

Zajímavé vlastnosti sluneční atmosféry: magnetická a rychlostní pole

Spektroskopie (nejen)
ve sluneční fyzice
LS 2011/2012

Michal Švanda

Astronomický ústav MFF UK
Astronomický ústav AV ČR

Vliv na tvar spektrální čáry

- **Dopplerův jev** (způsobený systematickým pohybem)
 - Uvažujeme pouze podélný
 - Posun středu spektrální čáry
- **Vliv magnetického pole**
 - Atom
 - L totální orbitální moment hybnosti elektronů v obalu
 - S spin
 - J celkový orbitální moment
 - $|L-S|, |L-S|+1, \dots, L+S$
 - M_J magnetické kvantové číslo
 - $-J, -J+1, \dots, J$
 - V případě nulového magnetického pole mají všechny hladiny s různým M_J stejnou energii

• Magnetické pole degeneraci snímá

- Landého faktor

- Škáluje posun hladin
$$g = 1 + \frac{J(J+1) + S(S+1) - L(L+1)}{2J(J+1)}$$

• Zeemanův jev (slabé pole)

- Spin-orbitální interakce silnější než externí pole
- Zachovává se celkový moment L
- S a L “preceduje” kolem vektoru $J=L+S$

• Paschen-Backův jev (silné pole)

- Externí pole naruší spin-orbitální interakci, L a S se zachovávají zvlášť

• Hanleův jev

- Redukce polarizace atomy v magnetickém poli, pokud byly předtím vystaveny ozáření polarizovaným světlem

• Přejchod z hladiny na hladinu:

- g, g', M, M'
- Posun vlnové délky

$$\Delta \lambda = \frac{e}{4\pi c m_e} g^* \lambda_0^2 B,$$

$$g^* = gM - g' M'$$

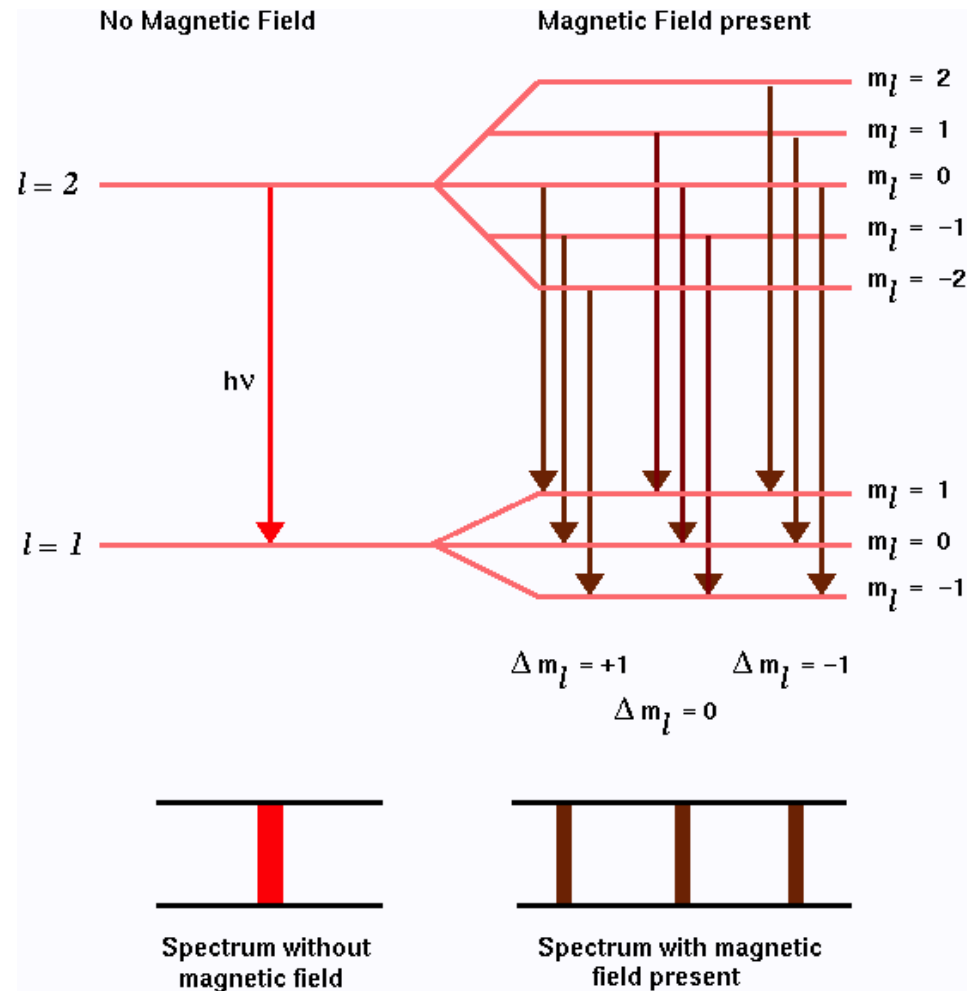
• Normální Zeemanův jev:

- $S = 0$
- $\Delta M_J = -1, 0, 1$
- (Lorentzův) triplet
- Za speciálních podmínek je triplet možný i pro $S \neq 0$

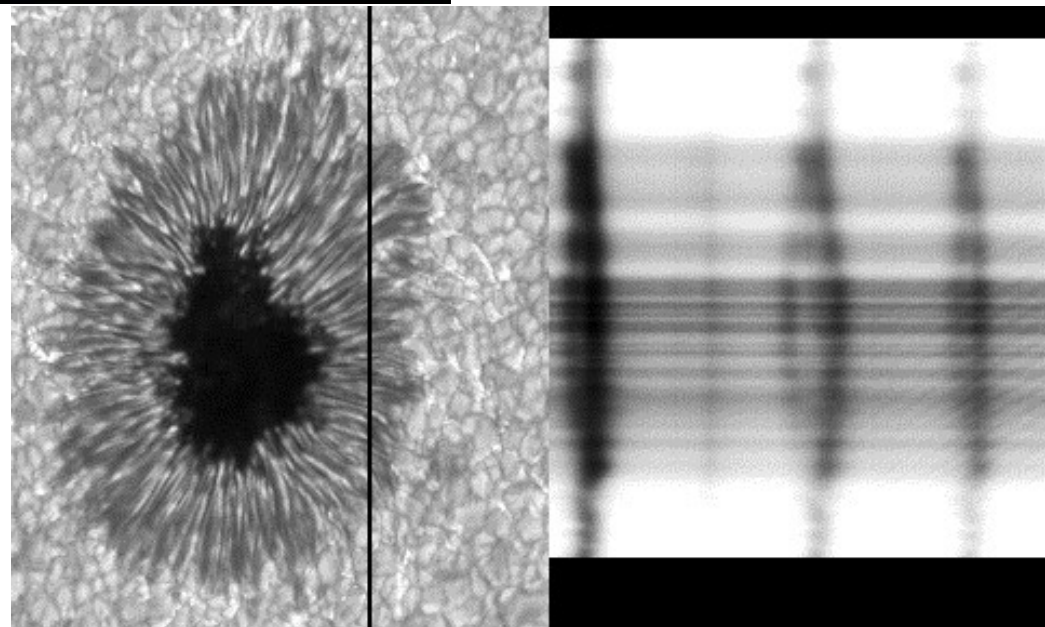
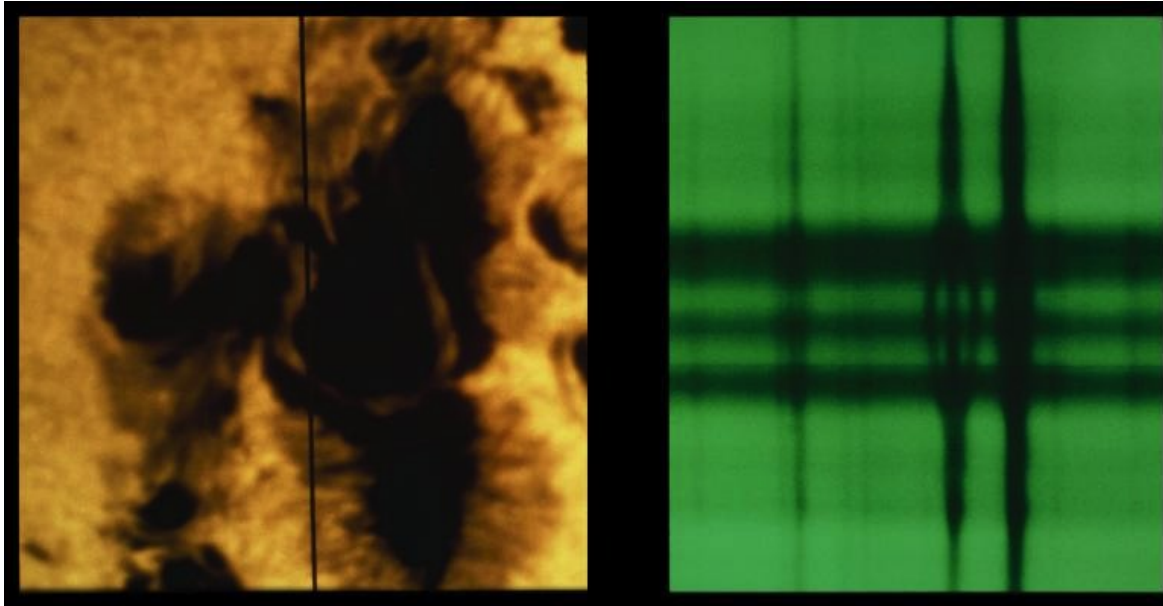
• Běžný je anomální Zeemanův jev

- Multiplet
- Pro slabá pole jsou ostatní komponenty neviditelné, je tedy možné uvažovat aproximaci tripletem)

Zeeman triplet

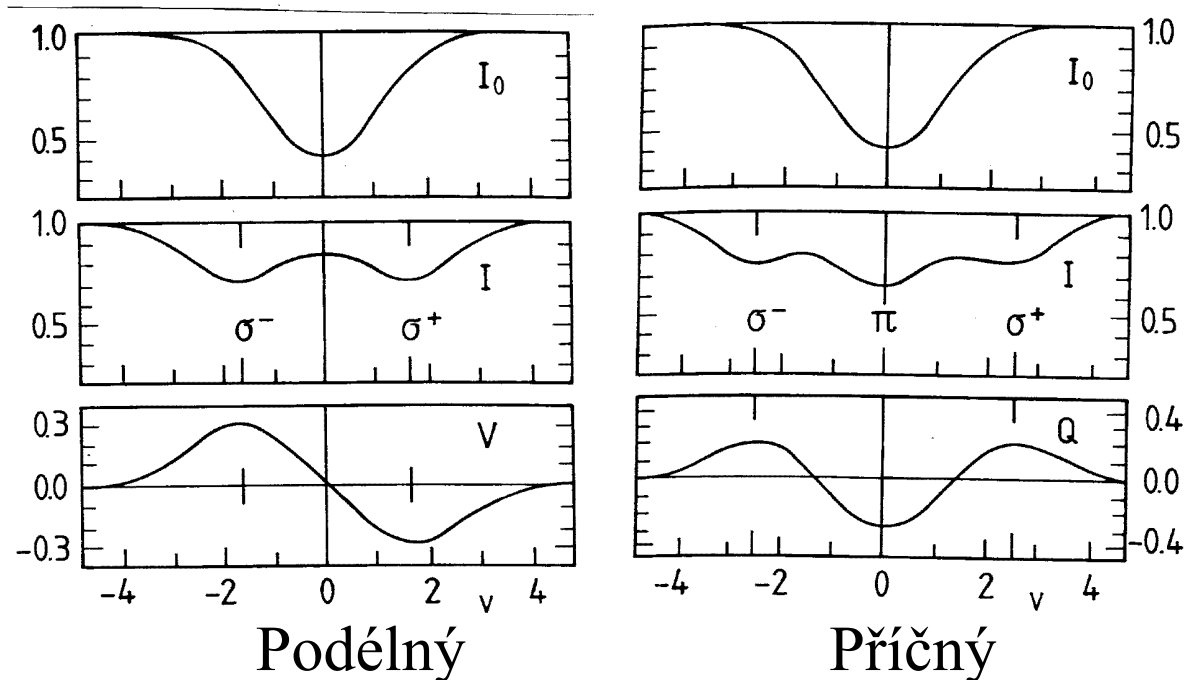


Zeemanovské rozštěpení

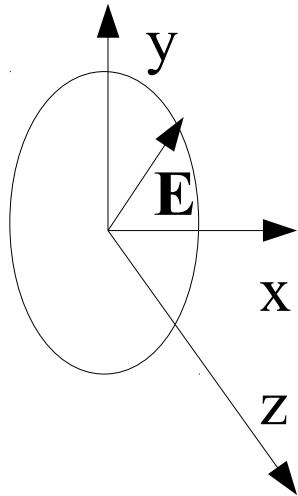


Triplet ještě jednou

- Pro absorpční čáru v opticky tenké vrstvě
 - Podélný (podél pole) – pouze rozštěpené kruhově polarizované σ komponenty
 - Příčný (napříč polem) – tři komponenty lineárně polarizované, π kolmo k \mathbf{B} , σ rovnoběžně s \mathbf{B} .
- Pro emisní čáry
 - Přehozené orientace polarizací



- Obecný směr **B**: všechny tři komponenty, σ elipticky polarizované
- Kolizní a Dopplerovské rozšíření – magnetické pole musí být alespoň 0,15 T (1500 G), abychom mohli něco pozorovat.
- Polarizace komponent – usnadňuje měření rozštěpu



$$E_x = \xi_x \cos \varphi$$

$$E_y = \xi_y \cos(\varphi + \epsilon)$$

$$\varphi = \omega t - kz$$

ξ_x, ξ_y, ϵ plně popisují polarizaci světla

Ekvivalent: **Stokesovy parametry**

$$I = \xi_x^2 + \xi_y^2$$

$$Q = \xi_x^2 - \xi_y^2$$

$$U = 2 \xi_x \xi_y \cos \epsilon$$

$$V = 2 \xi_x \xi_y \sin \epsilon$$

$$I^2 = Q^2 + U^2 + V^2$$

Stokesovy parametry pro obecné světlo

Světlo není monochromatické, realizuje se více polarizačních stavů.
Stokesovy parametry svazku pak jako statistické průměry

$$I = \langle \xi_x^2 + \xi_y^2 \rangle$$

$$Q = \langle \xi_x^2 - \xi_y^2 \rangle$$

$$U = 2 \langle \xi_x \xi_y \cos \epsilon \rangle$$

$$V = 2 \langle \xi_x \xi_y \sin \epsilon \rangle$$

Nepolarizované světlo: fáze ϵ rovnoměrně mezi 0 a 2π a nekorelované s ξ_x a $\xi_y \rightarrow Q = U = V = 0$.

Částečná polarizace: stupeň polarizace P

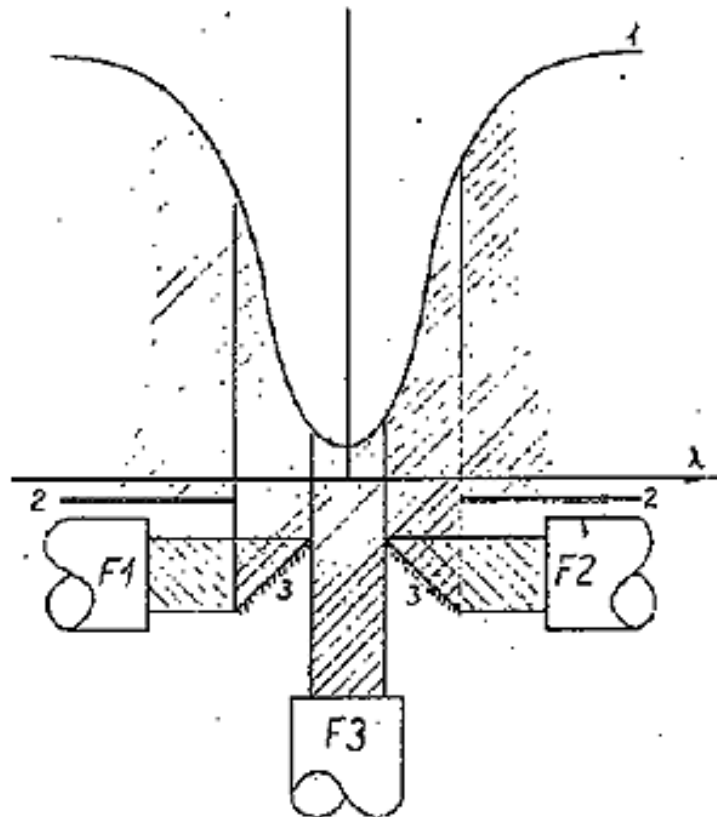
$$P = \sqrt{\frac{Q^2 + U^2 + V^2}{I^2}}$$

Stokesovy profily, polarimetrie

Na tabuli

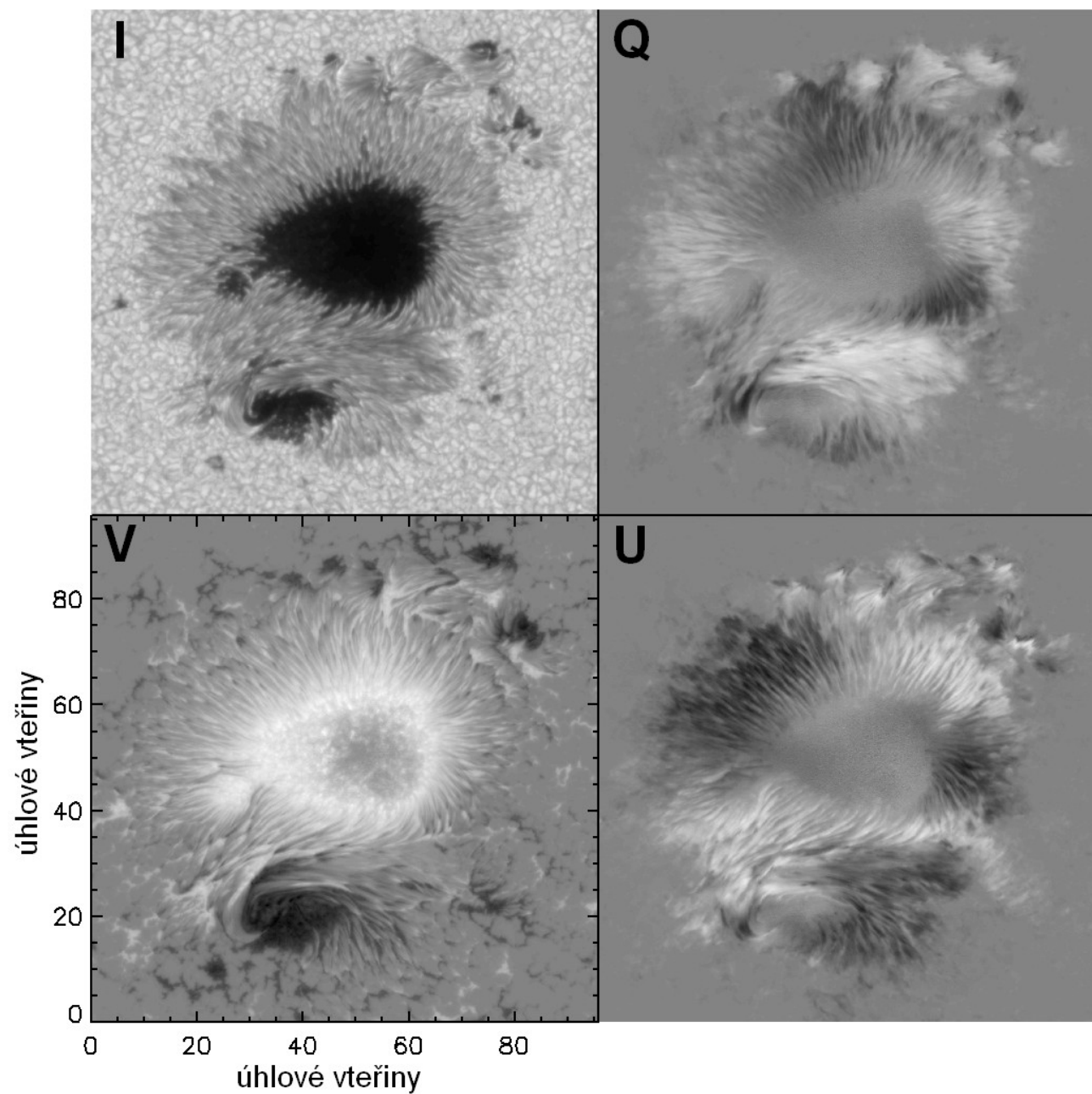
Měření magnetických polí

- Magnetooptické filtry – vše najednou
- Skenování spektrální čáry, polarizace pomáhá
- Měření v křídlech spektrální čáry, výběr sigma komponent $\lambda/4$ destičkou, měření rozštěpu



Měření vektorového magnetického pole

- Inverzí polarigramů

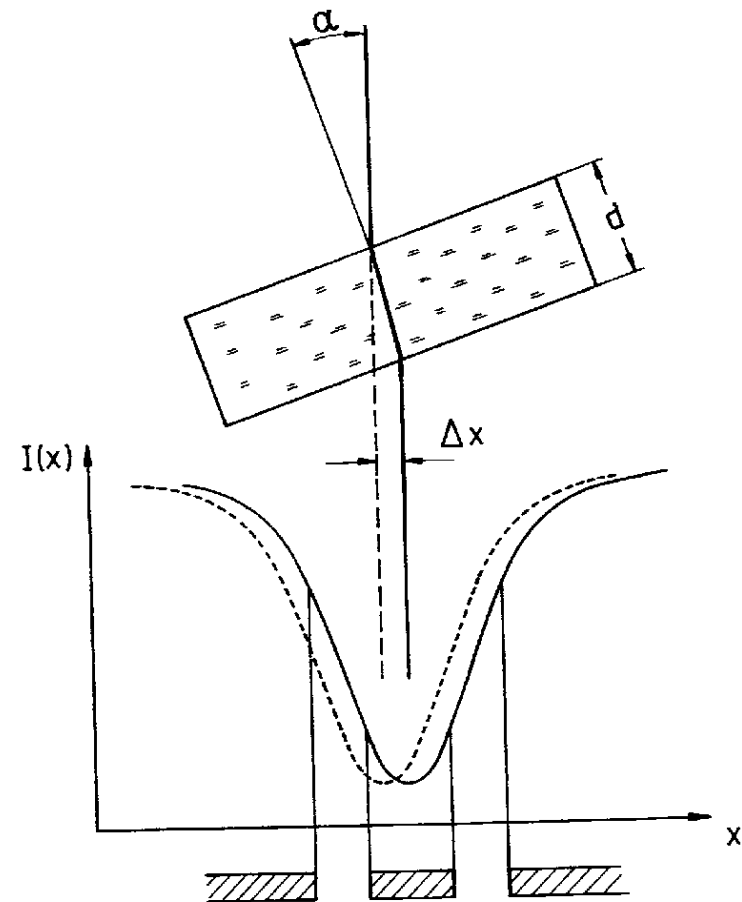


Měření rychlostí klasicky

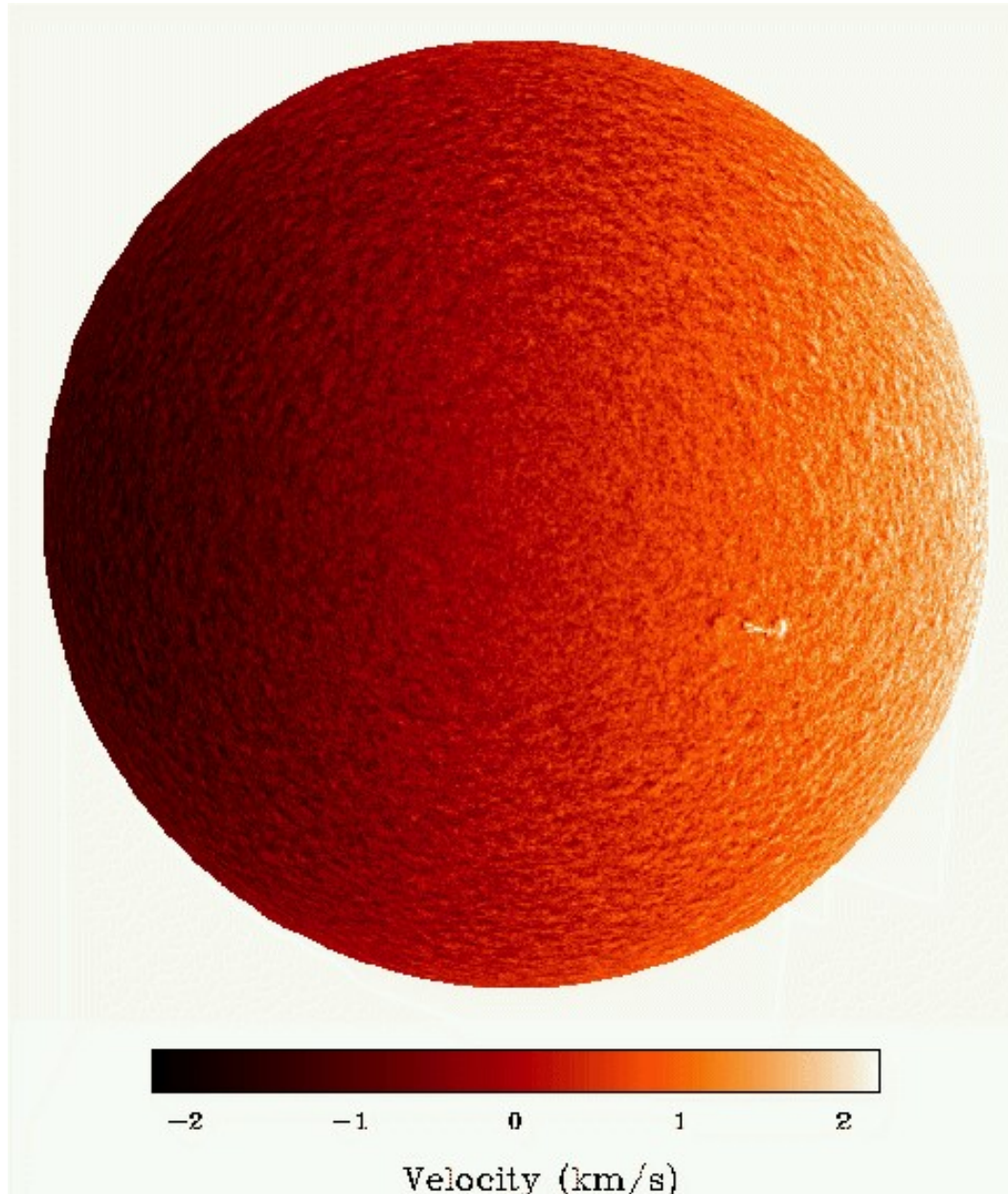
- Natočením destičky se posune čára tak, aby se vyrovnal signál na fotonásobičích měřících intenzitu ve spektru čáry
- Rychlost je úměrná úhlu natočení

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

- Používá se ve skenovacích magnetografech, signál se rychle vyhodnocuje



Dopplergramy



- Dnes: více pozic ve spektrální čáře (MDI, HMI), ideálně skenováním spektrální čáry
- Celodiskové mapy dopplerovské komponenty rychlosti

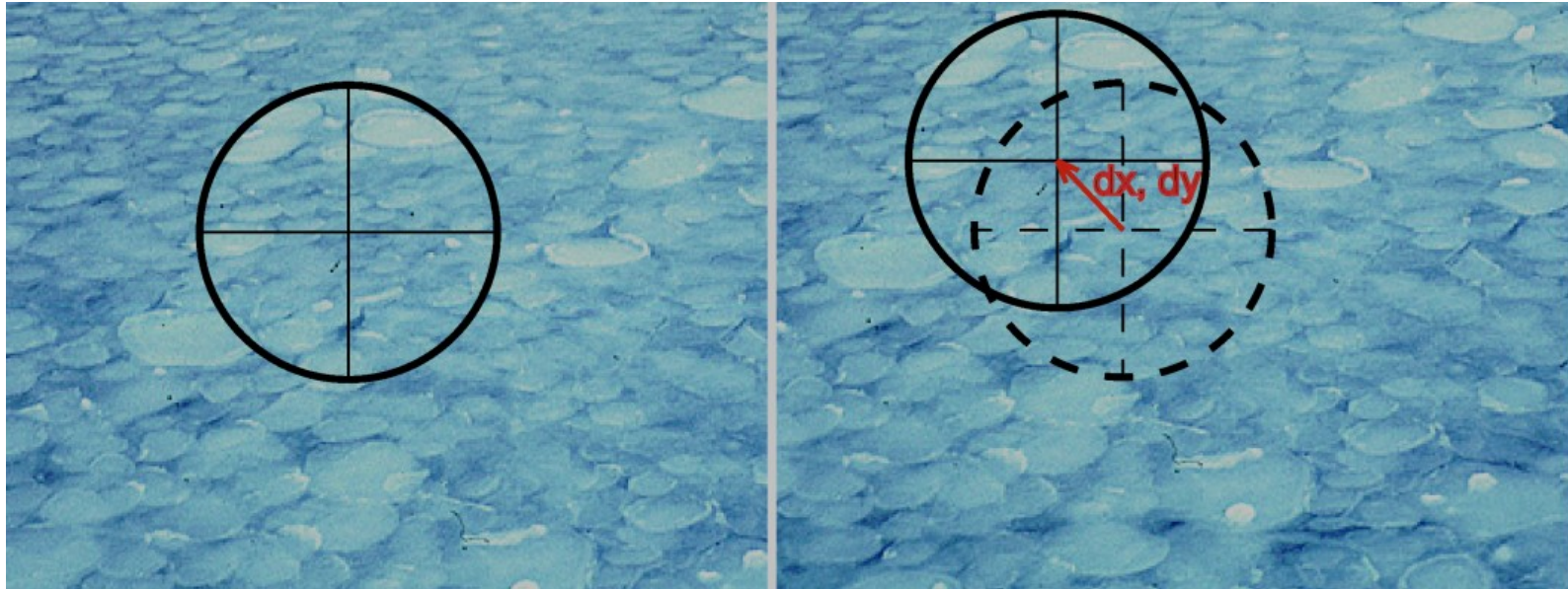
Horizontální rychlosti – tracking

- Ze sekvence pozorování
 - Stejným přístrojem
 - Stejné místo na Slunci
 - Pokud možno rovnoměrná kadence
- Feature tracking
 - Trasování jednotlivých struktur
- Local Correlation Tracking
 - Korelace oblastí, princip nejlepší shody
- Ball Tracking
 - Rozhození “míčů” do “údolí” jasové mapy, řeší se pohybová rovnice, míče sledují pohyb “údolí”. Dále mají moment hybnosti – robustní vůči výpadku snímků ve sekvenci.

Sekvence pozorování

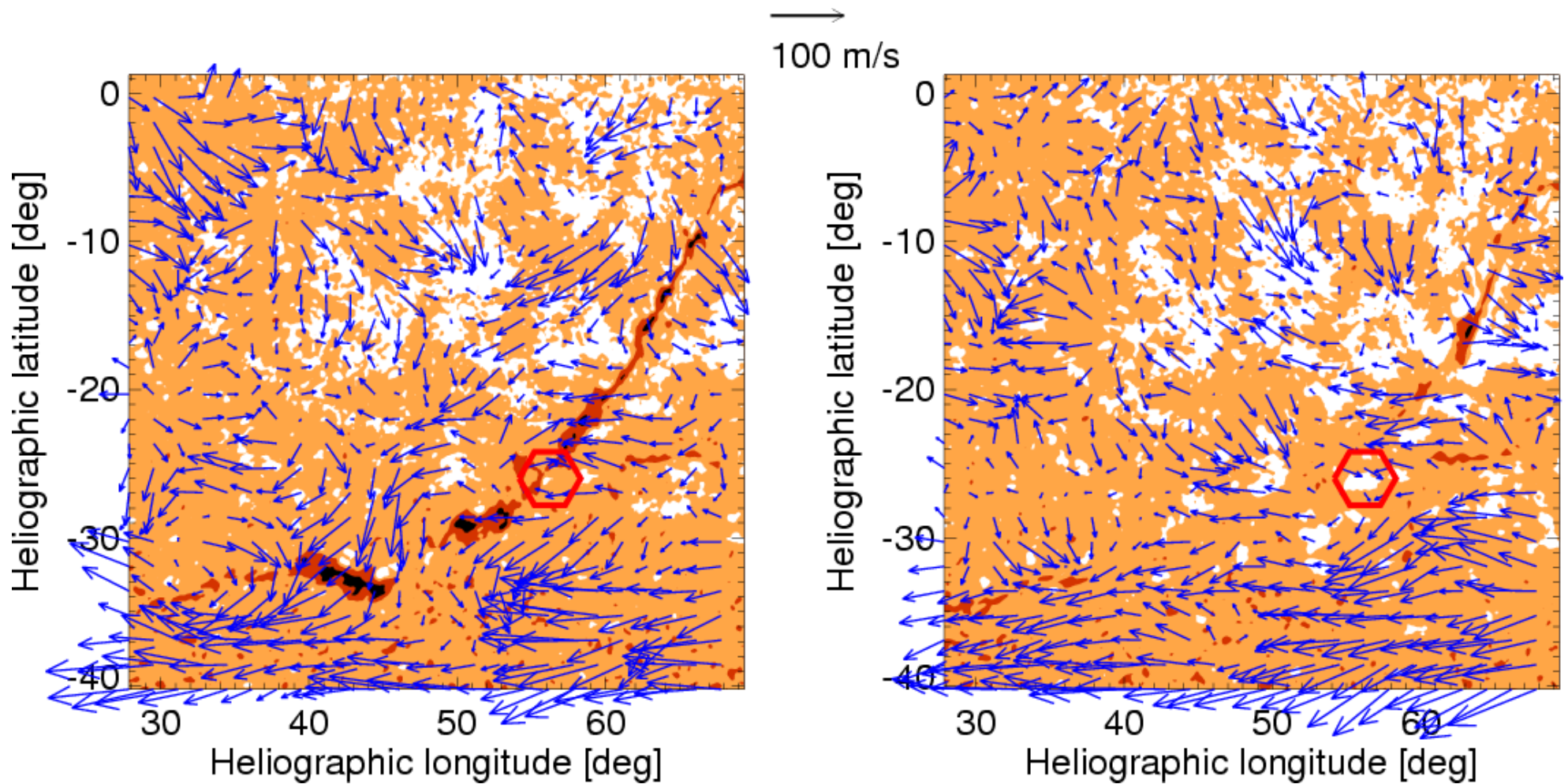


Princip nejlepší shody



- Vyhodnocuje se korelace jako funkce (x,y) , hledá (fituje) se pozice, na níž je korelace maximalizována
 - Volba míry korelace

LCT proudění plazmatu pod filamentem



před erupcí

po erupci