

SKVRNA

Číslo: 6

Vychází dne: 15. 7. 2004

Během několika demonstrací Slunce bylo jednou z nejčastějších otázek, jak to vlastně bude s budoucností Slunce? Jsem si vědom faktu, že v minulosti bylo na tento problém mnoho názorů založených převážně na odhadech získaných na základě pozorování jiných hvězd. Z této doby se zachovalo také několik mýtů až bludů o slunečním vývoji a vývoji planetární soustavy. S rozvíjející se výpočetní technikou se však nemusíme spoléhat jen na odhady, ale můžeme vývoj hvězd docela přesně vypočítat. Proto toto číslo Skvrny bude věnováno především volnému výkladu odborného článku, který postihuje výpočetní model Slunce daleko do minulosti – tento výpočet je v současnosti považován za nejlepší představu o budoucnosti naší sluneční soustavy. Myslím, že informace zde uvedené by se vám mohly hodit i při demonstracích.

Michal Švanda

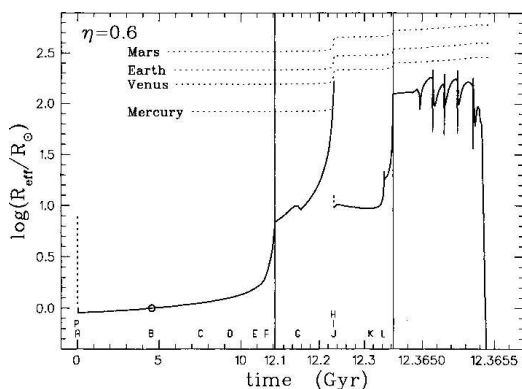
Slunce v proměnách času

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 ener-

gii $L_{\odot} = 3,858 \times 10^{26}$ 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



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.

$1,959 \times 10^6$ 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.

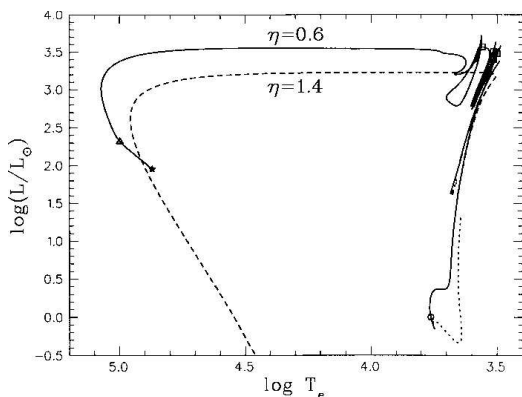
Konvektivní zónu před zvědavými zraky chrání pouhých 300 km tlustá fotosféra, vrstva s teplotním minimem (efektivní teplotou 5780 K), nad níž se rozkládá opticky tenká sluneční atmosféra se dvěma hlavními vrstvami – chromosférou a korónou, volně se rozprostírající do meziplanetárního prostoru. Taková 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 mili-



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 (v jednotkách $M_{\odot}/rok$) je parametrizována vztahem:

$$\mu = 4 \times 10^{-13} \eta \cdot \frac{L}{L_{\odot}} \frac{M_{\odot}}{M} \frac{R}{R_{\odot}}$$

ardy 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 setkají 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 sví-

tivosti 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.

V samotném centru slunečního tělesa vzniklo degenerované heliové jádro. Jeho teplota během vývoje v oblasti červených obrů postupně rostla až na hodnotu v řádu 108 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

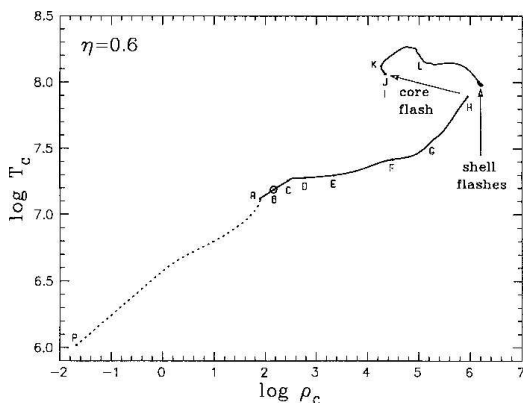
nabývá slupkové struktury – v centru narůstá uhlíkové jádro, nad ním se nachází slupka heliového hoření, ještě blíže k povrchu oblast helia a nad ním slupka vodíkového hoření. Slunce se dostává v H-R diagramu na asymptotickou větev obrů a jeho svítivost i rozměr začíná opět narůstat.

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 oběmu zásadním způsobem ovlivní si-



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

tuaci ve sluneční soustavě, především co se terestrických planet týče. 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, stihnou 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 vlasek. Pokud bude ztráta

hmoty výrazně menší, obě planety sice přežijí fázi červeného obra, ale budou pohlceny při předsmrtných termálních pulsech, kdy se hvězdná obálka rozeprve 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

Jak lze pozorovat odvrácenou stranu Slunce

Poslední vědecké poznatky a přístroje na palubě družice SOHO nám umožňují se dívat skrz Slunce a dokonce i měřit aktivitu jeho odvrácené strany.

MDI a helioseismologie

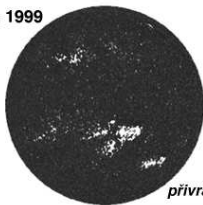
Helioseismologie vychází ze stejných předpokladů jako pozemská seismologie, která studiem zemětřesných vln zkoumá nitro Země. „Zemětřesné“ vlny byly na Slunci poprvé detekovány v 60. letech minulého století. O něco později, po vysvětlení jejich podstaty, se zjistilo, že mohou být využity ke studiu stavby a dynamiky Slunce (více o helioseismologii někdy příště). Tyto vlny můžeme sledovat měřením Dopplerova posuvu ve spektru slunečního světla. Klidné Slunce vykazuje určité posuvy ve spektru, které jsou v čase konstantní. Jaká-

koliv oblast sluneční aktivity však toto pozadí narušuje. A právě toho využívá přístroj Michelson Doppler Imager (MDI), který na tomto principu pracuje. MDI sleduje centrální oblast odvrácené strany Slunce nepřetržitě a každých 12 hodin poskytuje mapu její aktivity.

SWAN a UV záření

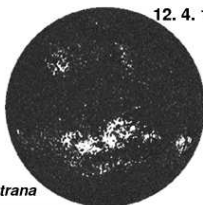
Na principu rozptylu slunečního světla na částicích meziplanetárního vodíku, je založen další přístroj z družice SOHO – Solar Wind Anisotropies (SWAN). Vzhledem k poloze družice, SWAN může detekovat i sluneční světlo okrajů odvrácené strany. Protože aktivní oblasti svítí víc než neaktivní, jsme schopni je výše popsanou metodou odhalit.

16. 3. 1999



přivrácená strana

12. 4. 1999



29. 3. 1999



odvrácená strana

Třípanelový obrázek, zobrazující velikost indukce magnetického pole stejné struktury (aktivní oblasti) půl otočky před (vlevo nahoře) a půl otočky poté (vpravo nahoře), co byla tato oblast pozorování helioseismologicky na odvrácené straně (uprostřed dole). ©ESA

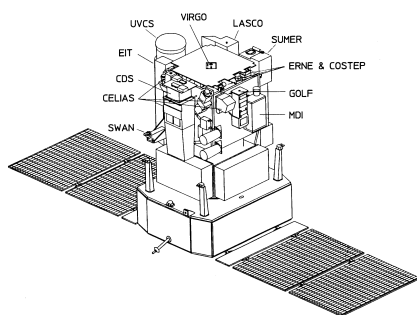


Schéma sluneční družicové observatoře SOHO a umístění všech dvanácti vědeckých přístrojů na palubě. ©ESA

MDI a SWAN

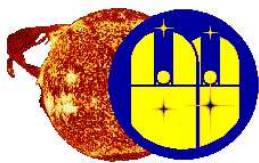
Kombinací obou výše uvedených metod a přístrojů můžeme nepřetržitě sledovat celou odvrácenou stranu Slunce. Získaná data se využívají třeba k předpovědi návratu velkých skvrn na převrácenou stranu stejně jako k upřesňování sluneční aktivity. Toho se využívá třeba v předpovědi vesmírného počasí.

podle tiskové zprávy ESA připravila Žofie Sovová

Novinky (nejen) ze Sekce

- Máme už několik sérií fotografií novým digitálním fotoaparátem, které zachycují zajímavě se chovající protuberance. V současné době je pro zpracování těchto snímků tvořen software, protože se ukazuje, že celá problematika je možná složitější, než jsme si na začátku malovali. Jednotlivé snímky se totiž musí před dalším použitím zcentrovat, což je v případě plošných objektů tak trochu oříšek.
- Víte jak je dlouhá astronomická jednotka? Podle posledních výpočtů (založených na pozorování kontaktů přechodu Venuše z 8. 6. 2004) je střední hodnota této veličiny 149 531 361 km. Ovšem oficiální hodnota získaná jiným a přesnějšími metodami je 149 597 870 km. Chyba tedy činí zhruba 0,04 %. Výsledek celoplanetárního šlénství je sice zajímavý, ale z dnešního hlediska již nepoužitelný. A to se na něm podílelo 1507 pozorovatelů.

Michal Švanda



SKVRNA je nepravidelným zpravodajem *Sluneční sekce Štefánikovy hvězdárny* v Praze. Adresa redakce: Štefánikova hvězdárna – Sluneční sekce, Petřín 205, 118 46 Praha 1, e-mail: skvrna.redakce@seznam.cz, webové stránky: <http://www.observatory.cz/slunce>. Za obsah článků odpovídají autoři. Sazba Michal Švanda systémem L^AT_EX.