

Vývoj Slunce v minulosti a budoucnosti

Vjačeslav Sochora

Astronomický ústava UK

9.5.2008

Obsah

- **Úvod.**
- **Standardní model.**
- **Standardní model se započtením ztráty hmoty.**
- **Minulost a budoucnost Slunce.**
- **Reference.**

Úvod: vznik Slunce

- Stáří Slunce 4.5 mld let.
- Patří do hvězd I. populace.
- Vzniklo z mlhoviny, jejíž rovnováha byla porušena zřejmě výbuchem blízké supernovy.
- Nejprve protoslunce, jehož jádro se zahřívalo smršťováním.
- Zapálení jaderných reakcí.
- Nastolení rovnováhy.
- Vznik Slunce.



Obrázek: Zárodečná mlhovina (HST)

Úvod: Současný vzhled



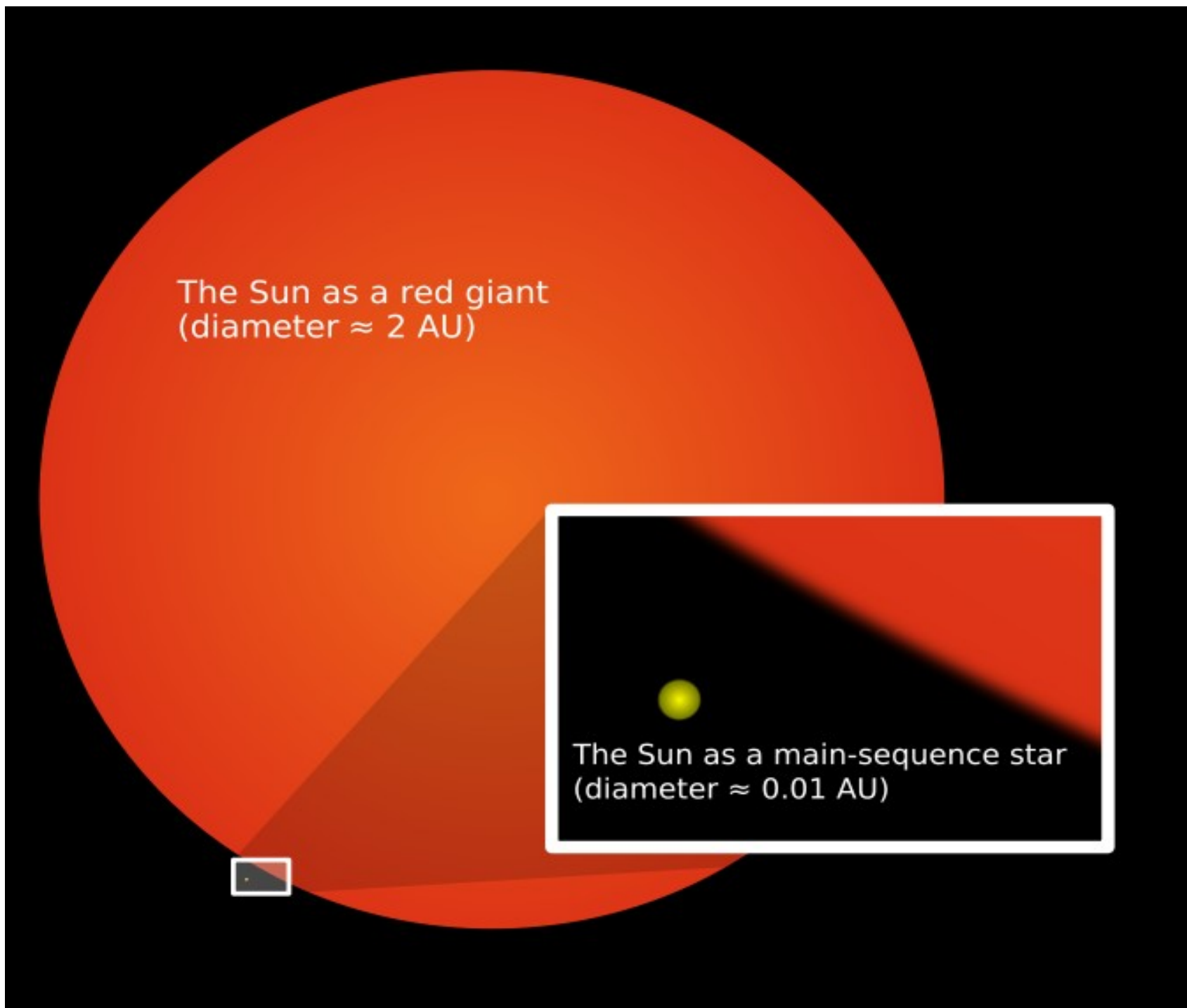
Obrázek: Slunce (SOHO)

Úvod: zánik

- Žádný vodík v jádře.
- Vznik rudého obra.
- Odhození vnější obálky.
- Vznik planetární mlhoviny a bílého trpaslíka.



Obrázek: Planetární mlhoviny (HST)



Obrázek: Srovnání velikosti Slunce v různých fázích (Wikipedie)

Standartní model

- Snaha popsat vývoj Slunce od jeho vzniku do současnosti.
- Standartní model nebere v úvahu rotaci, ani ztrátu hmoty.
- Tři vstupní hodnoty: Y , Z , α (parametr udávající hloubku vnější konvektivní obálky).
- Výstupní hodnoty: luminozita a efektivní teplota (popřípadě poloměr Slunce).

$$L_s = 3.86 \times 10^{33} \text{ erg/s} = 3.86 \times 10^{26} \text{ W}$$

$$R_s = 6.96 \times 10^{10} \text{ cm} = 6.96 \times 10^8 \text{ m}$$

- Při konstantním X/Z se zadávají různé Y a α takové, abychom dostali správné hodnoty sluneční L a T_{ef} jak je dnes pozorujeme.

Standartní model: výsledky

- Při volbě $Z / X = 0.02766$ a stáří Slunce $t = 4.54$ mld let výjde $Y = 0.278$, $Z = 0.0194$, $\alpha = 2.1$.
- Hodnota Y je v dobré shodě s nukleosyntézou v galaktickém vývoji po velkém třesku.
- Na výsledek Y má významný vliv pozorovaný poměr Z / X , vlastní množství těžkých elementů a vnitřní opacita.
- Samozřejmě nevysvětluje problém s neutrinami.
- Standartní model nevysvětluje ztrátu Li na povrchu Slunce během vývoje.

Standartní model se započtením ztráty hmoty

- Tento model započítává ztrátu hmoty ze Slunce.
- Pokud vezmeme poměr ${}^7\text{Li}/\text{H} = 1.0 \times 10^{-9}$ (hodnota odpozorována z první populace hvězd na hlavní posloupnosti), dostaneme ztrátu 0.10 – 0.11 hmotnosti Slunce. Pro ${}^7\text{Li}/\text{H} = 2.6 \times 10^{-9}$ (hodnoty z meteoritů) dostaneme ztrátu 0.12 – 0.13 hmotnosti Slunce.
- Počáteční hmotnost Slunce byla $M_i = 1.1 M_s$. To vyžaduje menší Y a větší Z , α a tok neutrin, odchylky od standartního modelu jsou však malé.

Standardní model se započtením ztráty hmoty

- Formule pro výpočet ztráty hmoty $\Delta M = (M_{Li} - M_{ce}) - M_{ce} \text{Inf.}$
- Větší počáteční hmotnost implikuje vyšší počáteční luminozitu (1.5 krát větší než ve standardním modelu).
- Větší luminozita, gravitační síla a silnější sluneční vítr mohly mít nezanedbatelný vliv na planety.

Minulost a budoucnost Slunce: počáteční parametry

$$Y = 0.274$$

$$Z = 0.01954$$

$$R_{ce} = 0.741 R_s$$

$$T_c = 15.43 \times 10^6 \text{ K}$$

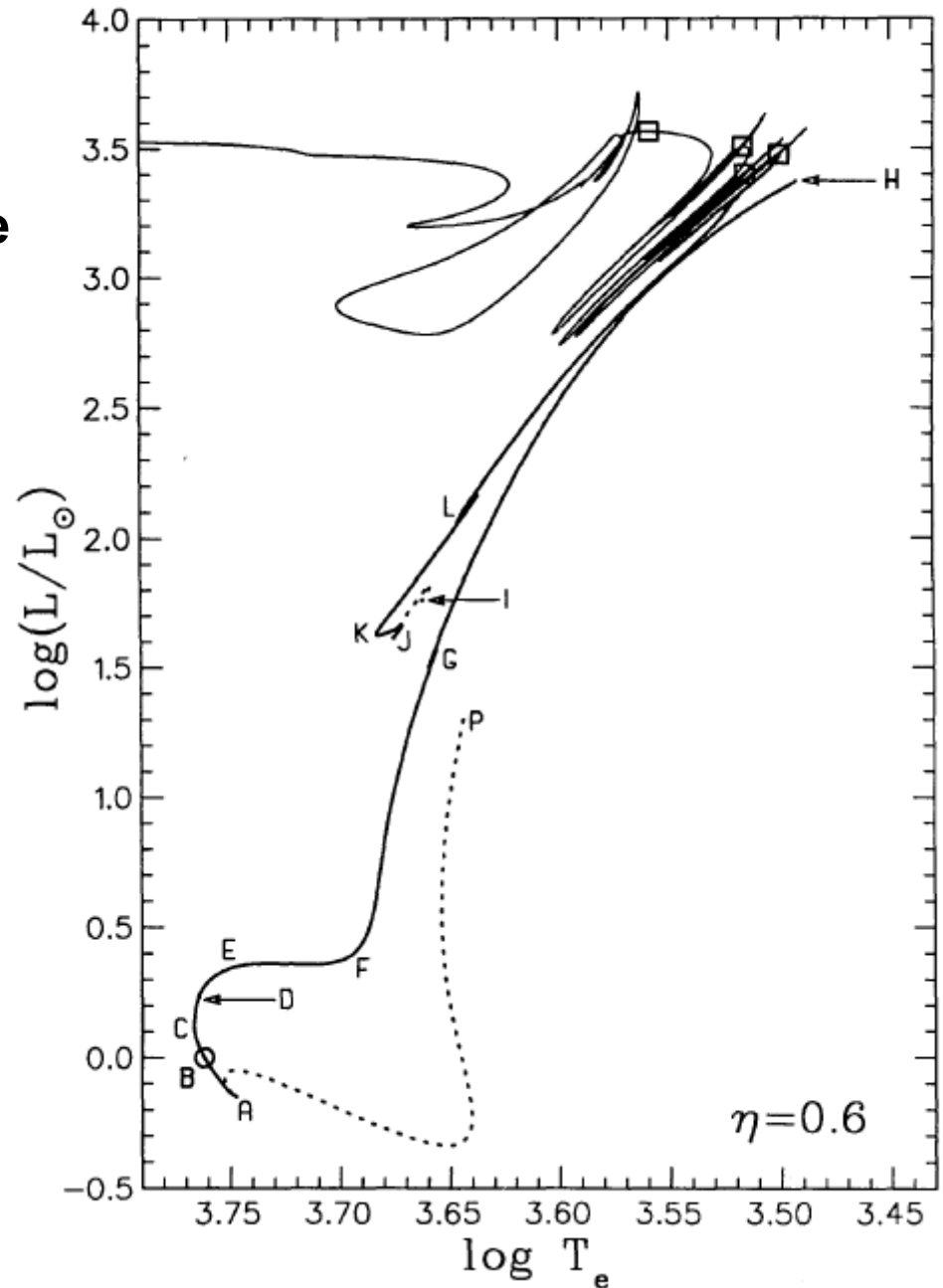
$$L_i = 0.7 L_s$$

6.5 SNU pro ^{37}Cl

$\eta = 0.6$ (parametr ztráty hmoty)

Slunce na HR diagramu

- Interval (P – A): pre – main – sequence
- Interval (A – E): hlavní posloupnost
- Bod B: poloha dnešního Slunce
- Interval (E – F): období před RGB
- Interval (F – H): období RGB
- Bod H: záblesk hel. jádra
- Bod I: hoření helia
- Interval (J – K): horizontální větev
- Bod L: helium hoří v obálkách kolem jádra
- Čtverce: heliové záblesky



Obrázek: Vývoj Slunce na HR diagramu (Sackmann 1993)

Minulost Slunce: pre – main - sequence

- **Před 4.5 mld let, trvala 0.05 mld let.**
- **Sluneční energie z gravitační kontrakce.**
- **Žádné jaderné hoření.**
- **Nejprve velký pokles luminozity při konstantní teplotě.**
- **Poté nárůst teploty za malé změny luminozity.**
- **Jádro se zapálí při teplotě 12 MK a hustotě 80 g cm^{-3} .**
- **Od této doby vstupuje na hlavní posloupnost.**

Minulost a budoucnost: hlavní posloupnost

- Zde setrvá 11 mld let.
- Luminozita se z počáteční hodnoty (ještě před vstupem na MS) zvýší na $2.2 L_s$ na konci MS.
- To bude mít katastrofické následky pro naše podnebí na Zemi.
- Oceány se vypaří při $1.4 L_s$, pokud bereme v úvahu Zemi bez mraku.
- Na konci shoří veškerý vodík v jádře.

Budoucnost: období po MS

- Nejprve 0.7 mld let se bude Slunce rozpínat, aniž by se zvýšila luminozita.

- Poté nastává RGB (větev rudých obrů).

Hoří vodíkové obálky.

Neustálé rozpínání a nárůst luminozity až na $2349 L_s$.

Teplota se výrazně nemění až do bodu G.

Toto období trvá 0.6 mld let.

- Horizontální větev

Konstantní luminozita $44 L_s$.

Trvá 0.1 mld let.

Budoucnost: období po MS

- **Raná AGB (asymptotická větev rudých obrů).**

Období trvá 0.02 mld let.

Hoří heliové obálky.

- **Termálně pulzující AGB.**

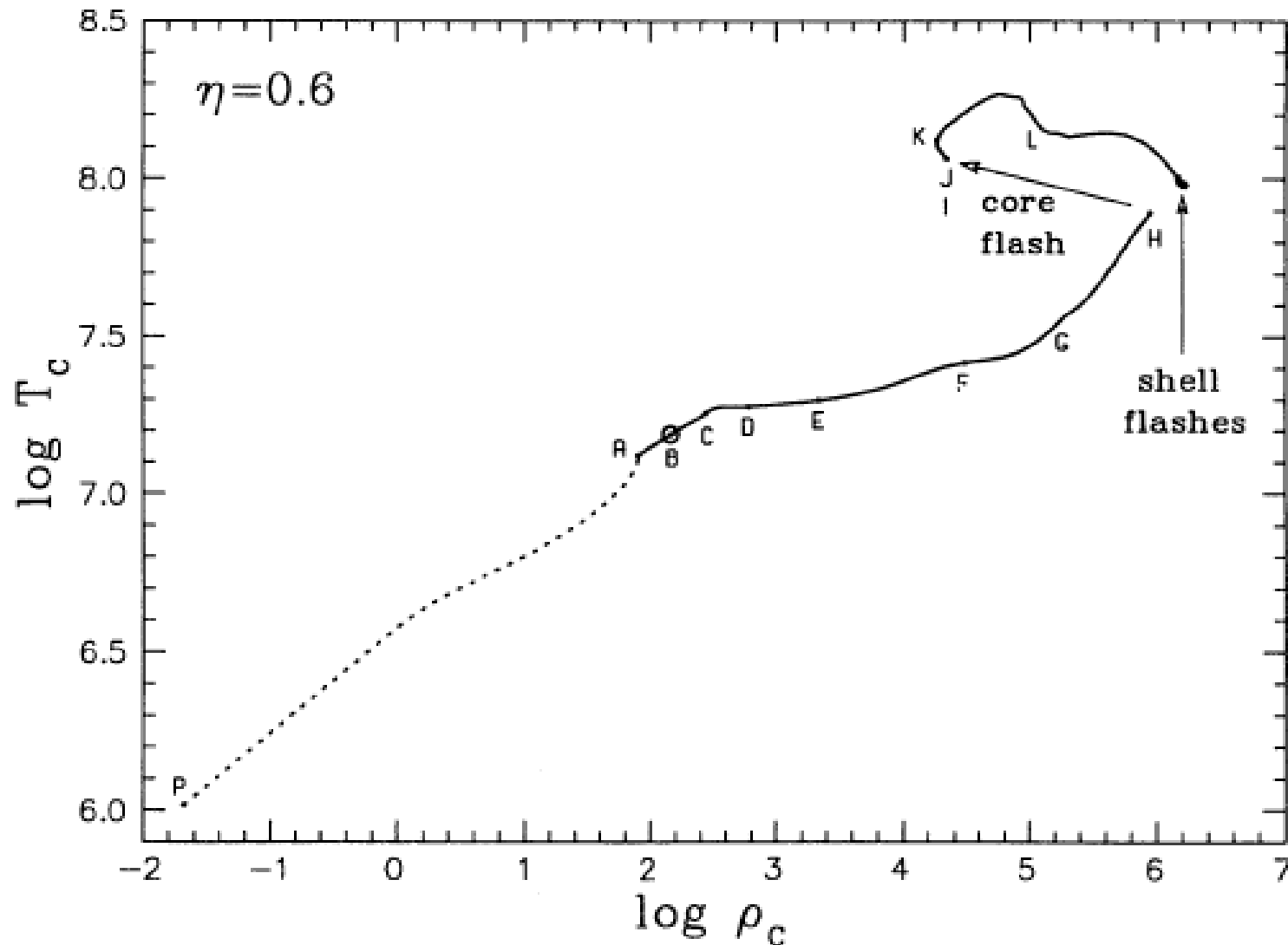
Uhlíko – kyslíkové jádro.

Heliové záblesky, opakují se, nárůst a pokles luminozity.

Období trvá 0.0004 mld let.

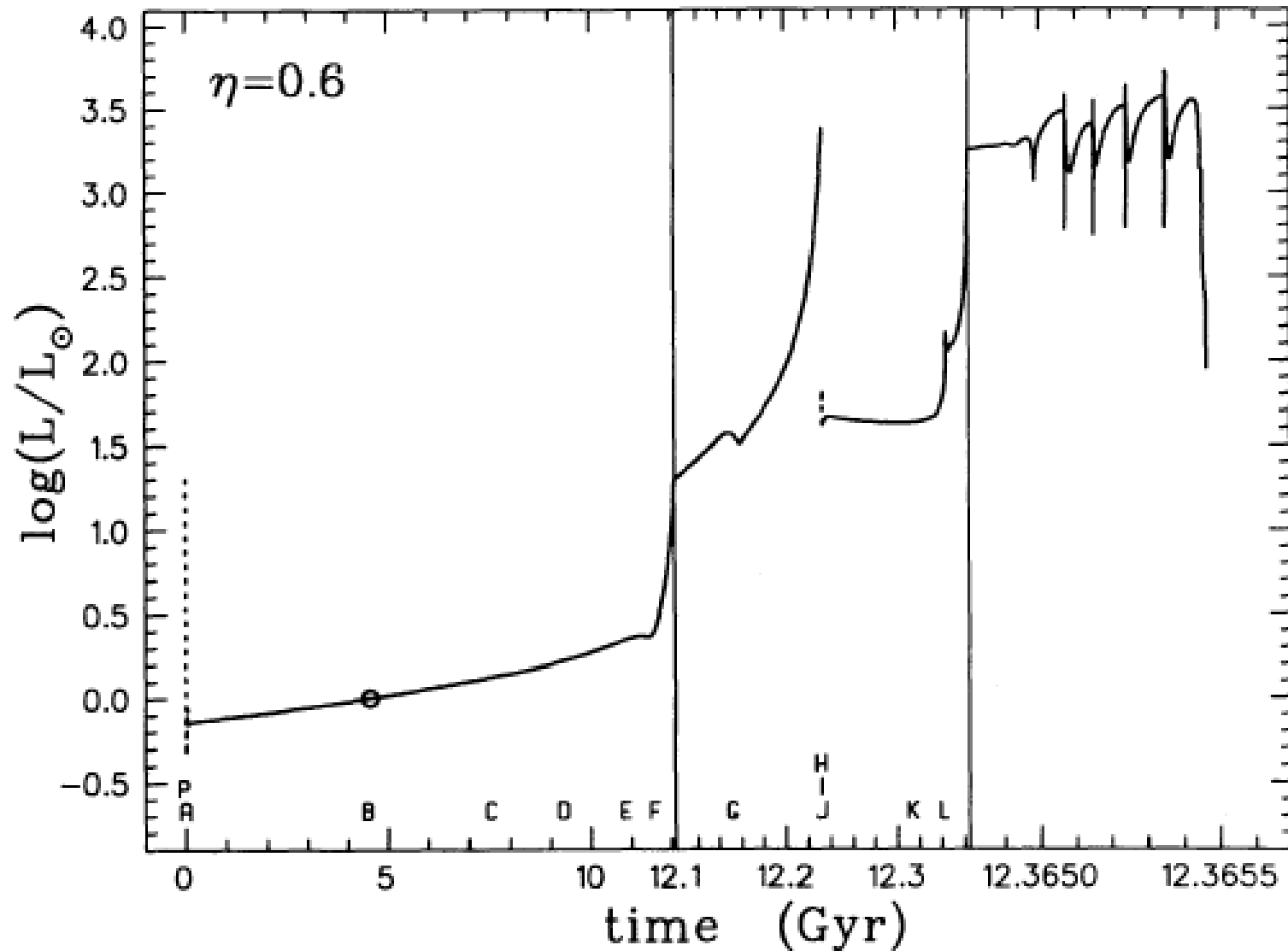
- **Vznik planetární mlhoviny.**

Budoucnost: období po MS



Obrázek: Vývoj centr. teploty s hustotou (Sackmann 1993)

Budoucnost: období po MS



Obrázek: Vývoj luminozity s časem (Sackmann 1993)

Budoucnost: ztráta hmoty

- Slunce skončí jako bílý trpaslík s konečnou hmotností $M = 0.541 M_{\odot}$.
- Na RGB (větev rudých obrů) ztratí $0.275 M_{\odot}$.
- Na AGB (asymptotická větev rudých obrů) ztratí $0.184 M_{\odot}$.
- Ztráta bude probíhat od 1.3 do $2.5 \times 10^{-7} M_{\odot}$ za rok.
- Konečná hmotnost závisí na parametru η .

Budoucnost: časové škály

- Hlavní posloupnost: 11 mld let.
- 0.7 mld let než dosáhne RGB.
- RGB: 0.6 mld let.
- Horizontální větev: 0.1 mld let.
- Raná AGB: 0.02 mld let.
- Termálně pulzující AGB: 0.0004 mld let.
- Přejít do planetární mlhoviny: 0.0001 mld let.

Budoucnost: vývoj poloměru

- K enormnímu nárůstu poloměru dojde při vstupu na RGB (na $166 R_s = 0.77 \text{ AU}$)

Bude pohlcen Merkur. Ztráta hmoty Slunce změní dráhy planet.

Poloha Venuše z 0.72 AU na 1 AU a tudíž nebude pohlcena.

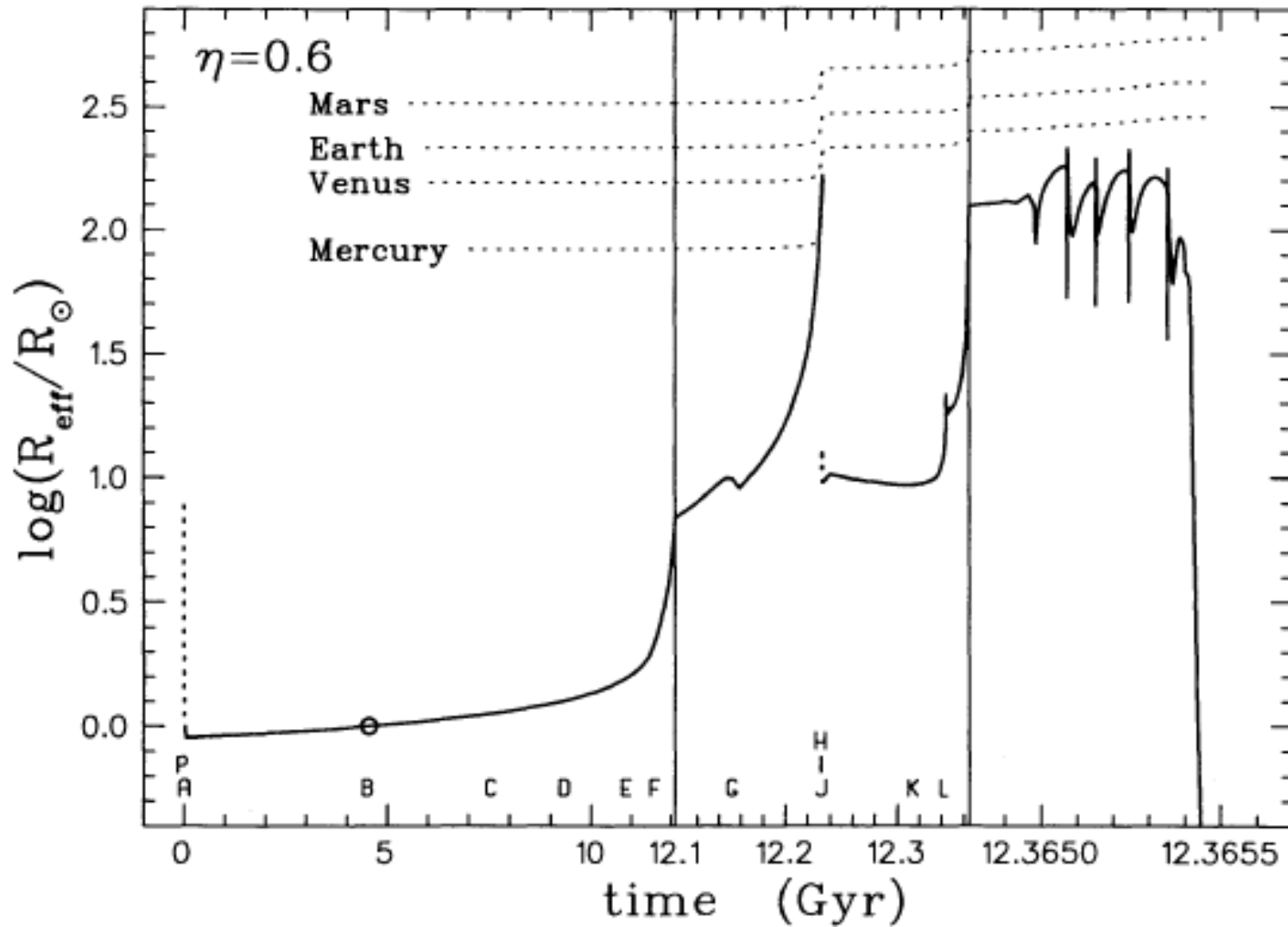
- Na AGB se bude poloměr Slunce periodicky měnit (perioda 10^5 let).

$$R_{max} = 213 R_s = 0.99 \text{ AU}.$$

Poloha Venuše 1.22 AU a Země 1.69 AU .

Konečná poloha (po ukončení ztráty hmoty) Venuše 1.34 AU a Země 1.85 AU .

Budoucnost: vývoj poloměru



Obrázek: Vývoj poloměru s časem (Sackmann 1993)

Reference

Sackmann, I. J., Boothroyd, A. I., Fowler, W. A., 1990, Ap. J., 360, 727 – 736.

Boothroyd, A. I., Sackmann, I. J., Fowler, W. A., 1991, Ap. J., 377, 318 – 329.

Sackmann, I. J., Boothroyd, A. I., Kraemer, K. E., 1993, Ap. J., 418, 457 – 468.