

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

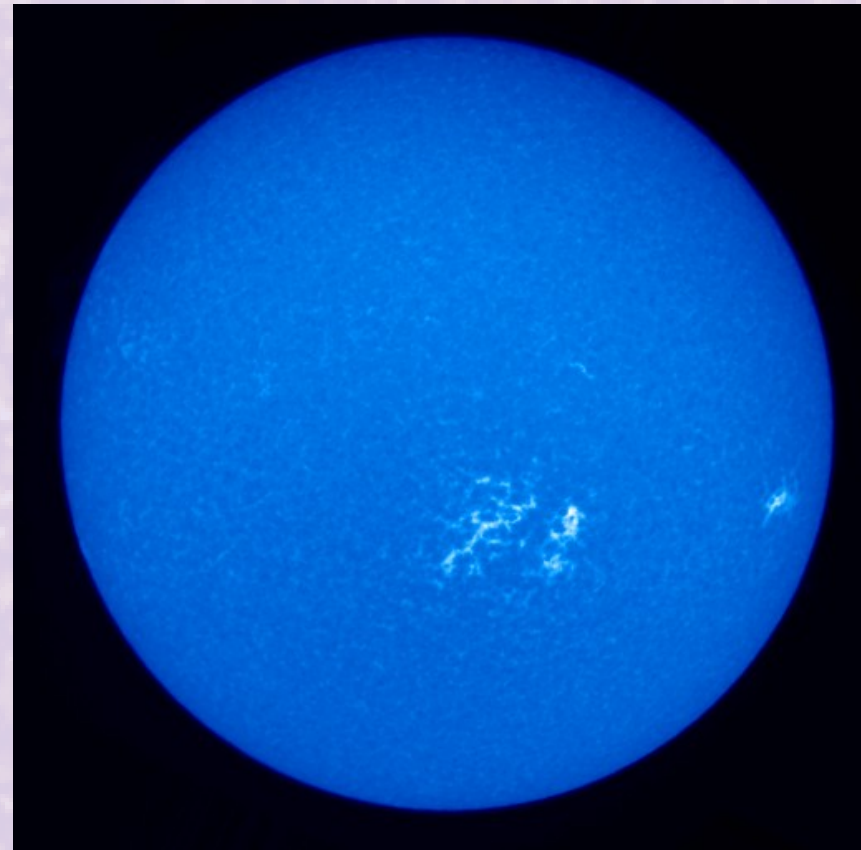
- Průměr dalekohled bez seeingu se stejným rozlišením jako rozlišení dalekohledu se seeingem

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

Seeing 1", $F = 13 \text{ cm}$ pro pozorování na 550 nm

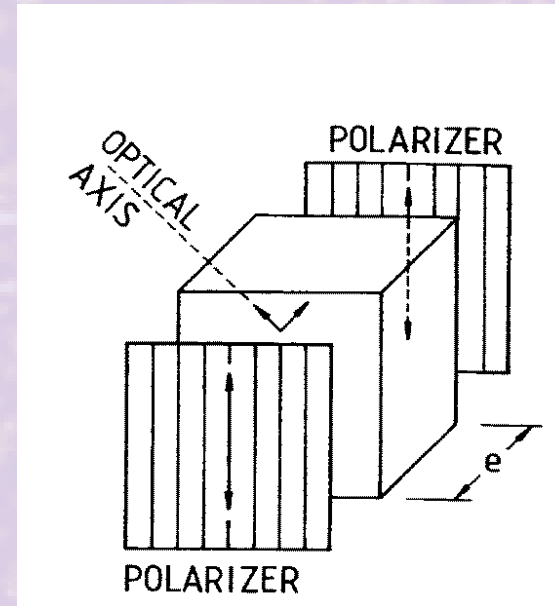
Filtrogram vs. spektroheliogram

- 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



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

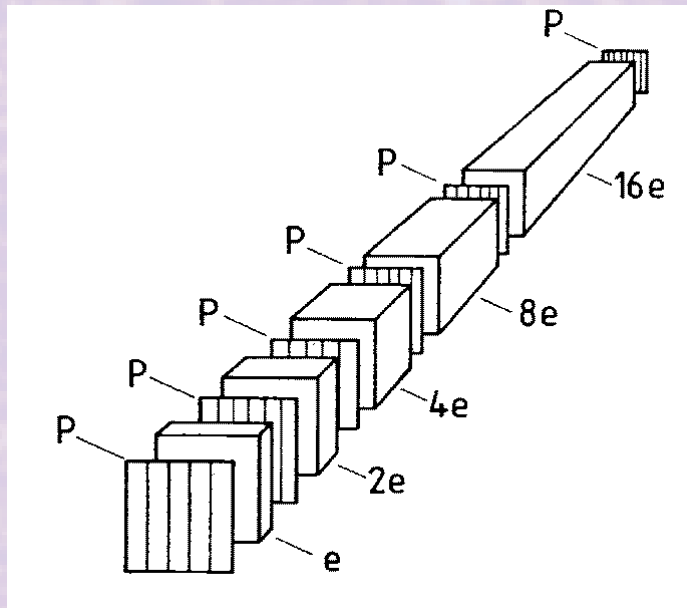
$$\delta = \frac{2\pi e J}{\lambda}, \quad J = n_o - n_e$$

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

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

Lyotův filtr: N destiček

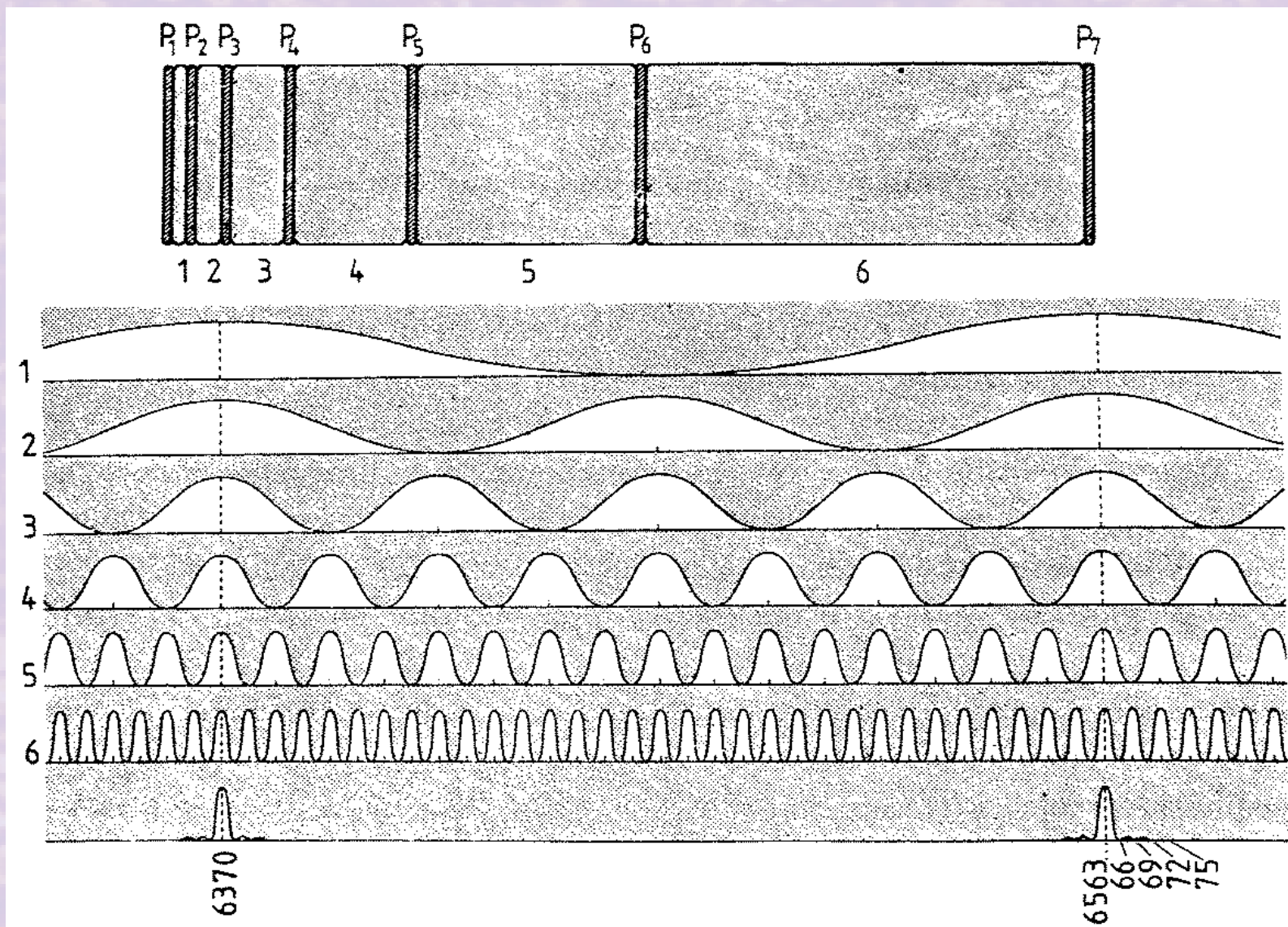
- N destiček s tloušťkou $e, 2e, 4e, \dots$



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

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

Lyotův filtr: průchozí světlo



+široký rámcovací filtr

Stokesovy parametry

EM pole s komponentami:

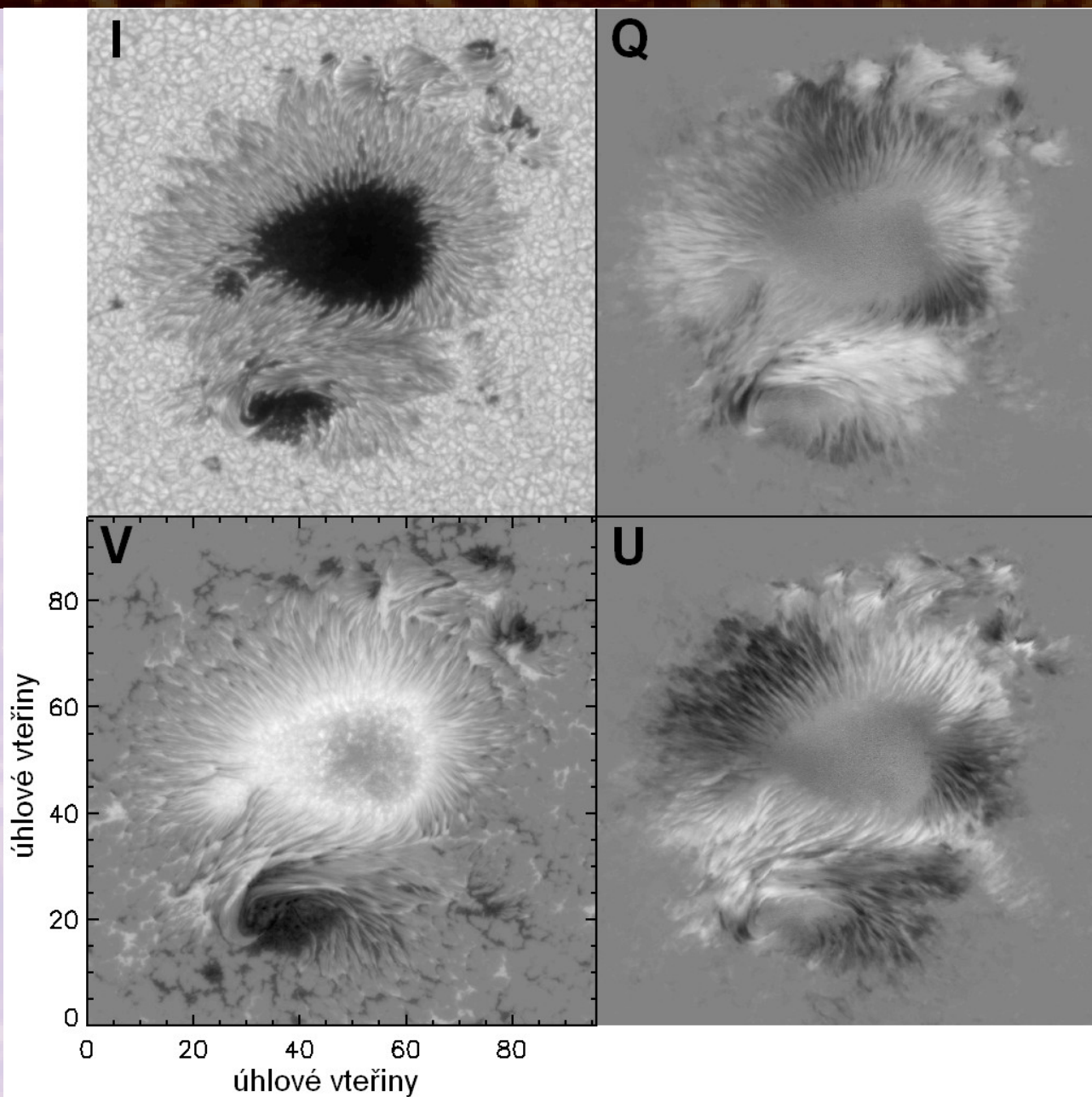
$$E_1 = A_1 e^{i(\phi_1 - \omega t)} = \epsilon_1 e^{-i\omega t}, \quad E_2 = A_2 e^{i(\phi_2 - \omega t)} = \epsilon_2 e^{-i\omega t}$$

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

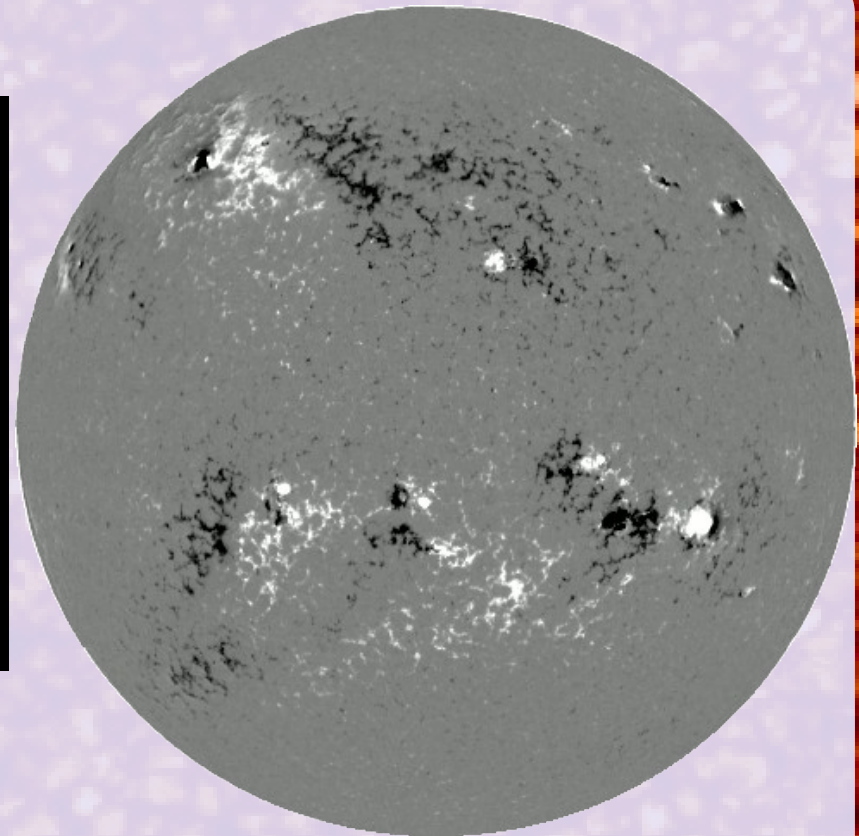
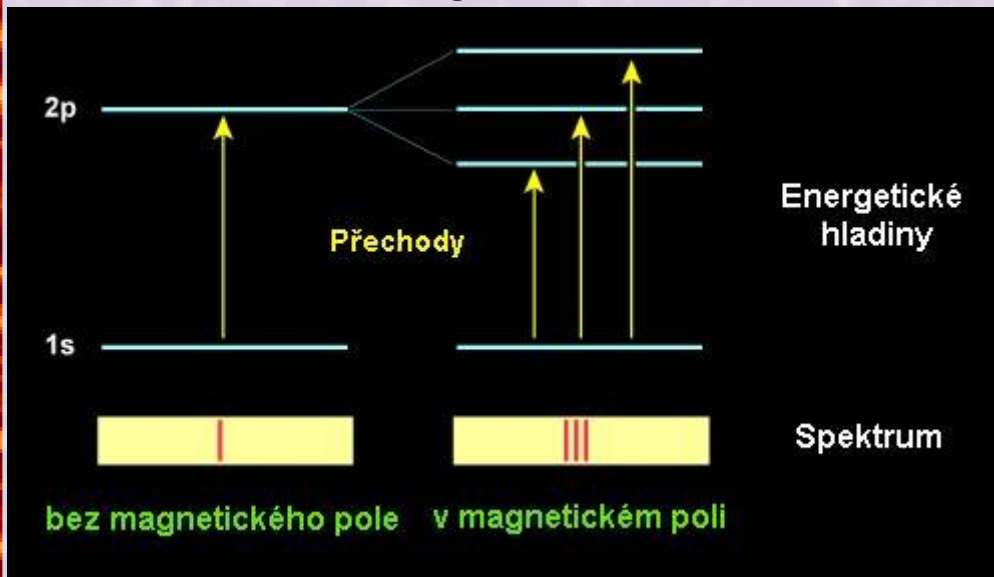
Stokesovy parametry:

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

Polarigramy sluneční skvrny



Zeemanův jev



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

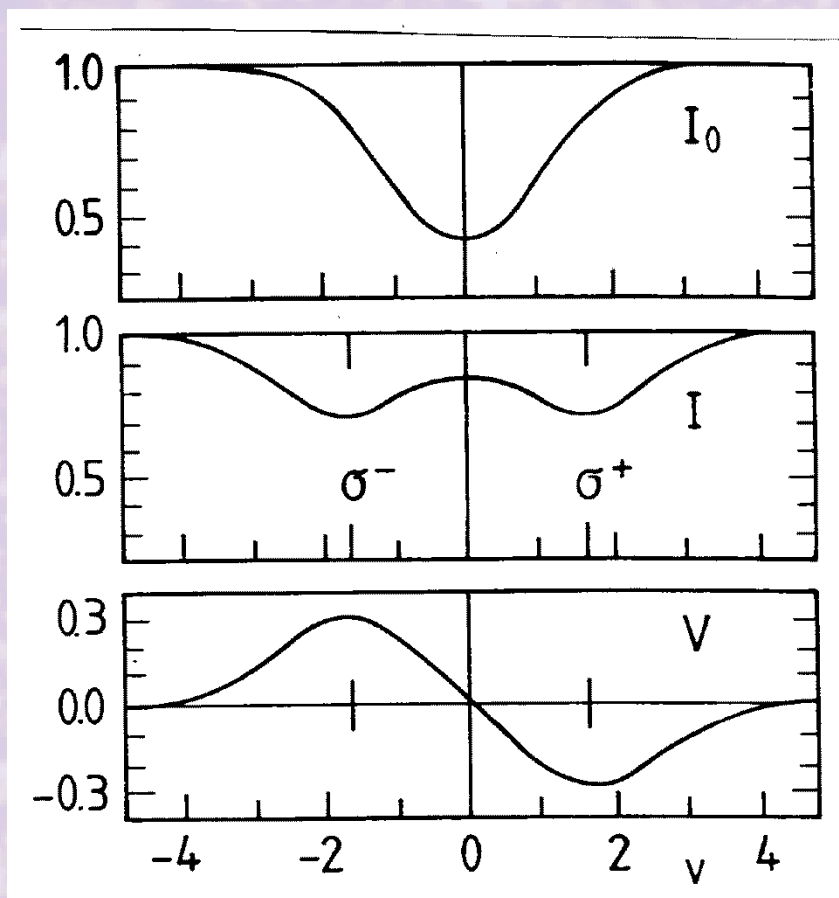
kvantovka : $\Delta \nu = \pm m g_L \mu_B B$, $\mu_B = \frac{e \hbar}{2 m_e}$

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

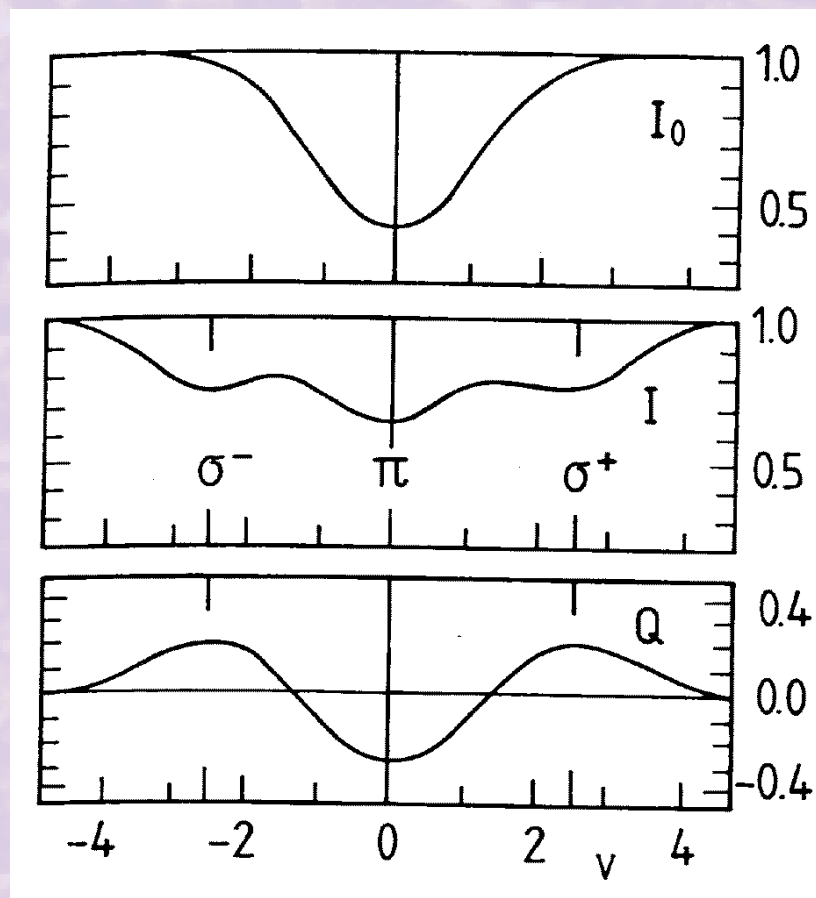
Podélně: 2 σ (kruhová polarizace) , 1 π (lineární polarizace)

Příčně: 2 σ (lineární polarizace)

Podélný vs. příčný



Podélný



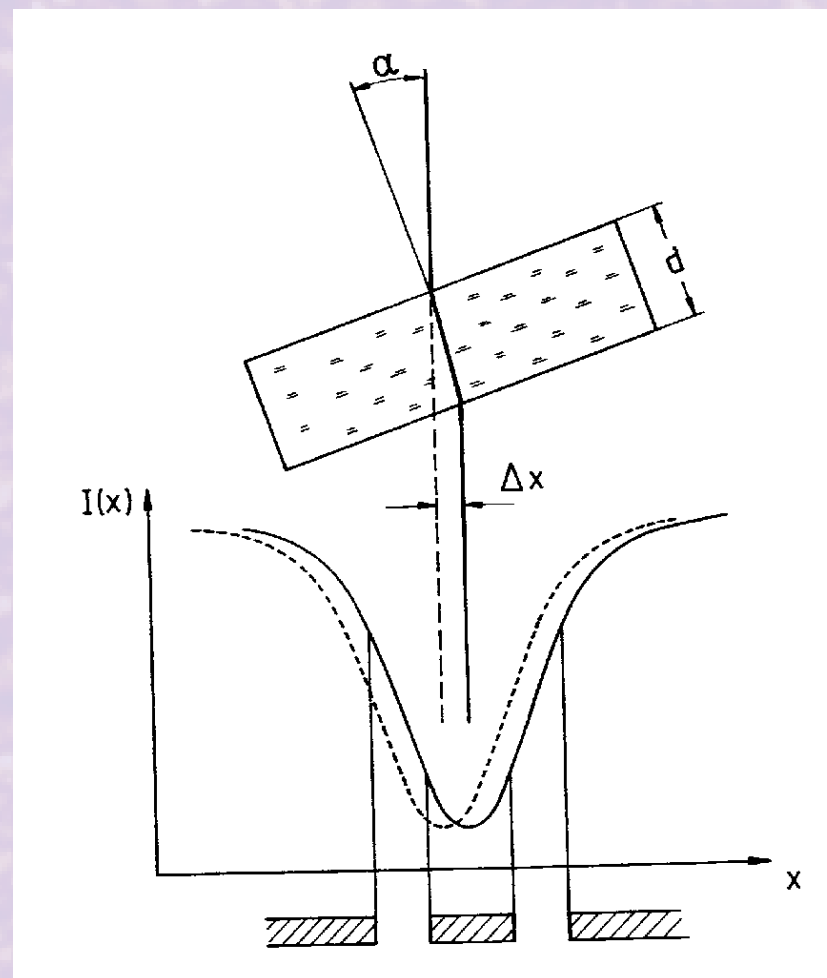
Příčný

Měření rychlostí: dopplerovský kompenzátor

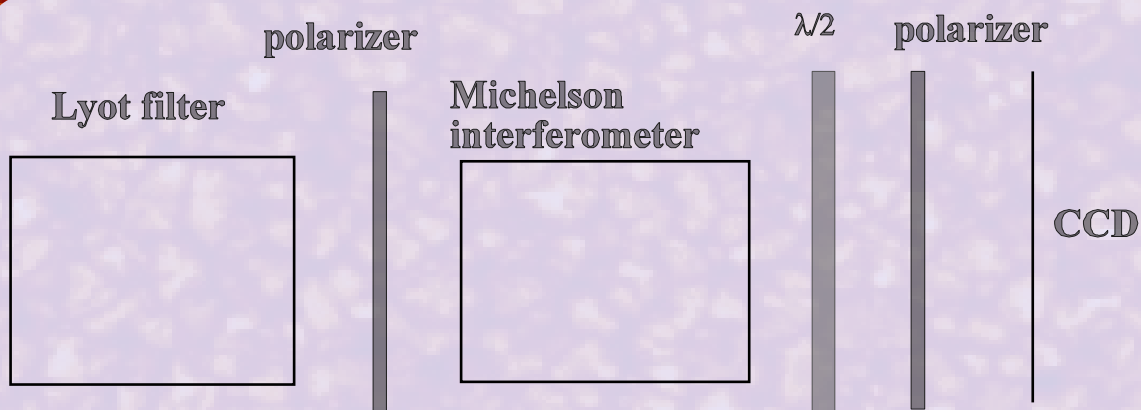
- Natočením destičky se posune čára tak, aby se vyrovnal signál na fotonásobičích měřících intenzitu ve spektru čáry
- Rychlost je úměrná úhlu natočení

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

- 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 ϕ .

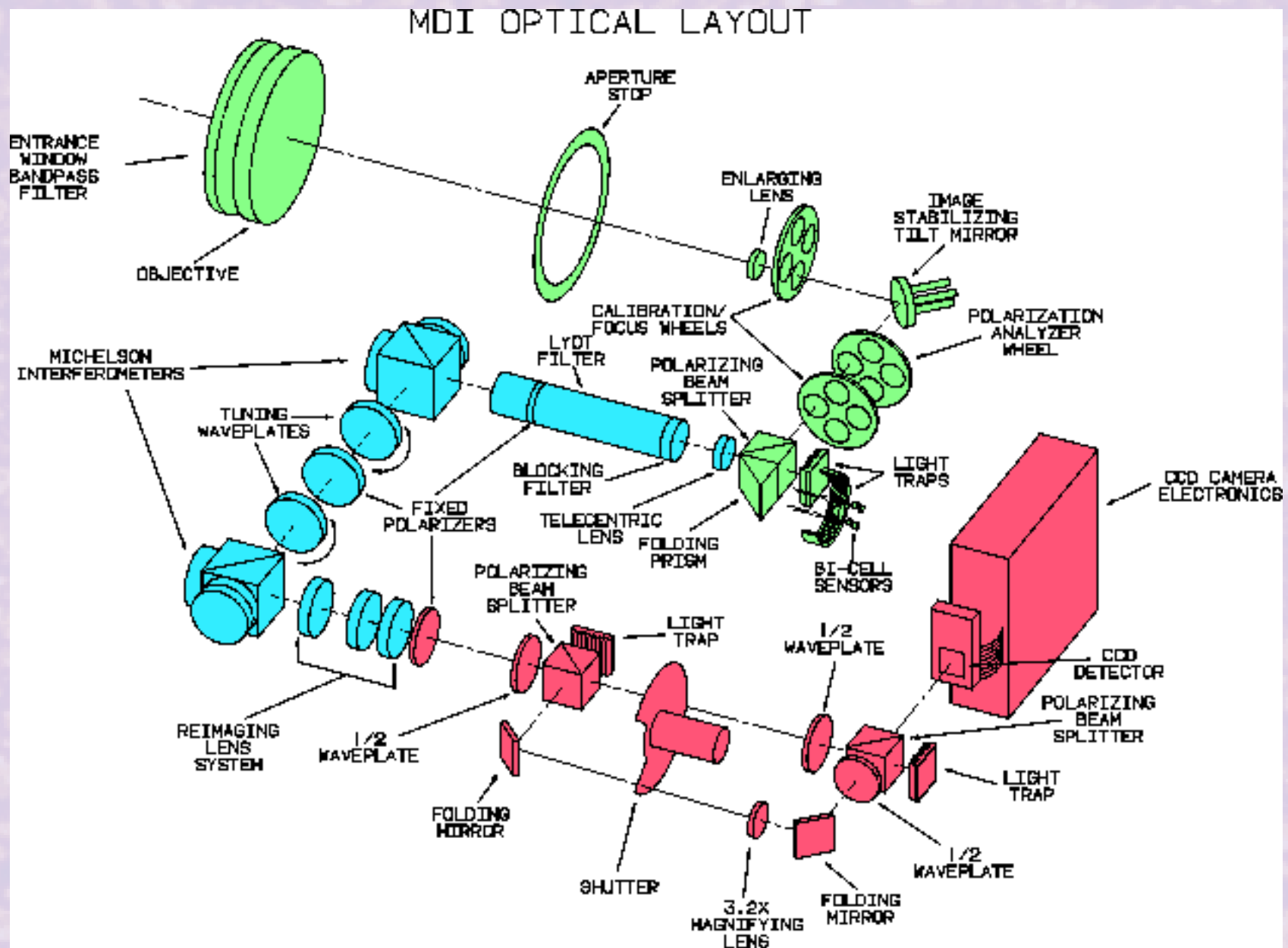
Rotující čtvrtvlnná destička přidá další modulaci $I \sim \cos(2\theta + \phi)$.

Měříme intenzitu ve třech polohách otočení destičky po 120° .

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

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

Fourierovské měření v praxi: MDI@SoHO



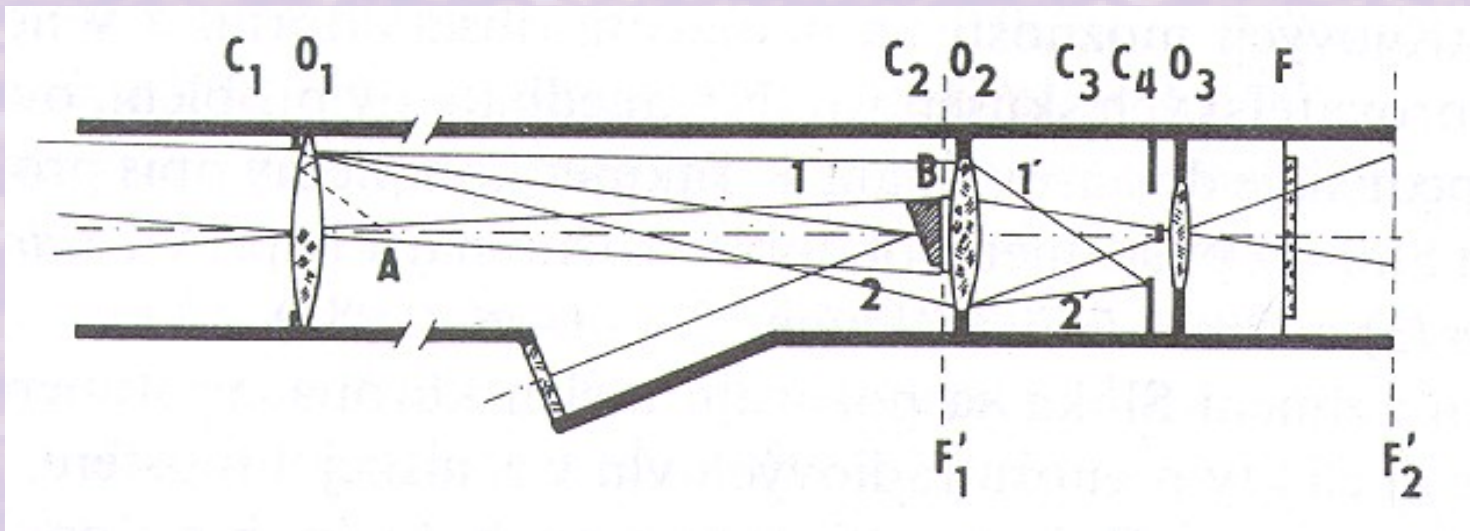
Z Fourierovy analýzy platí: $\Delta \omega = \omega_{\min} = \frac{2\pi}{T} \leq \omega \leq \frac{\pi}{\Delta t} = \omega_{\text{Ny}} = \omega_{\max}$

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

Δt (Δx) 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 jasů 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.

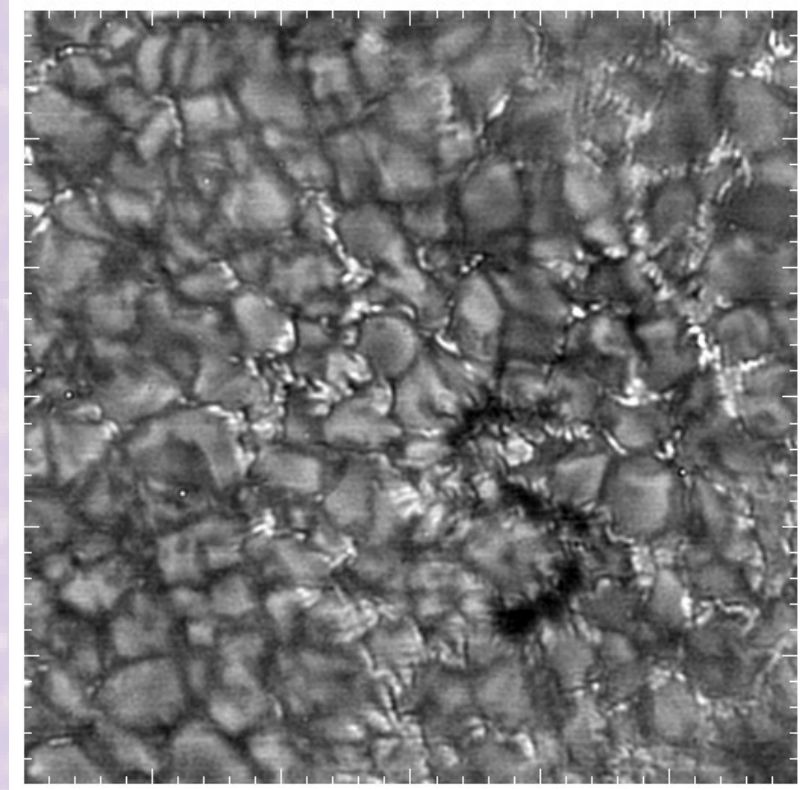
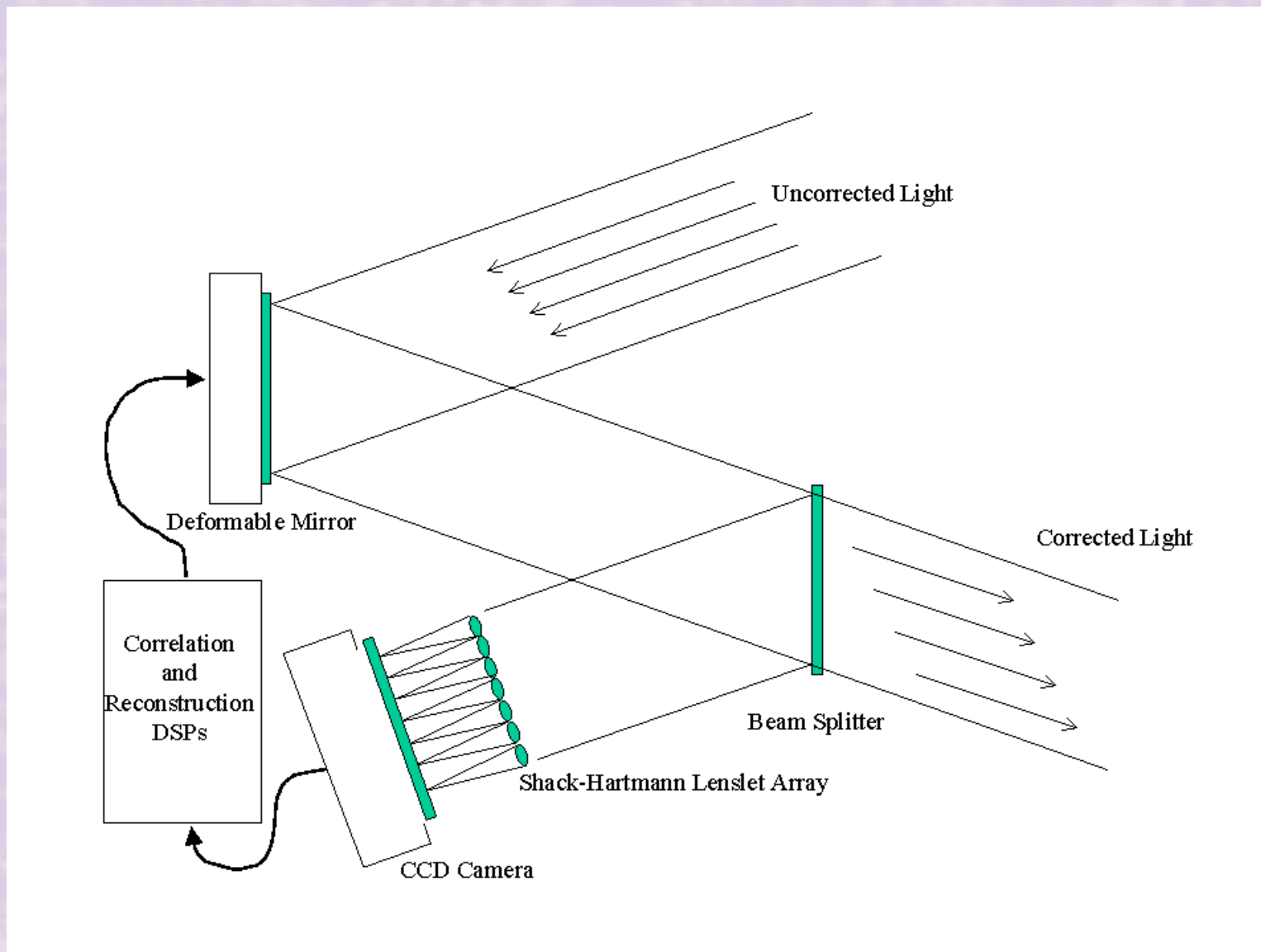
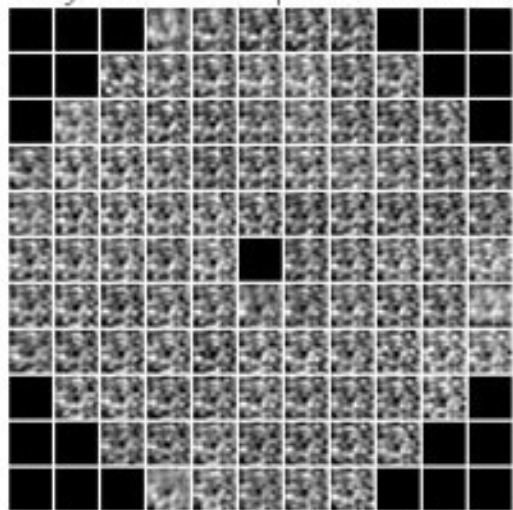


Schéma slunečního teleskopu s AO



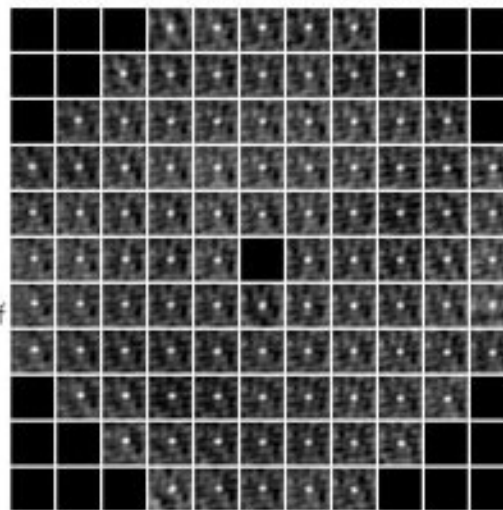
Hartmann-Shack sensor

Array of subaperture images

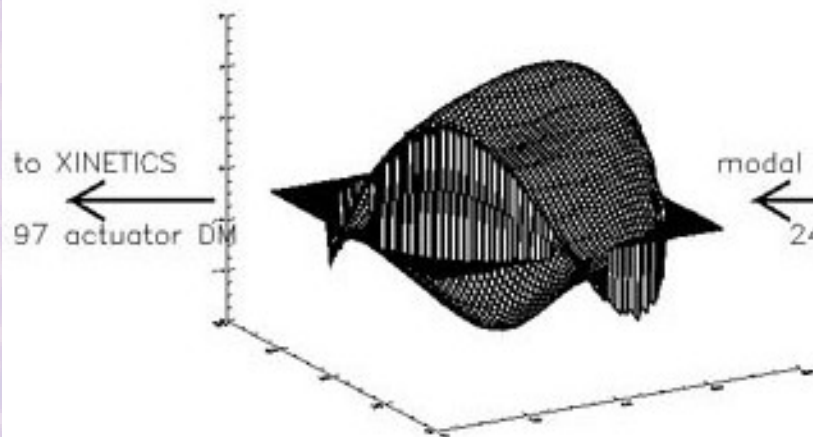


compute cross-correlations
using off-the-shelf DSP processors

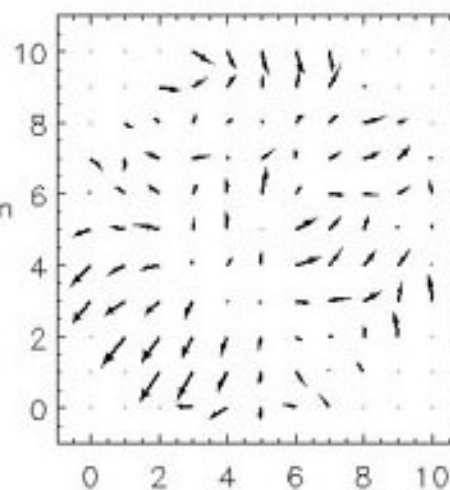
2-d Crosscorrelations



Wavefront



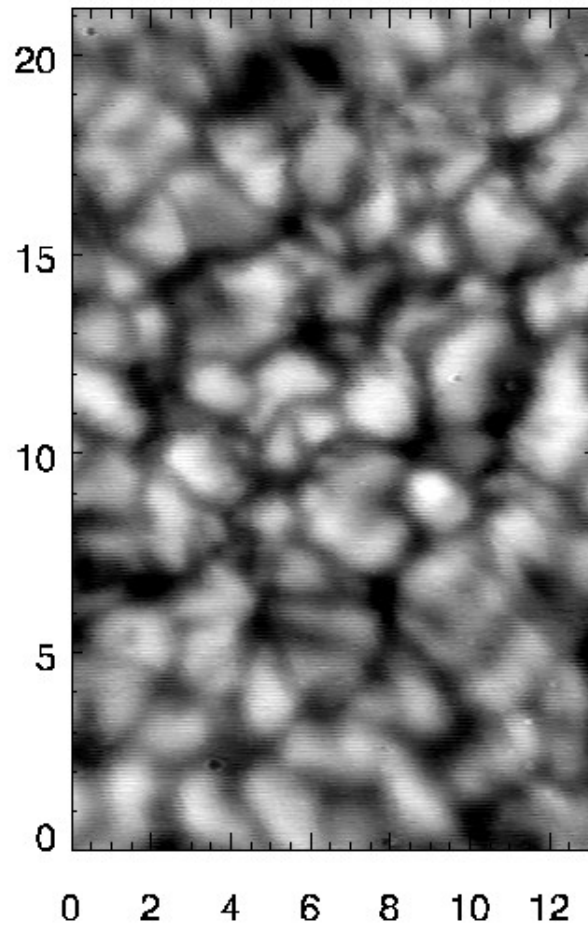
Slope Vectors



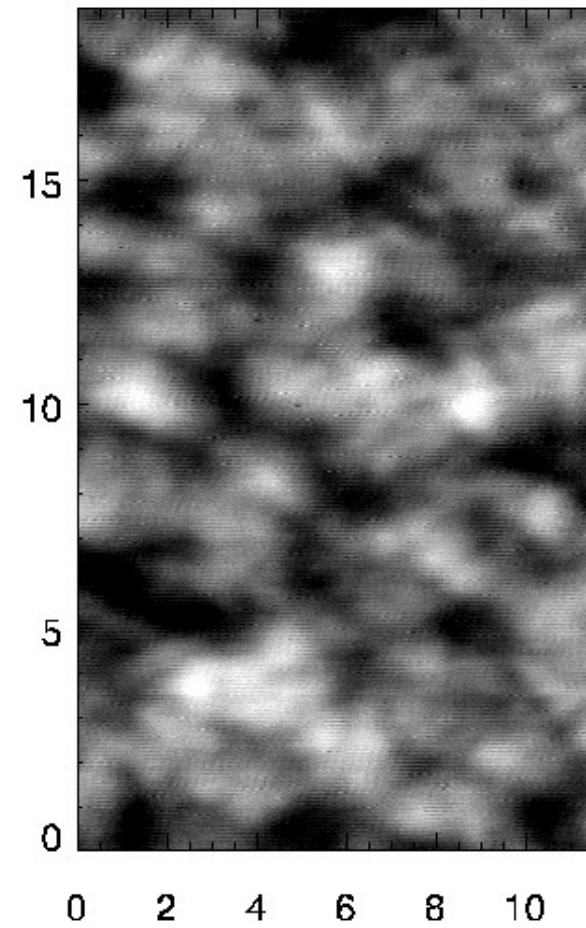
modal reconstruction
24 modes

S AO vs. bez AO

with AO



without AO



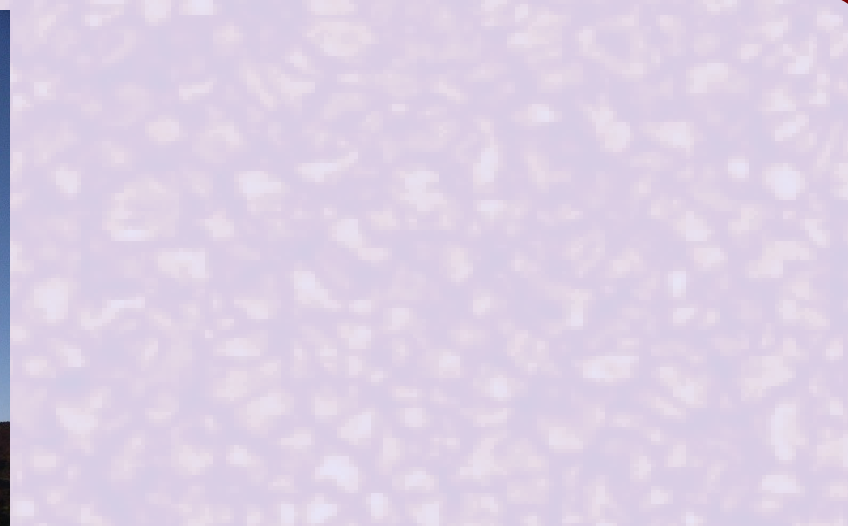
Věžový dalekohled

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

