

1. Slunce jako hvězda

Sluneční fyzika
LS 2013/2014

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

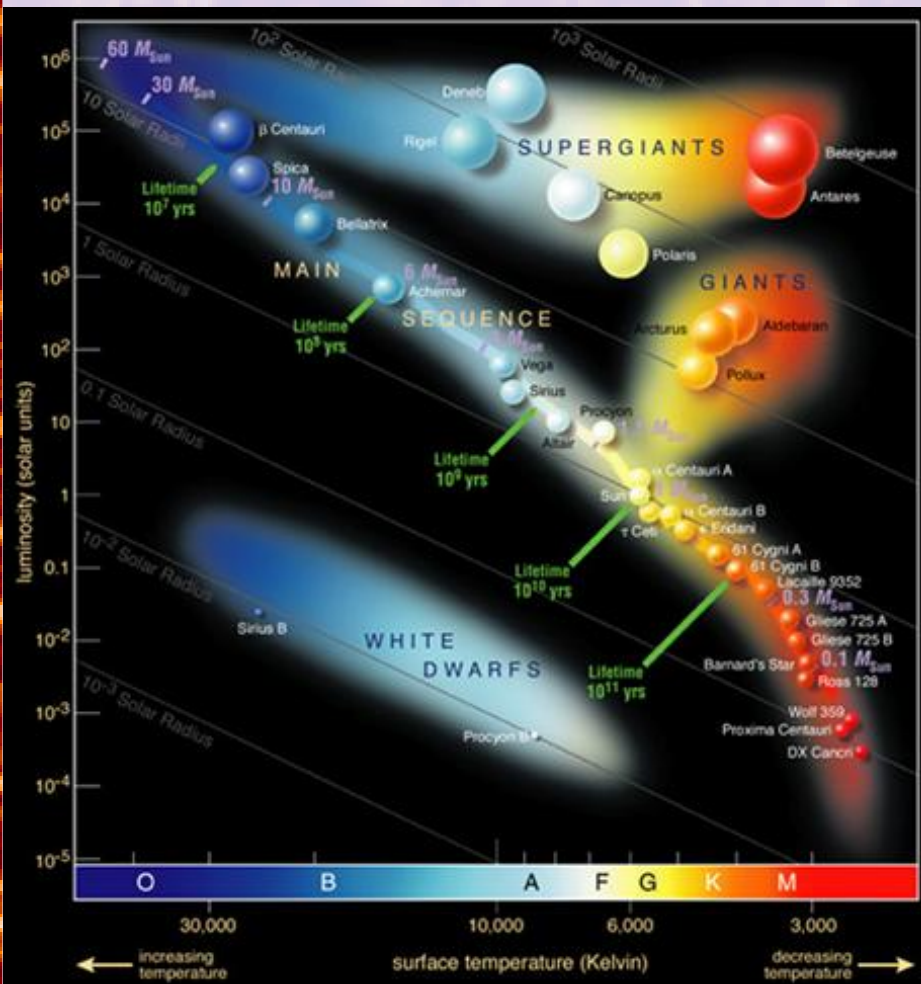
- 1128 – kresba slunečních skvrn v Anglii
- 1185 – v Rusku spatřeny protuberance
- 1600 – Bruno, „hvězdy jsou různě vzdálená Slunce“
- 1609/1610 – první teleskopická pozorování slunečních skvrn (Galileo, Scheiner, Fabricius)
- 1715 – první kresba sluneční koróny
- 1800 – W. Herschel, infračervené záření 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

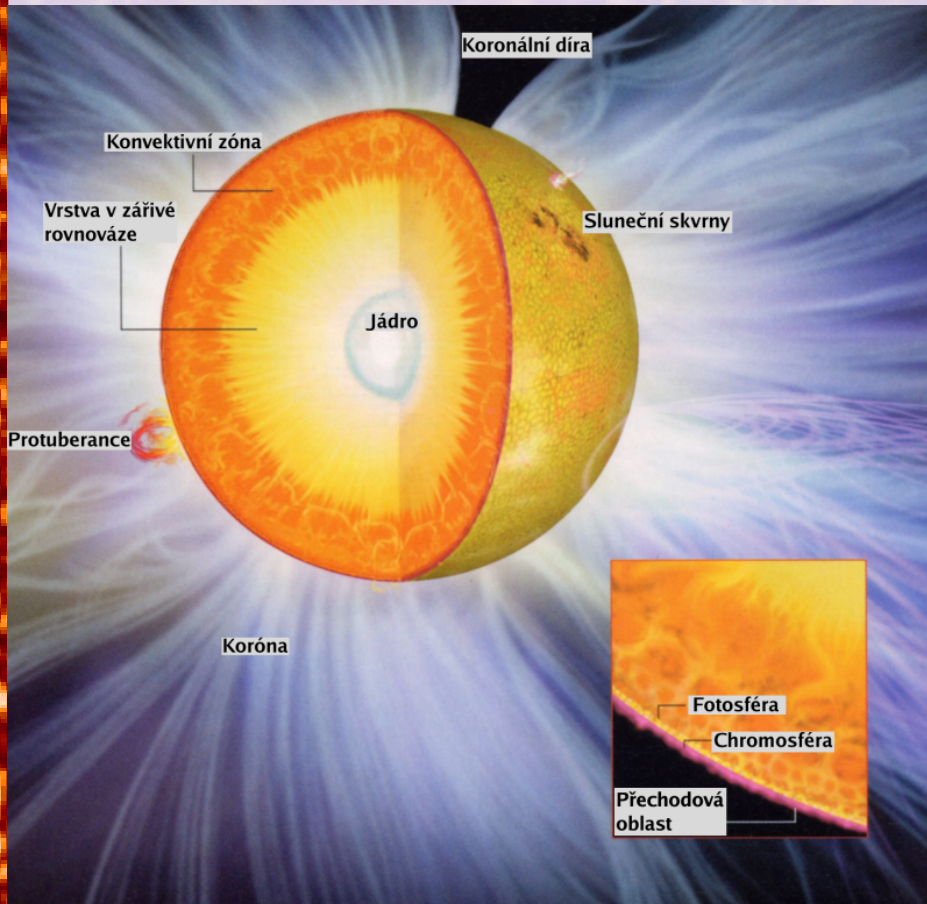
- Rovnováha sil – uvnitř musí být zdroj dodávající energii/teplo
- Slunce hoří – cca 20 000 let
- Kelvin-Helmholtzova kontrakce – udržela by zářivost Slunce cca 20 milionů let
- 1890 – Lockyer – padající komety by pokryly energetickou potřebu – ale změny planetárních drah
- 1904 – Rutherford – vnitřním 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



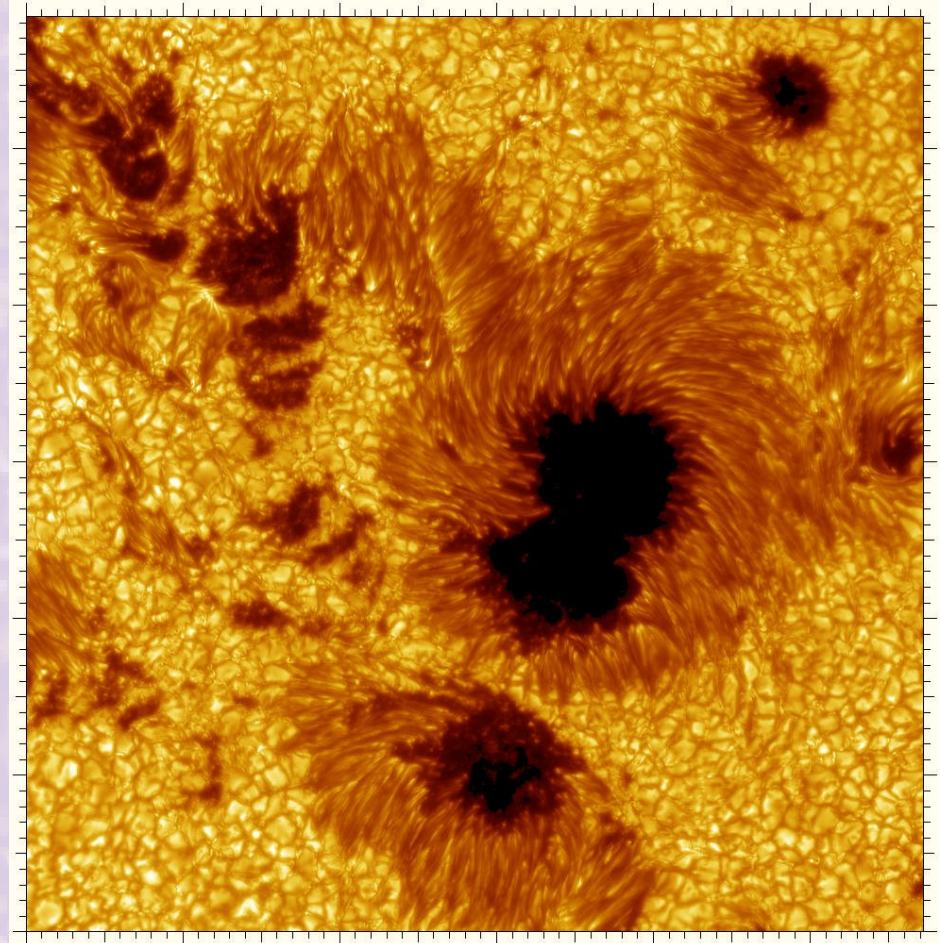
Vnitřní struktura Slunce



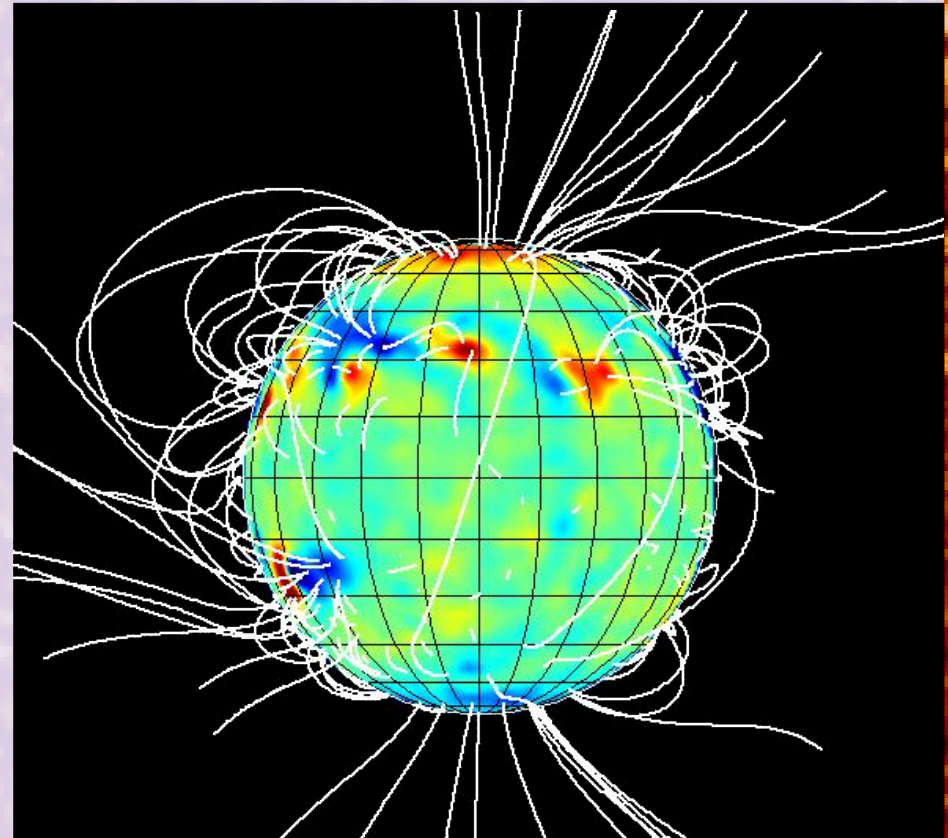
- Jádro
- Zářivá vrstva
- Konvektivní vrstva
- Fotosféra
- Chromosféra
- (Přechodová vrstva)
- Koróna

- 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 ?*

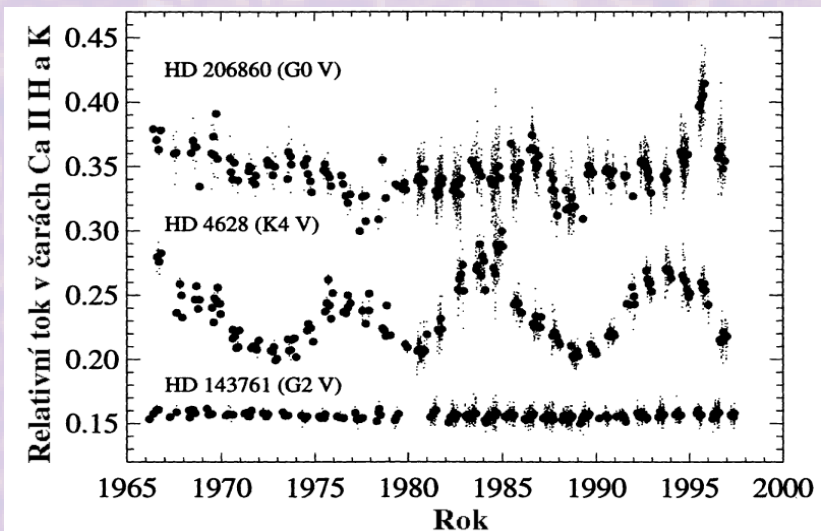
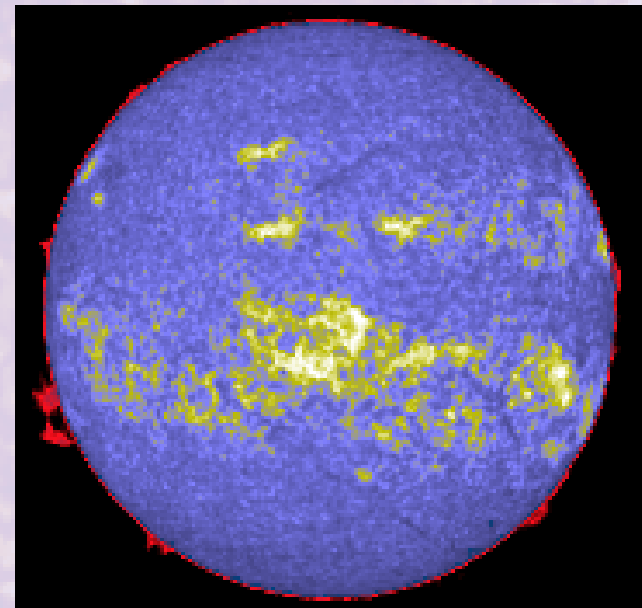


- Slunce = proměnná hvězda!
 - Jasové změny celkově cca 0,1 %, mnohem větší v UV a X nebo rádiu
- Aktivita = soubor v čase proměnlivých jevů souvisejících s magnetickým polem
 - Sluneční skvrny
 - Protuberance
 - Erupce
 - CME a plazmové oblaky

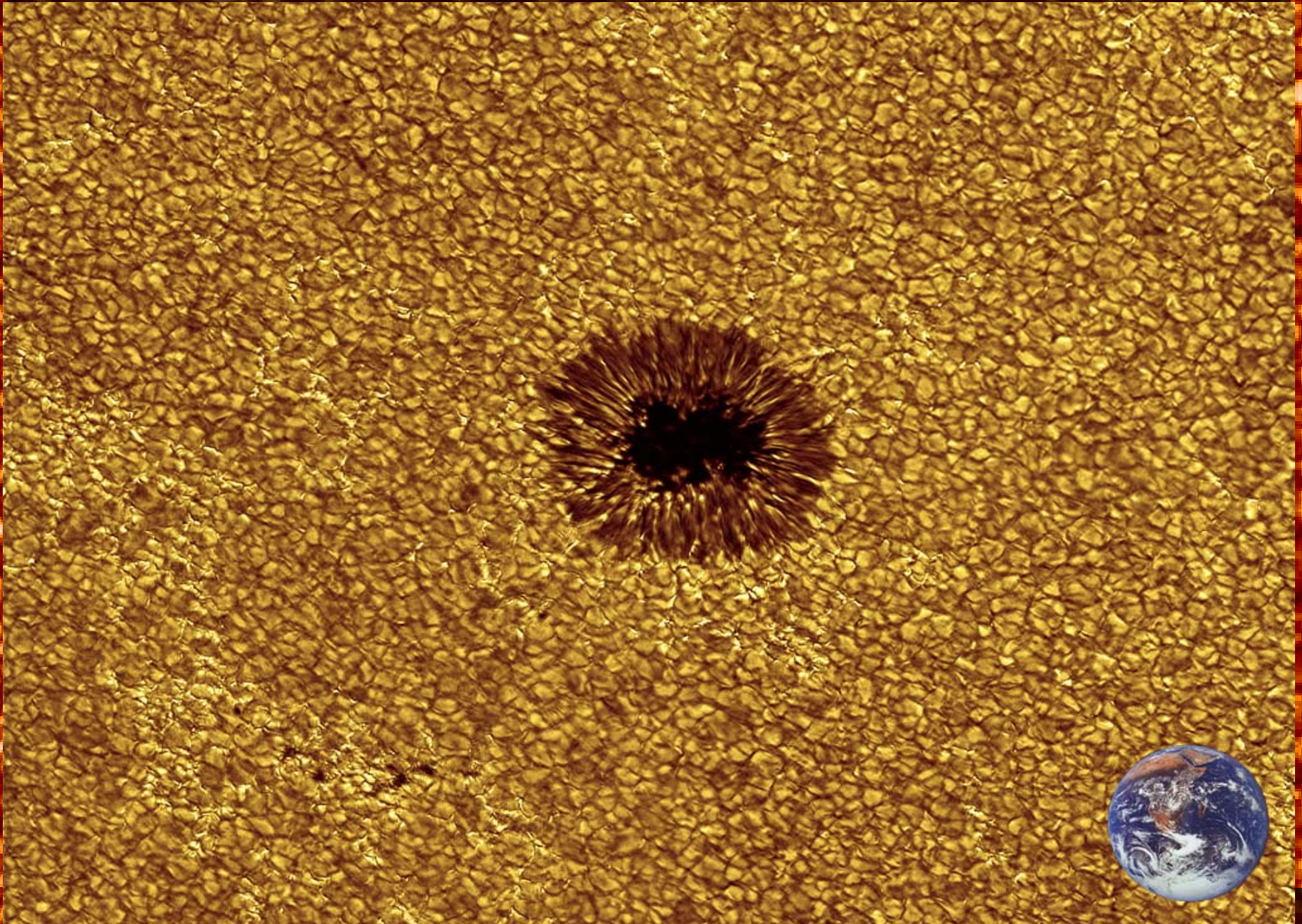


Hvězdná aktivita?

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

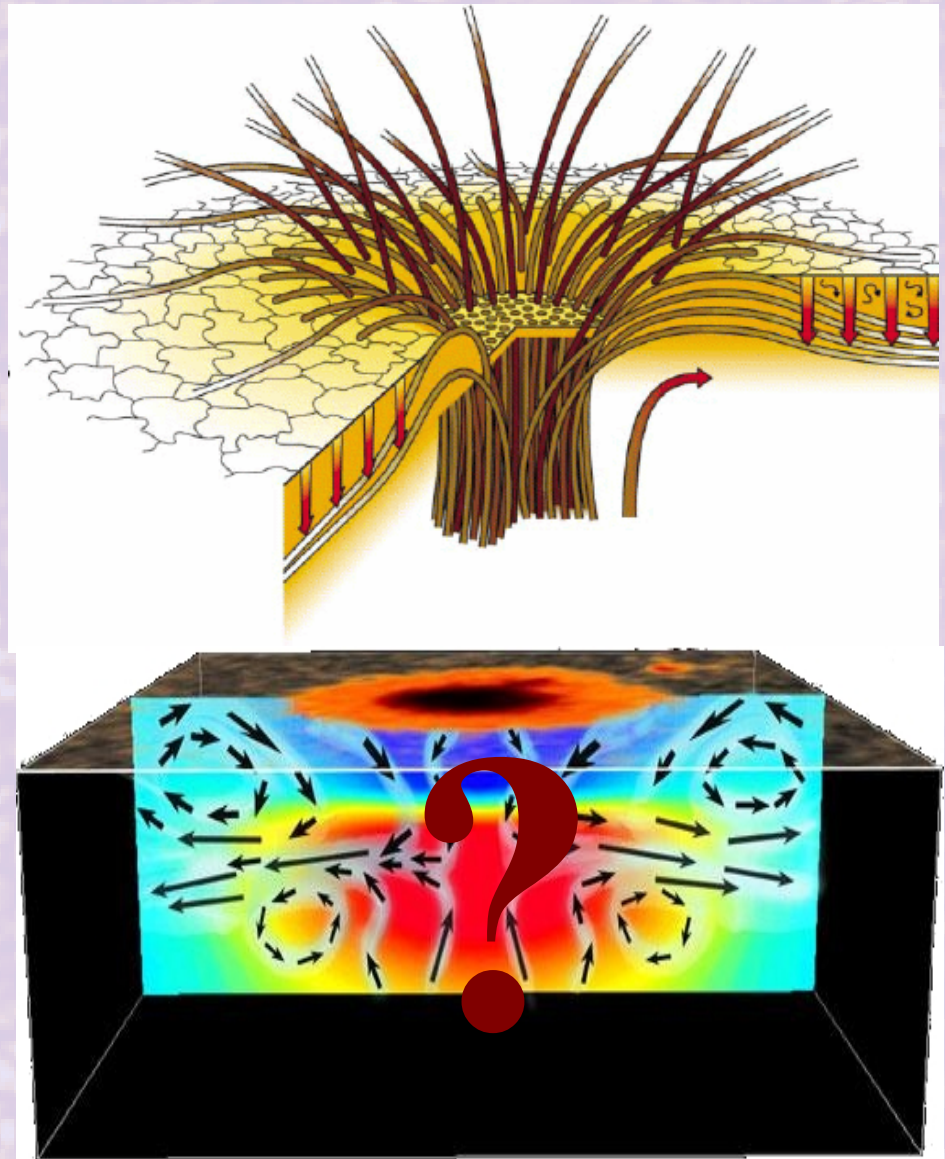


Sluneční skvrny

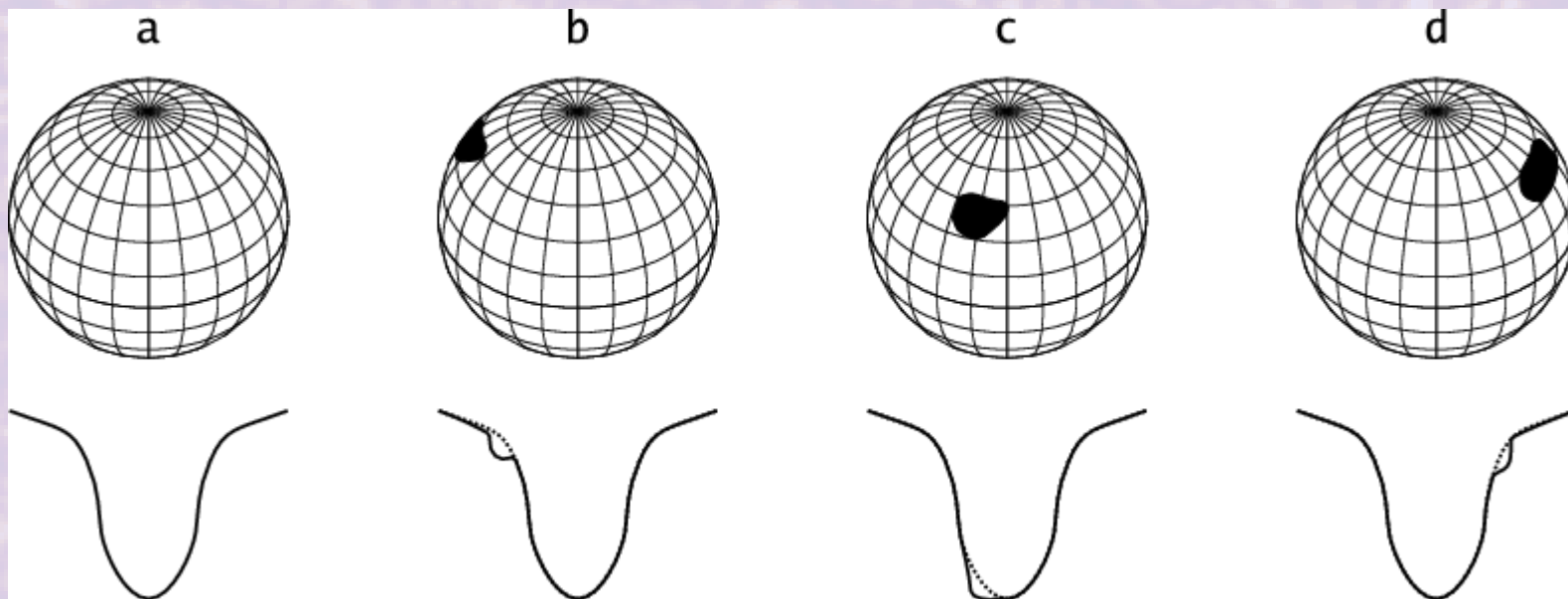


Sluneční skvrna, odkud se bere?

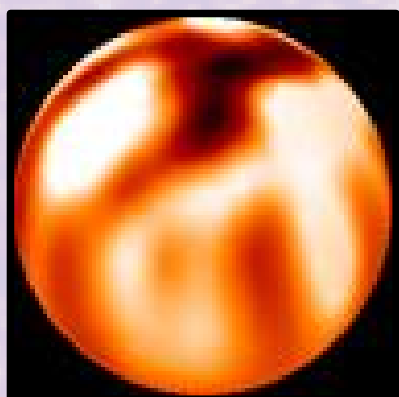
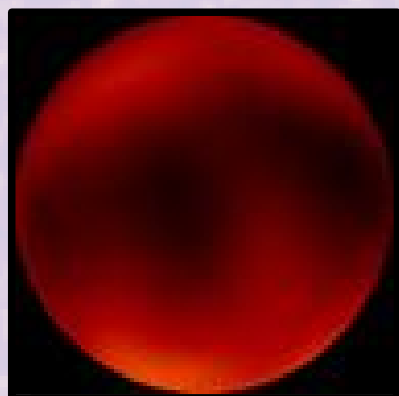
- Magnetické pole se vynoří do fotosféry (ale sakra odkud se to bere?)
 - Pokud se pole skloní o více než cca 70 stupňů, formuje penumbru
- Omezený tok tepla orientací pole
 - Lorentzova síla
- Oblast vychládá rychleji
 - Až o 1500 stupňů
- Komplikované pole formuje komplikovanou skupinu skvrn



- 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???

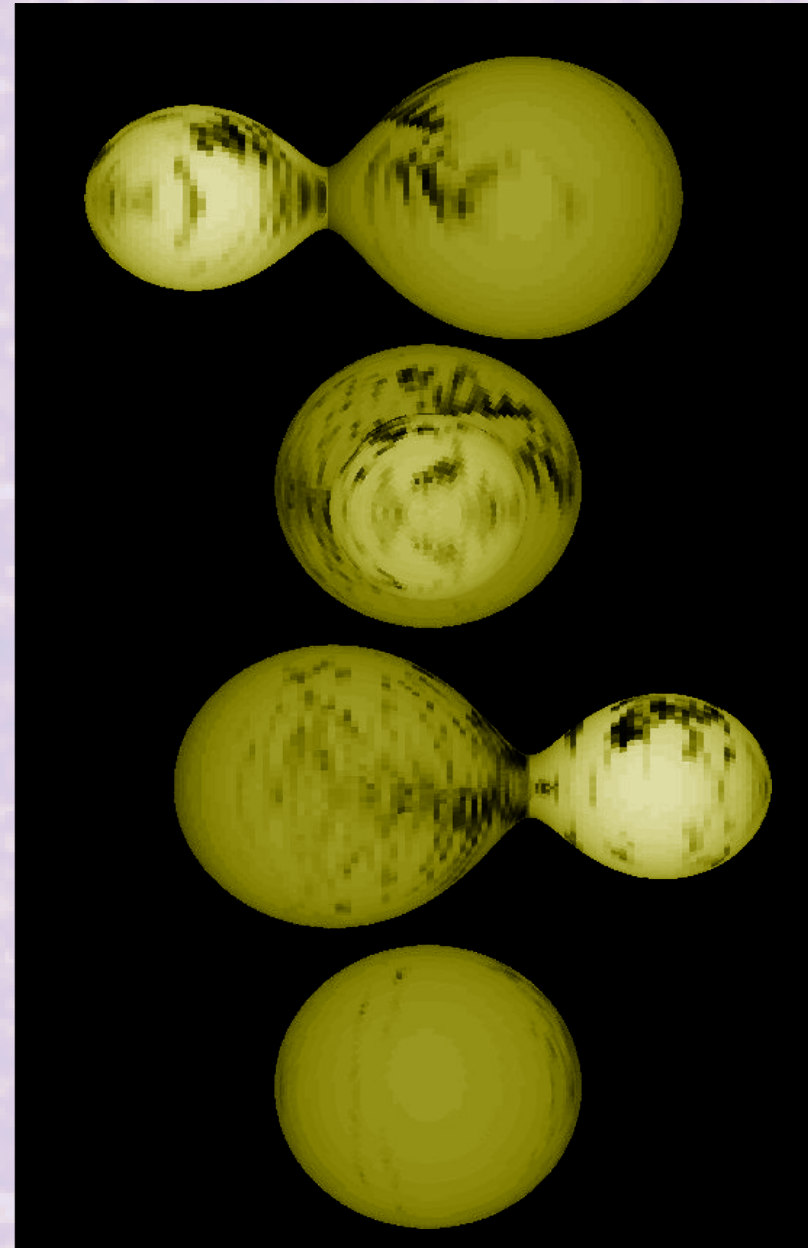


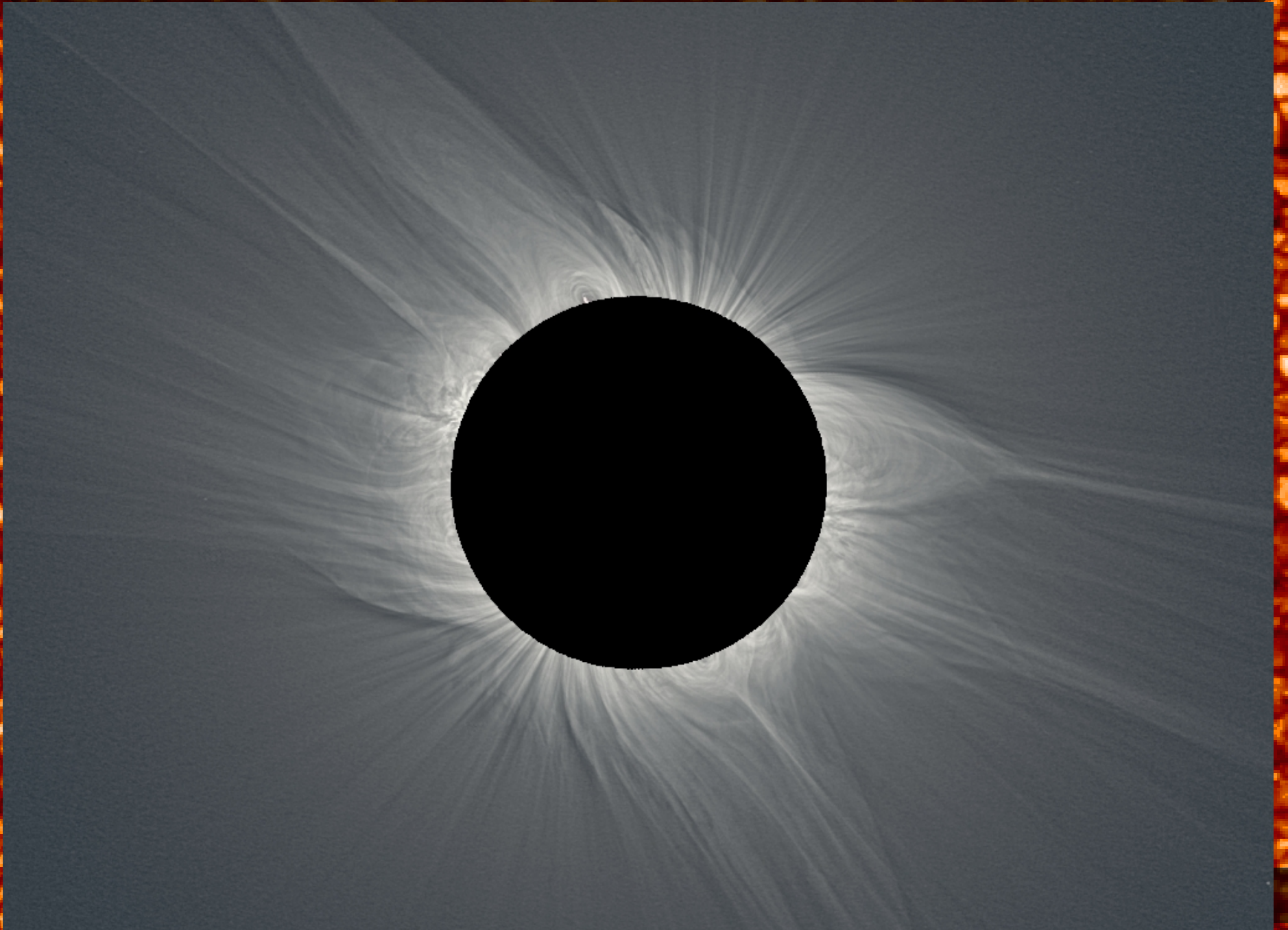
Dopplerovské obrázky jiných hvězd



Budoucnost dopplerovské tomografie

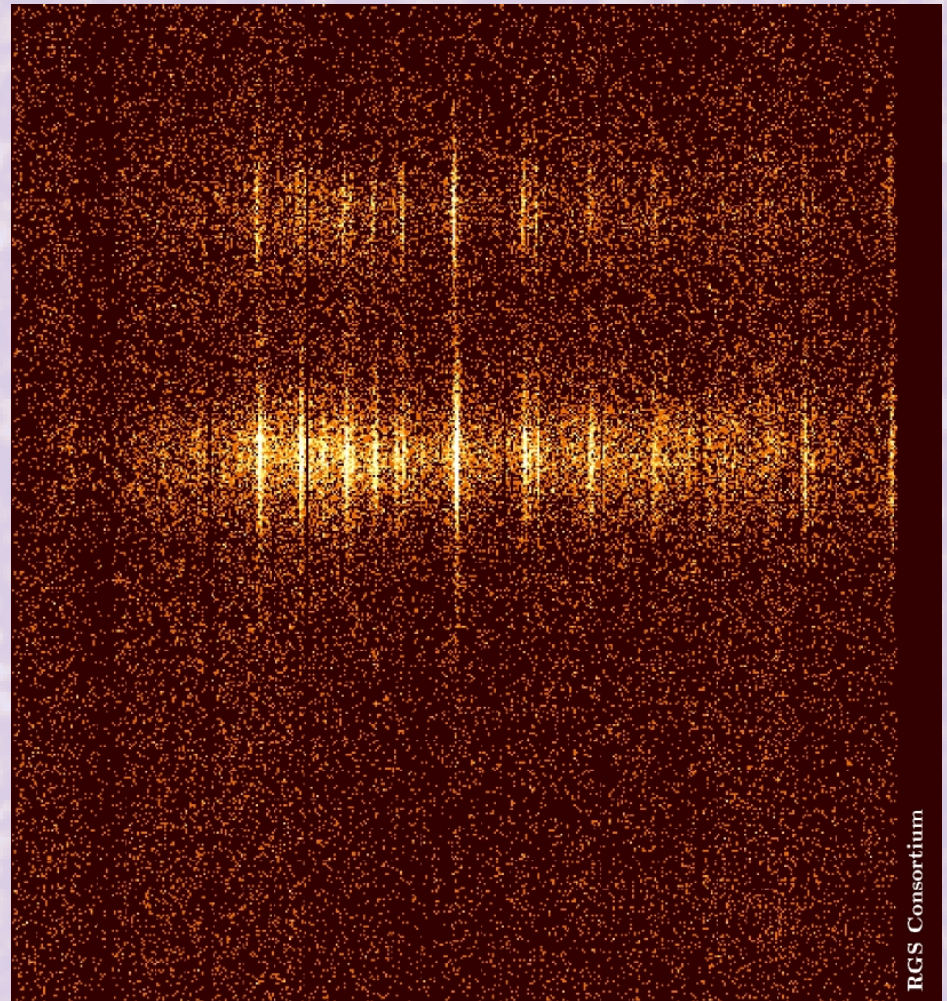
- Prozatím mapy s nízkým rozlišením, až na výjimky – *AE Phe*
- Rozvoj do budoucna – automatické přístroje a automatické redukční rutiny
- Studium povrchových pohybů
 - Důležité pro proces dynamika
- Pozorování hvězdných skvrn pomůže pochopení těch slunečních





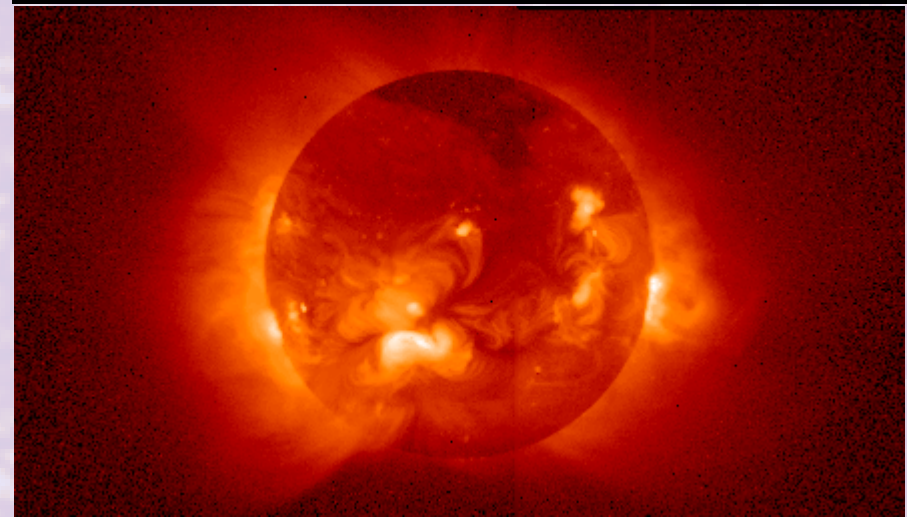
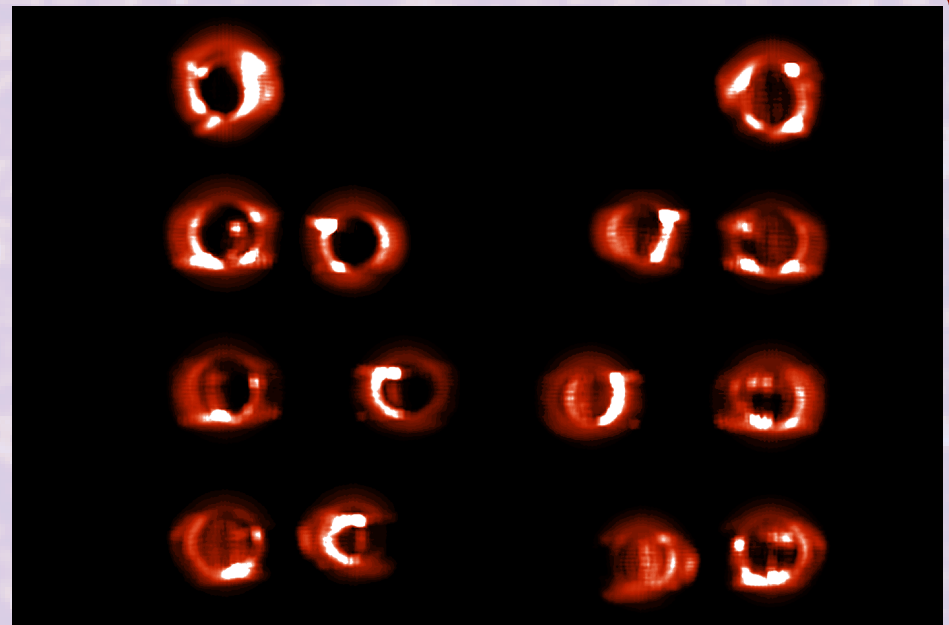
- Fotosféra ~ 5000 K \rightarrow koróna ~ 2 MK
- Možnosti ohřevu
 - Rozptyl zvukových vln způsobených konvekcí
 - Disipace MHD vln
 - Mikro-, nano-, piko-erupce
 - Joulovo teplo z proudů podél magnetických smyček
- Stále poněkud záhada, ale důležité pro energetiku hvězdy
- Pochopení vyžaduje MHD simulace 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



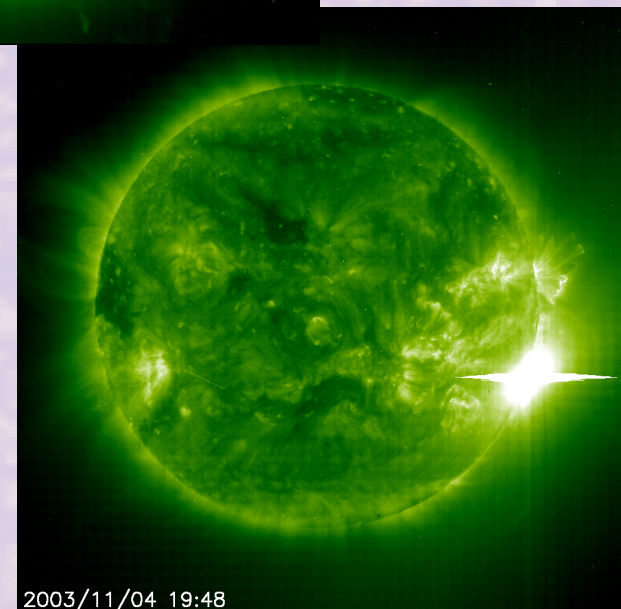
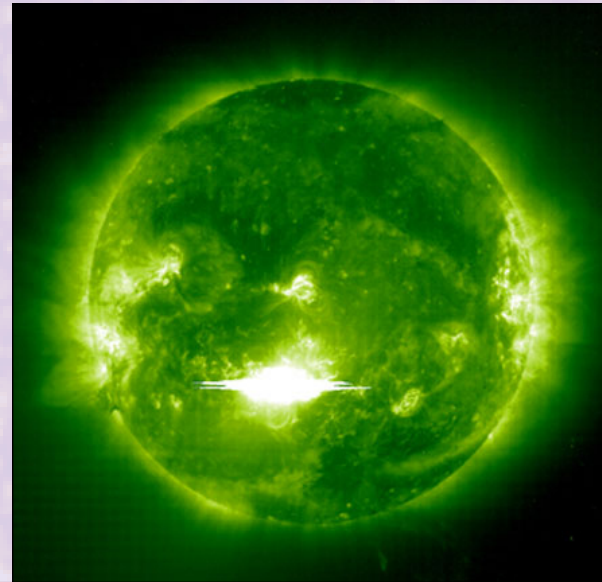
RGS Consortium

- 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

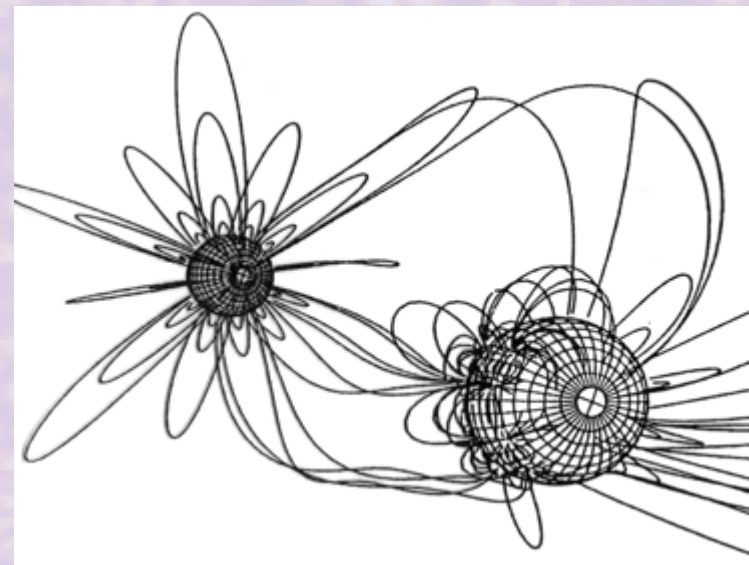
- Sluneční erupce A→X podle energie v RTG pásu (X: $E > 10^{-4} \text{ Wm}^{-2}$)
- Maximum X50?
 - $E \sim 10 \text{ Wm}^{-2}$
 - 1. 9. 1859 (?)
 - 4. 11. 2003 (>X20)
- Silnější erupce – nedozírné následky (elektronika, ozón, ...)
- Fyzika:
 - Rekonexe magnetického pole



Sluneční erupce – video

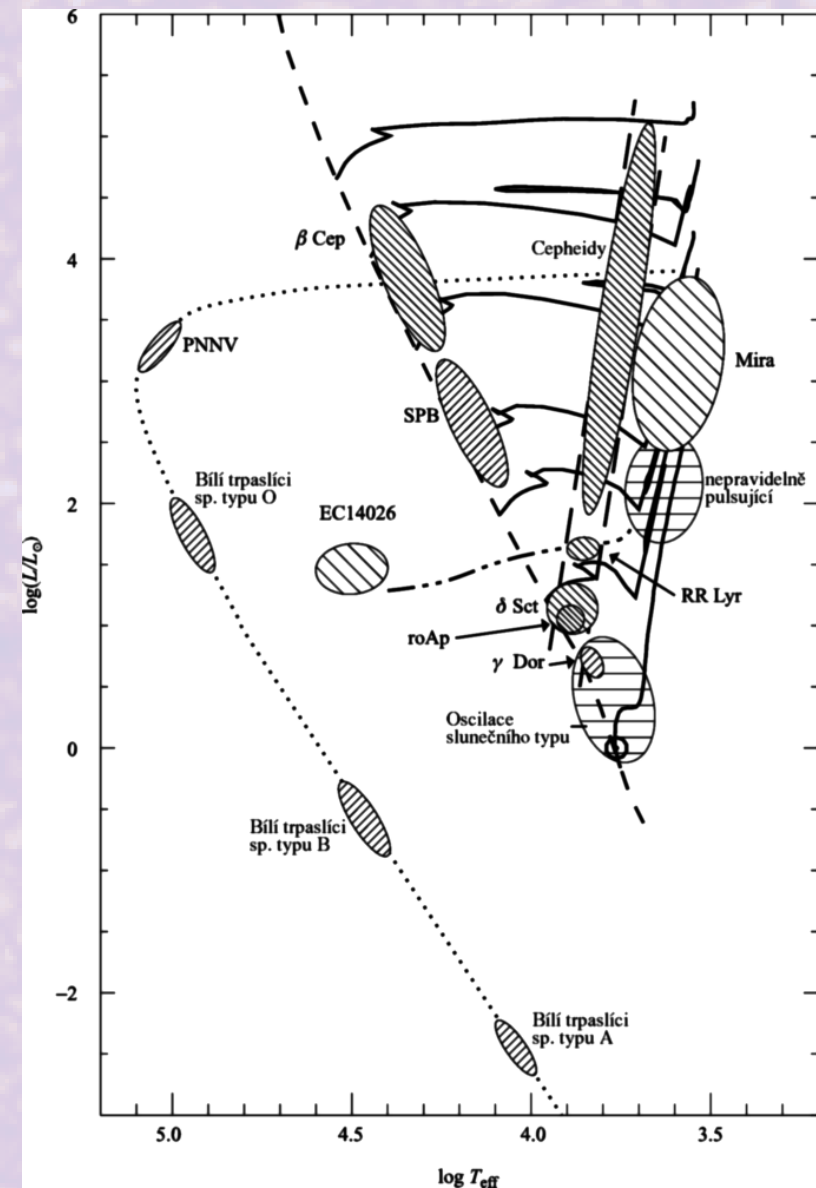


- Slunci-podobné hvězdy – běžně silnější erupce ($10^7 \times$)
- M-trpaslíci – ve V se zjasní až o 2 magnitudy ($\sim 1000 \times$)
- T Tau – přestavby magnetických polí
- Rentgenové záblesky
- Teploty až 10^{13} K
- G-hvězdy – proč?
 - Plynné planety na blízkých drahách
 - Rychlejší rotace
 - Dvojhvězda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

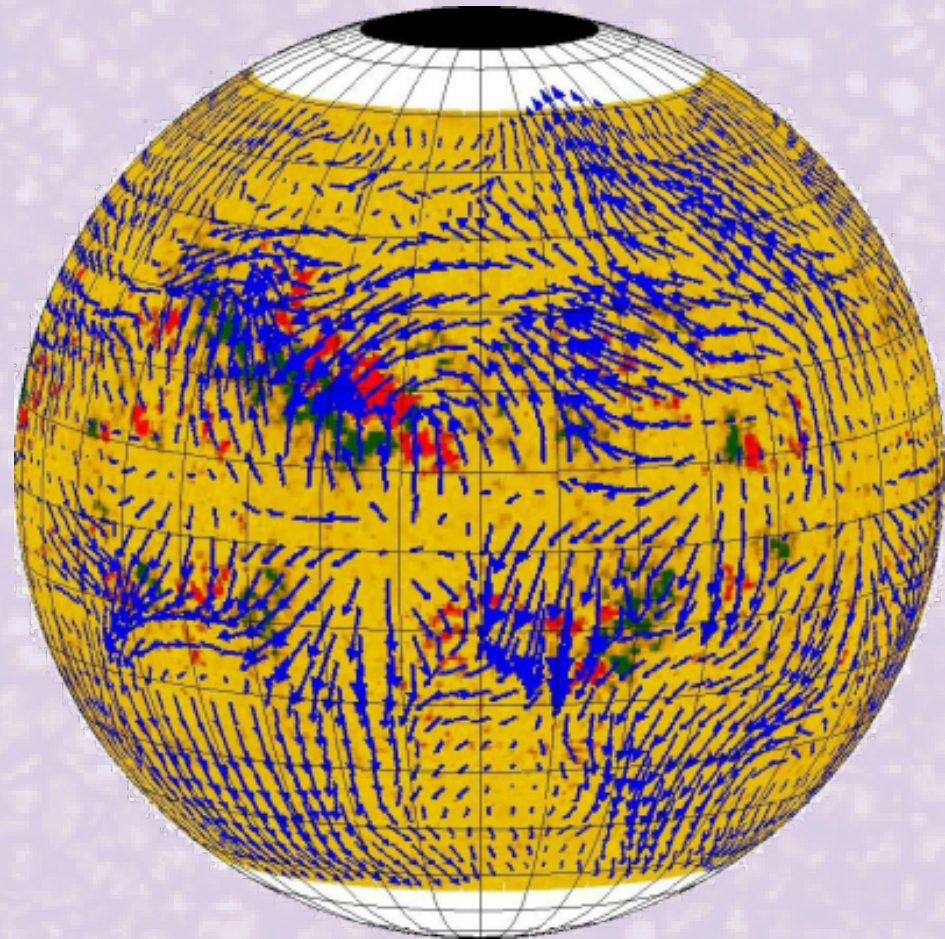


Pulsující hvězdy

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

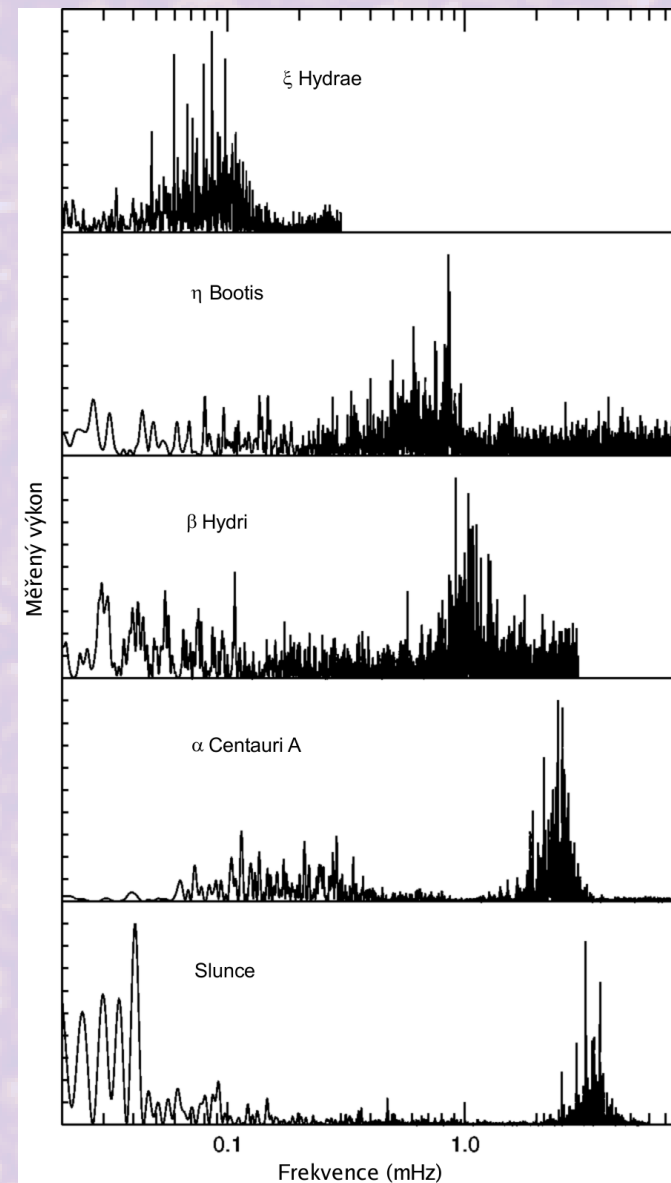


- Perspektivní metoda sluneční výzkumu
 - Stále ve vývoji od cca 60tých let
- Sledování odezvy hydrodynamických vln
 - Inverzí pozorování informace o poruchách, které ovlivňují šíření těchto vln
- Struktura nitra, podpovrchové toky, dění na odvrácené straně
- Globální × lokální

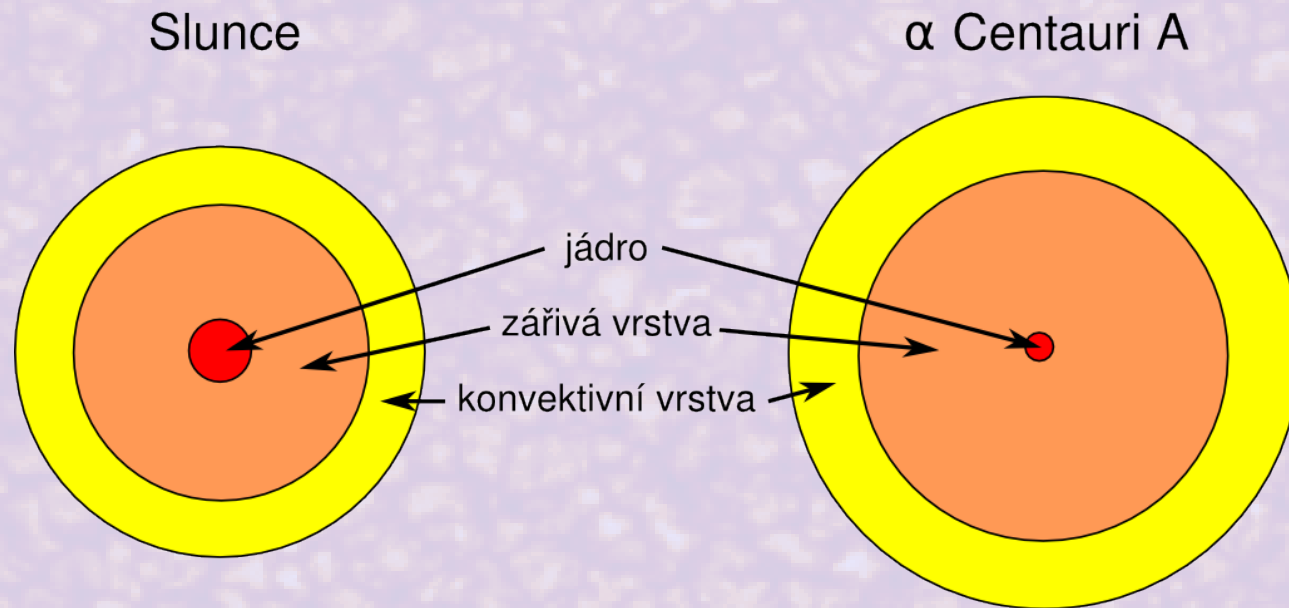


Asteroseismologie

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



Slunce vs. 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

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