

# ZÁKLADY ASTRONOMIE 1

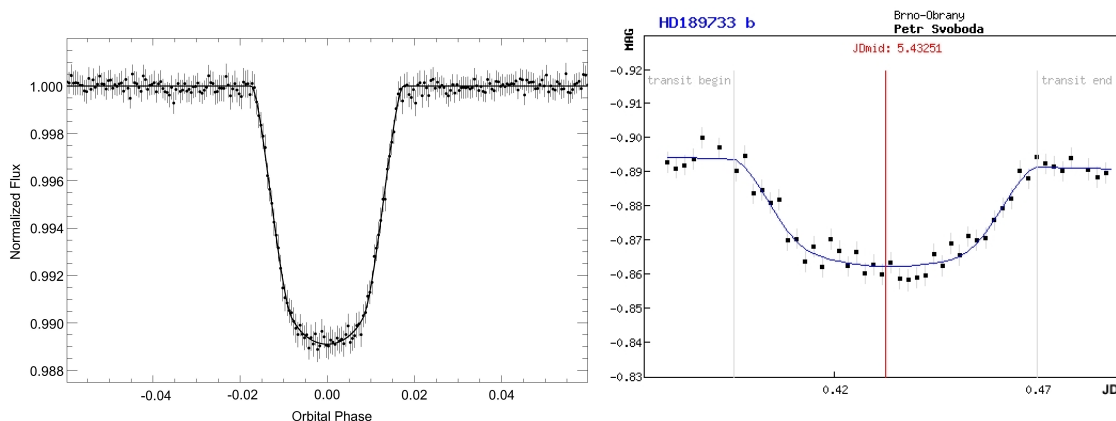
## Praktikum 10.

### VLASTNOSTI EXOPLANET

#### 1 Úvod

Když byly v devadesátých letech minulého století objeveny první extrasolární planety, jen málokdo dokázal odhadnout další rozvoj tohoto odvětví astronomie. Dnes je studium exoplanet jednou z nejrychleji se rozvíjejících částí astronomie. Počet nově objevených planet a planetárních soustav obíhajících jiné mateřské hvězdy než naše Slunce rychle roste. Katalogy exoplanet utěšeně bobtnají, ale nejen to. Dnes dokážeme studovat i atmosféry těchto vzdálených světů a promýšlet možnosti výskytu života na těchto planetách. Nové poznatky o exoplanetách ale nejen rozšiřují naše vědomosti, někde naopak zcela nabourávají naše dosavadní představy o vzniku planetárních soustav, jejich vývoje, dynamice.

V této praktické úloze se pokusíme zjistit o zvolené transituující exoplanetě co nejvíce. Postupně budete zjišťovat periody oběhu planety kolem mateřské hvězdy, její vzdálenost od této hvězdy, polohu planety vzhledem k zóně života, povrchovou teplotu, poloměr a hmotnost. Uvidíte, že i s poměrně skromnými vědomostmi se o vzdálených planetách můžete dozvědět spoustu zásadních informací.



Obr. 1: Hvězdná velikost hvězdy v průběhu transitu exoplanety. Vlevo měření družice COROT transitu exoplanety Corot 11b. Vpravo měření přechodu exoplanety HD 189733b pořízená Petrem Svobodou v Brně dalekohledem o průměru 34 mm! (Opravdu nejde o překlep. Dalekohled, vlastně jen fotografický objektiv měl využitý průměr necelých tři a půl centimetru.)

### 1. Určení oběžné periody exoplanety

První veličinou, kterou se pokusíme u exoplanety zjistit bude její oběžná doba kolem mateřské hvězdy. Metod, které slouží k detekci exoplanet a určování jejich orbitálních period je celá řada. My si vybereme jen dvě z nich – metodu radiálních rychlostí a měření jasnosti hvězdy pro transituující exoplanety.

Pokud obíhá kolem hvězdy jiné dosud nedetekované těleso (jiná hvězda, planeta), projeví se její existence v pravidelném posunu spektrálních čar hvězdy střídavě k červenému a modrému konci spektra. Z těchto posunů čar můžeme pak určit dobu oběhu, hmotnost tělesa a další parametry.

Měření transitů, tedy přechodů, planety přes disk mateřské hvězdy předpokládá, že zorný paprsek od nás ze Země se přibližně nachází v rovině oběhu exoplanety kolem mateřské hvězdy. V průběhu transitů je zakryta malá část disku hvězdy chladnějším diskem planety a dojde tak k velmi mírnému, ale přesto měřitelnému poklesu jasnosti hvězdy. Opakování poklesů pak samozřejmě odpovídá době oběhu planety.

### 2. Vzdálenost exoplanety od mateřské hvězdy

Pohyb planety kolem hvězdy popisují Keplerovy zákony a samozřejmě Newtonův gravitační zákon. Jejich využitím spočítáte vzdálenost planety od své hvězdy. Chybějící údaj o hmotnosti hvězdy lze odhadnout. Později v kurzu se dozvíte, že pro hvězdy na tzv. hlavní posloupnosti v HR diagramu je možné psát empirické vztahy pro jejich různé parametry. Všechny potřebné parametry hvězd pro tuto úlohu naleznete v tabulkách 2 a 3.

### 3. Je planeta obyvatelná?

Naše názory na život ve vesmíru a obyvatelnost planet se mohou i dost podstatně lišit, ale v současnosti převládá názor, že život ve vesmíru ke své existenci potřebuje vodu a to nejlépe vodu ve všech třech skupenstvích. Hledáme tedy planety, kde by panovaly takové podmínky, aby existence zejména tekuté vody byla možná. Na planetě tedy musí být vhodná teplota a tlak atmosféry, což je určeno parametry planety a její vzdáleností od mateřské hvězdy. Navíc předpokládáme, že pro vznik a udržení života je nutné, aby planeta měla pevný povrch, nikoli plynň jako například Jupiter. V každém případě, pokud by planeta byla příliš daleko, nedostávala by dost energie od mateřské hvězdy a byla by příliš chladná. Naopak, malá vzdálenost by planetu rozpálila na vysokou teplotu, jak můžeme pozorovat například u tzv. horkých Jupiterů. Pokud má planeta optimální vzdálenost, nachází se v tzv. zóně života. Podoba zóny života samozřejmě závisí na parametrech mateřské hvězdy. Na obrázku 2 jsou uvedeny zóny života dle Kastinga a kol. (1993).

### 4. Povrchová teplota exoplanety

Zatím jsme z měření určili dobu oběhu exoplanety kolem mateřské hvězdy, následně spočítali její vzdálenost a rozhodli o její poloze vzhledem k zóně života. Jak ale určit povrchovou teplotu planety? To přece musí být obtížná a náročná metoda! Budete zřejmě překvapeni, ale řešení je poměrně snadné. Kvalifikovaný odhad teploty povrchu exoplanety můžete provést sami na základě znalostí z kurzu a údajů v této praktické úloze.

Na teplotu exoplanety má vliv několik faktorů. Tak především teplota mateřské hvězdy a její vzdálenost. Důležité jsou i albedo a emisivita. Zatímco albedo je míra odrazivosti, tedy poměr mezi množstvím odraženého a dopadajícího záření, emisivita určuje, jak dokáže planeta vyzařovat tepelnou energii – je to poměr mezi množstvím skutečně vyzařené energie ku energii vyzařené absolutně černým tělesem o stejné teplotě.

Pro obyvatelnou planetu je nezbytné, aby měla dostatečně silnou a hustou atmosféru. Jestliže tato podstatná atmosféra je navíc perfektní absorbér a zářič (albedo i emisivitu lze zanedbat), pak můžeme průměrnou teplotu povrchu planety odhadnout ze vztahu

$$T_{\text{pl}} = \sqrt{\frac{R_{\text{hvězda}}}{2a_{\text{pl}}}} T_{\text{hvězda}}, \quad (1)$$

kde  $T_{\text{pl}}$  je průměrná povrchová teplota planety v kelvinech,  $R_{\text{hvězda}}$  je poloměr hvězdy,  $a$  je velká poloosa trajektorie exoplanety a  $T_{\text{hvězda}}$  je povrchová teplota mateřské hvězdy v kelvinech.

Je třeba si uvědomit, že pro obyvatelnou planetu je rozmezí možných povrchových teplot velmi malé. Abychom splnili zatím všeobecně přijímanou premisu o nezbytnosti tekuté vody, musí být v podstatě menší než sto stupňů – od bodu mrazu do bodu varu vody. Samozřejmě tento interval se může měnit v závislosti na tlaku, který na povrchu planety panuje.

## 5. Velikost exoplanety

Jak již víme, lze při vhodné orientaci roviny oběhu planety kolem mateřské hvězdy vůči směru k Zemi detekovat pokles jasnosti hvězdy způsobený přechodem planety přes disk hvězdy. Takové pozorování transitů lze v dnešní době vykonávat i v amatérských podmínkách s relativně malými dalekohledy a CCD kamerami (viz obrázek 1b). Samozřejmě nejpřesnější měření získáváme z družic COROT nebo KEPLER (viz obrázek 1a), ale pečlivým zpracováním a analýzou měření malých pozemských dalekohledů lze získat data vhodná k určení poloměru exoplanety. Nebudeme postupovat zcela rigorózně, ale úlohu si opět zjednodušíme. Ideální případ, kdy směr k Zemi, k pozorovateli, leží přímo v rovině oběhu exoplanety kolem mateřské hvězdy, tedy kdy planeta přechází přímo přes střed disku hvězdy, příliš často nenastává. Můžeme si ale pomoci zanedbáním okrajového ztemnění hvězdy. Budeme předpokládat, že disk hvězdy je všude stejně jasný, což znamená, že ať již bude zakrývána jakákoli část hvězdy, vždy bude pokles jasu záviset pouze na zakryté ploše disku. Její maximální hodnota je samozřejmě totožná s plochou disku exoplanety  $\pi R_{\text{pl}}^2$ . Pozorovaný relativní pokles jasnosti  $\Delta F$  je pak dán jednoduše jako poměr čtverců poloměrů planety a hvězdy

$$\Delta F = \frac{R_{\text{pl}}^2}{R_{\text{hvězda}}^2}. \quad (2)$$

## 6. Výpočet hmotnosti exoplanety

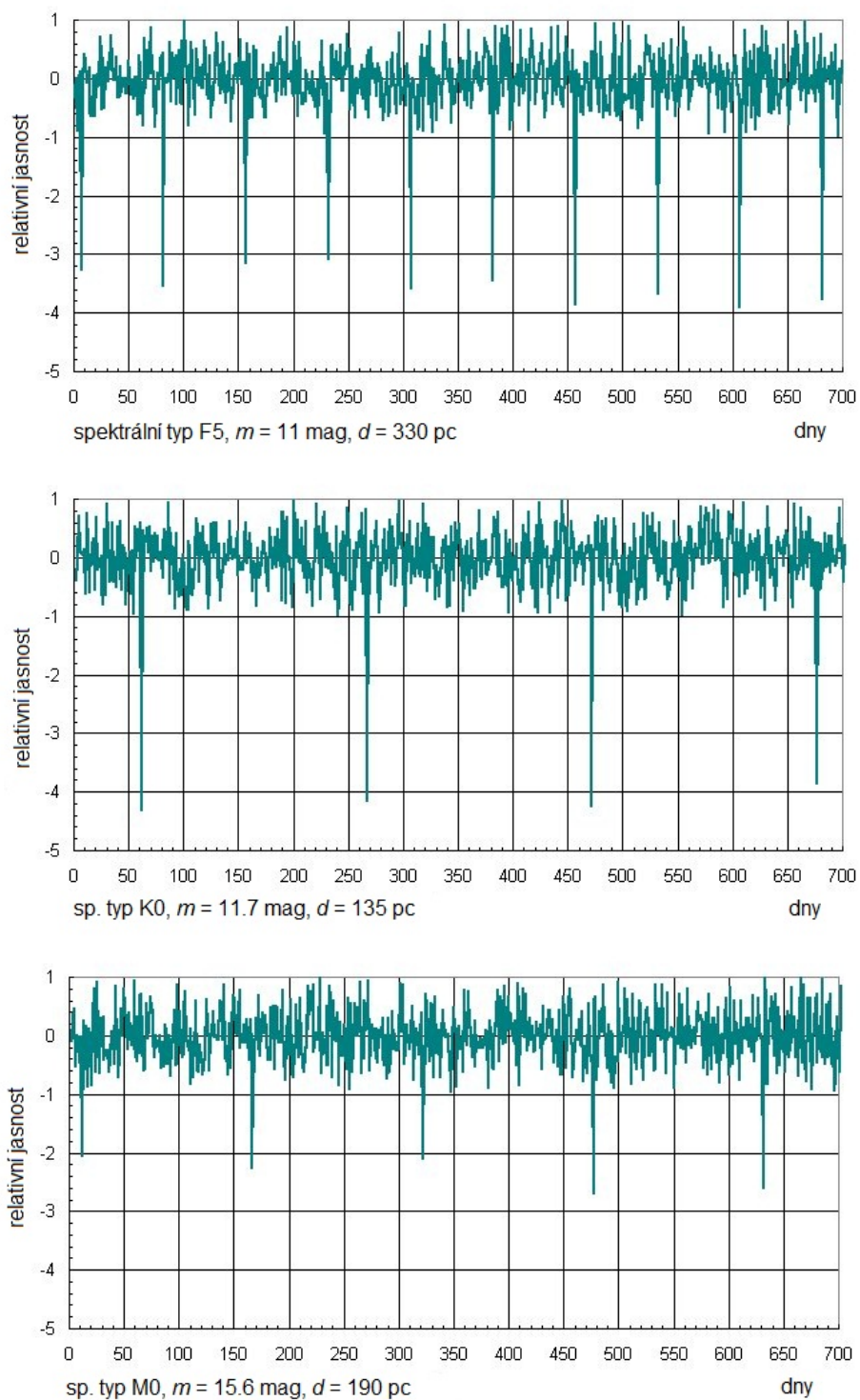
Hmotnost exoplanety můžeme určit na základě odhadu její hustoty. Využijeme dva velmi jednoduché modely. Budeme předpokládat, že hustota planety závisí jen na jedné veličině – buď na její velikosti, tedy poloměru, nebo na její vzdálenosti od mateřské hvězdy. Dlužno říci, že ani pro naši Sluneční soustavu, to není přesné, jak je vidět z obrázků 4. Pro komplexnější model hustoty planet bychom měli vzít v úvahu velikost planety, vzdálenost od mateřské hvězdy, její spektrální typ, povrchovou teplotu a další parametry.

V prvním modelu (obrázek 4 vlevo) je závislost hustoty planet Sluneční soustavy na jejich poloměru v logaritmické škále. Zobrazená křivka představuje nejlepší proložení, ale je jasné vidět, že pro řadu planet rozhodně nejde o optimální řešení. Navíc je třeba si uvědomit, že průběh hustoty v každém planetárním systému nemusí být stejný. Nicméně pro naše účely získaný odhad postačí. V druhém modelu (obrázek 4b) je podstatně lepší proložení pro závislost hustoty planety na její vzdálenosti od Slunce. I zde je však vidět odchylky pro některé planety, byť nejsou tak velké jako v předchozím případě.

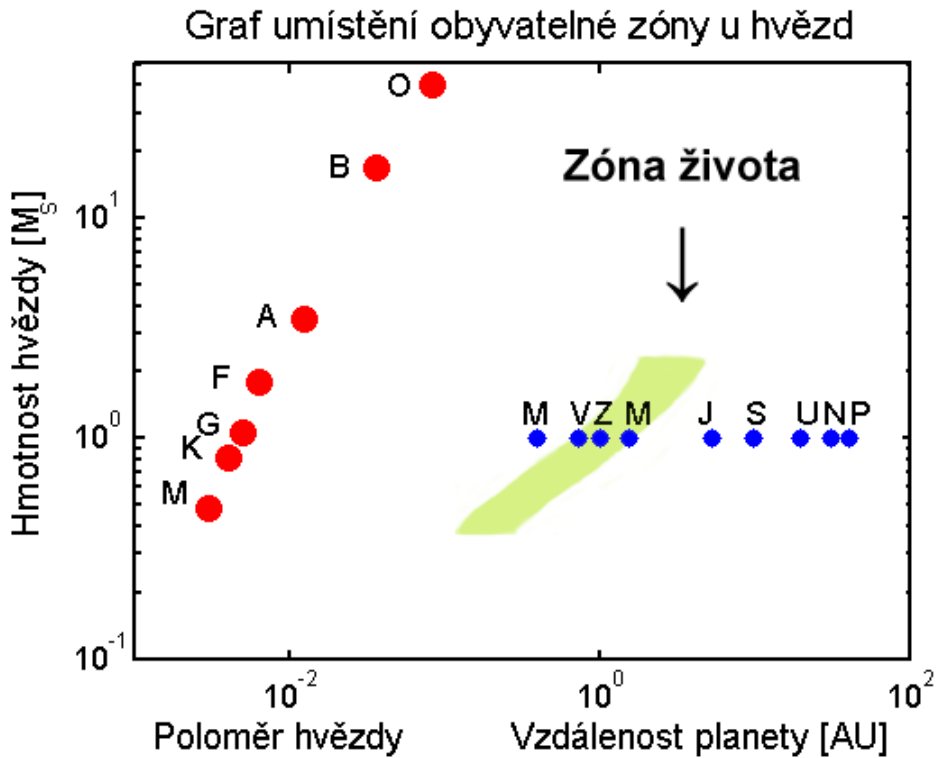
Průměrná hustota nějakého objektu je samozřejmě dána poměrem hmotnosti ku objemu tělesa. Za předpokladu kulového tvaru planet pak lze snadno psát

$$M_{\text{pl}} = \frac{4}{3}\pi\rho R_{\text{pl}}^3, \quad (3)$$

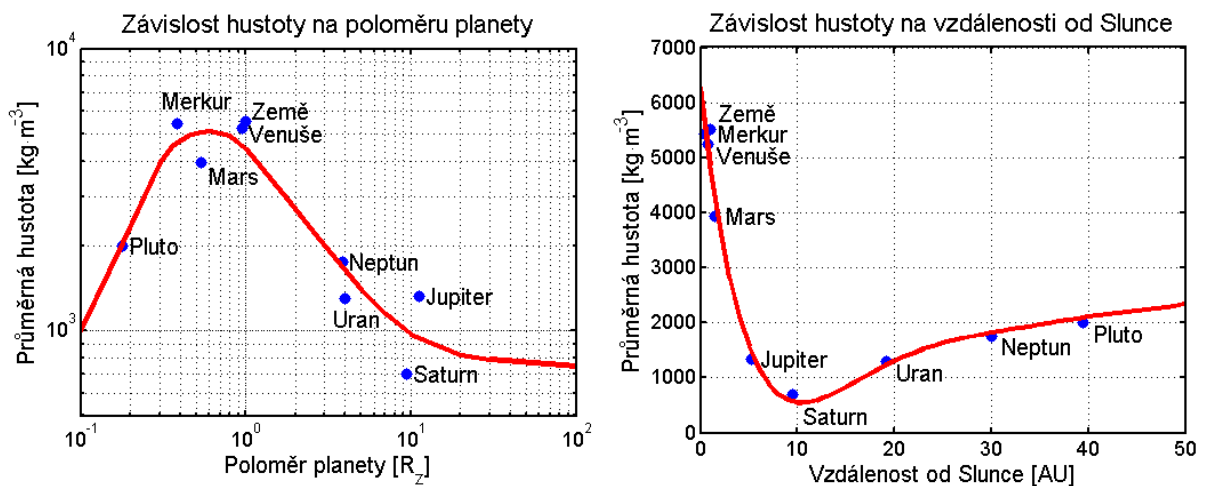
kde  $\rho$  je hustota planety.



Obr. 2: Grafy ukazují měřenou jasnost tří odlišných hvězd. Jejich spektrální typ je vždy uveden u příslušné křivky. Když planeta přechází před diskem hvězdy, nastane transit, malá část hvězdy je zacloněna podstatně chladnější planetou a dojde k poklesu pozorované jasnosti hvězdy.



Obr. 3: V grafu je vykreslena hmotnost hvězdy v hmotnostech Slunce v závislosti na vzdálenosti planety od mateřské hvězdy. Příslušným spektrálním typem (O, B, A, F, G, K, M) jsou také označeny odpovídající poloměry hvězd. Písmeno označuje vždy hodnotu pro podtyp 0, tedy A znamená A0. Přibližná poloha planet Sluneční soustavy je vyznačena podél vodorovné linie odpovídající  $1 M_{\odot}$  a je vyznačena vždy prvním písmenem názvu planety. Graf sestavil David Koch na základě práce Kastinga a kol.(1993).



Obr. 4: Závislosti hustoty planet Sluneční soustavy na jejich velikosti a vzdálenosti od Slunce.

1. Z obrázku 2 si vyberte jeden záznam s měřenou jasností hvězdy. Všechna další úkoly pak budete provádět s údaji dle zvoleného záznamu.

Pro tuto praktickou úlohu jsem si zvolil exoplanetu A, B, C,<sup>1</sup> jejíž spektrální třída je . . . .

Nyní pro zvolenou exoplanetu odměřte z grafu čas mezi poklesy jasnosti hvězdy a spočítejte průměrný čas mezi transity exoplanety. Je vhodné si případně zvolený graf vytisknout větší a z něj pak zjišťovat požadovaná data.

Měření opakujte 10 krát a запиšte do tabulky 1. Měřte různé úseky, například dvě nebo tři periody nebo od prvního poklesu do posledního. Několikrát proměřte i měřítko grafu, aby byl přepočet mezi jednotkami délkovými a zobrazovanými časovými co nejpřesnější. Při všech měřeních se nespokojte s přesností použitého měřidla, zpravidla milimetry, ale jistě můžete měřit s přesností na jednu až dvě desetiny milimetru.

Tabulka 1: Měření periody oběhu

číslo měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
délka [mm]										
počet period										
délka 1 periody [dny]										

Měřítka grafu 1 mm odpovídá . . . . . dní, bylo zjištěno na základě ..... měření s chybou .....

Průměrná hodnota oběžné periody z provedených měření je . . . . . dní = . . . . . roků.<sup>2</sup>

2. V této chvíli vystačíme s tím, že známe spektrální třídu mateřské hvězdy a v tabulce 2 si najdete příslušnou hmotnost hvězdy.

Povšimněte si, závislosti spektrální třídy hvězdy a hmotnosti. Které hvězdy jsou zde nejhmotnější? Chladné nebo žhavé? ....

Tabulka 2: Hmotnosti hvězd

Spektr.	05	B0	B5	A0	A5	F0	F5	G0	G5	K0	K5	M0	M5
Hmotnost [ $M_{\odot}$ ]	40	17	7.0	3.5	2.2	1.8	1.4	1.07	0.93	0.81	0.69	0.48	0.22

Vraťme se zpět k našemu úkolu. Máme určit velkou poloosu oběžné trajektorie exoplanety. Využijeme třetího Keplerova zákona, ale lze jej využít v následujícím tvaru nebo ve vztahu něco chybí?

$$P^2 M = a^3 \tag{4}$$

Pokud ve vztahu něco chybí, napište správný tvar. V každém případě odpověď zdůvodněte!

<sup>1</sup>Nehodící se škrtejte.

<sup>2</sup>Máme samozřejmě na mysli pozemský den 1 d = 86400 s a juliánský pozemský rok v délce 365,25 dne.

Dosaďte do vztahu, spočtete velkou poloosu trajektorie exoplanety  $a = . . . . .$  a запиšte dosazené hodnoty včetně jednotek.

3. Zjistěte poloměr mateřské hvězdy exoplanety z tabulky 3 a poté do obrázku vyznačte polohu hvězdy. Dávejte pozor na měřítka os, jsou obě logaritmická!

A nyní odpovězte na otázku, kde se nachází sledovaná exoplaneta (označte jednu z následujících možností).

Exoplaneta se nachází:

- a) nepochybně v zóně života na grafu,
- b) zcela jistě mimo zónu života,
- c) poblíž hranice zóny života.

4. Odhadněte povrchovou teplotu planety ze vztahu 1. Nejdříve potřebujete určit rozměry a povrchovou teplotu mateřské hvězdy. K tomu nám poslouží tabulka 3.

Tabulka 3: Parametry hvězd hlavní posloupnosti HR diagramu

Spektr.	05	B0	B5	A0	A5	F0	F5	G0	G5	K0	K5	M0	M5
Hmotnost [ $M_{\odot}$ ]	40	17	7.0	3.5	2.2	1.8	1.4	1.07	0.93	0.81	0.69	0.48	0.22
Radius [ $R_{\odot}$ ]	17.8	7.59	3.98	2.63	1.78	1.35	1.20	1.05	0.93	0.85	0.74	0.63	0.32
Temperature [K]	35000	21000	13500	9700	8100	7200	6500	6000	5400	4700	4000	3300	2600

Ve zvoleném případě je mateřská hvězda spektrální třídy . . . . a to znamená, že její povrchová teplota je . . . . . a poloměr . . . . . Povrchová teplota sledované exoplanety je pak . . . . .

5. Určete velikost exoplanety dle vztahu 2. Nejprve změřte relativní pokles jasnosti ze zvoleného grafu světelné křivky. Měření opakujte pro všechny registrované transity a spočtete průměrnou hodnotu. Měření samozřejmě můžete opakovat i pro stejné transity. Opakovaně proměřte i měřítko grafu. Nakonec spočtete průměrnou hodnotu a chybu určení.

Tabulka 4: Měření relativní změny jasnosti.

číslo transitu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
změřený pokles [mm]										

Měřítka osy relativní změny jasnosti: 1 mm odpovídá relativní změně . . . . . Průměrná hodnota relativního poklesu je . . . . . s chybou . . . . .

Poloměr exoplanety určený pomocí vztahu 2 je . . . . .  $R_{\odot}$ , což je . . . . . poloměrů Země<sup>3</sup>.

6. Do grafu 4a) vyznačte nalezený poloměr exoplanety a odečtete z něj odhadovanou hustotu planety (pozor – graf je v logaritmické škále!). Obdobně do grafu 4b) vyznačte zjištěnou střední

<sup>3</sup>Poloměr Slunce je přibližně 109 poloměrů Země.

vzdálenost exoplanety od mateřské hvězdy a odečtete odhadovanou hustotu exoplanety. Hodnoty zapište do tabulky 5 a pro obě spočítejte hmotnost planety za předpokladu kulového tvaru planety. Hmotnost exoplanety vyjádřete jak v kilogramech, tak ve hmotnostech Země  $M_Z = 5,98 \cdot 10^{24}$  kg.

Tabulka 5: Určení hustoty a hmotnosti planety.

	odhad hustoty [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	hmotnost planety [kg]	hmotnost planety [ $M_Z$ ]
model 1			
model 2			

7. Spočítejte, jak velkou změnu radiální rychlosti mateřské hvězdy způsobí sledovaná planeta a určete, jakým přístrojem a zda vůbec by byla taková změna radiální rychlosti ze Země pozorovatelná.

8. Diskutujte zjištěné parametry exoplanety. Odhadněte, jak se projeví různé zjednodušující předpoklady na výsledných parametrech.

## Použité zdroje a další materiály ke studiu

Kasting, J. F., Whitmire, D. P., & Reynolds, R. T., 1993, *Icarus*, 101, 108

<http://www.exoplanety.cz>

<http://www.exoplanets.eu>

<http://kepler.nasa.gov>

Úloha byla připravena s využitím materiálu Richarda L. Bowmana (Bridgewater College) a Davida Kocha (projekt družice Kepler).