

# 1. Slunce jako hvězda

Sluneční fyzika  
LS 2007/2008

**Michal Švanda**

Astronomický ústav MFF UK  
Astronomický ústav AV ČR

## Slunce v minulosti

- Starověk: Slunce = bůh
  - Ra/Re, Apolón, Khors, Radegast, Sunna, Dadźbóg, Surya Deva
- Inkové, Aztékové – celá mytologie zasvěcena Slunci
- 2134 BC – Číňané nezahnali draka požírajícího Slunce
- 1111 BC – Číňané zřejmě vidí bílou erupci
- 800 BC – čínská pozorování slunečních skvrn
- Anaxagoras (500-428 BC) – hořící kovová koule větší než Peloponés – uvězněn
- Eratosténés (276-194 BC) – správně změřil vzdálenost Země-Slunce
- Aristarchus (310-230 BC) – zakladatel heliocentrické soustavy

## Slunce v minulosti – modernější éra

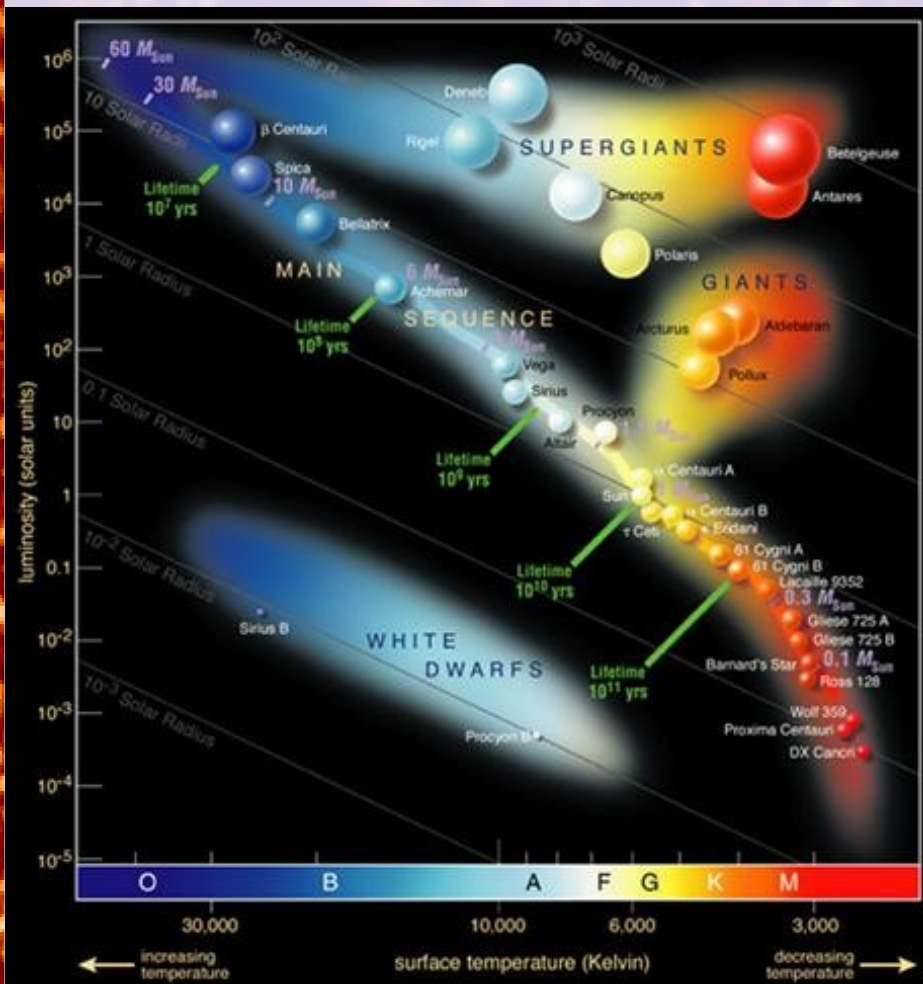
- 1128 – kresba slunečních skvrn v Anglii
- 1185 – v Rusku spatřeny protuberance
- 1600 – Bruno, „hvězdy jsou různě vzdálená Slunce“
- 1609/1610 – první teleskopická pozorování slunečních skvrn (Galileo, Scheiner, Fabricius)
- 1715 – první kresba sluneční koróny
- 1800 – W. Herschel, infračervené záření od Slunce
- 1851 – Schwabe – objev 11letého cyklu
- 1859 – Carrington – bílá erupce
- 1860 – během úplného zatmění spatřena CME
- 1892 – Hale, spektroheliograf
- 1908 – Hale, skvrny jsou magnetické
- 1951-58 – Biermann, Chapman, Parker – sluneční vítr

# Hledání energie pro Slunce

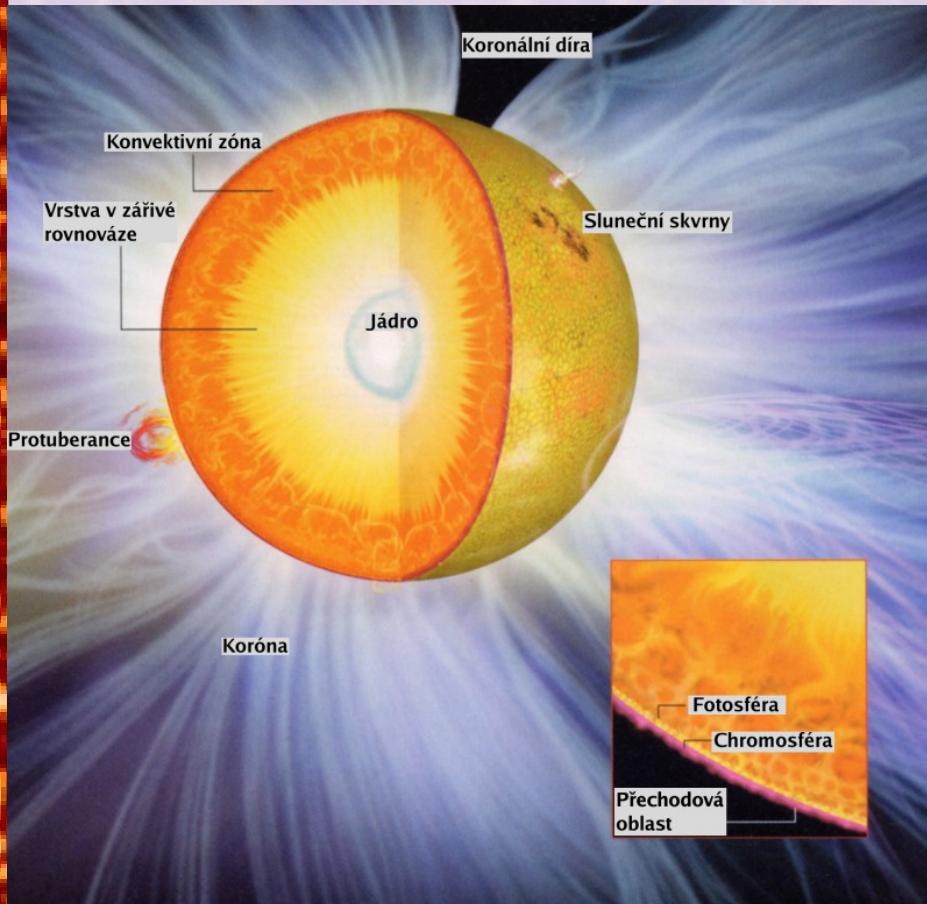
- Rovnováha sil – uvnitř musí být zdroj dodávající energii/teplo
- Slunce hoří – cca 20 000 let
- Kelvin-Helmholtzova kontrakce – udržela by zářivost Slunce cca 20 milionů let
- 1890 – Lockyer – padající komety by pokryly energetickou potřebu – ale změny planetárních drah
- 1904 – Rutherford – vnitřním zdrojem je rozpad radioaktivních prvků
- 1920 – Eddington – termonukleární reakce
- 1925 – Cecilia Payne – Slunce je převážně z vodíku
- 1930 – Chandrasekhar, Bethe – detaily termojaderného slučování
- 1957 – Burbidge – těžší prvky vznikají ve hvězdách

# 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

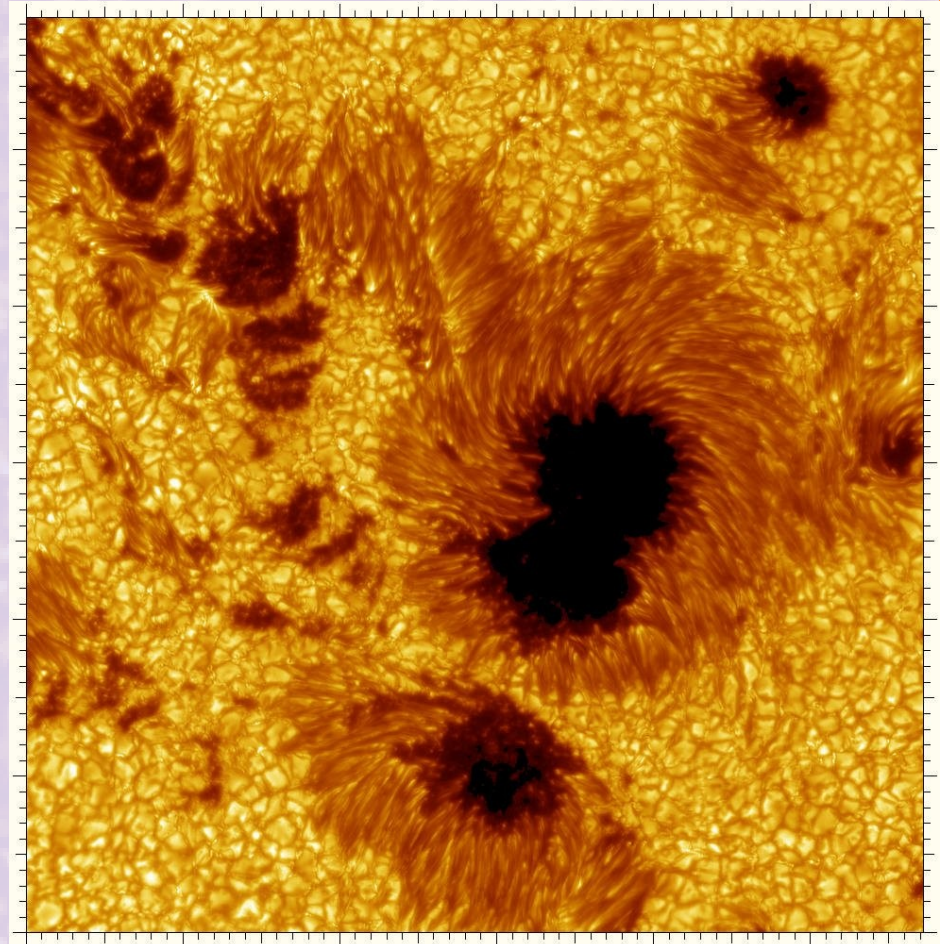


# Vnitřní struktura Slunce

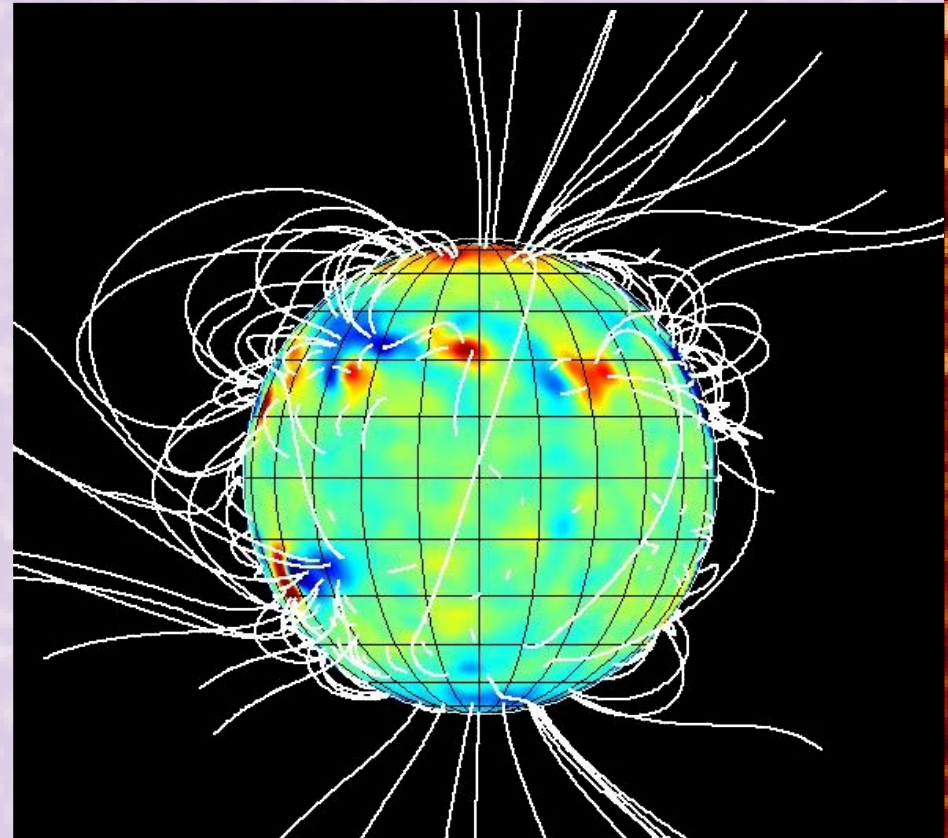


- Jádro
- Zářivá vrstva
- Konvektivní vrstva
- Fotosféra
- Chromosféra
- (Přechodová vrstva)
- Koróna
  
- Rovnováha sil
- Modely nitra
- Helioseismologie

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



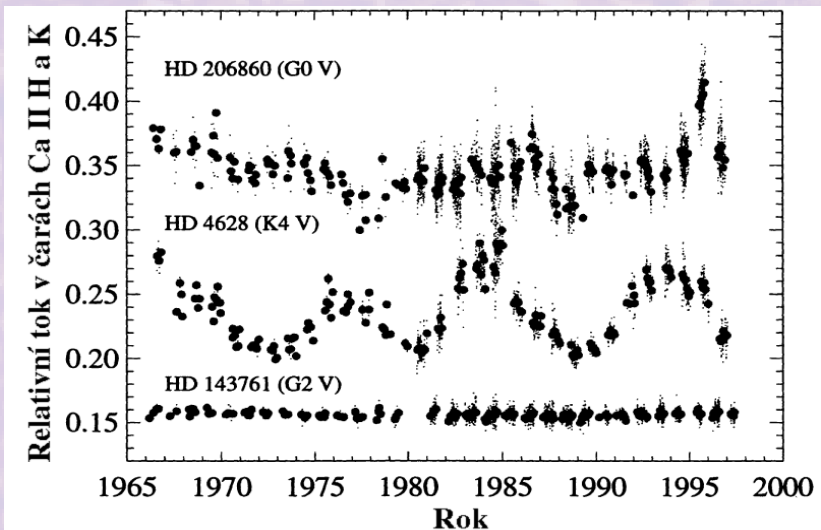
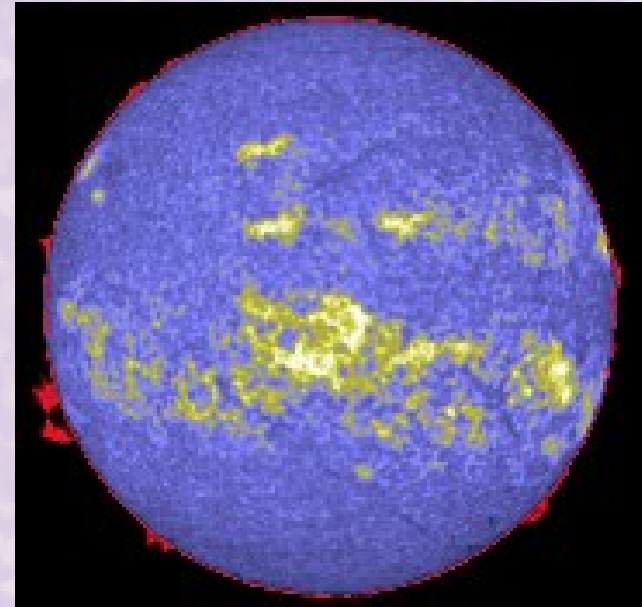
- Slunce = proměnná hvězda!
  - Jasové změny celkově cca 0,1 %, mnohem větší v UV a X nebo rádiu
- Aktivita = soubor v čase proměnlivých jevů souvisejících s magnetickým polem
  - Sluneční skvrny
  - Protuberance
  - Erupce
  - CME a plazmové oblaky



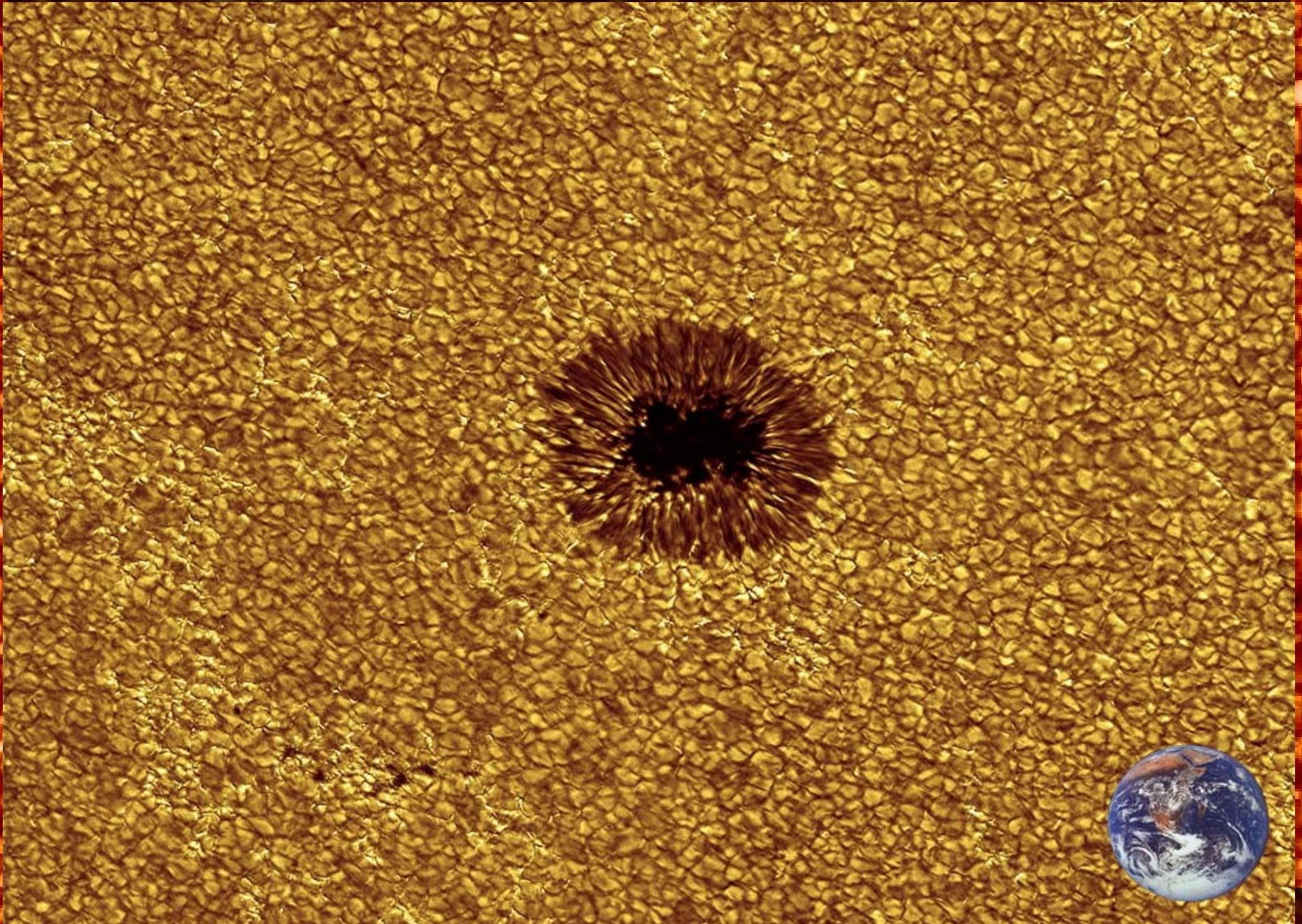


# Hvězdná aktivita?

- 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](http://www.mtwilson.edu/hk)
  - 300 000 pozorování od 60tých let

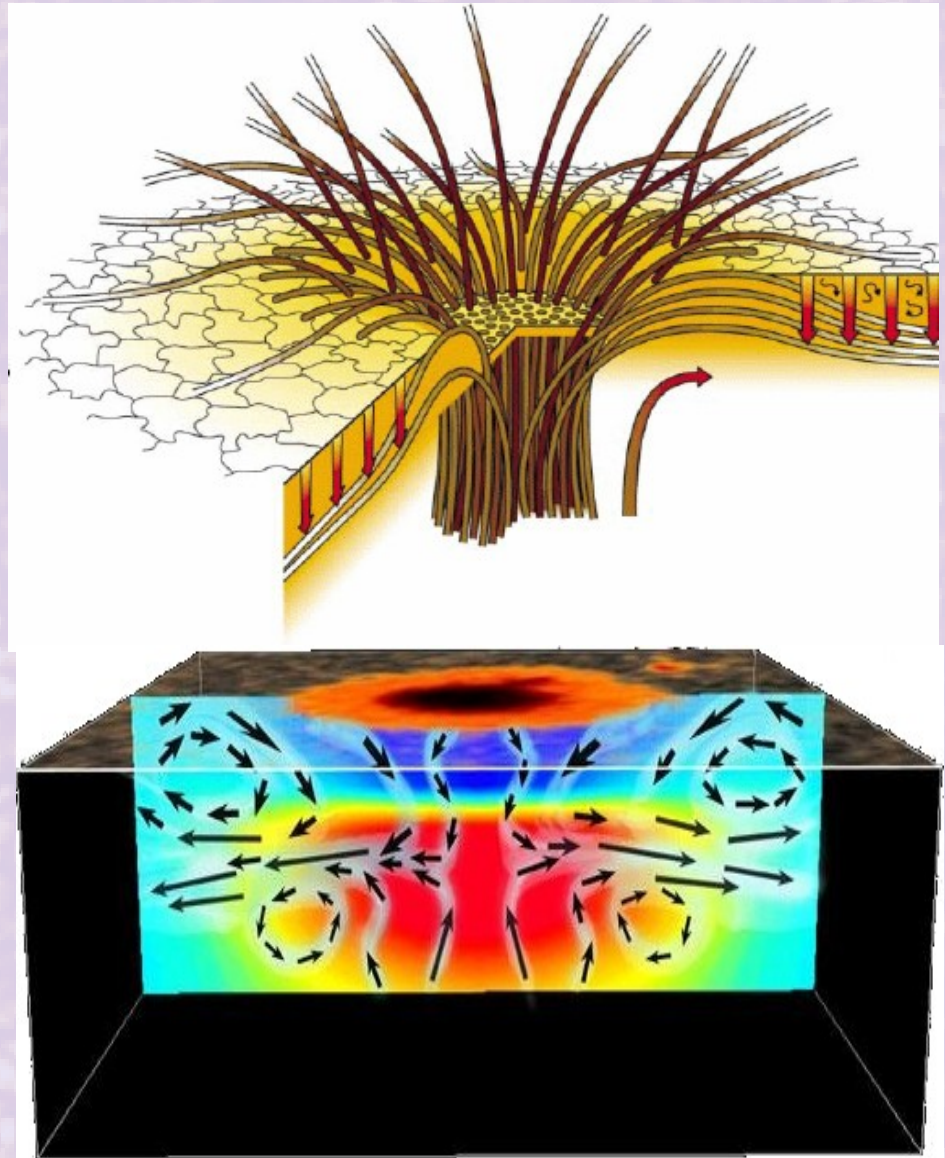


# Sluneční skvrny

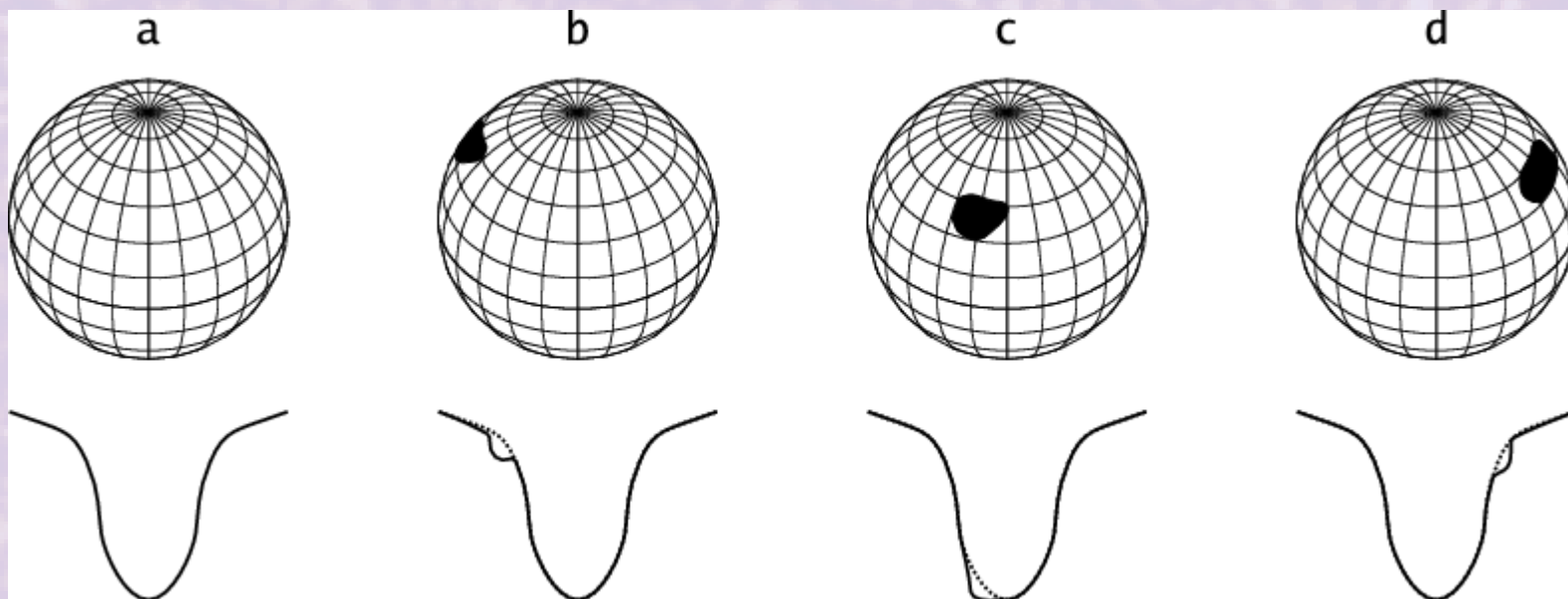


# Sluneční skvrna, odkud se bere?

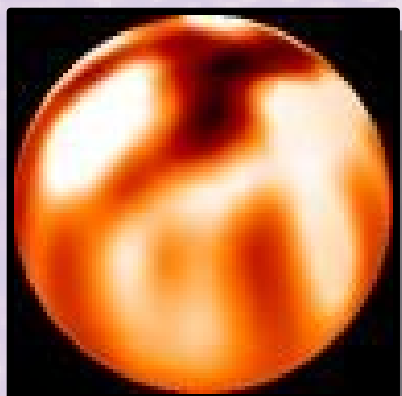
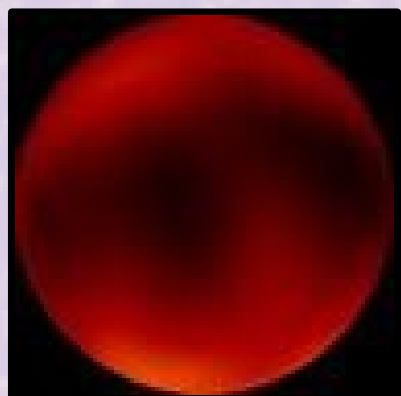
- Magnetické pole se vynoří do fotosféry (ale sakra odkud se to bere?)
  - Pokud se pole skloní o více než cca 70 stupňů, formuje penumbru
- Omezený tok tepla orientací pole
  - Lorentzova síla
- Oblast vychládá rychleji
  - Až o 1500 stupňů
- Komplikované pole formuje komplikovanou skupinu skvrn



- 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???

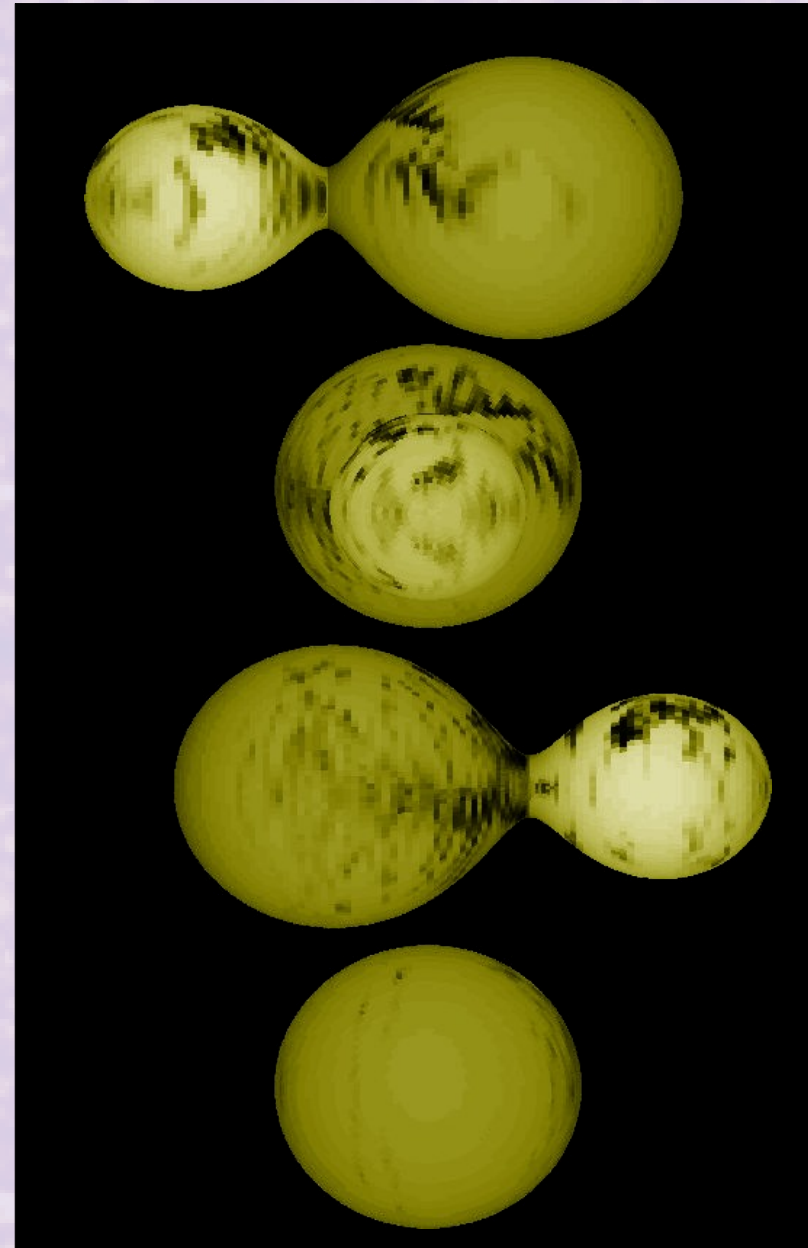


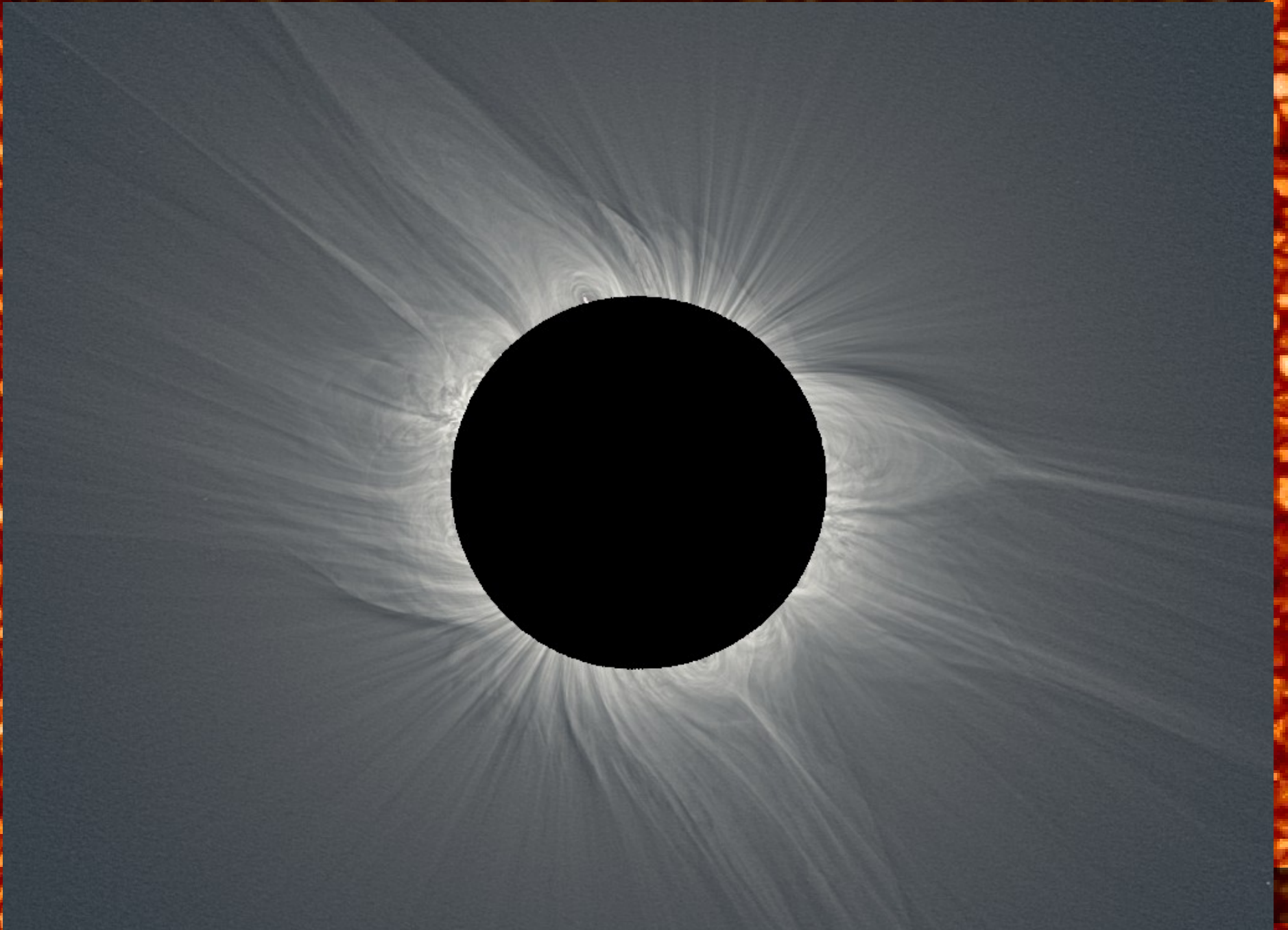
# Dopplerovské obrázky jiných hvězd



# 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

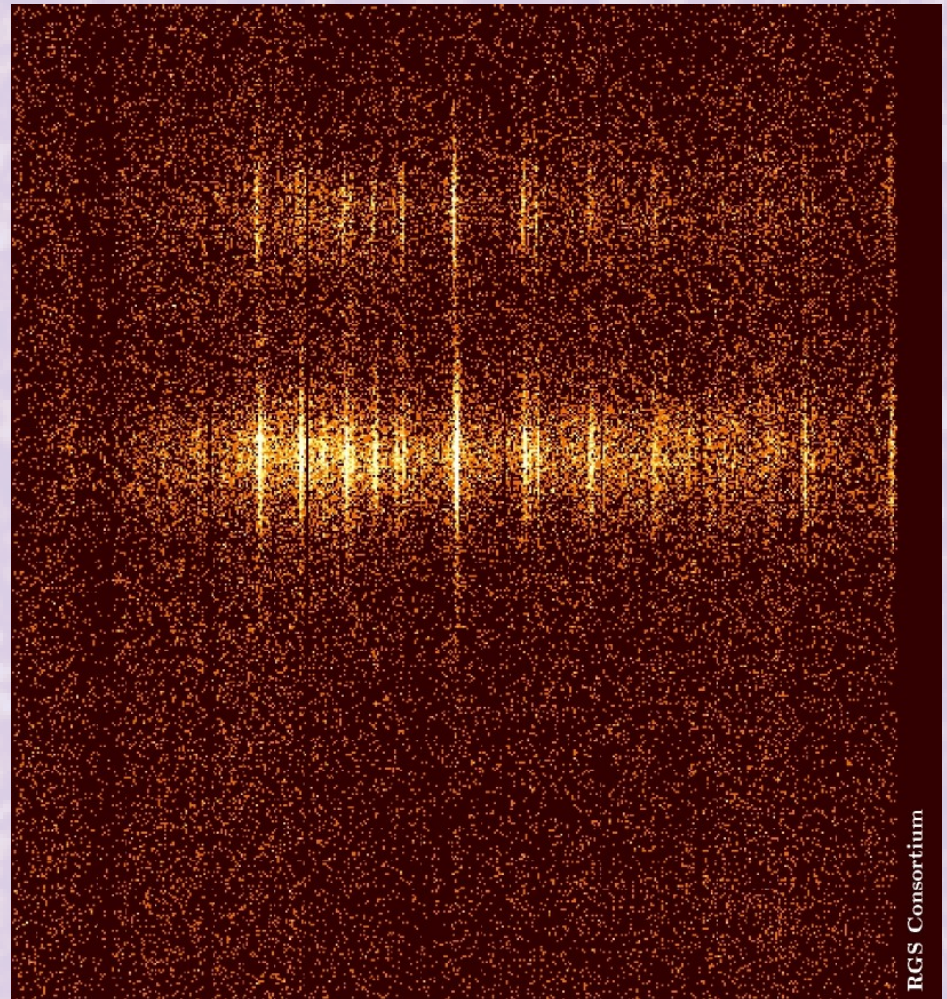




- Fotosféra  $\sim 5000$  K  $\rightarrow$  koróna  $\sim 2$  MK
- Možnosti ohřevu
  - Rozptyl zvukových vln způsobených konvekcí
  - Disipace MHD vln
  - Mikro-, nano-, piko-erupce
  - Joulovo teplo z proudů podél magnetických smyček
- Stále poněkud záhada, ale důležité pro energetiku hvězdy
- Pochopení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

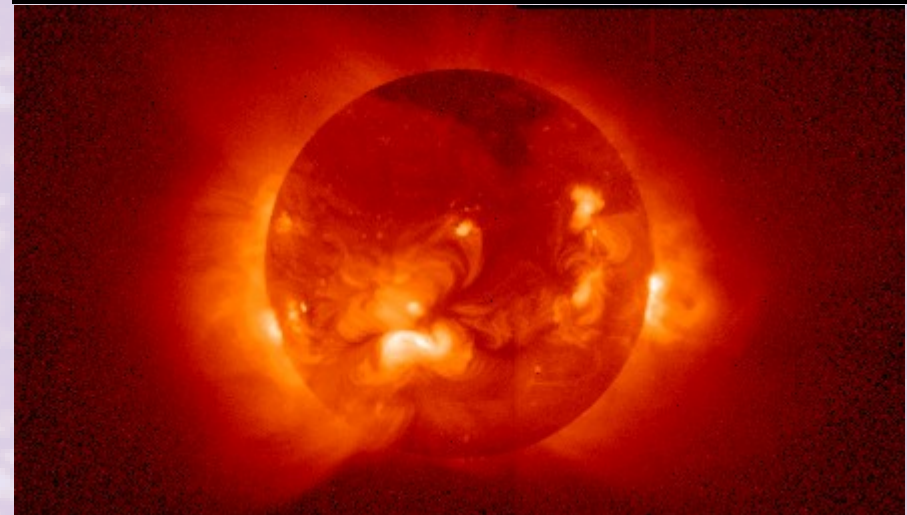
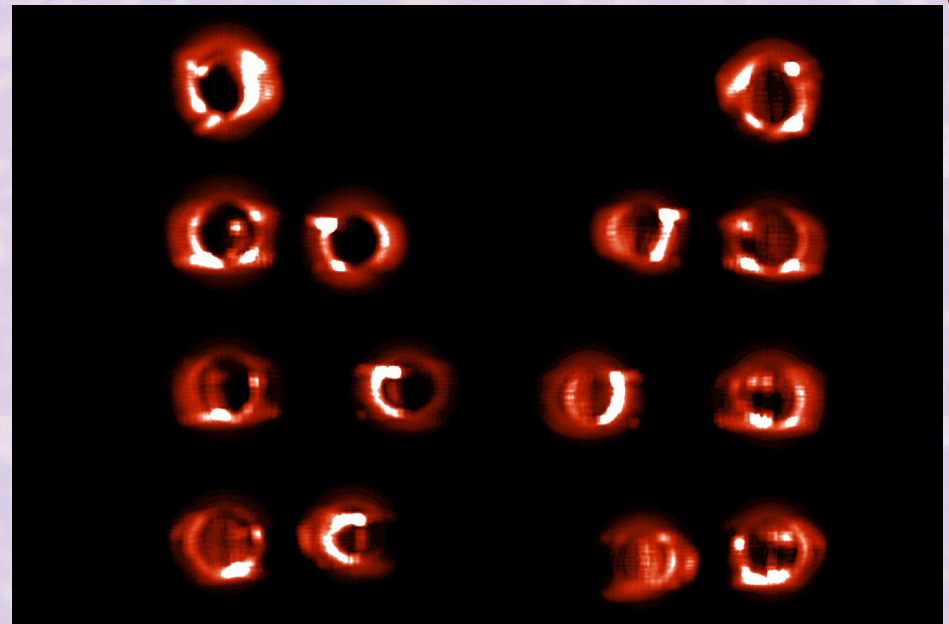


- Koróna – řídká, horká, ionizovaná
  - U horkých hvězd vzniká tlakem záření
  - U chladných hvězd je za vznikem silné magnetické pole vypínající se nad fotosféru
- Vyzařuje v UV a X
  - Zatmění Slunce?
- Měření mimo zemskou atmosféru
  - XMM Newton, Chandra



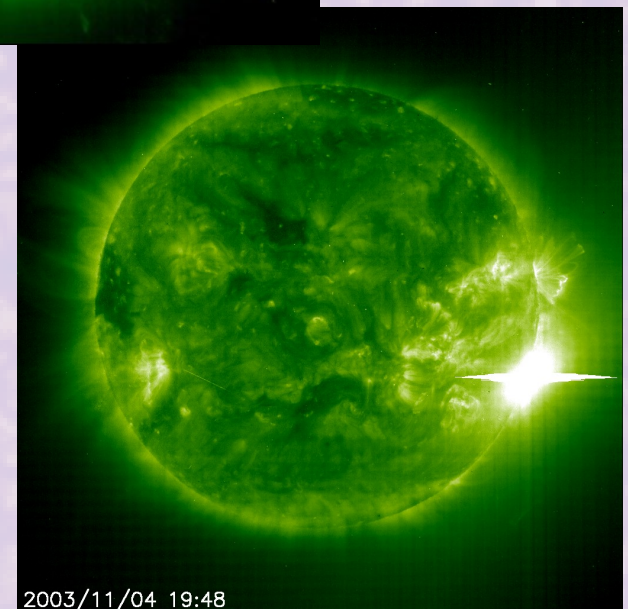
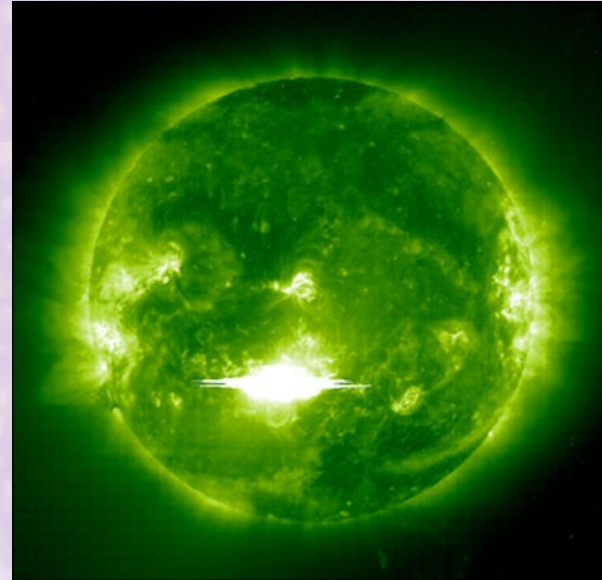
RGS Consortium

- 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

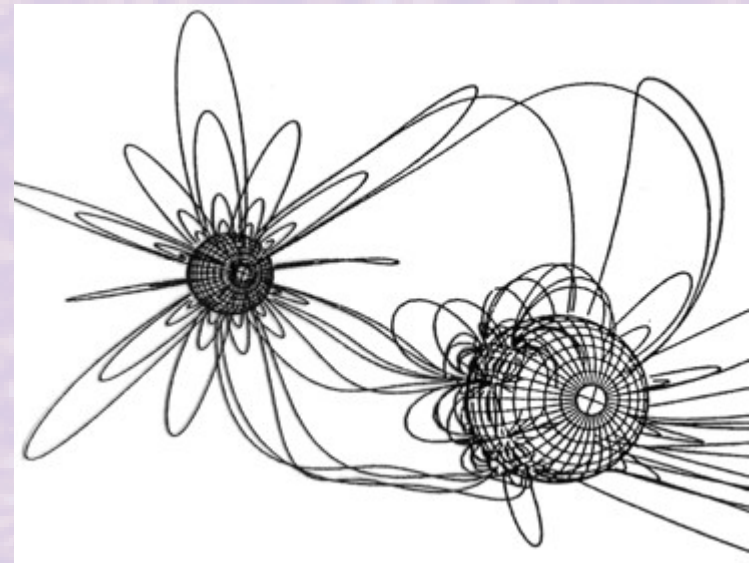
- Sluneční erupce A → X podle energie v RTG pásu (X:  $E > 10^{-4} \text{ Wm}^{-2}$ )
- Maximum X50?
  - E ~  $10 \text{ Wm}^{-2}$
  - 1. 9. 1859 (?)
  - 4. 11. 2003 (>X20)
- Silnější erupce – nedozírné následky (elektronika, ozón, ...)
- Fyzika:
  - Rekonexe magnetického pole



# Sluneční erupce – video

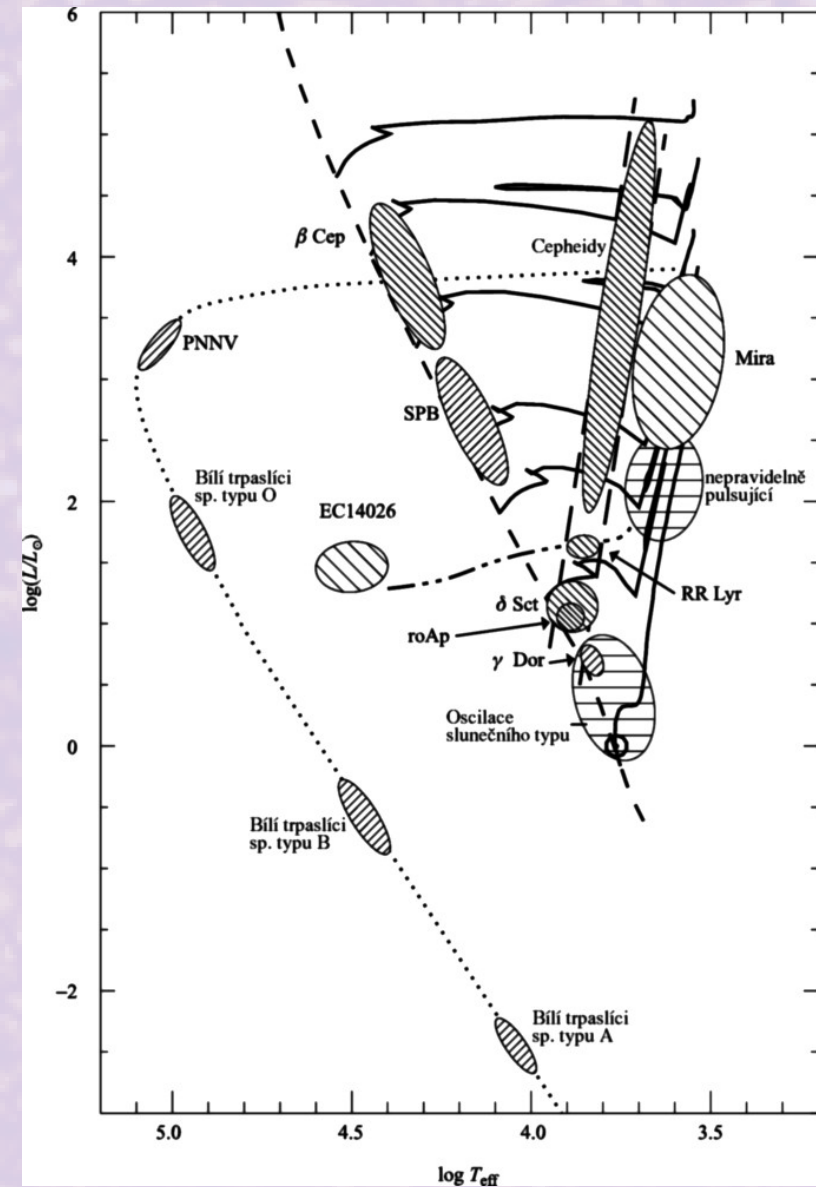


- Slunci-podobné hvězdy – běžně silnější erupce ( $10^7\times$ )
- M-trpaslíci – ve V se zjasní až o 2 magnitudy ( $\sim 1000\times$ )
- T Tau – přestavby magnetických polí
- Rentgenové záblesky
- Teploty až  $10^{13}$  K
- G-hvězdy – proč?
  - Plynné planety na blízkých drahách
  - Rychlejší rotace
  - Dvojhvězda s jinou aktivní hvězdou

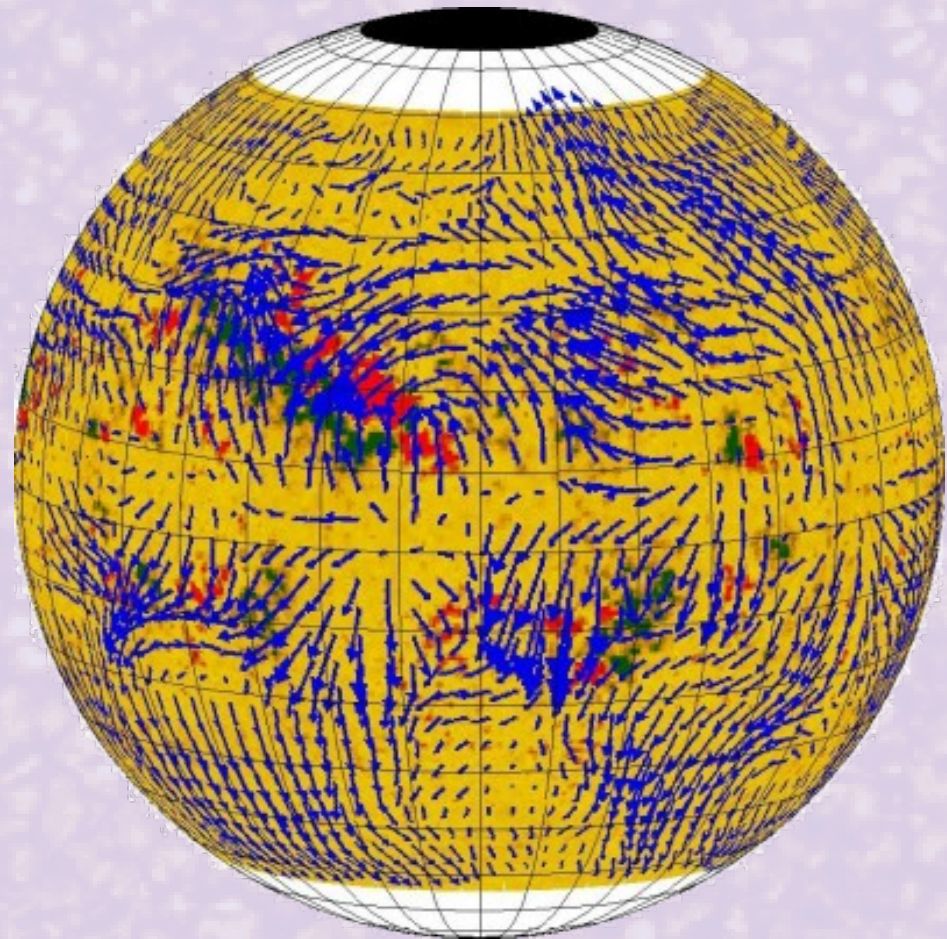


# Pulsující hvězdy

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

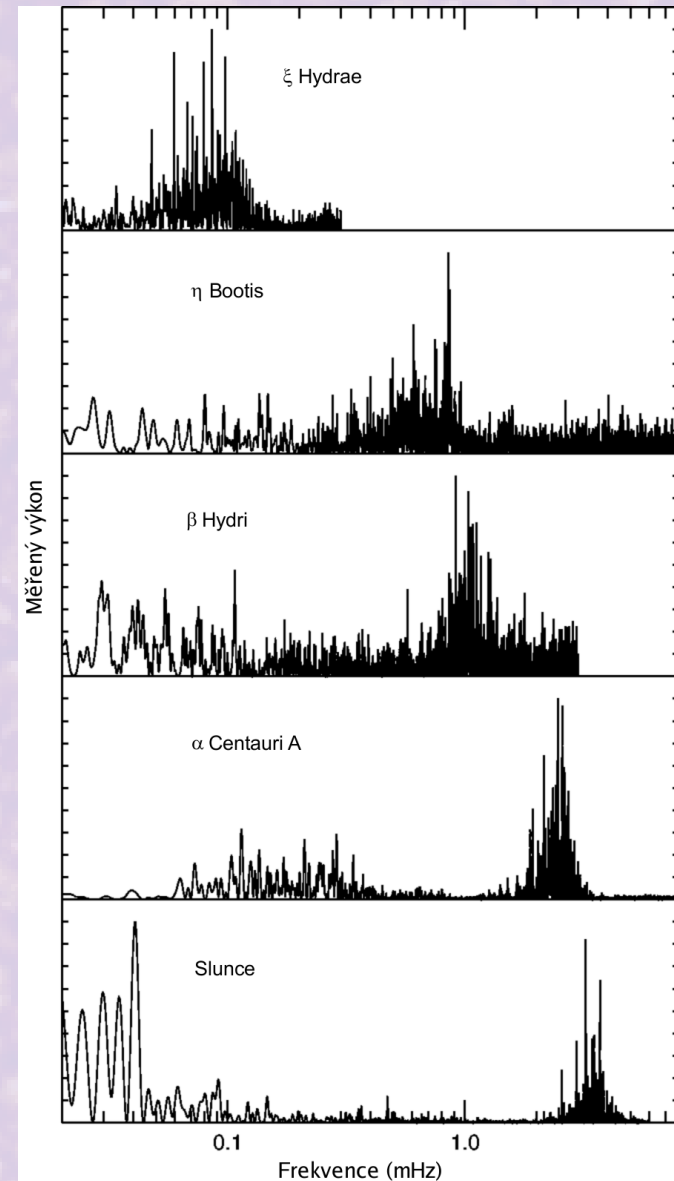


- Perspektivní metoda sluneční výzkumu
  - Stále ve vývoji od cca 60tých let
- Sledování odezvy hydrodynamických vln
  - Inverzí pozorování informace o poruchách, které ovlivňují šíření těchto vln
- Struktura nitra, podpovrchové toky, dění na odvrácené straně
- Globální × lokální



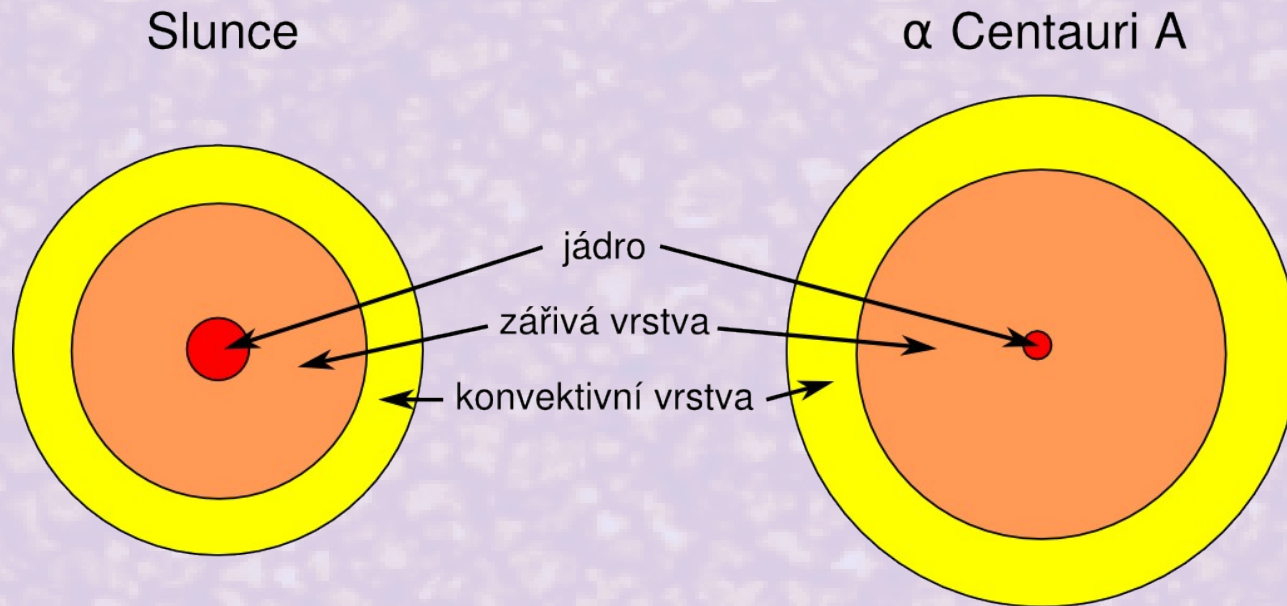
# Asteroseismologie

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





# Slunce vs. $\alpha$ 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

# Perspektivy sluneční jedinečnosti

- Nové automatické dalekohledy a družice (STELLA, PEPSI, COROT a další)
  - Mnoho dat pro mnoho hvězd
  - Lepší statistický vzorek
  - Rozvoj zpracovatelských metod
- Extrasolární planety
  - Planetární soustavy jsou spíše běžné než výjimečné
- ► Slunce definitivně ztratí svoji výjimečnost
  - Jedna z mnoha hvězd určitého typu, u níž pozorujeme zblízka aktivní procesy