

OPT/OZI

L11

# Aplikace IV: Atmosférická optika

standardní rozlišení teleskopu

$$\Delta\theta \approx \lambda/D [\text{rad}]$$

např. Keck 10m

$$\Delta\theta \approx 0,01''$$

reálně

krátké expozice  $\Delta\theta \approx 0,1''$

dlouhé expozice (seeing)  $\Delta\theta \approx 1''$

Kolmogorova teorie turbulence

- turbulence je nestabilní, turbulentní buňka se rozpadá, přenos kinetické energie z větších škál do menších
- proces končí disipací kinetické energie v důsledku viskozity kapaliny

Friedův parametr  $r_0$

- charakterizuje stav atmosféry
- $D = r_0$  standardní odchylka vlnoplochy v pupile způsobená turbulentí je **1 rad**

$$\Delta\theta = \begin{cases} \lambda/D, & D \ll r_0 & \text{difrakčně limitované zobrazení} \\ \lambda/r_0, & D \gg r_0 & \text{atmosférou limitované zobrazení} \end{cases}$$

- VIS na dobrém stanovišti  $r_0 \approx 0,2 \text{ m}$

simulace

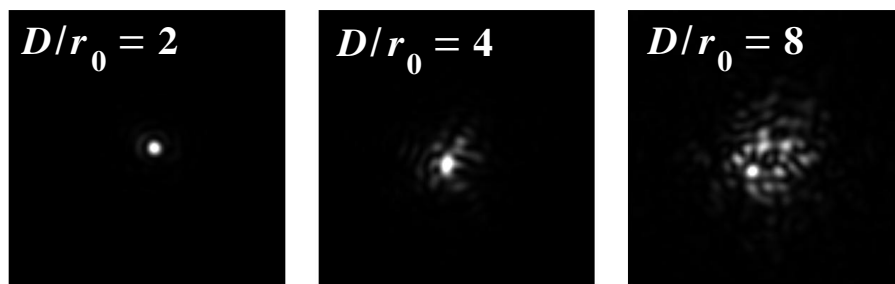
spektrální hustota fluktuace fáze

$$\Phi^K = 0,023 r_0^{-5/3} \rho^{-11/3}, \quad \rho = \sqrt{f_x^2 + f_y^2}$$

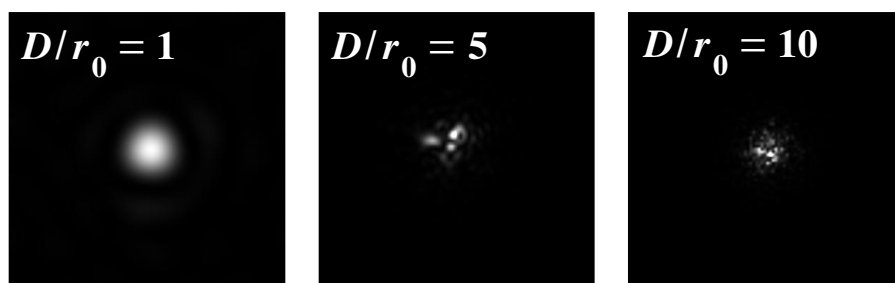
spektrum fáze vzorkujeme z normálního rozdělení

## zobrazování bodového objektu – krátké expozice

- konstantní apertura



- konstantní turbulence



- opakované krátké expozice



### další charakteristiky

- izoplanatický úhel  $\alpha \approx 0,3 r_0 / H$  výška turbulentní vrstvy  $\approx 5 \text{ km}$
- doba života fluktuací  $\tau \approx 0,3 r_0 / V$  rychlost větru  $\approx 10 \text{ m s}^{-1}$

# speklová interferometrie

zobrazování s náhodnou impulzní odezvou

model:

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

středovaná spektra:

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

spektrální hustoty

$$I(f) = \langle |I_{\alpha}(f)|^2 \rangle \longrightarrow \text{znám ze středování přes krátké expozice pozorovaného objektu}$$

$$S(f) = \langle |S_{\alpha}(f)|^2 \rangle \longrightarrow \text{znám ze středování přes krátké expozice bodového objektu}$$

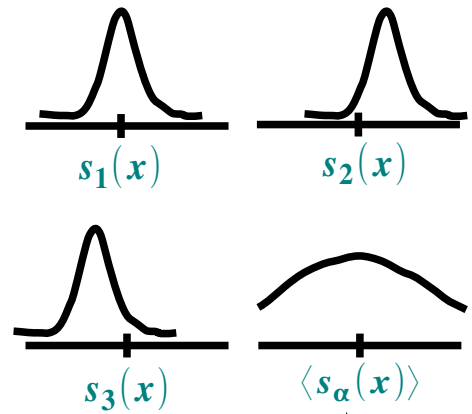
fáze spektra objektu je ztracena, vhodné pro některé objekty (dvojhvězdy apod.)

$$|O(f)|^2 \propto \cos^2(f \Delta/2) \quad \text{dvojhvězda se separací } \Delta$$

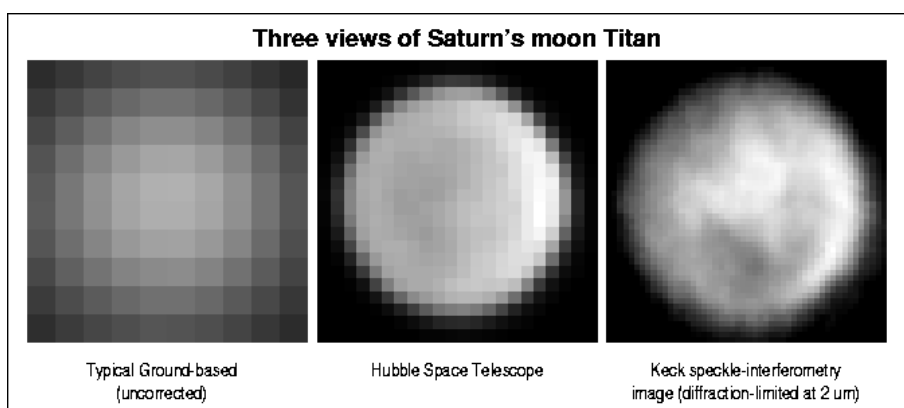
zobecnění: rekonstrukce fáze  $\phi(f) = \arg\{O(f)\}$

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

$$\Im o(x) = 0 \rightarrow \phi(0) = 0$$

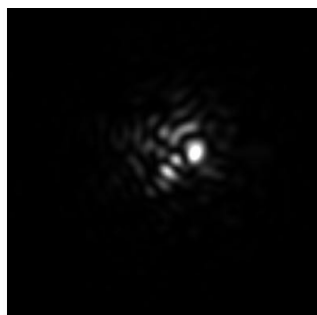


čísluje krátké expozice



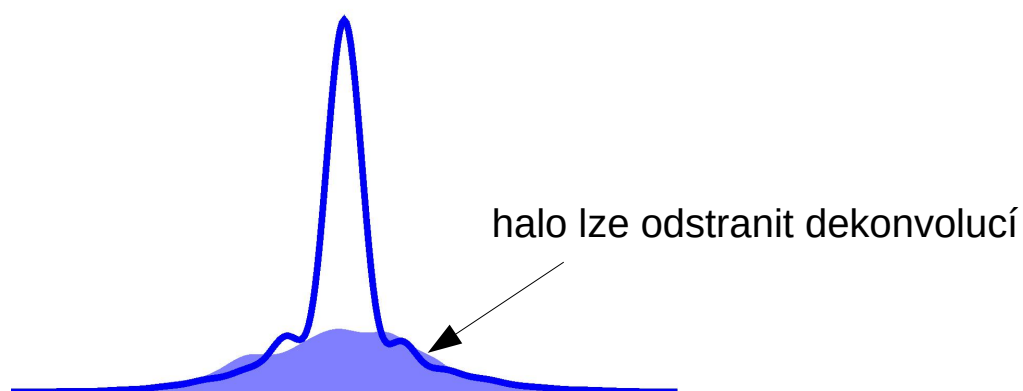
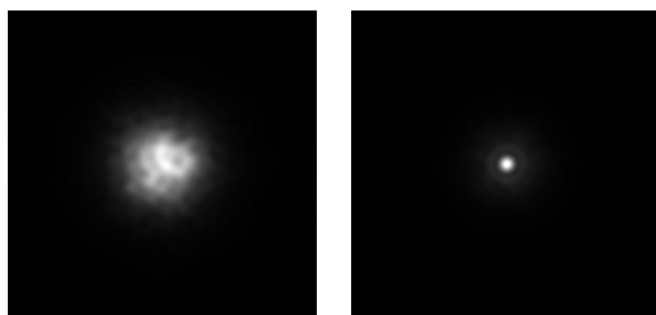
## metoda *shift-and-add*

- detekce mnoha krátkočasových ( $\sim 1\text{ms}$ ) expozic



...

- sečtení krátkočasových expozic = dlouhočasová expozice (seeing)
- odstranění náklonu – krátkočasové expozice vycentrujeme na nejjasnější pixel

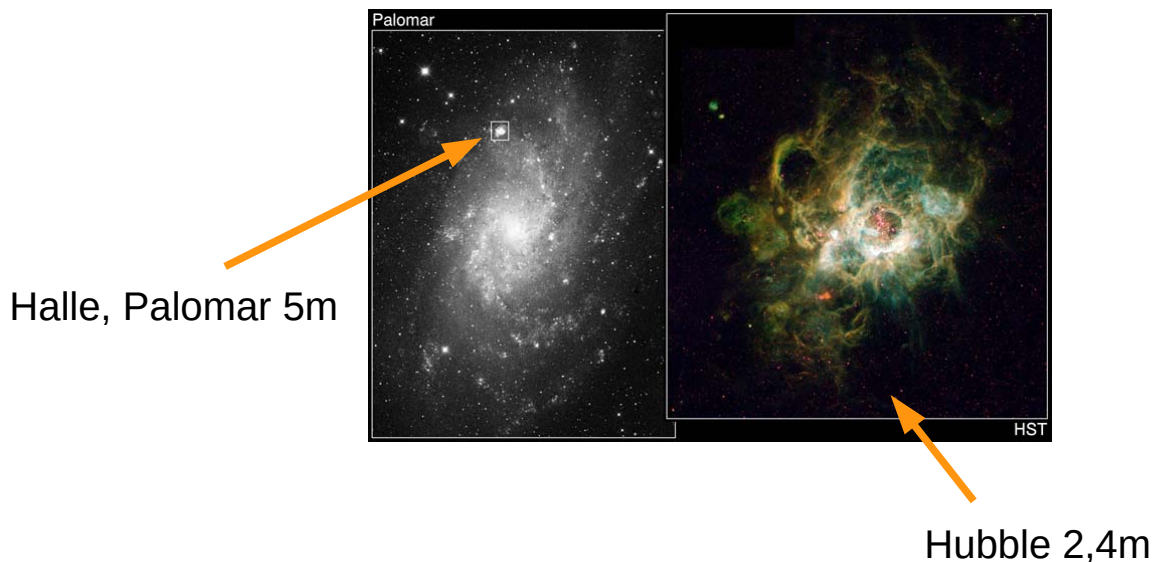


- hlavní nevýhoda těchto metod je nutnost pořizování krátkočasových expozic → nelze pro slabé objekty (t.j. většinu objektů)

## adaptivní optika

### motivace

- zlepšení rozlišení při detekci slabých objektů
- levnější alternativa teleskopů umístěných mimo atmosféru



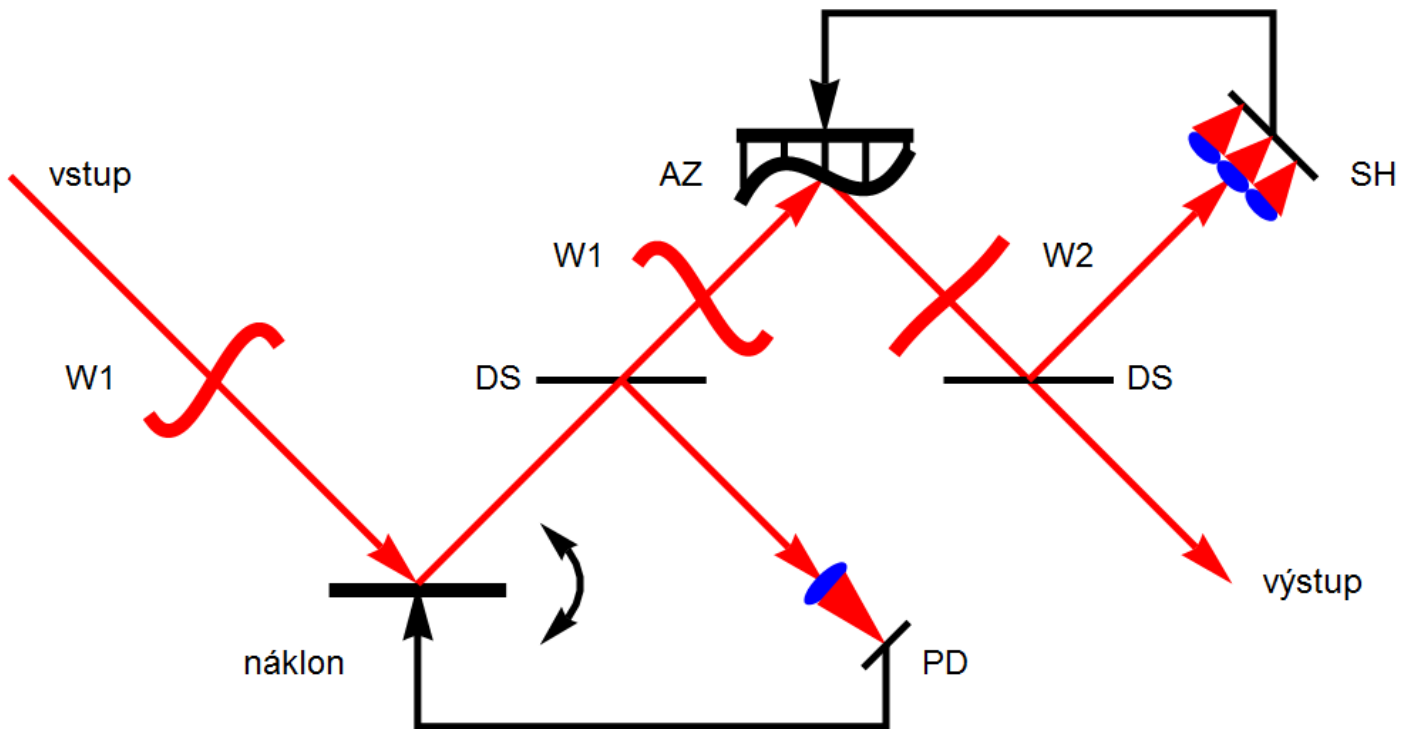
### princip

- detekce vlnoplochy od referenčního bodového zdroje
- konjugace fáze – odstranění aberací pro referenční bodový zdroj prostorovým modulátorem světla (deformovatelným zrcadlem)
- tím odstranění aberací pro blízký pozorovaný objekt
- zpětnovazební smyčka – detekce a korekce vlnoplochy v reálném čase

### výsledný efekt

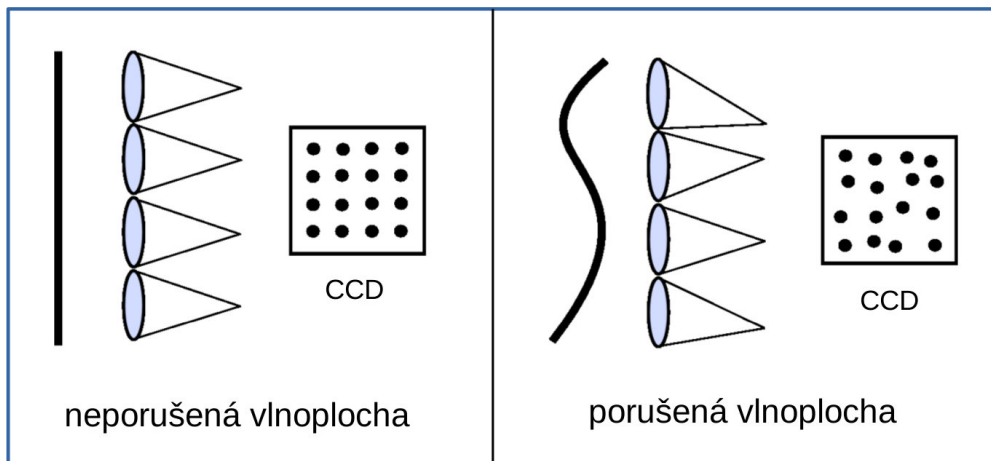
- zlepšení rozlišení – dosažení difrakčně-limitovaného zobrazení na velkých pozemských teleskopech (v IR oblasti)
- zvýšení citlivosti – zvýšení maximálně dosažitelné magnitudy s danou aperturou

## schéma AO systému



## měření vlnoplochy

- Shackův-Hartmannův senzor

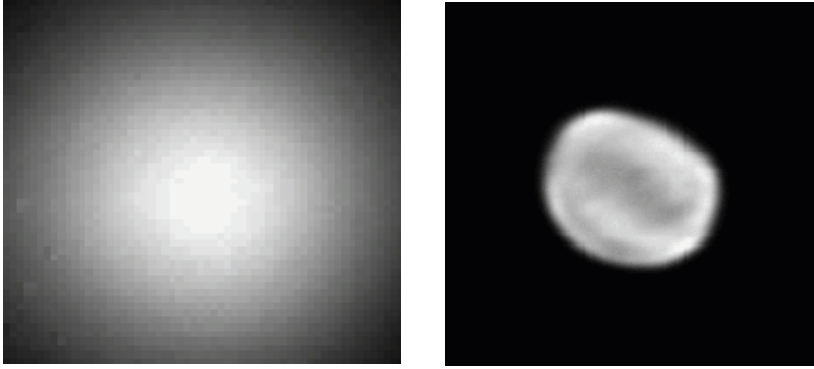


- měření lokální křivosti (intenzita v rozostřeném obraze)

## korekce

- deformovatelné zrcadlo
- ovládání lokální nebo modální

## asteroid 4 Vesta



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

### přetrvávající problémy

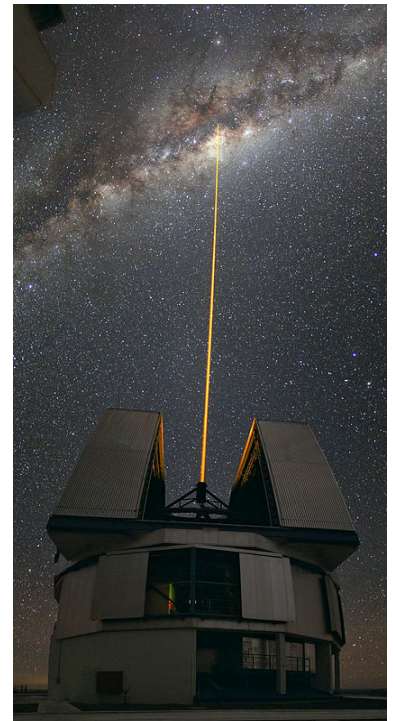
- malý izoplanatický úhel ve VIS, tj. nedostatek referenčních hvězd
- rychlá obnovovací frekvence ve VIS

### laserové referenční hvězdy

- excitace laserem (sodík)
- výška cca 90km
- lze generovat kdekoli v zorném poli
- necitlivé na náklon, tj. nutno kombinovat LGS a NGS

### laserová tomografie turbulence

- měření více referenčních LGS/NGS
- rekonstrukce turbulence pro střed FOV
- korekce středu FOV



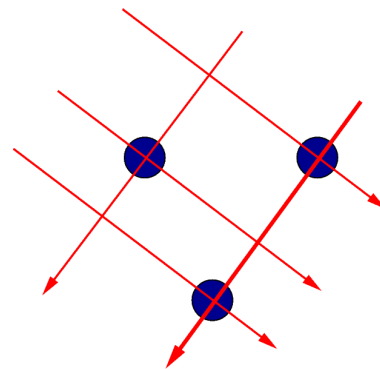
ESO/Yuri Beletsky (ybialets at eso.org)

# tomografie

zobrazení 2D objektu z 1D projekcí

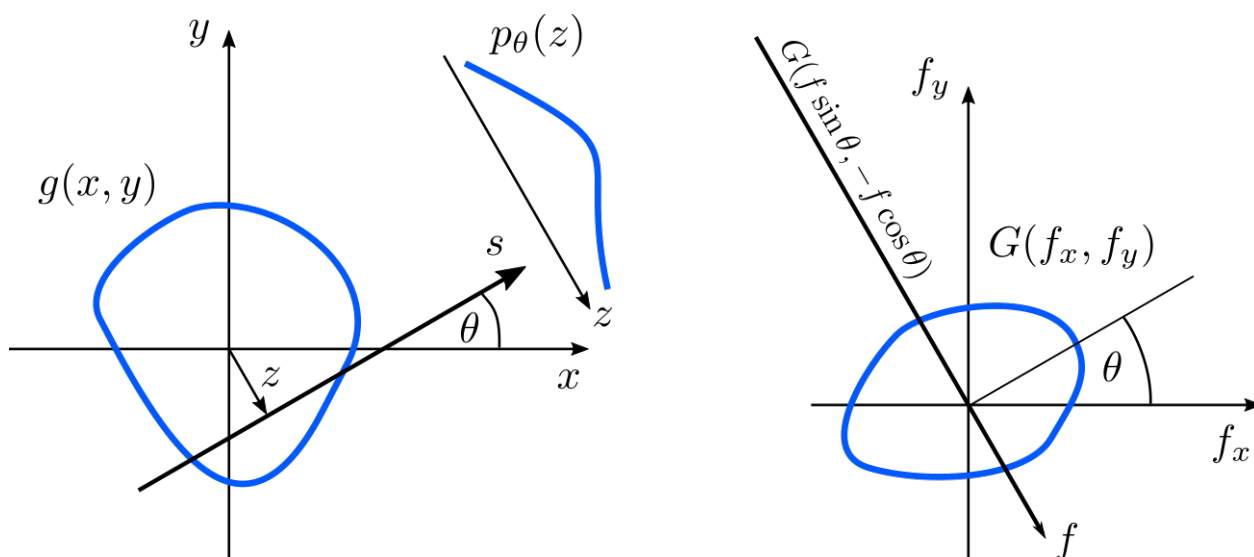
aplikace

- lékařství (CT, NMR)
- inverzní úlohy ve fyzice



projekce: 1D integrál 2D funkce podél přímky, tj. integrujeme přes jednu proměnnou (jako marginální rozdělení)

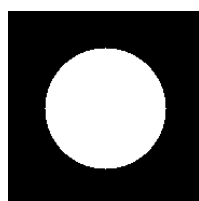
řez: 1D průnik 2D funkce a přímky v určitém směru, tj. zafixujeme jednu proměnnou (jako podmíněné rozdělení)



Fourierův teorém pro řezy

- 1D FT projekce objektu = řez 2D FT objektu
- interpolovanou 2D FT inverzně FT transformujeme

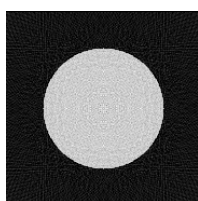
praktický algoritmus: filtrovaná zpětná projekce (FBP)



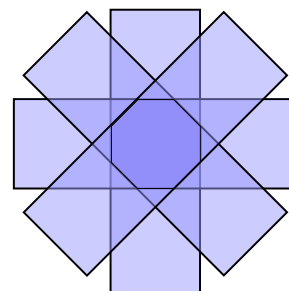
objekt



zpětná projekce



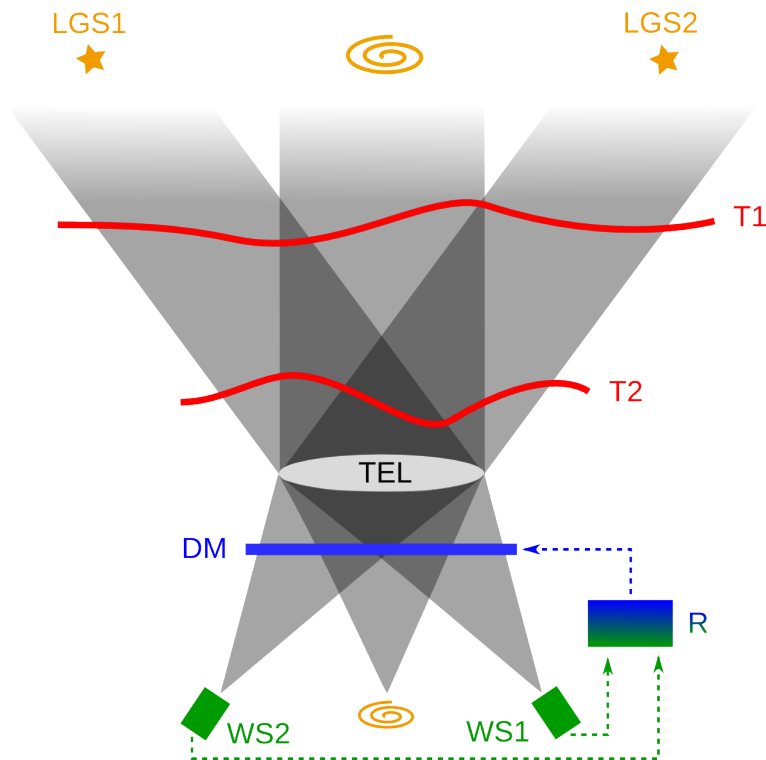
FBP



fyzikální požadavky (nezápornost): optimalizace/statistická inverze

## LTAO (laser tomography adaptive optics)

### laserová tomografie atmosférické turbulence



LGS – laserová referenční hvězda, T1, T2 – turbulentní vrstvy  
DM – deformovatelné zrcadlo, WS1, WS2 – senzory vlnoplochy  
R – rekonstrukce (tomografie) turbulence

- svazky od přirozených nebo umělých referenčních hvězd provádějí projekce turbulence z různých směrů
- každá ref. hvězda je měřená vlastním senzorem
- z detekovaných 2D projekcí lze rekonstruovat 3D rozložení fázových fluktuací
- to umožňuje vypočítat korekci pro libovolný směr – obvykle objekt umístěný ve středu zorného pole
- korekce širokého zorného pole lze dosáhnout použitím více prostorových modulátorů korigujících turbulence v různých výškách atmosféry – MCAO (multi-conjugate adaptive optics)