

EXOPLANETY

Ondřej Kvapilík
&
Michal Mejvald

Gymnázium Christiana Dopplera
duben 2005

Obsah

1 ÚVOD	3
2 HISTORIE	4
2.1 POČÁTKY HLEDÁNÍ.....	4
2.2 PLANETA NEBO HNĚDÝ TRPASLÍK?.....	4
3 DRUHY PLANET	6
3.1 VZNIK HVĚZD A PLANET.....	6
3.2 PLANETY U VÍCEČETNÝCH SYSTÉMŮ.....	7
3.3 PLANETY U BÍLÝCH TRPASLÍKŮ A PULSARŮ.....	7
4 METODY OBJEVOVÁNÍ PLANET	10
4.1 ASTROMETRICKÁ METODA.....	10
4.2 ZMĚNA RADIÁLNÍCH RYCHLOSTÍ.....	11
4.3 GRAVITAČNÍ MIKROČOČKY.....	12
4.4 ZÁKRYT HVĚZDY PLANETOU (FOTOMETRIE).....	13
4.5 PŘÍMÉ ZOBRAZENÍ (MATEMATICKÉ ZPRACOVÁNÍ).....	14
4.6 DALŠÍ METODY.....	16
4.6.1 Přebytek infračerveného záření.....	16
4.6.2 Rychlost rotace hvězdy.....	16
4.6.3 Přímé pozorování.....	16
4.6.4 Zpoždění záblesků pulsarů.....	16
4.6.5 Vylučovací metoda.....	17
5 HLEDÁNÍ	18
5.1 OBJEVENÍ DVOU PLANET DÍKY ZÁKRYTŮM.....	18
5.2 ODVRŽENÁ „PROTOPLANETA“.....	19
5.3 VYHLEDÁVACÍ PROJEKTY.....	20
6 PÁR VYBRANÝCH EXOPLANET	20
6.0.151 Pegasi b.....	20
6.0.2 PSR B1257+12 A,B,C,D.....	21
6.0.350 Andromedae b,c,d.....	21
6.0.4 Ro Coronae Borealis b.....	21
6.0.5 Ross 780 b.....	21
6.0.670 Virginis b.....	21
6.0.7 Gliese 86 c.....	21
7 BUDOUCNOST	22
8 PŘÍLOHY	23
8.1 OBĚŽNÉ DRÁHY.....	23
8.2 MAPY OKOLNÍCH EXOPLANET.....	24
8.3 FOTOGRAFIE EXOPLANETY.....	25
9 ZDROJE	26

1 Úvod

Hledání planet mimo sluneční soustavu je velice zajímavým odvětvím astronomie. V dnešní době, s rozvojem pozorovacích technologií, máme možnost objevovat tělesa obíhající okolo čím dál vzdálenějších hvězd.

Tato práce si dává za cíl shrnout různé informace o exoplanetách do souvislého celku. Zabývá se především způsoby vyhledávání exoplanet, které jsou v tomto oboru velice rozmanité.

Bohužel, díky nedostatku volně dostupných informací, a především díky nemožnosti vlastního výzkumu, jsme nuceni přebírat texty z rozličných zdrojů.

2 Historie

2.1 Počátky hledání

Roku 1844 zaznamenal F. W. Bessel nepatrný pohyb hvězd Sírius a Prokyon. U Síria činila odchylka od vlastního pohybu asi 3" a její perioda 49 let, u Prokyona 1" s periodou 40 let. Bessel ze svých pozorování usoudil, že hvězdy obíhají spolu s neviditelnými průvodci po eliptických drahách kolem společného těžiště. Oba tito tehdy ještě neznámí průvodci byli nalezeni o několik let později - Sírius B roku 1862 a Prokyon B roku 1896. Spolu s nalezením planety Neptun (1846) na základě naměřených odchylek pozic Urana byly tyto objevy klíčovými okamžiky, které ukázaly cestu hledání oběžnic vzdálených hvězd. Narodila se nová metoda - poziční astrometrie.

Pozorovací technika se však postupem času stále zlepšovala, a tak byla v letech 1927 až 1937 vystopována další hvězda s neviditelným průvodcem - jednalo se o hvězdu Ross 614. Průvodce, označený jako Ross 614 B, patří se svojí hmotností $0,08 M_S$ k těm nejmenším hvězdám. Je jen asi 80krát hmotnější než Jupiter a velká poloosa jeho dráhy je asi 4krát větší než střední vzdálenost Země od Slunce. Nemohlo se tedy jednat o planetu? Nikoli. Měla-li by tato domnělá planeta pouze odrážet světlo hvězdy, bylo by její pozorování tehdy zdaleka nedosažitelné. Ross 614 B svítí vlastním světlem, takže se zcela jistě jedná o hvězdu, i když velmi malou. Poziční astrometrie se jako metoda odhalování extrasolárních planet (exoplanet) díky ohromnému rozdílu mezi hmotnostmi hvězdy a planety tehdy neosvědčila. Teprve nyní jsme svědky jejího postupného návratu - přesnost, s jakou jsme dnes schopni měřit polohu hvězd, dosahuje díky rádiovým interferometrům úctyhodných miliontin úhlové vteřiny!

První tělesa planetárních hmotností u hvězd byla objevena metodou měření zpoždování záblesků pulsarů roku 1992. Roku 1995 byla objevena planeta měřením Dopplerova posuvu a roku 1998 metodou mikročoček. Metoda pozorování přechodů planety před kotoučkem hvězdy slavila svůj úspěch roku 1999.

2.2 Planeta nebo hnědý trpaslík?

Již z počátku objevované planety vědce šokovaly především svými zvláštními drahami. Astronomové očekávali, že planetární dráhy a dokonce planety samotné budou podobné těm, které pozorujeme v naší sluneční soustavě. Mnohokrát je zarazila velká výstřednost dráhy planety. Ve sluneční soustavě jsou planetární dráhy téměř dokonalé kružnice. V několika případech (16 Cygni Bb, HD 168443) se excentricita pohybuje kolem hodnoty 0,6, což odpovídá spíše dráze kometární, u oběžnice hvězdy HD 89707 pak činí dokonce 0,95 (!), což je velmi protáhlá elipsa. Zřejmě ještě více šokovaly vědce planety samotné. Ve velké části případů byly příliš velké, jejich hmotnost dosahovala až osmdesát hmotností Jupitera. Takové těleso je přesně napůl cesty mezi hvězdou a planetou. Hvězda to není, protože v nitru takového tělesa neprobíhají termonukleární reakce, ale není to ani planeta, protože získává energii z jaderných reakcí (reakcí lithia s protony vzniká helium). Takový objekt řadíme mezi hnědé trpaslíky.

Hnědý trpaslík je vlastně nepovedená hvězda o hmotnosti mezi 10 a 80 hmotnostmi Jupitera a o svítivosti mezi 6×10^{-5} a 5×10^{-4} svítivosti sluneční. Pokud je jeho hmotnost větší než 13 hmotností Jupiteru, proběhne v jeho mládí omezená termojaderná reakce, která spotřebuje veškeré deuterium. Avšak i nadále hnědí trpaslíci září vlastním světlem, získávají energii z gravitačního smršťování. V atmosférách hnědých trpaslíků se kromě vodíku a helia objevují i pásy prachu a metanu a někdy dokonce voda či oxid uhelnatý. Povrchová teplota takových těles je pod 2000 K. Podstatné je, že zatímco hnědí trpaslíci vznikají podobně jako

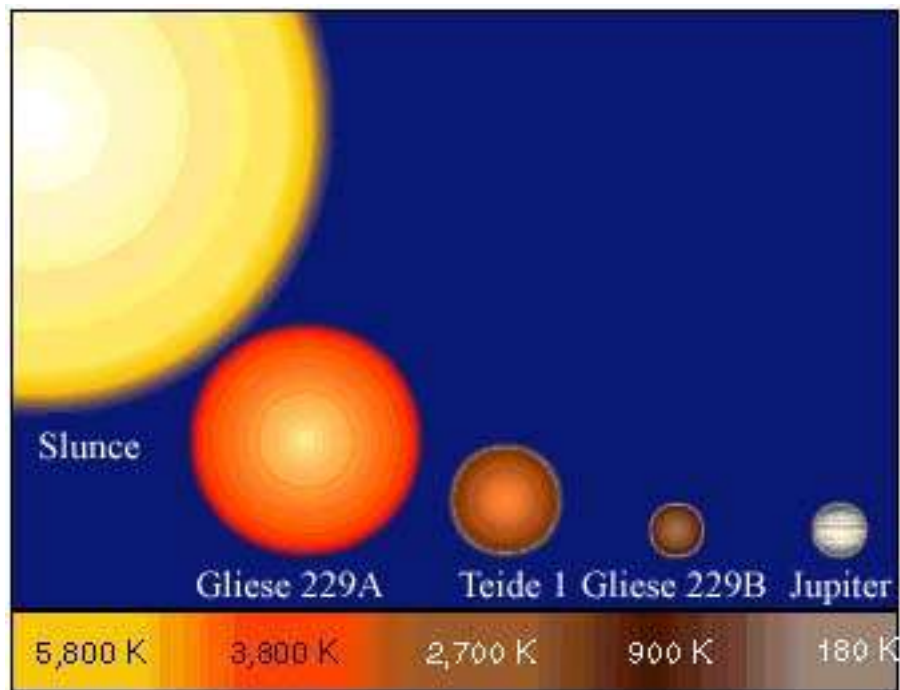
hvězdy gravitačním kolapsem oblaku plynu, planety se formují z materiálu, který obíhá mateřskou hvězdu.

Největším shromaždištěm dosud objevených hnědých trpaslíků je známá otevřená hvězdokupa M45 Plejády v Býku. Následující výčet známých hnědých trpaslíků rozhodně není úplný. Kromě zmíněných Plejád se jich několik známých nachází i v otevřené hvězdokupě M 44 Jesličky v Raku nebo v mračnu kolem hvězdy ρ Ophiuchi - hlavně díky tomu, že se tam nejlépe hledají a v těchto oblastech se nachází nejvíce kandidátů.

Hlavní rozdíly mezi hnědými trpaslíky a obřimi planetami ukazuje následující tabulka a obrázek pod ní:

	Hnědý trpaslík	Planeta
Vznik	kontrací z protostelární mlhoviny	akrecí z protoplanetárního disku okolo centrální hvězdy
Záření	viditelné světlo emituje po dobu několika miliard let	Viditelně nezáří, u obřích planet rádiové a IR emise
Hmotnost	13÷80 M_J	do 13 M_J

Porovnání velikostí Slunce, hnědých trpaslíků a Jupitera:

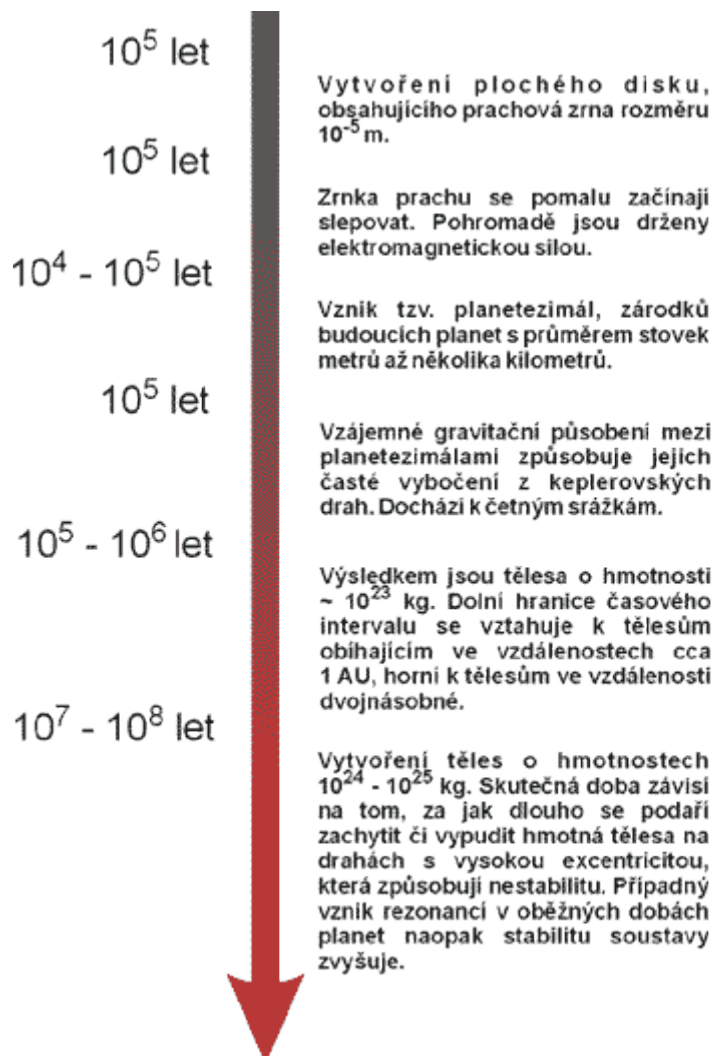


3 Druhy planet

3.1 Vznik hvězd a planet

Planety vznikají postupnou akrecí z plochého disku, který je vedlejším, nicméně přirozeným produktem vzniku (osamocené) hvězdy. Počátkem je gravitační kolaps rozsáhlého prachoplynného oblaku. Ten se skládá převážně z vodíku (ve formě molekul i atomů) a hélia. V mnohem menší míře jsou zastoupeny molekuly CO, CO₂, N₂, CH₄ a H₂O.

Prachová zrna obsahují zejména C, Si a O. Jejich typické rozměry jsou 10⁻⁵ m. Po počátečním impulsu se materiál rychle hromadí směrem k centrální protohvězdě, ale velký rotační moment brání jeho úplnému zhroucení. Postupně vzniká plochý disk. Doba, kterou disk potřebuje ke svému vzniku, je velmi krátká - v řádu 10⁵ let. Poslední fází ve vývoji disku před započítáním vlastní tvorby planet je jeho "vyčištění" od přebytečného plynu - ten je částečně přitážen centrální hvězdou a zčásti vyfoukán intenzivním hvězdným větrem. I tak zůstane v disku stále určité množství plynu - ty budou v budoucnu "použity" na tvorbu obřích planet.



3.2 Planety u vícečetných systémů

Prachoplynné disky se v principu objevují především kolem hvězd s hmotností Slunce nebo menší. Velké hvězdy totiž svým intenzivním hvězdným větrem celý disk rozfoukají, a zabrání tak vzniku planet. I to je dalším z důvodů, proč hledat planety právě u hvězd podobných Slunci. Protoplanetární disky kolem mnoha hvězd nesahají až ke hvězdě a kromě toho jsou ve vnitřních částech často asymetrické. To může být způsobeno již z kondenzovanými planetami nebo jejich zárodky, které ve svém okolí vysbíraly prach.

Osamocená hvězda je ve vesmíru však spíše výjimkou. Mohou existovat planety ve vícenásobných systémech? Teorie ukazuje, že tomu nic nebrání. Často diskutovanou soustavou je po Slunci nejbližší hvězdný systém *Alfa Centauri*. Výpočty ukázaly, že planety mohou mít své stabilní dráhy u každé z hvězd, jestliže jsou do 3 AU od mateřské hvězdy. Nebo může obíhat kolem hvězd obou, pokud bude mít trajektorie poloměr alespoň 70 AU. A skutečně byly planety ve vícenásobných systémech objeveny, například v dvojhvězdné soustavě *Gliese 86*.

Paradoxně lze hledat planety i u hvězd velmi málo příznivých pro život - u bílých trpaslíků nebo neutronových hvězd-pulsarů či dokonce i černých děr. Vědci se shodli v názoru, že kamenná jádra terestrických planet mohou přežít i rozepnutí hvězdy do fáze červeného obra a následně pak obíhat kolem chladnoucího bílého trpaslíka. Podobně se kolem hvězd neutronových nebo kolem černých děr mohou vytvořit z materiálu zbylého po výbuchu supernovy tzn. *planety druhé generace*, přičemž původní planety (pokud existovaly) byly výbuchem pravděpodobně úplně zničeny.

3.3 Planety u bílých trpaslíků a pulsarů

První tělesa planetárních hmotností byla objevena metodou měření zpoždění záblesků pulsarů roku 1992. Tak, jak oběžnice hýbe pulsarem, sledujeme zpoždění nebo zrychlování časových period mezi jednotlivými záblesky. Milisekundový rádiový pulsar PSR B1620-26 se nachází v blízkosti centra kulové hvězdokupy M4 v souhvězdí Štíra, ve vzdálenosti 7 200 světelných let od Země. Je součástí systému tří gravitačně vázaných těles – neutronová hvězda s hmotností cca $1,4 M_{\odot}$ obíhá okolo společného těžiště spolu s bílým trpaslíkem o hmotnosti $0,3 M_{\odot}$ s periodou 191 dní, a tvoří tak vnitřní část systému. Okolo společného těžiště této soustavy však obíhá ve vzdálenosti 50 AU ještě další těleso s hmotností přibližně trojnásobku (upřesnění z původního desetinásobku) hmotnosti Jupitera.

Samotný objev planety, obíhající okolo neutronové hvězdy, nebyl pro astronomy ničím novým. Roku 1994 byly u pulsaru PSR B1257+12 objeveny tři planety s hmotností srovnatelnou se Zemí, obíhající po kruhových drahách do vzdálenosti 1 AU od neutronové hvězdy. Dosud není zcela jasné, zda mohly planety přežít takovou událost, jako je výbuch supernovy, jež vzniku neutronové hvězdy předchází, nebo zda se zformovaly dodatečně z vyvrženého materiálu.

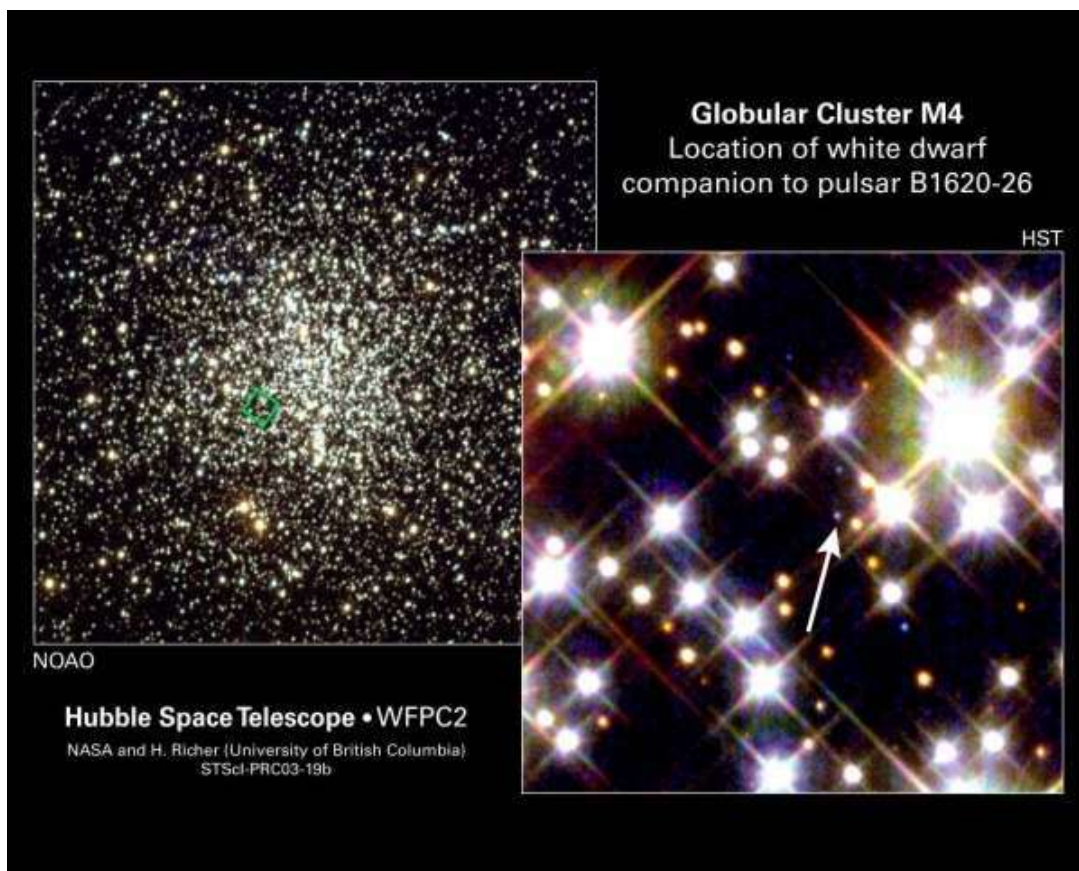
Porovnání hmotnosti Země, neutronové hvězdy a bílého trpaslíka:



Na příkladu pulsaru PSR B1620–26 lze však demonstrovat odhalení řady dalších překvapivých skutečností.

V první řadě je to samotný vznik této exotické soustavy. Jeden z možných scénářů vývoje systému začíná u staré neutronové hvězdy, vázané v binárním systému. Tato soustava se měkce střetla se soustavou hvězda-planeta. Doprovodná složka neutronové hvězdy byla gravitací vymrštěna mimo trojhvězdu a planeta zaujala místo na oběžné dráze okolo nově vzniklé soustavy neutronová hvězda – hvězda hlavní posloupnosti. Z té se postupem času stal červený obr, jehož hmota vyplnila celý Rocheův lalok a začala proudit přes akreční disk na neutronovou hvězdu. Tím došlo k jejímu rychlému roztočení a vzniku milisekundového pulsaru.

Počáteční podmínky tohoto scénáře byly podrobeny řadě numerických simulací a ukázalo se, že v 15% případů dojde k vytvoření podobné soustavy, jako u pulsaru PSR B1620–26. Ve většině takových případů byla výsledná dráha planety 10 až 100 krát větší než původní vzdálenost složek binárního systému, což odpovídá pozorování. Tato teorie má však dva velké nedostatky. Prvním problémem je fakt, že stáří milisekundového pulsaru by muselo být alespoň zhruba srovnatelné se stářím trojitého systému. Výpočty ukazují, že planeta obíhá okolo centra po dráze s velkou poloosou cca 50 AU, takže její dráha je vzhledem k velké hustotě hvězd v centru hvězdokupy dosti nestabilní. Odhadovaná životnost objevené soustavy je 3×10^7 let, tedy podstatně méně než odhadované stáří pulsaru (10^9 let). Doba životnosti soustavy se však významně prodlužuje v závislosti na vzdálenosti od centra hvězdokupy, kde klesá hustota hvězd. V polovině vzdálenosti směrem od centra ke kraji je již životnost systému na úrovni 10^9 let. Takovýto model vyžaduje, aby byl celý systém, který se nyní (v projekci) nachází v blízkosti centra, ve skutečnosti na oběžné dráze, jež sahá daleko od jádra a dovoluje soustavě trávit většinu času mimo husté středové partie.



Druhý problém se týká excentricity centrální dvojhvězdy. Uvedený model vzniku této soustavy ukazuje, že zároveň s přechodem planety na vnější oběžnou dráhu dojde díky působení slapových sil k cirkularizaci drah vnitřního systému. To je však v rozporu s nově naměřenými daty, takže vyšší excentricita vnitřní dráhy zůstává nevysvětlena. Bylo by možné jí vysvětlit druhotnou kolizí s další hvězdou, která by však zároveň s velkou pravděpodobností způsobila nestabilitu na vnější oběžné dráze. Výpočty ukazují, že k podobným druhotným setkáním skutečně může dojít, dokonce jsou vzhledem k hustotě hvězd v centru hvězdokupy velmi častá. Od doby svého vzniku by tento systém prošel nejméně 10 takovými setkáními, což snižuje pravděpodobnost zachování planety na vnější oběžné dráze pod 1%.

Jiný model proto předpokládá existenci milisekundového pulsaru již v době před kolizí se soustavou hvězda – planeta, ovšem numerické výpočty ukazují, že v tomto případě je pravděpodobnost zachycení planety oproti pravděpodobnosti zachycení hvězdy zhruba pětikrát menší.

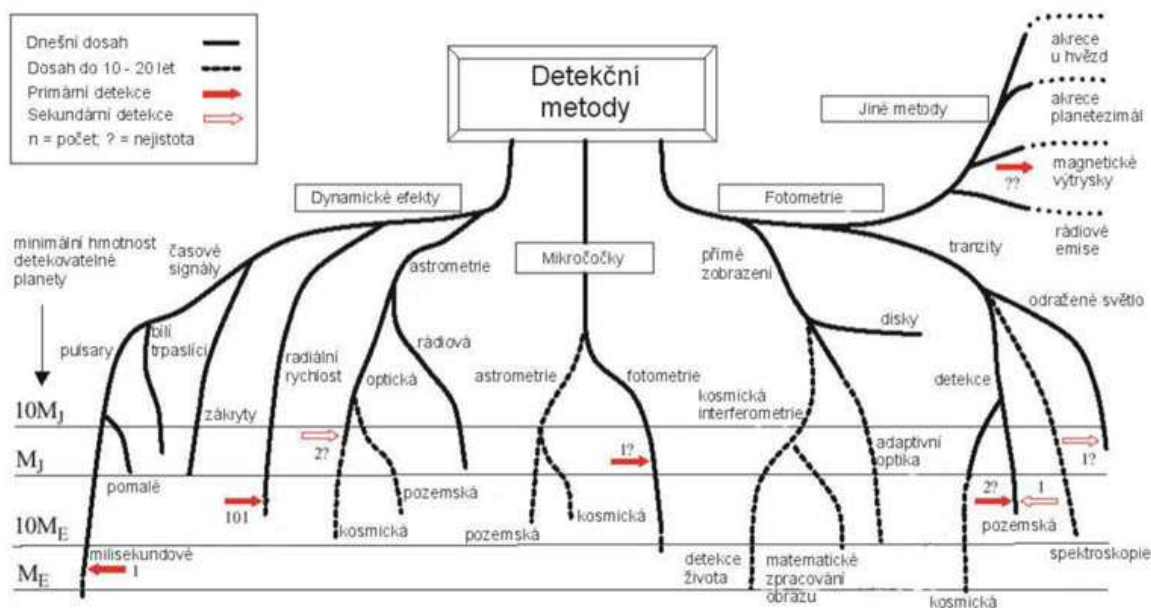
Bez ohledu na výše uvedené problémy však nejnovější data naměřená s pomocí Hubblova kosmického dalekohledu přikládají větší váhu prvnímu modelu. Například se ukázalo, že bílý trpaslík – sekundární složka trojčlenného systému, vznikl až v době po jeho vzniku. Pravděpodobná platnost prvního modelu však přináší obrovský zvrat do našich představ o vzniku planet a planetárních systémů. I když pomineme samotný fakt, že kulové hvězdokupy jsou vzhledem k častým gravitačním kolizím hvězd a vzhledem k malému zastoupení těžších prvků zcela nevhodnými místy pro tvorbu planet, ukazuje se, že pro splnění všech podmínek platnosti prvního modelu musíme předpokládat, že planeta se zformovala na okraji kulové hvězdokupy M4 před více než 12,5 miliardami let! Standardní teorie vzniku planetárních systémů postupnou akrecí z protoplanetárního disku však předpokládá, že obří plynné planety vznikaly až druhotně, nabalením plynů na pevná jádra o velikosti Země. Takový způsob vzniku je však vzhledem ke stáří planety téměř vyloučen – v době jejího zformování ještě neexistovalo dostatečné množství těžších prvků, potřebných k vytvoření pevného jádra. Ke slovu proto přichází alternativní teorie rychlého vzniku planet gravitačními nestabilitami přímo ze zárodečných disků. Je-li tato teorie pravdivá, pak musíme konstatovat, že planet se ve vesmíru nachází ještě mnohem více, než jsme se dosud domnívali – a to je další závažný důsledek modelu vzniku této bizarní trojčlenné soustavy.

4 Metody objevování planet

Obrázek shrnuje možnosti současných i budoucích způsobů detekce:

Metody detekce extrasolárních planet

Michael Perryman: Rep. Prog. Phys, 2000, 63, 1209 (updated Aug 2002)



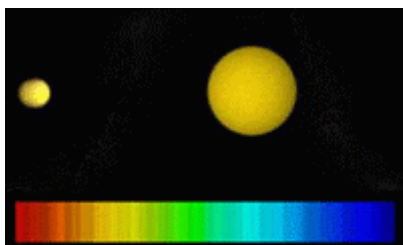
4.1 Astrometrická metoda

Z Newtonova gravitačního zákona vyplývá, že planeta nikdy neobíhá kolem hvězdy, ale obě tělesa obíhají kolem sebe navzájem, přesněji kolem společného těžiště. I když druhé těleso nevidíme, jeho gravitační vliv je dobře patrný. Vlastní pohyb mateřského tělesa po obloze není přímočarý, ale vlnitý. Z periody a amplitudy lze vypočítat hmotnost obíhajícího tělesa (nebo těles) a z třetího Keplerova zákona i jeho (jejich) oběžnou periodu a oběžnou vzdálenost. Nevýhodou je, že tuto metodu lze použít pouze pro menší vzdálenosti a dostatečně hmotná tělesa. Například trajektorie našeho Slunce (způsobená především Jupiterem) pozorovaná ze vzdálenosti 30 světelných let by měla amplitudu sinusoidy řádově v miliontinách stupně.

Holandan Van den Kamp ji používal v letech 1938 až 1968 a proměřoval velmi blízkou Barnardovu hvězdu. Z analýzy 3156 fotografií pak usoudil, že kolem hvězdy obíhají dvě planety ve vzdálenostech 2,8 a 4,7 AU v periodách 16 a 26 let o hmotnostech 0,7 a 1,0 hmotnosti Jupitera. Pozorování této hvězdy se však věnovali i další astronomové, ale ti již Van den Kampův objev nezopakovali. Van den Kamp tedy pravděpodobně přecenil přesnost svých měření. Astrometrickou metodou byly objeveny planety například u 61 Cygni nebo HD 114762 ve Vlasech Bereniky.

4.2 Změna radiálních rychlostí

Skutečnost, že vlnová délka světla vysílaného objektem, který se od nás vzdaluje, se vůči nám zvětšuje, je všeobecně známá jako rudý posuv. A právě tohoto efektu je využíváno k detekci extrasolárních planet. Hvězda a planeta obíhají kolem společného těžiště. Jestliže se k nám planeta přibližuje, hvězda se vzdaluje a její spektrální čáry vykazují červený posuv. Naopak, pokud se od nás planeta vzdaluje, hvězda se přibližuje a absorpční čáry ve spektru jsou posunuty k jeho modrému konci.



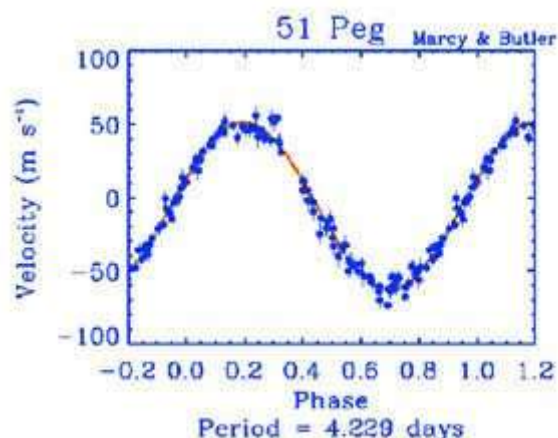
Pokud vyneseme velikost posunu těchto čar na časovou osu, získáme periodickou křivku, ze které můžeme odhadnout velikost planety, její oběžnou dobu a velkou poloosu dráhy. Přestože je tato metoda již dlouhou dobu používána k měření radiálních rychlostí blízkých hvězd i vzdálených galaxií, k detekci extrasolárních planet mohla být využita teprve nedávno. Abychom zaregistrovali i relativně malé planety, musí být změna radiální rychlosti změřena s přesností asi 1 m/s.

Amplituda K změny rychlosti hvězdy o hmotnosti M_* způsobená planetou o hmotnosti M_p se sklonem oběžné roviny vůči pozorovateli $\sin i$ (pozorujeme-li soustavu "z boku", je $i = 90^\circ$), s oběžnou dobou P a excentricitou e je dán vztahem:

$$K = \sqrt[3]{\frac{2\pi G}{P}} \frac{M_p \sin i}{\sqrt[3]{(M_p + M_*)^2}} \frac{1}{\sqrt{1-e^2}}$$

Za předpokladu kruhové dráhy a $M_p \ll M_*$ lze tento vztah zjednodušit. Změna radiální rychlosti Slunce způsobená oběhem Jupitera je $12,5 \text{ m s}^{-1}$ s periodou 11,9 roku, vliv Země se projeví změnou o velikosti $0,1 \text{ m s}^{-1}$. Nevýhodou této metody je, že nám dovoluje určit pouze dolní mez hmotnosti planety, tedy $M_p \sin i$. K určení hmotnosti proto potřebujeme znát skutečný sklon oběžné dráhy.

Vlastní měření může probíhat dvěma způsoby: buď se celý svazek světla shromážděného dalekohledem nechá projít ještě před rozložením na spektrum skleněnou nádobkou s velmi zředěným plynem (používá se například jód), nebo se světlo z dalekohledu mísí s referenčním svazkem vhodného světelného zdroje, třeba thorio-argonové lampy. Referenční zdroj měřeného spektrum oceňuje a posuv absorpčních čar vzniklých v atmosféře hvězdy je měřen vůči absorpčním čarám referenčního zdroje.



Touto metodou byla na konci roku 1995 odhalena první extrasolární planeta - u hvězdy 51 Peg. Objev extrasolární planety u hvězdy 51 Pegasi s hmotností podobnou Jupiteru, ale s extrémně malou vzdáleností 0,05 AU od hvězdy vyvolal řadu pochybností o správnosti interpretace naměřených dat a dohady, zdali nelze periodické změny radiální rychlosti objasnit neradiálními pulsacemi samotné hvězdy. Z pozorované neměnnosti tvaru spektrálních čar hvězdy 51 Peg v závislosti na oběžné době exoplanety však plyne, že možnost neradiálních pulsací hvězdy je nepatrná mimo jiné i proto, že hvězda má stálou jasnost s přesností $\pm 0,0007$ magnitudy. Další přesná měření z let 1995 až 1996 potvrdila všechny parametry exoplanety tak, jak je odvodili ve své průkopnické práci M. Mayor a D. Queloz. Vzdálenost hvězdy byla určena na 15,4 pc. Hvězda o hmotnosti $1,12 M_{\odot}$ je stará asi 4 miliardy let a do vzdálenosti 2 AU od ní neobíhá žádná další exoplaneta s hmotností Jupiteru či větší.

Metoda měření radiálních posuvů je v současné době k detekci exoplanet nejužívanější, ale i ona má svá úskalí. Především spočítanou hmotnost planety je nutno brát pouze jako dolní mez její skutečné hodnoty, neboť neznáme sklon oběžné dráhy planety vůči nám. Naměřená hodnota bude skutečné hodnotě odpovídat pouze v případě, že Země leží přímo v rovině oběžné dráhy planety. Sklon oběžné dráhy ovšem můžeme částečně odhadnout z tvaru prstence zodiakálního prachu, pokud se nám jej podaří vhodnou metodou zobrazit. Přesto je možné, že některá tělesa, která nyní pokládáme za planety, jsou ve skutečnosti mnohem těžší a je nutné je řadit spíše k hnědým trpaslíkům.

Přes všechny těžkosti detekce je možná překvapivě zjištění, že hledání extrasolárních planet metodou měření radiálních rychlostí není vyhrazena pouze známým světovým observatořím a jejich obřím dalekohledům. Jako jedna z prvních malých, ba dokonce "amatérských" hvězdáren, která se začala problematikou detekce extrasolárních planet zabývat, je Winner Observatory v jihovýchodní Arizoně. Pomocí 40cm dalekohledu se zde podařilo "najít" oběžnici Tau Boo. Tato již objevená planeta byla vybrána k testu aparatury proto, že změna radiální rychlosti zde probíhá s amplitudou cca 420 m/s, což byl přibližně čtyřnásobek odhadované rozlišovací schopnosti detekční aparatury. Výsledkem několikadenního měření byla perfektní sinusoida s periodou 3,41 dne. Vzhledem k dobrým výsledkům lze očekávat, že hledání extrasolárních planet se v krátké době stane pozorovacím programem mnoha amatérských skupin po celém světě.

4.3 Gravitační mikročočky

Další fotometrický způsob je založen na principu mikročoček. Je dobře známo, že v okolí velmi hmotných těles je dráha světelných paprsků zdatelně zakřivená. Pokud před nějakou velmi vzdálenou hvězdou prochází slabě zářící, ale velmi hmotné těleso, můžeme zaznamenat postupný nárůst a pokles její jasnosti. Pokud okolo procházejícího tělesa obíhá ještě planeta,

může se i ona na křivce jasnosti projevit jako krátkodobé zjasnění. Pro poloměr pozorovaného Einsteinova prstence platí:

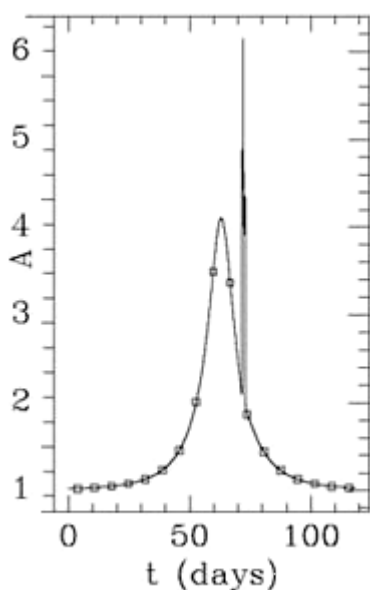
$$R_E = \left[\frac{4GM_L}{c^2} \frac{(D_S - D_L) D_L}{D_S} \right]^{1/2}$$

(M_L je hmotnost čočky a D_L a D_S jsou vzdálenosti k čočce a ke zdroji. O poměru R_E/D_L mluvíme jako o Einsteinově úhlu θ_E .)

Zvětšení (zjasnění) čočky je funkcí času:

$$A(t) = \frac{u^2(t) + 2}{u(t) [u^2(t) + 4]^{1/2}}$$

($u(t)$ je projekce úhlové vzdálenosti mezi čočkou a zdrojem v jednotkách Einsteinova poloměru. V případě, že by čočka byla bodová a body objekt - čočka - pozorovatel by se nacházely na jedné přímce, bylo by $u(t) \rightarrow 0$ a zvětšení by teoreticky bylo nekonečné.)



Na obrázku je křivka, jejíž první maximum náleží maximálnímu úhlovému přiblížení zdroje k čočce. Jestliže čočku tvoří dva objekty, v našem případě hvězda a planeta, závisí tvar křivky na poměru jejich hmotností a na úhlové vzdálenosti hvězda - planeta. Po většinu času bude křivka stejná jako v případě jednoduché čočky. Pouze na několik hodin (primární zdroj má za následek zjasnění trvající typicky několik desítek dnů) se zde projeví další zjasnění.

Doba, po kterou lze sekundární (z hlediska doby trvání, nikoli jasnosti) maximum pozorovat, závisí na hmotnosti čočkující planety. Z toho vyplývá první úskalí této metody - čočkující hvězdu je třeba neustále sledovat i několik měsíců, abychom tuto relativně krátkodobou událost zachytili. Navíc sama pravděpodobnost pozorování primárního jevu je velmi malá.

Tento nepříjemný fakt je navíc umocněn skutečností, že průběh zjasnění u jedné hvězdy lze naměřit pouze jednou a měření je tedy neopakovatelné.

Přesto zaznamenala metoda mikročoček první úspěch - roku 1998 byla tímto způsobem v rámci projektu MACHO objevena planeta s hmotností v rozmezí 1÷20 hmotností Země u hvězdy o hmotnosti cca 0,3 M_S .

4.4 Zákryt hvězdy planetou (fotometrie)

Pokud při vhodném natočení cizí planetární soustavy vůči Zemi dojde k přechodu vzdálené planety přes kotouček hvězdy, mohla by její jasnost poklesnout v rozmezí několika tisícín až setin magnitudy, což je dnešními prostředky dobře měřitelné. Například zákryt Slunce

Jupiterem, pozorovaný ze vzdálenosti 10 pc, způsobí pokles jasnosti o cca 0,02 mag. Změna jasnosti je přibližně dána vztahem:

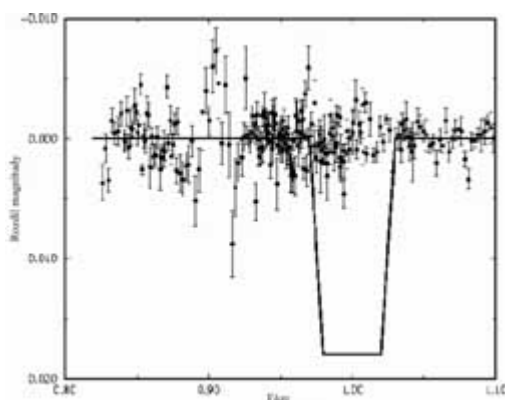
$$\frac{\Delta L}{L_*} = \left(\frac{R_p}{R_*} \right)^2$$

za předpokladu homogenní jasnosti kotoučku hvězdy.

Pro Zemi je poměr $\Delta L/L_*$ roven $8,4 \times 10^{-5}$, pro Jupitera $1,1 \times 10^{-2}$. Pokud se nám podaří určit polohu hvězdy v HR diagramu, můžeme lehce odvodit její poloměr a po naměření $\Delta L/L_*$ můžeme snadno vypočítat i R_p . Ze znalosti oběžné doby a předpokládané hmotnosti hvězdy (získané opět rozbořením spektra) můžeme z Keplerova zákona vypočítat velkou poloosu dráhy, z doby trvání zákrytu pak i sklon oběžné roviny.

Velkým úskalím této metody jsou však dvě fakta: Zaprvé – pravděpodobnost, že určitou hvězdu budeme pozorovat právě ve chvíli, kdy přes její disk přejde planeta, je velmi malá. Zadruhé – zdaleka ne všechny hvězdy svítí se stálou intenzitou. U některých se intenzita periodicky mění, ale každopádně je zapotřebí stálost jasnosti každé pozorované hvězdy důkladně prověřit. Mezi děje, které neperiodicky ovlivňují jasnost, můžeme zařadit různé koronální jevy, výtrysky hmoty apod.

Metodou tranzitní fotometrie se podařilo detekovat roku 1999 planetu u hvězdy HD 209458.



Toto je světelná křivka hvězdy HD 187123, u které pozorujeme změny radiální rychlosti díky přítomnosti planety s periodou oběhu 3,097 dne a amplitudou 72 m/s. Během 47 nocí bylo 42sekundovými expozicemi pořízeno celkem 8323 snímků. Velká shoda jednotlivých křivek naznačuje, že na povrchu hvězdy se nenachází žádné větší skvrny ani příliš nepulzuje. Důkladným proměřením snímků byla zjištěna mírná proměnlivost jasnosti hvězdy, ale do hranice 0,002 mag nebyl zaznamenán žádný přechod planety přes kotouček hvězdy. Z toho plyne, že sklon její oběžné dráhy vůči rovině pohledu je větší než 6° . Silnou čarou je na grafu vyznačena ideální křivka přechodu planety před hvězdou.

4.5 Přímé zobrazení (matematické zpracování)

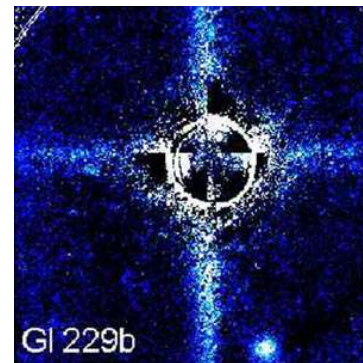
HST - první (donedávna jediný) snímek hnědého trpaslíka, obíhajícího okolo hvězdy Gl 229A. Jedná se o červeného trpaslíka spektrálního typu M1V, který je od nás vzdálen na 7 pc. Malý objekt Gl 229B se nachází 7 úhlových vteřin od hvězdy (40 AU). Je to hnědý trpaslík o hmotnosti 20÷50 Jupiterů. Slunce by na tomto snímku bylo 100× jasnější než centrální hvězda, Země by zářila 1000× méně než hnědý trpaslík a nacházela by se 40× blíže ke hvězdě - problém přímé detekce extrasolárních planet je tedy zřejmý.

Poměr jasnosti hvězdy a planety je dán závislostí:

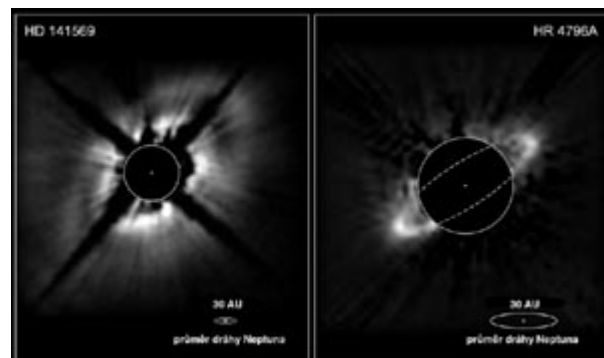
$$\frac{L_p}{L_*} = p(\lambda, \alpha) \left(\frac{R_p}{a} \right)^2$$

kde L je svítivost, R poloměr, a hlavní poloosa dráhy. Indexy p a $*$ označují planetu a hvězdu. $p(\lambda, \alpha)$ je funkce, která vyjadřuje odrazivost povrchu planety v závislosti na vlnové délce a fázi.

Poměr svítivostí je velmi malý, pro Slunce a Jupiter (v maximální elongaci) cca 10^{-9} . Ze vzdálenosti 5 pc by úhlová vzdálenost Jupitera od Slunce byla 1". Vzhledem k tomu, že pozemské pozorování se projevuje ve stejném řádu, je přímé pozorování planety pozemským dalekohledem bez využití systému adaptivní optiky nemyslitelné. Cílem zdokonalení přímých zobrazovacích metod je proto v první řadě pokus o potlačení vlivu atmosférické turbulence (adaptivní optika, pozorování z vesmíru), dále snížení rozptýleného světla hvězdy (koronální masky) a v neposlední řadě zvýšení kontrastu hvězda - planeta pozorováním na větších vlnových délkách.



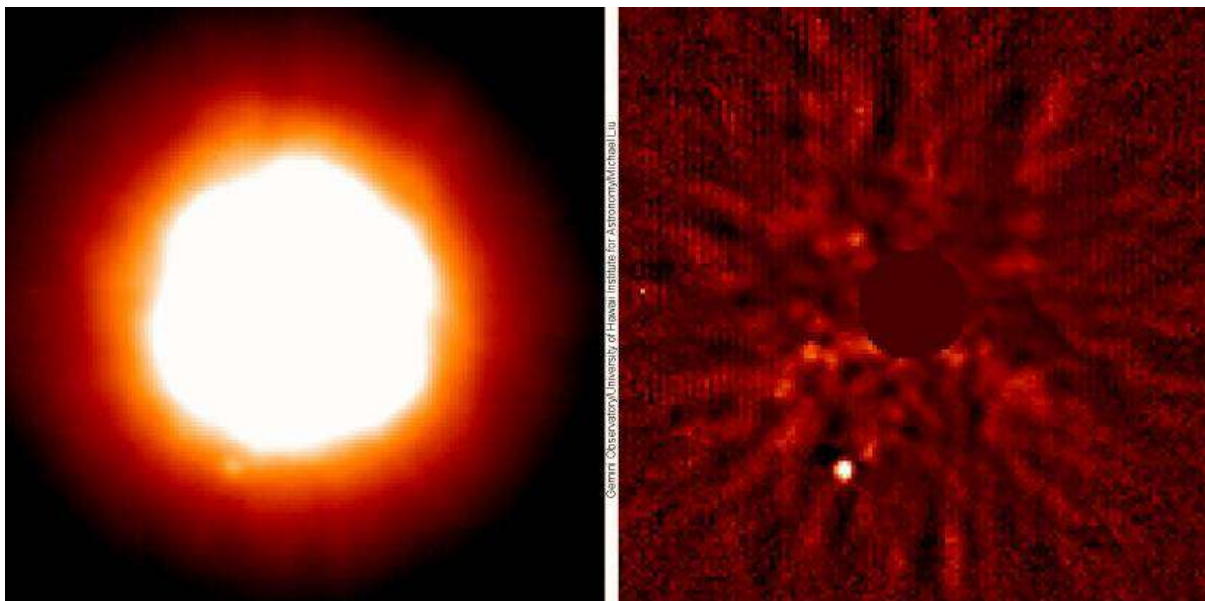
Zde na obrázku vidíme prachoplynné prstence, jak je zaznamenal v roce 1999 HST. Na levém snímku si můžeme všimnout tmavé mezery ve vzdálenosti asi 70 AU od hvězdy. Tak, jako měsíce Saturna tvoří mezery v jeho prstenci, může být i tento pás výsledkem oběhu nějaké větší planety nebo hnědého trpaslíka.



Toto je simulace 60hodinové expozice naší sluneční soustavy ze vzdálenosti 10 pc pomocí aparatury ESA Darwin Space Interferometer (plánované zařízení by se mělo skládat ze šesti 1,5metrových dalekohledů s 50metrovou základnou, obíhajících ve vzdálenosti 1 AU od Země). Tato aparatura by měla být funkční kolem roku 2015.

Tři skvrnky na obrázku jsou Merkur, Venuše a Země. Centrální hvězdu se podařilo "vynulovat" pootočením ramen interferometru o 90° kolem osy, která jí prochází.

Snímek pořízený roku 2002 ukazuje hnědého trpaslíka o hmotnosti $65 M_J$, který obíhá okolo hvězdy 15 Sge (58 ly od Země) ve vzdálenosti 14 AU. Matematické zpracování původního snímku (vlevo) dovolilo odečtení jasu hvězdy, který mnohatisíckrát převyšuje jas hnědého trpaslíka (vpravo).



4.6 Další metody

4.6.1 Přebytek infračerveného záření

Podobně jako prachoplynné disky i planety pohlcují záření hvězdy, ohřívají se a tepelnou energii vyzařují v infračervené oblasti, kde hvězda podobná Slunci příliš nesvítí. Při pohledu na naši sluneční soustavu by Jupiter byl výraznějším zdrojem tepelného záření než Slunce. Avšak i infračervené záření je podobně jako viditelné světlo obtížně detekovatelné.

4.6.2 Rychlost rotace hvězdy

Ze spektra hvězdy lze určit mimo jiné i její rotační periodu. Předpokládá se, že hvězdy, okolo nichž krouží planetární soustava, předaly část svého rotačního momentu právě svým planetám. U pomalu rotujících hvězd lze tedy usuzovat na planety, ale nejde o metodu příliš průkaznou a kromě toho nám vůbec nic neřekne o struktuře planetárního systému.

4.6.3 Přímé pozorování

Již dnes se plánuje stavba obrovských dalekohledů obíhajících daleko v prostoru sluneční soustavy, které by měly být schopny některé planety přímo pozorovat a dokonce snad rozeznávat detaily na jejich povrchu (např. projekt Planet Imager).

4.6.4 Zpoždování záblesků pulsarů

Další, již dříve zmíněná metoda, kterou lze odhalit existenci neviditelných průvodců, je použitelná pouze u pulsarů. Tak, jak oběžnice hýbe pulsarem, sledujeme zpoždování nebo

zrychlování jednotlivých záblesků. Tento objev byl velkým překvapením zejména proto, že hvězda, která se stane pulsarem, žije velmi krátkou dobu. Z toho vyplynulo, že vznik planet je z astronomického hlediska poměrně rychlou událostí. Samotný výbuch, který stadiu pulsaru předchází, planetám nijak zvlášť neublíží (z hlediska mechaniky). Dlužno ovšem podotknout, že na původ planet u pulsarů neexistuje jednotný názor. Mnozí astronomové se domnívají, že oběžnice mohou vzniknout v okolí hvězdy během posledních fází jejího bouřlivého života. Touto metodou byla odhalena existence třetího tělesa v binárním pulsaru PSR B1620-26 v kulové hvězdokupě M4 v souhvězdí Štíra, vzdálené od nás 1,8 kpc. Pulsar má za průvodce bílého trpaslíka a hnědého trpaslíka nebo exoplanetu o hmotnosti asi $3 M_J$.

4.6.5 Vylučovací metoda

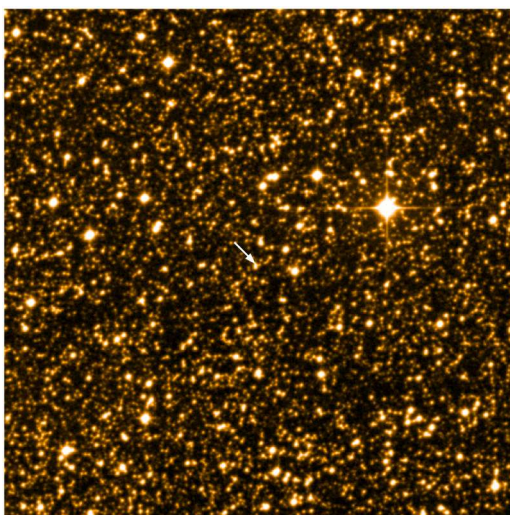
V současné době se provádí systematický výzkum, takže se postupuje i vylučovací metodou. Je nám známo již 21 hvězd, které s prakticky stoprocentní jistotou žádné planetární průvodce nemají.

5 Hledání

5.1 Objevení dvou planet díky zákrytům

Pomocí přístroje FLAMES na 8,2m teleskopu VLT Kueyen na ESO Paranal (Chile) byly v březnu 2004 získány přesné hodnoty radiálních rychlostí čtyřiceti jedné hvězdy, vybraných na základě přehlídky OGLE, jejichž jasnost se periodicky měnila. Periodické změny jasnosti mohou být známkou existence hvězdného nebo planetárního průvodce v systému. U dvou hvězd byly detekovány změny radiálních rychlostí odpovídající průvodci o hmotnosti planety o extrémně krátké době oběhu. Výsledky potvrdily existenci nové třídy obřích planet označovaných "horcí Jupiteri" - díky jejich velikosti a vysoké povrchové teplotě. Obíhají velmi blízko hvězd, doba oběhu je menší než dva (pozemské) dny.

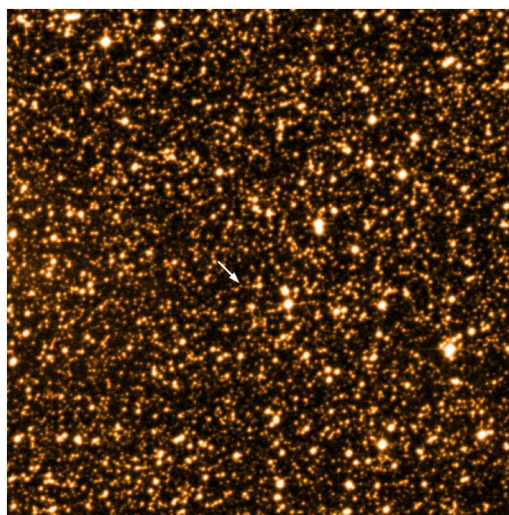
Snímky vybraných hvězd



OGLE- TR-113
(Digital Sky Survey)

ESO PR Photo 14a/04 (7 May 2004)

© European Southern Observatory

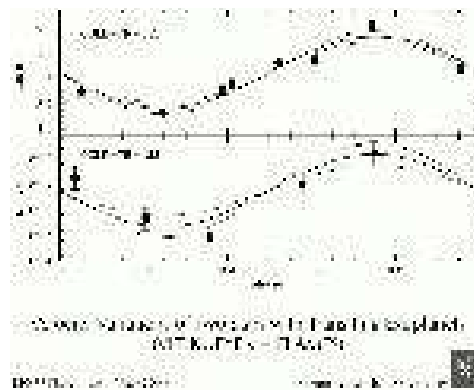
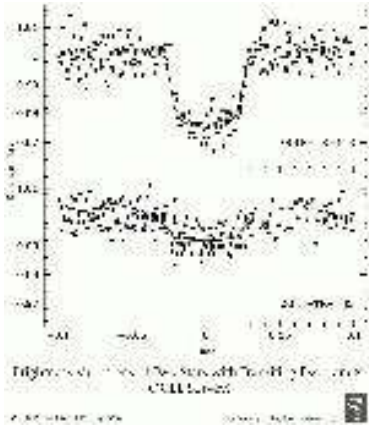


OGLE- TR-132
(Digital Sky Survey)

ESO PR Photo 14b/04 (7 May 2004)

© European Southern Observatory

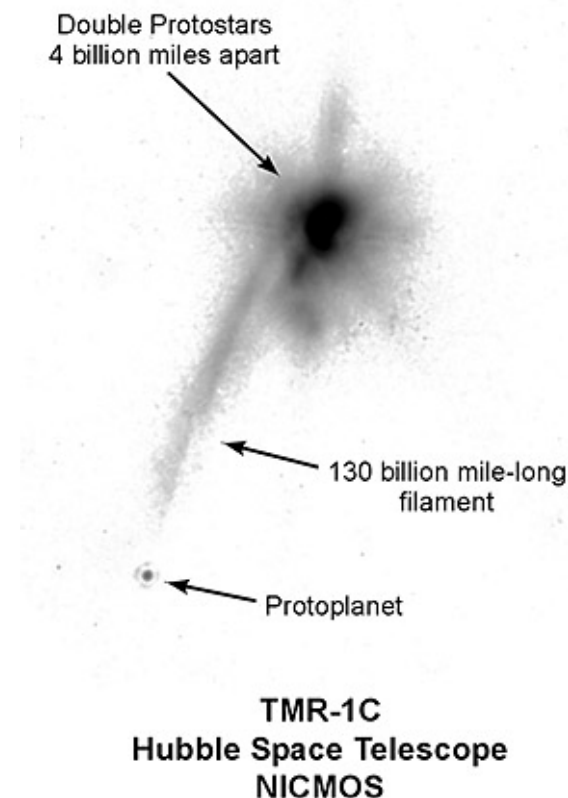




Světelná křivka, rychlosti radiálních rychlostí obou objevených exoplanet

5.2 Odvržená „protoplaneta“

Na jaře roku 1998 způsobil tento snímek velký rozruch. Zdálo se, že se jedná o první přímý pohled na exoplanetu – zdánlivě vyvrhnutou do hlubokého vesmíru její mateřskou hvězdou. Objekt TMR-1C leží na obloze ve směru souhvězdí Býka - v oblasti formování hvězd. Obrázek vypadá, jako by se objekt nacházel na konci podivného světlého vlákna, které bylo vymršťeno z okolí nově zformovaného páru dvojhvězdy.



Následná pozorování však bohužel ukázala, že zmíněný objekt má povrchovou teplotu asi 2600 K a jedná se o extrémně malou a chladnou hvězdu.

5.3 Vyhledávací projekty

Ve světě v současné době pracuje přibližně dvacet vyhledávacích programů pozemských a jeden ve vesmíru (HST). Každý projekt se specializuje na jednu z metod vyhledávání planet, nejvíce pak na metodu radiálních rychlostí. Využívány jsou nejmodernější astronomické přístroje (např. Keck I a II, HST), po prvních úspěšných nálezech pátrání pokračuje ve zvýšené míře. Ještě mnohem více jich je v plánu, především pak ty vesmírné, které počítají s vypouštěním velkých dalekohledů až na dráhy mezi Marsem a Jupiterem. Takové dalekohledy by už byly teoreticky schopny vybrané planety zobrazit a zachytit snad i větší podrobnosti na jejich povrchu nebo v jejich atmosféře. S těmito projekty se ale počítá až do doby kolem roku 2010 (např. Planet Imager, Terrestrial Planet Finder nebo NGST).

6 Pár vybraných exoplanet

6.0.1 51 Pegasi b

První planeta Jupiterova typu, která byla objevena a potvrzena u hvězdy podobné Slunci. Byla objevena dvěma švýcarskými astronomy (Mayor a Queloz) metodou radiálních rychlostí. Tento objev potvrdil myšlenku, že se ve vesmíru mohou nacházet planety Jupiterova typu. Rychlé výpočty ukázaly, že planeta může mít atmosféru, její povrchová teplota musí však vzhledem k parametrům oběžné dráhy (vzdálenost 0,05 AU, oběžná doba $4,2293 \pm 0,0011$ dne - je svému slunci osmkrát blíže než Merkur) být kolem 1200 K.

S objevem této planety byly zpočátku trochu problémy. Dr. Gray v roce 1997 publikoval práci, v níž vysvětloval změny radiálních rychlostí u 51 Pegasi pomocí oscilací povrchu

hvězdy. Ale další pozorování a nové výpočty ukázaly (a nakonec i Gray svoji práci sám popřel), že jde skutečně o oběžnici.

6.0.2 PSR B1257+12 A,B,C,D

Alexander Wolszczan a Dale Frail objevili první planetární systém, který obíhá kolem milisekundového pulsaru. Pulsar byl objeven v roce 1990 Wolszczanem pomocí radioteleskopu Arecibo na Portoriku. První dvě planety terestrického typu tohoto systému byly objeveny v roce 1991, třetí velikosti Měsíce pak v roce 1994 a nakonec planeta čtyřikrát hmotnější než Saturn v roce 1996. Pokaždé díky zpoždování nebo zrychlování signálů pulsaru.

Existence planety měsíčního typu je tak trochu sporná. Její vypočítaná oběžná doba totiž téměř souhlasí s rotační dobou našeho vlastního Slunce, takže je zde malá možnost, že poruchy signálu mohou být způsobeny právě naším Sluncem.

6.0.3 50 Andromedae b,c,d

Tato hvězda má přinejmenším tři planety Jupiterova typu. Vlastní hvězda je bohatá na kovy, vzdálená 16,5 pc od Slunce a s povrchovou teplotou kolem 6100 K a hmotností asi 1,3 hmotnosti Slunce. Nejvnitřnější planeta vážící 0,6 hmotnosti Jupitera je svou drahou velmi podobná 51 Pegasi b, obíhá s periodou 4,61 dne ve vzdálenosti 0,059 AU od své hvězdy. Druhá planeta je dvakrát hmotnější než Jupiter a oběhne ypsilon Andromedae za 242 dní ve vzdálenosti 0,83 AU, což zhruba odpovídá dráze Venuše v naší soustavě. Třetí těleso je 4,1krát hmotnější než největší planeta naší sluneční soustavy a oběhne svou hvězdu za 1269 dní (3,47 roku) ve vzdálenosti 2,5 AU.

6.0.4 Ro Coronae Borealis b

Ro CrB je asi 10 miliard let starý protějšek našeho Slunce (hmotností a spektrálním typem) vzdálený 55 světelných let. Jeho planetární průvodce váží 1,13krát více než Jupiter a obkrouží svou mateřskou hvězdu jednou za 40 dní ve vzdálenosti 0,25 astronomické jednotky; v naší sluneční soustavě by obíhal uzavřen v dráze Merkuru.

6.0.5 Ross 780 b

Ross 780 (Gliese 876) je 15 světelných let vzdálená proměnná hvězda v souhvězdí Vodnáře (IL Aqr), řadící se do skupiny červených trpaslíků. Tato planeta byla objevena nezávisle švýcarsko-francouzskou skupinou a skupinou SFSU, která používá teleskopy Keck I a II na Havajských ostrovech. Planeta je větší než Jupiter (2,1 hmotnosti Jupitera) a obíhá kolem své mateřské hvězdy po velmi eliptické dráze (excentricita 0,27) jednou za 61 dní ve vzdálenosti 0,21 AU.

6.0.6 70 Virginis b

70 Virginis b je "prototypem" hnědého trpaslíka vážícího 6,6krát více než Jupiter obíhajícího hvězdu slunečního typu po velmi excentrické dráze ($e=0,40$) jednou za 116,6 dní ve vzdálenosti 0,43 AU.

6.0.7 Gliese 86 c

Gliese 86 je poněkud chladnější hvězda o hmotnosti 0,79 našeho Slunce ležící 35 světelných let od Země. Gliese 86 je dvojhvězdou, Gliese 86 b se nachází přibližně 15 AU od Gliese 86 a. Objevená planeta pak obíhá kolem větší z hvězd téměř po kruhové dráze ve vzdálenosti 0,11 AU s periodou 15,84 dne. Těleso planety je 4,9krát hmotnější než Jupiter a teplota na povrchu planety se musí podle výpočtů pohybovat ve stejných hodnotách jako na našem Merkuru - kolem 400°C.

7 Budoucnost

Současné metody pro vyhledávání planet nejsou zatím natolik přesné, aby umožnily hledání planet podobných Zemi. Avšak se zdokonalující se technikou bude možné objevovat stále menší a vzdálenější exoplanety. Většina dosud objevených exoplanet obíhá příliš blízko svých hvězd a jedná se o tělesa s hmotností odpovídající hmotnosti plynných obrů, které známe z naší sluneční soustavy.

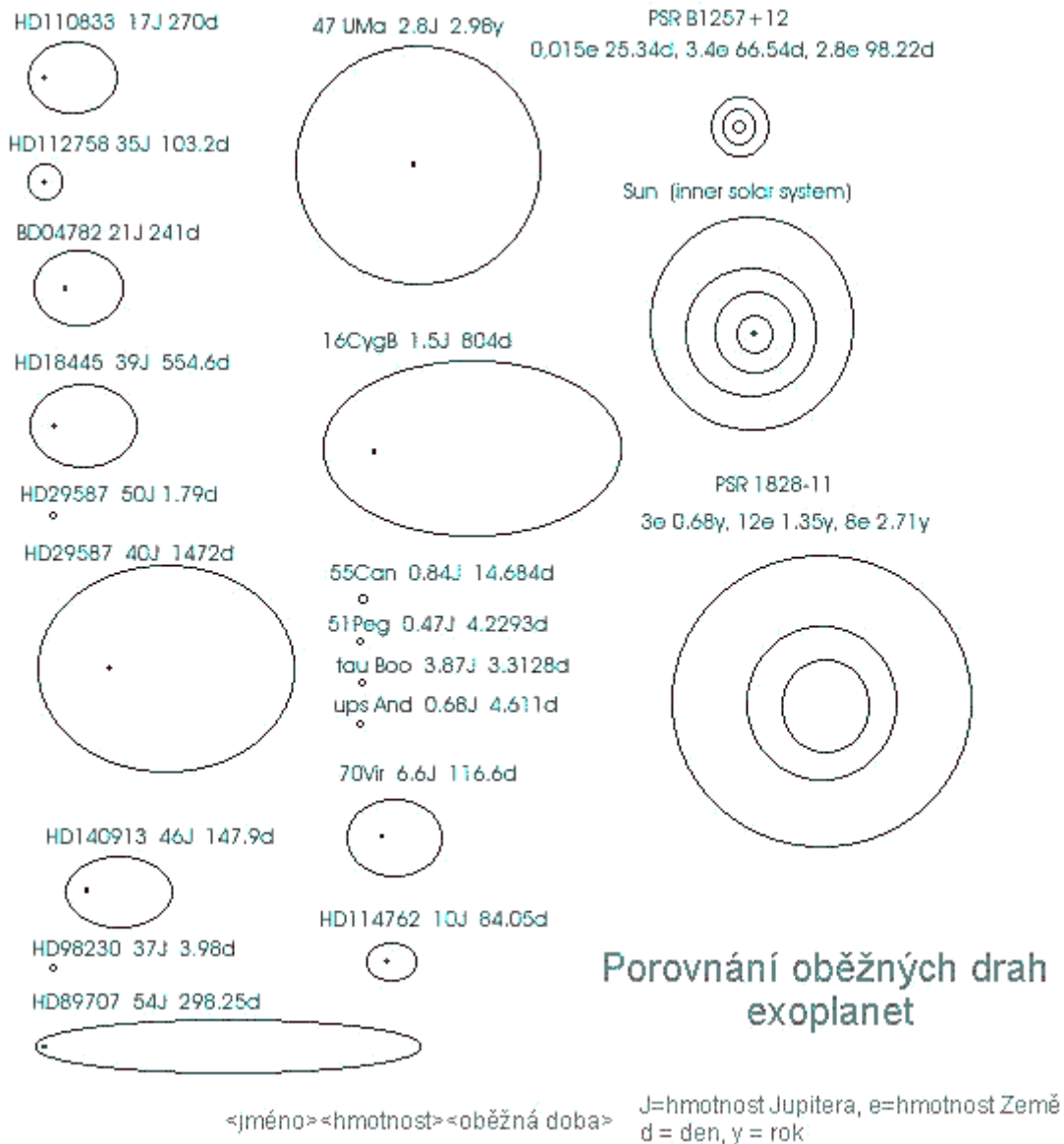
Velkou výzvou je objevování mimozemských forem života. Planetologové si dovedou přestavit život pouze na planetě podobné Zemi, tedy na planetě s pevným povrchem, atmosférou a vodou. Vývoj se tedy bude ubírat k metodám pro detekci života na takových planetách.

Dalším cílem je rozvoj přímého pozorování exoplanet, který by nám mohl umožnit pozorovat detaily na povrchu planet nebo dokonce přímé projevy života. To je však zatím otázka vzdálenější budoucnosti.

8 Přílohy

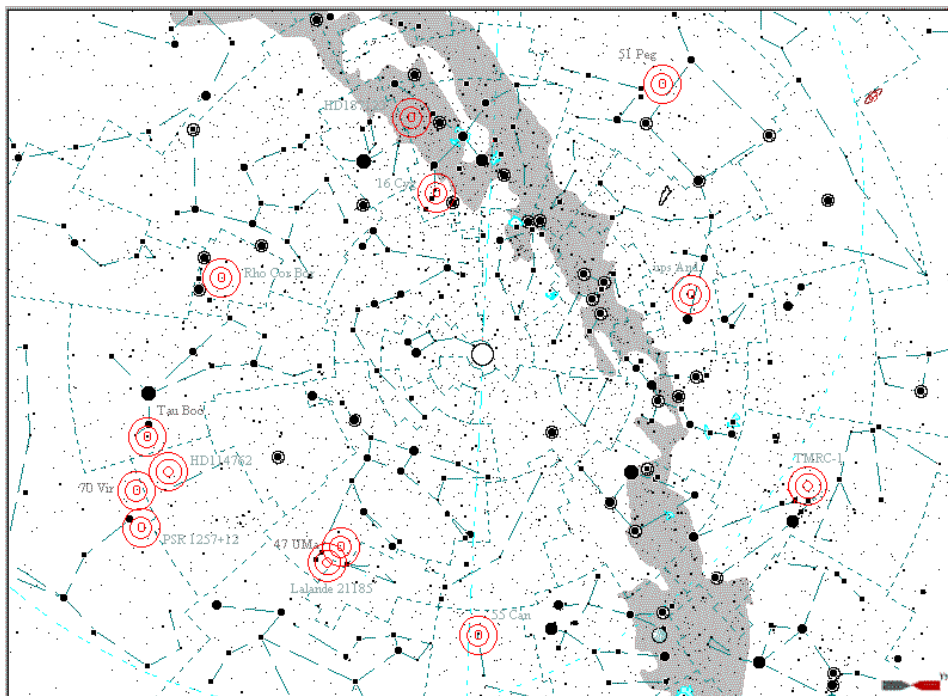
8.1 Oběžné dráhy

Na obrázku jsou dobře patrné obrovské rozdíly mezi drahami objevených exoplanet.

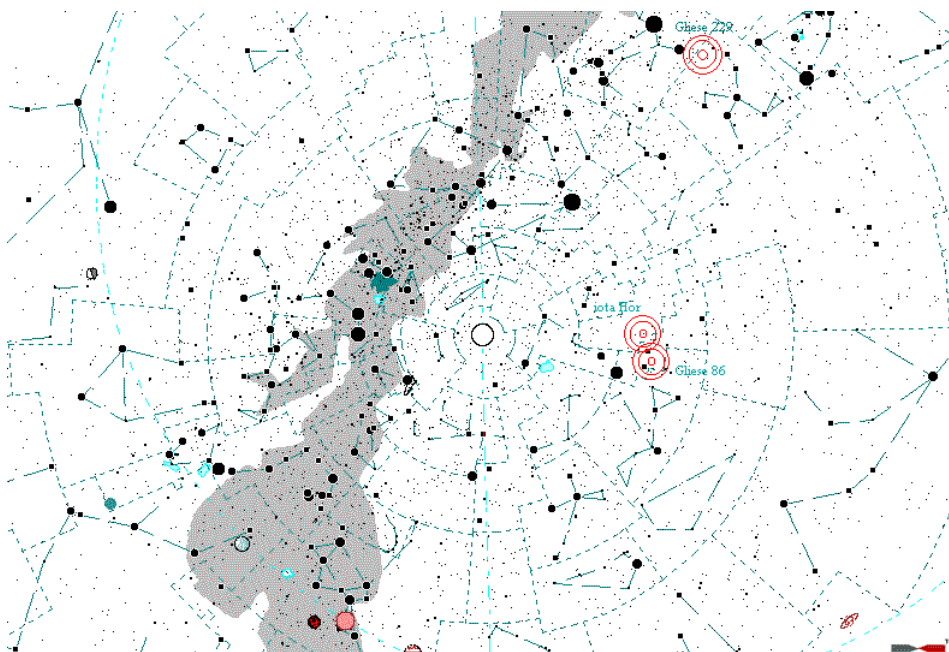


8.2 Mapy okolních exoplanet

Severní obloha



Jižní obloha



8.3 Fotografie exoplanety

Ve hvězdném systému 2M 1207, který se nachází asi 230 světelných let od Země a na obloze jej najdeme na pomezí souhvězdí Kentaura a Hydry, se pravděpodobně podařilo nasnímat poprvé v historii exoplanetu!



Infračervený snímek exoplanety pořízený na observatoři VLT v Chile.

9 Zdroje

<http://www.obspm.fr> - Katalogy hvězd a planet

<http://astro.sci.muni.cz> - Planeta uprchlík

<http://www.aldebaran.cz> - Bulletin, astrofyzika

<http://www.astro.cz> - Dvě zajímavé exoplanety

<http://www.volny.cz/hvezdarna> - První zmínky o exoplanetách

http://www.ian.cz/detart_fr.php - Lov na exoplanety

<http://www.asu.cas.cz> - Michal Švanda: Exoplanety

<http://www.novinky.cz/04/75/61.html> - První snímek exoplanety?!