

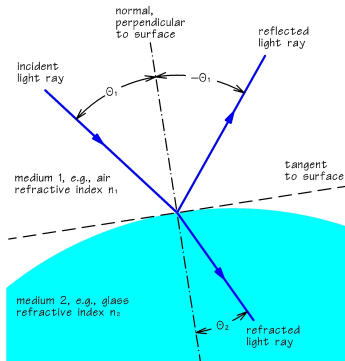
3. Optiikka

Lauri Jetsu
Fysiikan laitos
Helsingin yliopisto

Geometrinen optiikka

Geometrinen optiikka (kuva: @www.goldastro.com)

- ▶ Ei huomioi, että valo on aaltoliikettä $\Rightarrow$ Ei selitä diffraktiota ja interferenssiä
- ▶ Oletus: kaikki havaintolaitteen mitat $\gg \lambda$
- ▶ Oletus: valo koostuu hiukkasista
- ▶ Hiukkaset etenevät säteinä
- ▶ Homogeeninen väliaine $\Rightarrow$ Säteet suoria
- ▶ Väliaineiden pinnalla $\Rightarrow$ Suunnan muutos
- ▶ **Väliaineen taitekerroin** $n \geq 1 \Rightarrow v = c/n$,
 c = nopeus tyhjiössä, jolle $n = n_0 = 1$
- ▶ $\lambda_1 > \lambda_2 \Rightarrow n(\lambda_1) < n(\lambda_2) \Rightarrow$ dispersio
- ▶ Pierre de Fermat (Ranska, 1601-1665):
"Valo noudattaa aina reittiä, jota pitkin matkaan kuluva aika on lyhin mahdollinen." $\Rightarrow$
- ▶ **Heijastuslaki:** Tulokulma = Heijastuskulma = Θ_1 , **Snellin laki:** $n_1 \sin \Theta_1 = n_2 \sin \Theta_2$
- ▶ $n_1 > n_2 \Rightarrow$ Kokonaisheijastuksen ($\Theta_2 = 90^\circ$) rajakulma $\Theta_1 = \Theta_r = \arcsin(n_2/n_1)$
- ▶ $\Theta_1 > \Theta_r \Rightarrow$ Täydellinen heijastus $\Rightarrow$ Pätee heijastuslaki (mm. optiset kuidut)



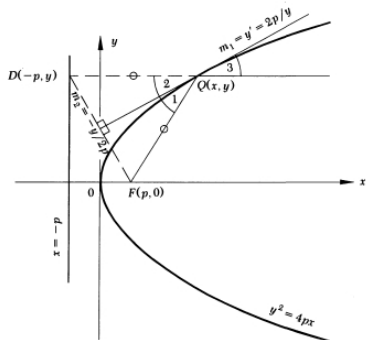
Geometrinen optiikka

Peilit (kuva: @http://www.maa.org)

- ▶ **Paraboloidi:** www $z/c = x^2/a^2 + y^2/b^2$
- ▶ Paraboloidinen peili:
 $a = b \Rightarrow z = Ax^2$, missä $A = \text{vakio}$
- ▶ Paraabelin määritelmä: Etäisyys johtosuorasta ja polttopisteestä sama
- ▶ Kuvassa polttopiste $F = (x = p, y = 0)$
- ▶ Esimerkki 3.1: "Kaikki optisen akselin suuntaiset säteet päätyvät polttopisteeseen."
- ▶ Kuvan geometrinen ratkaisu
 $x = -p = \text{johtosuora}$
 $x = y^2/(4p) = \text{paraabeli}$
 $|QD|^2 = (x + p)^2 = x^2 + 2xp + p^2$
 $|QF|^2 = (x - p)^2 + y^2 = x^2 + 2px + p^2$
 $y^2 = 4px \Rightarrow 2yy' = 4p \Rightarrow y' = 2p/y = m_1$
 $|DF| \Rightarrow m_2 = -y/(2p) \Rightarrow m_1 \times m_2 = -1$
 Tasakylkinen! $\Rightarrow$ Kolme kulmaa samat
 joka optisen akselin suuntaiselle säteelle

Proof without Words:

The reflection property of the parabola



$$QF = QD \quad \& \quad m_1 \cdot m_2 = -1 \quad \Rightarrow \quad \angle 1 = \angle 2 = \angle 3$$

Geometrinen optiikka

Linssit (kuvat: @ursa:havaitseva tähtitiede, @en.wikipedia.org)

- ▶ Valo taittuu kahdesti: ilma – lasi – ilma

- ▶ **Kupera linssi**

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$$

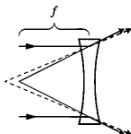
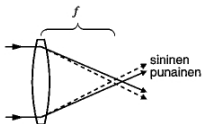
a = kohteen etäisyys linssistä

b = kuvan etäisyys linssistä

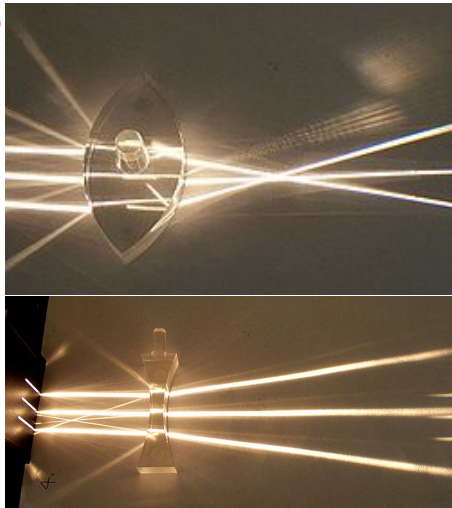
f = linssin polttoväli

- ▶ Tähtitieteessä $a \rightarrow \infty \Rightarrow b = f$

- ▶ Väriaberraatio



- ▶ **Kovera linssi:** ei kuvaa



Aalto-optiikka

Aalto-optiikka (kuvat: @Alonso/Finn, @en.wikipedia.org)

- ▶ Valon esteiden koko lähellä $\lambda \Rightarrow$
Geometrinen optiikka ei päde $\Rightarrow$
Aalto-optiikka
- ▶ Sähkömagneettinen säteily:
 $\mathbf{E}$ = Sähkökenttä
 $\mathbf{B}$ = Magneettikenttä
- ▶ $\mathbf{E} \perp \mathbf{B}$ ja värähtelevät toisiaan
vastaan kotisuorissa tasoissa
- ▶ Paikassa $\mathbf{r}$ sähkökenttä on
 $\mathbf{E} = E_0 \exp[i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)]$
 $\mathbf{k}$ = etenemissuuntaan osoittava
yksikkövektori
 $\omega = 2\pi f$ värähtelyn kulmanopeus
 f = frekvenssi
- ▶ Kaksi kuvaa liikkuvan aallon
 $\mathbf{E}$ ja $\mathbf{B}$ värähtelystä www

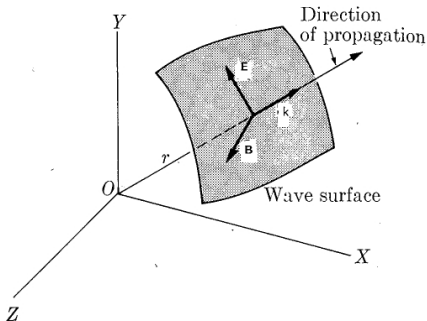


Fig. 11-4. Spherical electromagnetic wave at a large distance from the source.

Aalto-optiikka

Aalto-optiikka

(kuvat: @Ursa: Havaitseva tähtitiede)

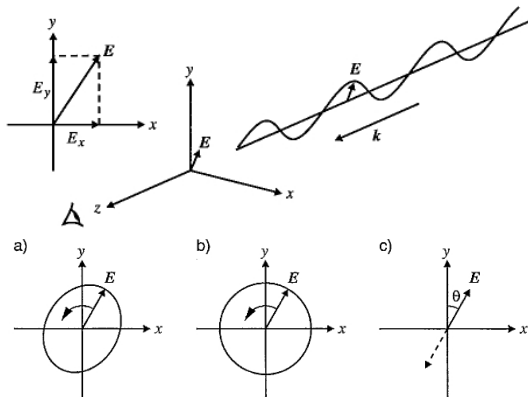
(video: @lauri.jetsu.helsinki.fi)

- Yksinkertaistus: säteily kohti havaitsijaa pitkin z -akselia
- $\mathbf{k} \parallel z \Rightarrow \mathbf{E} \perp z \Rightarrow E_z = 0$
- Sähkökentällä seuraavat komponentit xy -tasossa:

$$E_x = E_1 \cos(\omega t)$$

$$E_y = E_2 \cos(\omega t + \delta)$$
- a) Elliptinen polarisaatio
- b) Ympyrä polarisaatio
- c) Lineaarinen polarisaatio
- Graafinen video esitys vaihtoehdoista a, b ja c

www



Stokesin parametrit

Stokesin parametrit (kuva: @Ursa: Havaitseva tähtitiede)

- ▶ I = valon kokonaisintensiiteetti
 $I(1 - P_E)$ = polarisoitumaton valon komponentti
 IP_E = täysin elliptisesti polarisoitunut komponentti
 $0 \leq P_E \leq 1$ = polarisaatioaste
- ▶ E kiertää taivaalla ellipsiä: a = iso- ja b = pikkuakseli
 θ = positiokulma = isoakselin ja pohjoisen välinen kulma

- ▶ Polarisoitunutta valoa kuvataan **Stokesin parametreillä**:

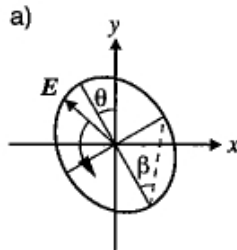
I = intensiteetti

$$Q = IP_E \cos 2\beta \cos 2\theta = IP \cos 2\theta$$

$$U = IP_E \cos 2\beta \sin 2\theta = IP \sin 2\theta$$

$$V = IP_E \sin 2\beta = IP_V$$

- ▶ $P = P_E \cos 2\beta$ = **lineaarinen polarisaatioaste**, $P_V = P_E \sin 2\beta$ = **ympyräpolarisaatioaste** $\Rightarrow$ Kuvassa $\beta \rightarrow 0 \rightarrow$ viiva, $\beta \rightarrow 45 \rightarrow$ ympyrä
- ▶ $P_V > 0$ = oikeakätinen ja $P_V < 0$ = vasenkätinen ympyräpolarisaatio
- ▶ $\beta = 45 \Rightarrow$ Täysin ympyräpolarisoitunut: $P = 0$, $Q = U = 0$ (Video: 3 ja 4 tapaus)
- ▶ $\beta = 0 \Rightarrow$ Täysin lineaarisesti polarisoitunut: $P_V = 0$, $V = 0$ (Video: 5 tapaus)



Stokesin parametrit

Stokesin parametrit (kuva: @Ursa: Havaitseva tähtitiede)

- ▶ Stokesin parametrit kuvaavat osittain polarisoituneen kohteen säteilyä

- ▶ Stokesin parametrien määritelmä $\Rightarrow$

$$IP_E = (Q^2 + U^2 + V^2)^{1/2}$$

$$P = P_E \cos 2\beta = [(Q^2 + U^2)^{1/2}]/I = \text{lineaarinen polarisaatioaste}$$

$$\theta = [\arctan(U/Q)]/2 = \text{positiokulma}$$

$$P_V = V/I = \text{ympyräpolarisaatioaste}$$

- ▶ Täysin lineaarisesti polarisoituneelle kohteelle käytetään

$$P_x = Q/I = P \cos 2\theta$$

$$P_y = U/I = P \sin 2\theta$$

- ▶ **Stokesin vektori** on $\mathbf{S} = [I, Q, U, V]$

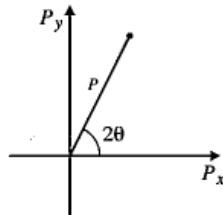
- ▶ Kahden kohteen S_1 ja S_2 voidaan summata (kaksoistähti)

- ▶ Stokesin vektorit eivät huomioi säteilyn vaihetta

- ▶ Säteilyn vaiheet satunnaisia $\Rightarrow$ Stokesin formalismi toimii

- ▶ Säteilyn vaiheet koherentteja $\Rightarrow$ Stokesin formalismi ei toimi

- ▶ Optisen elementin aiheuttama $\mathbf{S}$ muutos (Mullerin matriisit yms.)



- ▶ Aalto-optiikka $\Rightarrow$ Intensiteetin I jakautuminen väliaineen pinnalla

n_1 ja n_2 = Väliaineiden taitekertoimet

$\mathbf{E} = [E_{\parallel}, E_{\perp}]$ = saapuvan säteilyn sähkökenttä

$E_{\parallel}$ = sen pinnan suuntainen komponentti

$E_{\perp}$ = sen pintaa vastaan kohtisuora komponentti

$\mathbf{E}' = [E'_{\parallel}, E'_{\perp}] =$ heijastuvan säteilyn sähkökenttä

$E'_{||}$ = sen pinnan suuntainen komponentti

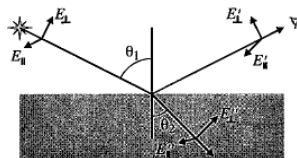
$E'_\perp$ = sen pintaa vastaan kohtisuora komponentti

$$\mathbf{E}'' = [E''_{\parallel}, E''_{\perp}] = \text{taivutuvan säteilyn sähkökenttä}$$

$E''_{||}$ = sen pinnan suuntainen komponentti

$E''_{\parallel}$ = sen pintaa vastaan kohtisuora komponentti

► Saapuvan säteilyn E tunnettu $\Rightarrow$ Ratkaisu E' ja E'' arvoille Fresnelin kertoimilla



Fresnelin kaavat

Fresnelin kaavat (kuva: @Ursa: Havaitseva tähtitiede)

- Fresnelin heijastuskertoimet (Reflection: $R_{\parallel}$ ja $R_{\perp}$)

$$E'_{\parallel} = E_{\parallel} R_{\parallel}, \text{ missä } R_{\parallel} = \frac{n_2 \cos \theta_1 - n_1 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_2 + n_2 \cos \theta_1} \text{ ja } E'_{\perp} = E_{\perp} R_{\perp}, \text{ missä}$$

$$R_{\perp} = \frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2}$$

- Fresnelin transmissiokertoimet (Transmission: $T_{\parallel}$ ja $T_{\perp}$)

$$E''_{\parallel} = E_{\parallel} T_{\parallel}, \text{ missä } T_{\parallel} = \frac{2n_1 \cos \theta_1}{n_1 \cos \theta_2 + n_2 \cos \theta_1} \text{ ja } E''_{\perp} = E_{\perp} T_{\perp}, \text{ missä}$$

$$T_{\perp} = \frac{2n_1 \cos \theta_1}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2}$$

- Intensiteetit:

$$I = (E_{\parallel})^2 + (E_{\perp})^2 \text{ saapuu, } I' = (E'_{\parallel})^2 + (E'_{\perp})^2 \text{ heijastuu, } I'' = (E''_{\parallel})^2 + (E''_{\perp})^2 \text{ taittuu}$$

- Tapauksessa $E_{\parallel} = E_{\perp} \equiv$ saapuva säteily polarisoitumatonta $\Rightarrow I = 2(E_{\parallel})^2$ ja
 $I' = (E'_{\parallel})^2 + (E'_{\perp})^2 = (E_{\parallel} R_{\parallel})^2 + (E_{\perp} R_{\perp})^2 = (E_{\parallel})^2 (R_{\parallel}^2 + R_{\perp}^2) \Rightarrow I'/I = (R_{\parallel}^2 + R_{\perp}^2)/2$

- Snellin lain: $\sin \theta_1 = n \sin \theta_2$, missä $n = n_2/n_1$, avulla voidaan kaikissa tapauksissa eliminoida taittumissuunnan, termin $\cos(\theta_2)$, vaikutus $\Rightarrow$

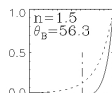
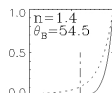
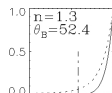
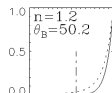
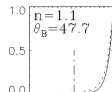
$$\cos \theta_2 = [1 - (\sin \theta_2)^2]^{1/2} = [1 - (\sin \theta_1/n)^2]^{1/2} = (1/n)[n^2 - (\sin \theta_1)^2]^{1/2}$$

- Kaikki riippuu vain tulokulmasta θ_1

Fresnelin kaavat

Fresnelin kaavat (kuva: @lauri.jetsu)

- Brewsterin kulma (θ_B): heijastunut säteily täysin polarisoitunut eli $R_{\parallel} = 0$
 $R_{\parallel}$:n osoittaja on nolla $\Rightarrow n_2 \cos \theta_1 = n_1 \cos \theta_2 \Leftrightarrow \cos^2 \theta_2 = (\frac{n_2}{n_1})^2 \cos^2 \theta_1$
 Snellin lain toteuduttava $\Rightarrow n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \Leftrightarrow \sin^2 \theta_2 = (\frac{n_1}{n_2})^2 \sin^2 \theta_1$
- $\sin^2 \theta_2 + \cos^2 \theta_2 = 1 = \sin^2 \theta_1 + \cos^2 \theta_1 = (\frac{n_1}{n_2})^2 \sin^2 \theta_1 + (\frac{n_2}{n_1})^2 \cos^2 \theta_1$
 $\Leftrightarrow \sin^2 \theta_1 [\frac{n_2^2 - n_1^2}{n_2^2}] = \cos^2 \theta_1 [\frac{n_2^2 - n_1^2}{n_1^2}] \Leftrightarrow \tan^2 \theta_1 = (\frac{n_2}{n_1})^2 \Leftrightarrow \theta_B = \theta_1 = \arctan n$
- Oppikirja: "Heijastunut säteily on aina polarisoitunutta"
 Edellinen sivu: Jos $E_{\parallel} = E_{\perp} \Rightarrow$
 Heijastuneen säteilyn intensiteetti on $I' = I(R_{\parallel}^2 + R_{\perp}^2)/2$
- Kuva: $R_{\perp}^2$ (katkoviiva) suurempi kuin $R_{\parallel}^2$ (jatkuva viiva) kaikilla θ_1 .
 Brewsterin kulma θ_B on merkitty pystysuoralla katkoviivalla
- Kuva: $\theta_1 \rightarrow 90^\circ$ kaikki säteily heijastuu $\Rightarrow$ taittuva säteily $I' = 0$
- Vastaavanlaisia $\Rightarrow$ tapauksia laskettavissa www



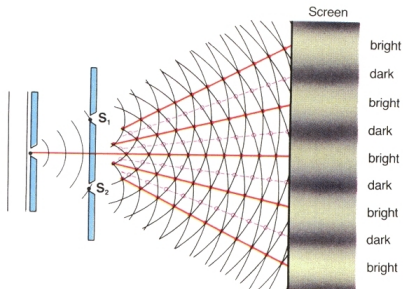
Interferenssi

Interferenssi

(kuvat: @www.stmary.ws, @www.scienceclarified.com)

(animaatio: @physicsforus.files.wordpress.com)

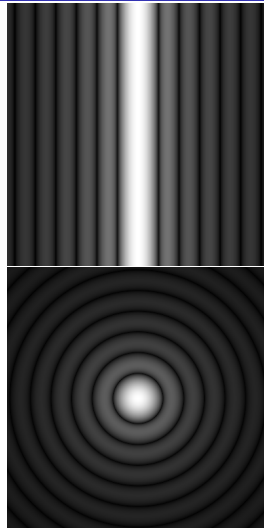
- ▶ Sähkövektori $\mathbf{E}$ kuvaa valoa
- ▶ Kahden valosäteen vuorovaikutus
 $\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2$
- ▶ Vaihe-ero muuttuu hitaasti
⇒ Interferenssi havaittavissa
- ▶ Useita atomeja ⇒ Vaiheet satunnaisia
⇒ Ei havaittavissa
- ▶ Saman kohteen valo jaetaan osiin
⇒ Annetaan vuorovaikuttaa
⇒ Vaihe-ero vakio
⇒ Interferenssi havaitaan
- ▶ Interferenssi [Animaatio](http://www) www
- ▶ Interferometria: kurssin lopussa



Diffraktio

Diffraktio (kuva: <http://mtfmapper.blogspot.com>)

- ▶ Valo kaukoputken kautta detektoriin
⇒ Ääretön määrä reittejä
- ▶ Valosäteillä eri vaiheet
⇒ Vahvistavat tai heikentävät toisiaan
- ▶ Lopputulos missä tahansa detektorin pisteessä =
Eri reittejä saapuneen säteilyn amplitudien summa
- ▶ Yleinen tapaus: **Fresnelin diffraktio**
 - Ratkaisut monimutkaisia ja työläitä
- ▶ Erikoistapaus: **Fraunhoferin diffraktio**
 - Kohde kaukana ⇒ Eri reittien pituudet lähes samat
 - Ratkaisut edelleen työläitä **Fourier muunnoksia** www
 - Lisäksi tarvitaan **numeerisia** ratkaisuja
- ▶ Kuvat: Kapean raon ja pyöreän aukon diffraktio



Diffraktio

Pyöreän aukon diffraktio (kuva: @www.ntmdt.com)

- ▶ Intensiteetti

$$I(\theta) \propto [(\pi^2 R^4)/m][J_1(2m)]^2 = C [J_1(2m)]^2$$

$$C = [(\pi^2 R^4)/m] = \text{Vakio aallonpituudella } \lambda$$

$$R = \text{Pyöreän aukon säde}$$

$$m = (\pi R \sin \theta) / \lambda$$

$J_1(x) = J_1(2m)$ on Besselin funktio www.math.uh.edu/~djozsef/teaching/ma4173/lecture10.pdf

- Sarjakehitelmän numeerinen ratkaisu $J_1(x) = 0$

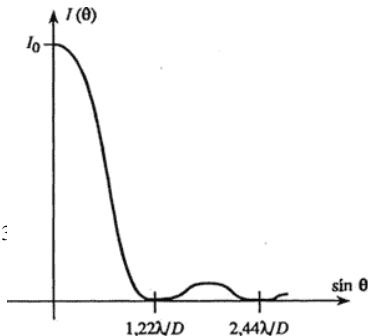
- Tulos on $\Rightarrow x \approx 3.83, 7.02, 10.17$ www.ck12.org

- **Ensimmäinen minimi** $x = 2m = (2\pi R \sin \theta)/\lambda \approx 3\lambda$
 $\Leftrightarrow \sin \theta = (3.83 \lambda)/(2\pi R) \approx 1.22\lambda/D$

- Kulma θ on pieni $\Rightarrow \theta \approx \sin \theta \approx 1.22\lambda/D$

- **Toinen minimi:** $x = 7.02 \equiv \theta \approx 2.23\lambda/D$

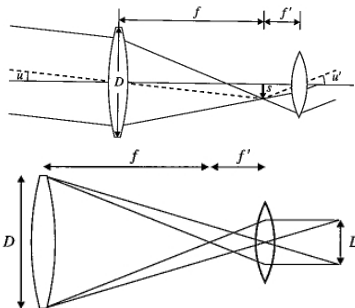
- Kolmas minimi: $x = 10.17 \equiv \theta \approx 3.24\lambda/D$



Kaukoputken optiikan perussuureet

Käsitteitä (kuvat: @ursa:havaitseva tähtitiede)

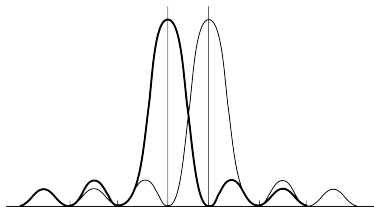
- ▶ Objektiivi (Peili tai Linssi) kerää valon
 D = Halkaisija, f = Polttoväli
- ▶ Usean linssin/peilin yhdistelmä
 $\Rightarrow f$ = Koko yhdistelmän polttoväli
- ▶ f/D = **Aukkosuhde**
 Konventio " f/n " tarkoittaa $n = f/D$
- ▶ u = Kulma jossa kohde näkyy
- ▶ $s = f \tan u$ = Kohteen kuvan korkeus,
 Pieni kulma: $\tan u \approx u$, f kasvaa $\Rightarrow$ Kuva kasvaa
- ▶ **Visuaalihavainnot**: f' = okulaarin polttoväli
- ▶ $\omega = u'/u = f/f' =$ **Suurennos** = Kohteen kulmaläpimitan suhteellinen kasvu
- ▶ $L = (f'/f)D = D/\omega =$ **Lähtöpupilli** = Okulaarin muodostama kuva objektiivista
 = Kaikki koottu valo kulkee lähtöpupillin läpi
- ▶ **Minimisuurennos**: Lähtöpupilli L pienempi kuin silmän pupillin läpimitta $d \approx 6$ mm
 $\Rightarrow \omega_{\min} \geq D/d \equiv$ Kaikki koottu valo silmään



Kaukoputken optiikan perussuureet

Käsitteitä (kuvat: @cnx.org, @www.met.reading.ac.uk)

- ▶ **Erotuskyky** = Miten läheisiä kohteita voidaan erottaa erillisinä.
- ▶ Määritelmä: Toisen kohteen keskipiste on toisen kohteen ensimmäisen pimeän diffraktio vyöhykkeen kohdalla $\Rightarrow \theta \approx \sin \theta = 1.22\lambda/D$
- ▶ Käytännössä $\theta \approx \lambda/D$, missä $[\theta] = \text{rad}$
Keltaiselle valolle $\lambda = 550 \times 10^{-9}\text{m}$ saadaan metrin, $D = 1\text{m}$, teleskoopilla erotuskyky $\theta = \lambda/D = 5.5 \times 10^{-7}\text{rad} = 0.11''$
- ▶ Suuremmilla putkilla **erotuskyky** θ pienempi $\Rightarrow$ Seeing parhaimmissakin observatorioissa määrää todellisen erotuskyvyn rajan

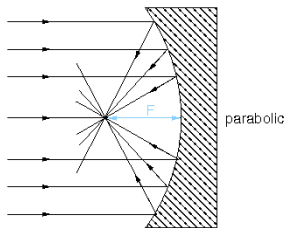
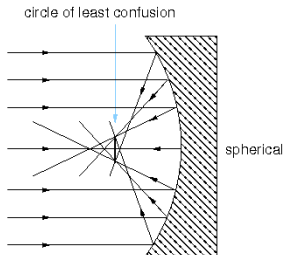
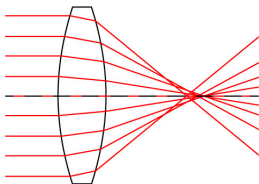


Kuvausvirheet

Kuvausvirheet (kuvat: @www.vikdhillon.staff.shef.ac.uk,

@alexhornsby.blogspot.com)

- Ideaalimailma: pistemäisten kohteiden kuvat pisteitä kaikkialla polttotasossa
- Aaltoliikettä $\Rightarrow$ Diffraktio raja $\theta \approx \lambda/D$
- **Aberraatio**: Mainittu aiemmin: **Linssin** polttoväli riippuu aallonpituudesta
- **Palloaberraatio**: **Peilin** tai **linssin** polttoväli muuttuu eri etäisyyksillä optisesta akselista
- Ei ongelma paraboloidi peileissä. Ongelma kaikissa linseissä $\Rightarrow$ **Täydellistä linssiä etsimässä** www



Kuvausvirheet

Kuvausvirheet

(kuvat: @www.phys.unsw.edu.au,

@en.wikipedia.org, @www.umich.edu)

- ▶ **Koma:** Ei optisen akselin suuntaiset säteet heijastuvat (**peilit**) tai taittuvat (**linssit**) eri alueille
- ▶ $K = \beta'' (3/16) (D/f)^2$ (Ross 1935, ApJ 81,156)
- ▶ Koman voimakkuus $\propto (D/f)^2 \Rightarrow$
Vähentyy: f kasvaa tai D pienenee (ei järkevää)
- ▶ Koman voimakkuus $\propto \beta''$ (**ei β^2 , s.o. neliöön!**)
Missä β'' etäisyys optiselta akselilta
 $\Rightarrow$ Paras kuva lähellä optista akselia
- ▶ Laaja kuvakenttä $\Rightarrow$ Käytetään korjauslinssejä

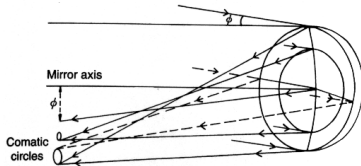
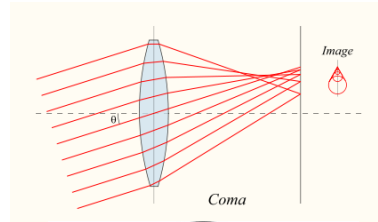


Image shape: size $\propto \phi$

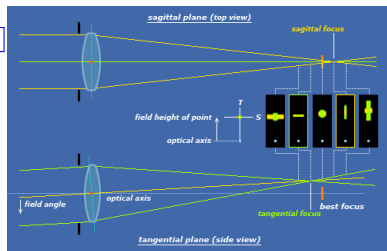
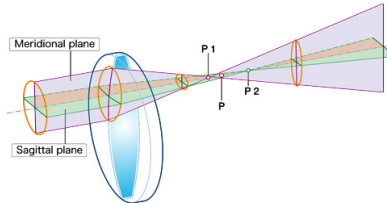


Kuvausvirheet

Kuvausvirheet

(kuvat: @www.nikon.com, @www.handprint.com, @en.wikipedia.org)

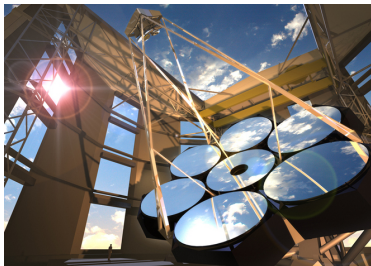
- ▶ **Astigmaattisuus:** Linssi tai peili epäsymmetrinen optisen akselin suhteen
- ▶ Pystysuoran ja vaakasuoran tason säteilyn komponenttien polttopisteet poikkeavat
- ▶ Kuvan muoto erilainen eri etäisyyksillä (Objektiivin huono tuenta, sylinterin muotoinen)
- ▶ **Kuvakentän kaarevuus:** ⇒ Petzvalin pinta www
- ▶ Alla Kepler satelliitin sensorien pinta
- ▶ Muita **kuvausvirheitä** kuvattu oppikirjassa



Optiikan suunnittelu

Optiikan suunnittelu (kuvat: @www.wired.com)

- ▶ **Linssit:** eri materiaalien yhdistelmät
- ▶ **Peilit:** pallo, paraboloidi hyperboloidi, ... jokin muu valittu mielivaltainen muoto
 f/D pieni $\equiv$ Kuvausvirhe suuri $\equiv D/f$ suuri
 f/D suuri $\equiv$ Kuvausvirhe pieni $\equiv D/f$ pieni
- ▶ Valittu D/f : **Kuvavirheiden** minimointi
 Esimerkiksi: $K \propto (D/f)^2 \Rightarrow$
 D/f pienenee $\Rightarrow K$ pienenee
- ▶ **Optisten elementtien** määrä ja yhdistelmät
- ▶ Kaukoputket: osa virhelähteistä **redusoitavissa** jälkikäteen & rajattu kaista (pieni värivirhe)
- ▶ **Suuret peilit:** hinta, paino, valmistettavuus, kestävyys, lämpölaajeneminen, ...
- ▶ **Tietokoneet:** Ennen valmistuksen aloittamista **Säteiden jäljitys** (engl. Ray-tracing)
- ▶ Esimerkiksi: Hunajakkenno (engl. **honeycomb**) rakenteen optiikka? www
- ▶ Esimerkiksi: Mitä maassa (D suurempi)? Mitä satelliitissa (D pienempi)?



Pähkinä (kuva: @Wikipedia)

Mitä etuja saavutetaan, kun tehdään optisen alueen teleskoopilla havaintoja satelliitista käsin?

