



HAVAITSEVAN TÄHTITIETEEN PK I

TEKNISET INNOVAATIOT

Syksy 2024

Thomas Hackman



13. TEKNISIÄ INNOVAATIOITA

- Uudet teleskoopit
- Erotuskykyä parantavat tekniikat
- Ilmaisinten kehitys
- Monitoimi-instrumentit

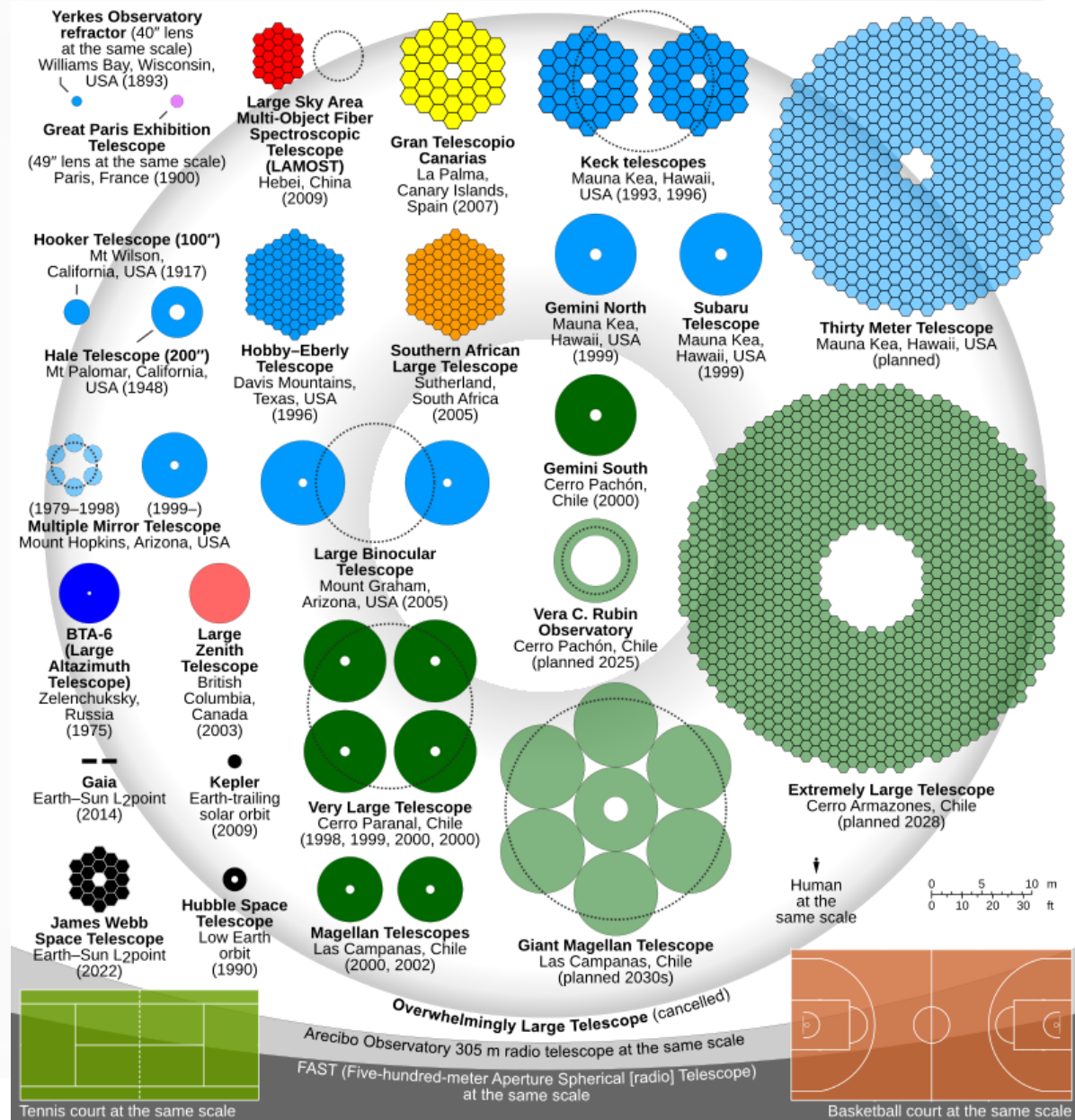


ELT 30.11.2024 (ESO)



13.1 TELESKOOPIT

Nykyisiä ja tulevia
teleskooppeja (Wikipedia)





13.2 MONIPEILI- JA MOSAIKKITELESKOOPIT

- Suurten monoliittipeilien yläraja ~8 m (*LBT* 8.4m suurin)
- Yli 6m yleensä kuitenkin mosaiikkeja
- Mosaiikkiteleskooppi toimii kuin yksipeilinen
 - Erotuskyky ja valonkeräyskyky sama kuin yhtenäiselle peilille
 - Peilien positiot toistensa suhteen säädettävä erittäin tarkkaan
- Monipeiliteleskooppi toimii kuin monta teleskooppia yhdessä
 - => Erotuskyky sama kuin yksittäisillä peileillä, valonkeräyskyky peilien yhteenlaskettu
 - => Mahdollisuus interferometriaan, jolloin erotuskyky vastaa systeemin halkaisijaa

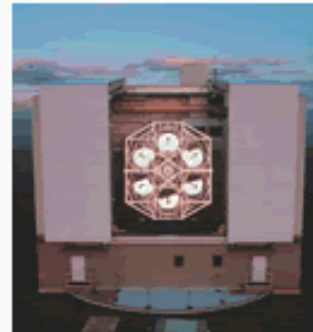
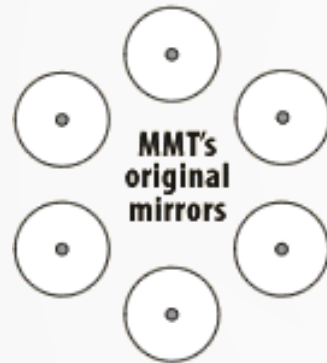


13.2 MONIPEILI- JA MOSAIKKITELESKOOPIT

STRATEGY 1

The Multiple Mirror Telescope (MMT) in Arizona

One group built a telescope using six individual mirrors held by a single mounting. The six mirrors created separate images that astronomers lined up by using joystick-like controls. Later, computers were used to align the images.



Courtesy Dane Penland

Above, the six separate mirrors of the original MMT are visible.

STRATEGY 2

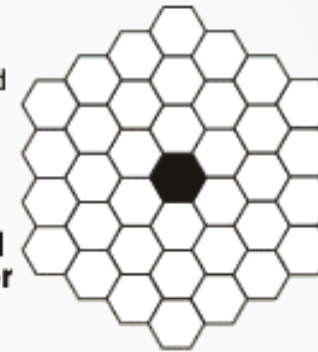
Keck I telescope in Hawaii

Another group of astronomers, at the Keck Observatory, pieced together 36 individual mirror segments into one gigantic mirror for the Keck I telescope.

One mirror segment



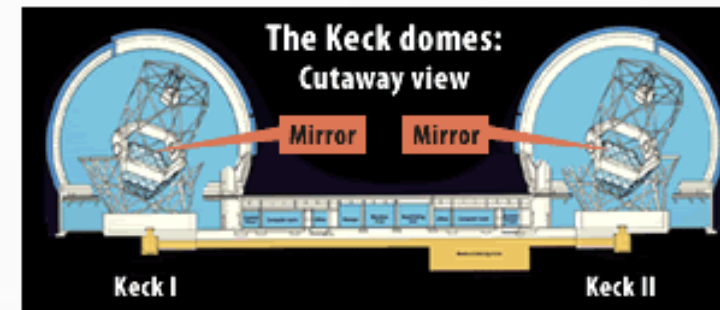
Keck I mirror



STRATEGY 3

Keck I telescope plus Keck II telescope

Eventually, scientists combined strategies 1 and 2. For example, Keck I now has a twin sister, Keck II. The telescopes' two separate mirrors can be used together to produce a single image.

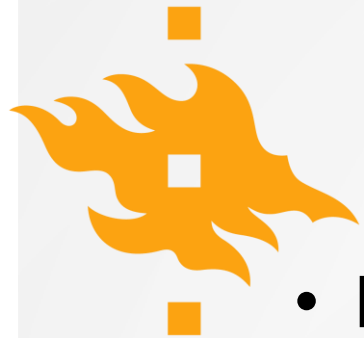


Courtesy NASA/JPL-Caltech



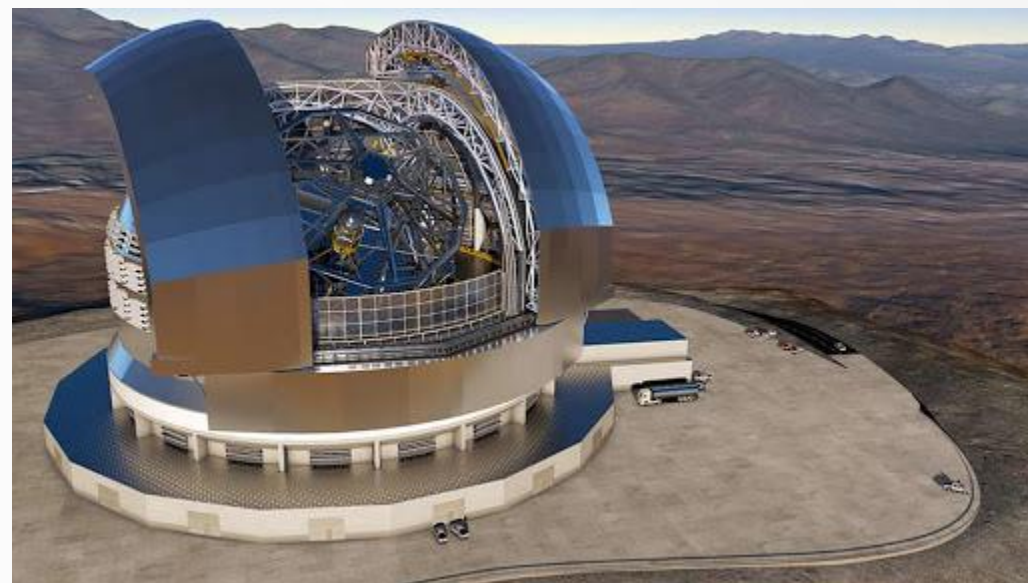
13.3 SUURET TELESKOOPIT

- Ilmaisinten parannuttua, teleskooppien valonkeräyspinta-alasta muodostui rajoite
- Uusien tekniikoiden kehitys mahdollistanut yhä suurempien teleskooppien rakentamisen
- Motivaattorina halu nähdä kauemmas ja/tai himmeämpiä kohteita
- Suuret teleskoopit usein optimoituja lähi-infrapunaan
 - Maailmankaikkeuden laajenemisesta johtuva punasiirtymä
 - Eksoplaneettojen säteilyn havaitseminen



13.3.1 ESO:N ELT

- European Extremely Large Telescope
- Rakentaminen aloitettu 2014: Cerro Armazones (kork. 3060m), 39.3 m pääpeili
- Valmis 2028 (arvio)
- Ensimmäiset galaksit ja tähdet, eksoplaneetat, maailmankaikkeuden laajeneminen ...

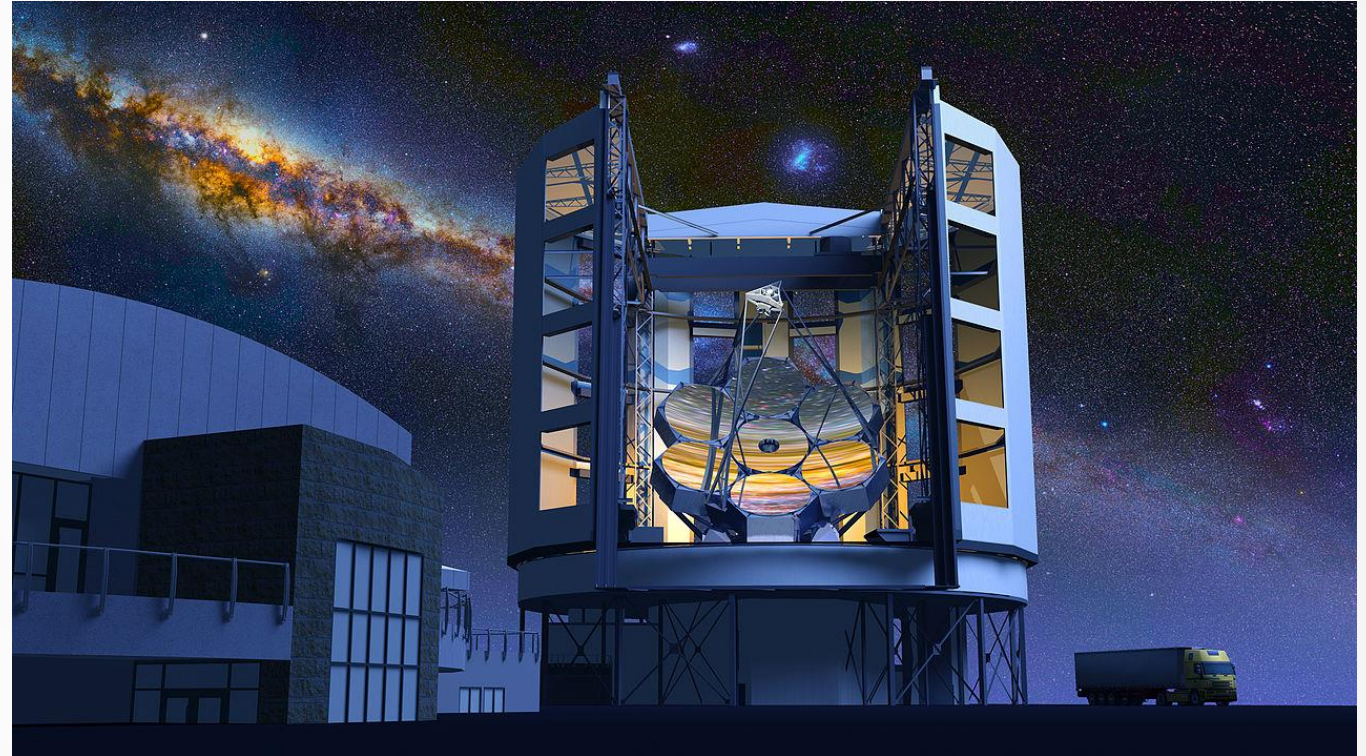


ESO Extremely Large Telescope (ELT)



13.3.2 GIANT MAGELLAN TELESCOPE

- Rakenteilla vuodesta
- Las Campanas, Chile (valmis 2030?)
- 24.4 m halkaisija, 7 peilin rakenne
- Ensimmäiset tähdet & galaksit ja raskaat alkuaineet
- Eksoplaneetat: massat, ilmakehien spektroskopiaa ja planeetan suoraa kuvaamista



Giant Magellan Telescope - GMT Corporation



13.3.3 THIRTY METER TELESCOPE

- 30m, mosaiikkipeili
- Suunniteltu paikka: Mauna Kea, Havaiji
- Vaihtoehtona La Palma
- Rakentaminen jäissä paikallisen vastustuksen takia
- Ensimmäiset tähdet ja raskaat alkuaineet, eksoplaneettojen spektroskopia

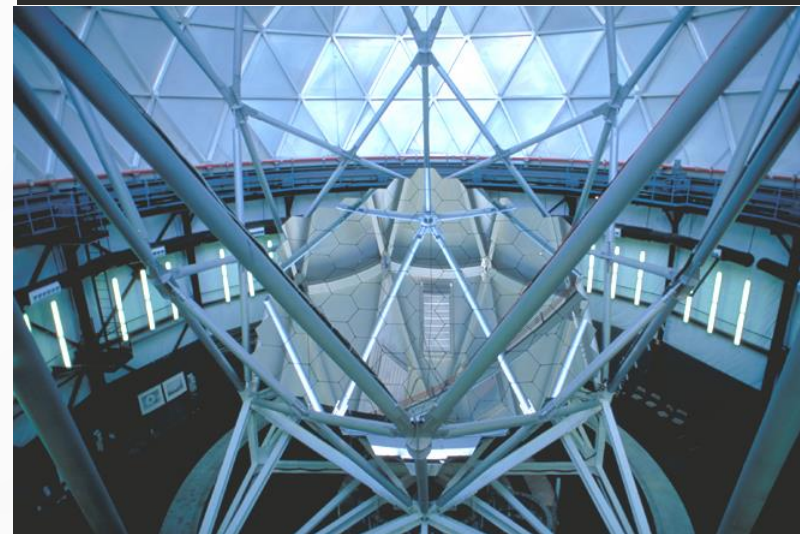


Thirty Meter Telescope (TMT, Hawaii)



13.4 KIINTEÄ ZENIITTIKULMA

- • *Hobby-Eberle Telescope* ja *South African Large Telescope*
- Isoja ~10 m:n mosaiikkiteleskooppeja, pääpeilin zeniittikulma on kiinteä
 - => Voidaan liikuttaa vain atsimuuttisuunnassa
 - => Huomattavia säästöjä rakennuskuluissa
- Apupeiliä liikuttamalla saadaan katettua noin 70% taivaasta yön aikana
- Erinomaisia ns. “service mode” havaintoihin



HET gallery

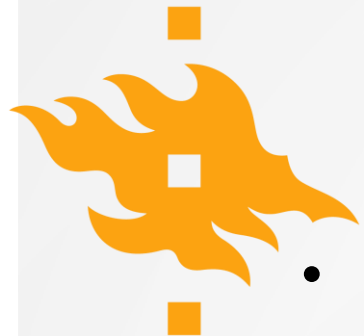


13.5 NESTEMÄINEN PÄÄPEILI

- Pyörivä neste muodostaa paraboloidipinnan
- Heijastavana nesteenä esim. elohopea (myrkyllinen!)
- Testeissä rauta- & hopea-nanopartikkeleita etyyliglykolinesteessä (+ peilin muokkaus magneettikentällä)
- Etuna hinta (~1% peilistä, ~5% koko teleskoopista)
- Rajoituksena suuntaus (peiliä ei voi kääntää)
- Suurin käytössä ollut oli Kanadassa sijaitseva 6m *Large Zenith Telescope* (2003-16)

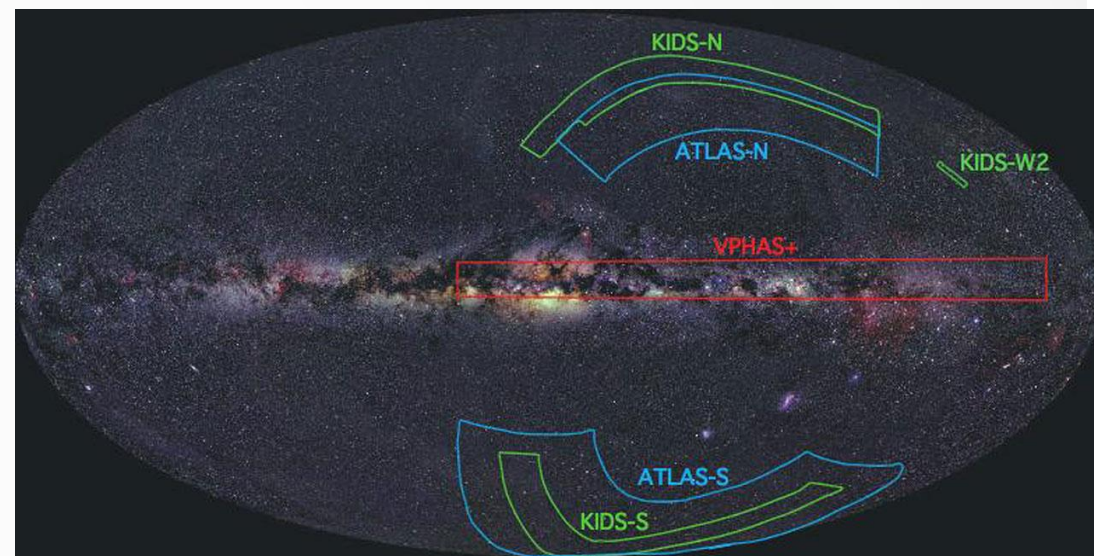


LZT



13.6 KARTOITUSTELESKOOPIT

- Halutaan kartoittaa
 - mahdollisimman suuri osa taivaasta
 - himmeämpään rajamagnitudiin
 - toistuvasti mahdollisimman tiheällä aikavälillä
 - mahdollisimman tarkalla monivärifotometrialla
 - mahdollisimman tarkalla astrometrialla
- Vaatii kehittynyttä datankäsittelyä

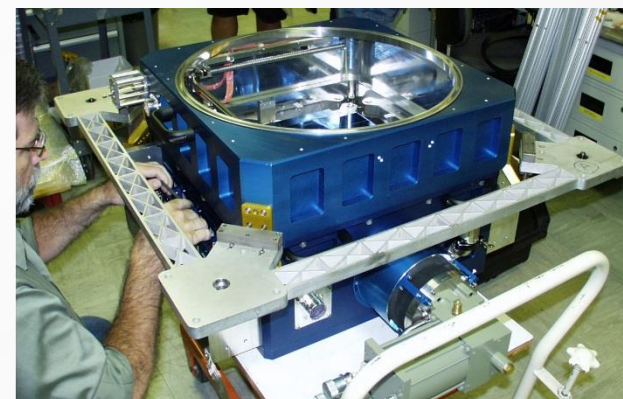
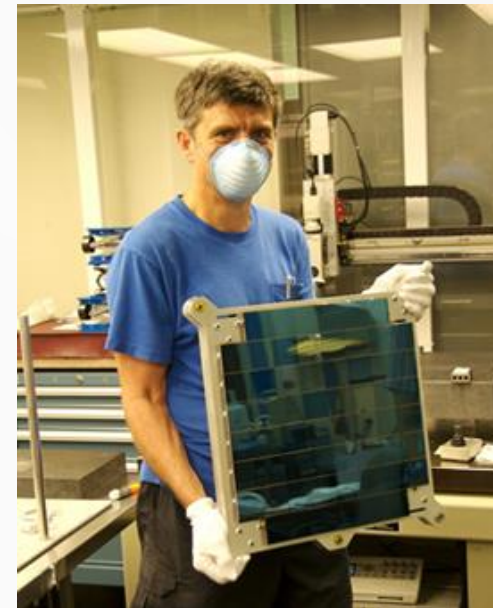


ESO:n VST:n kartoitus



13.6.1 PAN-STARRS

- Mount Haleakala, Havaiji (3052 m)
- 4 x 1.8m teleskooppi: 3° kenttä
- Päätehtävä: NEO asteroidit ja komeetat
- Myös muut aikariippuvaliset ilmiöt, esim. muuttuvat tähdet, supernovat
- Koko Havaijin taivas kartoitetaan 4 kertaa kuukaudessa



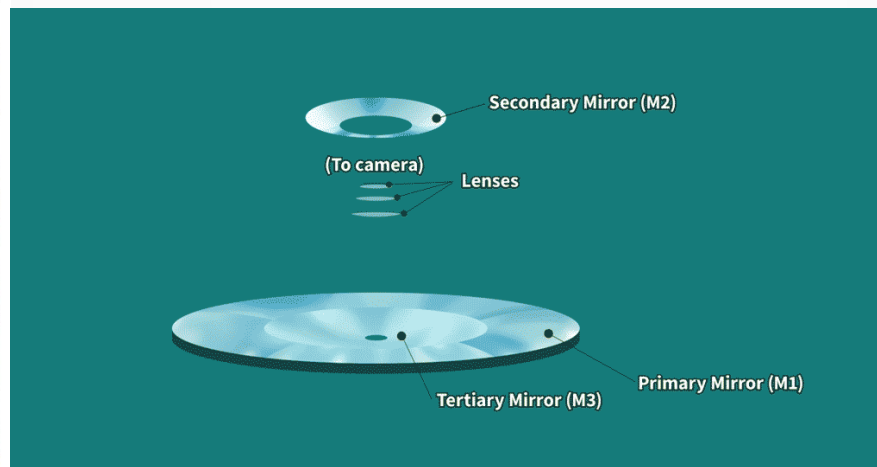


13.6.2 VERA RUBIN OBSERVATORY (LSST)

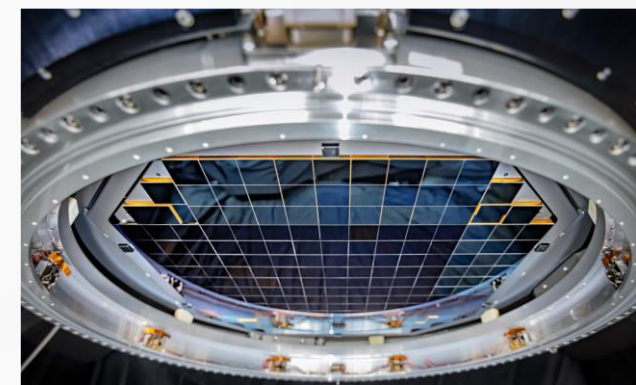
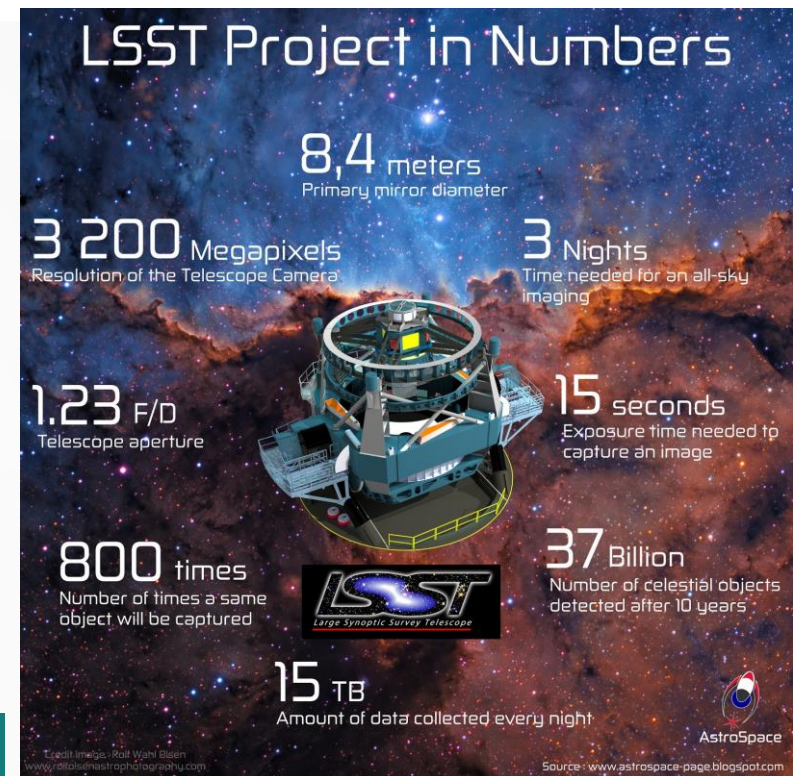
- Large Synoptic Survey Telescope
- Cerro Pachón, Chile, ensivalo 2025
- 8.4m teleskooppi: 3.5° kenttä
- 3.2 gigapikselin CCD



LSST Primary/Tertiary Mirror Blank
August 11, 2008, Steward Observatory Mirror Lab, Tucson, Arizona



Laaja kuvakenttä vaatii erityistä optiikkaa

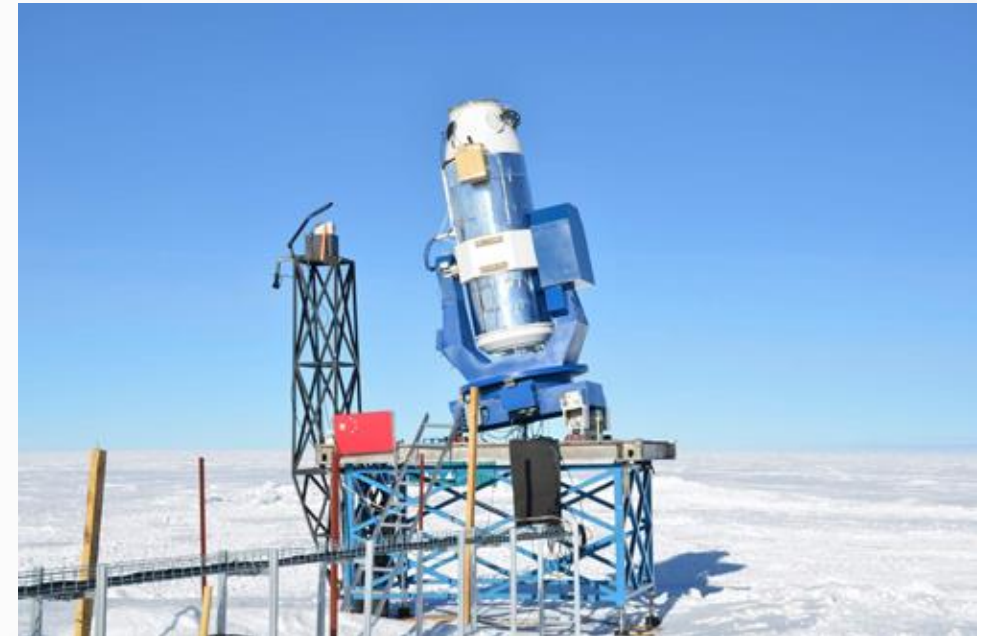


CCD-mosaiikki



13.7 TÄHTITIEDETTÄ ANTARKTIKSELLA

- Suurin osa seeingiä aiheuttavista ilmiöistä tapahtuu troposfäärissä.
- Antarktiksella tropopaussi on lähellä maan pintaa => seeing jopa 0.07"
- Ilma erittäin kuivaa (NIR)
- Pitkä yö => näkyvien kohteiden monitorointi
- Ongelmana kaukainen sijainti ja äärimmäiset sääolosuhteet, sekä rajoitettu kohteiden näkyvyys
- Esim. *Antarctica Schmidt/Survey Telescopes*



Antarctic Survey Telescope
AST3 (CAS)



13.8 AVARUUSTELESKOOPIT

- Avaruudessa ilmakehän ongelmat (seeing, absorptio,...) poistuvat
- Optisella alueella esim. *Hubble* ja *Gaia*
- Lähi-infrapunassa *James Webb ST* (0.6 - 28 μm , laukaisu 18.12.2021)
- Myös useita pienempiä teleskooppeja, esim. *Kepler*, *TESS*
- Hyvin kallista verrattuna maanpäälliseen tutkimukseen
- Äärimmäiset olosuhteet => voimakkaita rajoja teknologialle

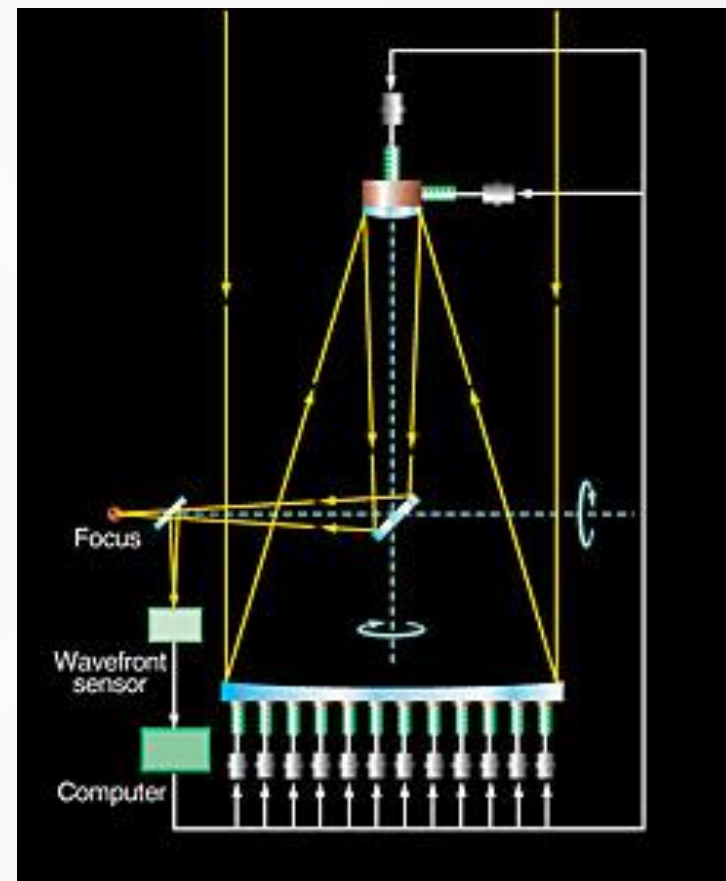


Hubble ST ja Kepler



13.9 AKTIIVINEN OPTIIKKA

- *Aktiivisella optiikalla* tehdään hitaita ($f \sim 0.01$ Hz) muutoksia peilin muotoon
- Nykyaikaiset peilit joustavia => pääpeilin muotoa voidaan säätää
- Voidaan aktiivisesti seurata aaltorintaman muotoa ja/tai noudattaa ennalta rakennettua mallia
- Peilin ja teleskoopin lämpötilan ja asennon muutoksiin voidaan reagoida aktiivisella optiikalla
- Myös ilmakehän hitaita muutoksia voidaan kompensoida

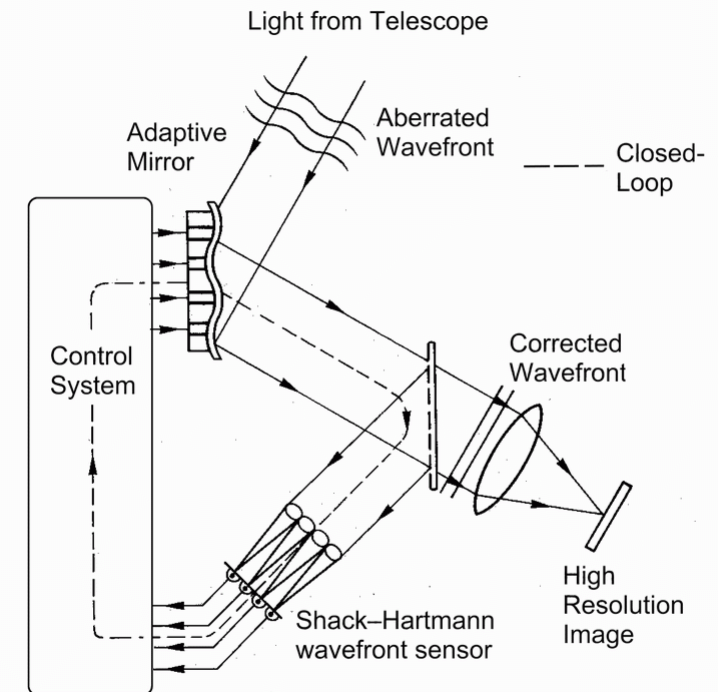


VLT:n aktiivinen optiikka



13.10 ADAPTIIVINEN OPTIIKKA

- *Adaptiivisellä optiikalla* korjataan ilmakehän muutoksia jopa 1000 kertaa sekunnissa
- Aaltorintaman muotoa seurataan => muutokset kompensoidaan muuttamalla apupeilin muotoa
- Tarvitsee referenssilähteen (läheinen tähti, lasermajakka)
- Kuvan terävyys parantuu noin kymmenkertaisesti
- Pieni käyttökelpoinen kuvakenttä





13.10.1 KEINOTÄHTI

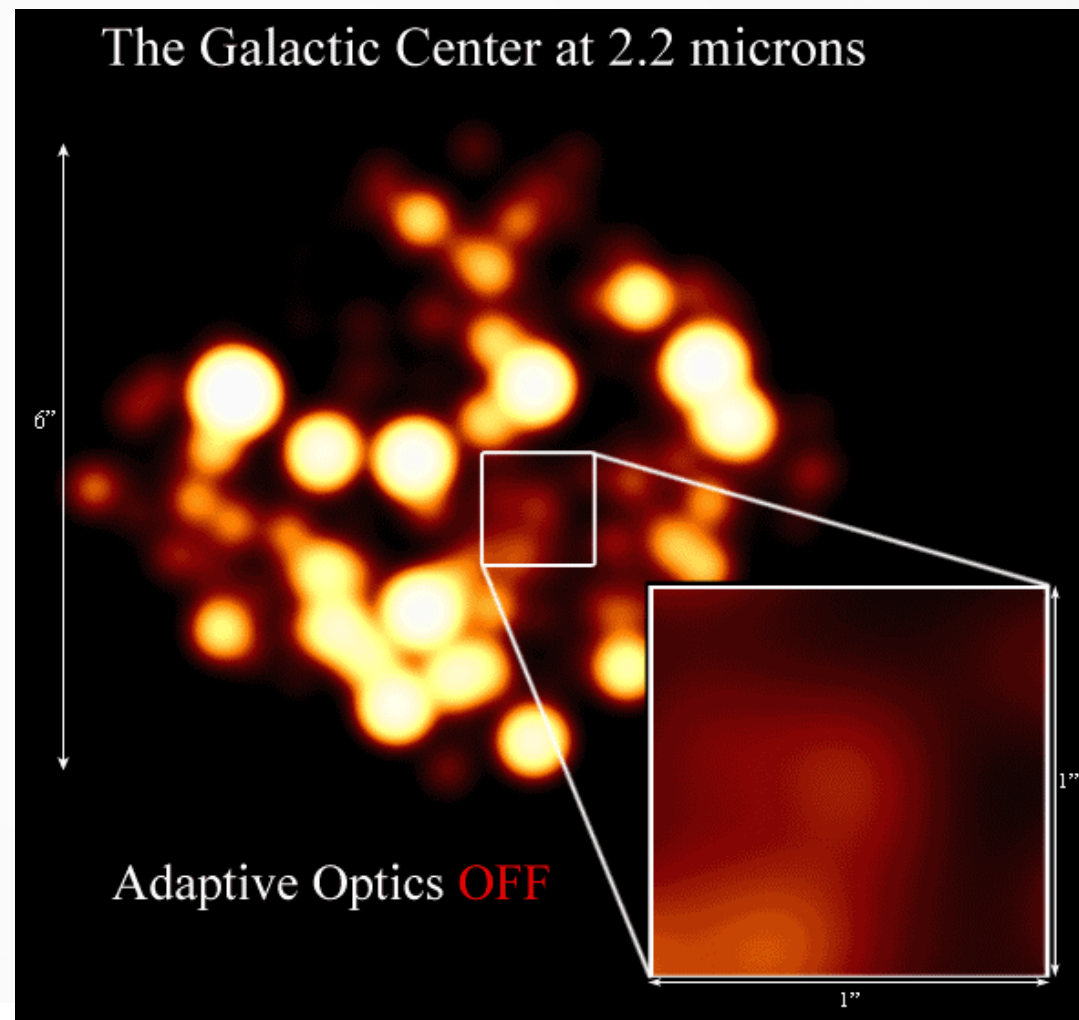
- Riittävän kirkasta referenssitähteä vaikea löytää
- Laserin avulla voidaan luoda “keinotähti”
- Käytetään joko Rayleigh’n sirontaa tai 92km korkeudella olevaa natrium kerrosta (589 nm)
- Laser voi häiritä observatorion muita teleskooppeja (puhumattakaan lentoliikenteestä)





13.10.2 ADAPTIIVISEN OPTIIKAN VAIKUTUS

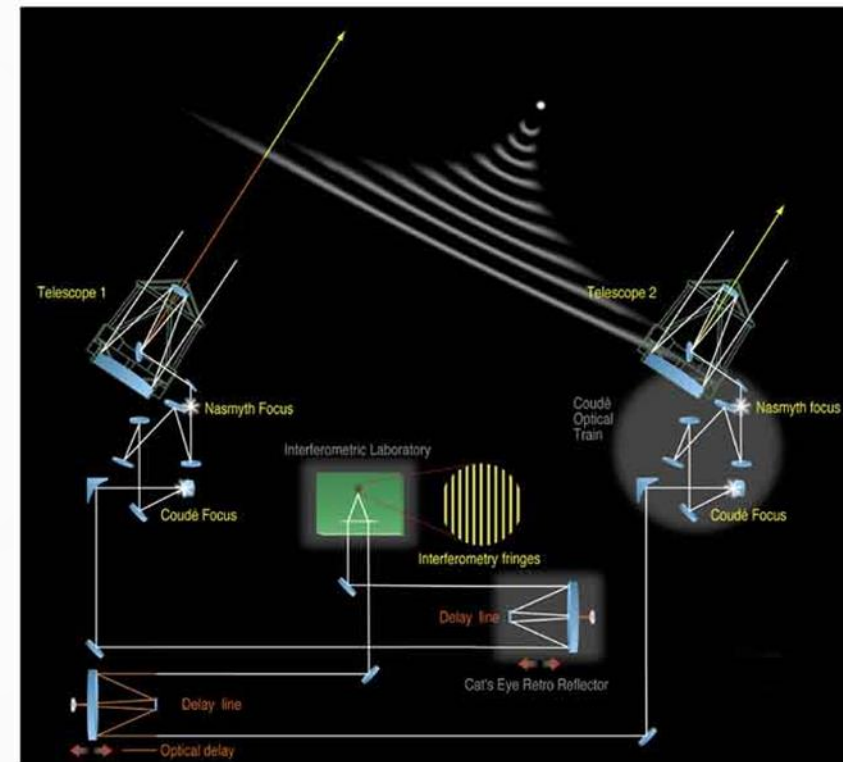
UCLA Galactic Center group





13.11 INTERFEROMETRIA

- Interferometriassa yhdistetään useamman teleskoopin vastaanottama valo samassa vaiheessa
- Tällöin voidaan muodostaa kuva, jonka resoluutio vastaa teleskooppien välistä projisoitua etäisyyttä
- Valonkeräyspinta-ala on peilien yhteenlaskettu pinta-ala
- Valonsäteiden kulkemaa matkaa on hallittava erittäin tarkkaan
- Kuva muodostetaan Fourier –muunnoksella (inversio)



Overview of the VLT Interferometer

ESO PR Photo 10c/01 (18 March 2001)

© European Southern Observatory



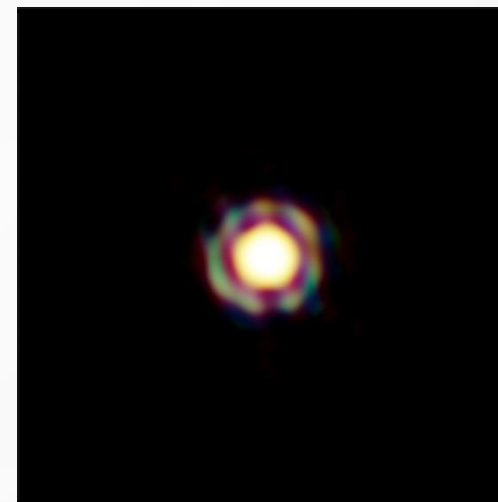


13.11.1 VLT

- VLT + 4x1.8m aputeleskooppi
- Millikaarisekunnin resoluutio
- Havaitaan kompakteja kohteita, esim. AGN, tähtien pintarakenteita, eksoplaneettoja
- Maksimihalkaisija 200m



ESO 0906a: T Lep
tähdessä purkautunut
kaasu, joka
muodostaa
molekyylipilven sen
ympärille (res 0.004")

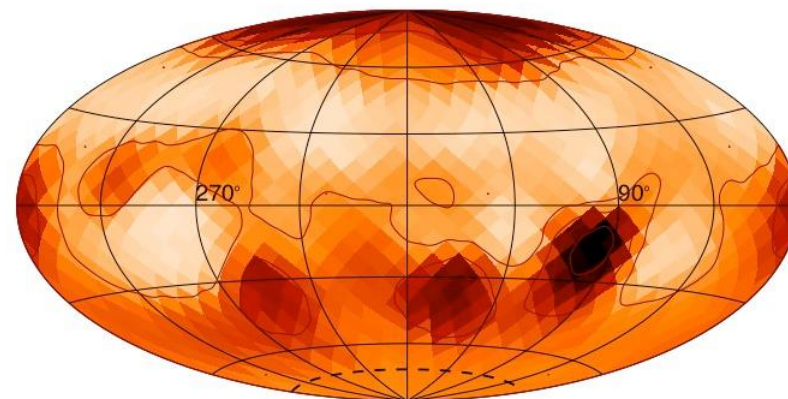
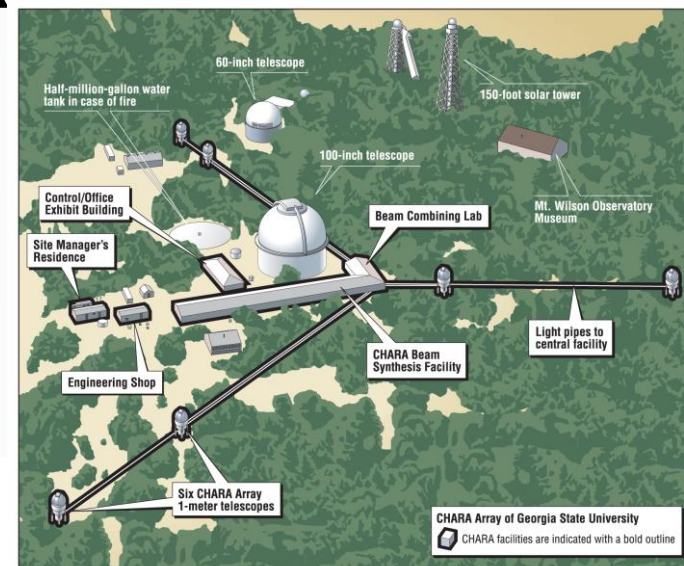


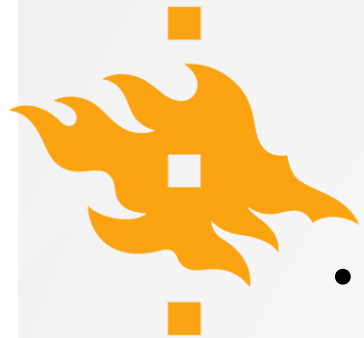


13.11.2 CENTER FOR HIGH ANGULAR RESOLUTION ASTRONOMY (CHARA)

- Mount Wilson Observatory:lla
- 6 x 1 m teleskooppia
- Maksimihalkaisija 330 m
- Ensimmäiset pintakuvat pääsarjan tähdille

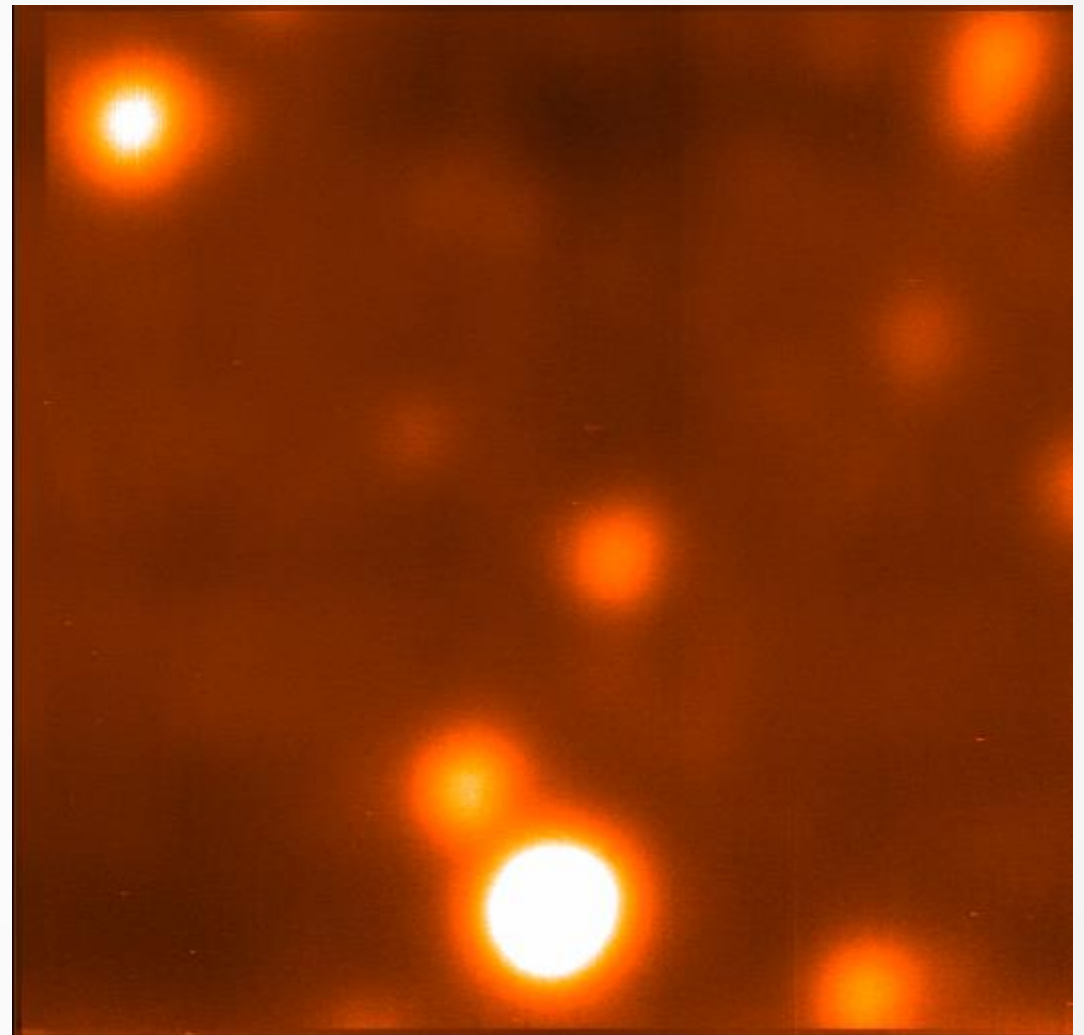
CHARA:n pilkkukartta ζ And:lle
(Roettenbacher et al. 2016)





13.12 LUCKY -KUVAUS

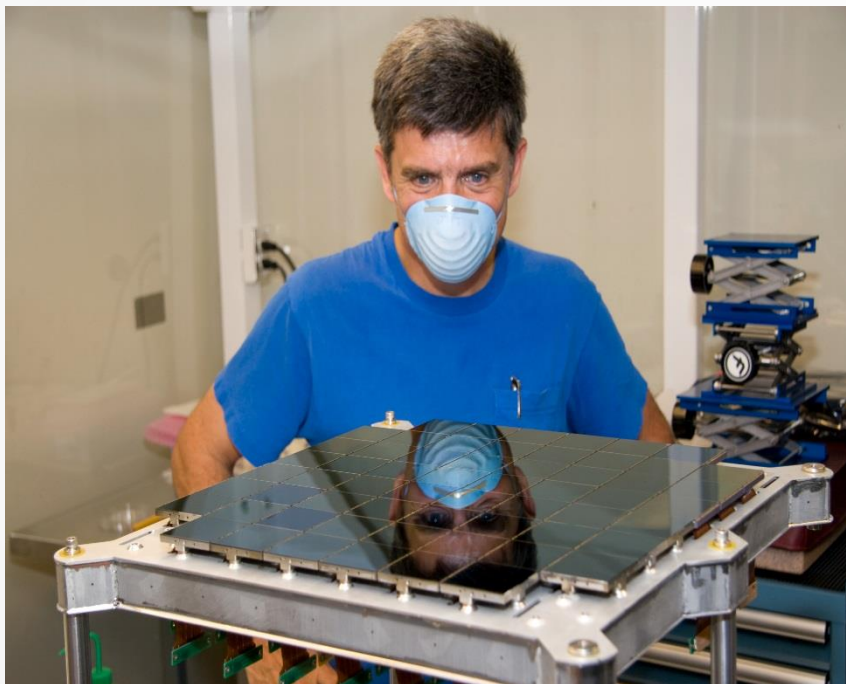
- Luetaan nopeasti lyhyitä valotuksia ($<100\text{ms}$) ja kuvista valitaan vain parhaat
 - $\Rightarrow$ jopa 5-7 krt parannus erotuskykyyn
 - Edellyttää mahd. kohinatonta lukutekniikkaa
- Kohteiden oltava melko kirkkaita, ~ 15 magnitudin ohjaustähti
- Kuvakenttä rajattu: $\sim 20''$



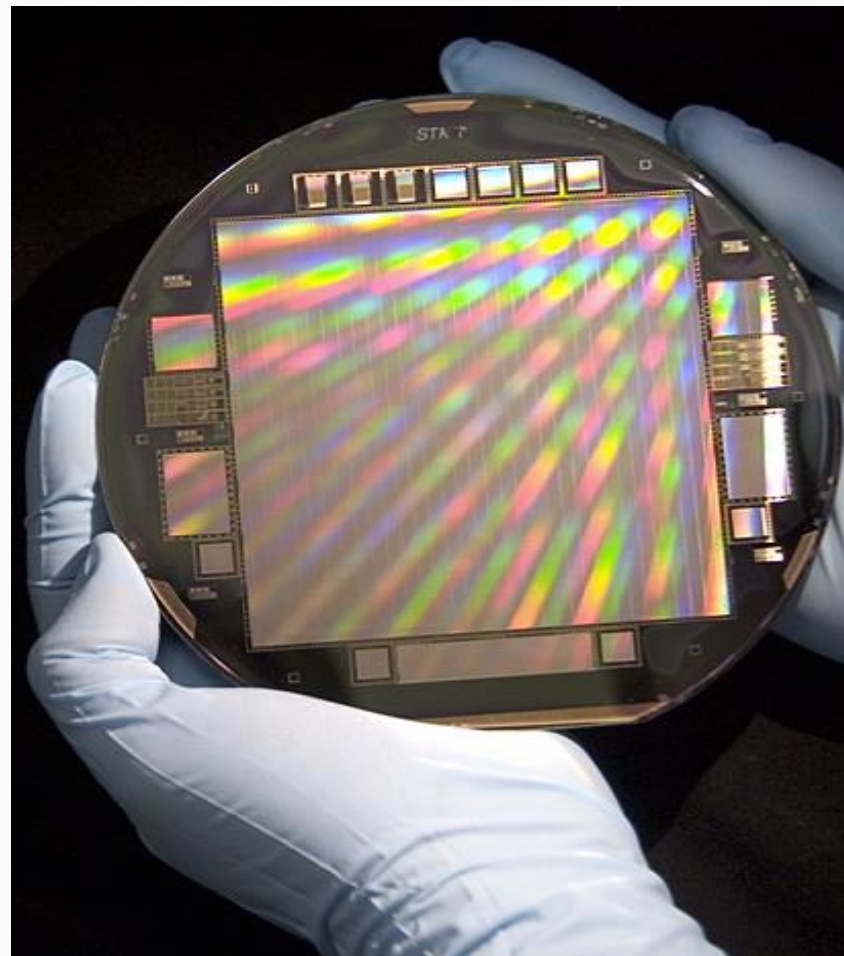
AO + Lucky Cam (Institute of Astronomy,
University of Cambridge)



13.13 MOSAIIKKI JA MONOLIITTI CCD



Yllä: Pan-STARRS:in Gigapixel
Camera (1.4 Gpix)
Vieressä: OMI 112 Mpix
monoliittikenno





13.13 MOSAIIKKI vs. MONOLIITTI

Mosaiikki:

- Rakenteeltaan monimutkaisempia ja siksi kalliimpia
- + Mahdollista valmistaa erittäin kookkaita
- Yksittäisten kennojen liitoskohdissa “railoja”
- + Lukunopeus suurempi
- + Saturaatio pienempi ongelma mosaiikille (kenno jossa kirkas tähti voidaan esim. lukea aikaisemmin)

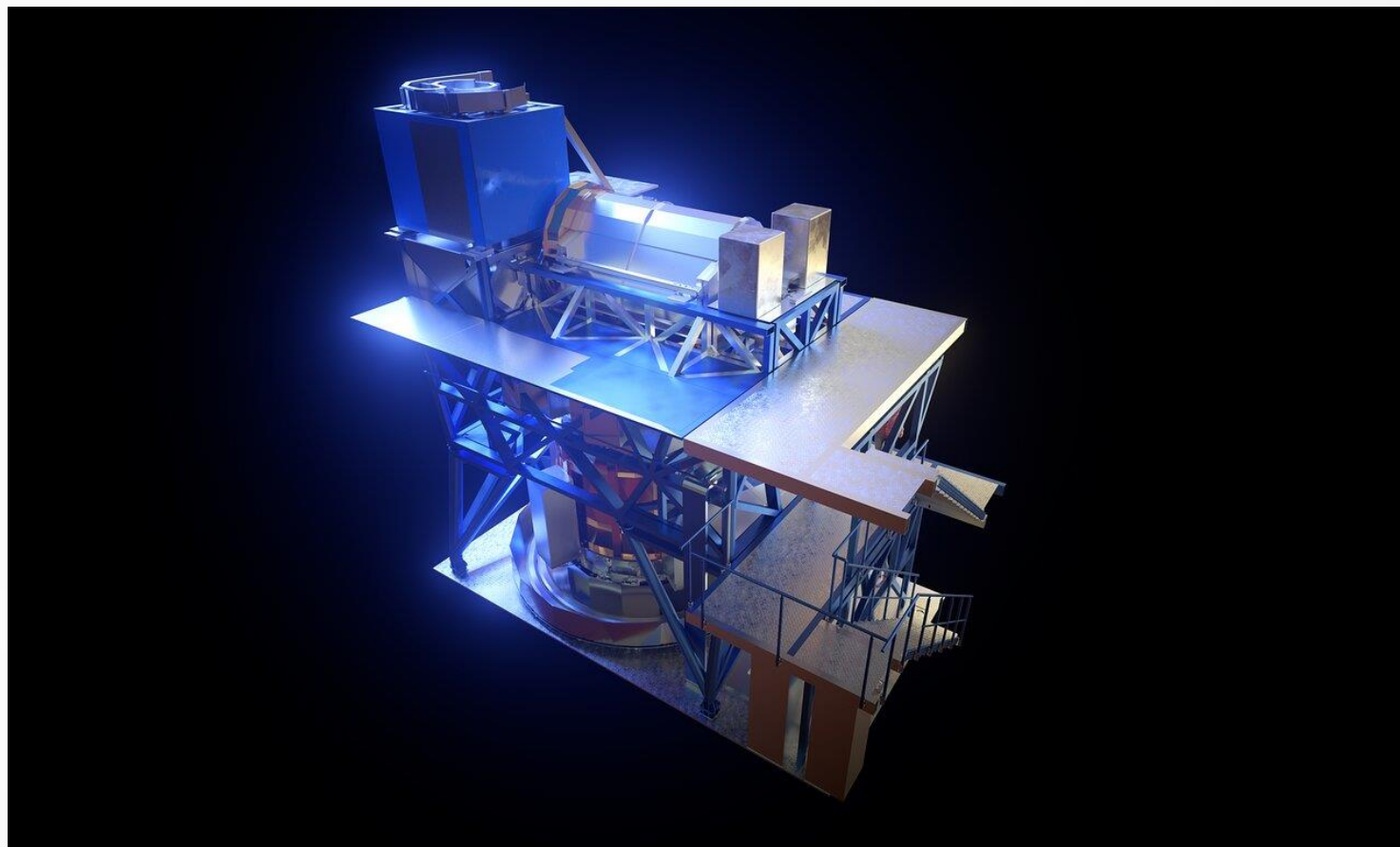
Monoliitti:

- Vaikeita valmistaa
- Herkempiä vaurioille (mosaiikissa vaurio rajoittuu pienemmälle alueelle)
- + Datat käsittely ja laadun valvonta yksinkertaisempaa



13.14 MONITOIMI-INSTRUMENTIT

- HARMONI@ELT
 - High Angular Resolution Monolithic Optical and Near-infrared Integral field spectrograph
 - 3D spektrografi: spektrit rajatun kokoisista alueista kautta kuvakentän



Tietokonekuva HARMONI:sta (ESO)