

# 14. Specifika slunečních pozorování

Sluneční fyzika  
LS 2007/2008

**Michal Švanda**

Astronomický ústav MFF UK  
Astronomický ústav AV ČR



## Pozorování Slunce: co je jinak?

- Spektroheliogramy
- Filtrogramy
- Magnetogramy
- Dopplergramy
- Měření oscilací
- Korónograf
- Polarizace
- Vysoké rozlišení

- Šum: Poissonovo rozdělení
- Rozptyl:
- Signál-k-šumu
- Počet zachycených fotonů dalekohledem
  - Zvýšit účinnost
  - Zvětšit zorné pole
  - Zvětšit čas
  - Zvětšit šířku filtru
  - Zvětšit aperturu

$$P(N) = \exp(-r\tau) \frac{(r\tau)^N}{N!}, \quad \langle N \rangle = r\tau$$

$$\sigma = \sqrt{\langle N \rangle}$$

$$SNR = N / \sqrt{N} = \sqrt{N}$$

$$N_T = \eta \cdot N \cdot S \cdot \Delta t \cdot \Delta \nu \cdot A$$

- Turbulence atmosféry

  - 100 Hz

- Point Spread Function

$$I(x, y) = I_0(\xi, \eta) * PSF(x, y; \xi, \eta)$$

- Modulation Transfer Function

$$MTF(k_x, k_y) = |\text{FT}(PSF(x, y))|$$

$$MTF_{\text{total}} = MTF_{\text{dalekohled}} \cdot MTF_{\text{seeing}}$$

• PSF difrakce  $PSF(r) = \frac{J_1(br)}{br}, \quad b = \frac{\pi D}{\lambda f}$

• Úhlové rozlišení  $\alpha = \frac{3,823 \lambda}{\pi D}$

$$MTF_D(k) = \frac{2}{\pi} \left[ \arccos\left(\frac{k}{k_m}\right) - \frac{k}{k_m} \sqrt{1 - \left(\frac{k}{k_m}\right)^2} \right]$$

$k_m = b/\pi, \quad MTF_D = 0 \quad \text{pro } k \geq k_m$

- Friedův parametr
- Průměr dalekohled bez seeingu se stejným rozlišením jako rozlišení dalekohledu se seeingem

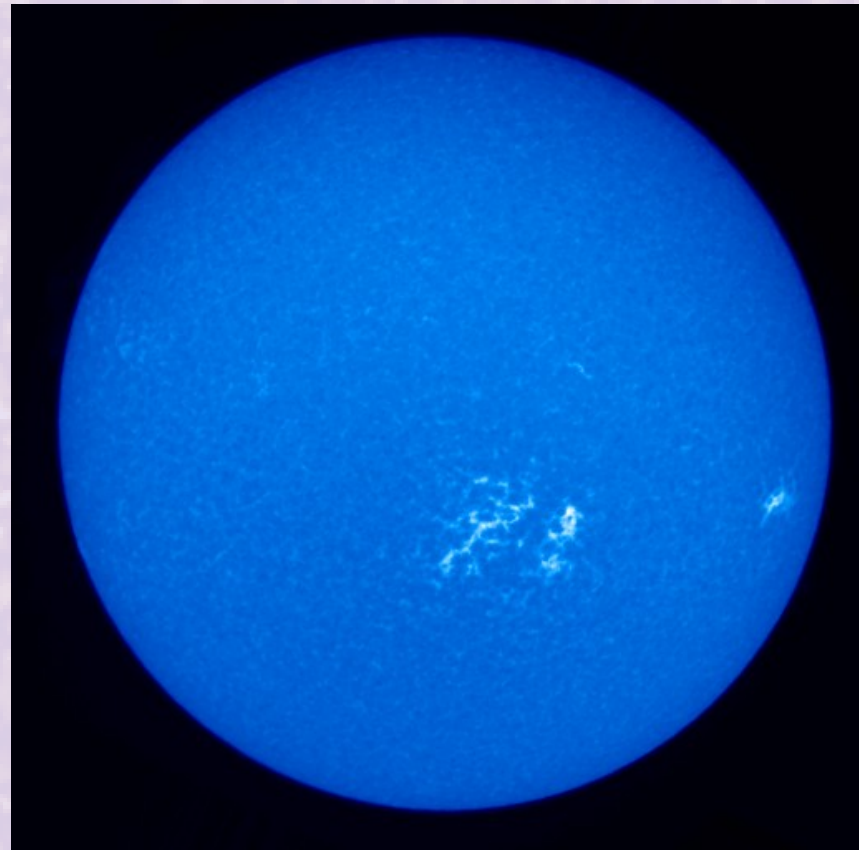
$$F = \frac{3,823 \lambda}{\pi \varphi}$$

Seeing 1", F = 13 cm pro pozorování na 550 nm



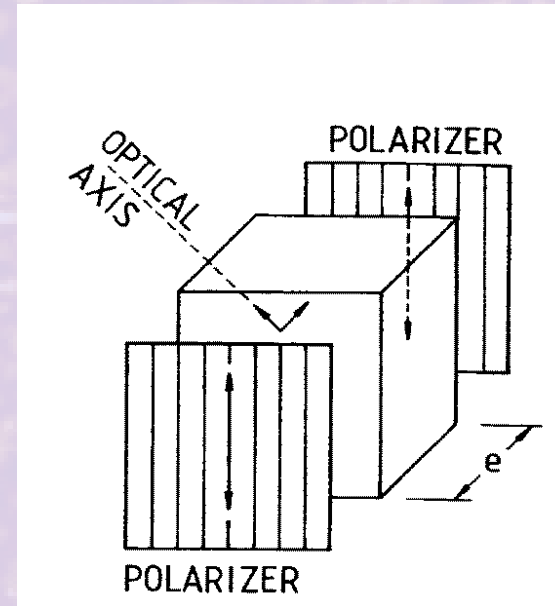
# Filtrogram vs. spektroheliogram

- Obojí pozorování zorného pole v dané spektrální čáře
- Filtrogram
  - Přes filtr
  - Celé zorné pole najednou
- Spektroheliogram
  - Rekonstrukce ze spektra
  - Skenováním, čili ne okamžitá informace
  - Variabilní!



# Lyotův filtr: jedna destička

- Dvojlom, fázový rozdíl mezi řádným a mimořádným – přes kombinaci polarizátor+ dvojlomný krystal+polarizátor projde jen paprsek rovnoběžný s osou druhého polarizátoru



$$\frac{A}{2} \cos(\phi + \delta) + \frac{A}{2} \cos \phi = A \cos \frac{\delta}{2} \cos \left( \phi + \frac{\delta}{2} \right)$$

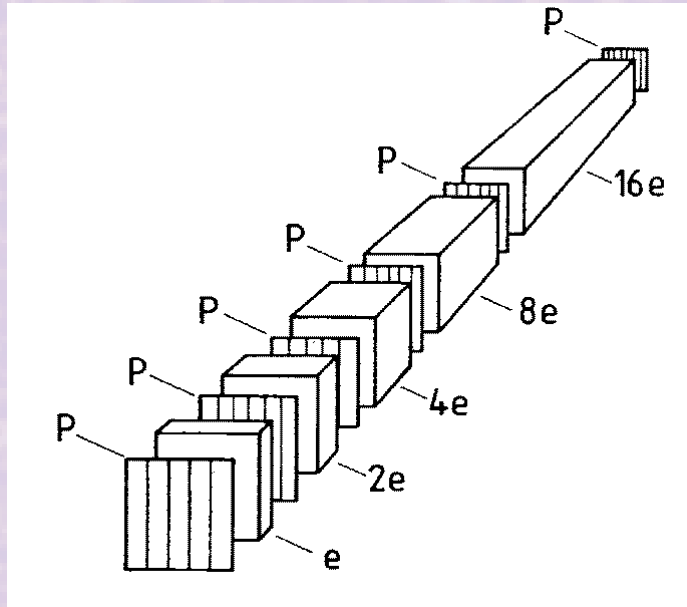
$$\delta = \frac{2\pi e J}{\lambda}, \quad J = n_o - n_e$$

$$I = A^2 \cos^2 \frac{\delta}{2}$$

$$I_{\max} : \delta = 2k\pi, \lambda = eJ/k$$

# Lyotův filtr: $N$ destiček

- $N$  destiček s tloušťkou  $e, 2e, 4e, \dots$

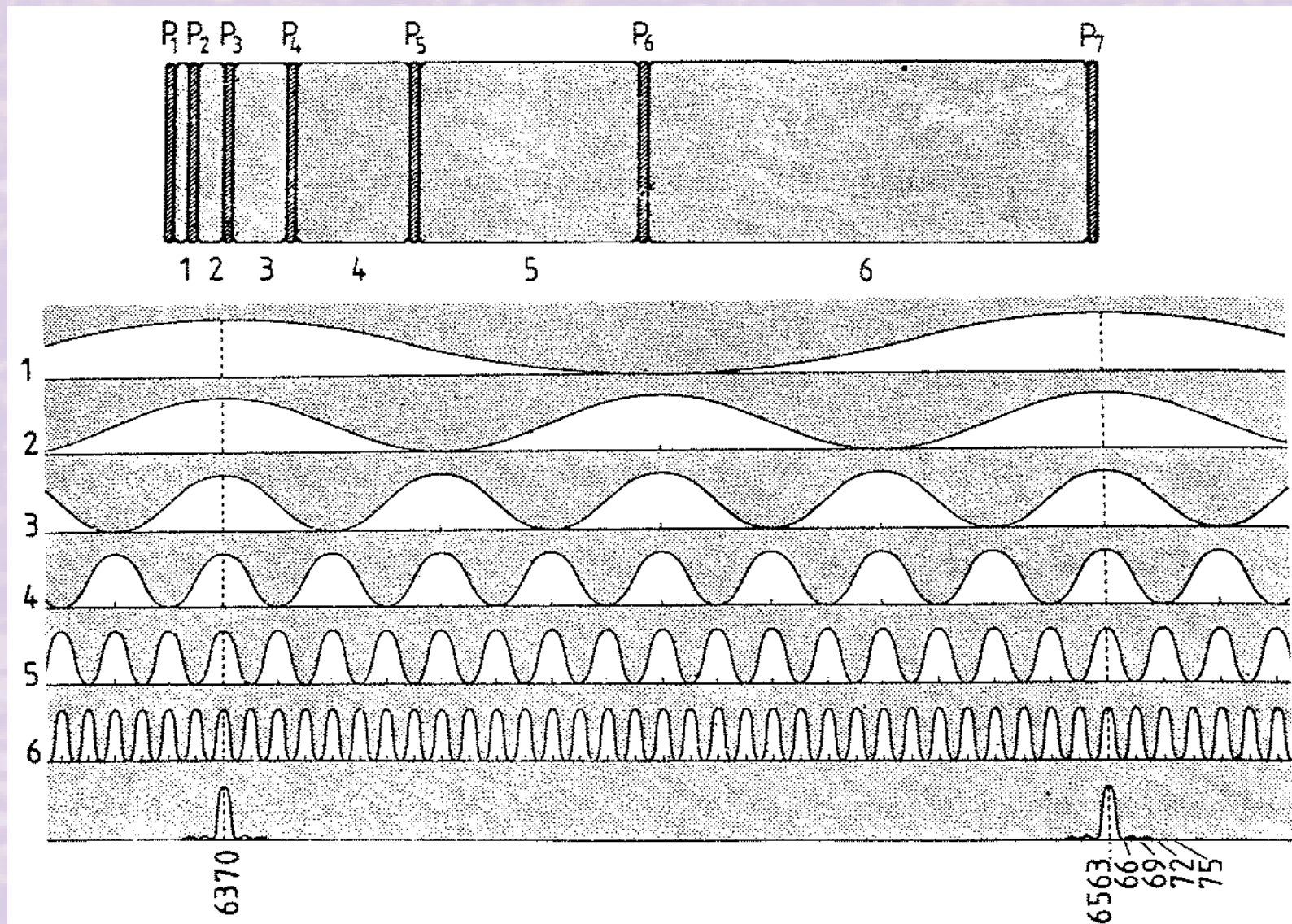


$$I_N = A^2 \cos^2(\pi eJ/\lambda) \cos^2(2\pi eJ/\lambda) \dots \cos^2(2^{N-1} \pi eJ/\lambda)$$

$$\lambda_{\max} = eJ/k, \quad \Delta\lambda \sim 2^{N-1} eJ/k^2$$



# Lyotův filtr: průchozí světlo



+široký rámcovací filtr

# Stokesovy parametry

EM pole s komponentami:

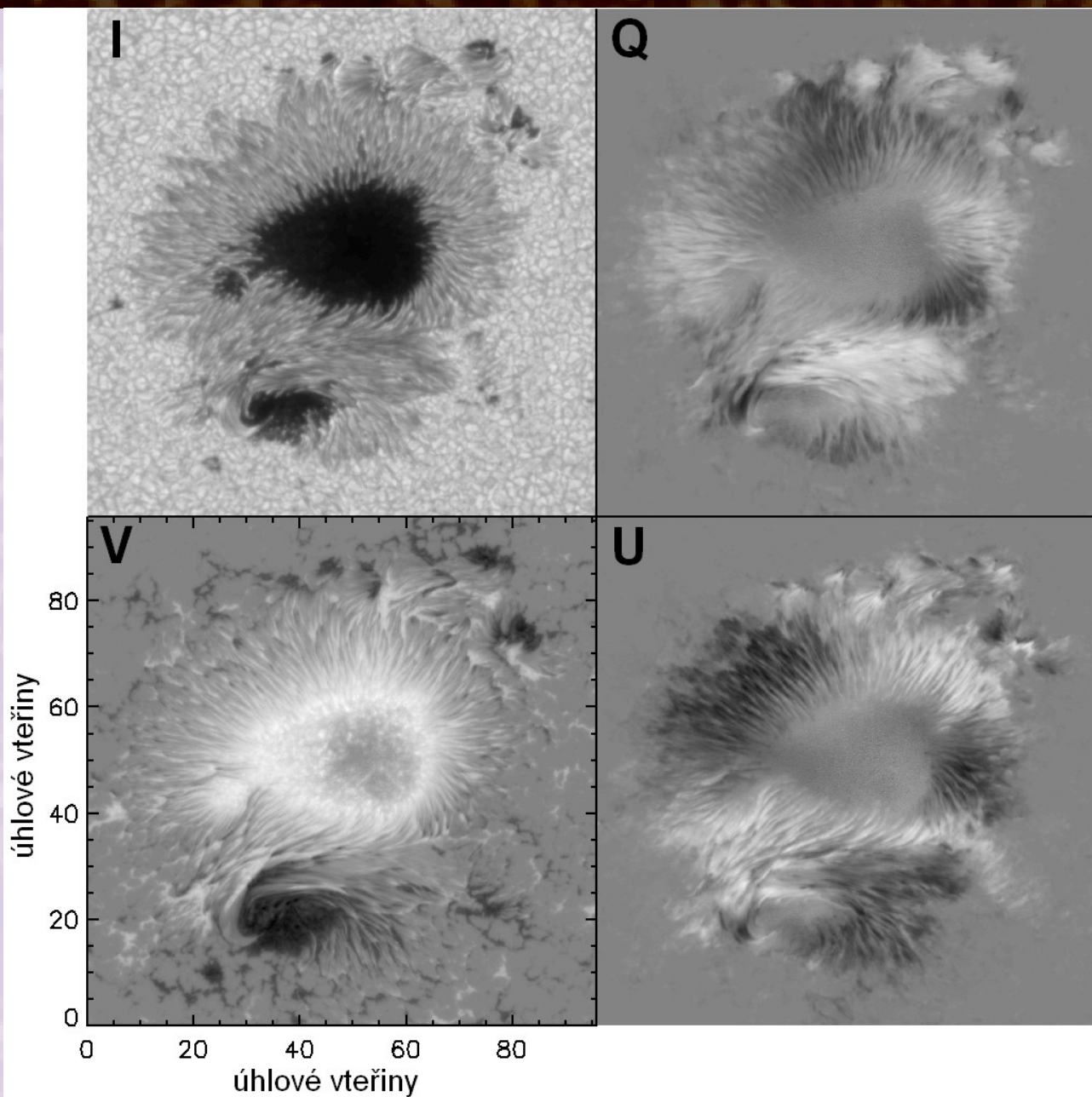
$$E_1 = A_1 e^{i(\phi_1 - \omega t)} = \epsilon_1 e^{-i\omega t}, \quad E_2 = A_2 e^{i(\phi_2 - \omega t)} = \epsilon_2 e^{-i\omega t}$$

$\phi_1 - \phi_2 = 0 \Rightarrow$  lineární,  $\phi_1 - \phi_2 = \pm\pi/2 \Rightarrow$  kruhová polarizace.

Stokesovy parametry:

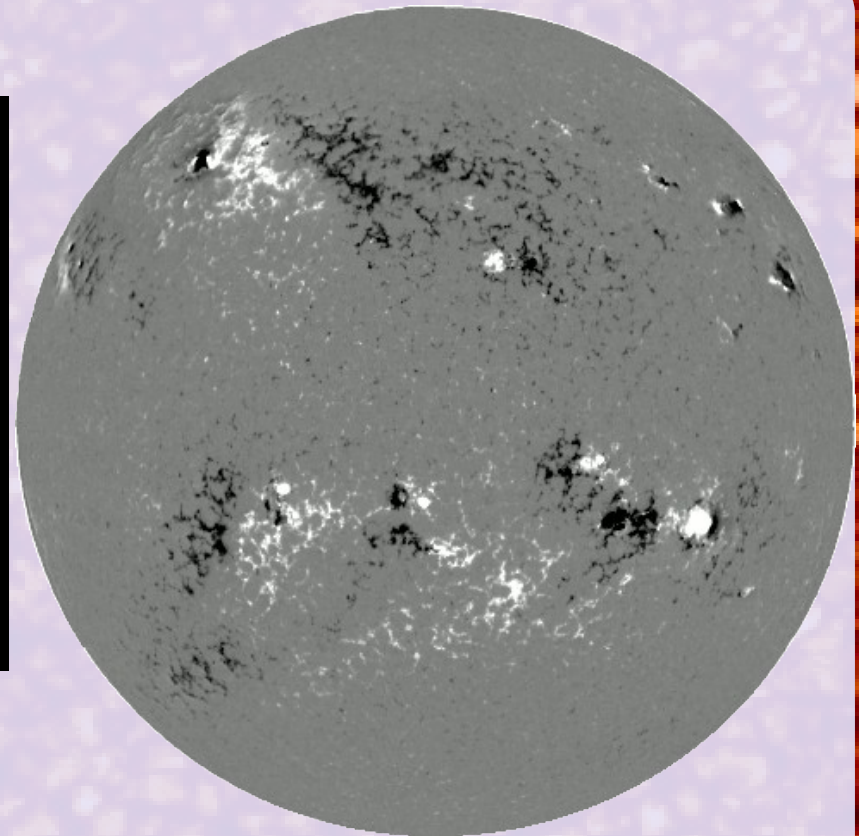
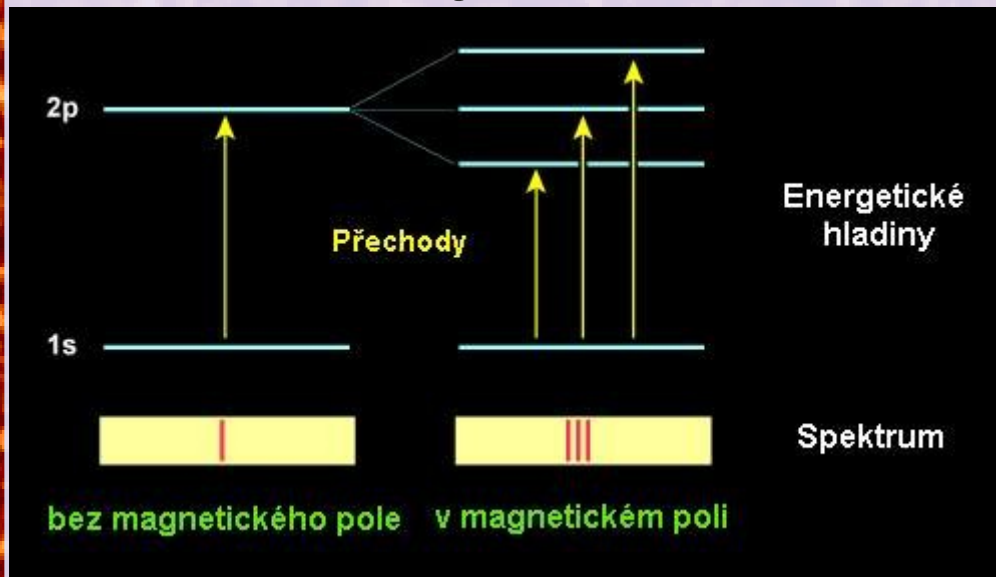
$$I = \langle \epsilon_1^* \epsilon_1 \rangle + \langle \epsilon_2^* \epsilon_2 \rangle$$
$$Q = \langle \epsilon_1^* \epsilon_1 \rangle - \langle \epsilon_2^* \epsilon_2 \rangle$$
$$U = \langle \epsilon_1^* \epsilon_2 \rangle + \langle \epsilon_2^* \epsilon_1 \rangle$$
$$V = \langle \epsilon_1^* \epsilon_2 \rangle - \langle \epsilon_2^* \epsilon_1 \rangle, \quad \langle X \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T X(t) dt$$

# Polarigramy sluneční skvrny





## Zeemanův jev



klasicky :  $\Delta \nu = \pm \nu_L = \pm \frac{eB}{m_e}$

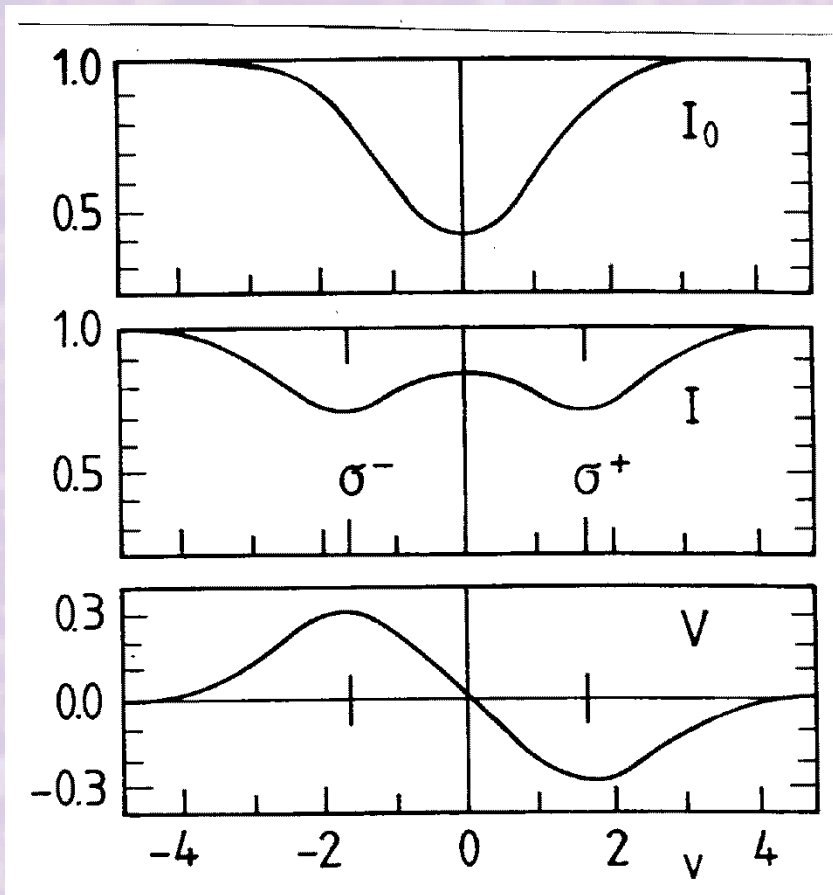
kvantovka :  $\Delta \nu = \pm m g_L \mu_B B$ ,  $\mu_B = \frac{e \hbar}{2 m_e}$

v CGS :  $\Delta \lambda [\text{nm}] = 4,67 \times 10^{-6} \lambda^2 [\text{nm}] B [\text{Gauss}]$

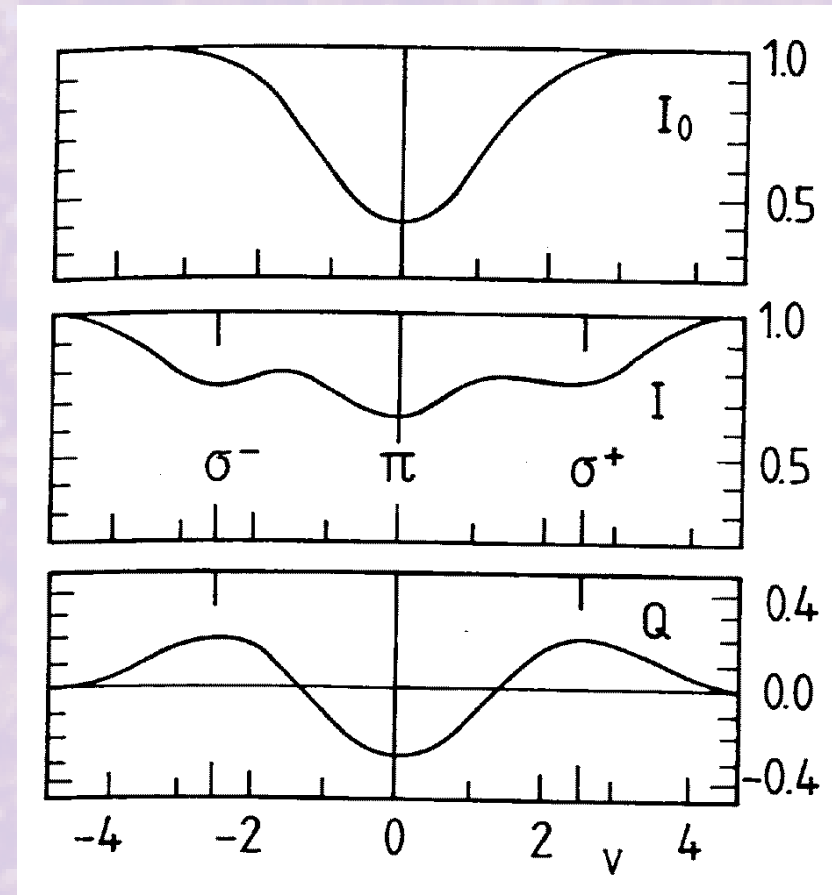
Podélně: 2  $\sigma$  (kruhová polarizace) , 1  $\pi$  (lineární polarizace)

Příčně: 2  $\sigma$  (lineární polarizace)

# Podélný vs. příčný



Podélný



Příčný

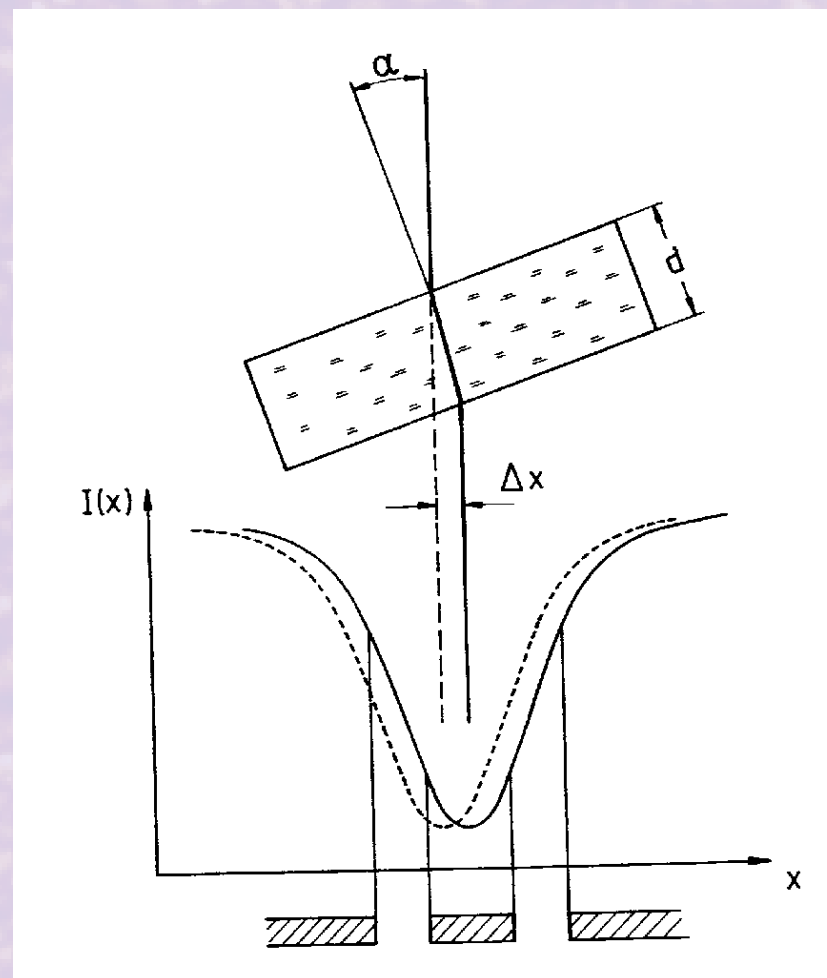


# Měření rychlostí: dopplerovský kompenzátor

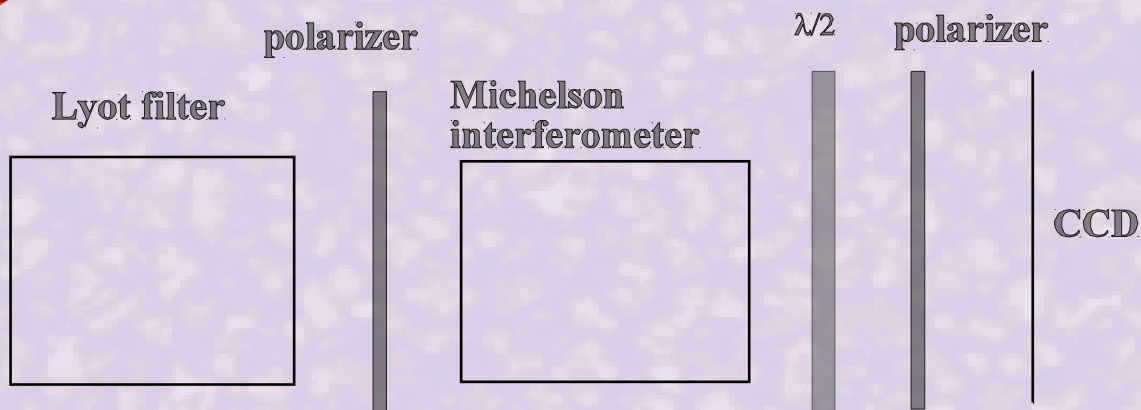
- Natočením destičky se posune čára tak, aby se vyrovnal signál na fotonásobičích měřících intenzitu ve spektru čáry
- Rychlost je úměrná úhlu natočení

$$v \sim \alpha c \frac{\Delta \lambda_D}{\lambda_0}$$

- Používá se ve skenovacích magnetografech, signál se rychle vyhodnocuje



# Fourierovský tachometr



Signál modulován Michelsonovým interferometrem

$I \sim 1 + \cos[k(x_2 - x_1)] = 1 + \cos \phi$ , kde  $k = 2\pi/\lambda$  závisí na posuvu

Dopplerovým jevem:  $\Delta k/k = -\Delta \lambda/\lambda$ . Pro změření  $\Delta \lambda$  stačí změřit  $\phi$ .

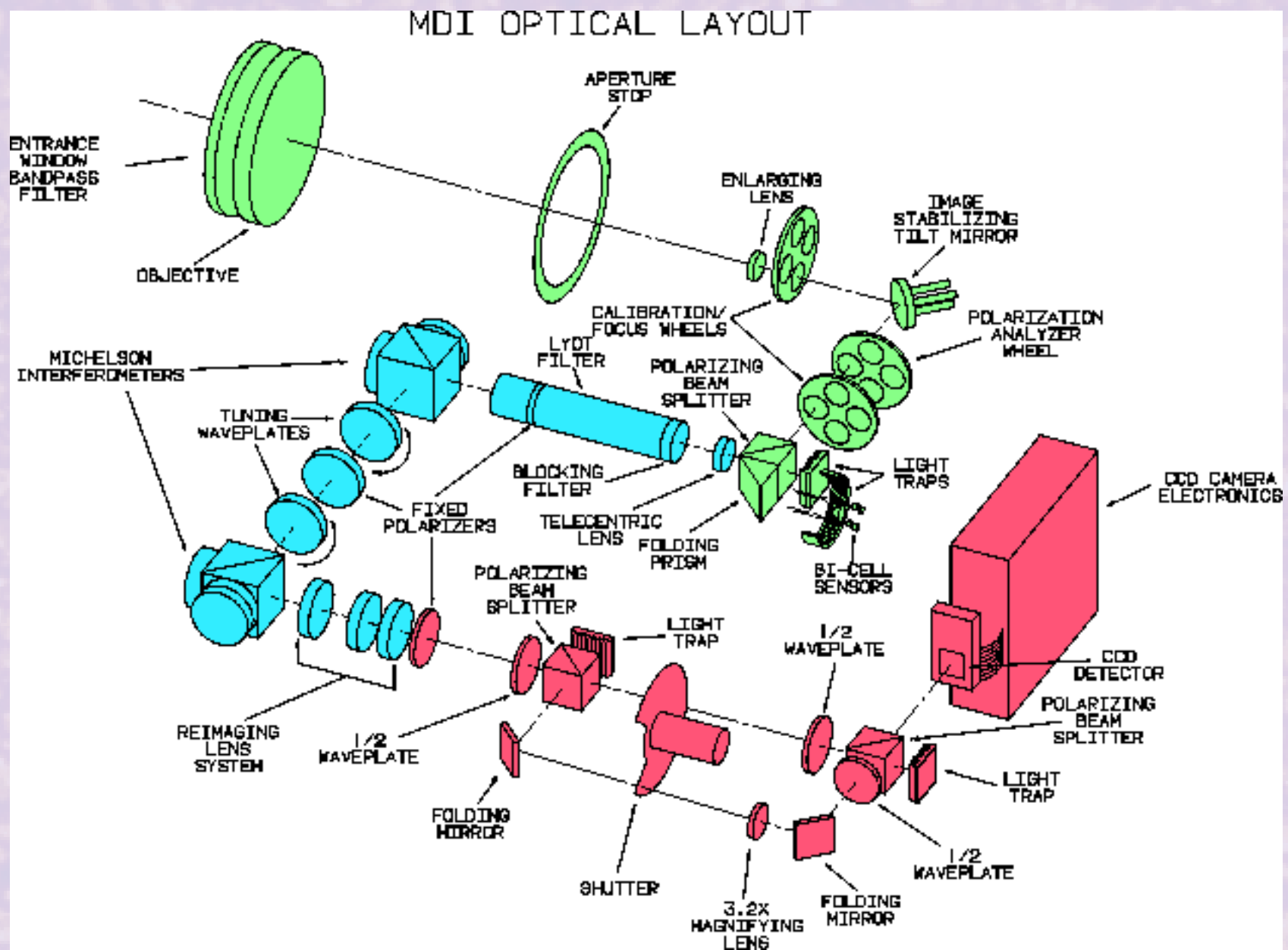
Rotující čtvrtvlnná destička přidá další modulaci  $I \sim \cos(2\theta + \phi)$ .

Měříme intenzitu ve třech polohách otočení destičky po  $120^\circ$ .

$I_1 \sim \cos(\phi)$ ,  $I_2 \sim \cos(2\pi/3 + \phi)$ ,  $I_3 \sim \cos(4\pi/3 + \phi)$ .

Pak 
$$\text{tg } \phi = \frac{I_2 - I_3}{I_2 + I_3 - 2I_1}.$$

# Fourierovské měření v praxi: MDI@SoHO



Z Fourierovy analýzy platí:  $\Delta \omega = \omega_{\min} = \frac{2\pi}{T} \leq \omega \leq \frac{\pi}{\Delta t} = \omega_{\text{Ny}} = \omega_{\max}$

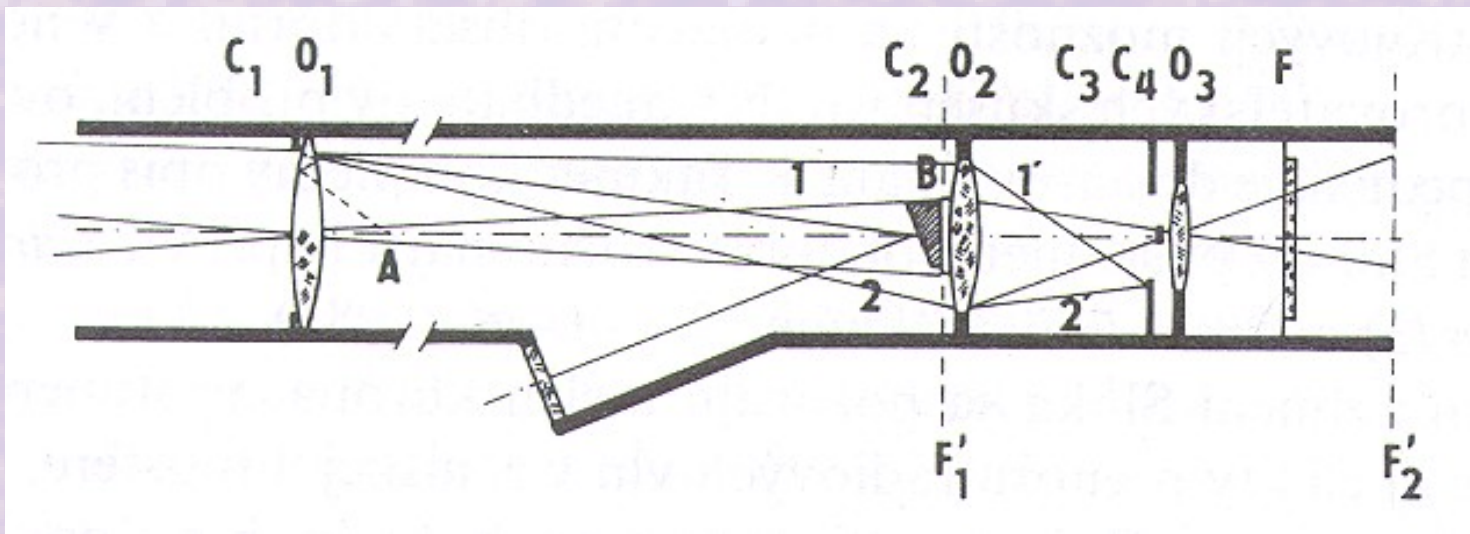
$$\Delta k_x = \frac{2\pi}{L_x} \leq k_x \leq \pi / \Delta x$$

$\Delta t$  ( $\Delta x$ ) je hustota vzorkování v čase (prostoru),

$T$  je hustota doba měření a  $L_x$  rozměr zorného pole.

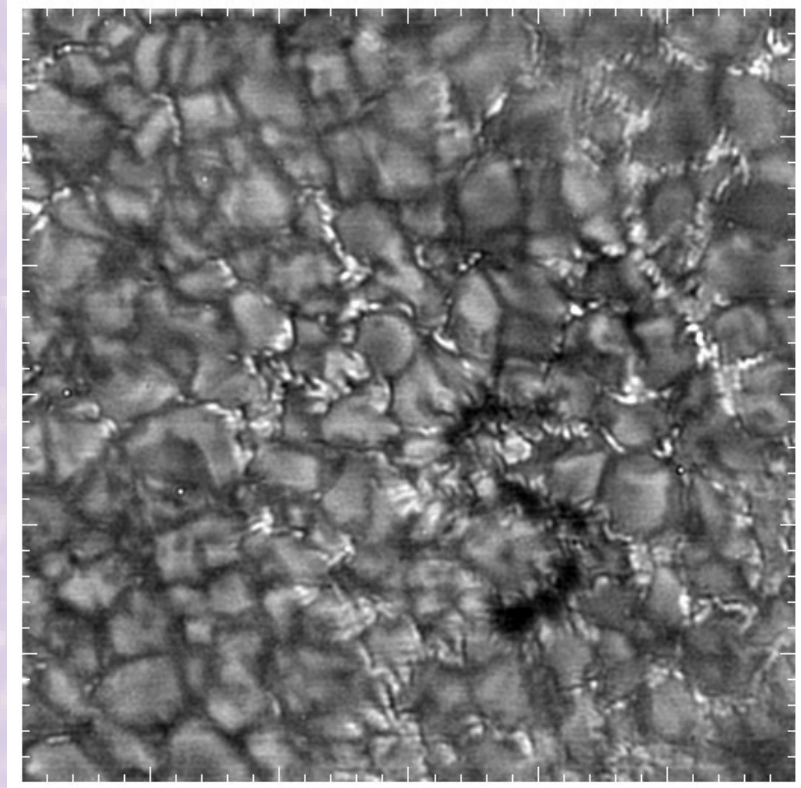
Vyšší frekvence než Nyquistovy se aliasují do nižších, tomu lze zabránit jejich odstraněním **před** periodovou analýzou low-pass filtrem (“rozmazáním”).

- „Umělé zatmění Slunce“
- Terčík (výměnný z důvodu proměnné zdánlivé velikosti slunečního disku)
- 1930 – Bernard Lyot
- Často polarizační nebo rámcovací filtry pro potlačení jasu nebe

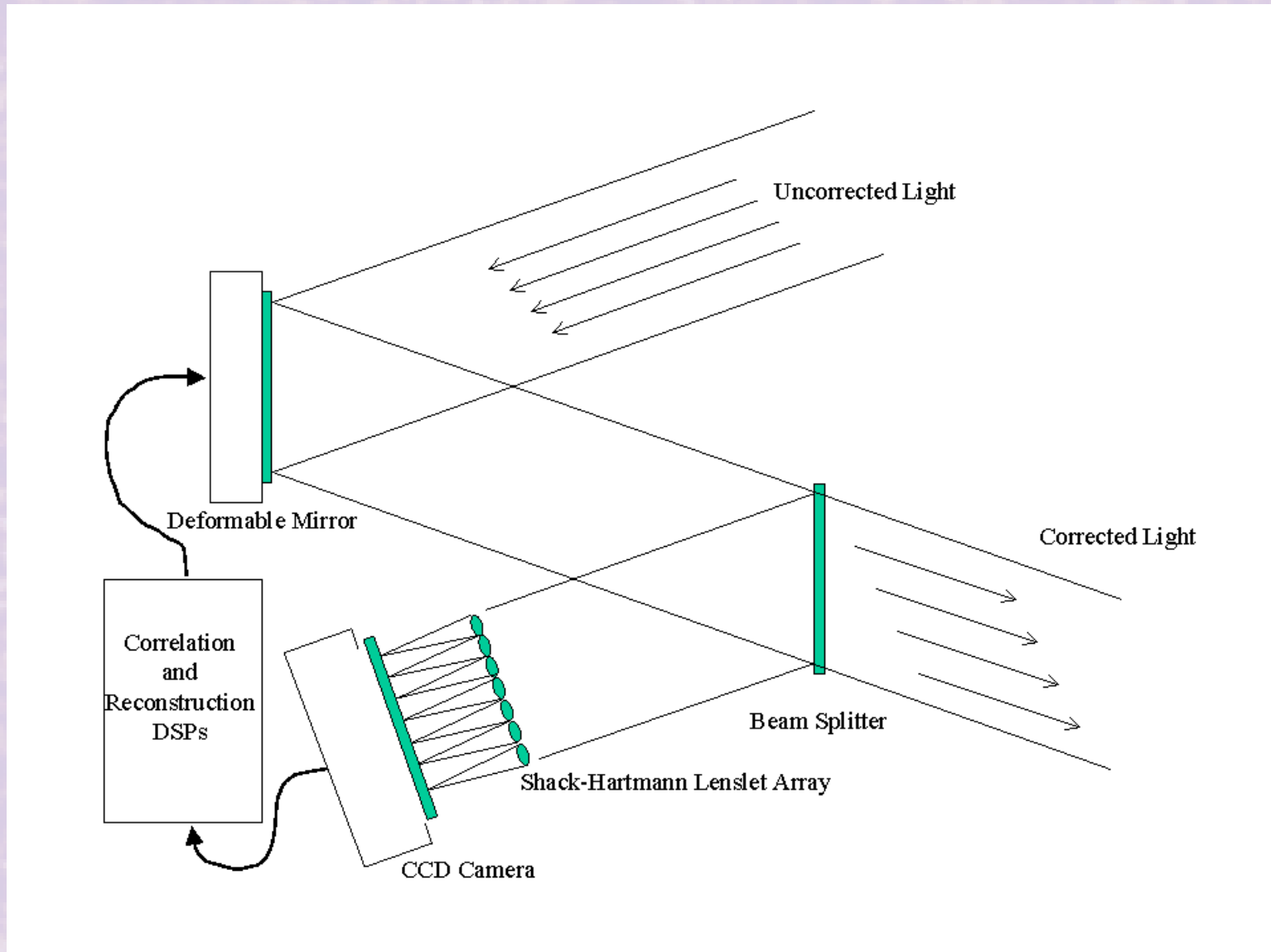




- Vysokého rozlišení (limitované difrakcí, ne seeingem) lze dosáhnout s pomocí adaptivní optiky.
- V reálném čase je měřena vlnoplocha atmosféry a deformováno zrcátko tak, aby výsledná vlnoplocha byla opět rovná.

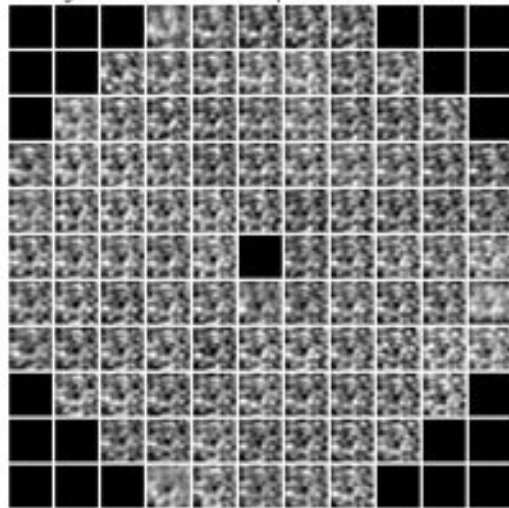


# Schéma slunečního teleskopu s AO



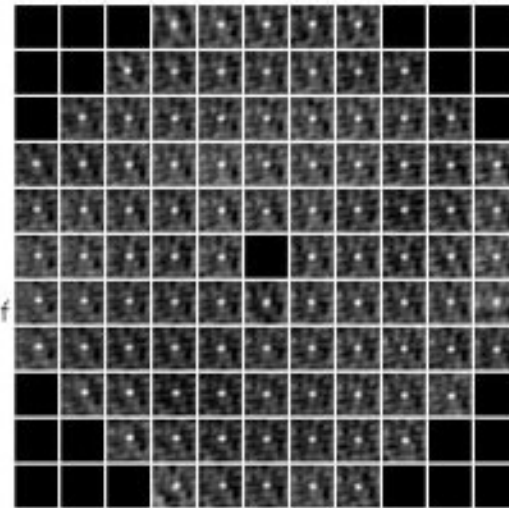
# Hartmann-Shack sensor

Array of subaperture images

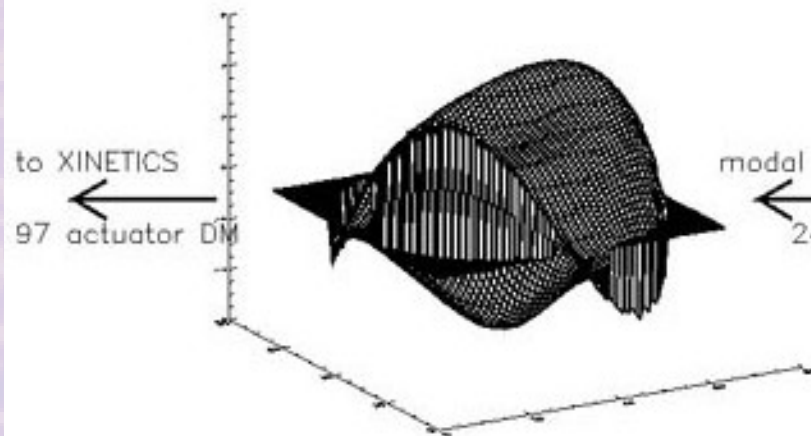


compute cross-  
correlations  
→  
using off-the-shelf  
DSP processors

2-d Crosscorrelations

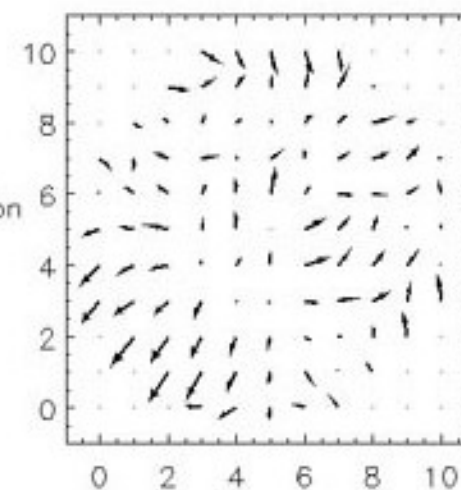


Wavefront



modal reconstruction  
←  
24 modes

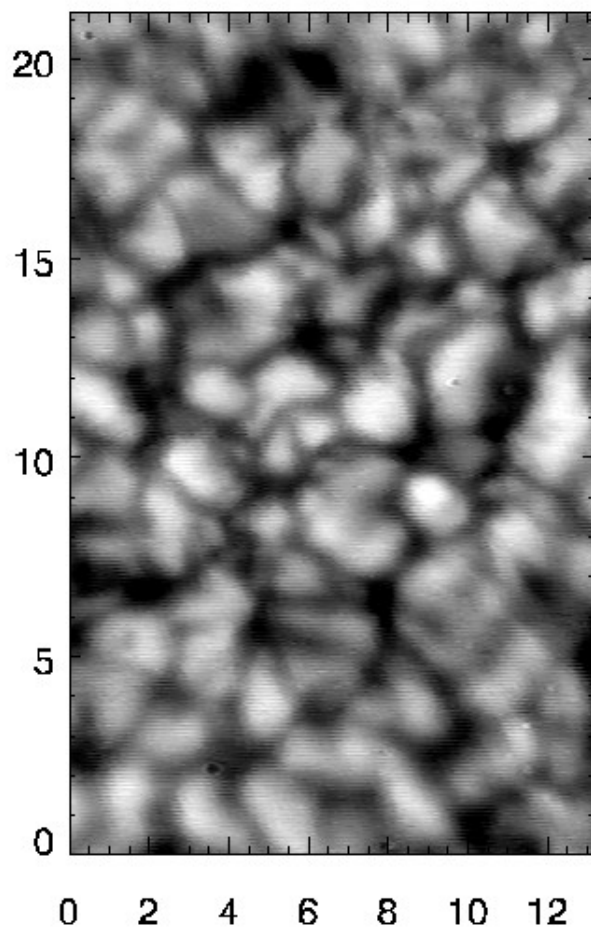
Slope Vectors



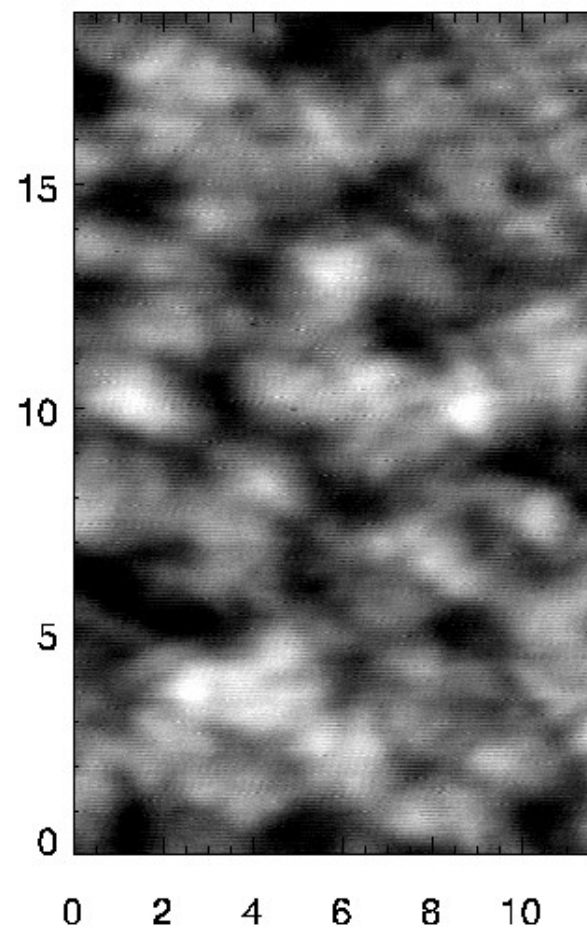


# S AO vs. bez AO

with AO



without AO





## Věžový dalekohled

Swedish Solar Telescope  
Roque de los Muchachos  
La Palma  
2500 m n. m.

1m dalekohled s adaptivní  
optikou, rozlišení až 0,1''.





# Na věži





# Pod věží

