

Astrofyzika III. cvičení

Záření hvězd

Vladimír Štefl

Ústav teoretické fyziky a astrofyziky

Výpočet efektivní teploty Slunce

Úloha 4.1 Pomocí bolometrů umístěných na družicích byla zjištěna přesná hodnota solární konstanty K . Určete efektivní povrchovou teplotu Slunce, známe-li dále hodnoty poloměru R_{\odot} a střední vzdálenosti Země od Slunce r .

Řešení: Efektivní povrchovou teplotu určíme ze vztahu $T_{ef} = \left(\frac{Kr^2}{\sigma R_{\odot}^2}\right)^{1/4} = 5780 \text{ K}$.

$$L = 4\pi R^2 \sigma T_{ef}^4 \quad L = 4\pi r^2 K \quad T_{ef} = \left(\frac{L}{4\pi\sigma R^2}\right)^{\frac{1}{4}}$$

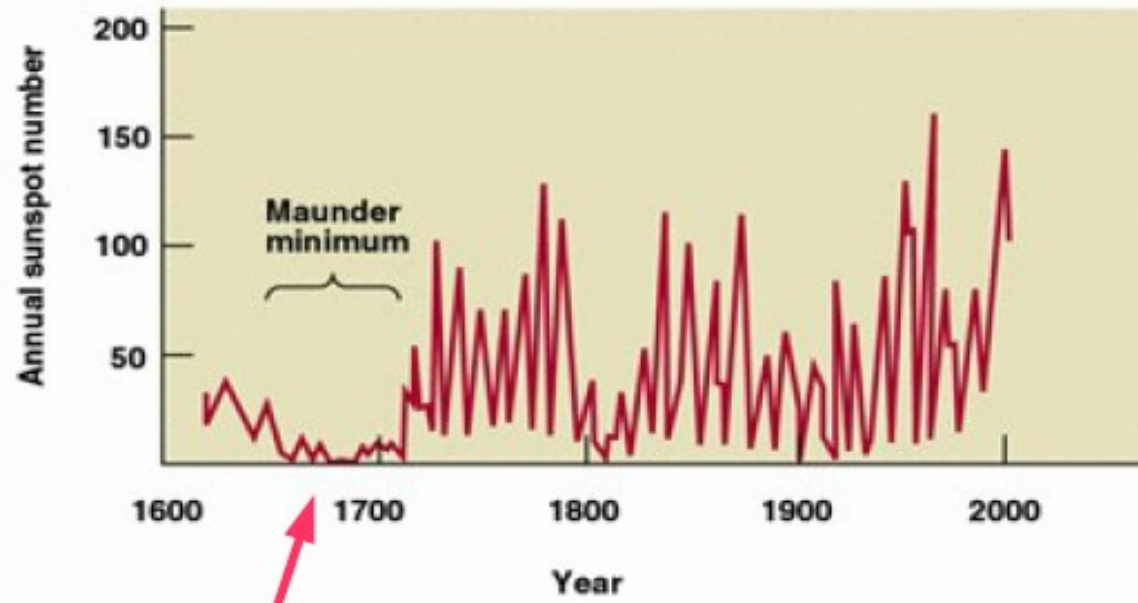
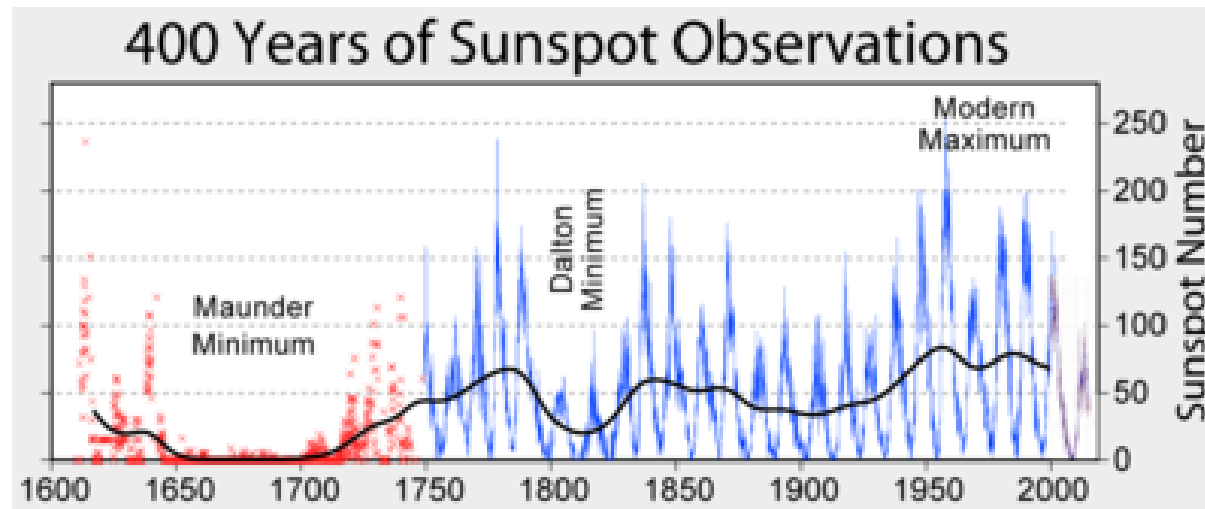
Je sluneční konstanta konstantou ?

Kde je měřena a proč?

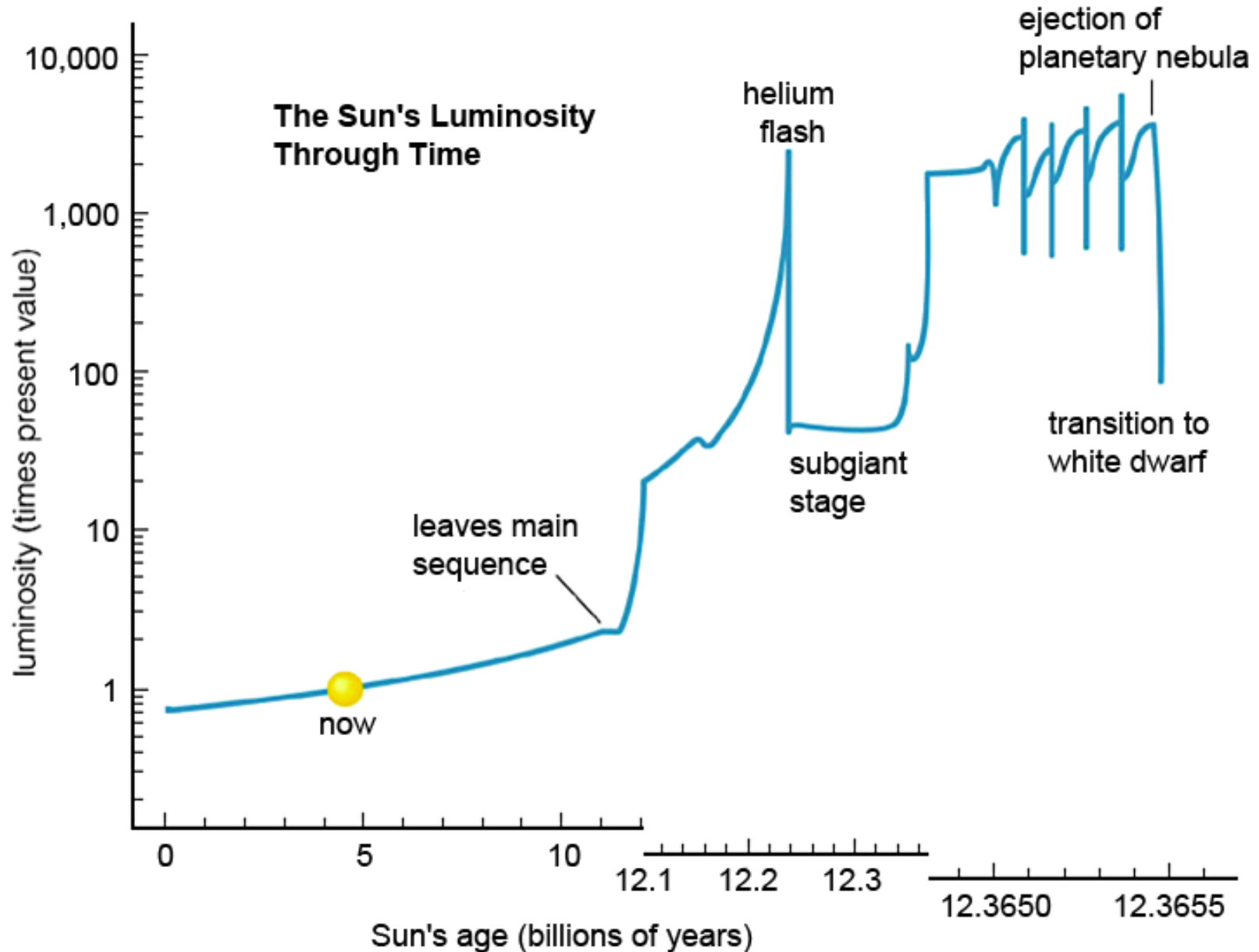
Vyjmenujte důvody její proměnnosti!

Wolfovo číslo... $R = k(10G + N)$ G počet skupin skvrn, N celkový počet skvrn ve všech skupinách

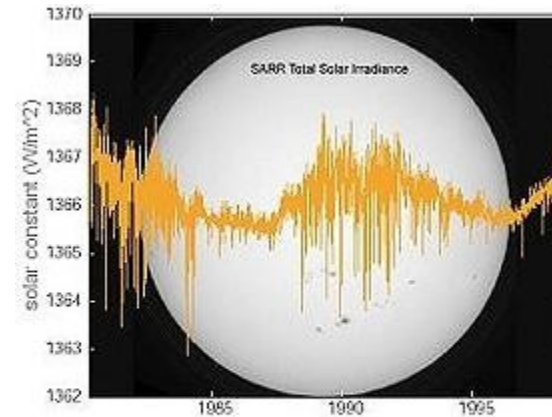
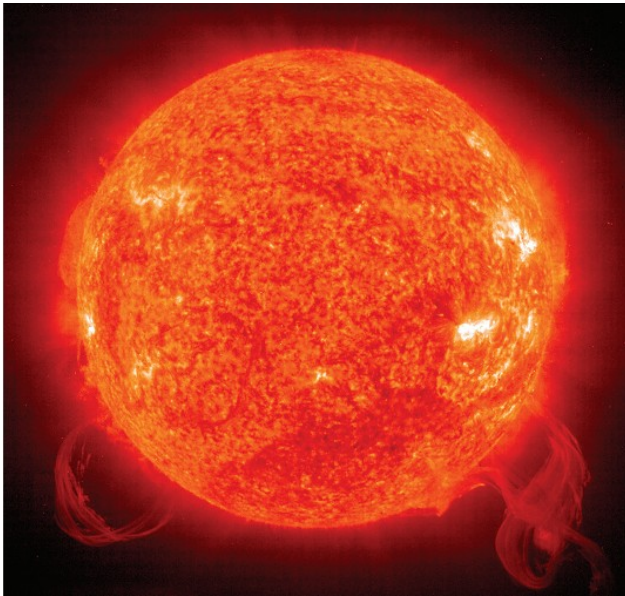
Časový záznam sluneční aktivity



Časový vývoj zářivého výkonu Slunce

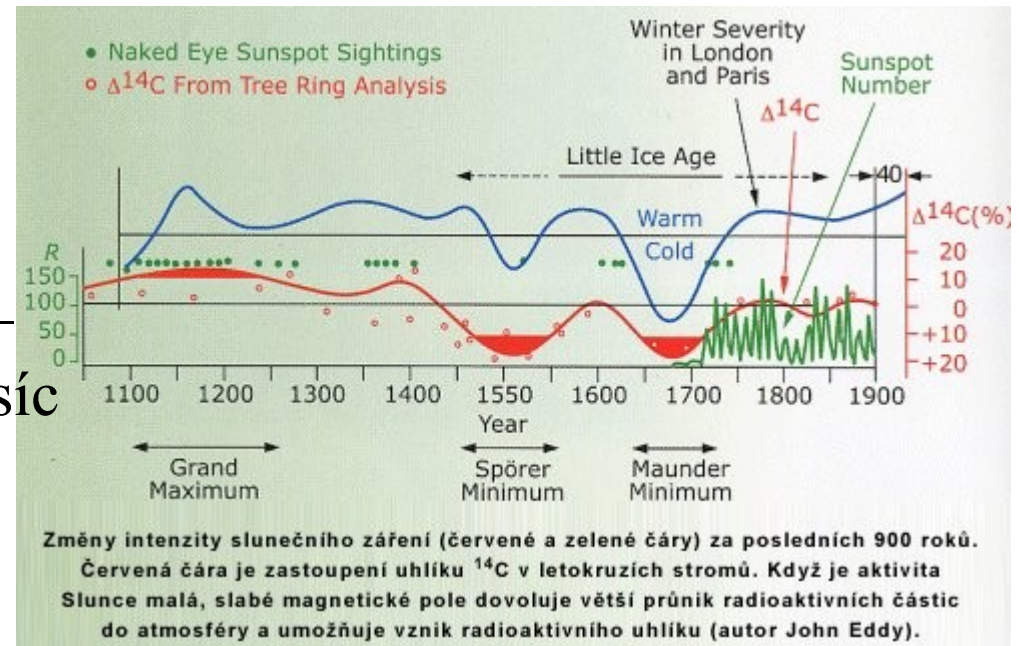


Slunce



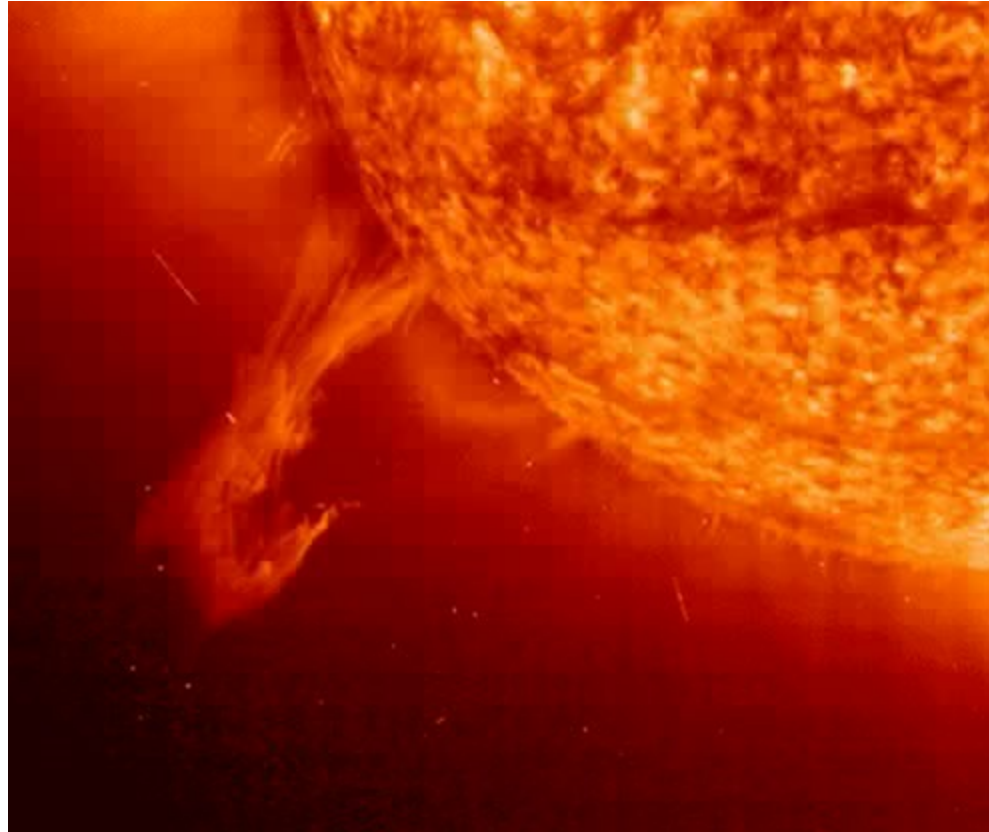
Záznam intenzity slunečního záření na základě družicových pozorování od roku 1978. Zdroj Catania Astrophysical Laboratory.

max. aktivity 1367 W.m^{-2}
min. aktivity 1365 W.m^{-2}
změna sl. konst. (0,2 – 0,6)%
studium ^{10}Be v ledu Antarktidy –
dlouhá perioda sl. činnosti – 6 tisíc
roků,
 L_S roste o 1 % za 100 mil. let



Změny intenzity slunečního záření (červená a zelená čára) za posledních 900 letů. Červená čára je zastoupení uhlíku ^{14}C v letokruzích stromů. Když je aktivita Slunce malá, slabé magnetické pole dovoluje větší průnik radioaktivních částic do atmosféry a umožňuje vznik radioaktivního uhlíku (autor John Eddy).

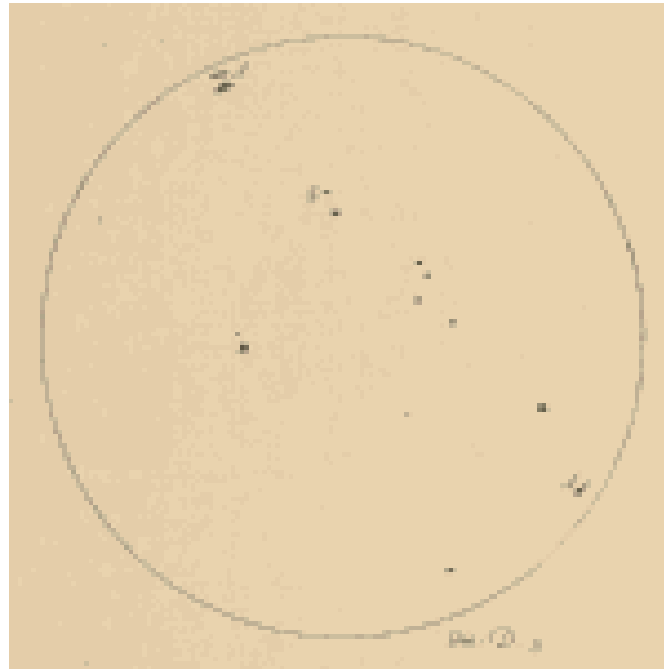
Vývoj protuberance



Sluneční skvrny

Galileo Galilei (1564-1642)

Historie a demonstrace slunečních skvrn 1613

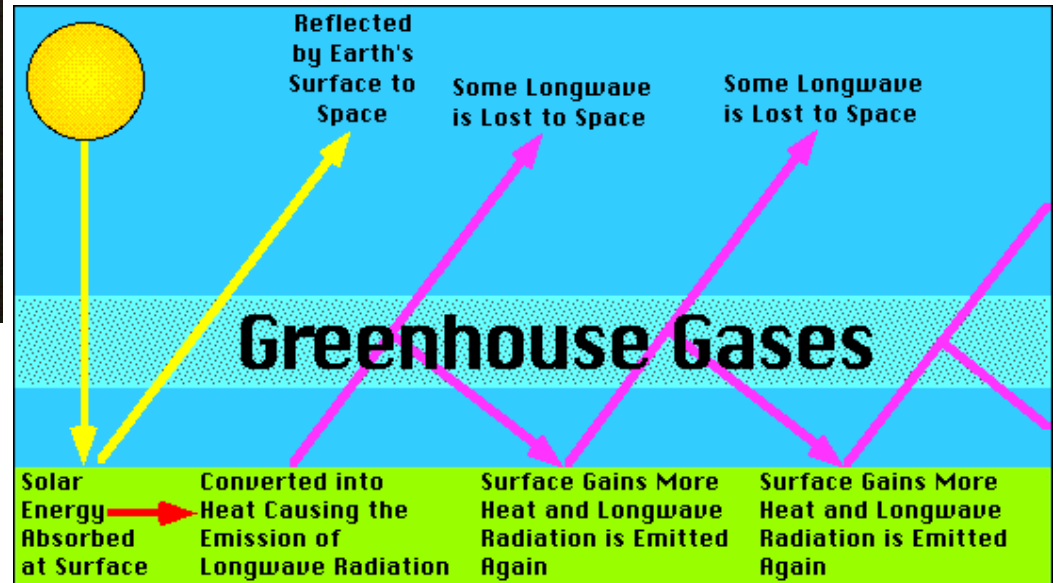
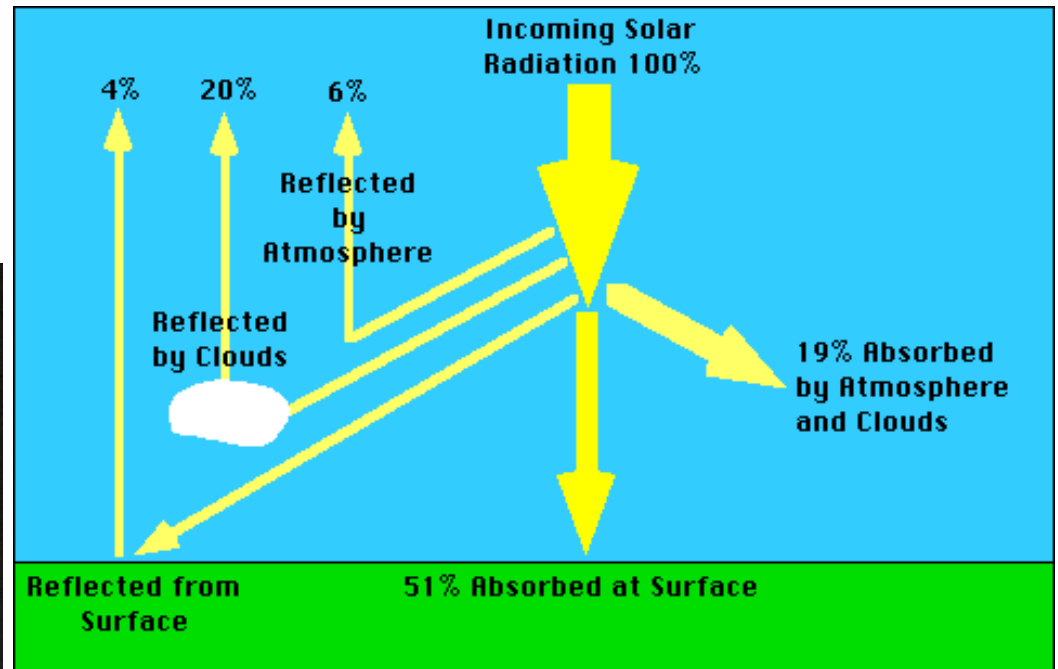


Sluneční skvrny

**GONG Network
Magnetograms**

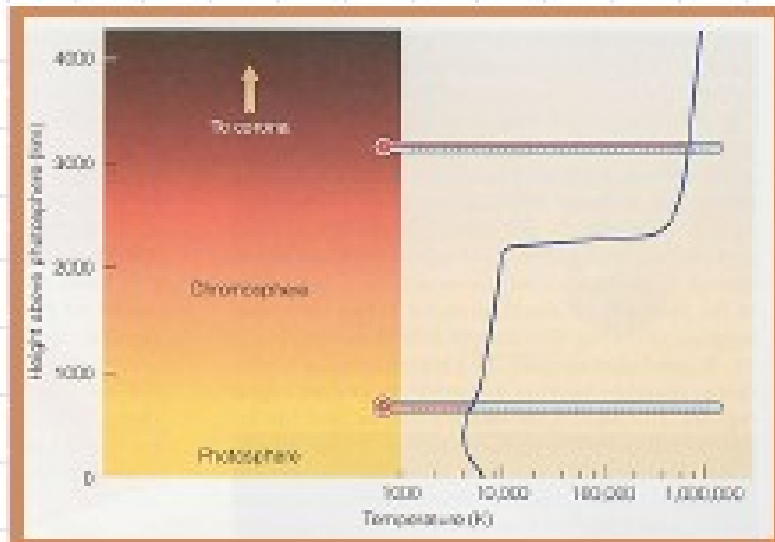
Země

solární konst.



Slunce – teplotní inverze v atmosféře

- ◆ Image of chromosphere in the light from the Hydrogen α emission line, reveals a complex structure
- ◆ Temperature of the chromosphere is higher than in the photosphere, and it rises as one goes outward from the Sun

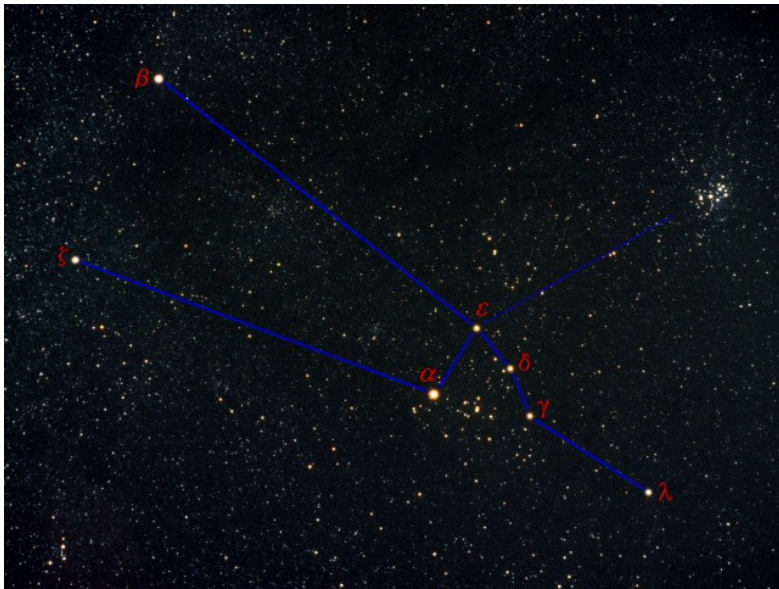


konvekce a magnetického pole v blízkosti fotosféry

Výpočet charakteristik hvězd

Úloha 4.6 U hvězdy α Tau Aldebarana K5 III byl zjištěn úhlový průměr $2\alpha = 0,021''$. Naměřená hodnota hustoty zářivého toku dopadajícího na vnější část atmosféry Země od této hvězdy je $F_{\text{bol}} = 3,2 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Roční paralaxa $\pi = 0,050''$. Stanovte poloměr a efektivní povrchovou teplotu hvězdy.

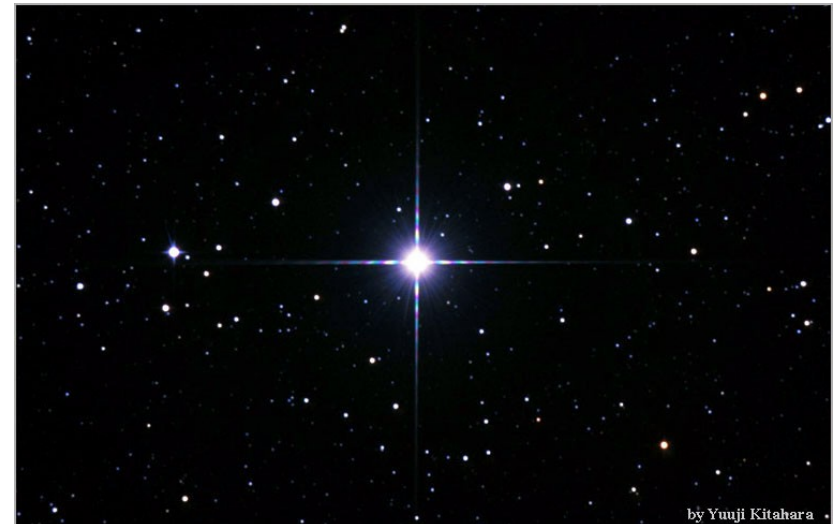
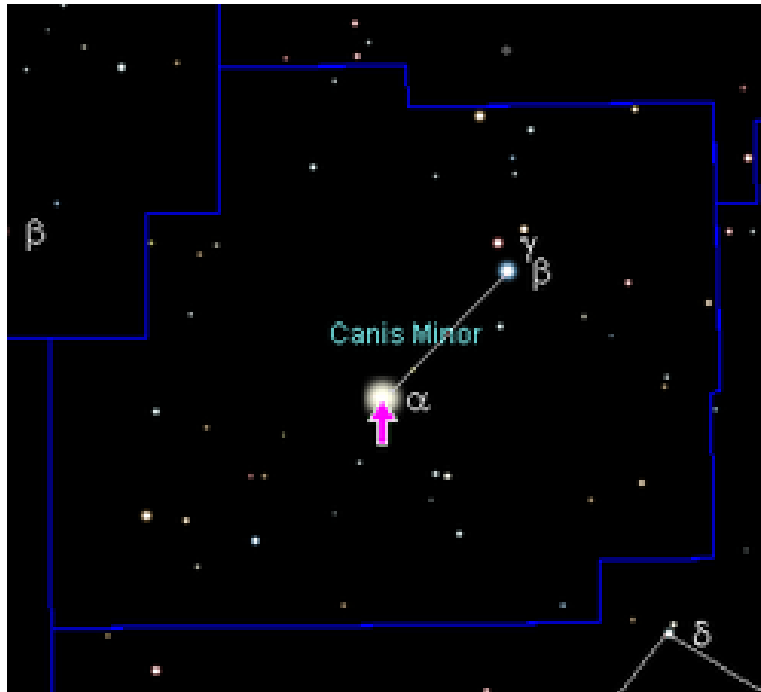
Řešení: Určíme vzdálenost hvězdy $r = \frac{1}{\pi} = 20 \text{ pc}$, úhlový poloměr $\alpha = 0,5 \cdot 10^{-7} \text{ rad}$. Skutečný poloměr $R = \alpha r = 3,09 \cdot 10^{10} \text{ m} = 44 R_{\odot}$. Efektivní povrchová teplota je $T_{\text{ef}} = \left(\frac{F_{\text{bol}} r^2}{\sigma R^2} \right)^{1/4} = 3900 \text{ K}$.



Výpočet charakteristik hvězd

Úloha 4.7 Úhlový průměr hvězdy α CMi Procyona F5 IV-V je $2\alpha = 0,005''$ a roční paralaxa $\pi = 0,292''$. Naměřená hodnota hustoty zářivého toku $F_{\text{bol}} = 1,6 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Určete poloměr a efektivní povrchovou teplotu hvězdy.

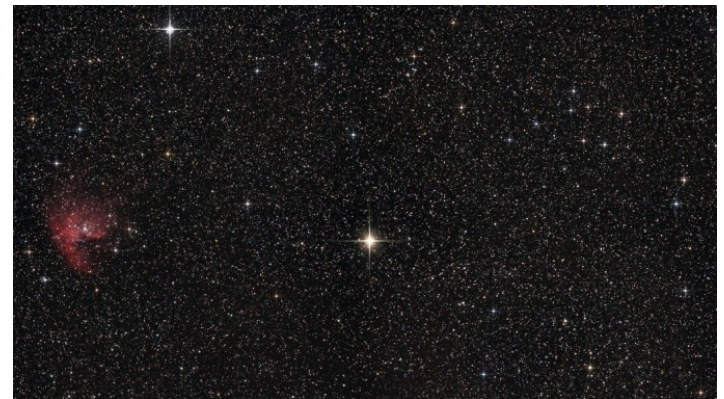
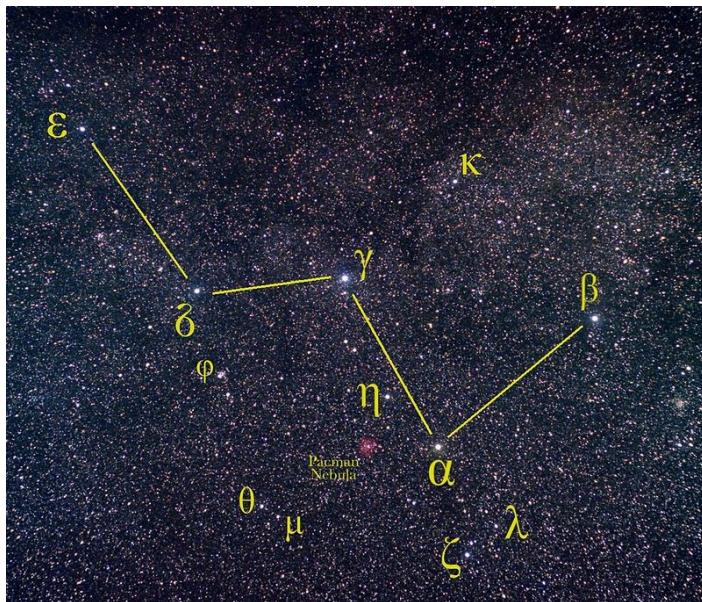
Řešení: Obdobným postupem jako u předcházejících úloh stanovíme $R = 1,7 R_{\odot}$, $T_{\text{ef}} = 6550 \text{ K}$.



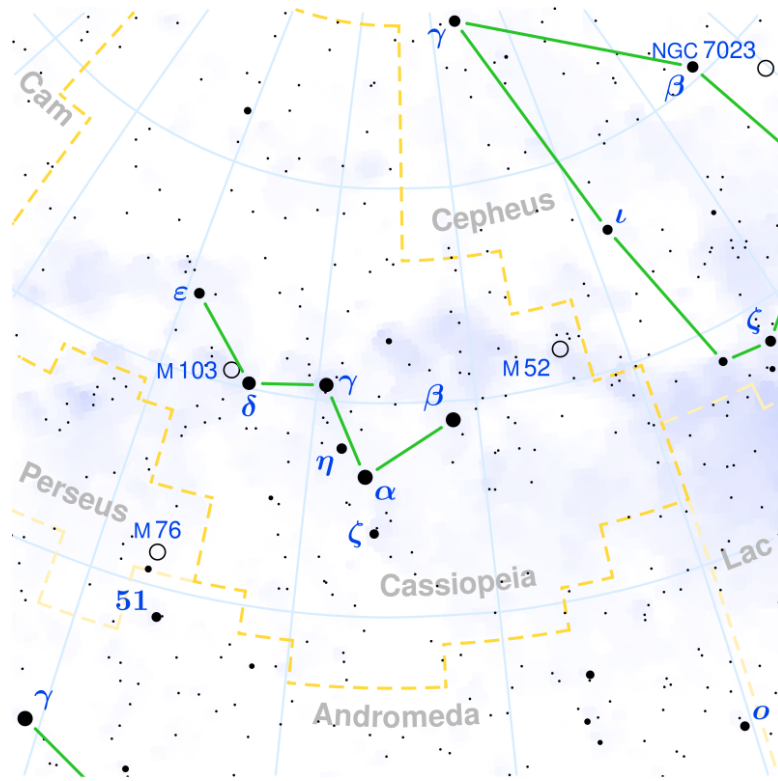
Výpočet charakteristik hvězd

Úloha 4.8 U hvězdy α Cas Schedar K0 III s efektivní povrchovou teplotou 4 500 K, nacházející se ve vzdálenosti 70 pc byla zjištěna hustota zářivého toku $F_{\text{bol}} = 1,65 \cdot 10^{-9} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Určete L , R , M_{bol} , m_{bol} , modul vzdálenosti a λ_{max} .

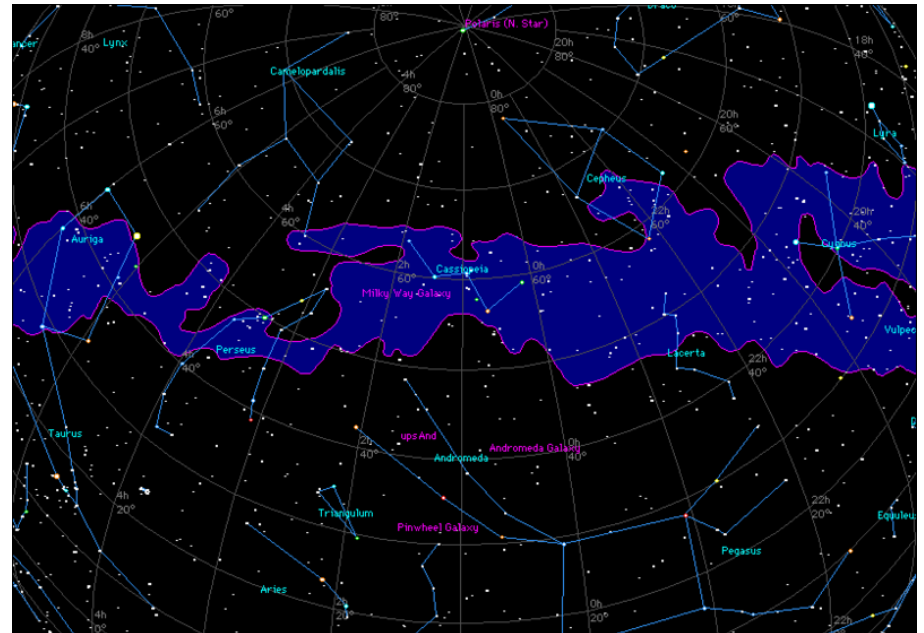
Řešení: Zářivý výkon určíme ze vztahu $L = 4\pi r^2 F_{\text{bol}} = 9,67 \cdot 10^{28} \text{ W} = 251 L_{\odot}$. Poloměr hvězdy stanovíme ze vztahu $R = \left(\frac{L}{4\pi\sigma T_{\text{ef}}^4}\right)^{1/2}$. Absolutní bolometrickou hvězdnou velikost stanovíme ze vztahu $\log L = 0,4(4,75 - M_{\text{bol}})$, odkud $M_{\text{bol}} = -1,24 \text{ mag}$. Pozorovanou bolometrickou hvězdnou velikost získáme z upravené Pogsonovy rovnice $m_{\text{bol}} = M_{\text{bol}} + 5 \log r - 5 = 2,99 \text{ mag}$. Modul vzdálenosti je $m_{\text{bol}} - M_{\text{bol}} = 4,23 \text{ mag}$. Vlnová délka hodnoty maximální intenzity záření zjištěná z Wienova posunovacího zákona je $\lambda_{\text{max}} = 644 \text{ nm}$.



Výpočet charakteristik hvězd



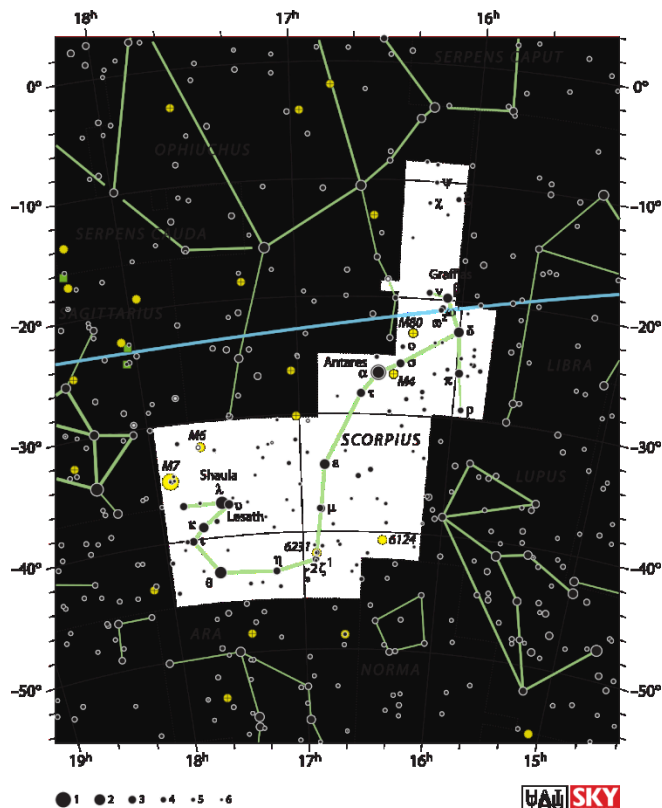
Schedar moderní hodnoty
4 M_{\odot} , 45 R_{\odot} , 4 500 K, 750 L_{\odot}



Výpočet charakteristik hvězd

Úloha 4.20 Hvězda 18 Sco (HD 146 233) je svými charakteristikami velmi podobná našemu Slunci. Její zářivý výkon je o 5 % větší než sluneční, zatímco efektivní teplota je o 90 K nižší než sluneční. Určete poloměr hvězdy.

Řešení: Při $L_{\odot} = 3,86 \cdot 10^{26}$ W a teplotě Slunce $T_{\odot} = 5\,777$ K stanovíme zářivý výkon a teplotu hvězdy 18 Sco takto $L_{\text{Sco}} = 4,05 \cdot 10^{26}$ W a teplota $T_{\text{Sco}} = 5\,687$ K. Poloměr hvězdy určíme ze vztahu $R = \left(\frac{L_{\text{Sco}}}{4\pi\sigma T_{\text{ef, Sco}}^4} \right)^{1/2} = 7,4 \cdot 10^8$ m.



18 Sco

1 M_{\odot} , 1 R_{\odot} , 5 700 K, 1 L_{\odot} , $r = 14$ pc

Výpočet charakteristik hvězd

Úloha 4.24 Hvězda Altair se nachází ve vzdálenosti $r = 5,14 \text{ pc}$, její úhlový poloměr je $\alpha = 0,8 \cdot 10^{-8} \text{ rad}$, efektivní teplota $T_{\text{ef}} = 7680 \text{ K}$. Na základě těchto údajů lze vypočítat zářivý výkon hvězdy. Můžeme ověřit správnost vypočítané hodnoty zářivého výkonu bolometrickým měřením hustoty zářivého toku, jestliže prahová citlivost bolometru umístěného na družici k určení hustoty zářivého toku je $10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$?

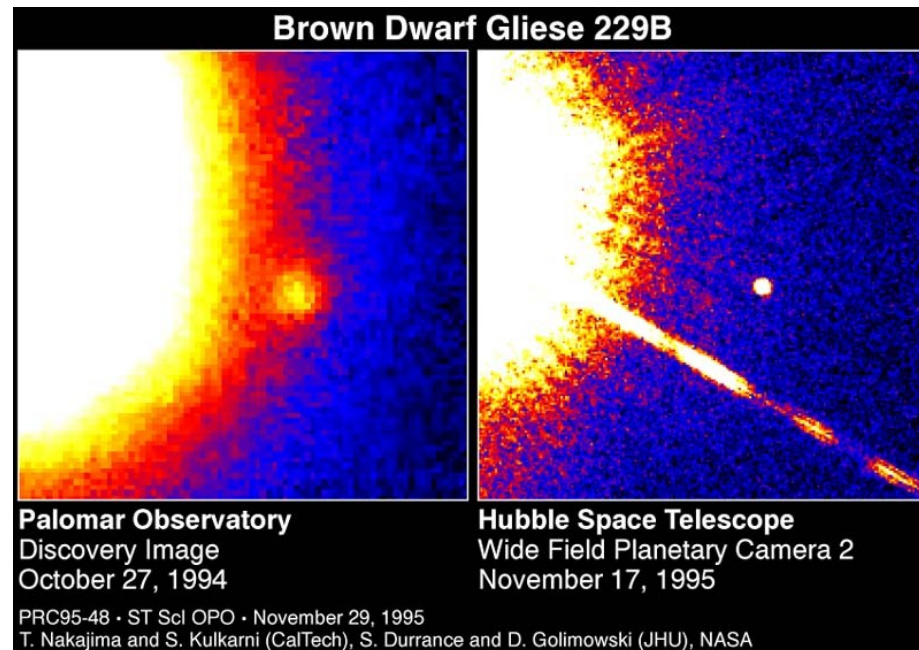
Řešení: Nejprve stanovíme poloměr hvězdy $R = \alpha r = 1,3 \cdot 10^9 \text{ m} = 1,9 R_{\odot}$. Propočítaný zářivý výkon hvězdy je $4\pi R^2 \sigma T_{\text{ef}}^4 = 4,2 \cdot 10^{27} \text{ W}$. Odtud vypočítaná hustota zářivého toku $F_{\text{bol}} = 1,3 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, bolometr má dostatečnou prahovou citlivost.



Výpočet charakteristik hvězd

Úloha 4.25 První objevený hnědý trpaslík Gl 229 B se vyznačuje roční paralaxou $\pi = 0,175''$. Maximum intenzity vyzařování jeho spojitého spektra připadá na vlnovou délku $2,9 \mu\text{m}$, poloměr je $0,94 R_J$. Odhadněte, jaká musí být minimální prahová citlivost bolometru umístěného na družici obíhající Zemi k detekci hustoty zářivého toku od tohoto hnědého trpaslíka.

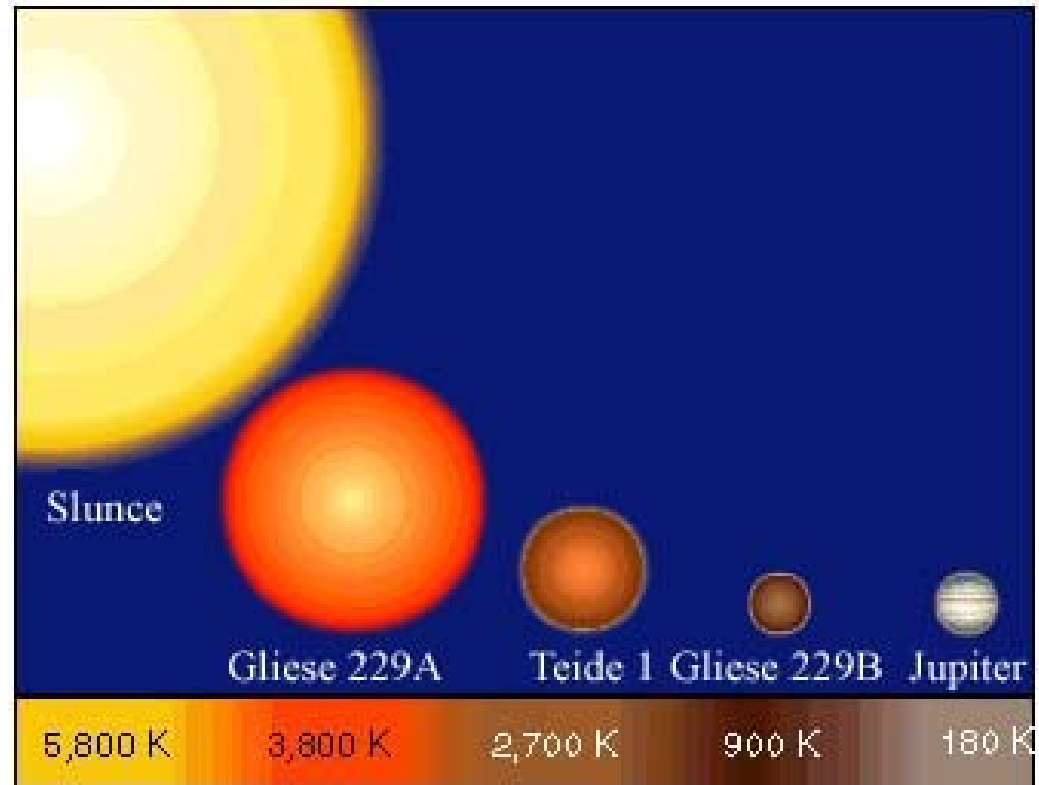
Řešení: Při paralaxe $\pi = 0,175''$ je vzdálenost hvězdy $r = 5,7 \text{ pc}$. Teplotu určíme z Wienova posunovacího zákona $T = b/\lambda = 1000 \text{ K}$. Zářivý výkon $L = 4\pi R^2 \sigma T_{\text{ef}}^4 = 3,2 \cdot 10^{21} \text{ W}$. Požadovaná minimální prahová citlivost je $F_{\text{bol}} = \frac{L}{4\pi r^2} = 8,2 \cdot 10^{-15} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.



Hnědí ? šarlatoví trpaslíci, soustava Gliese 229

fyzická dvojhvězda, $T = 200$ roků,
 $a = 40$ au, $\pi = 0,173''$

$M_1 = 0,6 M_S$, $R_1 = 0,5 R_S$,
 $T_{ef} \approx 3000$ K, hnědý trpaslík
 $M_2 \sim 40 M_J$, $R = 1R_J$ $T_{ef} \sim 900$ K,
 CH_4



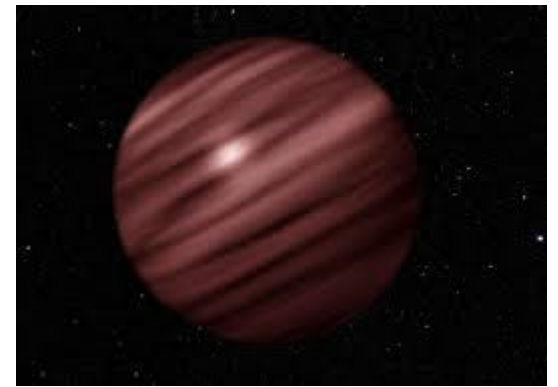
Hnědí trpaslíci

Shiv Kumar 1963 – navrhl tělesa s hmotnostmi mezi hvězdami a planetami

Jill Tarterová 1975 – pro infračervené hvězdy zavedla pojem **hnědí trpaslíci**, ve skutečnosti **šarlatoví trpaslíci**

1994 – objev prvních hnědých trpaslíků, potvrzení teoretických úvah

Hnědí trpaslíci v Orionu



Hnědí trpaslíci

Při $T > 2\,500\text{ K}$ sp. třída L $\sim 2\,000\text{ K}$, teplí hnědí trpaslíci
sp. třída T $\sim 1\,000\text{ K}$, chladnější h. trpaslíci
sp. třída Y $\sim 750\text{ K}$, velmi chladní hnědí trpaslíci

Vyzařování v infračerveném oboru

Poloměry $\sim 10^{-1} R_S$

Hmotnosti $(8 \cdot 10^{-2} - 2 \cdot 10^{-2}) M_S$

Zářivé výkony $(10^{-3} - 10^{-6}) L_S$

Nejprve přeměna deutéria na helium, posléze vznik degenerovaného plynu $T_c \downarrow, P_c \uparrow, U_i \uparrow$

Jak je nalezneme? - Lithiový a metanový test

Hnědí trpaslíci

Objekt však není ani planetou, protože ve vývoji tohoto objektu s hmotností $(0,07 - 0,013) M_{\odot}$ musí existovat krátká etapa termonukleárního stadia, v jejímž průběhu shoří těžký izotop vodíku deuterium $D \rightarrow He$, ${}^1_1H + {}^2_1D \rightarrow {}^3_2He$. Jde o velmi krátkou etapu vývoje, protože deuterium je velmi řídký se vyskytující izotop, $D/H = 10^{-5}$, hoření proto probíhá pouze několik milionů roků, což nezabrání celkovému dalšímu smršťování objektu. Povrchová teplota nepřevyšuje 2 800 K, proto takové hvězdy nazýváme hnědými trpaslíky, vhodněji a přesněji „šarlatovými“ hvězdami.

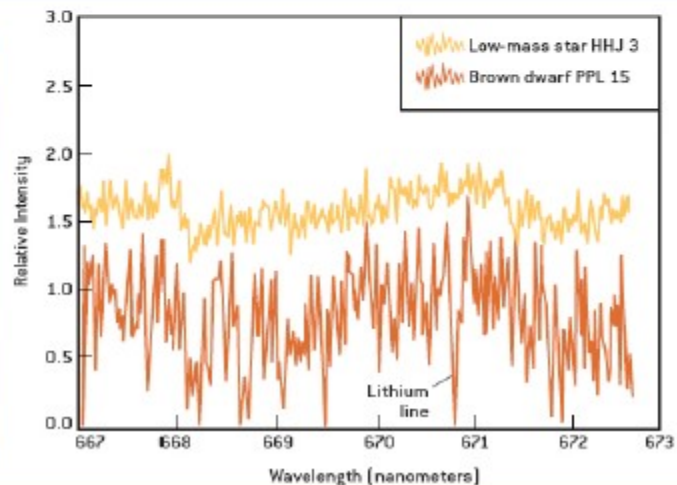
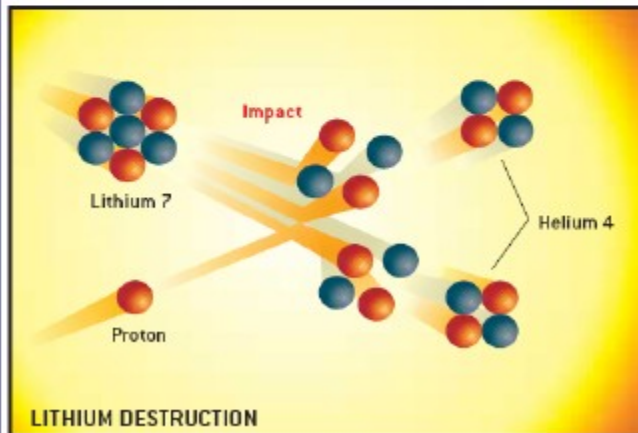
vyzařování v infračerveném oboru, uvolňování potenciální energie při smršťování

Vývoj hnědých trpaslíků můžeme sledovat prostřednictvím viriálové věty $0 = W_T + W_p$, předpokládáme, že hvězda se pozvolna smršťuje. Platí $\langle W_T \rangle = -\frac{1}{2} \langle W_p \rangle$, tudíž $W_p = -k \frac{GM^2}{R} \rightarrow \Delta W_p = k \frac{GM^2}{R^2} \Delta R$. Při konstantní hmotnosti $\Delta W_T \approx -\frac{\Delta R}{R^2} > 0$, tedy ΔR je záporné. Hvězdy se smršťují a narůstá jejich centrální teplota.

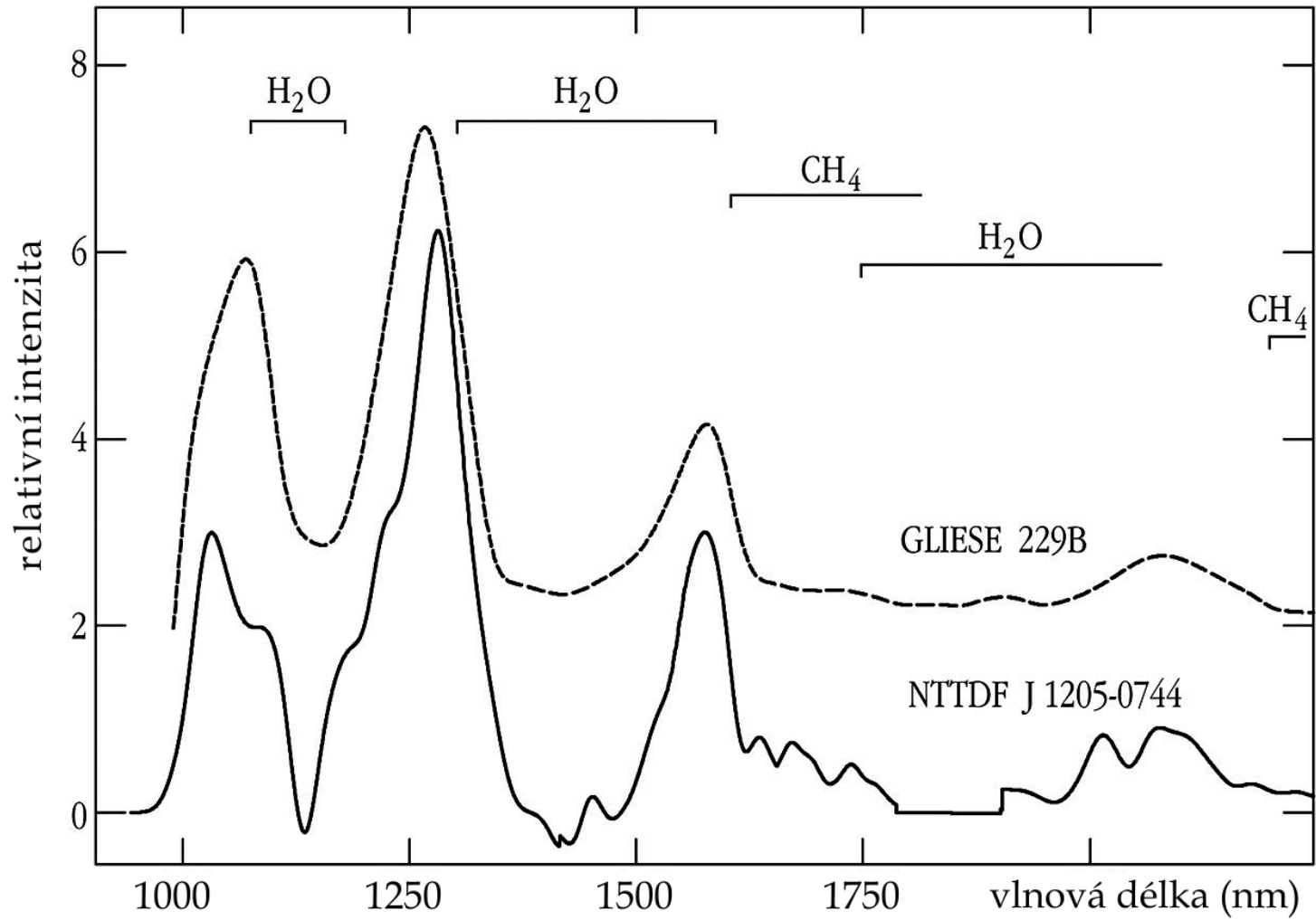
Hnědí trpaslíci

Lithiový test

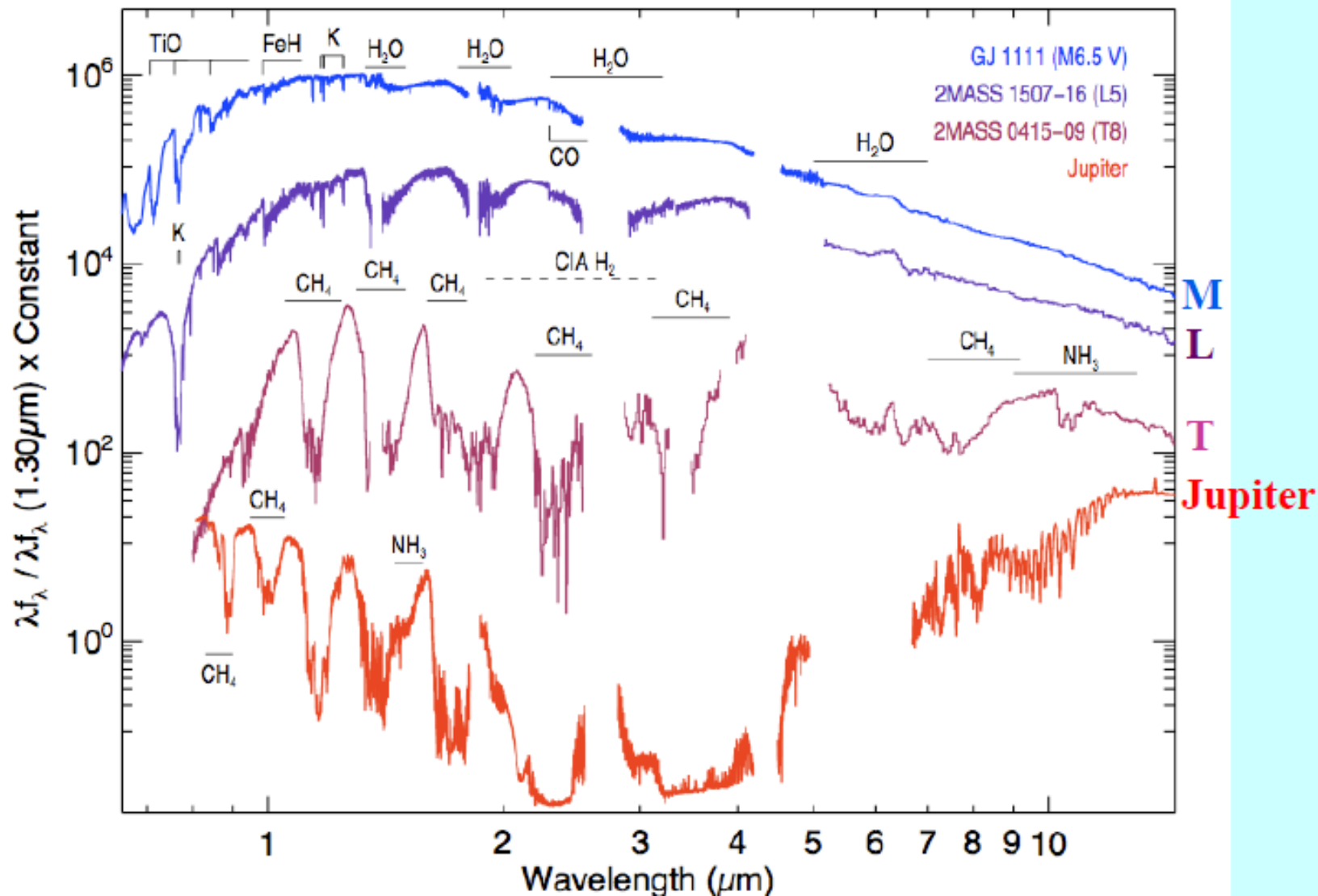
- **Přítomnost čar lithia ve spektru**
 - Zápalná teplota $\text{Li} + \text{p} \rightarrow 2 \text{He}$ o něco nižší než $\text{p} + \text{p} \rightarrow \text{D}$
 - Nepřítomnost Li – důkaz vyšší teploty, zapálení H
- **Test není absolutní**
 - Li čáry i u velmi mladých hvězd a ve vnější atmosféře
 - Existují HT s teplotou dostatečnou k spálení Li
- **Teide 1- první izolovaný HT prověřený lithiovým testem**



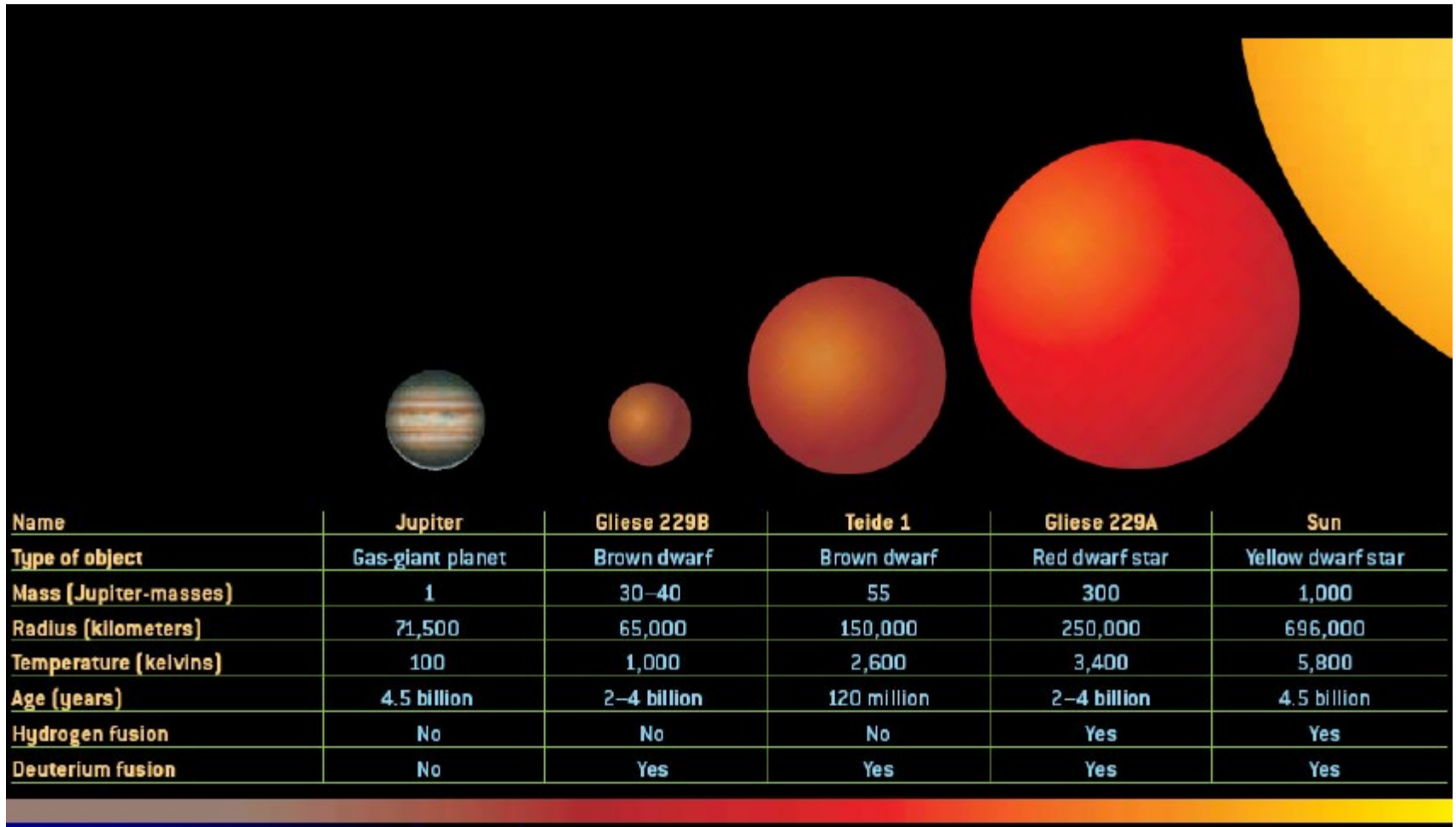
Hnědí trpaslíci – metanový test



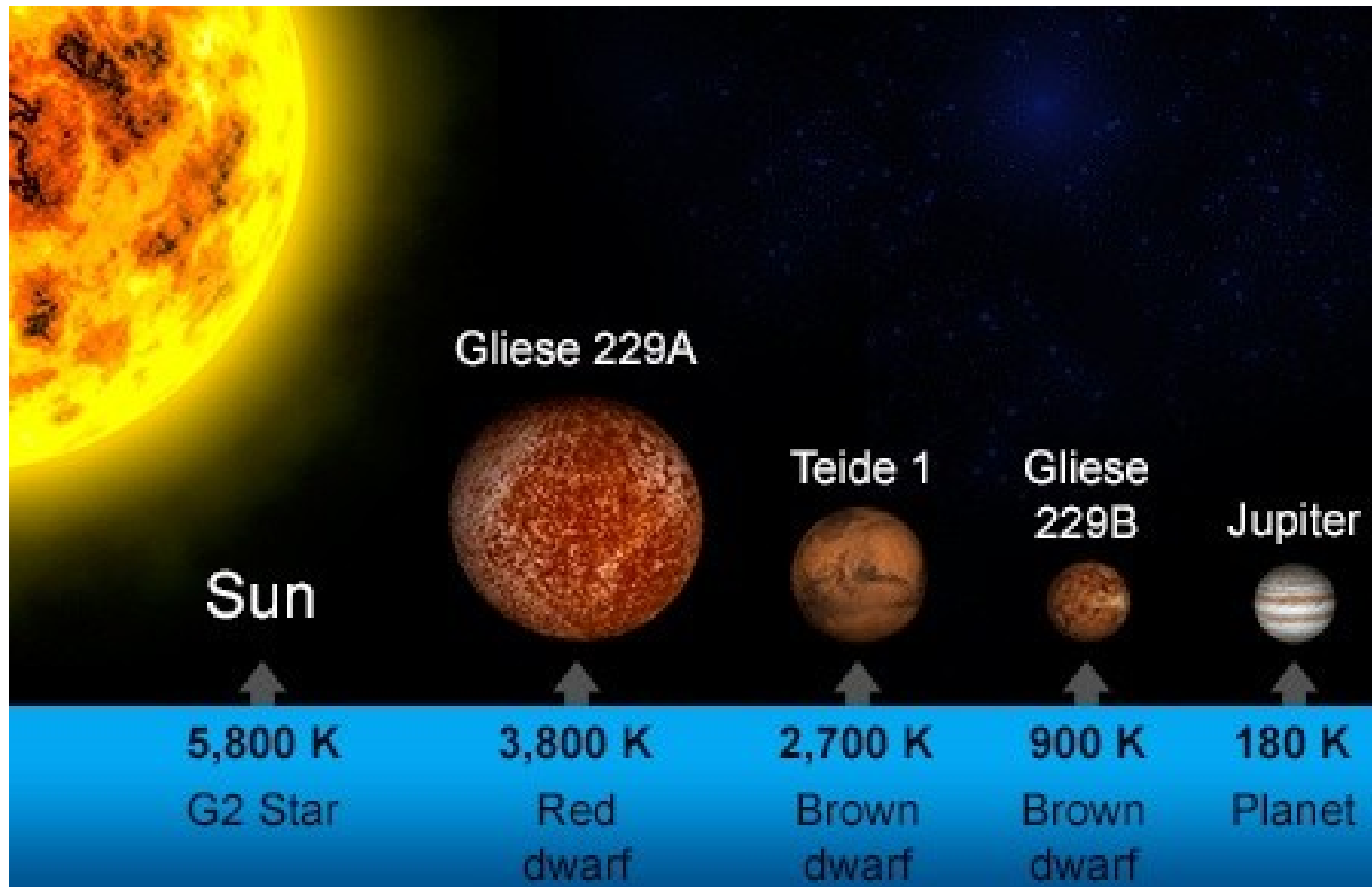
Hnědí trpaslíci – spektrum



Hnědí trpaslíci – charakteristiky



Hnědí trpaslíci

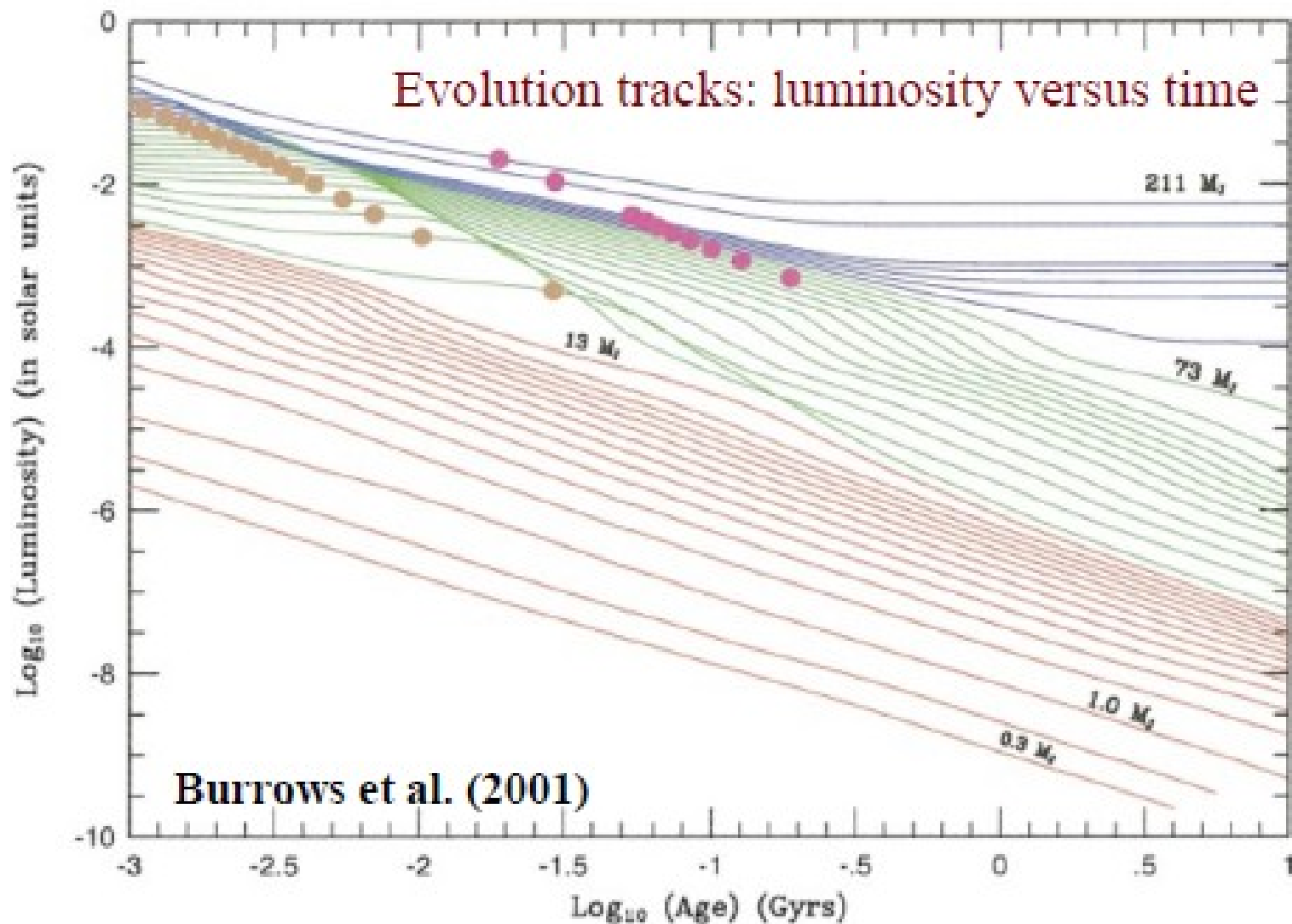


Hnědí trpaslíci

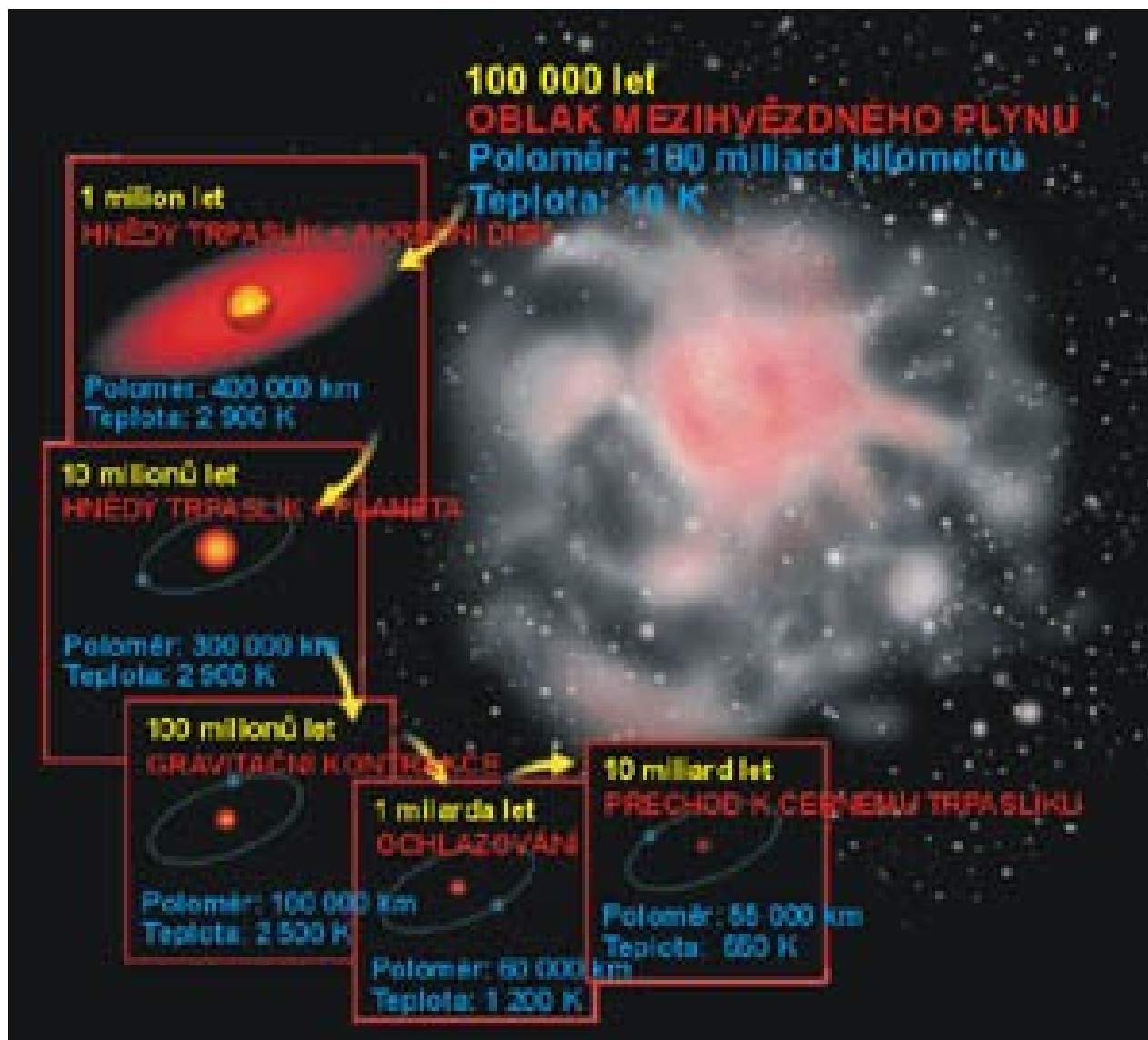


- Přenos energie **konvekcí** – vnitřek hnědých i červených trpaslíků se dokonale promíchává. **Spektrum hvězdy** tak odráží chemické složení nitra
- V nitru HT spáleno deuterium, ne ale lithium
- Ve spektru by měly být přítomny čáry lithia

Hnědí trpaslíci – vývoj



Hnědí trpaslíci – předpokládaný vývoj



Nitro hvězd

6.1, 6.5, 6.7, 6.8, 6.10, 6.11, 6.20, 6.28, 6.30