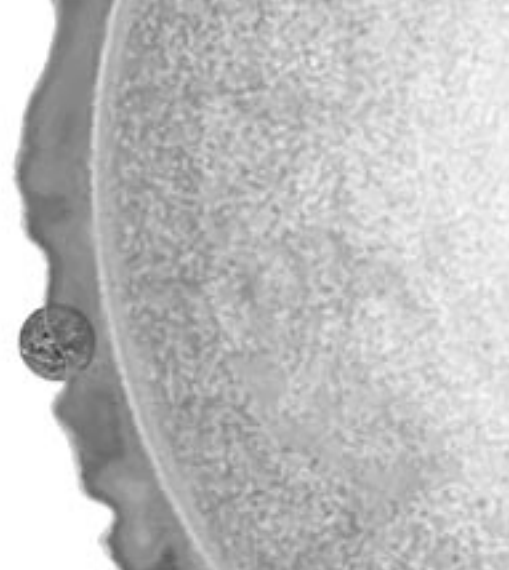


Kdy bude za globální oteplování opravdu odpovědné Slunce?

Michal Švanda



Diskuse nad příčinami a důsledky probíhajícího oteplování zemské atmosféry nemají konce. Oba tábory diskutujících mají v ruce vědecké argumenty a celý problém prozatím nespěje k jasnému závěru ani nad příčinami, natož pak nad důsledky. Jedním z mnoha argumentů, používaných skupinou skeptiků, kteří vliv člověka na změnu klimatu považují za zanedbatelný, je dominance vlivu Slunce.

Není žádným tajemstvím, že výkyvy sluneční činnosti mají na pozemské klima měřitelný vliv. Obecně platí, že čím nižší je dlouhodobě sluneční aktivita, tím nižší je průměrná teplota na Zemi. Vliv se připisuje hustotě přilétajících vysokoenergetických částic galaktického původu, které mohou působit jako kondenzační jádra způsobující zvýšený výskyt oblačnosti v tropických a subtropických pásech. Vyšší množství oblačnosti se projeví sníženou pozemskou teplotou. V období zvýšené sluneční aktivity se ale musí galaktické částice prodírat bariérou narušeného meziplanetárního magnetického pole, a do samotné zemské atmosféry jich tedy dorazí méně. Průměrná teplota na Zemi vzroste. Ukázkovým případem je vysoká sluneční aktivita v 10. století, kdy se Grónsko stalo zemědělskou kolonií, a naopak dlouhé období Maunderova minima (1645–1715), které je spojováno s tzv. Malou dobou ledovou. V Evropě zamrzala Temže a Baltské moře.

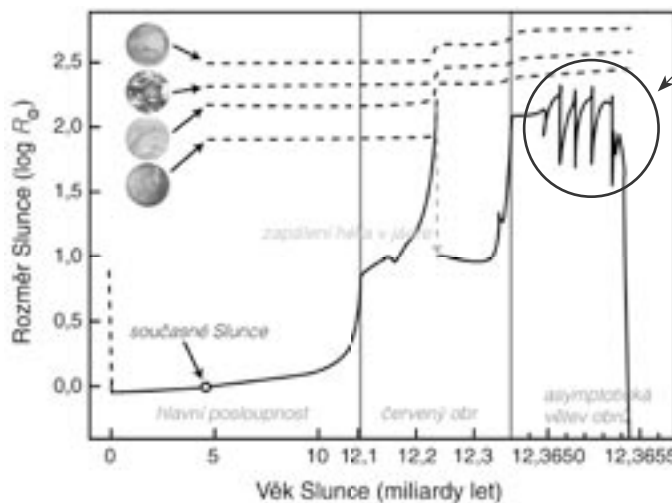
Z hlediska lidské rasy může mít globální změna klimatu drastický dopad na škále desítek, možná stovek let. Nezáleží na tom, zda je hlavní příčinou vypouštění skleníkových plynů nebo proměnná sluneční aktivita. Dlouhodobě, na škálách milionů a miliard let, pozemské klima řídí jednoznačně Slunce. Ne však svojí proměnnou aktivitou.

Do hry vstupuje důsledek nukleárního vývoje – Slunce stárne a mění se.

Slunce se stejně jako každá jiná hvězda vyvíjí v důsledku změn chemického složení: z vodíku se postupně stává helium, které se bude měnit na uhlík a kyslík. Mění se chemické složení posouvá podmínky rovnovážného stavu, na což hvězda reaguje změnou teploty, poloměru i vnitřní struktury. Tyto změny probíhají zpočátku pomalu, proto hvězda stráví na hlavní posloupnosti miliardy let. S věkem ale tempo jaderného vývoje roste, hvězdy tráví ve stádiích červených obrů maximálně stovky milionů let, až končí ve formě kompaktního objektu. Výsledné stádium záleží na počáteční hmotnosti hvězdy a také na tom, kolik z této hmotnosti ztratí během svého života hvězdným větrem.

A právě ztráta hmoty slunečním větrem je v modelech Slunce tou největší neznámou. Na ní také závisí, zda Země jako těleso přežije sluneční vývoj, nebo zda bude expandující sluneční obálkou pohlcena ve fázi rudého obra. Získané závěry jsou důležité i pro hledače extrasolárních planet: mohou dát odpověď na otázku, zda má smysl hledat planety zemského typu kolem bílých trpaslíků. Modely vypočtené ještě v devadesátých letech minulého století poskytovaly pro finální stádium velký rozptýl výsledků. Podle různých studií a způsobu odhadu, jak moc bude ztráta hmoty podstatná, se lišily také závěry o budoucnosti Země jako planety.

Profesor Schröder z Univerzity v Guanajuatu v Mexiku se slunečními modely zabývá už nějakou dobu. Spolu se svým týmem za-



Termální pulsy jsou důsledkem střídavého zapalování a zhasínání heliové slupky. Zapálení je tak překotné, že vnější obálky získávají vyšší než únikovou rychlost, a formují tak zárodek planetární mlhoviny. Podle nejnovějšího modelu Slunce projde jen dvěma téměř nevýraznými termálními pulsy a neumožní formaci výrazné planetární mlhoviny.

Vývoj rozměru Slunce a poloměrů planetárních drah podle staršího modelu z devadesátých let minulého století. Téměř všechny terestrické planety vyjma Merkuru by přežily fázi rozepnutého červeného obra. Časová osa má tři úseky s různým zvětšením, to kvůli zrychlujícímu se vývoji. Tyto úseky jsou odděleny šedými svislými čarami. Návod na čtení logaritmické svislé osy: hodnota 0,0 znamená současný poloměr Slunce, 1,0 jeho desetinasobek, 1,5 dvaatřicetinasobek, 2,0 stonásobek a 2,5 značí 317násobek současného poloměru, který činí 695 980 km. (Podle Sackmannová a kol., 1993.)

Autorova představa: vyprahlá Země zničená mohutným skleníkovým jevem spiráluje v rozepnuté sluneční chromosféře vstříc svému zániku. K tomu dojde za přibližně sedm a půl miliardy let. Podobně, ovšem mnohem dříve, dopadne i Merkur a Venuše.

Slovníček pojmů

hlavní posloupnost – oblast Hertzsprungova-Russellova diagramu (viz následující strana), v níž se zdánlivě vyskytuje nejvíce hvězd, je-li použitý statistický vzorek dostatečně bohatý. Hvězdy na hlavní posloupnosti jsou ve stavu rovnováhy, kdy je gravitační síla působící smršťování hvězdy právě vyvážena silou tlaku plynu a záření v hvězdném nitru. Hvězda na hlavní posloupnosti se dlouhodobě mění jen velmi pomalu. Zdrojem energie v jádře jsou termojaderné reakce slučování vodíku na helium.

konvektivní zóna – v nitrech hvězd je energie přenášena dvěma způsoby: zářením a konvekcí. Konvekce se ustaví ve vrstvách nitra, kde se prudce mění ionizace plazmatu a přenos energie zářením se stává neefektivním. Chladnější hvězdy pozdních spektrálních typů mají vyvinutou konvektivní zónu pod povrchem, zatímco v horkých hvězdách se konvekce typicky ustaví v jádře.

sluneční vítr – neustálý tok částic od Slunce do meziplanetárního prostoru rychlostmi několika stovek kilometrů za sekundu. Slunce v současnosti slunečním větrem ztratí přibližně čtyři miliony tun hmoty za sekundu, což je přibližně totéž, o kolik ubude jeho hmota odnesená elektromagnetickým zářením. Rychlost ztráty hmoty slunečním větrem je větší v počátečních obdobích vývoje (před příchodem na hlavní posloupnost) a v závěrečných fázích, zejména v období červeného obra.

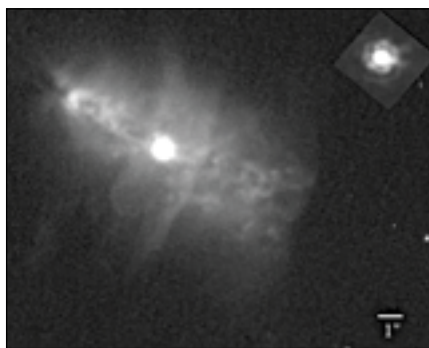
sluneční model – ač by to bylo užitečné, bohužel se nejedná o funkční Slunce v určitém měřítku. Pod pojmem hvězdný model si představíme výsledek výpočtu počítačového programu, který v sobě zahrnuje fyzikální principy, jež se uplatňují ve hvězdném nitru a které je možné popsat s pomocí matematických rovnic. Program tyto rovnice řeší, výsledkem je jakási tabulka hodnot parametrů popisujících stav plazmatu v závislosti na vzdálenosti od středu hvězdy. Model popisuje průběh teploty, hustoty, tlaku, mechanismu přenosu energie a dalších fyzikálních parametrů vzhledem k poloze ve slunečním tělese.

červený obr – období vývoje hvězdy, kdy došlo k vyčerpání vodíku v samotném jádře a termojaderná reakce se přesunula do slupky obalující jádro. Tato slupka postupně prohořívá dále k povrchu hvězdy, samotné jádro je v tom okamžiku složeno z téměř čistého helia, které je popelem vodíkového hoření.

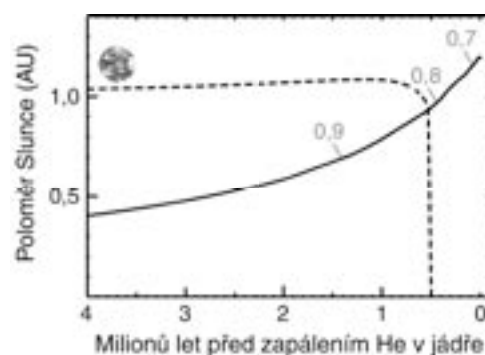
hrnul do svého modelu Slunce všechny možné vlivy měnící vývoj nejen Slunce, ale i poměrů ve vnitřních partiích sluneční soustavy.

Kromě nejistoty týkající se ztráty hmoty je dalším z nedostatků současných modelů také například přístup, s jakým se započítává konvekce. Celých vnějších 30 % poloměru, tedy 65 % objemu tělesa, tvoří konvektivní obálka. V ní dochází k přenosu energie konvekcí, tedy prostřednictvím makroskopických pohybů bublin přehřátého plazmatu. Teplota slunečního nitra totiž právě na 0,7 poloměru klesá na asi dva miliony stupňů, což je hranice, při níž přestává být vysoce ionizované plazma průhledné pro fotony vyráběné při termojaderných reakcích. Konvekce bývá v celkových modelech započítána jen parametricky s pomocí tzv. směšovací délky. Ta odpovídá charakteristické vzdálenosti, na níž může konvektivní element cestovat bez toho, aby byl nějak významně změněn. Hodnotu parametru nelze vypočítat z žádné fyzikální teorie a stanovuje se empiricky. Teprve mnohačasticové numerické simulace umožňují konvektivní pohyby reprodukovat a dávají tak lepší hodnoty konvektivního parametru v závislosti na okolních podmínkách.

Podobně empiricky se musí stanovit funkce popisující ztrátu hmoty slunečním větrem. Ke stanovení neznámé funkce lze naštěstí využít statistický vzorek jiných hvězd, u nichž je možné množství hmoty odnášené hvězdným větrem změřit. K tomu se typicky používají hvězdy v kulových hvězdokupách, které jsou dostatečně staré, a silný hvězdný vítr u nich hraje nezanedbatelnou roli. Odhady založené na nej-



Mlhovina IC 2149 v infračerveném světle. Takto bude možná vypadat okolí Slunce po ukončení jeho nukleárního vývoje.



Výřez vývoje poloměru Slunce na konci stádia červeného obra. Země bude ještě během této fáze pohlcena rozpínající se fotosférou. Šedé číslice značí aktuální hmotnost Slunce v jednotkách jeho současné hmotnosti, která činí 2×10^{30} kg. (Podle Schröder a kol., 2008.)

modernějším slunečním modelem tak předpokládají, že Slunce během svého vývoje a zejména v jeho pokročilých fázích přijde téměř o třetinu (0,332) své současné hmotnosti. V důsledku toho zbude v rozepnuté obálce jen velmi málo látky v závěrečných fázích vývoje a tzv. termální puls, při nichž se obálka několikrát prudce rozepne a zase splaskne, nevytvoří planetární mlhovinu. To je velká změna oproti předchozím modelům, které předpovídaly menší ztrátu hmoty, a tak vznik rozsáhlé planetární mlhoviny podobné Prstencové mlhovině v Lyře nebo Helixu ve Vodnáři. Současný model naznačuje, že zbylá obálka, jež bude mít zhruba setinu současné sluneční hmotnosti, může vytvořit malý a nevýrazný ekvivalent planetární mlhoviny, podobný např. mlhovině IC2149 ve Vozkovi.

A jakže to bude se Zemí? Předchozí modely dávaly prostor k jejímu úniku před expandujícím Sluncem. S poklesem hmoty centrálního tělesa se v důsledku zákonů zachování musí též posouvat poloměry planetárních drah k vyšším hodnotám. Země by tak mohla uskočit až do vzdálenosti 1,69 astronomické jednotky a uniknout rozepnuté sluneční obálce ve stádiu červeného obra. Předchozí modely ale nezapočítaly dvě věci: slapové brzdění a odpor plynu v sluneční atmosféře, v níž se bude Země v každém případě pohybovat.

Mgr. Michal Švanda, Ph.D. (*1980) vystudoval astronomii a astrofyziku na MFF UK. V současnosti pracuje v Astronomických ústavech MFF UK a AV ČR.
Email: michal@astronomie.cz

Slapové tření je z obou efektů důležitější. Jakmile Slunce dosáhne poloměru, který bude více než stonásobek současně hodnoty, přestane prakticky rotovat. Rotace se zpomalí z jedné otáčky za měsíc na jednu za několik tisíc let. Slapové síly pak budou mít spoustu času vytvořit deformace obří sluneční fotosféry a snižovat celkový moment hybnosti obíhajících planet. Země místo uskakování naopak začne spirálovat do Slunce, kde bude pohlcena za přibližně sedm a půl miliardy let.

Tohoto momentu se není třeba obávat. V té době už bude Země tak jako tak dávno neobyvatelná. Výpočty slunečního vývoje spojené s popisem termodynamiky zemské atmosféry ukazují, že již pouhý desetiprocentní nárůst slunečního zářivého výkonu povede k velmi výraznému pozemskému skleníkovému efektu, a to až do stavu, kdy se vypaří povrchová voda. To nastane přibližně za 1,1 miliardy let. Skleníkový efekt pak už nic nezastaví. Vodní pára z povrchových vod se dostane částečně i do stratosféry, kde ji ultrafialové záření rozloží na molekulu hydroxyly

a atomární vodík, který z atmosféry unikne. Hydroxyl je další skleníkovou látkou, jež způsobí nárůst skleníkového efektu. Za přibližně 3,5 miliardy let se tak vypaří všechny pozemské oceány. Slunce pak nespokojně Země plnou života, ale vyprahlou pouštní planetu, na níž mohou být teploty dost vysoké na to, aby se tavily některé kovy.

Zdá se, že jakákoli planeta, která v současnosti obíhá Slunce dále než 1,15 astronomické jednotky, expanzi Slunce přežije. Zejména atmosféra takové planety ale projde obrovskou chemickou a teplotní změnou. Takové těleso však může obíhat kolem výsledného bílého trpaslíka, až nukleární vývoj hvězdy dospěje do svého konce. To dává částečnou odpověď na otázku, zda se extrasolární planety, detekované kolem pulsarů, tedy neutronových hvězd, vytvořily z planetární mlhoviny, nebo zda může jít o relikty planet obíhajících původní hvězdu. Druhý scénář se nyní zdá být možným.

Současný model nedává příliš prostoru, jak se vyhnout katastrofickému scénáři. Moderní studie tedy ukazují, že v daleké budoucnosti bude mít Slunce rozhodující vliv

Hertzsprungův-Russellův diagram

Diagram použitý poprvé v roce 1910 umísťuje hvězdy podle dvou kritérií: povrchové teploty (která je ekvivalentem barvy nebo spektrální třídy) a celkové svítivosti (nebo absolutní jasnosti). V konstruovaných diagramech se formuje diagonální hlavní posloupnost (např. Slunce, Vega a další), oblast obrů (Aldebaran) a nadobřů (Deneb, Betelgeuse) a bílých trpaslíků (Sirius B, Prokyon B). Pouhou znalostí polohy hvězdy v H-R diagramu lze hrubě odhadnout její rozměr, hmotnost, věk, převládající jadernou reakci a další parametry, které hvězdy popisují. Více o H-R diagramu viz plakát na str. 22–23 *Astropisu Speciál 2005*.

na vývoj pozemského klimatu. A nebude to záviset na tom, zda si lidstvo přírodní prostředí dříve zničí svojí činností. ■

Literatura:

Sackmannová, I.-J. a kol., *Our Sun. III. Present and future*. ApJ 418 (1993), 457.

Schröder, K.-P. a kol., *Distant future of the Sun and Earth revisited*. MNRAS 386 (2008), 155.



CELESTRON[®] CPC[™]

CPC 800 (203/2032mm, f/10)

Dalekohled systému Schmidt-Cassegrain je na naváděné azimutální vidlicové montáži.

Dalekohled je vybaven pokročilými technologiemi, jako je **SkyAlign** (ustavení dalekohledu bez nutnosti zadání jmen hvězd), modul **GPS** (pro automatické určení data, času, zeměpisné polohy), **XLT** reflexní a antireflexní vrstvy zvyšující propustnost optické soustavy. Dalekohled umí vyhledat více než 40.000 objektů.

Kompaktní přístroj vidlicové montáže a tubusu dalekohledu (19kg), společně se stativem na 2" nerezových nohách (9kg) je snadno přenositelný.

Dalekohled je napájen z 12V, součástí je adaptér do autozásuvky.

Cena dalekohledu: 49.800 Kč
(Cena před 1.5.2008 68.200 Kč)

Výtahy Baader-Planetarium SteelTrack

Robustní dvourychlostní (1:10) okulárové výtahy typu Crayford firmy **Baader-Planetarium** na první pohled zaujmou kvalitou zpracování (černá a zlatá anodizace). Výtahy jsou ve verzi pro refraktory (zdvih 7cm), Newtony (3cm) a Schmidt-Cassegrainy (3cm).

Cena: Newton 5.330 Kč, SCT a Refraktor 5.820 Kč



....hvězdám blíž

+420 284 820 939 • www.celestron.cz • celestron@celestron.cz

SUPRA Praha • Mochovská 23 • 198 00 • Praha 9 • Česká Republika
pro členy ČAS 5% slevy na veškerý sortiment astronomického zboží

