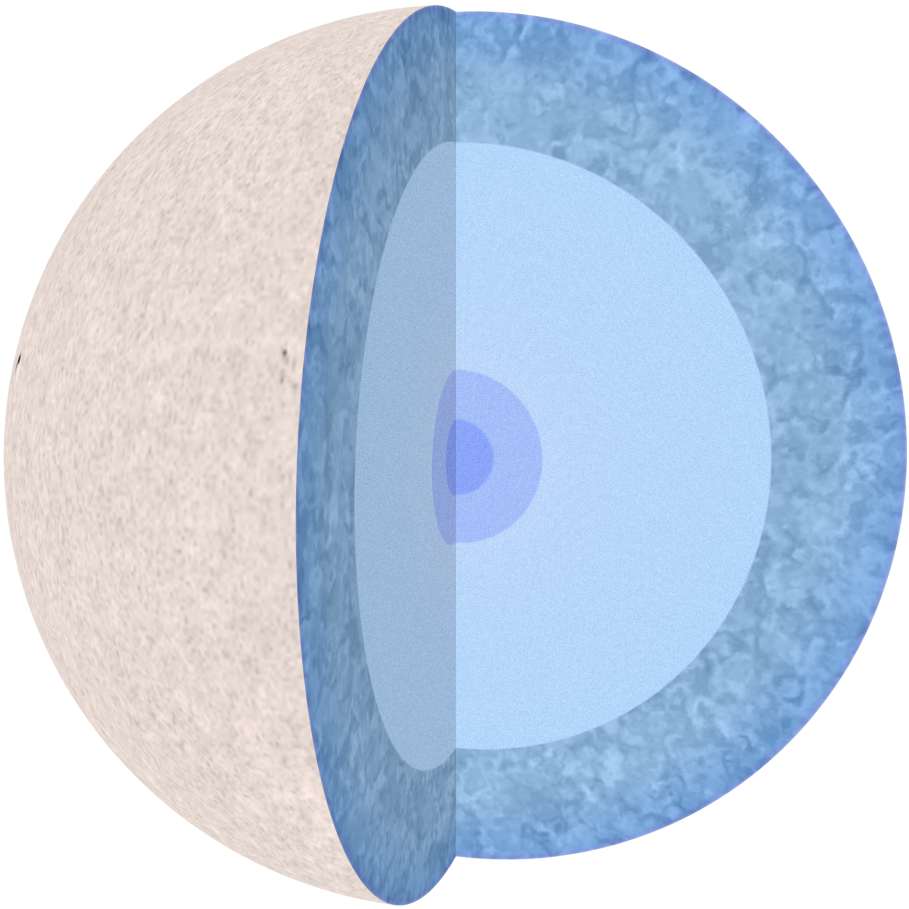
POVĚTROŇ

Královéhradecký astronomický časopis * ročník **27** * číslo **3/2019**



Obsah

strana

Miroslav Brož: *Modré Slunce* 3
Vojtěch Andrys: *Vývoj hvězdy o hmotnosti Slunce* 8
Jaromír Ciesla: *Sluneční hodiny 1. kvartálu roku 2019* 23
Jaromír Ciesla: *Sluneční hodiny 2. kvartálu roku 2019* 25

Titulní strana — Slunce je na povrchu bílé a uvnitř modré. K článku na str. 3.

Povětroň 3/2019; Hradec Králové, 2019.
Vydala: **Astronomická společnost v Hradci Králové** (2. 11. 2019 na 344. setkání ASHK)
ve spolupráci s **Hvězdárnou a planetáriem v Hradci Králové**
vydání 1., 28 stran, náklad 100 ks; dvouměsíčník, MK ČR E 13366, ISSN 1213–659X
Redakce: Miroslav Brož, Miloš Boček, Martin Cholasta, Josef Kujal,
Martin Lehký, Lenka Trojanová a Miroslav Ouhrabka
Předplatné tištěné verze: vyřizuje redakce, cena 35,– Kč za číslo (včetně poštovného)
Adresa: ASHK, Národních mučedníků 256, Hradec Králové 8, 500 08; IČO: 64810828
e–mail: ⟨ashk@ashk.cz⟩, web: ⟨http://www.ashk.cz⟩

Modré Slunce

Miroslav Brož

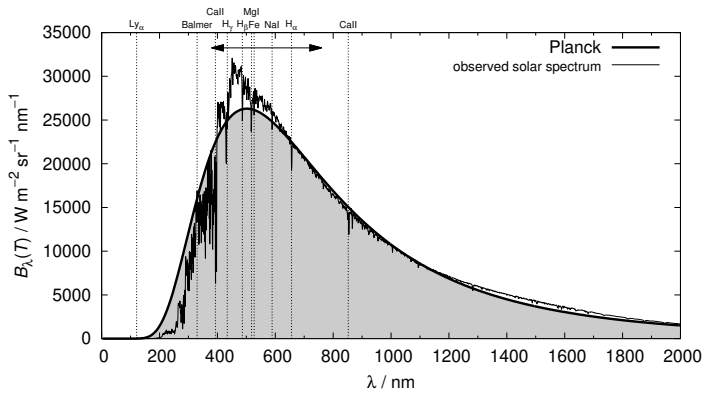
Slunce je modré. Tečka. Zdá se to „šílené“? Vždyť „všechny“ obrázky, všechny učebnice, všechny populární knihy o astronomii ukazují Slunce „vždy“ žluté na povrchu, přecházející do červena uvnitř, znovu do žluta, případně až do bíla ve středu. Kde je pravda?

Podívejme se nejprve na Slunce v poledne. Pravda bolí; světla je příliš mnoho. Proto si pomůžeme jedním ze tří způsobů: počkáme, až se Slunce ztlumí za mraky; uděláme do papíru milimetrový otvor a promítneme Slunce na jiný papír (*camera obscura*); zastíníme si oko dlaní a díváme se skrz prsty. Anebo můžeme jednoduše použít následující argument: „Sluneční světlo svítí na bílý papír, který je bílý, což znamená, že Slunce je bílé.“

Potvrzuje to i pozorované spektrum (obr. 1); blíží se spektru absolutně černého tělesa, pokud pomineme spektrální čáry, Balmerův skok, okrajové ztemnění, redistribuci mezi obory V $\rightarrow$ IR, netepelné UV záření atd. To znamená, že pro jeho přibližný popis lze použít Planckův zákon:

$$I_\lambda \doteq B_\lambda(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\mathrm{e}^{\frac{hc}{kT\lambda}} - 1} \,,$$

kde I_λ, B_λ označuje monochromatickou intenzitu záření (ve $\mathrm{W\,m^{-2}\,sr^{-1}\,nm^{-1}}$), T termodynamickou teplotu, h Planckovu konstantu, c rychlost světla ve vakuu, λ vlnovou délku, k Boltzmannovu konstantu; dosadíme za $T = 5\,780\,\mathrm{K}$, aby bolometrická intenzita $I = \int I_\lambda \mathrm{d}\lambda$ vycházela totožná.



Obr. 1 — Monochromatická intenzita I_λ v závislosti na vlnové délce λ pro pozorované spektrum Slunce (tence) v porovnání se spektrem absolutně černého tělesa o teplotě $T = 5\,780\,\mathrm{K}$ (tlustě). Svislými čarami jsou vyznačeny nejvýznamnější Fraunhoferovy spektrální čáry; šipkami rozsah (vakuových) λ viditelných okem. Data převzata z Gueymard (2004).

Vidíme, že maximum v λ je mezi 450 a 500 nm, v závislosti na tom, zda použijeme pozorované spektrum nebo Planckovu funkci; u pozorovaného navíc záleží na rozlišení, případně aktuální propustnosti atmosféry. Spektrum klesá na obě strany. Zohledníme-li zároveň citlivost lidského oka, která je při denním vidění (čípky) největší asi pro 550 nm a také klesá na obě strany, není divu, že výsledný vjem je bílá; možná trošičku, lehounce, nepatrně okrová.[1]

Obr. 2 — Barva Slunce spočtená dle spektra absolutně černého tělesa pro $T \doteq 5\,800$ K. Barevné složky v systému sRGB jsou $(255, 243, 234)$. Podle [3].

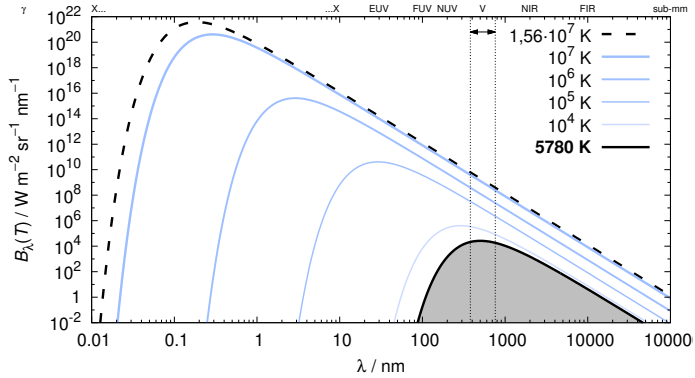
Podívejme se nyní na to, jak se spektrum mění s hloubkou. Jistou výhodou je, že nitro je blíže termodynamické rovnováze než atmosféra, čili tím spíše můžeme použít Planckův zákon; dokonce by měly mizet i spektrální čáry. Podle standardního modelu dosahuje teplota v centru $T_\mathrm{c} = 1{,}56 \cdot 10^7$ K (Paxton aj. 2015), tudíž si nakreslíme příslušná spektra (obr. 3).

Vidíme, že maximum je kdesi v rentgenovém oboru ($\lambda = 0{,}2$ nm, $E = hc/\lambda \doteq$ $\doteq 6$ keV).[2] Poměr maximálních intenzit je řádově 10^{17}, ale na tom nezáleží, protože poměr intenzit v *optickém* oboru je „jen“ asi 10^5. Spektrum v každém případě klesá s λ již od teplot 10^4 K, pak se jeho sklon dokonce vůbec nemění, což znamená, že barva zůstává stále stejná, tzn. modrá (viz obr. 4).

Obr. 4 — Barva pro teplotu $T \doteq 29\,800$ K. Barevné složky jsou $(159, 191, 255)$.

Profil teploty $T(R)$ vlastně ani příliš strmý není (obr. 5). Navíc je to v jistém smyslu kompenzováno poloměrem R, kde horké slupky mají menší objem, $V = 4\pi R^2 \mathrm{d}R$. Uvědomme si také, že to, co vidíme jako záření Slunce, neboli

1. Vnímání této barvy je ovlivněno řadou jevů: pozadím (bílé barvu ztmavuje; šedé by ji zesvětlovalo), úrovní osvětlení, barvou osvětlení, úhlem, stavem monitoru, stavem oka, použitým profilem ICC (sRGB), totéž pro váš prohlížeč, monitor, tiskárnu; proto nelze zaručit, že barvu vnímáte totožně.
2. Na skutečnosti, že při proton–protonovém řetězci vznikají anihilacemi pozitronů a elektronů fotony γ ($\lambda \doteq 0{,}002$ nm, $E = 511$ keV), zde nezáleží, protože tyto jsou záhy termalizovány, tzn. pohlceny, atd.

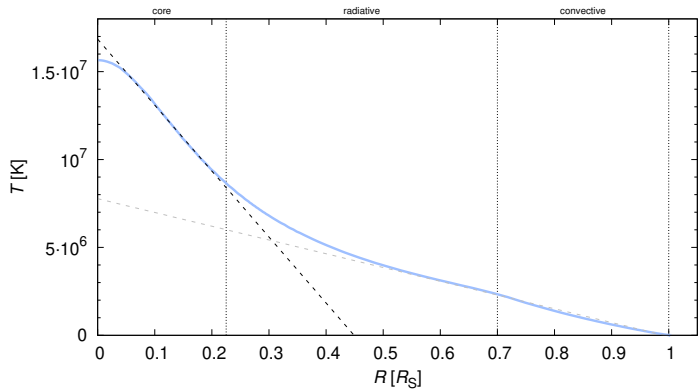


Obr. 3 — Planckovské spektrum pro velký rozsah teplot, $T = 5 \cdot 10^3$ až 10^7 K, od povrchu do středu Slunce.

bolometrický tok povrchem koule, $L_R \doteq L_\odot = 3{,}84 \cdot 10^{26}$ W, je mimo jádro konstantní. Jde však o nepatrný *rozdíl* mezi obrovskými toky do horního a do dolního poloprostoru! Konkrétně

$$L_\uparrow \doteq L_\downarrow = \iiint I_\lambda \mathrm{d}\lambda \cos\vartheta \mathrm{d}\omega \mathrm{d}S = 4\pi R^2 \pi B(T) = 4\pi R^2 \sigma T^4 \,,$$

což je např. pro $R = 0{,}5\, R_\odot$ rovno asi $2 \cdot 10^{37}$ W $\gg L_\odot$. Slunce v nitru svítí víc, než si dokážeme představit dle povrchu.



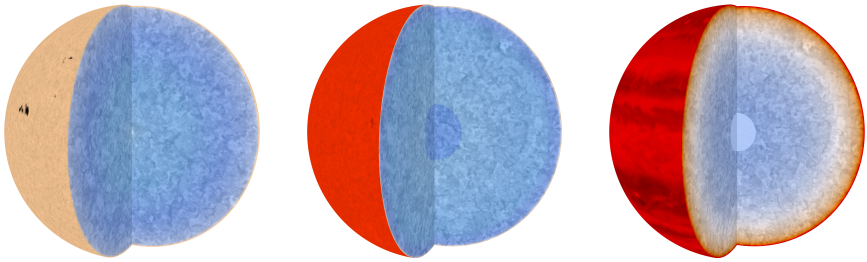
Obr. 5 — Profil teploty $T(R)$ v nitru Slunce. V jádře klesá přibližně lineárně, v konvektivní zóně též, v radiační zóně je navázání. Pouze ve fotosféře (nezobrazena, resp. za osou x) je pokles strmější kvůli úniku záření do meziplanetárního prostoru.

Vizualizace proto není přímočará. Prakticky totiž není možné zohlednit profil intenzity $I_\lambda(R)$, protože bílý povrch by se musel postupně měnit až na nepředstavitelně „bělejší“ střed ($255 \cdot 10^5 \simeq 10^7 \gg 255$); naopak černý povrch by nám asi nikdo neprominul ($255/10^5 \doteq 0{,}003 \doteq 0$). Namísto toho si představujme, že se oko vždy na danou slupku *akomoduje* a soustřeďme se pouze na její barvu, kterou odvozujeme dle [3].

Měrný výkon jaderných reakcí $\varepsilon_{\mathrm{nuc}}$ (v jednotkách $\mathrm{W\,kg^{-1}}$) je vyznačen koncentrickými slupkami, které jsou modré, modřejší a nejmodřejší, když je $\epsilon_{\mathrm{nuc}} > 10^{-4}$, 10^{-3} a $10^{-2}\,\mathrm{W\,kg^{-1}}$.[3] Otázka je, zda bychom v nitru okem neviděli i něco jiného než jednolitou modrou. Jednotlivé fotony X a γ, stejně jako p, n, e^-, e^+, α, atd. s energiemi řádu keV nebo MeV jsou totiž pronikavé a mohly by na sítnici nebo ve sklivci vytvářet jevy obdobné kosmikám na čipu CCD nebo čerenkovskému záření. Asi bychom tam neměli zírat dlouho.

Konvekce je vyznačena v místech, kde probíhá, šedými víry. Jejich přesná struktura dosud není známa, s výjimkou granulace na povrchu; třeba je možné, že víry směrem nahoru jsou jiné než dolů. Odpovídající teplotní kontrast ΔT by reálně patrně byl menší. V planetáriu je však potřeba kontrast přehnat kvůli vícenásobnému rozptylu na kopuli, který dopadá na jiná místa kopule. Výsledek je na titulním obrázku.

Jak vypadají jiné hvězdy? Podle obr. 6 je červený obr modrý, červený trpaslík také modrý, dokonce hnědý trpaslík modrý; teprve Jupiter je poněkud oranžový.



Obr. 6 — Vnitřní struktura červeného obra, hnědého trpaslíka a Jupiteru, o hmotnostech $M = 1$, 0,05 a $10^{-3}\,M_\odot$, poloměrech $R = 48$, 0,5 a 0,1 $R_\odot$; i když v tomto zobrazení se tělesa jeví stejná.

Pro digitální planetária jsme tímto způsobem zobrazili celý vývoj hvězd různých hmotností, a to ve standardním formátu fulldome 4K, 4096×4096 pixelů,

3. Pro srovnání, varná konvice má měrný výkon řádově $10^3\,\mathrm{W\,kg^{-1}}$, což je milionkrát více než Slunce; asi bychom neměli přemýšlet o termojaderné fúzi jako o „nejvýkonnějším“, ale spíše „nejobsažnějším“ zdroji. Důvodem je, že první reakce proton–protonového řetězce je velmi pomalá ($\tau = 10\,\mathrm{Gyr}$); jinak by Slunce doslova explodovalo (neexistovalo).

30 fps. Hvězdy mají vždy stejné měřítko, od protohvězdy po zbytek, a jsme od nich ve stejné vzdálenosti, aby nevznikala zbytečná mýlka. Pouze čas t (viz příslušný popisek) je nutné měnit nelineárně. Výpočet byl proveden programem Mesa (Paxton aj. 2015), vizualizace programem Povray. WWW adresa pro stažení je:

`http://sirrah.troja.mff.cuni.cz/~mira/proplanetaria/`.

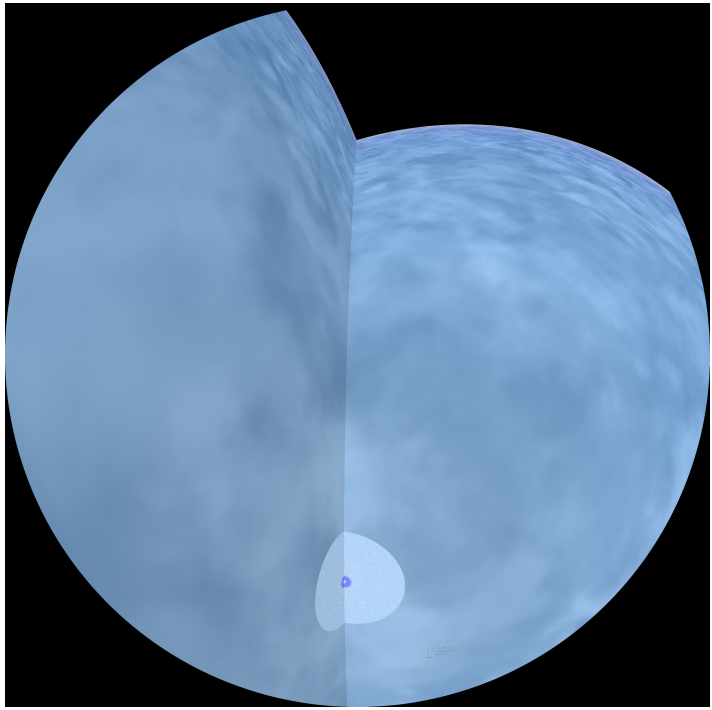
Sám za sebe musím říct, že vidět některé aspekty vývoje hvězd na vlastní oči je prostě úžasné. Popis jednotlivých fází vývoje lze dohledat v [1] nebo na str. 8.

[1] Brož, M. *Hydrodynamika v astronomii.* [online] [cit. 2019-10-10]. ⟨`http://sirrah.troja.mff.cuni.cz/~mira/hydrodynamika/`⟩.

[2] Gueymard, Ch. *The Sun's total and spectral irradiance for solar energy applications and solar radiation models.* Solar Energy, **74**, 6, 423–453, 2004.

[3] Charity, M. *What color are the stars?* [online] [cit. 2019-10-16]. ⟨`http://www.vendian.org/mncharity/dir3/starcolor/`⟩

[4] Paxton, B., Marchant, P., Schwab, J., Bauer, E. B., Bildsten, L., Cantiello, M., Dessart, L. aj. *Modules for Experiments in Stellar Astrophysics (MESA): Binaries, Pulsations, and Explosions.* Astrophys. J. Suppl., **220**, 15, 2015.



Obr. 7 — Týž červený obr jako na obr. 6, ale ve formátu fulldome.

Vznik hvězd obecně *

Na všech planetách vnitřní sluneční soustavy se nachází velké množství prvků, které byly pravděpodobně syntetizovány při výbuších supernov dlouho před vznikem Slunce. Slunce naopak nikdy nesloučí žádné těžší prvky než uhlík a kyslík — sice prvky pro vznik známého života důležité, ale ne dostačující — jelikož není dostatečně hmotné. Hmotnost hvězdy je rozhodující veličina určující její vývoj. Hmotnosti jsou přitom výsledkem gravitačního smrštění mezihvězdného plynu a prachu v oblacích, rozlišených na obří molekulová oblaka (GMC) až jednotlivé Bokovy globule (objevené ve čtyřicátých letech minulého století Bartholomeem Bokem). Obří molekulová oblaka o hmotnostech od 10^3 do 10^7 Sluncí, s průměrem 15 až 600 světelných let a hustotou 10^4 až 10^6 částic na krychlový centimetr, bývají často neprůhledná, jeví se nám jako temné mlhoviny (známé jsou například Barnard 33, Caldwell 99). U řady GMC jsou pozorována hustá jádra, která považujeme za místa vzniku nových hvězd.

Předpokládá se, že hustá část oblaku bývá zpočátku stabilní, kde síla gravitační v místech samotného oblaku se rovná *gradientu* tlaku plynu plus gradientu tlaku magnetického. Tato rovnováha může být narušena zářením z nedaleké hvězdy zahřívající plyn či rázovou vlnou blízké supernovy. Nastává pak určitá převaha gravitačního působení a smršťování oblaku. Za určitou dobu se vytvoří protohvězda obklopená oblakem a později protoplanetárním diskem. To, jak protohvězda přibírá hmotu z okolí, není příliš dobře objasněno. Navíc tyto objekty nelze snadno zanést do Hertzsprungova–Russellova (HR) diagramu, jelikož bývají stále zahaleny oblakem plynu, jenž pohlcuje většinu záření uvolněného z povrchu. Rostoucí teplota a uvolněné záření nejsou zatím důsledkem jaderného slučování, jelikož teplota, tlak a hustota jádra protohvězdy nedosáhly mezní hodnoty pro započetí tohoto děje. Avšak teplota i hustota neustále rostou, což je způsobeno především, případně pokračujícím, dopadáním plynu na povrch protohvězdy a gravitačním smršťováním.

Když protohvězda veškerý plyn ve svém bezprostředním okolí pohltí — pouze část zůstane v rotujícím protoplanetárním disku, kde se mezitím vytvářejí protoplanety — nebo až ho odfoukne, je již snadno viditelná a lze ji vynášet do HR diagramu.

Data z programu Mesastar *

Posuňme se k vývoji samotného Slunce, jenž se dosti liší od vývoje hvězd noční oblohy, které jsou mnohdy hmotnější a jasnější. Proto, abychom ho pocho-

pili, následuje popis různých parametrů měnících se v čase. Data užitá v grafech jsou generovaná programem Mesastar (Paxton aj. 2011, 2013, 2015) se vstupní hmotností hvězdy 1 $M_\odot$, abundancí ^{4}He 0,274 a metalicitou 0,01954. Pokusíme se stručně nastínit, co se děje ve hvězdě a jaká je budoucnost našeho Slunce. Simulace začíná před ustálením hvězdy na hlavní posloupnosti a končí po 13 miliardách let (Gyr) po vzniku. V každém grafu je v základu zahrnuto na 3 157 bodů (kromě detailů jednotlivých grafů, tam jich je samozřejmě méně, aby bylo vůbec možné rozlišit jednotlivé děje a změny). Vygenerovaný datový soubor byl importován do programu Libreoffice. Zde byly vyneseny sloupce v dokumentu do grafů. Grafická úprava byla provedena v programu Inkscape.

Užité zkratky *

Pro období ve vývoji Slunce jsou zavedeny různé zkratky, obvyklé též v literatuře:

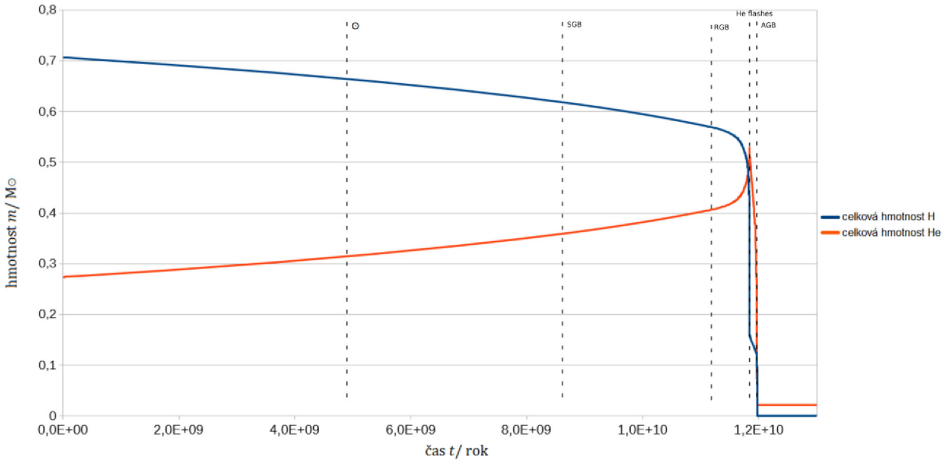
- **pre-MS**: anglicky pre-main-sequence, znamená období hvězdy před hlavní posloupností. Neprobíhají termonukleární reakce v jádře hvězdy.
- **MS**: anglicky main-sequence, znamená hlavní posloupnost, tedy dobu, po kterou je hvězda velmi stálá z důvodu pozvolného slučování vodíku v jejím jádře.
- **SGB**: anglicky subgiant branch, značí větev podobrů, na niž Slunce vstoupí asi v čase $t = 8{,}62$ Gyr. Vyznačuje se spotřebováním vodíku v centru a reakcemi ve slupkách.
- **RGB**: anglicky red giant branch, je větev červených obrů ($t = 11{,}2$ Gyr); expanze relativně chladné obálky, zvětšení poloměru.
- **He flash**: znamená období héliového záblesku v jádře hvězdy (trvají od $t_1 =$ $= 11{,}8428$ Gyr do $t_2 = 11{,}8448$ Gyr); náhlý začátek přeměn hélia.
- **HB**: anglicky horizontal branch, označuje období horizontální větve; probíhá syntéza jader hélia v jádře.
- **E-AGB**: anglicky early asymptotic giant branch, doba asymptotického obra ($t = 11{,}9345$ Gyr); spotřebování hélia v centru, reakce ve slupkách.
- **TP-AGB**: anglicky thermal pulses asymptotic giant branch, znamená období termálních pulsů v plášti hvězdy (od $t_1 = 11{,}96954$ Gyr do $t_2 = 11{,}96991$ Gyr).
- **NB**: anglicky nebula, česky planetární, obálková mlhovina; všechny slupky hvězdy jsou odvrženy.
- **WD**: anglicky white dwarf, postupné chladnutí bílého trpaslíka trvající až do 13 Gyr. Následně simulace končí.

Užité hodnoty *

- $M_\odot = 1{,}9885 \cdot 10^{30}\,\mathrm{kg}$ (dnešní hmotnost Slunce)
- $L_\odot = 3{,}828 \cdot 10^{26}\,\mathrm{W}$ (fotonový zářivý tok Slunce; dnešní)
- $t_\odot = 4{,}567\,\mathrm{Gyr}$ (stáří Slunce dle meteoritů)
- $1\,\mathrm{AU} = 149\,597\,871\,\mathrm{km}$ (střední vzdálenost Země a Slunce)
- $T_{\mathrm{ef}} = 5\,780\,\mathrm{K}$ (efektivní teplota sluneční fotosféry; dnešní)
- $R_\odot = 696\,392\,\mathrm{km}$ (poloměr Slunce; dnešní)
- $g_\odot = 274\,\mathrm{m\,s^{-2}}$ (gravitační zrychlení ve sluneční fotosféře; dnešní)

Vývoj Slunce *

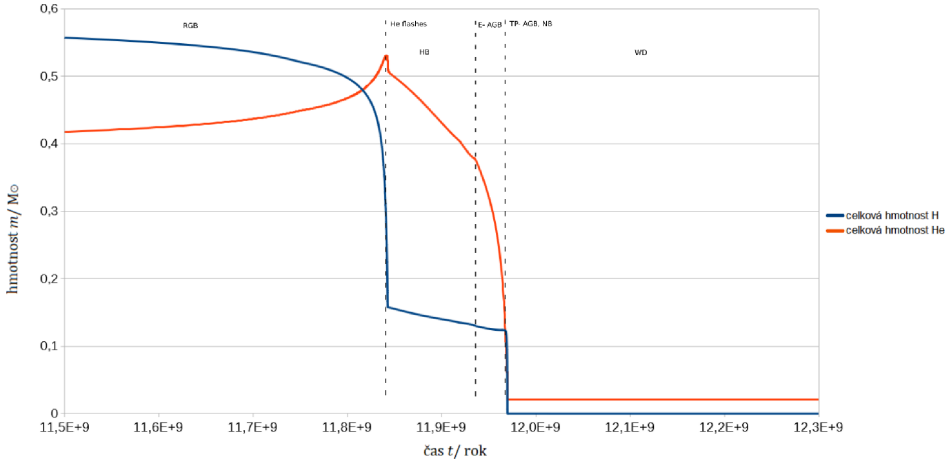
Nyní již popis řady jevů odehrávajících se ve Slunci. Nejdříve je vložen graf se stručným popiskem; po grafu následuje komentář. V grafech jsou vždy uvedeny popisky os x, y; případná legenda se nachází vpravo. Grafy jsou dodatečně opatřeny přerušovanými či plnými čarami; ty značí vstup hvězdy do další vývojové fáze. U přerušovaných čar jsou pokaždé uvedeny náležité zkratky pro vývojová období.



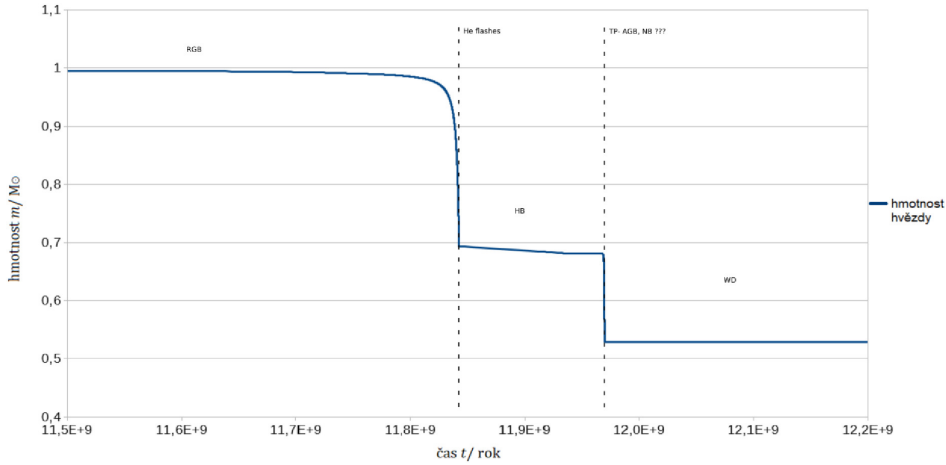
Obr. 8 — Celková hmotnost vodíku a hélia ve hvězdě v závislosti na čase (Gyr).

Komentář k obr. 8. Už protohvězda je ze značné části tvořena héliem, které bylo sloučeno po Velkém třesku a ve hvězdách předchozích generací. Zároveň celkové hmotnosti prvků H a He na začátku ještě nedávají celkovou hmotnost hvězdy,

tedy $1\,M_\odot$. K tomuto součtu je totiž třeba přičíst ještě hmotnost hmotnějších prvků, která odpovídá přibližně 2 % celkové hmotnosti hvězdy.



Obr. 9 — Detail celkové hmotnosti vodíku a hélia ve hvězdě v závislosti na čase od 11,5 Gyr do 12,3 Gyr.

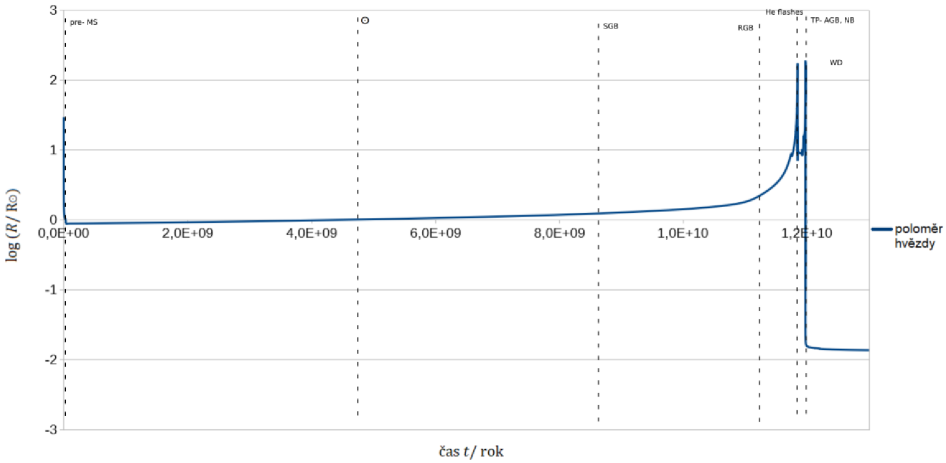


Obr. 10 — Detail hmotnosti hvězdy v závislosti na čase od 11,5 Gyr do 12,2 Gyr.

Komentář k obr. 9. Celkové hmotnosti vodíku a hélia se rovnají v čase asi 11,82 Gyr. Na konci fáze RGB nastává prudký pokles množství vodíku, spojený

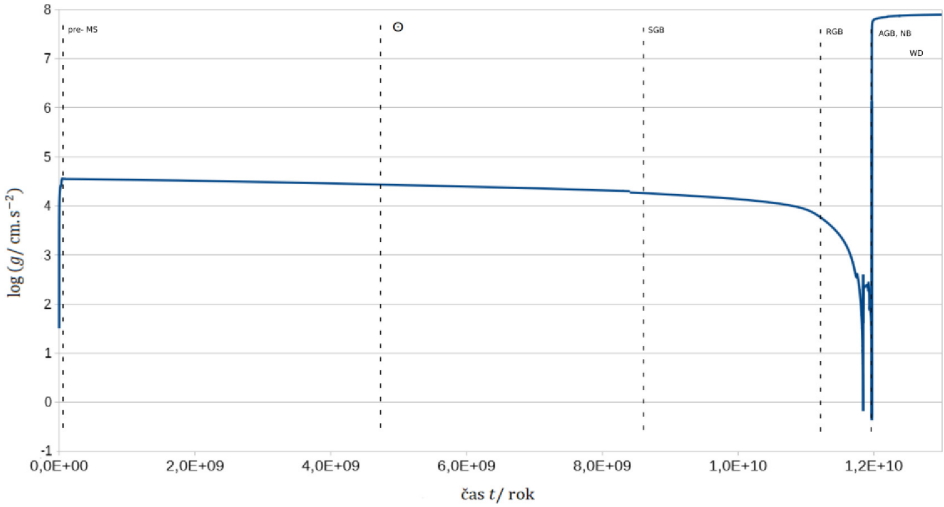
se smrštěním jádra a růstem jeho teploty a zvýšením měrného výkonu reakcí vodíku ve slupkách. Následně ve fázi HB klesá množství hélia, kvůli dosažení mezní teploty, hustoty a tlaku nutných pro jeho fúzi. Obě hodnoty se opět protínají v období termálních pulsů (TP-AGB), kdy již hvězda spotřebovává poslední dostupné zásoby jader těchto prvků, jež se nacházejí hlavně v koncentrických vrstvách. Hélium se přitom přeměňuje na uhlík a kyslík.

Komentář k obr. 10. Po dobu 11,6 Gyr je hmotnost, až na malý úbytek kvůli hvězdnému větru, velmi stálá. Silný hvězdný vítr začíná vanout až při přechodu do fáze RGB. Takový vítr by doslova odvál dnešní atmosféru Země. Venuše už asi sotva v té době bude existovat, protože zmiňovaný červený obr bude zasahovat až k její oběžné dráze. Druhý velký úbytek hmotnosti je ve fázi AGB při termálních pulsech a souvisí se vznikem obálkové (planetární) mlhoviny.



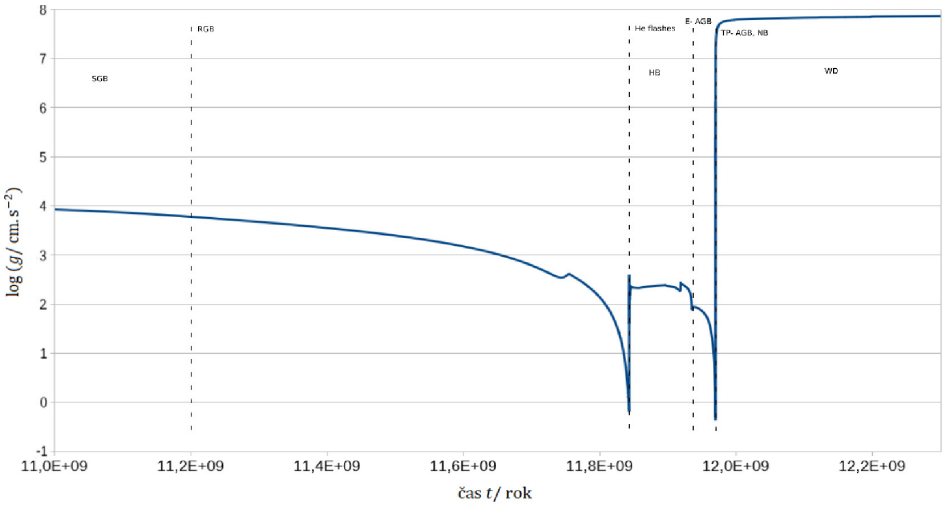
Obr. 11 — Změna poloměru hvězdy v závislosti na čase (Gyr).

Komentář k obr. 11 a 12. Jako další budou popsány grafy poloměru a gravitačního zrychlení. Grafy jsou umístěny za sebou, jelikož spolu přímo souvisejí, což vyplývá ze vztahu pro gravitační zrychlení na povrchu tělesa, $g = \frac{GM}{R^2}$, kde G označuje gravitační konstantu s hodnotou $6{,}67 \cdot 10^{-11}\,\mathrm{m^3\,kg^{-1}\,s^{-2}}$, M je hmotnost tělesa a R je poloměr tělesa (obvykle oblasti fotosféry). Dříve, než se protohvězda ustálí na hlavní posloupnosti (MS), dojde k jejímu značnému zmenšení. Hvězda se zmenší během 30 milionů let (Myr) téměř padesátkrát. To je způsobeno poměrně rychlým gravitačním smršťováním, protože v nitru hvězdy před hlavní posloupností ještě nedošlo k započetí jaderného slučování prvků. Obálka „stálice“ se pak až do období RGB zvětšuje. Dnes je na povrchu Slunce gravitační zrychlení $274\,\mathrm{m\,s^{-2}}$, na povrchu bílého trpaslíka pak dosáhne až $820\,000\,\mathrm{m\,s^{-2}}$, neboť se



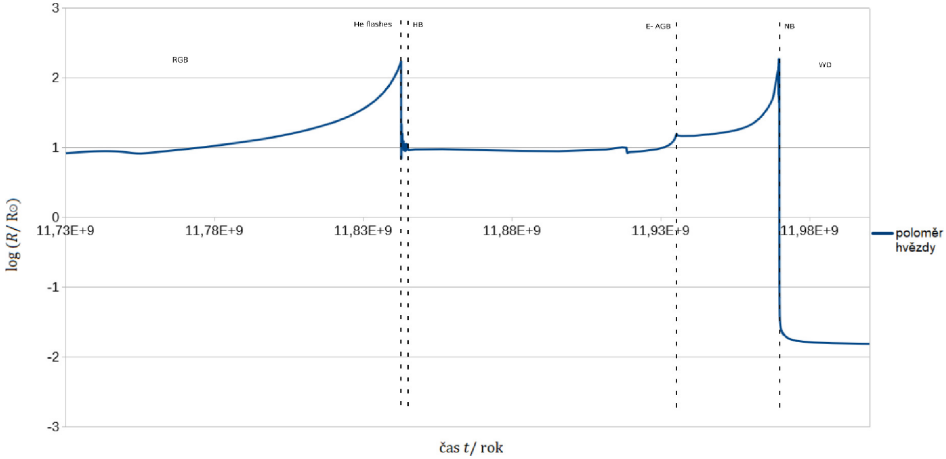
Obr. 12 — Změna gravitačního zrychlení na povrchu hvězdy v závislosti na čase (Gyr).

jedná o velmi kompaktní objekt. Vnější slupky hvězdy se během jejích pozdních fází (RGB, AGB) dvakrát velmi výrazně zvětší, a to až na 0,8 AU, což souvisí s možným zánikem Země. Ta ovšem v té době již bude dávno neobyvatelná.



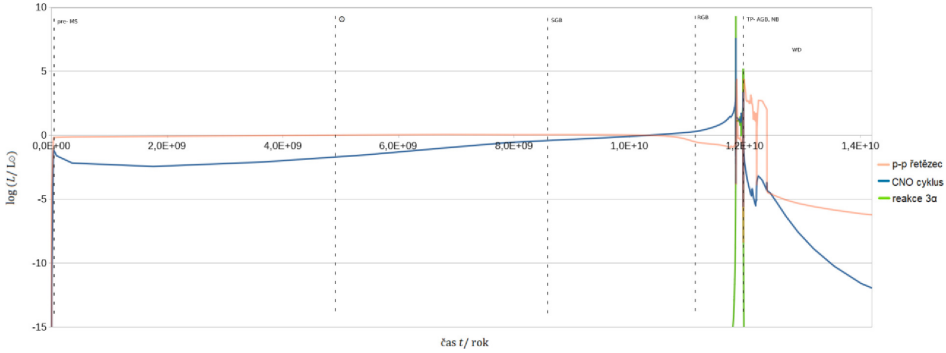
Obr. 13 — Detail změny gravitačního zrychlení v závislosti na čase od 11 Gyr do 12,3 Gyr.

Komentář k obr. 13. Na detailech v časech 11,75 Gyr a 11,93 Gyr jsou vidět výchylky křivky. V prvním případě se jedná o závěr trvání fáze RGB. Ve druhém pak přechod do období asymptotického obra.



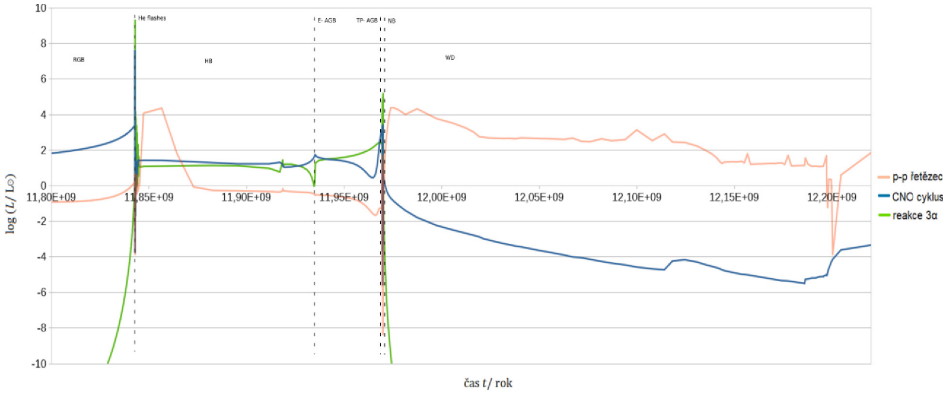
Obr. 14 — Detail změny poloměru v čase od 11,73 Gyr do 12 Gyr.

Komentář k obr. 14. Po prvním zvětšení na vrcholu RGB se obří hvězda opět zmenší a přejde do poklidnější fáze HB, avšak po druhém zvětšení je až 17 % hmoty ztraceno v důsledku silného hvězdného větru podpořeného termálními pulsy, čímž postupně vzniká obálková (planetární) mlhovina s pozůstalým kompaktním bílým trpaslíkem v jejím středu.



Obr. 15 — Změna zářivého výkonu jaderných syntéz v čase (Gyr).

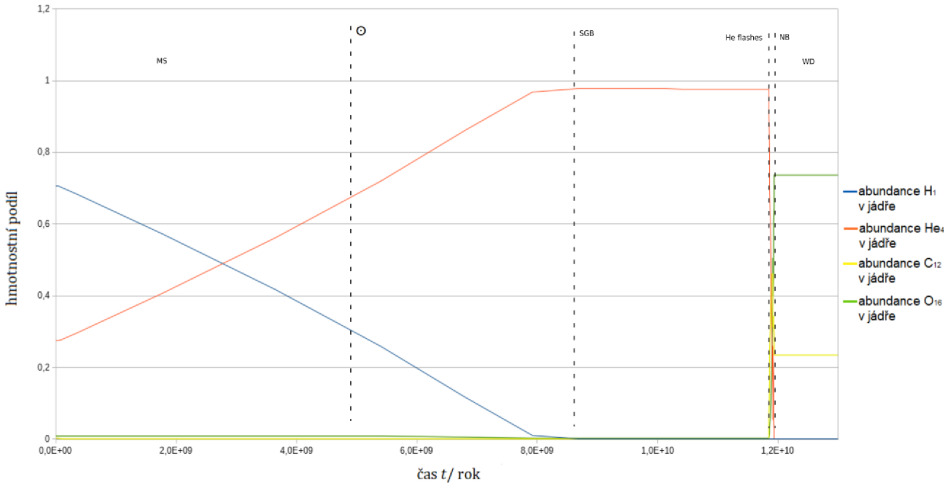
Komentář k obr. 15. Po dobu, kdy je stálice na hlavní posloupnosti, je hlavním původcem zářivého výkonu a udržování gradientu tlaku proton–protonový řetězec. Ten se však mění při přechodu do SGB na CNO cyklus. Jádro hvězdy je v období podobra tvořeno především degenerovaným héliem a slučování vodíku probíhá v okolních slupkách.



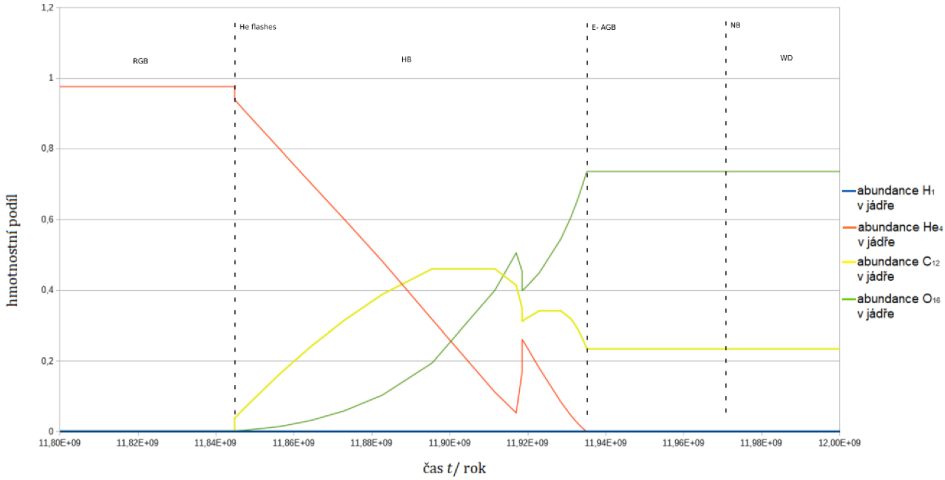
Obr. 16 — Detail změny zářivého výkonu jaderných syntéz v čase 11,8 Gyr až 12,22 Gyr.

Komentář k obr. 16. Přibližně v čase 11,84 Gyr překročí teplota jádra hranici 100 MK, protože degenerované héliové jádro (na rozdíl od jádra hvězdy MS) není teplotně regulováno. Tím je započata fúze $^4_2$He na $^{12}_6$C, ale jelikož tato reakce označovaná 3α je silně teplotně závislá, nastává řetězový proces. Během velmi krátké doby se ve Slunci vyprodukuje obrovské množství záření, to je však téměř zcela pohlceno okolními vrstvami. Jádro se opět zvětší, obálky naopak zmenší. Po dalších 80 Myr se odehrává reakce 3α v jádře a CNO cyklus i proton–protonový řetězec v okolních vrstvách. Přechod do fáze E-AGB je vyvolán vyčerpáním hélia v jádře hvězdy, všechny tři druhy termojaderných reakcí probíhají od té doby mimo uhlíkové a kyslíkové jádro. Termální pulsy jsou krátkodobé děje, které se odehrávají asi 4 Myr. Jde o zážehy reakce 3α posledních slučovatelných atomů $^4_2$He. Není-li možné, aby probíhaly tyto reakce, dochází k přechodu na bílého trpaslíka. Značně výkonné reakce proton–protonového řetězce po 11,98 Gyr probíhají již v povrchových kulových vrstvách vodíku na smršťujícím se bílém trpaslíkovi.

Komentář k obr. 17. Na tomto grafu je snad nejlépe vidět přechod hvězdy do fáze podobra (SGB), přičemž hmotnostní podíl jader $^4_2$He roste pravidelně, dokud je v jádře dostatek $^1_1$H, čili do konce hlavní posloupnosti. RGB přechod tu není poznat vůbec.

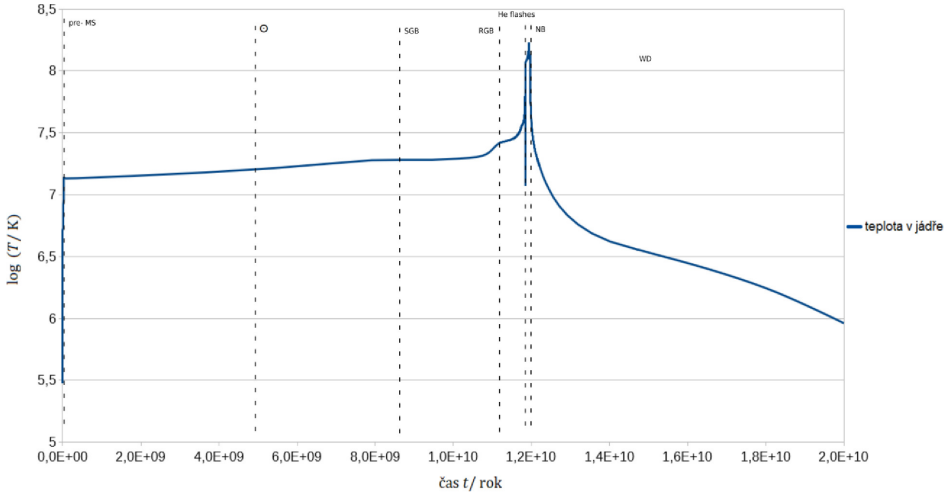


Obr. 17 — Měnící se hmotnostní podíl prvků v centru v závislosti na čase (Gyr).

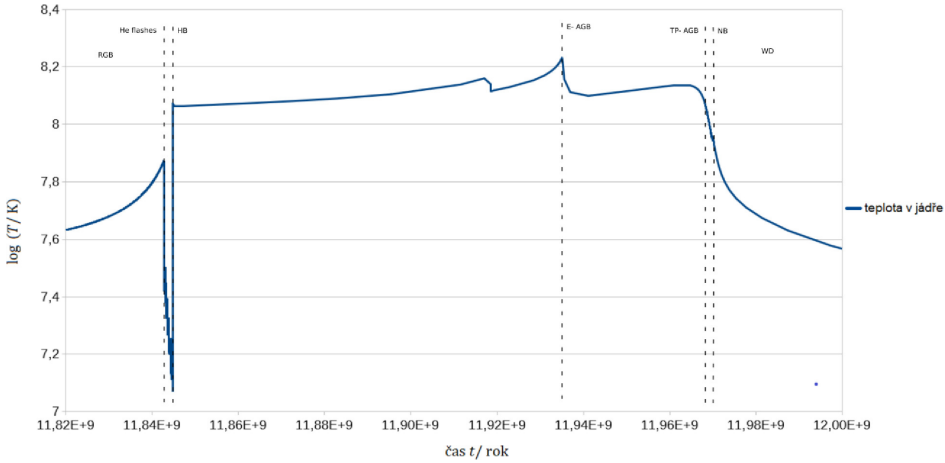


Obr. 18 — Detail měnícího se hmotnostního podílu prvků v centru v čase 11,8 Gyr až 12 Gyr.

Komentář k obr. 18. Abundance hélia začne klesat až po prvních reakcích 3α v čase 11,8428 Gyr. V čase 11,915 Gyr dojde k promíchání prvků v jádře s okolními vrstvami, v nichž probíhá konvekce (turbulentní proudění), což zvýší podíl $^4_2\mathrm{He}$. Ještě následujících 20 Myr dochází ke slučování. Je dobře vidět, že bílý trpaslík je tvořen výhradně plazmatem $^{12}_{6}\mathrm{C}$ a $^{16}_{8}\mathrm{O}$.



Obr. 19 — Změna teploty v centru hvězdy v závislosti na čase (Gyr).

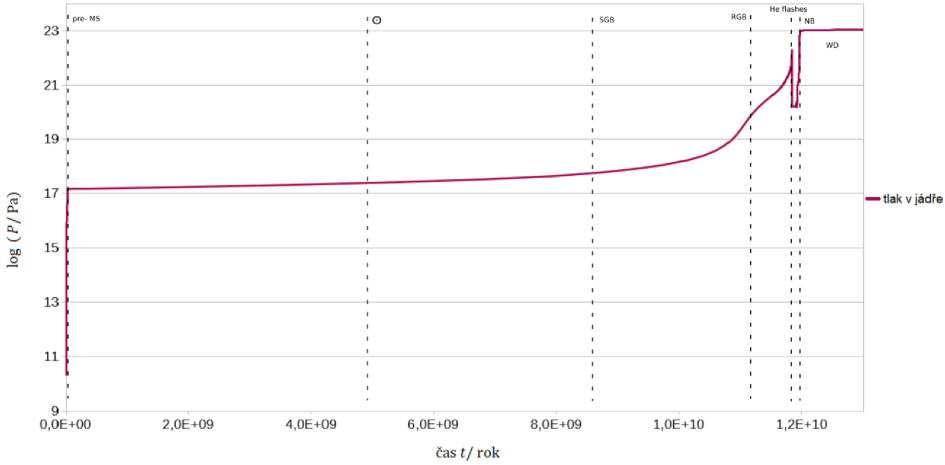


Obr. 20 — Detail změny teploty v centru od 11,82 Gyr do 12 Gyr.

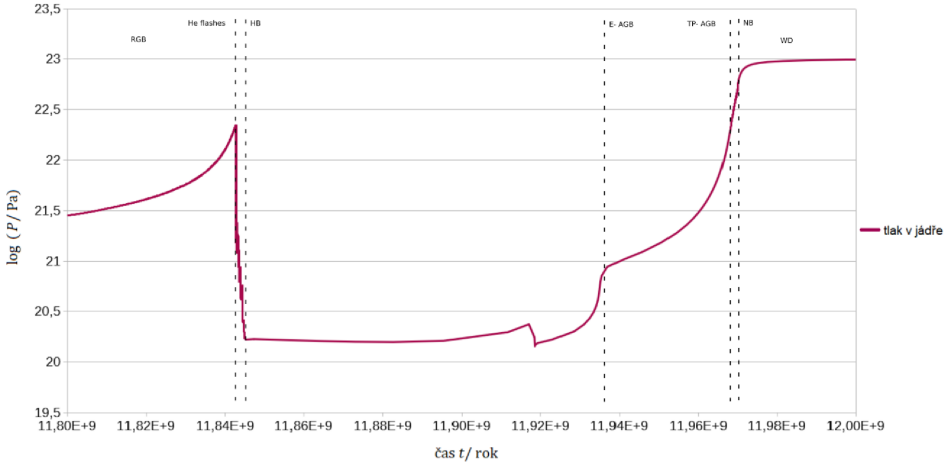
Komentář k obr. 19. K největšímu vzrůstu teploty dochází ve fázi pre-MS před ustálením stavu na hlavní posloupnosti. Teplota v centru se během krátké doby změní z přibližně 380 000 K na 15 MK, což je důležité pro započetí syntézy jader vodíku. Na hlavní posloupnosti stoupá teplota jádra poměrně málo, po přechodu do fáze SGB se i stabilizuje, avšak před postupem na větev červených obrů začne opět stoupat. Stoupání následně zrychluje po rozepnutí obálek červeného obra.

Naopak jádro v podobě bílého trpaslíka se během 7 Gyr ochladí kondukcí (vedením) o pouhý jeden řád.

Komentář k obr. 20. Po posledním héliovém záblesku v jádře hvězdy v době 11,8448 Gyr teplota kvůli expanzi jádra klesá. Pak opět narůstá, což značí vstup na horizontální větev, kde se přeměňuje $^4_2$He. Poslední význačný vzrůst teploty se odehrává při kontrakci jádra a expanzi obálek asymptotického obra.



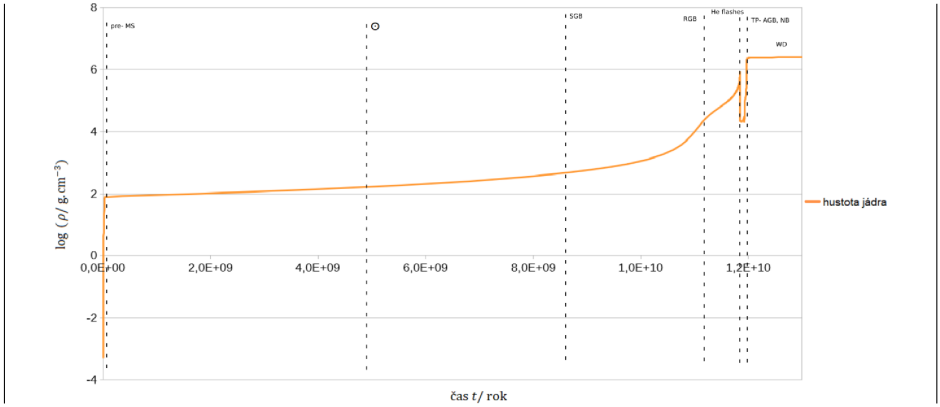
Obr. 21 — Tlak v centru hvězdy v čase (Gyr).



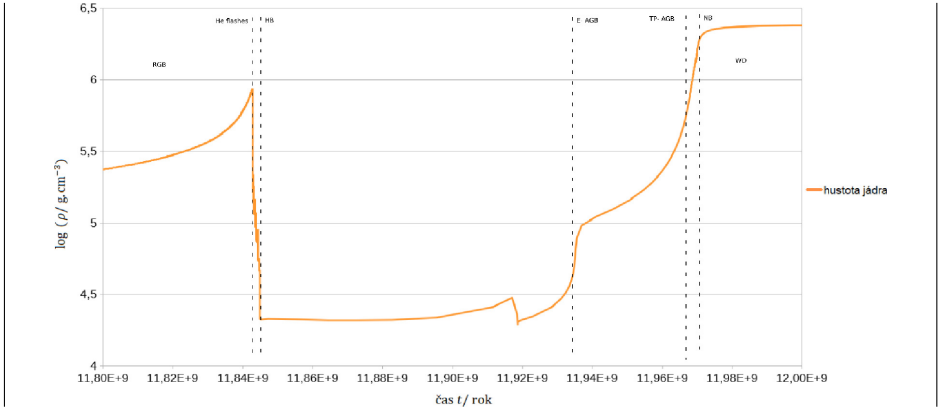
Obr. 22 — Detail změny tlaku v centru od 11,8 Gyr do 12 Gyr.

Komentář k obr. 21. Nástup hvězdy na hlavní posloupnost je provázen navýšením centrálního tlaku v jádře o 7 řádů. I tlak, stejně jako například teplota či poloměr, téměř neustále vzrůstá. To je důkaz, že hvězdy se téměř neustále hroutí. Tlak, který je v centru bílého trpaslíka, je však po celé miliardy let jen málo klesající (asi 3 setiny řádu za 10 Gyr).

Komentář k obr. 22. Po héliových záblescích dojde k náhlému poklesu tlaku kvůli zvětšení jádra. Po následujících 75 Myr je tlak poměrně stálý, což odpovídá stabilitě HB. Znovu narůstá, když zůstane už jen degenerované uhlíkové a kyslíkové jádro, které se znovu začne smršťovat, což má za následek rozepnutí obálek a přechod do fáze asymptotického obra.

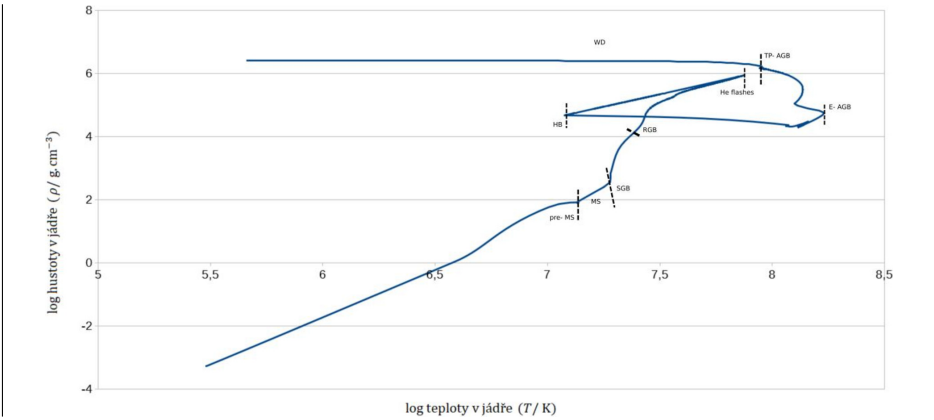


Obr. 23 — Měnící se hustota v centru hvězdy v čase (Gyr).



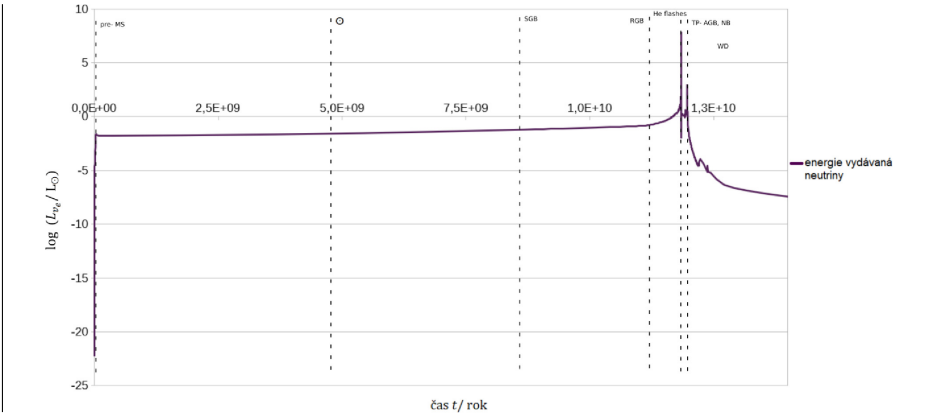
Obr. 24 — Detail měnící se hustoty v centru od 11,8 Gyr do 12 Gyr.

Komentář k obr. 23 a 24. Hustota souvisí s tlakem, proto jsou si tyto dva grafy podobné. V podstatě jsou na sobě závislé, nemění-li se zároveň teplota. Bílý trpaslík má hustotu asi $\varrho = 6 \cdot 10^9\,\mathrm{kg\,m^{-3}}$, což je stále o přibližně 8 řádů méně, než mívá neutronová hvězda.

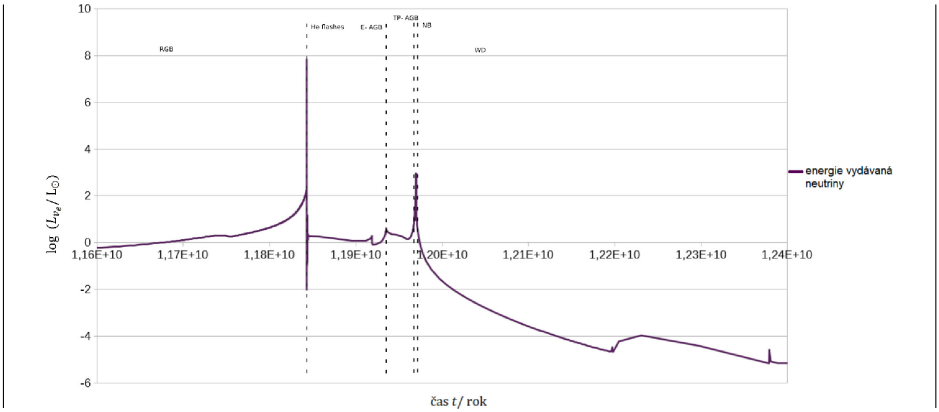


Obr. 25 — Hustota jádra v závislosti na teplotě jádra.

Komentář k obr. 25. Nejdelší úseky na grafu znázorňují největší změny, ačkoliv často trvají jen krátkou dobu. MS se zde jeví jako nejkratší (nejstabilnější) ze všech fází. Lépe než jinde tu vyniká vývoj hvězdy před hlavní posloupností, přičemž změna o jeden řád hustoty jádra kolabující protohvězdy se rovná vzrůstu teploty jádra protohvězdy o řády tři.



Obr. 26 — Změna zářivého výkonu neutrin v závislosti na čase (Gyr).



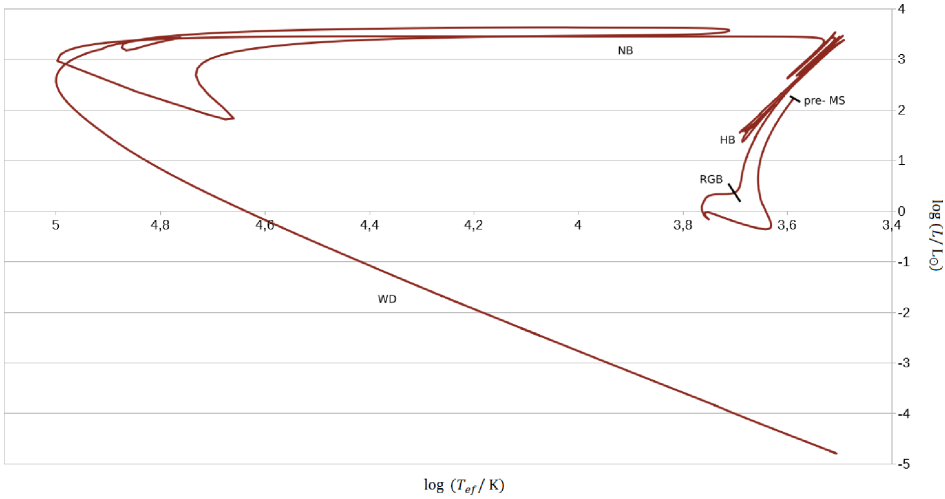
Obr. 27 — Detail změny zářivého výkonu neutrin od doby 11,6 Gyr do 12,4 Gyr.

Komentář k obr. 26 a 27. Existence neutrina (z italštiny s významem malý neutron) byla předpovězena Rakušanem Wolgangem Paulim v roce 1930. První jeho měření se podařilo v roce 1956 dvojici fyziků Clydu Cowanovi a Fredericku Reinesovi. Tyto částice interagují pouze slabou jadernou silou a velmi málo gravitačně, jelikož jejich hmotnost je jen asi $5{,}7 \cdot 10^{-37}$ kg. Fyzikové rozlišují 3 základní druhy neutrin, přičemž volně se pohybující neutrino tyto tři stavy v čase různě mění (tzv. oscilace neutrin). Vznikají při některých dějích, známý je β rozpad, a ve hvězdách jsou uvolňována termojadernou fúzí. Až na sotva patrný nárůst zářivého výkonu po započetí jaderné syntézy v jádře protohvězdy o dvacet dva řádů, se během hlavní posloupnosti a větve podobrů produkce neutrin zvyšuje jen mírně. Období héliových záblesků v jádře hvězdy znamená na krátký časový úsek až o deset řádů vyšší výdej energie neutriny, než je tomu dnes. Klesá vždy, když dochází k poklesu míry slučování jader prvků ve hvězdě.

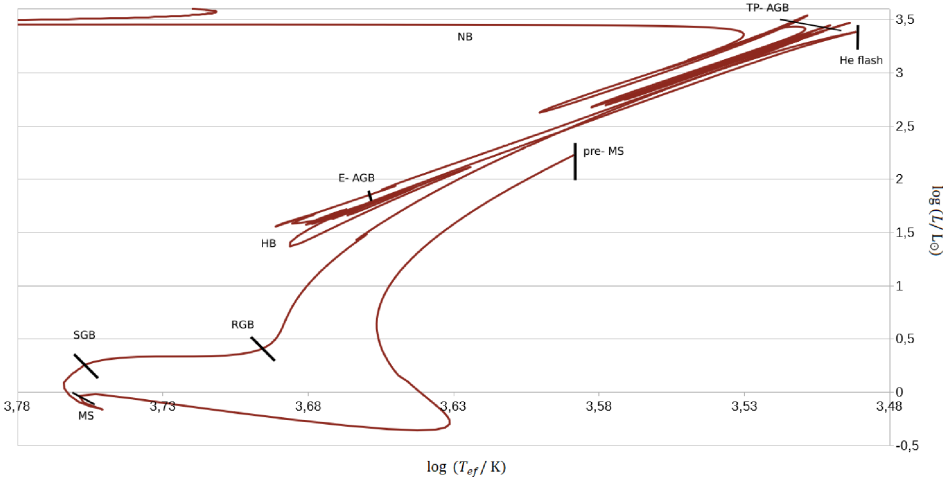
Komentář k obr. 28. Mnohem používanější je HR diagram pro mnoho hvězd najednou, tento diagram se ale týká konkrétně Slunce. Začíná poznámkou pre-MS a končí chladnutím bílého trpaslíka u nejnižší zanesené hodnoty zářivého výkonu.

Komentář k obr. 29. Opět dobře viditelné je zde zhroucení protohvězdy. Krátký se jeví úsek hlavní posloupnosti, kdy se oproti jiným fázím mění zářivý výkon jen málo. Poté rychle chladnoucí povrch podobra přechází v rozepnutí obálek červeného obra. Horizontální větev i vstup hvězdy na větev asymptotických obrů jsou, co se týče detailů diagramu, hůře pozorovatelné. Podstatné jsou však tři termální pulsy s nejvyšším zářivým výkonem na celém diagramu. Čtvrtý termální puls o efektivní teplotě asi 5 100 K a se zářivým výkonem přibližně 3 200 Sluncí již dává vzniknout obálkové mlhovině.

Závěrečným HR diagramem celý výčet končí. Program Mesastar ovšem generuje mnohem více dat o hvězdách. Celkem dokáže zahrnout přes 120 veličin



Obr. 28 — Hertzsprungův–Russellův diagram pro Slunce.



Obr. 29 — Detail Hertzsprungova–Russellova diagramu pro Slunce.

popisujících vývoj hvězd, z nichž tady nebyla zmíněna celá řada. Například to jsou veličiny jako počet vrstev v plášti, konvektivita vrstev, chemické složení fotosféry i jádra, atd. To vše dohromady dokáže poměrně věrohodně popsat vývoj hvězdy s danými, doufejme reálnými vstupními parametry.

[1] Paxton, B., Bildsten, L., Dotter, A., Herwig, F., Lesaffre, P., Timmes, F. *Modules for Experiments in Stellar Astrophysics (MESA).* Astrophys. J. Suppl., **192**, 3, 2011.
[2] Paxton, B., Cantiello, M., Arras, P., Bildsten, L., Brown, E. F., Dotter, A., Mankovich, Ch., Montgomery, M. H., Stello, D., Timmes, F. X., Townsend, R. *Modules for Experiments in Stellar Astrophysics (MESA): Planets, Oscillations, Rotation, and Massive Stars.* Astrophys. J. Suppl., **208**, 4, 2013.
[3] Paxton, B., Marchant, P., Schwab, J., Bauer, E. B., Bildsten, L., Cantiello, M., Dessart, L. aj. *Modules for Experiments in Stellar Astrophysics (MESA): Binaries, Pulsations, and Explosions.* Astrophys. J. Suppl., **220**, 15, 2015.

Sluneční hodiny 1. kvartálu roku 2019

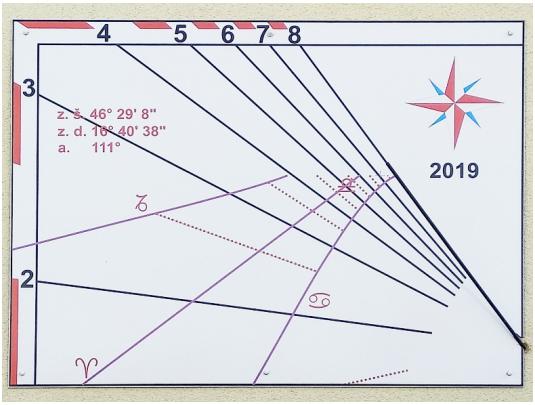
Jaromír Ciesla

Během prvního kvartálu roku 2019 přibylo do našeho katalogu slunečních hodin pouhých 12 nových záznamů, i tak byl ale výběr velmi náročný. Z domácích přírůstků se podařilo nakonec vybrat dva zástupce, kteří splňují požadovaná kritéria.

Na druhém místě skončily polární prstencové hodiny z Prahy 7, Holešovic. Zhotovení prstencových slunečních hodin není moc náročné a při přesně provedené práci za dodržení základních pravidel ukazují čas spolehlivě. Číselník hodin je vynesen na ocelovém pásu stočeném do prstence. Jednotlivé hodinové značky jsou vynesené v rozestupech 15°. Osou prstence prochází stínový ukazatel. U hodin je důležité správné naklonění, aby ukazatel byl rovnoběžný se zemskou osou a číselník ležel rovnoběžně se zemským rovníkem. Pokud jsou hodiny správně instalované, leží 12. hodina číselníku v rovině místního poledníku. Hodiny ukazují pravý místní sluneční čas (PMSČ). Jsou umístěné na střešní zahradě budovy Národního zemědělského muzea, v květinovém záhonu, aby svojí přítomností připomínaly plynutí času.

Obr. 30 — Praha 7, Holešovice, Kostelní 44 (katalogové číslo 07 11).

Na první místo se dostaly svislé sluneční hodiny z Boskovic. I když na první pohled vypadají velmi jednoduše, rozhodně stojí za detailní průzkum. První, co nás při bližším pohledu na číselník těchto hodin zaujme, je rozložení hodinových čar, které se sbíhají nad pravým dolním rohem číselníku, ze kterého vychází ukazatel. Další pozoruhodností je umístění ukazatele, který se směrem nahoru od stěny vzdaluje. Vysvětlení je prosté: ukazatel je rovnoběžný se zemskou osou a azimut stěny je 111°, takže stěna je natočena přibližně zsz. směrem. Pokud se o takovou zeď opřeme pravým ramenem, bude se severní nebeský pól nacházet před námi, asi 50° vysoko na obloze. A právě do toho místa ukazuje konec ukazatele. Na číselníku jsou vyznačené tři datové křivky. Horní je pro zimní slunovrat, střední pro jarní a podzimní rovnodennost a spodní pro letní slunovrat. Jednotlivé křivky jsou označeny znaky zvěrokruhu. Podle místa mezi hodinovými čarami, ve kterém končí jednotlivé datové čáry, lze odvodit, v kolik hodin zapadá Slunce v danou roční dobu. Při použití šikmého ukazatele odečítáme čas z polohy stínu ukazatele mezi hodinovými čarami. Dobu rovnodenností, slunovratů či mezi nimi indikuje konec stínu ukazatele.



Obr. 31 — Boskovice, Ludvíka Vojtěcha 2257/48 (BK 36).

Ze tří zahraničních přírůstků byl nakonec vybrán jen jeden zástupce. Na první místo se dostaly velice zajímavé polární prstencové hodiny, které se nacházejí asi 50 km sz. od Karlových Varů, nedaleko kosmonautického muzea v Muldenhammeru v Německu. Hodiny jsou tvořené dvěma oblouky, z nichž jeden leží v rovině rovnoběžné s rovníkem a druhý v rovině místního poledníku. Číselník je vyznačen na rovníkovém oblouku v římských číslicích v rozsahu VI–XII–VI a se značkami po půlhodině. Jako ukazatel slouží ocelový prut natažený mezi konci poledníkového oblouku, jehož jižní konec zdobí model Země a severní konec letící raketa.

Obr. 32 — Muldenhammer, Německo (DE SC 96).

Sluneční hodiny 2. kvartálu roku 2019

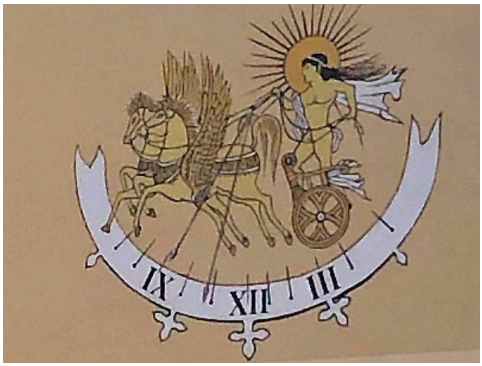
Jaromír Ciesla

Během druhého kvartálu přibylo v katalogu slunečních hodin 36 nových záznamů. Konstrukčně zajímavé provedení rovníkových hodin, které se umístily na prvním místě, můžeme spatřit v parčíku naproti obecnímu úřadu v obci Medlov, ležící asi 20 km ssz. od Olomouce. Jak z názvu hodin vyplývá, leží plocha číselníku hodin v rovině rovníku. Číselník je vynesen na její horní ploše. Očíslované jsou sudé hodiny, pro liché hodiny je použita značka. Pracovní rozsah je od šesté hodiny ranní do šesté odpolední. U hodin je použit kolmý ukazatel. U rovníkových slunečních hodin bývají používané dva číselníky. Jeden je na horní, severní straně desky a druhý na spodní, jižní straně desky. Je to z toho důvodu, že se Slunce zjevně pohybuje po ekliptice a dvakrát do roka překračuje rovinu rovníku. Když se Slunce nachází nad rovinou rovníku, v době od jara do podzimu, osvětluje horní stranu desky, spodní číselník je nefunkční a naopak. V okamžicích rovnodenností se stín ukazatele promítá nad oběma stranami až do nekonečna.

Jak vznikají sluneční hodiny, nám zdokumentovaly snímky pořízené během vykreslování svislého číselníku v obci Chotýš, která ležící asi 4 km sv. od Kostelce nad Černými lesy. Ze snímku je již patrný vzhled číselníku. Ukazatel zatím chybí. I když není číselník hotový, je zřejmé, že kromě hodinových rysek bude obsahovat i datové křivky. Střízlivé barevné podání bude lahodit oku. Pokud by se do soutěže dostaly snímky již kompletních hodin, věřím, že by měly velkou šanci na čelní umístění. Zhotoviteli jsou Miloš Nosek, firma A. CH. K. písmomalíři a p. Urbánek.

Obr. 33 — Medlov (katalogové číslo OC 76).

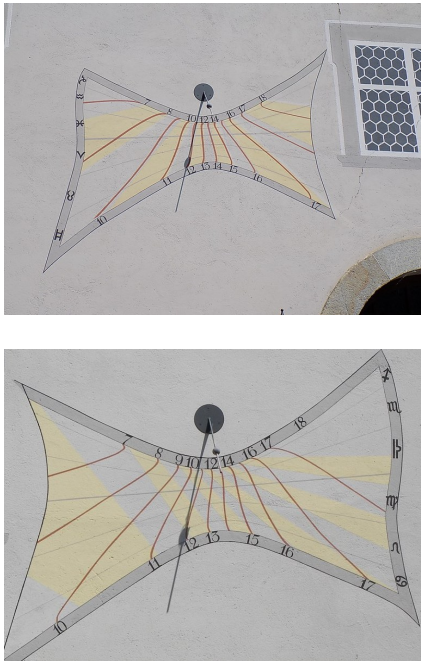
Obr. 34 — Chotýš 11 (KO 41).



Obr. 35 — Touškov, Včelařská 353 (PS 93).

Ve městě Touškov, ležícím 9 km zsz. od Plzně, jsou od roku 2015 na štítu domu v ulici Včelařská vymalované svislé hodiny. Trvalo jim téměř čtyři roky, než se dostaly do katalogu! Pracovní rozsah číselníku je od sedmé hodiny ranní do páté hodiny odpolední. Očíslované jsou jen hodiny IX, XII a III. Jako ukazatel je použit polos. Slunečním hodinám zde vládne bůh Slunce Apollón, jedoucí po nebeské klenbě na zlatém kočáře.

Sluneční hodiny, které přímo ukazují střední sluneční čas, jsou konstrukčně náročnější a často se s nimi nesetkáváme. Takovéto hodiny lze řešit různými způsoby, ale nejčastěji tvarem hodinových čar, které jsou vykreslené s korekcí o časovou rovnici a zeměpisnou délku. Výsledným tvarem jsou analemy, tvaru protažené osmičky. U těchto hodin se řídíme buď koncem stínu ukazatele, nebo polohou stínu nodu, je-li použit. Takovéto řešení je na svislých slunečních hodinách na byzantském kostele St. Nikolaus v městečku Niederalteich v Německu asi 40 km sz. od Passau. Jelikož by jeden číselník byl těžko čitelný, jsou použity dva. Jeden ukazuje v období od letního do zimního slunovratu a druhý od zimního do letního slunovratu. Kromě hodinových křivek jsou na číselníku také datové křivky, označené znaky zvěrokruhu. Možná jsou i další řešení, která jsou ale ještě náročnější.



Obr. 36 — Niederalteich, Německo (DE BA 113/1 a 113/2).

V německém městečku Neuburg am Inn, ležícím 8 km jižně od Passau, jsou na stěně místního zámku bohatě malované svislé hodiny. Podle vzhledu číselníku a ukazatele lze usuzovat, že se jedná o jz. stěnu. Za povšimnutí stojí ukazatel hodin, který je šikmý a musí být rovnoběžný se zemskou osou a současně mít začátek v místě, ze kterého vycházejí hodinové čáry. Jak je na snímku vidět, ukazatel je uchycený ve zdi kus pod průsečíkem hodinových čar. Do snad správného sklonu je ukazatel ohnut až kus nad stěnou a tím je dosaženo kýženého stavu, že po prodloužení ukazatele se dostaneme do místa, ve kterém se hodinové čáry protínají. Hodiny jsou označené římskými číslicemi od IX přes XII do VI. Čáry patřící půlkám hodin jsou zakončené puntíkem.

Obr. 37 — Neuburg am Inn, Německo (DE BA 108).

Na třetím místě zahraniční části soutěže skončily vodorovné hodiny ze Sárváru, nacházejícího se v Maďarsku, asi 130 km j. od Bratislavy. Hodiny jsou umístěné vedle parkoviště hotelu Thermal. Jako stínový ukazatel slouží šikmo nakloněný oštěp, který drží v pravé ruce uherský hrdina Ferenc Nádasdy (1555–1604). Hodiny tak plní několikerý účel. Jsou jednoduchým časoměrným zařízením, architektonickým prvkem a hlavně připomínkou historické postavy, která se proslavila v bojích proti osmanským nájezdníkům.

Obr. 38 — Sárvár, Rákóczi 1, Maďarsko (HU VA 01).