

Loeng 17. Valgus: geomeetriline optika ja fotomeetria

Optika. Nimetus *optika* tuleneb kreeka keelest, kus "*optike*" tähendab nägemist, nägemisvõimet. Sõna tõi tema praeguses tähenduses teadusse Newton, kes pealkirjastas nii oma 1704. a. ilmunud töö "**Optika ehk traktaat valguse peegeldumisest, murdumisest, kõverdumisest ja värvidest**" (*Optics or a treatise of the reflections, refractions, inflections and colours of light*). Igapäevaelus tähistab sõna "optics" Inglismaal prillipoodi.

Optika on valgusõpetus. Valguse all mõistame silmaga nähtavat elektromagnetkiirugust.

Niisiis: teadus valguse levimisest. Sõna "**valgus**" vajaks füüsikas samuti täpsustamist. Praegu mõistame me (enda arvates?) selle all elektromagnetlaineid lainepikkuste vahemikus umbes **0.4 ÷ 0.7 μm**.

Aga ega see pole ka mingi füüsika. Mida tähendab "ligikaudu"? Ja mis "elektromagnetlaineline" - see pole ju nähtus, vaid kirjeldus! Ütleks, et "silma nähtavad elektromagnetlained" - aga kõik optika seadused kehtivad ka "mittenähtavate" infrapunaste ja ultraviolettkiirte kohta.

Laiemas mõttes mõistame optika all elektromagnetlainete tekke ja levikuga tegelevat füüsikaharu.

Objektiivselt võttes ongi tänapäeva optika elektromagnetlainete levimist käsitlev füüsikaharu; nägemisega teda eriti ei seostata. Tehnikas, kus on vaja arvestada valguse mõju inimsilmale, oleme sunnitud kasutama *fotomeetrilisi suurus* ja see ongi peaaegu et ainus koht, kus nägemine (*optike*) sisse tuleb.

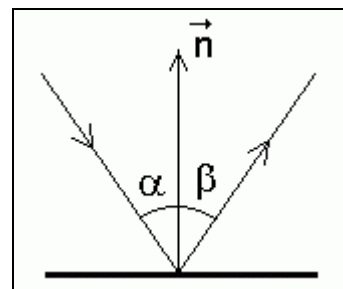
Natuke annab mõistele "valgus" selgust teda tähistavate sõnade kõrvaltähendus erinevates keeltes. Eestlased on oma termini saanud ilmselt *valgest värvist*, arvestades meie kuulumist germaani kultuuriareaali on see üsna sarnane sakslastele ("*licht*" omadussõnana tähendab "hele", "hõre"). Inglise "*light*" vastab omadussõnale "kerge" ja kõige ilmekam on vast venelaste "*svet*" - samaaegselt nii "valgus" kui "maailm".

Et inimese välistaju põhineb 90% ulatuses nägemismeelel, on ka meie maailmapilt "optilis-ruumiline". See, nagu taolistel juhtudel tavaline, raskendab valguse kui "pilditekitaja" mõistmist. Tavaliselt kasutame terminit **valguskiir**, mõistes selle all silmast või valgusallikast lähtuvat ning vaatluse all oleva objektiga lõppevat sirglõiku. Mida see kiir endast kujutab, on kaunis raske seletada. Tõsi küll, mõnikord on ta isegi nähtav - tolmuses või suitsuses ruumis näiteks.

Valgusõpetus tugineb Newtoni poolt formuleeritud neljale põhiseadusele.

Newton, harjunud tema ajal moes olevate postulatiivsete süsteemidega, tõi välja neli põhiseadust:

1. Valgus levib sirgjooneliselt.
2. Valguskiired on sõltumatud: iga kiir levib ruumis nii, nagu poleks teisi olemas.
3. Valguse peegeldumisel tasaselt pinnalt on langev kiir, peegeldunud kiir ja langemispunkti tõmmatud pinnanormaal ühes tasandis. Langemisenurk võrdub peegeldumisenurgaga.
4. Valguse üleminekul ühest keskkonnast teise kiir murdub (muudab suunda), kusjuures langev kiir, murdunud kiir ja langemispunkti tõmmatud pinnanormaal on ühes tasandis. Langemisenurga ja murdumisenurga siinuste suhe on antud keskkondade paari jaoks konstantne suurus ega sõltu langemisenurgast.

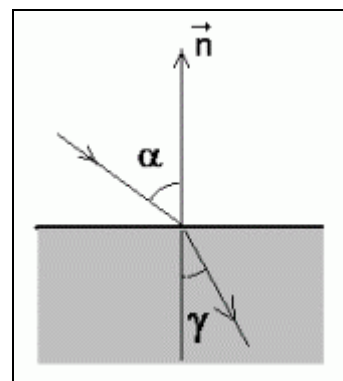


Valguse peegeldumine:
 α on langemisenurk, β peegeldumisenurk, \vec{n} peegeldavale pinnale tõmmatud normaal (ristsirge).

Pea meeles:

- Langemis-, peegeldumis- ja murdumisenurkade all mõistetakse kiirte ja **pinnanormali** vahelisi nurki.
- Siinuste suhtega võrduv konstant n kannab nimetust **suhteline murdumisenäitaja** e. teise keskkonna (kuhu valgus jõuab hiljem) murdumisenäitaja esimese keskkonna suhtes.
- Ainete murdumisenäitajaid vaakumi (tühjuse!) suhtes nimetatakse **absoluutseteks**.

Lihtne matemaatika näitab, et suhteline murdumisenäitaja on absoluutsete murdumisenäitajate suhe.



Murdumisseadus. γ on murdumisenurk.

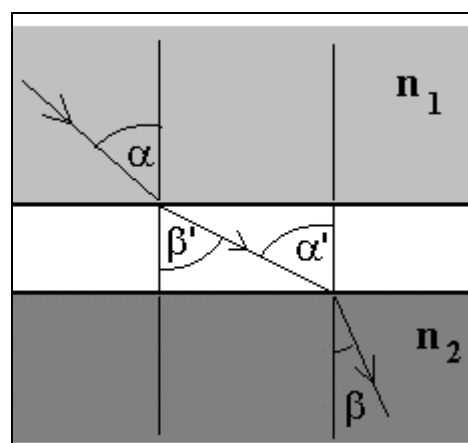
Vaatame pilti, kus ainete 1 ja 2 vahel on vaakum. Kiire teel esimesest keskkonnast teise tuleb ette kaks murdumist, kusjuures murdumisseaduse järgi

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta'} = \frac{1}{n_1}$$

$$\frac{\sin \alpha'}{\sin \beta} = n_2$$

Korrutades need võrdused omavahel ja arvestades, et $\alpha' = \beta'$, saame

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



Absoluutne ja suhteline murdumisenäitaja. "Vaakumist vahekihi" läbimisel on murdumisenurk β' võrdne langemisenurgaga teise keskkonna piiril α' .

17. saj. lõpuks olid loetletud seadused hästi teada, vast teine seadus välja arvatud. Kiirte sõltumatus pole iseenesest vajalik, tema ületähtsustamine on tingitud Newtoni mehhanistlikust maailmapildist. Oli ju seni õnnestunud kõiki nähtusi kirjeldada kehade liikumisega - miks siis mitte ka valgust.

Kui valguskiir oleks kehade voog, tuleks kiirte sõltumatust eraldi vaadelda, sest "põrkuvad kiired" peaks tekitama hajumise, mida tegelikkuses ei täheldata.

Ajaloost. Ajaloolises plaanis on valgusnähtuste uurimine vast üks kõige dramaatilisema arenguga füüsikavaldkondi. Juba põhikontseptsiooni areng (vaheldumisi kord laine, kord osake) näitab, et tegu on tavaterminites raskesti kirjeldatava objektiga.

Et valguse puudumisel kaotab inimene suurema osa oma orienteerumisvõimest, loetakse teda peaaegu et jumalikuks objektiks (substantsiks?). Paljudes religioonides - ristiusk kaasa arvatud - algab maailma ajalugu just valguse loomisest.

Laineteooria. Veel enne Newtonit, 1678.a., tuli prantsuse akadeemik Christiaan Huygens välja teravmeelse, kuid nõrgalt põhjendatud ideega, et valgus on keskkonna ülikiire (suure sagedusega) lainetus.

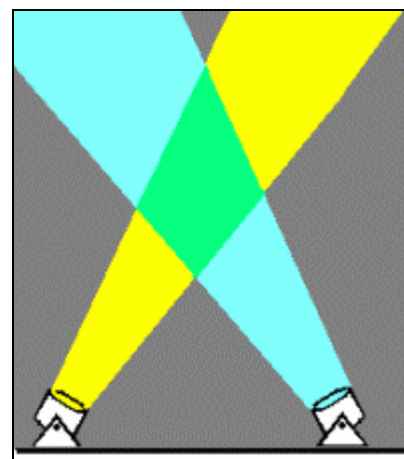
Huygens oli suur võnkumiste uurija, ka kellapendel on tema leiutatud. Valguse juures meeldis talle asjaolu, et laine kannab energiat üle ilma osakeste voo abita; samuti meeldis talle lainete sirgjooneline levimine ning peegeldus. Ka murdumiseseadus annab lainete abil lihtsalt seletada - kui oletada, et laine levimiskiirus keskkonnas on pöördvõrdeline murdumisnäitajaga.

Lainete sõltumatus oli Huygensi pooldajate üks põhiargumente vaidluses Newtoniga ning seetõttu ei saanud ka Newton seda fakti ignoreerida.

Oma optilisi rehkendusi tegi Huygens geomeetriselt, kasutades enda poolt leiutatud printsiipi (tänapäeval tuntud kui *Huygens'i printsiip*):

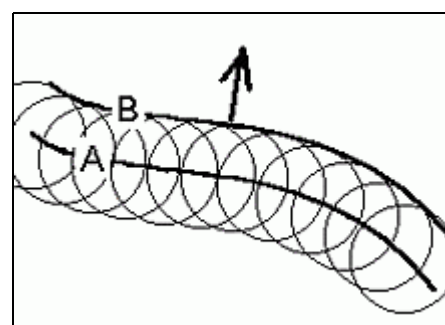
Laine levimisel on iga lainefrondi punkt laineallikaks; lainefrondi mistahes järgneval ajamomendil saame leida neist punktidest väljuvate keralainete mähispinnana.

Keeruline lause, aga sirkli abil hästi rakendatav. Ja sobib suurepäraselt meie ettekujutusega lainest kui korrastatud võnkumistest.



Kiirte sõltumatus: ristuvate projektorikiirte lõikepunktis ei toimu mingit valguse hajumist ega nõrgenemist.

Hüpoteesi valguse laineiseloomust püstitas Christiaan Huygens.



Huygens'i printsiip:

lainefrondi A kõigist punktidest väljuvad keralained tekitavad paralleelse lainefrondi B.

Fermat' printsiip. Veel paremini kui Huygens oskas valguskiire teed arvutada teine prantslane Pierre de Fermat. Tema küll akadeemik ei olnud ja teenis leiba advokaadina, tehes teadust põhitöö kõrvalt. Elu jooksul kogutud kopsaka varanduse kohta tegi ta testamendi, mille täitumise üheks tingimuseks oli tema poolt ette valmistatud käsikirjade avaldamine. Nii ilmusidki Fermat' tööd alles pärast tema surma 1655. a.

Vormilt on Fermat' printsiip matemaatikute poolt laialt kasutatav variatsiooniprintsiip:

Valguse kiirus keskkonnas on pöördvõrdeline keskkonna optilise tihedusega;

levides punktist A punkti B valib valgus tee, mille läbimiseks kulunud aeg on minimaalne.

"Optilise tiheduse" all mõistis Fermat' absoluutset murdumisnäitajat.

Ilmselgeks järeltuleks Fermat' printsiibist on valguse sirgjoonelise levimise seadus. Aga ka peegeldumis- ja murdumisreedused on lihtsalt rehkendatavad, kui tunneme funktsiooni ekstreemumi tingimusi.

17. sajandil oli see väga uus asi.

Muide, variatsiooniarvutuse abil võib Fermat' printsiibist tuletada ka valguskiire tee muutuva optilise tihedusega keskkonnas.

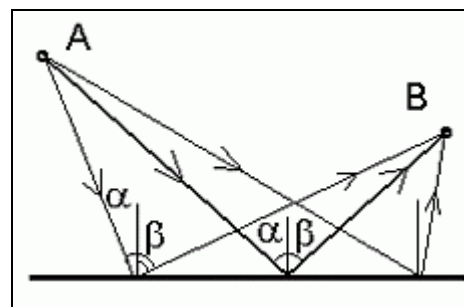
Korpuskulaarteooria. Ja ikkagi tuletas Newton "oma teooria", pannes optika ummikusse enam kui sajaks aastaks.

Newtoni järgi on valgus väikeste osakeste - korpuskliite (lad. *corpusculum* = kehake) - voog. Need osakesed liiguvad väga suure kiirusega (seetõttu levib valgus sirgjoonelisel) ning on väga väikesed (seetõttu ei haju nad kiirte lõikumisel). Osakeste kiirus on kõige väiksem vaakumis ning kasvab ainetes võrdeliselt optilise tihedusega.

Kõik faktid pea peale pööratud. Miks? Ja miks usuti Newtonit rohkem kui prantslasi?

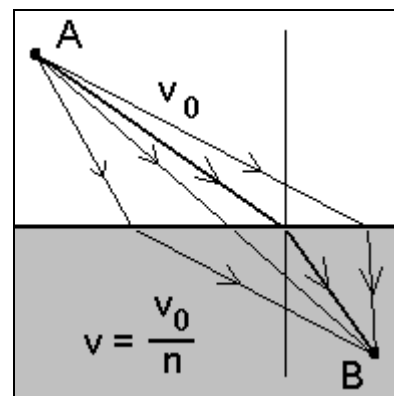
Põhjusi oli kaks. Esimene, teaduslik, seisnes selles, et polnud ühtki vaatluslikku fakti, mis kinnitaks laineteooriat. Vastupidi:

- valgus levib ka vaakumis, aga lainetus nõuab keskkonda.
- Lained peavad liitudes interfereerima (peab kehtima amplituudide reegel), katses seda ei täheldatud.
- Huygensi printsiibist järeltuleks difraktsioon (lainetus levib ka tõkete taha), aga valguse teel olev tõke jätab terava varju.



Fermat' printsiip peegeldumisel:

kõigist teedest punktide A ja B vahel on lühim see, kus langemisnurk α on võrdne peegeldumisnurgaga β .



Fermat' printsiip murdumisel.

Kas suudate tõestada, et kiireim tee vastab murdumisreedusele?

Newtoni teoorias on valgus väikeste kiirestilendavate osakeste -- **korpuskliite** -- voog.

Täpselt nii Newton väljenduski: hüpoteese me ei püstita. Muidugi polnud keegi näinud (mõõtnud) ka korpuskleid, aga nende olemasolu oli igati loogiline.

Teine põhjus on Newtoni autoriteet. Veel tänapäeval on Cambridge'i ülikoolis, kus Newton oma optikat luges-kirjutas, alles tema nimeline professor koos tooliga, mida omal ajal kasutas Newton. (Tool ise seisab praegu reservis, kuna professoriks olev Stephen W. Hawking saab kasutada ainult spetsiaalset elektroonilist ratastooli.)

Etteantud teemas oli Newtoni traktaat täiuslik. Vast märkasite, et sellest puudub **polarisatsiooni mõiste**. See pole juhuslik - kuigi polarisatsiooninähtust tunti juba enne Newtonit, vaikis ta selle maha. Pole ju võimalik seletada kaksikmurdumist korpusklitega.

Loodusteaduses, ka füüsikas, pole kunagi võimalik midagi "ära teha". Teadus on igavene otsing. Ja ajalugu näitab, et mida põhjalikum on üks või teine teooria, seda põhjalikumalt on ta tunnetusprotsessil jalus.

Samal ajal pole midagi praktilisemat heast teooriast. Näiteks Newtoni omast. Kohe näete.

Geomeetriline optika

Newtoni järgi on valguskiir sirge. Peegeldumisel ja murdumisel ta muudab suunda, aga see suuna muutus on täpselt arvutatav, kui teame keskkondade optilisi omadusi (murdumisnäitajat).

Praktilise optika ülesandeks on optiliste riistade konstrueerimine. Ka tänapäeval on 99% optikast seotud lihtsate süsteemide - prillide, binoklite, objektiivide jms. valmistamisega.

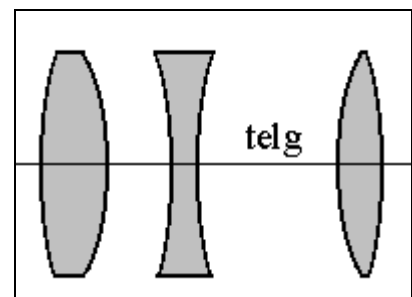
Kõik need mahuvad ühe nimetuse alla ja see nimetus on **tsentreeritud optilised süsteemid**.

Üldisemas mõttes tähendab see **telgsümmeetriat** - kõik murdavad-pegeldavad pinnad on **pöördpinnad** ning nendel on **ühine telg**.

Kitsamas mõttes (ideaalne optiline süsteem) on meil tegu ainult sfääriliste või tasapindadega - sel juhul on tsentreeritud süsteemi tingimuseks sfääride tsentrite asumine samal sirgel.

Eitades valguse laineiseloomu, pidurdas Newtoni teooria füüsika arengut rohkem kui sajandi vältel.

Geomeetriline optika toetub Newtoni teooriale ja lubab (suhteliselt!) lihtsasti arvutada optiliste süsteemide omadusi.

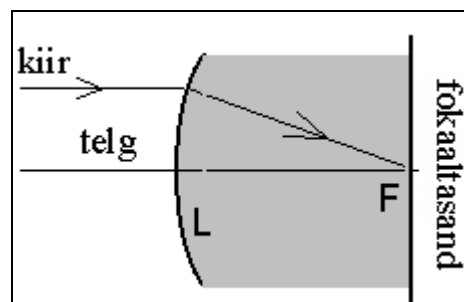


Tsentreeritud optiline süsteem:

kõigi läätsede kõverustsentrid asuvad ühel sirgel.

Ühist telge nimetatakse **süsteemi peateljeks**. Et kõik murdvad/peegeldavad pinnad on peatelje suhtes sümmeetrilised, jääb pärast murdumist (või peegeldust) iga peateljega paralleelne kiir tasandisse, millel asub ka peatelg. See aga tähendab, et kiir pärast murdumist/peegeldust löikub peateljega, kusjuures löikepunkti asukoht sõltub nii murdumisnäitajast kui pinna kõverusest.

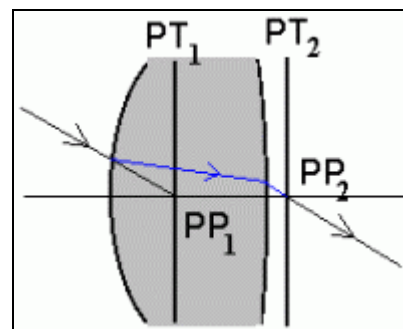
- Punkti, kus peateljega paralleelsed kiired löikuvad pärast murdumist peatelge, nim. **pinna fookuseks**,
- seda punkti läbivat ja peateljega ristuvat tasapinda nimetatakse **fokaaltasandiks**.



Optilise pinna fokaaltasand ja fookus.

Kui kiir murdub/peegeldub peateljest eemale, leitakse fookus kiire pikendusel. Loomulikult on teisel pool murdvat pinda veel üks fokaaltasand (aga peegli korral?).

- Fokaaltasandid on esimene paar süsteemi **põhitasanditest**.
- Teise paari moodustavad **peatasandid**
 - tasandid, milles asuvate esemete kujutised süsteemis on esemetega ühesuurused.
- Peatasandite löikepunkte peateljega nim. **peapunktideks**.



Peatasandid ja peapunktid.

Fookuste ja peapunktide asukohad on määratud süsteemi ehitusega, nende arvutamist võib vaadata Saveljevi õpikust (I. Saveljev. Füüsika üldkursus. Tallinn 1979, 3.kd., lk 25 - 45).

Esimesse peapunkti langev kiir väljub teisest esialgselt paralleelsena (kiire tegelik käik on kujutatud sinisega).

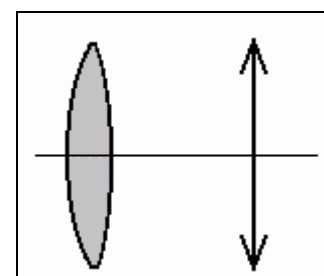
Veel paar terminit:

- peapunkti ja fookuse vaheline kaugus on **fookusekaugus**,
- selle pöördväärtus on **optiline tugevus**.

Edasi on lihtne: teades fookusekaugust ning arvestades, et

- teljega paralleelne kiir läbib pärast murdumist fookuse.
- eesmise peapunkti langenud kiir väljub tagumisest peapunktist esialgselt paralleelsena,

saame joonlaua abil konstrueerida suvaliste kiirte teekonna läbi kogu süsteemi ning arvutada meid huvitavad suurused geomeetria-trigonomeetria valemite abil.



Reaalne ja "õhuke" lääts:

Siit ka meetodi nimetus - **geomeetriline optika**.

viimasel kujutatakse ainult peatasand.

Kui soovime leida mingi punkti kujutist, võtame sellest lähtuvad kaks kiirt:

- ühe, mis on paralleelne peateljega ja
- teise, mis suundub peapunkti.

Neid oskame kujutiste ruumis jätkata ning nende lõikepunkt ongi meie punkti kujutis.

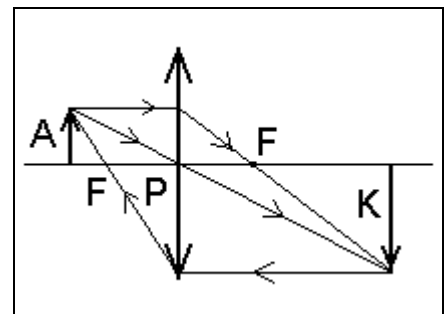
Geomeetriliselt on võimalik teha ka süsteemide liitmist. Selleks loeme meid huvitava punkti kujutise esimeses süsteemis teise süsteemi lähtepunktiks ning konstrueerime sama eeskirja kohaselt selle kujutise teises süsteemis. Nii võime jätkata lõpmatuseni.

Seega vaadeldakse süsteemide liitmisel esimese süsteemi poolt tekitatud kujutist teise süsteemi objektina. Selle kujutis teises süsteemis ongi eseme kujutiseks liitsüsteemis.

Muidugi on see vaid skeem; reaalsete kiirte tee erineb oluliselt kiirte käigust ideaalses süsteemis.

Kooliülesannetes kasutatakse tavaliselt süsteemi graafilist kujutist, kus peatasandid viiakse kokku üheks tasandiks - nn. "õhukeseks läätses" (**L**).

Sellises läätses on pilt pööratav: ühtviisi saame konstrueerida objekti järgi kujutise (ülemine kiir) või siis kujutise järgi objekti (alumine kiir).



Kujutise konstrueerimine läätses.

A - ese, K - kujutis, F - fookus, P - peapunkt

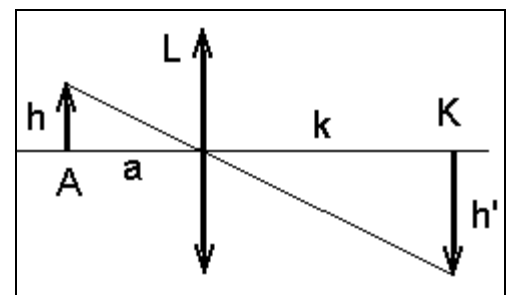
Süsteemi põhiparameetrid. Optilise süsteemi põhiparameetriteks on fookusekaugus, suurendus ja valgusjõud.

Fookusekaugus defineeritakse analoogiliselt optilise pinna omaga:

1. fookus on punkt optilisel teljel, kuhu koonduvad teljega paralleelsed kiired;
2. fookusekaugus on fookuse kaugus läätses (süsteemi viimase, fookusele lähima elemendi) tasandist.

Suurendus on mõistetav kaheti:

- kujutise lineaarmõõtmete suhet objekti mõõtmetesse nim. **joonsuurenduseks**,
- kujutise ja objekti vaatenurkade suhet aga **nurksuurenduseks** ehk lihtsalt suurenduseks.



Joonsuurendus.

A - ese, K - kujutis, L - lääts

Et optilist tsentrit läbiv kiir oma suunda ei muuda, moodustub sarnaste kolmnurkade paar, kust

$$\gamma = \frac{h'}{h} = \frac{k}{a}$$

Neist ühe (tavaliselt kujutise kauguse) saame asendada läätse valemist

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{k} = \frac{1}{f} \rightarrow k = \frac{1}{1/f - 1/a} = \frac{af}{a-f}$$

$$\gamma = \frac{f}{a-f}$$

Näeme, et $\gamma \rightarrow \infty$, kui $a \rightarrow f$ ning $\gamma \rightarrow 0$, kui $a \rightarrow \infty$.

Joonsuurendus on oluline fotokaamerate ning projektsiooniseadmete korral. Visuaalsel (silмага) vaatlemisel on tähtsam nurksuurendus.

Nurksuurenduse valemid tuletage ise. Kui vaja, vaadake kooliõpikust järele.

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{\tan \varphi'}{\tan \varphi} = \frac{d_0}{f} (\text{luup}) \\ &= \frac{d_0 \Delta}{f_1 f_2} (\text{mikroskoop}) \\ &= \frac{f_1}{f_2} (\text{teleskoop}) \end{aligned}$$

d_0 tähistab nn. "parima nägemise kaugust" - normaalse silma jaoks on $d_0 = 25$ cm.

Valgusjõud iseloomustab kujutise valgustatust objektiga võrreldes. Selle leidmiseks võrdleme objekti heledust E kujutise heledusega E' . Lihtsuse mõttes võtame objektiks mati pinna, mis kiirgab ühtlaselt tema kohale jäävasse ruuminurka $\omega = 2\pi$.

Olgu objekti pinna suurus S , siis jõuab tema kiirgusest (ES) objektini vaid see osa, mis vastab objektiivi pindalale (objektilt vaadatuna)

$$E_{obj} = ES \frac{\pi R^2}{2\pi a^2},$$

kus R on objektiivi raadius ja a objekti kaugus objektiivist.

Optiline süsteem annab sellest kujutise pindalaga S' ning heledusega E' kusjuures $E'S'$ peab olema võrdne eseme noolt

Süsteemi valgusjõud näitab, kuimitu korda on kujutise pind heledam objekti omast. Ta on võrdeline süsteemi suhtelise ava ruuduga.

objektiivile kiiratud valgusega:

$$E' S' = E S \frac{\pi R^2}{2\pi a^2}.$$

Kujutise ja objekti heleduste suhteks saame seega

$$\frac{E'}{E} = \frac{R^2 S}{2a^2 S'}$$

ning, arvestades joonsuurendust

$$\frac{S}{S'} = \frac{h^2}{(h')^2} = \frac{a^2}{k^2}.$$

Saame

$$\frac{E'}{E} = \frac{R^2 a^2}{2a^2 k^2} \sim \frac{D^2}{k^2} \sim \left(\frac{D}{f}\right)^2.$$

Avaldist D/f , kus $D = 2R$ on objektiivi läbimõõt, nim. süsteemi (objektiivi) **suhteliseks avaks**.

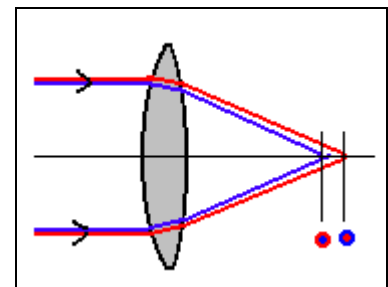
Näeme, et valgusjõud on võrdeline suhtelise ava ruuduga.

Aberratsioonid. Geomeetriline optika, nagu teisedki füüsikateooriad, on matemaatiliselt ilus ja lihtne ainult idealiseeritud juhul (õhukesed läätsed, optilise peateljega paralleelsed kiired, väike suhteline ava jms). Reaalsete süsteemide korral pole meil enamik nendest täidetud. Seetõttu annab geomeetriline optika vaid lähtevõrrandid, mida tuleb "parandada" nn. optiliste vigade ehk **aberratsioonide** arvel.

Iga kõrvalekallet ideaalsest süsteemist kajastab omaette aberratsioon:

- **kromaatile aberratsioon** on fookusekauguse sõltuvus lainepikkusest;
- **sfääriline aberratsioon** on fookusekauguse sõltuvus kiire kaugusest optilisest teljest (sfäärilise läätses või peegli korral);
- **astigmatism** on kujutise moondumine juhul, kui kiired pole paralleelsed optilise peateljega;

jne. jne.



Kromaatile aberratsioon:

kuna punaste kiirte jaoks on klaasi murdumisnäitaja väiksem, asub nende koondumispunkt (fookus) läätsesest kaugemal kui sinistel kiirtel.

Aberratsioonide teooria on vähemalt niisama keeruline kui geomeetiline optika ise. Et vigade parandamiseks tehtavate arvutuste maht oli suur ja täpsus väike, oli praktiline optika kuni viimase ajani suures osas "kunst", kus meistri kogemused ja vilumus kaalusid tihti üles inseneride suured arvutused.

1980-test alates on põhiliselt tänu jaapani ja USA tehnoloogiale kujunemas automatiseeritud optikatööstus, kus optilisi süsteeme enam ei arvutata, vaid modelleeritakse arvuti abil. Arvuti juhtimisel ja laserseadme kontrolli all toimub ka tulemuse realiseerimine.

Fotograafias ja astronoomias on revolutsioon juba toimunud - programmeeritav tehnoloogia võimaldab saada suvaliste parameetritega optikat. Viimaseks moeks on nn. *adapteeruv optika*, kus pinna kuju on muudetav ka eksploatatsiooni käigus (isefokuseeruvad teleskoobid ja kaamerad, kujutise stabiliseerimine binoklis või liikuva kaamera korral).

Fotomeetria.

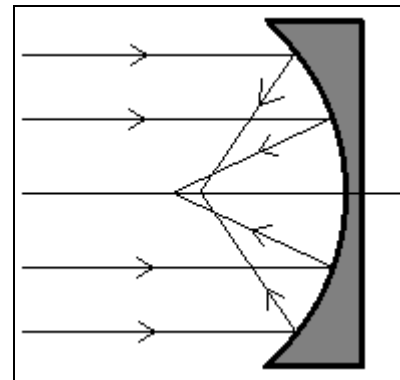
Kui tõlkida ladina keelest, tähendab fotomeetria valguse mõõtmist. Sõnal "valgus" on aga, nagu teame, kaks tähendust:

- elektromagnetkiirgus kindlas sagedusvahemikus;
- valgusaisting.

Aistingu tugevust pole võimalik mõõta, kogu füüsika ongi tehtud just aistingute ebaobjektiivsusest vabanemiseks. Sellele vaatamata oleks hea, kui oskaksime kirjeldada todasama elektromagnetkiirgust suurustega, mis võimalikult hästi korreleeruksid selle lainetuse poolt esile kutsutud aistingu tugevusega.

Fotomeetrias defineeritakse valgustugevuse ühikud, mis sobivad normaalse "keskmise" inimese nägemisega. Neid kasutatakse töö- ja eluruumide ning tänavavalgustuse projekteerimise normatiividena, samuti valgustite tehnilisel kirjeldamisel.

Füüsikalistel mõõtmistel kasutatakse seevastu **energeetilisi suurus**i, millel pole nägemisega midagi ühist. Loomulikult on olemas ka ilus integraal ühtedelt ühikutelt teistele üle minemiseks.



Sfääriline aberratsioon:

optilisest peateljest kaugemal asuvad paralleelsed kiired lõikavad pärast peegeldumist telge peeglile lähemal.

Fotomeetria tegeleb valguse mõõtmisega.

Energeetilised ühikud on SI-süsteemis nagu ikka vatt (W) ja vatt ruutmeetri kohta (W m^{-2}).

- vatt (W)
- vatt ruutmeetri kohta (W/m^2)

Vattides mõõdetakse **pinna bolomeetrist heledust**.

Teades kiirgava keha pindala, võime selle abil arvutada kiirgaja koguvõimsuse:

$$P_B = \int_S R(T) dS; \quad [P_B] = \text{W}.$$

Energiavoog arvutatakse tavaliselt aga **Gaussi teoreemi** abil:

(energia)voog läbi kinnise pinna on võrdne pinnaga ümbritsetud ruumis asuvate (energia)allikate koguvõimsusega:

$$\oint \vec{\Phi}_B d\vec{S} = \sum P_B.$$

Ühe allika ning isotroopse kiirguse korral järeldeb sellest (nagu jõuväljade korralgi), pöördruutsõltuvus. See tähendab, et küllalt suurel kaugusel allikast on

$$\vec{\Phi}(r) = \frac{P_B}{4\pi r^2} \frac{\vec{r}}{r}.$$

"Suurel kaugusel" tähendab seda, et me ei pea arvestama allika mõõtmeid. Analoogiliselt gravitasioonivälja punktmassi või elektrivälja punktlaenguga räägitakse siingi **punktallikast**.

Selle lähendi abil on lihtne defineerida näiteks **allika bolomeetrilise valgustugevuse**, mis on võrdne ühikulisse ruuminurka (sterradiaani) kiiratud energiaga:

$$I_B = \frac{P_B}{4\pi}; \quad [I_B] = \frac{\text{W}}{\text{ster}}.$$

Kordaja $(4\pi)^{-1}$ võtmisel ühiku definitsiooni sisse on sügav mõte: nüüd saame kaugusel r asuvat ühikulist pinda läbiva kiirgusvoo, jagades heleduse pinna kauguse ruuduga (ühte sterradiaani kiiratud valgus jaotub kaugusel r ühtlaselt pinnale $r^2 \text{ m}^2$).

Pinna võimalikku kallet arvestades:

$$E_B = \int_S \vec{\Phi} d\vec{S} = \frac{I_B \cos \alpha}{r^2},$$

kus α on langemisnurk (nurk kiirte suuna ja pinnanormaali vahel).

Suurust E_B nim. pinna **bolomeetriliseks valgustatuseks**.

Tema ühikuks ongi **vatt ruutmeetri kohta**. Sama ühik kõlbab veel kiirgava pinna **kiirgusvõime** ja ruumis asuvat pinda läbiva **kiirgusvoo** kirjeldamiseks.

Nüüd ongi meil käes põhilised suurused ja seosed nende vahel. Jääb üle seletada, mida tähendab indeks B ja täiend "bolomeetiline". Õigem oleks öelda "energeetiline" valgustatus, aga ajalooliselt on jäänud viide soojuslikule kiirgusvastuvõtjale - bolomeetritele. Algselt oli bolomeeter tumedaks värvitud anum, milles oleva vedeliku temperatuuri mõõtes hinnati anuma poolt neelatud kiirguse energiat; praegu nimetatakse nii kõiki soojusliku toimega kiirgusmõõtjaid.

Fotomeetrilised ühikud. Kui on vaja mõõta kiirguse intensiivsust inimsilmas tekkiva valgusaistingu alusel, tuleb energeetilisi ühikuid teisendada. Selleks korrutame suvalist nendest erilise funktsiooni, nn. **silma tundlikkuse kõveraga**.

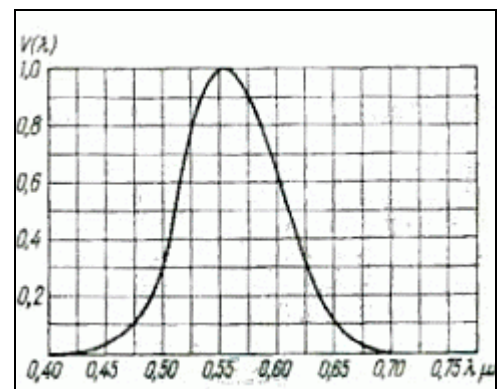
See on katseliselt, suure hulga inimeste abiga koostatud funktsioon, mis kujutab **sama energiaga kiirguse poolt tekitatud aistingu tugevuse sõltuvust valguse lainepikkusest**.

Funktsioon on normeeritud nii, et ta võrdub ühega silma maksimaalse tundlikkuse juures ($\lambda \approx 555 \text{ nm}$) ning on null seal kus silm kiirgust ei tunne. Kõvera ($V(\lambda)$) käik on antud kõrvalasuval joonisel.

See pole veel kõik. Loomulikult on ka valguse mõõtmisel (nagu mujalgi füüsikas) mõõtühikud vanemad kui teooria. Seetõttu ei mõõda me valgusvoogu mitte "bioloogiliste vattide", vaid **luumenitega**, valgustatust **luksides**, valgustugevust **kandelates** ning kiirgava pinna heledust **nittides**.

Põhiühikuks on **valgustugevuse** ühik **kandela** e. rahvusvaheline küünal (cd), mille kohta antakse etaloondefinitsioon:

Üks kandela on valgustugevus, mis võrdub $1/60 \text{ cm}^2$ suuruse pinna kiirgusega plaatina tahkumistemperatuuril (2044 K).



Silma valgustundlikkuse kõver.

SI süsteemi fotomeetriliseks põhiühikuks on kandela.

Tuletatud ühikuteks on:

- **Luumen (lm)** - valgusvoog, mida kiirgab punktallikas 1 cd ruuminurka 1 sterradiaan;
- **Luks (lx)** vastab valgustatusele üks luumen ruutmeetri kohta;
- **nitt (nt)** vastab heledusele 1 cd kiirgava pinna ruutmeetri kohta.

Fotomeetrilised ühikud:

- **kandela (cd)**
- **luumen (lm)**
- **luks (lx)**
- **nitt (nt).**

Kõik "energeetilised" valemid kehtivad ka "fotomeetriliste" suuruste kohta.

Juhul, kui valgusallikat pole võimalik "väikseks" lugeda, tuleb kasutada vana tuttavat võtet. Allika (näiteks suuremõõtmelise hajutiga lambi) pind jagatakse elementideks, millest igaühete võib vaadelda kui punktallikat; seejärel leitakse vaadeldava pinna valgustus kõigi elementide jaoks ning summeeritakse. Tavaliselt on tulemuseks integraal üle mingi geomeetrilise pinna.

Pisut keerulisem on juht, kus pinnalt lähtuv kiirgus pole isotroopne - sel juhul tuleb valgustatuse valemisse lisaks langemisnurgale veel kiirgaja *indikatrissist* (funktsioon, mis kirjeldab eri suundades kiirratavate lainete suhtelisi intensiivsuseid) tulenev kordaja.

Hästi on uuritud nn. *koosinuskiirgajat*, kus pind kiirgab ühtlaselt kõigis suundades, mistõttu indikatrissi asemel läheb valemisse pinna kaldenurk. Koosinuskiirgaja korral vastab pinna heledusele (kiirgusvõime pinna ühelt ruutmeetrilt ruuminurka üks sterradiaan) üks nitt valgus (kogukiirgus ühelt ruutmeetrilt) π kandelat.

Energeetiliste ning fotomeetriliste ühikute võrdluseks võib tuua ühe arvu: parima nägemise lainepikkusel (555 nm) vastab valgusvoole üks luumen kiirgusvoog 0.0016 W/ster.

Akustika. Ka kuulmisaisting on laine (seekord õhus või vees leviva elastsuslaine) poolt edasikantava energia tajumine. Seetõttu tekib ka siin vajadus taju mõõtmiseks - näiteks töökaitstes müra piirnormi rehkendamisel.

Nagu valguse, nii ka hääle korral sõltub aisting energiavoost ja sagedusest. Ainult et erinevalt silmast pole võimalik kõrvu ülemäärase heli eest kaitsmiseks sulgeda.

Akustika on tehnilise füüsika haru, mis uurib häälelainete levimist.

Kitsamas mõttes uurib ta häälelainete poolt esile kutsutavat kuulmisaistingut.

Seetõttu piirab **kuuldepiirkonda** lisaks tundlikkusele (alumine kõver joonisel) veel nn. **valulävi**, millest suurema energiavoo toimel tekib organismi kaitsereaktsioonina valuaisting (ülemine kõver). "Normaalse kuuldavuse" piirkond jääb kusagile nende kahe kõvera vahele.

Muide, valulävi toimib ka kuuldepiirkonnast väiksema sageduse (nn. infraheli) korral ja seda arvestab **vibratsioonikaitse**. Samuti on bioloogiline mõju suurematel sagedustel, aga sellekohased normatiivid ei puutu ei akustikasse ega fotomeetriasse. Nende probleemidega tegeleb **kiirguskaitse**, millel on omad bioloogilist laadi mõõtühikud.

Parima kuulmise sagedusel (umbes 1000 Hz) on valu- ja kuuldelävele vastavate energiavoogude suhe 13 suurusjärku. Et seda mõistlikult gradueerida, võetakse kasutusele **logaritmilised ühikud**. Heli valjuse ühikuks on **bell (B)** ja selle arvutamise valem on

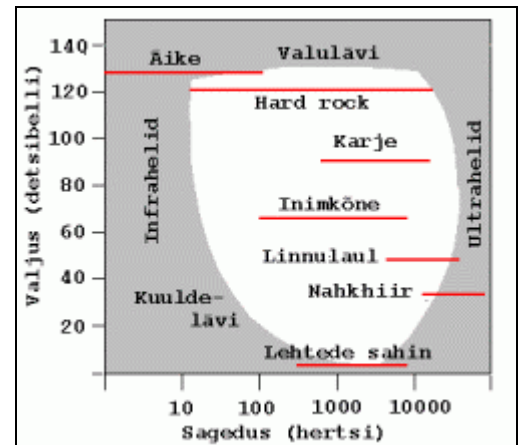
$$A = \log \Phi_h + 12.$$

Tavaliselt kasutatakse belli asemel 10 korda väiksemat ühikut - detsibelli. Kui soovime vastust detsibellides, tuleb valemit korrutada kümnega. Rangelt võttes kehtib valem vaid 1000 Hz lähedaste sageduste korral; et aga kõrva tundlikkus sellest eemaldumisel kiiresti langeb, võib integraali asendada keskvaartusega, mis erineb tegelikust vaid poole detsibelli võrra.

Huvitav on märkida, et astronoomide kasutatav tähesuuruste skaala on üsna sarnane akustilisele. Kui võtta aluseks kindlasse (silma või valgusfiltri abil määratud) sageduspiirkonda jääv energiavoog, on tähesuurus määratud valemiga:

$$m = a - 2.5 \log \left(\int_0^{\infty} V(\omega) \Phi(\omega) d\omega \right)$$

Konstant **a** on määratud mõõteriistaga, funktsioon **V(ω)** on aga meile juba tuttav silma (või filtri) tunnuskõver - seekord mitte lainepikkuse vaid nurksageduse järgi.



Kuuldepiirkond. Kuulmislävest nõrgemad helid kuulmisaistingut ei tekita, valulävest tugevamate helide korral tekib valuaisting.

"Keskmise inimese" aistinguid hindavaid mõõtühikuid nimetatakse mõnikord **biomeetristeks**.

Sellega rõhutatakse, et mõõdetakse mitte niivõrd **nähtusi** (heli, valgus) kui neid tajuvaid **organisme** (näiteks inimesi).

Heli valjuse ühikuks on **bell (B)**. Tavaliselt mõõdetakse valjust detsibellides.

Valjuse skaala on logaritmiline: mõõtühik käib mitte energiavoo, vaid selle logaritmi kohta.