Havaitsevan tähtitieteen peruskurssi I

4. Teleskoopit ja observatoriot

Lauri Jetsu
Fysiikan laitos
Helsingin yliopisto

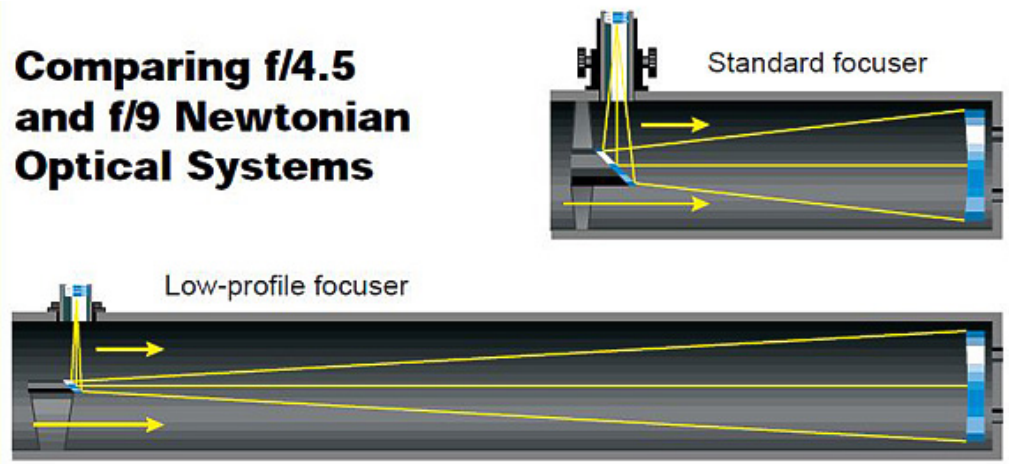
Teleskoopin perussuureet

Teleskoopin perussuureet

(kuva: @garyseronik.com)

- **Tavoite: Kuvata, kuinka** teleskooppi rakennetaan aiemmin kuvatuista optisista elementeistä
- Teleskoopin päätehtävä: koota mahdollisimman paljon valoa detektoriin (esim: CDD)
- Tärkeimmät ominaisuudet:

1. Objektiivi: **Linssi** tai **peili**
2. Objektiivi: $D =$ **Halkaisija**
3. Objektiivi: $f =$ **Polttoväli**.
   Näistä kolmesta johdettavissa:
   $F \propto D^2 =$ **Valonkeräyskyky**
   $f/D =$ **Aukkosuhde**
   $s = f \tan u \approx fu =$ **Kuvan mittakaava polttotasossa**, missä u on se kulma jossa kohde näkyy ($[s] =$"/mm tai CCD: ”/pix),
   $\theta = \lambda/D \propto 1/D =$ **Erotuskyky** ($[\theta] =$ rad)



Teleskoopin perussuureet

Teleskoopin perussuureet

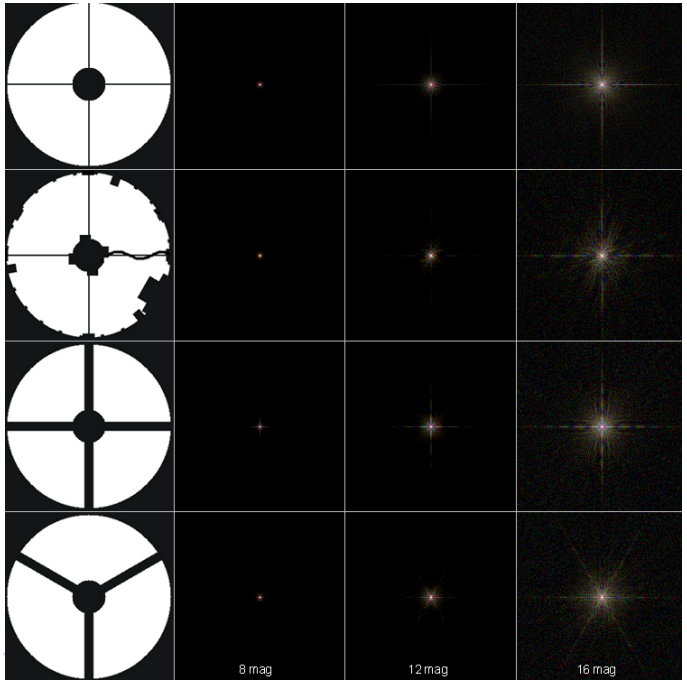
(kuvat: @en.wikipedia.org, @beugungsbild.de)

- **Teleskoopin toiminta**
  - Valon kulku **geometrisesta optiikasta**
  - Paitsi erotuskyky θ (diffraktio) **aalto-optiikasta**

  $\theta = 1.22\lambda/D =$ **Rayleigh'n** raja

  $\theta \approx \lambda/D =$ **Dawesin** raja
- **Maassa**: Seeing
  $\Rightarrow$ θ:lla ei käytännön merkitystä

  Avaruudessa: Satelliittikaukoputki
  $\Rightarrow$ θ:lla on käytännön merkitys
- Peilikaukoputket:
  - Apupeilin diffraktio
  - **yläkuva:** (Hubble Space Telescope
  $\Rightarrow$ Piikit vaikeuttavat kuvankäsittelyä, vaikkapa fotometrian mittaamista
  - **alakuva:** Muita vaihtoehtoja
  $\Rightarrow$ Tähdille erilaiset sakarat



Teleskoopin perussuureet

Erotuskyky $\theta = \lambda/D \propto 1/D$
$\Rightarrow$ Mitä suurempi peili/linssi, sitä paremmin erottuvat kaksi pistemäistä kohdetta toisistaan (**avaruudessa** tämä toteutuu, **maassa** seing on rajana)

Polttoväli f
$\Rightarrow$ Mitä pienempi polttoväli f, sitä laajempi kuvakenttä

- **Suunnittelu**: Esimerkkejä aukkosuhteen D/f valinnan vaikutuksista

1. **Himmeä** tai hyvä **erotuskyky** (galaksit, kvasaarit)
   Suuri $D \Rightarrow$ Kerää paljon valoa
   Pieni $\theta \propto 1/D \Rightarrow$ Erottaa pienempiä yksityiskohtia
   D/f valitaan "sopivan suureksi"
2. **Laaja** tai heikko **pintakirkkaus** (kaasusumut, kartoitus)
   Pieni $f \Rightarrow$ Kuvan mittakaava polttotasossa $s = fu$, missä u kulma jossa kohde näkyy
   $\Rightarrow$ Kohteiden valo laajemmalle alueelle
   $\Rightarrow$ Tarvitaan pidempiä mittauksia
   D/f valitaan "sopivan pieneksi"
3. **Pistemäinen** tai **kirkas** (planeetat, kaksoistähdet)
   Suuri $f \Rightarrow$ Pienempi $f \Rightarrow s = fu$ kuvan riittää
   Pienempi D riittää $\Rightarrow$ Kirkkaita kohteita pistemäisiä kohteita

Teleskoopin perussuureet

Optinen teleskooppi satelliitissa

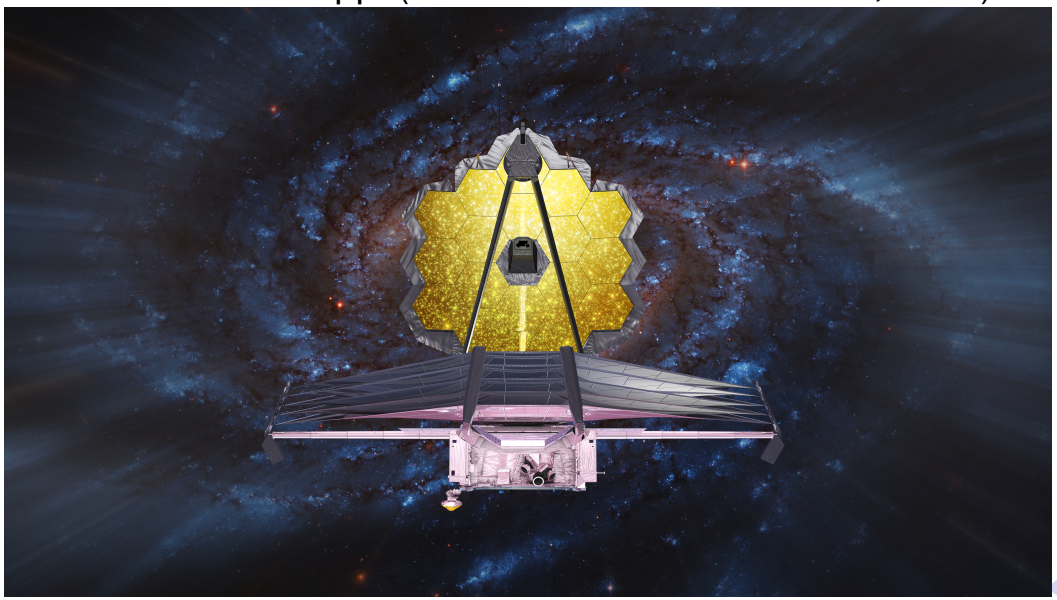
Edut

- Kaikki ilmakehän aiheuttamat häiriöt poissa

Haitat

- Kallista (in 2015 Hubble Space Telescope cumulative costs 11.3 billion US dollars)
- Huoltaminen kallista tai mahdotonta
- Avaruuden ääriolosuhteet (kylmä, kuuma, säteily ...)
- Havaintoajasta järjetön kilpailu
- Hubble optinen, Webb infrapuna

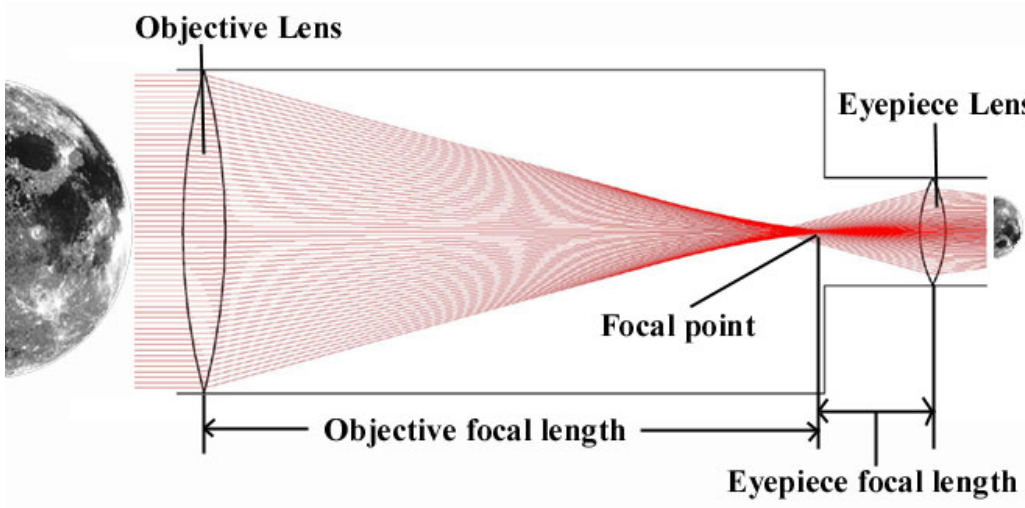
Kuva: Webb teleskooppi (Launch date: December 25, 2021)



Klassiset optiset ratkaisut

Klassiset optiset ratkaisut

(kuva: @math.ubc.ca)



- **Sivistyssanoja** (sama asia, eri sana)

  Linssi ≡ **Dioptrinen** ≡ Refraktori

  Peili ≡ **Kataoptrinen** ≡ Reflektori

  Molemmat ≡ **Katadioptrinen**
  ≡ Yhdistelmät:
  Schmidt–kamera,
  Schmidt-Cassegrain–teleskooppi
  Maksutov–teleskooppi

- **Linssiteleskooppi** www

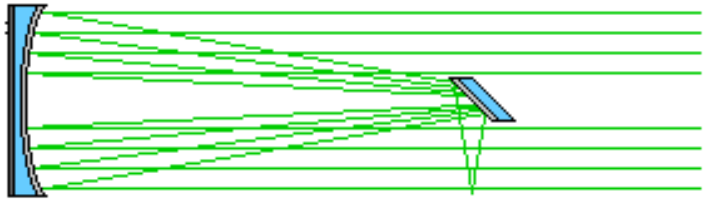
Etu	Haitta
Umpinainen ⇒ Ilma ei liiku ⇒ Kuva rauhallisempi	f/D suuri ⇒ Näkökenttä pieni
Ei esteitä kulkureitillä ⇒ Ei diffraktiokuvioita	Väriaberraatio, Iso kupoli
Detektorien tasapainotus helpompaa	$D < 1\mathrm{m}$ yläraja

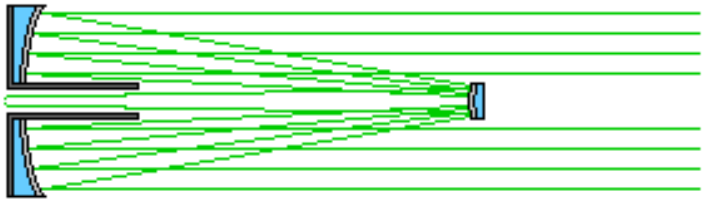
- **Sovellutuksia:** f suuri ⇒ Pienet kirkkaat kohteet: planeetat, kaksoistähdet, parallaksimittaukset, astrometria (meridiaanikoneet)

Klassiset optiset ratkaisut

Klassiset optiset ratkaisut

(kuva: @members.shaw.ca)





- **Newtonin peilikaukoputki** www

Etu	Haitta
Paraboloidi peili helppo valmistaa	Suuremmat detektorit $\Rightarrow$ Tasapainotus vaikea
Tasainen apupeili	Voimakas koma $\Rightarrow$ Hyvä kuvakenttä pieni
Halpa valmistaa	Apupeilin diffraktio
Visuaalihavainnot	Suuri $f/D \Rightarrow$ Pieni apupeili

- **Cassegrainin teleskooppi**: www paraboloidi, apupeili: hyperpoloidi,
- **Ritchey–Chretien teleskooppi**: www pääpeili hyperboloidi, apupeili hyperboloidi

Etu	Haitta
Rakenne: kompakti, luja, vakaa	Kaareva kuvakenttä
Suuret detektorit helppo tasapainottaa	Astigmaattisuus: Newton parempi
Koma tai palloaberraatio: Newton huonompi	Peilipintojen valmistus vaativaa
Ritchey–Cretien: ei komaa, ei aberraatiota	Yhdistelmän fokusointi vaativaa

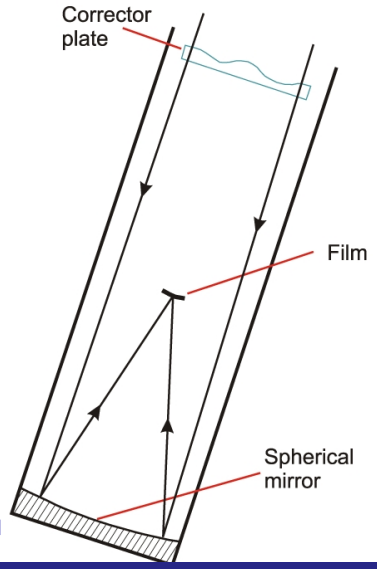
Klassiset optiset ratkaisut

Klassiset optiset ratkaisut (kuva: @setterfield.org, @en.wikipedi.org)

- **Schmidt–kamera**: www
- Bernhard Schmidt (1879–1935, Viro)
- Pallopeili ⇒ Ei komaa
- Pallopeili ⇒ Palloaberraatio
- Ratkaisu: Korjauslasi poistaa palloaberraation
- Korjauslasin halkaisija hiukan alle D

Etu	Haitta
Ei komaa	Detektori putken sisällä
Ei palloaberraatiota	Kaareva kuvakenttä
Ei astigmaattisuutta	Korjauslasin valmistus vaativaa
Laaja $5 - 7^{o}$ näkökenttä	Detektorin lämmön aiheuttamat haitat

- Yrjö Väisälä (1891–1971)
- Toinen korjauslinssi polttopinnan eteen ⇒ Tasainen kuvakenttä



Klassiset optiset ratkaisut

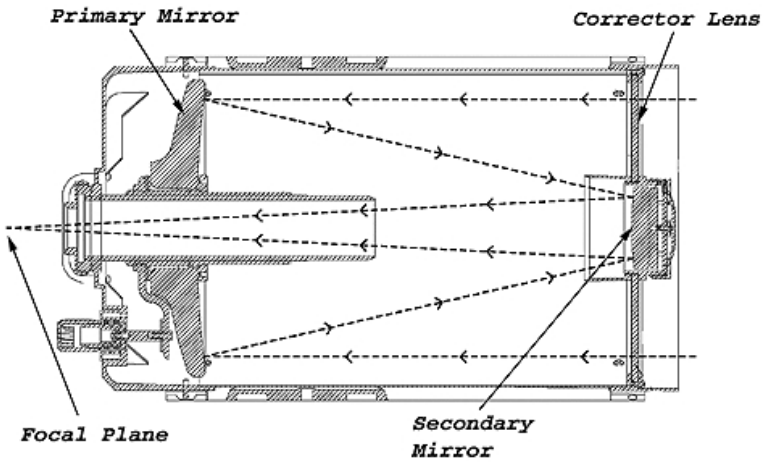
Klassiset optiset ratkaisut

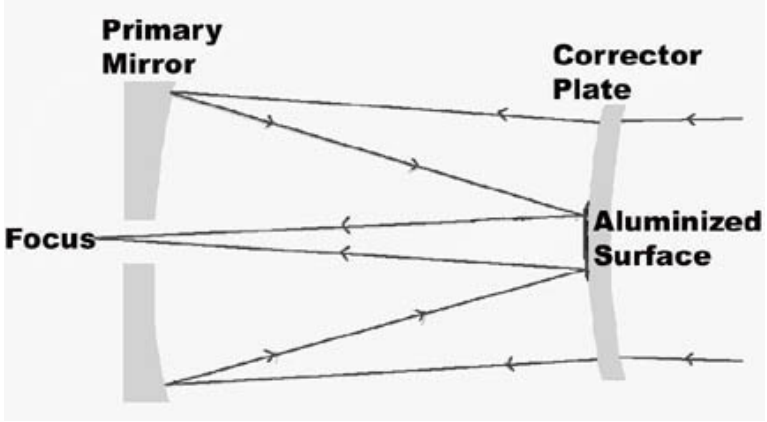
(kuvat: @celestron.com, @findascope.com)

- **Schmidt–Cassegrain**: www
- Yhdistelmä molemmista
- Lyhyt putki **mutta** pitkä polttoväli
- Harrastajien suosima

Etu	Haitta
Suuri f & Lyhyt putki	Vaikea valmistaa
Näkökenttä: virheetön	Kallis laite
Detektorit: ulkopuolella	
Detektorit: tasapaino	

- Maksutov–teleskooppi: www
- Kaareva korjauslasi
- Apupeili korjauslasin sisäpinnalla
- Edut & haitat: Samat kuin Schmidt





Teleskoopin pystytys

Teleskoopin pystytys (kuva: @astro.ljmu.ac.uk)

- Kaksi pystytystapaa **Ekvatoriaalinen** www

  Tuntiakseli || Maan pyörimisakseli

  Delkinaatioakseli ⊥ Tuntiakseli

  Maa pyörii ⇒ Kohteen tuntikulma muuttuu

  Kierros tuntiakselilla $0.^{\mathrm{d}}99726958$

  Ongelma: vinot akselit ⇒ kuormitus epätasaista ⇒ Laakerit kuluvat

- **Atsimutaalinen** www

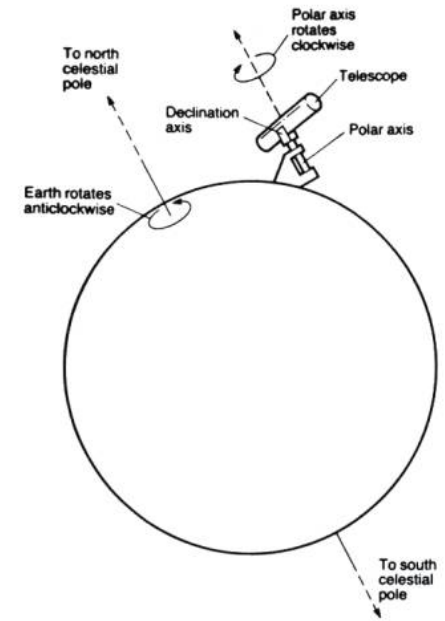
  Maan pinta: Vaaka– ja pystysuora akseli

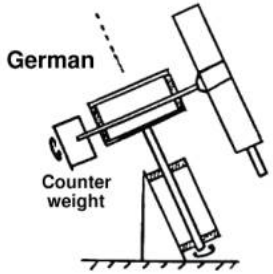
  Etu: kevyt rakenne, tasainen kuormitus

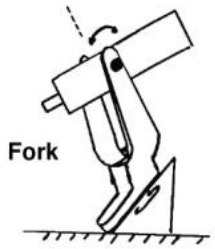
  Haitat: Tietokone ohjaus, Kuvakenttä kiertyy ⇒ Detektorin kierryttävä

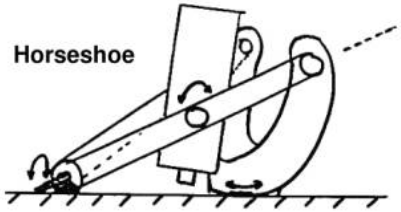
- Zeniitti ohituksessa horisontaalitasossa mitattu kulma, **atsimuti,** www muuttuu 180° ⇒ Ohjausongelmia

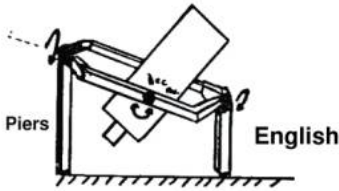
- **Jalustat:** Saksalainen, Haarukka, Englantialainen ja Hevosenkenkä (Edut ja haitat mainittu oppikirjassa)





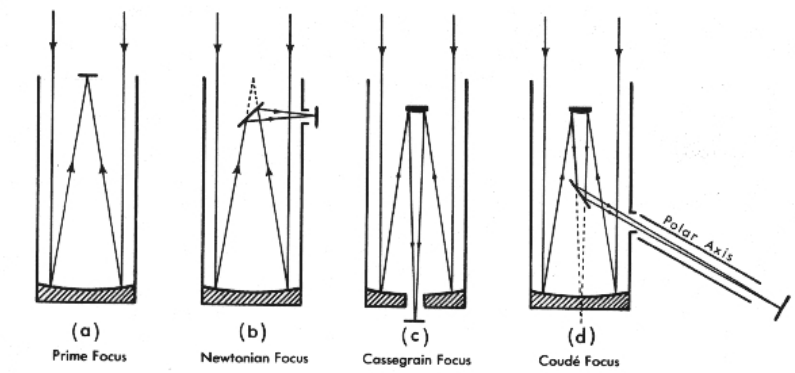


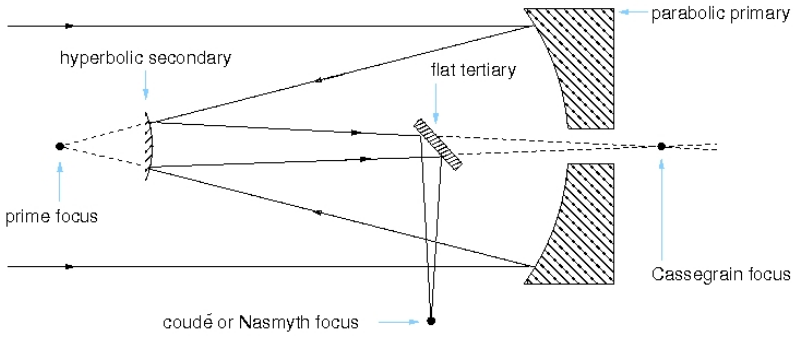




Fokus

Fokus (kuvat: @aao.gov.au, @vikdhillon.staff.shef.ac.uk)





- **Fokus**: polttotason sijainti
- Valitaan käyttötarkoituksen mukaan
- Teleskooppin sisällä tai ulkopuolella
- **Primääri**fokus: Pääpeilin polttotaso

  Pieni f/D, Pienet detektorit
- **Newton**-fokus: Kaukoputken sivulla

  Pienet detektorit
- **Cassegrain**-fokus: Pääpeilin takana

  Suuri f/D, Suuret instrumentit
- **Coude**-fokus: **Ekvatoriaalinen pystytys,** Fokus kaukoputken ulkopuolella

  Suuri f/D, Putki liikkuu $\Rightarrow$ Fokus ei liiku $\Rightarrow$ Suuret kiinteät instrumentit
- **Nasmyth**-fokus: **Atsimutaalinen pystytys,** Fokus kaukoputken ulkopuolella

  Suuri f/D, Putki liikkuu $\Rightarrow$ Fokus ei liiku, Valo vaaka-akseliin, edut kuin Coude
- **Apupeilin** kierto: Eri fokus vaihtoehtoja
- **Apupeilien** määrä: Joka heijastuksessa menetetään osa valosta

Kuvan laatuun vaikuttavia tekijöitä

Kuvan laatuun vaikuttavia tekijöitä

(kuvat: @npr.org, @en.wkipedia.org)

Optiikan lisäksi vaikuttavia tekijöitä

- **Teleskooppityyppi** $\Rightarrow$ Ominaiset kuvausvirheet
- **Käyttötarkoitus** määrää Teleskooppityypin
- **Hionnan laatu** (**Ylempi kuva**)

  Poikkeamat teoreettisesta muodosta $< \lambda/10$

  $\lambda = 550\text{nm} \Rightarrow$ Poikkeamat $< 0.000055\text{mm}$
- **Pääpeilin tuenta**

  Peilin muodon säilyttävä eri asennoissa

  Pienet peilit: kiinteä tuki

  Suuret peilit: aiemmin passiivinen tuenta

  Suuret peilit: nykyisin ohuita (NOT, $0.^{\text{m}}19/2.^{\text{m}}56$)

  Lukemattomia ratkaisuja www

  Nykyisin **säädettävä** monipistetuenta (alta ja sivulta)
  Aktiivinen optiikkaa, Hunajakennorakenne,
  Nestemäinen pyörivä pääpeili www (**Alempi kuva**)

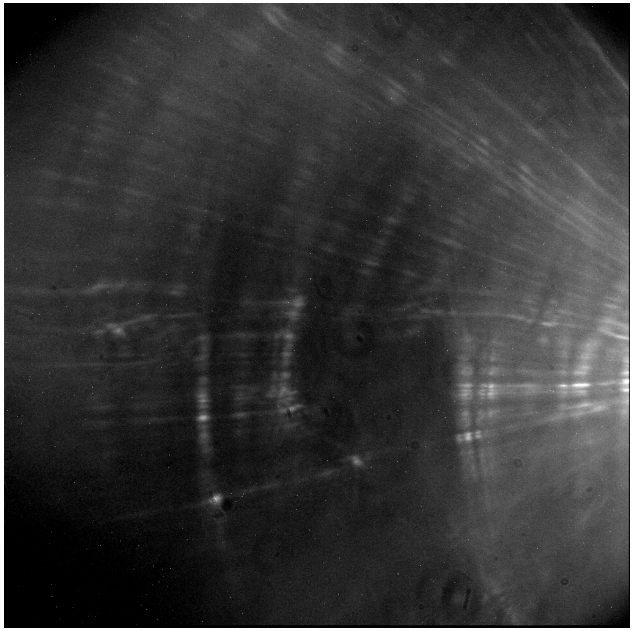
Pneumaattinen tuenta (Kuva: Hill et al. 2008)

Hajavalo

Hajavalo

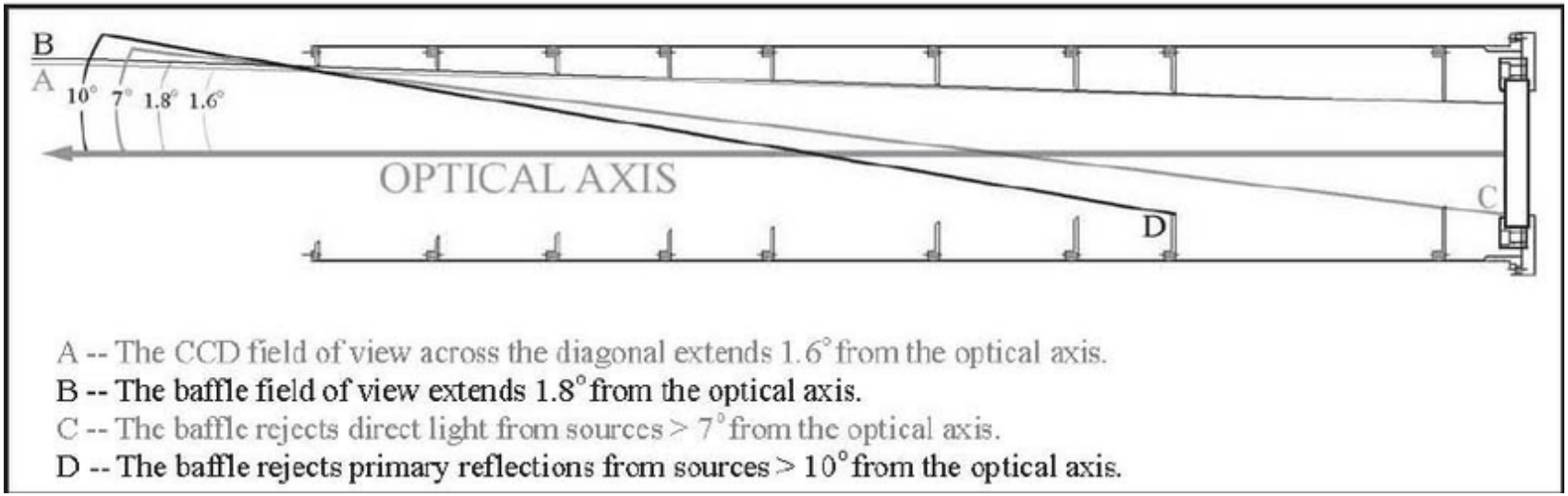
(kuvat: @physics.bgsu.edu, @en.wikipedia.org)

- “Eksynyt” valo **(engl. stray light)** www detektoriin
  - Himmeät kohteet vaikeita havaita
  - Kuvissa anomalioita
- CCD-tausta: Lähistöllä valolähde
- **Hajavalon lähteitä**
  - Kuu, Planeetat, Kirkkaat tähdet
  - Taustataivas
  - Valosaaste www
  - Säteily havaintolaitteista
- Hajavalosuojat
  - Suora valo: Esteet
  - Epäsuora valo: Tummat pinnat ja esteet
- Sama alue, Samanlainen instrumentti, Eri havaintopaikka



Hajavalo (Stray light)

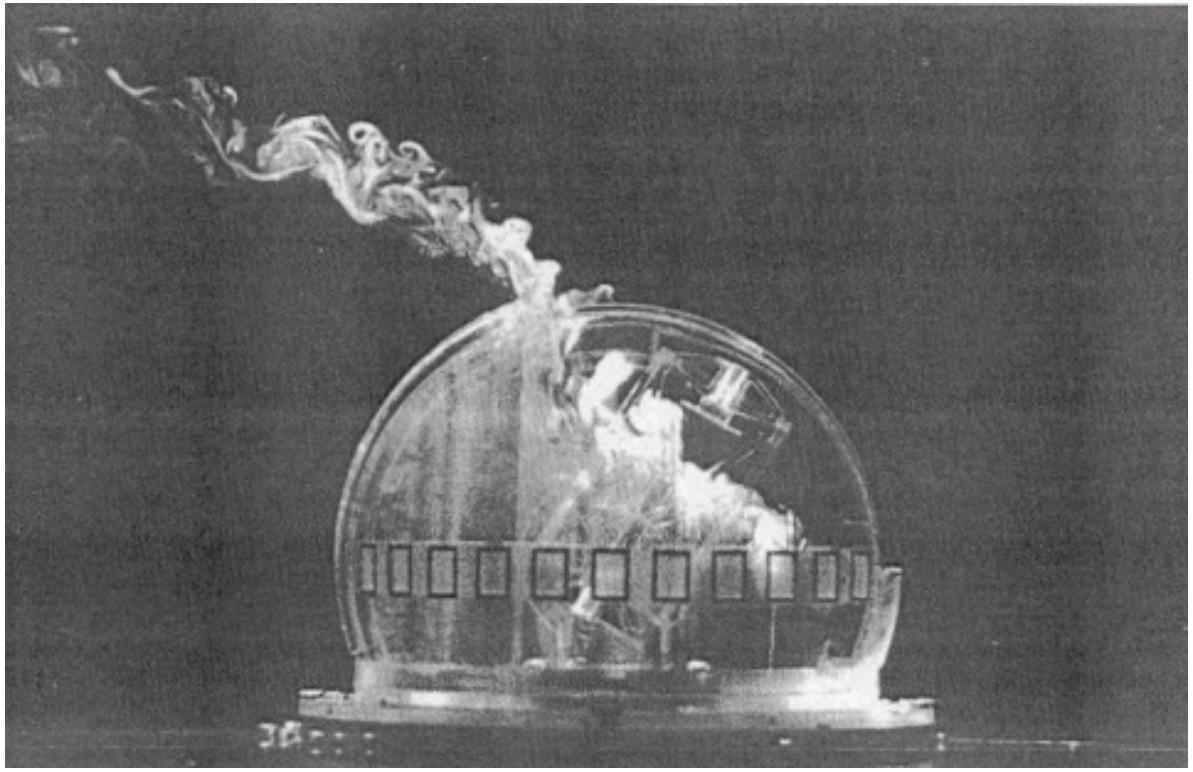
Eräs ratkaisu hajavalon eliminoimisessa (Rex et al. 2006, Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering 6269)



Terminen suunnittelu

Terminen suunnittelu

(kuva: @gsmt.noao.edu)



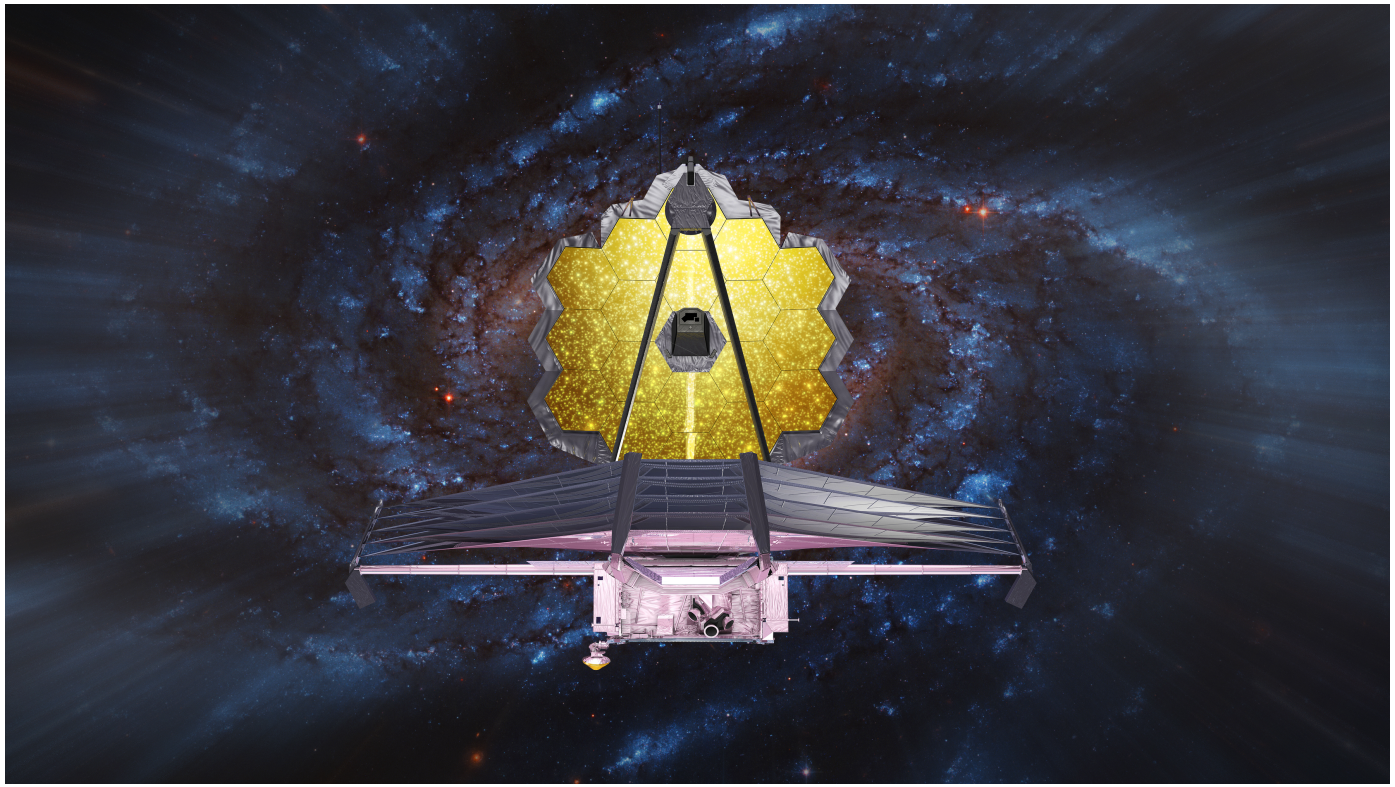
- **Lämpölähteet**
  ⇒ Ilma väreilee
  ⇒ Seeing huononee
- **Lämpölähteitä**
  Teleskooppi, Peili, Rakennus, Rakenteet, Laitteet, Havaitsija, Ympäristö, Maaperä, ...
- Kuvassa “Vesitunneli testi”
- Minimoidaan lämpölähteet ja poistetaan muu lämpö
- **Observatorio:** Mahdollisimman kompakti, Jäähdytys yö lämpötilaan, Vaaleat pinnat (vähän absorptiota, paljon emissiota), Pieni peilin massa ja lämpölaajeneminen, Ohjaushuone ja havaitsijat, Instrumenttien kylmennys, Teleskoopin värähtelyn estäminen, ... (Oppikirja: paljon muita yksityiskohtia, sekä pitkä lista kansainvälisistä ja suomalaisista teleskoopeista)

Observatorion sijoituspaikka

Observatorion sijoituspaikka

(kuvat: @mn.uio.no @hexagonmetrology.co.uk)

- **Minimoidaan ilmakehän häiriöt**
  - Vähän pilviä
  - Korkealla ⇒ Vähemmän ilmakehän häiriöitä, Tummempi taustataivas
  - Hyvä seeing Ilman virtaukset
  - Kuiva ⇒ Myös infrapuna
  - Ei valosaastetta.
- **Vähän sopivia paikkoja** Laaja infrastruktuuri ⇒ Monikansallisia keskittymiä
- Suomi
  - NOT (La Palma), ESO (Chile)

Pähkinä (kuva: @Wikipedia)

Miksi Webb teleskooppi suunniteltiin havaitsemaan infrapuna-alueessa?