

# Omejitve pri opazovanju in fotografiranju

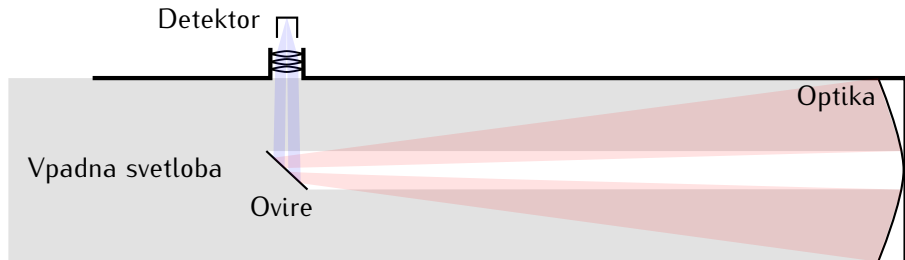
Jure Varlec

Astronomsko društvo Vega — Ljubljana,  
Univerza za tretje življenjsko obdobje

December 2012

# Tema predavanja

Shema teleskopa Newtonovega tipa z označenimi viri napak:



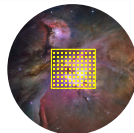
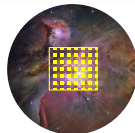
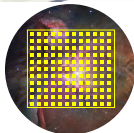
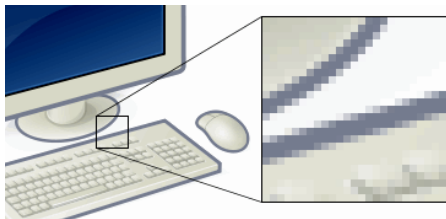
- ▶ Napak v optičnih elementih tokrat ne bomo obravnavali.
- ▶ Napake detektorja: razlike med očesom, emulzijo in CCD/CMOS.
- ▶ Napake v vpadni svetlobi: atmosferske motnje ipd.
- ▶ Napake zaradi ovir: uklon svetlobe zmanjša ločljivost.

# Lastnosti detektorja

- ▶ Ločljivost
- ▶ Zaznavanje barv
- ▶ Spektralni odziv
- ▶ Linearnost, dinamični razpon, posledice zasičenja
- ▶ Šum



- ▶ Ločljivost: najmanjša razdalja med dvema rečema, da ju na sliki še razločimo.
- ▶ Gre za število pikslov, s katerimi opišemo sliko.
- ▶ Teleskop projicira sliko na detektor, svetloba vzbudi elemente senzorja.
- ▶ Ločljivost lahko izrazimo z gostoto pikslov senzorja.

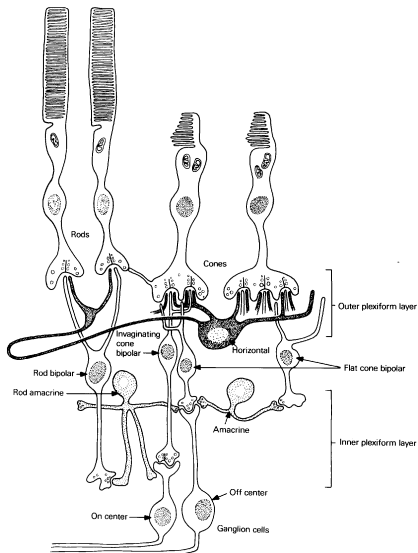


	oko	CCD	emulzija
oblika mreže	heksagonalna	kvadratna	naključna
gostota elementov [ $\text{mm}^{-2}$ ]	60 000 - 4 000 000	30 000	1 000 000





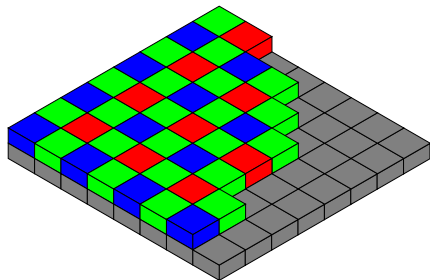
- ▶ Dva tipa čutnic: palčke in čepki.
- ▶ Palčke:
  - ▶ visoka občutljivost,
  - ▶ nizka ločljivost,
  - ▶ občutljive predvsem v modrem delu spektra.
- ▶ Čepki:
  - ▶ tri vrste, različni spektralni odzivi;
  - ▶ spektralni odzivi se prekrivajo;
  - ▶ predvsem v rumeni pegi, visoka ločljivost;
  - ▶ manj občutljivi kot palčke.
- ▶ Celice so oživčene na kompliciran način: obdelava slike teče že v očesu.





## ▶ Bayerjev filter

- ▶ Posamezni piksli imajo svoje filtre.
- ▶ Zelenih pikslov je  $2\times$  več.
- ▶ Iz take slike je barve treba interpolirati → zmanjšanje ločljivosti.



## ▶ Kolo s filtri

- ▶ Ni interpolacije barv, ohranimo polno ločljivost.
- ▶ Treba je narediti več zaporednih posnetkov.
- ▶ Lahko uporabimo najrazličnejše filtre, glede na trenutne zahteve.

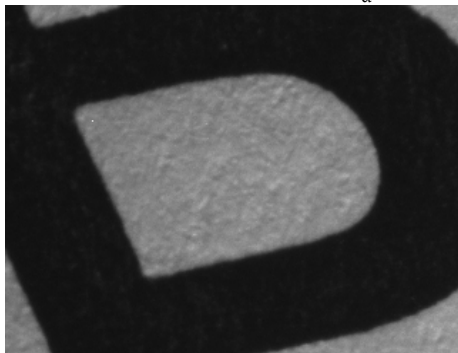


# Bayerjev filter, izguba ločljivosti

Barvna kamera Imaging Source

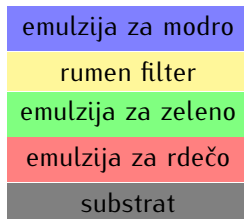


Črno-bela kamera Basler,  $H_{\alpha}$  filter



# Zaznavanje barv: emulzija

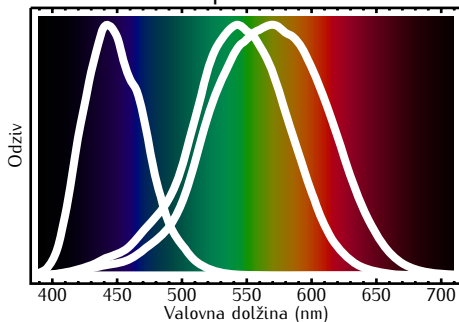
- ▶ Tipična srebrova emulzija je občutljiva samo na modro.
- ▶ Ko prva plast posname modro, jo z rumenim filtrom odstranimo.
- ▶ Naslednji plasti sta obdelani, da sta občutljivi ena pri zeleni in druga pri rdeči.
- ▶ Ker modre svetlobe ni več, ti dve plasti posnameta samo zeleno in rdečo barvo.



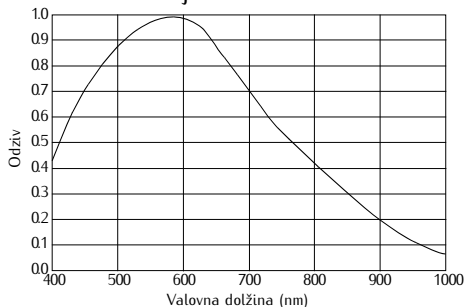


- ▶ CCD in emulzije znamo narediti tudi za IR in UV.
- ▶ Tipičen CCD senzor je bistveno občutljivejši v IR — fotoaparati imajo IR filtre.
- ▶ Spektralni odziv je lastnost sensorja brez barvnih filtrov, ki so lahko pred njim.

Odziv čepkov v očesu



Odziv Baslerjeve črno-bele kamere

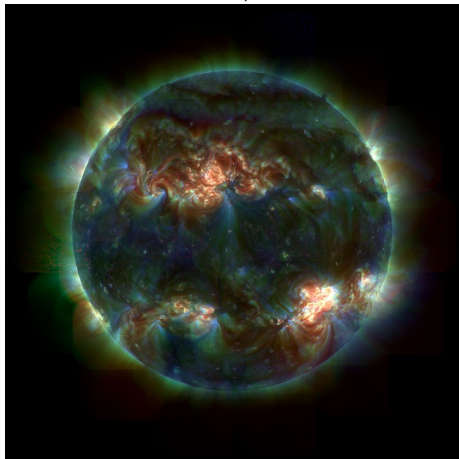


# Kaj so “prave” barve?

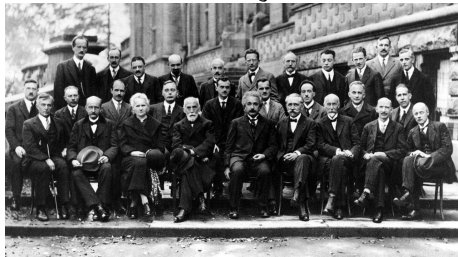
- ▶ Oko in možgani si barve “izmislijo”; veda o človeškem zaznavanju barv je komplicirano področje.
- ▶ Pri emulziji imamo pri reprodukciji barv dokaj proste roke, izbiramo tip emulzije in prilagajamo postopek razvijanja, pri razvijanju uporabljamo filtre itd.
- ▶ Polprevodniške detektorje lahko naredimo širokopasovne, uporaba kolesa s filtri omogoča zapis informacije, ki je oko ne more zaznati.
- ▶ Poleg vidne in IR svetlobe lahko v sliko dodamo tudi radijske, rentgenske in gama podatke, če jim pripišemo barve.
- ▶ Takšna slika ni “umetno pobarvana”, pač pa je verodostojna upodobitev izmerjenih podatkov.
- ▶ Nauk: **koncept “pravih barv” je nesmisel!**



Sonce v UV, tri barve



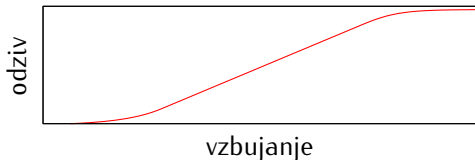
Udeleženci 5. Solvayeve konference



# Odziv detektorja glede na stopnjo vzbujanja

- ▶ Pri emulziji in CCD izbiramo osvetlitev za celo sliko, čutnice v očesu pa so neodvisne.
- ▶ Vsak detektor ima spodnji prag odziva in nasičenje.
- ▶ Med skrajnostima je CCD linearen, kar je krasno za fotometrijo.
- ▶ Emulzija ima potenčen odziv (t.i. gama krivulja), da se preračunati.
- ▶ Dinamični razpon: območje med pragom odziva in nasičenjem.
- ▶ CCD ima mnogo slabšo dinamiko od emulzije, emulzija je tipično "dovolj dobra", oko pa ima izjemen razpon.

Tipična oblika odziva linearnega detektorja

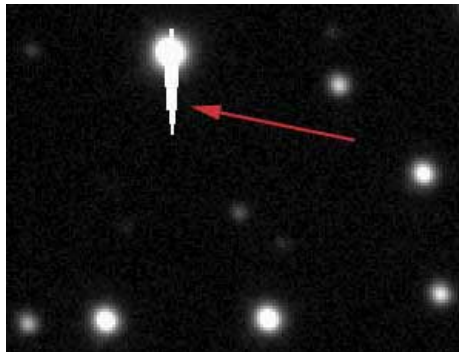






- ▶ Vsak piksel si lahko predstavljamo kot vedro. To nabira elektrone, ki jih izbijejo fotoni. Vedro se lahko napolni.
- ▶ Po nasičenju so piksli na sliki "prekurjeni", beli.
- ▶ Pri emulziji sosednji kristali niso prizadeti.
- ▶ Pri CCDju se naboj razlije v okoliške piksele (t.i. "bloom").
- ▶ V očesu pride pri močni svetlobi do sipanja v steklovini, kar lahko izgleda podobno kot bloom.

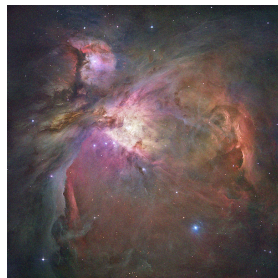
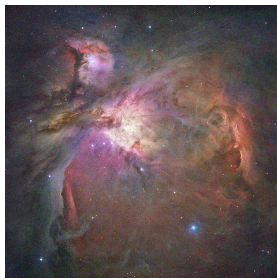
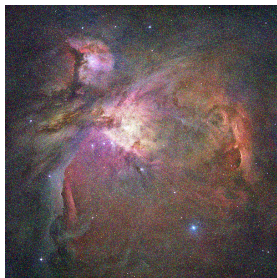
Bloom zaradi strukture senzorja tipično poteka v eni smeri.



- ▶ Glavna vira šuma: termični in fotonski.
- ▶ Termični šum:
  - ▶ Termične fluktuacije izbijajo elektrone, tudi ko ni fotonov.
  - ▶ Enakomeren po celi sliki.
  - ▶ Prizadane oko in CCD, ne pa emulzije.
  - ▶ Pri emulziji je dogajanje podobno, a na daljši rok in se pozna kot "megla".
- ▶ Fotonski šum:
  - ▶ Prihajanje fotonov in izbijanje elektronov je naključen proces.
  - ▶ Število izbitih elektronov je naključno in statistika pove, koliko se razlikuje od "pravega" števila fotonov.
  - ▶ Ta naključnost se vidi kot šum.
  - ▶ Statistika pove, da je šum močan na temnih delih slike in šibkejši na svetlih.
- ▶ Ker je šum naključen proces, se ga lahko znebimo s povprečevanjem.
- ▶ Emulzija ima trajno lastnost, zrnatost, ki izgleda enako kot fotonski šum.



1, 5 in 10 povprečenih slik:



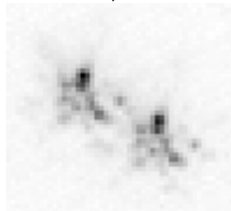
- ▶ CCD ima neenakomerno temperaturo → tudi šum je neenakomeren.
- ▶ Neenakomernost odpravimo tako, da posnamemo temno sliko. Povprečje temnih slik odštejemo od osvetljenih.
- ▶ S tem postopkom odpravimo tudi posledice nekaterih trajnih defektov senzorja.
- ▶ Oko to počne ves čas. To je razlog, da ne vidimo žil nad mrežnico.

- ▶ Da lahko na sliki zabeležimo detajle, mora senzor imeti veliko ločljivost.
- ▶ Velika ločljivost pomeni veliko gostoto pikslov, ki morajo torej biti majhni.
- ▶ Majhni piksli so majhna vedra za elektrone: hitro se zasičijo in so bolj podvrženi šumu.
- ▶ Hitro zasičenje pomeni majhen dinamični razpon: ne moremo slikati temnih objektov, ne da bi nam svetle zvezde ob njih kvarile sliko.
- ▶ Na CCDju lahko barve dobimo z Bayerjevim filtrom, ki zniža ločljivost, ali pa z ločenimi filtri, ki terjajo več zaporednih posnetkov.
- ▶ Določanje barv iz spektra svetlobe je vedno do neke mere poljubno.
- ▶ CCD je linearen, ima pa majhen dinamični razpon, zasičenje prizadane sosednje piksele.
- ▶ Posledice šuma lahko zmanjšamo s povprečevanjem.



- ▶ Turbulenca v atmosferi povzroči migotanje zvezd — “seeing”.
- ▶ Pri dolgih osvetlitvah se slika zvezde, ki bi morala biti pika, razmaže v disk.
- ▶ Pri kratkih osvetlitvah vidimo, da se zvezda razlomi v več pik.
- ▶ Pri opazovanju Lune in planetov seeing vidimo kot “kuhanje”.

Slika dveh zvezd, kratka osvetlitev:



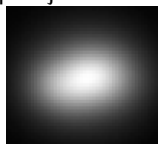
Video: seeing zvezda

Video: seeing Luna

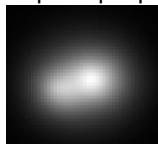


- ▶ Lahko gremo nad atmosfero (Hubblev teleskop).
- ▶ Slikanje na srečo:
  - ▶ kratki osvetlitveni časi, mnogo slik;
  - ▶ slike razvrstimo po kvaliteti, izberemo najboljše;
  - ▶ povprečimo samo najboljše slike.
- ▶ Slikanje s pikicami:
  - ▶ kratki osvetlitveni časi, mnogo slik;
  - ▶ slikamo čez luknjičasto masko;
  - ▶ luknjice predstavljajo optični interferometer.

Povprečje 50 000 slik:



Poravnava pred povprečenjem:



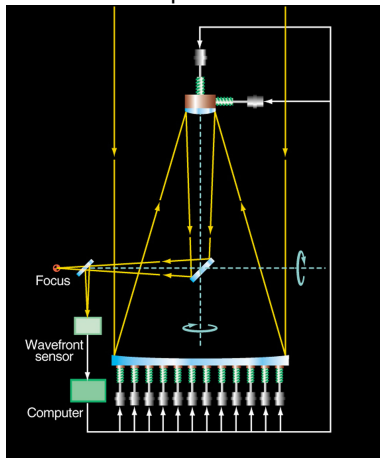
Povprečje najboljše polovice slik:





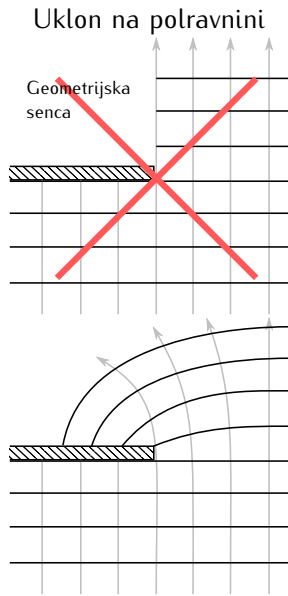
- ▶ Aktivna in adaptivna optika:
  - ▶ Segmentirano ali mehko zrcalo oziroma leča, prilagodljiv položaj segmentov.
  - ▶ Merjenje atmosferskih motenj:
    - ▶ opazovanje primerne zvezde;
    - ▶ "umetna zvezda": laserski pulzi vzbudijo atome v zraku, ki nato nekaj mikrosekund svetijo.
  - ▶ Iz meritev motenj računalnik izračuna prilagoditev zrcala ali leče, ki motnje zmanjša.

## Aktivna optika na VLT:





- ▶ Uklon je širjenje valovanja v geometrijsko senco.
- ▶ Uklonski pojavi so velikostnega reda valovne dolžine valovanja, saj jakost valovanja hitro pojema z razdaljo od uklonskega roba.
- ▶ Uklon je zelo pomemben pri zvoku, ker gre za valovne dolžine od centimetra do več metrov.
- ▶ Pri svetlobi najbolj opazen pri optičnih instrumentih.





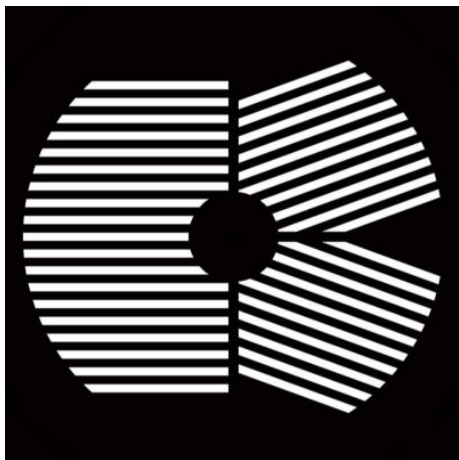
# Uklon v optičnih napravah

- ▶ Na optični poti v teleskopu so ovire: sekundarno zrcalo, pajek.
- ▶ Vsaka ovira doda uklon.
- ▶ Uklon je najlažje viden pri močnih virih svetlobe.
- ▶ "Žarki", tipični za slike močnih zvezd, so posledica uklona na pajku.





- ▶ Bahtinova maska uporablja uklon za lažje fokusiranje.
- ▶ Zaradi ponavljajočih se rež so uklonski "žarki" zelo izraziti.
- ▶ V fokusu se morajo žarki sekati, izven fokusa pa se ne.
- ▶ Mnogo lažje se je odločiti, ali se žarki sekajo, kot pa, ali je slika ostra.



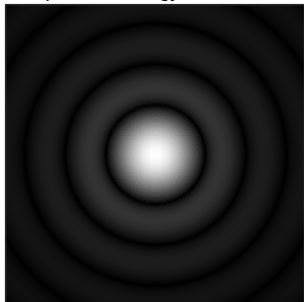
Video: Idealno fokusiranje

Video: Realno fokusiranje

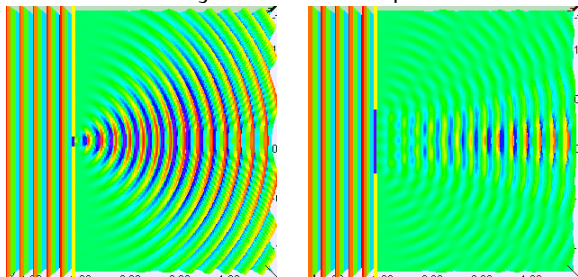


Vstopna odprtina teleskopa je že prva uklonska ovira! Manjša kot je, večja je njena uklonska slika.

Uklonska slika okrogle odprtine: Airyjeve vzorec



Uklon glede na širino odprtine



Ozka

Široka

# Velikost uklonske ovire in njene slike

- ▶ Uklonska relacija je takšna, da velika ovira da majhno sliko in obratno.
- ▶ Primera s podobno relacijo:
  - ▶ čas in frekvenca (zelo opazno pri radijski telegrafiji),
  - ▶ Heisenbergovo načelo nedoločenosti (npr. nedoločenost položaja in hitrosti)
- ▶ Posledica: velikega teleskopa si ne želimo le zavoljo večje količine svetlobe, ki jo zbere, ampak tudi zato, ker ima manjšo uklonsko sliko.
- ▶ Tipično so atmosferske motnje mnogo večji problem, a tudi tega lažje rešimo z velikim teleskopom: slikanje na srečo ali čez uklonsko masko terjata več zajete svetlobe.

# Vpliv Airyjevega vzorca na sliko

- ▶ Vsaka točka se preslika v Airyjeve vzorec.
- ▶ Zvezda je točkasta, torej postane Airyjeve oblike.
- ▶ Razsežen objekt (planet, meglica) je iz mnogo točk; tam vsaka točka postane nekakšno povprečje sosednjih, vzorec povprečevanja ustreza Airyjevemu.
- ▶ Takšno povprečevanje vidimo kot izgubo ločljivosti.

Slika, omejena z ločljivostjo "senzorja"



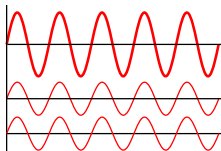
Vpliv 2 px široke uklonske slike



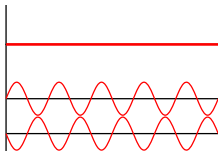


- ▶ Še bolj kot pri optični astronomiji je uklon pomemben pri radijski.
- ▶ Posledicam uklona in atmosfere se da izogniti naenkrat z uporabo interferenčnih pojavov.
- ▶ Interferenca nastopi, ko seštejemo dva vala.

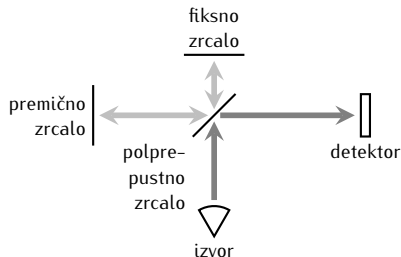
Konstruktivna interferenca



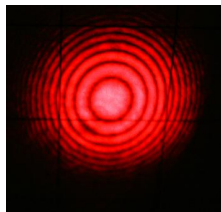
Destruktivna interferenca



## Michelsonov interferometer



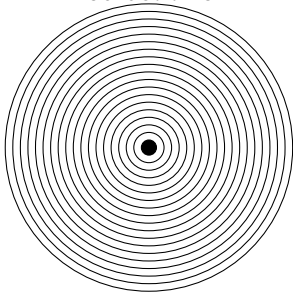
## Tipičen interferenčni vzorec



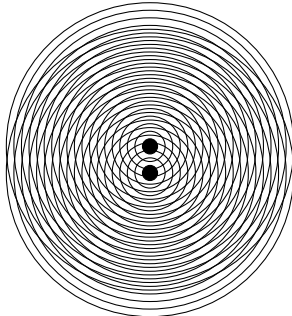
# Prostorska koherenca

Interferenca lahko nastopi samo, če sta vala prostorsko koherentna. Razsežno telo (zvezda) je sestavljeno iz več točk, ki sevajo neodvisno; ker so prostorsko ločene, interference ni. Ker pa gledamo od daleč, je zvezda skoraj točkasta.

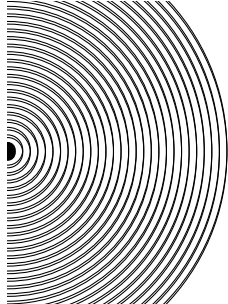
Točkast izvor



Dva izvora



Dva izvora od daleč



- ▶ S preprosto meritvijo prostorske koherence svetlobe lahko izmerimo velikost zvezde.
- ▶ Svetlobo z dveh teleskopov speljemo skupaj.
- ▶ Razdaljo med teleskopoma spreminjamo in gledamo, kdaj interferenca izgine.
- ▶ Iz te razdalje lahko izračunamo velikost zvezde.
- ▶ Tehnično zahteven korak: pravilno združiti svetlobo z obeh teleskopov.



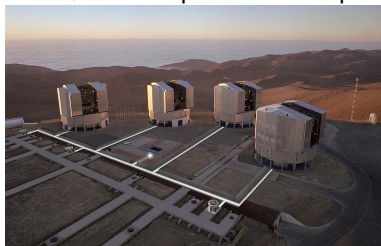


- ▶ Združiti signal je mnogo lažje v radijski astronomiji: elektronika dovolj hitra, uporabimo antene in radijsko valovanje posnamemo.
- ▶ Če uporabimo več teleskopov, razporejenih v mrežo, lahko iz signalov izračunamo sliko.
- ▶ Ločljivost slike je takšna, kot bi imeli teleskop z vhodno odprtino, enako razdalji med najbolj oddaljenima teleskopoma v mreži.
- ▶ Zaradi velike valovne dolžine radijskih valov je interferometrija edini pameten način, da dobimo sliko.

VLA, 27 radijskih teleskopov



VLT, 4 + 4 optični teleskopi



- ▶ Lastnosti detektorjev:
  - ▶ ločljivost,
  - ▶ zaznavanje barv,
  - ▶ spektralni odziv,
  - ▶ odziv glede na jakost vzbujanja,
  - ▶ šum.
- ▶ “Seeing”: posledica turbulentne atmosfere.
  - ▶ Pri dolgih osvetlitvah se slika samo zamaže.
  - ▶ Nekoliko si lahko pomagamo s slikanjem na srečo.
  - ▶ Boljša rešitev je uporaba interferometrije s slikanjem čez masko.
  - ▶ Najboljši rešitvi sta adaptivna optika in teleskop v vesolju.
- ▶ Uklon svetlobe:
  - ▶ Ovire na optični poti spremenijo obliko svetlih zvezd.
  - ▶ Velikost vstopne odprtine omeji ločljivost teleskopa.
  - ▶ Omejitvi se izognemo z interferometrijo.