

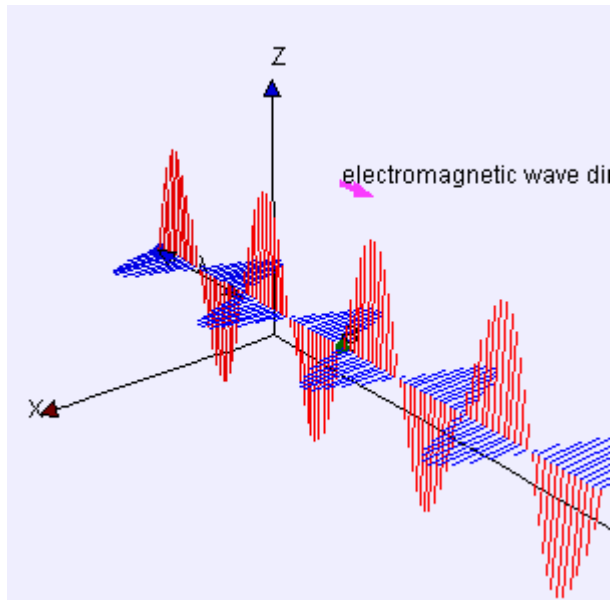
Elektromagnetilised lained

- Nähtav valgus: lainepikkus
 $\lambda = 380..700 \text{ nm}$
- Kui kiirus on $c (= 3 \cdot 10^8 \text{ m/s})$, siis
võnkesagedus:

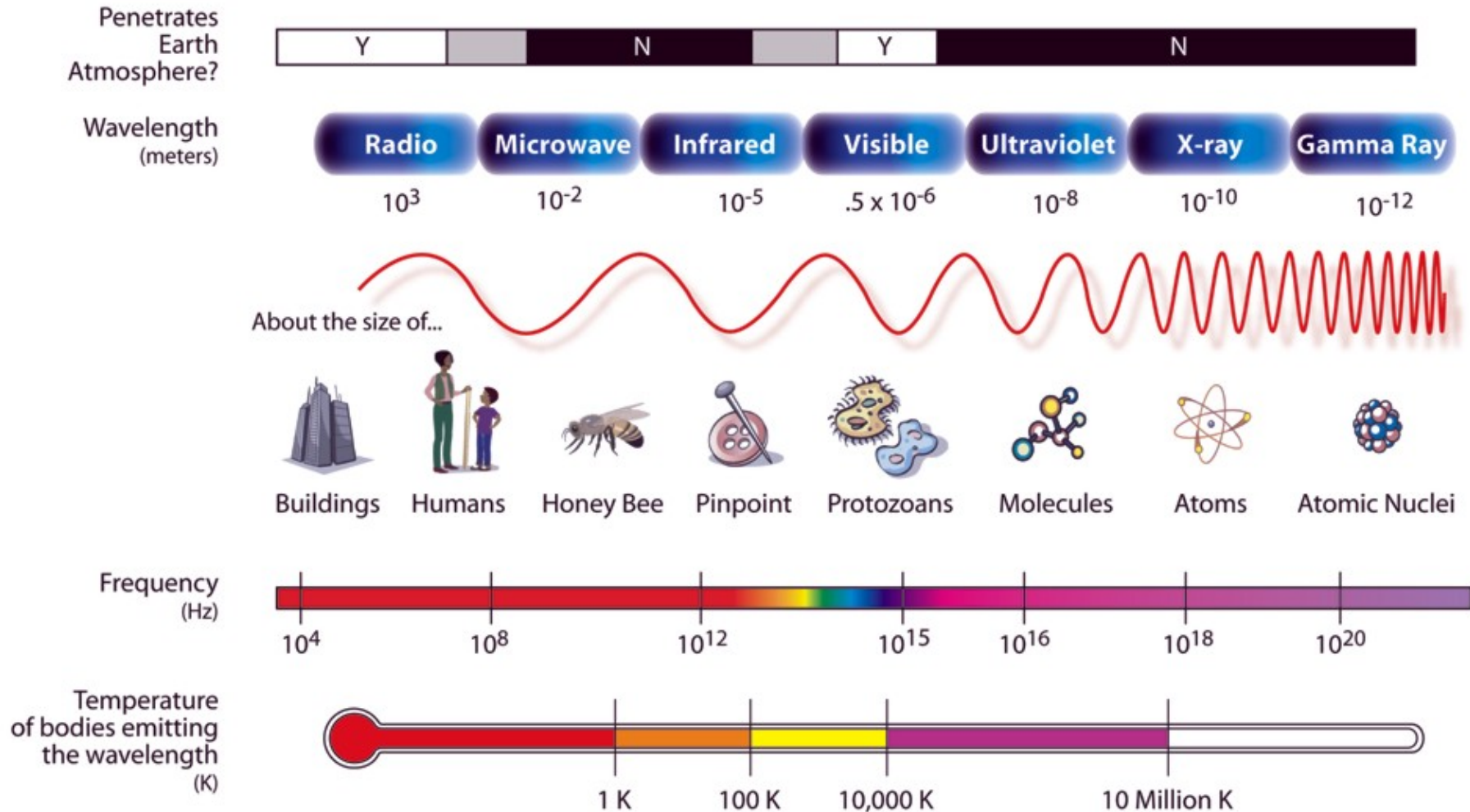
$$\nu = \frac{c}{\lambda}$$

- laine elektrivälja- ja magnetvälja-
komponent on omavahel risti ja
kannavad üksteist edasi nende
mõlemaga ristuvast suunas.

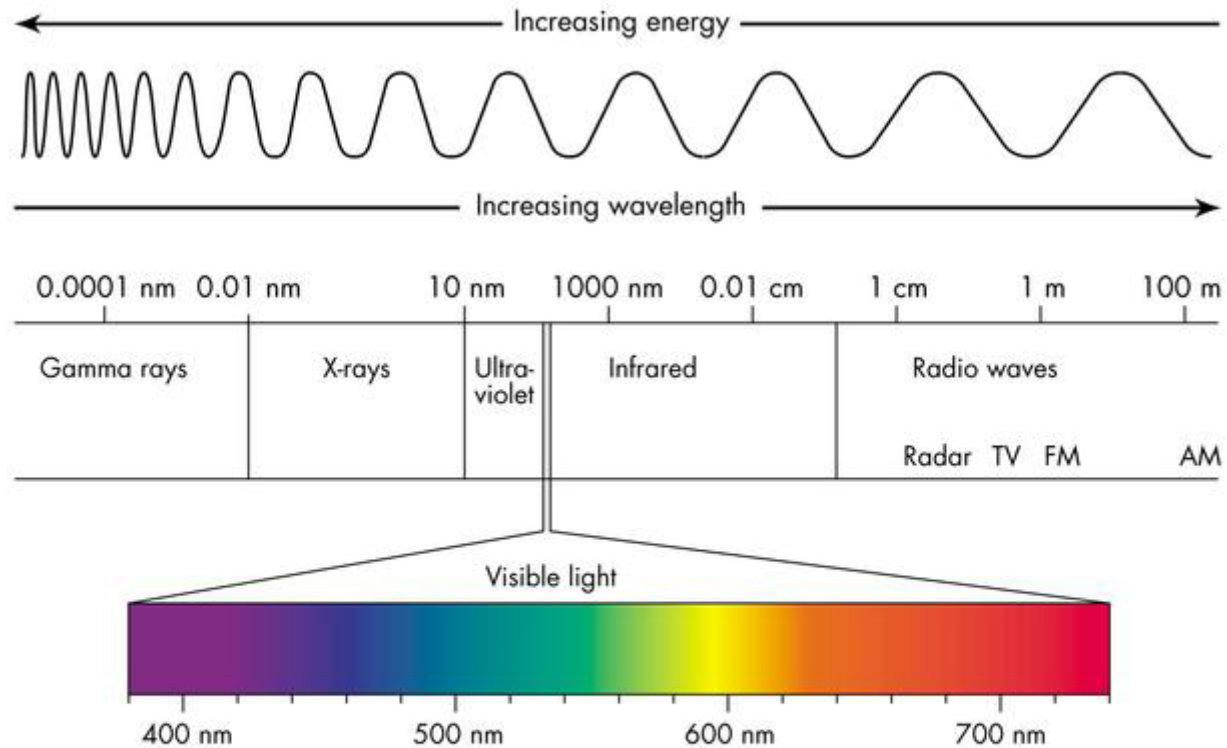
Ühtlasi kannavad nad edasi ka energiat.



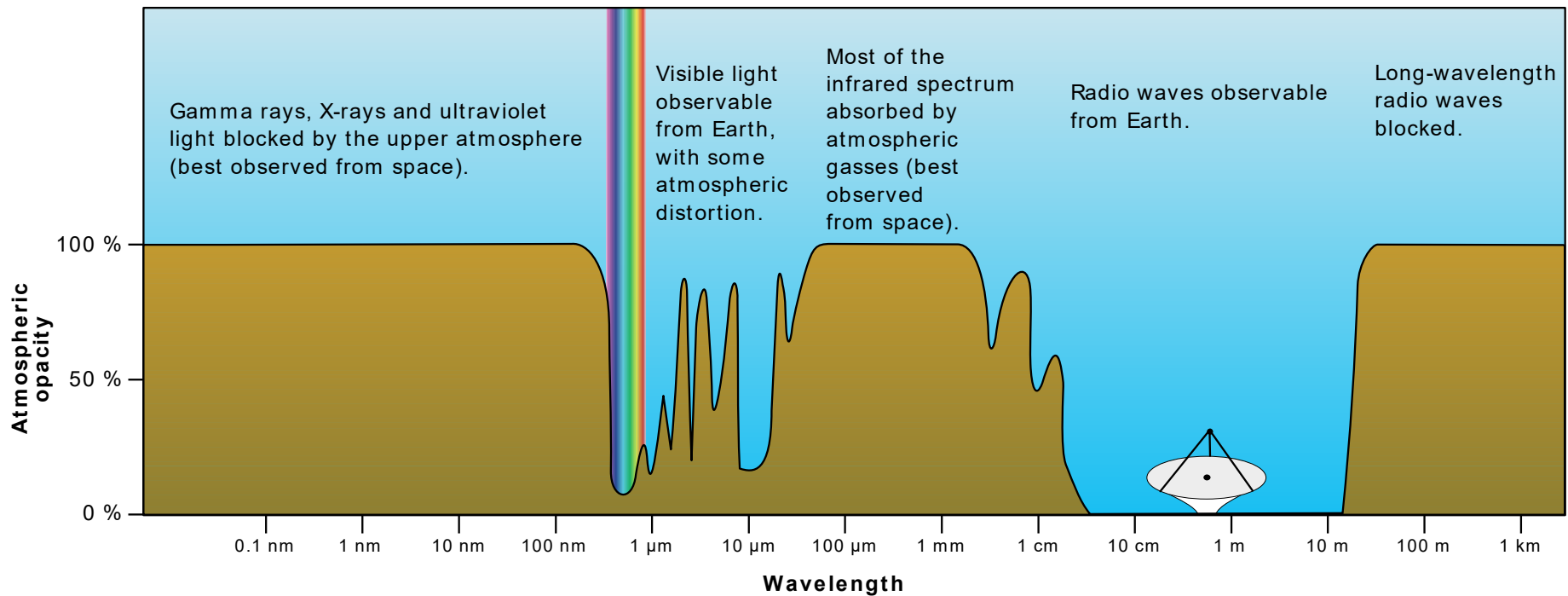
THE ELECTROMAGNETIC SPECTRUM



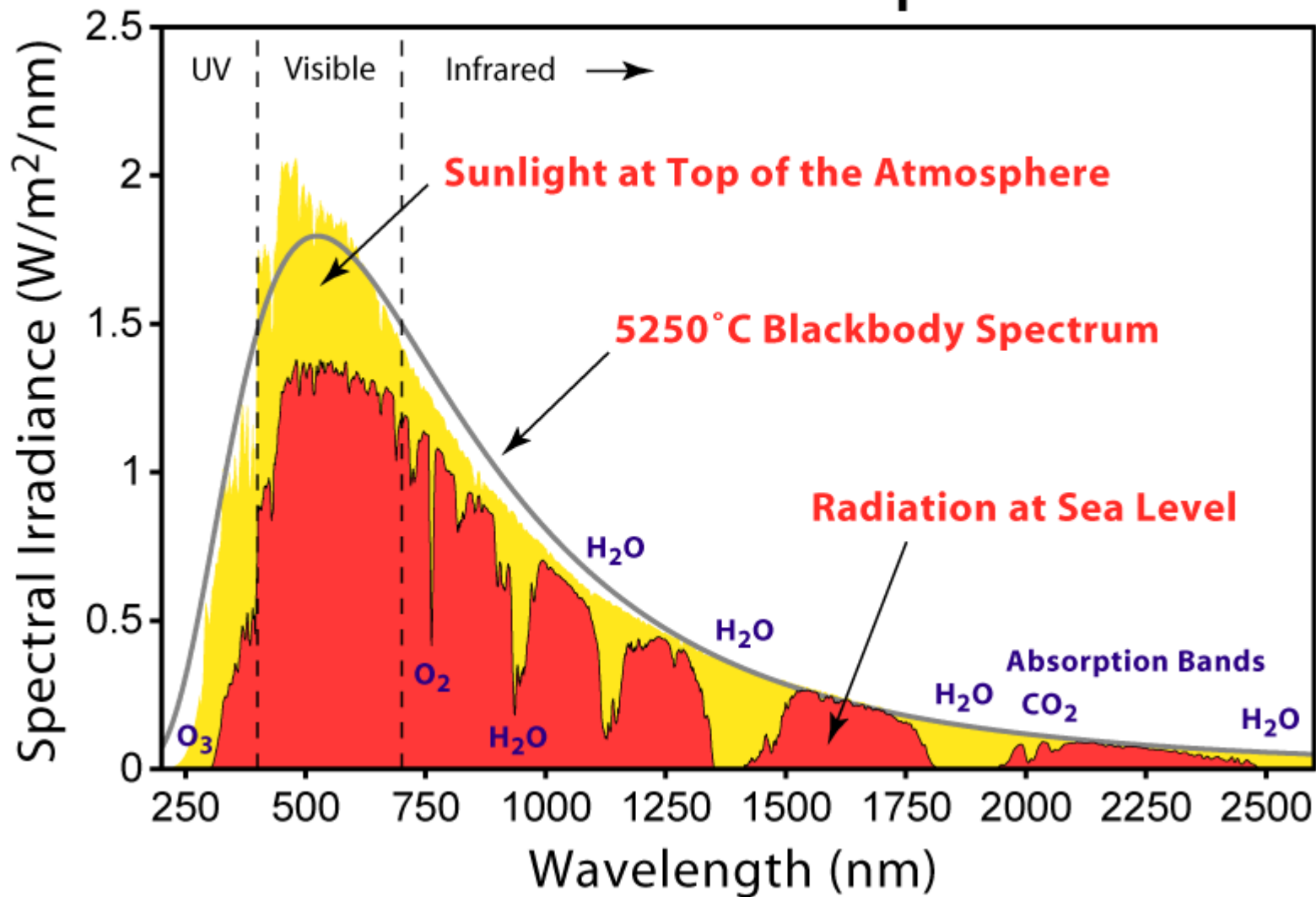
Nähtav valgus



Mis pääseb läbi atmosfääri?

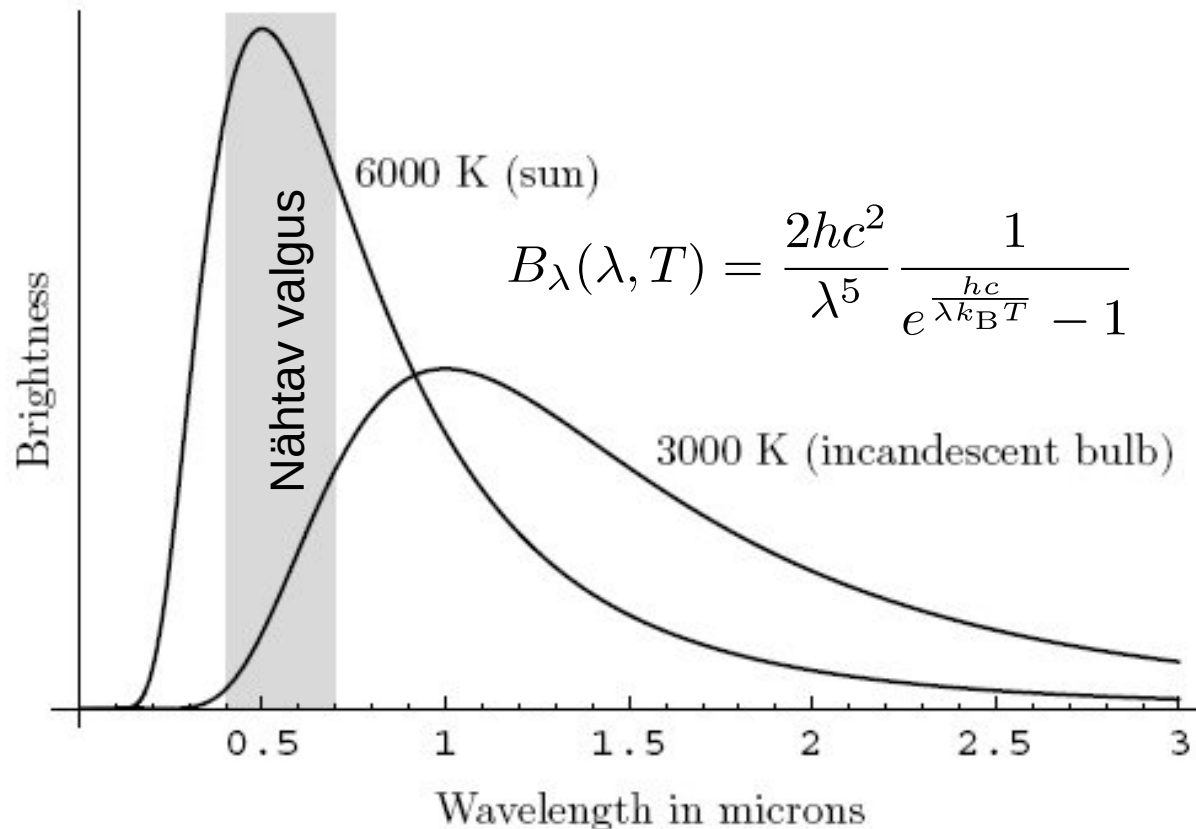


Solar Radiation Spectrum



Valgusallikad: soojuslik kiirgus

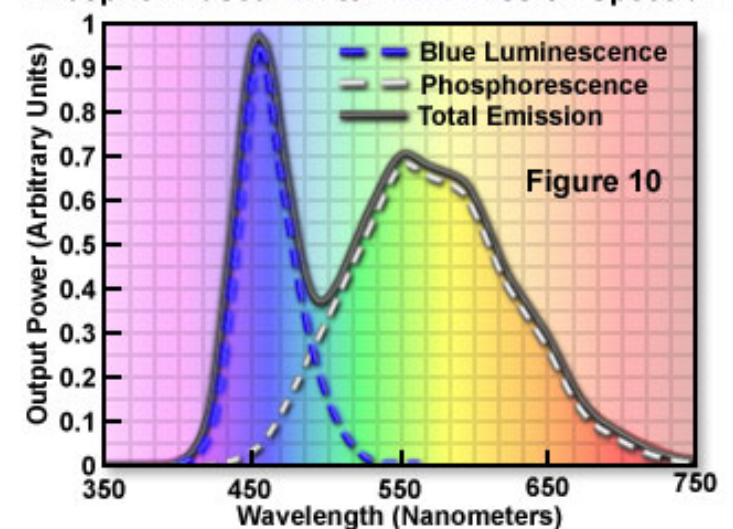
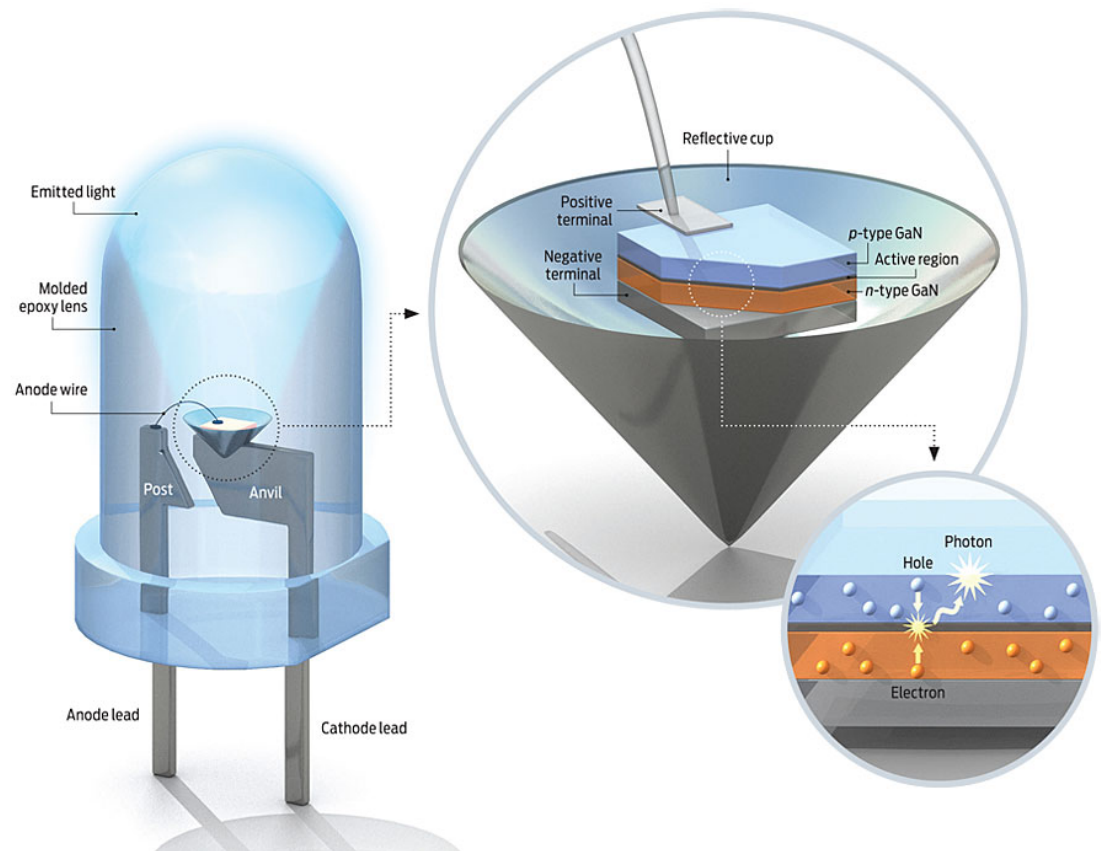
- Iga 0K-st kõrgema temperatuuriga keha eraldab elektromagnetkiirgust laetud osakeste soojusliikumise tõttu (võnkumised, põrked)
- Umbes 500°C juures jõuab see nähtava piirkonnani
- Spektrit võib arvutada nn. musta keha kiirguse ehk Plancki valemi abil



Päike vs. hõõglamp

Valgusdiod

- n -tüüpi pooljuhis kannavad laengut elektronid, p -tüüpi juhis augud (elektronvakantsid), mis on efektiivselt positiivsed laengukandjad.
- Pärioolu korral kohtuvad elektronid ja augud diodi p - n siirdes ja rekombineeruvad; sealjuures võib eralduda valgus (sõltuvalt põhiliselt pooljuhi aine valikust).
- Valge valgusdiodi saamiseks lisatakse sinisele diodile fosfoore, mis annavad sekundaarset kiirgust ja seega laiendavad spektrit.



Valge LED

Laser



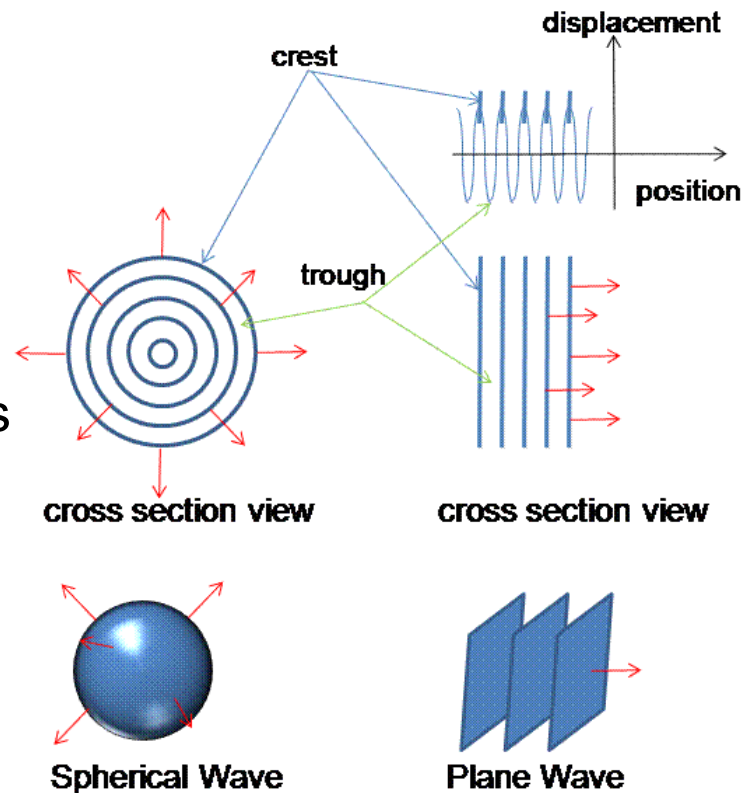
- Monokromaatne e. ühevärviline (üks kitsas spektrijoon)
- (Peaaegu) paralleelne kiirtekimp

Sfäärilised ja tasalained

Lainefrondid:
samafaasijooned

Sfäärilised lained:

- Punktvalgusallikas (lähedal)

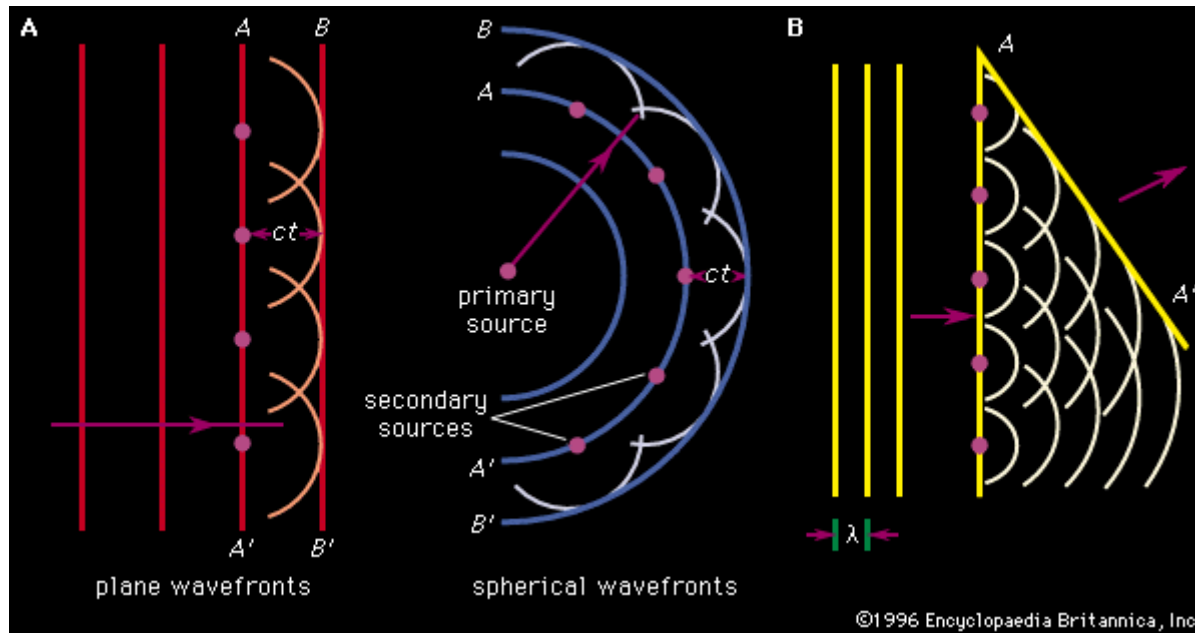


Tasalained:

- Kauge punktvalgusallikas (nt. Päike)
- Või ka lihtsalt väga (lõpmatult) väike osa suvalisest lainefrondist
- laser – küllalt heas lähenduses

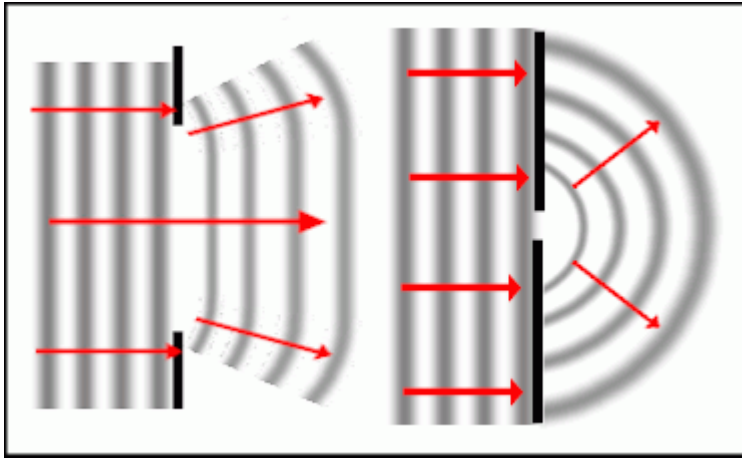
Huygensi printsiiip

Lainefrondi iga punkt on käsitletav punktvalgusallikana:



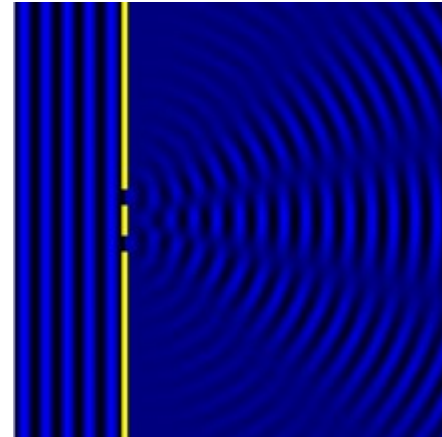
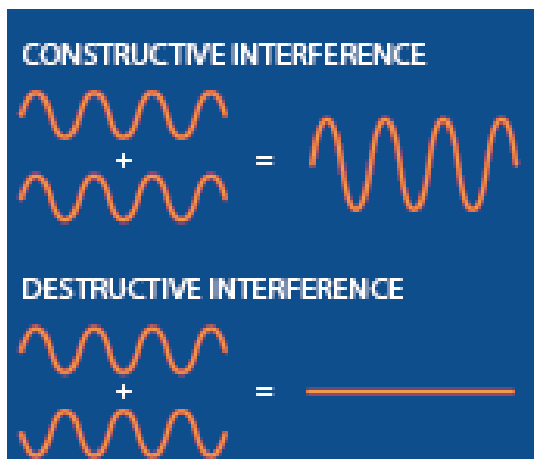
Uueks lainefrondiks aja t järel saab eelmisest frondist lähtunud keralainete, raadiusega ct , mähispind. Sellise konstruktsiooni abil on võimalik modelleerida lainefrondi liikumist, samuti nt. peegeldumist ja murdumist.

Difraktsioon ja interferents



Vastavalt Huygensi printsiibile
levivad lained ka ümber tõkete
(difraktsioon)

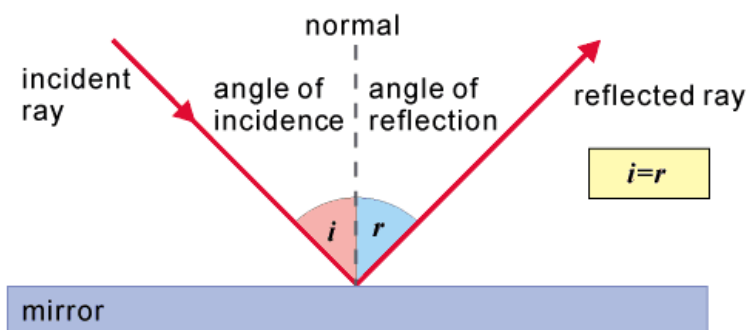
... ja võivad liitudes üksteist
kas kustutada või
võimendada (interferents)



Geomeetriline (kiirte) optika

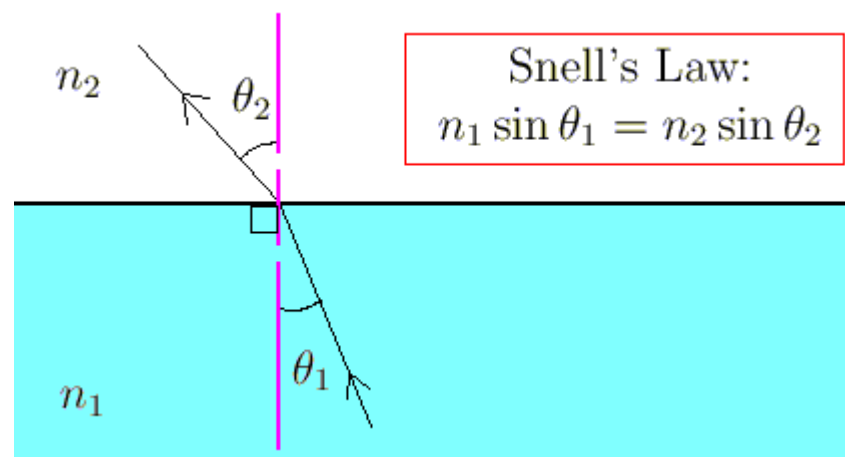
- Laineoptika lihtsustus, kus valguse levikut kirjeldatakse energia levikusuunalise suunatud joone e. kiirena.
- Isotroopses keskkonnas on kiired risti lainepindadega, s.o. sfäärilised lained → radiaalne kiirtekimp; tasalained → paralleelne kiirtekimp
- Fermat' printsiip – valgus levib kahe punkti vahel mööda lühima ajaga läbitavat teed → peegeldumis- ja murdumisseadus
- Geom. optika eeldab, et lainepikkus on tühiselt väike, mis ei võimalda nt. interferentsi- ja difraktsiooninähtuste kirjeldamist

Peegeldumis- ja murdumisseedus



- Peegeldusnurk = langemisnurk
- Langev kiir, peegeldunud kiir ja pinnanormaal peegelduspunktis on samas tasandis

Kuna sagedus ei muutu, siis samapalju kordi väheneb ka lainepikkus.



Murdumisnäitaja (n) – keskkonda iseloomustav suurus, mis näitab, mitu korda valguse kiirus keskkonnas on väiksem valguse kiirusest vaakumis. On seotud ka suhtelise dielektrilise (ja magnetilise) läbitavusega, enamasti kehtib:

$$n = \sqrt{\epsilon_s \mu_s}$$

aga nt. vedelikes sõltuvus välja sagedusest

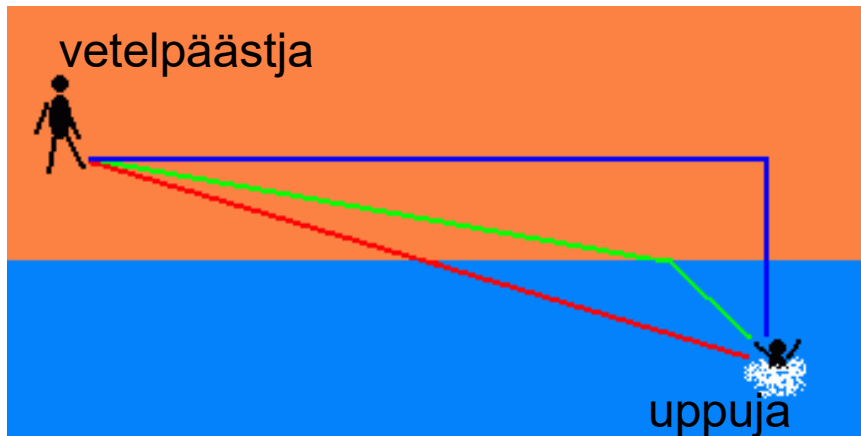
n väärtusi:

Õhk: 1.0003 Vesi: 1.333
Klaas: 1.5 Teemant: 2.42

Fermat' printsiip

Otsetee pole alati kiireim tee

Kuidas valgus kiireima tee leiab?



Fermat's Principle and Refraction

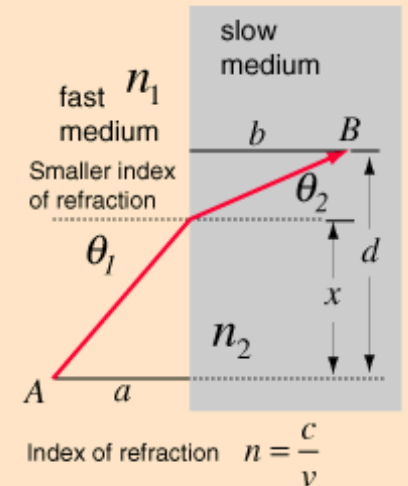
Fermat's Principle: Light follows the path of least time. [Snell's Law](#) can be derived from this by setting the derivative of the time = 0. It shows how the [refraction](#) of light at an interface depends upon the [indices of refraction](#).

$$t = \frac{\sqrt{a^2 + x^2}}{v} + \frac{\sqrt{b^2 + (d-x)^2}}{v'}$$

$$\frac{dt}{dx} = \frac{x}{v\sqrt{a^2 + x^2}} - \frac{(d-x)}{v'\sqrt{b^2 + (d-x)^2}}$$

$$0 = \frac{\sin \theta_1}{v} - \frac{\sin \theta_2}{v'}$$

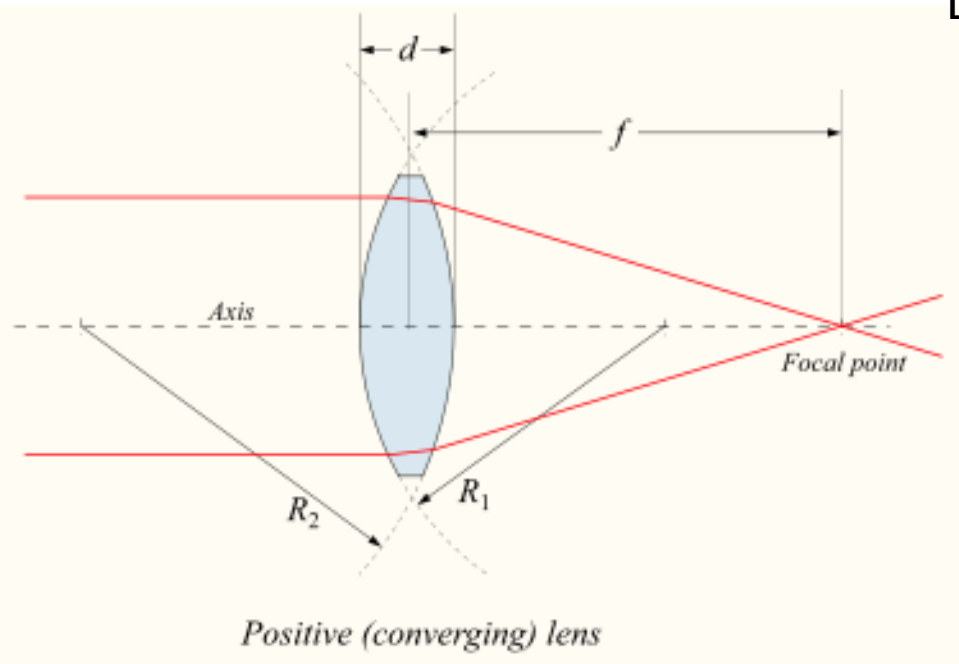
$$\text{Snell's Law} \quad \frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1}$$



Arvutatakse läbimisaeg A → B sõltuvalt murdumispunkti kaugusest x ja leitakse selle miinimum (tuletis x järgi = 0).

Peegeldusseaduse tuletamine Fermat' printsiibist on lihtsam, seda proovige iseseisvalt!

Õhuke lääts



Läätsevalmistaja valem (Lensmaker's formula)

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

1. pinna raadius

2. pinna raadius

$$n = \frac{n_{\text{lääts}}}{n_{\text{ümbritsev}}}$$

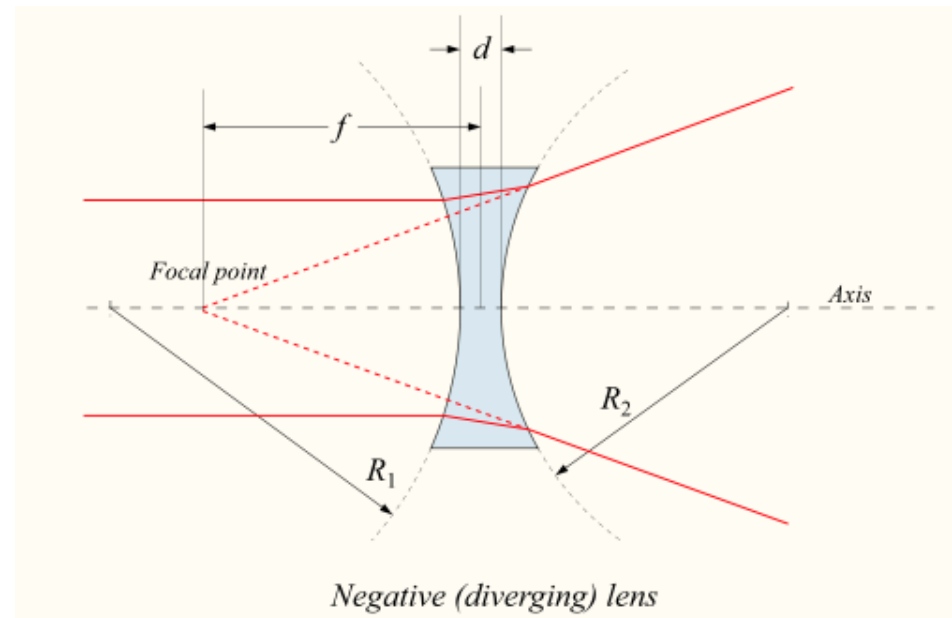
Raadiuse märk sõltub sellest, kummal pool lääts asub vst. sfäärilise pinna keskpunkt (joonisel vasakul -, paremal +).

Hajutava läätses puhul $f < 0$

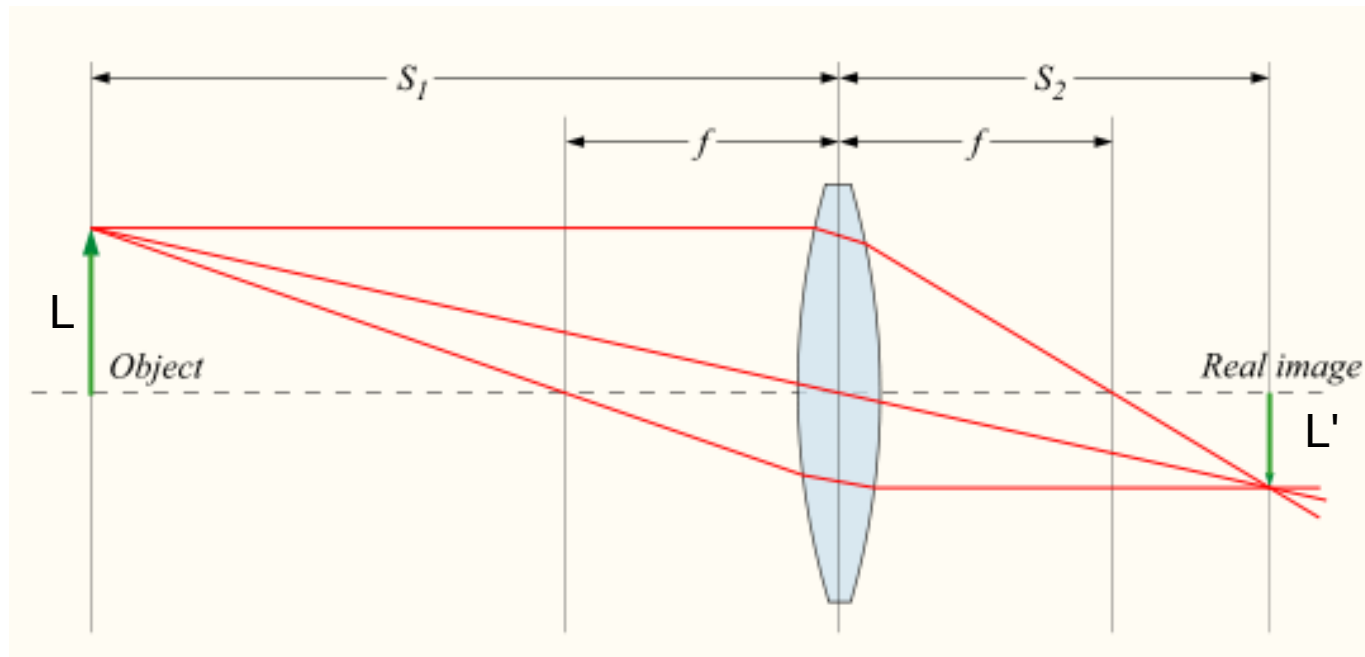
- 2 murdvat pinda, paksus väike (võrreldes fookuskaugusega, $d \ll f$)
- Paraksiaalne lähend – kiired opt.telje suhtes väikese nurga all

Teljega paralleelsed kiired ühel pool läätses läbivad fookuspunkti teisel pool ($f < 0$ korral läbivad nende tagasipikendused)

NB! Läätses ümberpööramise järel fookuskaugus samaks.



Kujutised ja suurendused



Kujutise asukoht:

$$\frac{1}{S_2} + \frac{1}{S_1} = \frac{1}{f} \implies S_2 = \frac{S_1 f}{S_1 - f}$$

$S_2 < 0$ korral on tegu näivkujutisega

Joonsuurendus:

$$M = -\frac{L'}{L} = \frac{f}{f - S_1} = -\frac{S_2}{S_1}$$

$M < 0$ korral on kujutis pööratud

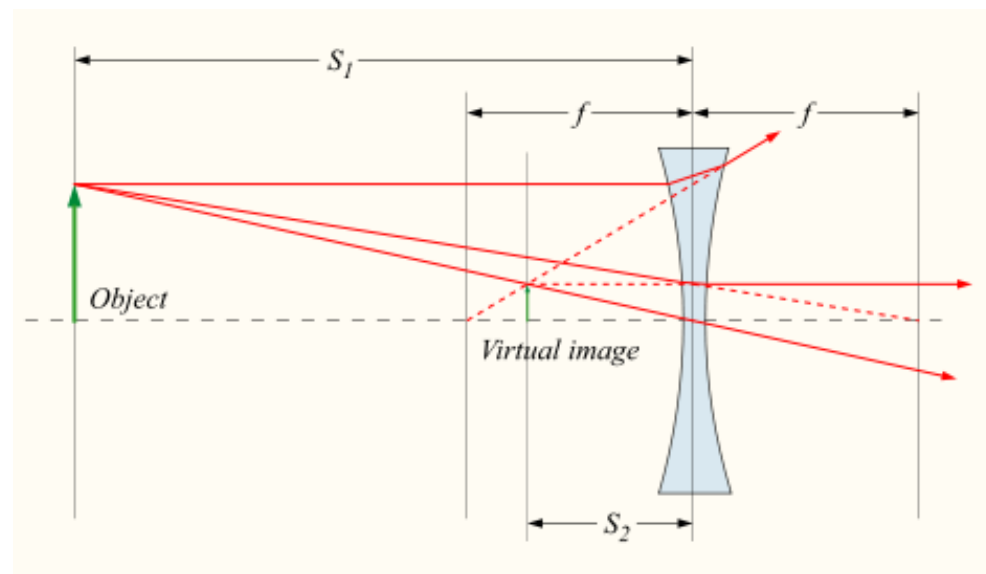
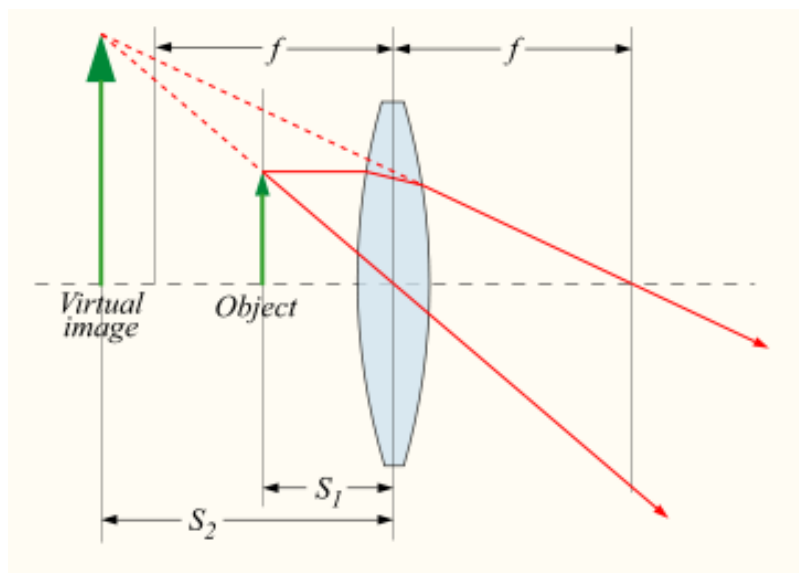
Seega koondava läätse ($f > 0$) puhul $S_1 < f$ korral tekib pööramata näivkujutis (muidu pööratud tõeline).
Mida võime öelda suurenduse kohta?

- teljega paralleelne kiir läbib pärast läätse läbimist fookust
- läätse keskpunkti läbiv kiir ei murdu
- kiired on pööratavad

Näivkujutis

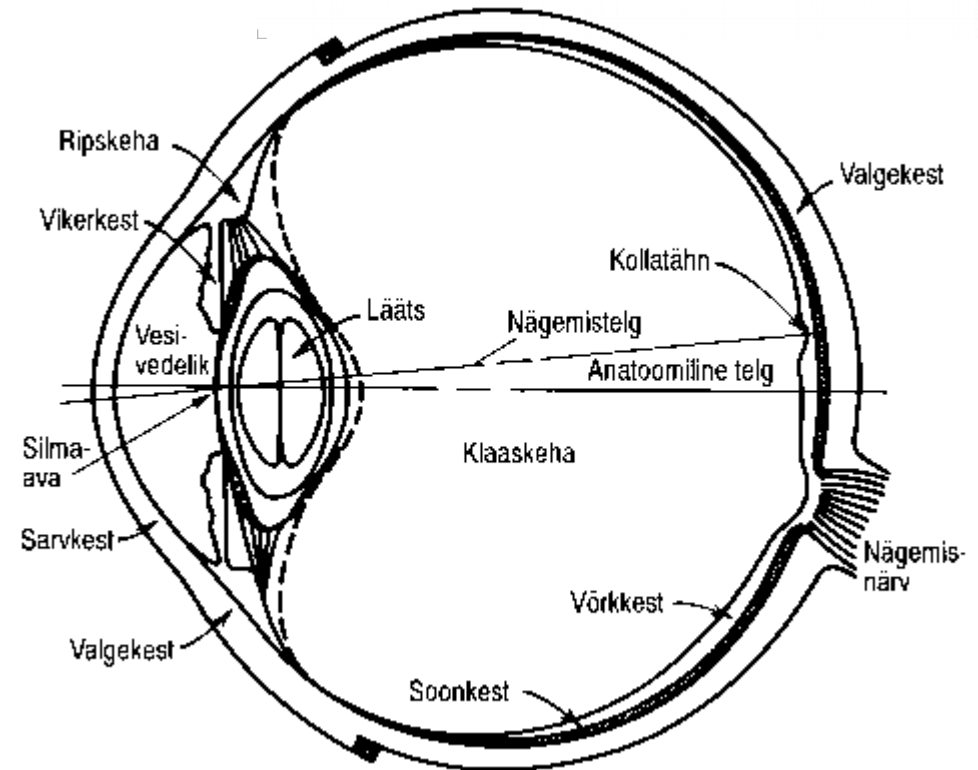
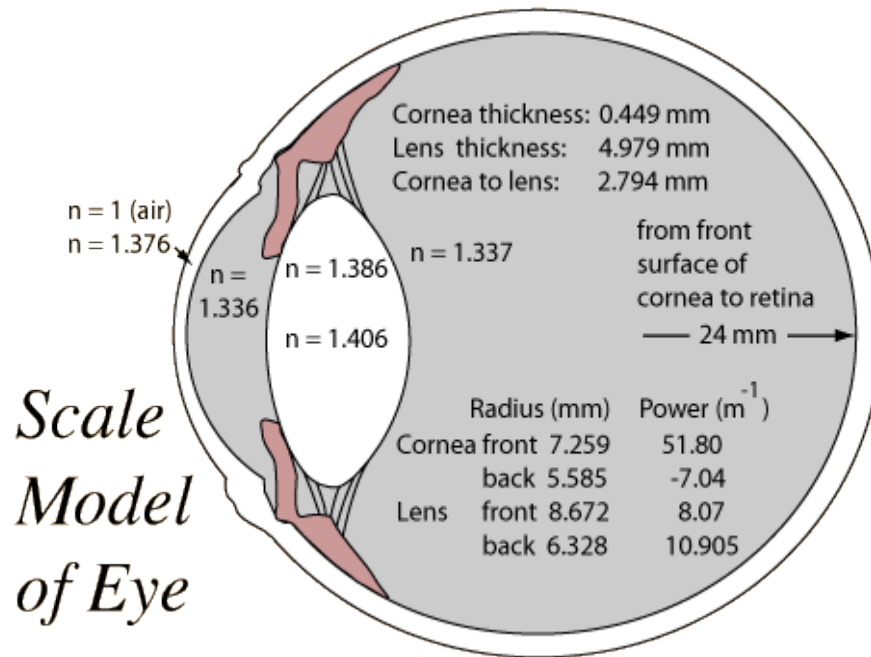
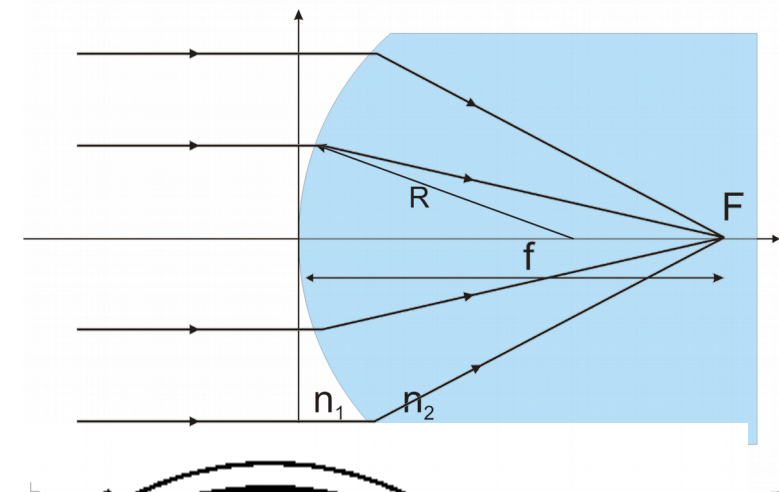
Tõelist kujutist saab projekteerida ekraanile, näivkujutist mitte.

Aga näivkujutist võib edasi kujutada, sh tõelisena (nt. silma võrkkestale luubi ja okulaari korral).



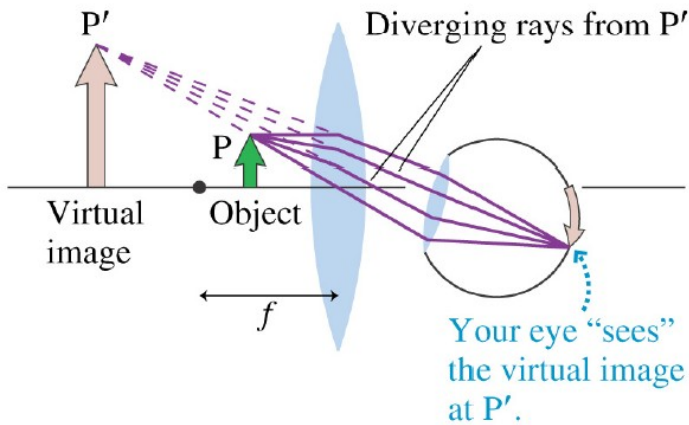
Silm

(ühe pinnaga lääts)



Läätse kuju muutus võimaldab fookuskaugust muuta (akommodatsioon), tekitades vörkkestale kujutisi minimaalselt ca. 25 cm kaugusel (nn. parima nägemise kaugus) asuvatest objektidest.

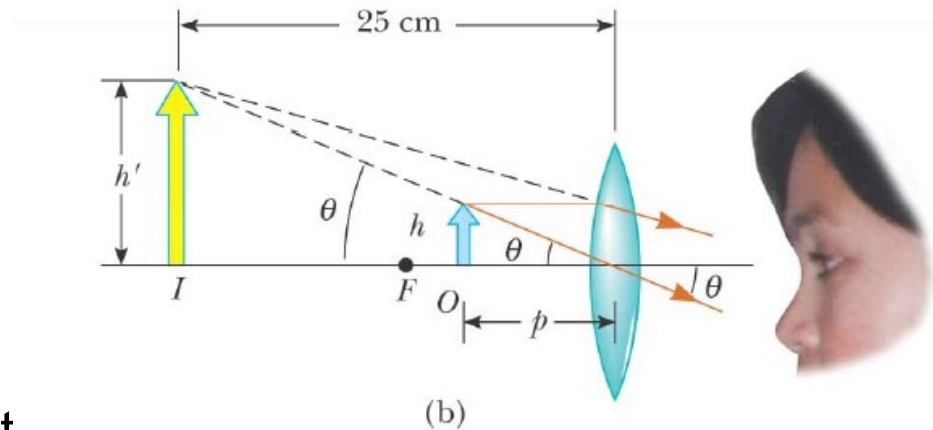
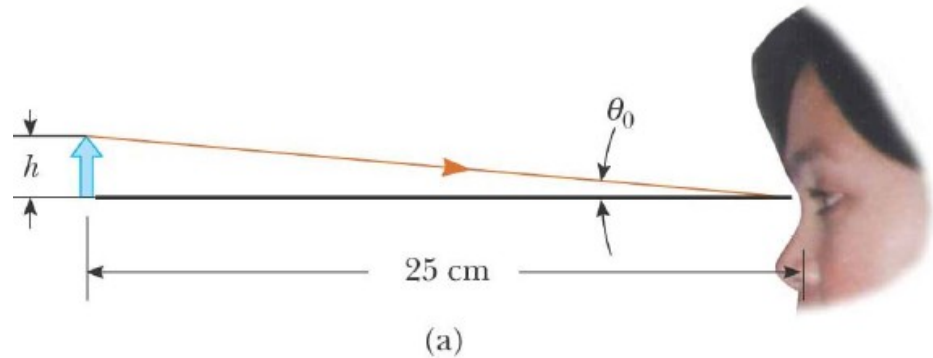
Luup (okulaar)



Copyright © 2004 Pearson Education, Inc., publishing as Addison Wesley

Vaatame suurendatud näivkujutist (s.o. tekitame võrkkestale tema tegeliku kujutise).

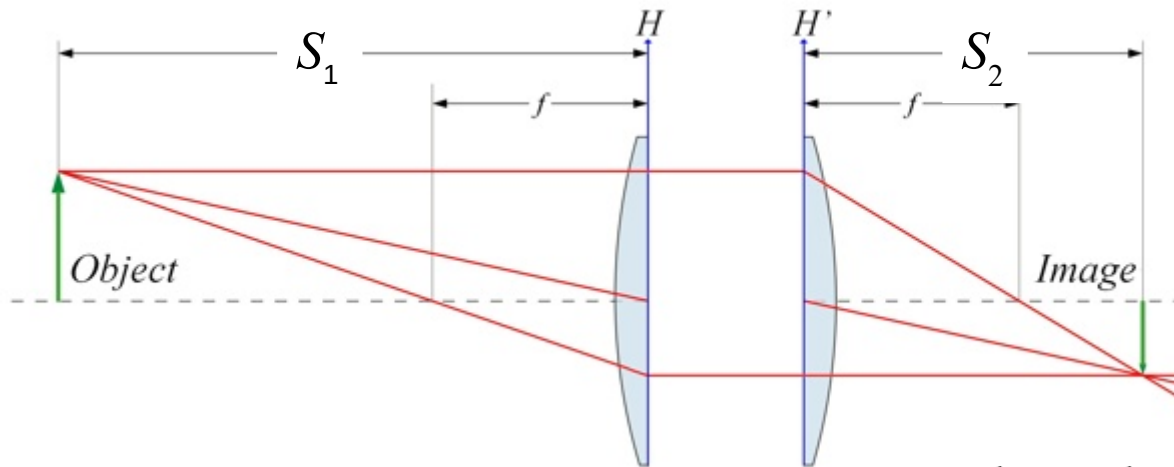
(Nurk)suurendus antakse tavaliselt juhu jaoks, kui ese asub luubi fookuses, võrrelduna juhuga, kui ta asuks parima nägemise kaugusel:



©2004 Thomson - Brooks/Cole

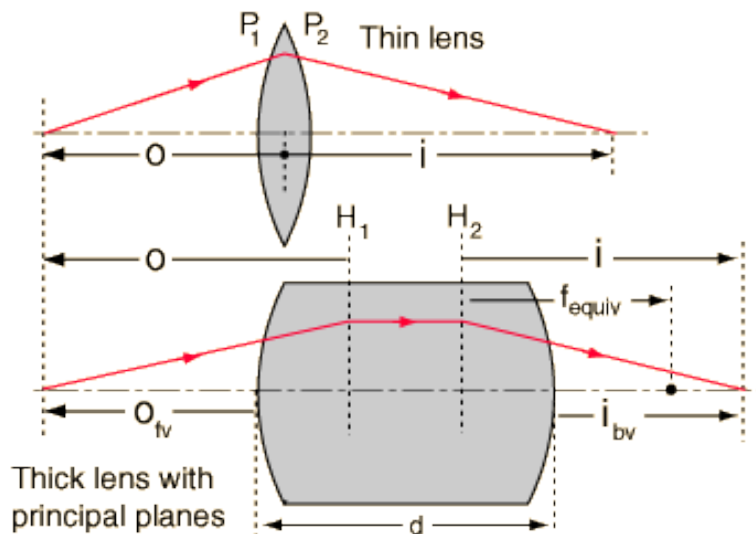
$$M_n = \frac{h/-f}{h/-25\text{ cm}} = \frac{25\text{ cm}}{f}$$

Läätsede liitsüsteemid

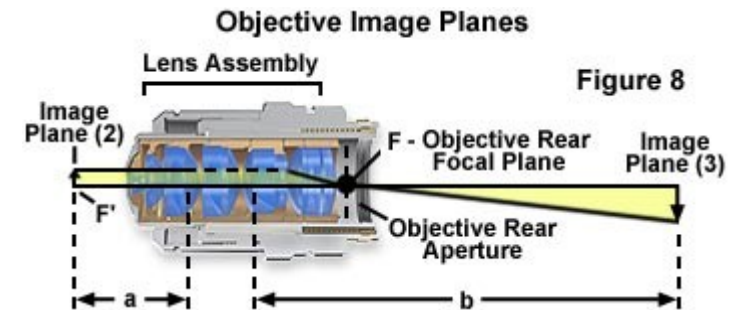


- Keerulise läätsede süsteemi saab taandada sisuliselt õhukeseks läätseks, kui teada on optilised peatasandid (H): nendest tuleb arvestada kaugusi.

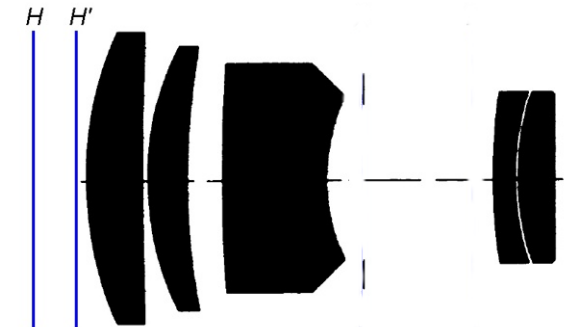
$$\frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} = \frac{1}{f}$$



Näide: paks lääts



Opt. peatasandid
võivad vahel asuda
ootamatutes kohtades

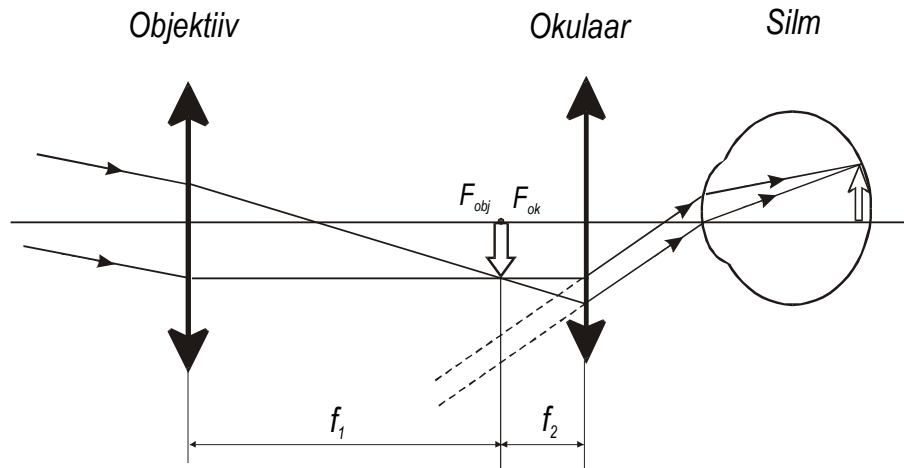


Teleskoop ja pikksilm

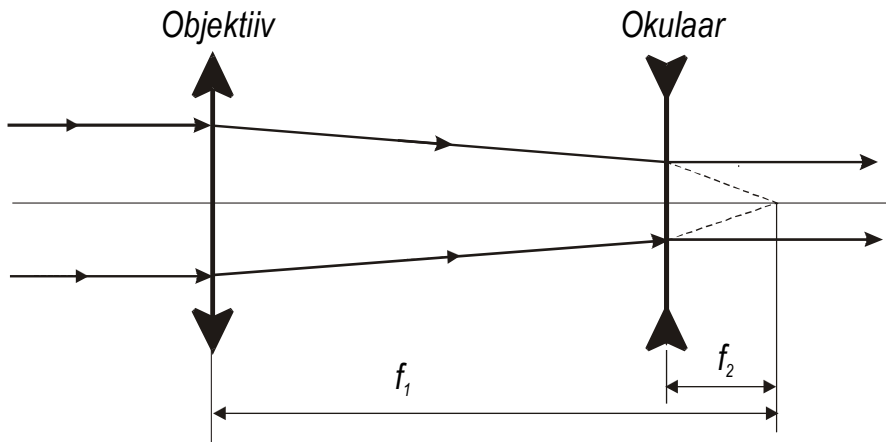
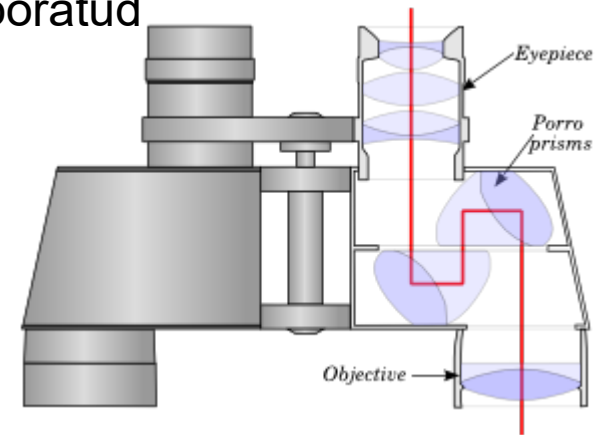
Vaadeldakse kaugel asuvaid esemeid, s.o. kujutis tekib objektiivi tagumises fookuses. Silmaga vaatlemisel ühtib see praktiliselt okulaari fookusega (vrd. luup), s.o. silma jõuab paralleelne kiirtekimp.

$$\frac{1}{S_2} + \frac{1}{S_1} = \frac{1}{f}$$

$$S_1 \rightarrow \infty \implies S_2 = f$$



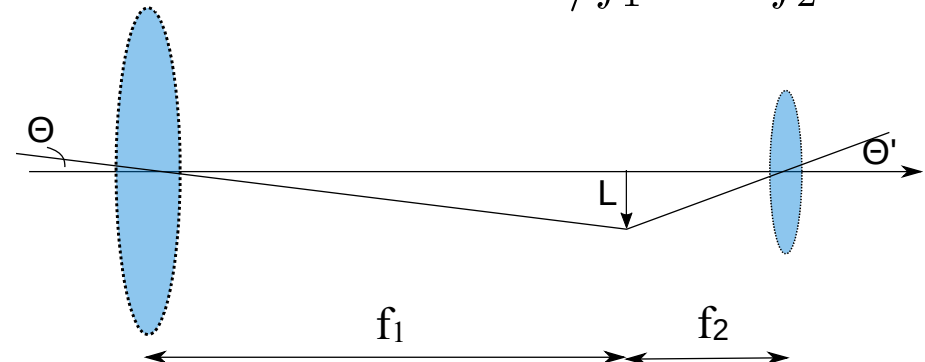
Kepleri pikksilm:
kujutis on pööratud



Galilei pikksilm:
kujutis õigetpidi, aga
väike vaateväli

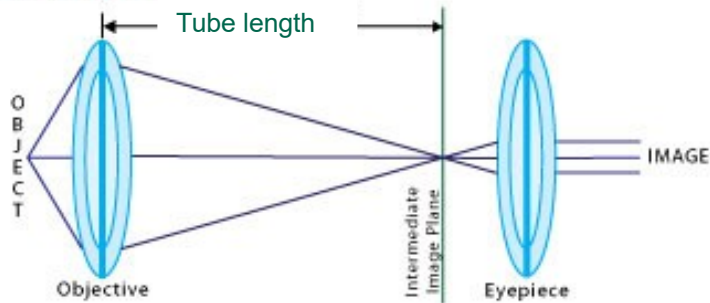
Nurksuurendus:

$$M_a = -\frac{\Theta'}{\Theta} = -\frac{L/f_2}{L/f_1} = -\frac{f_1}{f_2}$$

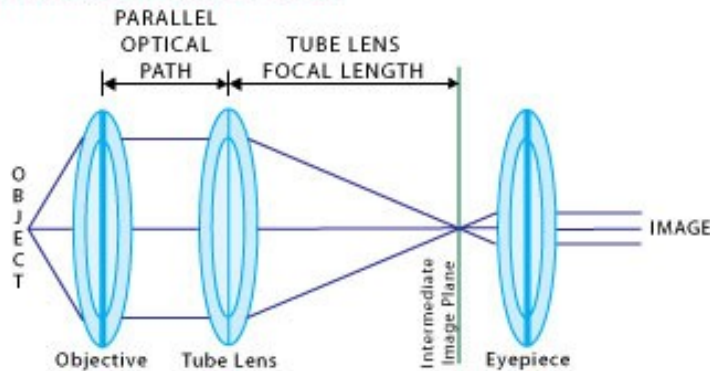


Mikroskoop

FINITE OPTICAL SYSTEM



INFINITY OPTICAL SYSTEM



Esialgsetes mikroskoopides asetses objekt objektiivi fookusest veidi eespool, okulaariga vaadati tekkivat kujutist samuti nagu luubiga.

Tänapäeval on levinud nn. lõpmatuskorrigeeritud skeem, kus objekt asetseb objektiivi fokaaltasandis ja iga punkt tekitab paralleelse kiirtekimbu objektiivi väljundis.

Suurendatud kujutis (nt. kaamera sensoril või edasiseks vaatamiseks okulaariga) tekitatakse täiendava nn tuubuslääts abil.

See võimaldab paralleelse osa pikkust muuta ja paigaldada sinna lisaelemente.

Sel juhul suurendus vahekujutistasandil:

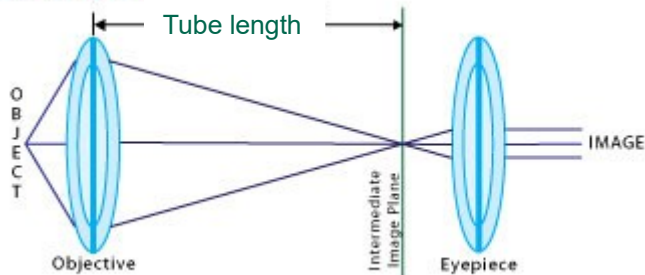
Tootjad	f_{tuubus} , mm
Zeiss	160
Olympus	180
Leica, Nikon	200

$$M = \frac{f_{\text{tuubus}}}{f_{\text{objektiiv}}}$$

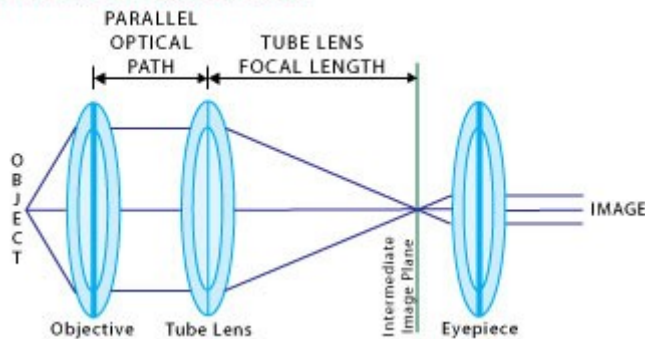
Tavaliselt 1..100x

Mikroskoop

FINITE OPTICAL SYSTEM



INFINITY OPTICAL SYSTEM



Objective Working and Parfocal Distance



Tootjad	f_{tuubus} , mm
Zeiss	160
Olympus	180
Leica, Nikon	200

$$M = \frac{f_{\text{tuubus}}}{f_{\text{objektiiv}}}$$

Tavaliselt 1..100x

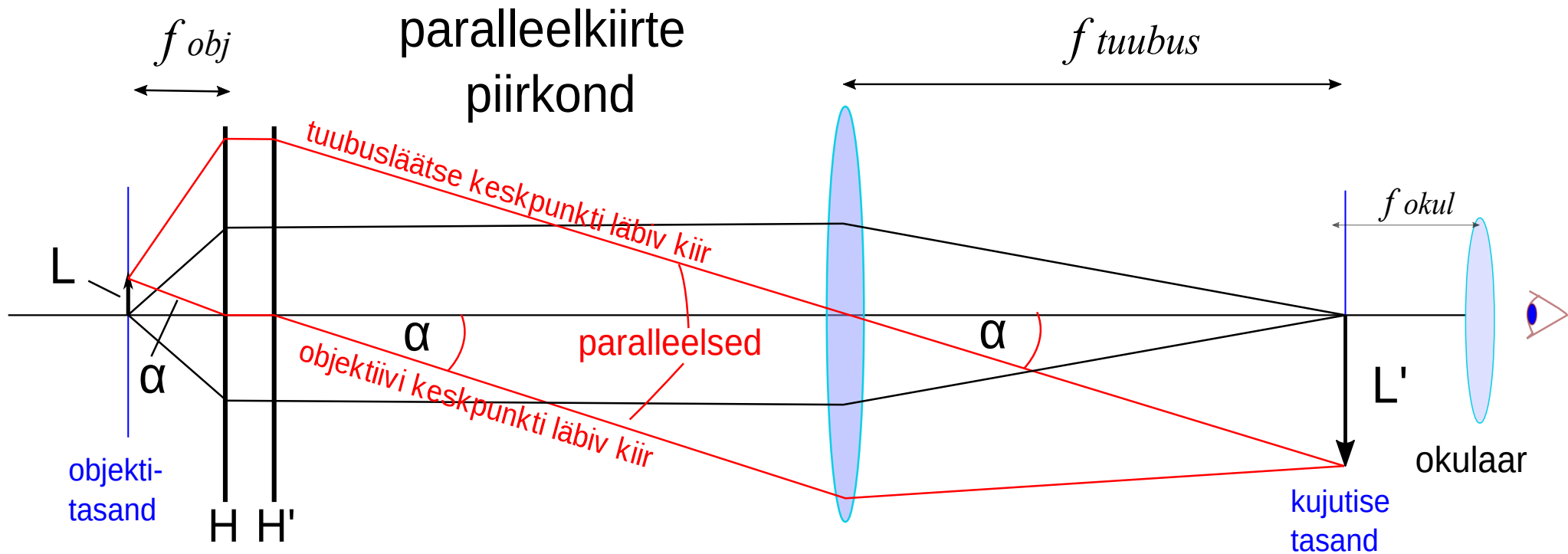
Objektiivi
fookuskaugus $\neq$
töökaugus!

Mikroskoobi aseskeem (lõpmatuskorrigeeritud)

Joonsuurendus:

$$M \underset{\text{def}}{=} -\frac{L'}{L} = -\frac{f_{\text{tuubus}}}{f_{\text{obj}}}$$

Kas näete, miks?



objektiiv

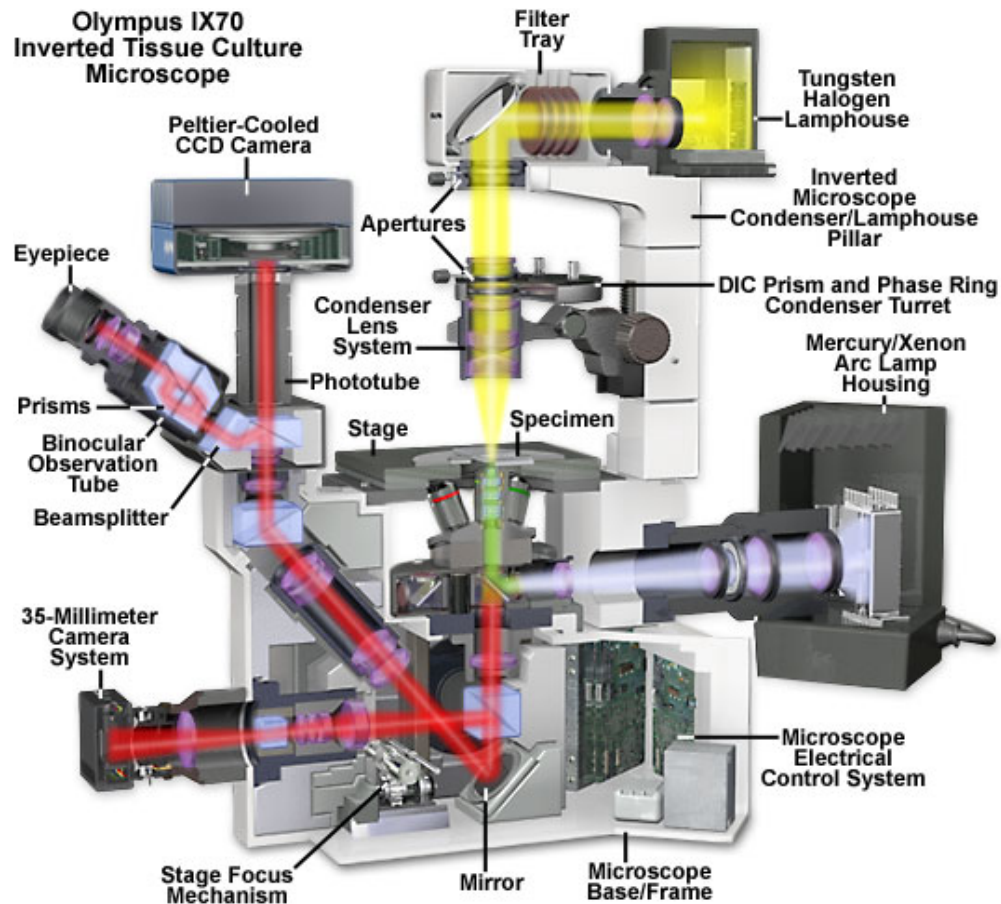
tuubuslääts

okulaar

Seda piirkonda võib (mõistlikkuse piires) vabalt pikendada / lühendada, nt. objektiivi fokuseerimiseks, filtrite vm. komponentide lisamiseks

Siia võib kaamera panna

Inverteeritud ja püstised mikroskoobid



Reflected/Transmitted Light Microscope Configuration

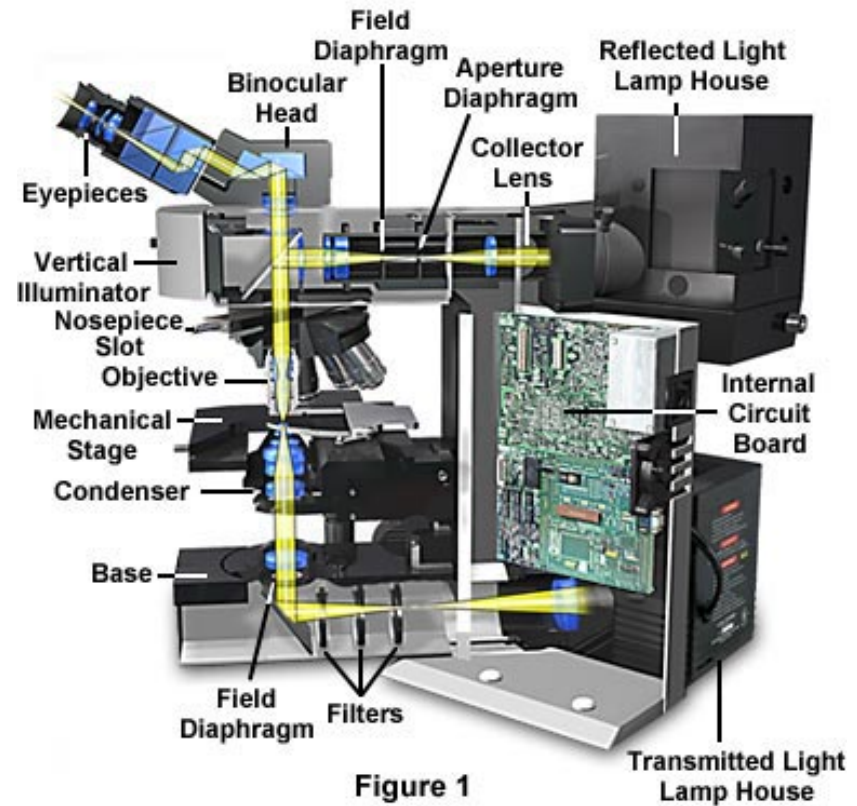
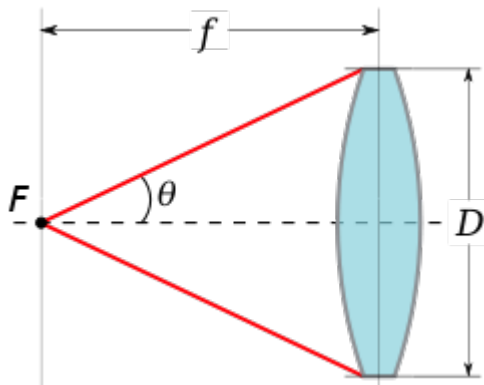
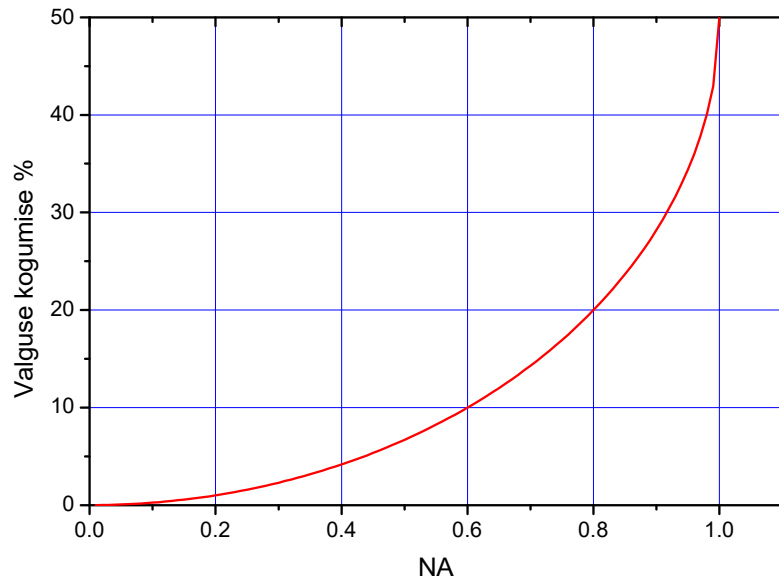


Figure 1

Objektiivi valgusjõud



Kui eeldada, et objektiivi fookuses olev punkt kiirgab võrdselt igas suunas, siis kui suure osa saame kätte (õhus oleva objektiivi korral, s.o. $n = 1$)?



Kui palju objektilt peegelduvast või kiirgavast valgusest me suudame oma süsteemi püüda?

Apertuuriarv (numerical aperture):

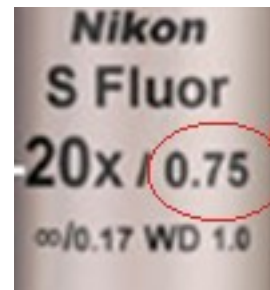
$$NA = n \sin \theta \approx \frac{nD}{2f}$$

kus n on läätse ümbritseva keskkonna murdumisnäitaja.

Vahel kasutatakse f-arvu (f-number):

$$f/\# = \frac{f}{D}$$

(vt. nt. fotoaparaadi objektiivi ava)



NA



f-arvud

Mikroskoobi lahutusvõime

Millise vahekaugusega punkte on põhimõtteliselt võimalik mikroskoobiga eristada?

Punktvalgusallika kujutiseks läbi mikroskoobi ei ole tegelikult punkt, vaid nn Airy ketas. Põhjuseks on difraktsioon (põhiliselt) objektiivi sisendaval. Avaga me piirame teatud hulga punktiist lähtuvate lainete osalemist kujutise moodustamisel ja moonutame lainefronte servadel.

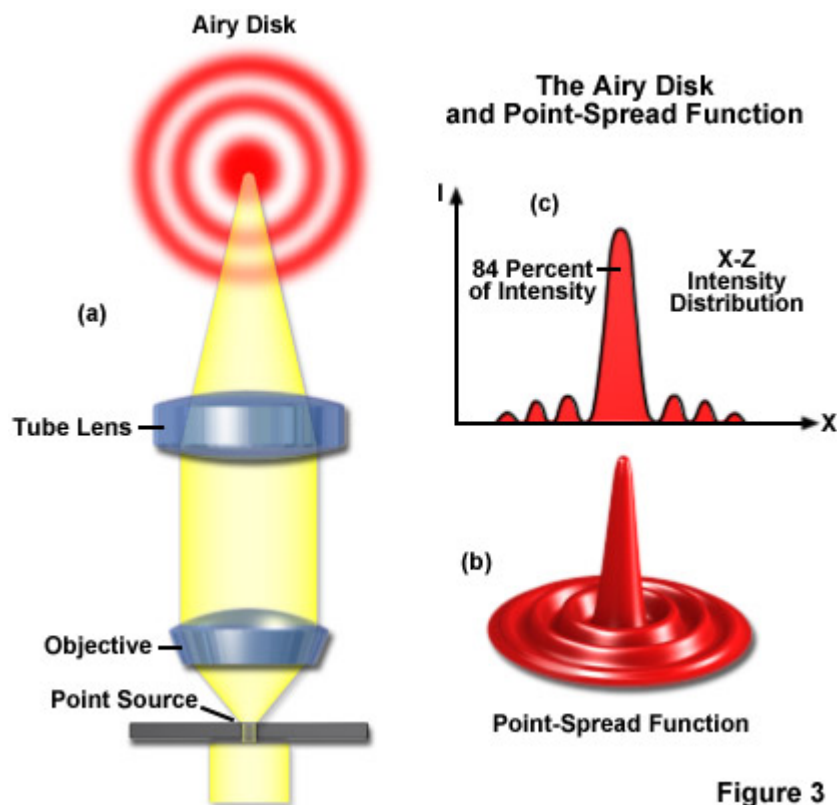


Figure 3

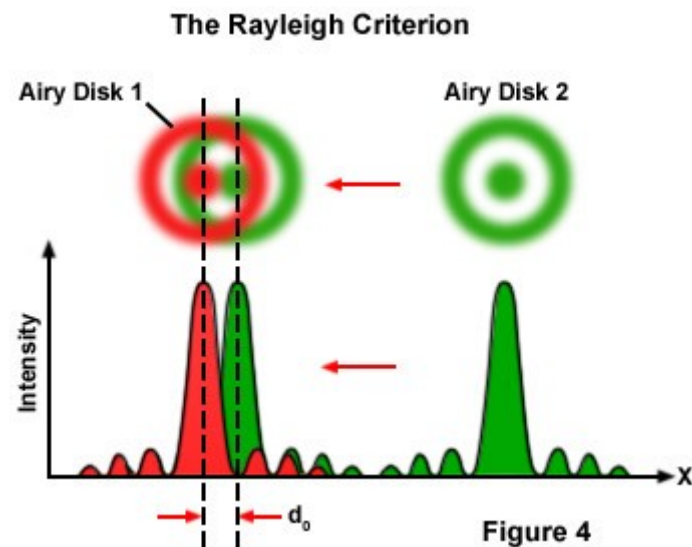


Figure 4

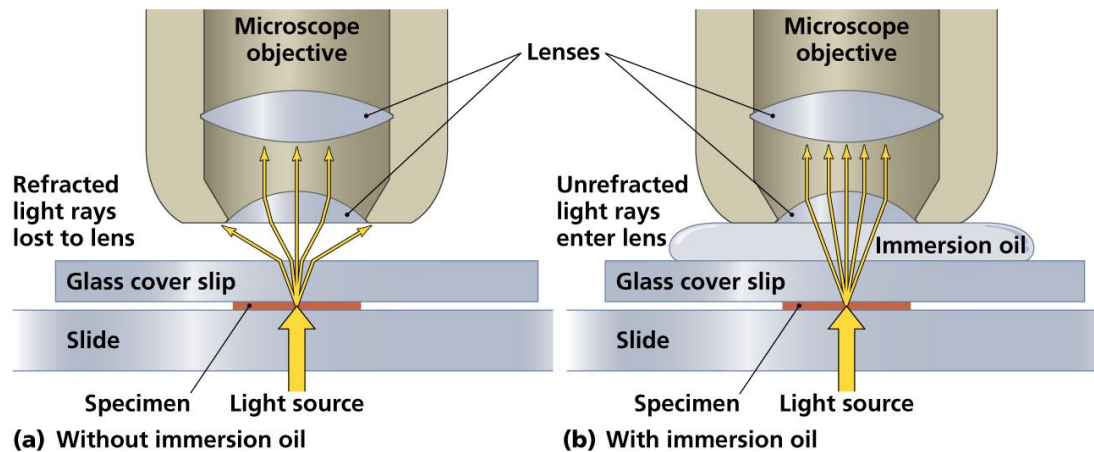
Raileigh' kriteerium: Loeme kaks kõrvutiasuvat punkti eristatuks, kui ühe punkti kujutise maksimum langeb kokku teise miinimumiga. Siis minimaalne vahekaugus objektitasandil:

$$\Delta d = \frac{0.61\lambda}{NA}$$

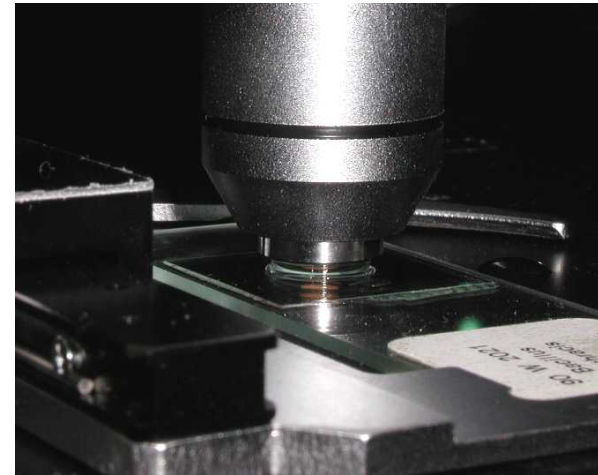
(nn. difraktsioonipiir)

kus λ on kasutatav lainepikkus, NA on objektiivi apertuurarv.

Immersioonobjektiivid



Copyright © 2006 Pearson Education, Inc., publishing as Benjamin Cummings.



Väikese töökaugusega objektiivi korral saab nii lahutusvõimet kui valgusjõudu parandada, pannes objektiivi ja objekti vahele kihi suure murdumisnäitajaga vedelikku – õli ($n = 1.5$) või vett ($n = 1.33$).

$NA = n \sin \theta$: n suurendamisega võimalik tõsta kuni ca 1.4

$$\Delta d = \frac{0.61\lambda}{NA}$$

Võttes $\lambda = 400 \text{ nm}$, $NA = 1.4$, saame parima ristsuunalise lahutusvõime hinnanguks $\Delta d = \mathbf{170 \text{ nm}}$

Tavaliselt on mikroskoobi lahutusvõime 1 mikromeetri suurusjärgus, s.o. õigustab oma nimetust.

Aberratsioonid

- **Sfääriline aberratsioon:**

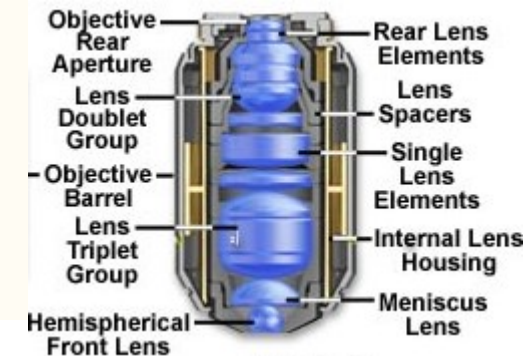
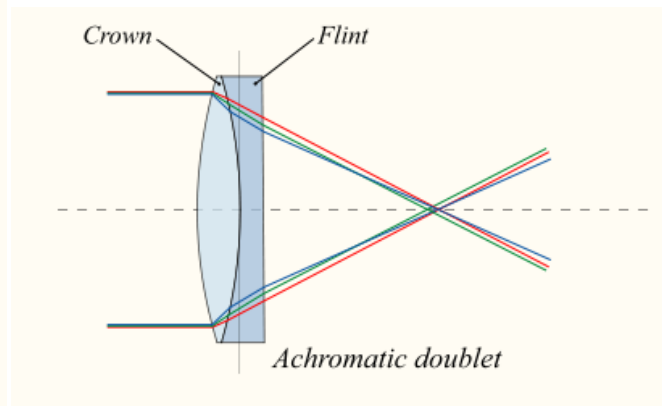
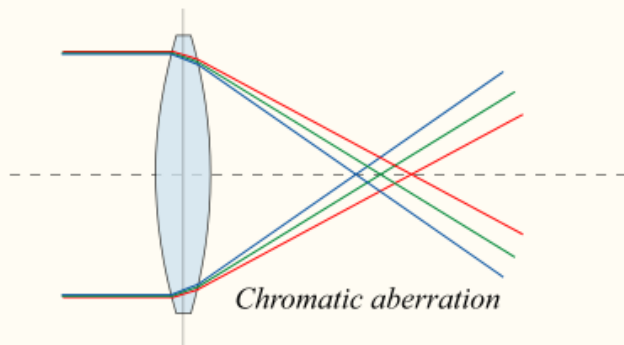
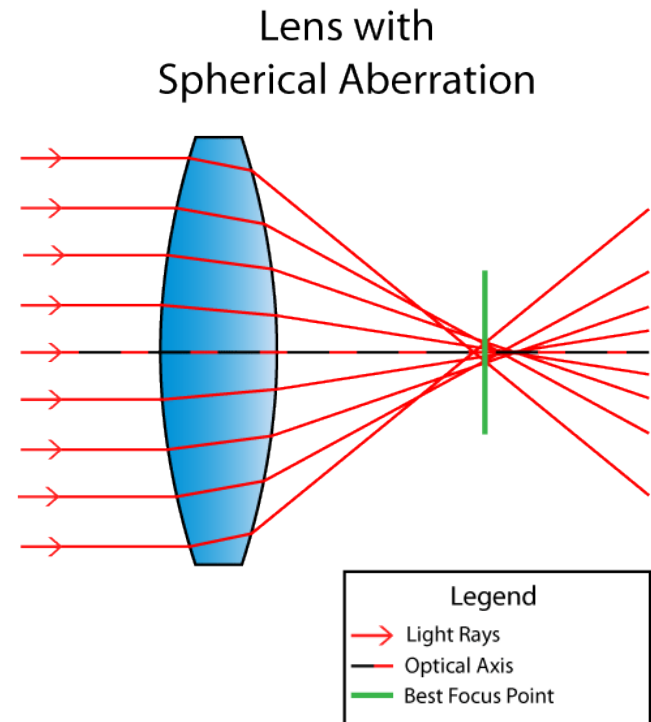
- Paraksiaalsest lähendusest tulenevad ebatäpsused
- „Õhuke“ lääts on tegelikult sfääriline (lõpliku paksusega)

Fookuspunkt hakkab sõltuma kiire sisenemispunkti kaugusest optilisest teljest.

See hägustab kujutist ja halvendab seega samuti lahutusvõimet, kusjuures vastupidiselt difraktsioonilisele komponendile ava suurendamine (vst. f-arvu vähendamine) halvendab olukorda.

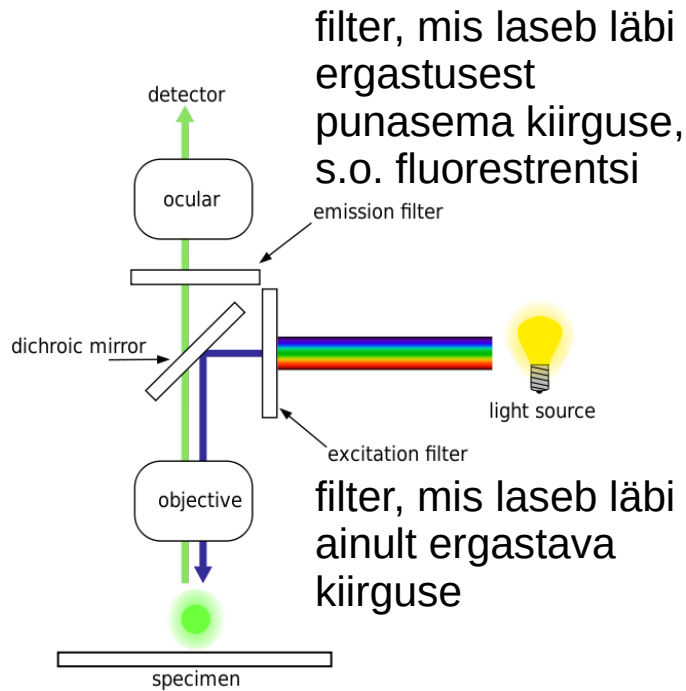
- **Kromaatiline aberratsioon:**

- Murdumisnäitaja sõltub lainepikkusest (dispersioon) → fookused eri värvidel eri kohtades



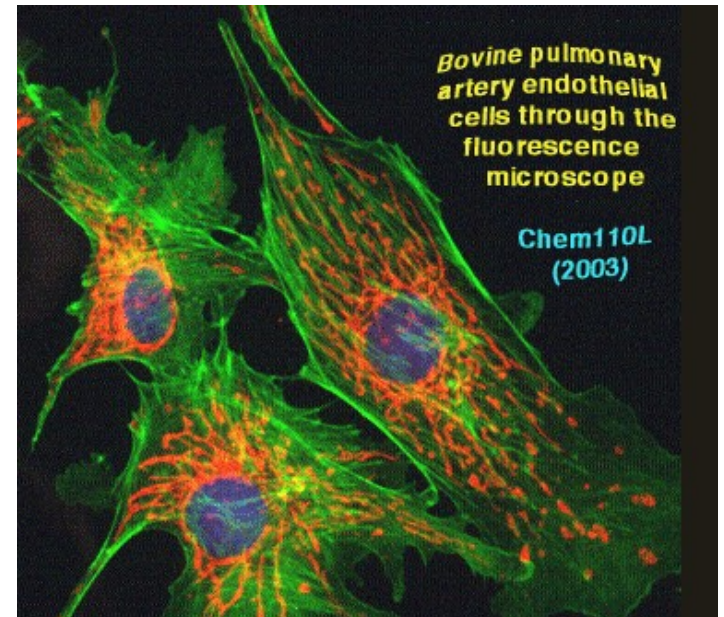
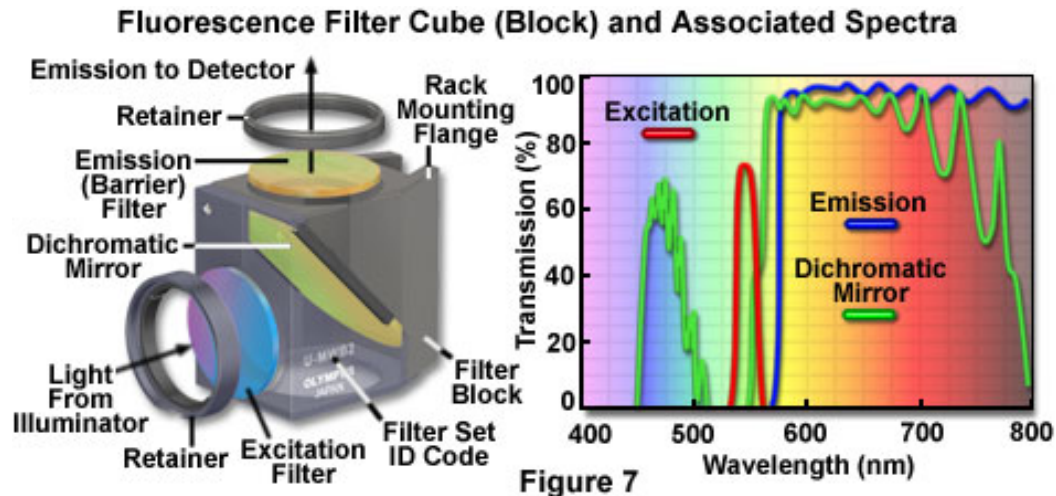
Aberratsioone saab teatud piirides parandada eri murdumisnäitajatega klaasidest dublettidenä (või ka triplettidenä) valmistatud läätsede abil.

Fluorestsentsmikroskoopia



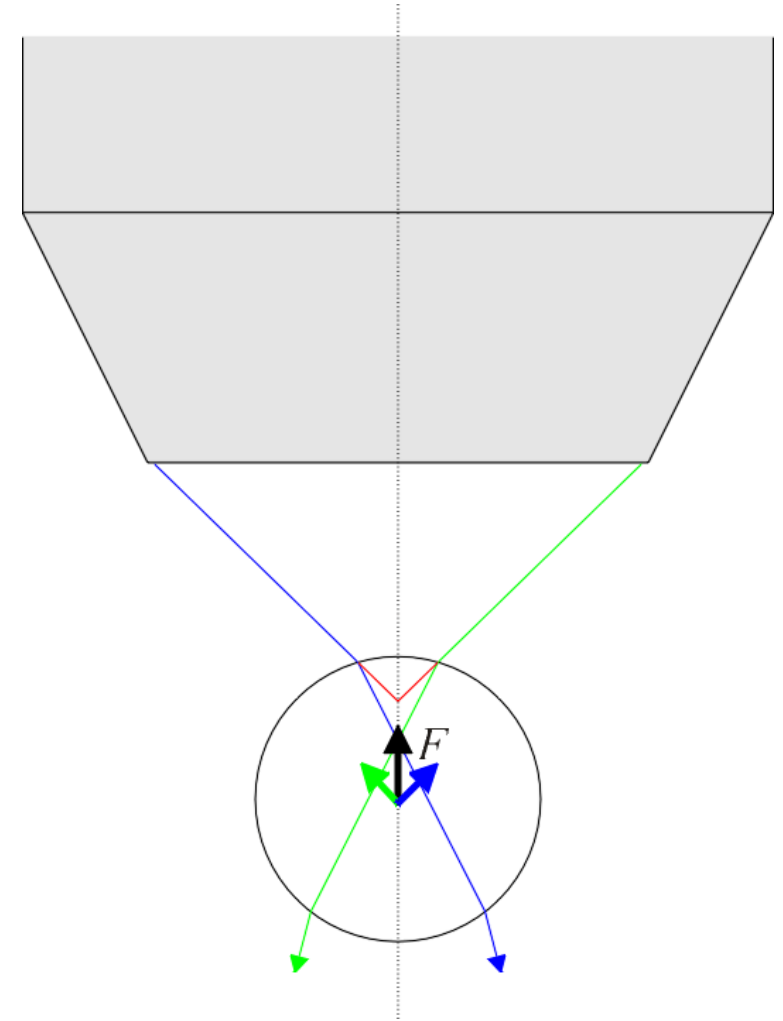
Vaadeldakse objektil tekkivat sekundaarset kiirgust e. fluorestsentsi. Esialgne, ergastav kiirgus osaliselt neelatakse objekti poolt ja kiiratakse pikemalainelist (punasemat) kiirgust. Filtritega tagatakse, et registreerimisseadmesse (silma, kaamerasse) satuks ainult fluorestsents. Kui objekt ise naturaalselt ei kiirga, võib lisada värvaineid, mis haakuvad spetsiifiliselt teatud objektide või nende osadega.

Dikroiline peegel – läbilaske- ja peegeldustegurid sõltuvad lainepikkusest. Antud juhul peegeldab põhiliselt ergastavat valgust ja laseb läbi fluorestsentsi.



Optiline lõksustamine

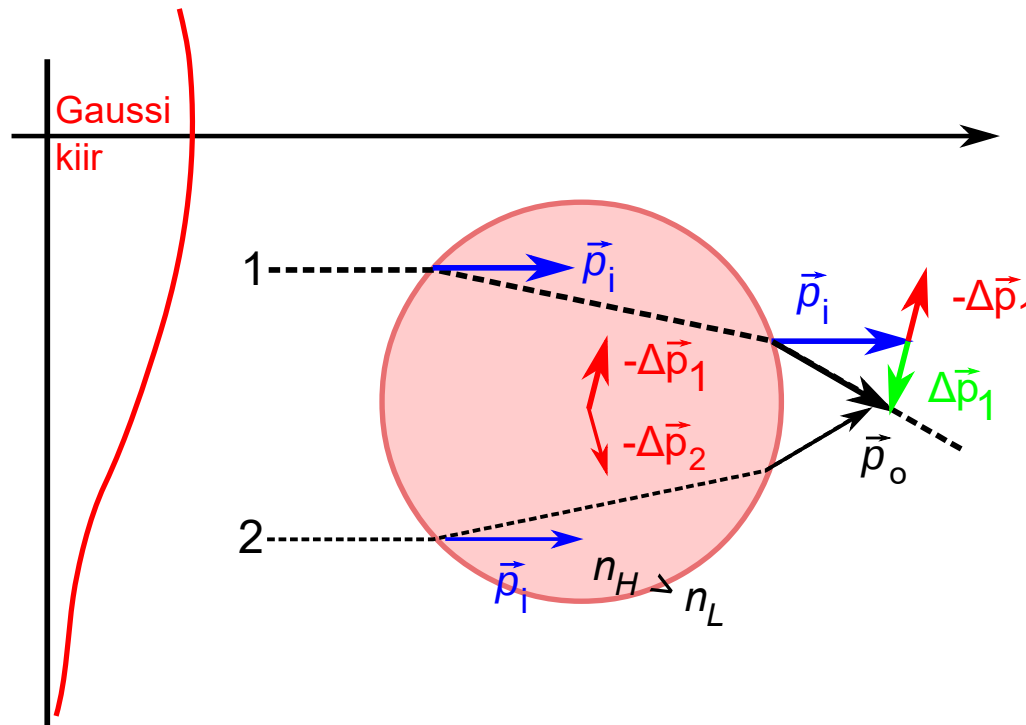
- Valgust võib vaadelda footonite voona, millest igaühel on valguskiire suunaline impulss h/λ .
- Kui see impulss muudab keskkonda läbides suunda, antakse teatav impulss üle ka keskkonnale.
- Kui läbi objektiivi fokuseerida intensiivset laserivalgust, tekib fookuse ümbruses olukord, kus üldisest keskkonnast erineva murdumisnäitajaga osakestele valguse läbimise tõttu mõjuv jõud suunab neid alati fookuse suunas. See lõksustab osakese fookuse lähedusse. Nii tekib võimalus valgusega osakesi kinni hoida ja ümber paigutada.



Osake ei tohiks lõksustavat valgust eriti neelata, kuna see võiks põhjustada tema tõenäoliselt liigset kuumenemist (valgusintensiivsus on suur) ja vähendaks ka vajalikku murduva valguse osa.

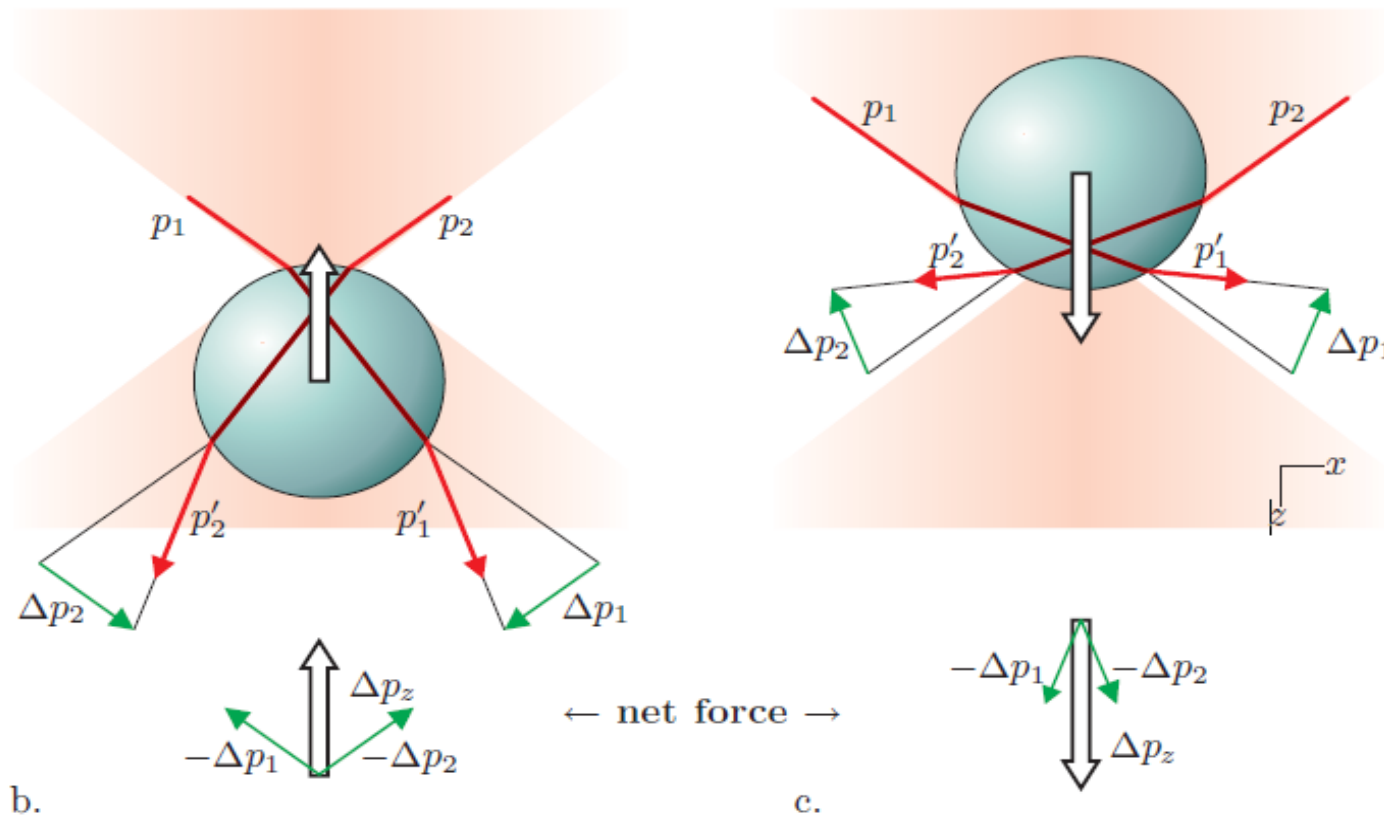
Kaks järgnevat slaidi üritavad selgitada, kuidas tekivad lõksustamise rist- ja pikisuunaline komponent. Uurige huvi korral, eksamil seda ei küsita.

Ristsuunaline jõud optilisel lõksustamisel:



Kuna kiir 1 pärineb suurema intensiivsusega osast kui kiir 2, siis keskkonnale üle antud impulss $-\Delta\vec{p}_1$ on suurem ja lükkab kera kiire keskosa suunas. Sinna jõudes kiired 1 ja 2 võrdsustuvad.

Pikisuunaline jõud



Kui kera on fookusest allpool, siis lükkab keskkonnale üleantav jõud teda ülespoole, kui ülalpool, siis allapoole. Stabiilne olukord saabub, kui kera on fookuses (tegelikult veidi allpool, kuna oma impulsi annavad ka pinnalt peegelduvad footonid).