

Hvězdy zblízka



Hvězdné otázky

Jak dlouho hvězdy existují?

Proč se nezhroutí?

Proč hvězdy svítí?

Jak hvězdy vznikají?

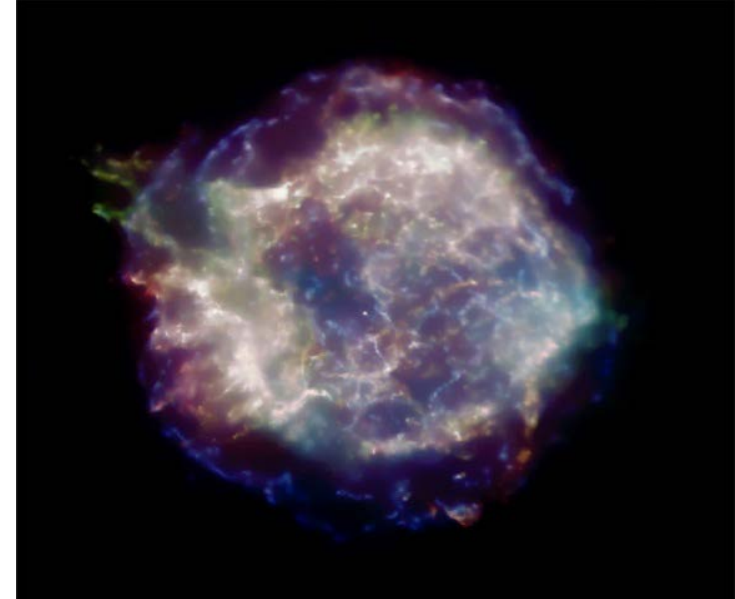
Jak vypadá látka v nitru hvězd?

Co je zdrojem energie hvězd?

...

...

...



Co je hvězda?

Hvězda - gravitačně vázaný objekt, složený z vysokoteplotního plazmatu;

hmotnost $0,08 M_{\odot}$ (cca $80 M_{J}$) – cca $300 M_{\odot}$,

např. R136a1 (LMC) má $315_{(+60-50)} M_{\odot}$

Plazma – zcela nebo částečně *ionizovaný plyn, jako celek je elektricky neutrální.*

Plyn

těsné interakce, srážky

$$F \sim 1/r^6$$

X

Plazma

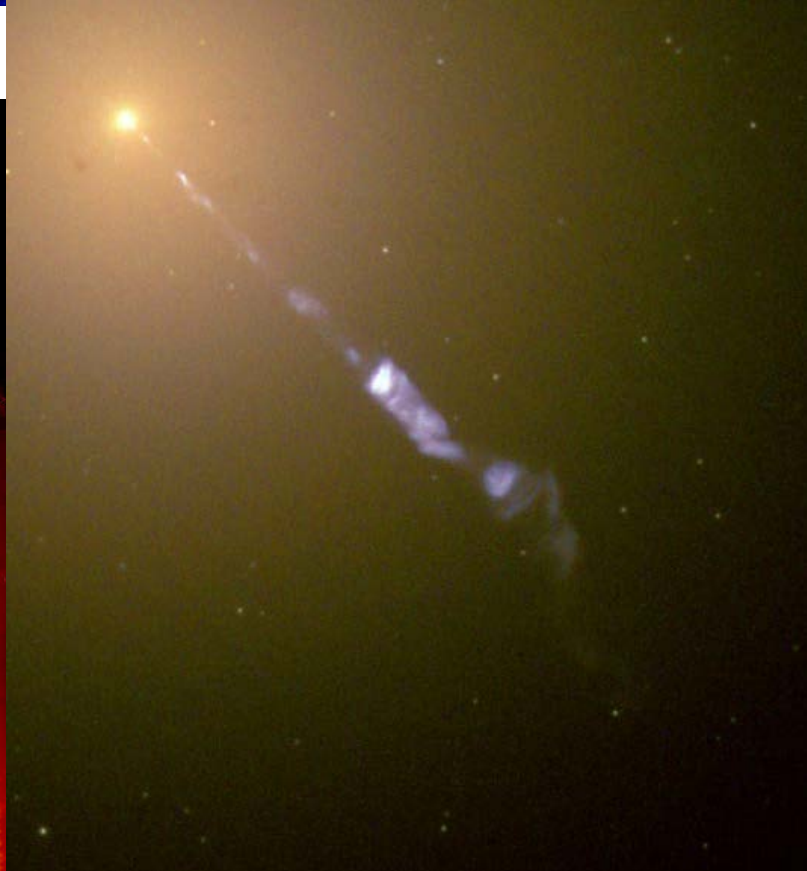
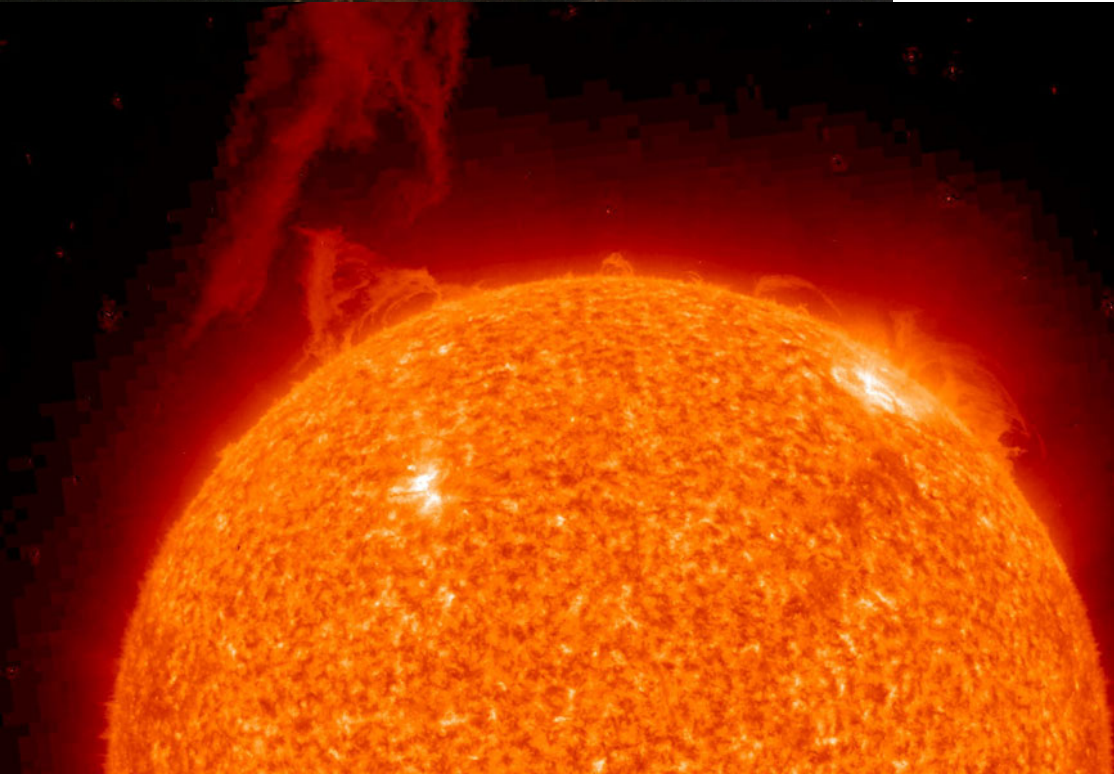
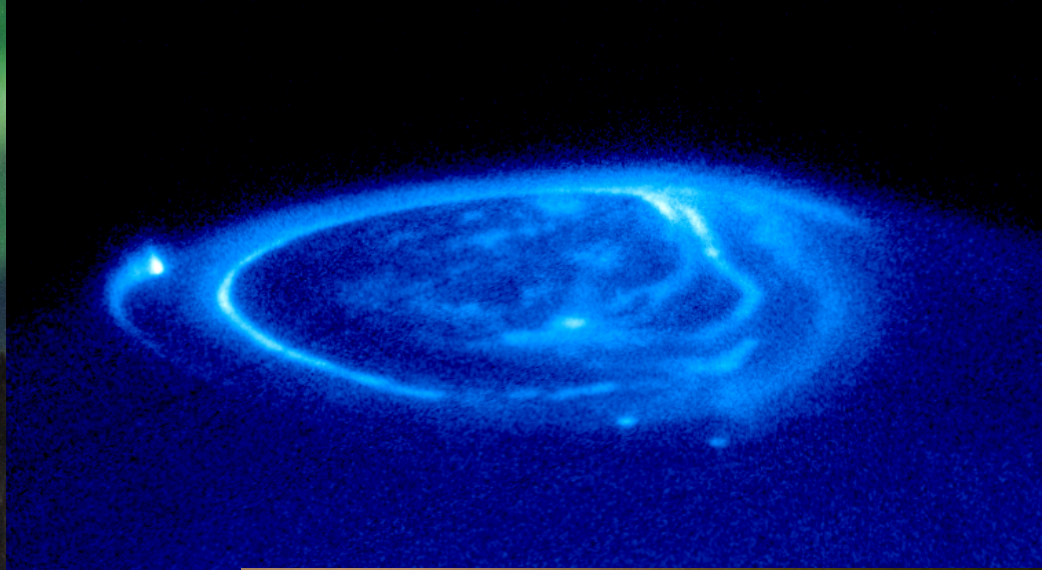
coulombovské interakce,
stálé působení,
volné nosiče náboje

$$F \sim 1/r^2$$

Řídké plazma – coulombovská interakce « vliv vnějších elmg. sil => chová se jako soubor nabitých částic (plazma v mezihvězdném prostoru)

Husté plazma – časté vzájemné srážky => chová se jako kapalina, plyn (plazma uvnitř hvězd)

plazma = 99 % atomární látky ve vesmíru



Chemické složení hvězd

1925 – C. Payne-Gaposhkinová – PhD práce



Abundance - poměrné zastoupení určitých chemických prvků v kosmických objektech,
- v logaritmech počtu atomů vztažených vůči takovému množství látky,
v němž je obsaženo právě 10^{12} atomů vodíku (*zastoupení počtu*),
případně 10^{12} kg vodíku (*hmotnostní zastoupení*)
metalocita -

$$[Fe/H] = \log_{10} \left(\frac{N_{Fe}}{N_H} \right)_{star} - \log_{10} \left(\frac{N_{Fe}}{N_H} \right)_{sun}$$

Periodická soustava prvků

Legend:

- vodík
- alkalické kovy
- kovy alkalických zemin
- železo
- polokovy
- řetkovy
- vzácné plyny

chemické složení Slunce - typické pro naprostou většinu hvězd, potažmo i pro celý vesmír

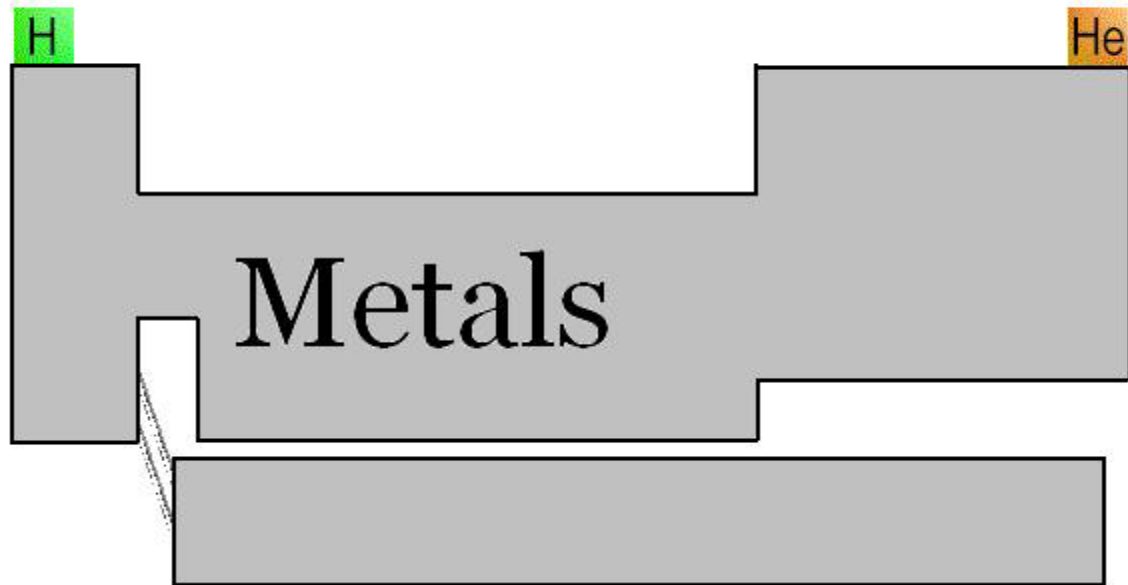
- vodík (téměř 80 % všech atomů),
- helium (téměř 20 %),
- hmotnostně 74 % a 24 %
- ostatní prvky jen asi 2 % (charakteristické pro téměř celou hvězdu s výjimkou jádra)

hmotnostně složení Slunce:

$$X = 0.7380, Y = 0.2485 \text{ a } Z = 0.0134$$

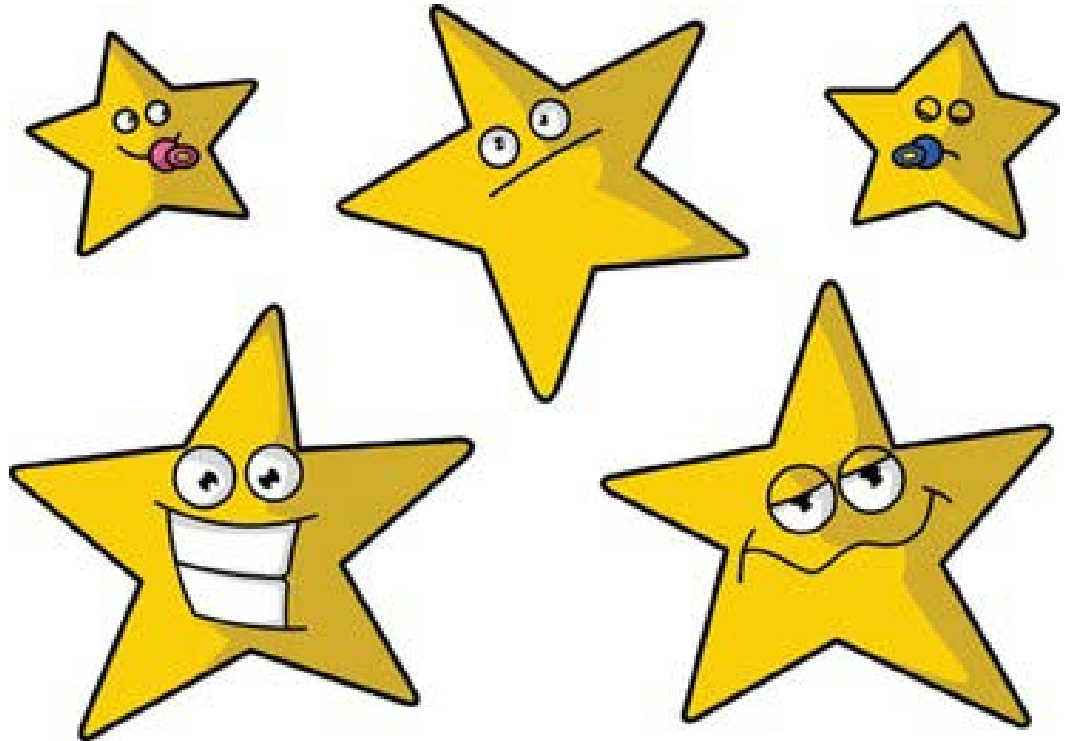
(N. Grevesse et al., *Astrophys Space Sci* (2010) 328,179)

The Astronomers' Periodic Table of Elements



Anatomie hvězdy

- hvězdné nitro
- hvězdná atmosféra



Anatomie hvězdy

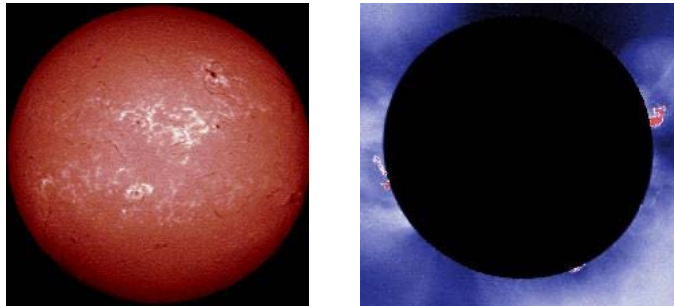
atmosféra – povrchové (pozorování přístupné) vrstvy hvězdy

fotosféra – odtud přichází fotony, které pozorujeme – oblast vzniku optického spektra, „povrch hvězdy“, 7000-4200 K; u různých typů hvězd má rozdílnou tloušťku a hustotu:

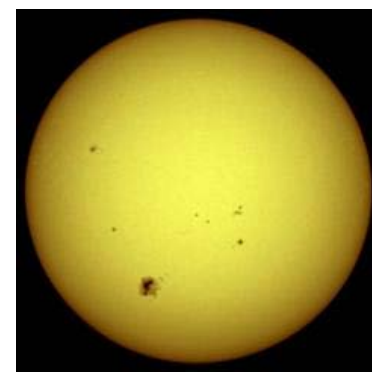
objekt	tloušťka	hustota
Slunce	200 km	$3 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3*}$
bílí trpaslíci	řádově metry	$100 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
obří a veleobří	řádově poloměry Slunce	velmi nízká

*) srovnatelné s hustotou zemské atmosféry ve výšce 60 km

chromosféra – tloušťka 1000 km, 4200-10000 K; vznik nejsilnějších Fraunhoferových čar, emisních čar (sp. tř. M)



koróna – až 10^6 km, teplota až 10^6 K; zdroj rtg. záření hvězd



číselné hodnoty platí pro Slunce



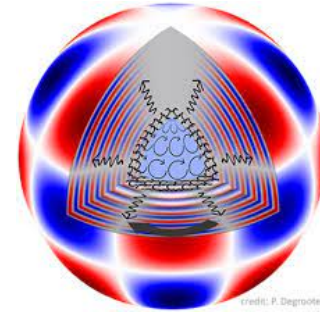
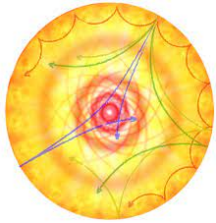
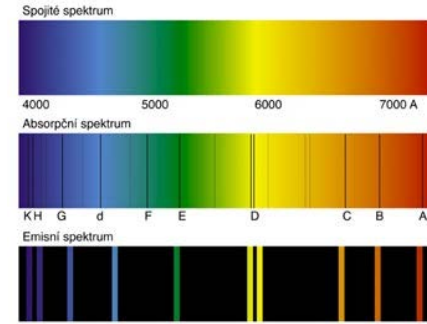
Metody studia hvězdných atmosfér

přímé - spektroskopie – studium hvězd „na dálku“

spektrum hvězdy je dáno stavbou a teplotou fotosféry (viditelný „povrch“ hvězdy)

- kontinuum – spodní husté, horké vrstvy
- absorpční čáry (chladnější, řidší oblasti)
- emisní čáry (teplejší útvary)

- fotometrie - astroseismologie
- studium hvězdného větru – odběry vzorků (pouze u Slunce)



nepřímé – modelování

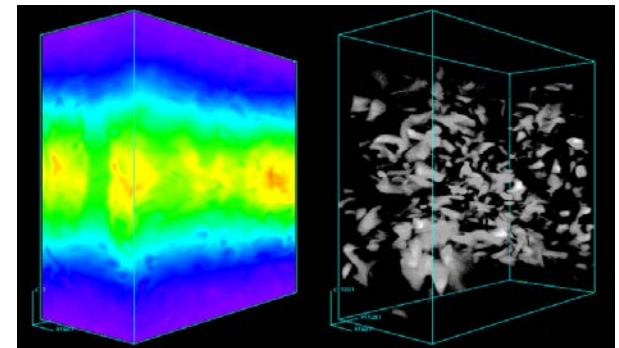
model = idealizovaná představa tělesa, soustavy těles

nebo jevu; fyzikální, fenomenologický, matematický model

tvorba modelu – zjednodušení reality

obecně - modely v astrofyzice:

- hvězd a jejich vývoje,
- vzniku planetárních soustav,
- galaxií, srážek galaxií,
- vesmíru

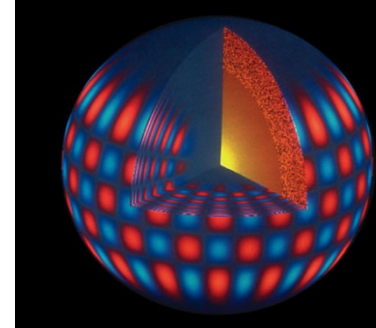


použití modelu - *vždy porovnat se skutečností!*

Nejlépe prostudovanou hvězdnou atmosférou je atmosféra Slunce!

Anatomie hvězdy

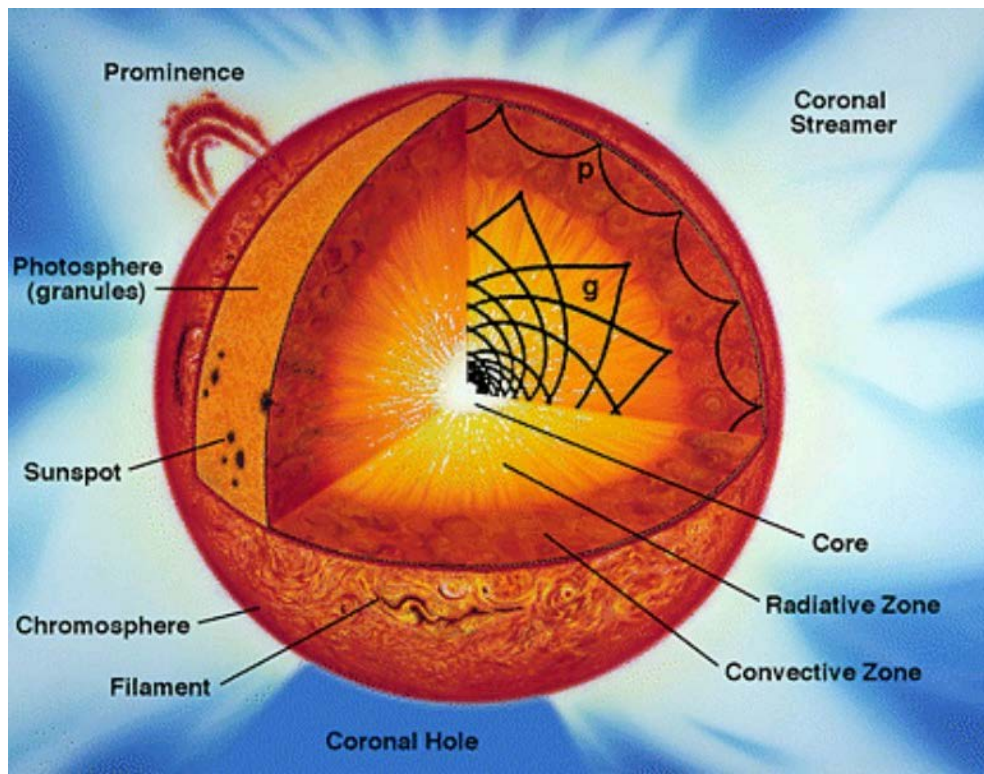
- hvězdné nitro
- hvězdná atmosféra



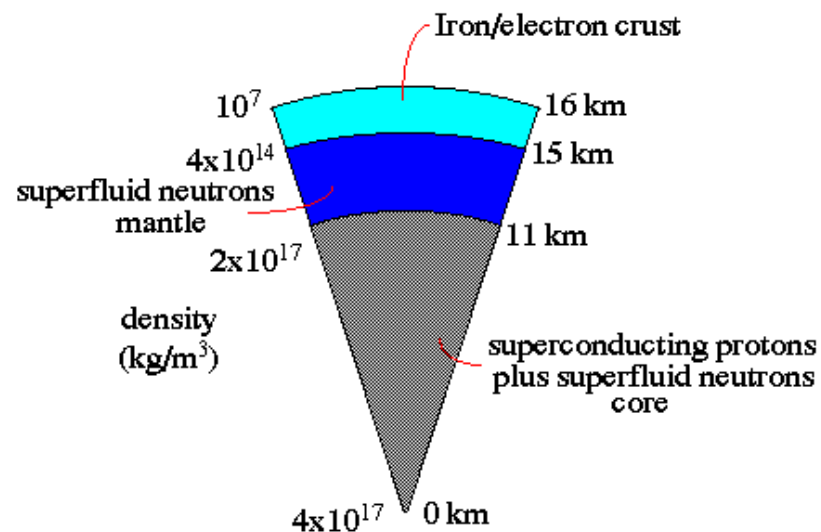
nitro hvězdy - části hvězdy, které nikdy nemůžeme přímo pozorovat; žádný foton přímo z nitra hvězdy se k nám nedostane!

metody zkoumání - nepřímé - modelování

- „přímé“ – helioseismologie, hvězdná seismologie (astroseismologie)



Neutron Star Interior



Pohledy do zákulisí aneb co je za fotosférou?

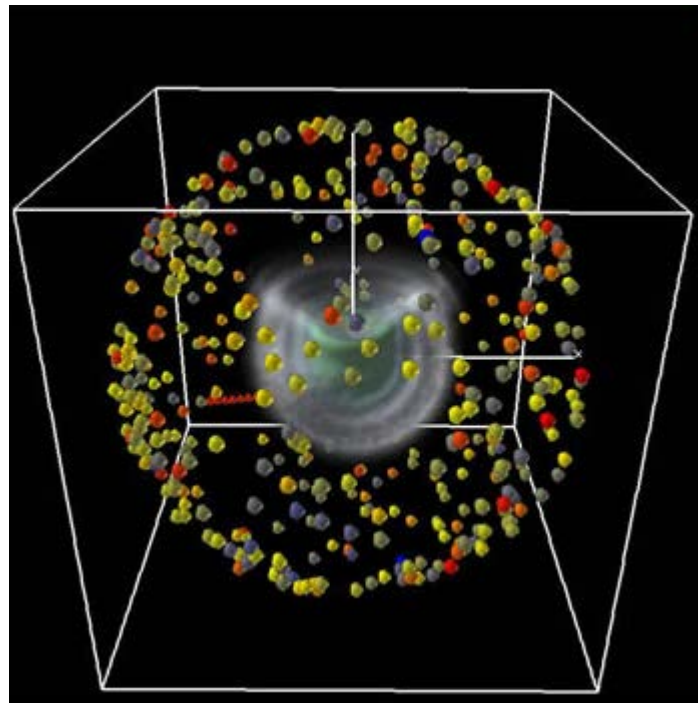
Problémy studia hvězd

- hvězdný vývoj – velmi dlouhé časové škály
- hvězdné nitro – nedostupné

východiskem je
seismologie,
ale zejména
modelování!

Rovnice hvězdné stavby:

- stavová rovnice
- zachování hmoty
- hydrostatická rovnováha
- tepelná rovnováha
- přenos energie



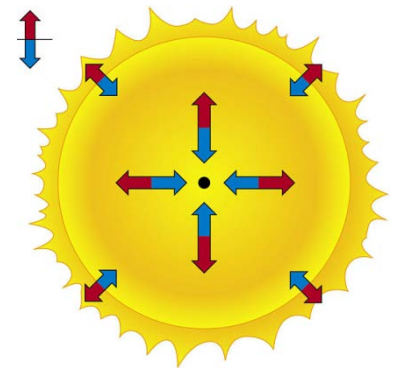
Proč se hvězdy nezhroutí?

proti gravitaci působí jiná síla, která je s gravitační silou ve velmi dokonalé rovnováze

=> hvězda se nachází v *hydrostatické rovnováze*,

gravitační síla x síla *vztlaková*

proti gravitaci nepůsobí tlak, ale gradient tlaku



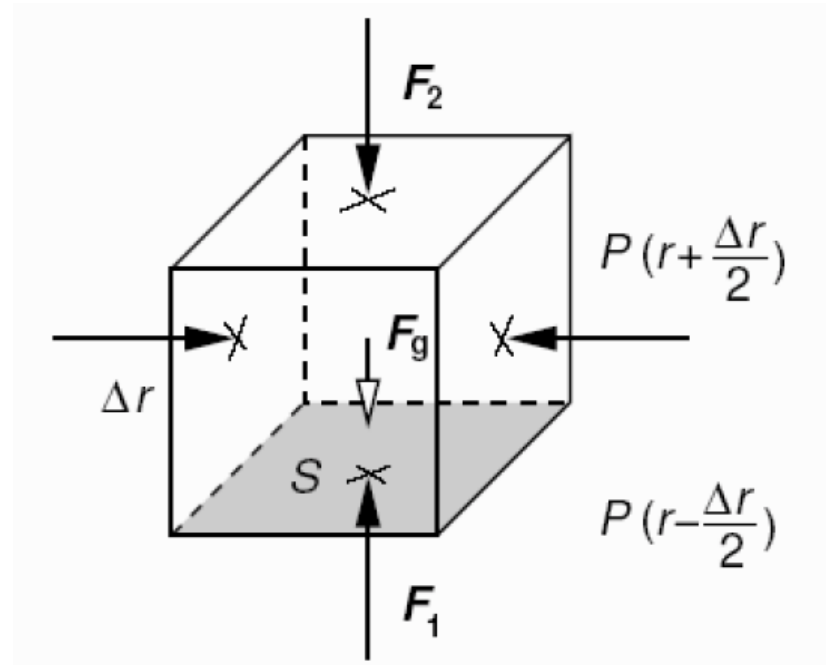
Vztlaková síla – dána tlakem ze dvou složek

- *tlak plynu* - vzájemné srážky částic, z nichž je hvězda utvořena
- *tlak záření* (uplatní se jen u velmi hmotných hvězd)

Rovnice hydrostatické rovnováhy

Zadání:

samostatná, nerotující hvězda,
 elementární objem tvaru kvádru S , Δr
 těžiště ve vzdálenosti r od středu hvězdy
 $\rho(r)$ - hustota plazmatu ve vzdálenosti r
 $\mathbf{g}(r)$ gravitační zrychlení



Hvězda působí na elem. objem tíhovou silou

$$\mathbf{F}_g = m\mathbf{g}(r) = \rho(r) S \Delta r \mathbf{g}(r) = -\rho(r) S \Delta r g(r) \frac{\mathbf{r}}{r}$$

Vztlaková síla = výslednice tlakových sil

$$\mathbf{F}_t = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 = S \left[P\left(r - \frac{\Delta r}{2}\right) - P\left(r + \frac{\Delta r}{2}\right) \right] \frac{\mathbf{r}}{r} \cong S \left[P(r) - \frac{dP}{dr} \frac{\Delta r}{2} - P(r) - \frac{dP}{dr} \frac{\Delta r}{2} \right] \frac{\mathbf{r}}{r},$$

$$\mathbf{F}_t = -S \frac{dP}{dr} \Delta r \frac{\mathbf{r}}{r}$$

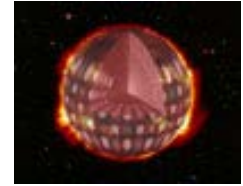
Element v rovnováze = v klidu \Rightarrow výslednice sil nulová $\mathbf{F}_t + \mathbf{F}_g = \mathbf{0}$

$$\mathbf{F}_t + \mathbf{F}_g = \left(-\frac{dP}{dr} - \rho(r) g(r) \right) S \Delta r \frac{\mathbf{r}}{r} = \mathbf{0} \quad \rightarrow$$

Rovnice hydrostatické rovnováhy $\frac{dP}{dr} = -\rho(r) g(r).$

platí zcela obecně, tj. pro libovolná statická tělesa nacházející se v obecném gravitačním poli

V jakém stavu je látka uvnitř hvězd? - modely



1. **centrální teplota** - miliony až miliardy K

vysoká teplota => v nitru je zcela ionizován vodík a helium, velmi silná ionizace těžších prvků,
(+ vysoká hustota) => časté srážky částic =>
=> hvězdná látka se chová jako *ideální plyn*.

2. **hustota látky** - řádově 10^4 až 10^9 kg/m³

v některých fázích vývoje - hustota látky se zvětší =>
částice spolu začnou interagovat i v době mezi vzájemnými srážkami =>
efekty kvantové fyziky -> látka *degeneruje*

Elektronově degenerovaný plyn - mechanickými, tepelnými a elektrickými vlastnostmi připomíná pozemské kovy (vysoká hustota, obtížně stlačitelný, dokonalý vodič elektřiny a tepla).

Výskyt - v nitrech bílých trpaslíků, v centrálních částech hvězd v pokročilejším stupni vývoje či ve svrchních vrstvách neutronových hvězd.

Proč hvězdy září?

Protože jsou horké!



hvězda – dokonalý termostat

teplota fotosféry se s časem výrazně nemění =>

něco? doplňuje ztráty způsobené vyzařováním

=> uvnitř hvězd je zdroj energie

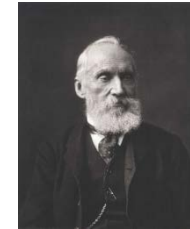
fotosféra - stav *energetické rovnováhy* - v ustáleném stavu musí projít povrchem koule opsané kolem středu hvězdy v každém okamžiku právě tolik tepla, kolik ho uvnitř této koule vznikne

Co je zdrojem energie ve hvězdách?



Přehled představ:

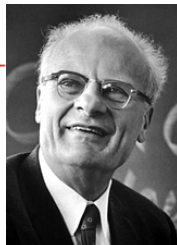
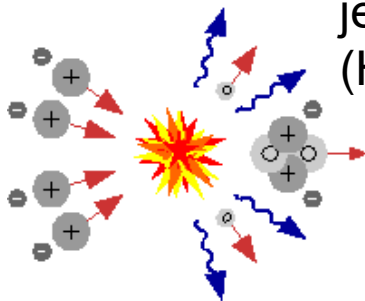
- dobřela rozžhavený železný kotouč (antika, Anaximandros)
- chemické hoření (pol. 19. st. H. Helmholtz, J. Herschel)
- gravitační smršťování (H. Helmholtz a W. Thomson (lord Kelvin))



- dopady meteoritů (1846, J. Mayer)



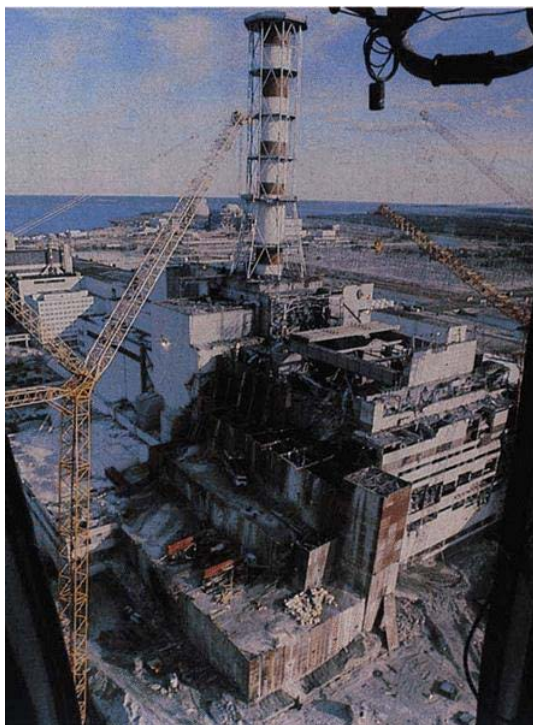
- jaderné štěpení - rozpad ^{235}U (poč. 20. st.)
- jaderné reakce/ jaderná syntéza - 30. léta 20. stol. - Eddington jen za vysoké teploty => zpravidla pouze ve středu hvězdy (H. Bethe, von Weizsäcker – teorie)



srovnání – 2 zdroje s jadernými reakcemi

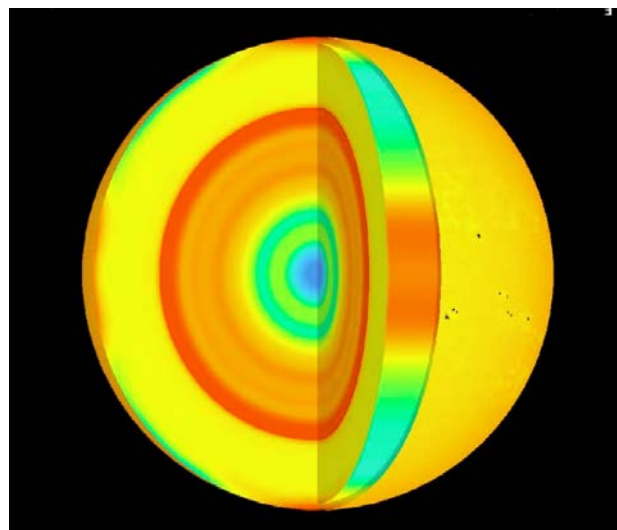
jaderný reaktor **x** ***nitro hvězdy***

štěpení těžších jader
atomů na lehčí
(nekontrolované štěpení =
jaderný výbuch)



jaderná bomba 1 kt uvolní 10^{12} J,
výbuch průměrné sopky – 10^{15} - 10^{18} J,

syntéza lehčích
jader atomů na těžší



produkce Slunce $4 \cdot 10^{26}$ J/s

rekord tokamaku JET (2023):
za 5,2 s 69 MJ z 0.2 mg paliva
($1,3 \cdot 10^7$ J/s)

Proč financovat astronomii a astronomy?



- mj. snaha o napodobení jaderných reakcí ve hvězdách ...
jaderná fúze - levná a ekologická výroba elektřiny

Kontrolovaná jaderná fúze produkuje:

- ❖ $4 \cdot 10^6$ x více energie než chemické reakce (hoření uhlí, olejů, plynu)
- ❖ 4x více energie než jaderné štěpení při srovnatelné hmotnosti paliva

V čem je problém?

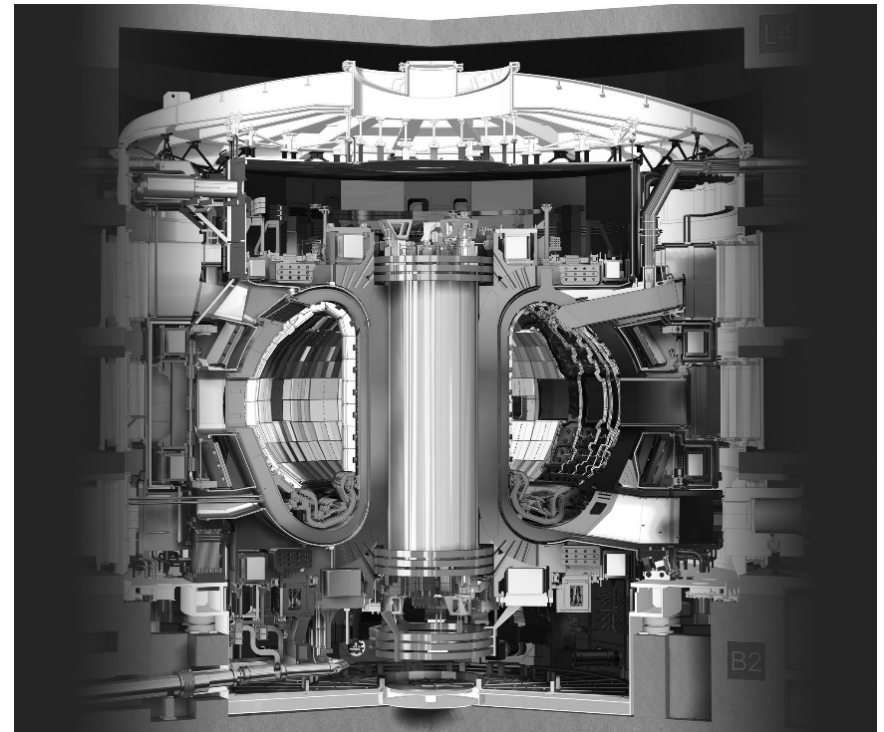
- potřeba řízené reakce (reaktor ITER ve Francii <https://www.iter.org/>)
- dostatek kvalitní izolace
- zatím jen krátkou dobu

(český příspěvek – účast na projektu superlaserů HiPER + ELI)

hlavní vnitřní zdroj energie hvězd = jaderné hoření v centrálních oblastech,
spíše jaderné doutnání, dokonalý termostat (0.001 K při 10^7 K !)

největší energetický projekt lidstva (35 zemí) - obří tokamak pro jadernou fúzi

- hmotnost 23 000 t
- teplota jádra – až 150 mil. K
- výstupní energie 500 MW



<https://edu.ceskatelevize.cz/video/2273-nejvetsi-tokamak-na-svete>

Jaderné reakce v nitru hvězd

Proton-protonový řetězec (p-p řetězec)

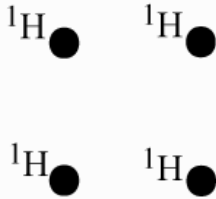
4 protony (jádra H) ->

2 protony+2 neutrony (1 jádro He) + energie (foton, pozitron a neutrino)

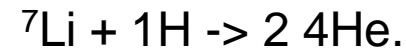
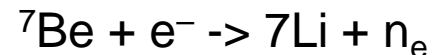
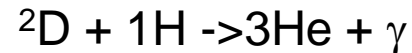
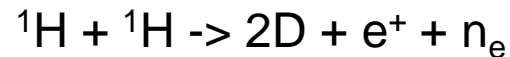
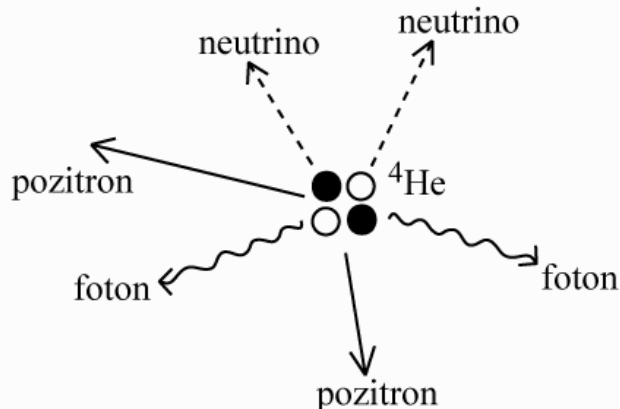
nejvyšší účinnost - při $T < 20 \cdot 10^6$ K, uvolněná energie - $E \sim \rho T^4$ (někdy 5-6)

výskyt – Slunce, hvězdy s $M < 1.7 M_{\odot}$ (většina hvězd)

před syntézou:



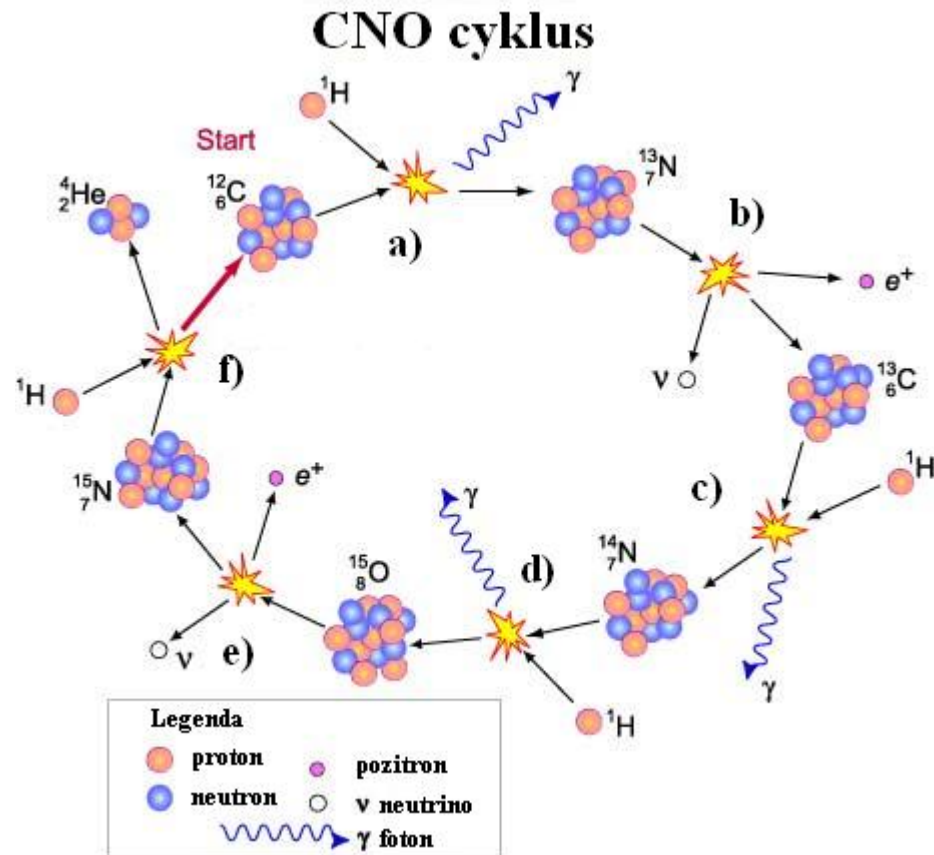
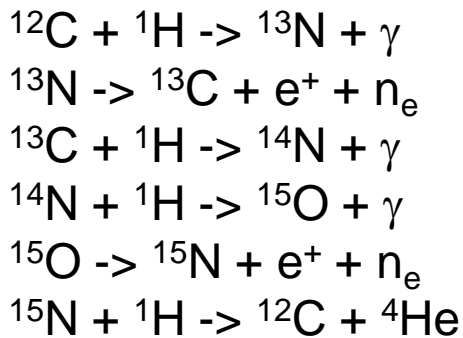
po syntéze:



CNO (uhlíkový) cyklus

4 protony -> 1 jádro helia

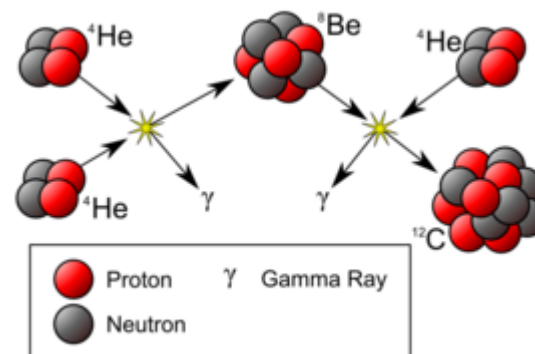
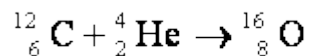
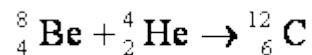
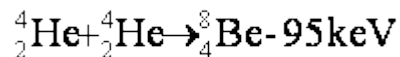
(jádra uhlíku, dusíku a kyslíku - „katalyzátory“)



výskyt – u žhavých hvězd s $M > 1.7 M_{\odot}$, uvolněná energie - $E \sim \rho T^{18}$ (někdy 15-18)

3 α proces

3 částice alfa \rightarrow uhlík + foton(gama)



výskyt - v závěrečných fázích vývoje hvězd,

teploty – řádově $100 \cdot 10^6 \text{ K}$

množství energie $\sim 10^{30} \text{ J}$

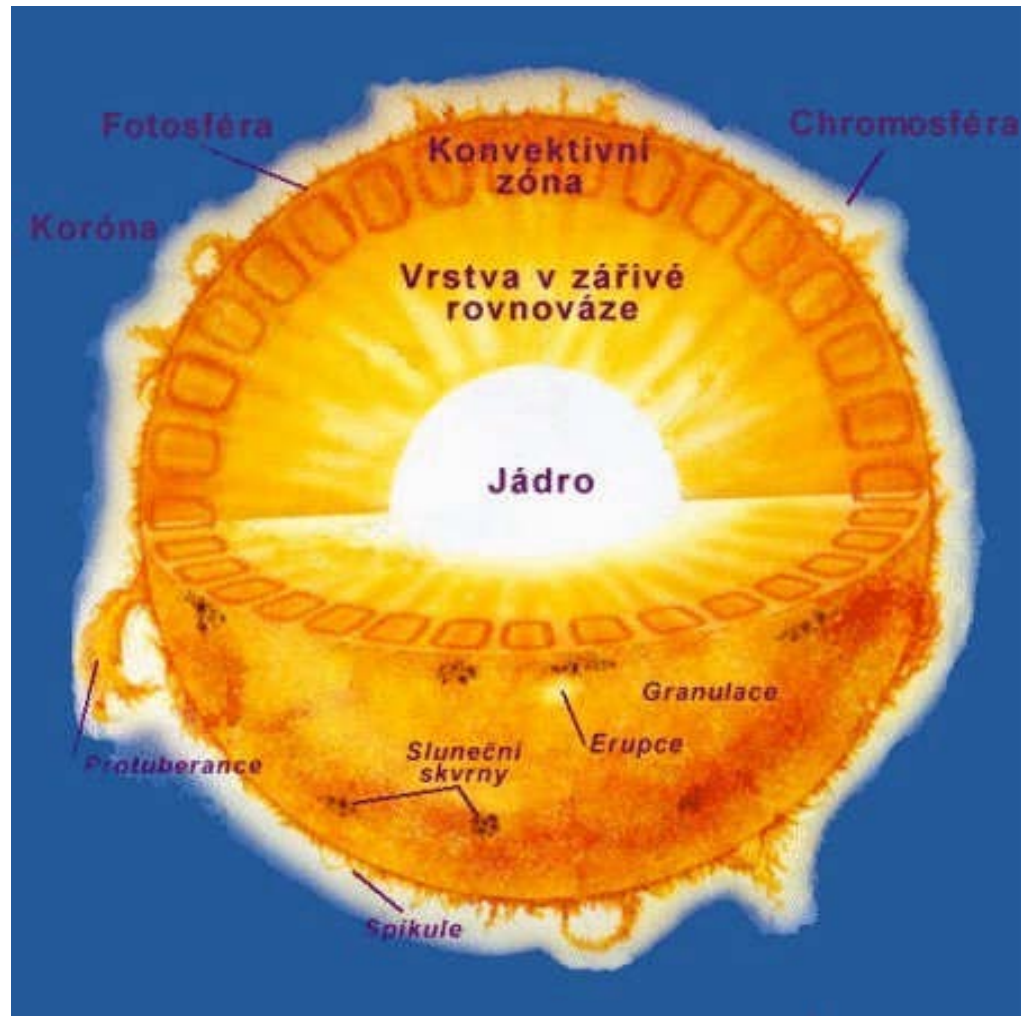
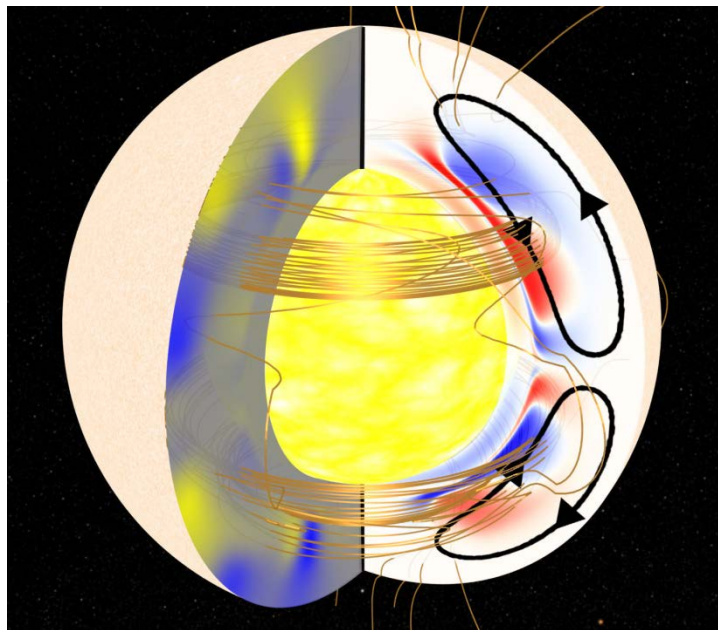
Rozhodující je teplota – ovlivňuje „nasazení“ reakcí i energetickou výtěžnost!

hlavní vnitřní zdroj energie hvězd = jaderné hoření v centrálních oblastech

=> pro přenos tepla na povrch - *teplotní spád*

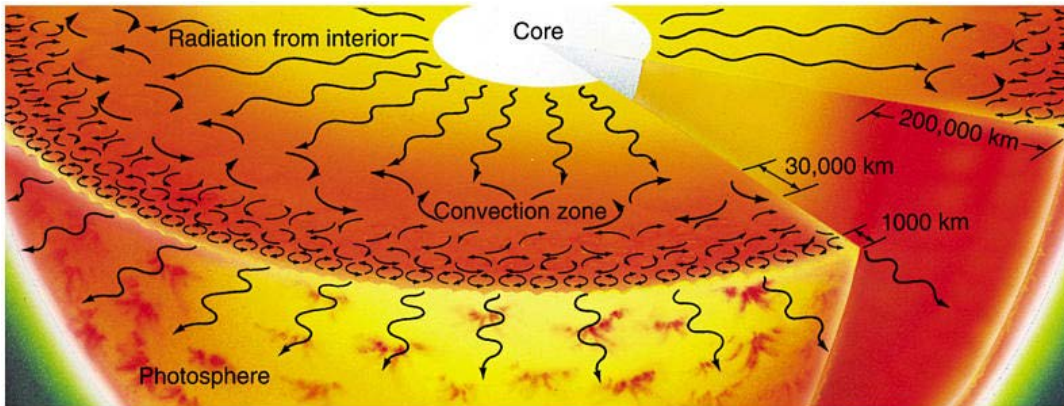
Přenos tepla

1. zářením,
2. prouděním (konvekcí),
3. vedením
4. proud neutrin



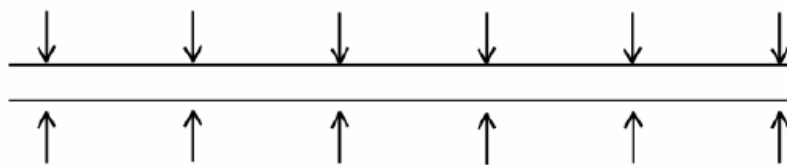
1. Přenos zářením (zářivou difúzí)

- stoprocentně účinný pouze v prázdném prostoru,
- v nitru hvězdy látka brání průletu fotonů; střední volná dráha fotonu (v centru Slunce) – řádově mm až cm
- fotony jsou mnohokrát pohlceny a jiné opět vyzářeny
- v teplejších oblastech je více fotonů, navíc s vyšší energií
- přenos tepla zářením je velmi pomalý



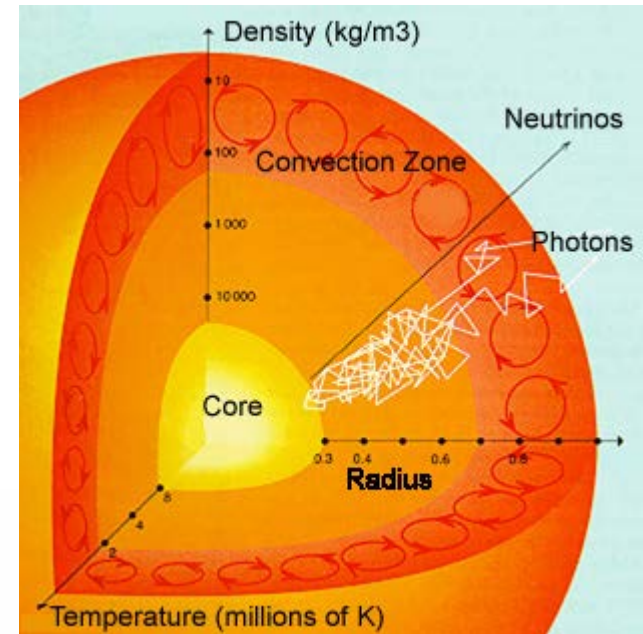
příklad: nitro Slunce, vzdálenost $r = 0,5 R_{\odot}$, teplota $T = 3,5 \cdot 10^6$ K

tok fotonů shora dolů: $4 \cdot 10^{10}$



tok fotonů zdola nahoru: $4 \cdot 10^{10} + 1$

střední volná dráha fotonu
 $d = 1,5$ mm, rozdíl teplot
 $\Delta T = 0,00003$ K

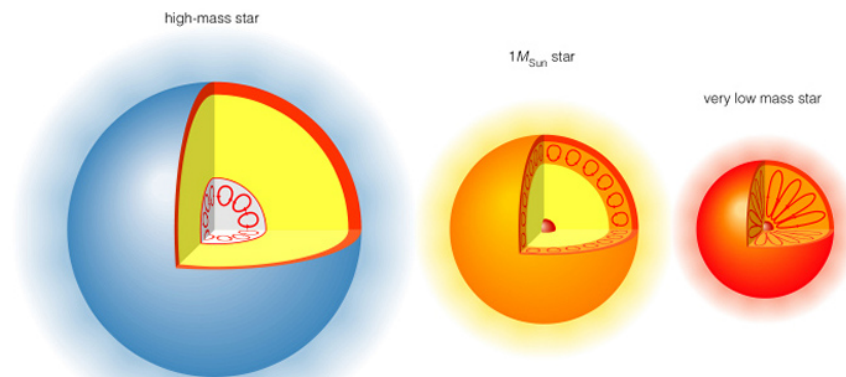


2. Konvekce (proudění)

přenos tepla *konvekci* (*prouděním*) – proudy teplé látky stoupají vzhůru a po ochlazení vyzářením opět klesají dolů

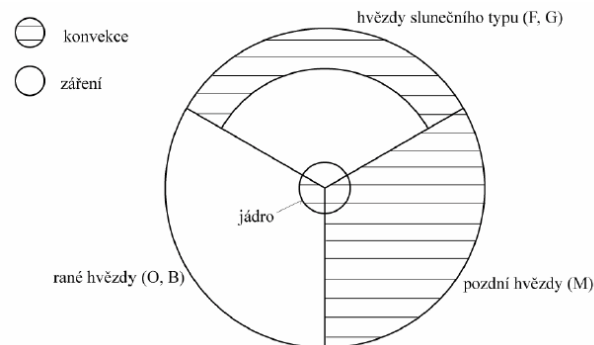
podmínky vzniku konvekce:

- příliš neprůhledný materiál hvězdy (vysoká opacita) - u hvězd $M < 1,5 M_{\odot}$
- konvektivní vrstvy pod fotosférou - tím hlubší, čím je hvězda méně hmotná (u Slunce 200 000 km – *granulace*)



- zdroj energie ve velmi malém objemu => v centru hvězdy prudký spád teploty (povrch nestačí odvádět teplo); pro hvězdy $M > 1,5 M_{\odot}$ *konvekce v jádru* - zajišťuje i dodávku čerstvého materiálu do centra

- účinnější než zářivá difuze
- způsobuje vyhřátí atmosféry (i vnější části – koróny)
- rozpínání koróny - *hvězdný vítr* (u Slunce *sluneční vítr*)



3. Přenos tepla vedením

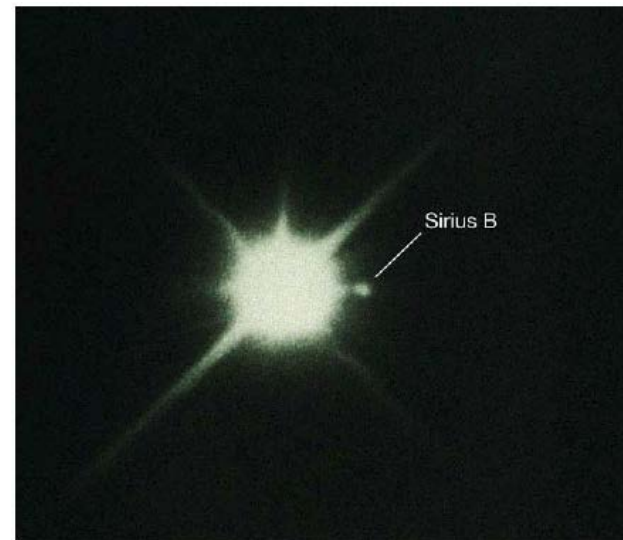
- teplo se přenáší volnými elektrony
- látka má vlastnosti podobné kovům
- ve hvězdách na konci vývoje, bez jaderného hoření a bez smršťování
- výdaje energie jsou hrazeny ze zásob => hvězdy chladnou

o jaké hvězdy jde?

bílí trpaslíci!

Bílí trpaslíci chladnou postupně až desítky miliard let
– proč tak dlouho?

povrch BT je velice malý



4. Proud neutrin

- i u Slunce, ale energeticky nepříliš významné
- podstatné např. u supernov

