

Spektroskopie Slunce

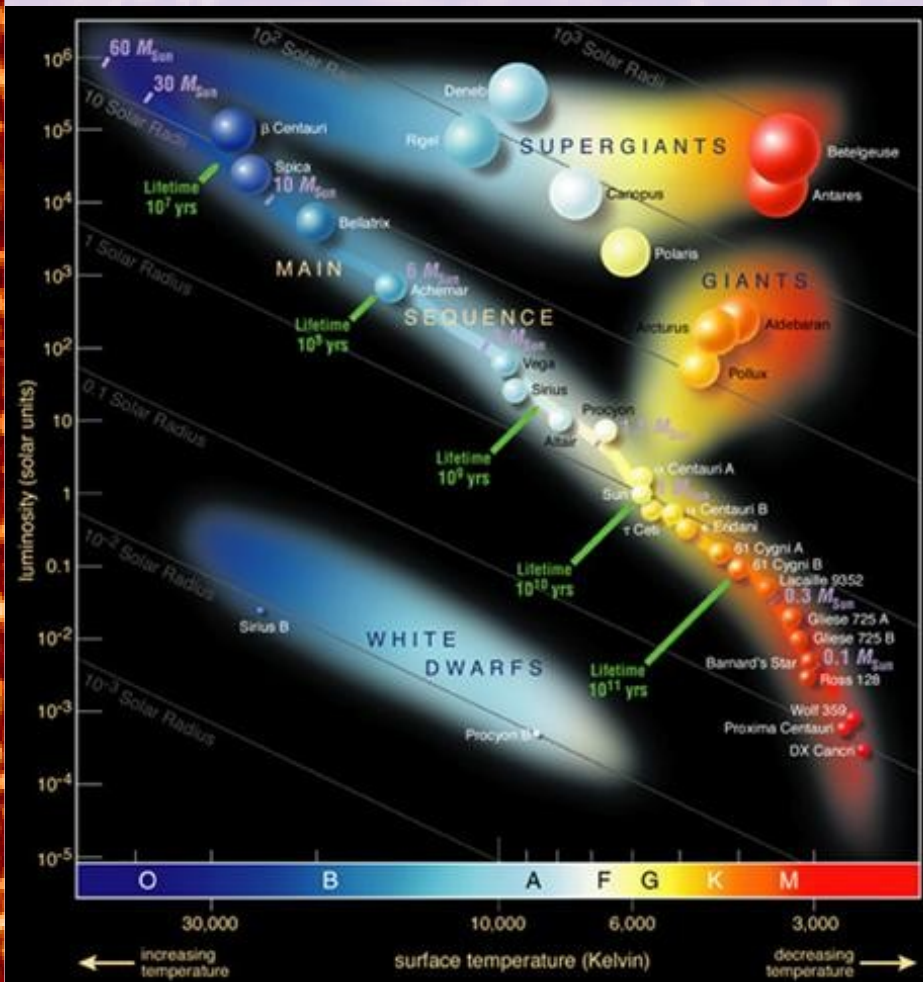
Spektroskopie (nejen) ve sluneční
fyzice
LS 2011/2012

Michal Švanda

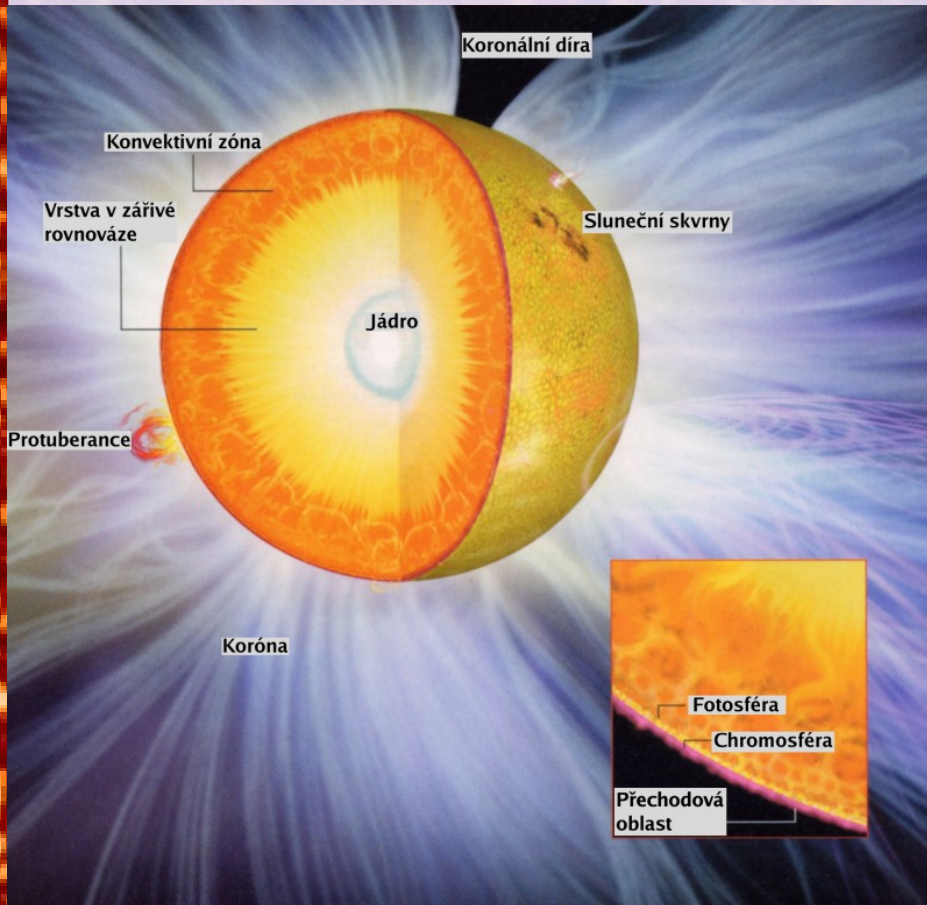
Astronomický ústav MFF UK
Astronomický ústav AV ČR

Slunce jako hvězda

- Spektrální třída G2, hlavní posloupnost
- 4,5 mld let, v „nejlepších letech“
- Ještě 6,4 mld let na hlavní posloupnosti
- Za cca 8 mld let jen bílý trpaslík
- $M = 1,98 \times 10^{30}$ kg
- $R = 695\,980$ km
- $L = 3,84 \times 10^{26}$ W
- $Z = 0,016$
- $T_{\text{eff}} = 5770$ K

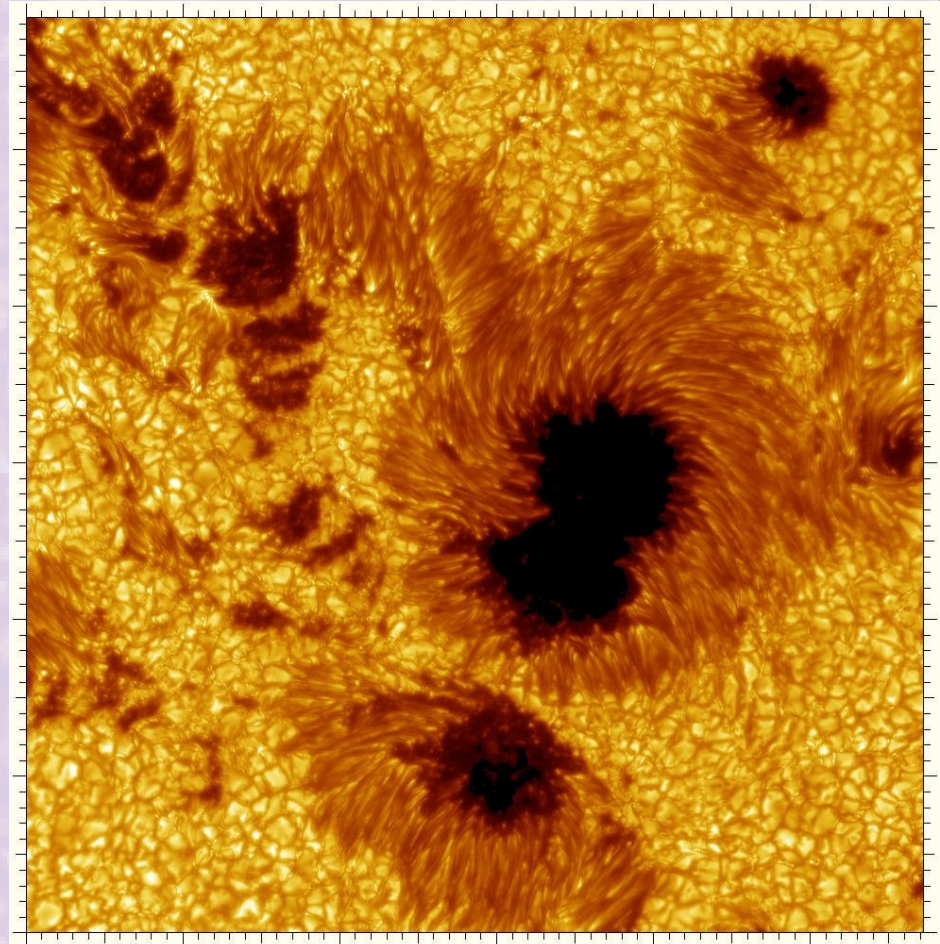


Vnitřní struktura Slunce



- Jádro
 - Zářivá vrstva
 - Konvektivní vrstva
 - Fotosféra
 - Chromosféra
 - (Přechodová vrstva)
 - Koróna
-
- Rovnováha sil
 - Modely nitra
 - Helioseismologie

- V bílém světle
 - Kresby/fotografie
 - Spektrum
 - Vysoké rozlišení
- Spektrální pozorování
- Speciální pozorování
 - Magnetogramy
 - Dopplergramy
- Vše s prostorovým i časovým rozlišením
- ? *Slunce jako hvězda ?*



• Dalekohled

- Vysoké rozlišení – obvykle nepohyblivý s napájecím zařízením (heliostat, coelostat, turet, atd.)
- Velký průměr: málo světla!
- Adaptivní optika?

• Výběr spektrální oblasti

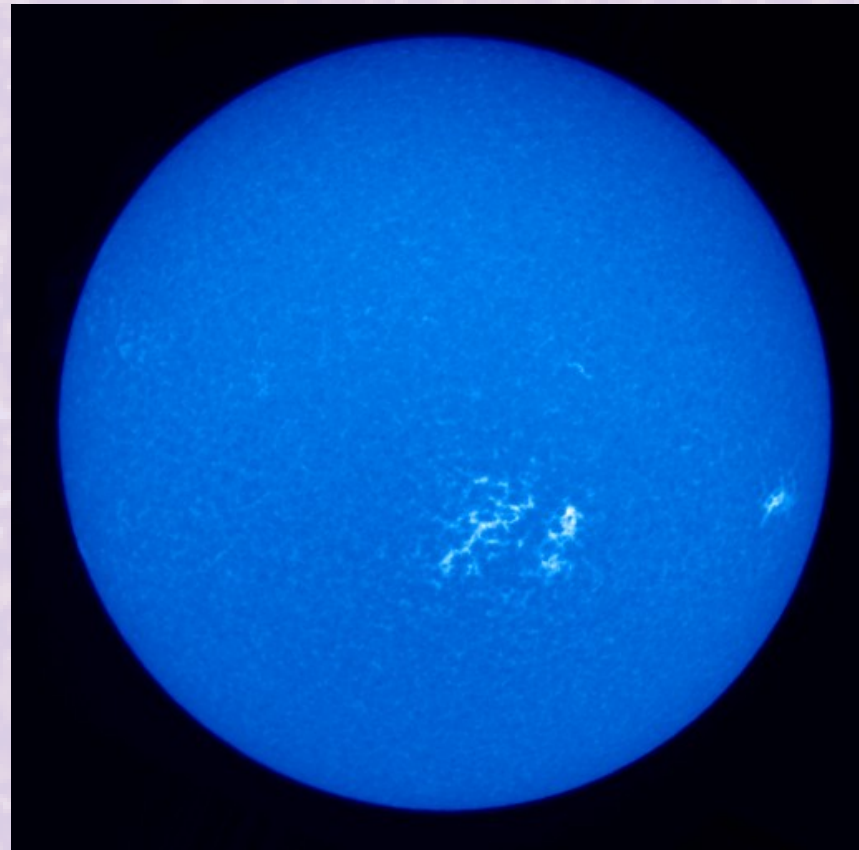
- Disperzní rozklad
 - Bílé světlo se rozloží na spektrum (hranol, mřížka)
 - Vybere se spektrální čára (např. natočením mřížky)
- Filtr
 - Do optické cesty se postaví filtr omezující požadovanou spektrální oblast

• Záznam

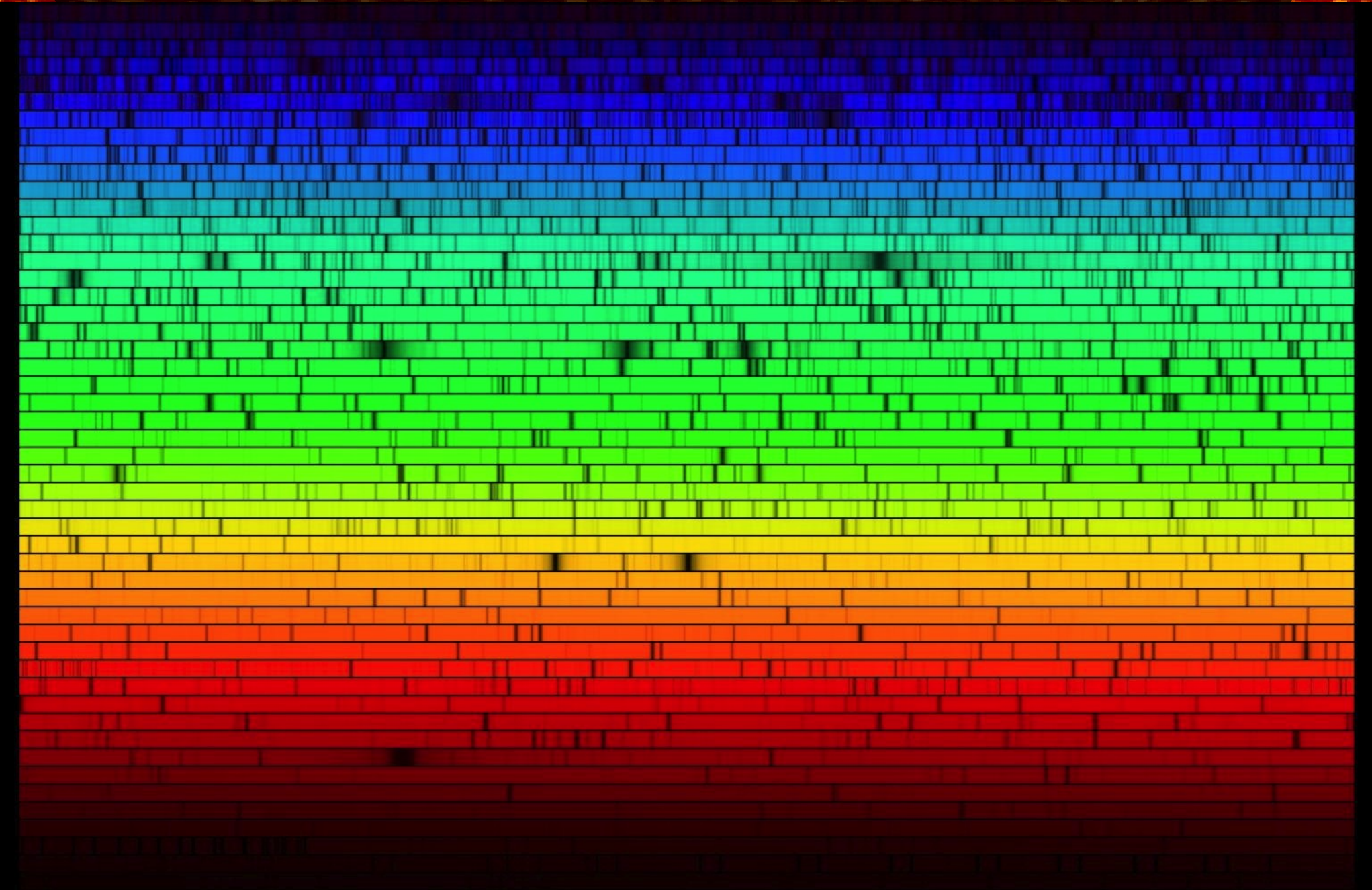
- Celý disk? Skenování? Skenování ve spektru nebo v pozici nebo obojí?

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!

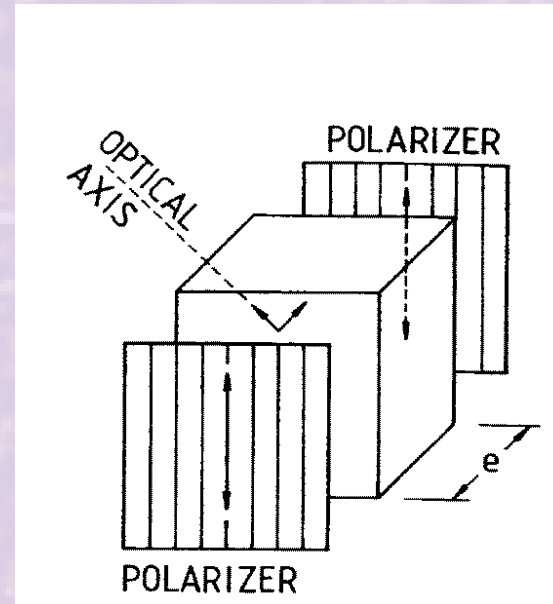


Sluneční spektrum



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



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

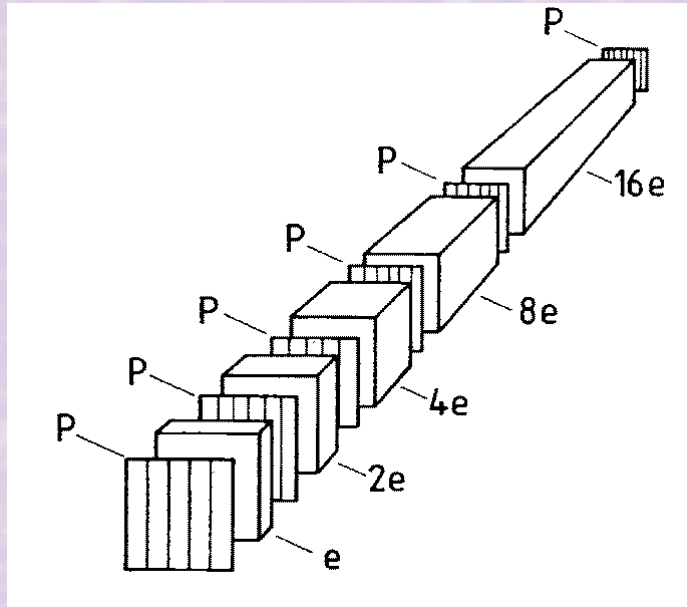
$$\delta = \frac{2\pi e J}{\lambda}, \quad J = n_o - n_e$$

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

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

Lyotův filtr: N destiček

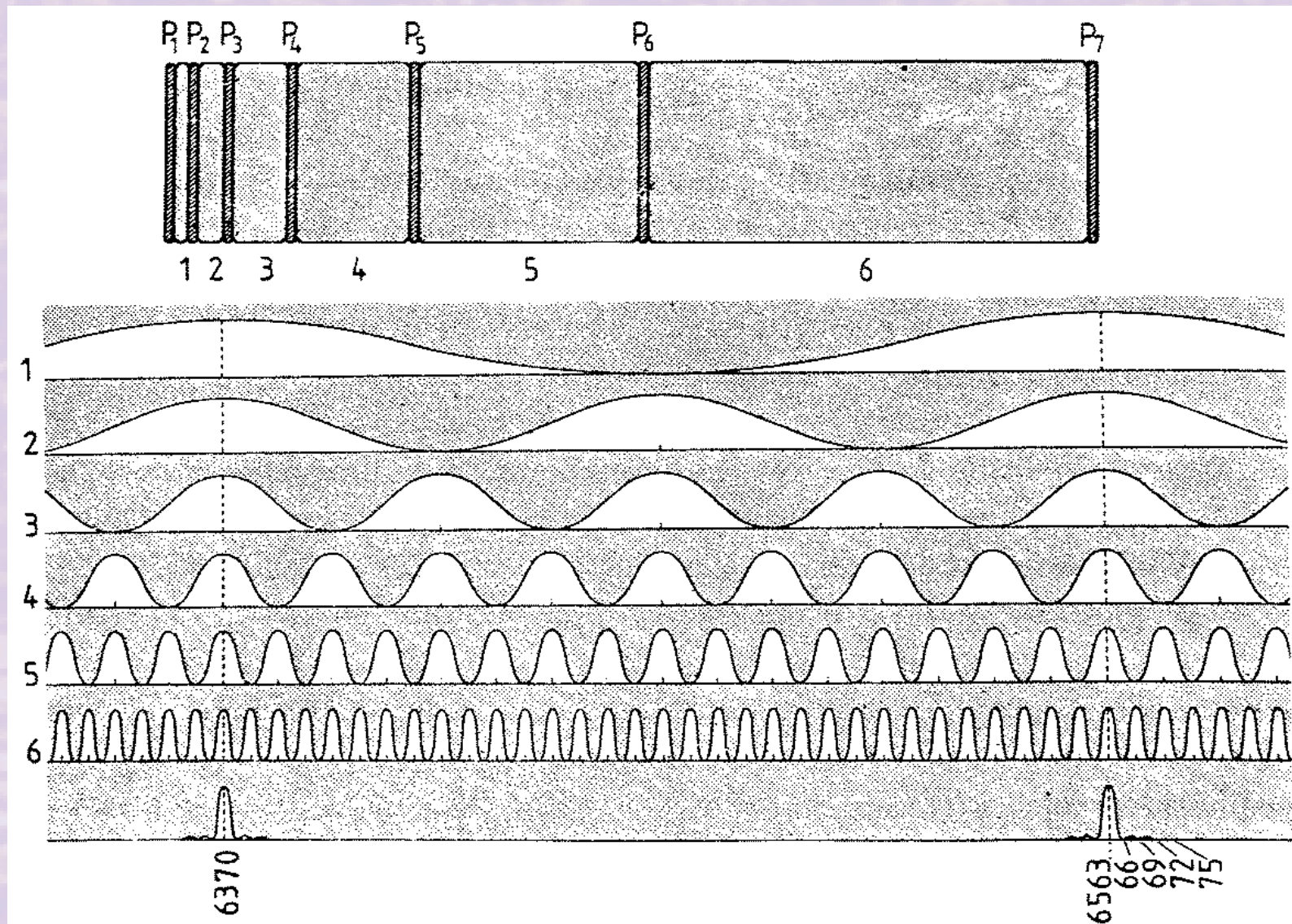
- N destiček s tloušťkou $e, 2e, 4e, \dots$



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

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

Lyotův filtr: průchozí světlo



+široký rámcovací filtr

Stokesovy parametry

EM pole s komponentami:

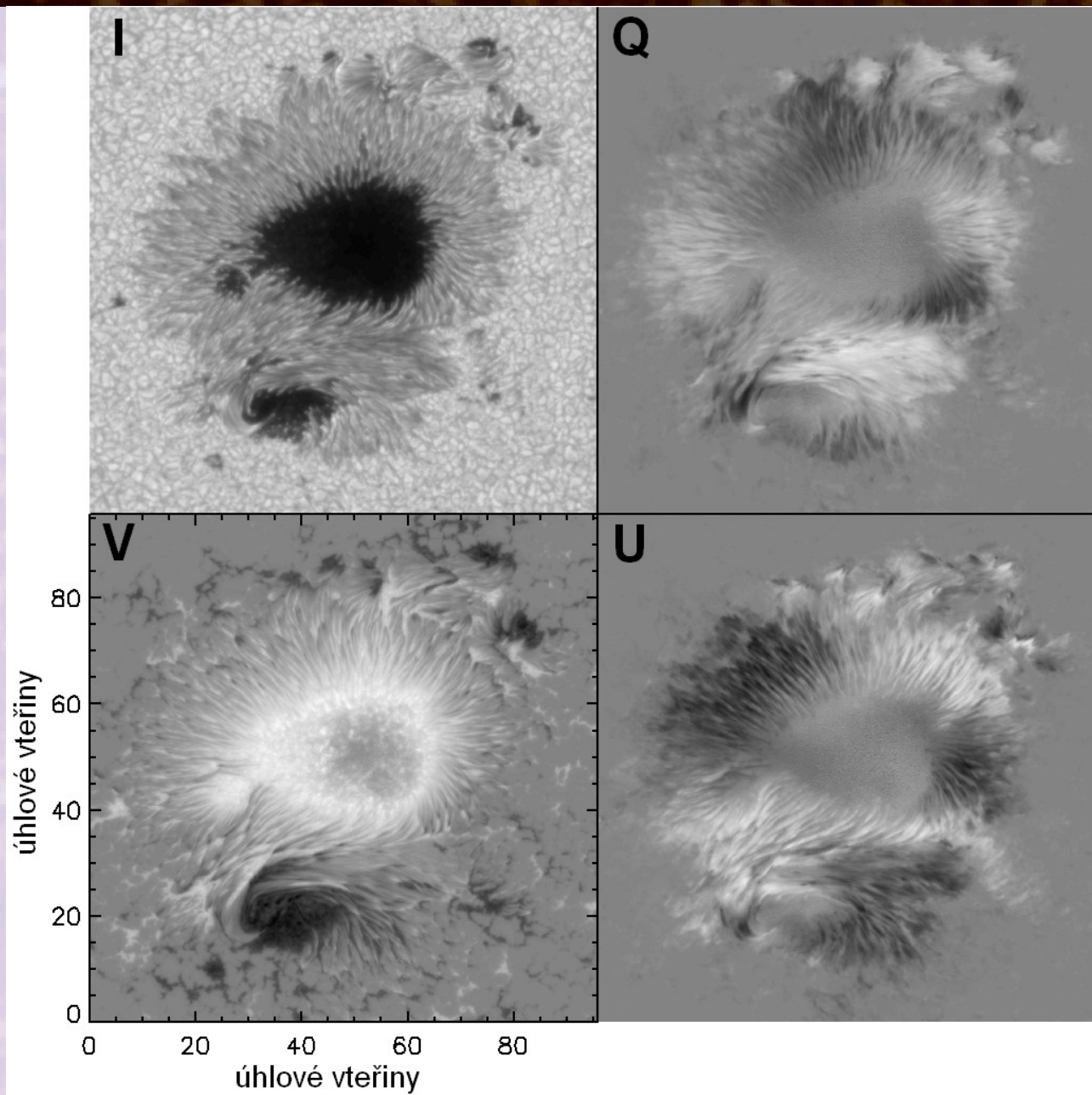
$$E_1 = A_1 e^{i(\phi_1 - \omega t)} = \epsilon_1 e^{-i\omega t}, \quad E_2 = A_2 e^{i(\phi_2 - \omega t)} = \epsilon_2 e^{-i\omega t}$$

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

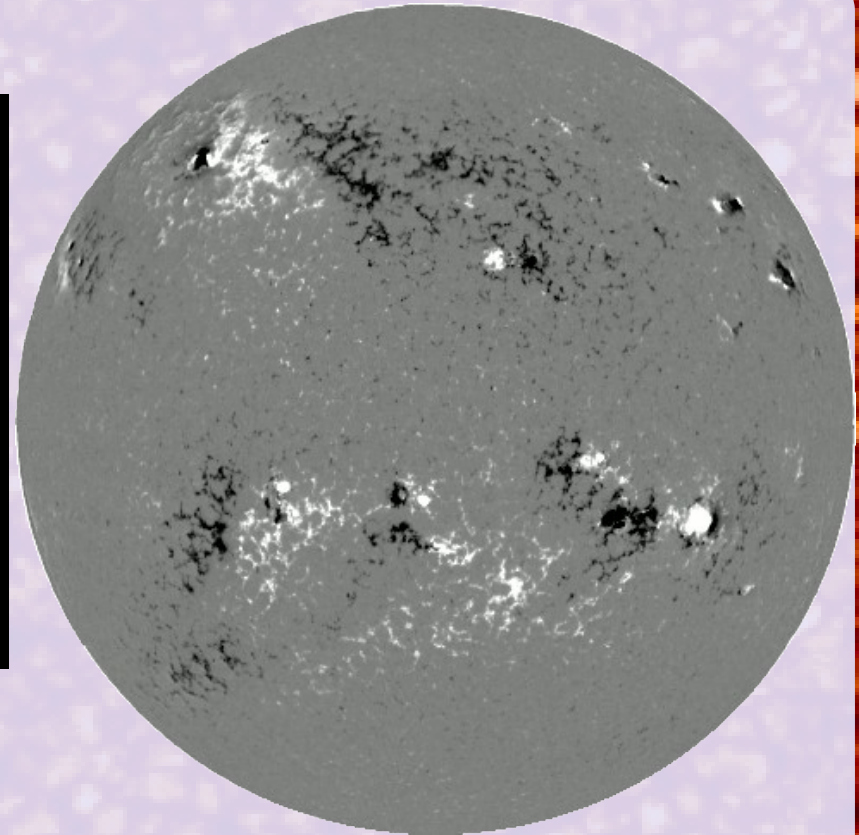
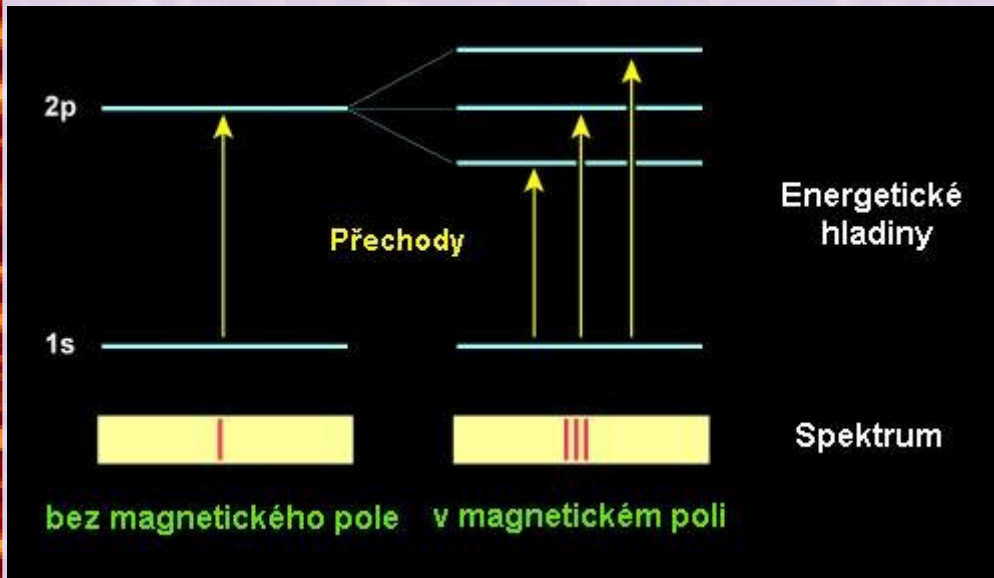
Stokesovy parametry:

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

Polarigramy sluneční skvrny



Zeemanův jev



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

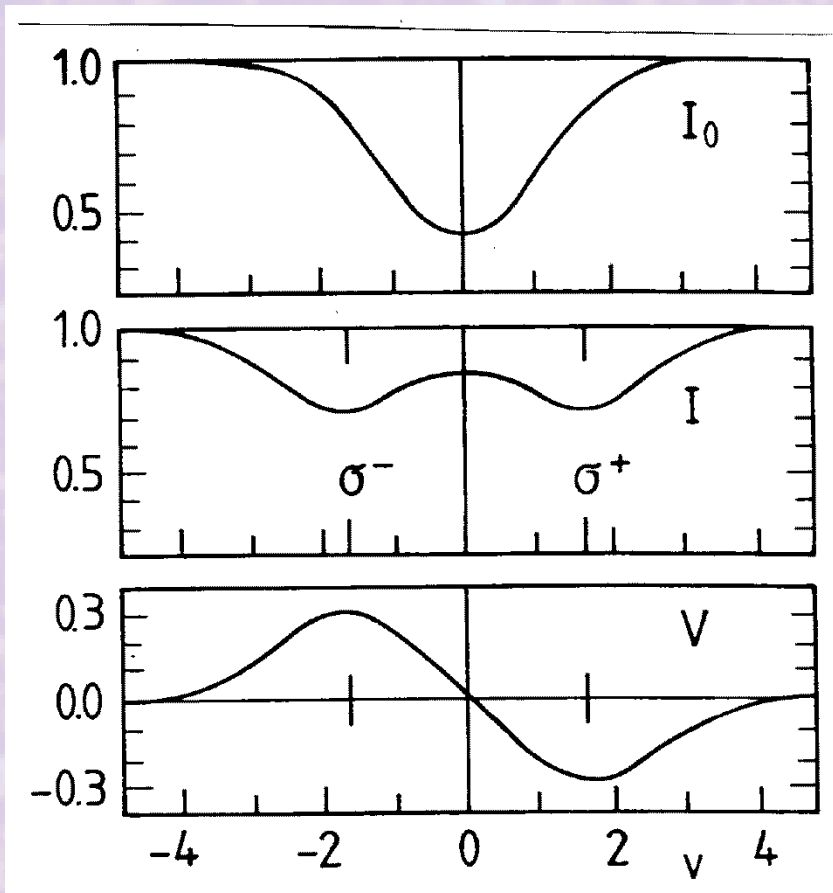
kvantovka : $\Delta \nu = \pm m g_L \mu_B B$, $\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e}$

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

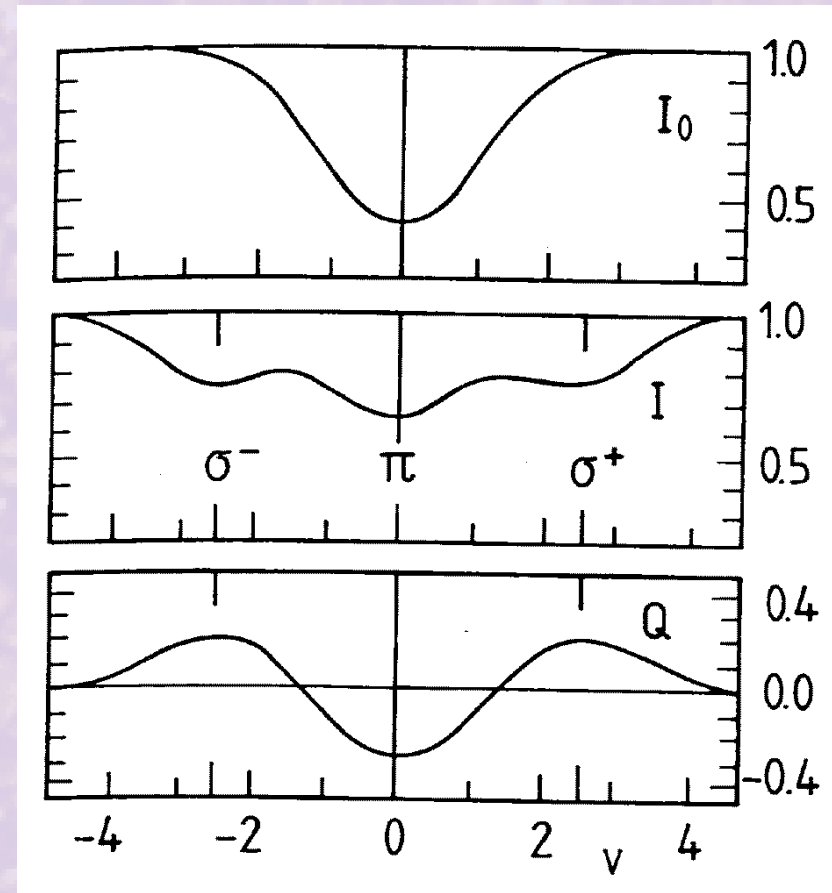
Podélně: 2 σ (kruhová polarizace) , 1 π (lineární polarizace)

Příčně: 2 σ (lineární polarizace)

Podélný vs. příčný



Podélný



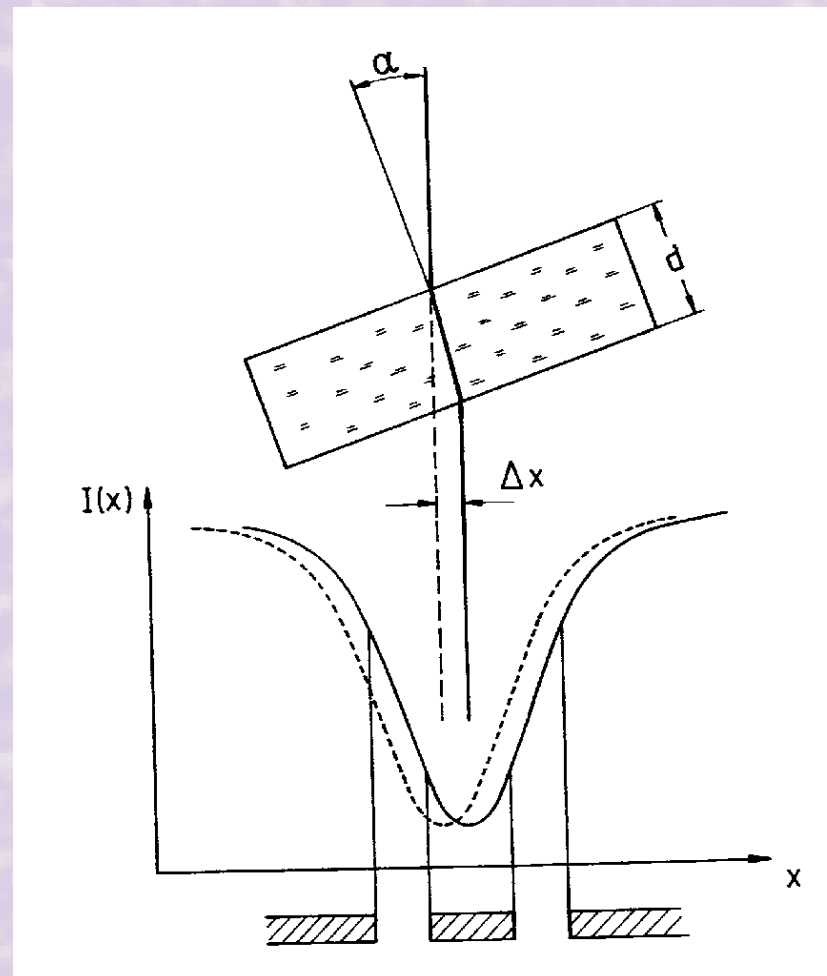
Příčný

Měření rychlostí: dopplerovský kompenzátor

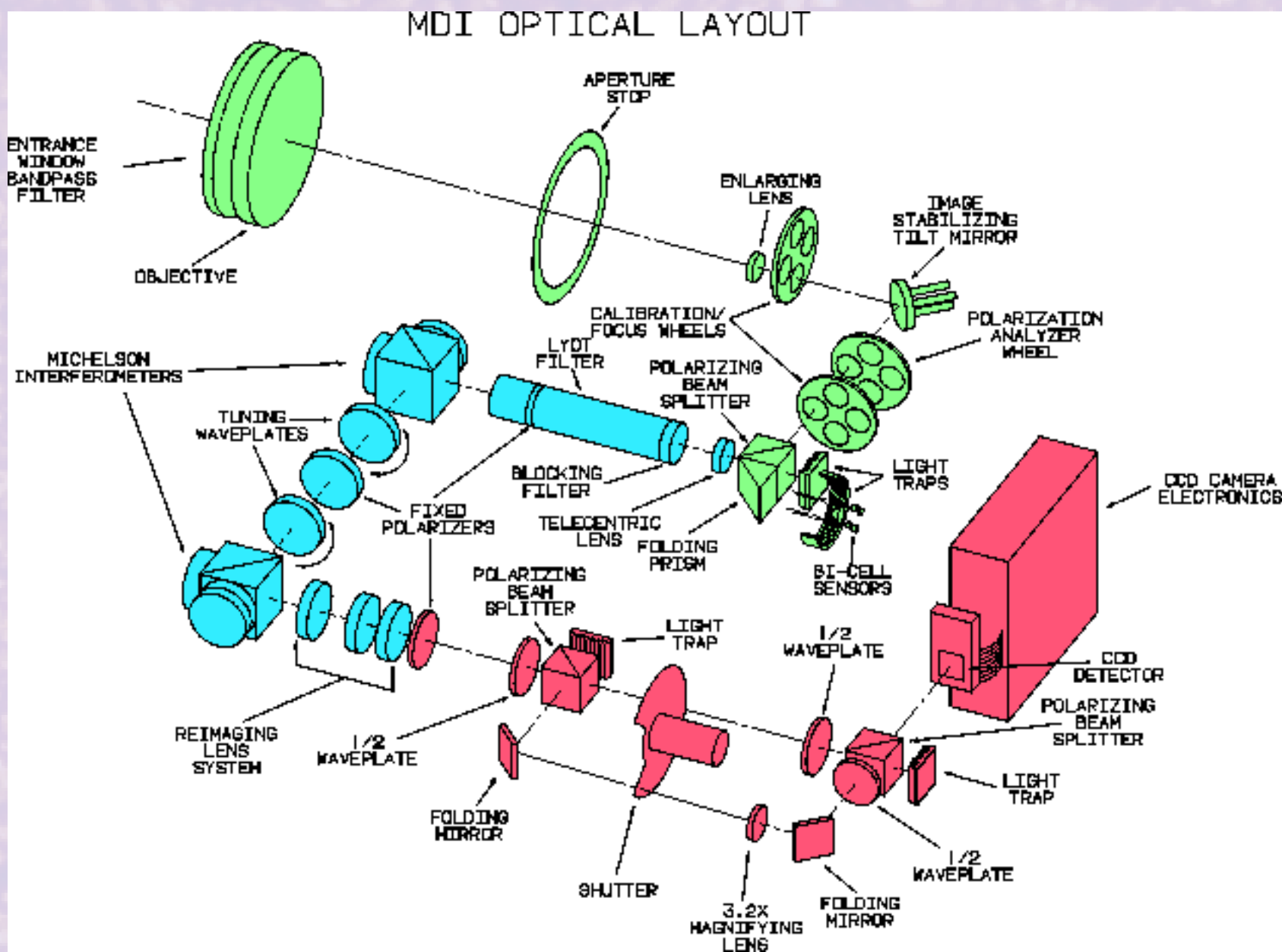
- Natočením destičky se posune čára tak, aby se vyrovnal signál na fotonásobičích měřících intenzitu ve spektru čáry
- Rychlost je úměrná úhlu natočení

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

- Používá se ve skenovacích magnetografech, signál se rychle vyhodnocuje

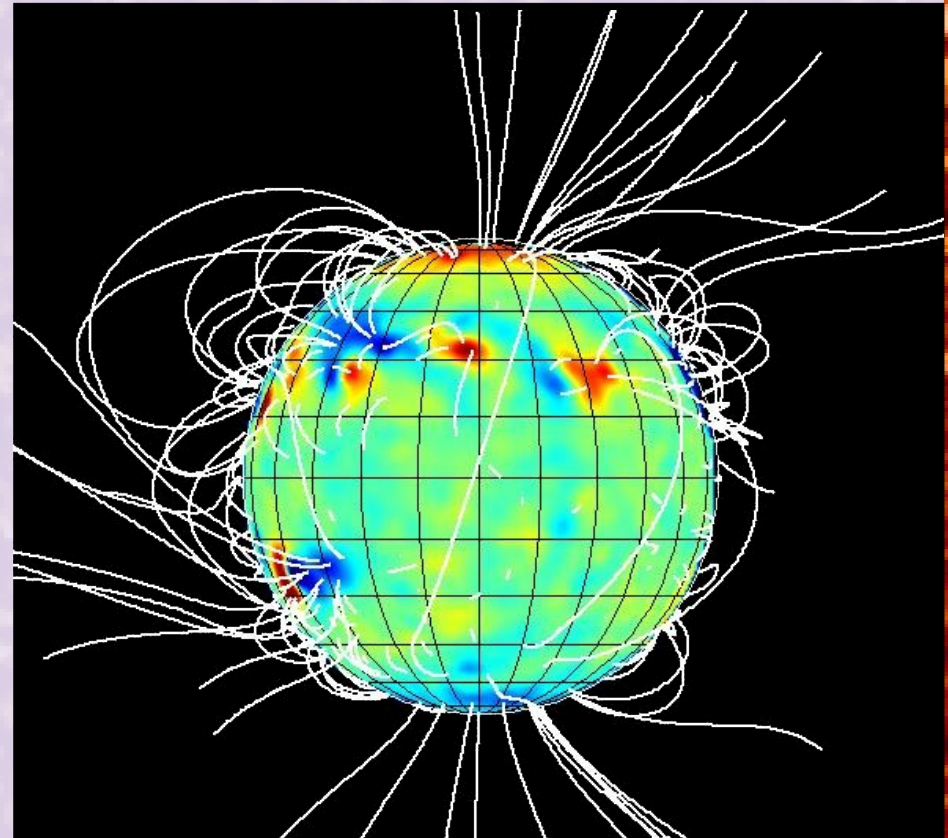


Měření ve spektrální čáře v praxi: MDI@SoHO



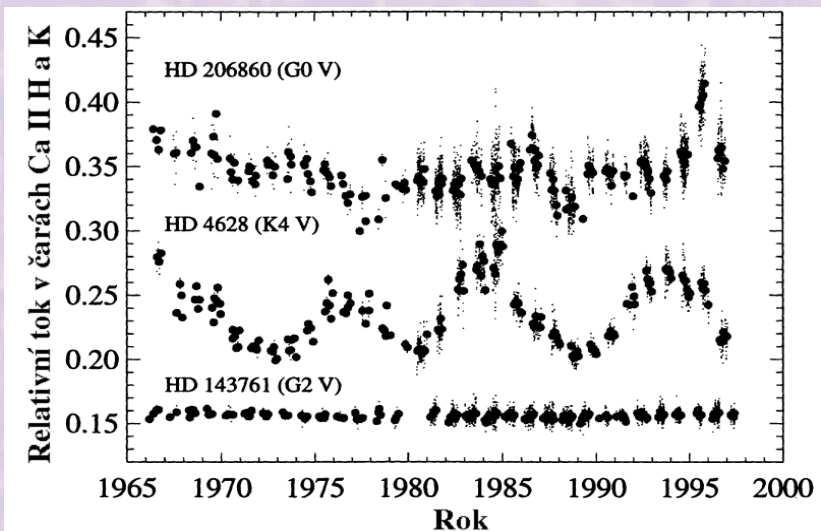
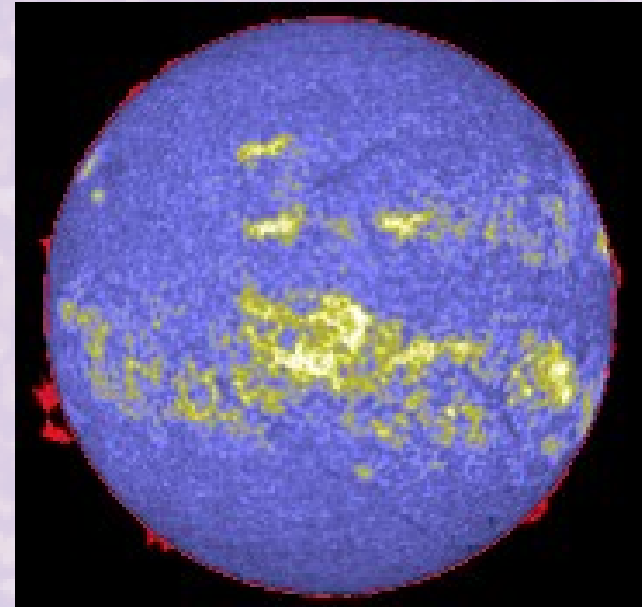
Vybrané aplikace, které by nebyly možné bez spektroskopických metod

- Slunce = proměnná hvězda!
 - Jasové změny celkově cca 0,1 %, mnohem větší v UV a X nebo rádiu
- Aktivita = soubor v čase proměnlivých jevů souvisejících s magnetickým polem
 - Sluneční skvrny
 - Protuberance
 - Erupce
 - CME a plazmové oblaky

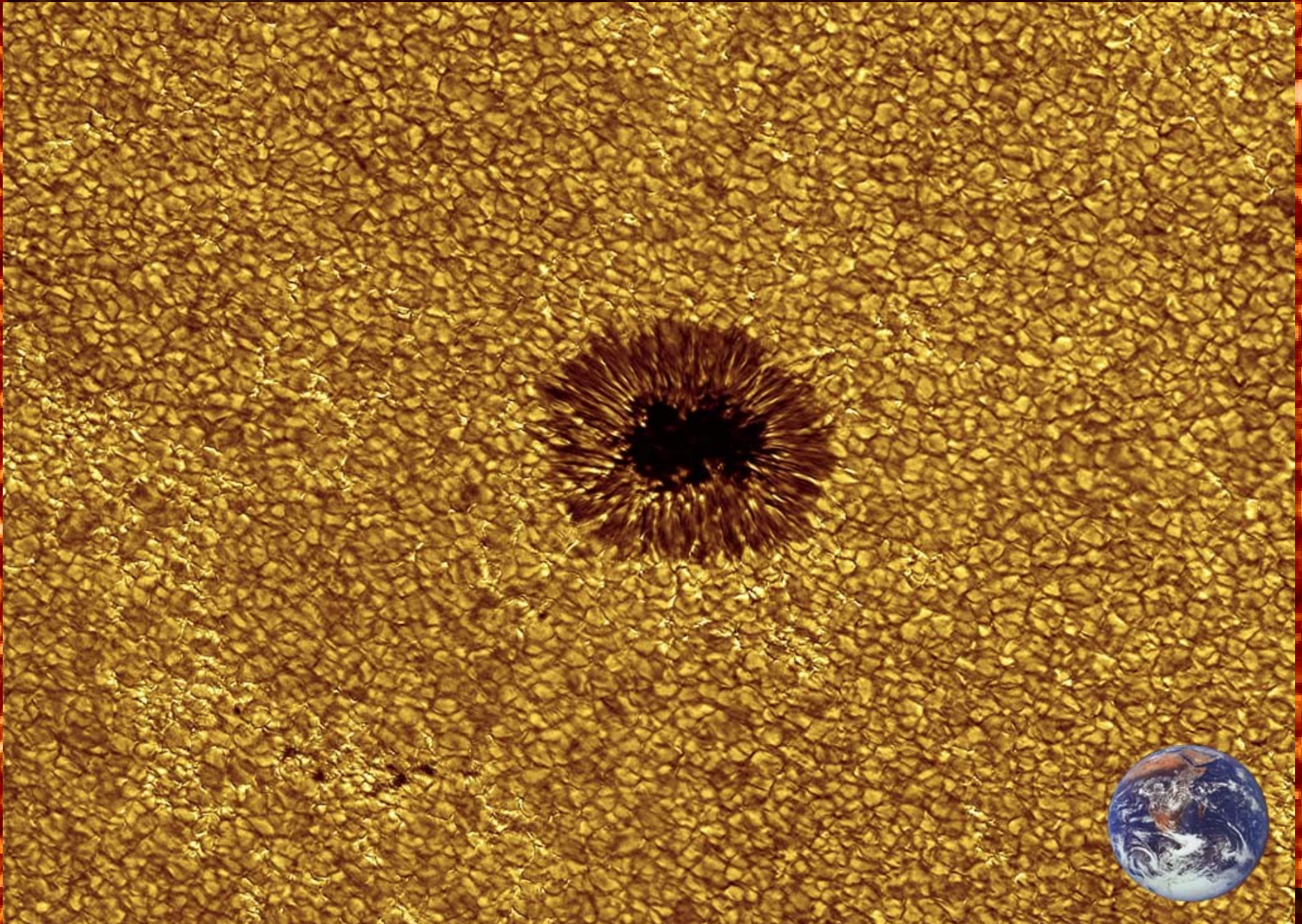


Hvězdná aktivita?

- Jak by vypadala aktivita Slunce, kdybychom ho nedokázali rozlišit?
- Vápníková emise
 - Magnetická pole
- $H\alpha$ emise
 - Chromosféra
- UV a rentgenová emise
 - Koróna
- Rentgenové záblesky
 - Erupce
- www.mtwilson.edu/hk
 - 300 000 pozorování od 60tých let

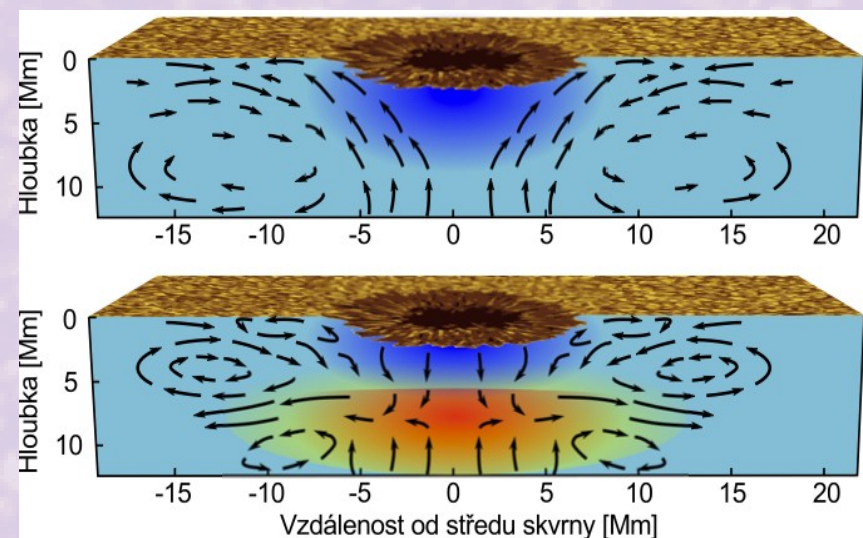
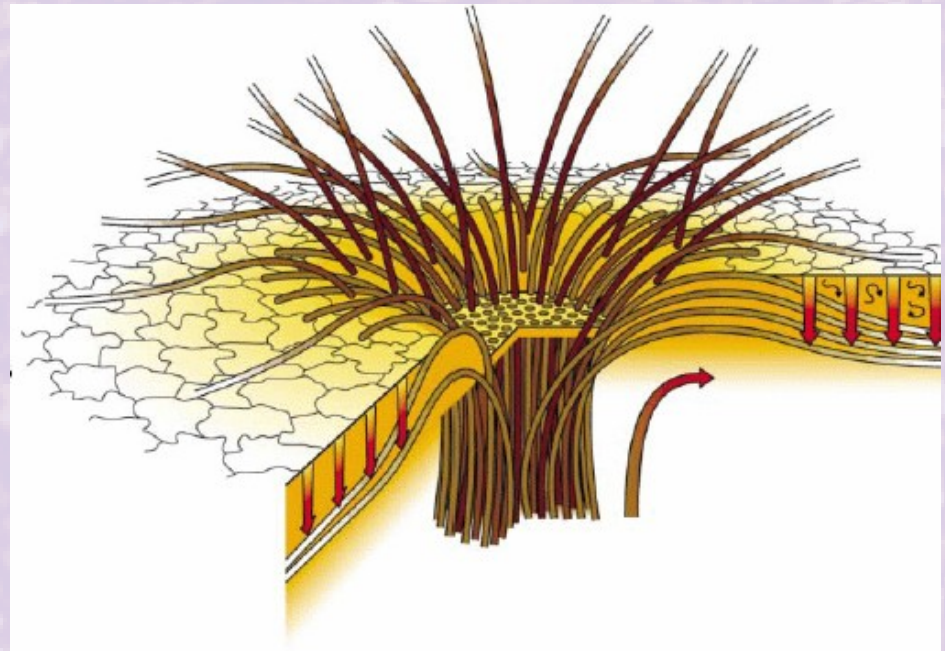


Sluneční skvrny

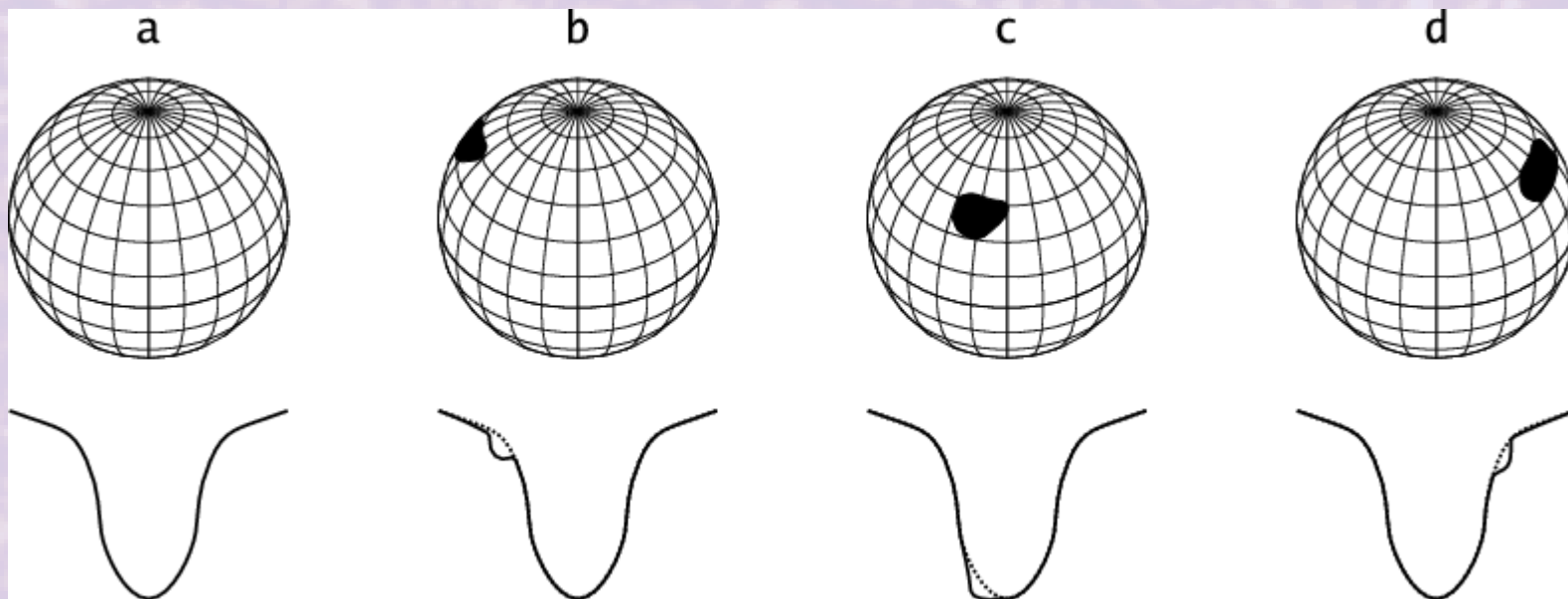


Sluneční skvrna, odkud se bere?

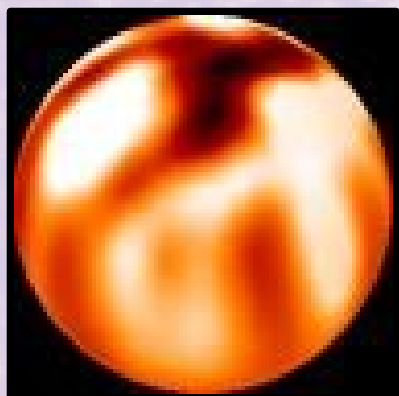
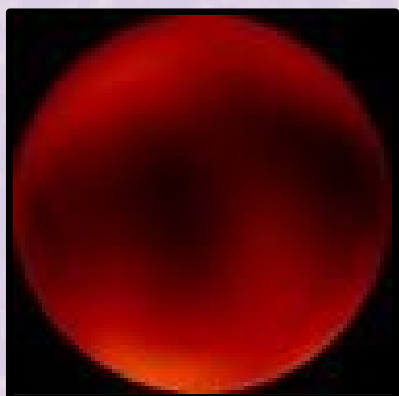
- Magnetické pole se vynoří do fotosféry (ale sakra odkud se to bere?)
 - Pokud se pole skloní o více než cca 70 stupňů, formuje penumbru
- Omezený tok tepla orientací pole
 - Lorentzova síla
- Oblast vychládá rychleji
 - Až o 1500 stupňů
- Komplikované pole formuje komplikovanou skupinu skvrn



- Skvrna na povrchu → změna profilu spektrální čáry – **dopplerovská tomografie**
- Inverzní metoda – z měřených profilů lze odvodit tvar a teplotu skvrn, které by tyto profily vyvolaly
 - Je potřeba rychlá vysokodisperzní spektroskopie po dlouhou dobu, na rychle rotující hvězdy
 - Lze to vůbec???

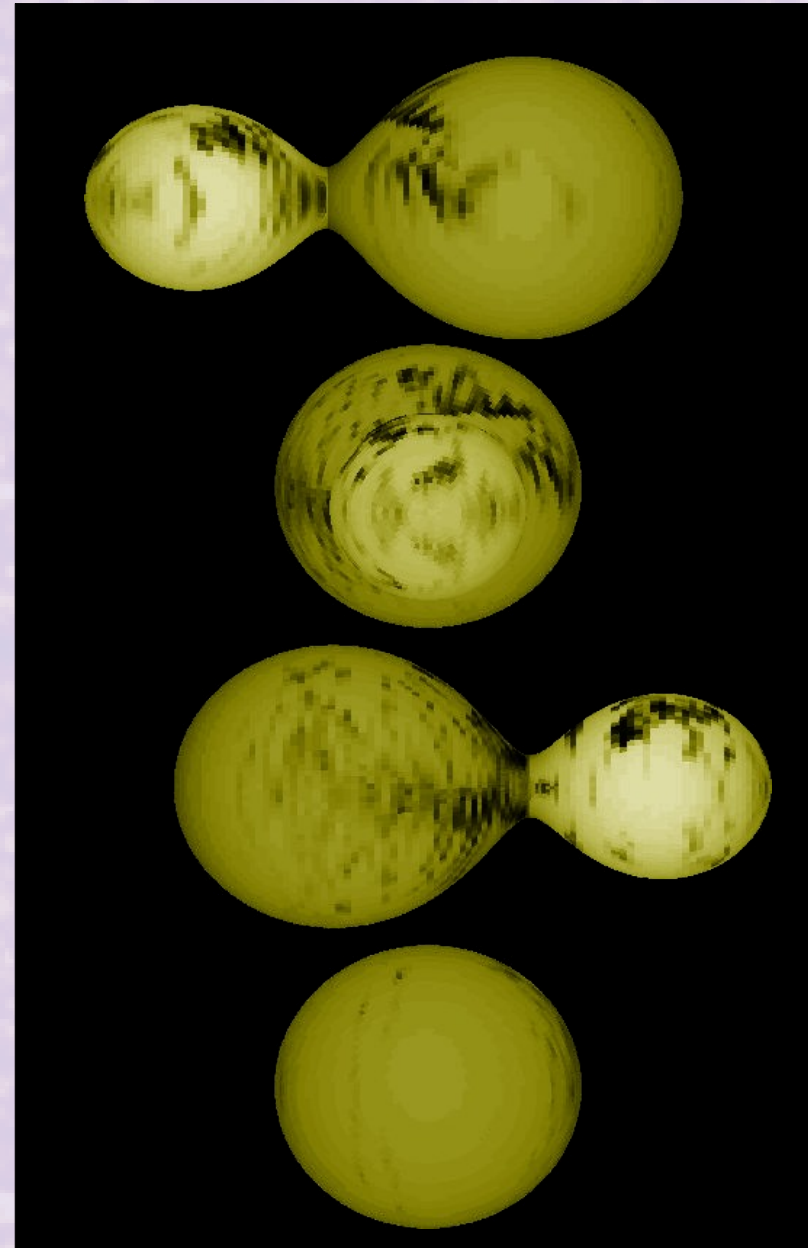


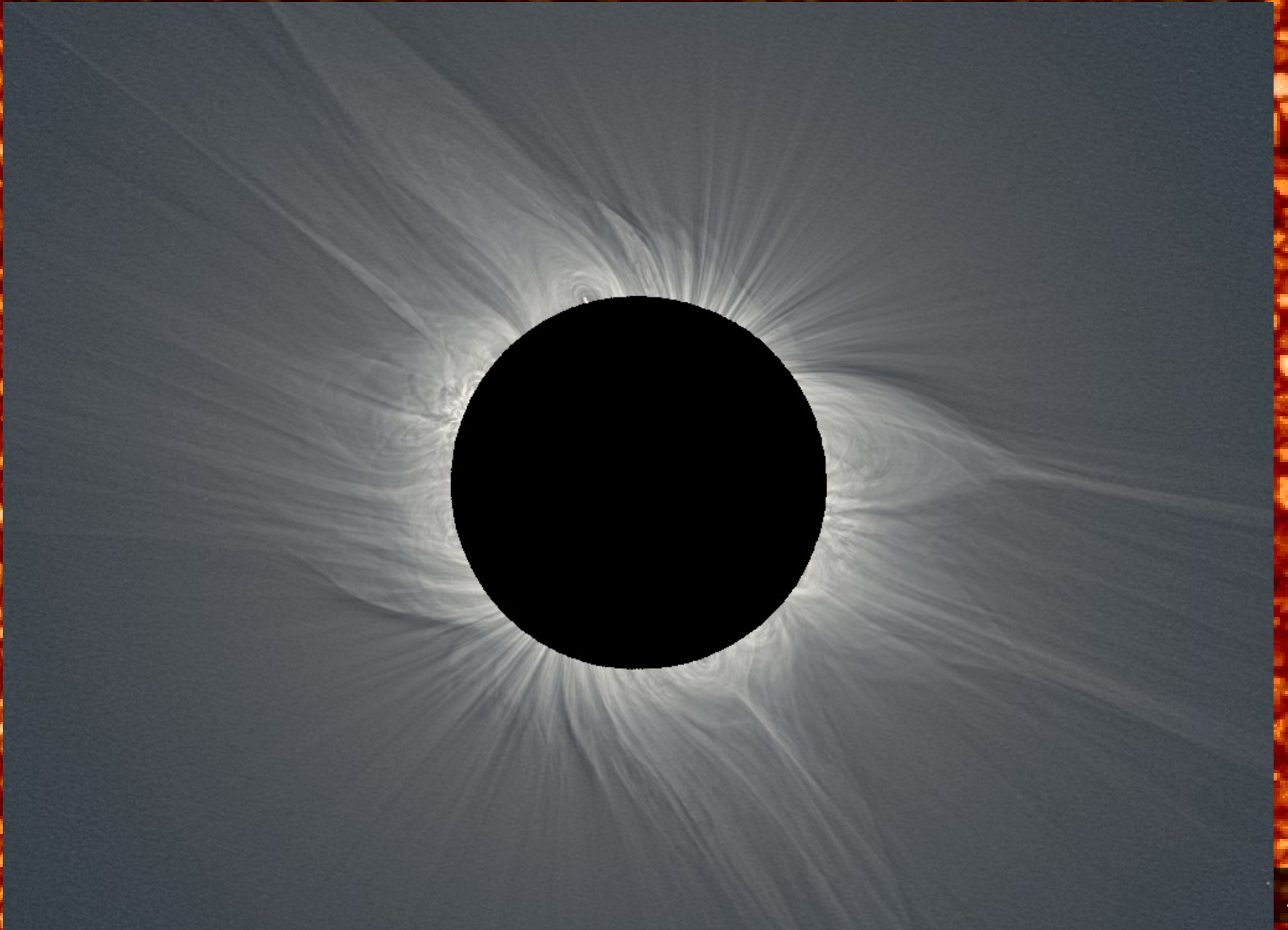
Dopplerovské obrázky jiných hvězd



Budoucnost dopplerovské tomografie

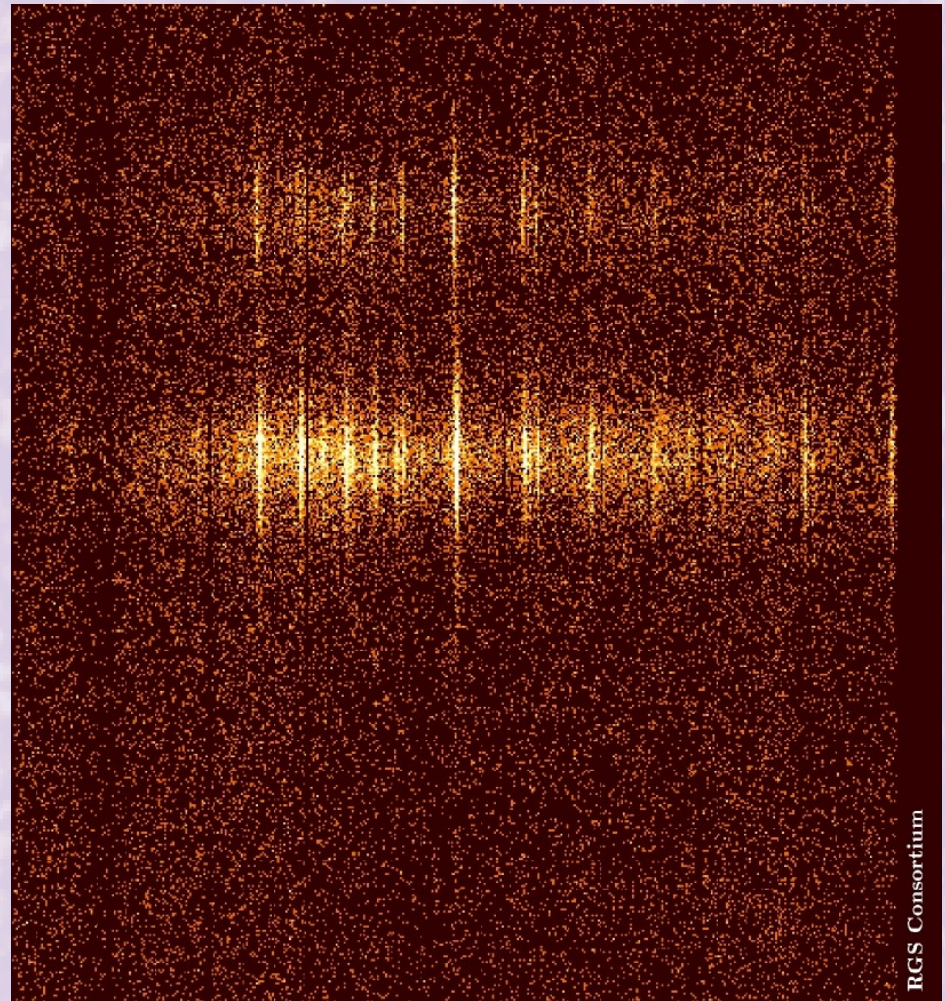
- Prozatím mapy s nízkým rozlišením, až na výjimky – *AE Phe*
- Rozvoj do budoucna – automatické přístroje a automatické redukční rutiny
- Studium povrchových pohybů
 - Důležité pro proces dynamika
- Pozorování hvězdných skvrn pomůže pochopení těch slunečních





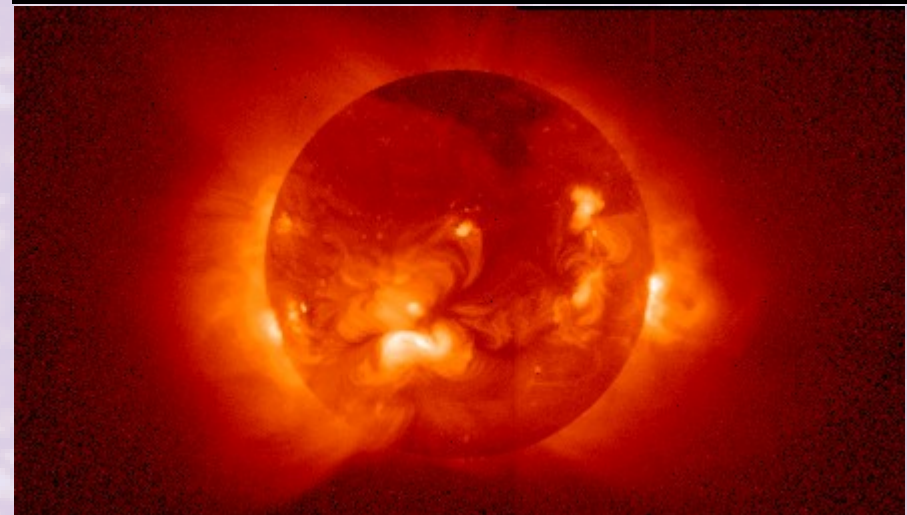
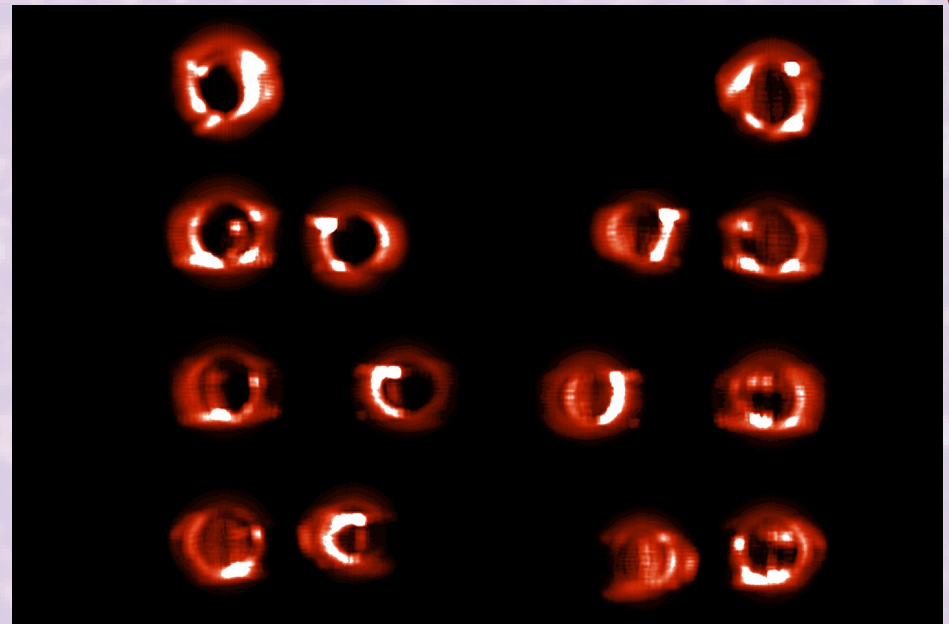
- Fotosféra ~ 5000 K \rightarrow koróna ~ 2 MK
- Možnosti ohřevu
 - Rozptyl zvukových vln způsobených konvekci
 - Disipace MHD vln
 - Mikro-, nano-, piko-erupce
 - Joulovo teplo z proudů podél magnetických smyček
- Stále poněkud záhada, ale důležité pro energetiku hvězdy
- Pochopení vyžaduje MHD simulace a pozorování s velmi velkým rozlišením
 - Ukazuje se, že na malých škálách je hodně magnetických polí (mezigranulární prostory)

- Koróna – řídká, horká, ionizovaná
 - U horkých hvězd vzniká tlakem záření
 - U chladných hvězd je za vznikem silné magnetické pole vypínající se nad fotosféru
- Vyzařuje v UV a X
 - Zatmění Slunce?
- Měření mimo zemskou atmosféru
 - XMM Newton, Chandra



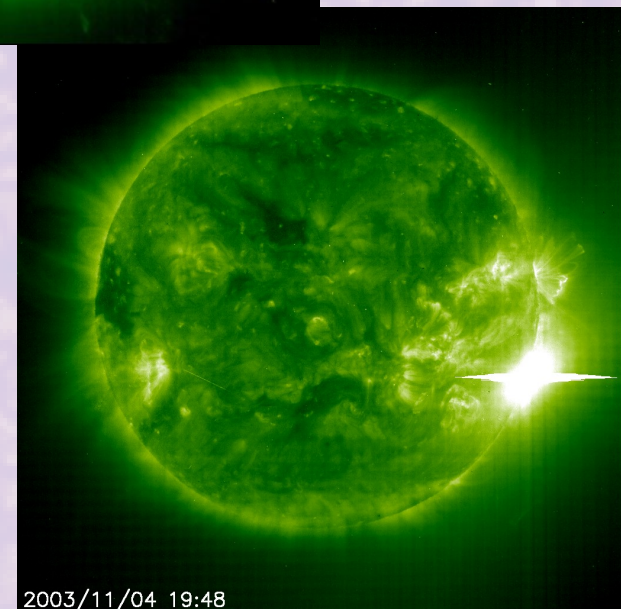
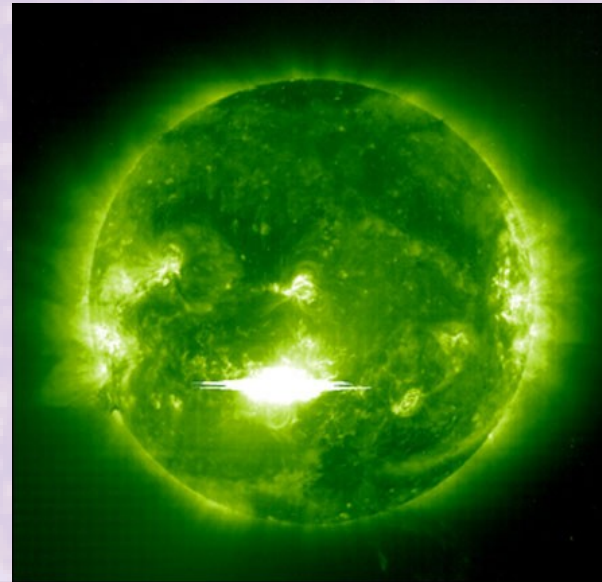
RGS Consortium

- Dvojhvězda M-hvězd
- Součást 6-systému Castor
- 37 l.y. od Země
- $0,60 M_{\odot}$, $0,60 R_{\odot}$,
3800 K, $P=19$ h
- Trpaslíci významnější X-
zdroje než „hlavní“
hvězdy (A a K)



Sluneční erupce

- Sluneční erupce A→X podle energie v RTG pásu (X: $E > 10^{-4} \text{ Wm}^{-2}$)
- Maximum X50?
 - $E \sim 10 \text{ Wm}^{-2}$
 - 1. 9. 1859 (?)
 - 4. 11. 2003 (>X20)
- Silnější erupce – nedozírné následky (elektronika, ozón, ...)
- Fyzika:
 - Rekonexe magnetického pole

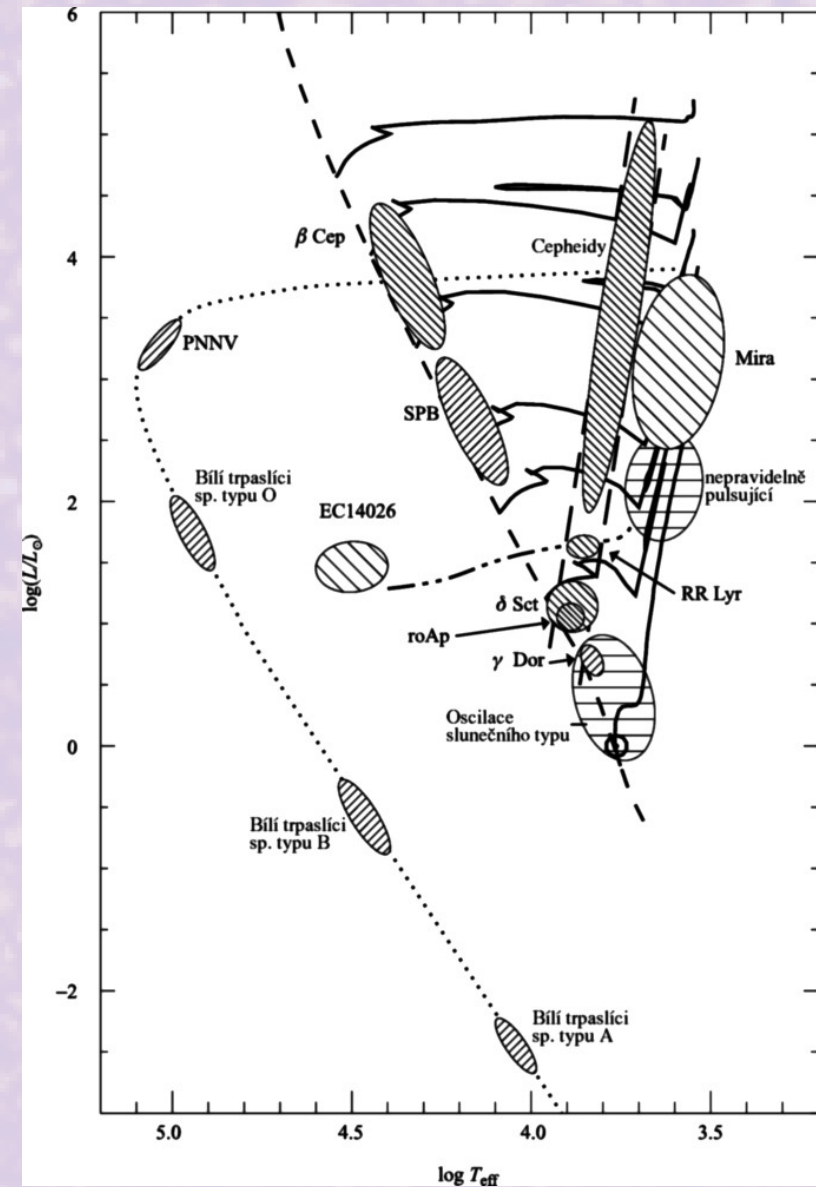


Sluneční erupce – video

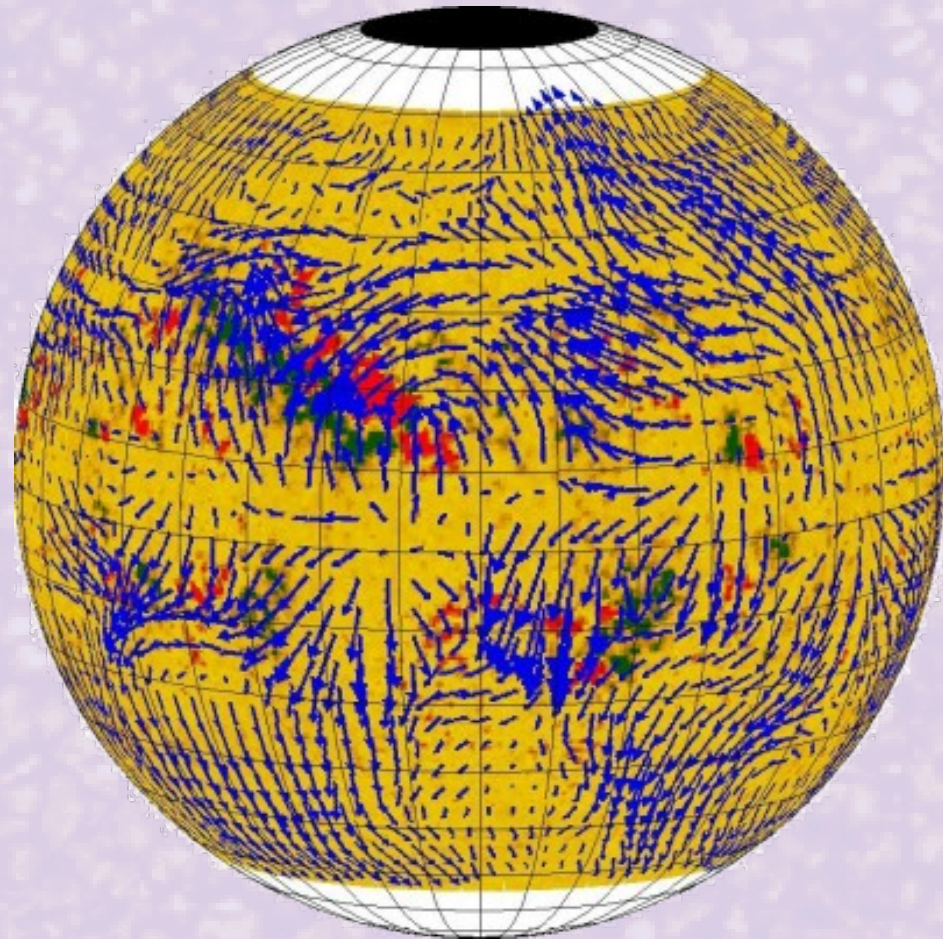


Pulsující hvězdy

- Hvězdy nejsou statické, ale dynamické
- Různé mechanismy pulsací
 - Záklopkové
 - Vnitřní nestability
- Radiální × neradiální
- Informace o vnitřní struktuře

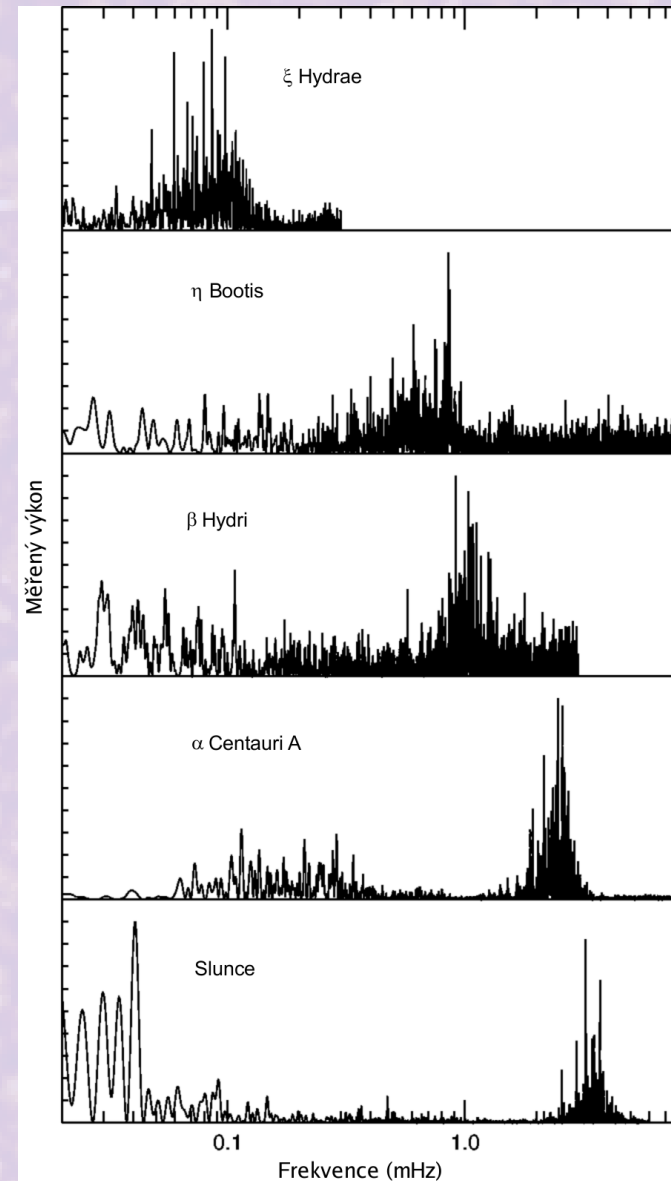


- Perspektivní metoda sluneční výzkumu
 - Stále ve vývoji od cca 60tých let
- Sledování odezvy hydrodynamických vln
 - Inverzí pozorování informace o poruchách, které ovlivňují šíření těchto vln
- Struktura nitra, podpovrchové toky, dění na odvrácené straně
- Globální × lokální



Asteroseismologie

- Obdoba helioseismologie, pouze globální
- Struktura hvězd slunečního typu
- Mnohé jiné typy hvězd
- Málo exemplářů (data)



Slunce vs. α Centauri A

| | | |
|--------------------|--------------------------|--------------------------|
| Hmotnost: | $1,98 \times 10^{30}$ kg | $2,19 \times 10^{30}$ kg |
| Svítivost: | $3,84 \times 10^{26}$ W | $5,83 \times 10^{26}$ W |
| Efektivní teplota: | 5770 K | 5790 K |
| Teplota jádra: | 15,7 MK | 19 MK |
| Hustota jádra: | $152,7 \text{ g/cm}^3$ | $177,1 \text{ g/cm}^3$ |
| Teplota KZ: | 2,18 MK | 1,89 MK |
| Metalicita: | 0,01694 | 0,0384 |

