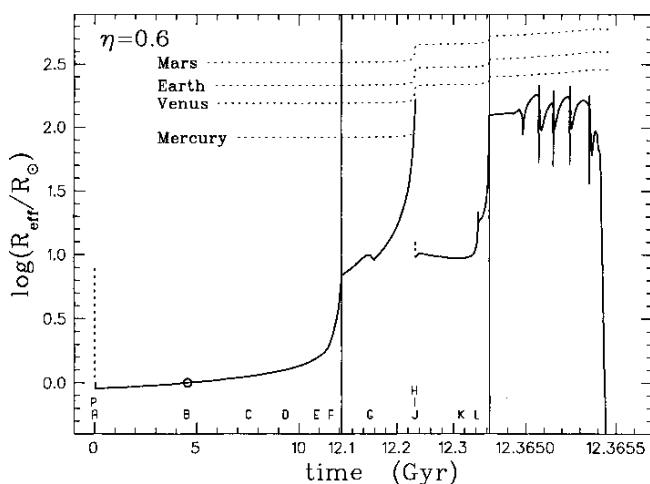


Slunce v proměnách času

Současné Slunce

Slunce je klidnou hvězdou v současnosti se nacházející na hlavní posloupnosti (spektrální třída G2V), na kterou vstoupilo před 4,5 miliardami let. Ve svém nitru při centrální teplotě $15,4 \times 10^6$ K a tlaku $2,269 \times 10^{16}$ Pa poklidně spaluje nejčastěji se vyskytující nukleární palivo – vodík. Jeho hmotnost $M_{\odot} = 1,9891 \times 10^{30}$ kg je shromážděna v kouli o poloměru $R_{\odot} = 6,9598 \times 10^8$ m. Do okolního prostoru každou sekundu vyzáří energii $L_{\odot} = 3,858 \times 10^{26}$ joulů. Zatímco v povrchových vrstvách se zastoupení prvků od okamžiku kontrakce příliš nezměnilo (28 % helia, necelá 2 % těžších prvků a zbytek vodík), v centru již došlo ke spálení zhruba poloviny vodíku, jeho zastoupení zde činí nějakých 36 %.



Oblast spalování zasahuje přibližně do 15 % slunečního poloměru od jádra, v další vrstvě, vrstvě v zářivé rovnováze, se pak již energie prakticky nevytváří, pouze přenáší. A to až do 0,741 slunečního poloměru, kde při teplotě $1,959 \times 10^6$ K rekombinují některé ionty vodíku a zastaví zde přenos energie zářením. Zde se nachází dno mohutné podpovrchové konvektivní zóny, která zabírá prakticky 60 % slunečního tělesa, avšak soustředí v sobě jen 1,7 % jeho hmotnosti.

Změny slunečního poloměru jako funkce času pro případ nejvíce pravděpodobné hodnoty ztráty hmoty. Zakresleny jsou i změny velkých poloos terestrických planet. Obě osy jsou v logaritmickém měřítku.

Konvektivní zónu před zvědavými zraky chrání pouhých 300 km tlustá fotosféra, vrstva s teplotním minimem (efektivní teplotou 5780 K), nad níž se rozkládá

opticky tenká sluneční atmosféra se dvěma hlavními vrstvami – chromosférou a korónou, volně se rozprostírající do meziplanetárního prostoru.

Taková je centrální hvězda sluneční soustavy. Poklidně zásobuje planety energií a dává řád jejich pohybům. Její dlouhodobá stabilita a relativně nízká aktivita se staly zárukou příznivého podnebí na planetě zvané Země, kde tak mohl vzniknout život až do podoby, jakou známe dnes.

Bude tomu tak navždy?

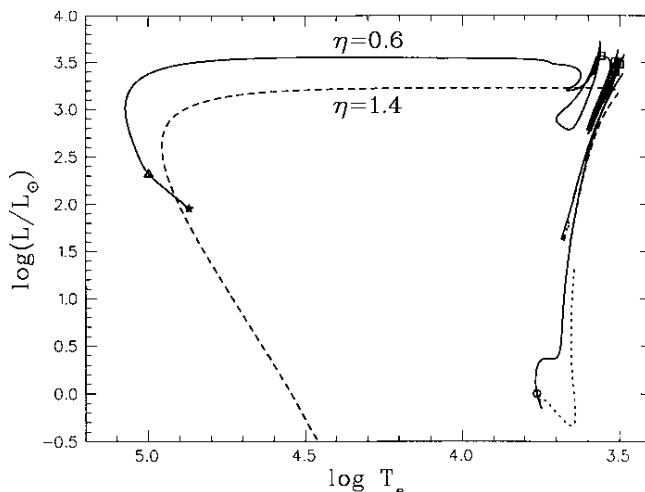
Podívejme se na výsledky detailního slunečního modelu. To je v podstatě sofistikovaný počítačový program, který řešením rovnic hvězdné struktury „umí předpovídat“ budoucnost i minulost našeho Slunce. V případě hvězd je to naštěstí docela dobře možné. Ačkoli mohou být výsledky výpočtu dosti ovlivněny parametry, které ani v případě Slunce neznáme dostatečně přesně, ukazuje se, že kardinální rozpor ve výsledcích tato neznalost obvykle nezpůsobí.

Pohled do budoucnosti

Jako každá hvězda, i naše Slunce stráví převážnou část svého života na hlavní posloupnosti. Naše Slunce zde pobýlo již 4,5 miliardy let a ještě nějakých 7 miliard se bude na hlavní posloupnosti vyskytovat. Jeho zářivý výkon pomalu stoupá z přibližně 70 % dnešní hodnoty, kterou mělo v době svých začátků mezi dospělými hvězdami, na 221 %, kterou bude mít v době, kdy se od hlavní posloupnosti odkloní. Přibližně za 3 miliardy let dosáhne efektivní teplota sluneční fotosféry svého maxima – 5843 K, což je o pouhých 64 K více, než je aktuální hodnota. Za 4,8 miliardy let dojde k vyčerpání vodíku v samotném centru hvězdy, ale stále ho ještě bude dostatek v okolí, takže zde termonukleární reakce mohou bez problémů probíhat dál. Uvnitř jádra se bude postupně rozšiřovat koule jaderného popela – helia. Za 6,4 miliardy let již termonukleární reakce probíhají nikoli v samém centru, ale v tlusté vrstvě poblíž jádra a v důsledku toho začne nitro kontrahovat. Zrychlující se kontrakce nitra urychluje hoření ve vodíkové slupce, což způsobí dramatické nafouknutí obálky. Slunce opouští hlavní posloupnost.

Nemusíme však mít strach, že by přechod centrální hvězdy sluneční soustavy mezi rudé obry způsobil drastickou změnu v životních podmínkách na Zemi. Země v té době bude již dávno neobyvatelná. Bylo totiž spočítáno, že veškerá povrchová voda na Zemi se vypaří v době, kdy svítivost Slunce dosáhne 1,1násobku současné hodnoty, čili přibližně za 1,1 miliardy let. Živoucí planeta se promění ve vyprahlou pouštinu obklopenou zmenšujícím se oceánem. Až bude zářivý výkon $1,4 L_{\odot}$, vypaří se kompletně i oceány. Za nějakých 3,5 miliard let.

Přechod z hlavní posloupnosti bude Slunci trvat přibližně 700 milionů let. Je to stádium pomalé expanze, v jehož závěru naroste sluneční poloměr přibližně $2,3 R_{\odot}$, zatímco efektivní teplota poklesne až na 4900 K. V tu chvíli se expanze výrazně zrychlí, v důsledku toho naroste svítivost, podpovrchová konvektivní zóna se rozšiřuje směrem do nitra. Z nitra k povrchu naopak postupuje slupka jaderného hoření. Obě vrstvy se potkají za 7,6 miliard let, což způsobí dočasný pokles jinak stále rostoucí svítivosti. Krátce poté však opět narůstá a to mnohem rychleji než předtím, neboť konvekce dodává do vodíkové slupky čerstvé palivo. Vrcholu svítivosti dosáhne Slunce za 7,68 miliardy let, kdy její hodnota přesáhne $2300 L_{\odot}$. V té době dosáhne sluneční průměr $166 R_{\odot}$. Celkově stráví Slunce ve větvi červených obrů H-R diagramu 600 milionů let.



Vývojová stopa Slunce v Hertzsprungově-Russellově diagramu od doby před hlavní posloupností do doby těsně před konečnou fází bílého trpaslíka. Zakresleny jsou vývojové stopy pro dvě hodnoty hmotové ztráty – pro nejpravděpodobnější ($\eta=0,6$) a extrémní ($\eta=1,4$). Ztráta hmoty je parametrizována vztahem:

$$\mu = 4 \times 10^{-13} \eta (L/L_{\odot})(M_{\odot}/M)(R/R_{\odot}) M_{\odot}/\text{rok}$$

V samotném centru slunečního tělesa vzniklo degenerované heliové jádro. Jeho teplota během vývoje v oblasti červených obrů postupně rostla až na hodnotu v řádu 10^8 K, což je dostatečná teplota k hoření helia. Zapálení reakce se podobá spíše výbuchu. Nitrem hvězdy se směrem k povrchu šíří rázová vlna, která se ale velmi rychle utlumí a prakticky nezasáhne vnější obálku. Logicky by mělo dojít k nárůstu celkové svítivosti, ale není tomu tak. Děje se jev přesně opačný. Totiž i v okamžiku zapálení heliové reakce v nitru je zdaleka nejvýraznějším zdrojem energie hořící vodíková slupka. Při heliovém záblesku však dojde k jejímu „odfouknutí“ do oblastí blíže k povrchu, kde je teplota nižší a vodíková reakce se tudíž zpomalí. Se svítivostí rapidně poklesne i sluneční poloměr – nafouknuté Slunce „splaskne“.

Další vývoj už je velmi rychlý. Slunce zůstane v relativně stabilním stavu asi 100 milionů let, celková svítivost zůstává téměř konstantní na hodnotě $44 L_{\odot}$, rozměr umírajícího Slunce dosáhne přibližně 10násobku současné hodnoty. Situace v samotném centru se opakuje, jen s jinými prvky – od středu začne narůstat husté degenerované uhlíkové jádro a heliové hoření se přesune do okolní slupky. Nitro Slunce nabývá slupkové struktury – v centru narůstá uhlíkové jádro, nad ním se nachází slupka heliového hoření, ještě blíže k povrchu oblast helia a nad ním slupka vodíkového hoření. Slunce se dostává v H-R diagramu na asymptotickou větev obrů a jeho svítivost i rozměr začíná opět narůstat.

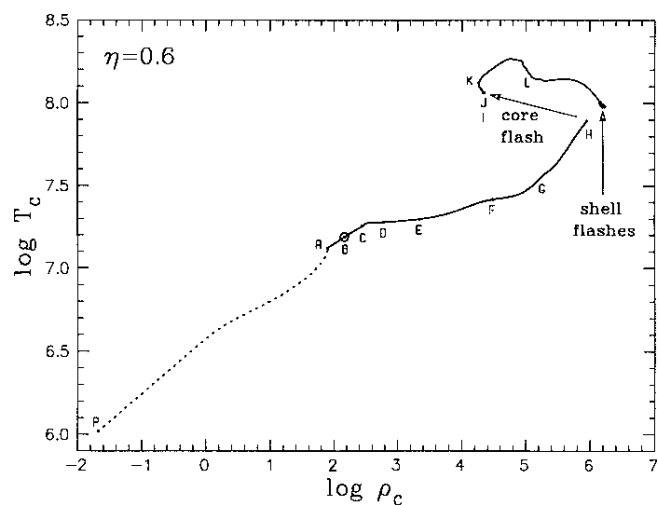
Uhlíko-kyslíkové jádro je pro Slunce konečnou fází, k jeho zapálení již nedojde. V nitru se objevují četné nestability, degenerované jádro stlačuje hořící heliovou slupku, což způsobuje pulsy v rychlosti jejího hoření. Slunce projde čtyřmi až deseti těmito termálními pulsy, v závislosti na míře ztráty hmoty. Expanzní část pulsu trvá typicky 400 let (heliová vrstva se při něm „naředí“), zpětná kontrakce pak zabere přibližně 10 000 let. Na asymptotické větvi obrů Slunce pobyde přibližně 400 tisíc let.

Při termálních pulsech hvězda odhazuje své vnější obálky do meziplanetárního

prostoru. V okamžiku opouštění asymptotické větve obrů v H-R diagramu nezůstanou Slunci prakticky žádné vnější vrstvy. Z obra se stane horké odhalené uhlíkové jádro s efektivní teplotou až 120 000 K a o hmotnosti $0,54 M_{\odot}$. Žhavý zbytek ionizuje a ohřívá okolní materiál a nakrátko tak rozsvítí planetární mlhovinu. Horké jádro postupně chladne a přechází do klidného stádia bílého trpaslíka, v němž dožije za mnoho desítek miliard let.

Vývoj sluneční soustavy

Je asi jasné, že Slunce při svém vývoji a především mohutných změnách objemu zásadním způsobem ovlivní situaci ve sluneční soustavě, především co se terestrických planet týče.



Vývoj centrální teploty a centrálního tlaku. Zajímavý je skok v okamžiku heliového záblesku v jádře.

Merkur bude rozpínající se obálkou pohlcen ještě během fáze rudého obra, čili přibližně za 7,7 miliard let. Situace dalších planet silně závisí na míře ztráty hmoty v závěrečných stádiích. Pokud bude totiž ztráta hmoty dostatečně velká, stihnout planety počínaje Venuší postupně „uskakovat“ do větších vzdáleností, takže je Slunce nespolkne. Pokud během pobytu v oblasti červených obrů ztratí Slunce 28 % hmoty (což je preferovaná hodnota), přesune se Venuše do vzdálenosti 1 astronomické jednotky a Země 1,38 AU. Venuše svému pohlcení rozpínající se hvězdou unikne prakticky o vlásek. Pokud bude ztráta hmoty výrazně menší, obě planety sice přežijí fázi červeného obra, ale budou pohlceny při předsmrtných termálních pulsech, kdy se hvězdná obálka rozepne až na $347 R_{\odot}$.

Míra ztráty hmoty slunečním větrem je nejdůležitější neznámou celého modelu, na její hodnotě je závislý průběh závěrečného stádia života Slunce a také vývoj vnitřní planetární soustavy. Bohužel hodnotu tohoto parametru lze jen odhadovat na základě analogií s podobnými hvězdami v různých stádiích vývoje. Výsledek se přesto nemění – ze Slunce vznikne chladnoucí bílý trpaslík.

– Michal Švanda –

Zdroj: Sackmann, I.-J., Boothroyd, A. I., Kraemer, K. E.: 1993, Astrophysical Journal, 418, 457–468

Trpasličí tipy na srpen, září a říjen

Srpen je pro astronoma amatéra tím nejlepším měsícem. Doba prázdnin a dovolených, teplé letní noci, které jsou čím dál tím delší, Mléčná dráha nad hlavou občas profatá létavicemi Perseid, ráno vycházející Plejády a Orion... Není divu, že během srpna se nejvíce pozoruje. Ne pro všechny je ale srpen ideální. Pozorovatelé Měsíce a planet mají v letním období tu nevýhodu, že objekty jejich zájmu bývají dost nízko nad obzorem. Příčina je jednoduchá: v létě kolem půlnoci se totiž nad jižním obzorem díváme do souhvězdí, ve kterých se nacházelo Slunce v zimě (protože kolem půlnoci je Slunce právě na opačné straně oblohy – pod severním obzorem). Jak víme, v zimě Slunce vystoupí jen nevysoko nad jižní obzor, a stejné je to v létě s planetami, protože ty se pohybují po obloze po stejné zdánlivé kružnici jako Slunce – po ekliptice. Pokud je tedy Měsíc nebo planeta v létě viditelná nejlépe kolem půlnoci, nachází se v nejjihnější části ekliptiky (má nejnížší možnou deklinaci kolem -23 stupňů) a vystoupí maximálně necelých 20 stupňů nad obzor. Však to znáte: letní úplněk líně se povalující mezi vrcholky stromů a vlezle nahlížející do oken. V takto malé výšce nad obzorem silně kazí obraz chvění vzduchu (seeing) a také vadí různé překážky, hlavně stromy, což je problém především na hvězdárnách, kde není možné větší dalekohledy podle potřeby přemísťovat. Tohle byl přesně případ opozice planety Mars Ioni v létě. Podrobnosti zřetelné jen při velmi klidné atmosféře, pobíhání s malými přenosnými dalekohledy po poli a hledání děr mezi stromy. Příznivější je, pokud jsou planety v létě vidět zvečera nebo k ránu, to už leží ekliptika severněji a tedy i výše nad obzorem. Nejvýše jsou naopak planety i Měsíc v zimě (je to zkrátka vždy opačně než se Sluncem). Také známý obrázek: úplněk vysoko nad hlavou, zalévající svým bledým světlem za mrazivé noci zasněženou krajinu.