

OPT/AO

L11

Moderní astrooptika

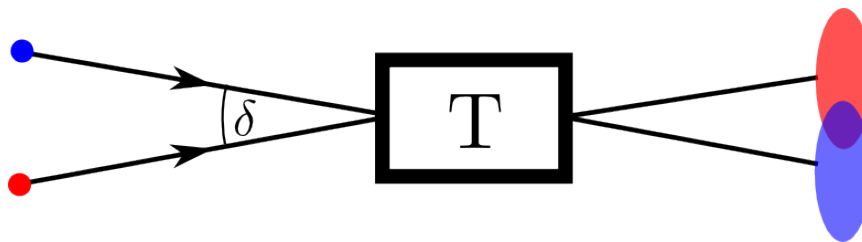
přínos teleskopu pro astronomii

- zesílení optického signálu
 - umožňuje pozorovat slabé objekty (např. vzdálené galaxie)
 - závisí na průměru vstupní pupily teleskopu
- zlepšení rozlišení
 - umožňuje rozlišit detaily pozorovaného objektu (např. dvojhvězdy)
 - závisí na průměru zrcadla/pupily teleskopu (Dawes 19.stol.)

závěr: čím větší zrcadlo, tím lépe!

max. průměry zrcadel $D \approx 10\text{ m}$

rozlišení: nejmenší úhel mezi dvěma rozlišenými bodovými objekty



neozbrojené oko: $\delta \approx \begin{cases} 1' & \text{silné osvětlení} \\ 2' - 3' & \text{slabé osvětlení} \end{cases}$

Slunce a Měsíc $\approx 30'$

Titan $\approx 0,6''$

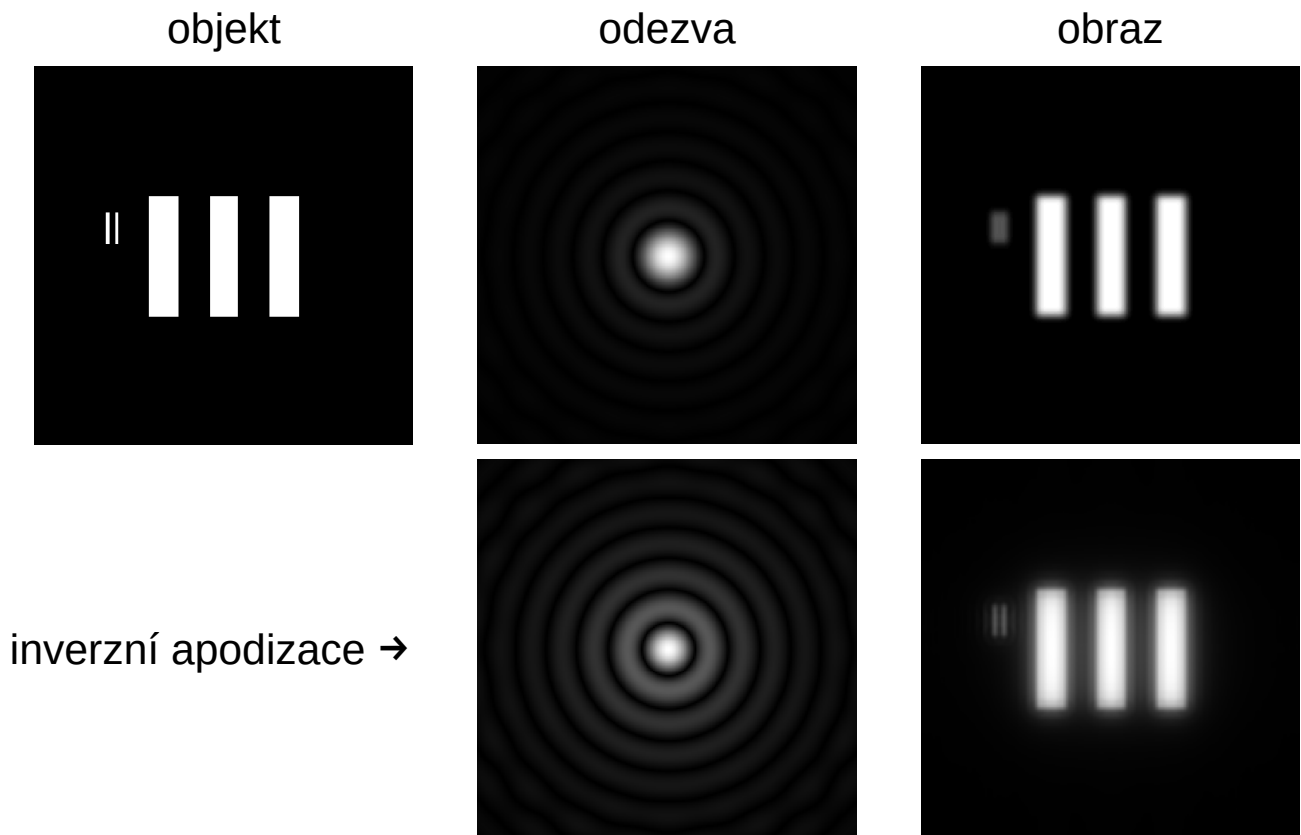
Alcor – Mizar $\approx 12'$

Pluto $\approx 0,1''$

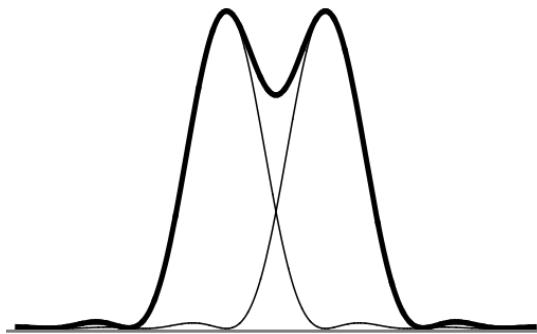
Saturn $\approx 20''$

Betelgeuze $\approx 0,05''$

impulzní odezva



Rayleighův limit



- rozlišení určeno pološířkou centrálního maxima

$$\delta [\text{rad}] = 1,22 \lambda / D \quad \delta_{\text{VIS}} ['] \approx 0,12 / D$$

- odpovídá vizuálnímu pozorování
- lze překonat digitálním zpracováním dat (superrozlišení)

př. Keck I/II $D = 10 \text{ m}$

teoreticky $\delta \approx 0,01''$

skutečnost $\delta \approx 1''$ (dlouhé expozice – tzv. seeing)

$\delta \approx 0,1''$ (krátké expozice)

pozemské teleskopy

- šíření signálu atmosférou
- nehomogenní náhodné prostředí
- turbulence ovlivňuje kvalitu obrazu

fyzikální model (Kolmogorov 1941)

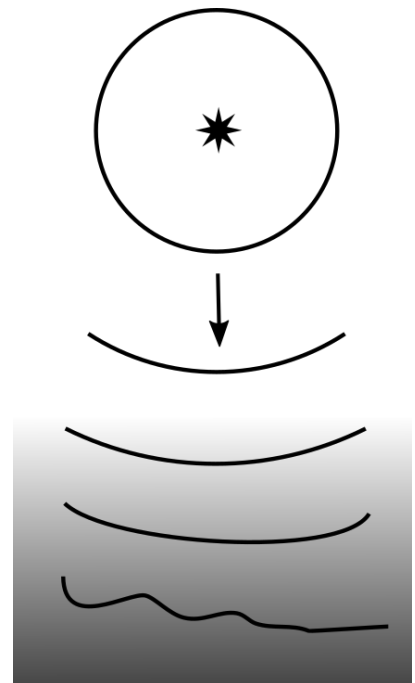
- Friedův parametr r_0
- doba života fluktuací τ_0
- difrakčně limitované zobrazení

$$D \ll r_0, \delta \sim \lambda/D$$

- atmosférou limitované zobrazení

$$D \gg r_0, \delta \sim \lambda/r_0 \text{ (seeing)}$$

typicky $r_0 \approx 20 \text{ cm}$, $\tau_0 \approx 1 \text{ ms}$

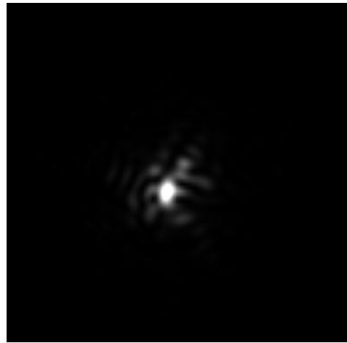


krátké expozice

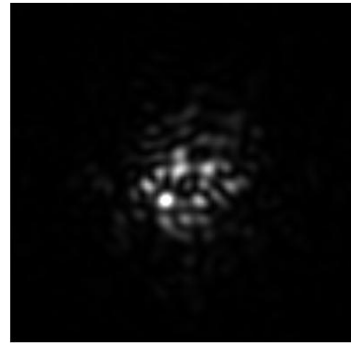
(A) stejný teleskop, různé atmosférické podmínky



$$r_0 = D/2$$



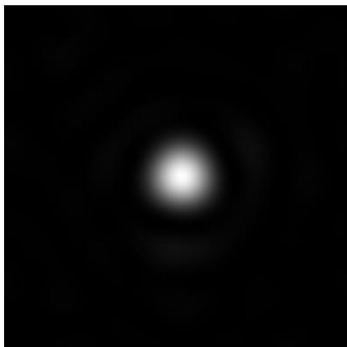
$$r_0 = D/4$$



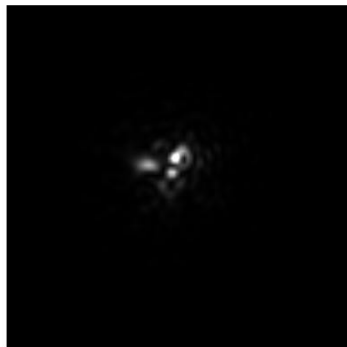
$$r_0 = D/8$$

obrazec velikosti λ/r_0 s difrakčně limitovanými skvrnami

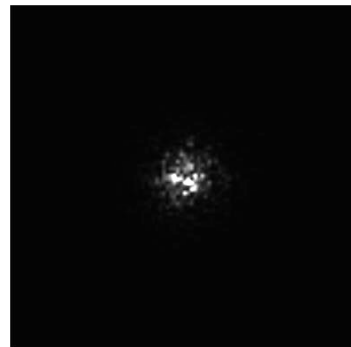
(B) stejné podmínky, různé teleskopy



$$D = r_0$$



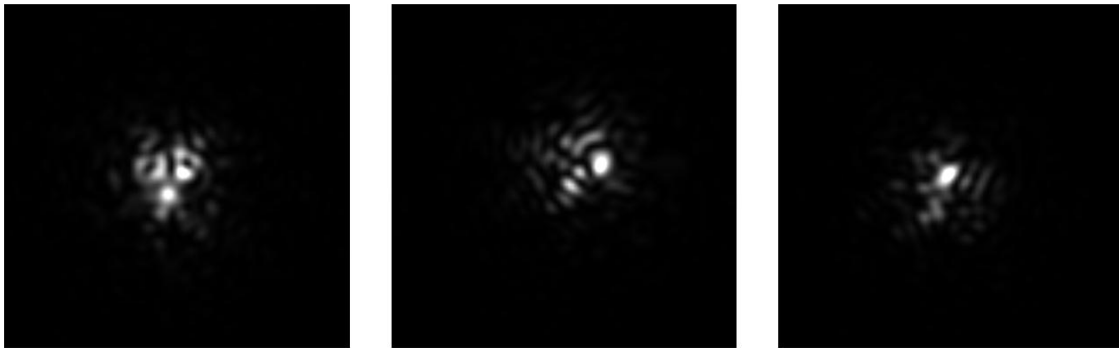
$$D = 5r_0$$



$$D = 10r_0$$

v tomto režimu rozlišení nezávisí na průměru teleskopu

(C) stejné podmínky, stejný teleskop



$$D = 6r_0$$

rychlé náhodné změny polohy a tvaru obrazce

kosmický teleskop

výhody

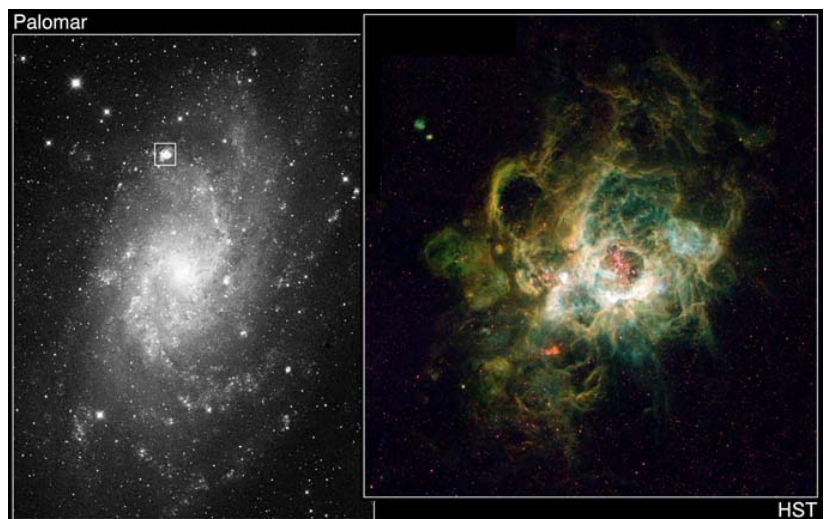
- žádné turbulence
- neomezené spektrum



nevýhody

- vysoká cena
- problematická údržba

→ snaha o vylepšení pozemských teleskopů



speklová interferometrie

krátké expozice \longrightarrow statistika fluktuací \longrightarrow zaostření obrazu

model detekce

$$i_{\alpha}(x) = \int o(x') s_{\alpha}(x - x') dx'$$

- stochastická odezva (PSF)
- α čísluje krátké expozice

spektrum

$$I_{\alpha}(f) = O(f) S_{\alpha}(f)$$

spektrální hustoty obrazu a PSF

$$I(f) = \langle |I_{\alpha}(f)|^2 \rangle, \quad S(f) = \langle |S_{\alpha}(f)|^2 \rangle$$

středování přes krátké expozice

$$I(f) = |O(f)|^2 S(f)$$

získáme intenzitu spektra objektu $|O(f)|^2$

- neposkytuje plnou informaci o (komplexním) spektru
- funguje pouze pro některé objekty (např. dvojhvězdy)

$$o(x) \propto \delta(x - a/2) + \delta(x + a/2) \rightarrow |O(f)|^2 \propto \cos(f a/2)$$

zobecnění: rekonstrukce fáze $\phi(f) = \arg\{O(f)\}$

$$\arg\{\langle I_{\alpha}^*(f) I_{\alpha}(f + \Delta f) \rangle\} = \phi(f + \Delta f) - \phi(f) + \arg\{\langle S_{\alpha}^*(f) S_{\alpha}(f + \Delta f) \rangle\}$$

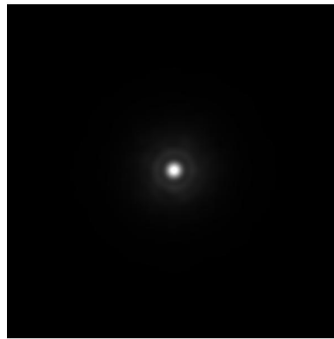
intenzita je reálná funkce $\rightarrow \phi(0) = 0$

metoda *shift-and-add*

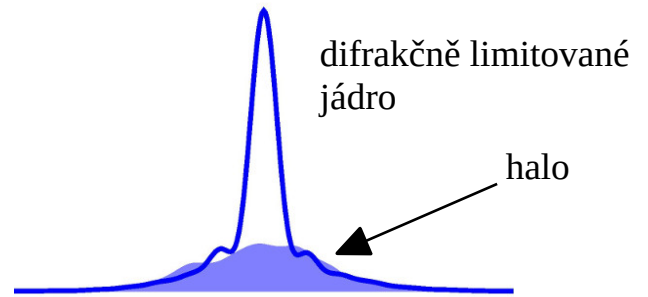
- sčítání vzájemně posunutých krátkých expozic
- nejjasnější pixel je vždy posunut do středu obrazu



součet bez posunů



součet s posunů



řez

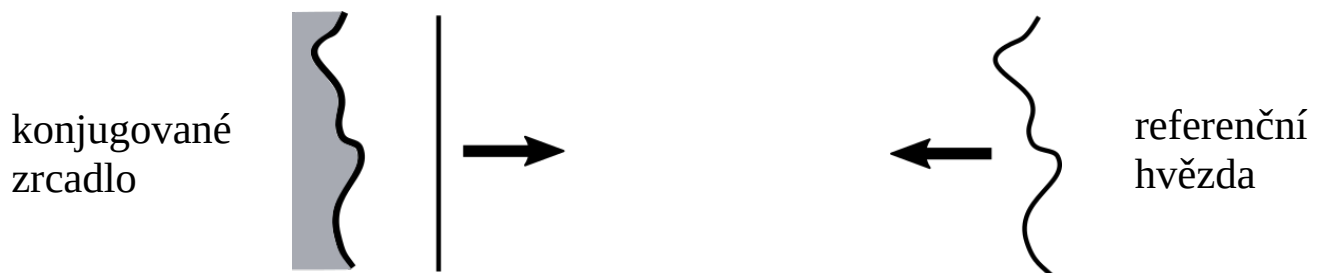
konjugace fáze

slabé astronomické objekty

- nelze pořídit dostatečně krátké expozice
- statisticky motivované postupy nelze použít
- týká se naprosté většiny objektů (např. vzdálené galaxie)

rozvoj IT a prostorové modulace signálu (konec 20. stol.)

- měření a korekce turbulence v reálném čase



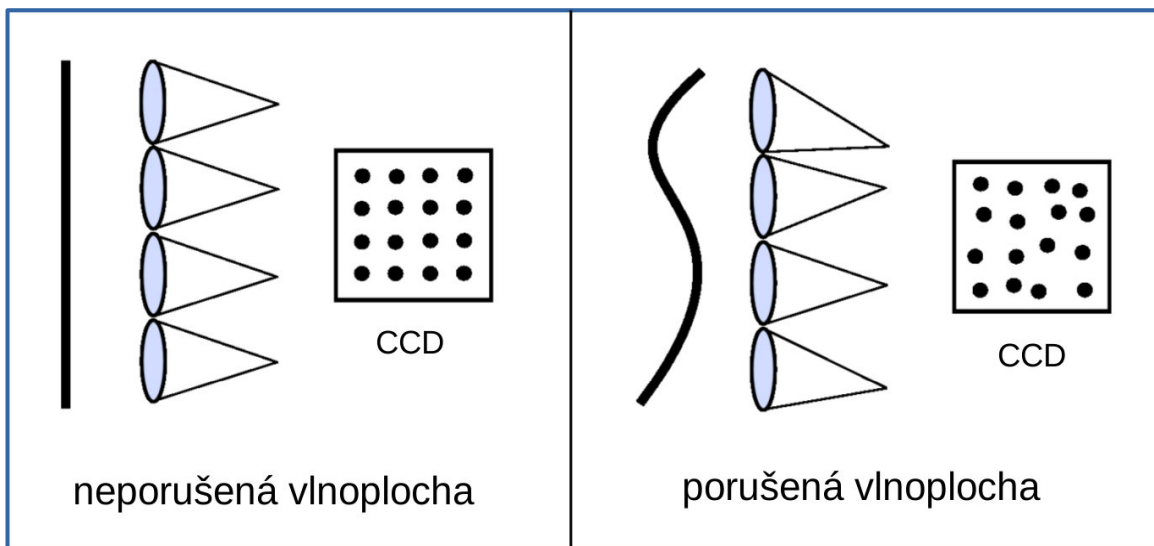
adaptivní optické systémy

adaptivní systém mění své optické vlastnosti na požádání

základní prvky

- senzor vlnoplochy měří signál referenční hvězdy
- deformovatelné zrcadlo odstraňuje vliv turbulence
 - pro referenční hvězdu
 - pro pozorovaný objekt
- systém běží v uzavřené smyčce s frekvencí stovek Hz

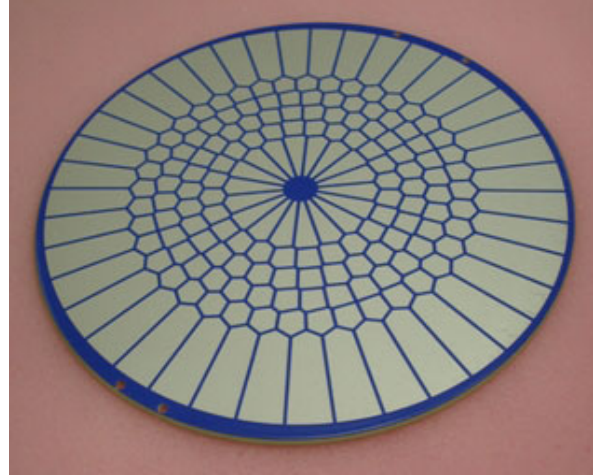
senzor vlnoplochy – obvykle Shackův-Hartmannův senzor



AO systém je řízen tak, aby byl vynulován výstup S-H detekce

modulace fáze

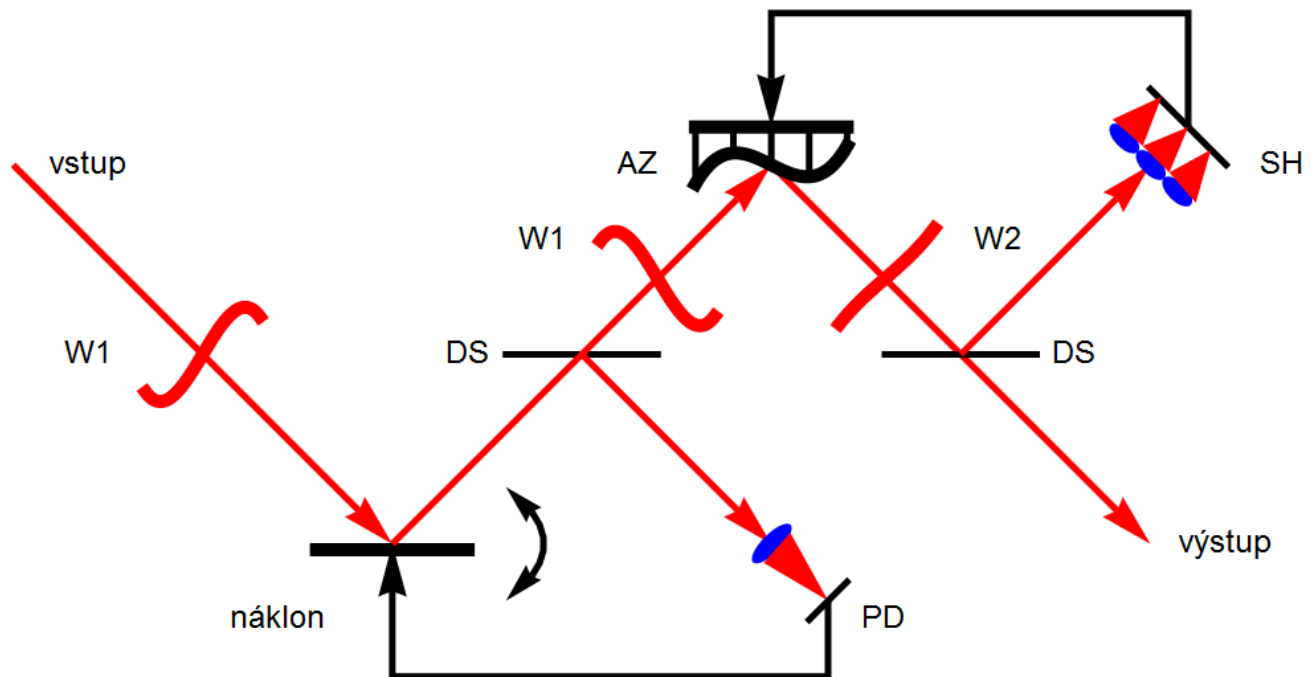
deformovatelné zrcadlo



<http://subarutelescope.org>

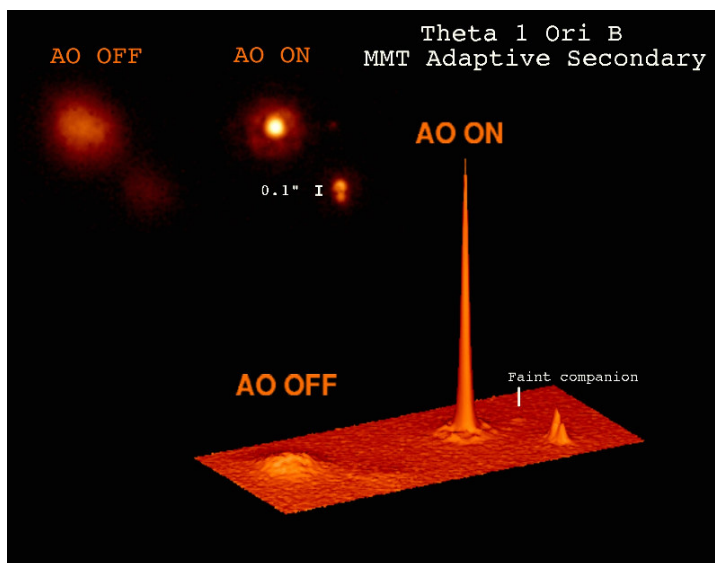
- vloženo do dráhy svazku
- různé technologie
 - piezzo
 - tenká magnetická fólie
 - MEMS (micro electro-mechanical systems)
- lokální změna tvaru zrcadla
- počet aktuátorů $\sim (D/r_0)^2$

AO systém



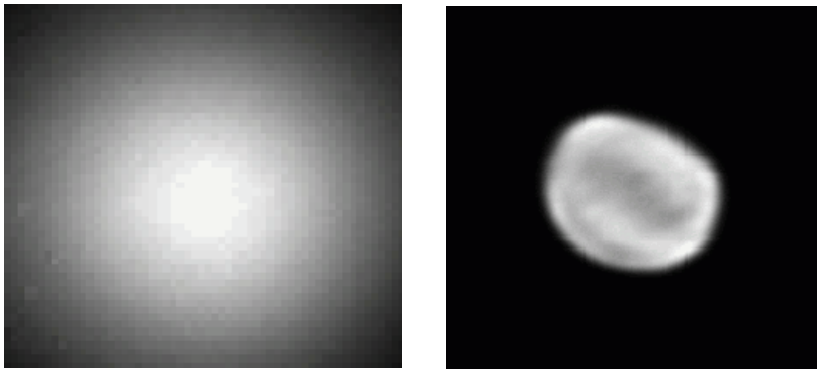
výhody AO korekce

- dosažení difrakčně limitovaného zobrazení
- zvýšení citlivosti



<http://exoplanet.as.arizona.edu>

asteroid 4 Vesta



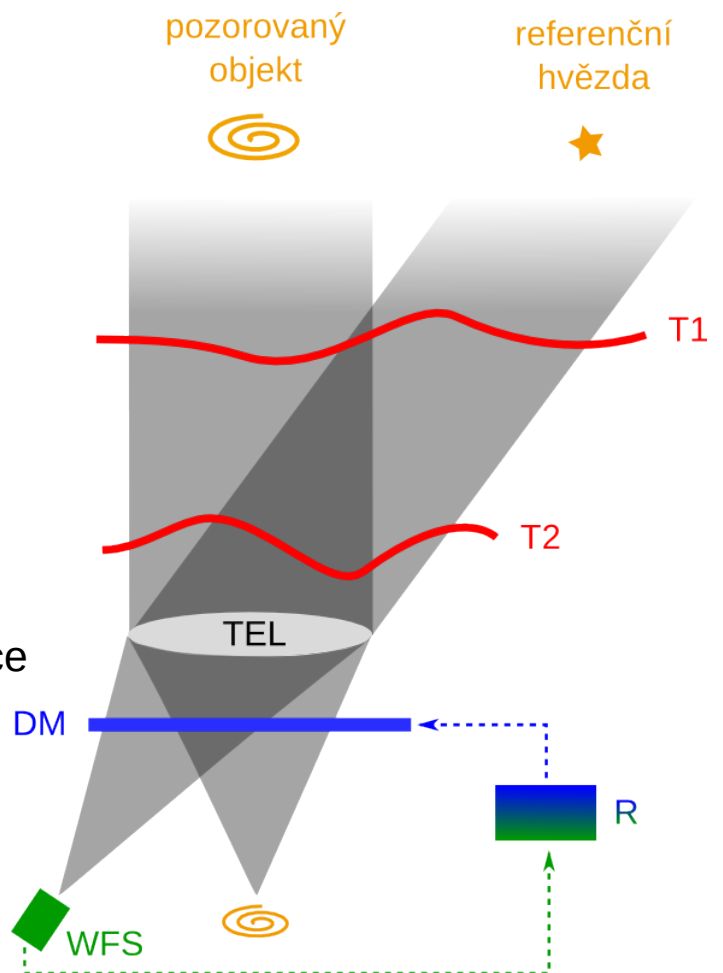
<http://www2.keck.hawaii.edu>

izoplanatický úhel

- ref. hvězda musí ležet poblíž pozorovaného objektu
- ref. hvězda musí být jasná
- nedostatek přirozených ref. hvězd

řešení

- laserové ref. hvězdy (LGS)
- laserová tomografie turbulence (LTAO)
- vícenásobně konjugovaná AO (MCAO)



laserové referenční hvězdy

sodíkové referenční hvězdy

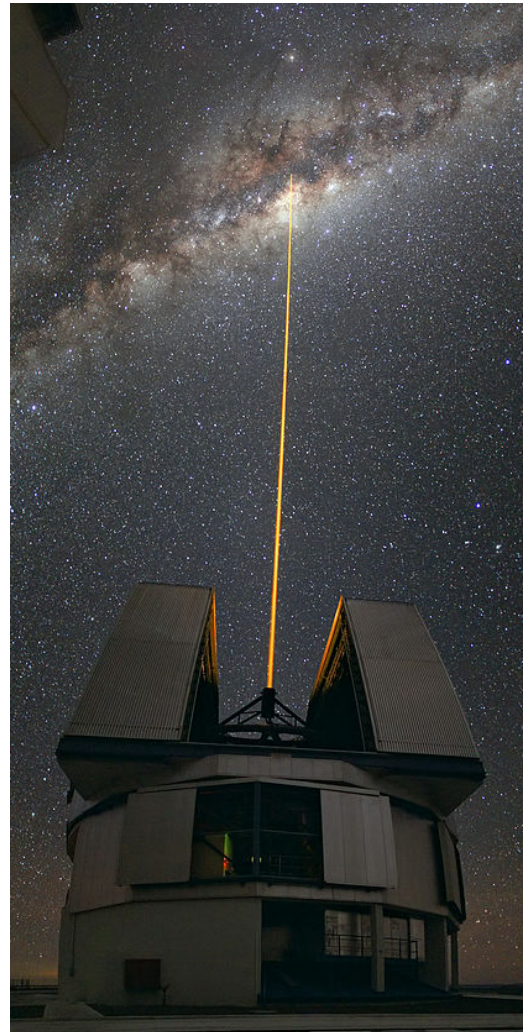
- excitace laserem
- výška ≈ 90 km
- velikost ≈ 50 cm

výhoda

- lze generovat kdekoli
v zorném poli

nevýhoda

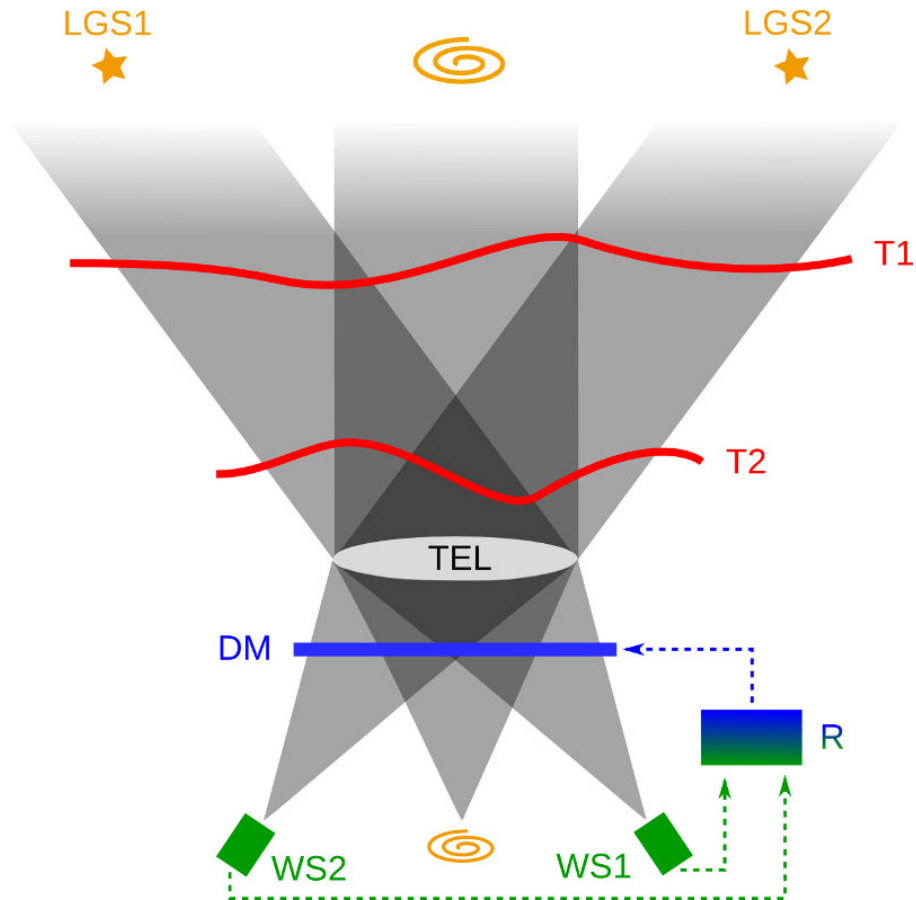
- necitlivé na náklon
- nutno kombinovat s NGS



Laser Towards Milky Ways Centre" by ESO/Yuri Beletsky (ybialets at eso.org)

šíření světla LGS atmosférou je poněkud odlišné oproti NGS

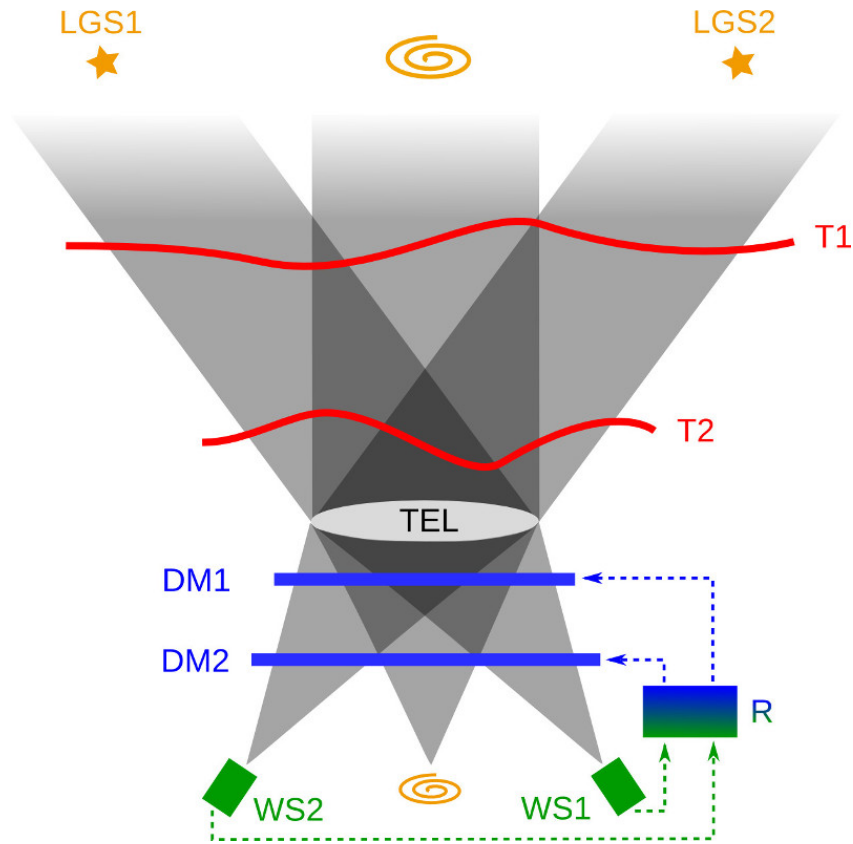
laserová tomografie turbulence



měření několika referenčních hvězd současně

- 3D rekonstrukce turbulence
- korekce středu zorného pole
- nevyžaduje blízkou NGS/LGS

vícenásobně konjugované AO systémy



více ref. hvězd a více WFS

- korekce turbulence nezávisle pro různé vrstvy atmosféry
- korekce v celém zorném poli

GeMS (Gemini South)

- korigované pole $85'' \times 85''$
- difrakčně limitované zobr. v IČ oblasti $\text{FWHM} \approx 0.07''$
- zisk $1,5^m$ (v IČ lepší než HST)

závěr

- využití pokročilé adaptivní optiky umožňuje dosáhnout difrakčně limitovaného zobrazení v IČ na velkých pozemských teleskopech
- na těchto vlnových délkách pozemské teleskopy již dnes překonávají HST jak v rozlišení tak citlivosti
- další pokrok v technologii adaptivní korekce by měl umožnit implementaci AO systémů na plánovaných obřích teleskopech
- korekce ve viditelné oblasti je stále problematická
- kosmické teleskopy budou i nadále nepostradatelné pro spektrální pásma absorbovaná atmosférou a speciální aplikace (astrometrie)