline skeem)
24. Valguse neeldumine, neeldumiskoefitsient
25. Footon (mõiste, omadused)
26. Fotoefekt , selle seadused ja rakendused (Einsteini valem, fotoelemendi ja fotoelektronkordisti tööpõhimõte)
27. Sisefotoefekt (kirjeldus)
28. Valguse rõhk (kirjeldus)
29. Valguse dualism (kirjeldus)
30. Spektrid, nende liigitus (pidev-, joon-, kiirgus-, neeldumisspekter)
31. Soojuskiirgus (kirjeldus koos spektri kuju olenevusega temperatuurist)
32. Stefan-Boltzmanni seadus (sõnastus koos valemiga)
33. Absoluutselt must keha (kirjeldus)
34. Optiline püromeeter (tööpõhimõte)
35. Luminestsentskiirgus (erinevused teistest kiirgustest, rakendused)
36. Laserkiirgus (erinevused teistest kiirgustest, rakendused)

14.02.12.

H.Voolaid