



**PROGRAM
CEZHRANIČNEJ
SPOLUPRÁCE**

SLOVENSKÁ REPUBLIKA
ČESKÁ REPUBLIKA



**EURÓPSKA ÚNIA
EURÓPSKY FOND
REGIONÁLNEHO ROZVOJA**

SPOLOČNE BEZ HRANÍC



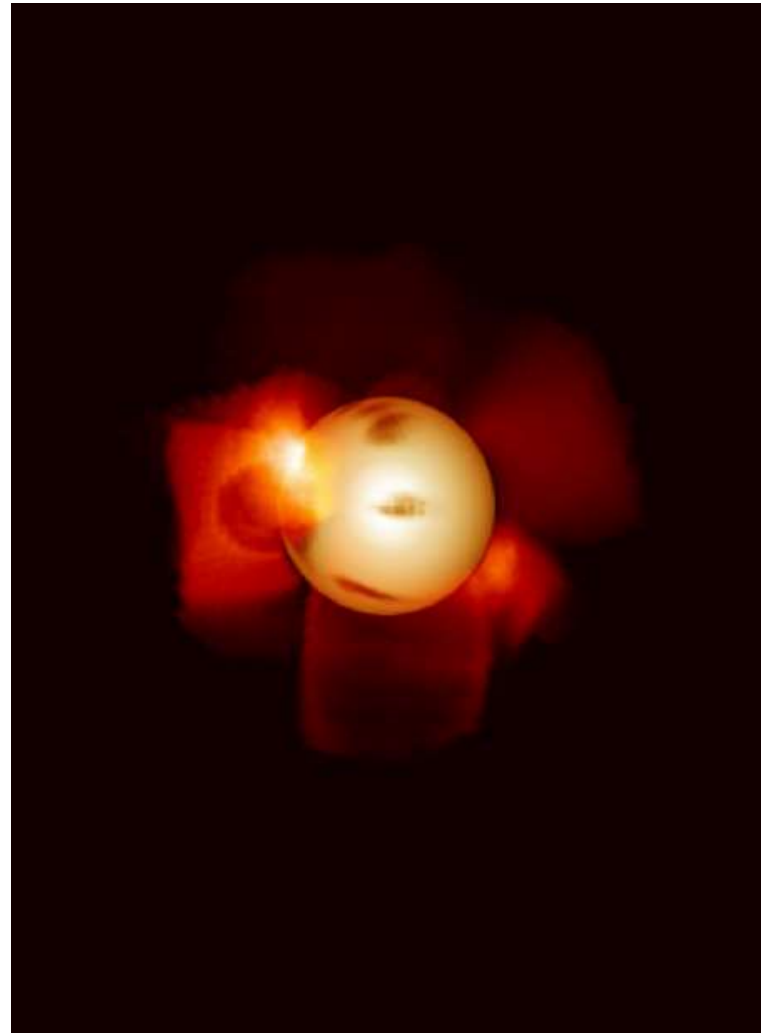
FOND MIKROPROJEKTŮ

Slunce jako hvězda

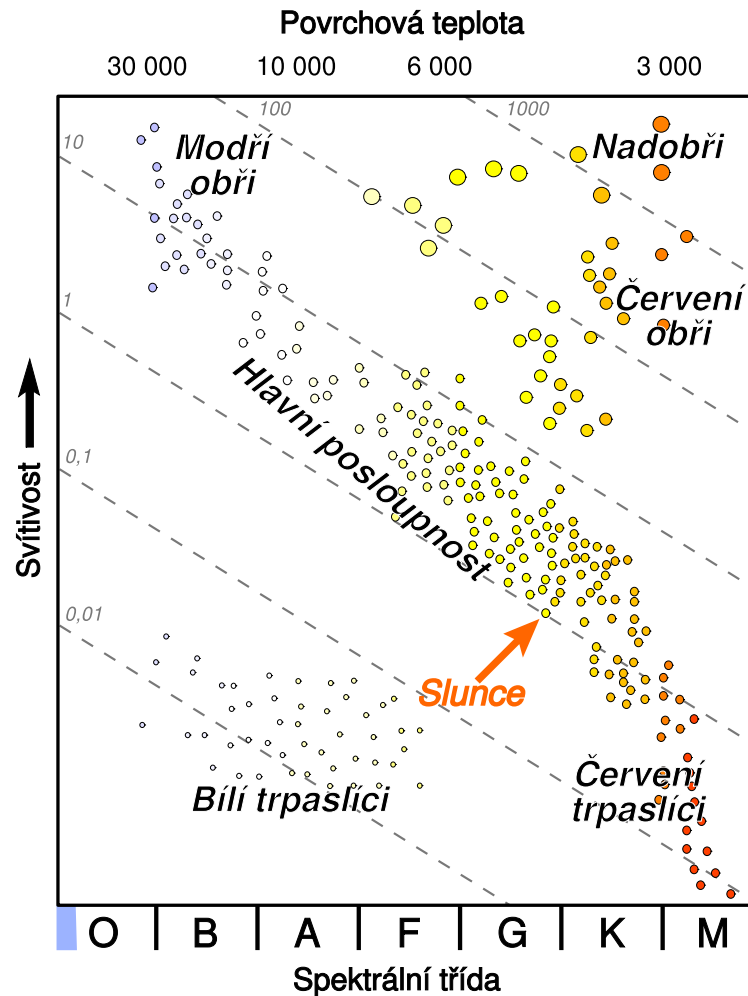
Michal Švanda
Astronomický ústav AV ČR
Astronomický ústav UK

Hvězdy, koření vesmíru

- Pouhá 4,5% hmoty a energie vesmíru ve svítící hmotě
- Z toho pouze 90 % podle předpokladů koncentrováno v plynu, 9,9 % ve hvězdách a zbytek ve smetí
- Hvězda – astrofyzikální objekt, který je po většinu času v hydrostatické rovnováze a po značnou část života si vyrábí energii termojadernou fúzí v nitru
- Hmotnost 0,01 – 100 Sluncí
- Teploty 2500 – 100 000 K
- Poloměr 10 km – 1000 Sluncí
- Svítivost až 100 000 Sluncí

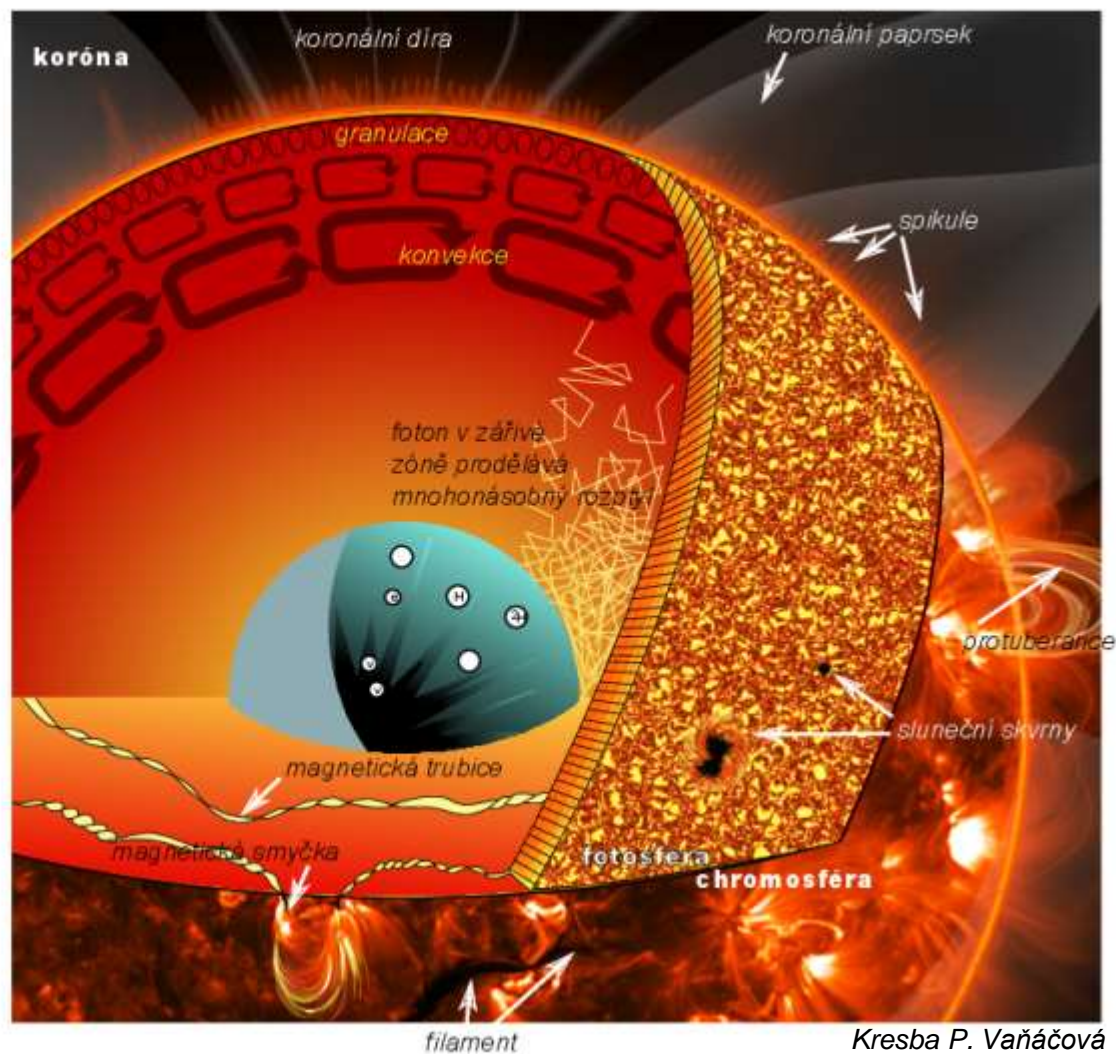
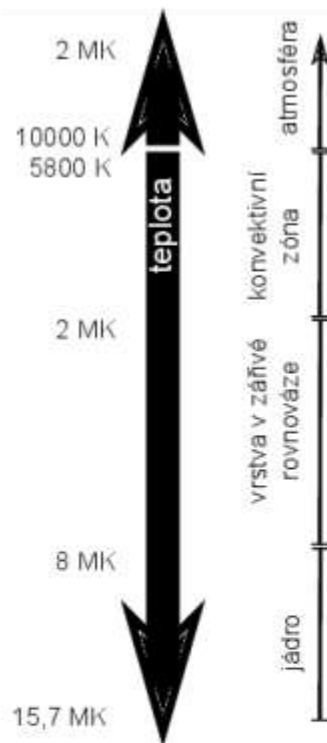


Hertzsprungův-Russelův diagram



- Vznik na počátku 20. století na základě spektroskopických přehlídek
- Základní diagnostický nástroj pro určování vlastností hvězd
- Hlavní posloupnost
- Hvězda během života po H-R diagramu cestuje
- I to lze využít k diagnostice

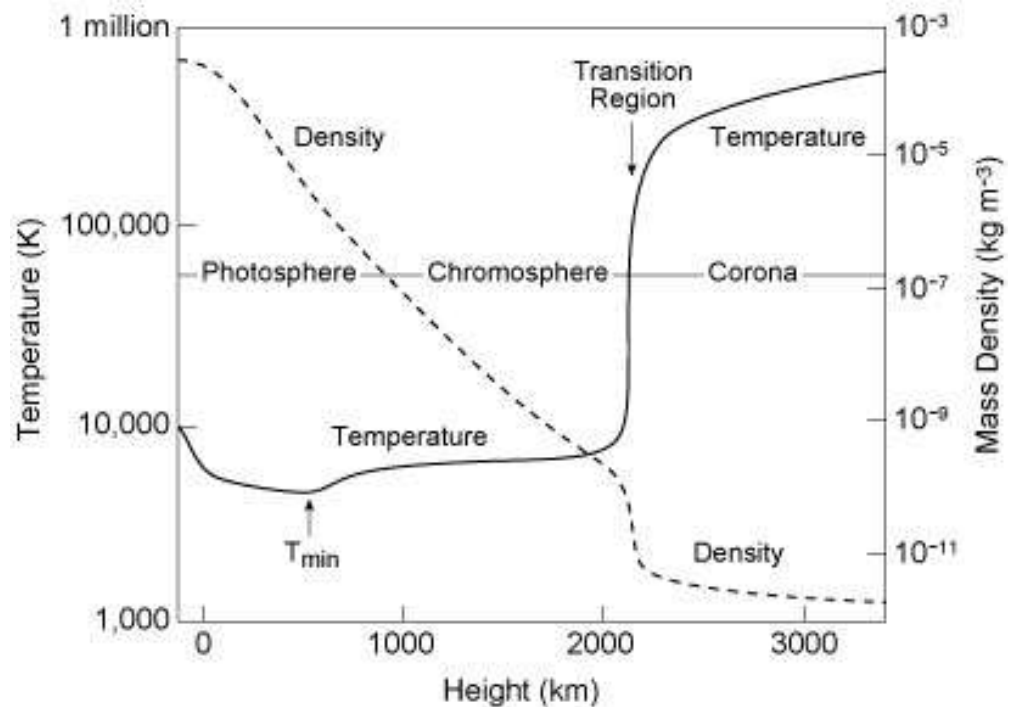
Slunce: naše nejbližší hvězda



Kresba P. Vaňáčová

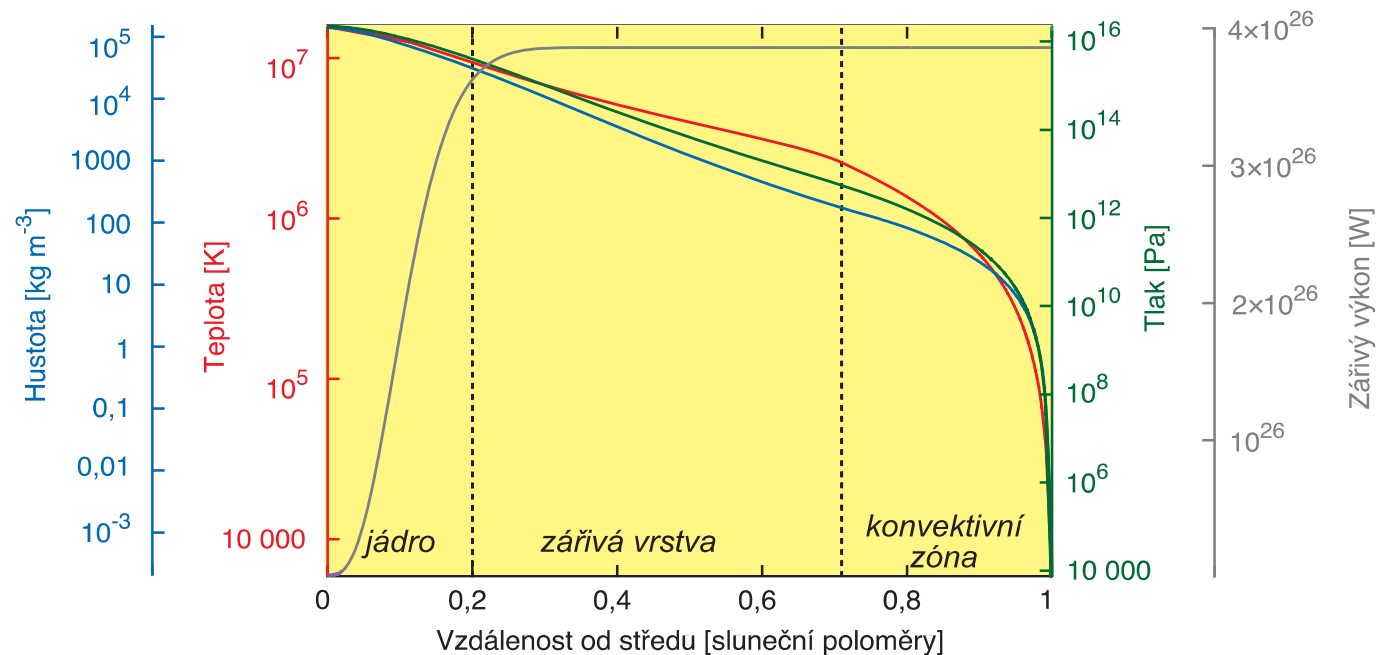
Sluneční atmosféra

- Fotosféra
- Chromosféra
- (přechodová vrstva)
- Koróna
- Co ohřívá vyšší atmosféru?
 - Vlny, rekonexe, elektrické proudy



Na stopě vnitřní struktury

- První představy: rovnováha sil; hledání tepelného zdroje
- První modely: kolem WW2
- 60. léta: objev oscilací
- S lepšími modely předpovědi oscilací
- Lze opačně?
- Neutrinový problém



Slunce vnitřním pohledem fyzika

- 4 rovnice, vše 1D
- „materiálové vztahy“
- Nebere v úvahu, že látka je ve stavu plazmatu
- Způsob výroby energie musí být předepsán (ϵ funkcí stavových parametrů)
 - p-p $\sim T^4$
 - CNO $\sim T^{15-18}$
- Řešení – hvězdný model
- *Ale kde je čas?*

$$\frac{dm}{dr} = 4\pi\rho r^2$$

$$\frac{dP}{dr} = \frac{-Gm\rho}{r^2}$$

$$\frac{dL}{dr} = 4\pi\rho r^2(\epsilon + \text{korekce})$$

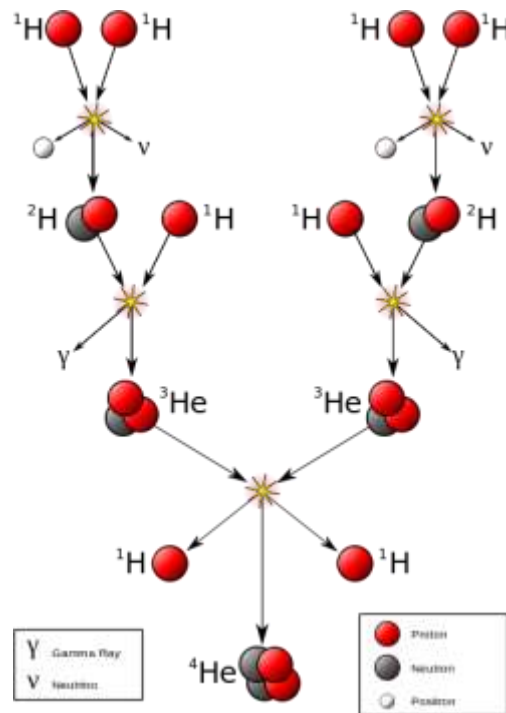
$$\frac{dT}{dr} = \frac{-GmT\rho}{r^2 P} \nabla \leftarrow \begin{aligned} \nabla_{\text{rad}} &= \frac{3\kappa P L}{16\pi ac Gm T^4} \\ \nabla_{\text{ad}} &= \frac{\delta Gm}{c_p r^2} \end{aligned}$$

$$P = \frac{\Re \rho T}{\mu}, \quad \mu = \frac{1}{2X + \frac{3}{4}Y + \frac{1}{2}Z}$$

$$\epsilon = \epsilon_0 X^2 \rho T^4$$

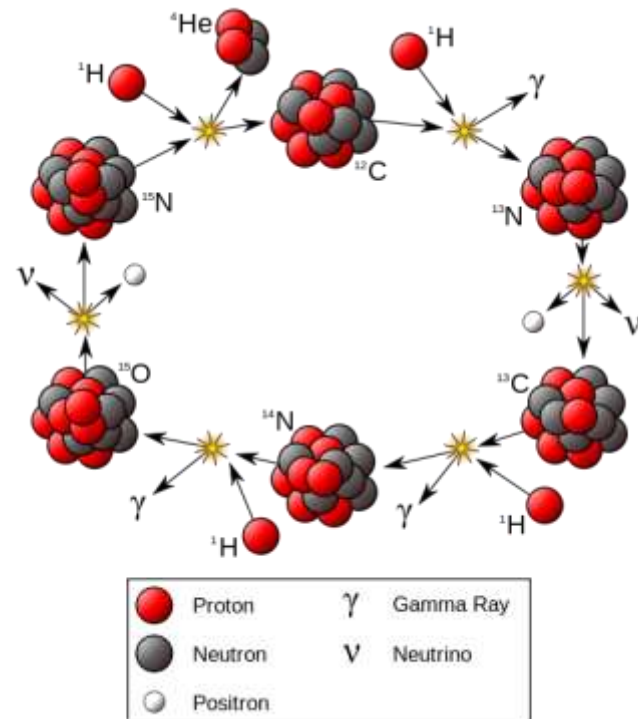
$$\kappa = \kappa_0 (X+1) Z \rho T^{-3.5}$$

Výroba energie



□ $T_{\min} \sim 1 \text{ MK}$

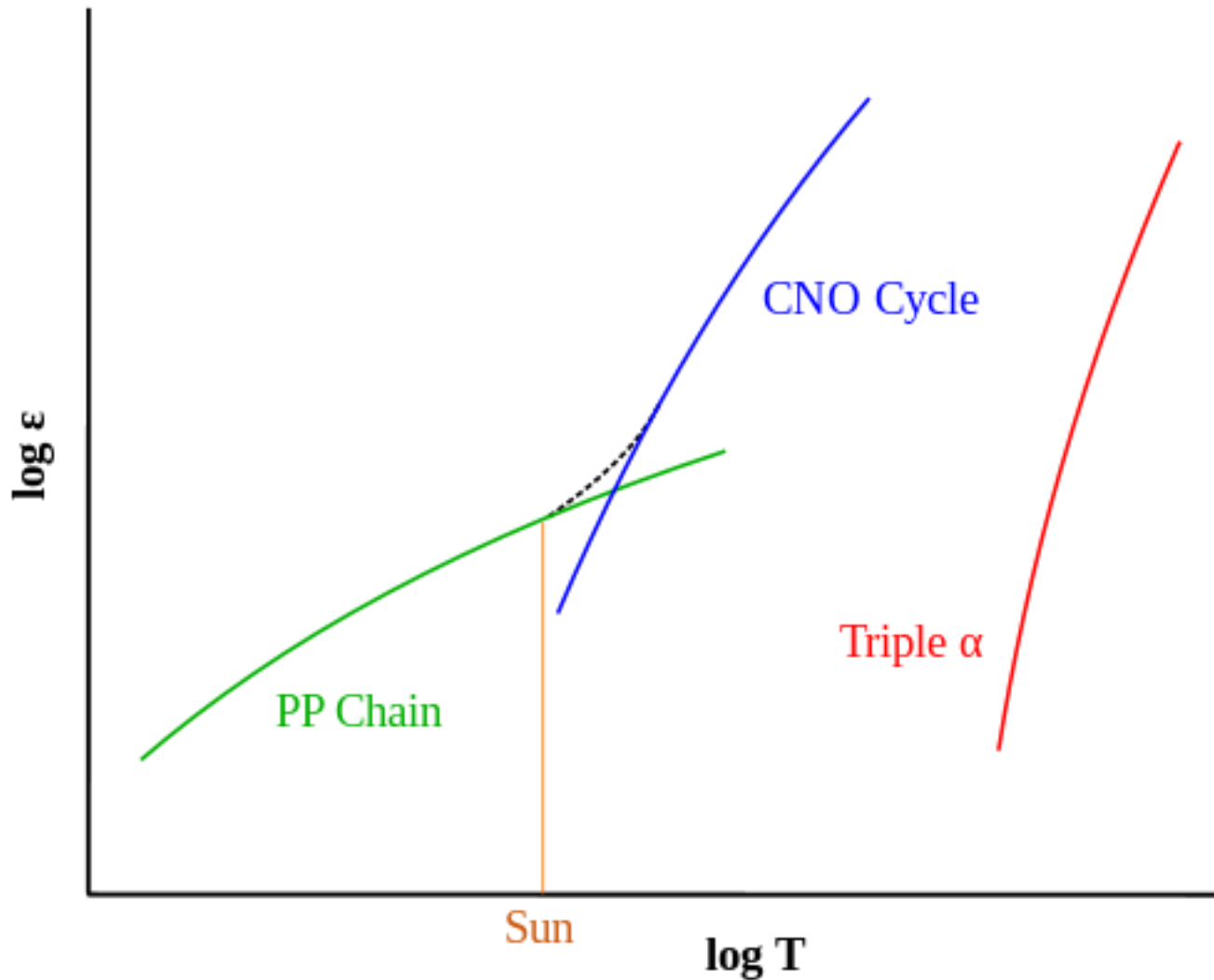
□ $\varepsilon \sim T^4$



□ $T_{\min} \sim 10 \text{ MK}$

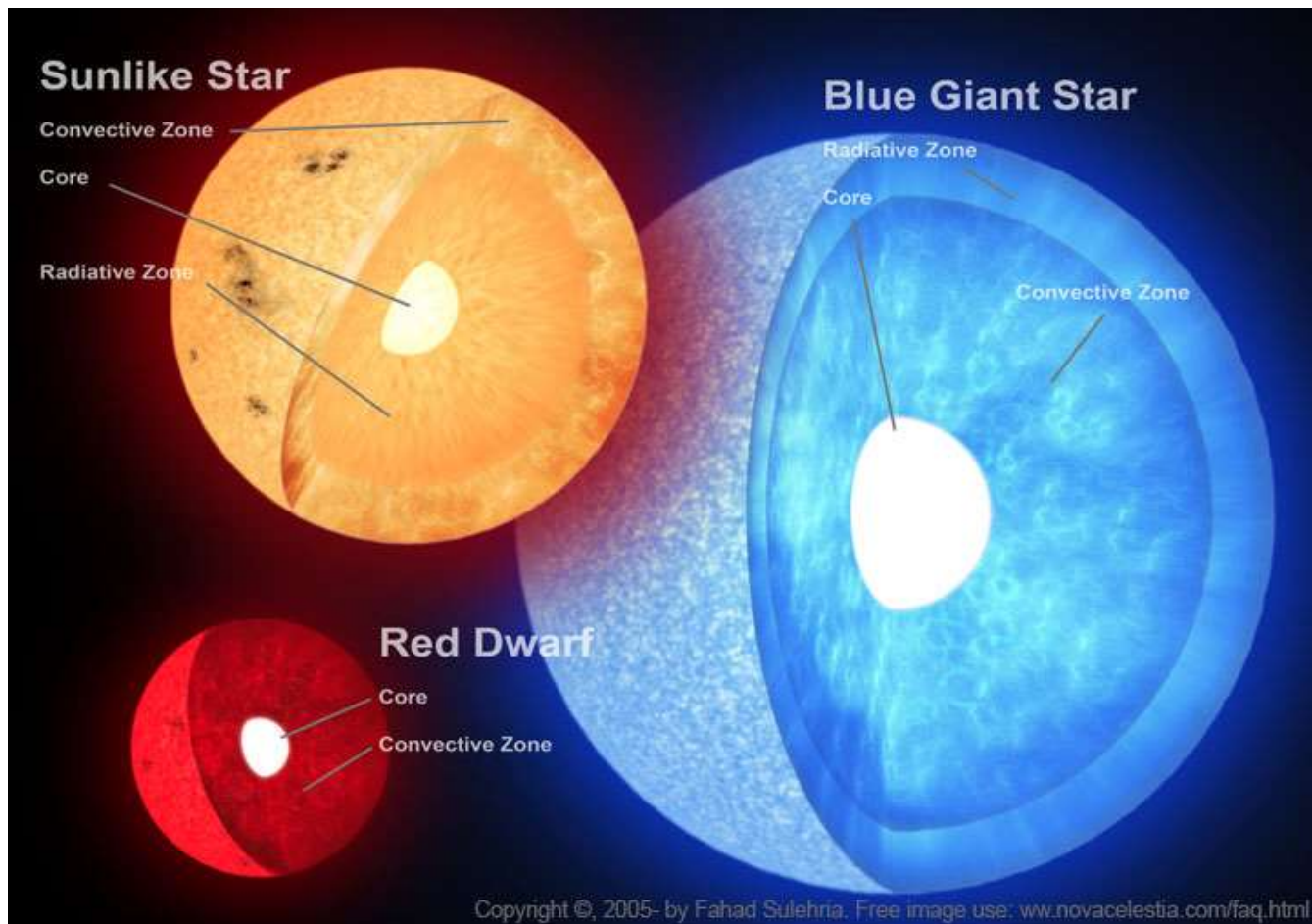
□ $\varepsilon \sim T^{15-18}$

Který cyklus převažuje?



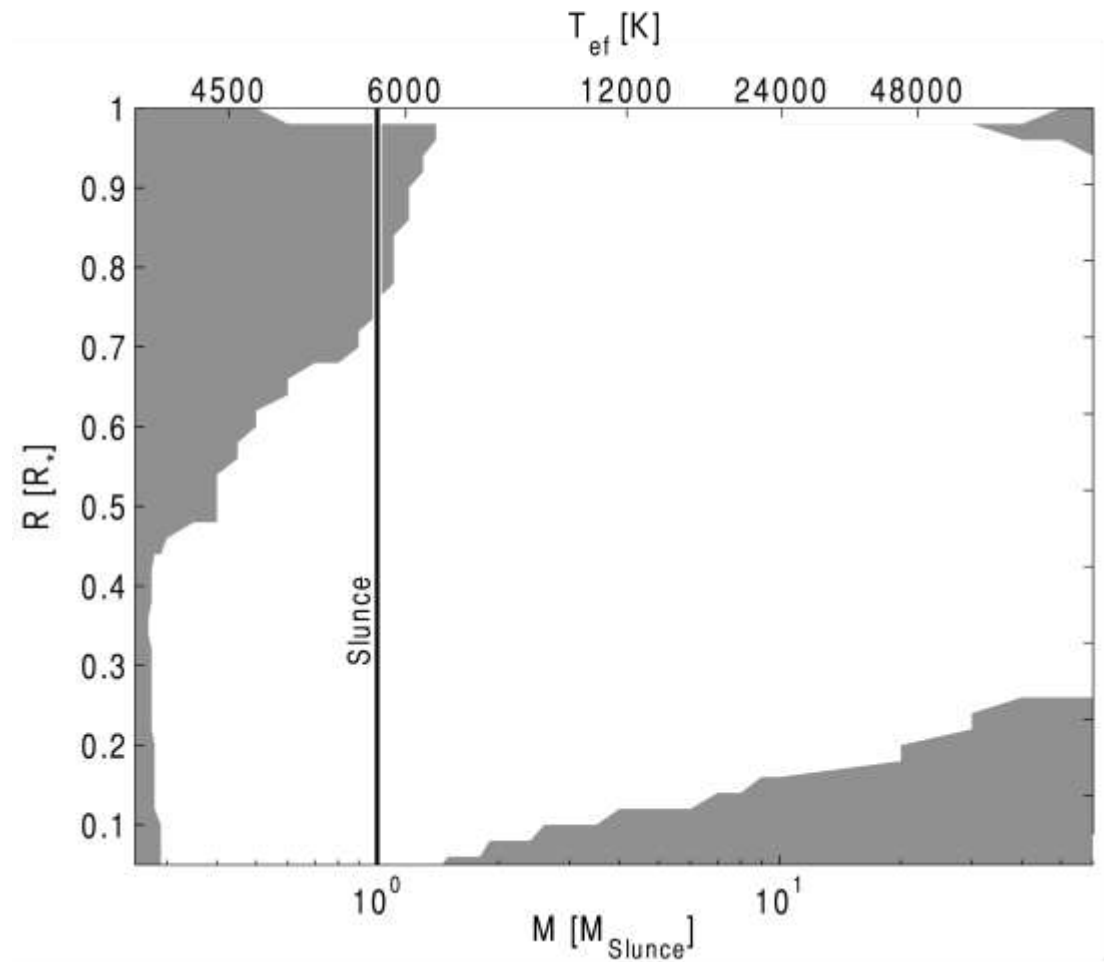
Vnitřní struktura jiných hvězd

- ▣ Velmi silná funkce počáteční hmotnosti (hmotnější hvězdy mají strmější průběh stavových veličin)



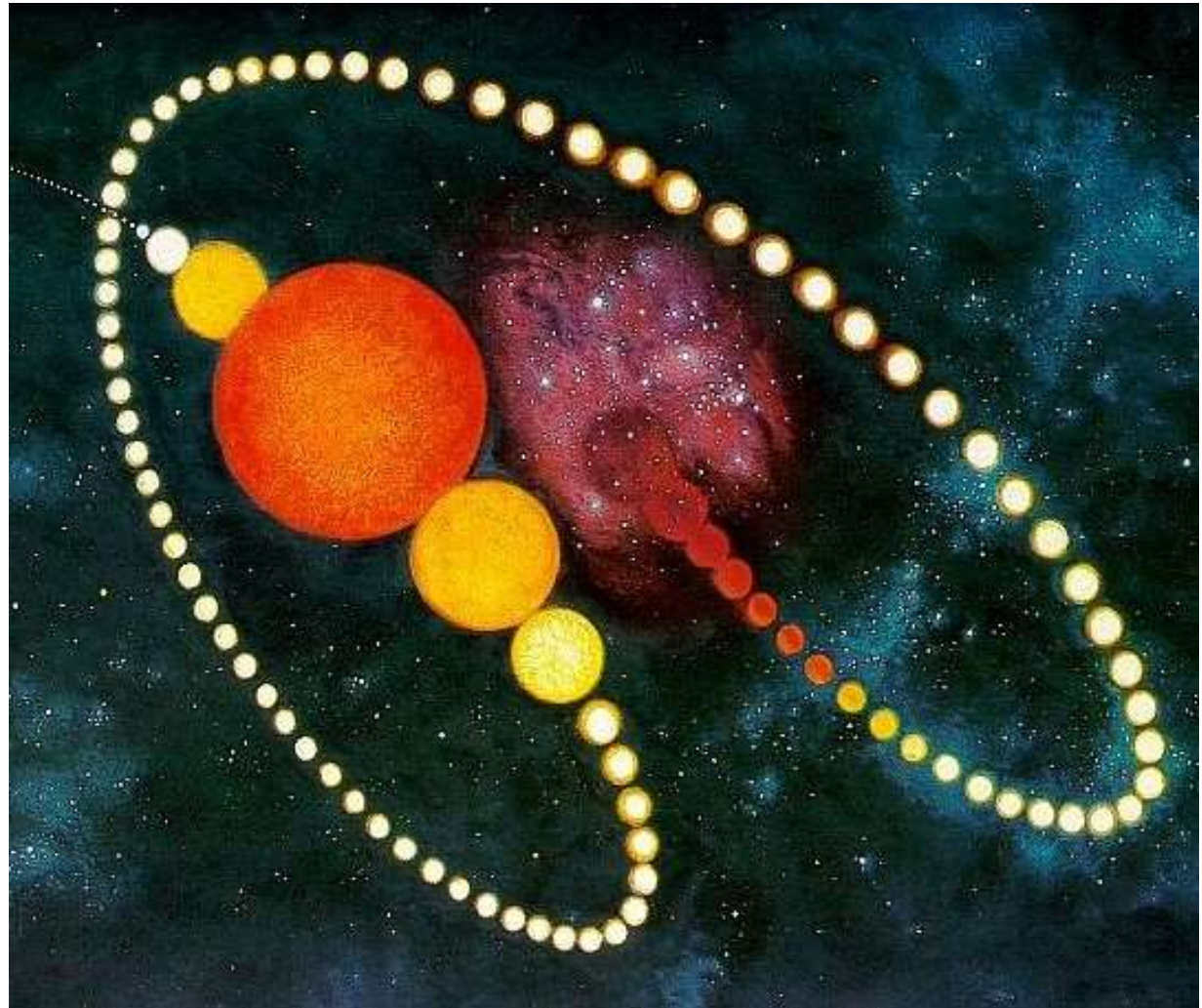
Konvektivní zóny

- Hvězda v úplné zářivé rovnováze neexistuje, vždy najdeme někde konvektivní zónu
- Konvekce se ustanoví pokud někde prudký teplotní gradient, ionizační zóna nebo je vysoká opacita



Nejlepší sluneční model

- Sled statických modelů, mezi nimiž se (skokem) změnil chemické složení
- Časový skok: miliony let



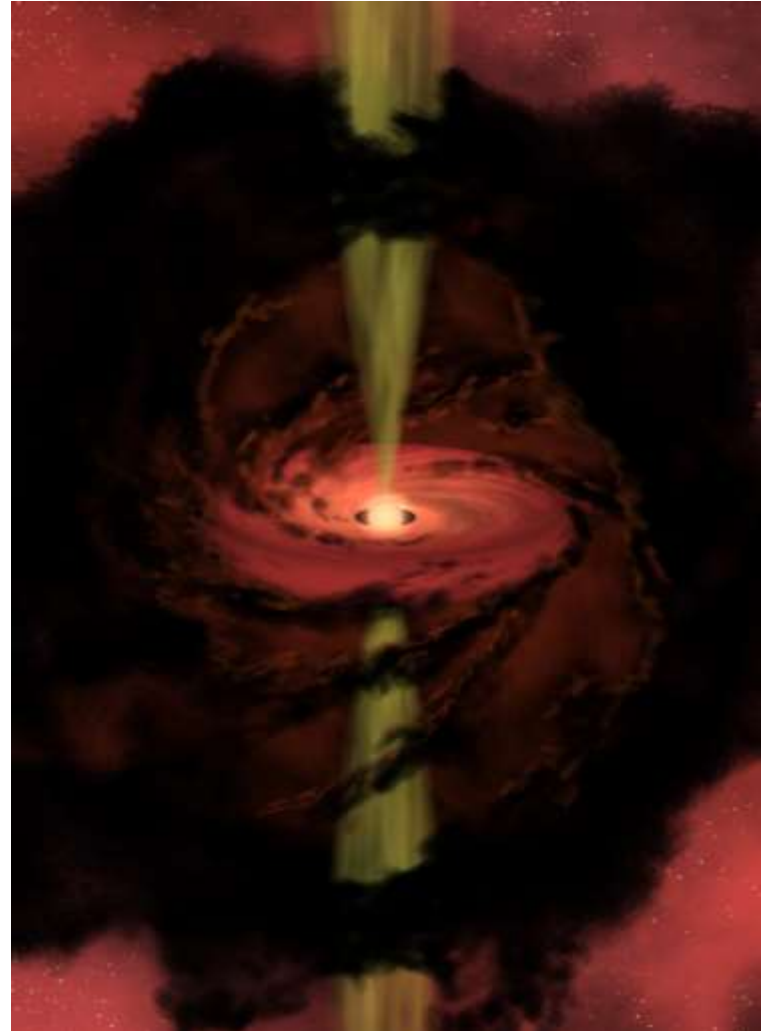
Slunce se rodí

- Hvězdy vznikají gravitačním kolapsem (samovolným nebo indukovaným) obřího molekulového oblaku
 - $M \sim 6 \times 10^5$ Sluncí
 - $R \sim 100$ ly
 - $\rho \sim 100 \text{ cm}^{-3}$
- Kolaps hierarchický, *globule* hmotnosti hvězdné
- Rychlá ($\sim 10\,000$ let) počáteční fáze, pak ustavení rovnováhy, další kolaps řídí prach (60-100 K), centrální teplota roste
- Hustota 10^{-10} kg/m^3 , stomiliardkrát původní



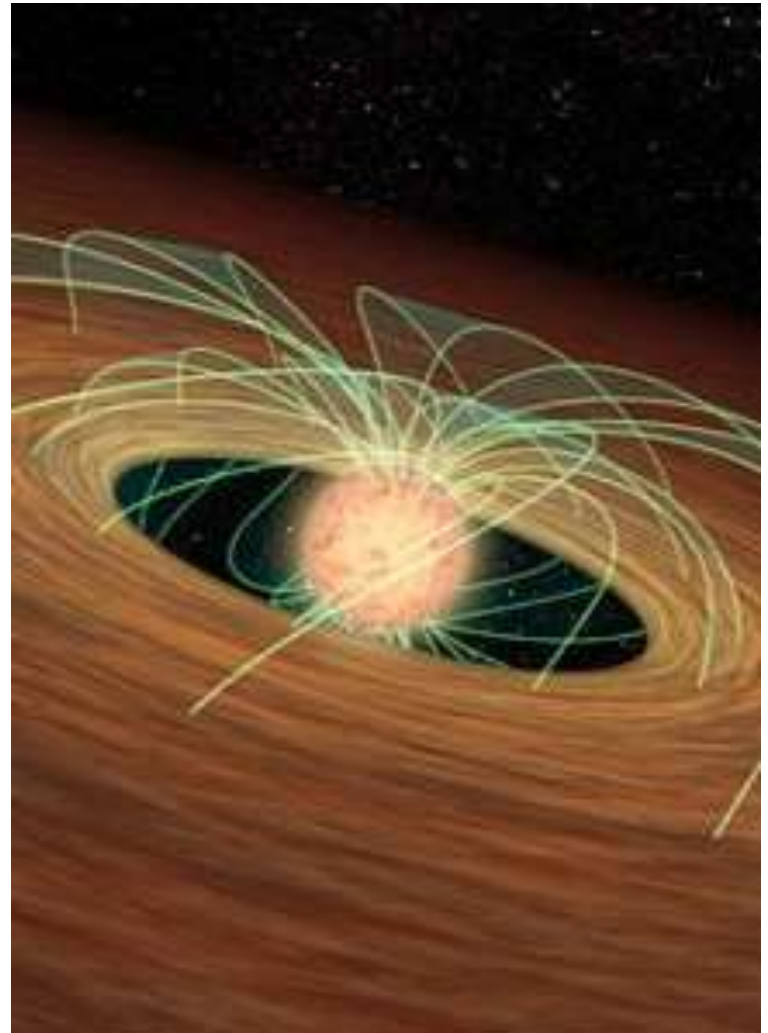
Protohvězda

- Překročení hranice 2000 K, rozpad molekul vodíku a záhy jeho ionizace – spotřebuje se energie, následuje rychlý kolaps
- Centrální hustota nyní 10^{-5} kg/m^3
- Dočasná hydrostatická rovnováha
- Akrece z disku
- Centrální teplota nad 1 MK, krátká (jen pár milionů let) reakce deuteria



Sluneční puberta

- Hvězda typu *T Tauri*
 - Chladné (2000-4000 K) obří hvězdy ohříváné gravitační kontrakcí
 - Plně konvektivní
 - Rychle rotují
 - Mají silná magnetická pole
 - Obří skvrny
 - Supererupce
 - Silný hvězdný vítr
 - Naprosto nepravidelné proměnné
 - Magnetická proměnnost
 - Zákryty zhustky v disku



Dospělost Slunce: *právě teď*

- ▣ Před 4,5 mld let, bude ještě 6,4 mld let ještě bude
- ▣ Zářivý výkon roste z 70 % na ZAMS na 221 % na TAMS
- ▣ Za 3 mld let T maxima (5843 K, tedy +64 K)
- ▣ Za 4,8 mld let dojde vodík v jádře (dnes spálena asi polovina)
- ▣ Za 6,4 mld let jádro gravitačně kolabuje, vodík hoří v tlusté slupce v okolí, Slunce opouští MS



Předdůchod s obezitou

- 700 mil let přechod k rudým obrům, na počátku $2,3 R_0$, 4900 K
- Dále expanduje, jak roste produkce energie v jádře. Konvektivní zóna klesá k jádře, od jádra postupuje slupka jaderného hoření – potkají se za 7,6 mld let
- To zrychlí expanzi až na $166 R_0$ při svítivosti $2300 L_0$ za 7,68 mld let
- U rudých obrů celkově 600 mil let
- Centrální teplota 10^8 K, heliový záblesk



Důchodové křeče

- Héliový záblesk sníží svítivost, Slunce dočasně splaskne
- Vnitřní struktura slupková, opětovná expanze
- 100 milionů let stabilní, pak uhlíko-kyslíkové jádro, jaderné reakce ve dvou slupkách
- Termální pulsy (400 let +, 10 000 let -)
 - Rozepnutí až na $347 R_0$
- 400 000 let na asymptotické větvi obrů

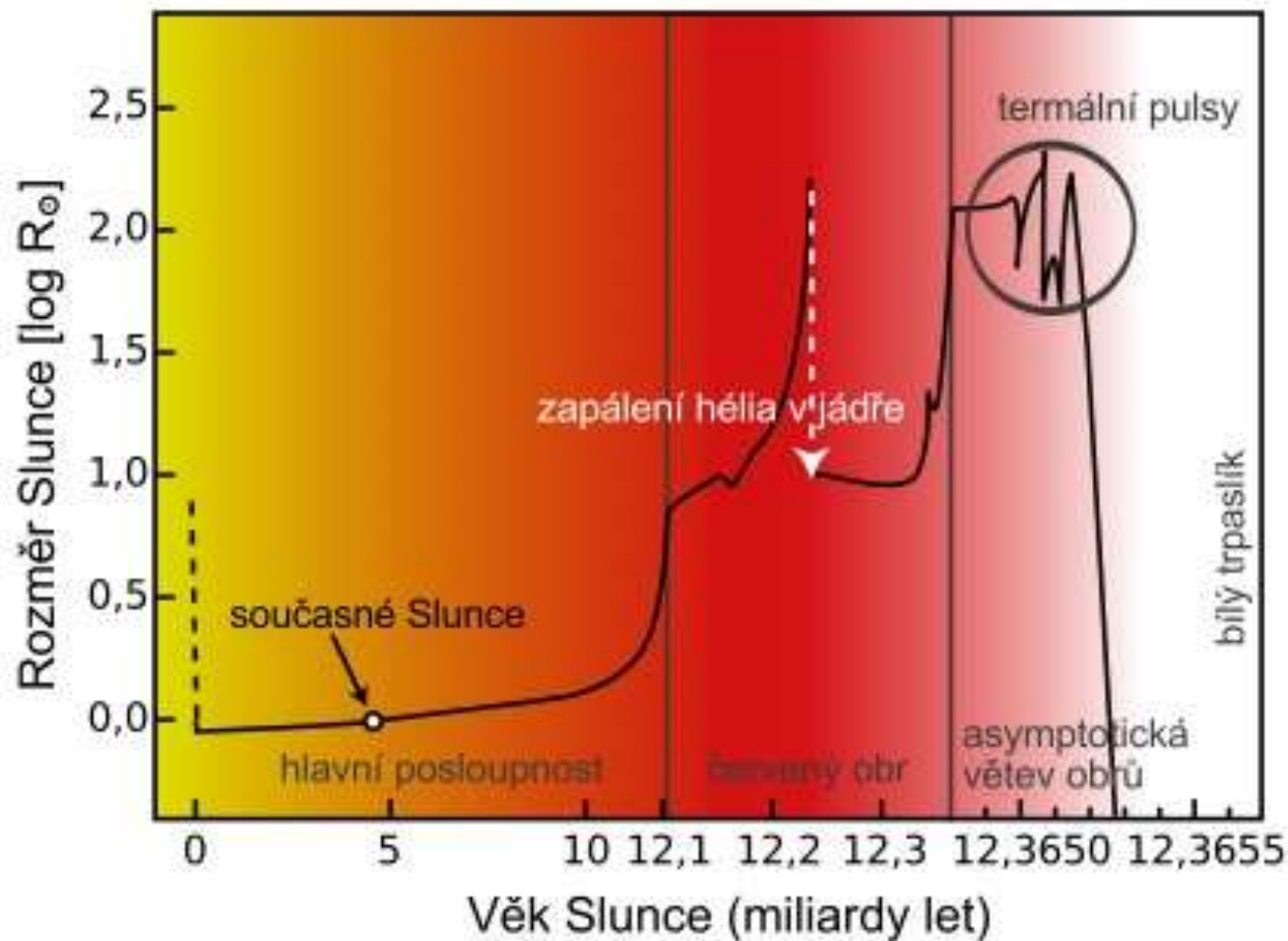


Rozžhavený důchodce

- Termálními pulsy odhozena obálka – planetární mlhovina
- Zůstane pouze jádro, 0,54 M_{\odot} , 120 000 K
 - *Bílý trpaslík*
- Malý zářivý výkon, chladne desítky až stovky miliard let
 - *Černý trpaslík*



Svítivost a rozměr v běhu času



Jak ověříme správnost modelů?

■ Sluneční dvojčata

Identifier	Coordinates ^[3]		Distance ^[3] (ly)	Stellar Class ^[3]	Temperature (K)	Metallicity (dex)	Age (Gyr)	Notes
	Right ascension	Declination						
Sun	—	—	0.00	G2V	5,778	+0.00	4.6	[59]
18 Scorpii ^[60]	16 ^h 15 ^m 37.3 ^s	−08° 22′ 06″	45.1	G2Va	5,835	+0.04	4.2	[61]
HD 44594 ^[62]	06 ^h 20 ^m 06.1 ^s	−48° 44′ 29″	84	G3V	5,840	+0.15	4.1	[63]
HD 195034 ^[64]	20 ^h 28 ^m 11.8 ^s	+22° 07′ 44″	92	G5	5,760	−0.04	2.9	[65]
HD 138573 ^[66]	15 ^h 32 ^m 43.7 ^s	+10° 58′ 06″	101	G5IV-V	5,710	−0.03	7.8	[67]
HD 142093 ^[68]	15 ^h 52 ^m 00.6 ^s	+15° 14′ 09″	103	G2V	5,841	−0.15	1.3	[67]
HD 98618 ^[69]	11 ^h 21 ^m 29.1 ^s	+58° 29′ 04″	126	G5V	5,851	+0.03	4.2	[61]
HD 143436 ^[70]	16 ^h 00 ^m 18.8 ^s	+00° 08′ 13″	141	G0	5,768	+0.00	3.8	[67]
HD 129357 ^[71]	14 ^h 41 ^m 22.4 ^s	+29° 03′ 32″	154	G2V	5,749	−0.02	8.2	[67]
HD 133600 ^[72]	15 ^h 05 ^m 13.2 ^s	+06° 17′ 24″	171	G0	5,808	+0.02	6.3	[61]
HD 101364 ^[73]	11 ^h 40 ^m 28.5 ^s	+69° 00′ 31″	208	G5V	5,795	+0.02	3.5	[61][74]
HD 197027 ^[75]	20 ^h 41 ^m 54.6 ^s	−27° 12′ 57.4″	250	G3V	5,723	−0.013	8.2	[76]

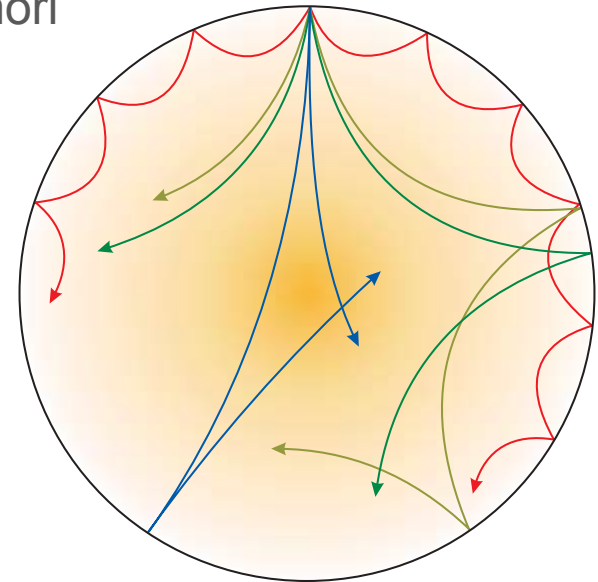
■ Hvězdy v jiných vývojových stádiích

■ Seismologie

Sluncetřesení

- Vznik vln: odezva na hydrodynamické poruchy v prostředí
 - Chaotická konvekce poskytuje takových poruch nespočetně
- Podle řídící síly typ vln
- Rezonance
 - Hlubková lokalizace
 - Pouze určité vlny se dlouhodobě uchovají
 - *Uvězněné vlny*

- g : gravitační – v konvektivně stabilním prostředí
- p : zvukové – v konvektivně nestabilním prostředí
- f : povrchové gravitační vlny – fyzikálně podobné vlnám na moři

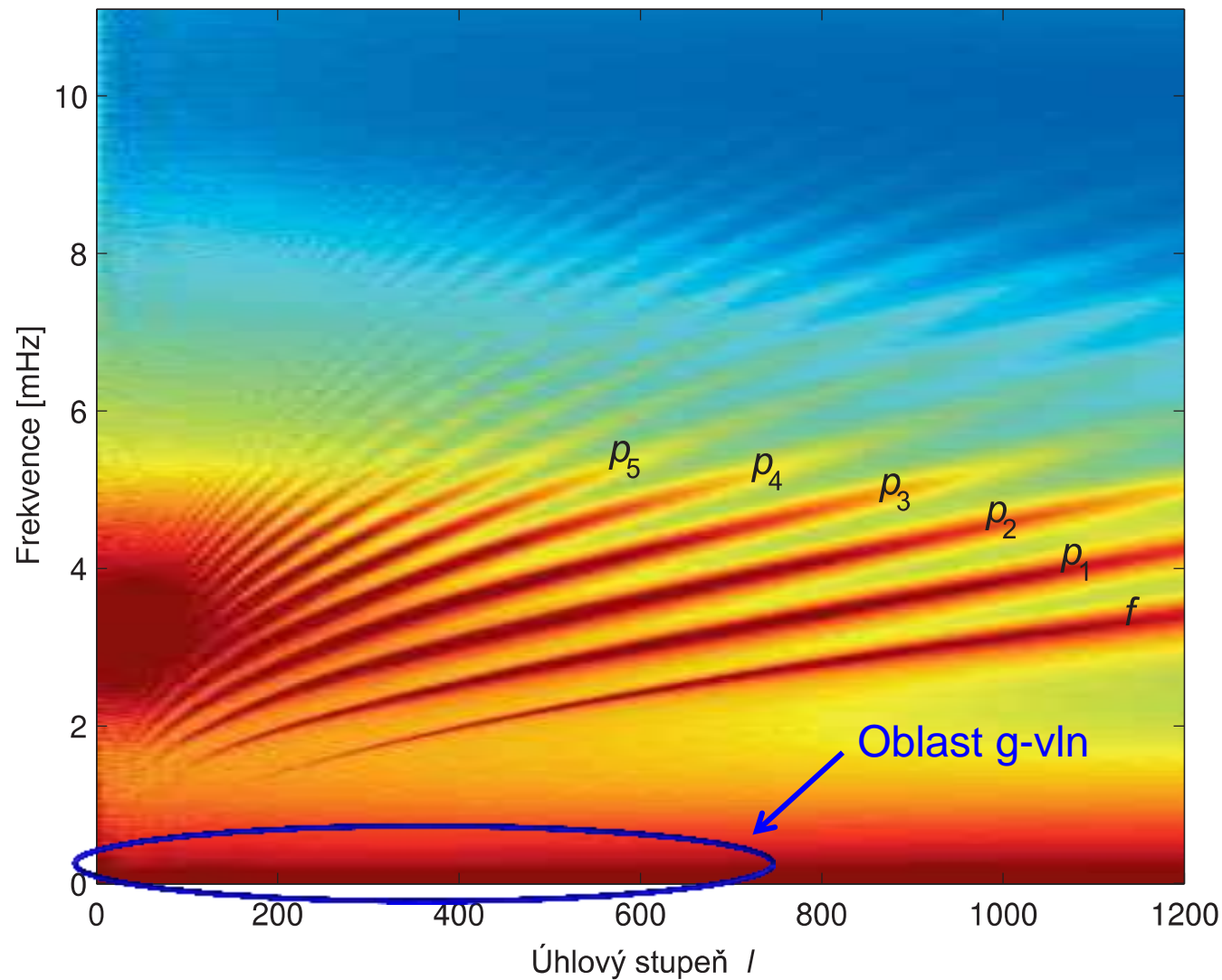


Praktická seismologie

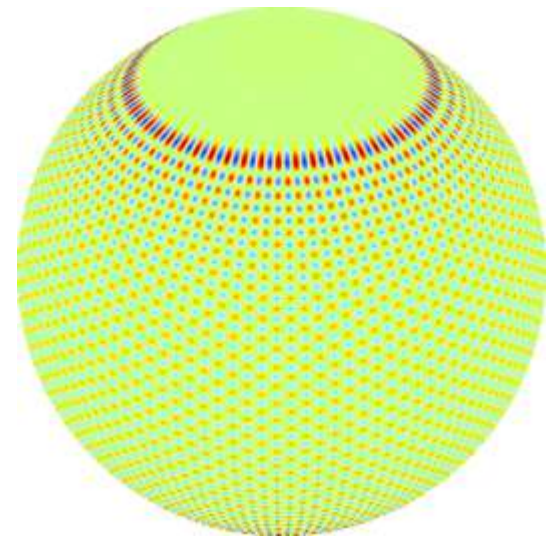
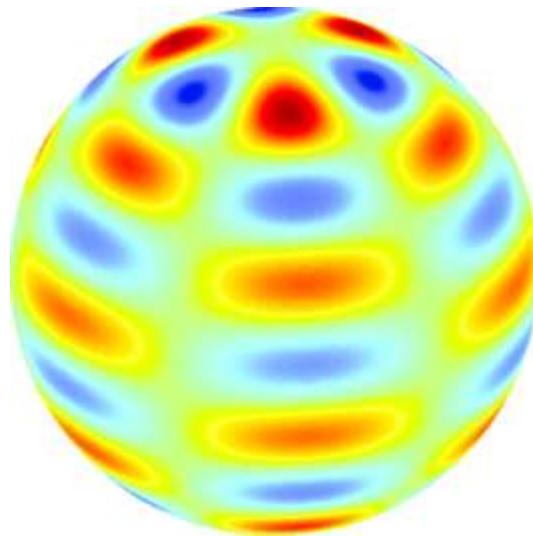
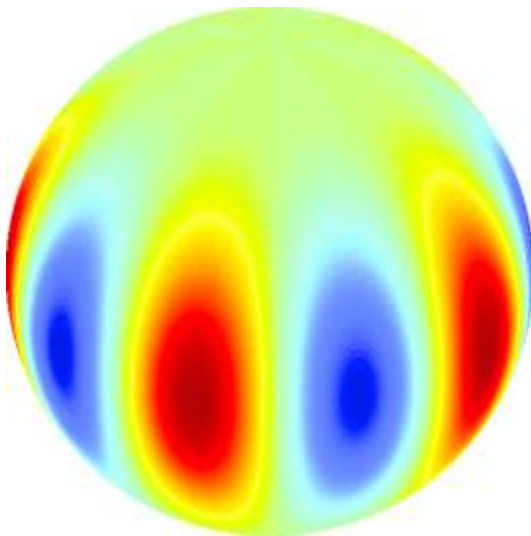
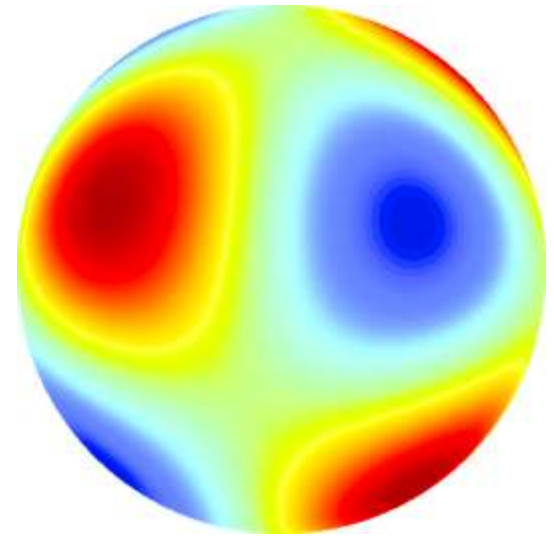
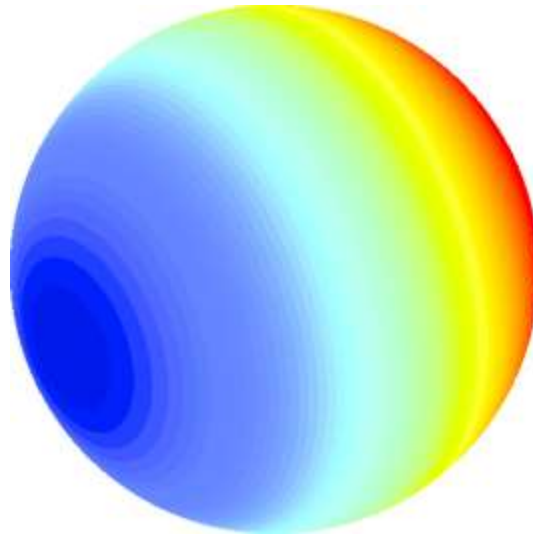
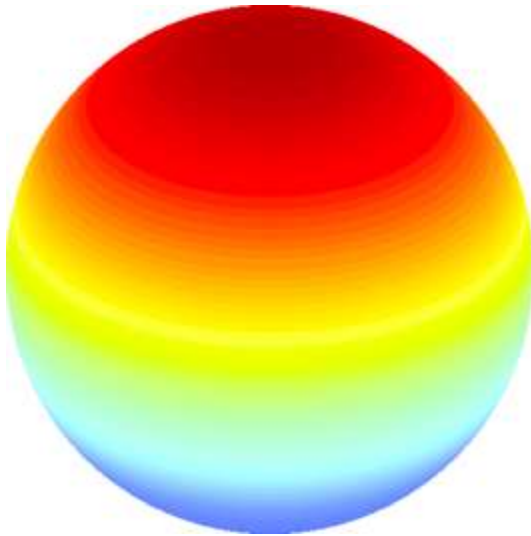
- Vozmistr:
 - Porucha v obruči nebo kole se projeví rozptylem zvukových vln šířících se kolem – vozmistr pozná sluchem, že “něco je jinak”
 - Detailním oťukáváním ze všech stran bychom mohli poznat, kde je problém a o jaký problém jde
 - Brzda též mění rezonanční podmínky, pozná se sluchem



k - ω (I-v) diagram

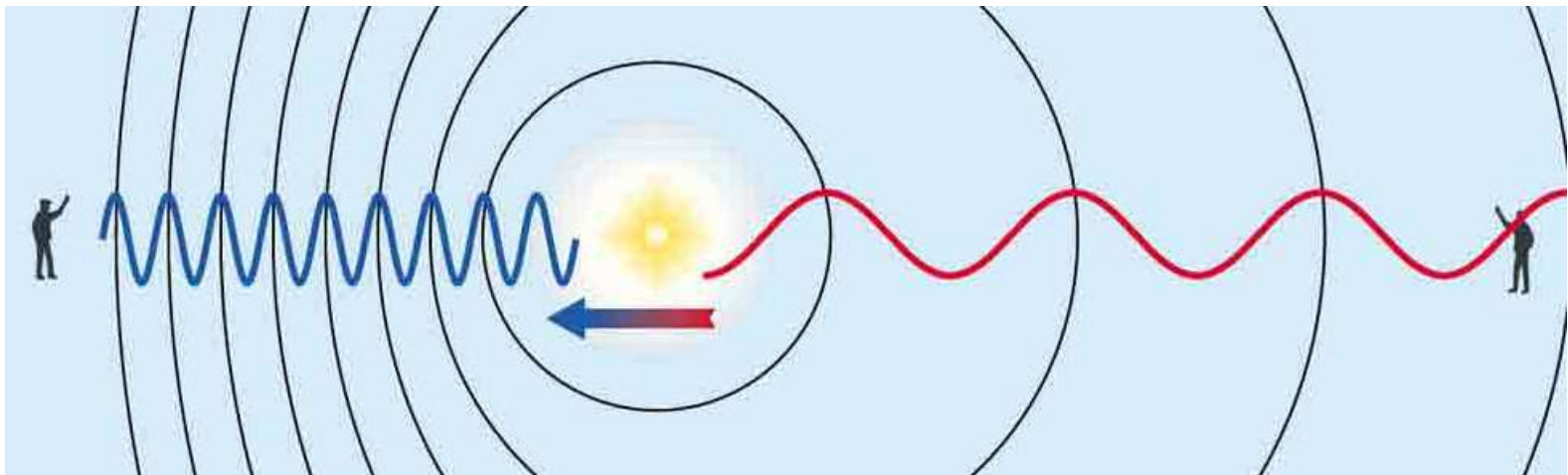


Prostorové vlny



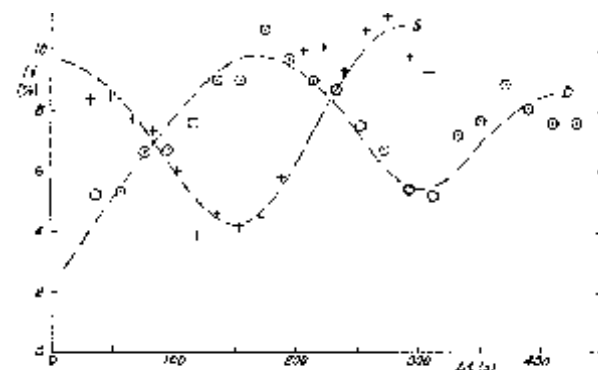
Jak se měří oscilace?

- Cestující vlna dočasně mění lokální rovnováhu
 - Způsobuje jasové změny
 - Přidatná rychlost
 - Dopplergramy
 - Lokální změny hustoty



Vznik helioseismologie

- Leighton 1960 – pozoroval supergranulaci, všiml si pětiminutové periodicity ve vertikální rychlosti (publikace 1962, 522 citací)
- Deubner 1974 – pozorování na Capri – první k- ω diagram
 - 1970 teoreticky předpověděl Ulrich (215 citací)
- Měření z jednoho místa – problém pro periodovou analýzu
 - 160-minutové oscilace – *odstrašující lekce z periodové analýzy*
 - Od 1979 – dlouhodobá pozorování na jižním pólu
 - Od 1976 BISON – stafeta stanic kolem světa (pouze jedno měření, žádné obrázky)



the peak heights of A C curves (evaluated for long, narrow str. also differences plots of Fig. 14 (column 2) and the Dandelion

contributions published coincide very closely & of the statistical significance of the wa same observations has been published rec

Exactly at this position a protrusion or is observed, preferentially at the disk c gravity waves excited by single granules. finding (Clark and Clark, 1973) that gr the photosphere. However, this domain way linked to the 5-min oscillations.

5-MIN OSCILLATIONS

The Figures 3 to 6 demonstrate that th consideration of the statistical stability

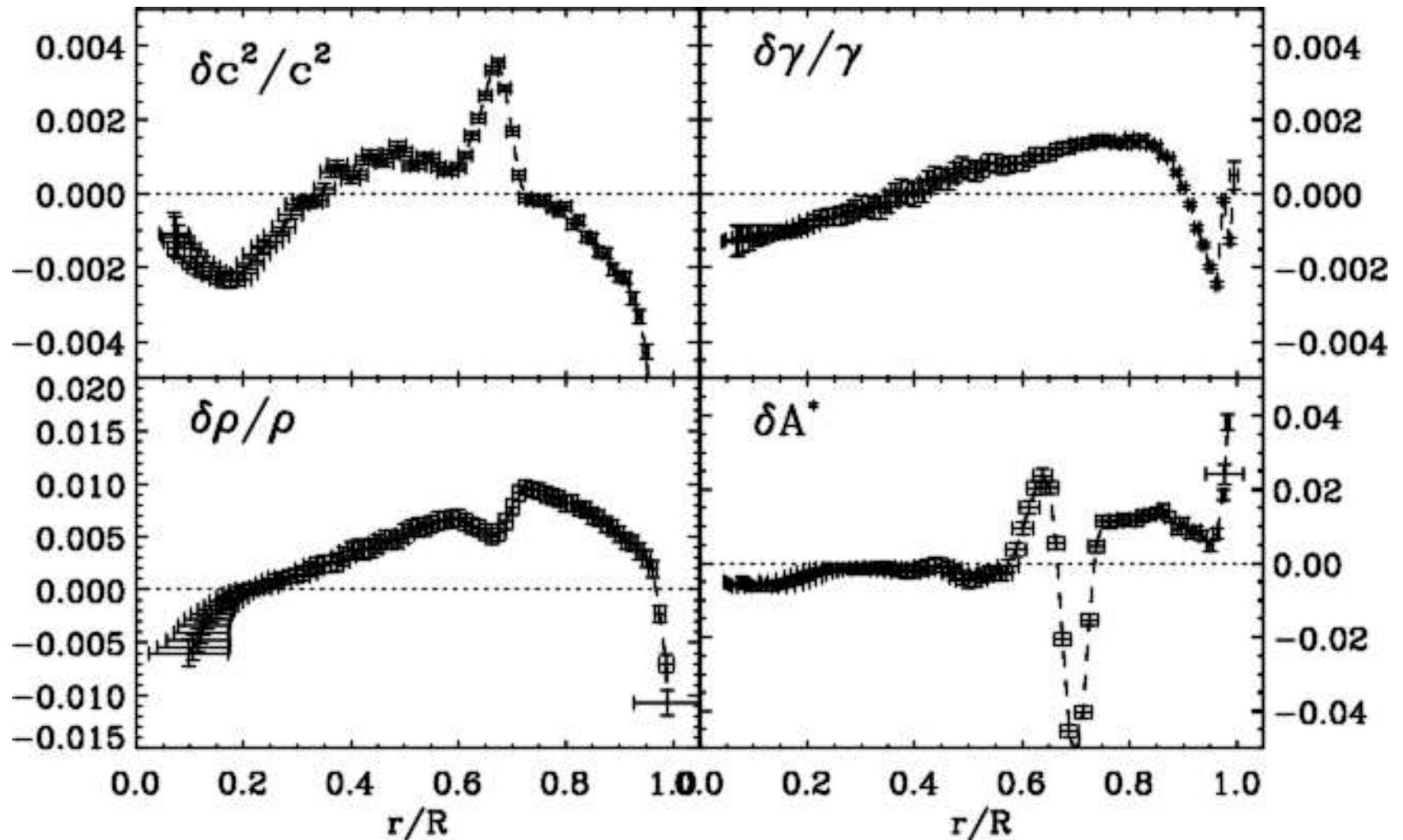
První inverze

- Struktura slunečního nitra
- Duvallův zákon – po přidání kontanty (vlastnost přípovrchových vrstev) si na sebe hřbety p modů v k - ω diagramu “sednou”
 - Existuje disperzní relace
 - Lze (analyticky) invertovat a za předpokladu monotónní funkce získat profil rychlosti zvuku
- Článek v *Nature* (138 citací)

pancy that was larger than the estimated errors in root of the discrepancy was traced to an error in the high-degree data, which caused spatial frequencies to be overestimated by 1%. Accordingly we increased the values of l in the original high-degree data set by an increase of 1.4% would have minimized the discrepancy. In total, 2,820 modes were used, with lower frequencies r_i in the range 0.06–0.994 R_\odot . Note that the quality of the estimates and the degree of smoothing changes at $l = 105$ –200.

The relation defined by equation (1) was fitted to the coefficients which are shown in Fig. 1. It was determined by cl

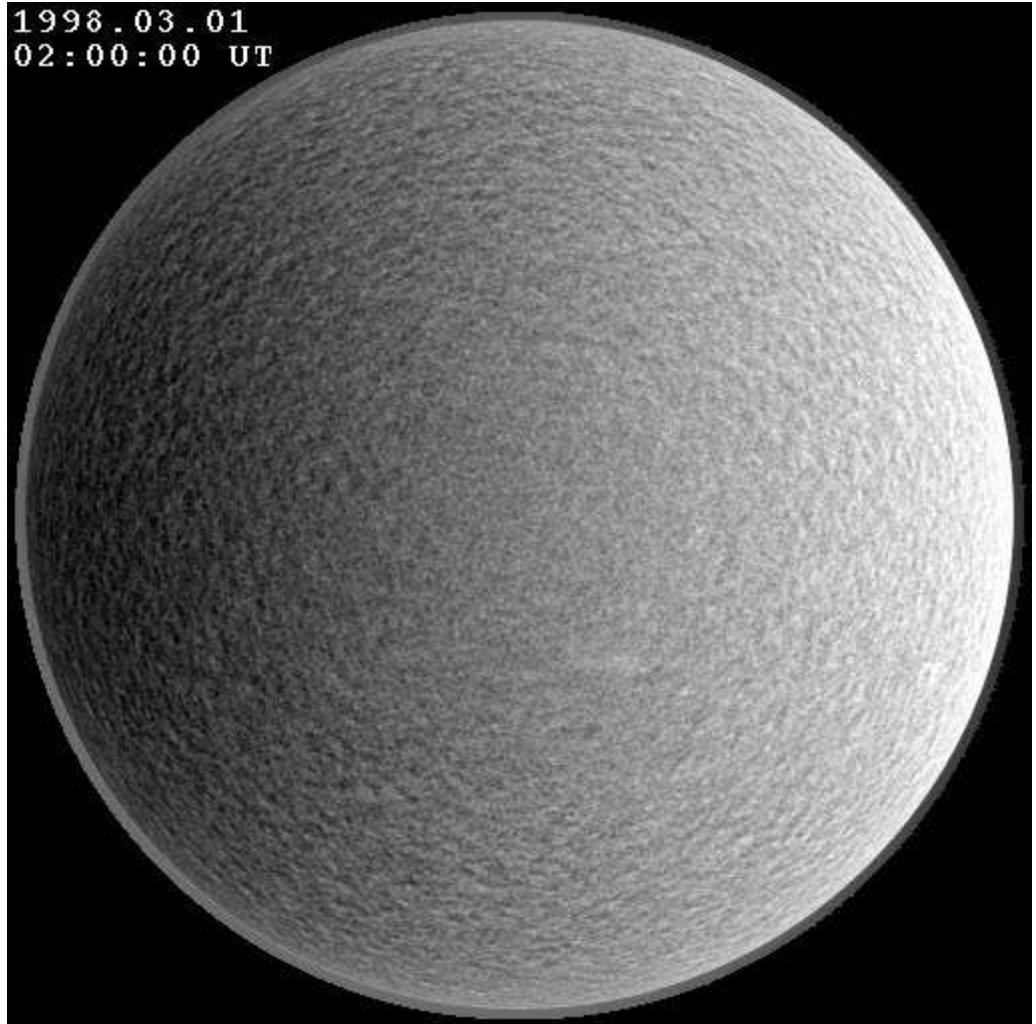
Strukturální inverze



Rozvoj pozorovacích technik

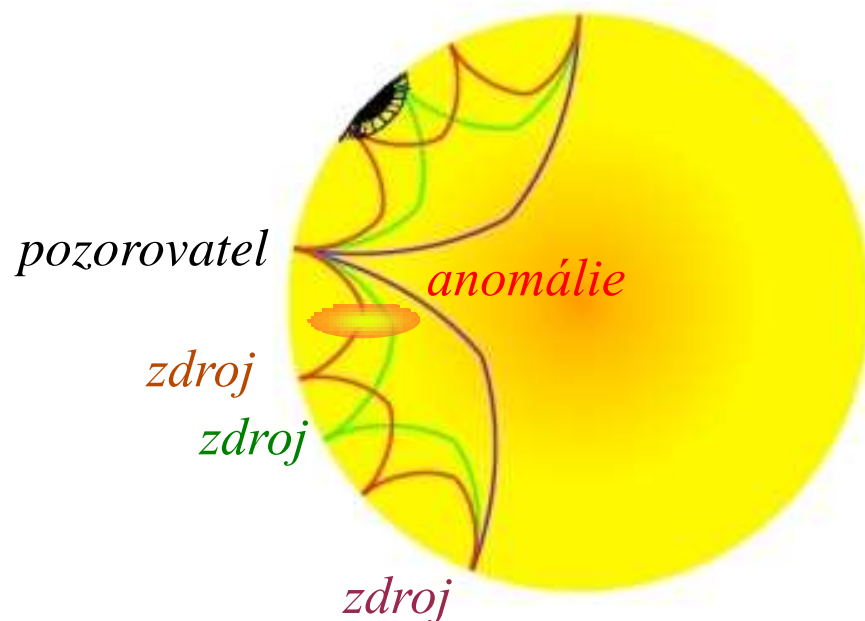
- Dopplergramy
- 1995: start SOHO a GONG
 - Nepřeberné množství velmi kvalitních pozorovacích dat
 - Překotný rozvoj metod a mraky výsledků
 - Rozvoj lokální seismologie
- MDI (1459 citací)

1998.03.01
02:00:00 UT



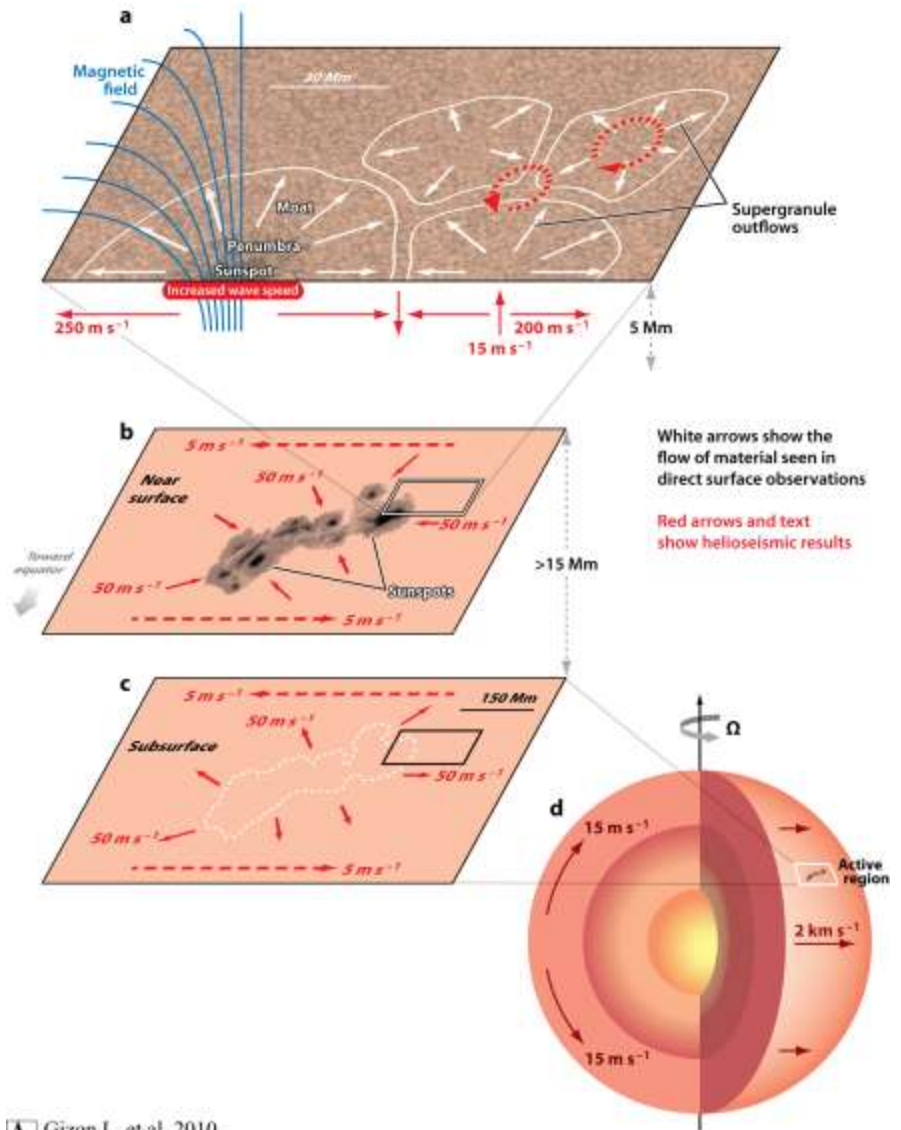
Analýza cestujících vln

- Lokální helioseismologie
- Seismické vlny
(v přípovrchových vrstvách
zvukové) se šíří nitrem
a interagují s překážkami
a anomáliemi
 - Ty ovlivňují rychlost jejich
šíření
- Lze měřit čas průchodu
vlny nitrem v závislosti na
vzdálenosti (hloubce
prostupu)
- Inverzí lze získat informace
o dění pod povrchem

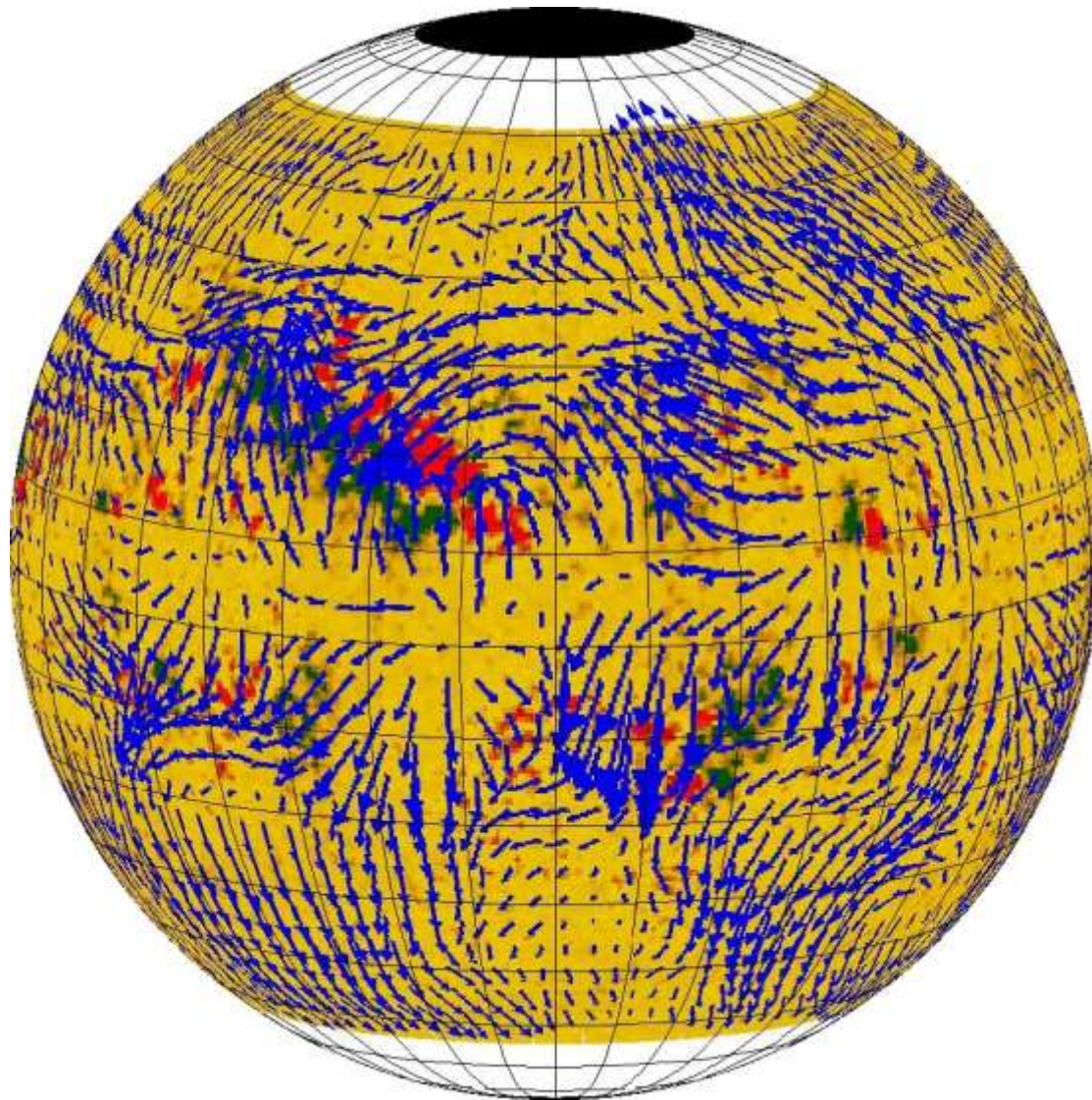


Dynamika plazmatu

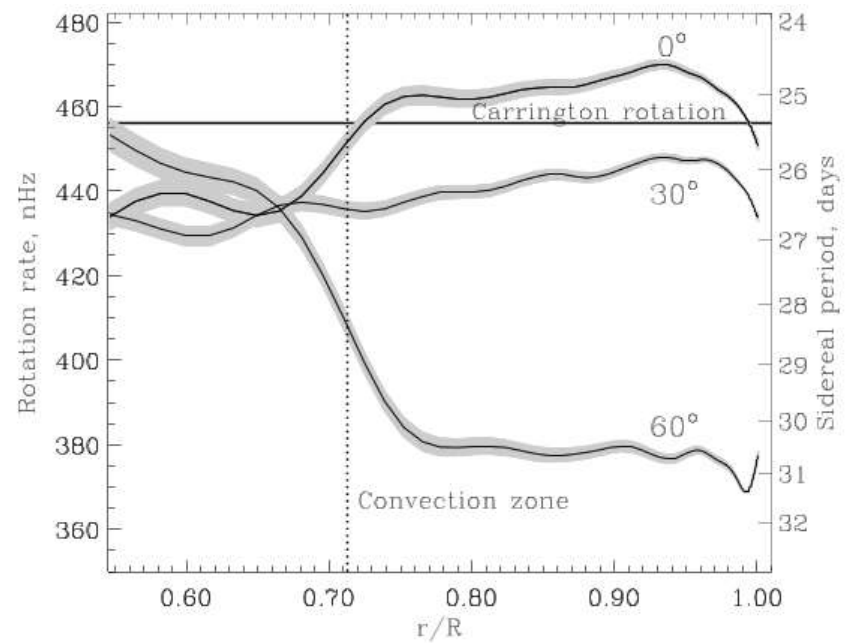
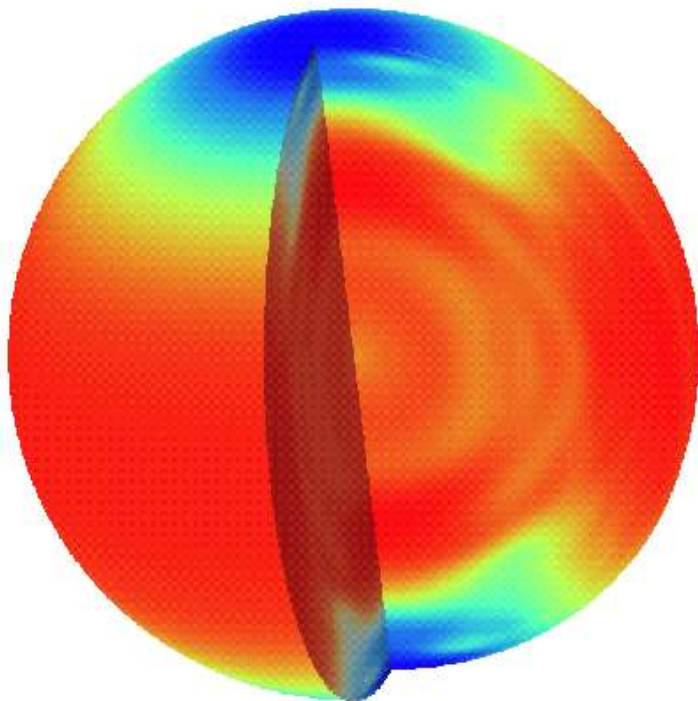
- (Pod)fotosférická dynamika plazmatu
- Mnohaškálová
- Bude o ní ještě řeč



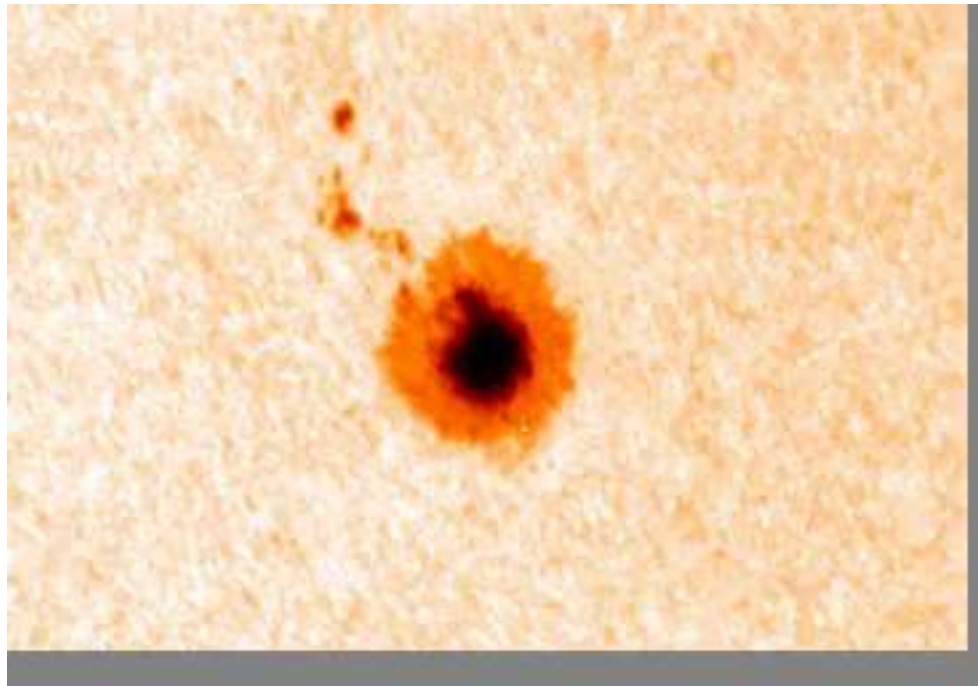
Velkorozměrové proudění



Sluneční rotace



Struktura slunečních skvrn,



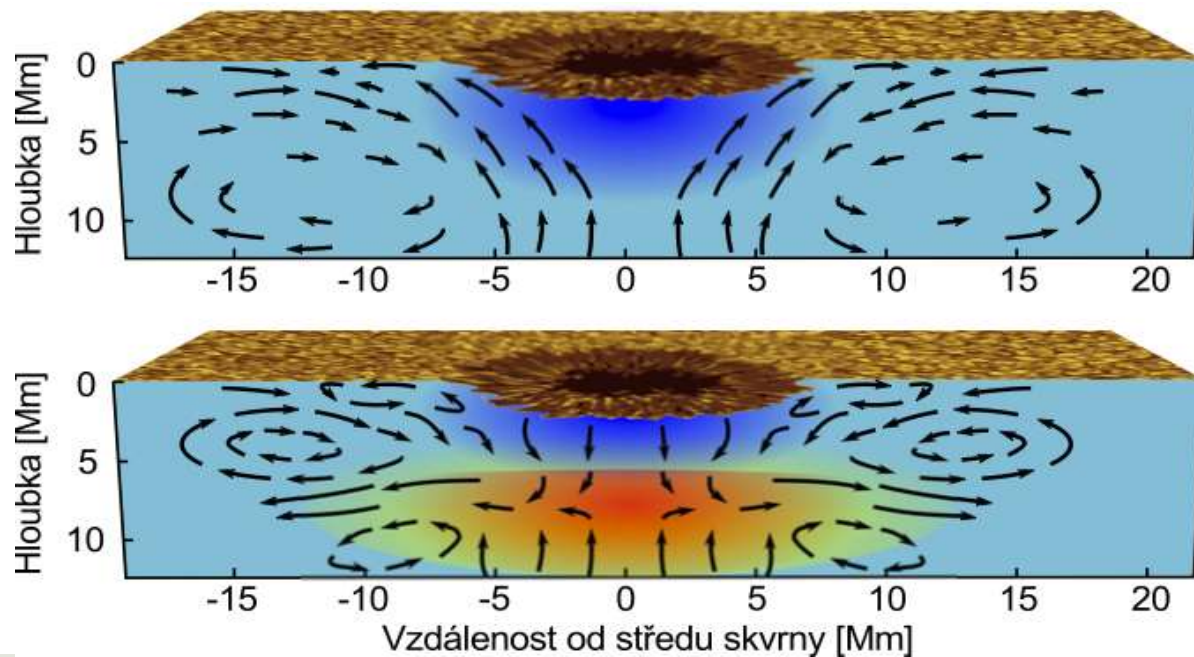
161 citací

(vsuvka o inverzních metodách)

- Inverzní problém lze zřídka řešit přesně (v helioseismologii nikdy)
- Předpoklady
 - Linearizace přináší jen malé chyby (poruchy jsou malé)
 - Problém je separabilní v prostoru poruch
 - Známe přímý problém
- Kompromisy
 - Realistický problém je obří (inverze matice s $(10^7)^2$ prvky)
 - Zjednodušení – např. předpoklad translační invariance, osekání problému redukcí proměnných atd.
 - Numerický problém (špatně podmíněná nebo singulární matice)
 - Řešení je regularizováno dodatečnou podmínkou (požaduje se hladkost nebo omezující podmínka na tvar lokalizační funkce nebo omezení přenosu šumu)
 - Regularizační podmínky jdou často proti sobě

aneb ignorance fyziky

- Často: fyzika je moc složitá nebo náročná, jak nějaký vliv prohlásíme za zanedbatelný a ignorujeme
 - Ve skvrnách inverzní metody ignorují 90 % fyziky!
 - Předpoklad lineárních vln narušen!
 - Předpoklad translační invariance narušen!
 - (Dostatečně dobře) neznáme přímý problém

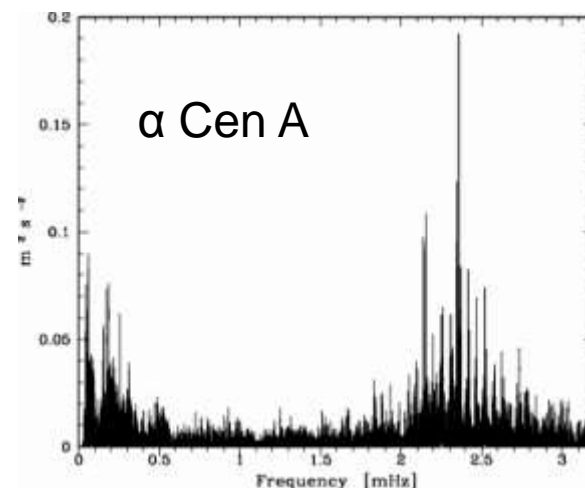


Velké zúčtování

- Posledních 15 let: velké zúčtování s boomem v druhé polovině 90. let 20. století
- Mnoho výsledků tehdejší doby je považováno za přinejmenším kontroverzní (mnohé z nich byly publikovány v Nature a Science!)
- Opětovný příklon k dopřednému modelování
 - Lépe se implementuje fyzika a studují se dopady na měřené veličiny
 - Počítače jsou dost rychlé, aby byly simulace dostatečně realistické

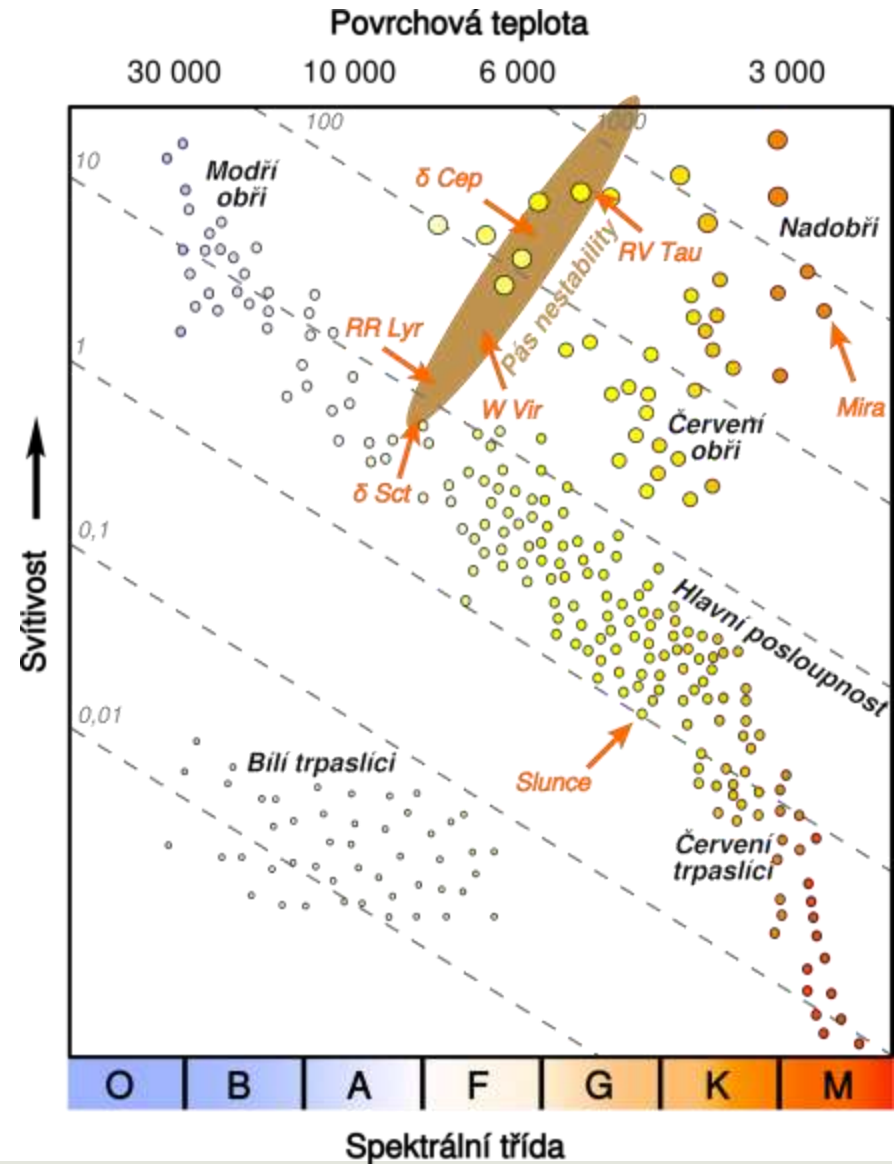
Budoucnost helioseismologie?

- I přes všechny problémy se stále jedná o nejpřesnější měření v astronomii
- Měření lze snadno přehnaně interpretovat a dospět k vnitřně konzistentnímu bludu
- Oscilace ve vyšších vrstvách atmosféry – zajímavý diagnostický nástroj, v současnosti v rozvoji
- Neomezujme se na Slunce: asteroseismologie
 - Dnes: stanovení fundamentálních parametrů osamělých hvězd (hmotnost, poloměr, střední hustota, stáří), stanovení vnitřní rotace, stanovení polohy rotační osy v prostoru (konec problému “ $\sin i$ ”)



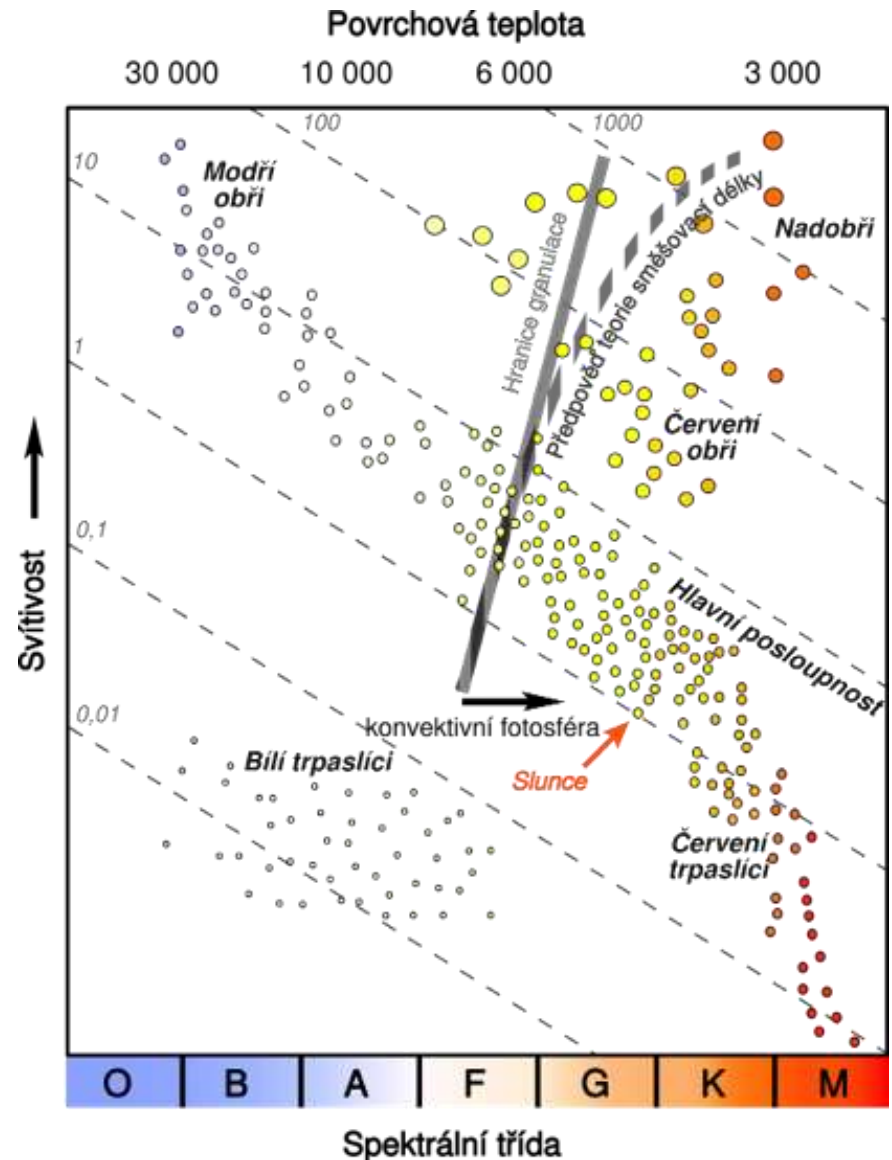
Pulsující hvězdy

- Známe mnoho typů hvězd, za jejichž proměnnost mohou pulsace
 - Kappa mechanismus: chemická záklopka měnící termodynamické poměry
 - cefeidy, δ -Scuti hvězdy, miridy,...
 - Pruh nestability na H-R diagramu
 - Převážně radiální pulsace
 - Hvězda se nafukuje a vyfukuje



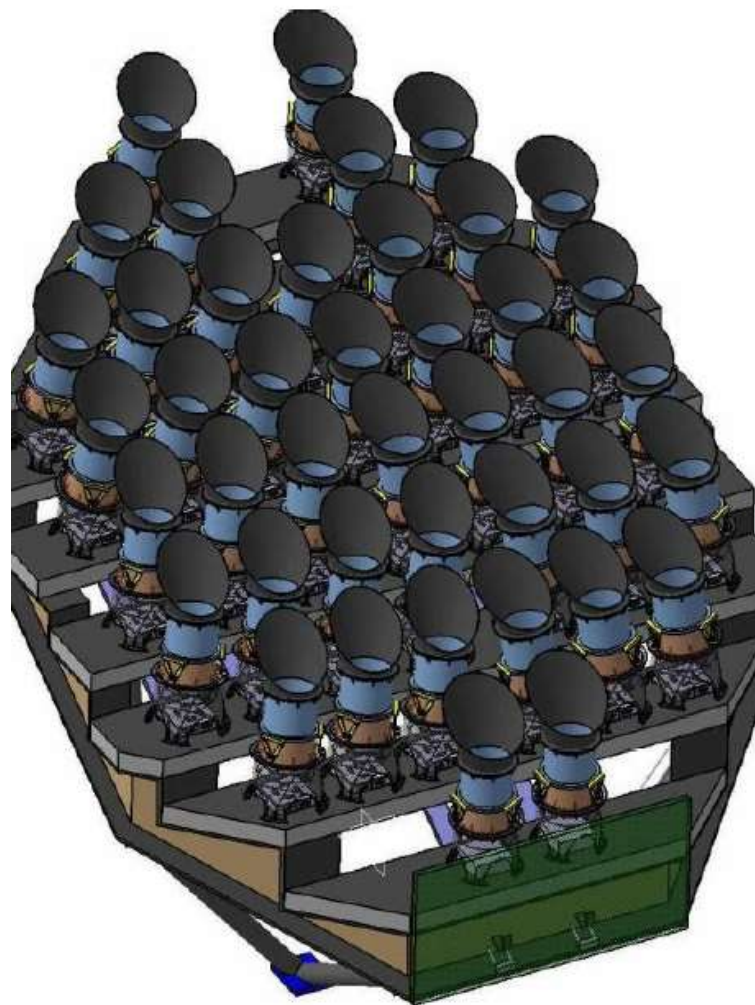
Asteroseismologie

- Slunce však pulsuje z jiného důvodu – konvekce excituje tlakové mody
- Přípovrchová konvekce se vyskytuje v “chladnější polovině” H-R diagramu
- Tyto hvězdy tedy pulsují podobně jako Slunce
 - Množství různých modů skenujících nitro hvězdy
 - Vhodné cíle pro asteroseismologii
 - Nemáme však prostorové rozlišení
 - Rychlá fotometrie



Asteroseismické dalekohledy

- CoRoT
 - 150 hvězd
 - 5,4 až 9,2 mag
 - 20-150 dní na hvězdu
 - Měření po 32 s
- Kepler
 - 170 000 hvězd
 - 7 až 17 mag
 - 4 roky na hvězdu
 - Měření po 59 s
- PLATO (2.0)
 - >1 000 000 hvězd
 - 8 až 16 mag
 - 20 dní – 3 roky na hvězdu
 - Měření po 25 s (2,5 s)
- MOST, WIRE, ...



Výkonová spektra

- Typické frekvence vyskytující se v fotometrické řadě
- Slunce – dominováno p -mody kolem 3,5 mHz

Slunce



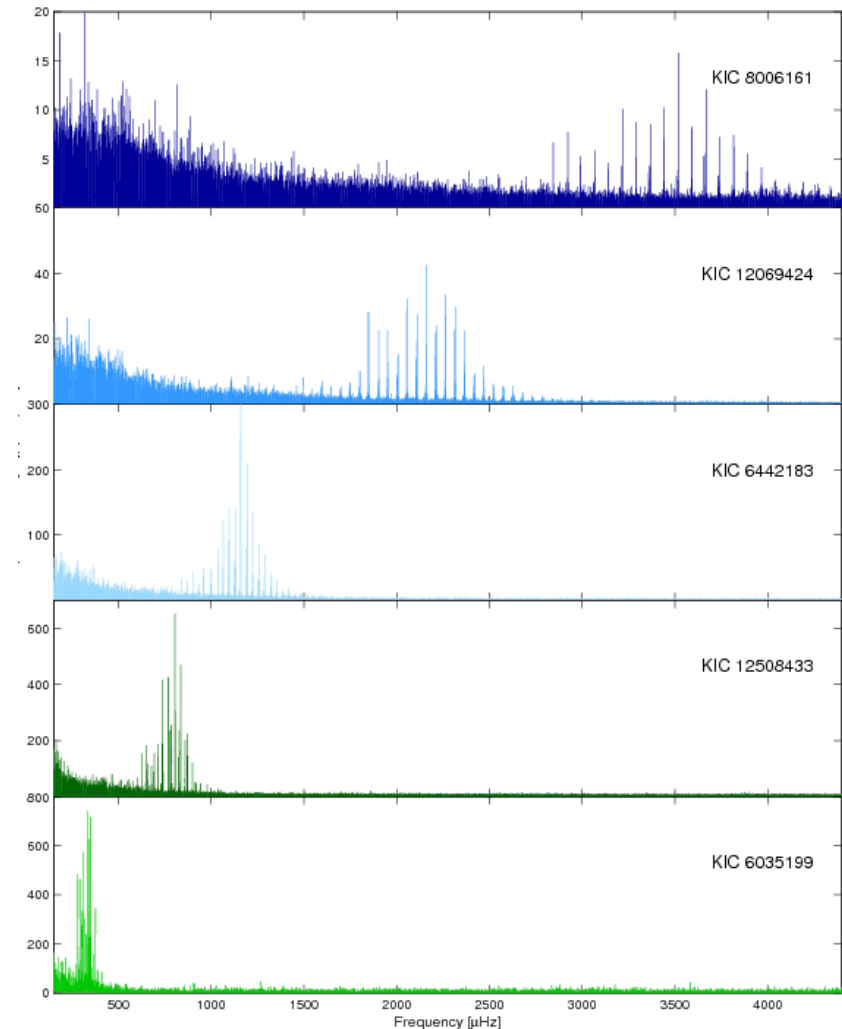
α Cen A



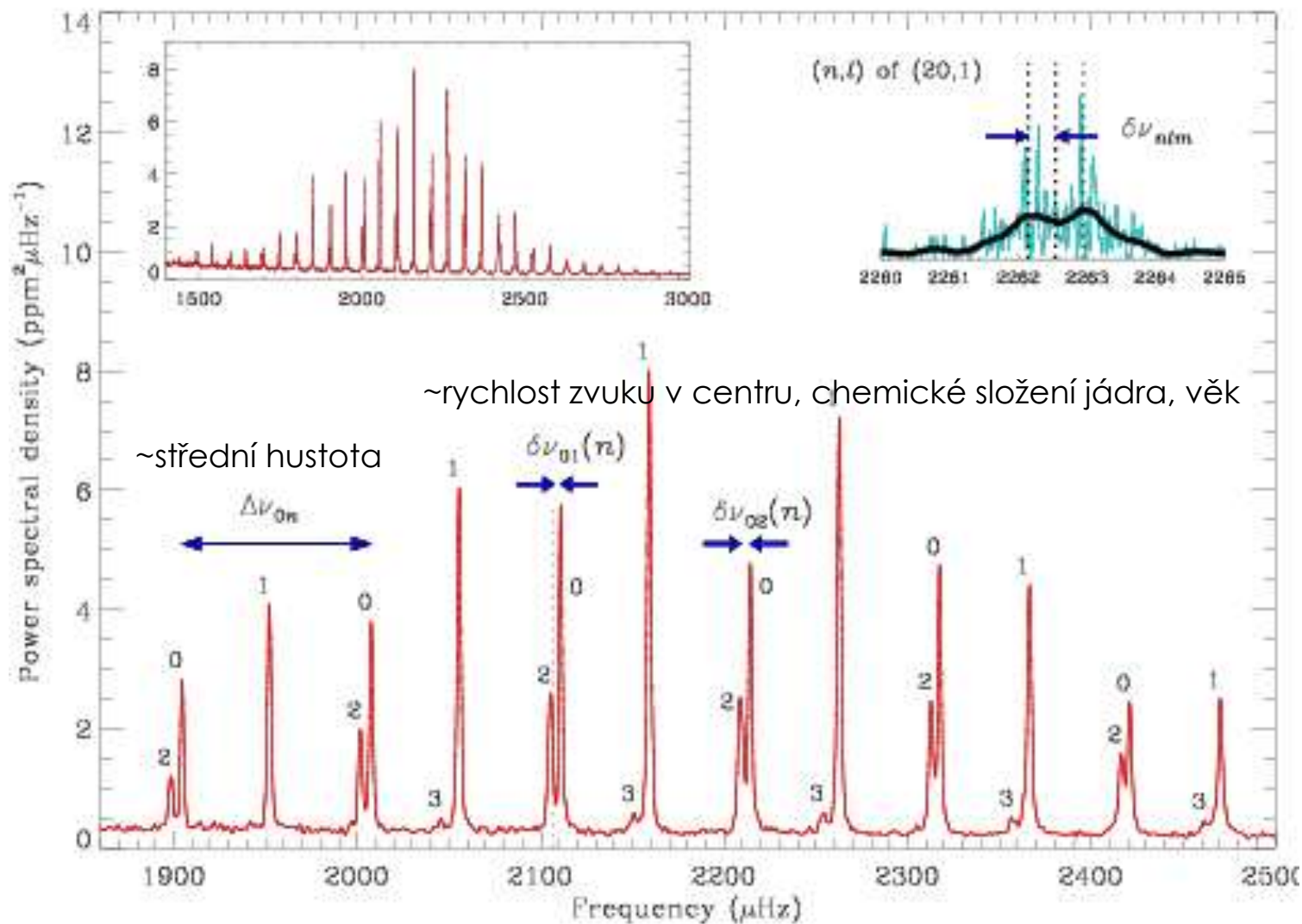
α Cen B



χ Hya



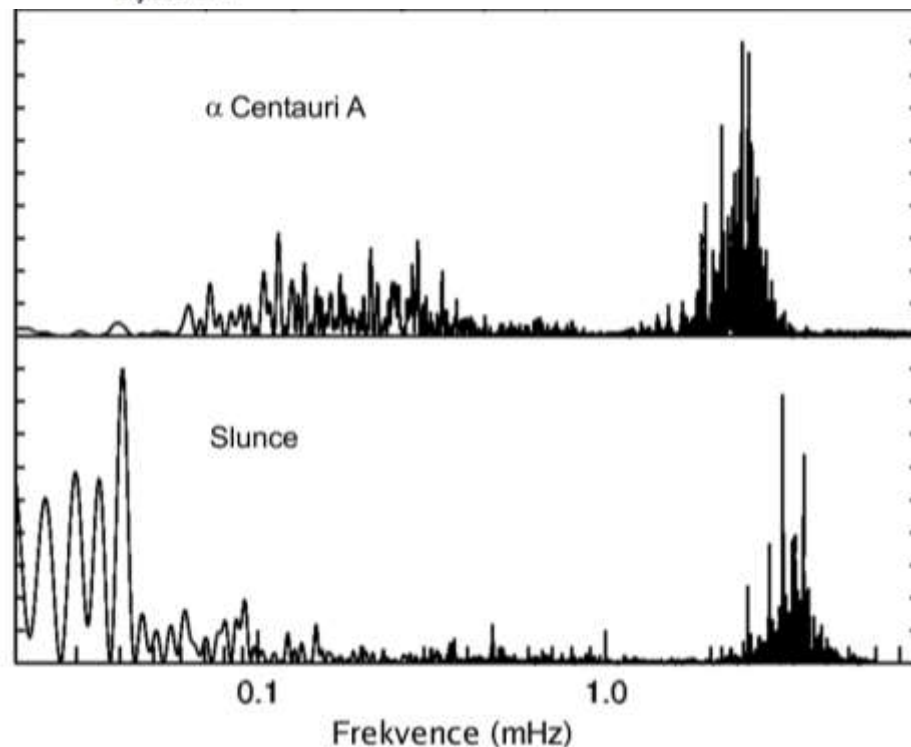
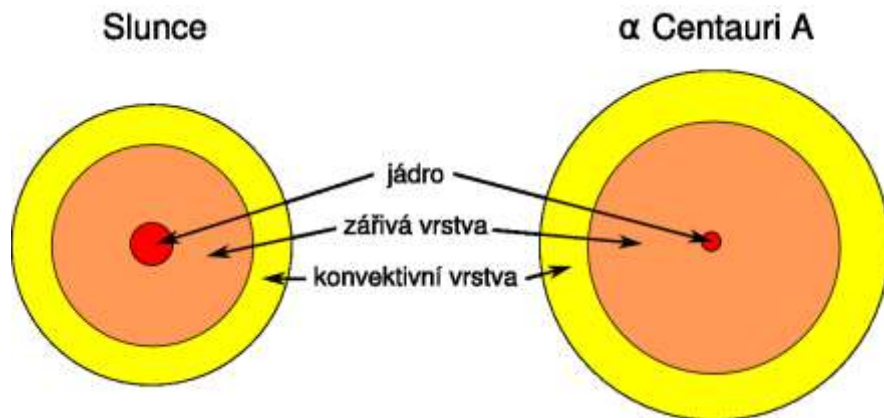
Separace



Vnitřní struktura hraje roli

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

$2,19 \times 10^{30}$ kg
 $5,83 \times 10^{26}$ W
5790 K
19 MK
 $177,1 \text{ g/cm}^3$
1,89 MK
0,0384





Konec první části...