

F7514 Exoplanety

8-Mateřské hvězdy exoplanet

Marek Skarka

Záření hvězd

- Valnou většinu informací o hvězdách získáváme díky studiu jejich vyzařování
- Záření hvězdy lze velmi dobře aproximovat zářením absolutně černého tělesa

Planckův vyzařovací zákon:

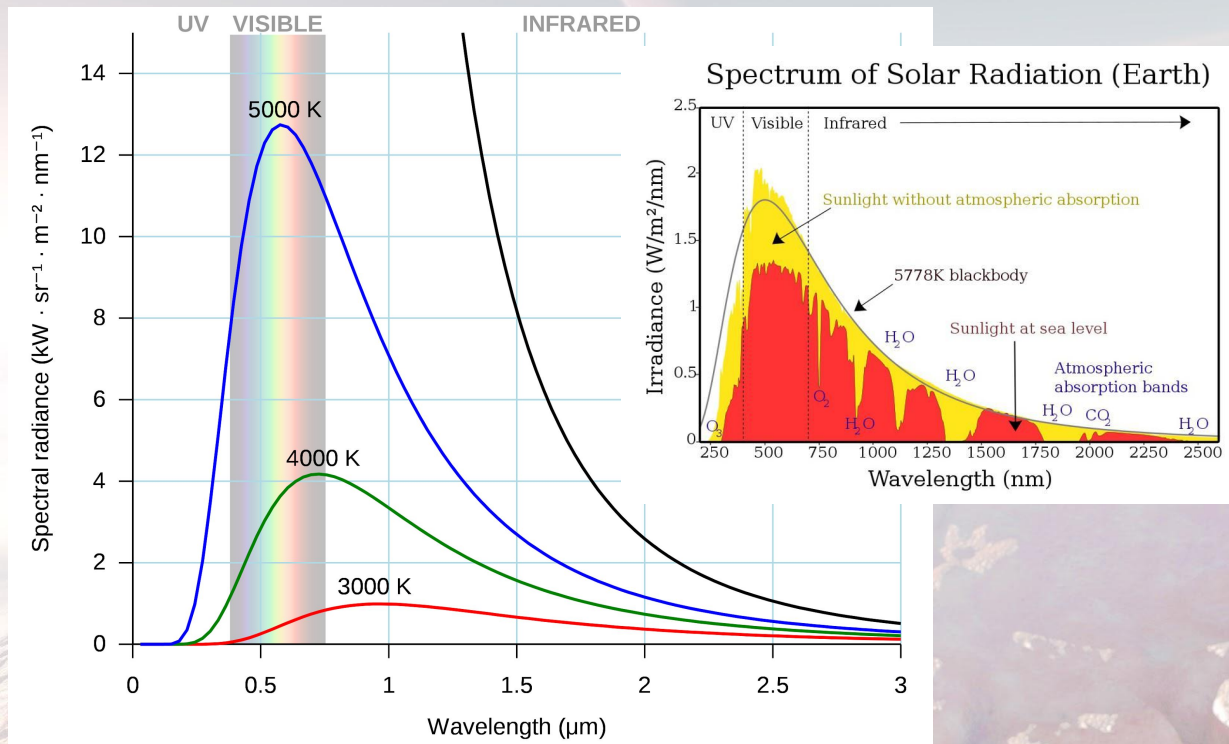
$$B(T, \nu) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

$$B(T, \lambda) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}$$

Wienův posunovací zákon:

$$\lambda_{\max} T = b = 2.897 \cdot 10^{-3} \text{ m K}$$

Teplejší tělesa září více na všech vlnových délkách, maximum vyzařování na kratších vlnových délkách



Záření hvězd

- Valnou většinu informací o hvězdách získáváme díky studiu jejich vyzařování
- Záření hvězdy lze velmi dobře aproximovat zářením absolutně černého tělesa

Planckův vyzařovací zákon:

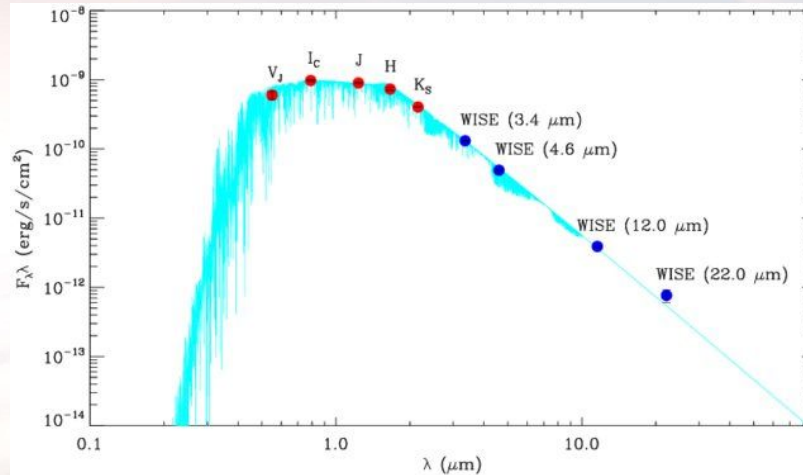
$$B(T, \nu) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

$$B(T, \lambda) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}$$

Wienův posunovací zákon:

$$\lambda_{\max} T = b = 2.897 \cdot 10^{-3} \text{ m K}$$

Teplejší tělesa září více na všech vlnových délkách, maximum vyzařování na kratších vlnových délkách



Barragán et al. 2018, A&A, 612, 95

Fitováním SED (Spectral Energy Distribution) je možné odhadnout teplotu hvězdy

<http://vizier.u-strasbg.fr/vizier/sed/>
<http://svo2.cab.inta-csic.es/theory/vosa/>

Záření hvězd

- Valnou většinu informací o hvězdách získáváme díky studiu jejich vyzařování
- Záření hvězdy lze velmi dobře aproximovat zářením absolutně černého tělesa

Planckův vyzařovací zákon:

$$B(T, \nu) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

Integrace přes všechny frekvence

Stefanův-Boltzmannův zákon:

$$L = 4\pi\sigma R_*^2 T_{\text{eff}}^4$$

$$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ J s}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ K}^{-4}$$

Zářivý výkon hvězdy o poloměru R_* , jaký by měla hvězda, pokud by zářila jako černé těleso o teplotě T_{eff}

Záření hvězd

- Valnou většinu informací o hvězdách získáváme díky studiu jejich vyzařování
- Záření hvězdy lze velmi dobře aproximovat zářením absolutně černého tělesa

Planckův vyzařovací zákon:

$$B(T, \nu) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

Integrace přes všechny frekvence

Stefanův-Boltzmannův zákon:

$$L = 4\pi\sigma R_*^2 T_{\text{eff}}^4$$

$$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ J s}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ K}^{-4}$$

Zářivý výkon hvězdy o poloměru R_* , jaký by měla hvězda, pokud by zářila jako černé těleso o teplotě T_{eff}

Pogsonova rovnice:

$$F = \frac{L}{4\pi r^2}$$

$$m_1 - m_2 = -2.5 \log \left(\frac{F_1}{F_2} \right)$$

Modul vzdálenosti:

$$m - M = 5 \log r - 5 = -5 \log \pi - 5$$

Absolutní hvězdná velikost (hvězdná velikost ze vzdálenosti 10 pc)

Záření hvězd

- Valnou většinu informací o hvězdách získáváme díky studiu jejich vyzařování
- Záření hvězdy lze velmi dobře aproximovat zářením absolutně černého tělesa

Planckův vyzařovací zákon:

$$B(T, \nu) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

Integrace přes všechny frekvence

Stefanův-Boltzmannův zákon:

$$L = 4\pi\sigma R_*^2 T_{\text{eff}}^4$$

$$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ J s}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ K}^{-4}$$

Zářivý výkon hvězdy o poloměru R_* , jaký by měla hvězda, pokud by zářila jako černé těleso o teplotě T_{eff}

Pogsonova rovnice:

$$F = \frac{L}{4\pi r^2}$$

$$m_1 - m_2 = -2.5 \log \left(\frac{F_1}{F_2} \right)$$

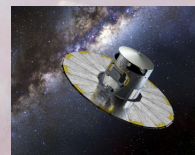
Modul vzdálenosti:

$$m - M = 5 \log r - 5 = -5 \log \pi - 5$$

Absolutní hvězdná velikost (hvězdná velikost ze vzdálenosti 10 pc)

Nutno započítat Bolometrickou korekci $BC = M_{\text{bol}} - M_V$ a extinkci A_V

Pokud znám vzdálenost, můžu určit zářivý výkon hvězdy



Záření hvězd

- Valnou většinu informací o hvězdách získáváme díky studiu jejich vyzařování
- Záření hvězdy lze velmi dobře aproximovat zářením absolutně černého tělesa

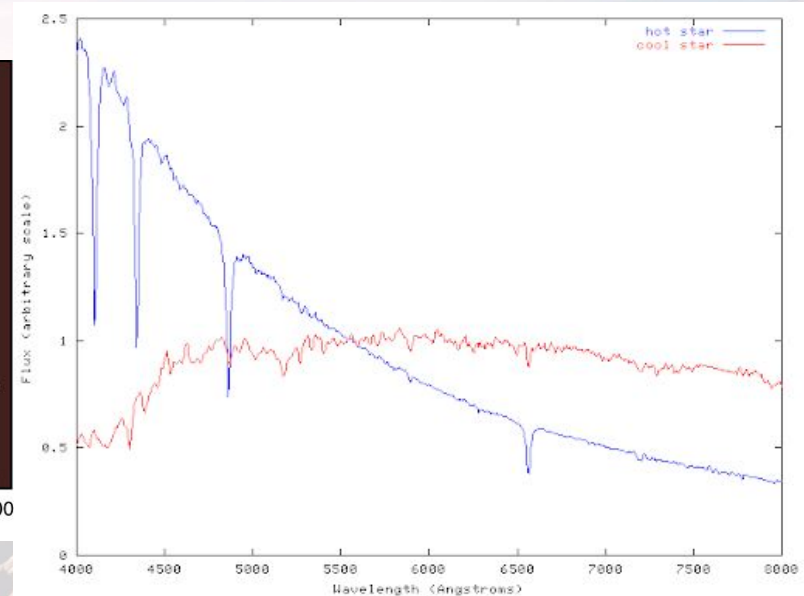
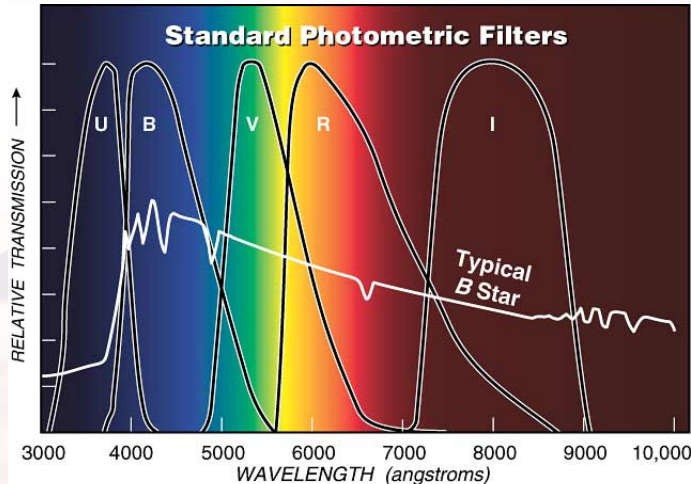
Pozorováním na různých vlnových délkách lze získat odhad teploty

$$T_{\text{eff}} = 9114 - 6827(B - V) + 2638(B - V)^2 + 368[\text{Fe}/\text{H}] \quad \sigma = 47K$$

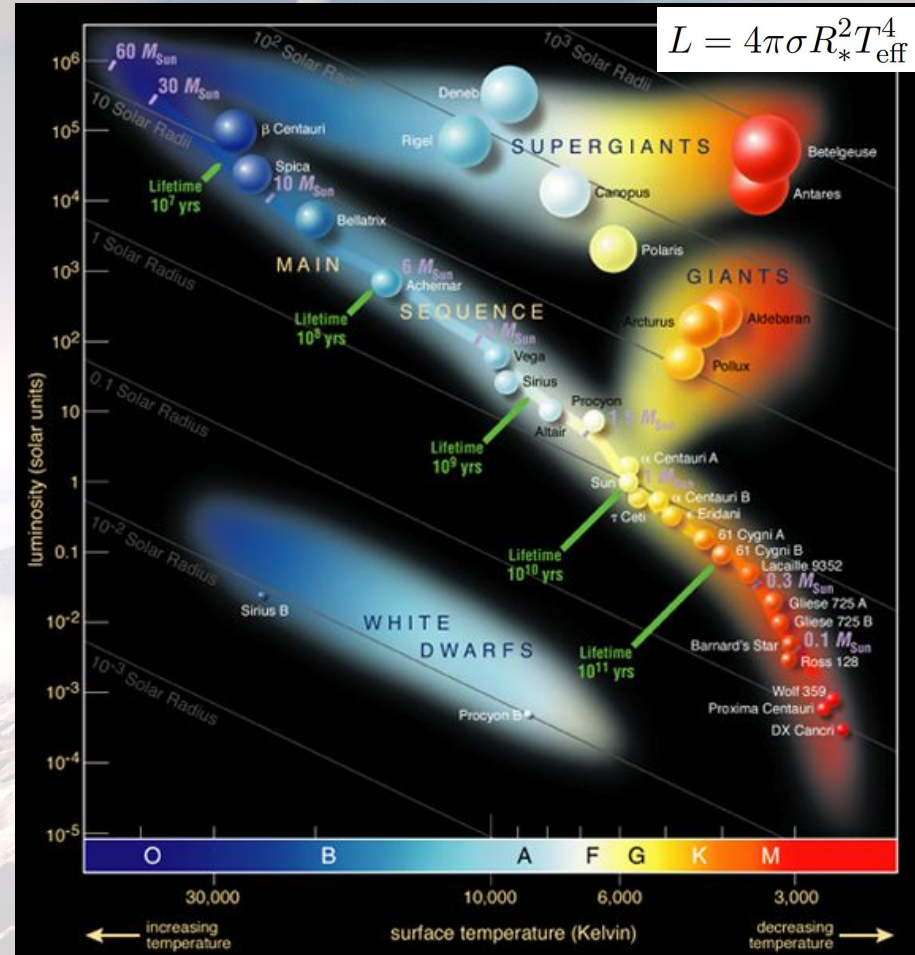
T_{eff} : 4500 – 6400

$B - V$: 0.5 – 1.2

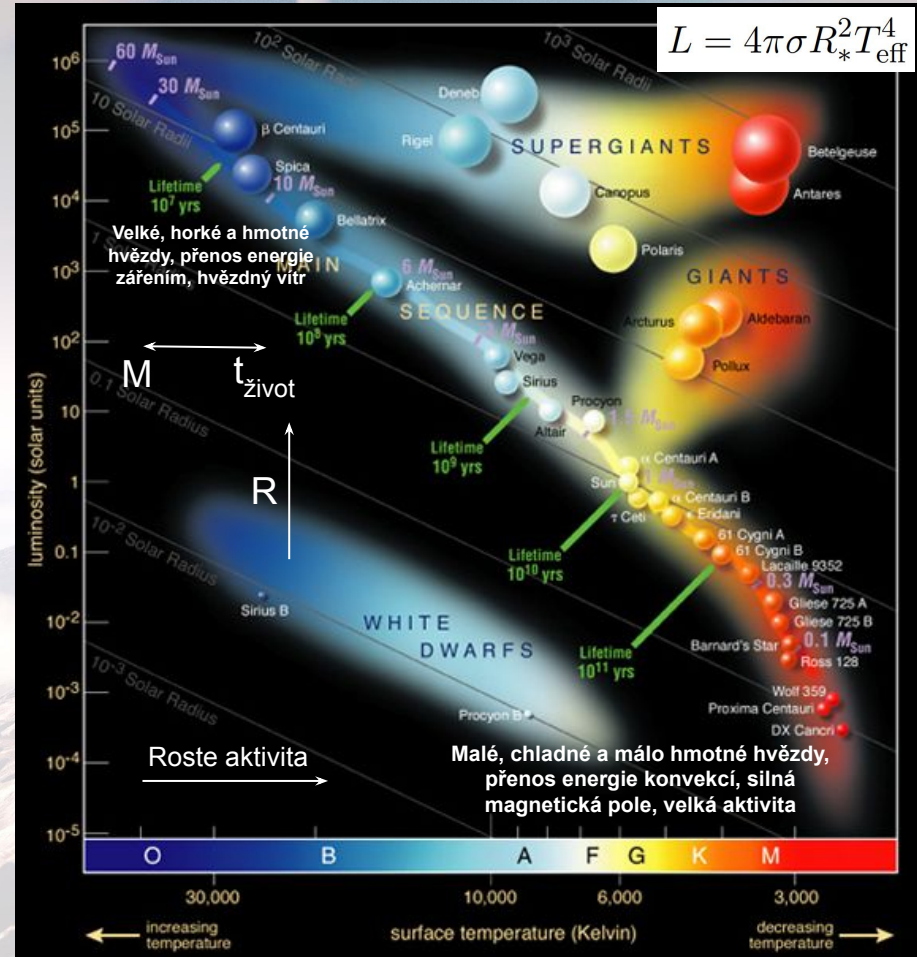
$[\text{Fe}/\text{H}]$: - 0.85 – 0.4



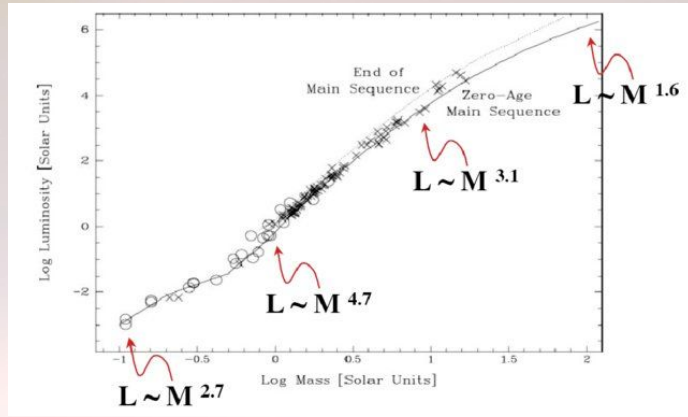
Hertzprungův-Russelův diagram



Hertzprungův-Russelův diagram

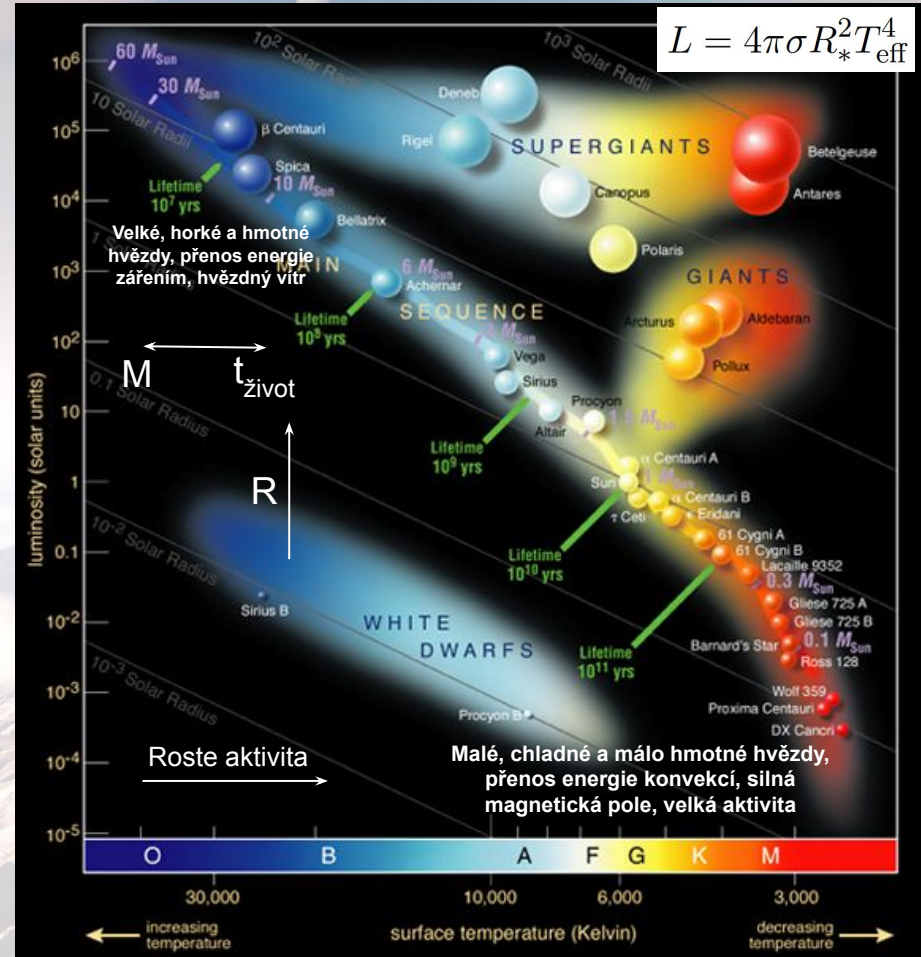


Hertzprungův-Russelův diagram

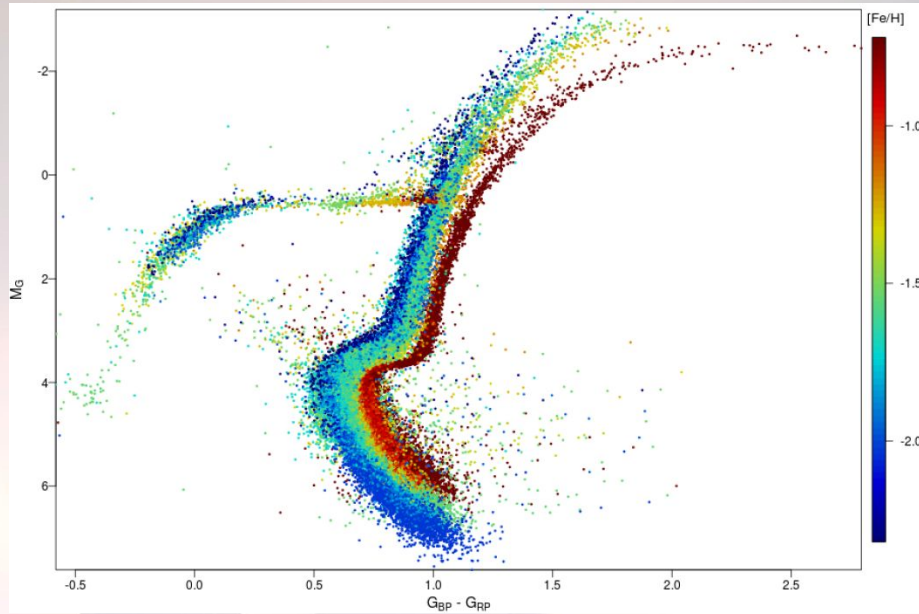


Hmotnost hvězdy je nejdůležitějším parametrem, který definuje ostatní vlastnosti

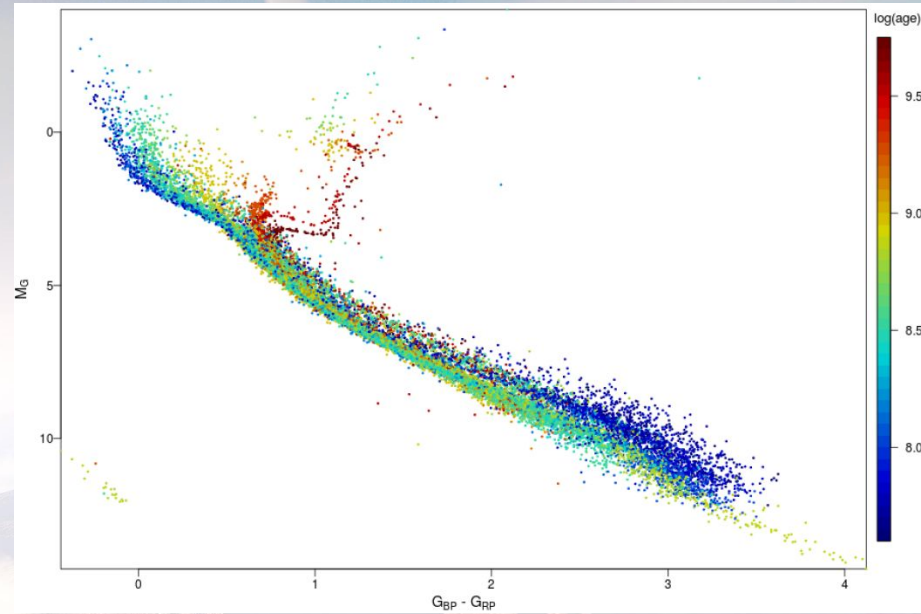
MAIN SEQUENCE STARS							
	O	B	A	F	G	K	M
Spectral Type:	O	B	A	F	G	K	M
Temperature:	40 000K	20 000K	8500K	6500K	5700K	4500K	3200K
Radius (Sun=1):	10	5	1.7	1.3	1.0	0.8	0.3
Mass (Sun=1):	50	10	2.0	1.5	1.0	0.7	0.2
Luminosity (Sun=1):	100 000	1000	20	4	1.0	0.2	0.01
Lifetime (million yrs):	10	100	1000	3000	10 000	50 000	200 000
Abundance:	0.00001%	0.1%	0.7%	2%	35%	8%	80%



Hertzprungův-Russelův diagram



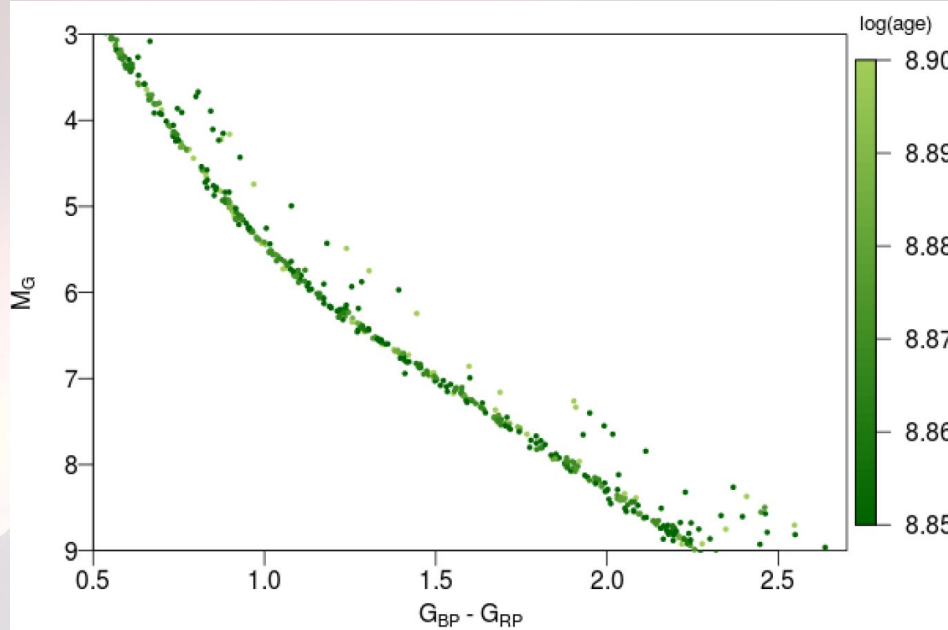
14 kulových hvězdokup



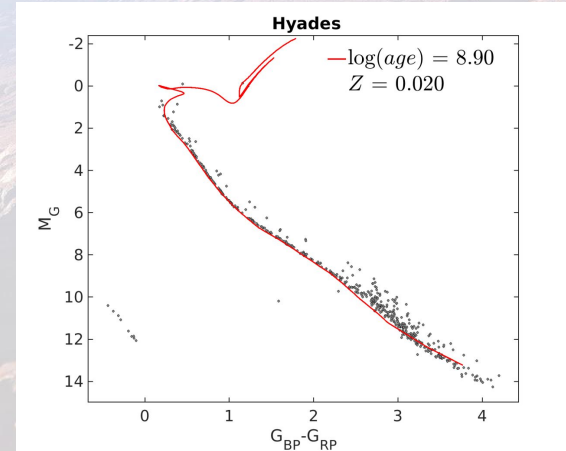
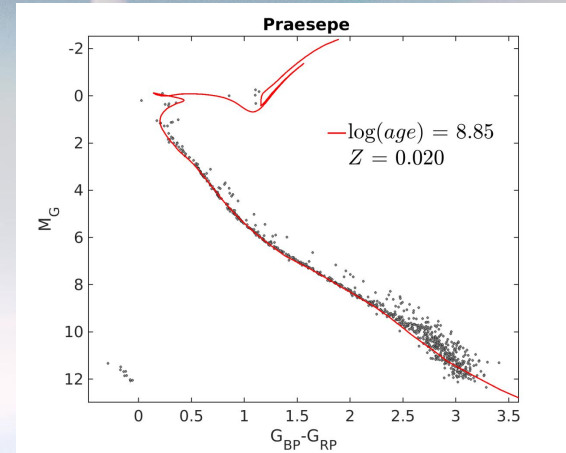
32 otevřených hvězdokup

HRD slouží i jako vývojový diagram

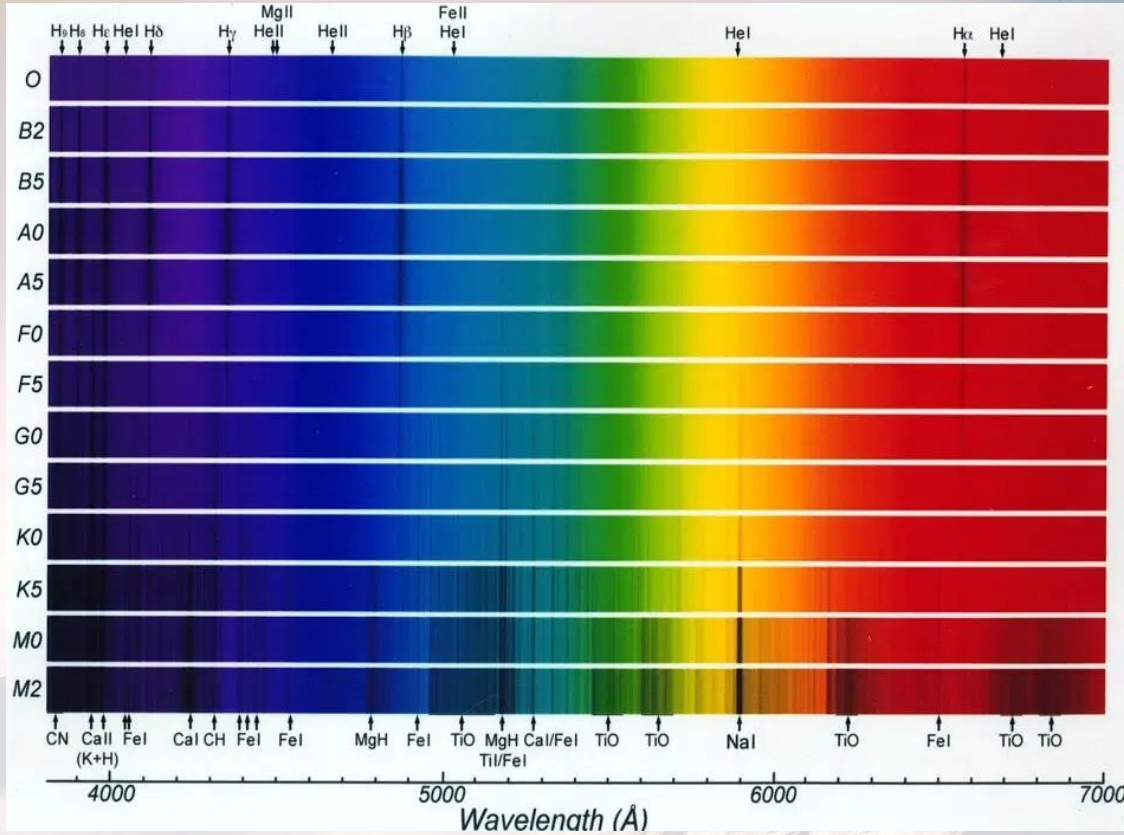
Hertzprungův-Russelův diagram



Hyády a Jesličky, nad hlavní posloupností jsou dvojhvězdy



Spektrální typy

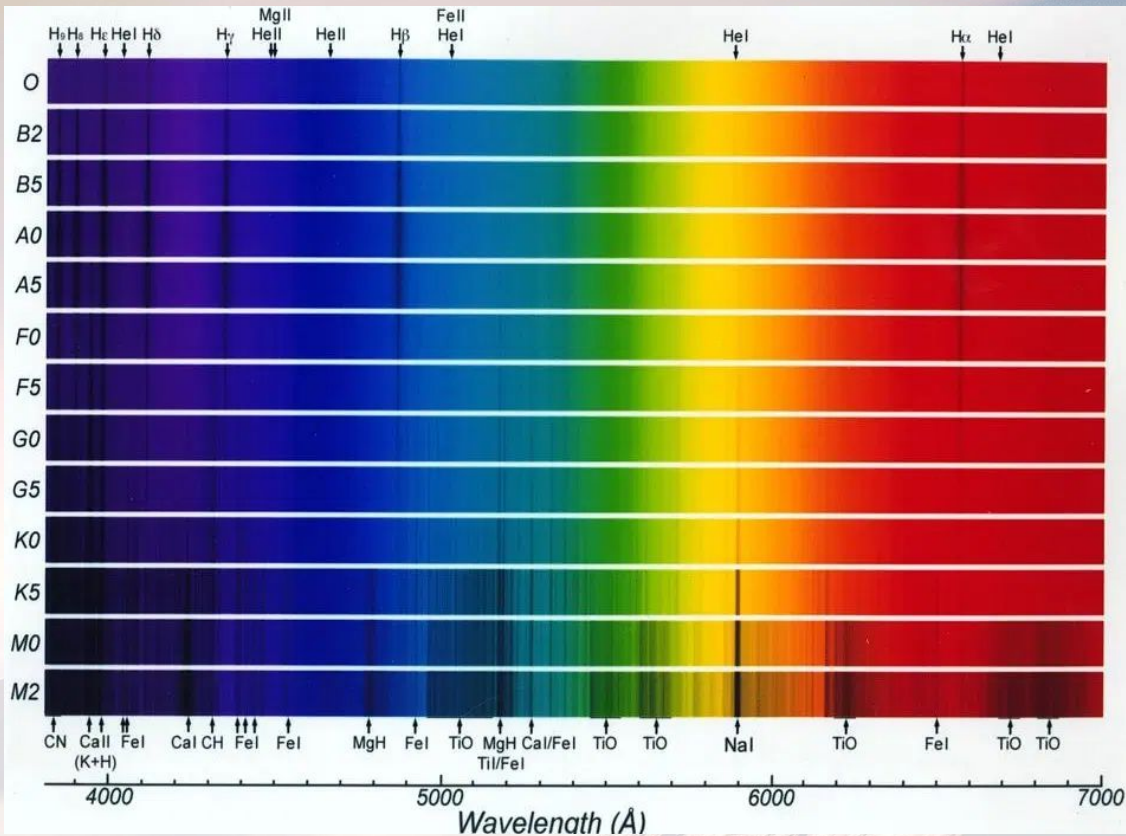


Vzhled spektra je definován podmínkami látky
v atmosféře hvězdy, především teplotou

=> harvardská klasifikace je teplotní klasifikací

Hustý plyn produkuje spojité spektrum, horký řídký plyn emisní spektrum, chladný řídký plyn, přes který prochází světlo produkuje absorpční spektrum

Spektrální typy



Hustý plyn produkuje spojité spektrum, horký řídký plyn emisní spektrum, chladný řídký plyn, přes který prochází světlo produkuje absorpční spektrum

Vzhled spektra je definován podmínkami látky v atmosféře hvězdy, především teplotou

=> harvardská klasifikace je teplotní klasifikací

Boltzmannova rovnice

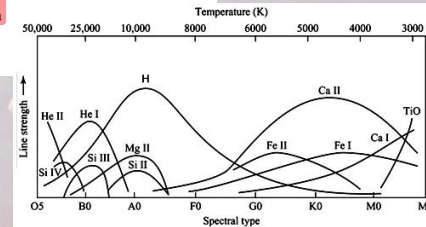
$$\frac{N_b}{N_a} = \frac{g_b}{g_a} e^{-(E_b - E_a)/kT}$$

Annotations:
 - BOLTZMANN FACTOR (points to kT)
 - BOLTZMANN CONSTANT (points to k)
 - RATIO OF POPULATIONS FOR STATES A AND B (points to N_b/N_a)
 - RATIO OF DEGENERACIES FOR STATES A AND B (points to g_b/g_a)

Sahova rovnice

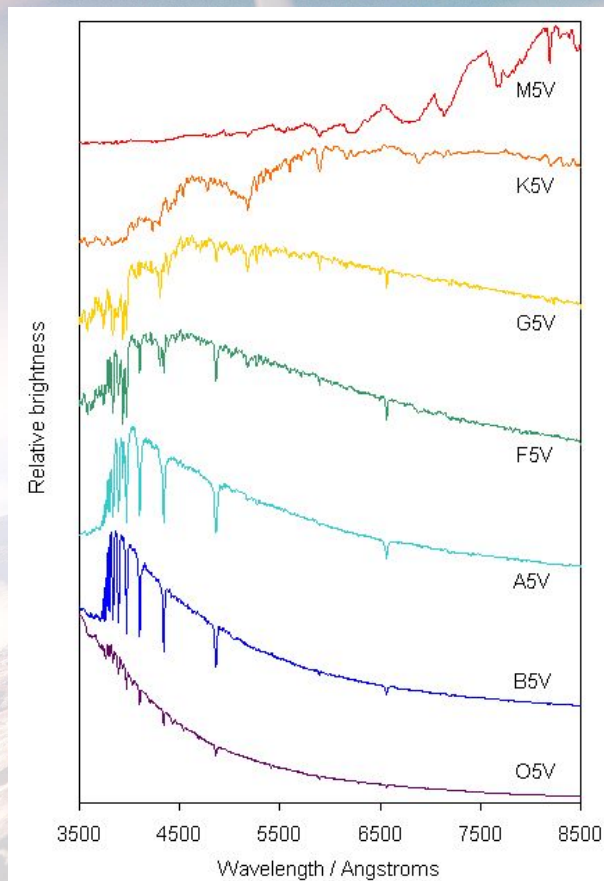
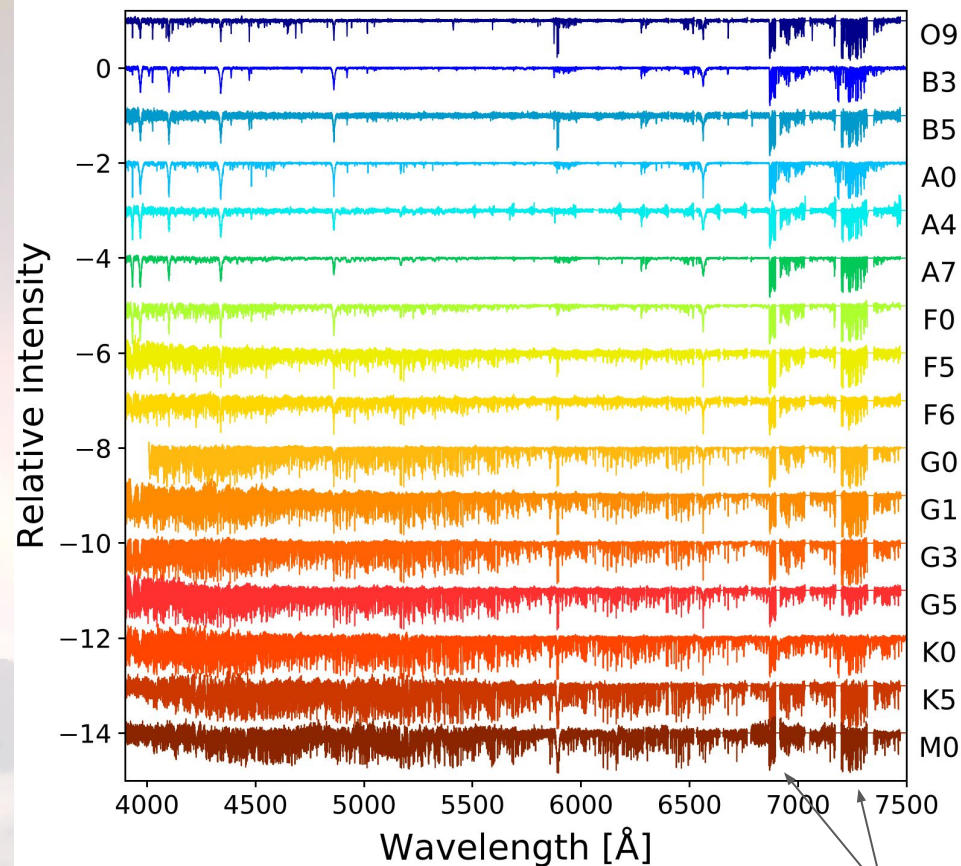
$$\frac{N_{i+1}}{N_i} = \frac{2Z_{i+1}}{n_e Z_i} \left(\frac{2\pi m_e kT}{h^2} \right)^{3/2} e^{-\chi_i/kT}$$

Annotations:
 - ELECTRON MASS (points to m_e)
 - BOLTZMANN CONSTANT (points to k)
 - IONIZATION ENERGY (points to χ_i)
 - PLANCK CONSTANT (points to h)
 - RATIO OF POPULATIONS OF STATES i AND i+1 (points to N_{i+1}/N_i)
 - PARTITION FUNCTIONS FOR i AND i+1 (points to Z_i)
 - ELECTRON NUMBER DENSITY (points to n_e)



Spektrální typy

Bakalářská práce David Štegr, 2020

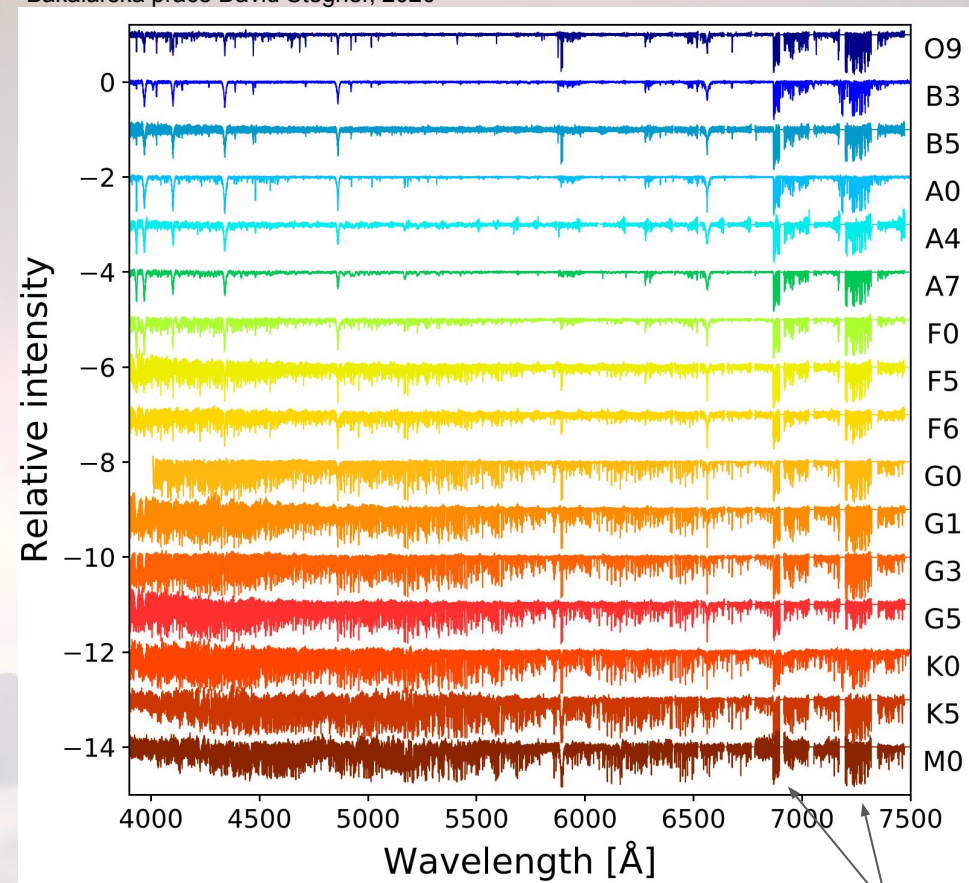


Type	Absorption lines
O	(H I, He I,) He II, N III, O III, Si IV
B	H I, He I, O II, Si III
A	H I, Mg II, Si II, (Fe II, Ti II, Ca II)
F	H I, Ca II, Fe I, Ti I, Fe II, Ti II
G	(H I,) Ca II, Fe I, Ti I, etc., CH
K	Ca II, Ca I, etc., TiO
M	Ca I, TiO, etc.

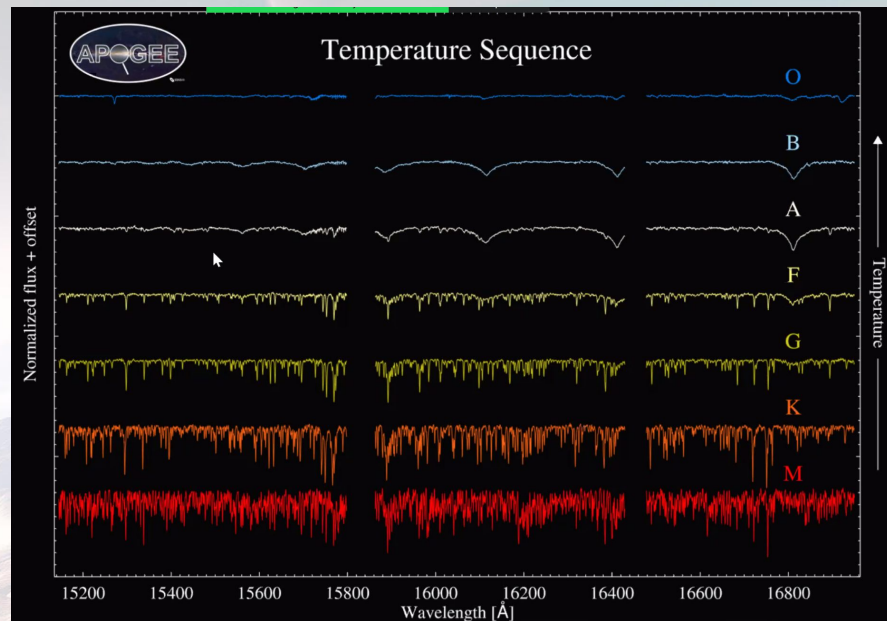
Telurické čáry

Spektrální typy

Bakalářská práce David Štegr, 2020



Telurické čáry



Spektrum hvězd

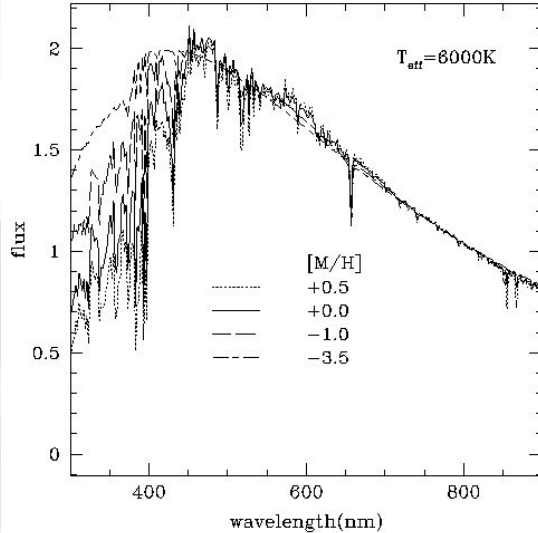
Vzhled spektra dále ovlivňuje:

- Gravitační zrychlení na povrchu (široké čáry u hvězd s velkým log g)
- Rotace hvězdy (rozšíření čar vlivem Dopplerova jevu)
- Chemické složení (různá síla čar)
- Vlastní pohyb hvězdy (posun čar vlivem Dopplerova jevu)

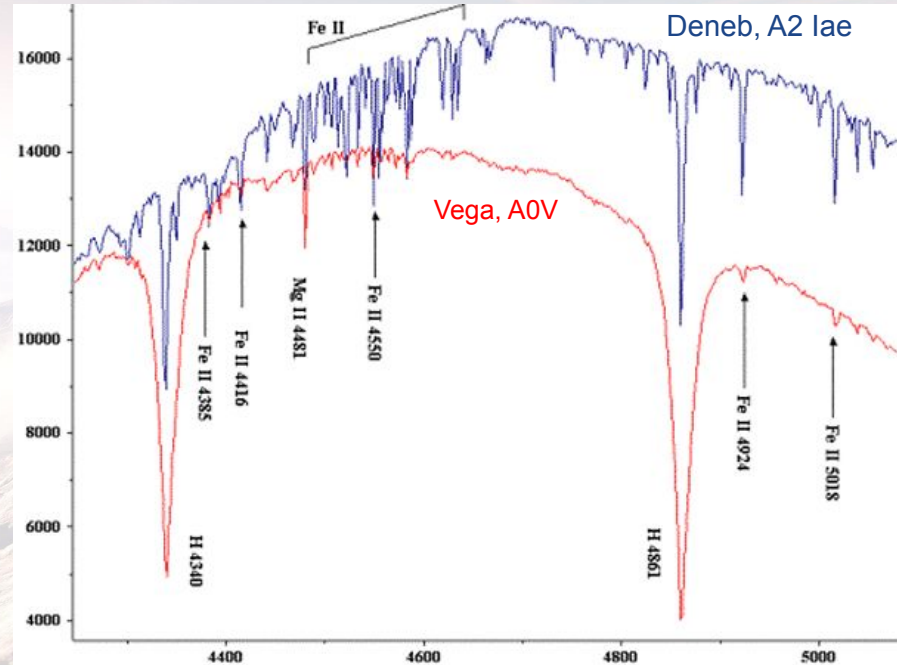
+instrumentální jevy

Metalicita

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



Vliv rozdílného log g a rychlosti rotace



Spektrum hvězd

Vzhled spektra dále ovlivňuje:

- Gravitační zrychlení na povrchu (široké čáry u hvězd s velkým $\log g$)
- Rotace hvězdy (rozšíření čar vlivem Dopplerova jevu)
- Chemické složení (různá síla čar)
- Vlastní pohyb hvězdy (posun čar vlivem Dopplerova jevu)

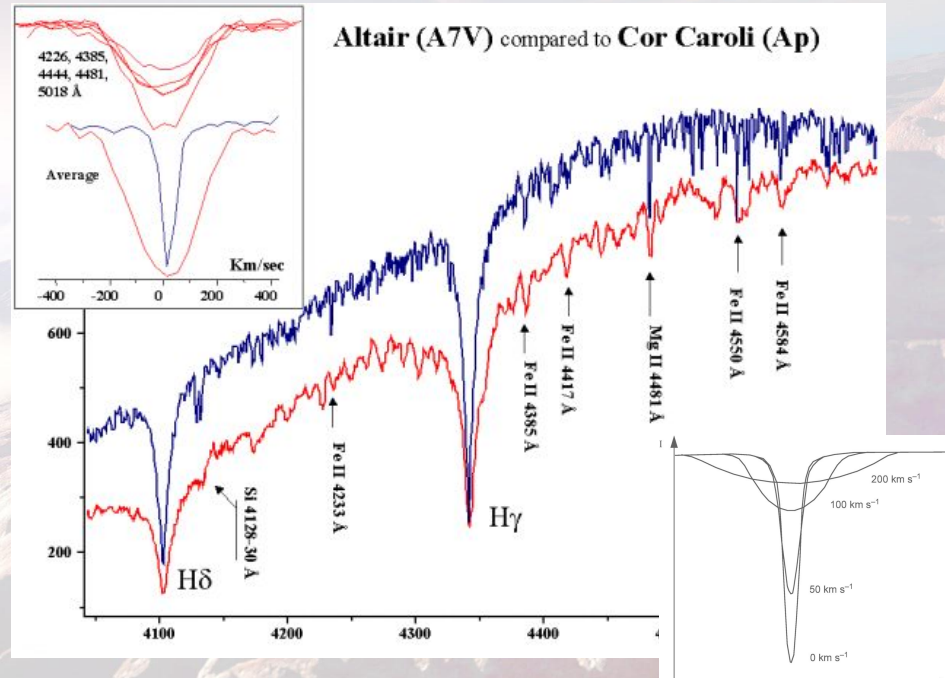
+instrumentální jevy

Modelováním hvězdného spektra lze odhadnout teplotu, chemické složení, rychlost rotace a gravitační zrychlení na povrchu

Fotometrie - svítivost hvězdy, rotační rychlost, přítomnost skvrn

=> poloměr, inklinace rotační osy, hustota

Vliv rychlosti rotace



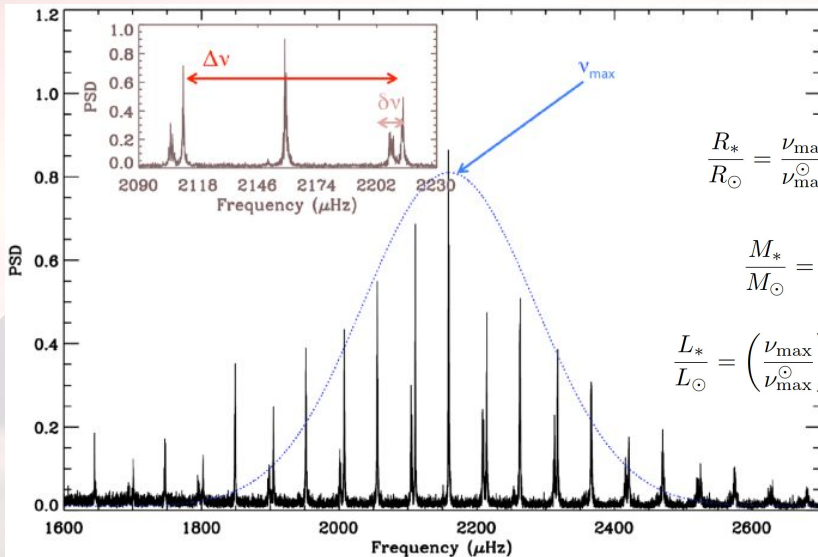
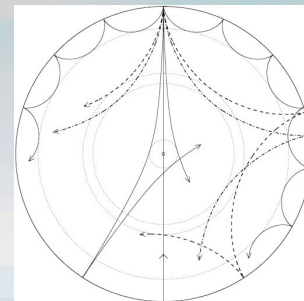
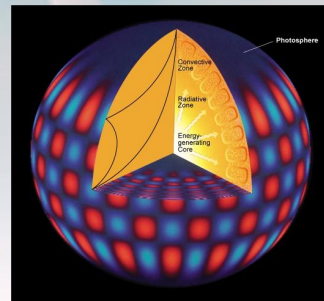
Asteroseismologie

S využitím hvězdných pulzací a oscilací lze odhadnout střední hustotu hvězdy, rychlost rotace hvězdy, vnitřní strukturu hvězdy a její stáří - studium změn jasnosti a profilů sp. čar

Změřením pulzační periody zjistíme něco o hustotě. Analýzou frekvenčního spektra a užitím škálovacích relací můžeme odhadnout další parametry

$$P \sim \frac{1}{\sqrt{\rho}}$$

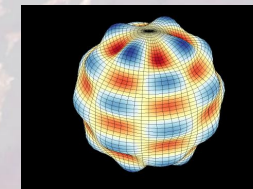
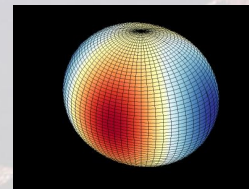
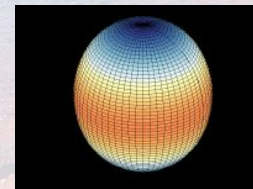
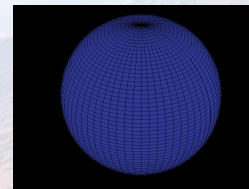
Zvukové (p) a "gravitační" (g) vlny



$$\frac{R_*}{R_\odot} = \frac{\nu_{\max}}{\nu_{\max}^\odot} \times \left(\frac{\Delta\nu}{\Delta\nu_\odot} \right)^{-2} \times \sqrt{\frac{T_{\text{eff}}}{T_{\text{eff}}^\odot}}$$

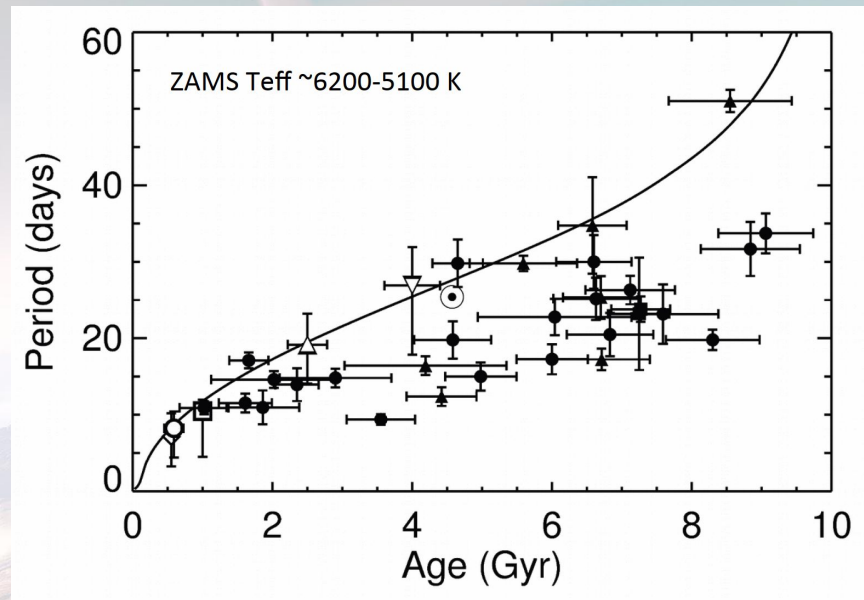
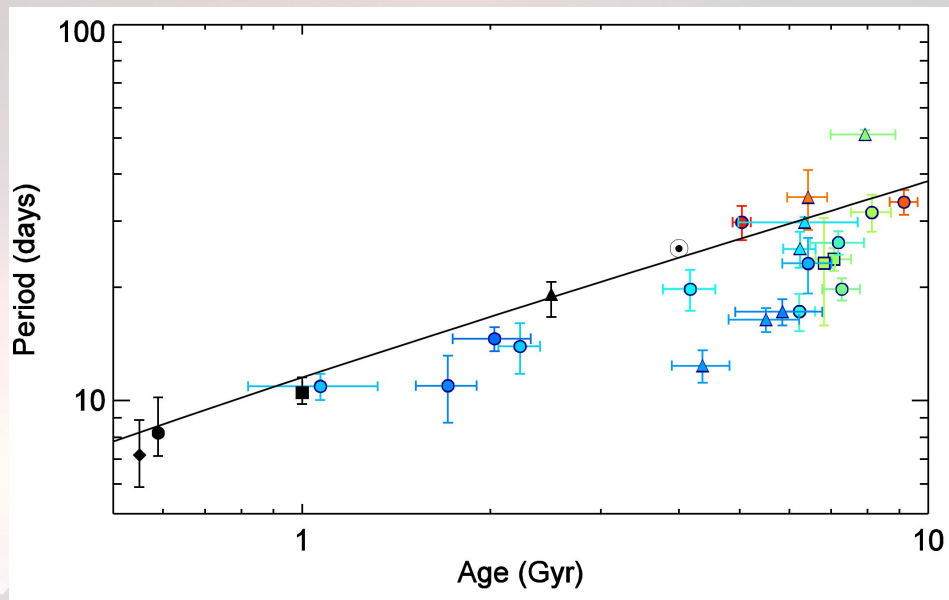
$$\frac{M_*}{M_\odot} = \left(\frac{R_*}{R_\odot} \right)^3 \times \left(\frac{\Delta\nu}{\Delta\nu_\odot} \right)^2$$

$$\frac{L_*}{L_\odot} = \left(\frac{\nu_{\max}}{\nu_{\max}^\odot} \right)^2 \times \left(\frac{\Delta\nu}{\Delta\nu_\odot} \right)^{-4} \times \left(\frac{T_{\text{eff}}}{T_{\text{eff}}^\odot} \right)^5$$



Stáří hvězd

Z vývojových modelů, izochron v HRD a rychlosti rotace je možné odhalit stáří hvězd - vše pouze orientační



van Saders et al. 2006, Nature, 529, 181

- Modely fungují dobře na hvězdokupách, ale selhávají na jednotlivých hvězdách - potřeba asteroseismologických měření

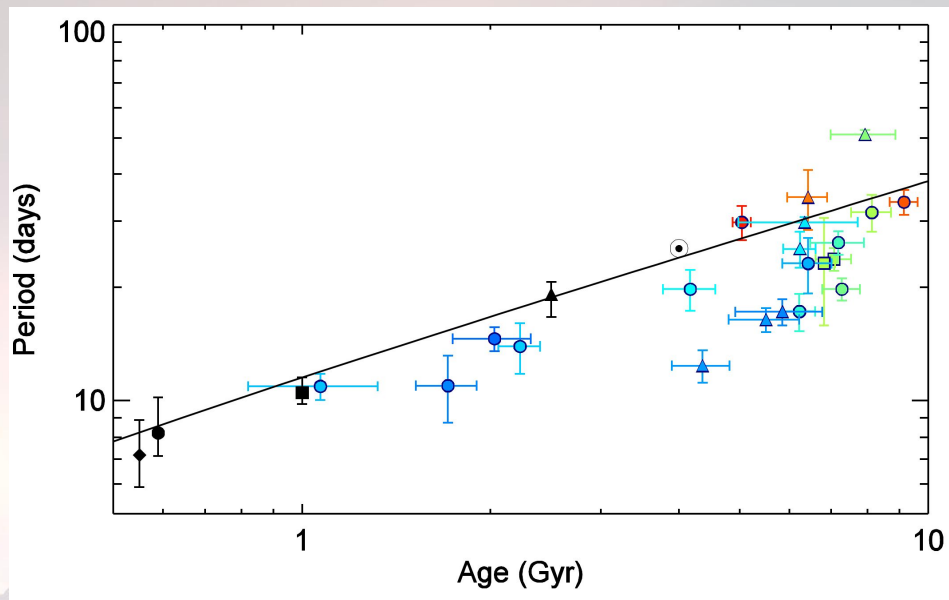
Empirické vztahy velmi nepřesné

$$\log\left(\frac{t}{\text{Gyr}}\right) = \frac{[\log(P_{\text{rot}}) - \log(0.770) - 0.553 \log(B - V - 0.472)]}{0.5344}$$

$$t = 591 \left[\frac{P_{\text{rot}}}{9.30 + 10.39(J - K - 0.504)} \right]^{1/0.56} \text{ Myr.}$$

Stáří hvězd

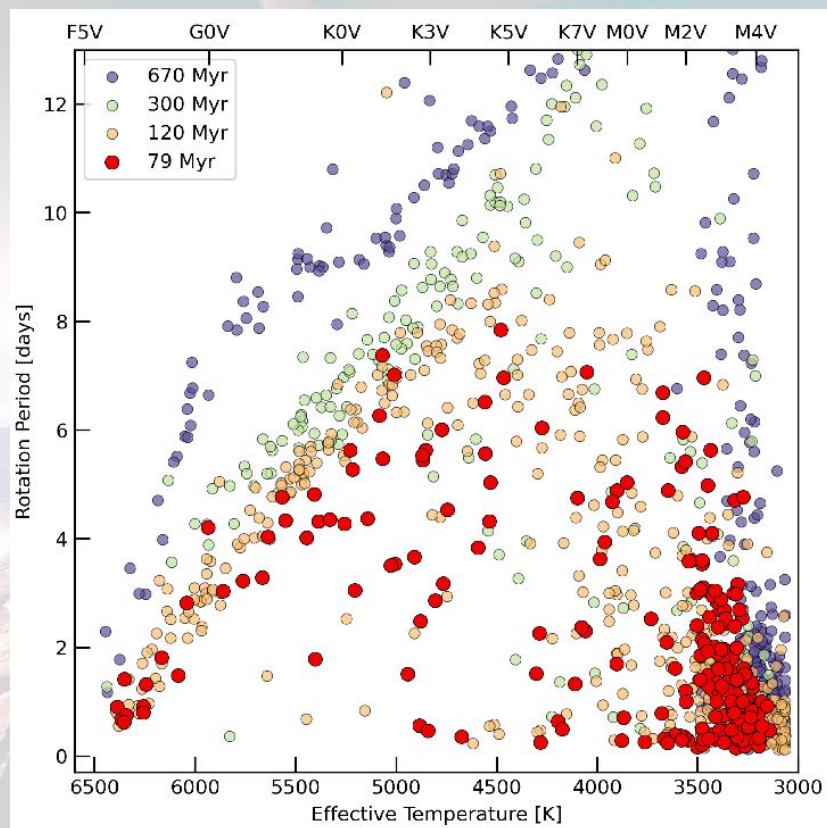
Z vývojových modelů, izochron v HRD a rychlosti rotace je možné odhalit stáří hvězd - vše pouze orientační



van Saders et al. 2006, Nature, 529, 181

- Modely fungují dobře na hvězdokupách, ale selhávají na jednotlivých hvězdách - potřeba asteroseismologických měření

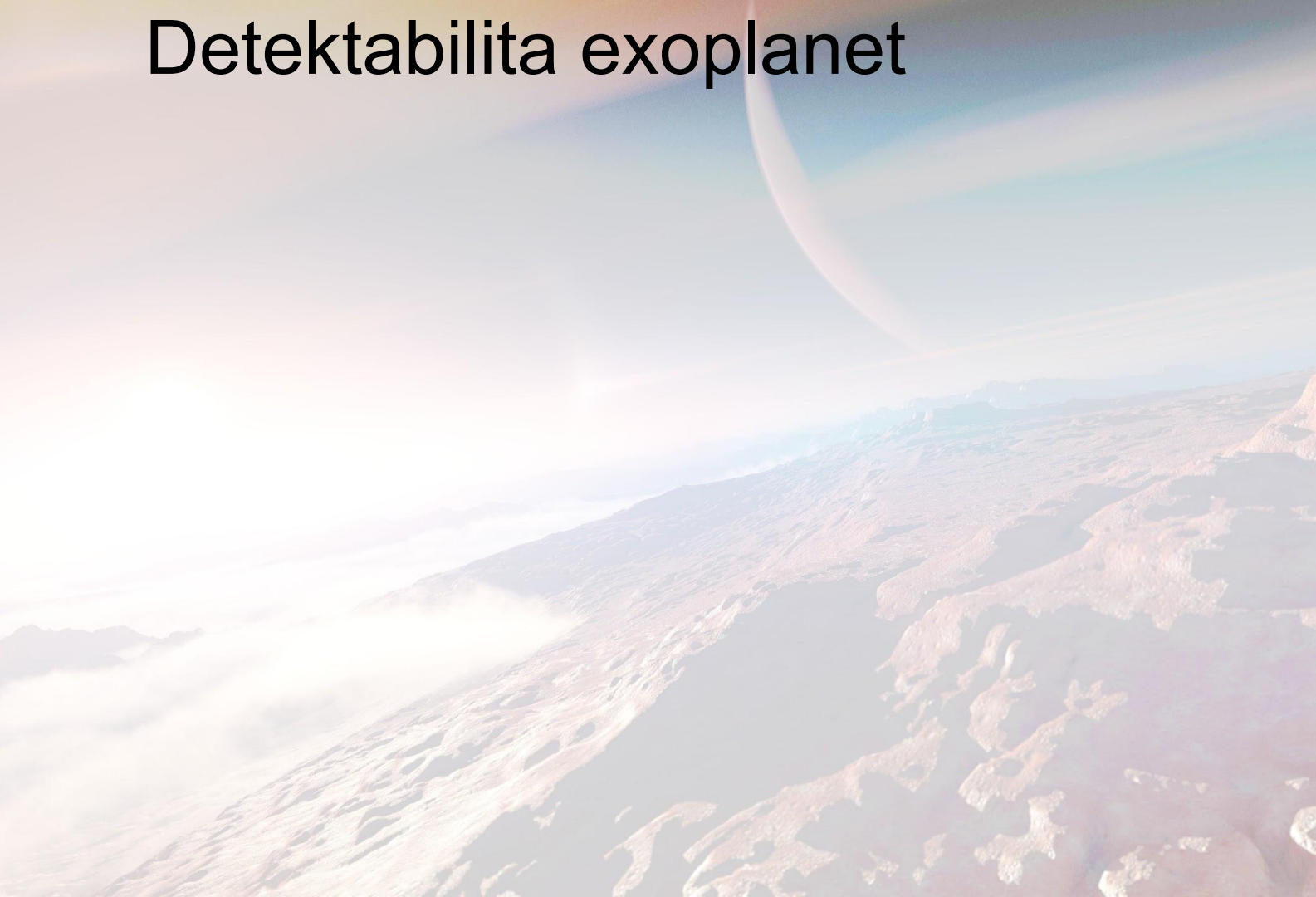
Boyle&Bouma 2022,
1v22890.1122:viXra



Detektabilita exoplanet



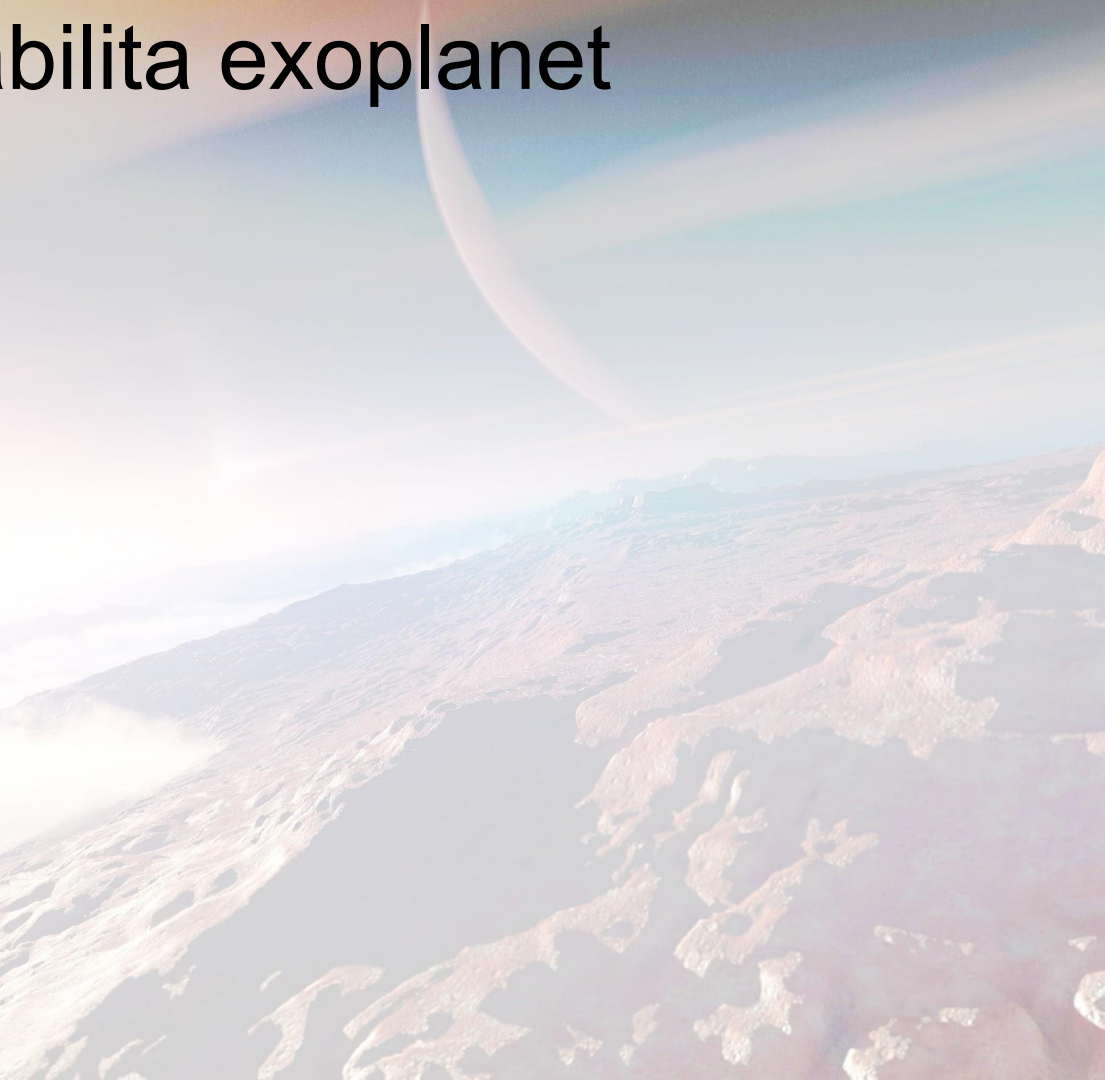
Roste M , L , R , T_{eff}
Klesá $\log g$, počet čar, doba života hvězdy, aktivita hvězdy



Detektabilita exoplanet



Roste M , L , R , T_{eff}
Klesá $\log g$, počet čar, doba života hvězdy, aktivita hvězdy



Detektabilita exoplanet

O
B
A
F
G
K
M



Roste M , L , R , T_{eff}
Klesá $\log g$, počet čar, doba života hvězdy, aktivita hvězdy

Výskyt planet

Nepravděpodobný kvůli
krátkému věku hvězd

Dostatečný věk pro
formování exoplanet

Radiální rychlosti

Obtížná detekce kvůli
malému počtu
(širokých) čar, velké
hmotnosti hvězd

Dobrá detektabilita,
množství (úzkých) čar
(pomalá rotace), nízká
hmotnost hvězd
vs.
aktivita hvězd

Relativně dobrá detekce, nízká
hmotnost
Vs.
čáry blendují, silná aktivita hvězd

Detektabilita exoplanet

O
B
A
F
G
K
M



Roste M , L , R , T_{eff}
Klesá $\log g$, počet čar, doba života hvězdy, aktivita hvězdy

Výskyt planet

Nepravděpodobný kvůli
krátkému věku hvězd

Dostatečný věk pro
formování exoplanet

Radiální rychlosti

Obtížná detekce kvůli
malému počtu
(širokých) čar, velké
hmotnosti hvězd

Dobrá detektabilita,
množství (úzkých) čar
(pomalá rotace), nízká
hmotnost hvězd
vs.
aktivita hvězd

Relativně dobrá detekce, nízká
hmotnost
vs.
čáry blendují, silná aktivita hvězd

Tranzity

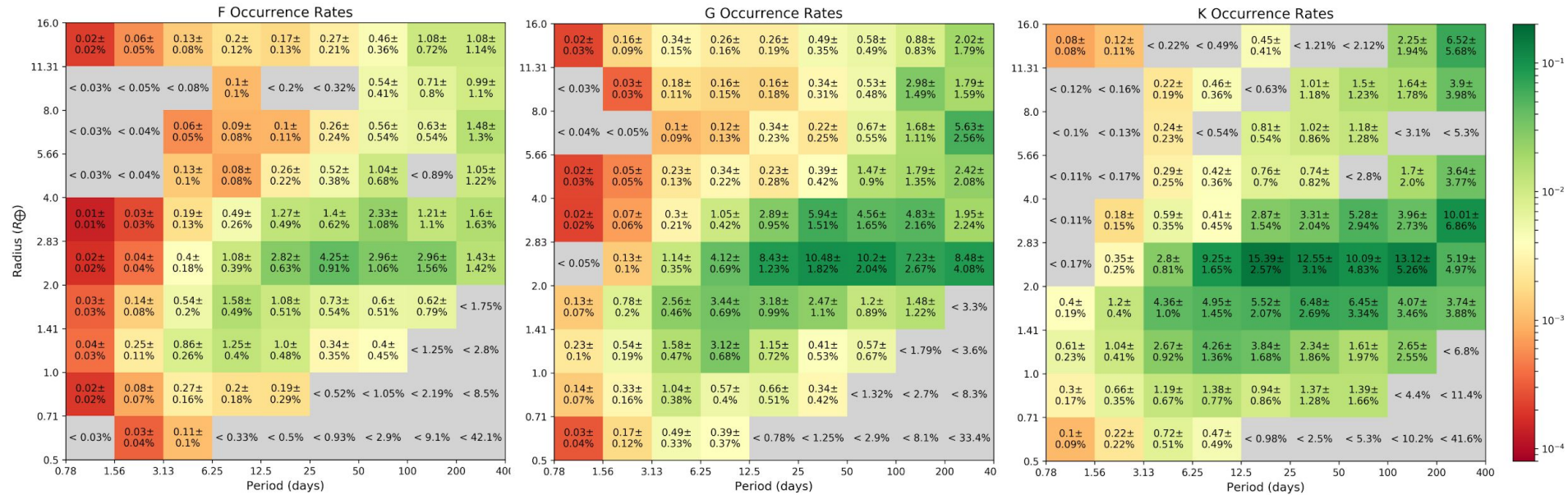
Obtížná detekce kvůli
velkým poloměrům
hvězd

Dobrá detektabilita,
malé poloměry hvězd
vs.
Silná aktivita hvězd

Malé poloměry
vs.
Nízká svítivost, silná aktivita hvězd

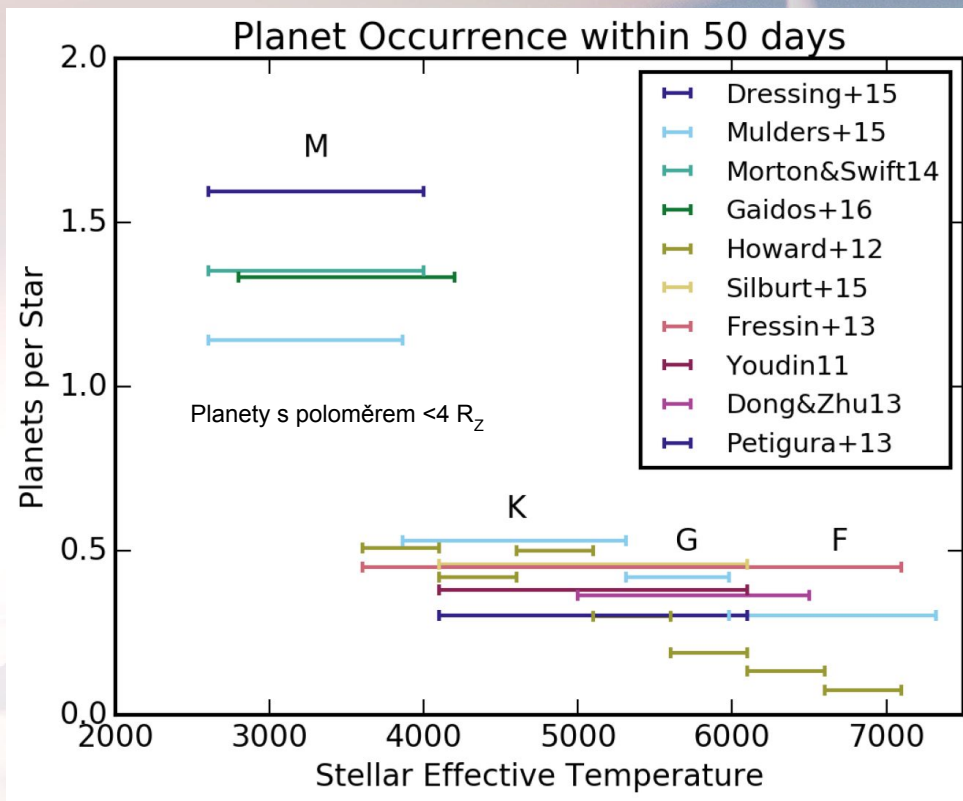
Exoplanety u hvězd různých typů

Kunimoto&Matthews 2020, AJ, 159, 248 - statistické modely na základě dat z Keplera



Současné statistiky naznačují, že většina planet je větších než Země a obíhají po drahách s periodami mezi 10 a 400 dny - odhady

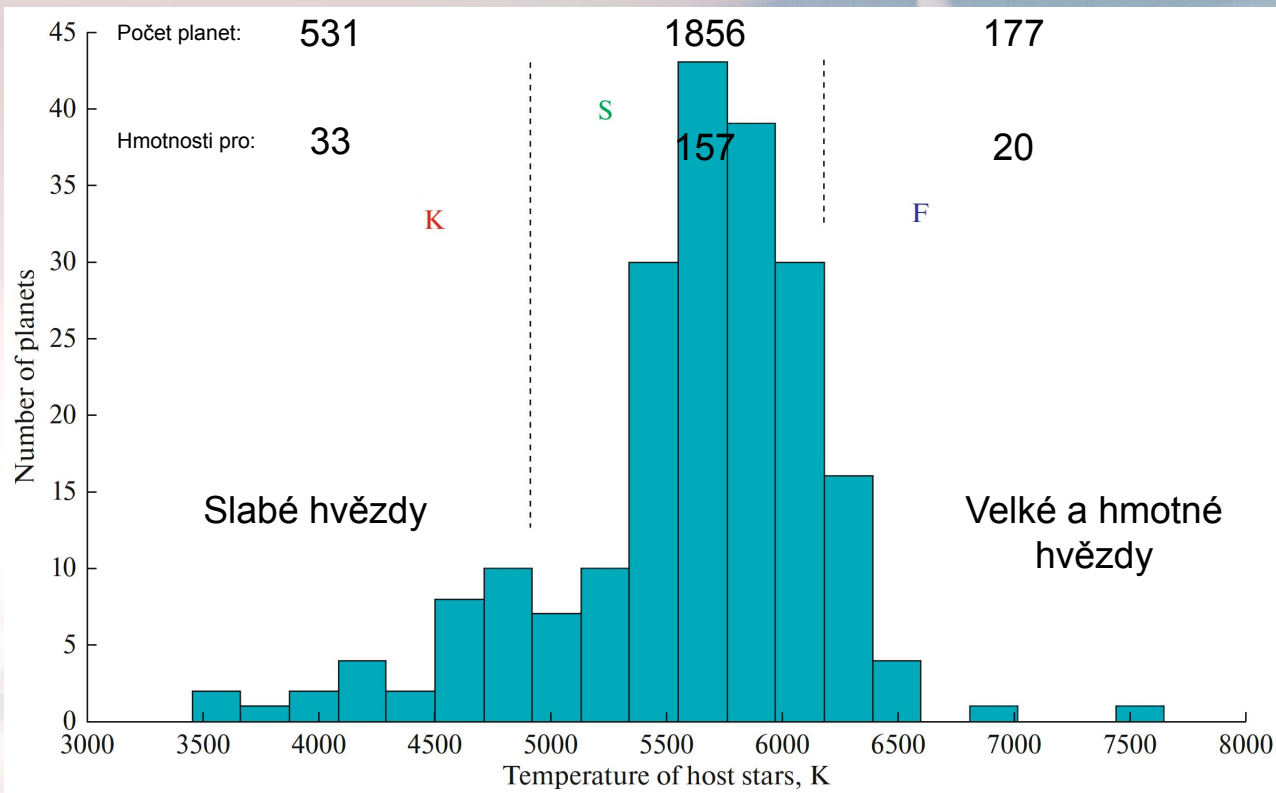
Exoplanety u hvězd různých typů



Mulders 2018, Handbook of Exoplanets, ISBN 978-3-319-55332-0

Pozor na pozorovací zkreslení - metody tranzitu a radiálních rychlostí jsou citlivé na velké a hmotné planety blízké svým (málo hmotným) hvězdám

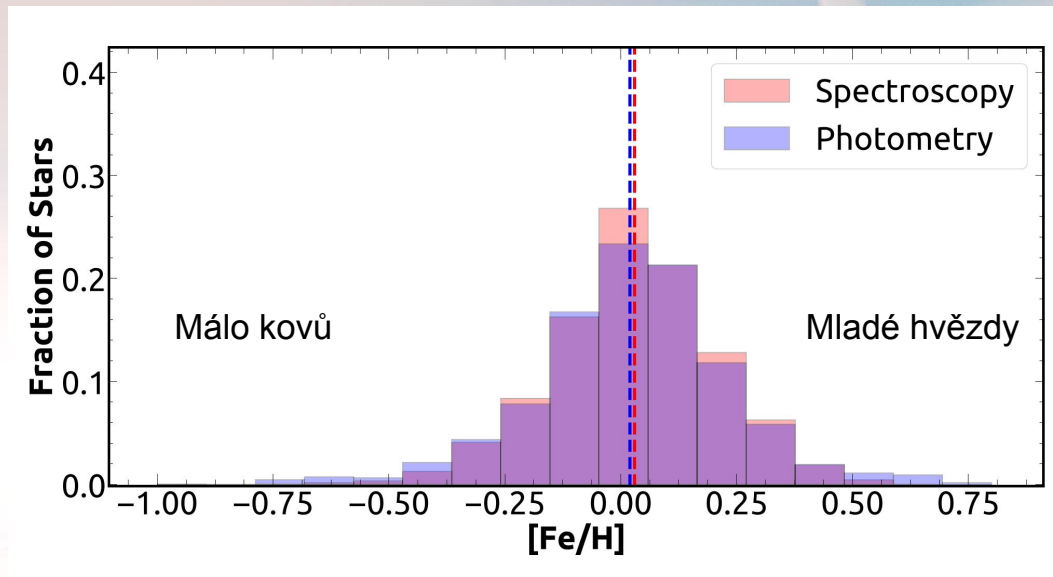
Exoplanety u hvězd různých typů



Ananyeva et al. 2020, SSR, 54, 175 - statistika výskytu planet objevených Keplerem

Pozor na pozorovací zkreslení - metody tranzitu a radiálních rychlostí jsou citlivé na velké a hmotné planety blízké svým (málo hmotným) hvězdám

Přítomnost planet - závislost na $[Fe/H]$



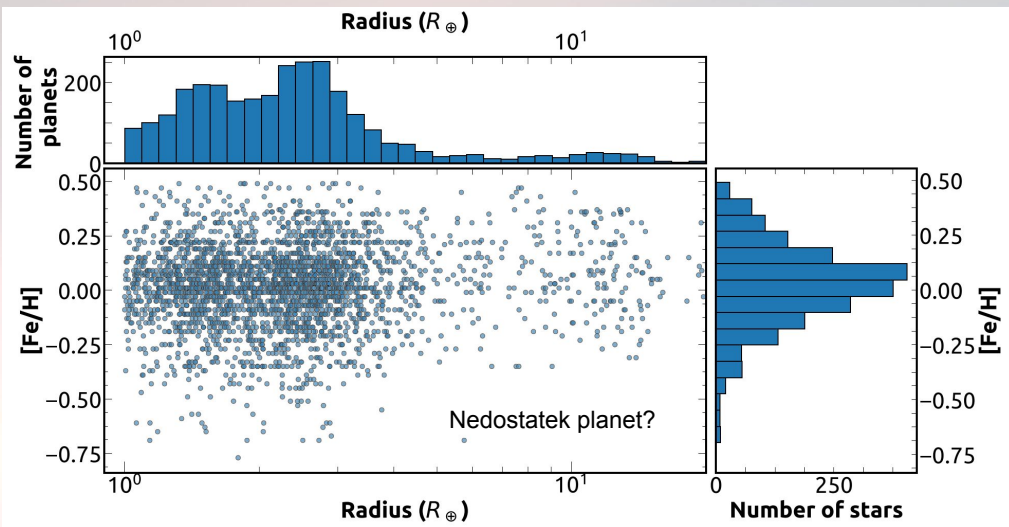
Narang et al. 2018, ApJ, 156, 221 - výskyt planet u hvězd různých vlastností

Známé exoplanety se vyskytují v širokém rozmezí metalicit, nejvíce pak u solární.

Pozor na pozorovací zkreslení - metody tranzitu a radiálních rychlostí jsou citlivé na velké a hmotné planety blízké svým (málo hmotným) hvězdám

Přítomnost planet - závislost na $[Fe/H]$

Obecně je známo více malých planet než velkých

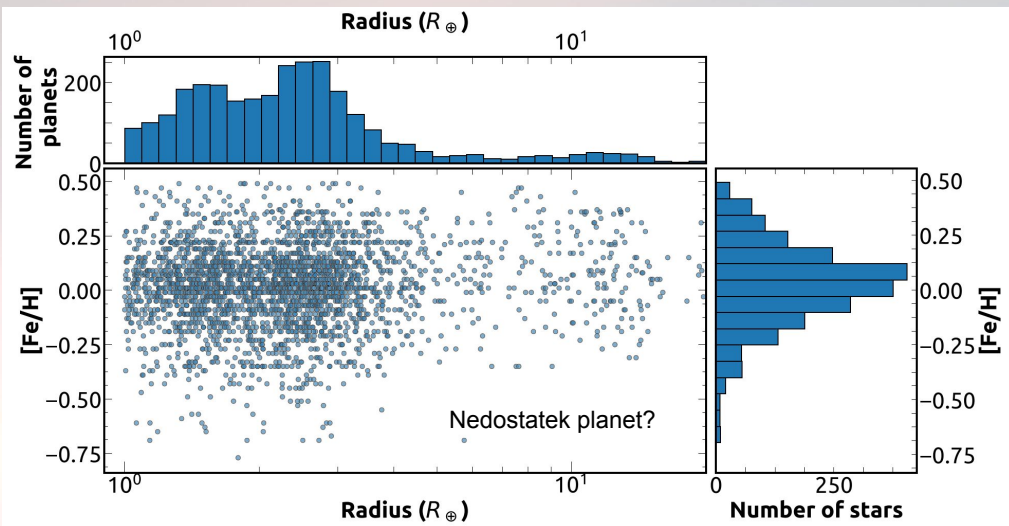


Narang et al. 2018, ApJ, 156, 221 - výskyt planet u hvězd různých vlastností

Pozor na pozorovací zkreslení - metody tranzitu a radiálních rychlostí jsou citlivé na velké a hmotné planety blízké svým (málo hmotným) hvězdám

Přítomnost planet - závislost na [Fe/H]

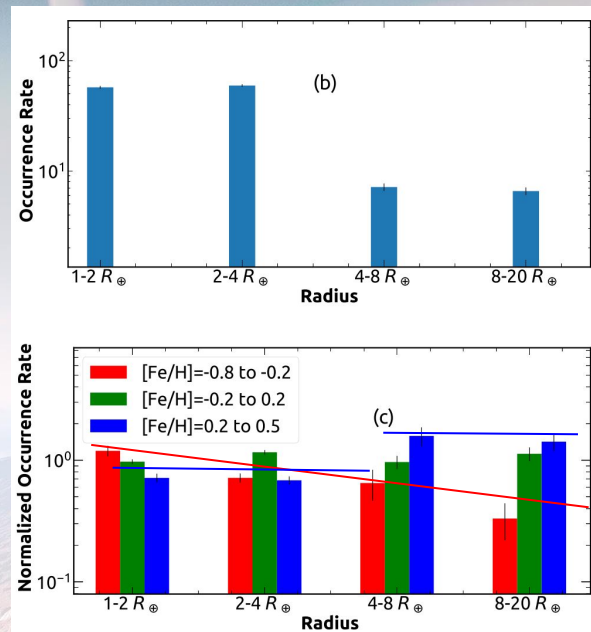
Obecně je známo více malých planet než velkých



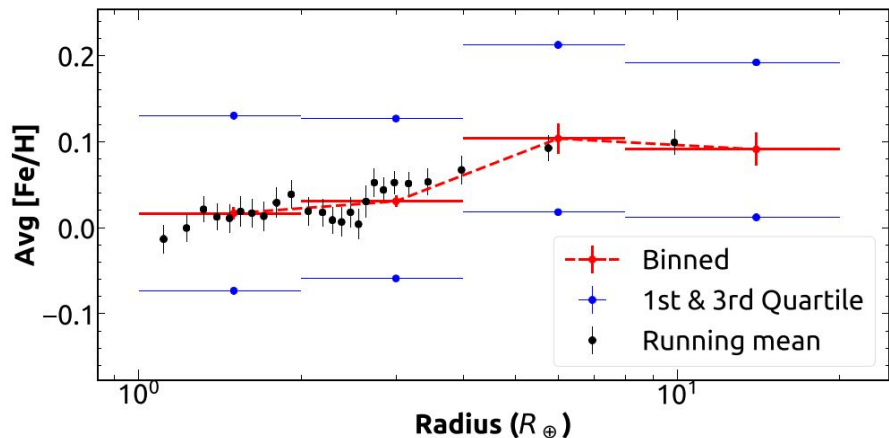
Narang et al. 2018, ApJ, 156, 221 - výskyt planet u hvězd různých vlastností

Velké planety jsou více zastoupeny u hvězd s vyšší metalicitou - více dostupného materiálu po delší dobu

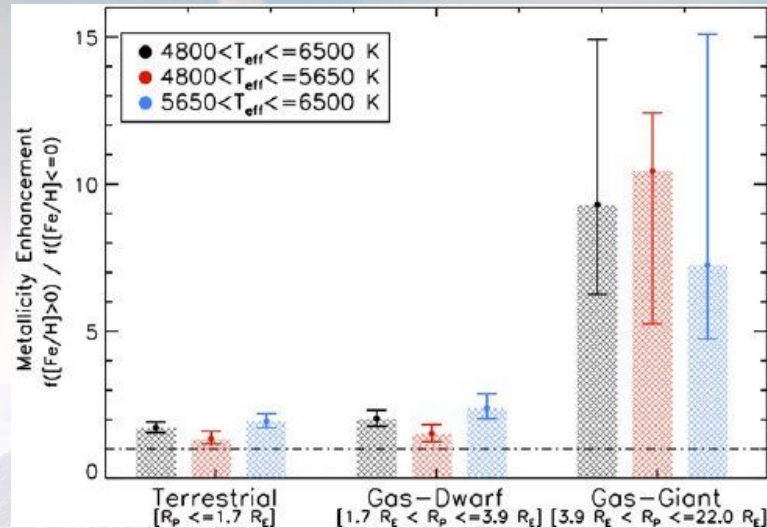
Pozor na pozorovací zkreslení - metody tranzitu a radiálních rychlostí jsou citlivé na velké a hmotné planety blízké svým (málo hmotným) hvězdám



Přítomnost planet - závislost na [Fe/H]



Narang et al. 2018, ApJ, 156, 221 - výskyt planet u hvězd různých vlastností



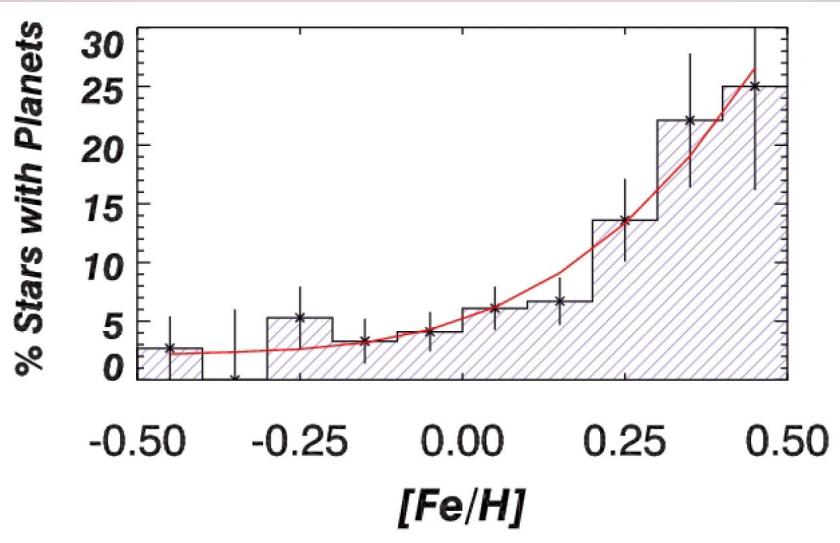
Wang&Fischer 2014, ApJ, 149, 1

Velké planety jsou více zastoupeny u hvězd s vyšší metalicitou - více dostupného materiálu po delší dobu

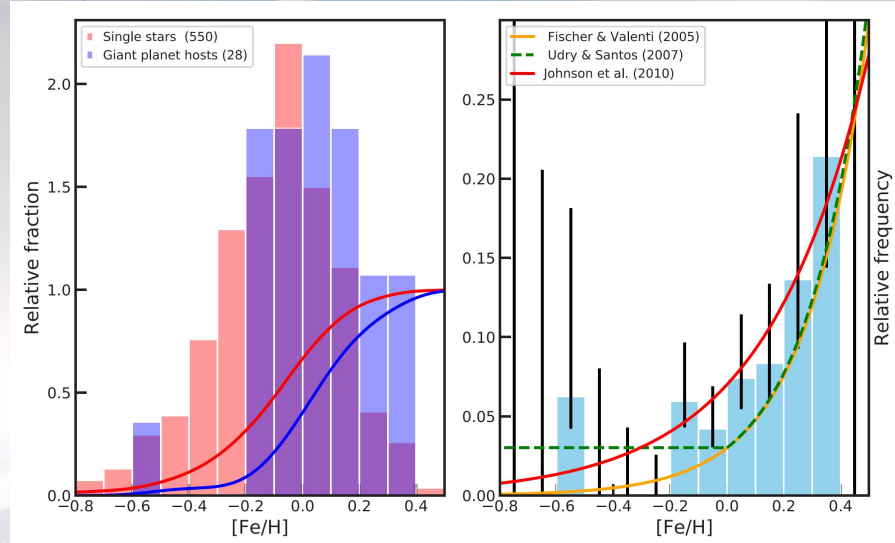
Pozor na pozorovací zkreslení - metody tranzitu a radiálních rychlostí jsou citlivé na velké a hmotné planety blízké svým (málo hmotným) hvězdám

Přítomnost planet - závislost na $[Fe/H]$

Velké planety



Mulders 2018, Handbook of Exoplanets, ISBN 978-3-319-55332-0

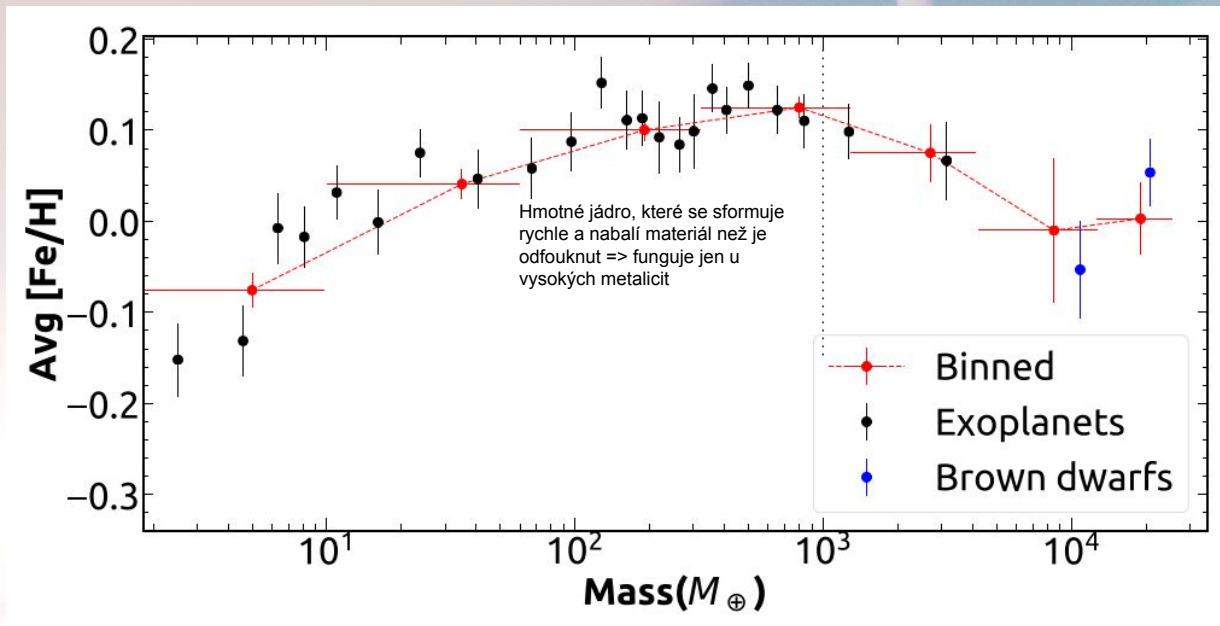


Adibekyan 2019, Geosc, 9, 105

Velké planety jsou více zastoupeny u hvězd s vyšší metalicitou - více dostupného materiálu po delší dobu

Pozor na pozorovací zkreslení - metody tranzitu a radiálních rychlostí jsou citlivé na velké a hmotné planety blízké svým (málo hmotným) hvězdám

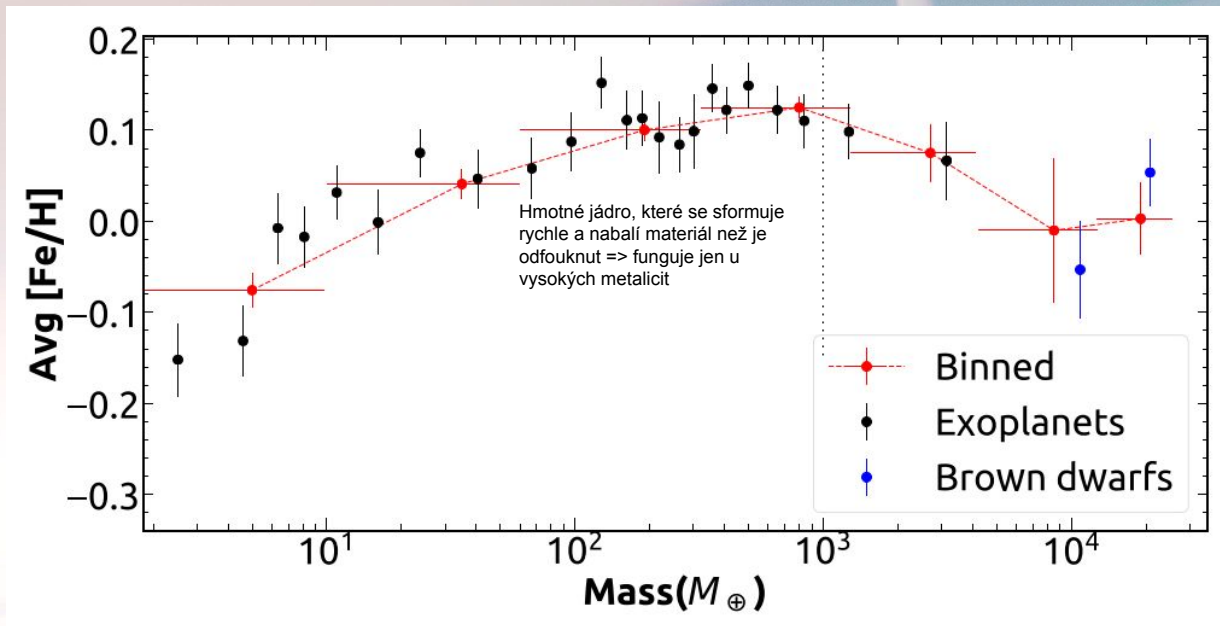
Přítomnost planet - závislost na [Fe/H]



Narang et al. 2018, ApJ, 156, 221 - výskyt planet u hvězd různých vlastností

Pozor na pozorovací zkreslení - metody tranzitu a radiálních rychlostí jsou citlivé na velké a hmotné planety blízké svým (málo hmotným) hvězdám

Přítomnost planet - závislost na [Fe/H]

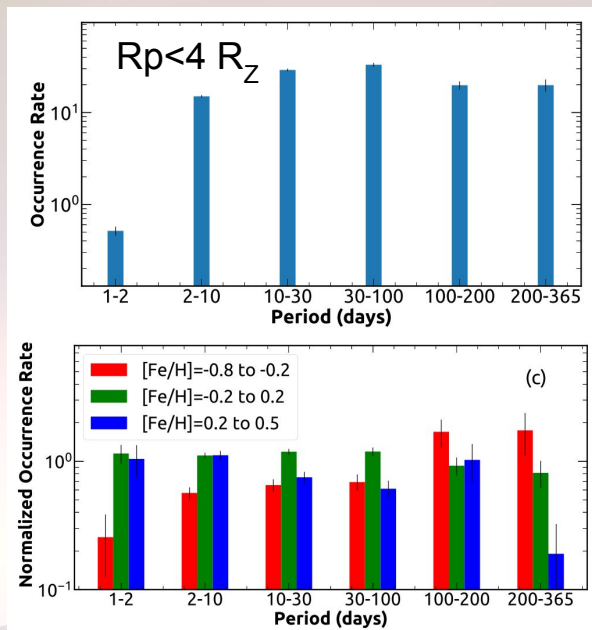


Narang et al. 2018, ApJ, 156, 221 - výskyt planet u hvězd různých vlastností

Nejhmotnější planety nejspíše vznikají jinak než akrecí jádra (nestabilitou v disku - pevné částice nehrají až tak zásadní roli - důležitější celková hmotnost disku)

Pozor na pozorovací zkreslení - metody tranzitu a radiálních rychlostí jsou citlivé na velké a hmotné planety blízké svým (málo hmotným) hvězdám

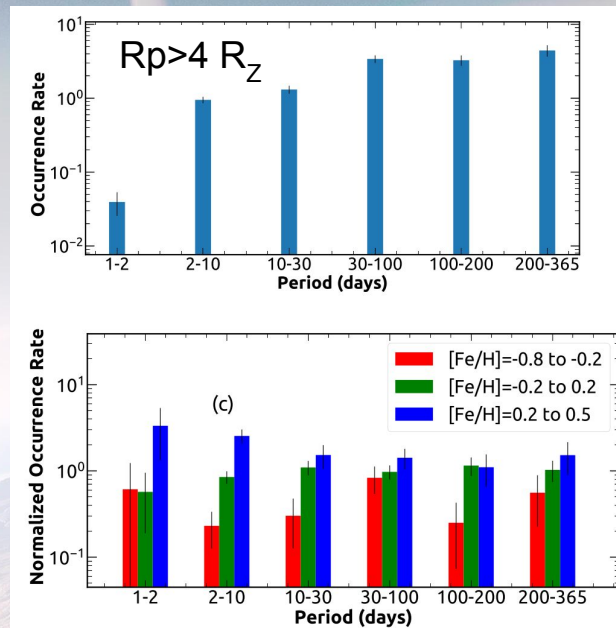
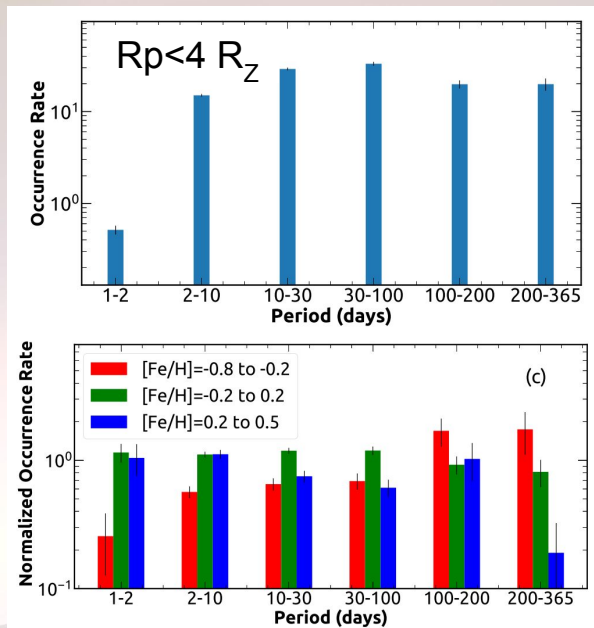
Přítomnost planet - závislost na $[Fe/H]$



Narang et al. 2018, ApJ, 156, 221 - výskyt planet u hvězd různých vlastností

Malé planety s krátkými periodami se vyskytují zejména u super-solar metalicit (jádra větších plynných planet, které přišly o atmosféry X zárodky horkých Jupiterů, které neměly čas nabalit dostatek hmoty X v disku s množstvím prachu (vysoké $[Fe/H]$) mohly planety domigrovat blíže hvězdě)

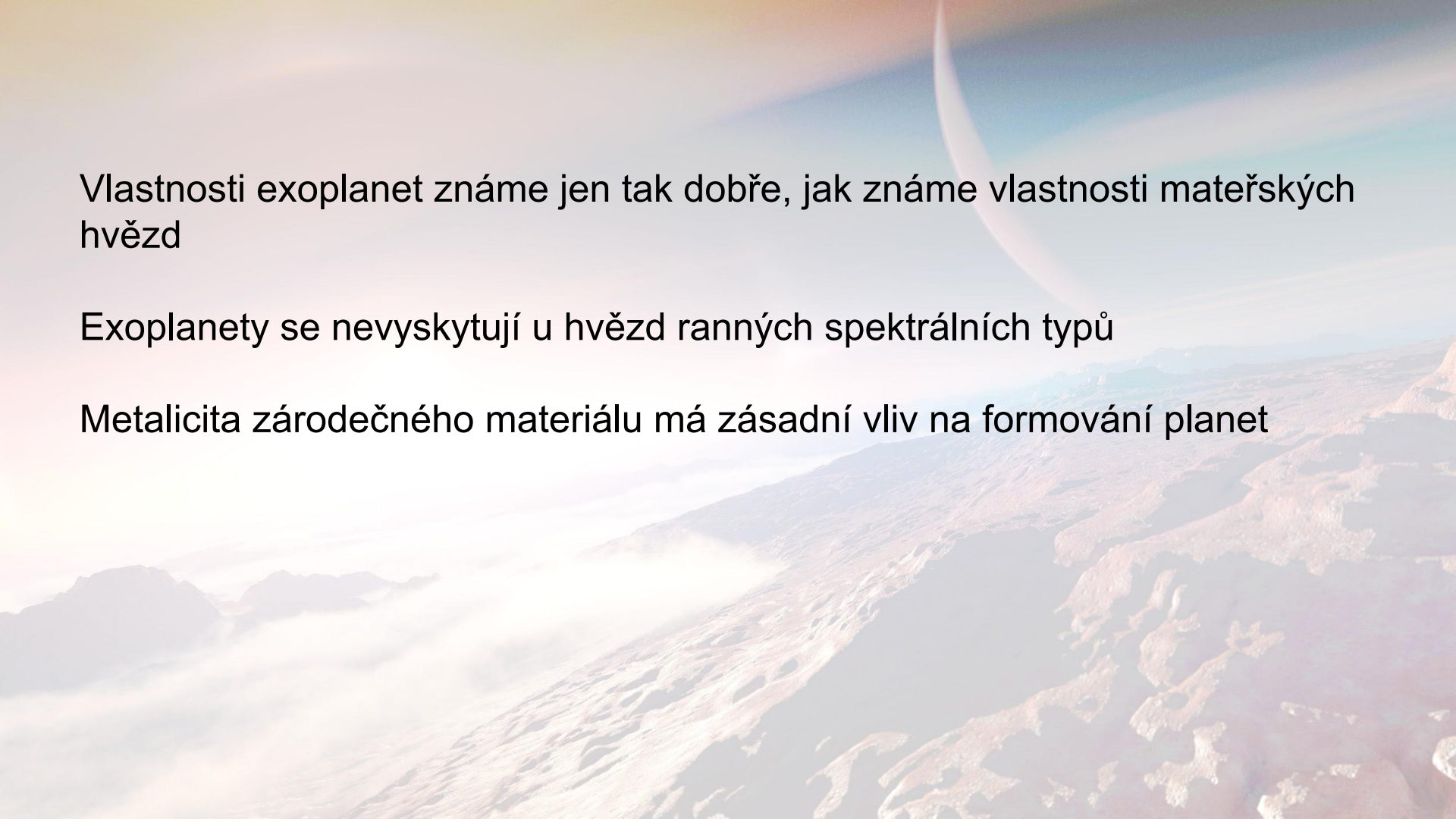
Přítomnost planet - závislost na $[Fe/H]$



Narang et al. 2018, ApJ, 156, 221 - výskyt planet u hvězd různých vlastností

Malé planety s krátkými periodami se vyskytují zejména u super-solar metalicit (jádra větších plynných planet, které přišly o atmosféry X zárodky horkých Jupiterů, které neměly čas nabalit dostatek hmoty X v disku s množstvím prachu (vysoké $[Fe/H]$) mohly planety domigrovat blíže hvězdě)

Velké planety se objevují více u hvězd s vyšší metalicitou bez ohledu na periodu oběhu => velké planety jednodušeji vznikají v prostředí bohatém na těžší prvky

A futuristic landscape with a large planet in the sky. The foreground shows a rocky, hilly terrain with a layer of white mist or clouds. In the upper right, a large, crescent-shaped planet is visible against a blue and orange sky.

Vlastnosti exoplanet známe jen tak dobře, jak známe vlastnosti mateřských hvězd

Exoplanety se nevyskytují u hvězd ranných spektrálních typů

Metalicita zárodečného materiálu má zásadní vliv na formování planet