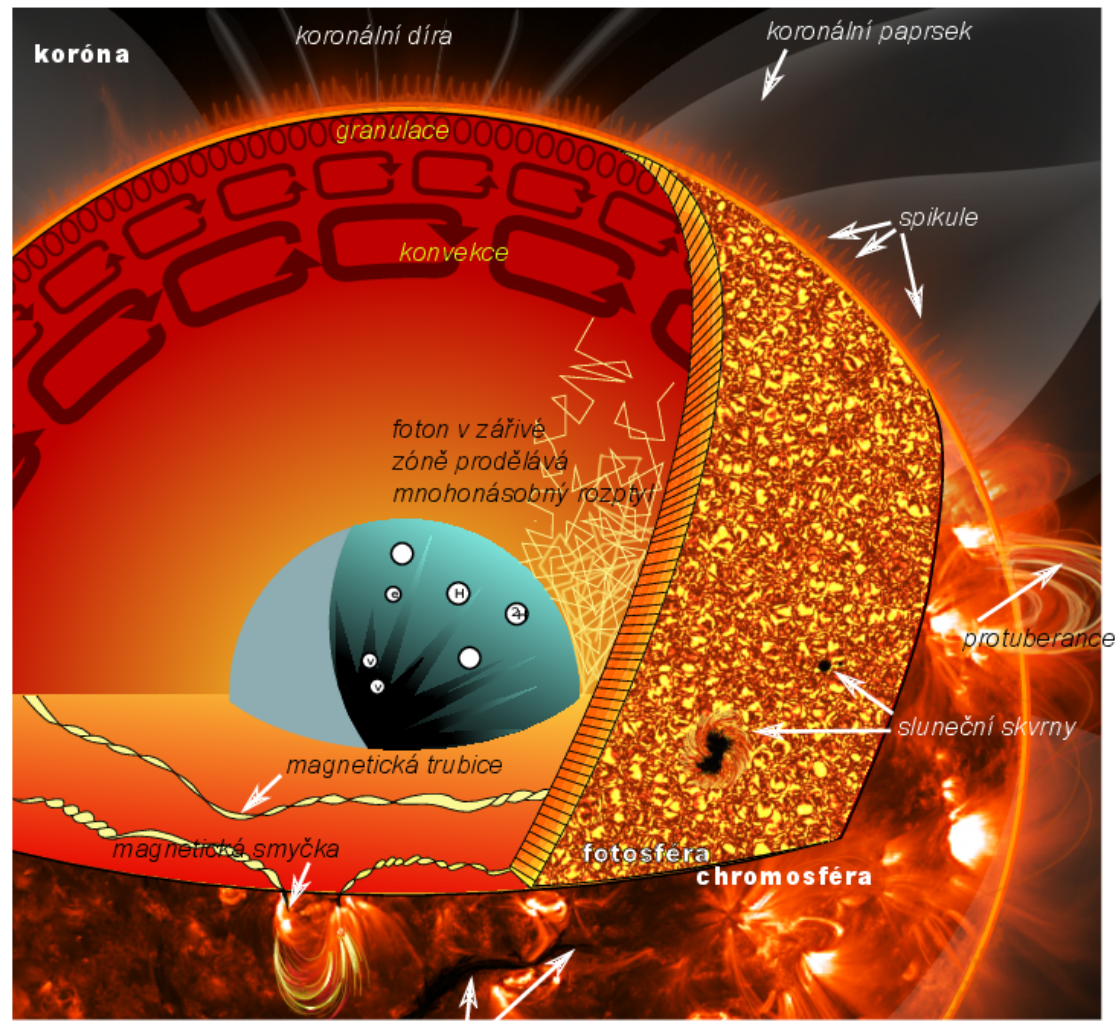
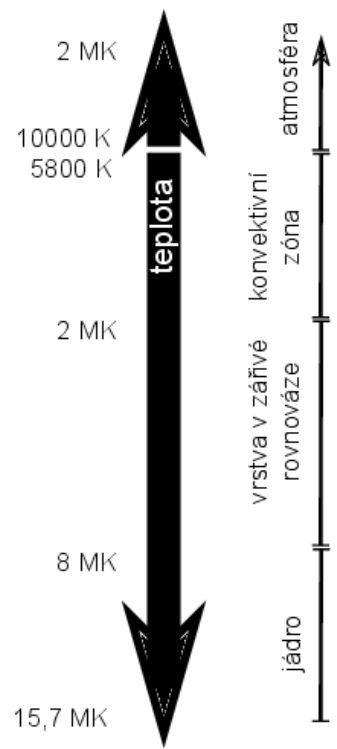


2. Vnitřní struktura a vývoj Slunce

Michal Švanda
Sluneční fyzika LS 2013/2014

Slunce: naše nejbližší hvězda



Kresba P. Vaňáčková

Rovnice vnitřní struktury

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

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

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

$$\frac{dT}{dr} = \frac{-GmT\rho}{r^2 P} \nabla \leftarrow \begin{array}{l} \nabla_{\text{rad}} = \frac{3\kappa PL}{16\pi acGmT^4} \\ \nabla_{\text{ad}} = \frac{\delta Gm}{c_p r^2} \end{array}$$

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

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

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

Nestandardní modely

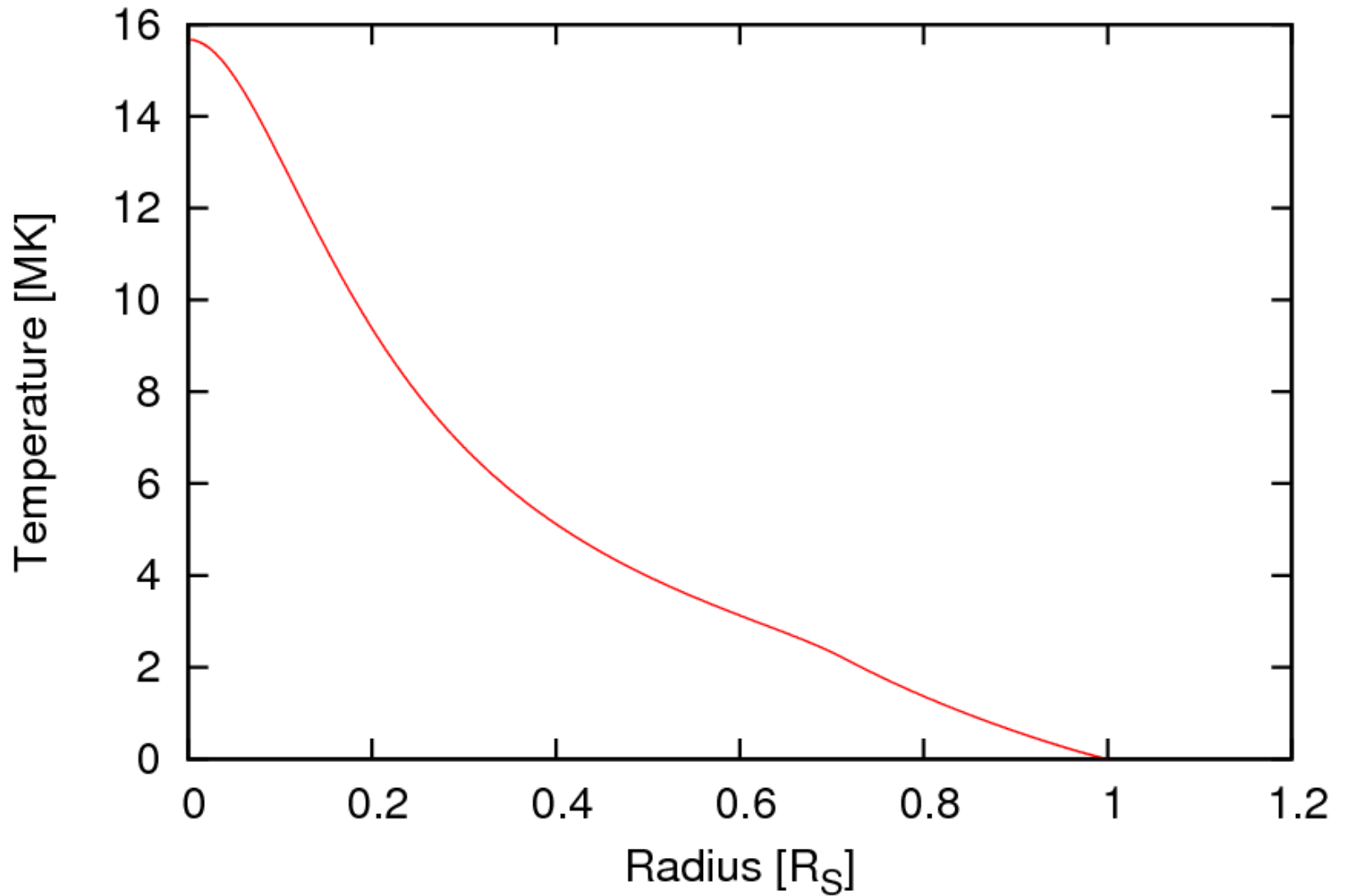
- 1960s – neutrinový problém
 - Low Z model: menší Z -> menší opacita -> menší teplotní gradient -> větší jádro, avšak nižší centrální teplota -> nižší produkce neutrin. Pro $Z \sim 0,001$ soulad. Povrchové $Z \sim 0,02$ průchodem zaprášeným prostředím. Vyloučeno spektrem oscilací.
 - Rychle rotující jádro: Odstředivá síla též vzdoruje gravitaci, tedy nutný menší zářivý tlak a možná nižší teplota. Na vysvětlení neutrin třeba jádro rotující 500x rychleji než povrch. Vyloučeno pozorovanou hodnotou zploštění.
 - Vnitřní magnetické pole: Tlak magnetické pole pracuje proti gravitaci, opět možná nižší teplota. Nutná intenzita mg. pole cca 10^9 G (tlak pole 10 % tlaku plynu a záření). Ohmická disipace pole, nepřežilo by životní dobu Slunce.
 - Vnitřní míchání: Míchání snižuje střední molekulární hmotnost, stačí nižší teplota pro stejný zářivý tlak ($P \sim T/\mu$). Neshoda s měřením oscilací a vyžaduje energii – těžké helium musí být transportováno vzhůru.
 - WIMPy gravitačně vázané v jádře – interagují pouze slabě, efektivní přenašeči energie na dlouhé vzdálenosti, snižují teplotní gradient atd.
 - *Nedetekujeme všechna vzniklá neutrina kvůli oscilacím...*

Fundamentální parametry Slunce

- $M = (1,9891 \pm 0,0012) \times 10^{30} \text{ kg}$
- $L = 3,86 \times 10^{26} \text{ W}$
- $R = 695\,980 \text{ km}$
- $\langle \rho \rangle = 1400 \text{ kg m}^{-3}$
- $g = 27,4 \text{ m s}^{-2}$
- $T_{\text{eff}} = (5785 \pm 10) \text{ K}$
- $X = 0,71, Y = 0,27, Z = 0,02$
- $1'' = 726 \text{ km}$ ve vzdálenosti 1 AU
- Věk $\sim 4,5 \times 10^9$ let
- $v_{\text{esc}} = 6,17 \times 10^5 \text{ m s}^{-1}$
- $I = 1,7 \times 10^{41} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
- Ztráta hmoty
 - Zářením: $\sim L_0/c^2 \sim 4 \times 10^9 \text{ kg/s}$
 - Větrém: $\sim 10^9 \text{ kg/s}$
 - Zatím: $7,5 \times 10^{26} \text{ kg} \sim 0,04 \% M_0$

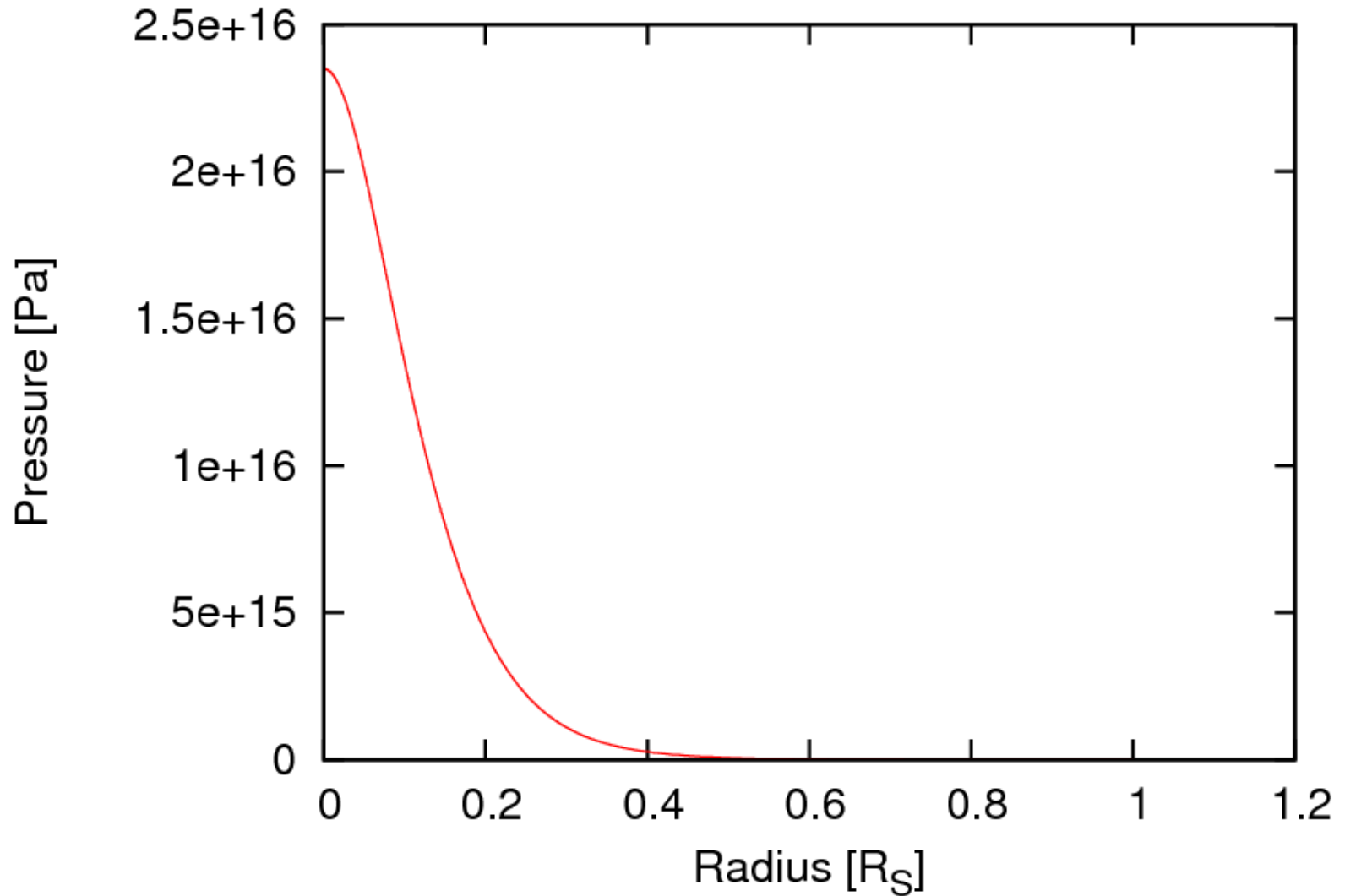
Model S

(Christensen-Dalsgaard et al. 1996)



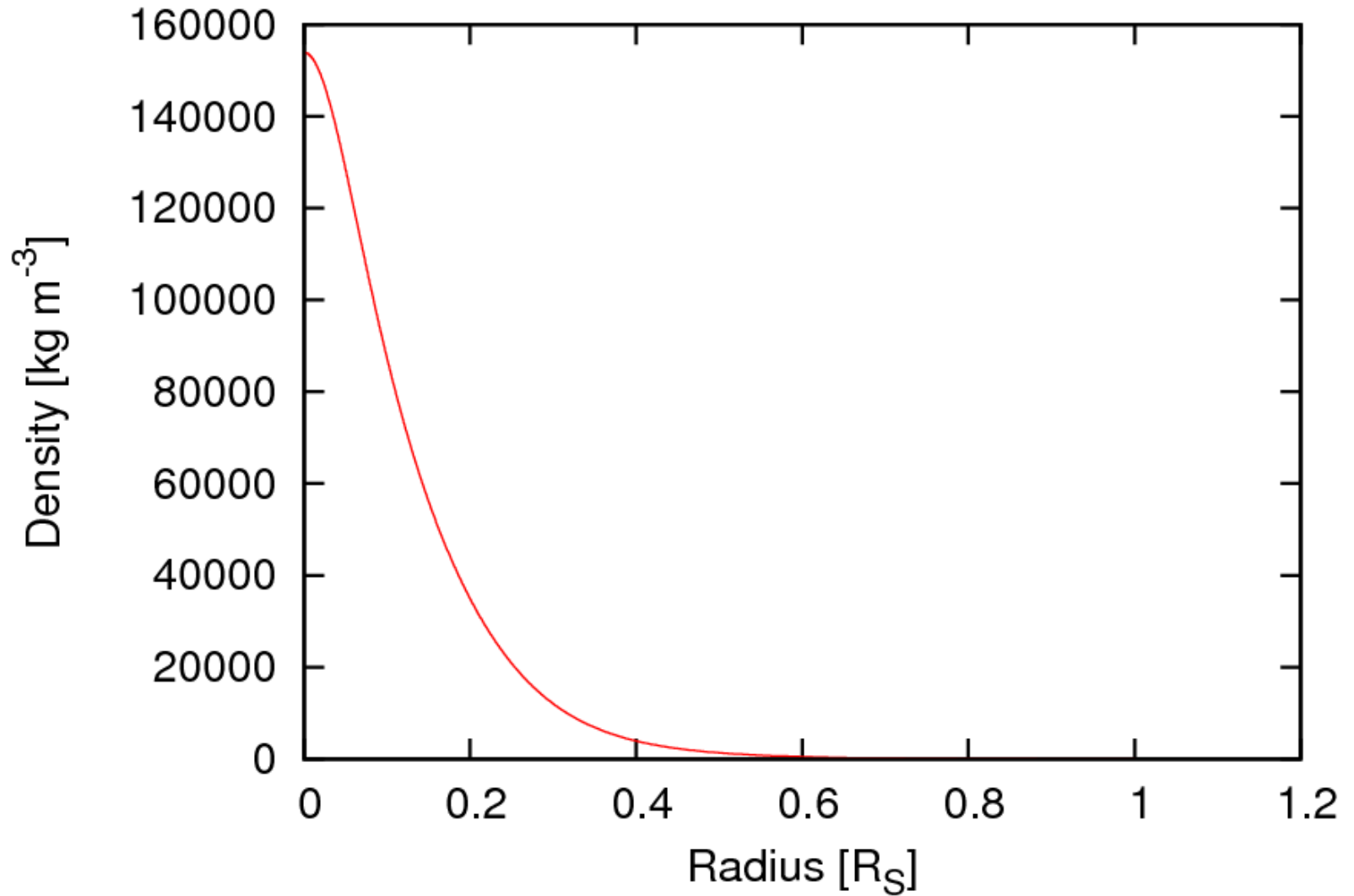
Model S

(Christensen-Dalsgaard et al. 1996)



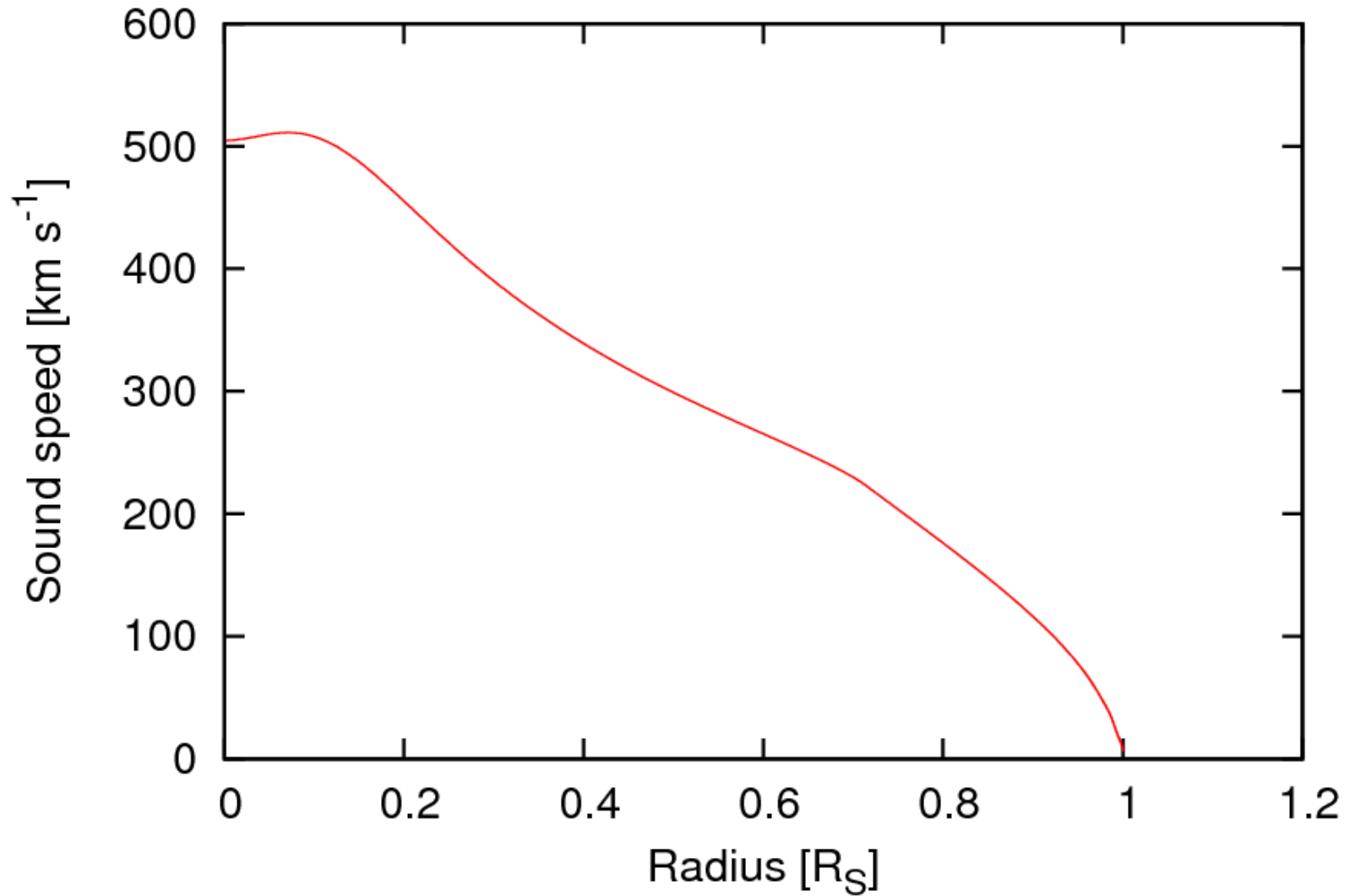
Model S

(Christensen-Dalsgaard et al. 1996)



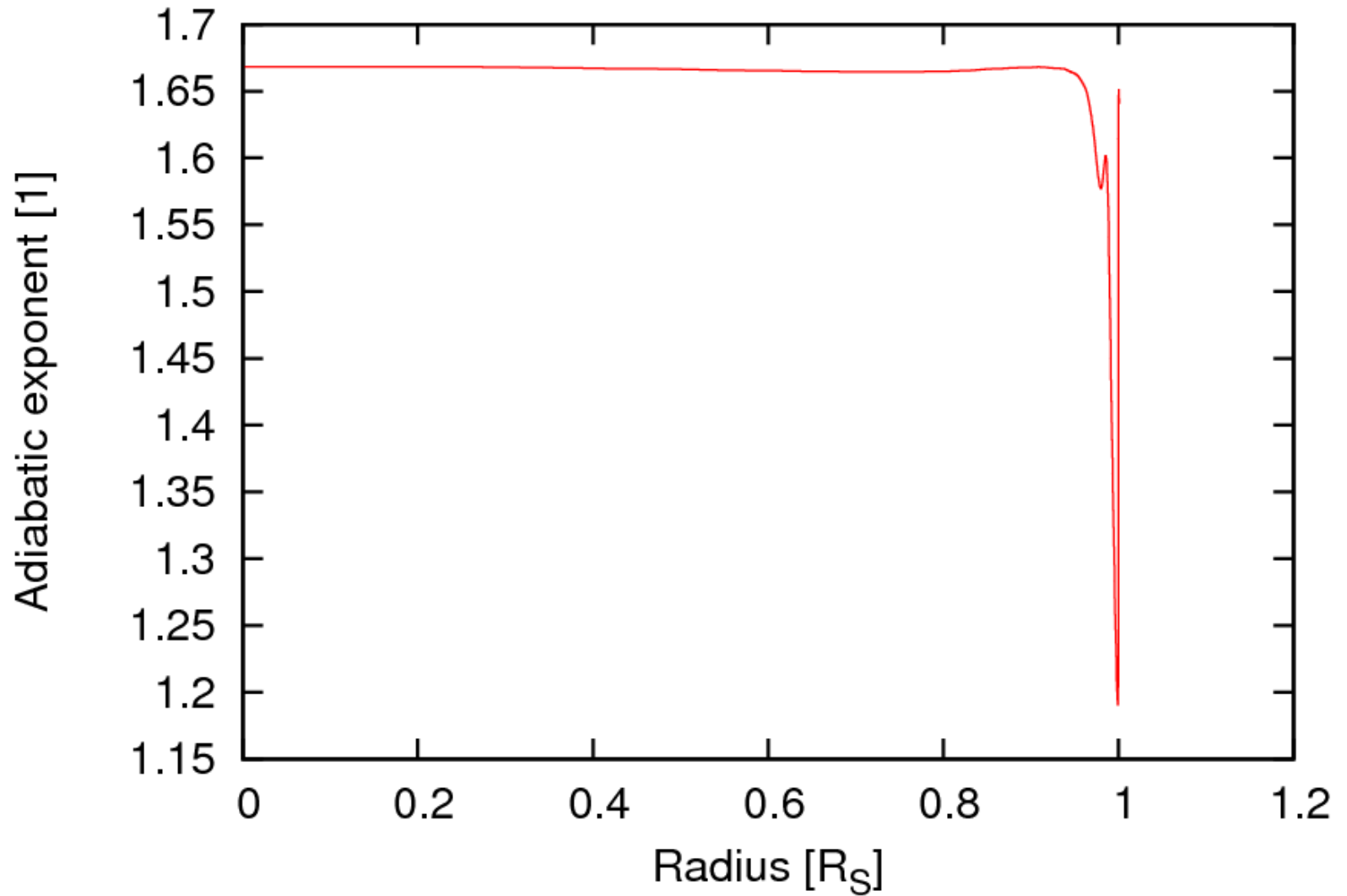
Model S

(Christensen-Dalsgaard et al. 1996)



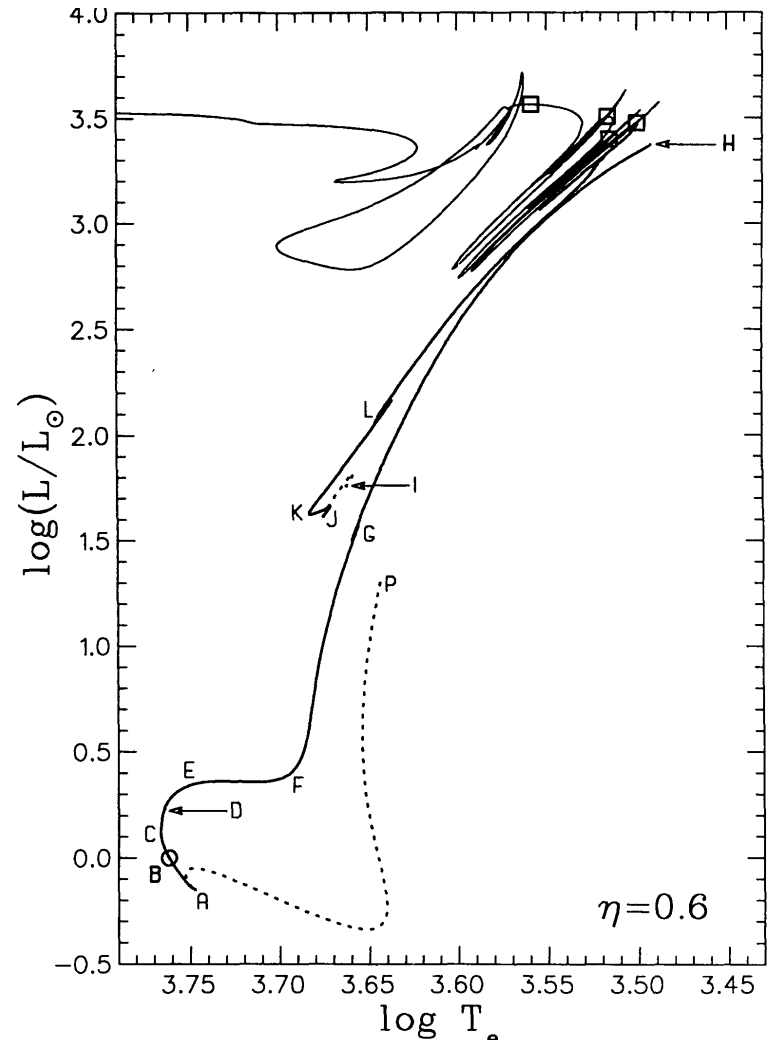
Model S

(Christensen-Dalsgaard et al. 1996)



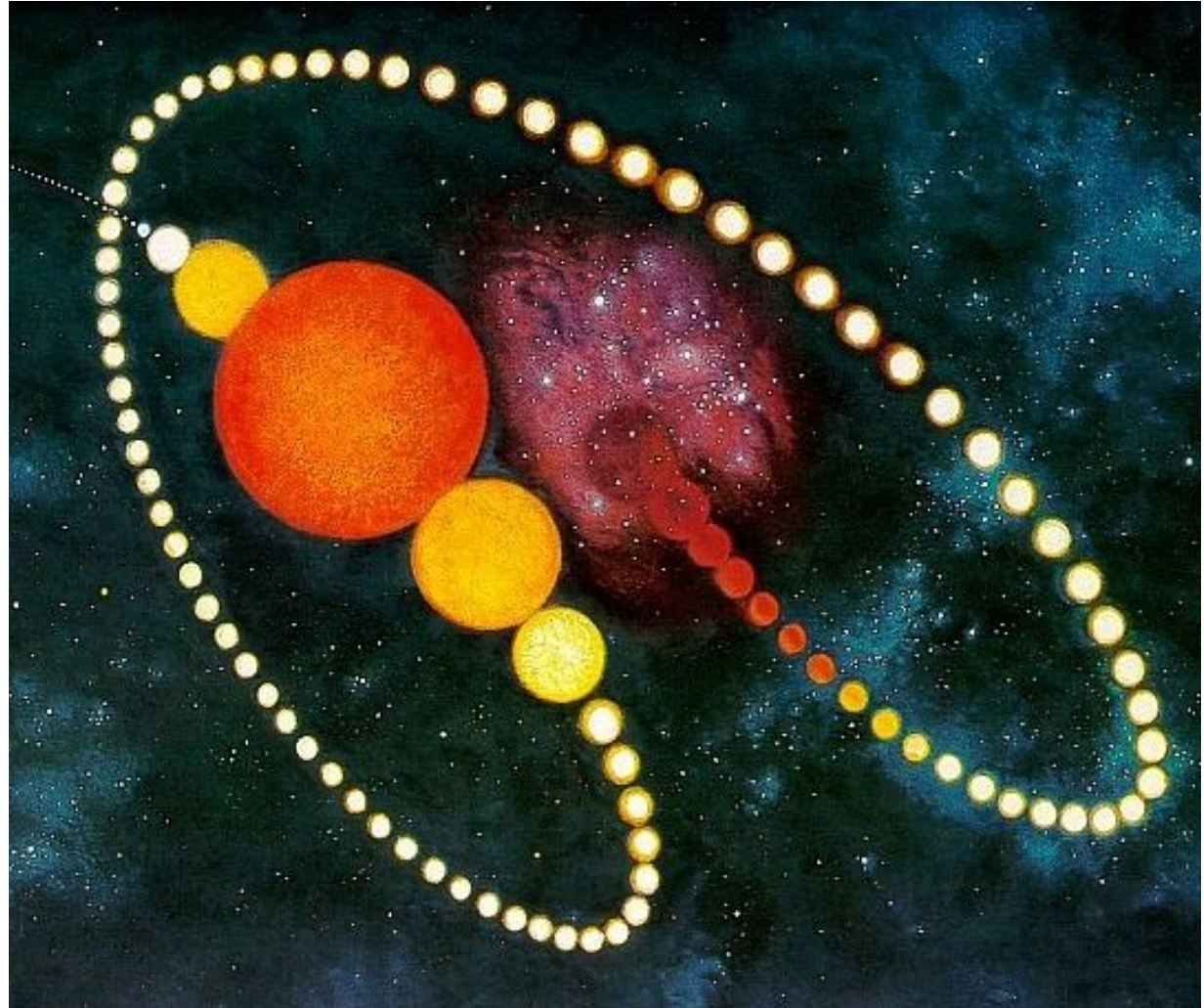
Pohyb Slunce po H–R diagramu

- Sackmann, I. J. (1993)
- P-A před MS
- A-E MS, B současné Slunce
- H-J heliový záblesk
- I-J před horizontální větví rudých obrů
- Čtverečky – záblesky slupek He na AGB
- MS ještě cca 6,4 Gy (celkově 11 Gy)
- RGB 0,6 Gy
- AGB 0,1204 Gy



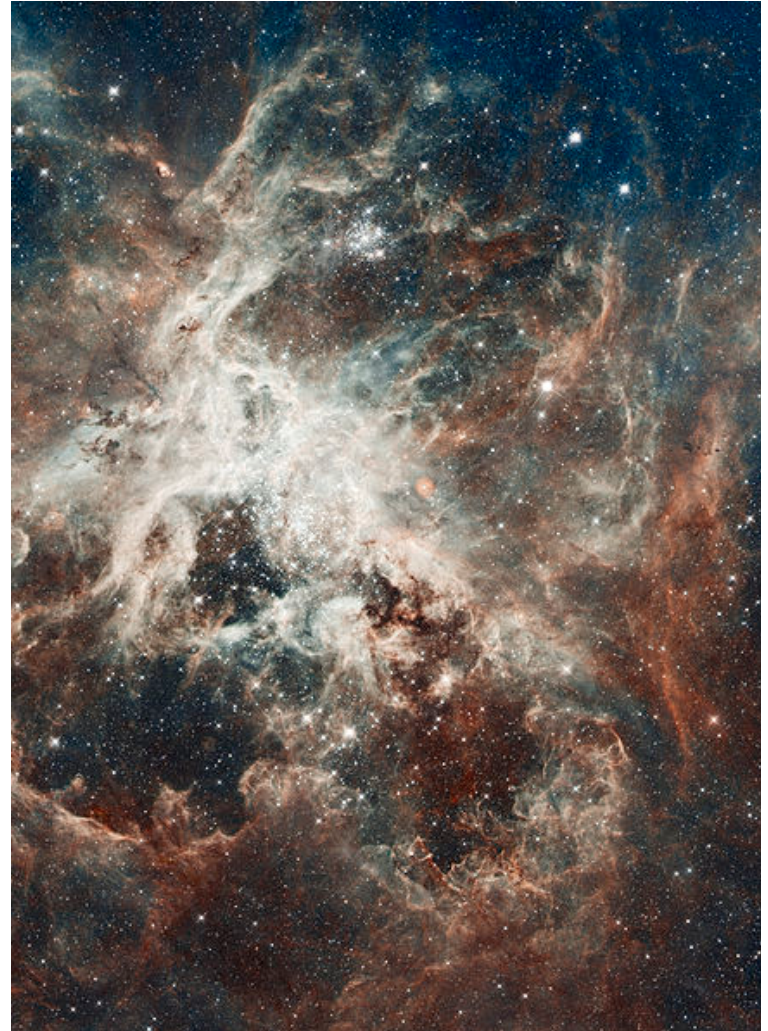
Nejlepší sluneční model

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



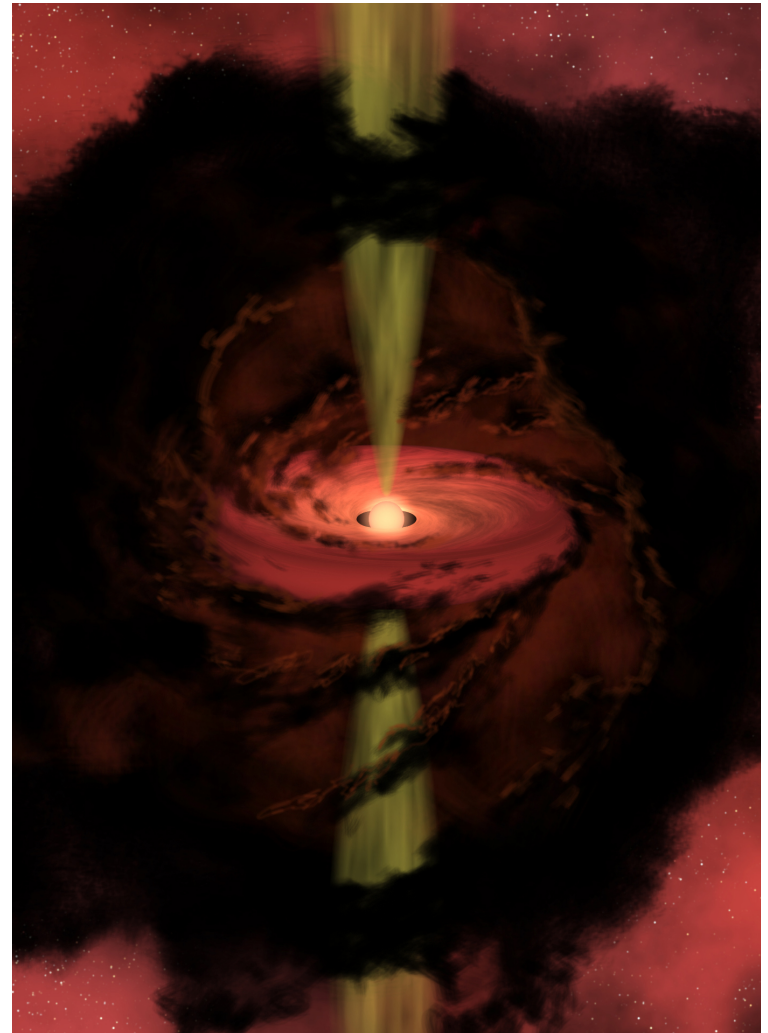
Slunce se rodí

- 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



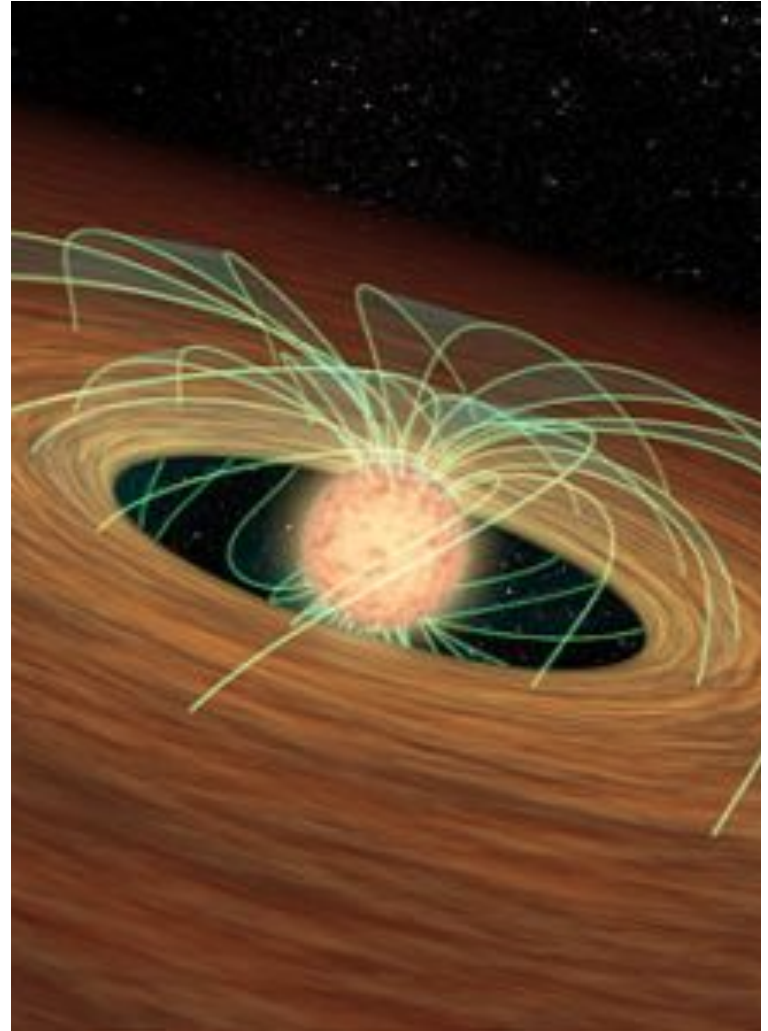
Protohvězda

- 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



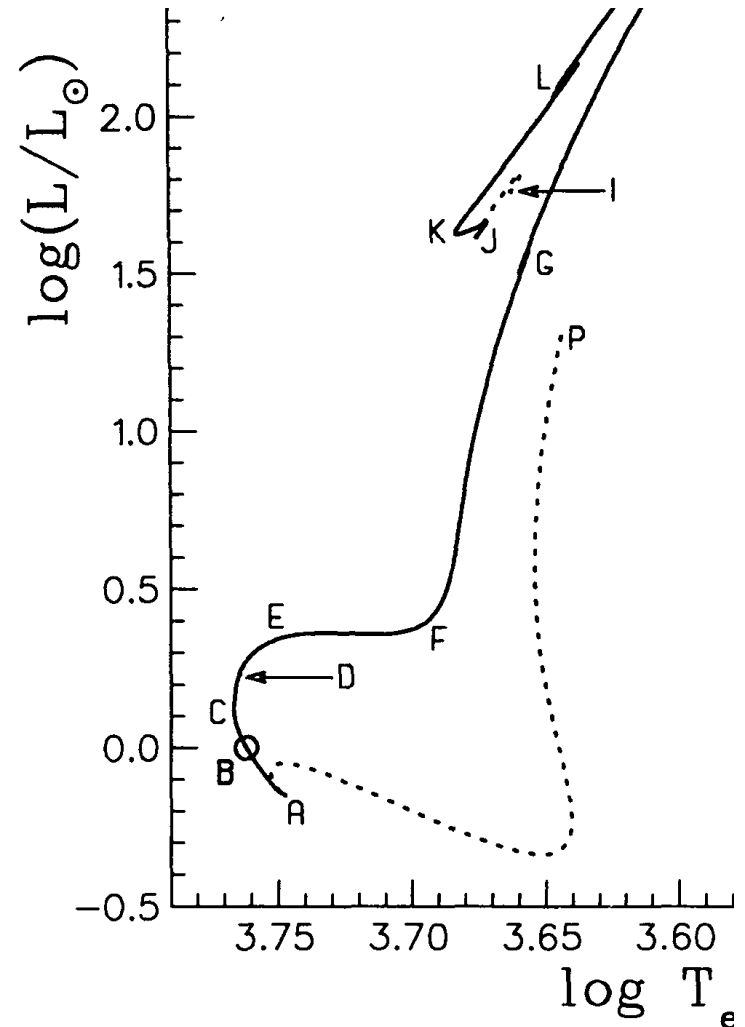
Sluneční puberta

- 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



Slunce před hlavní posloupností

- Téměř izotermální kontrakce 10 Myr, velký pokles luminosity
- Posléze pomalejší přibližování hlavní posloupnosti, 20 Myr, luminosity roste na dvojnásobek, efektivní teplota roste o 30 %
- Dále během 20 Myr lehký pokles luminosity až k minumu - ZAMS



Dospělost Slunce: *právě teď*

- Před 4,50 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 ve středu jádra (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 expanze při konstantní luminozitě $2,3 R_0$, přechod k rudým obrům, 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 lehce mimo střed (střed “ochlazován” unikajícími neutriny) – okamžik záblesku produkce energie v jádře $10^{10} L_0$



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 $347 R_{\odot}$
- 400 000 let na asymptotické větvi obrů

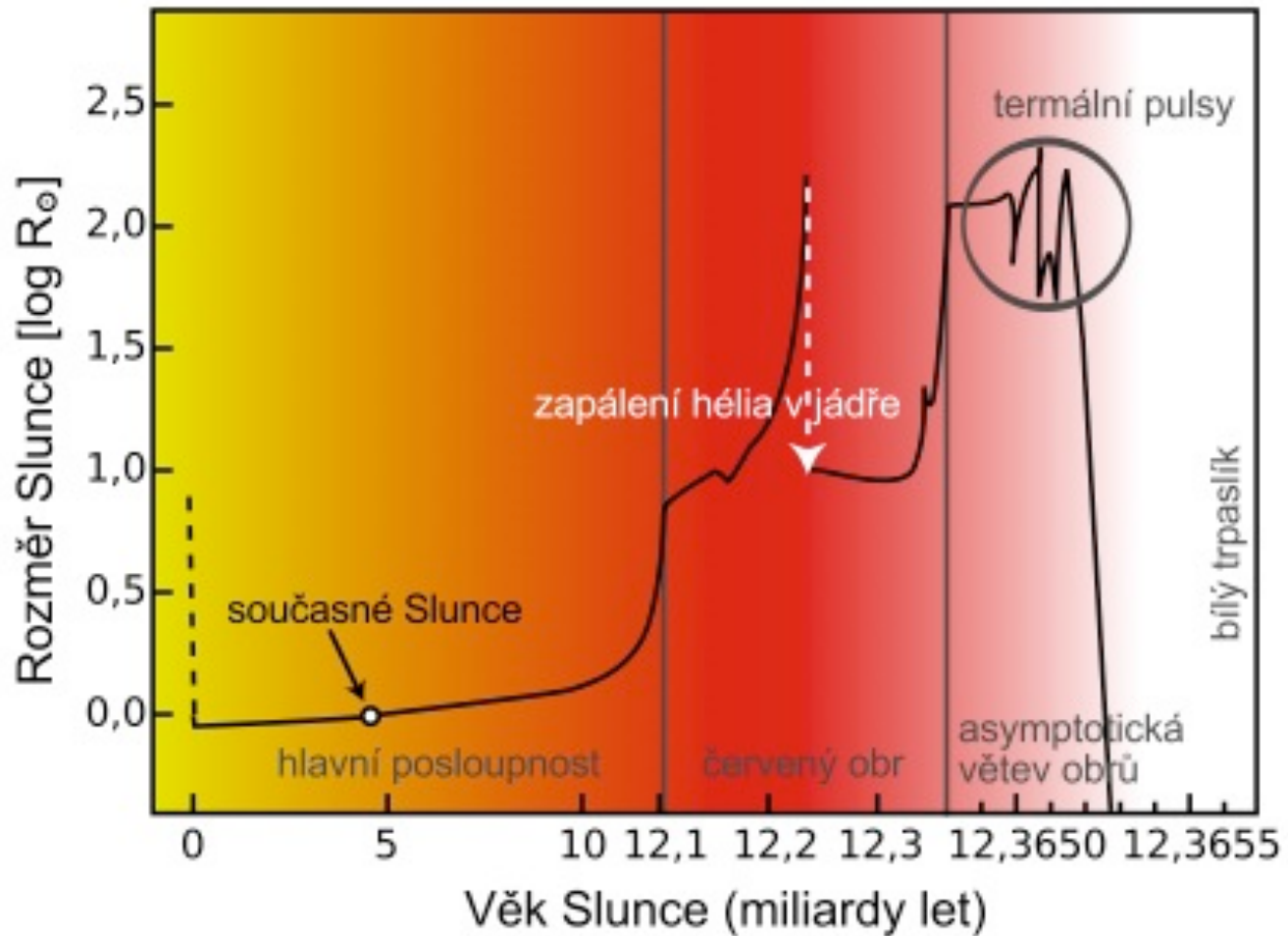


Rozžhavený důchodce

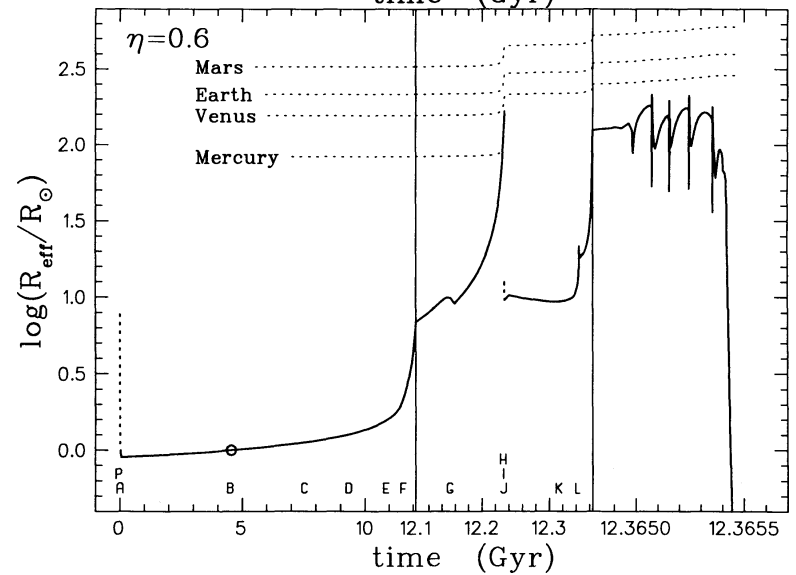
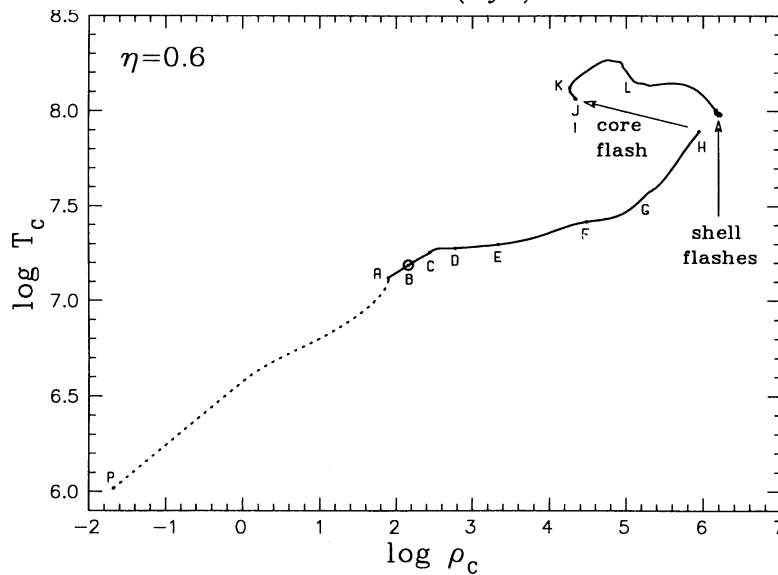
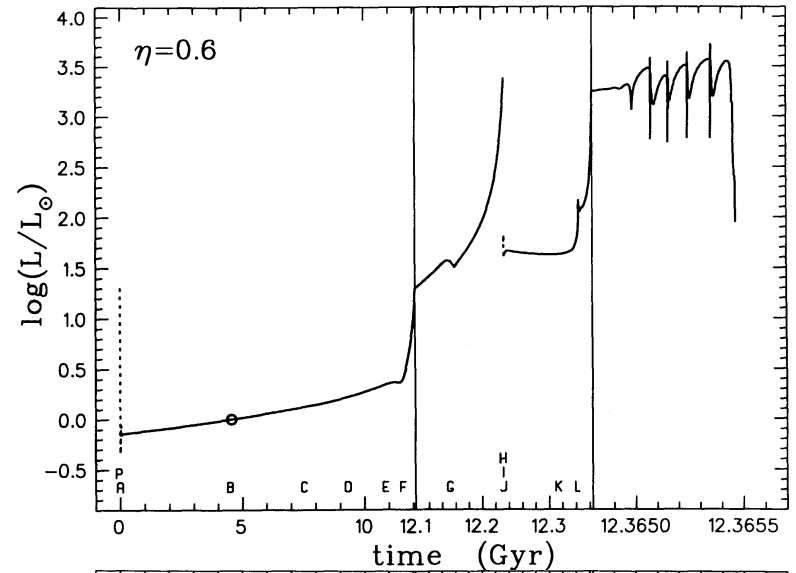
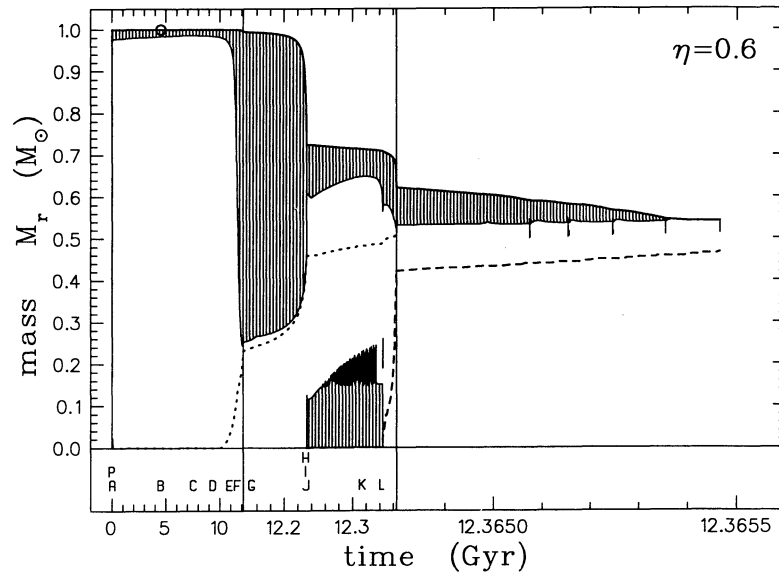
- Termálními pulsy odhozena obálka – planetární mlhovina
- Zůstane pouze jádro, 0,54 M_{\odot} , 120 000 K
 - *Bílý trpaslík*
- Malý zářivý výkon, chladne desítky až stovky miliard let
 - *Černý trpaslík*



Svítivost a rozměr v běhu času



Vývoj parametrů Slunce v čase



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