



**PROGRAM
CEZHRANIČNEJ
SPOLUPRÁCE**
SLOVENSKÁ REPUBLIKA
ČESKÁ REPUBLIKA



**EURÓPSKA ÚNIA
EURÓPSKY FOND
REGIONÁLNEHO ROZVOJA**
SPOLOČNE BEZ HRANÍC



FOND MIKROPROJEKTŮ

Pozorování Slunce s vysokým rozlišením

Michal Sobotka
Astronomický ústav AV ČR, Ondřejov



Úvod

Na Slunci se důležité děje odehrávají na malých prostorových škálách (desítky až stovky km). Granule mají typickou velikost 1000 km, umbrální body 100 km.

Na povrchu Slunce vidíme vzdálenost 725 km pod úhlem 1". Z toho vyplývá potřeba úhlového rozlišení 0,1" – 0,5".

Kromě toho potřebujeme vysoké rozlišení v čase (sekundy až desítky sekund) a ve vlnové délce (pro spektroskopii rozlišení řádu pm = 10^{-12} m).

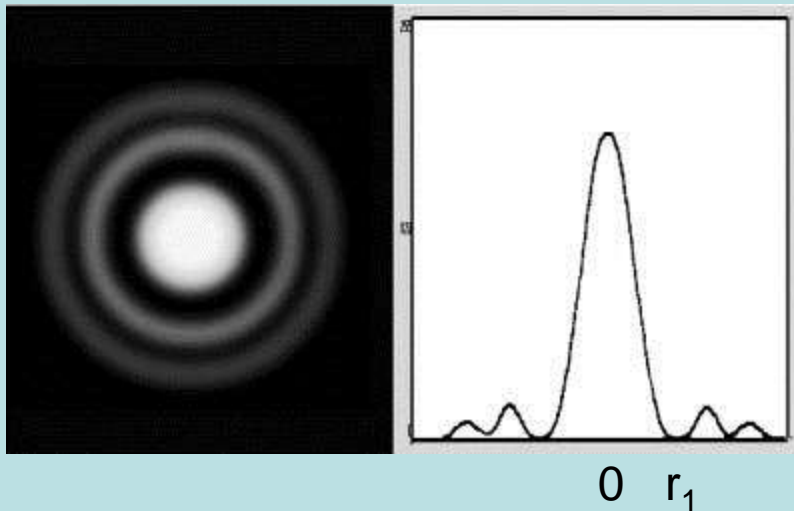
K dosažení toho všeho musíme mít dostatek fotonů, tedy dalekohled o velkém průměru.

Co nám kazí vysoké úhlové rozlišení

A. Dalekohled

- Optické vady (barevná, sférická, astigmatismus, koma) způsobují rozostření obrazu. Dají se minimalizovat.
- Konečný průměr vstupního otvoru. Ohyb světla (difrakce) na vstupním otvoru způsobuje rozostření.

Rozostření obrazu popisuje rozptylová funkce (PSF).



PSF dalekohledu bez opt. vad - Airyho funkce, obraz bodového objektu (hvězdy).

$$s(r) = \frac{1}{\pi} \left(\frac{J_1\left(\frac{\pi D}{\lambda f} r\right)}{r} \right)^2$$

Rayleighova mez rozlišení: $r_1 = 1,22 \lambda f / D$; $\theta = 1,22 \lambda / D$ (radiány)

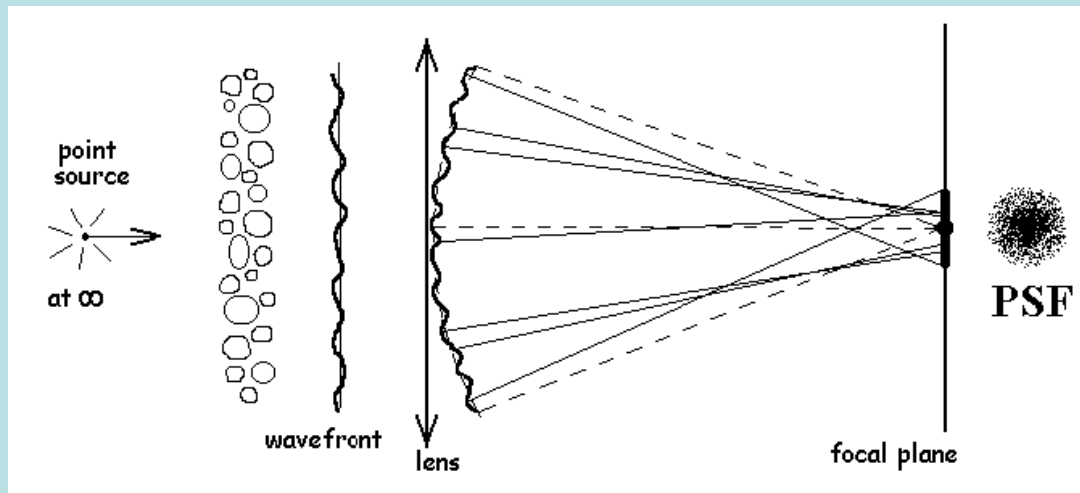
V praxi: θ ["], λ [nm], D [mm] ; $\theta = 0,25 \lambda / D$

Difrakční meze rozlišení

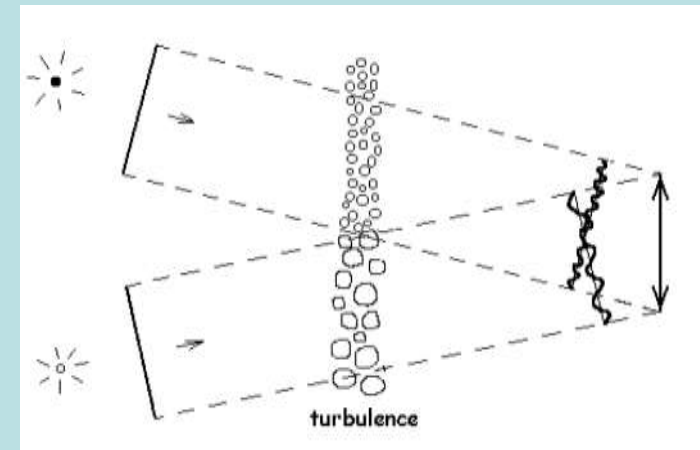
D =	20 cm	50 cm	1 m	1,5 m
Modrá 400 nm	0,50"	0,20"	0,10"	0,07"
Zelená 500 nm	0,63"	0,25"	0,13"	0,08"
Červená 600 nm	0,75"	0,30"	0,15"	0,10"

B. Atmosféra Země

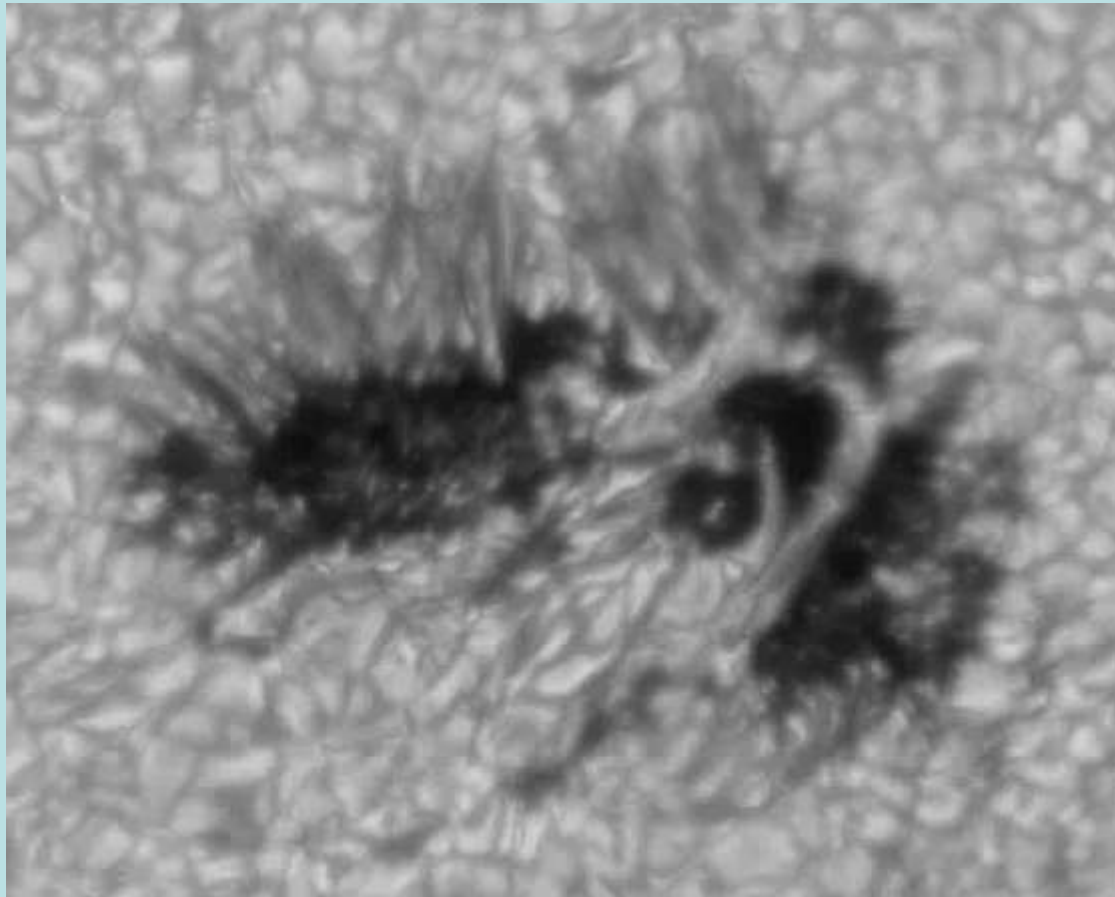
- Vzdušné „bubliny“ s různou teplotou mají různý index lomu a způsobují změny délky optické dráhy.
- PSF se mění s časem a s polohou v zorném poli.
- Atmosféra způsobuje rozostření, pohyb obrazu a jeho deformaci – souhrnný název „seeing“.



Původně rovinná vlnoplocha se díky změnám délky optické dráhy deformuje.



V různých směrech jsou deformace různé – anisoplanatismus



Příklad kvalitního pozorování ovlivněného atmosférou Země:

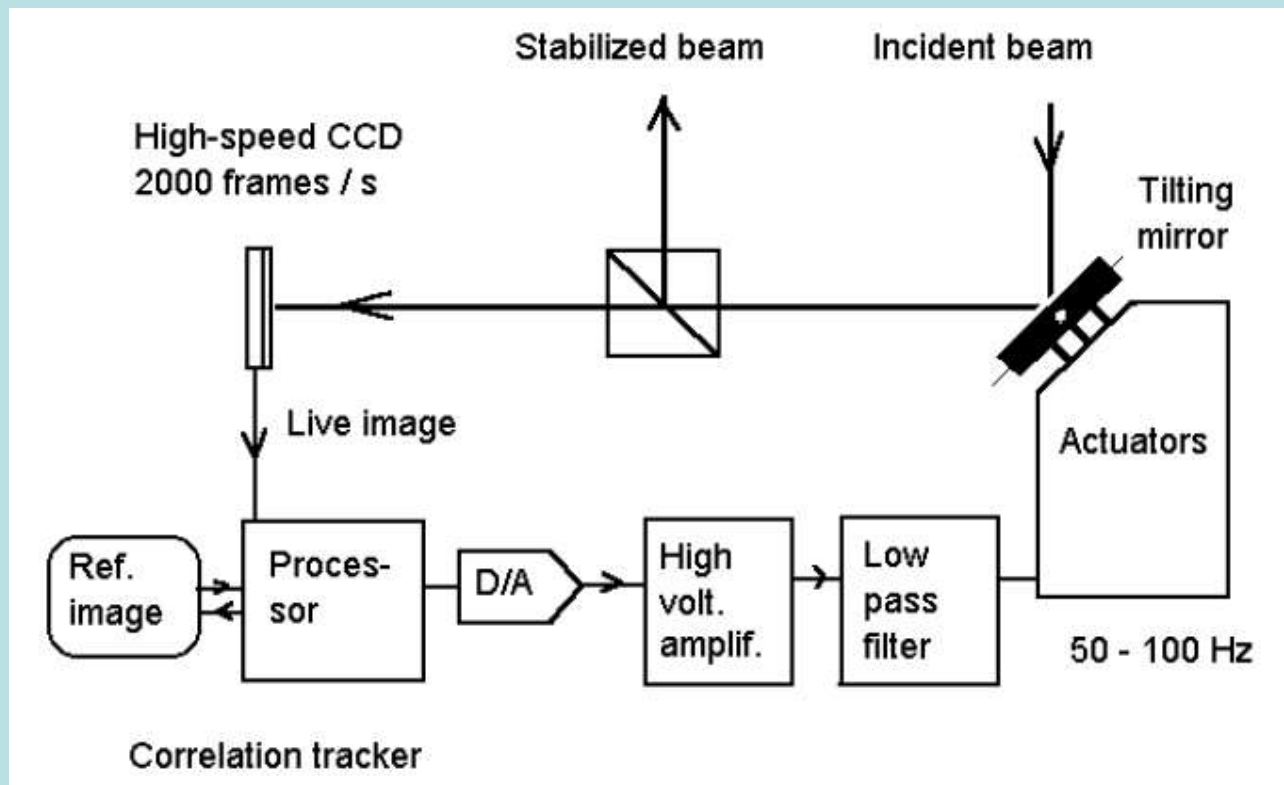
Série 124 snímků sluneční skvrny (40 minut v reálném čase), z $D = 1$ m Švédského slunečního dalekohledu, La Palma, Kanárské ostrovy.

- Anisoplanatické oblasti se stejnou PSF v daném čase jsou veliké asi 5" při dobrém seeingu.
- Frekvence časových změn PSF je 1–100 Hz.
- Při krátkých expozicích 1–10 ms se obraz „zmrazí“, ale PSF je velmi složitá a nesymetrická.
- Při dlouhých expozicích > 100 ms se PSF zprůměruje a je jednodušší. Kvalitu obrazu popisuje
- Friedův parametr r_0 = průměr dalekohledu umístěného mimo atmosféru, který dává stejný obraz jako $D = \infty$ dalekohled pozorující skrz atmosféru.
- Při $r_0 = 7$ cm začíná být vidět granulace. $r_0 > 15$ cm znamená výborný seeing. Při $r_0 \approx D$ přestává mít atmosféra vliv na rozlišení.

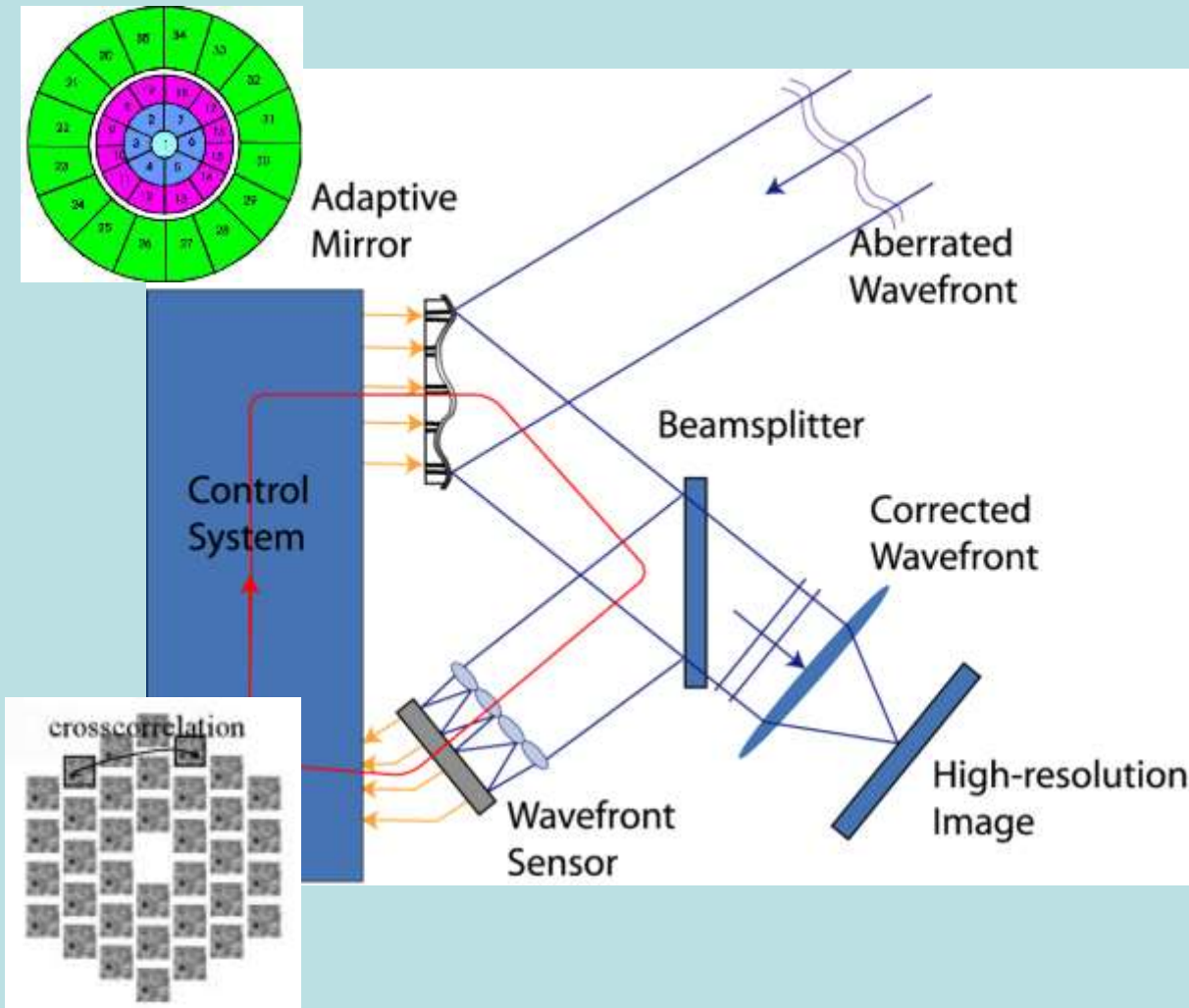
Korekce vlivu atmosféry

A. Během pozorování

A1 – korekce pohybu obrazu: korelátor



A2 – korekce pohybu, deformace a rozostření obrazu: adaptivní optika (AO). Oprava deformací vlnoplochy.



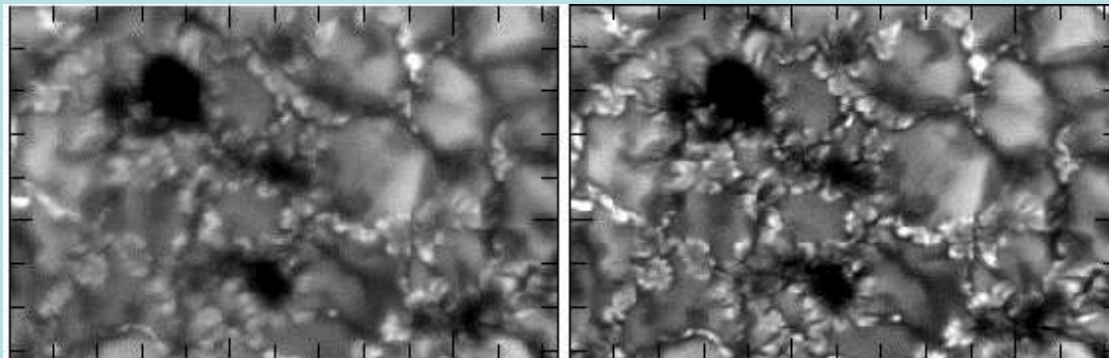
AO je nutná pro velké dalekohledy s $D \gg r_0$.

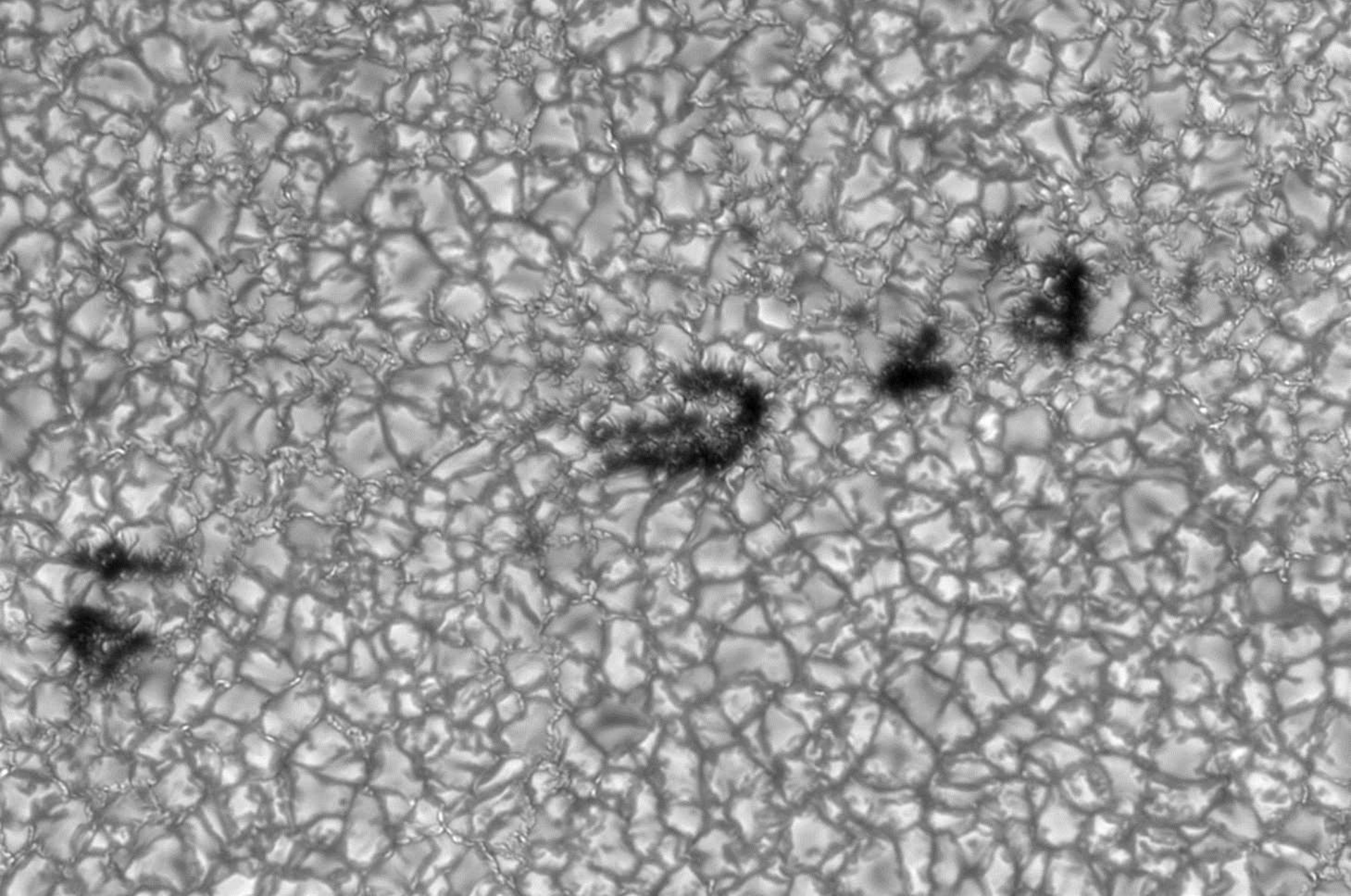
Jednoduchá AO koriguje jen jednu isoplanatickou oblast.

Pro korekci většího pole se řadí několik AO stupňů za sebou (MCAO).

B1. Matematická rekonstrukce obrazu

- Nalezení nebo odhad PSF a matematické odstranění jejího vlivu tak, aby bylo získáno původní rozložení intenzity světla objektu.
- **Skvrnková interferometrie** – je založena na statistických modelech atmosférické turbulence a používá mnoho pozorovaných obrazů k vytvoření jednoho rekonstruovaného.
- **Fázová diversita** – odhad optických aberací dalekohledu a atmosféry z párů zároveň exponovaných zaostřených a známým způsobem rozostřených snímků.
- **Mnohosnímková slepá dekonvoluce (MFBD)** – hledá PSF tak, že minimalizuje rozdíly mezi pozorovanými snímky a odhadem intenzit objektu ovlivněného mnoha různými PSF.





Příklad rekonstruovaného obrazu - fotosféra při rozlišení 90 km

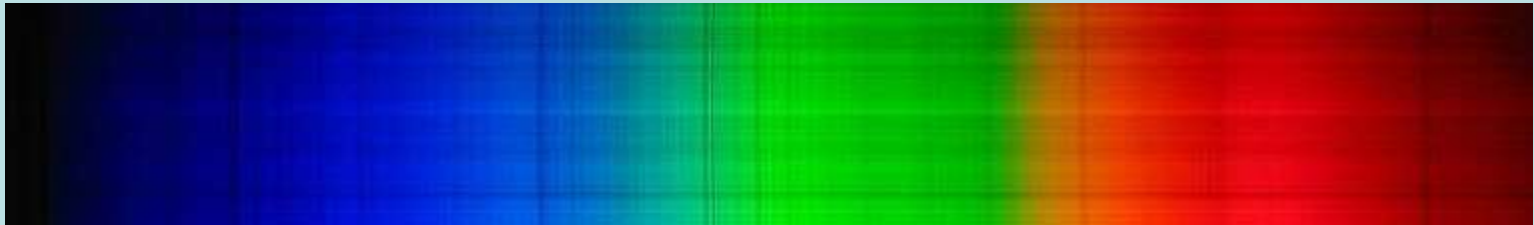
B2. Matematické zvýraznění obrazu

- Tyto metody si nekladou za cíl získání původního rozložení intenzity objektu, ale zvýraznění zobrazených struktur a potlačení šumu.
- Kombinují několik pozorovaných snímků k vytvoření jednoho výsledku a používají metod pro zvýrazňování hran.
- Příkladem je známý Registax nebo zvýraznění struktur v koróně metodou MVV M. a H. Druckmüllerových z VUT v Brně.



Měření magnetického pole, rychlosti a teploty

Informace o fyzikálních veličinách dávají spektrální čáry, které vznikají v různých hloubkách sluneční atmosféry.



Magnetické pole – rozštěpení čar a polarizace světla

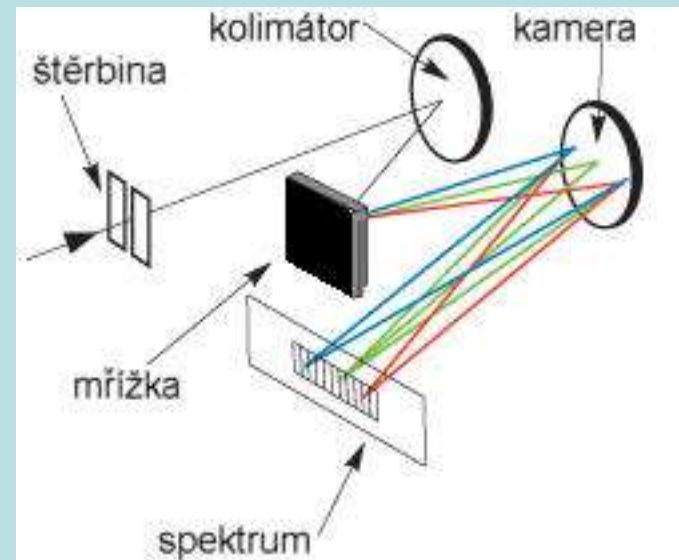
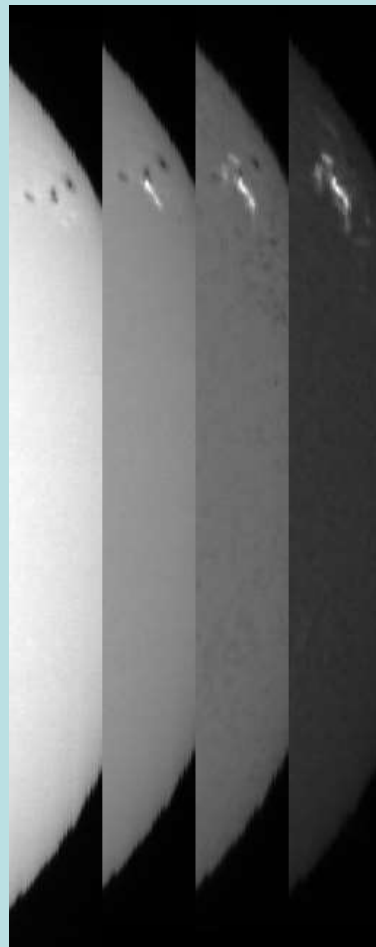
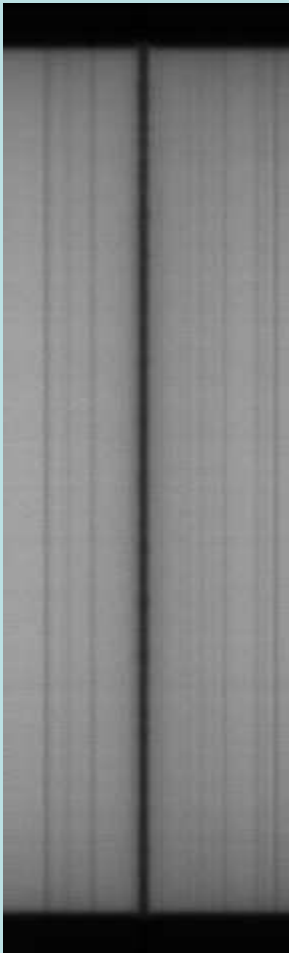
Rychlost – posuv čar (Dopplerův jev)

Teplota, tlak, hustota – profily čar (hloubka, šířka, tvar)

V každém místě zorného pole potřebujeme znát intenzitu světla v různých vlnových délkách, stav polarizace a vývoj těchto veličin v čase.

A. Štěrbínový spektrograf

vytváří obraz, kde vodorovně se mění vlnová délka a svisle poloha na Slunci. K získání plošné 2D informace se obraz Slunce postupně posunuje (skenuje) po štěrbině spektrografu.



Spektoheliogramy

H α + 1,5 nm

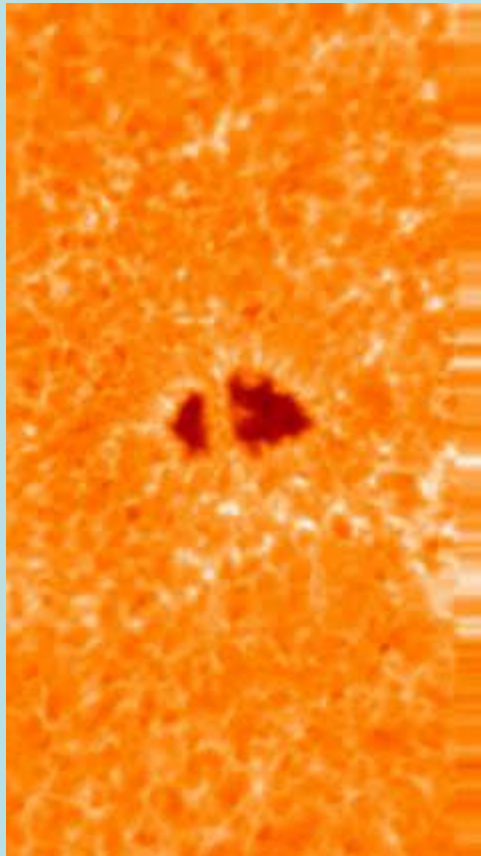
H α + 0,3 nm

H α + 0,1 nm

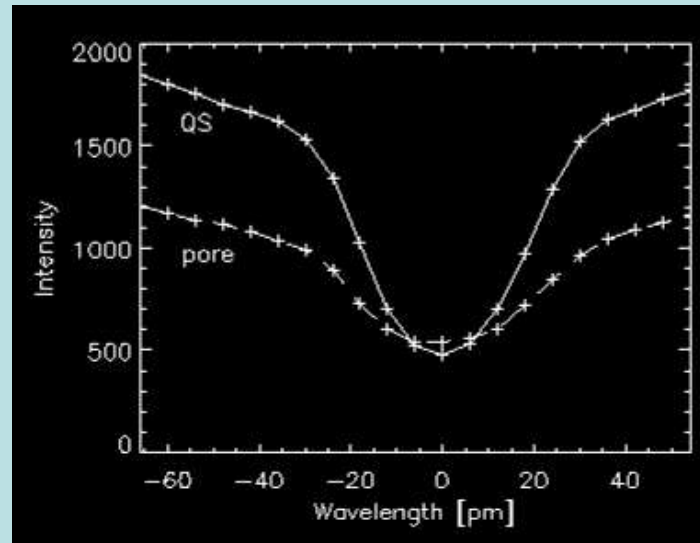
H α střed čáry

B. Proladitelný úzkopásmový filtr

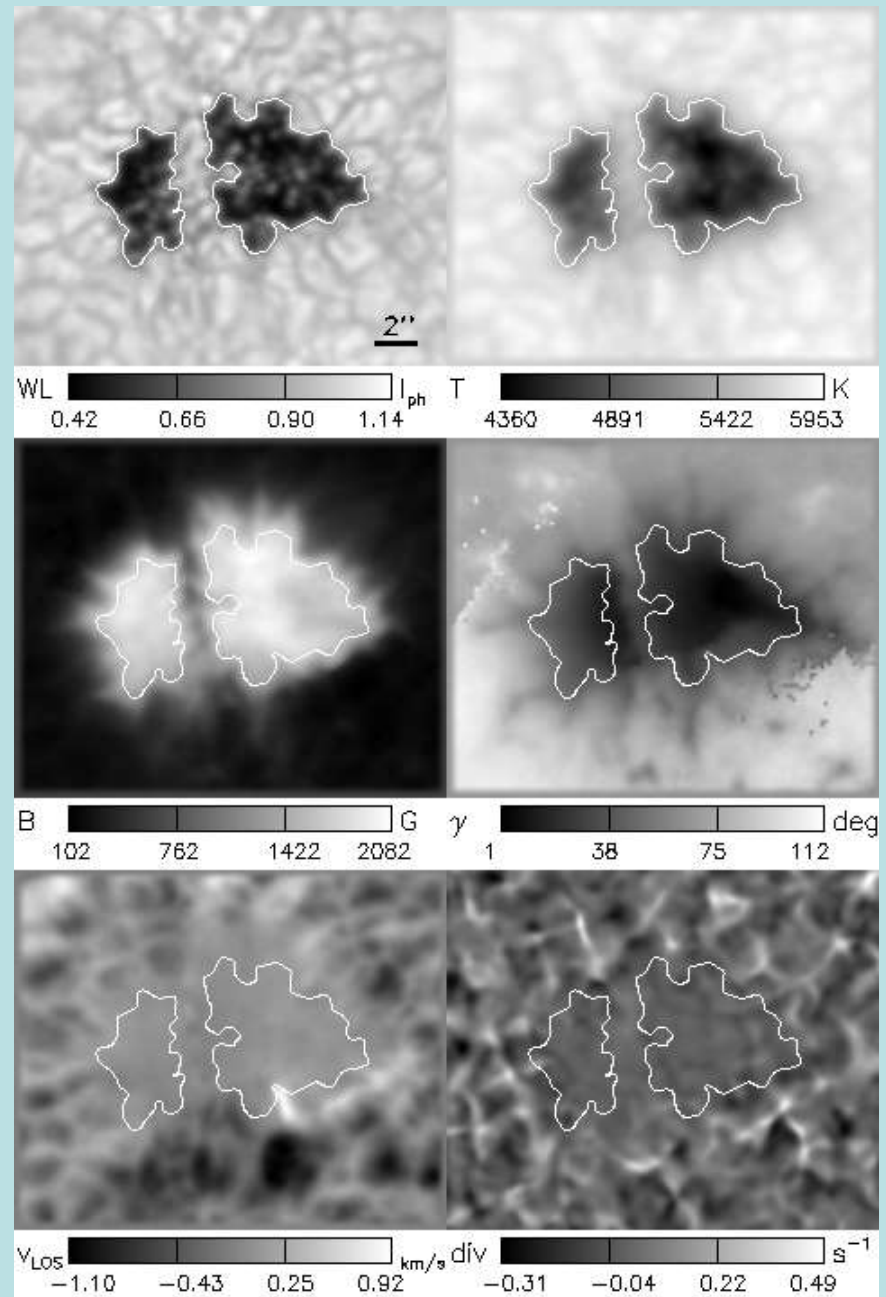
vytváří sérii 2D snímků v různých vlnových délkách a polarizačních stavech. Rozsah vlnových délek pokrývá jednu nebo více spektrálních čar. Série musí být pořízena rychle, než dojde ke změnám na Slunci.

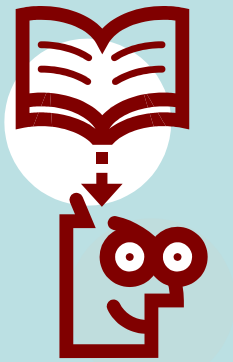


Série 21 snímků v infračervené čáře ionizovaného vápníku (Ca II 854,2 nm). Z těchto snímků je možné získat profil čáry v každém bodě zorného pole.



Analýzou profilů
spektrálních čar,
jejich rozštěpení,
polarizace a posuvu
získáme mapy
fyzikálních veličin:
teploty,
magnetického pole
a rychlosti.





Díky za pozornost