

Marek Wolf

Extrasolární planety. K 10. výročí objevu první planety u hvězdy podobné Slunci

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 50 (2005), No. 1, 44--61

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/141253>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 2005

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

Extrasolární planety

K 10. výročí objevu první planety u hvězdy podobné Slunci.

Marek Wolf, Praha

Úvod

Na počátku 90. let minulého století bylo spolehlivě známo pouhých devět planet v naší sluneční soustavě. Jeden z největších astronomických objevů 20. století na sebe nechal čekat až do r. 1995, kdy bylo detekováno první těleso planetární hmotnosti obíhající hvězdu podobnou našemu Slunci. O existenci extrasolárních planet (exoplanet), tedy planet mimo naši sluneční soustavu, se vážně uvažovalo již v druhé polovině minulého století. Detekční metody však byly natolik nepřesné, že taková tělesa nedokázaly odhalit. K prvnímu objevu těles planetární velikosti v jiných soustavách však došlo u vcelku exotického objektu, jakým je pulsar — tedy rychle rotující neutronová hvězda.

V současné době pracuje na tomto tématu na celém světě více než 50 početných vědeckých týmů a pracovních skupin s moderními přístroji. Lze bez nadsázky říci, že vlastně vznikl nový, rychle se rozvíjející obor astrofyziky. Přehled všech známých exoplanet včetně jejich vlastností lze nalézt na stránkách *The Extrasolar Planets Encyclopaedia* [9], *California & Carnegie Planet Search* [2] nebo *Extrasolar Visions* [3].

Obecně přijímaná teorie vzniku hvězd říká, že planetární systém je vlastně vedlejším produktem procesu formování hvězdy. Při kolapsu oblaku prachu a plynu se důsledkem zachování momentu hybnosti vytváří kolem nově vznikající hvězdy plochý akreční disk. V tomto disku se prachové částice a ledová zrnka postupně shlukují na protoplanety. Ve vnějších a chladnějších oblastech disku, kde mohou plyny kondenzovat, vznikají planetární zárodky až několik milionů let. Když získají dostatek hmoty (zhruba 10násobek hmotnosti Země, dále $M_Z = 3 \cdot 10^{-6} M_\odot = 6 \cdot 10^{24}$ kg), je jejich gravitační přitažlivost natolik velká, aby z okolního prostoru akumulovaly zbylý plyn a postupně zvyšovaly hmotnost. Tento proces vede ke vzniku velkých plyných planet, jaké známe i v naší sluneční soustavě (např. Jupiter a Saturn). Ve vnitřní části disku, kde vysoké teploty nedovolí plyným látkám kondenzovat, vytváří silikátové částice postupně menší planety podobné naší Zemi. Protoplanetární disky u vznikajících hvězd byly objeveny pomocí Hubblova dalekohledu např. v mlhovině v Orionu. Snímky ukazují, že disky jsou společnou vlastností všech mladých hvězd slunečního typu, ale donedávna unikaly našim detekčním schopnostem.

Doc. RNDr. MAREK WOLF, CSc. (1957), Astronomický ústav, Matematicko-fyzikální fakulta Univerzity Karlovy, V Holešovičkách 2, 180 00 Praha 8, e-mail: wolf@cesnet.cz

Současná definice Mezinárodní astronomické unie říká, že planeta je těleso, které má hmotnost mezi hmotností Pluta a patnáctinásobkem hmotnosti Jupitera (dále $M_J = 9,5 \cdot 10^{-4} M_\odot = 1,9 \cdot 10^{27}$ kg), přitom obíhá těleso, které produkuje ve svém nitru energii pomocí nukleárních reakcí [1]. Podle této definice tak první tělesa objevená u pulsarů nejsou řádnými planetami.

Tempo objevů nových planetárních těles je vysoké. Do konce března r. 2000 bylo zaznamenáno celkem 34 exoplanet, statistika na konci března 2005 říká, že u hvězd v okolí Slunce bylo objeveno zatím 152 exoplanet v celkem 134 planetárních systémech. V tomto počtu je zahrnuto také 14 vícenásobných planetárních systémů. Každý měsíc přinášejí odborné časopisy zprávy o objevech dalších planetárních těles, viz [9]. Vysoké excentricity planetárních drah, malá vzdálenost od mateřské hvězdy a poměrně velké hmotnosti detekovaných planet však ukazují, že tato tělesa jsou zcela odlišná od planet, které dobře známe v naší sluneční soustavě.

V tomto příspěvku je uveden stručný popis detekčních metod nejčastěji používaných k objevu nových exoplanet, přehled základních fyzikálních vlastností nových planet a také informace o budoucích kosmických projektech, které by měly podstatným způsobem rozšířit naše znalosti o těchto pozoruhodných a dlouho neznámých objektech. Další informace nalezne čtenář např. v [7] nebo [12].

1. Detekční metody

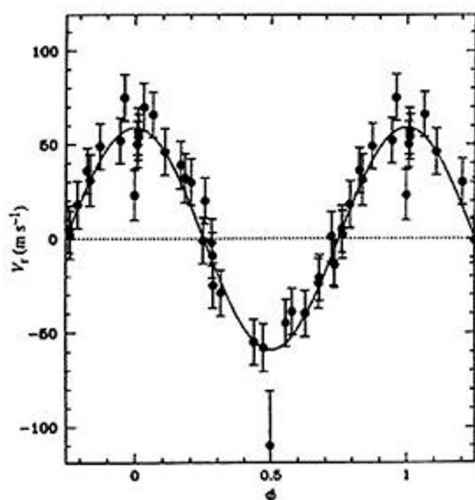
Detekce extrasolárních planet je v současné době založena především na nepřímých metodách. Většina těchto metod vychází z dynamických účinků planety na mateřskou hvězdu. Soustava hvězda–planeta vlastně obíhá kolem společného těžiště. Gravitační účinky planety na hvězdu jsou sice velmi malé, ale lze je přesto odhalit jako změny její radiální rychlosti nebo nepatrné změny polohy na obloze.

1.1. Metoda radiálních rychlostí

Prakticky všechny planety u blízkých hvězd byly odhaleny díky rychlému vývoji a vysoké přesnosti měření radiálních rychlostí. Tato metoda je zatím stále nejproduktivnější a dosud nejvíce rozšířená. Princip metody spočívá v měření pohybu hvězdy ve směru zorného paprsku (tzv. radiální rychlosti) pomocí Dopplerova posuvu spektrálních čar. Pro radiální rychlost platí jednoduchý vztah

$$\frac{v_r}{c} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}, \quad (1)$$

kde c je rychlost světla, $\Delta\lambda$ je naměřený posuv vlnové délky a λ_0 laboratorní vlnová délka této spektrální čáry. Přesnost této metody, která současně využívá až stovku spektrálních čar hvězdy, dosahuje nyní řádově jednotky m/s, tj. $\Delta\lambda/\lambda \sim 10^{-8}$. Taková přesnost je však k detekci planet potřebná, neboť např. oběh Jupitera vyvolá pro vzdáleného pozorovatele periodické změny radiální rychlosti Slunce s amplitudou



Obr. 1. Křivka radiálních rychlostí hvězdy 51 Peg. Sinusové variace jsou způsobeny oběhem planety o hmotnosti $4,2 M_J$. (Geneva Observatory.)

pouhých 13 m/s. Pro srovnání, radiální rychlosti hvězd v okolí Slunce dosahují řádově 10 až 100 km/s a jsou dány vzájemným pohybem hvězd v Galaxii. U složek těsných dvojhvězd nalezneme amplitudy ještě vyšší, dané oběhem hmotných hvězd okolo společného těžiště. Amplituda změn radiální rychlosti je

$$K = \left(\frac{2\pi G}{P} \right)^{1/3} \frac{M_p \sin i}{(M_p + M_*)^{2/3}} \frac{1}{(1 - e^2)^{1/2}}, \quad (2)$$

kde G je gravitační konstanta, e je excentricita a i sklon dráhy k rovině nebeské sféry. Oběžná doba P , velká poloosa a a hmotnosti planety a hvězdy M_p a M_* jsou svázány známým 3. Keplerovým zákonem

$$\frac{a^3}{P^2} = \frac{G}{4\pi^2} (M_p + M_*). \quad (3)$$

Hmotnost planety je možné vzhledem k hmotnosti hvězdy většinou zanedbat. Poprvé se detekce planety touto metodou u hvězdy hlavní posloupnosti podařila dvojici švýcarských astronomů z Ženevské observatoře u hvězdy 51 Peg v r. 1995 [6], viz obr. 1. Po potvrzení tohoto objevu na Lickově observatoři v Kalifornii začal opravdový hon na nové planety. Cílem se postupně staly všechny blízké a tedy poměrně jasné hvězdy, jejichž spektrální typ je podobný našemu Slunci. V r. 1996 tak přibýlo hned několik dalších objevů. V tabulce 1 jsou uvedeny spektrální typy, hmotnosti, oběžné doby, hlavní poloosy, excentricity a amplitudy radiálních rychlostí pro první planety objevené do konce r. 1996.

Na vyhledávání planet spektroskopickou metodou v současné době pracuje řada velkých světových observatoří, mezi nejúspěšnější patří Keckovy dalekohledy na Havajských ostrovech (obr. 2), Lickova observatoř v Kalifornii a francouzská observatoř v Haute-Provence.

Tabulka 1. Prvních sedm planet objevených u hvězd hlavní posloupnosti do r. 1996 metodou měření radiální rychlostí (řazené podle rostoucí hmotnosti).

Hvězda	Spektrální typ	$M \sin i$ [M _J]	Perioda [dny]	Poloosa [AU]	Excentricita	K [m/s]
51 Peg	G2V	0,46	4,231	0,05	0,01	55,0
ν And	F8V	0,69	4,617	0,059	0,01	70,2
55 Cnc	G8V	0,84	14,653	0,115	0,02	72,2
16 Cyg B	G2V	1,69	798,938	1,67	0,67	51,2
47 UMa	G0V	2,54	1089,00	2,09	0,06	49,3
τ Boo	F7V	4,13	3,312	0,05	0,01	471,4
70 Vir	G5V	7,44	116,689	0,48	0,40	315,2

Poznámky: 1. U hvězd 55 Cnc a ν And byla v průběhu dalších let identifikována planetární soustava se čtyřmi, resp. třemi planetami. Z hlediska nebeské mechaniky je dále pozoruhodné, že dvě vnitřní planety u hvězdy 55 Cnc jsou zachyceny v dráhové rezonanci 3 : 1.

2. Hvězda 16 Cyg B je známý fotometrický standard a tzv. sluneční analog, tedy hvězda prakticky totožná svými vlastnostmi s naším Sluncem. Sama je ovšem složkou vizuální dvojhvězdy s oběžnou dobou zhruba 18 000 let s velmi excentrickou dráhou ($e \simeq 0,7$). To je zřejmě příčinou i značně vysoké excentricity u trajektorie nově objevené exoplanety.



Obr. 2. Keckovy dalekohledy na Havajských ostrovech. Disponují 10m zrcadly s adaptivní optikou a vysokodisperzním spektrografem HIRES. Společně mohou pracovat jako interferometr se základnou 85 m. (Foto: W. M. Keck Observatory.)

1.2. Pulsary

Jak bylo řečeno úvodem, první tělesa srovnatelná hmotností s naší Zemí byla překvapivě objevena u pulsaru, tedy rotující neutronové hvězdy. Lze si jen těžko představit, že by tyto planety přežily výbuch supernovy, při které samotný pulsar vzniká. Tyto oběžnice zřejmě vznikly právě z té látky, kterou hvězda odhodila do okolního prostoru.

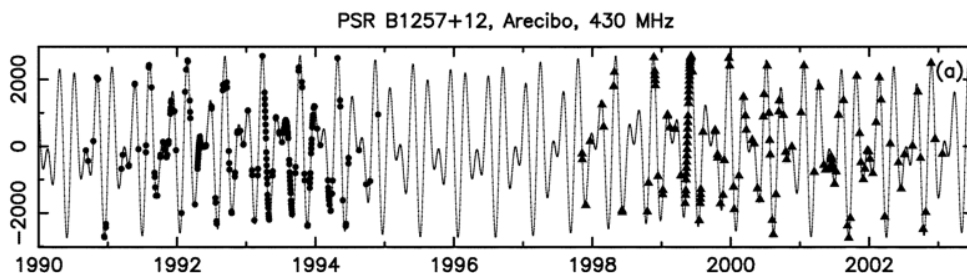
Princip této detekční metody vychází ze známé skutečnosti, že v astronomii dovedeme měřit časové intervaly mnohem přesněji než jiné fyzikální veličiny (např. hmotnost nebo vzdálenost). Pulsar je možné si také představit jako unikátní časový etalon, který vysílá pravidelné pulsy v přesných časových odstupech. Tyto intervaly jsou dány rychlou rotací malé a kompaktní neutronové hvězdy, jejíž rotační periody dosahují i milisekundových hodnot. Změny této periody, tj. střídavé zpoždování a zrychlování záblesků, je možné vysvětlit oběhem pulsaru kolem společného těžiště s neznámou planetou. Tato velmi citlivá metoda tak dokáže odhalit i průvodce, jejichž hmotnosti jsou srovnatelné s hmotností naší Země. Dosud jsou však známy pouze dva případy planetárních systémů u pulsarů a jsou svým způsobem výjimečné.

První planetární systém se podařilo objevit A. Wolszczanovi u milisekundového pulsaru PSR 1257+12 (nalézá se v souhvězdí Panny) pomocí 300m radioteleskopu v Arecibu (Portoriko) v r. 1992 [14]. Svůj objev potvrdil ještě o dva roky později. Podle současných výsledků obíhají kolem tohoto pulsaru nejméně dvě planety o hmotnostech 2,8 a 3,4 M_Z na prakticky kruhových drahách s oběžnou dobou 98,22 dne a 66,54 dne (tedy blízko dráhové rezonance 2 : 3). Sklony drah obou oběžnic k rovině nebeské sféry jsou 53° a 47°, jde tedy prakticky o koplanární soustavu. Další monitorování tohoto pulsaru odhalilo ještě třetí těleso s kratší oběžnou dobou $P = 25,34$ dne a možná i čtvrté těleso s delší periodou 170 let [5]. Na obr. 3 je záznam časových odchylek pulsaru v závislosti na čase. Pro kruhovou dráhu a typický pulsar o hmotnosti 1,35 M_\odot je amplituda časových změn způsobená pohybem obíhající planety dána

$$\tau_p = 1,2 \left(\frac{M_p}{M_Z} \right) \left(\frac{P}{1 \text{ rok}} \right)^{2/3} \text{ ms}, \quad (4)$$

kde P je oběžná doba planety v rocích.

Další exoplaneta byla potvrzena u milisekundového pulsaru PSR 1620–26 v kulové hvězdokupě M4, tedy v další unikátní soustavě. Tento celkově trojný systém obsahuje totiž pulsar o hmotnosti 1,35 M_\odot a bílého trpaslíka (0,34 M_\odot), který obíhá s periodou 191,4 dne. Třetím členem je pak planeta podobná Jupiteru s oběžnou dobou ~ 100 let a hmotností 2,5 M_J [11].



Obr. 3. Časové odchylky pulsaru PSR 1257+12 v období let 1990–2002. Na svislé ose je vyneseno zpoždění, resp. urychlení pulsů v μs . Je zřetelný vliv dvou planet na keplerovských drahách s oběžnou dobou 98 a 67 dní. (The Astrophysical Journal.)

1.3. Fotometrická metoda

Fotometrická metoda je další z nepřímých metod, která je založena na detekci přechodů (tj. transitů) planety přes disk hvězdy. Je tedy výrazně omezena jen na ty případy, kdy sklon dráhy exoplanety je blízký 90° , obr. 4. Podobný vzácný úkaz jsme mohli sledovat v loňském roce v naší sluneční soustavě při přechodu planety Venuše přes



Obr. 4. Zákryt hvězdy planetou. (© Lynette Cook.)

sluneční disk. Pravděpodobnost detekce závisí obecně na geometrii zákrytu, vyšší pravděpodobnost transitů mají především krátkoperiodické planety. Pokles jasnosti je velmi malý, nicméně dobře měřitelný současnými přístroji s citlivými detektory. Pro změnu svítivosti za předpokladu rovnoměrné jasnosti disku hvězdy přibližně platí

$$\frac{\Delta L}{L_*} \simeq \left(\frac{R_p}{R_*} \right)^2, \quad (5)$$

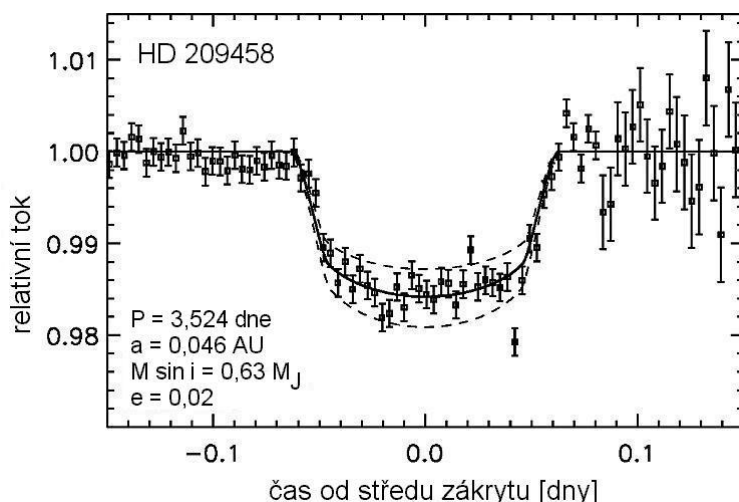
kde L_* je svítivost hvězdy a R_p a R_* jsou poloměry planety a hvězdy. Vzhledem k tomu, že na okrajích disku hvězdy pozorujeme tzv. okrajové ztemnění, které je navíc závislé na vlnové délce pozorovaného záření, je výsledný průběh změn jasnosti trochu složitější. Např. pro vzdáleného pozorovatele je poměr $\Delta L/L_*$ pro Zemi, Mars a Jupiter přecházející přes disk Slunce po řadě $8,4 \cdot 10^{-5}$, $3 \cdot 10^{-5}$ a $1,1 \cdot 10^{-2}$. Doba trvání zákrytu je pak dána vztahem

$$\tau = \frac{P}{\pi} \left(\frac{R_* \cos \delta + R_p}{a} \right), \quad (6)$$

kde δ je nejmenší úhlová vzdálenost planety od středu hvězdného disku a a je hlavní poloosa dráhy planety. Přechod Jupitera by tak vzdálený pozorovatel sledoval 25 hodin, Země by přecházela přes disk Slunce asi 13 hodin.

V r. 2000 se podařilo skupině astronomů vedených Davidem Charbonneau (Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics) zachytit opakovaně velmi slabý pokles jasnosti u hvězdy HD 209458, u které byla již dříve odhalena exoplaneta měřením přesných radiálních rychlostí. K fotometrickému měření použili jen malou Schmidtovu komoru se CCD kamerou. Vzhledem k jasnosti hvězdy (7,65 mag) bylo nutné obraz rozostřit, aby nedošlo k přexponování jednotlivých snímků a tím i znehodnocení fotometrických měření. Změna jasnosti během několika hodin monitorování činila pouhá 2%. Viz obr. 5 podle [4]. Světelná křivka byla analyzována stejným způsobem, jako se řeší světelné křivky zákrytových dvojhvězd. Nejlepší shoda pak byla získána pro poloměr planety $1,27 R_J$ (poloměr Jupitera $R_J \simeq 7 \cdot 10^4$ km) se sklonem oběžné roviny $87,1^\circ$.

Při použití moderní CCD kamery je možné takový pokles jasnosti zachytit i poměrně malým dalekohledem. Proto se do této systematické práce pustili i někteří amatérští pozorovatelé. Seznam vhodných hvězd k detekci zákrytu lze nalézt např. v [10].



Obr. 5. Světelná křivka hvězdy HD 209458. Pokles jasnosti odpovídá přechodu planety přes disk hvězdy. Větší rozptyl bodů ke konci měření je způsoben malou výškou hvězdy nad obzorem. (The Astrophysical Journal.)

Další možností je zaměřit pátrání po exoplanetách fotometrickou metodou na zákrytové dvojhvězdy, tedy systémy, jejichž geometrie již částečně předurčuje sklon dráhy planety blízký 90° a tím i větší pravděpodobnost pozorování transitů. Takto byla fotoelektricky sledována proměnná hvězda CM Dra, jedna z nejmenších zákrytových dvojhvězd s oběžnou dobou 1,28 dne. Tato blízká dvojhvězda se skládá ze dvou prakticky identických hvězd, červených trpaslíků spektrální třídy M4. Její jasnost se během oběžné doby prakticky nemění s výjimkou vlastních hlubokých zákrytů, které trvají několik desítek minut. Výsledky několikaletého monitorování tohoto systému však nebyly přesvědčivé a pravidelné transity hypotetické planety se nepodařilo odhalit. Přítomnost průvodce (třetího tělesa) se neprojevila ani zdánlivými změnami oběžné periody, jako je tomu v případě planet obíhajících kolem pulsarů.

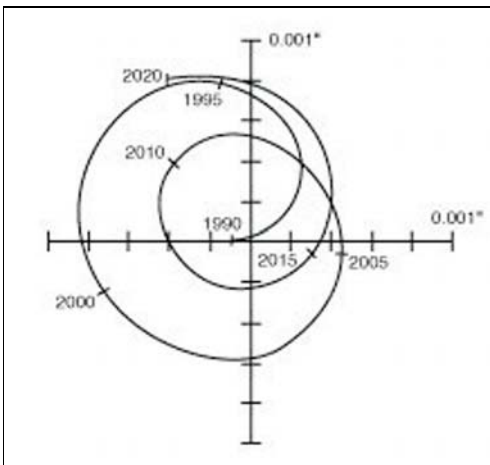
Pozemská fotometrie dosahuje dnes na nejlepších observatořích přesnosti měření až 0,1 % (0,001 mag). Vyšší přesnosti nelze dosáhnout, neboť naše měření jsou ovlivněna změnou atmosférické extinkce a scintilací, tj. stálou proměnností atmosféry vlivem teplotní turbulence vzduchu. Další omezení přesnosti přináší i samotná měřicí aparatura.

1.4. Astrometrie

Princip této metody spočívá v měření velmi malých změn polohy hvězdy na obloze, způsobených oběhem exoplanety, a je jednou z nadějí budoucích kosmických projektů k odhalení většího počtu vzdálených planetárních soustav. Dráha hvězdy kolem společného barycentra soustavy se promítá na oblohu jako malá elipsa s hlavní poloosou α v úhlové míře

$$\alpha = \frac{M_p}{M_*} \frac{a}{d}, \quad (7)$$

kde M_p a M_* jsou hmotnosti planety a hvězdy, d je jejich vzdálenost od Slunce a a hlavní poloosa dráhy planety. Tato metoda je citlivá na relativně dlouhé oběžné doby ($P > 1$ rok). Např. oběh Jupitera vyvolá pro pozorovatele ve vzdálenosti 10 pc pravidelný pohyb Slunce s amplitudou $500 \mu\text{as}$, oběh Země pak způsobí odchylky pouhé $0,3 \mu\text{as}$ ($1 \mu\text{as} = 0,000\,001''$), viz obr. 6. Hledání exoplanet touto metodou zatím příliš úspěšné nebylo. Tak malé úhly lze spolehlivě měřit jen z oběžné dráhy a bude proto použita v některém z budoucích kosmických projektů.



Obr. 6. Změna polohy Slunce mezi hvězdami způsobená přítomností Jupitera a ostatních planet, jak ji uvidí pozorovatel ze vzdálenosti 10 pc. (JPL/NASA.)

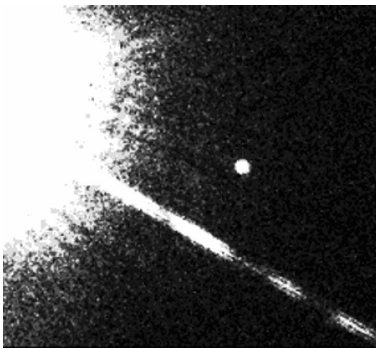
1.5. Přímé zobrazení

Přímé zobrazení je jediná přímá metoda detekce exoplanety. Je však třeba říci, že tato metoda nebyla zatím v odhalení nových planet příliš úspěšná. Naráží na dva závažné problémy. Je třeba rozlišit velmi malou úhlovou vzdálenost, ve které planeta kolem

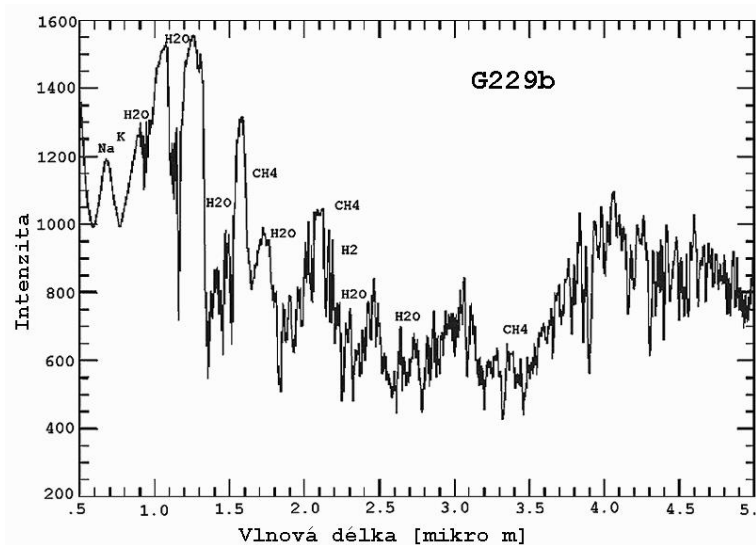
materšské hvězdy obíhá, a současně se musí vypořádat s velkým rozdílem jasností obou těles, protože planeta pouze odráží záření materšské hvězdy. Poměr jasnosti planety a hvězdy je dán zejména poloměrem planety R_p a její vzdáleností od hvězdy

$$\frac{L_p}{L_*} = p(\lambda, \alpha) \left(\frac{R_p}{a} \right)^2, \quad (8)$$

kde $p(\lambda, \alpha)$ je tzv. fázová funkce, popisující geometrii odrazu a vlastnosti rozptylu v atmosféře planety. Poměr L_p/L_* je velmi malý, pro planetu podobnou Jupiteru v maximální elongaci dosahuje řádově 10^{-9} . Planeta v úhlové vzdálenosti 1 as od hvězdy (např. Jupiter pozorovaný z 5 pc) bude ovlivněna difrakčním profilem objektivu ($\lambda/D \simeq 0,02$ as pro vlnovou délku 500 nm a 5m teleskop) a zcela pohlcena turbulentní změnou refrakce v atmosféře (tzv. seeing, řádově 1 as).



Obr. 7. Snímek z Hubblova dalekohledu. Velmi jasný objekt je blízká trpasličí hvězda G229, slabý průvodce G229b vpravo je hnědý trpaslík o hmotnosti zhruba $40 M_J$. (Foto: NASA/HST.)



Obr. 8. Spektrum průvodce G229b v infračervené oblasti. Označeny jsou pásy molekul H_2O a CH_4 . (United Kingdom Infrared Telescope.)

Jak takový kontrast vypadá, si můžeme dobře představit podle snímku okolí blízké hvězdy Gliese 229. Hubblův dalekohled zde v r. 1995 identifikoval jako slabého průvodce hnědého trpaslíka, viz obr. 7. Jeho hmotnost se odhaduje na 0,025 až 0,065 M_{\odot} , průměr okolo 1 R_J , s povrchovou teplotou okolo 1000 K. V jeho spektru však byly identifikovány některé důležité molekuly, např. voda a metan, které bychom rádi našli i ve spektrech exoplanet, viz též obr. 8.

1.6. Gravitační mikročocky

Gravitační mikročocky jsou poslední efektivní metodou detekce, o které se zde stručně zmíníme. Připomeňme, že gravitační čocky předpověděl A. Einstein v r. 1936. Méně je známo, že v tomto roce zveřejnil stejný nápad i český astronom F. Link¹⁾. Při tomto jevu dochází k zesílení záření vzdáleného tělesa jiným mezilehlým hmotným objektem. K zesílení dochází ohybem světla v gravitačním poli. Pozorovatel na Zemi, „čocka“ i objekt musí ležet prakticky v jedné přímce. Poprvé byl tento úkaz pozorován v r. 1979 Walshem u kvasaru 0957+561, který zobrazil vzdálenou neznámou galaxii ve tvaru deformovaných prstenců. Termín gravitační mikročocka pochází od B. Paczynského a je určen pro tento jev v případě, kdy nejsme schopni tyto obrazce rozlišit, tedy v případě bodových objektů. Tento jev je charakterizován poloměrem Einsteinova prstence

$$R_E = \left[\frac{4GM_L}{c^2} \frac{(D_S - D_L)D_L}{D_S} \right]^{1/2}, \quad (9)$$

kde M_L je hmotnost tělesa tvořícího čocku, D_L a D_S jsou vzdálenosti k čocke a vzdálenému objektu (srovnej se Schwarzschildovým gravitačním poloměrem $r_g = 2GM_L/c^2$).

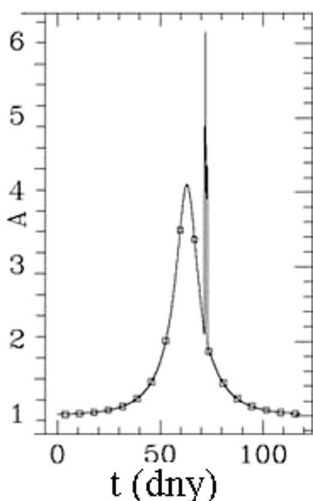
V případě, že hvězda má svého planetárního průvodce, můžeme v průběhu zesílení obrazu vzdálené hvězdy pozorovat ještě dodatečné zesílení touto planetou. I zde je ovšem pozorovatel odkázán na náhodu, kdy se dvě různě vzdálené hvězdy dostanou do přesného geometrického zákrytu. Je proto zřejmé, že k monitorování mikročocěk si astronomové vybrali velmi hustá hvězdná pole, jako je např. centrum naší Galaxie nebo Velké a Malé Magellanovo mračno, dvě blízké a nepravidelné satelitní galaxie na jižní obloze. Pro typickou tangenciální rychlost hvězdy $v_t = 200$ km/s je doba, po kterou sledujeme zesílení gravitační čockou, dána vztahem

$$t_E = 69,9 \left(\frac{M_L}{M_S} \right)^{1/2} \left(\frac{D_S}{8 \text{ kpc}} \right)^{1/2} [(1-d)d]^{1/2} \text{ dne}, \quad (10)$$

kde $d = D_L/D_S$. Jedinou nevýhodou této metody je, že určitý systém nelze sledovat systematicky, a je navíc velmi nepravděpodobné, že by u jednoho systému s planetou došlo v krátké době opětovně k efektu mikročocky. Výhodou je však vysoká citlivost i na planety s malou hmotností.

¹⁾ FRANTIŠEK LINK (1906–1984), zakladatel a pozdější ředitel observatoře v Ondřejově, zabýval se sluneční fyzikou a meziplanetární hmotou; *Sur les consequences photometriques de la deviation d'Einstein*, C. R. Acad. Sci., 1936 Paris, 207, 219.

Od r. 1993, kdy se rozběhly největší pozorovací programy k sledování gravitačních mikročoček, přibývá objektů s magickými názvy EROS (*Expérience de Recherche d'Objets Sombres*), MACHO (*MAssive Compact Halo Objects*), MOA (*Microensing Observations in Astrophysics*), MPS (*Microensing Planet Search Project*), OGLE (*Optical Gravitational Lensing Experiment*), PLANET (*Probing Lensing Anomalies NETwork*), které představují všechny důležité pozorovatelské projekty uplynulých deseti let, z nichž některé se výzkumem gravitačních čoček zabývají dodnes. Většina z nich měří na jižní polokouli a soustřeďuje se na již zmíněné oblasti s vysokou hustotou hvězd.



Obr. 9. Gravitační mikročočka. Dodatečné zjasnění vzdáleného objektu je způsobeno přítomností planety u mezilehlé hvězdy.

2. Vlastnosti

Většina dosud objevených extrasolárních planet má nečekaně málo společného s planetami naší sluneční soustavy. Jak bylo řečeno v úvodu, nejvíce překvapivé jsou vysoké excentricity, blízké dráhy a poměrně vysoké hmotnosti. Tato tělesa jsou proto v astronomické hantýrce často přezdívána „horcí Jupiteri“.

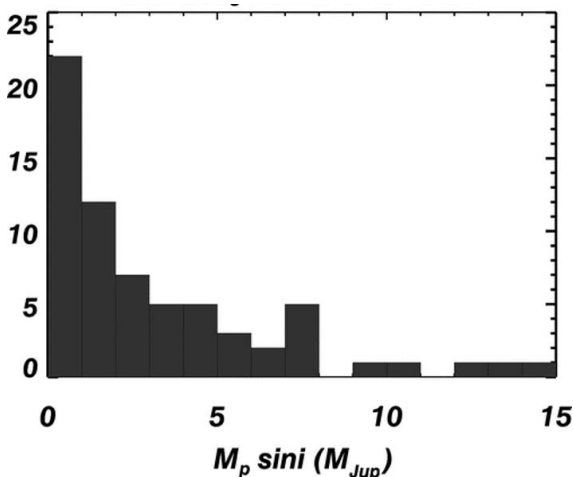
2.1. Oběžné doby

Nalezené periody všech exoplanet leží zatím v rozmezí 1,2 až 5360 dní. Tomu odpovídají hlavní poloosy v intervalu 0,0225 až 5,9 AU. Jedna třetina všech objevených těles však obíhá svou mateřskou hvězdu blíže než Merkur, což je jeden z nejzajímavějších problémů, který se objevil hned po detekci prvních exoplanet. Už sama první planeta u hvězdy 51 Peg je právě takový případ: oběžná doba 4,2 dne odpovídá střední vzdálenosti pouhých 0,05 AU, tedy mnohem méně, než je velká poloosa dráhy Merkuru (0,378 AU).

Nové teoretické výsledky ukazují, že tato tělesa nemohla vzniknout v tak malé vzdálenosti od mateřské hvězdy. Byl proto navržen vhodný mechanismus, který původně vzdálené planety dostane do takové blízkosti k centrální hvězdě. Tím by měla být gravitační interakce planety s akrečním diskem nebo i s okolními planetami. Podle současných modelů jsou však doby planetární migrace v disku směrem do centra poměrně krátké a je naopak potřeba tento proces včas zastavit nebo alespoň výrazně zpomalit. Ze současné statistiky však zcela jasně vyplývá, že zatím nebyly objeveny planety s oběžnou dobou kratší než 3 dny. Tento výsledek je překvapivý, protože např. u dvojhvězd nacházíme množství soustav s kratší oběžnou dobou. Z toho tedy vyplývá, že u planet musí existovat nějaký proces, který planetu zastaví právě v této vzdálenosti. Svoji roli zde může hrát magnetické pole akrečního disku, slapové působení mateřské hvězdy nebo přenos hmoty z mladé obří planety na hvězdu, který má za následek prodloužení oběžné doby.

2.2. Hmotnosti

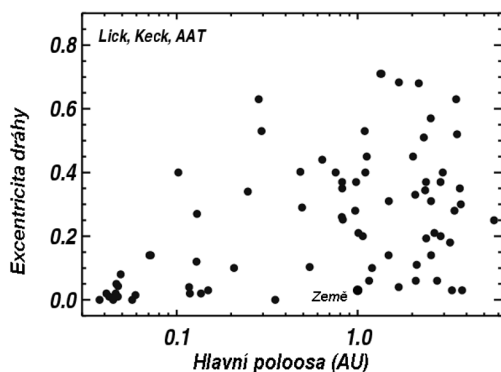
Další důležitá informace vyplývá z rozdělení hmotností nových planetárních průvodců. Obr. 10 ukazuje, že rozložení hmotností není homogenní a v intervalu 30 až $50 M_J$ nenalzáme prakticky žádná tělesa. Tato mezera, nazývaná často „pustina hnědých trpaslíků“ (*brown dwarf desert*) odděluje tělesa o hmotnostech planet od jejich hvězdných protějšků a říká něco o fyzikálních procesech, které probíhají při vzniku těchto dvou populací: hvězd, které vznikají gravitačním kolapsem a fragmentací oblaku plynu a prachu, a planet, které vznikají v cirkumstelárním akrečním disku. Detailní pohled na rozdělení hmotností známých exoplanet ukazuje, že počet známých těles klesá s rostoucí hmotností a končí u hodnoty $10 M_J$. Tento výsledek není důsledkem nejistoty ve sklonu dráhy (u objevů spektroskopickou metodou sklon přesně neznáme), ale je zřejmě reálná horní hranice hmotností všech objevených planet.



Obr. 10. Rozdělení hmotností exoplanet. (Lick & Keck Observatory.)

2.3. Excentrické dráhy

Téměř polovina celého souboru všech exoplanet má výrazně excentrickou trajektorii s $e > 0,3$. To je jedna z největších záhad souvisejících s nově objevovanými planetami. Podle dosavadních teorií i modelů by nové planety měly vznikat v plochem akrečním disku na téměř kruhových drahách. U objevených planet však najdeme trajektorie s excentricitou až 0,9, např. u planety obíhající hvězdu HD 80606. S takovými excentricitami se v naší sluneční soustavě setkáváme jen u komet a některých výjimečných asteroidů. Na obr. 11 je znázorněno rozdělení excentricity planetárních drah v závislosti na oběžné době. Odtud je zřejmé, že krátkoperiodické planety pozorujeme na téměř kruhových drahách důsledkem slapového působení, které excentricitu dráhy rychle snižuje. Dráhy ostatních planet s delší oběžnou dobou mají excentricity v širokém intervalu všech přípustných hodnot. Zvýšení excentricity je možné vysvětlit např. vzájemnou interakcí planet ve vícenásobném planetárním systému, současnou migrací více planet do středu soustavy nebo vlivem ne příliš vzdáleného hvězdného průvodce.



Obr. 11. Excentricity planetárních trajektorií v závislosti na hlavní poloose. (Lick & Keck Observatory.)

Ačkoliv máme na seznamu nyní okolo 150 exoplanet, pouze dva planetární průvodci byli objeveni u trpasličí hvězdy spektrálního typu M (oba u systému Gl 876). Tento fakt může být přímým důsledkem výběrového efektu daným pozorovacími možnostmi. Hvězdy tohoto typu jsou velmi slabé a je obtížné změřit přesně jejich radiální rychlost. Vzhledem k tomu, že trpasličí hvězdy typu M představují v naší Galaxii téměř 80 % všech hvězd hlavní posloupnosti, je pochopitelná snaha astronomů získat lepší přehled o této skupině objektů.

3. Kosmické projekty

Výzkum a objevy nových exoplanet, které v současnosti probíhají především z pozemských observatoří, by měly být v dohledné době doplněny několika kosmickými experimenty, které podstatně rozšíří soubor studovaných těles. Dále uvádíme přehled plánovaných misí NASA a ESA, který vzhledem k termínům plánovaných misí nebude úplný.

3.1. COROT



Obr. 12. Družice COROT. (Foto: CNES.)

Jedním z prvním projektů, který by měl podstatně rozšířit počet známých exoplanet, je projekt COROT²⁾ (*Convection Rotation and planetary Transits*) Francouzské kosmické agentury ve spolupráci s ESA a dalšími evropskými státy. Jeho cílem je především detekce planet srovnatelných s velikostí Země. Pomocí dalekohledu o průměru 30 cm by měl COROT fotometrickou metodou monitorovat hvězdy v okolí Slunce. Družice COROT bude obíhat po kruhové polární dráze ve výšce 826 km, umožňující spojitě pozorování dvou vybraných oblastí na obloze (okolí centra Galaxie a opačný směr) po dobu nejméně 150 dní v roce. Očekává se objev několika stovek nových exoplanet, mezi nimi desítky planet zemského typu. Start tohoto projektu je plánován již na červen 2006 a operační fáze by měla trvat 2,5 roku.

3.2. Kepler



Obr. 13. Dalekohled Kepler. (Foto: NASA.)

Projekt Kepler³⁾ je kosmickým projektem NASA v rámci programu Discovery zaměřeným především na detekci planet zemského typu. Fotometrickou metodou budou opět měřeny všechny hvězdy podobné Slunci s vizuální hvězdnou velikostí do 12 mag. Jako cíl bylo zvoleno poměrně velké hvězdné pole v souhvězdí Labutě a Lvy, které bude monitorovat soustava celkem 21 čtvercových CCD detektorů. Každý pokrývá na obloze zhruba 5 čtverečních stupňů, přičemž detektory jsou nastaveny tak, aby nejjasnější hvězdy pole ($m \simeq 4$ až 5 mag) zůstaly v mezerách. U zachycených transitů bude sledováno jejich opakování,

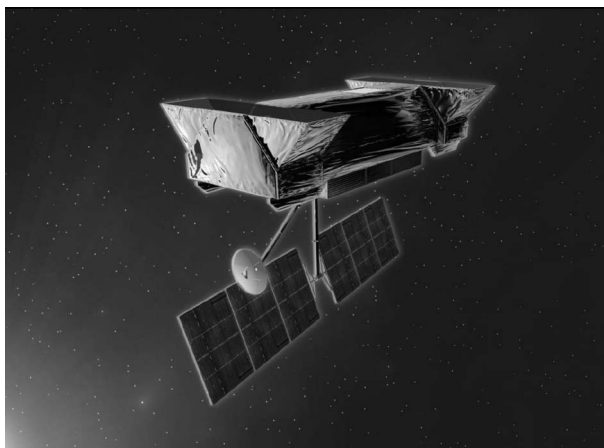
²⁾ <http://www.esa.int/science/corot>

³⁾ <http://www.kepler.arc.nasa.gov/>

případně zjištěna oběžná doba, hloubka poklesu a doba trvání, které umožní získat poměrně přesné údaje o poloměrech exoplanet. Dalekohled bude vynesena na heliocentrickou, téměř kruhovou dráhu sledující Zemi s oběžnou dobou 372,5 dne. Start satelitu se předpokládá v říjnu 2007, operační fáze by měla trvat nejméně 4 roky.

3.3. SIM

SIM — *Space Interferometry Mission*⁴⁾ je další projekt americké NASA. Jde vlastně o klasický Michelsonův interferometr se základnou délky 10 m, který bude pracovat převážně v optické oblasti 400 až 900 nm. Tento přístroj bude umístěn ve sluneční soustavě na heliocentrické dráze sledující Zemi. Přesnost určení polohy by měla teoreticky dosáhnout až $0,000\,001''$, tj. $1\,\mu\text{s}$. Vlastní pohyby hvězd tak budou získány s vynikající přesností $2\,\mu\text{s}/\text{rok}$, tj. tangenciální rychlost hvězd by měla být určena s chybou $\pm 10\text{ m/s}$ na vzdálenost 1 kpc. Start je plánován na r. 2010 a předpokládá se, že operační fáze bude trvat celkem 5 let.



Obr. 14. Snímek kosmického interferometru SIM. (Foto: NASA.)

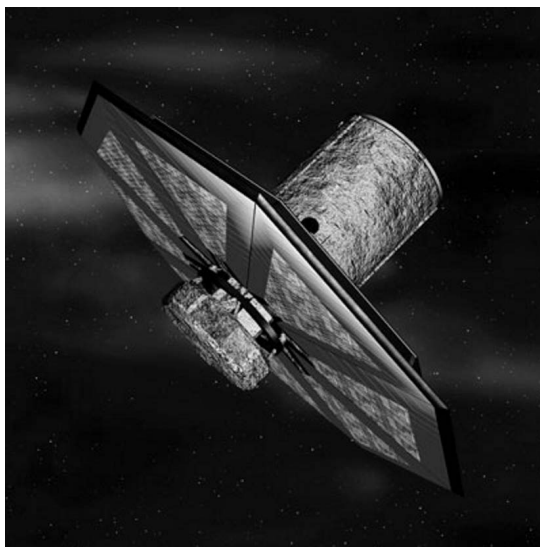
3.4. Darwin

Projekt Darwin⁵⁾ Evropské kosmické agentury má jako hlavní cíl detekovat obyvatelné planety podobné Zemi a analyzovat jejich atmosféry z hlediska přítomnosti molekul provádějících projevy života na povrchu především v infračervené oblasti spektra (6 až $18\,\mu\text{m}$). Půjde o flotilu celkem osmi družic, z nichž šest by představovalo kosmické teleskopy umístěné ve vrcholech pravidelného šestiúhelníku, sedmá družice by sbírala jejich signál, osmý satelit by zajišťoval komunikaci se Zemí. Celá soustava by se nacházela daleko za Měsícem ve vzdálenosti zhruba 1,5 mil. km v Lagrangeově bodě L_2

⁴⁾ <http://planetquest.jpl.nasa.gov/SIM/>

⁵⁾ <http://ast.star.rl.ac.uk/darwin/>

soustavy Slunce–Země. Start této mise je plánován až na r. 2014. Projekt Darwin je tak dalším z budoucích kosmických projektů, který využívá relativní stability Lagrangeova bodu L_2 , kde by měly být zanedlouho umístěny i další přístroje unikátních projektů Planck (start 2007), Herschel (2007), James Webb Space Telescope (2011) a GAIA (2011).



Obr. 15. Jeden ze šesti teleskopů soustavy Darwin. (Foto: ESA.)

3.5. FAME

Projekt FAME⁶⁾ (*Full-sky Astrometric Mapping Explorer*) je projektem americké U. S. Naval Observatory a několika dalších ústavů. Jeho cílem je stanovit velmi přesné polohy, vzdálenosti, vlastní pohyby a jasnosti zhruba 40 milionů hvězd v našem galaktickém okolí. Deklarovaná přesnost měření by měla dosahovat $50 \mu\text{as}$. V průběhu pěti let by měla tato družice pokrýt celou oblohu stejným způsobem jako dřívější velmi úspěšný astrometrický satelit Hipparcos. Termín vypuštění družice FAME nebyl dosud stanoven.

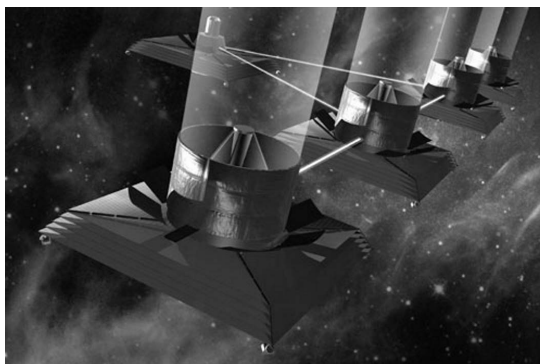
3.6. TPF

Projekt TPF⁷⁾ (*Terrestrial Planet Finder*) je posledním z projektů NASA, o kterém se zde stručně zmíníme. Jeho cílem bude přehlídka blízkých hvězd a hledání tzv. obyvatelných oblastí (angl. *habitable zones*), tedy míst vhodných pro vznik a vývoj života. Jde o zhruba 150 hvězd do vzdálenosti 15 pc, u kterých by měly být odhaleny

⁶⁾ <http://www.usno.navy.mil/FAME/>

⁷⁾ <http://planetquest.jpl.nasa.gov/TPF/>

planety velikosti Země. Projekt je složen ze dvou doplňujících se částí: koronografu pro vizuální záření a interferometru v infračervené oblasti. Start koronografu je plánován na r. 2014, interferometru až kolem r. 2020.



Obr. 16. Interferometrická soustava TPF. (Foto: NASA/JPL.)

Závěr

Extrasolární planety patří bezesporu k aktuálním tématům současné astrofyziky. Jejich podrobné studium je ale na samém počátku. Po deseti letech můžeme jen s jistotou říci, že nejméně 5 % hvězd podobných našemu Slunci má blízké obří planetární průvodce s krátkou oběžnou dobou (~ 3 roky). V nejbližších letech pak můžeme očekávat stovky nových planet, které rozšíří soubor těchto těles a vylepší jejich statistické studie. Mnoho dalších problémů stále čeká na svá řešení. Spektroskopická měření jistě odhalí i taková tělesa, která jsou svými vlastnostmi vhodná pro vznik a udržení života, odhalí přítomnost atmosféry a jejího složení, zejména některých pro život důležitých molekul (H_2O , O_2 , O_3 , CO_2 , CH_4).

Pokusme se v této souvislosti ještě závěrem shrnout základní vlastnosti, které by z hlediska vzniku a existence možného života na povrchu měla mít každá obyvatelná planeta. Podle americké astronomky Virginie Trimblové [12], která je známa např. svými každoročními přehledy zásadních objevů v oblasti astrofyziky, musí takové planetární těleso splňovat následující podmínky. Jejich výčet nemusí být ovšem úplný a navíc je do značné míry diskutabilní.

- Pevný povrch a tedy hmotnost planety nepřevyšující příliš hmotnost Země.
- Voda na povrchu v tekutém stavu, tj. teploty zhruba v rozmezí 273 až 373 K po většinu roku (resp. oběžné doby planety).
- Hmotný průvodce — satelit, který stabilizuje rotační osu planety.
- Magnetické pole, které ochrání před kosmickým zářením (Van Allenovy pásy).
- Slapové jevy, které pravidelně zásobují místa vzniku životně důležitých molekul.

- Vnější hmotné planety, které včas odstraní zbytky po vzniku planetární soustavy a chrání tak vnitřní planety před intenzivním bombardováním malými planetkami nebo kometárními jádry.
- Atmosféra obsahující potřebné molekuly a chránící před dopady menších těles.
- Desková tektonika, která zaručí rovnováhu kontinentů a oceánu a umožní vznik fosilních paliv.

Poděkování. Tato práce vznikla za podpory grantového projektu GAČR č. 205/04/2063.

L i t e r a t u r a

- [1] BOSS, A. P.: <http://www.ciw.edu/boss/IAU/div3/wgesp/>
- [2] *California & Carnegie Planet Search.* <http://exoplanets.org/>
- [3] *Extrasolar Vissions.* <http://www.extrasolar.net/>
- [4] CHARBONNEAU, D., BROWN, T. M., LATHAM, D. W., MAYOR, M.: *Detection of planetary transits across a sun-like star.* *Astrophysical J.* 529 (2000), L45–L48.
- [5] KONACKI, M., WOLSCZCAN, A.: *Masses and Orbital Inclinations of Planets in the PSR B1257+12 System.* *Astrophysical J.* 591 (2003), L147.
- [6] MAYOR, M., QUELOZ, D.: *A Jupiter-mass companion to a solar-type star.* *Nature* 378 (1995), 355–359.
- [7] PERRYMAN, M. A. C.: *Extra-solar planets.* *Rep. Prog. Phys.* 63 (2000), 1209–1272.
- [8] SANTOS, N. C., MAYOR, M., QUELOZ, D., UDRY, S.: *Extra-Solar Planets.* *Messenger* 110 (2002), 32–38.
- [9] SCHNEIDER, J.: *The Extrasolar Planets Encyclopaedia* (1996).
<http://www.obspm.fr/encycl/encycl.html>
- [10] *Transitsearch.* <http://transitsearch.org/>
- [11] THROSETT, S. E., ARZOUMANIAN, Z., CAMILO, F., LYNE, A. G.: *Astrophysical J.* 523 (1999), 763.
- [12] TRIMBLE, V.: *Extra-solar system planets: searches, discoveries and characteristics.* *Bull. Astr. Soc. India* 32 (2004), 87–98.
- [13] WOLSCZCAN, A.: *Confirmation of Earth-Mass Planets Orbiting the Millisecond Pulsar PSR B1257+12.* *Science* 264 (1994), 538.
- [14] WOLSCZCAN, A., FRAIL, D. A.: *A planetary system around millisecond pulsar PSR 1257+12.* *Nature* 355 (1992), 145–147.