

## PLANÉTY MIMO SLNEČNEJ SÚSTAVY - EXTRASOLÁRNE PLANÉTY

*RNDr. Theodor Pribulla, CSc.*

*pribulla@ta3.sk*

*Astronomický ústav SAV, 059 60 Tatranská Lomnica*

### Úvod

Možná existencia iných planetárnych sústav nadchýna ľudstvo už oddávna. Už od stredoveku sa učitelia zaoberali otázkami: Existujú iné planetárne sústavy? Sú vo Vesmíre ďalšie Zemi podobné planéty? Existuje život v ďalších planetárnych sústavách? Je niekde vo Vesmíre inteligentný život? Ešte pred nedávnom boli extrasolárne planéty SCI-FI a nepoznali sme odpoveď na žiadnu z horeuvedených otázok. Hoci je pravdepodobné, že planetárne sústavy sú v našej Galaxii pomerne bežným zjavom, ich detekcia si vyžiadala značné úsilie a aj rozvoj pozorovacej techniky. Tento fakt je dôsledkom obrovského rozdielu medzi jasnosťami hviezd a planét, ktoré sa strácajú v jase materských hviezd. Hoci dnes je známych takmer 250 extrasolárnych planét, o ich podstate a vzniku vieme len málo. Extrasolárne planéty je zvyčajne možné detegovať len nepriamymi metódami pozorovaním materskej hviezdy. Potrvá ešte mnoho rokov kým budeme schopní detegovať a študovať objekty podobné Zemi. Poďme ale po poriadku!

### Od špekulácií k prvým objavom

Objavu prvých extrasolárnych planét predchádzalo niekoľko neúspešných pokusov. Už v roku 1855 boli zdanlivé odchýlky pohybu vizuálnej dvojhviezdy 70 Oph považované za dôsledok obehu planéty. V 50-tych a 60-tych rokoch minulého storočia sa zdalo, že Barnardova hviezda má planetárneho spoločníka. Až v roku 1988 merania radiálnej rýchlosti gamma Cep ukázali zmeny, ktoré by mohli byť vyvolané prítomnosťou hmotnej planéty. Samotní autori však zostali skeptickí vzhľadom na to, že detekcia bola na hranici pozorovacích možností vtedajšej techniky. Prítomnosť extrasolárnej planéty v gamma Cep však bola v roku 2003 potvrdená. Prvý, v krátkom čase potvrdený objav, ohlásili A. Wolszczan a D. Frail začiatkom roka 1992. Na základe analýzy pulzov 6,3 milisekundového pulzaru PSR 1257+12, boli detegované dve extrasolárne planéty; neskôr bola v tejto sústave nájdená tretia planéta. Existencia planét v takejto bizarnej sústave okamžite vyvolala otázku ich formácie: jedná sa o zvyšky obrích planét po výbuchu supernovy alebo tieto planéty vznikli až po ňom? Objav prvej extrasolárnej planéty okolo normálnej hviezdy, 51 Pegasi, bol ohlásený 6. októbra 1995 M. Mayorom a D. Quelozom zo Ženevskej univerzity. Planéta bola detegovaná na základe vysokopresných meraní radiálnych rýchlostí. Týmto objavom sa začína nová éra výskumu extrasolárnych planét. K dnešnému dňu (3. október 2007) bolo nájdených 240 extrasolárnych planét, 20 planetárnych sústav a 2 pulzary okolo ktorých sú planéty. Popred disk materskej hviezdy 19 planét prechádza (obr. 1).

### Metódy detekcie

Hľadanie a štúdium extrasolárnych planét je skomplikované obrovským rozdielom jasností materskej hviezdy a planéty. Vo vizuálnej oblasti je pomer ich jasností až  $10^9$ . Všetko je ešte komplikované malou uhlovou vzdialenosťou medzi planétou a materskou hviezdou, a preto planéta úplne zaniká v žiare hviezdy. Samotné planéty je preto možné pozorovať len

výnimočne (napr. pri trpasličích hviezdach) a väčšinu informácií získavame len z materskej hviezdy.

Najrozšírenejšou a najefektívnejšou metódou sa ukázali byť presné merania radiálnych rýchlostí, čiže rýchlostí v smere zorného lúča k pozorovateľovi. Ak planéta obieha okolo hviezdy, aj hviezda obieha okolo planéty. Relatívna rýchlosť a veľkosť dráhy hviezdy je samozrejme veľmi malá vzhľadom na pomer hmotností. Pohyb hviezdy okolo spoločného ťažiska spôsobí posun spektrálnych čiar v spektre hviezdy vďaka Dopplerovmu javu. Aby sme dokázali detegovať pohyb materskej hviezdy vyvolaný obehom planét, potrebujeme dosiahnuť presnosť 1 - 10 m/s. Takúto presnosť je možné dosiahnuť len na špeciálne upravených vysokodisperzných spektrografoch, kde kalibrácia vlnových dĺžok prebieha napríklad využitím jódovej bunky. Požadovaná presnosť merania radiálnych rýchlostí vyžaduje vysokú mechanickú stabilitu spektrografu. Typické amplitúdy zmien radiálnych rýchlostí dosahujú zvyčajne len 1/100 - 1/1000 pixelu na čípe. Preto je nevyhnutné zabezpečiť vysokú tepelnú stabilitu spektrografu resp. umiestniť ho do vákua. Rozloženie svetla hviezdy na spektrum s vysokou disperziou však vyžaduje pri požiadavke rozumného pomeru signál/šum dostatočne veľký d'alekohľad. V súčasnosti program hľadania extrasolárnych planét presnými radiálnymi rýchlosťami prebieha napr. na 1,93 m d'alekohľade observatória na Haute Provence, ale aj na najväčších d'alekohľadoch sveta ako je Keckov d'alekohľad s priemerom 10 m. Najvyššiu presnosť merania radiálnych rýchlostí (0,9 m/s) dosahuje dnes spektrograf HARPS na 3,6 m d'alekohľade v Chile (Európske južné observatórium). Analýzou zmeraných radiálnych rýchlostí môžeme určiť dráhu hviezdy okolo spoločného ťažiska s planétou. Zvyčajne je možné určiť obežnú dobu planéty, výstrednosť dráhy, ako aj ďalšie elementy dráhy. Keďže zo samotných radiálnych rýchlostí nemôžeme určiť sklon dráhy voči rovine oblohy, pri známej hmotnosti hviezdy je možné vypočítať len minimálnu hmotnosť planéty. Tak sa medzi planéty môžu dostať málo hmotné hviezdy alebo hnedí trpaslíci. Chýbajúci sklon dráhy je možné určiť z astrometrických (čiže pozičných) meraní alebo v prípade, že planéta prechádza popred disk materskej hviezdy.

Extrasolárne planéty je možné detegovať aj prípade, že prechádzajú popred disk materskej hviezdy. Takéto prechody však nastávajú len v prípade, ak rovina dráhy hviezdy je takmer presne kolmá na rovinu oblohy. Šanca pozorovať prechod planéty popred disk hviezdy je mimoriadne malá, a preto je potrebné dlhodobo sledovať súčasne niekoľko desiatok tisíc hviezd (zo Zeme zriedkavo pozorujeme prechod Merkúra a Venuše popred slnečný disk). Samotný prechod planéty popred disk hviezdy sa prejaví malým poklesom jasnosti trvajúcim niekoľko hodín. Pri planétach doteraz nájdených touto metódou pozorujeme pokles jasnosti zhruba o 0.01 magnitúdy (obr. 2). To si vyžaduje veľmi presné meranie jasnosti hviezd, čiže fotometriu. Aby bola reálna šanca takto objaviť planétu, je potrebný d'alekohľad s veľkým zorným poľom a veľkým CCD čípom. Pri súčasnom sledovaní desiatok tisíc hviezd sú nevyhnutné efektívne algoritmy na vyhľadávanie poklesov jasnosti. Existenciu planéty je však potrebné potvrdiť spektroskopickými pozorovaniami. Keďže meranie jasnosti hviezd je rušené turbulenciou v zemskej atmosfére, značne vyššiu presnosť nevyhnutnú na analýzu priebehu prechodov je možné získať pozorovaním z družíc, napr. Hubbleov kozmický d'alekohľad, COROT alebo kanadská družica MOST. Z intervalu medzi nasledujúcimi zákrytmi môžeme určiť obežnú dobu planéty; z priebehu poklesu jasnosti je možné zistiť polomer planéty (voči polomeru hviezdy) ako aj sklon dráhy. V kombinácii so spektroskopickými pozorovaniami je tak možné zistiť aj hmotnosť a hustotu planéty. Detekcia na základe prechodov predpokladá, že jasnosť materskej hviezdy je dostatočne stabilná. Zmeny jasnosti aktívnych hviezd (napr. spôsobené výskytom škvŕn) sú limitujúce pre detekciu planét zemskeho typu. Po zvýšení fotometrickej presnosti (napr. pri pozorovaní z kozmu) by sľubnou metódou mohla byť aj detekcia fázových zmien jasnosti planét pri obehu okolo materskej hviezdy. Zatiaľ sa podarilo Spitzerovým kozmickým d'alekohľadom detegovať fázové zmeny jasnosti v d'alekej infračervenej oblasti (24 mikrometrov) spôsobené obehom planéty okolo materskej hviezdy pri Upsilon And.

Ďalšie dve metódy, ktoré doteraz priniesli výsledky, sú založené na konečnej rýchlosti svetla a ohybe svetla okolo hmotných telies. Ak materská hviezda vysiela presný časový signál (pulzar, zakryty v zakrytovej dvojhviezde, maximá jasnosti pulzujúcej hviezdy) a pozorujeme periodické predbiehanie alebo meškanie tohto signálu, znamená to, že v sústave existuje ďalšie teleso, ktoré hýbe pozorovaným objektom v smere zorného lúča. Takto vyvolané rozdiely vzdialenosti sa prejavia vďaka konečnej rýchlosti svetla. Presné pozorovania okamihov pulzov pulzaru PSR 1257+12 viedli k detekcii troch extrasolárnych planét. Metóda je citlivá na planéty s dlhými obežnými dobami aj s veľmi malými hmotnosťami. Zaujímavá je metóda detekcie extrasolárnych planét na základe gravitačných mikrošošoviek. Podľa všeobecnej teórie relativity sa svetelné lúče zakrivujú okolo hmotných telies. Ak medzi pozorovateľom a hviezdou sa nachádza ďalšia hviezda alebo hmotný objekt, gravitačné pole tohto objektu zakriví svetlo hviezdy ako šošovka. Pozorujeme kruhový obraz vzdialeného objektu (Einsteinov prstenec). Pritom dôjde k zvýšeniu jasnosti vzdialenej hviezdy. Jav mikrošošovky je dosť zriedkavý, keďže objekty musia ležať na jednej priamke s vysokou presnosťou. V prípade, že hviezdu-hmotný objekt obieha planéta, ktorá takisto pretne spojnicu pozorovateľ-vzdialená hviezda nastane krátkodobé zosilnenie jasnosti. Presne takéto zjasnenie bolo pozorované v rámci projektu OGLE (The Optical Gravitational Lensing Experiment) v roku 2003. Nevýhodou efektu gravitačných mikrošošoviek je, že zosilnenie jasnosti danej hviezdy skúmanou planetárnou sústavou sa dá pozorovať len raz a zjasnenie zodpovedajúce planéte trvá len niekoľko hodín. Z priebehu zmien jasnosti je však možné určiť pomer hmotnosti planéty a hviezdy ako aj projekciu skutočnej vzdialenosti medzi nimi. Na rozdiel od ostatných metód je táto citlivá aj na planéty zemského typu.

V prípade, že uhlová vzdialenosť planéty a materskej hviezdy je dostatočne veľká (napr. 0,1") a pomer jasností nie je veľmi veľký, je možné pozorovať planétu priamo. Takto boli nájdené planéty v okolí trpasličích hviezd GQ Lup alebo AB Pic. Aby bola šanca detekcie planét typu Jupitera, je nevyhnutné pozorovať v infračervenej oblasti (kde je menší kontrast medzi jasnosťou planéty a hviezdy). Je takisto potrebné dosiahnuť vysoké uhlové rozlíšenie. To je možné pozorovaním z družíc (napr. HST) alebo využitím tzv. adaptívnej optiky, ktorá umožňuje eliminovať rozostrenie obrazu hviezd spôsobené turbulenciou v zemskej atmosfére. Fyzickú väzbu planéta-materská hviezda je však nevyhnutné preukázať spektroskopickými alebo pozičnými meraniami. Ak sa jedná o gravitačne zviazaný pár, obe zložky vykazujú rovnaký vlastný pohyb voči vzdialeným hviezdám. Pri blízkych objektoch (od Slnecnej sústavy) by po dostatočne dlhej dobe mal byť pozorovateľný orbitálny pohyb. Jas materskej hviezdy je možné znížiť jej zatienením podobne ako pri slnečných koronografoch prípadne pri tzv. nulling interferometrii. Koronografické pozorovania niekoľkých blízkych hviezd (napr. beta Pictoris) viedli k detekcii protoplanetárnych diskov.

Okrem týchto metód, ktoré viedli k objavom extrasolárnych planét, existuje ešte niekoľko nádejných metód, ktoré si vyžadujú ďalšie zvýšenie presnosti pozorovaní (obr.1). Takými sú pozičné merania. Pohyb planéty okolo materskej hviezdy vyvoláva malé zmeny polohy materskej hviezdy na oblohe. Aby sa táto metóda mohla uplatniť, bolo by potrebné zvýšiť presnosť pozičných meraní 10 až 100 krát. Prvou lastovičkou je tu využitie pozičného zariadenia na Hubbleovom kozmickom ďalekohľade pri sústave HD33636. Len zo samotných radiálnych rýchlostí sa zdalo, že v sústave je extrasolárna planéta. Pozičné merania z HST ukázali, že sklon dráhy voči oblohe je len 4 stupne, čo zvyšuje hmotnosť planéty na 142 M<sub>J</sub> a preto sa jedná o hnedého trpaslíka.

Je zrejmé, že s rozvojom pozorovacej techniky sa rozvinú aj nové doteraz netušené metódy. Sľubné je aj rozšírenie priamych detekcií do rádiovnej oblasti. Napríklad Zem je prirodzene najjasnejšia v oblasti 100kHz. Problémom je rušenie pozorovaní pozemskými vysielačmi ale aj procesmi v ionosfére.

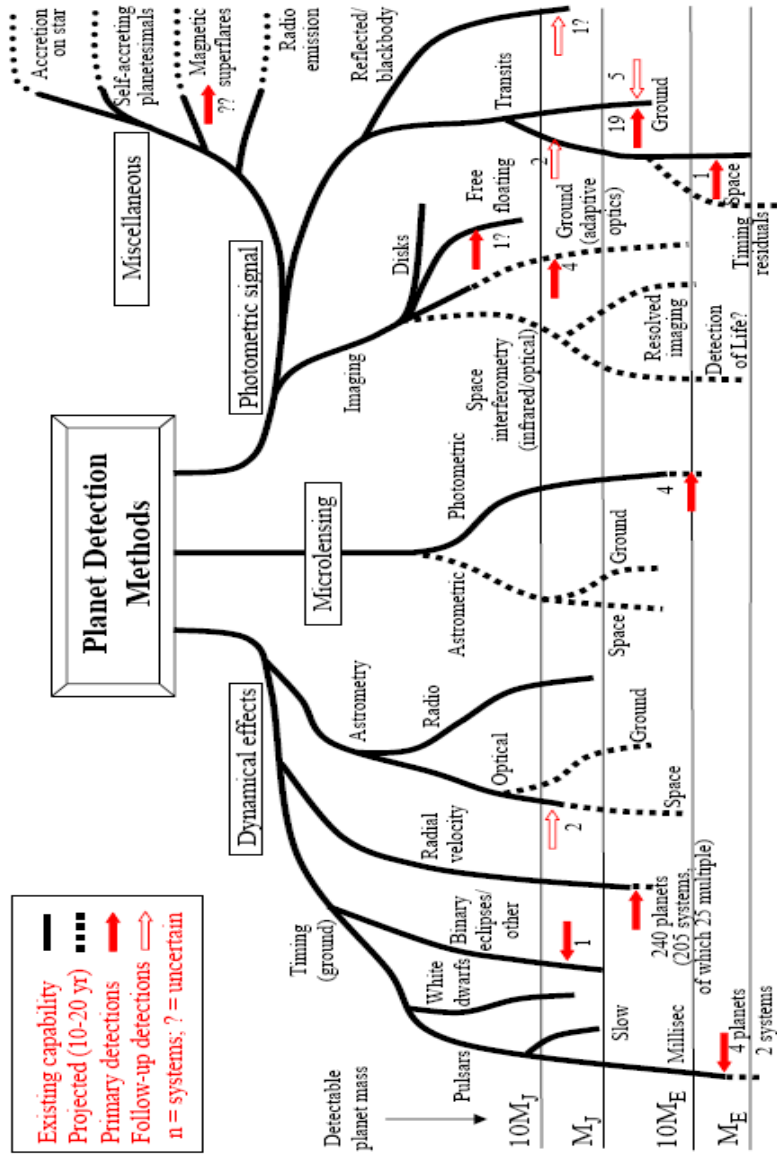
## Vlastnosti extrasolárnych planét a materských hviezd

Hoci je dnes známych takmer 250 extrasolárnych planét je to stále pomerne malý súbor, aby sa mohli robiť všeobecné závery o ich vlastnostiach. Táto vzorka je silno ovplyvnená tzv. výberovými efektmi, čo znamená, že objav silno závisí na charaktere a dráhe planéty. Najprv sú, prirodzene, objavované najhmotnejšie telesá na najkratších dráhach. Každá pozorovacia metóda má pritom svoje špecifiká a je citlivá na iný druh objektov. Najrozšírenejšia metóda merania radiálnych rýchlostí je efektívna, ak je ich zmena aspoň niekoľko desiatok m/s. Amplitúda zmien radiálnych rýchlostí materskej hviezdy pritom narastá so zvyšovaním sa hmotnosti planéty, skracovaním obežnej doby a nárastom sklonu dráhy. Preto väčšina spektroskopických detekcií sú hmotné planéty jupiterovského typu na tesných dráhach okolo svojej materskej hviezdy, tzv. horúci jupiteri. Šanca nájsť extrasolárnu planétu na základe poklesu jasnosti materskej hviezdy je takisto vyššia pre objekty s krátkymi obežnými dobami. Rozhodujúci je pomer polomeru planéty a hviezdy, ktorý určuje veľkosť poklesu jasnosti a limituje pri danej presnosti fotometrie detekciu menších objektov. Na druhej strane, pozičné alebo priame pozorovania sú ovplyvnené pomerom jasnosti planéty a hviezdy ako aj ich uhlovou vzdialenosťou. Najľahšie je preto nájsť telesá obiehajúce na veľkých dráhach s dlhými obežnými dobami. Napriek tomu, že súbor doteraz nájdených extrasolárnych planét je silno ovplyvnený výberovými efektmi, doterajšie objavy priniesli viacero prekvapení. Asi najväčším je existencia horúcich jupiterov, ktorá je v rozpore s usporiadaním Slnčnej sústavy, kde obrie planéty sú rozmiestnené vo veľkých vzdialenostiach od Slnka. Pravdepodobným vysvetlením je migrácia planét z vonkajších oblastí smerom k materskej hviezde. Hoci väčšina týchto planét má viazanú rotáciu (podobne ako Mesiak, ktorý je k Zemi privrátený stále jednou stranou) a ich dráhy sú kruhové, niektoré planéty (napr. pri hviezde HD86060) vykazujú silne excentrickú dráhu s  $e = 0,9$ . Existenciu takejto výstrednej dráhy je takisto ťažké vysvetliť: podľa modelov vzniku planét z protoplanetárnych diskov by mali byť dráhy masívnych planét kruhové, čo pozorujeme v Slnčnej sústave. Možným vysvetlením je existencia ďalšej, málo-hmotnej hviezdy, ktorá zmenila počiatočnú dráhu takýchto bizarných planét. Distribúcia hmotností doteraz známych planét vyžaduje maximum okolo hmotnosti Jupitera ( $M_J$ ). Telesá s hmotnosťami 20 až 40 hmotností Jupitera sa prakticky nepozorujú. To znamená, že planéty nie sú jednoduchou extrapoláciou málohmotných hviezd a mechanizmus ich formácie je odlišný. Úbytok telies menších hmotností (pod  $0,5 M_J$ ), ktorý je v doterajšej štatistike pozorovaný, je však jednoznačne dôsledkom našej neschopnosti detegovať málo hmotné telesá zemského typu. Napríklad, obeh Zeme na dráhe okolo Slnka spôsobí zmeny radiálnej rýchlosti len zhruba 3 cm/s, alebo pokles jasnosti Slnka počas prechodu len asi 0,0001 magnitúdy, čo je ďaleko za možnosťami súčasnej techniky. Možnostiam pozorovacej techniky zodpovedajú obežné doby planét, ktoré sú dnes v rozsahu 1,2 dňa až 14 rokov, pričom veľká väčšina doteraz známych planét obieha materskú hviezdu za niekoľko málo dní. Pritom obežné doby extrasolárnych planét, ak sa pozorujú prechody po dlhšiu dobu, je možné určiť s presnosťou len niekoľko sekúnd. Ostatné dráhové parametre je možné určiť so značne nižšou relatívnou presnosťou.

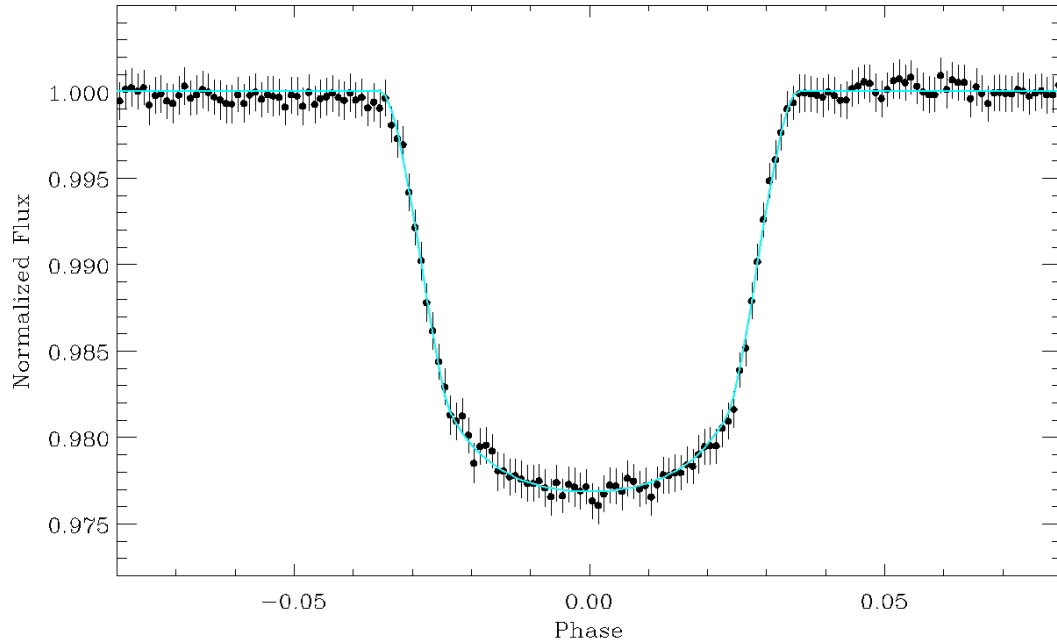
Povrchovú teplotu extrasolárnych planét je zatiaľ možné len odhadnúť na základe svietivosti materskej hviezdy, vzdialenosti planéty a albeda (odrazivosti) jej povrchu. Doteraz známe planéty majú teploty od zhruba 150 K až po takmer 2000 K. Takéto vysoké teploty sú pozorované u horúcich jupiterov. Približne dve desiatky planét majú odhadovanú povrchovú teplotu medzi bodom zamrznutia a varu vody. Hustoty tranzitujúcich planét, ktoré sú spoľahlivo

# Planet Detection Methods

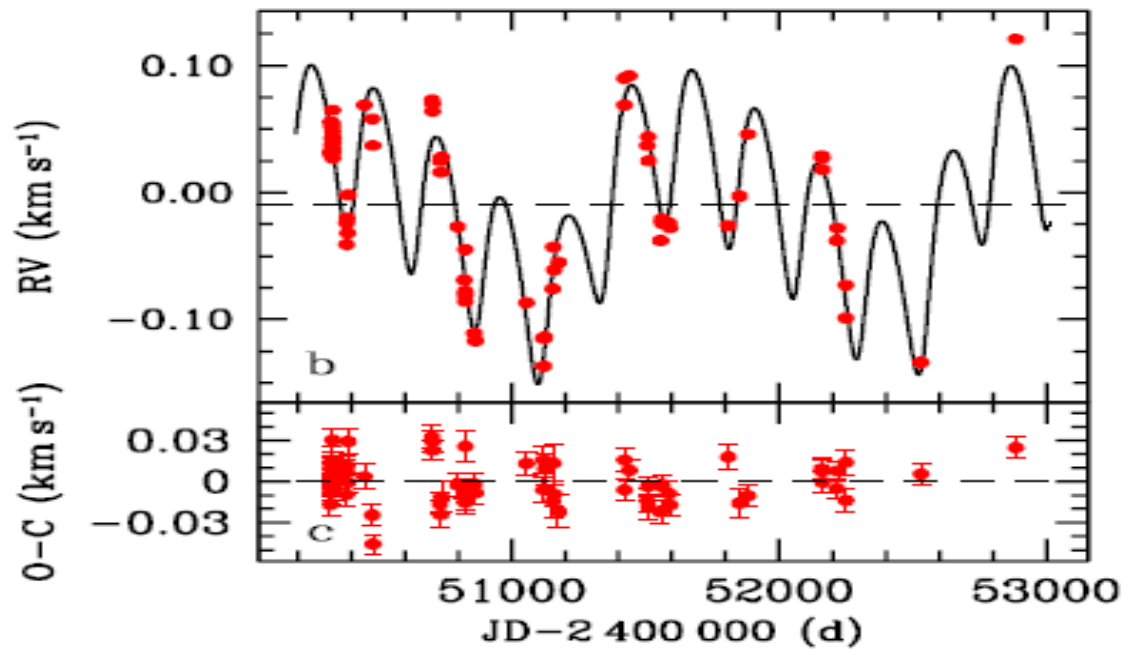
Michael Perryman, Rep. Prog. Phys., 2000, 63, 1209 (updated 3 October 2007)



Obr. 1: Prehľad doterajších metód detekcie extrasolárnych planét. Metódy, ktoré už boli úspešné sú vyznačené plnou čiarou. Perspektívne metódy sú vyznačené prerušovanou čiarou. Vodorovné čiary označujú detegovateľnú hmotnosť planéty. Diagram je aktuálny k aprílu 2007 (<http://www.rssd.esa.int/SA-general/Projects/Staff/perryman/planet-figure.pdf>).



Obr. 2: Prechod extrasolárnej planéty Corot – Exo-1b objavenej sondou COROT. Hmotnosť planéty 1,3 hmotnosti Jupitera; obežná doba 1,5 dňa (<http://smc.cnes.fr/COROT/>).



Obr. 3: Zmeny radiálnej rýchlosti Upsilon And spôsobené obehom dvoch vonkajších planét. Pohyb vnútornej planéty na vnútornej dráhe bol odstránený ([http://arxiv.org/PS\\_cache/astro-ph/pdf/0310/0310261v1.pdf](http://arxiv.org/PS_cache/astro-ph/pdf/0310/0310261v1.pdf)).

vo známe, sú v rozpätí 300 až 1500 kg/m<sup>3</sup>, čiže podobné, ako majú Jupiter alebo Saturn. Jedná sa preto o plynné gule zložené prevažne z vodíka a hélia v plynnom, tekutom aj kovovom stave. Predpokladá sa, že podobne ako obrie planéty Slnecnej sústavy, extrasolárne planéty môžu mať v strede tuhé jadro.

Okrem telies, ktoré obiehajú materskú hviezdu pozorujeme aj tzv. voľne plávajúce planéty, ktoré sa vyskytujú v plyново-prachových mračnách, napr. vo Veľkej hmlovine v Orióne. Ich skutočná podstata doteraz nie je zrejmá. Navyše, takéto telesá podľa definície Medzinárodnej Astronomickej únie (IAU) medzi planéty nepatria.

Študovať materské hviezdy extrasolárnych planét je značne jednoduchšie. Doterajšia štatistika ukazuje, že extrasolárne planéty sa najčastejšie vyskytujú pri hviezdach s vyšším obsahom kovov (v spektroskopii a astrofyzike sa za kovy považujú látky s protónovým číslom  $>2$ ). To je v súlade s teoretickými predpokladmi. Vysoký obsah kovov v atmosférach materských hviezd však môže byť aj dôsledkom znečistenia planetárnymi sústavami. Z hľadiska metalicity naša Galaxia obsahuje rôzne populácie. Najstaršie zložky Galaxie, napr. guľové hviezdokopy, majú malý obsah kovov. Tam sa extrasolárne planéty nepozorujú. Príkladom je prehliadka guľovej hviezdokopy 47 Tucanae, kde fotometrické monitorovanie 22 tisíc hviezd nevedlo k detekcii žiadnej extrasolárnej planéty. Zatiaľ sa však našla asi stovka klasických premenných hviezd.

Podobne ako v Slnecnej sústave, aj pri iných hviezdach vznikli planetárne sústavy. Napr. Upsilon Andromedae obiehajú 4 planéty (obr. 3). U troch z nich pozorujeme rezonancie dráh, čiže orbitálne periódy dráh jednotlivých planét sú v celočíselných pomeroch. Napríklad pri sústave HD202206 sú obežné doby planét 256 a 1383 dní (v pomere 1:5) a ich dráhy sú dlhodobo stabilné. Podobné rezonancie pozorujeme v Slnecnej sústave napr. medzi Jupiterom a asteroidmi, Neptúnom a Plutom, a pod.

### Zaujímavé objekty

Doterajšie hľadanie extrasolárnych planét prinieslo viacero prekvapení. Zdá sa, že výskyt planetárných sústav nie je obmedzený len na hviezdy slnečného typu. Sústavu 2M1207b tvorí hnedý trpaslík a obria planéta s hmotnosťou 5 M<sub>J</sub>. Vzdialenosť zložiek je pritom až 55 AU, takže odhadovaná orbitálna perióda je niekoľko 100 rokov. V júni bol v sústave na základe infračervených pozorovaní detegovaný protoplanetárny disk. Bizarnou je aj planéta okolo hviezdy HD86060, ktorá obieha materskú hviezdu na silne excentrickej dráhe ( $e = 0,927$ ) s obežnou dobou 112 dní. Zvláštnou je planetárna sústava okolo 55 Cnc, ktorá je vizuálnou dvojhviezdou. Jasnejšiu zložku dvojhviezdy obiehajú 4 planéty. Z nich 3 majú hmotnosti blízke Jupiteru, jedna je podobná Neptúnu. Keďže je pravdepodobné, že sústava obsahuje planéty zemského typu, objekt je jedným z cieľov kozmickej misie TPF (pozri nasledujúcu časť). Ďalšou neštandardnou sústavou je obria hviezda iota Dra a jej hmotný sprievodca ( $M > 8,9 M_{\text{J}}$ ), ktorý okolo nej obehne za 536 dní. Jedná sa o prvú sústavu, kde materskou hviezdou nie je normálna hviezda hlavnej postupnosti. Vzhľadom na veľký priemer obra sú prechody planéty vysoko pravdepodobné. Zaujímavou je aj sústava nájdená v guľovej hviezdokope M4 (v súhvezdí Škorpióna), kde obiehajú biely trpaslík, neutrónova hviezda a obria planéta s  $M = 2,5 M_{\text{J}}$ . Keďže vek tejto hviezdokopy sa odhaduje na 13 miliárd rokov, jedná sa o najstaršiu známu planetárnu sústavu. Najchladnejšou planétou s hmotnosťou len 5,5 M<sub>Z</sub> je planéta OGLE-2005-BLG-390Lb nájdená na základe javu gravitačnej mikrošošovky. Svoju materskú hviezdu obieha vo vzdialenosti 2 AU za zhruba 10 rokov. Najmenej hmotnou, doteraz detegovanou planétou, je teleso s hmotnosťou len 1/5 hmotnosti Pluta obiehajúce okolo pulzaru PSR 1257+12, ktoré bolo zistené analýzou kolísania jeho periódy (ostatnými metódami detekcie sa zatiaľ darí detegovať telesá hmotnosti Neptúna). Za 17 rokov neustáleho sledovania tohto pulzaru sa zistilo, že táto planetárna sústava obsahuje 4 planéty.

Vznik planetárnych sústav z látky obohatenej o kovy podporuje aj detekcia planéty okolo obra epsilon Tau v otvorenej hviezdokope Plejády. Planéta obieha svoju materskú hviezdu po excentrickej dráhe za 595 dní. Zaujímavým objavom je detekcia planéty okolo trpasličej hviezdy GJ 436. Jedná sa o planétu s priemerom len asi 50 tisíc km. Planéta prechádza popred disk svojej materskej hviezdy. Pozorovania zákrytu planéty materskou hviezdou Spitzerovým kozmickým ďalekohľadom viedli k priamemu určeniu teploty planéty na zhruba 720 K. Hoci doterajšie pozorovania viedli k prekvapujúcim objavom, na malé planéty zemského typu si ešte budeme musieť počkať.

## Kozmické projekty

Hranice doterajších pozorovacích možností siahajú k planétam veľkosti a hmotnosti Neptúna. Detekcia planét zemského typu bude zrejme výsadou pozorovaní z kozmu. Európska ESA aj americká NASA plánujú viacero misií zameraných na detekciu planét zemského typu ako aj na detekciu organických molekúl v ich atmosférach. V decembri 2006 sa za hľadania zemských planét vydala družica COROT (CONvection ROTation and planetary Transits). Táto družica využije veľmi presnú fotometriu z kozmu nielen na štúdium oscilácií hviezd ale aj na detekciu a pozorovanie prechodov extrasolárnych planét. Hlavným prístrojom misie je ďalekohľad s priemerom 27 cm, v ktorého ohniskovej rovine sú 4 CCD čipy. Už v máji 2007 bola objavená nová extrasolárna planéta vykazujúca prechody a obiehajúca svoju materskú hviezdu na tesnej dráhe s obežnou dobou len 1,5 dňa. Pozemské spektroskopické pozorovania ukázali, že hmotnosť planéty je zhruba 1,3  $M_J$ . Od mája do októbra 2007 družica bude kontinuálne sledovať hviezdne pole v súhvezdí Orla, neďaleko stredu Galaxie. Na snímkach bude súčasne zaznamenaných vyše 10 tisíc hviezd. Podobnou je plánovaná misia KEPLER americkej NASA, ktorá bude zameraná na fotometrickú detekciu prechodov planét zemského typu. Vypustenie družice je plánované na rok 2009. Hlavným prístrojom bude ďalekohľad s priemerom 95cm s veľkým využitelným zorným poľom (105 štvorcových stupňov). Počas misie trvajúcej 3,5 roka bude sledované stále rovnaké pole.

Vo vzdialenejšej budúcnosti (po roku 2010) sú plánované viaceré misie, ktoré by mali byť zamerané na detekciu života vo vesmíre. Dôležitou misiou bude TPF (Terrestrial Planet Finder, NASA), ktorá bude využívať interferometriu a koronografiu na detekciu planét zemského typu. Pozorovací systém bude zložený zo štyroch ďalekohľadov, ktorých obraz bude kombinovaný na dosiahnutie vyššieho rozlíšenia príp. odstránenia obrazu hviezdy (nulling interferometry). Sonda bude vybavená aj spektrografom, ktorý bude analyzovať spektra planét s cieľom nájsť molekuly, ktoré indikujú prítomnosť života ( $CO_2$ ,  $CH_4$ ,  $O_2$ ,  $O_3$ ,  $H_2O$ ). Podobnú misiu, DARWIN, pripravovanú na vypustenie okolo roku 2015 plánuje ESA. Flotila troch troj až štvormetrových ďalekohľadov však bude umiestnená ďaleko od Zeme v libračnom bode  $L_2$  sústavy Zem-Slnko.

## Astrobiológia: SCI-FI alebo realita

Doterajšie hľadanie mimozemských civilizácií (napr. SETI: Search for Extraterrestrial Intelligence) je neúspešné. To však neznamená, že existencia života, napr. na nižšom stupni rozvoja, je vylúčená. Ak si berieme príklad od našej planéty, predpoklady vzniku života sú nasledujúce: (I) planéta zemského typu s pevným povrchom, (II) jej dráha musí byť v obývateľnej zóne (viď ďalej), (III) rotácia planéty nesmie byť viazaná s orbitálnym pohybom, aby na jej povrchu neboli veľké rozdiely teploty povrchu, (IV) planetárna sústava nesmie byť veľmi mladá (časté dopady komét a asteroidov), (V) planéta musí byť chránená atmosférou pred drobnými impaktmi - mikrometeoritmi, (VI) pred škodlivým kozmickým žiarením musí

život chrániť magnetické pole aj atmosféra. Z teórie stavby a vývoja hviezd vieme, že rozumnými kandidátmi na materské hviezdy extrasolárnych planét sú chladnejšie – Slnku podobné hviezdy. Pri veľmi hmotných horúcich hviezdach je hľadať planéty zbytočné z nasledujúcich dôvodov (I) silný hviezdny vietor rozmetá protoplanetárny disk ešte pred vytvorením planét, (II) hmotné hviezdy existujú len niekoľko desiatok miliónov rokov, čo je málo pre formáciu planét a vznik života, (III) intenzívne ultrafialové žiarenie dokonale sterilizuje povrch planét.

Ak predpokladáme život na rovnakom základe ako na Zemi (založený na vode, kyslíku, uhlíkovodíkoch a zložitejších organických molekulách), spektroskopické pozorovania by mali ukázať prítomnosť organických molekúl. Pri hľadaní exoplanét schopných podporovať život zvyčajne uvažujeme tzv. obývateľnú zónu. Je to prstencová oblasť okolo materskej hviezdy, kde môže voda existovať v kvapalnom skupenstve. Vnútorý polomer tejto oblasti zodpovedá miestu, kde hviezdne žiarenie odparí celú povrchovú vodu (v slnečnej oblasti 0,84 AU), vonkajšiemu polomeru zodpovedá miesto, kde teplota nedosahuje teplotu topenia vodného ľadu ani s pomocou skleníkových plynov (napr.  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ). Vzdialenosť obývateľnej zóny závisí najmä od svietivosti a teploty materskej hviezdy. Pre chladné hviezdy spektrálnej triedy M sa obývateľná zóna nachádza len v tesnom okolí hviezdy.

Dôležitou pomôckou pri hľadaní život podporujúcich planét je diaľkový prieskum Zeme. Spektrum Zeme, tak ako ho pozorujeme z kozmu, je zložené z odrazeného slnečného žiarenia (dominuje vo vizuálnej až ultrafialovej oblasti), ako aj vlastného tepelného žiarenia Zeme (ďaleká infračervená oblasť). Keďže časť dopadajúceho slnečného žiarenia prechádza atmosférou a je od povrchu odrazená späť do vesmíru, dochádza k pohlteniu žiarenia molekulami atmosféry. V spektre Zeme preto môžeme nájsť absorpčné čiary molekúl vody, metánu, ozónu a kyslíka. Výrazné sú aj čiary zodpovedajúce chlorofylu obsiahnutého v zelených rastlinách. Dôležitým indikátorom existencie života sú sezónne zmeny množstva bioindikátorov v atmosfére vyvolané obedom planéty okolo materskej hviezdy alebo vlastnou rotáciou.

Všetky doterajšie detekcie vody alebo iných biomarkerov sú nepriame alebo na hranici možností pozorovacej techniky. Napríklad pozorovania planéty okolo hviezdy HD189733 Spitzerovým kozmickým ďalekohľadom, ktorá prechádza pred materskou hviezdou, indikujú prítomnosť vody v jej atmosfére. Tento záver bol vyvodený na základe rozdielov polomeru planéty v závislosti na vlnovej dĺžke v infračervenej oblasti spektra. Pozorovania je však možné vysvetliť aj ako dôsledok premennosti materskej hviezdy.

Hlavným problémom pri detekcii týchto biomarkerov pri extrasolárnych planétach je obrovský rozdiel v jasnostiach medzi hviezdou a planétou a očakávaná malá jasnosť planét zemského typu aj pri hviezdach, ktoré sú k nám blízko. Preto možno predpokladať, že hlavnú úlohu tu zohrajú kozmické misie.

## **Teoretický výskum**

Popri observačnom výskume extrasolárnych planét zohrávajú dôležitú úlohu teoretické štúdie. Závažnou otázkou je formácia a vývoj planetárnych sústav. Je zrejmé, že planéty sa formujú v protoplanetárnych diskoch okolo hviezd. Otázne je, čo koncentruje prach, plyn a ľad do väčších telies. Teoretické štúdie ukazujú, že sú to rôzne nestability v diskoch, ako sú špirálovité vlny, víry. Dôležitú úlohu hrá viskozita materiálu v disku. Zhlukovanie čistočiek do väčších telies sa zdá byť jednoduchšie za tzv. snežnou čiarou (kde sa už vodný ľad netopí), kde dochádza k obaľovaniu prachových zrn ľadom a ich vzájomnému zlepovaniu. Pri väčších telesách už pomáha aj vlastná gravitácia. Zhlukovanie materiálu do planét musí byť dostatočne rýchly proces, keďže sa ukazuje, že protoplanetárne disky nie sú staršie ako niekoľko miliónov rokov. Počítačové simulácie ukazujú, že proces formácie planét netrvá dlhšie ako 100 až 200 miliónov rokov. Pri postupnom zväčšovaní planéty sa predpokladá, že

v protoplanetárnom disku sa vytvorí medzera a vďaka interakcii planéty s diskom dochádza k jej migrácii. Brzdienie planéty diskom pritom spôsobí presun planéty smerom k materskej hviezde. Otázna je však formácia planét zemského typu. V analógii so Slnecnou sústavou by migrácia veľkých planét mohla narušiť formáciu planét zemského typu. Je však možné, že horúci jupiteri na tesných dráhach okolo ich materských hviezd vznikli tesným priblížením inej hviezdy k materskej hviezde a vytrhnutím časti materiálu. Vo všeobecnosti je však vznik planét v protoplanetárnych diskoch podporený (i) existenciou takýchto diskov a (ii) faktom, že roviny dráh planét Slnecnej sústavy sú takmer koplanárne. Problematické je teoretické modelovanie tzv. horúcich jupiterov, ktorých existencia je pravdepodobne dôsledkom migrácie zo vzdialenejších dráh. Teoreticky sa totiž predpovedalo, že obrie planéty môžu vzniknúť až za snehovou čiarou, mimo jej protoplanetárneho akréčného disku. Prítomnosť horúcich jupiterov na tesných dráhach by však nemala prekážať vzniku planét zemského typu vo väčších vzdialenostiach. Teoretické výpočty ukazujú, že rotačné periódy horúcich jupiterov sa vďaka slapom synchronizujú s ich obežnou dobou za niekoľko miliónov rokov, zatiaľ čo excentricita dráhy klesne na nulu (kruhová dráha) za stovky miliónov rokov. Numerickému modelovaniu bola podrobená aj stabilita niektorých planetárnych sústav. Napríklad v sústave dvoch planét okolo HD155358 dochádza k ich vzájomnej gravitačnej interakcii, ktorá bude periodicky meniť výstrednosť ich dráh. Modelovanie stability extrasolárnych planét môže vylúčiť nesprávne určenie elementov dráh, pri ktorých by boli tieto sústavy nestabilné.

## **Záver**

Hoci ešte pred 15 rokmi boli extrasolárne planéty v oblasti SCI-FI, dnes sú realitou a ich hľadanie a štúdium napreduje obrovským tempom. Po prvých rokoch objavov sa vďaka zdokonaľovaniu pozorovacej techniky výskum postupne presúva na štúdium planét samotných. Dôležitým je aj teoretický výskum, ktorý sa zaoberá vznikom planetárnych sústav, atmosférami planét, ich teplotným režimom, či vplyvom rôznych faktorov na vznik života. Dá sa predpokladať, že ďalší rozvoj pozorovacej techniky povedie k detekcii mesiačikov extrasolárnych planét, ich prstencov, v niektorých planetárnych sústavách budú detegované pásy asteroidov.

Už dnes vieme, že minimálne 5-10% hviezd slnečného typu obiehajú planéty. Hoci doteraz sme schopní detegovať len obrie planéty typu Jupitera alebo Neptúna, niektoré zo známych planetárnych sústav s veľkou pravdepodobnosťou obsahujú aj planéty zemského typu. Pripravované kozmické misie budú zamerané najmä na detekciu takýchto planét. To dáva reálnu šancu aj na detekciu života mimo Slnecnej sústavy.