



# **Temná nebo světlá budoucnost Slunce?**

**Zdeněk Mikulášek**

Univerzita třetího věku, Masarykova univerzita, Brno, 22. března 2017

Ta nejvzdálenější budoucnost Slunce bude zaručeně temná - žádné těleso ve vesmíru nemůže zářit neomezeně dlouho.

Mezitím, ale bude Slunce svítit, a to víc, než nám bude milé.

- Minulý i budoucí osud naší denní hvězdy spolehlivě popisuje teorie stavby a vývoje hvězd – klasická součást astrofyziky.

Zpočátku byly Slunce + hvězdy považovány za **planety**, tělesa předurčená pro život rozumných bytostí.

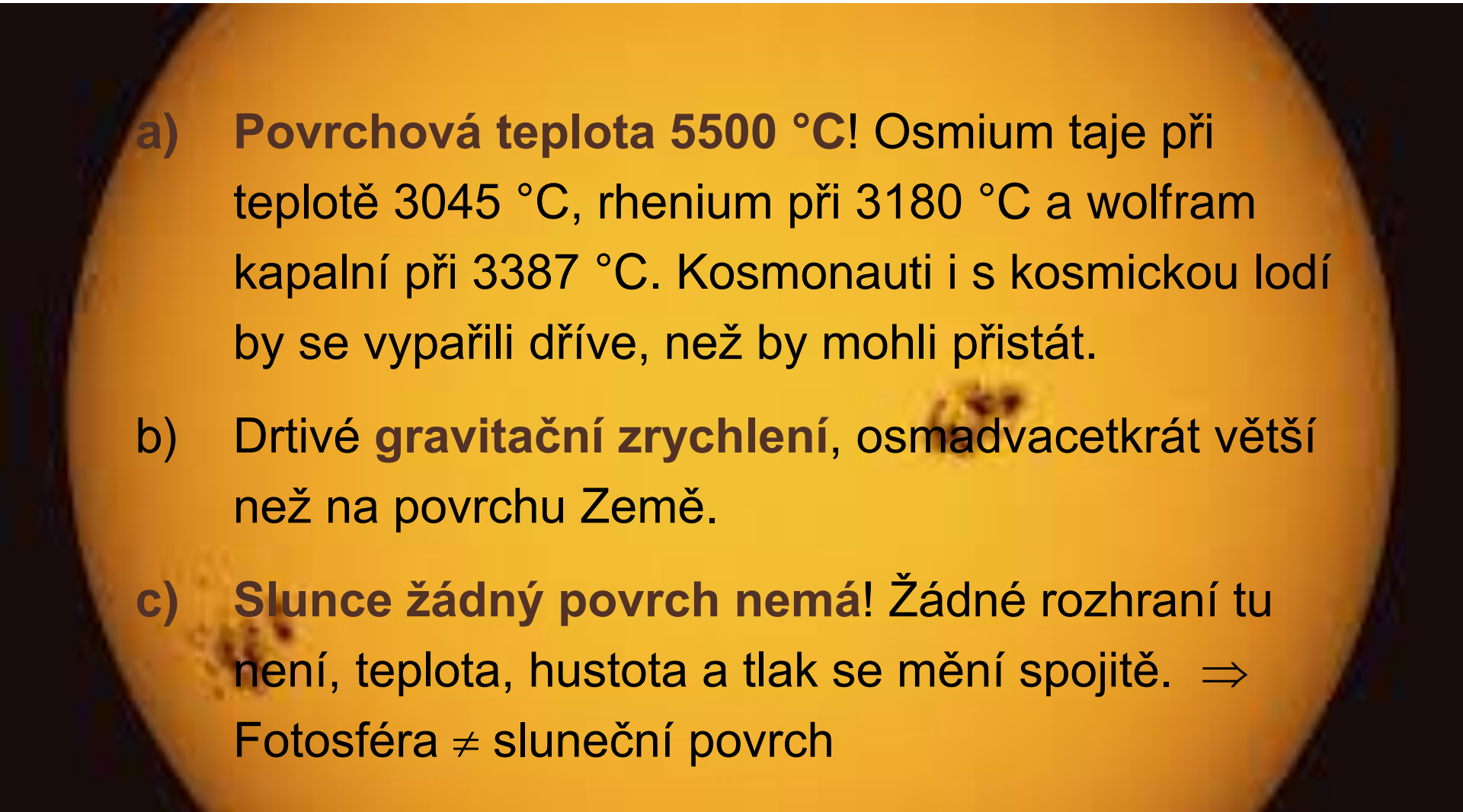
- Teprve počátkem 20. století začalo být jasné: Slunce + hvězdy – **koule žhavých plynů**, které drží pohromadě svou vlastní gravitací.
- Průměrná teplota ve Slunci je asi 7 milionů kelvinů. Nejchladněji je ve Slunci v povrchových slunečních skvrnách – teplota tam je přechodně snížena na pouhých 4000 kelvinů!
- ☹ **Slunce, i další hvězdy, jsou tělesa pro život zcela nevhodná.**



- Průměrná teplota ve Slunci je asi 7 milionů kelvinů. Nejchladněji je ve Slunci v povrchových slunečních skvrnách – teplota tam je přechodně snížena na pouhých 4000 kelvinů!
- ☹ **Slunce, i další hvězdy, jsou tělesa pro život zcela nevhodná.**

# Kdy už se projdeme po povrchu Slunce?

**Nikdy!!**

- 
- a) **Povrchová teplota 5500 °C!** Osmium taje při teplotě 3045 °C, rhenium při 3180 °C a wolfram kapalní při 3387 °C. Kosmonauti i s kosmickou lodí by se vypařili dříve, než by mohli přistát.
  - b) Drtivé **gravitační zrychlení**, osmadvacetkrát větší než na povrchu Země.
  - c) **Slunce žádný povrch nemá!** Žádné rozhraní tu není, teplota, hustota a tlak se mění spojitě. ⇒ Fotosféra ≠ sluneční povrch

## *Co ale je fotosféra, není-li slunečním povrchem?*

- Slunce září; záření přichází převážně z fotosféry - vrstvy tlusté 200 km, s hustotou zemského ovzduší v 60 km.

## *Experiment se žáruvzdorným kosmonautem*

- Podle Archimédova zákona by začal padat směrem k centru. Po průchodu fotosférou se mu uzavřel výhled do prostoru.
- Pád skončí: střední hustota kosmonauta  $\approx$  hustotě hvězdy.  $\Rightarrow$  Kosmonaut by „zamrznu“ v polovině vzdálenosti mezi tzv. povrchem a centrem. Teplota tam: 3,5 milionu kelvinů, tlak 500 milionů atmosfér.
- ☹ Ani zde by kosmonaut neucítil „pevnou zemi“ pod nohama. Vznášel by se v plazmatu, nemohl by ani nahoru, ani dolů.
- Jeho osud by byl zpečetěn.

# Proč se Slunce nezhroutí?

- Slunce – organizovaný útvar  $2 \times 10^{57}$  částic (e, p, He) – co je drží pohromadě – **gravitace**. Mocné pouto, uniknout mohou jen ty, co mají  $v > 618$  km/s. Co gravitaci vzdoruje?
- Zhroucení – velmi rychlý proces – ½ hodiny. Co drží gravitaci na uzdě?

## **Pokus s trubicí 2,1 m s 0,1 m Fe pístem uprostřed.**

- Ve svislé poloze poklesne o 27 mm – hustota dolní části vzroste o 2,75%, teplota o 3,4°C, tlak o 3,8% vyšší, opak v horní – rozdíl tlakových sil udrží píst.
- Mikroskopický pohled – srážky částic. Vzduchový polštář.

- Další krok – píst rozřežeme jako salám na řadu pístíků, po otočení komůrky nejmenší dole, největší nahoře.

### **Ve hvězdách písty nejsou!**

- Plyn sám ale něco váží – on sám je pístíkem. Takže písty už vlastně nepotřebujeme.
- Úvaha má obecnou platnost – lze ji aplikovat na všechna tělesa v tzv. **hydrostatické rovnováze**.
- Ve všech stabilních tělesech v gravitačním poli musí existovat spád tlaku – tlakový gradient.
- V centru Slunce  $2 \cdot 10^{16}$  Pa = 200 mld atmosfér.

V hlavě člověka je o 0,17 atm menší tlak než v nohou.

**Všichni vztyk a stojku nebo aspoň suchou vrbu!!!**

# Proč je Slunce uvnitř horké?

- Přece protože v něm probíhají termonukleární reakce!  
Při TNR vznikají rychlé částice  $\Rightarrow$  ohřívání materiálu. Teplo šíří až na povrch, odtud zářením do prostoru. Ve hvězdách se pomocí TNR uvolní právě tolik energie, kolik se jí vyzáří.
- Jenže TNR nejsou jediným zdrojem hvězdné energie.

Ty probíhají pouze:

je-li k dispozici vhodné termonukleární palivo + jeho teplota je větší než „zápalná teplota“

- Nejdůležitějším jaderným palivem ve hvězdách je **vodík**.  
Přednosti: a) snadná dostupnost, b) velká výhřevnost, c) „nízká“ zápalná teplota cca 8 milionů K.



- Slunce začalo jako oblak chladného a řídkého plynu  $\frac{1}{4}$  světelného roku  $\Rightarrow$  objekt udržovaný vlastní gravitací, v mechanické rovnováze: Ve hvězdě proti silám tíže se staví vztlkové síly dané tím, že tlak ve hvězdě směrem ke středu roste.
- $M = 1 M_{\odot}$ ,  $R = 100 R_{\odot}$ ,  $T_c < 140\,000\text{ K}$  – výkon H-reakcí bilionkrát menší než výkon hvězdy. Je však také v energetické rovnováze!

## Proč tedy svítí?

- Nemůže jinak: povrch zahřát na teplotu vyšší, než je teplota jejich kosmického okolí.
- Tenká slupka sluneční fotosféry by brzy vychladla, kdyby nebyla stále dotována přísunem tepla zevnitř  $\Rightarrow$  ve hvězdě musí existovat jistý teplotní spád  $\Rightarrow$  musí být udržován tepelným zdrojem uvnitř Slunce.

# Obecná charakteristika slunečního vývoje

- Slunce vzniklo asi před  $4,55 \cdot 10^9$  lety a do závěrečné etapy vývoje se dostane za 7,8 mld let.



# Obecná charakteristika slunečního vývoje

- Slunce vzniklo asi před  $4,55 \cdot 10^9$  lety a do závěrečné etapy vývoje se dostane za 7,8 mld let.

**Počáteční stav:** Na počátku vývoje Slunce byl rozměrný, chladný a řídký zárodek hvězdy s hmotností odpovídající hmotnosti současného Slunce ( $2 \cdot 10^{30}$  kg –  $2 \cdot 10^{57}$  částic), o poloměru 1/4 světelného roku (15 000 AU,  $2 \cdot 10^{15}$  m).

Počáteční chemické složení bylo stejné jako složení povrchových vrstev současného Slunce, jež nebyly dotčeny následným jaderným vývojem. Převládaly tam molekuly  $H_2$  a atomy He, ostatní prvky zastoupeny asi 2 %. Hustota látky byla asi  $5 \cdot 10^{-17}$  kg m<sup>-3</sup> (tj. 10 molekul na mm<sup>3</sup>).



## Konečný stav:

**Slunce** - chladnoucí bílý trpaslík – hvězda tvořená převážně elektronově degenerovaným plynem o hmotnosti asi  $0,54 M_{\odot}$  ( $1,1 \cdot 10^{30}$  kg), s poloměrem  $1/80 R_{\odot}$  ( $4/3 R_Z = 8,5 \cdot 10^6$  m).

Složení uhlík, kyslík + 2 % ještě těžších prvků.

Střední hustota hvězdného reliktu je  $4 \cdot 10^8$  kg m<sup>-3</sup>.

Zbytek látky je prostřednictvím hvězdného větru a pulzací vrácen do mezihvězdného prostoru. Díky němu chemického složení tam přibude trochu prvků C, N, O.

Okolo centrální hvězdy nadále krouží planety se zanedbatelnou hmotností, které však na sebe vážou kolem 98 % momentu hybnosti celé Sluneční soustavy.

☺ Hvězdy – znamenitá osvětlovací tělesa, jež dokáží podstatnou část své vnitřní energie využít na výrobu a emisi fotonů.

- Dále asi  $10^{57}$  neutrin (1 % energie)

**Vývoj Slunce** je časová posloupnost dějů, které je z počátečního stavu dovedou do jeho konečného stavu.

Vývoj v sobě tedy musí zahrnovat:

- obrovské smrštění ve velikosti tělesa v poměru 240 milionů:1, (8 řádů) zahuštění 1:  $8 \cdot 10^{24}$  (25 řádů)!
- únik až 50 % látky (H + He + příměsi) do prostoru.
- změnu chemického složení podstatné části hvězdy (původní H a He se změnilo na C a O).
- vznik sluneční soustavy, kam se odklidila podstatná část počátečního momentu hybnosti.

# Vývoj Slunce v kostce

- Slunce vzniklo spolu se sluneční soustavou před 4,65 mld let.
- Jakmile se v něm zapálily vodíkové reakce, začala nejdelší etapa v jeho životě – stalo se hvězdou tzv. **hlavní posloupnosti**. Tou bude ještě dalších 6 mld let.
- Pozvolna se vyvíjí – jak uvnitř, tak zevně. Uvnitř se u něj vytváří héliové jádro, smršťuje se a zahřívá. Z vnějšku se zahřívá, rozpíná a zjasňuje. Oproti počátku má nyní o 40% větší výkon.
- Na Zemi se však teplota v posledních několika mld let nezměnila. Proč – souběžně klesá skleníkový efekt. Oba děje se kompenzovaly. Dnes jsme svědky opačného procesu.
- V budoucnosti se bude výkon Slunce zvětšovat – tím i teplota na Zemi. Vše v časovém měřítku stovek miliónů let

- Má tedy Slunce před sebou světlou budoucnost? Rozhodně ano, nejméně dalších 7 mld let, bude svítit, a to stále více.
- Už za ½ miliardy let se zjasní natolik, že se Země stane neobyvatelnou. Hromadné přesídlení k jiné hvězdě je chiméra.
- Příčinou krizového vývoje je fakt, že se v nitru Slunce hromadí hélium na úkor vodíku. Vnější vrstvy však zůstávají nedotčeny.
- Dá se proti tomu něco udělat? **Kupodivu ano.** Stačí si pořídit pořádně velkou lžičku a tou vnitřek Slunce zamíchat.

Pro Slunce to bude představovat omlazovací kúru – vrátí se do doby, kdy ještě tak nežhnulo. Navíc to lze i několikrát opakovat. Je to velká výzva pro budoucí inženýry...

- Bez onoho zákroku výkon Slunce stále rychleji poroste. Veškerá voda na Zemi se vypaří, skleníkový efekt dokonale sterilizuje i poslední stopy života. Přeměna Slunce na obra se bude konat už beze svědků...



# Slunce a sluneční soustava

- Sluneční soustava tvořená planetami, planetkami a drobnějším materiálem vznikla se Sluncem ze stejného zárodečného disku, a to před 4,64 mld let.
- Chemické složení těles, jež se zformovala v různých částech SS, je ale rozdílné. Uvnitř jsou malé pevné planety zemského typu, následují obří plynné planety, vně jsou ledová tělesa.
- Vývoj planet je pozvolný. Výjimkou je Země s kapalnou vodou, Měsícem, deskovou tektonikou a životem. Vše formuje její povrch i atmosféru (skleníkový efekt).
- Dráhy planet se nemění, menší tělesa a prach putují SS a část končí ve Slunci. Co se ale stane s planetami? Poví nám něco exoplanety – známe jich již stovky?
- Především to, že SS je dost atypická. U většiny PS jsou obří planety mnohem blíže – horčí jupiteři. Jejich působením jsou menší tělesa vymetána mimo PS. Dále, že planety něco vydrží.

- Pokud výkon Slunce stále poroste, poroste i povrchová teplota terestrických planet, ty časem přijdou o své atmosféry, vnější povrch bude postupně odtávat.



- Pokud výkon Slunce stále poroste, poroste i povrchová teplota terestrických planet, ty časem přijdou o své atmosféry, vnější povrch bude postupně odtávat.
- Planety by vzaly za své úplně, pokud by vstoupily do vnějších vrstev Slunce – následovala by rychle spirála smrti. Toto nejspíš potká Merkur – je hodně blízko.
- U Venuše a Země to už tak jisté není – Slunce v podobě obra totiž ztrácí hodně hmoty – planety se tak dostanou do větší vzdálenosti od Slunce, jejich oběžné doby podstatně vzrostou.
- Pokud přežijí i odhození vnější obálky Slunce, budou existovat věčně. (Konečně pozorujeme planety kroužící i kolem NH).



- Pokud přežijí i odhození vnější obálky Slunce, budou existovat věčně. (Konečně pozorujeme planety kroužící i kolem NH).
- Budou to však dokonale mrtvé, neobyvatelné světy bez atmosféry, bez vody. Teplota na nich rychle poklesne pod 50 K. Jejich budoucnost bude naprosto temná, stejně jako budoucnost Slunce. Agónie potrvá desítky miliard let.