

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích

Pedagogická fakulta – Katedra fyziky

Extrasolární planety

Bakalářská práce

Vedoucí práce: RNDr. Petr Jelínek, Ph.D.

Autor: Ing. Lucie Levá

Anotace

Tématem předkládané bakalářské práce jsou extrasolární planety. Jedná se o téma, kterému je zejména v posledních patnácti letech věnována velká pozornost a nejinak tomu bude zcela jistě i v budoucnu. První část práce je věnována teorii vzniku naší sluneční soustavy, rozdělení exoplanet a hledání obyvatelných planet. Další část je již zaměřena prakticky a popisuje metody hledání extrasolárních planet. Nejvíce pozornosti je věnováno metodě měření radiální rychlosti hvězdy za pomoci spektrografu, jehož princip fungování je dále podrobněji rozebrán. Závěrečná část je věnována zajímavým objevům v poslední době a přehledu několika významných exoplanet.

Abstract

The subject of this bachelor work is the extrasolar planets. In recent years especially a great attention is being paid to this issue and this won't change in the future. The first part of this work concentrates on the theory of our Solar system formation, exoplanets classification and searching for habitable planets. Next part is focused practically and describes the methods of detecting extrasolar planets. Particular attention is being paid to the radial velocity method using the spectrograph, the function of which is further described in details. The final part deals with interesting discoveries in recent time and survey of several significant exoplanets.

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci jsem vypracovala samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu literatury.

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své bakalářské práce, a to v nezkrácené podobě elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách.

V Českých Budějovicích dne 8. prosince, 2008.

.....

Na tomto místě bych ráda poděkovala svému vedoucímu bakalářské práce
RNDr. Petru Jelínkovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky při zpracování mé práce.

Obsah

1 Úvod.....	7
2 Vznik a vývoj sluneční soustavy	8
3 Historie objevů a výzkumu extrasolárních planet.....	10
3. 1 Vědecký a filozofický význam hledání dalších „Zemí“	10
3. 2 Historie objevování extrasolárních planet	12
4 Druhy extrasolárních planet.....	15
4. 1 Známé extrasolární planety.....	15
4. 2 Druhy extrasolárních planet.....	16
4. 2. 1 Různost exoplanet.....	16
4. 2. 2 Ultrahorké Jupitery	16
4. 2. 3 Horké Jupitery.....	17
4. 2. 4 Nadobří	17
4. 2. 5 Obří planety s dlouhou oběžnou dobou	18
4. 2. 6 Horké Neptuny.....	19
4. 2. 7 Terestrické planety.....	20
4. 3 Statistika známých planet	20
5 Vztah hmotnost – poloměr u exoplanet	25
5. 1 Plynní obři o nízké hustotě	26
5. 2 Plynní obři s vysokou hustotou.....	26
5. 3 Terestrické planety.....	26
6 Hledání obyvatelných planet	27
6. 1 Obyvatelnost	27
6. 2 Definice obyvatelnosti a obyvatelné zóny	27
6. 3 Hranice obyvatelné zóny v naší sluneční soustavě.....	27
6. 4 Hranice obyvatelné oblasti pro jiné hvězdy.....	28
7 Způsoby detekce extrasolárních planet u vzdálených hvězd	30
7. 1 Objevování exoplanet	30
7. 2 Spektroskopická metoda měření radiální rychlosti hvězd.....	30
7. 2. 1 Současný stav techniky: optická dopplerovská spektroskopie	30
7. 2. 2 Infračervená dopplerovská spektroskopie	32
7. 2. 3 Popis metody měření radiální rychlosti hvězdy.....	33
7. 2. 3. 1 HARPS: Lovce planet.....	35

7. 2. 4 Měření poloh hvězdy	43
7. 2. 5 Sledování zákrytu hvězdy planetou	45
7. 2. 6 Gravitační mikročočka.....	47
7. 2. 7 Metoda zpoždování záblesků pulsarů	49
8 Zajímavé objevy extrasolárních planet v poslední době.....	51
8. 1 Nejmenší dosud objevená planeta.....	51
8. 2 Tři superzemě obíhající kolem jedné hvězdy	52
8. 3 První vyfotografovaná planeta u hvězdy podobné Slunci	54
9 Přehled vybraných exoplanet.....	57
Závěr	64
10 Seznam použité literatury	65
11 Seznam obrázků.....	66
12 Seznam grafů	67
13 Seznam tabulek	68

1 Úvod

Extrasolární planeta neboli exoplaneta je planeta nacházející se mimo naši sluneční soustavu a tudíž obíhající kolem jiné hvězdy, než je Slunce [1–3]. První potvrzený objev exoplanety byl oznámen vědci Michele Mayorem a Didierem Quelozem ze Ženevské observatoře v říjnu 1995 na konferenci ve Florencii. Ke konci října 2008 bylo známo více než 300 exoplanet a jejich počet se neustále zvyšuje. Jejich hledání a následný výzkum umožňuje srovnávání naší sluneční soustavy s cizími planetárními soustavami. Ukazuje se, že tyto cizí soustavy jsou velmi rozmanité a je možné, že by zde mohl existovat život, byť pravděpodobně v jiné formě než na Zemi. Studium exoplanet může rovněž přispět k zodpovězení otázky vzniku a vývoje Země a dalších planet naší sluneční soustavy.



Obr. 1: Objevitelé první exoplanety 51 Peg b Michel Mayor a Didier Queloz [4]

2 Vznik a vývoj sluneční soustavy

Vzniku sluneční soustavy astronomové rozumějí stále jen částečně. Pro pochopení jejího vzniku je potřeba mít na paměti, že sluneční soustava není jen Slunce, planety, komety a planetky, ale skládá se také z něčeho, co na první pohled nelze spatřit. Kromě větších těles, ze kterých je naše sluneční soustava tvořena, je zde mezi nimi poměrně velké množství prostoru. Tento prostor není úplně prázdný, ale je vyplněný ionizovaným plynem – plazmatem, který vyvrhuje naše Slunce, tzv. slunečním větrem. Dále je v tomto prostoru velké množství prachových částic, což jsou drobná zrníčka o velikosti od desetin do stovek mikrometrů a dále tzv. kosmické záření. To jsou velmi energetické částice, z nichž většina pochází z našeho Slunce, a některé pocházejí z okolního mezihvězdného prostoru.

Před vznikem sluneční soustavy zde byly právě jen tyto drobné částičky a záření. Všechna tělesa – planety, planetky ale i Slunce vznikla z obřího plynového oblaku. Tato obří molekulární oblaka jsou obrovské útvary, které mají hmotnosti řádově několika milionů hmotnosti Slunce a obsahují v sobě tzv. hustá jádra, ze kterých potom planetární soustavy a hvězdy obecně vznikají. Molekulární oblaka jsou z našeho pohledu poměrně řídká, jejich nejhustší části dosahují hustot, kde v jednom cm^3 je řádově milion částic. Jedná se především o jádra vodíku – protony, ale to je pořád o mnoho řádů méně, než je nejlepší vakuum, jaké se v laboratorních podmínkách podařilo na Zemi vytvořit.

Dnes astronomové vědí, že pokud takový obří oblak dostane impuls zvenčí, začne se smršťovat a v jeho středu se vytvoří Slunce a planety. Naše sluneční soustava vznikala v poměrně bouřlivém prostředí, ve kterém se nacházely velké hvězdy, které následně vybuchly jako supernovy. Důkazem toho jsou radioaktivní prvky, které byly nalezeny v meteoritech. Konkrétně se jedná o izotop železa, o kterém se ví, že musel vzniknout v nitrech velkých hvězd. Za vznik nové hvězdy, nové planetární soustavy vděčíme vlastně smrti hvězdy jiné. Oblak se po impulzu začne smršťovat a uvnitř, kde je nejhustší a nejteplejší vznikne zárodek budoucí hvězdy.

Není však jasné, proč se začnou vytvářet také planety. Proces jak planety vznikají, není ještě zcela jasný. Nejvíce preferovaný model říká, že disk se skládá jednak z plynu a také z určitého množství prachu. Prachová zrna se začala postupně spojovat, začala tzv. koagulovat do větších a větších objektů. Z těchto objektů následně vznikaly

tzv. planetesimály, které se srážely, a vznikala větší tělesa, až se nakonec vytvořila tělesa velikosti na příklad naší Země nebo i větší. Větší planety vznikaly tak, že se na tato kamenná jádra nabaloval plyn ze zbytku disku.

Většina procesů, které podstatným způsobem ovlivnily vlastnosti těles sluneční soustavy, proběhla už v první miliardě let od jejího vzniku. První pětina doby existence naší sluneční soustavy byla plná velkých proměn. Pak ovšem, po dlouhé tři a půl miliardy let až do současnosti nastává období relativně pomalého vývoje všech těles. Toto období však není nezajímavé, už třeba proto, že na Zemi vznikl a začal se vyvíjet život.

3 Historie objevů a výzkumu extrasolárních planet

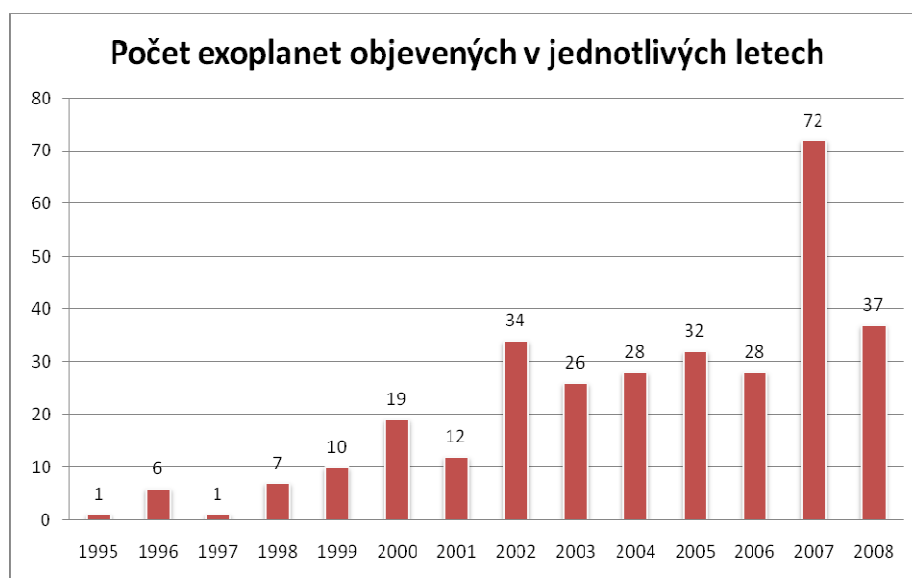
3.1 Vědecký a filozofický význam hledání dalších „Zemí“

Myšlenka, že domov lidstva ve vesmíru je pouze jedním z mnoha světů, byla přítomna v celé řadě kultur napříč historií lidstva. Jako nit se táhne od starověku, přes středověk, až po současnost. Pohled na vesmír ve středověké Evropě postavil Zemi na speciální pozici a zamezil spekulacím o možnosti existence jiných obydlených světů. Nehledě na to, vyjádřil německý filozof a teolog 13. století Albert Veliký myšlenku, že: „Existuje mnoho světů nebo je pouze jeden jediný? To je jedna z nejvznešenějších a nejušlechtlejších otázek ve studiu přírody“. O dvě století později prohlásil na filozofickém základě Mikuláš Kusánský, že nebesa oplývají obydlenými světy. Teorie plurality světů dostala vědecký základ v polovině 16. století díky Kopernikově heliocentrickému učení, které přesunulo Zemi ze středu sluneční soustavy, takže již bylo možné si představit výskyt neviditelných světů ve formě jiných slunečních soustav, jak napsal Giordano Bruno: „Existuje bezpočet sluncí a bezpočet zemí, všechny rotující kolem svých sluncí přesně stejným způsobem jako šest planet naší soustavy. My vidíme pouze ta slunce, protože jsou největšími objekty a září, ale jejich planety nám zůstávají neviditelné, protože jsou menší a nezáří. Nesčetné světy ve vesmíru nejsou horší nebo méně obydlené než naše Země“. Tyto myšlenky nebyly v mrazivém protireformačním prostředí tehdejší doby oblíbené a Giordano Bruno byl nakonec v roce 1600 upálen na hranici. Avšak o méně než desetiletí později na základě svých pozorování Galileo Galilei zjistil, že náš Měsíc, spíše než dokonalá koule, je ve skutečnosti hornatý svět a poté, že planetám podobné objekty (měsíce) obíhají kolem Jupiteru stejně, jako Měsíc obíhá kolem Země. Postupné odsunování lidské pozice ze středu vesmíru se stalo nevyhnutelným. Dnes víme, že Země je jedním z mnoha těles obíhajících kolem Slunce; Slunce obíhá kolem středu galaxie Mléčné dráhy spolu s dalšími 300–400 miliardami hvězd; ve vesmíru existuje velké množství galaxií, jako je Mléčná dráha.

A přesto je naše planeta Země něčím jedinečná – ze všech planet ve sluneční soustavě pouze Země prokazatelně oplývá životem. Žádná planeta v naší sluneční soustavě není vhodná pro takový život, jak ho známe na naší Zemi a pokud máme zjistit, zda existují jiné obydlené světy než Země, musíme se zaměřit na hvězdy mimo

naši sluneční soustavu. Aby mohla být dokončena Kopernikova „revoluce“, je zapotřebí pátrat po extrasolárních planetách, které mají podobnou velikost jako naše Země.

Počátkem devadesátých let došlo k objevu prvních planet, obíhajících kolem jiných hvězd než je naše Slunce, a to nejprve nepřímo, pomocí účinků, které měly planety na pohyb své mateřské hvězdy a pak i přímo. Ke konci října 2008 byla známa existence 313 planet obíhajících okolo jiných hvězd, z toho asi 10 % je možno zkoumat přímo. Všechny tyto planety, až na pár výjimek, mají více než desetkrát větší hmotnost než Země a v současné době nejsme schopni detekovat planety podobné Zemi, obíhající kolem hvězdy podobné Slunci, které by se nacházely ve vzdálenosti menší než 4 ly (z angl. light year – světelný rok, $1 \text{ ly} = 9,46 \cdot 10^{15} \text{ m}$ [4]), což je přibližně vzdálenost od Země k nejbližší hvězdě Proxima Centauri.



Graf 1: Počet objevených exoplanet v jednotlivých letech [5]

Vedle hledání a charakterizování planet velikosti Země je cílem stanovit, zda složení naší sluneční soustavy – kamenné planety obíhající v blízkosti mateřské hvězdy a četné obří planety na vzdálenějších oběžných drahách – je typické. V současné době je k dispozici dostatek informací na to, aby bylo možné říci, že více než 15 % hvězd podobných Slunci poskytuje útočiště obřím planetám a i planety o velikosti menší než je velikost Neptunu jsou poměrně běžné. Nejvíce podobné Zemi co do hmotnosti jsou tzv. superzemě, zatím celkem šest planet, které byly objeveny v červnu 2008. Hmotnost nejmenší z nich je odhadována na 3,3násobek hmotnosti naší Země.

Lidstvo stojí dnes na prahu zodpovězení nejstarších otázek, jaké si klade: je náš svět tím jediným ve vesmíru, který je vhodný pro život, tak jak jej známe? Většina lidí by odpověděla, že ne, ale pouze proto, že Kopernikovská myšlenka je příliš zakořeněná v naší moderní kultuře. Co kdybychom byli natolik vzácní, že žádná jiná Země v dosahu moderních astronomických dalekohledů neexistuje? Jak bychom reagovali na potvrzenou prázdnotu, kterou by nám vesmír nabízel? Vedla by naše ojedinelost k hlubokému smyslu pro víru nebo hluboké osamělosti? Posílilo by to lidské odhodlání přežít, vyřešit své politické problémy a problémy životního prostředí? Byli bychom si díky své samotě ve vesmíru více vědomi cenné jedinečnosti našeho intelektu a uvědomění?

3. 2 Historie objevování extrasolárních planet

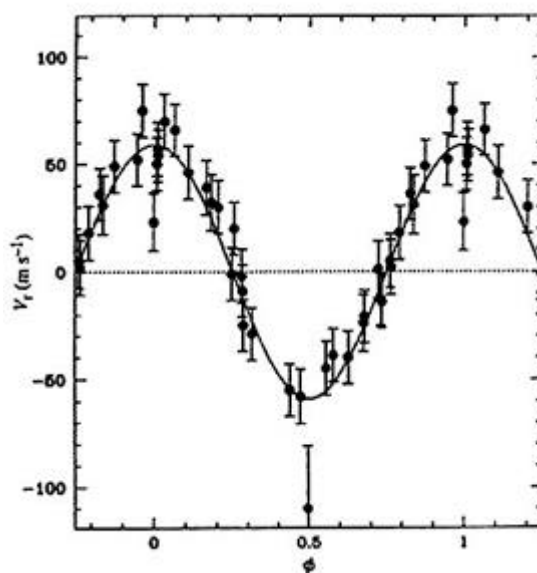
První tělesa planetárních hmotností obíhající okolo hvězd byla objevena metodou měření zpoždování záblesků pulsarů roku 1992 – ty však tvoří zcela samostatnou skupinu. Roku 1995 byla metodou měření Dopplerova posuvu u radiálních rychlostí mateřských hvězd objevena první extrasolární planeta. Exoplaneta obíhá kolem hvězdy 51 Pegasi a má hmotnost podobnou Jupiteru. Má však extrémně malou vzdálenost (7,5 milionů km) od hvězdy, což vyvolalo pochybnosti o správnosti interpretace naměřených dat. Z pozorované neměnnosti tvaru spektrálních čar hvězdy 51 Peg v závislosti na oběžné době exoplanety však plyne, že interpretace je správná; kromě toho má hvězda stálou jasnost s přesností $\pm 0,0007$ magnitudy (magnituda – veličina používaná v astronomii udávající jasnost objektu na obloze). Další měření všechny parametry exoplanety potvrdila.

Vzdálenost hvězdy 51 Peg byla určena na 48,3 ly. Hvězda o hmotnosti 1,12násobku hmotnosti Slunce je stará asi 4 miliardy let a do vzdálenosti 300 milionů kilometrů od ní neobíhá žádná další exoplaneta s hmotností Jupiteru či větší.

Od prvního potvrzeného objevu exoplanety roste počet nově objevených velmi rychlým tempem. Jak již bylo zmíněno výše, ke konci října 2008 je jich známo 313, a to u 267 různých hvězd hlavní posloupnosti severní i jižní oblohy. Ve 32 systémech byla nalezena více než jedna planeta.



Obr. 2: Výtvarné pojetí: Exoplaneta 51 Peg b se svou mateřskou hvězdou [5]



Graf 2 : Křivka radiální rychlosti hvězdy 51 Peg získaná pomocí spektrografu Elodie v observatoři Haute-Provence [9]

Exoplanetám se zatím nedávají žádná jména, ale jsou označovány názvem hvězdy a malým písmenem podle abecedy, přičemž „a“ je vyhrazeno centrální hvězdě. První objevená planeta u příslušné hvězdy má tedy za svým názvem písmeno „b“, další písmeno „c“, atd. Příklady názvů exoplanet jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 1: Příklady názvů exoplanet

Název mateřské hvězdy	Název exoplanety
47 Ursae Majoris	47 Ursae Majoris c
OGLE-2005-BLG-169L	OGLE-2005-BLG-169L b
Gliese 876	Gliese 876 d
AB Pictoris	AB Pictoris b
Upsilon Andromedae	Upsilon Andromedae c

Nejvíce exoplanet je zatím známo díky metodě přesného měření radiálních rychlostí mateřských hvězd. Další slibnou metodou, zejména pro potvrzení objevů, je přesné měření malých poklesů jasnosti mateřské hvězdy při přechodu exoplanety přes hvězdný kotouč. Několik exoplanet bylo objeveno metodou gravitační mikročochky, měřením polohy hvězd anebo snímkováním. Všechny zmíněné metody jsou podrobněji popsány v kapitole 7.

4 Druhy extrasolárních planet

4.1 Známé extrasolární planety

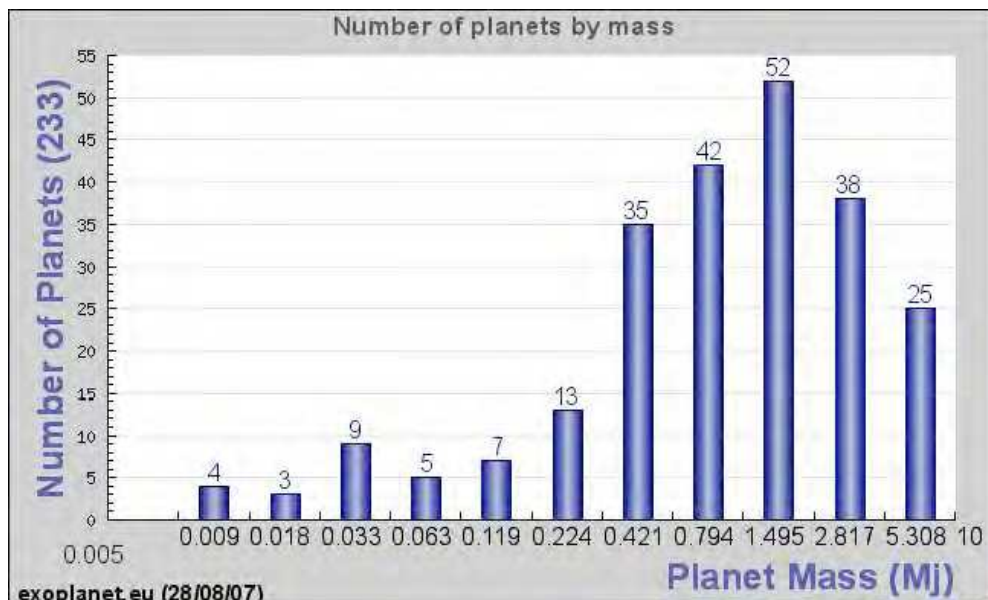
Planety a další tělesa naší planetární soustavy byly objeveny v průběhu stovek let teleskopického pozorování a během více než čtyřiceti let vesmírných misí vybavených roboty. Máme snímky bouří vířících čpavkových mraků na Jupiteru, detailní pohledy na velkou tmavou skvrnu na Neptunu, obrázky horkého povrchu Venuše a robotů zkoumajících prašná panoramata a oranžové nebe na Marsu. V naší sluneční soustavě se většina velkých planet nachází na stabilních, téměř kruhových oběžných drahách s jasným rozlišením mezi kamennými – terestrickými planetami ve vnitřní oblasti a vzdálenými obřími plynnými planetami. Takovéto uspořádání podporuje teorii formování planet, podle které planety vznikly z převážně nehybného disku plynu a prachu, který obíhal nově vzniklé Slunce.

Jak již bylo zmíněno dříve, v roce 1995 na konferenci v Itálii oznámil Michel Mayor a Didier Queloz svůj objev planety kroužící v blízkosti hvězdy podobné Slunci – 51 Pegasi. Planeta je asi 150krát těžší než Země s oběžnou dobou pouhé 4,2 dne. Prvotní obecnou reakcí byla nedůvěra, protože na základě znalostí v roce 1995 se vycházelo z toho, že masivní planety by se měly nacházet v mnohem větší vzdálenosti od svých mateřských hvězd. Během několika dnů však byla existence exoplanety 51 Peg b potvrzena. Objev tohoto bizarního, zcela nepředvídatelného světa, dal vzniknout novému astronomickému oboru: studiu cizích planetárních soustav. Kromě ultrahorkých Jupiterů s oběžnou dobou něco málo přes den, známe mrazivé světy jen několikrát těžší než Země, které obíhají kolem červených trpaslíků a neobvyklé víceplanetární soustavy. Extrasolární planety nám umožňují lépe porozumět tomu, jak vznikaly a jak se vyvíjely planetární soustavy a dovolují nám umístit naši vlastní planetární soustavu do kontextu galaktického planetárního celku. Pravděpodobně již během příštích deseti let budeme vědět, zda soustavy jako ta naše jsou běžné nebo vzácné a téměř jistě budeme mít konkrétní příklady cizích Zemí – terestrické planety obíhající v takových vzdálenostech od mateřské hvězdy, že na nich může existovat kapalná voda a snad i život.

4. 2 Druhy extrasolárních planet

4. 2. 1 Různost exoplanet

Hmotnosti všech známých extrasolárních planet jsou znázorněny v grafu 3. Přesný tvar této funkce nazývané „hmotnostní funkce“ je stále předmětem zkoumání a debat. Tomu, aby mohla být adekvátně vymezena kompletní hmotnostní funkce, brání nedostatečný počet objevených planet o menší hmotnosti. S tím, jak se počet známých planet neustále zvyšuje, je zřejmé, že ty dosud objevené mohou být rozděleny do několika základních kategorií, které jsou uvedeny v následujících kapitolách.



Graf 3: Počet planet v závislosti na hmotnosti [1]

4. 2. 2 Ultrahorké Jupitery

Existuje stále více důkazů, že planety s velmi krátkými oběžnými dobami P ($P < 2$ dny) mohou být zařazeny do kategorie „ultrahorkých Jupiterů“. Tato tělesa dosahují průměrné hmotnosti více než o polovinu větší než hmotnost Jupiteru a jsou tak výrazně těžší než populace tradičních horkých Jupiterů (viz dále), které se nacházejí na poněkud vzdálenějších oběžných drahách. Je možné, že extrémní podmínky, za kterých ultrahorké Jupitery existují, jsou příčinou toho, že obsahují více hmoty za účelem „přežít“ proces vypařování během miliard let nebo mohly být formovány odlišnými procesy.

4. 2. 3 Horké Jupitery

Odhaduje se, že tyto objekty, které jsou charakteristické oběžnou dobou v délce 2–7 dnů a téměř nulovou excentricitou, doprovází přibližně 0,5 % trpaslíků hlavní posloupnosti v blízkosti Slunce a jejich průměrná hmotnost je přibližně $1 M_{\text{Jup}}$ (M_{Jup} – hmotnost Jupiteru). Prototypickým „horkým Jupiterem“ je souputník hvězdy 51 Pegasi. Do dnešního dne bylo objeveno 76 planet patřících do této kategorie.

Díky své blízkosti mateřské hvězdě mají horké Jupitery vysokou pravděpodobnost, že se jedná o přecházející planety (planety, které přecházejí přes kotouč své mateřské hvězdy) a v současné době je jich známo asi 43. Přecházející horké Jupitery představují pozoruhodnou rozmanitost planetárních poloměrů. Aktuální teoretické modely naznačují, že tyto planety by měly být co do velikosti podobné Jupiteru, ale pozorování přechodu ukázala mnohem větší velikostní rozsah, než se očekávalo (např. exoplaneta HD 149026 b má poloměr $0,72 R_{\text{Jup}}$ (R_{Jup} – poloměr Jupiteru)), mnohem menší, než se očekávalo, zatímco exoplaneta TrES-4 b má poloměr $1,74 R_{\text{Jup}}$, přestože dosahuje pouze 85 % hmotnosti Jupiteru. Předpokládá se, že horké Jupitery s nezvykle malými poloměry obsahují směsi, ve kterých převažují těžké prvky, zatímco ty s většími, než očekávanými rozměry jsou nahuštěny dosud neurčenými zdroji vnitřního tepla. Úplné a definitivní vysvětlení rozmanitosti pozorovaných poloměrů přecházejících extrasolárních planet je jednou z nejzajímavějších oblastí výzkumu v oboru exoplanet.

4. 2. 4 Nadobří

Exoplanety nazývané nadobří se pohybují po excentrických oběžných drahách v oblasti mezi 0,1 až několika astronomickými jednotkami AU (AU – astronomická jednotka, $1 \text{ AU} = 1,496 \cdot 10^{11} \text{ m}$) od své mateřské hvězdy – střední vzdálenost Země od Slunce. Průměrná hmotnost planet této skupiny dosahuje $5 M_{\text{Jup}}$, což je významně více, než průměrná hmotnost horkých Jupiterů. Pokračující průzkumy využívající metody měření radiální rychlosti hvězdy dosahují vynikající citlivosti při detekci planet z této skupiny a jejich statistické rozložení je tak dobře známo. A opravdu, vypadá to, že přibližně 7 % hvězd hlavní posloupnosti spektrální třídy F, G a K v blízkosti Slunce je doprovázeno nadobrem a je proto důležité najít definitivní vysvětlení procesů, které jsou příčinou jejich zvláštních orbitálních vlastností. Důležitým klíčem je téměř jistě

skutečnost, že mateřské hvězdy jak nadobru, tak horkých Jupiterů obsahují výrazně více kovů než Slunce. Řada nadobru je součástí víceplanetární soustavy, některé z nich vykazují zajímavé meziplanetární interakce v pozorovatelných časových škálách. Přítomnost více než jedné planety v příslušné soustavě často umožňuje vyvodit závěry s ohledem na mechanismy vytváření a evoluce, které by jinak byly složité.

Standardní paradigma formování planet cestou akrece plynu z protoplanetárního disku na protoplanetární jádra, nazývaný model „jádrové akrece“, je silně podporováno pozorovaným metalickým spojením planety a mateřské hvězdy. Tento model předpovídá, že obří planety by měly začít svou existenci na kruhových oběžných drahách. Proto nám prodloužené, excentrické oběžné dráhy a pozorovaná multiplicita typická pro spoustu nadobru napovídá, že v protohvězdném disku je zřejmě běžná dráhová porucha. Anebo se může ukázat, že tato podtřída vysokohmotnostních planet s velkou excentricitou je odrazem vytváření pomocí gravitační nestability a přímé fragmentace disku.

4. 2. 5 Obří planety s dlouhou oběžnou dobou

Jupiter, Saturn, Uran a Neptun představují prototypy těles patřících do kategorie „obřích planet s dlouhou oběžnou dobou“. Tato skupina je charakteristická dlouhou dobou oběhu (jednotky až desítky let) a téměř kruhovou oběžnou dráhou. Rozsáhlé průzkumy využívající metody měření radiální rychlosti s vysokou přesností se provádí více než deset let, a proto dosud objevené extrasolární planety mají oběžnou dobu obecně kratší než 5 let (pro srovnání: doba oběhu Jupiteru kolem Slunce činí téměř 12 let). Soustavy extrasolárních planet s vícero obřími planetami na oběžných drahách s dlouhou dobou oběhu a malou excentricitou by představovaly hledanou analogii s naší sluneční soustavou.

Spolu se zvětšující se časovou základnou pro experimenty pomocí radiální rychlosti a zlepšením přesnosti experimentů jsou objevovány planety o stále větších orbitálních poloměrech. Měření radiálních rychlostí ukázala, že mnoho hvězd vykazuje pomalu se měnící trendy ve svých rychlostech a naznačují tak, že by případně mohla být objevena dvojčata Jupiteru a Saturnu. Tyto objevy jsou důležité ze dvou hlavních důvodů: doplňují naše chápání uspořádání a typu planet okolo hvězd a jsou dobrými objekty pro přímou detekci.

Vzdálenější obří planety doplňují naše znalosti složení planetárních soustav v měřítku naší sluneční soustavy. Hmotnosti a orbitální vlastnosti takových planet nabízejí pohled do formování planetární soustavy a pozdějšího vývoje pomocí migrace. Pro porozumění výskytu terestrických planet potřebujeme pochopit, jak často obří planety migrují přes obyvatelné zóny a potenciálně tak narušují vytváření terestrických planet. Zatím nevíme, zda planetární soustavy s (v některých případech vícečetnými) masivními planetami blízko nebo uvnitř obyvatelných zón jsou výjimkou z pravidla. Tato otázka může být zodpovězena pouze porozuměním frekvenci výskytu Jupiterů na kruhových oběžných drahách za obyvatelnými zónami. Metoda měření radiálních rychlostí, s již vytvořenou širokou základnou, se výborně hodí pro zodpovězení této otázky.

Dalším velkou výhodou obřích planet na vzdálených oběžných drahách je skutečnost, že by mohly být přímo detekovány příští generací velkých pozemských dalekohledů. Např. maximální úhlová vzdálenost obří planety 55 Cnc d od své primární hvězdy činí 0,39 arcs (arcs – oblouková vteřina). Šest dalších planet dosahují úhlové vzdálenosti větší než 0,2 arcs a planet s úhlovou vzdáleností rovnou 0,1 arcs je dvacet. Největší funkční dalekohled světa s pohyblivým segmentovaným zrcadlem dosahuje rozlišovací schopnosti 0,18 arcs. Jedná se o tzv. Velký kanárský dalekohled GTC (Gran Telescopio Canarias), který se nachází na španělské observatoři Roque de los Muchachos Observatory na Kanárských ostrovech.

4. 2. 6 Horké Neptuny

Během posledních tří let vznikla nová kategorie planet nazývaná „horké Neptuny“. Tyto objekty dosahují hmotnosti v rozmezí 5–30krát větší než Země a nalézají se především v okolí hvězd o nízké hmotnosti. Za zmínku stojí planeta 55 Cancri e s oběžnou dobou 2,8 dne. Jedná se o planetu nejbližší své mateřské hvězdě v soustavě obsahující nejméně pět planet na oběžných drahách s malou excentricitou. Další je Gliese 436 b s oběžnou dobou 2,6 dne, s podobnou hmotností jako Neptun. Nedávno bylo zjištěno, že přechází přes kotouč své mateřské hvězdy, kterou je červený trpaslík. Strukturální modely naznačují, že Gliese 436 b je pravděpodobně co do složení podobná Neptunu. Přestože detekce objektů o hmotnosti podobné Neptunu pomocí Dopplerovy metody je časově náročná, ukazuje rychlé tempo jejich objevů, že jsou

pravděpodobně velmi běžné – hypotéza potvrzená objevem dvou planet o hmotnosti menší než hmotnost Neptunu pomocí gravitační mikročocky. To je ve shodě s tzv. jadernou akrecí, což je teorie vytváření planet, která postuluje, že „rozpadlá“ jádra obřích planet (těch s malým nebo žádným množstvím plynu) by měla být běžná u celé řady hvězd hlavní posloupnosti.

4. 2. 7 Terestrické planety

Do poslední kategorie nazvané „terestrické planety“ patří čtyři planety z vnitřní oblasti naší sluneční soustavy: Merkur, Venuše, Země a Mars. Mezi další terestrické planety se řadí tři planety objevené metodou sledování záblesků pulsarů a nejspíše objekty jako Gliese 581 c a Gliese 876 d. Detekce terestrických planet v okolí hvězd mimo hlavní posloupnost je jednou z největších výzev pro příštích několik desetiletí.

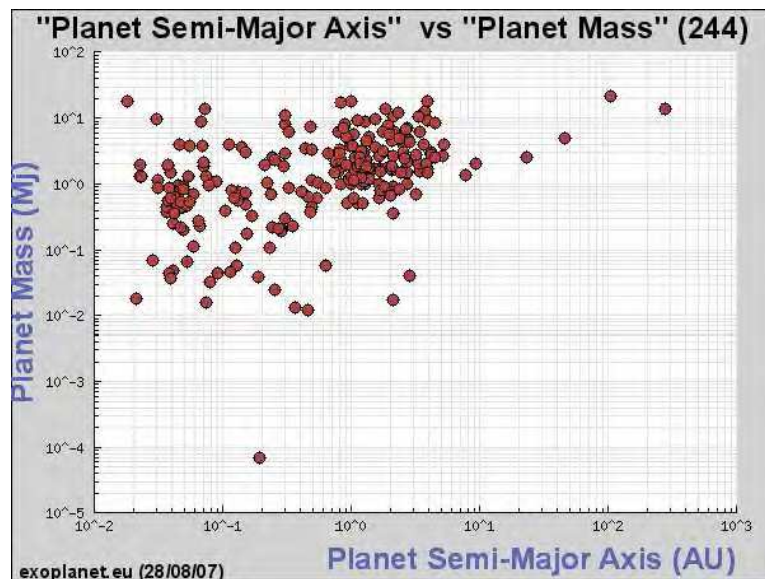
4. 3 *Statistika známých planet*

V době dokončování této bakalářské práce (říjen 2008) bylo známo 267 planetárních soustav s 313 extrasolárními planetami. Ve 32 z těchto soustav je více než jedna planeta. Rozložení planet podle hmotnosti, velké poloosy nebo předpokládané úhlové vzdálenosti a excentricity je zobrazeno v uvedených grafech níže. Tato rozložení by však měla být interpretována obezřetně kvůli možnému pozorovacímu zkreslení. Graf 4 znázorňuje rozložení velkých poloos známých planet a graf 5 rozložení oběžných dob. Na grafu 6 je zobrazeno rozložení excentricit drah jako funkce velké poloosy pro všechny objevené exoplanety, u kterých známe excentricitu (excentricita není známa u planet objevených metodou gravitační mikročocky a u těch, které byly objeveny přímo snímáním). Střední excentricita je 0,25, což je více než excentricita jakékoliv planety naší sluneční soustavy, i když je tento údaj zkreslen kvůli planetám s malou hodnotou velkých poloos, jejichž oběžné dráhy jsou pravděpodobně více kruhové díky slapovému působení.

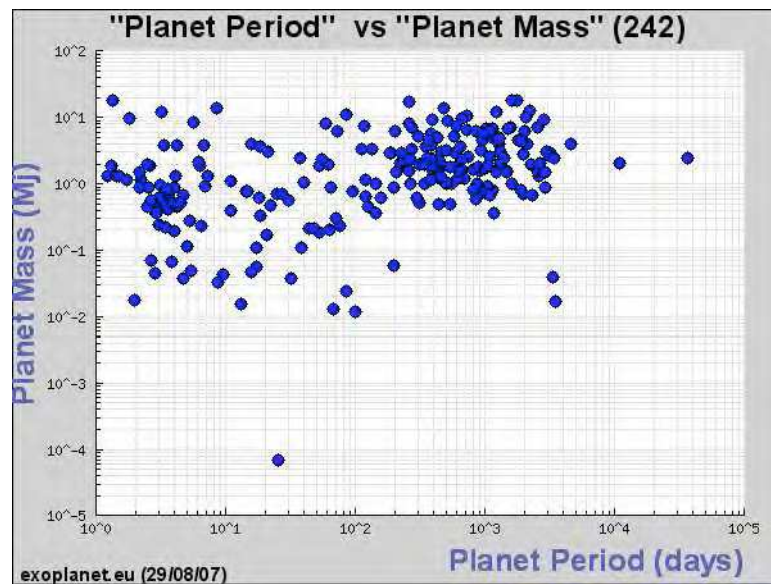
Největší známou excentricitou, která činí 0,93, se vyznačuje exoplaneta HD 80606 b. Některé blízké planety dosahují značných excentricit, které měly být zmírněny v dobách mnohem mladších, než je stáří mateřské hvězdy; ty jsou považovány za dynamicky vybuzené dalšími planetami v soustavě. Rozložení excentricit jako

funkce hmotnosti v grafu 7, nezobrazuje žádný významný trend; to je pravděpodobně znak procesu vytváření planet.

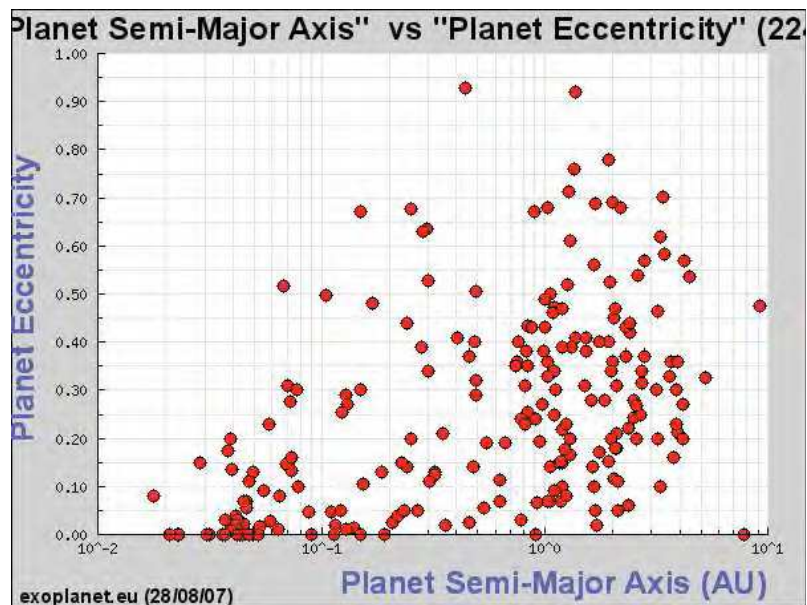
Existují zkreslení závisící na použité metodě hledání. Většina extrasolárních planet byla objevena pomocí metody měření radiálních rychlostí hvězd, takže grafy rozložení omezené na detekci pomocí radiální rychlosti vypadají podobně jako by vypadaly grafy, ve kterých by byly zahrnuty všechny metody objevování exoplanet. Naopak, zajímavý trend vzniká pro rozložení excentricity dráhy versus velká poloosa pro přecházející planety. Z grafu 8 je patrné, že několik jich má překvapivě velkou excentricitu. Podobně jako planety objevené metodou gravitační mikročocky – graf 9 znázorňuje rozložení hmotností planet jako funkci předpokládané vzdálenosti planety od mateřské hvězdy. Objevení dvou chladných planet o hmotnosti podobné hmotnosti Neptunu, jejichž objev byl méně pravděpodobný než detekce planet o hmotnosti Jupiteru, napovídá, že planety blízké této hmotnosti jsou běžné, přestože počet objevených planet metodou gravitační mikročocky je stále příliš nízký na to, aby mohly být vyvozeny nějaké pevné závěry.



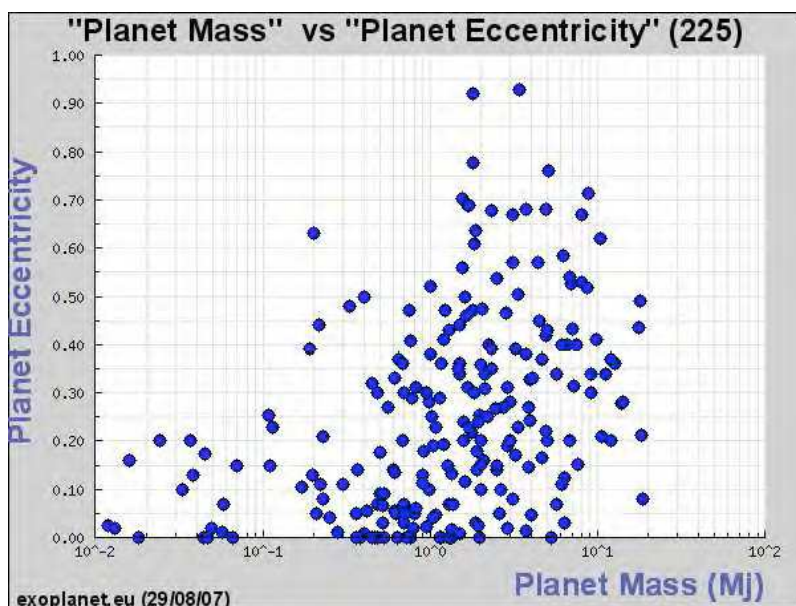
Graf 4: Rozložení velkých poloos známých planet [1]



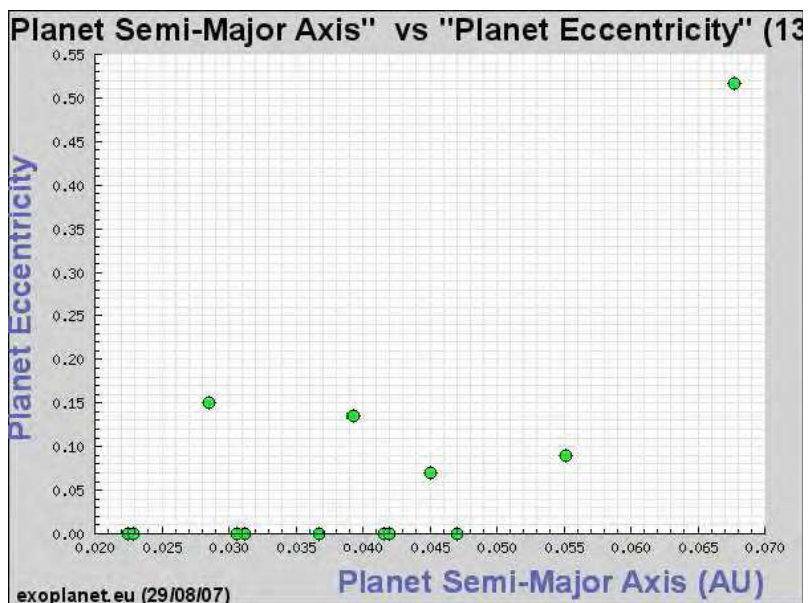
Graf 5: Rozložení oběžných dob známých exoplanet [1]



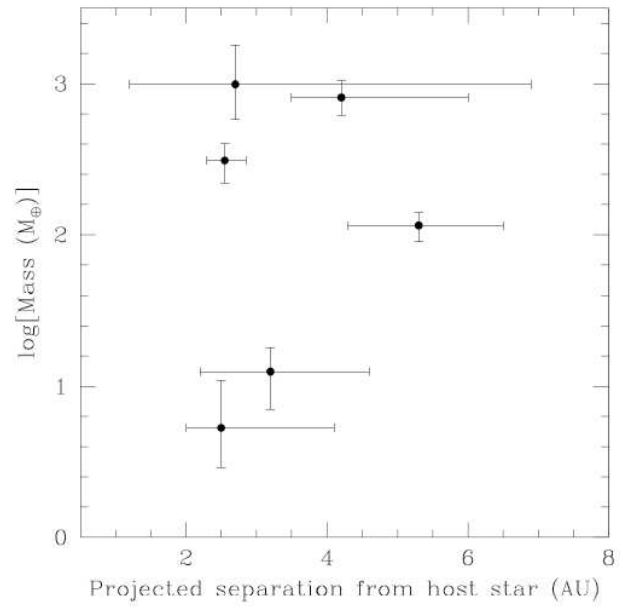
Graf 6: Rozložení orbitálních excentricit jako funkce velké poloosy pro všechny objevené planety, u kterých je známá excentricita [1]



Graf 7: Rozložení excentricit jako funkce hmotnosti [1]



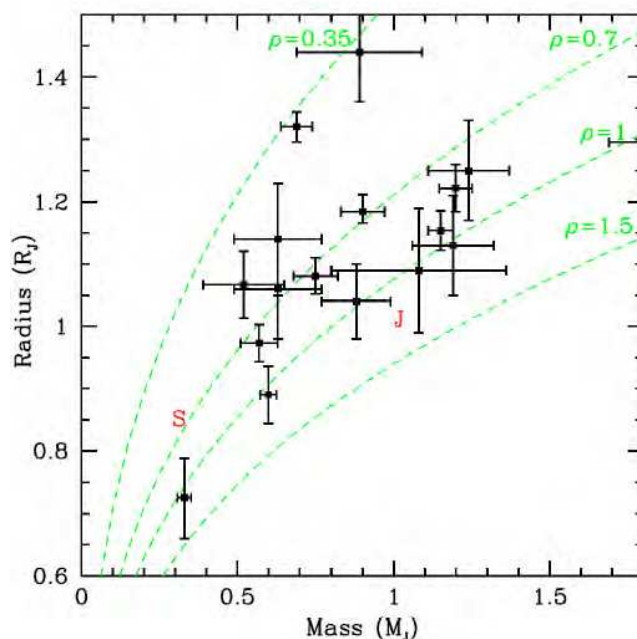
Graf 8: Rozložení orbitální excentricity versus velká poloosa pro přecházející planety [1]



Graf 9: Rozložení hmotností planet jako funkci předpokládané vzdálenosti planety od mateřské hvězdy [1]

5 Vztah hmotnost – poloměr u exoplanet

Je známo více než 20 exoplanet, které přechází přes kotouč své mateřské hvězdy. Přecházející exoplanety jsou jedinými, u kterých můžeme měřit jejich fyzikální vlastnosti pomocí současné technologie. Jejich hmotnosti a poloměry jsou základními fyzikálními parametry, které lze měřit (viz graf 10) a které nám udávají průměrnou hustotu planety. Ze znalosti hmotnosti, poloměru a/nebo hustoty můžeme odvodit souhrnné složení planety. Většina ze známých přecházejících planet má nízkou hustotu, takže musejí být složeny téměř výhradně z vodíku a hélia – stejně jako Jupiter. To je důležitý charakteristický znak pro exoplanety, které jsou tak extrémně blízko ke svým mateřským hvězdám. Tím demonstrují, že jsou to opravdu obří planety, jejichž struktura je modifikována jejich blízkostí mateřské hvězdě. Na druhou stranu, některé ze známých přecházejících exoplanet mají ve srovnání s Jupiterem výrazně abnormální hustoty. Tyto anomálie odstartovaly rozsáhlý výzkum a daly vzniknout zajímavým otázkám týkajících se vývoje plynných obřích planet.



Graf 10: Vztah hmotnost – poloměr obřích exoplanet. Čárkované křivky představují konstantní hustotu. Za všimnutí stojí rozložení hmotností a poloměrů exoplanet. S znamená Saturn a J značí Jupiter. [1]

5. 1 Plynní obři o nízké hustotě

První objevená přecházející exoplaneta – HD 209458b má neobvykle nízkou hustotu ($4 \cdot 10^2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) v poměru k hustotě Jupiteru, která je $1,33 \cdot 10^3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Jinými slovy, tato planeta má na svou hmotnost velmi velký poloměr. Při svém vzniku jsou planety velké a horké, s rostoucím věkem se smršťují a ochlazují. Exoplaneta HD 209458b se tedy měla vzhledem ke stáří hvězdy smrstit a ochladit na velikost podobnou velikosti Jupiteru, ale místo toho má poloměr o 30 % větší než Jupiter.

5. 2 Plynní obři s vysokou hustotou

Některé přecházející obři plynné exoplanety mají podstatně vyšší hustotu, než by se očekávalo při složení čistý vodík a hélium. Jedna z nich, HD 149026b, je na svou velikost neobyčejně hustá, $1,4 \cdot 10^3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, že až ze dvou třetin musí být tvořena těžkými prvky. Jako taková, je HD 149026b podstatně odlišná ode všech jiných pozorovaných obřích planet, které jsou tvořeny většinou z vodíku a hélia. Není jasné, jak se HD 149026b s takovým množstvím těžkého materiálu mohla vytvořit. Její mateřská hvězda je bohatá na kov, takže zřejmě její protoplanetární disk měl více kamenného materiálu než Slunce. Přesto, existence obřích planet s více než polovinou těžkých prvků je vážnou výzvou pro každou teorii formování planet.

5. 3 Terestrické planety

Největší nejasností ve vztahu hmotnost – poloměr u terestrických planet je výskyt železa a možnost, že planeta není převážně kamenitá, ale že je tvořena směsí kamení – voda nebo kamení – led. První jmenovaný problém je nám známý i z naší sluneční soustavy: Merkur je hustší než mnohem větší Venuše, kde koncentrace kamene hraje důležitou roli, takže první jmenovaná planeta musí mít mnohem větší podíl železa než druhá (a než Země). Planety tvořené kamenem – ledem nebo kamenem – vodou mají svou analogii ve velkých měsících ve vnější oblasti naší sluneční soustavy – Ganymedes, Callisto a Titan – ale žádná z nich se co do velikosti nepodobá Zemi.

6 Hledání obyvatelných planet

6. 1 Obyvatelnost

Nejvíce povzbuzující perspektivou pro blízkou budoucnost je hledání důkazů existence planet o velikosti podobné Zemi okolo blízkých hvězd a hlavně stanovení pomocí spektroskopie, zda některá z těchto planet může být obyvatelná. Nejprve je však třeba definovat termín „obyvatelný“.

6. 2 Definice obyvatelnosti a obyvatelné zóny

Předpokládáme, že základem života je uhlík a že je požadována alespoň dočasná přítomnost kapalné vody. Na základě tohoto předpokladu lze definovat obyvatelnou zónu (z angl. habitable zone, dále jen „HZ“) jako prostor kolem hvězdy, ve kterém je stabilní kapalná povrchová voda. Dále definujeme trvale obyvatelnou oblast (z angl. continuously habitable zone, dále jen „CHZ“) jako prostor kolem hvězdy, který zůstává obyvatelným po určitou specifikovanou dobu s tím, jak se hvězda vyvíjí.

6. 3 Hranice obyvatelné zóny v naší sluneční soustavě

Hranice HZ mohou být definovány buď teoreticky, pomocí klimatických modelů nebo na základě pozorování. Teoreticky byl problém zatím řešen pomocí 1D globálně průměrových klimatických modelů. Poblíž vnitřního okraje HZ se předpokládá, že se u planety vyvine hustá atmosféra bohatá na H₂O. Fotodisociace H₂O ve stratosféře, následovaná únikem vodíku do prostoru, vede nakonec k vyčerpání povrchové vody a ztrátě obyvatelnosti. Umírněný odhad pro vzdálenost vnitřního okraje HZ je 0,95 AU. Planeta ale může v této vzdálenosti zůstat obyvatelná, pokud mraky pomáhají udržet klima planety chladné.

U planet, které jsou blízko vnějšího okraje HZ, se předpokládá, že vytvoří husté atmosféry bohaté na CO₂. Další skleníkové ohřívání díky CO₂ představuje negativní zpětnou vazbu na klima, což napovídá, že vnější okraj HZ by měl být relativně daleko, pravděpodobně 1,7 AU. Při větší vzdálenosti začíná CO₂ kondenzovat a negativní

zpětná vazba je tak ztracena. Pouze planety s vnitřními zdroji tepla a vulkanismem srovnatelným s tím jaký je na Zemi, mohou využít této zpětné vazby.

Jiný způsob jak odhadnout hranice obyvatelné zóny je ten, že se podíváme na Venuši a Mars. Velká poloosa Venuše je 0,72 AU, což bylo očividně příliš blízko na to, aby mohla být tato planeta obyvatelná, protože ztratila veškerou vodu, kterou kdy měla. Naproti tomu, přestože je Mars v současné době neobyvatelný (přinejmenším na jeho povrchu), usuzuje se, že raný Mars obyvatelný byl, což vyplynulo z pozorování říčních kanálů nacházejících se v jižním pohoří s mnoha krátery. Zářivost Slunce byla tehdy nižší, takže sluneční tok na oběžné dráze Marsu byl shodný s tím, který je v současnosti ve vzdálenosti 1,8 AU. Tato skutečnost napovídá, že současný vnější okraj HZ je v této nebo větší vzdálenosti.

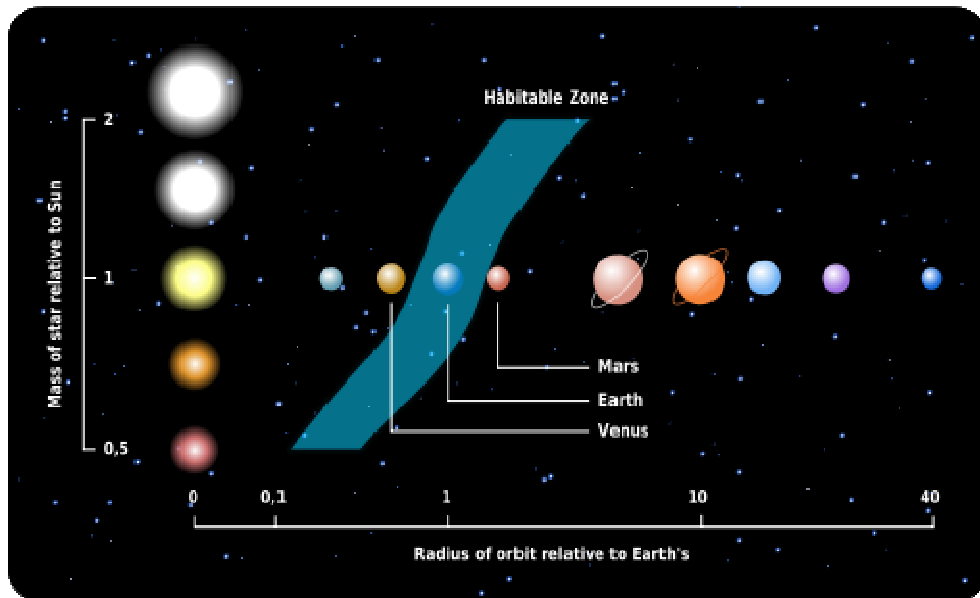
6. 4 Hranice obyvatelné zóny pro jiné hvězdy

Stejné klimatické výpočty prováděné pro naši sluneční soustavu mohou být použity i pro jiné typy hvězd. Výsledky jsou podle očekávání: HZ se posouvá dále pro zářivější hvězdy a blíže pro ty méně zářivé. Zatímco podle prvního řádu se hranice obyvatelné oblasti měří jako odmocnina hvězdné zářivosti, hraje významnou roli i spektrální rozložení hvězdného záření. Podle Rayleighova rozptylu se modré světlo odráží efektivněji, zejména v hustých atmosférách bohatých na H₂O a CO₂ blízko hranic HZ, posouvající HZ blíže hvězdě. A naopak, červené světlo je rozptylováno méně efektivně a je absorbováno efektivněji v blízkém infračerveném pásmu pomocí H₂O a CO₂; hranice HZ se proto posouvají dále.

Hranice HZ jsou znázorněny jako funkce hvězdné hmoty v obr. 3. Na obrázku je rovněž zakresleno osm planet naší sluneční soustavy. HZ je znázorněna v čase, kdy hvězda vstupuje do hlavní posloupnosti a postupně se s časem posune mimo.

Hvězdy spektrální třídy M představují z hlediska obyvatelnosti specifický problém. HZ v okolí hvězdy M leží uvnitř oblasti, ve které působí slapové síly hvězdy a tyto planety mohou být roztrhány nebo deformovány a může být ovlivněna jejich rotace. Zamrznutí těkavých látek na odvrácené straně planety hvězdy třídy M může představovat problém, přinejmenším pro řídké atmosféry. Hvězdy třídy M jsou chromosféricky aktivní a jejich intenzivní hvězdné větry, spolu s předpokládanou absencí magnetických polí na pomalu se otáčejících planetách okolo hvězdy spektrální

třídy M, mohou být příčinou toho, že atmosféra planet časem zmizí. Přesto zůstávají planety velikostně nebo hmotnostně podobné Zemi, obíhající hvězdu M zajímavé, částečně proto, že se předpokládá, že budou během příštích desetiletí nejnárodněji nalezitelné.



Obr 3: Graf znázorňující hranice obyvatelná zóny [10]

7 Způsoby detekce extrasolárních planet u vzdálených hvězd

7.1 Objevování exoplanet

V následující kapitole budou zmíněny čtyři základní metody objevování a charakterizování extrasolárních planet. Metody jsou rozděleny na tzv. „přímé“ a „nepřímé“ techniky. Nepřímá detekce zahrnuje pozorování často jemných efektů odhalujících přítomnost planety u mateřské hvězdy. S výjimkou přecházejících planet neexistuje možnost detekce nebo izolace světla ze samotné planety; proto mohou být atmosférické vlastnosti a teploty odvozeny pouze z modelování. V případě přechodů je možno získat informace o velikosti planet, atmosférickém složení a efektivní teplotě (pomocí vedlejších zatmění) a je detekováno i světlo z planety.

7.2 Spektroskopická metoda měření radiální rychlosti hvězd

Planeta a hvězda obíhají kolem svého společného těžiště (nebo těžiště soustavy) a v důsledku vzájemného gravitačního působení mění planeta nejen svou polohu, ale také polohu této hvězdy, byť jen nepatrně. Pomocí spektroskopie a Dopplerova jevu se měří změny složky rychlosti hvězdy ve směru zorného paprsku, tedy změny radiální rychlosti. Dalekohledy vybavené přesnými spektrometry mohou tento malý posuv „radiální rychlosti“ měřit.

7.2.1 Současný stav techniky: optická dopplerovská spektroskopie

V roce 1995 odhalila přesná měření radiálních rychlostí hvězd první exoplanetu obíhající kolem hvězdy hlavní posloupnosti. Pomocí metody radiální rychlosti bylo od té doby objeveno více než 90 % ze současných 313 známých exoplanet (stav ke konci října 2008). Tato metoda je přirozeně nejcitlivější v případě planet, které vyvolávají velké amplitudy rychlosti u svých mateřských hvězd. Z tohoto důvodu závisí efektivita detekce na několika faktorech, mezi které patří hmotnost planety, hmotnost hvězdy a velká poloosa dráhy planety (nebo oběžná doba). Další požadavek při využití

Dopplerova jevu je, že hvězda musí být pozorována po dobu nejméně jedné celé periody oběhu, čímž je zvýhodněn objev planet s krátkou oběžnou dobou.

První objevené exoplanety byly běžně několiksetkrát těžší než Země a obíhaly poměrně blízko svých mateřských hvězd. Průzkumy využívající Dopplerův jev nyní společně monitorují okolo 3000 jasných hvězd podobných Slunci. V rámci dosud prozkoumaných hvězd byly již ty nejsnadněji objevitelné planety (tj. těžké a s oběžnou dobou kratší než 1 rok) objeveny. Statistika hvězd, u kterých byla použita metoda měření radiálních rychlosti je následující:

- asi 1% hvězd podobných Slunci má ve své blízkosti plynné obry (nebo horké Jupitery)
- plynné obří planety jsou častější u vysoce kovových hvězd
- nejméně 15% hvězd je obíháno plynnými obry s oběžnou dobou kratší než 10 let
- asi polovina hvězd s jednou známou planetou vykazuje další rychlostní odchylky, což naznačuje přítomnost dalších planet
- rozložení hmotností stoupá s klesající hmotností planet
- rozsah excentricit, kterých exoplanety dosahují, je velmi široký
- trpasličí spektrální třídy M o nízké hmotnosti mají méně plynných obrů než hvězdy slunečního typu

S klesající hmotností planet roste prudce jejich počet. Většina těžkých plynných obrů se nachází na oběžných drahách o velkých poloměrech. Obě tyto charakteristiky (nízká hmotnost planety a velký orbitální poloměr) mají za následek slabší signály radiální rychlosti. Avšak v minulém desetiletí se zvýšila jak stálost, tak i přesnost měření na základě Dopplerova jevu a byla objevena rekordně lehká planeta, dosahující 5násobku hmotnosti Země. Několik planet o hmotnosti podobné Neptunu bylo objeveno na oběžných drahách s poměrně krátkou periodou a dále bylo objeveno několik nových víceplanetárních soustav, včetně soustavy s 5 planetami obíhajícími hvězdu 55 Cancri, pozoruhodný příklad toho, jak měření radiální rychlosti mohou objasnit architekturu exoplanet.

Metodou měření radiální rychlosti hvězd byly rovněž objeveny planety obíhající kolem trpasličích hvězd spektrální třídy M s nízkou hmotností. Statisticky mají trpasličí hvězdy M méně plynných obrů než hvězdy slunečního typu. Hvězda GJ 876 se dvěma plynnými obry a třetí exoplanetou (7,5krát těžší než Země), jejíž složení je obtížné

odhadnout, však tvoří výjimku. Planety o hmotnosti podobné Neptunu obíhají další dvě trpasličí hvězdy M, takže aktuální data předpokládají, že trpasličí M mají buď méně planet, nebo že planety obíhající trpaslíky M jsou podstatně lehčí než ty, obíhající hvězdy slunečního typu.

Pozorované charakteristiky populací exoplanet poskytují důležitý pozitivní indikátor úspěchu pro budoucí hledání exoplanet. Existuje významný rezervoár nízkohmotnostních planet, které by mohly být planetami terestrickými a existuje i významný soubor plynných obrů, kteří budou zase vhodnými cíli pro techniky přímých zobrazování. Proces detekce planet podobných Zemi zahrnuje tři stádia:

- 1.) Detekce – na základě výsledků jedné pozorovací techniky se zjistí, že je přítomna exoplaneta podobná Zemi a několik astrofyzikálních parametrů soustavy
- 2.) Verifikace – druhá pozorovací technologie potvrdí přítomnost planety a pomocí kombinace odvozených parametrů nabídne lepší porozumění sledované soustavě
- 3.) Charakterizace – propracovanější (komplexnější, dražší) pozorovací techniky jsou určené pro specifické soustavy a kombinace všech pozorování přináší konkrétní detailní údaje jako poloměr, hustotu, teplotu, chemické složení, atd. planetární soustavy, které jsou potřebné k astrofyzikální interpretaci

7. 2. 2 Infračervená dopplerovská spektroskopie

Hvězdy spektrální třídy M jsou nejčastějšími hvězdami v blízkosti Slunce a tvoří 70 % hvězd v Mléčné dráze. Kromě skutečnosti, že hvězdy třídy M jsou běžné, existují dva klíčové důvody, proč jsou optimálním cílem pro hledání planet pomocí Dopplerova jevu. Zaprvé, tyto hvězdy mají nízkou hmotnost, což má za následek větší amplitudu rychlosti pro danou hmotnost exoplanety. Zadruhé, jejich nízká zářivost posouvá obyvatelnou zónu blíže ke hvězdě, což má opět za následek větší amplitudu rychlosti spolu s kratšími a rychleji objevenými oběžnými drahami. Z těchto důvodů představují hvězdy třídy M nejlepší možnost pro objevení planet podobných Zemi v rámci obyvatelné zóny.

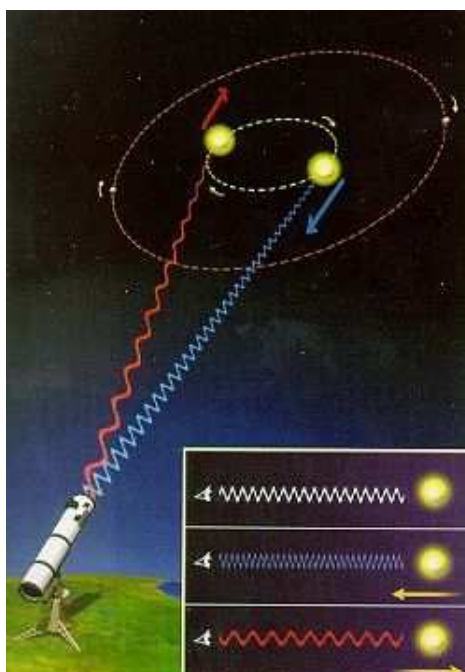
Větším problémem, než schopnost infračervených spektrometrů dosahovat přesnosti větší než 10 m.s^{-1} v laboratoři je z technického hlediska časová proměnlivost absorpčních čar při skutečných pozorováních. Navíc se pro hvězdy pozdější než M4V zase začíná zvyšovat hvězdná rotace. Širší hvězdné čáry omezily informační obsah a

mohly by nastavit skutečný hvězdný limit pro přesnost Dopplerova jevu a ovlivnit možnost objevení planet v případě infračervených průzkumů.

Aktuálně je optickou Dopplerovou metodou zkoumáno asi 150 trpaslíků M. Protože hvězdný tok pro trpaslíky M má svůj vrchol v blízkém IR pásmu mezi 1–2 μm , IR spektroskopie byla navržena jako nová technika pro hledání planet obíhajících okolo hvězd s nejnižší hmotností. V současné době dosahuje přesnost IR spektrometrů od asi 80 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ do 200 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ a měla by být dostačující pro objevení plyných obrů okolo hvězd s nízkou hmotností. Avšak návrhy nových IR spektrometrů předpokládají přesnost rychlosti 1 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, čímž se detekce planet o hmotnosti Země obíhajících okolo starších hvězd hlavní posloupnosti stává dosažitelnou.

7. 2. 3 Popis metody měření radiální rychlosti hvězdy

Jak již bylo zmíněno, při hledání extrasolárních planet je využíváno Dopplerova jevu. To znamená, že vlnová délka záření vysílaného tělesem, které se od nás vzdaluje, se vůči nám zvětšuje. Hvězda a planeta obíhají okolo společného těžiště, a pokud se k nám planeta přibližuje, hvězda se vzdaluje a její spektrální čáry vykazují červený posuv. A naopak, pokud se od nás planeta vzdaluje, hvězda se přibližuje a absorpční čáry v jejím spektru se posunují k jeho modrému konci. Výše popsany proces je znázorněn na obr. 4.



Obr. 4: Změna vlnové délky při pohybu hvězdy [7]

Vyneseme-li amplitudy červeného posunu na časovou osu, získáme tzv. periodickou křivku. Z této křivky je možné odhadnout velikost planety, její oběžnou dobu a velkou poloosu. Tato metoda je používána již dlouhou dobu k měření radiálních rychlostí blízkých hvězd i vzdálených galaxií, avšak k detekci extrasolárních planet mohla být využita teprve nedávno. Důvod je jednoduchý, abychom detekovali i relativně malé planety, musíme být schopni měřit změny radiální rychlosti s přesností řádově 1 m.s^{-1} .

Schopnost detekovat planetu měřením radiální rychlosti závisí na amplitudě rychlosti hvězdy K . Ta je dána následujícím vztahem, kde M_* je hmotnost hvězdy, M_p hmotnost planety, $\sin i$ je sklon oběžné roviny vůči pozorovateli, P oběžná doba a e značí excentricitu:

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

Např. změna radiální rychlosti Slunce způsobená oběhem Jupiteru pro oběžnou dobu 12 let je $K = 12,5 \text{ m.s}^{-1}$. Vliv Země se projeví změnou rychlosti o $K = 0,1 \text{ m.s}^{-1}$. Metoda však kvůli členu $M_p \sin i$ dovoluje vypočítat pouze dolní mez hmotnosti planety, viz dále.

Tato metoda má své výhody a nevýhody. Mezi výhody patří to, že detekce změn radiální rychlosti hvězdy není přímo závislá na její vzdálenosti. Amplituda změn je dána nejen poměrem hmotností hvězdy a planety, ale také sklonem oběžné roviny dráhy planety k zornému paprsku (leží-li zorný paprsek v rovině oběhu, jsou změny radiální rychlosti maximální, naopak je-li oběžná rovina na tento paprsek kolmá, změny radiální rychlosti hvězdy nepozorujeme). A právě tato závislost na sklonu oběžné dráhy planety je také zjevnou nevýhodou metody: pokud sklon dráhy neznáme nebo jej nedokážeme odhadnout z jiných měření, dostáváme vždy pouze dolní mez hmotnosti planety (hmotnost tedy může být stejná jako náš výsledek nebo větší). Pro určení skutečné hmotnosti planety potřebujeme znát ještě sklon oběžné dráhy vůči pozorovateli. V případě exoplanet to ovšem znamená, že když hmotnost námi zkoumaného tělesa vychází několikanásobně větší než hmotnost Jupiteru (a informaci o sklonu dráhy nemáme), může jít ve skutečnosti o těleso ještě hmotnější, které už nebude exoplanetou, ale hnědým trpaslíkem. Nicméně ze statistiky dosud objevených exoplanet vyplývá, že

jen necelých 15 % všech těles má hmotnost větší než $5 M_{\text{Jup}}$ (M_{Jup} – hmotnost Jupiteru), takže riziko, že pozorujeme hnědé trpaslíky namísto exoplanet, je docela malé. Hmotnost exoplanety se nám podaří zjistit spolehlivě, pokud kombinujeme spektroskopickou metodu s technikou sledování přechodu exoplanety přes kotouč hvězdy.

Změny radiální rychlosti hvězdy jsou vzhledem k relativně nepatrné hmotnosti planet docela malé. Jak již bylo zmíněno, Jupiterem způsobená amplituda změny radiální rychlosti Slunce činí pouhých $12,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ s periodou 12 let. Sluneční spektrální čáry ve viditelné části spektra (u vlnové délky přibližně 500 nm) se posunou o pouhých $2 \cdot 10^{-5} \text{ nm}$ oproti laboratorním vlnovým délkám. Nicméně v současné době již existují moderní spektrometry, které umožňují zjistit radiální rychlost objektu s přesností až $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Jedním z nich je spektrograf HARPS – High Accuracy Radial Velocity Planet Searcher na observatoři ESO v La Silla v Chile. V následujícím oddíle bude spektrograf popsán podrobněji.

7. 2. 3. 1 HARPS: Lovec planet

HARPS je zařízení Evropské jižní observatoře (ESO), které je určené pro měření radiálních rychlostí s co nejvyšší přesností, která je v současné době dosažitelná. Hlavním úkolem spektrografu HARPS je hledání extrasolárních planet. Přístroj je konstruován tak, aby dosahoval velmi vysoké dlouhodobé přesnosti při měření radiální rychlosti (v řádu jednotek $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$). Pro dosažení tohoto cíle byl HARPS navrhnout jako ešeletový spektrograf, do něhož je přiváděno světlo párem optických vláken z Cassegrainova ohniska dalekohledu o průměru 3,6 m v La Silla v Chile. Ešeletový spektrograf, na rozdíl od standardního, zobrazí naráz velké množství spektrálních řádů. Každý řád zahrnuje jen krátký úsek vlnových délek, ale protože se jednotlivé řády částečně překrývají, lze je poskládat dohromady a získat najednou velmi rozsáhlý úsek spektra. Spektrograf HARPS je umístěn v Dewarově nádobě, aby se předešlo spektrálním driftům způsobeným kolísáním teploty a tlaku vzduchu. Jedno ze dvou optických vláken zachycuje světlo hvězd, zatímco to druhé je použito buď k simultánnímu zaznamenávání thorio-argonového referenčního spektra, nebo hvězdného pozadí. Obě vlákna přivádějící do HARPS světlo mají aperturu na oblohu o velikosti 1"; rozlišovací schopnost ve spektrografu je tak 115 000. Obě vlákna mají kodér snímků, aby bylo zajištěno stejnoměrné osvětlení pupily spektrografu.

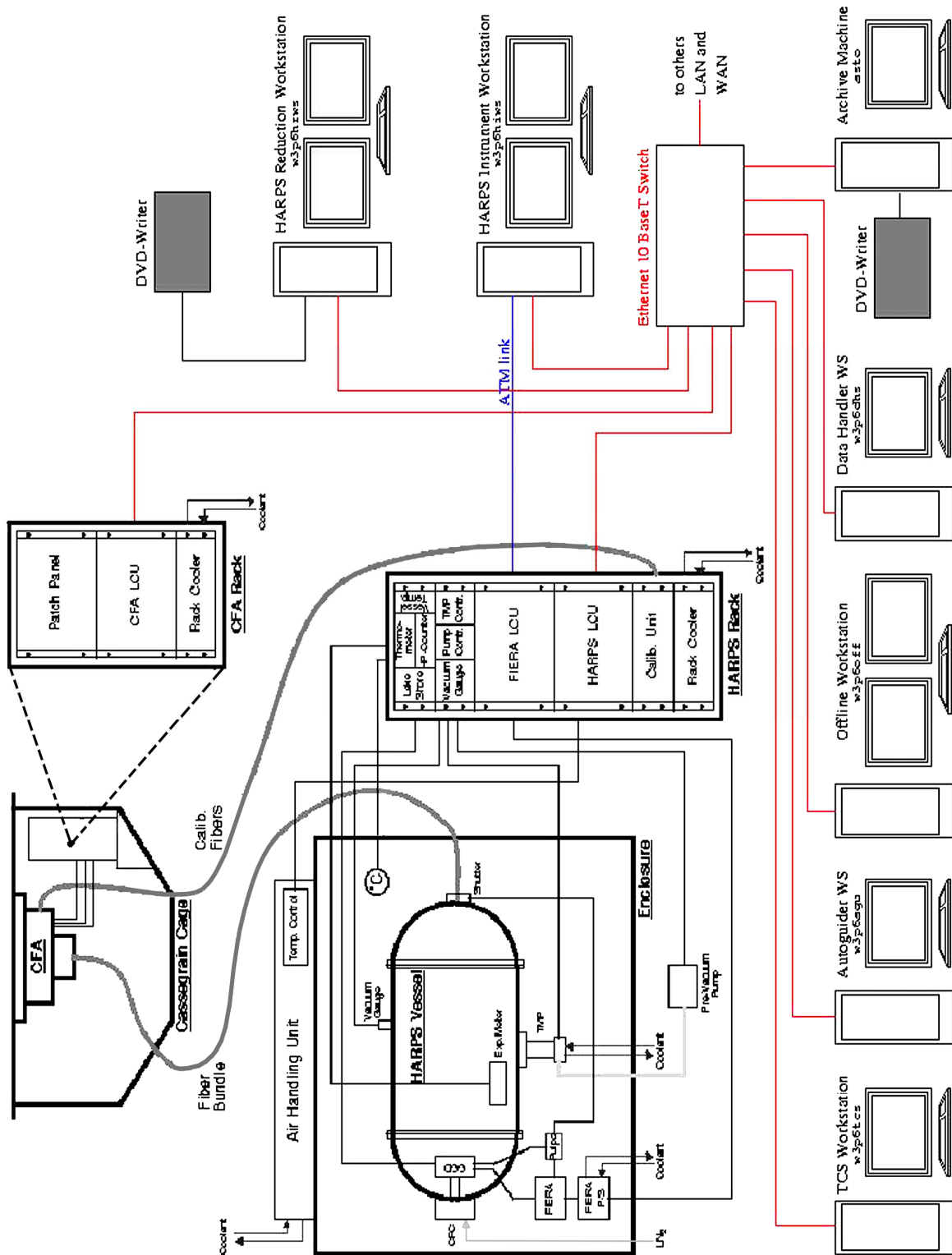
Zobrazovaný rozsah spektra činí 378–691 nm, rozložený v rozmezí řádů 89–161 ešletové mřížky. Protože je detektor tvořen dvěma CCD čipy (celkem 4 000 x 4 000 pixelů, rozměr pixelu 15 mikrometrů), je jeden spektrální řád ($N = 115$, od 530 nm do 533 nm) ztracen v mezeře mezi těmito dvěma čipy.

Poměr signál/šum u spektrografu HARPS činí 110 na pixel při vlnové délce 550 nm pro hvězdu o magnitudě $M_v = 6$, spektrální třídy G2V, v minutovém integračním čase (1" seeing, vzdušná hmota = 1,2). Při použití simultánní thorio-argonové referenční metody (která je standardním režimem pro dosažení nejvyšší přesnosti při měření radiálních rychlostí) by měl být tento poměr signál/šum dostačující pro dosažení šumové chyby fotonu při radiální rychlosti asi $0,90 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Vezmeme-li v úvahu chyby způsobené pointací, ohniskem a nejistotou přístroje, činí celková přesnost měření radiálních rychlostí přibližně $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Tohoto výsledku je dosaženo pro hvězdy starší než hvězdy spektrálního typu G a nerotující hvězdy ($v \sin i < 2 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$).

V simultánním Th-Ar režimu musí uživatelé HARPS přísně dodržovat kalibrace předpokládané v kalibračním plánu, který zahrnuje řadu odchylek, flat field a Th-Ar expozice pořízené večer.

HARPS je vybaven vlastní cestou přenosu dat (instalovanou v La Silla). Tento datový přenos zajišťuje hostujícímu astronomovi téměř v reálném čase extrahovaná a podle vlnové délky kalibrovaná spektra ve všech pozorovacích režimech. Při použití simultánní thorio-argonové referenční metody zajišťuje datový přenos přesné radiální rychlosti pro starší hvězdy, jejichž radiální rychlost je známa v rozmezí $1\text{--}2 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$, za předpokladu, že standardní kalibrace byly provedeny odpoledne.

Na následujícím obrázku je znázorněno schéma HARPS s Cassegrainovým optickým adaptérem nahoře (s řídicí skříní vedle), spektrografem dole vlevo a skříní obsahující kalibrační jednotku napravo dole. Dvě optická vlákna propojují hlavní komponenty.



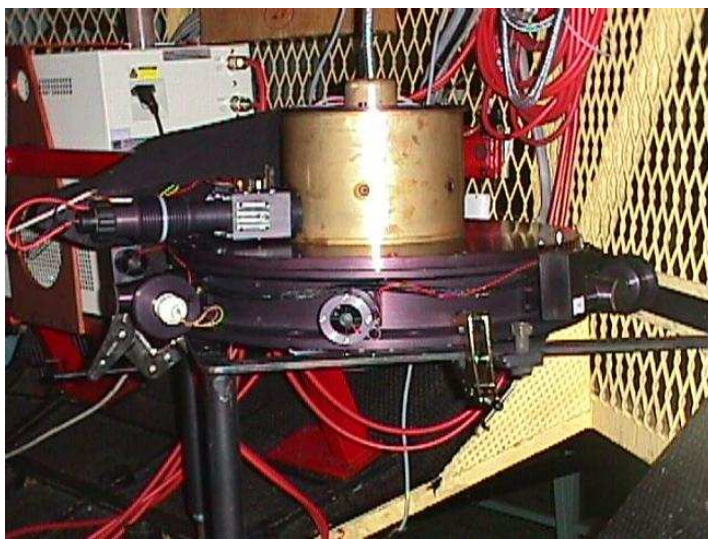
Obr. 5: Funkční schéma HARPS [11]

Hlavní komponenty zařízení HARPS

V následujícím oddíle jsou popsány hlavní komponenty přístroje v pořadí, v jakém jimi prochází světlo. Ke konci je stručně popsána funkce přístroje.

- Dalekohled o průměru 3,6 m v La Silla

Dalekohled o průměru 3,6 m na Evropské jižní observatoři byl uveden do provozu v roce 1977 a v roce 1999 prošel kompletní rekonstrukcí. Cassegrainovo ohnisko tohoto dalekohledu využívá spektrograf HARPS pro získávání světla.



Obr. 6: Dalekohled Evropské jižní observatoře o průměru 3,6 m [11]

- Cassegrainův vláknový adaptér

Pro připojení vlákna k dalekohledu navrhli a vyrobili inženýři z La Silla nový vláknový adaptér pro Cassegrainovo ohnisko. Pro HARPS je zde rovněž neutrální filtr hustoty a napájení pro kalibrační vlákno, které vede světlo ze samostatné kalibrační jednotky. To je zásadní část kalibračního konceptu HARPS. Jako unikátní funkci bude HARPS nabízet pozorovateli dvě volby pro přesnou kalibraci vlnové délky: implicitní simultánní thorio-argonovou referenční metodu a použití jodové absorpční komůrky. Tato jodová komůrka je namontována i na Cassegrainově vláknovém adaptéru a může být dálkovým ovládním posunuta do a mimo paprsek dalekohledu.



Obr. 7: Cassegrainův vláknový adaptér [11]

- Vláknový spoj, kodér snímků

HARPS je distribuovaný systém a jednou z nejdůležitějších komponent spojujících různé části je vláknový spoj. Jeho účelem je přivádět do spektrografu buď:

- a.) světlo z hvězd získané z Cassegrainova ohniska
- b.) nebo Th-Ar spektrum pro simultánní kalibraci nebo světlo z noční oblohy.

Pro HARPS byla vybrána dvě 70 μm vlákna odpovídající 1 obloukové vteřině na obloze. Celková délka vláken vedoucích z Cassegrainova ohniska ke vstupu spektrografu je 38 metrů.

Kodér násobného obrazu je umístěn na vstupu objektivových/referenčních vláken do Dewarovy nádoby spektrografu a slouží ke stabilizaci osvětlení spektrografu: objektiv se může posunout na vstup vlákna kvůli vodicím chybám nebo seeingu, ale intenzita rozložení na konci vlákna, tj. na vstupu spektrografu se nezmění. Kodér navíc slouží jako průchodka pro vlákna do vakua a rovněž kryje, na straně atmosféry, expoziční clonu.

Světlo je nakonec vedeno na vstup spektrografu uvnitř Dewarovy nádoby pomocí dvou vláken o délce 2 m. Připojení ke spektrografu je opět provedeno pomocí páru dubletových mikročoček na vlákno. Druhý vláknový spoj vede, jak již bylo zmíněno, z kalibrační jednotky do coudé západní místnosti ke Cassegrainovu ohnisku.

- Dewarova nádoba se spektrografem

Účelem Dewarovy nádoby je chránit spektrograf před kolísáním teploty a před vlivy kolísání indexu lomu vzduchu. Objem nádoby činí přibližně 2 m^3 a je odsávána pomocí turbomolekulárního čerpadla před začátkem provozu; obnova vakua se provádí jednou až dvakrát měsíčně. Protože dlouhodobá stabilita spektrografu je pro úspěšné hledání exoplanet nanejvýš důležitá, mělo by být vakuum narušováno pouze zřídka. Z tohoto důvodu nejsou uvnitř vakua žádné pohyblivé komponenty s výjimkou zaostřovacího mechanismu kamery. Ten je však seřízen a zajištěn ještě než je nádoba definitivně uzavřena.



Obr. 8: Spektrograf HARPS v Evropské jižní observatoři La Silla [11]

Samotný spektrograf je ešeletový spektrograf s lámavým hranolem. Parabolické zrcadlo s $f/2,1$ slouží jako kolimátor. Dioptrická kamera zobrazuje spektra z lámavého hranolu (každé z objektového a referenčního vlákna) vedle sebe na dva čipy EEV CCD s rozlišením $2\,000 \times 4\,000$ pixelů. Počet 68 řádů pokrývá spektrální rozsah 378–691 nm. Veškeré optické komponenty jsou namontovány na optické lavici z nerezové oceli. Optické parametry jsou uvedeny v následující tabulce:

Tabulka 2: Optické parametry spektroskopu [11]

Název parametru	Popis parametru
Systém	2 vlákna (průměr 1'), spektrální rozsah 378–691 nm, kolimovaný svazek 208 mm
Ešeletová mřížka	R4, 31,6 vrypů na 1 mm, úhel blaze efektu 75°, rozměry mřížky 840 x 214 x 125 mm, kvantová účinnost > 65% ve viditelném spektru
Lámaný hranol	Sklo FK5, 257,17 vrypů na 1 mm, rozměry, 240 x 230 x 50 mm
Zrcadlo kolimátoru	Zerodur s ochranným stříbrným povlakem, f = 1 560 mm, průměr 730 mm
Kamera	dioptrická, f = 728 mm, f/3,3
Formát spektra	„horní“ CCD (Jasmin): řády 89–114, oblast spektra 533–691 nm „dolní“ CCD (Linda): řády 116–161, oblast spektra 378–530 nm
Rozlišení spektra	120 000
Oddělení spektra od vláken A a B	17,3 px
Oddělení řádu	Jasmin: řád 89: 1,510 mm = 100,7 px, řád 114: 0,940 mm = 62,7 px Linda: řád 116: 0,910 mm = 60,7 px, řád 161: 0,513 mm = 34,2 px

- Detektor

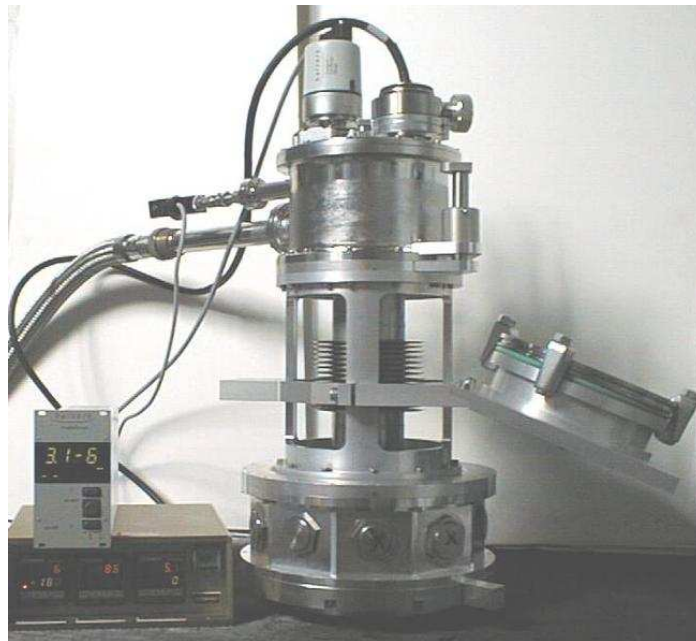
HARPS používá dva čipy EEV typ 44-82 CCD (přezdívané Jasmin a Linda). Formát spektra je 4096 x 4096 pixelů ($15\mu\text{m}^2$), z toho se využívá pole o rozměru 62,7 x 61,4 mm při vzorkování 4 pixely na spektrální prvek. Hlavní vlastnosti čipů jsou shrnuty v následující tabulce.

Tabulka 3: Vlastnosti čipů [11]

Typ	EEV 44-82
Formát spektra	4096 x 4096 px ($15\mu\text{m}^2$); používá se 62,7 x 61,4 mm
Vyčítací režimy	104 kpx/s a 416 kpx/s, jeden port na čip

Protože je HARPS stacionárním přístrojem, jsou jeho detektory ochlazovány průtokovým kryostatem, který je v souladu se současným standardním designem ESO. Speciální vlastností kryostatu je však skutečnost, že čelo detektoru je namontováno na lavici spektrografu uvnitř Dewarovy nádoby, s vlastním kryostatem venku. Oba jsou připojeny pružinami z nerezové oceli, které chrání vakuum detektoru (10^{-4} Pa) před

vakuum (1 Pa) nádoby spektrografu. Čelní okénko detektoru slouží i jako kolektiv kamerové optiky.



Obr. 9: Detektor [11]

- Další komponenty

Kalibrační jednotka: Kalibrační jednotka HARPS zajišťuje kalibraci vlnové délky a flat field světla. Pro tyto účely obsahuje sadu thorio-argonových a halogenových lamp s dutou katodou, které mohou být dálkově zapínány a vypínány. Motorizovaný výměnný mechanismus umožňuje umístit kalibrační vlákno před požadovanou lampu. Pár kalibračních vláken spojuje kalibrační jednotku, která je umístěna vedle klimatizovaného krytu HARPS v coudé západní místnosti s vláknovým adaptérem Cassegrainova ohniska.

Expozimetr: Pro zlepšení pozorovací účinnosti tím, že bude vždy aplikována správná expoziční doba (podle zvoleného poměru signál/šum), je použit expoziometr. Pro měření světla přicházejícího z objektového a referenčního vlákna, které je odraženo mimo štěrbinu na ešletu mezi dvěma mřížkami jsou použity dva fotonové čítače.

Jodová buňka: Jodová buňka je vestavěna do Cassegrainova vláknového adaptéru, aby bylo umožněno použití jodové autokalibrační metody. Druhá jodová buňka je součástí

kalibrační jednotky, takže světlo s jodovým spektrem v absorpci může být projektováno do referenčního vlákna.

Termální kryt: Aby bylo možné udržet teplotu spektrografu co nejstabilnější, bylo rozhodnuto umístit Dewarovu nádobu do dodatečného termálního krytu. Jedná se o dobře izolovanou místnost na coudé patře budovy, kde je umístěn 3,6metrový dalekohled, a která je již sama o sobě teplotně stabilizována. Na základě předběžných měření se očekává, že kolísání teploty lavice spektrografu uvnitř Dewarovy nádoby budou menší než 0,1 K, ideálně 0,01 K.

- Provoz

Veškeré prvotní údaje jsou uloženy v lokálním archívu a poté v centrálním vědeckém archívu. Navíc jsou všechna pozorování automaticky uspořádána v téměř reálném čase pomocí datové přenosové cesty běžící na přidělené pracovní stanici: pokud pozorovatel využívá vysoce přesný simultánní thoriový referenční režim, má k dispozici všechny konečné radiální rychlosti na konci noci. Veškerá data mohou být okamžitě zapsána na DVD-ROM.

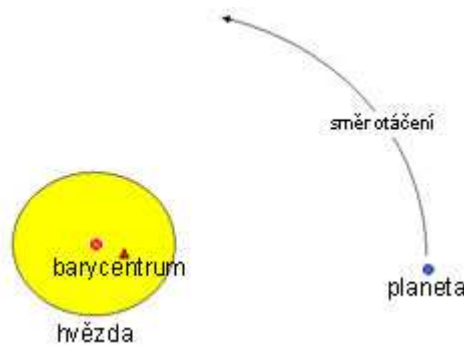
7. 2. 4 Měření poloh hvězdy

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 3. Keplerova zákona v úplném znění i jeho (jejich) oběžnou periodu a oběžnou vzdálenost.

$$\frac{T^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{G(M + m)} \quad (2)$$

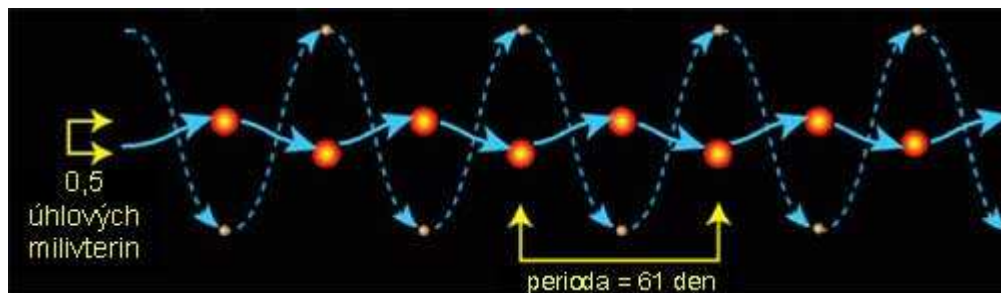
Stejně jako metoda měření radiální rychlosti hvězdy i tento způsob objevování exoplanet závisí na nepatrném pohybu hvězdy způsobeném obíhající planetou, který

může být sledován z místa vzdáleného několik světelných let. V tomto případě však astronomové hledají malinký posun hvězdy na obloze.



Obr. 10: Poloha barycentra pro hvězdu a planetu [7]

Tato metoda hledání exoplanet vychází z přesného měření poloh hvězdy. Pro určitý čas se přesně určí poloha zkoumané hvězdy vůči souboru hvězd okolních, o nichž se předpokládá, že se nacházejí relativně daleko a že to jsou objekty bez doprovodných těles. Potom tyto vybrané hvězdy tvoří jakousi síť, vůči které můžeme vztahovat polohu zkoumané hvězdy, kolem které by mohla obíhat exoplaneta. Měřená hvězda se pohybuje vůči vzdálenému („nehybnému“) pozadí nikoli po přímce, ale jakési vlnovce.



Obr. 11: Kolísání polohy hvězdy na obloze způsobené planetou [7]

Astrometrická metoda je nejstarší metodou objevování exoplanet a stejně postupovali astronomové ve dvacátém století také při prvních pokusech o detekci exoplanet, i když od počátku bylo zřejmé, že v důsledku nižší hmotnosti těchto těles (ve srovnání s hmotností centrální hvězdy) budou změny poloh mateřské hvězdy nepatrné. Chyby těchto měření byly vždy větší než hledané změny poloh, takže všechny dosavadní pokusy o detekci exoplanet astrometrickou metodou byly na pozemních

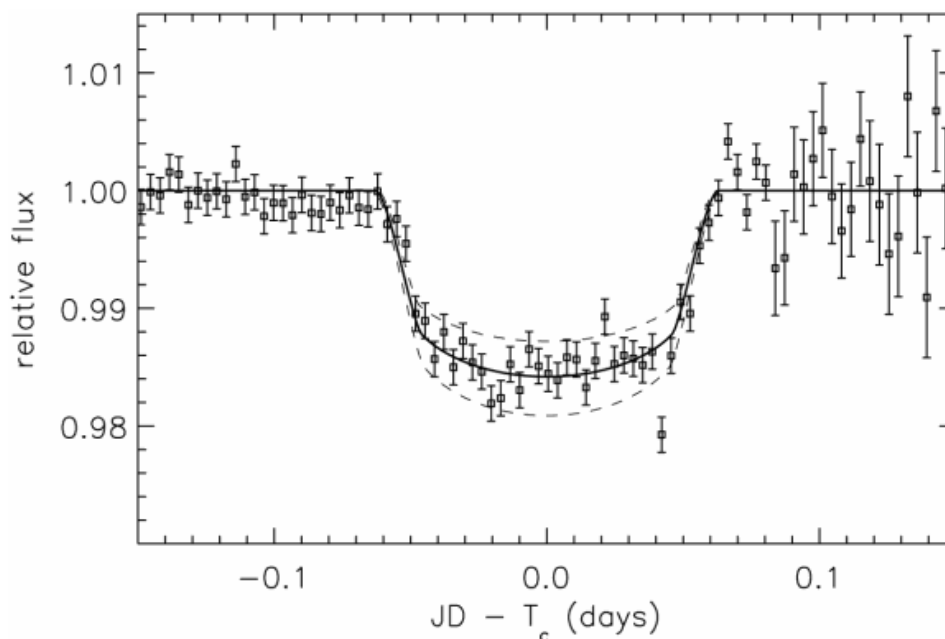
observatořích neúspěšné. Nicméně když byla tato astrometrická metoda použita v případě hvězdy Gliese 876 – poloha se zjišťovala Hubbleovým vesmírným dalekohledem, podařilo se (v kombinaci s měřeními spektroskopickými) spolehlivě určit přítomnost exoplanety a odvodit hmotnost exoplanety s relativní chybou asi 20 %.

Nespornou výhodou astrometrické metody je schopnost detekovat planety, jež se nacházejí relativně daleko od mateřské hvězdy (za takovou soustavu můžeme považovat právě tu naši sluneční, kde se Jupiter a další velké planety nalézají vně planet podobných Zemi). Jiné metody jsou naopak vhodné pro detekci obřích planet na drahách ležících blízko centrální hvězdy, takže se astrometrický postup s nimi vhodně doplňuje.

Nevýhodou je, že tuto metodu lze použít pouze pro menší vzdálenosti a dostatečně hmotná tělesa. Například trajektorie našeho Slunce (způsobená především Jupiterem) pozorovatelná ze vzdálenosti 30 světelných let by měla amplitudu sinusoidy řádově v miliontinách stupně. Další nevýhodou je vysoká náročnost na přístrojové vybavení. Vidíme, že teprve vesmírné dalekohledy poskytnou smysluplné výsledky. K tomu je třeba vzít v úvahu, že při sledování planet na vzdálených drahách musí pozorovací řady překlenout značně dlouhé časové údobí, srovnatelné s oběžnými dobami takových planet – tedy řádově roky až desetiletí. Astrometrickou metodou byly objeveny planety například u 61 Cygni nebo HD 114762 ve Vlasech Bereniky.

7. 2. 5 Sledování zákrytu hvězdy planetou

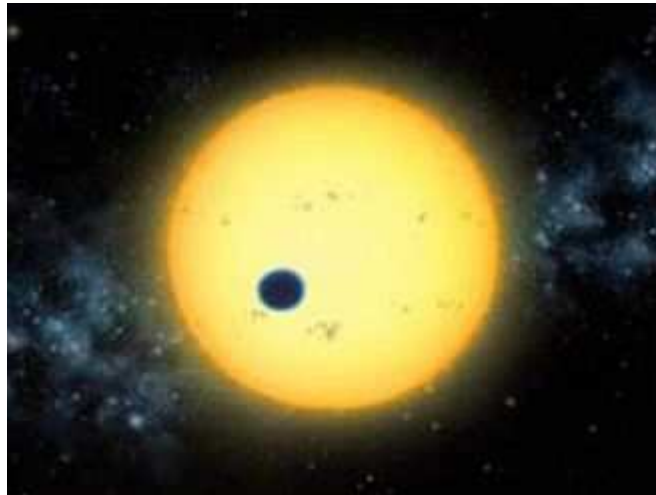
Další metodou je sledování zákrytu hvězdy planetou nebo také často nazývanou přechod planety přes kotouč hvězdy. Principiálně je tento způsob objevování exoplanet znám z pozorování tzv. zákrytových proměnných hvězd, tj. dvojhvězd tak těsných, že nejsou úhlově rozlišitelné, avšak při vzájemném oběhu jedna složka zakrývá druhou a astronomové pozorují výsledné změny jasnosti. Z charakteristického tvaru světelné křivky (závislost jasnosti na času) lze odvodit velikost hvězdy i planety. Světelná křivka je charakteristická hlavním (hlubším) a vedlejším (mělčím) minimem. Pokud je efektivní teplota menší složky nižší než teplota složky větší, pak při přechodu nastává hlubší minimum než při zákrytu za větší složkou, k němuž dochází přesně půl periody poté. Je-li navíc tato metoda kombinovaná také se spektroskopickým zjišťováním změn radiálních rychlostí mateřské hvězdy, můžeme zjistit hmotnost planety a její střední hustotu.



Obr. 12: Průběh změny jasnosti při přechodu planety přes kotouč hvězdy [7]

U exoplanet je ovšem kolísání jasnosti centrální hvězdy zcela nepatrné. V okamžiku, kdy se vzdálená planeta dostane mezi Zemi a hvězdu, dochází k poklesu jasnosti hvězdy v rozmezí několika tisícín až setin magnitudy, což však je dnešními prostředky měřitelné. Z amplitudy poklesu pak můžeme určit alespoň přibližně průměr planety a odhadnout tak i její hmotnost. Například přechod Jupitera přes Slunce, pozorovaný ze vzdálenosti asi 30 světelných roků způsobí pokles jasnosti o zhruba 0,02 mag.

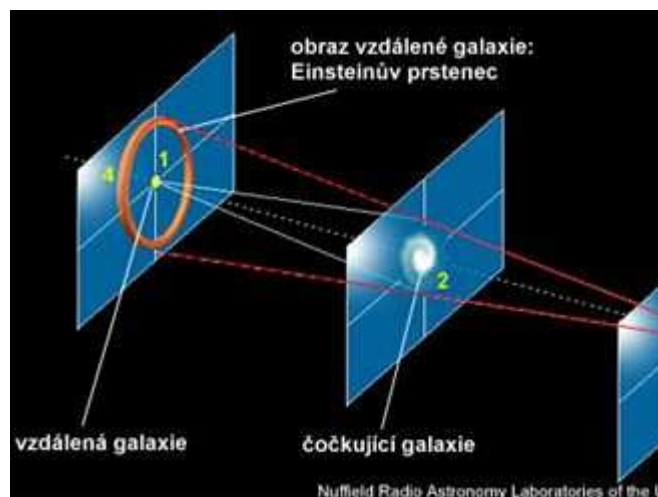
Mezi úskalí této metody patří malá pravděpodobnost, že určitou hvězdu budeme pozorovat právě ve chvíli, kdy přes její disk přejde planeta. Tady se uplatní automaticky pracující dalekohledy. Ovšem zdaleka ne všechny hvězdy svítí se stálou intenzitou. U některých se intenzita periodicky mění a proto je zapotřebí stálost jasnosti každé pozorované hvězdy důkladně prověřit.



Obr. 13: Výtvarné pojetí – přechod planety přes kotouč hvězdy [7]

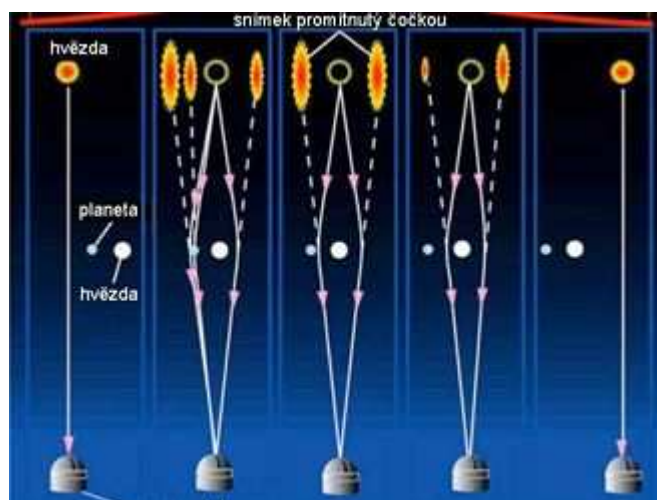
7. 2. 6 Gravitační mikročočka

Další metodou popisovanou v této bakalářské práci je metoda gravitační mikročočky. Jev gravitační mikročočky nastává tehdy, když gravitační pole nějaké hvězdy zakřivuje elektromagnetické záření vzdálené hvězdy (jako optická čočka) nacházející se přesně v témže směru od pozorovatele. Obě hvězdy se tedy musí nacházet téměř v dokonalém zákrytu. Efekt mikročočky dokáže vyvolat i jediná planeta, ale na rozdíl od efektu vyvolaného hvězdou bude trvat velice krátce, takže není jednoduché ho včas zaznamenat.



Obr. 14: Metoda gravitační mikročočky [7]

Efekt gravitační čočky je důsledkem Einsteinovy obecné teorie relativity. Ukázal, že hmota nějakého tělesa je schopna zakřivit prostor. Důsledkem toho je, že i dráha, po níž se světlo pohybuje, je podobně zakřivená. Efekt mikročočky je projevem prostorové křivosti. Světlo, které k nám letí z nějaké velmi vzdálené hvězdy, se jeví jakoby rozpuštěné po tak dlouhém letu vesmírem, a proto se nám zdá velmi slabé. Když se mezi takovou velmi vzdálenou hvězdu a Zemí dostane nějaká hvězda, její hmota donutí světlo vzdálené hvězdy, aby se soustředilo ve směru Země. Hvězda pak vypadá několik hodin nebo dnů jasnější.



Obr. 15: Metoda gravitační mikročočky [7]

Na rozdíl od předešlé metody lze pomocí gravitační mikročočky odhalit planety o hmotnostech Země a je vhodná pro planety vzdálenější, jež se nacházejí 3 až 6 AU od své mateřské hvězdy.

Zjevnou nevýhodou této metody je, že gravitační mikročočka nikdy nevzniká dvakrát. Pouze náhoda rozhoduje o tom, že se nějaký hmotný objekt dostane mezi Zemí a vzdálenou hvězdu. Astronomové tak musí vzít v úvahu nahodilost výskytu mikročoček. Navíc odchylky vybuzené planetou, plynným obrem netrvají déle než jeden den, v případě terestrické planety ani ne hodinu.

Právě metodou gravitační mikročočky byla objevena dosud nejmenší exoplaneta, o které se podrobněji zmíníme v následující kapitole.

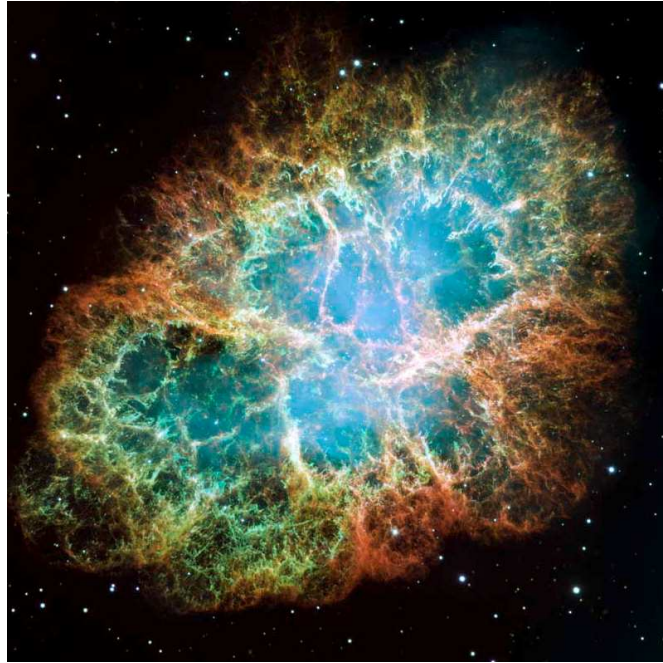
7. 2. 7 Metoda zpoždování záblesků pulsarů

Další metoda, kterou lze odhalit exoplanety, je použitelná pouze u pulsarů [14]. Pulsar je rychle rotující neutronová hvězda – zbytek po výbuchu supernovy. První pulsar byl objeven v roce 1967 astronomkou J. Bellovou.



Obr. 16: Objevitelka prvního pulsaru Jocelyn Bell [13]

Tak, jak oběžnice hýbe pulsarem, je možné sledovat 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). Je však třeba 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. Pulsar má za průvodce bílého trpaslíka a hnědého trpaslíka nebo exoplanetu o hmotnosti asi $10 M_{\text{Jup}}$.



Obr. 17: Zbytek po výbuchu supernovy [14]

8 Zajímavé objevy extrasolárních planet v poslední době

8.1 Nejmenší dosud objevená planeta

V červnu 2008 objevili astronomové extrasolární planetu, která je pouze třikrát těžší než naše Země a je tedy nejmenší dosud pozorovaná obíhající normální hvězdu. Samotná hvězda není hmotná, dosahuje asi jedné dvacetiny hmotnosti našeho Slunce. Tato skutečnost napovídá výzkumným týmům, že poměrně běžné nízkohmotnostní hvězdy mohou představovat dobré kandidáty, kolem kterých by mohly obíhat planety podobné Zemi.



Obr. 18: Umělecké pojetí planety MOA-2007-BLG-192Lb [5]

Mezinárodní výzkumný tým vedený Davidem Bennettem z Univerzity Notre Dame představil 2. června 2008 na tiskové konferenci na setkání Americké astronomické společnosti v St. Louis, v Montaně své objevy. „Náš objev naznačuje, že i kolem těch nejméně hmotných hvězd mohou obíhat planety,“ říká Bennett. „Předtím nebyly nalezeny žádné planety, které by obíhaly kolem hvězd o hmotnosti menší než 20 % hmotnosti Slunce.“

Astronomové objevili tuto planetu pomocí metody gravitační mikročochky, metody, pomocí které lze nalézt planety o hmotnosti jedné desetiny hmotnosti Země. „Tento objev demonstruje citlivost metody mikročochky pro hledání planet o nízké hmotnosti a doufáme, že v blízké době objevíme planetu o stejné hmotnosti jako naše Země,“ uvedl dále Bennett.

Podle stávající nomenklatury se mateřská hvězda nově objevené planety jmenuje MOA-2007-BLG-192L, MOA označuje observatoř, 2007 je rok kdy metoda

mikročochky probíhala, BLG je zkratka slova „bulge“, 192 znamená 192. pozorování pomocí mikročochky provedené v observatoři MOA v příslušném roce a L značí lens star (hvězda sloužící jak čočka) oproti hvězdnému pozadí, která se nachází v delší vzdálenosti. Při pojmenování planety se k názvu hvězdy přidá písmeno, které označuje, že se jedná o další objekt v soustavě této hvězdy. Písmeno a je vyhrazeno mateřské hvězdě, planeta se tedy nazývá MOA-2007-BLG-192Lb.

Hvězda MOA-2007-BLG-192L je vzdálena 3 000 světelných let a je klasifikována buď jako vodík spalující hvězda s nízkou hmotností, v jejímž jádře probíhají jaderné reakce stejně jako u našeho Slunce nebo jako hnědý trpaslík, těleso podobné hvězdě, která nemá dostatečnou hmotnost na to, aby v jejím jádře probíhaly termonukleární reakce. Výzkumníci nebyli schopni potvrdit, do které kategorie hvězda spadá.

Při objevu byly využity dva mezinárodní dalekohledy: Microlensing Observations in Astrophysics (MOA) a Optical Gravitational Lensing Experiment (OGLE). Výzkumníci na Novém Zélandu provedli počáteční měření nové planety a její hvězdy za použití nového dalekohledu MOA-II v observatoři Mt. John. Fotoaparát MOA-cam3 může za jedno pozorování udělat snímek oblohy 13krát větší než je plocha celého Měsíce. Výzkumníci v Chile provedli následná měření pomocí objektivu s vysokým úhlovým rozlišením na dalekohledu VLT na Evropské jižní observatoři. Data z pozorování byla analyzována vědci z celého světa.

„Tento objev je velmi vzrušující, protože z něj vyplývá, že planety o hmotnosti Země se mohou nacházet kolem hvězd s nízkou hmotností a tyto hvězdy jsou běžné,“ řekl Michael Briley, astronom a úředník dohlížející na Bennettův grant. „Je to další významný krok v hledání terestrických planet v obyvatelných zónách hvězd a nebyl by možný bez mezinárodní spolupráce profesionálních i amatérských astronomů, kteří se věnují měření těchto signálů,“ dodává Briley.

8. 2 *Tři superzemě obíhající kolem jedné hvězdy*

Tým evropských astronomů oznámil na mezinárodní konferenci v Nantes ve Francii v roce 2008 pozoruhodný průlom v oblasti extrasolárních planet. Použitím nástroje HARPS na observatoři ESO v La Silla objevili trio superzemí obíhajících kolem hvězdy HD 40307. Při prohlížení kompletního vzorku navíc astronomové

napočítali 45 kandidátů na planety o hmotnosti nižší než 30násobek hmotnosti Země a s oběžnou periodou kratší než 50 dní. Z toho vyplývá, že okolo jedné ze tří hvězd podobných Slunci obíhají tři takové planety.



Obr. 19: Tři superzemě obíhající kolem hvězdy HD 40307 [5]

„Má každá hvězda svou planetu, a pokud ano, tak kolik?“ přemýšlí lovec planet Michel Mayor ze ženevské observatoře. „Odpověď zatím neznáme, ale učinili jsme již velký pokrok, abychom se to dozvěděli.“

„S příchodem přesnějších přístrojů jako je spektrograf HARPS umístěný na dalekohledu o průměru 3,6 m v La Silla, jsme nyní schopni objevit menší planety, s hmotností dosahující 2 až 10násobku hmotnosti Země,“ říká Stéphane Udry, jeden z kolegů Mayora. Takové planety jsou nazývány superzemě, protože jsou hmotnější než Země, ale méně hmotné než Uran a Neptun (asi 15 hmotností Země).

Skupina astronomů nyní objevila soustavu tří superzemí obíhajících okolo normální hvězdy, která je jen o něco lehčí než naše Slunce a nachází se ve vzdálenosti 42 světelných let směrem k jižnímu souhvězdí Doradus a Pictor.

„Provedli jsme velmi přesná měření rychlosti hvězdy HD 40307 během posledních pěti let, což zcela jasně odhalilo existenci tří planet,“ říká Mayor. Planety dosahují hmotnosti 4,2; 6,7 a 9,4násobku hmotnosti Země, obíhají hvězdu s periodou 4,3; 9,6 a 20,4 dní.

„Odchytky způsobené planetami jsou opravdu velmi malé – hmotnost nejmenší planety je stotisíckrát menší než hmotnost hvězdy – a pouze díky vysoké citlivosti HARPS mohly být objeveny,“ říká spoluautor François Bouchy z Institut

d'Astrophysique de Paris ve Francii. A opravdu, každá planeta způsobuje pohyb hvězdy pouhých několik metrů za sekundu. Je opravdu jednodušší nalézt planetu, která se nachází na oběžné dráze s větší výstředností a s krátkou periodou než tu, která je na méně výstředné oběžné dráze s dlouhou periodou.

„Je pravděpodobné, že existuje mnoho dalších planet: nejen superzemě a planety podobné Neptunu s delšími periodami, ale i planety podobné Zemi, které zatím nejsme schopni nalézt,“ uzavírá Udry.

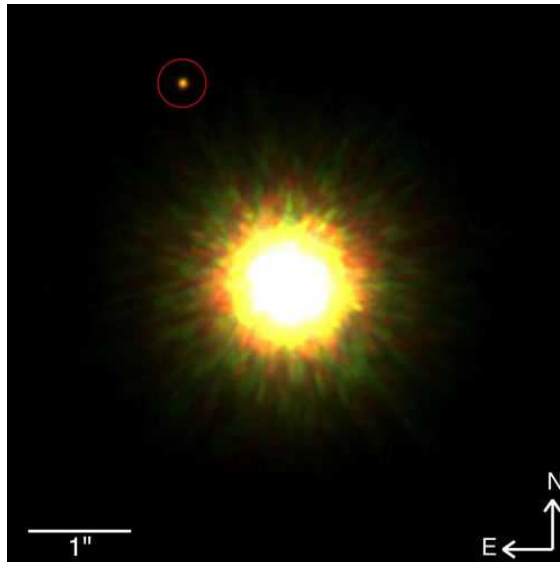
8. 3 První vyfotografovaná planeta u hvězdy podobné Slunci

Pomocí dalekohledu Gemini North na havajské sopce Mauna Kea se podařilo kanadským astronomům přímo vyfotografovat exoplanetu u hvězdy GSC 6213-1358. Ta leží v souhvězdí Štíra asi 500 světelných let daleko.



Obr. 20: Observatoř na vrcholku Mauna Kea na Havaji [15]

Už dříve se vědcům podařilo přímo zobrazit exoplanety, ale ty se buď samostatně pohybovaly vesmírem, nebo obíhaly kolem hnědých trpaslíků, takže se v jejich slabé záři neschovaly. Teď se povedlo poprvé zobrazit exoplanetu u hvězdy podobné Slunci. Exoplaneta je asi 8krát hmotnější než náš Jupiter, a co je zajímavé, obíhá svou hvězdu ve vzdálenosti 330 astronomických jednotek. To je 11krát dále, než obíhá Neptun kolem Slunce.



Obr. 21: Snímek hvězdy GSC 6213-1358 a exoplanety obíhající kolem ní (v červeném kroužku) [12]

Nový objev tak přiděluje starosti teoretickým astronomům, protože takto vzdálené planety by se vůbec neměly vyvinout. Samozřejmě je tu možnost, že současný objev je planým poplachem, zatím se neprokázalo, že exoplaneta hvězdu skutečně obíhá. Na to je potřeba alespoň dvouleté monitorování, aby bylo gravitační působení hvězdy na planetu měřitelné.

Zobrazení exoplanety bylo i přes její velkou vzdálenost od hvězdy náročné. Těch 330 astronomických jednotek se totiž ve vzdálenosti 500 světelných let promítne do úsečky dlouhé pouhých 2,2 úhlové vteřiny. To je jako sledovat na vzdálenost 1 km dvě svíčky, mezi nimiž je vzdálenost 1 cm. Toto přirovnání není ještě úplně přesné, protože planeta a hvězda svítí různě jasně. Bez adaptivní optiky by se exoplanetu objevit nepodařilo.

Objev exoplanety právě u hvězdy GSC 6213-1358 nebo podle jiného označení 1RXS J160929.1-210524 nebyla žádná náhoda. Vědci tuto oblast souhvězdí Štíra zkoumali už dříve, protože to je oblast nedávného vzniku nových hvězd. V roce 1998 zjistili, že hvězda patří mezi mladé hvězdy a vypadá tedy jako naše Slunce jen miliony let po svém vzniku. O tom, jak těžké bylo exoplanetu najít, svědčí i to, že stejnou hvězdu sledovali i američtí vědci. Letos v květnu publikovali výsledky hledání exoplanet (případně dvojhvězd) v souhvězdí Štíra, ale u hvězdy GSC 6213-1358 žádnou exoplanetu nenašli i přesto, že použili desetimetrový dalekohled Keckovy observatoře.



Obr. 22: Dva dalekohledy Keckovy observatoře o průměru 10 m [15]

Protože největší šanci na objev planety přímým zobrazením je u nejbližších hvězd, láká oblast v severní části souhvězdí Štíra i další vědce. Už loni se podařilo u hnědého trpaslíka UScoCTIO 108 objevit planetu. Ta dokonce obíhá svou hvězdu ve vzdálenosti 670 AU, což je dvojnásobek GSC 6213-1358.

Malá vzdálenost od nás je důležitou výhodou, ale ne jedinou. Existuje ještě jeden dobrý důvod, proč hledat exoplanety právě v oblasti mladých hvězd. Planety u nedávno zrozených hvězd jsou totiž teplejší. Neměly během několika prvních milionů let svého života ještě čas vychladnout. Zářící tedy více, než srovnatelně velké planety starších hvězd. Povrchovou teplotu exoplanety u GSC 6213-1358 určili vědci na 1500 °C. Pro srovnání: náš Jupiter, kterému je už 4,5 miliardy let, je asi o 1600 °C chladnější.

Objev exoplanety je prvním výsledkem systematického prohledávání oblasti mladých hvězd v horní části souhvězdí Štíra. Kanadští vědci z Torontské univerzity stejným způsobem sledují 85 hvězd, takže je možné, že tento objev nebyl poslední.

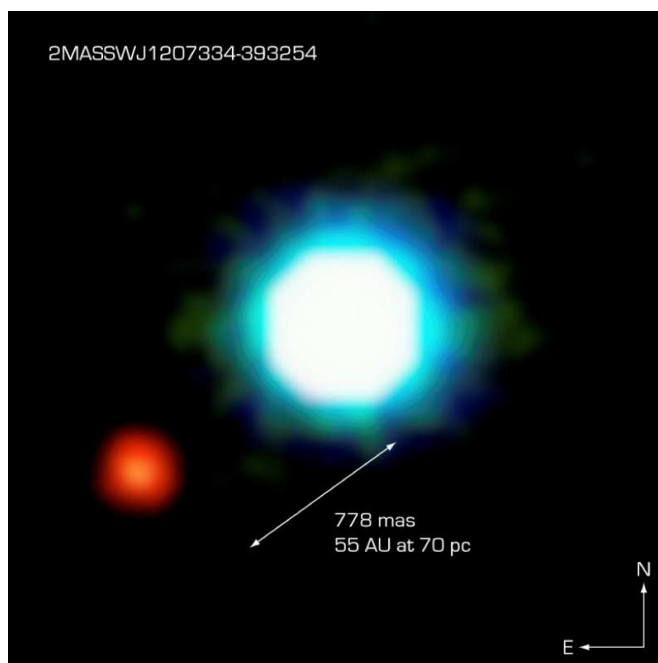
Tabulka 4: Seznam přímo zobrazených exoplanet [8]

Planeta	Hmotnost (M_{Jup})	Vzdálenost od hvězdy (AU)	Rok objevu
2M1207b	4	46	2004
GQ Lup b	21,5	103	2005
AB Pic b	13,5	275	2005
SCR 1845 b	>8,5	>4,5	2006
UScoCTIO 108 b	14	670	2007
GSC 6213-1358 b	8	330	2008

9 Přehled vybraných exoplanet

Tabulka 5: Údaje o exoplanetě 2M 1207 b [5, 6]

2M 1207 b – první snímek planety mimo naší Sluneční soustavu	
Hmotnost planety M_{Jup}	4
Doba oběhu [dny]	–
Velká poloosa [AU]	46
Výstřednost dráhy	–
Typ planety	plynný obr
Mateřská hvězda	2M 1207 (hnědý trpaslík)
Vzdálenost mateřské hvězdy od Země [ly]	227,5
Metoda objevení	přímé pozorování
Rok objevení	2004



Obr. 23: Snímek exoplanety 2M 1207 b [13]

Tabulka 6: Údaje o exoplanetě 51 Peg b [5, 6]

51 Peg b – první horký Jupiter	
Hmotnost planety M_{Jup}	0,468
Doba oběhu [dny]	4,23
Velká poloosa [AU]	0,052
Výstřednost dráhy	0
Typ planety	horký Jupiter
Mateřská hvězda	51 Peg (hnědý trpaslík)
Vzdálenost mateřské hvězdy od Země [ly]	48
Metoda objevení	měření radiální rychlosti hvězdy
Rok objevení	1995



Obr. 24: Umělecké pojetí exoplanety 51 Pegasi b a její mateřské hvězdy [13]

Tabulka 7: Údaje o exoplanetě Epsilon Eridani b [5, 6]

Epsilon Eridani b – nejbližší exoplaneta	
Hmotnost planety M_{Jup}	1,55
Doba oběhu [dny]	2502
Velká poloosa [AU]	3,39
Výstřednost dráhy	0,702
Typ planety	plynný obr
Mateřská hvězda	Epsilon Eridani
Vzdálenost mateřské hvězdy od Země [ly]	10,4
Metoda objevení	měření radiální rychlosti hvězdy
Rok objevení	2000



Obr. 25: Umělecké pojetí exoplanety Epsilon Eridani b [13]

Tabulka 8: Údaje o exoplanetě MOA-2007-BLG-192-L b [5, 6]

MOA-2007-BLG-192-L b – nejmenší dosud objevená exoplaneta, obíhající okolo nejmenší dosud známé hvězdy	
Hmotnost planety M_{Jup}	0,01
Doba oběhu [dny]	–
Velká poloosa [AU]	0,62
Výstřednost dráhy	–
Typ planety	plynný obr
Mateřská hvězda	MOA-2007-BLG-192-L
Vzdálenost mateřské hvězdy od Země [ly]	1000
Metoda objevení	gravitační mikročočka
Rok objevení	2008



Obr. 26: Umělecké pojetí exoplanety MOA-2007-BLG-192-L b a její mateřské hvězdy [13]

Tabulka 9: Údaje o exoplanetě PSR B1620-26 c [5, 6]

PSR B1620-26 c – nejstarší exoplaneta	
Hmotnost planety M_{Jup}	2,5
Doba oběhu [dny]	36000
Velká poloosa [AU]	23
Výstřednost dráhy	–
Typ planety	exoplaneta u pulsaru
Mateřská hvězda	PSR B1620-26 – dvojhvězda – pulsar a bílý trpaslík
Vzdálenost mateřské hvězdy od Země [ly]	12 350
Metoda objevení	zpoždování záblesků pulsarů
Rok objevení	1994



Obr. 27: Umělecké pojetí exoplanety PSR B1620-26 c [13]

Tabulka 10: Údaje o exoplanetě HD 189733 b [5, 6]

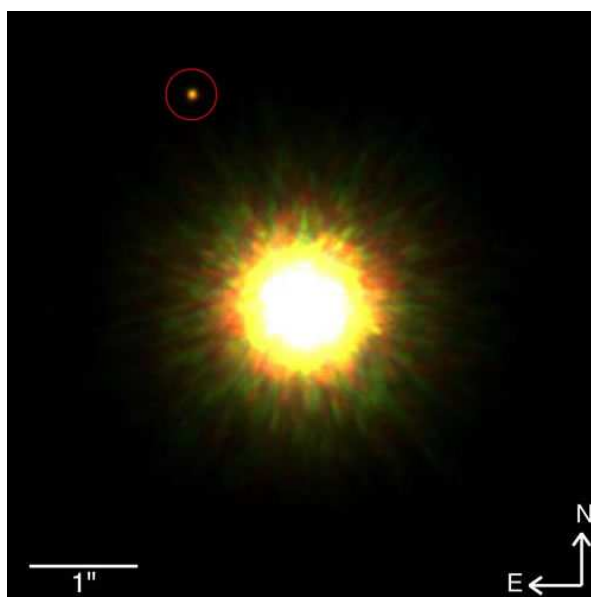
HD 189733 b – exoplaneta s molekulami metanu	
Hmotnost planety M_{Jup}	1,15
Doba oběhu [dny]	2,2
Velká poloosa [AU]	0,0312
Výstřednost dráhy	0
Typ planety	horký Jupiter
Mateřská hvězda	HD 189733
Vzdálenost mateřské hvězdy od Země [ly]	63
Metoda objevení	měření radiální rychlosti hvězdy
Rok objevení	2005



Obr. 28: Umělecké pojetí exoplanety HD 189733 b [13]

Tabulka 11: Údaje o exoplanetě GSC 6213-1358 b [5, 6]

GSC 6213-1358 b – první vyfotografovaná exoplaneta u hvězdy podobné Slunci.	
Hmotnost planety M_{Jup}	8
Doba oběhu [dny]	–
Velká poloosa [AU]	330
Výstřednost dráhy	0
Typ planety	zatím není znám
Mateřská hvězda	GSC 6213-1358 (1RXS1609 b)
Vzdálenost mateřské hvězdy od Země [ly]	500
Metoda objevení	přímé zobrazení (vyfotografování)
Rok objevení	2008



Obr. 29: Umělecké pojetí exoplanety GSC6213-1358 [12]

Závěr

Člověka odjakživa přitahovala otázka existence života mimo naši rodnou planetu. A protože je Země zřejmě jediným ostrovem života v naší sluneční soustavě, musíme se pohlednout po planetách obíhajících okolo cizích hvězd – extrasolárních planetách neboli exoplanetách. Výzkum exoplanet je v současnosti jedním z nejvíce se rozvíjejících oborů astronomie. První planety mimo sluneční soustavu byly objeveny v polovině 90. let minulého století. Teprve počátkem 90. let se totiž technika a astronomie dostaly na takovou úroveň, abychom mohli pátrání po exoplanetách považovat za reálné. Dnes známe již více než 300 exoplanet a v nejbližších letech se toto číslo jistě mnohonásobí.

Objev exoplanety není nic jednoduchého. Planety jsou ve srovnání s hvězdami malé objekty přezářené svými slunci. Spatřit exoplanetu u cizí hvězdy je velmi obtížné i v případě těch nejvýkonnějších dalekohledů, ať už pozemských či kosmických. Přesto nám ale dala příroda šanci exoplanety objevit a zkoumat. Stejně jako člověk zanechává stopy a ovlivňuje své okolí, tak i planety ovlivňují své mateřské hvězdy.

Nejúspěšnější při detekci extrasolárních planet je metoda měření radiální rychlosti hvězdy. Z tohoto důvodu jsem se rozhodla popsat tuto metodu ve své práci podrobněji. K měření radiální rychlosti hvězd se používá přístroj nazývaný spektrograf a jako příklad tohoto zařízení jsem si vybrala ešeletový spektrograf HARPS, který se nachází na Evropské jižní observatoři v La Silla v Chile a díky kterému již bylo několik exoplanet objeveno.

Měla jsem možnost vidět spektrograf, i když jiného typu, než HARPS při exkurzi v Astronomickém ústavu Akademie věd České republiky v Ondřejově. Tento spektrograf sice pracuje na trochu odlišném principu, ale i tak mi pomohl ujasnit si řadu věcí, které mi předtím nebyly zcela jasné.

Kromě popisu metod detekce extrasolárních planet jsem se ve své práci věnovala i jejich klasifikaci a historii jejich objevů a výzkumu, hledání obyvatelných planet, zajímavým objevům exoplanet v poslední době a ke konci práce je uveden přehled exoplanet, které jsou podle mého názoru nejzajímavější.

10 Seznam použité literatury

- [1] Astronomy and Astrophysics Advisory Committee – Worlds Beyond: Report of the ExoPlanet Task Force, Washington, D.C.: Draft submitted to the AAAC, 2008.
- [2] Mayor, M., Frei, P. Y.: Nové světy ve vesmíru – Objevování exoplanet, Paseka, Praha, 2007.
- [3] Pokorný, Z.: Exoplanety – Najdeme ve vesmíru další Zemi?. Academia, Praha, 2007.
- [4] Philip's Astronomy Dictionary: Výkladový astronomický slovník. Nakladatelství Jota, Brno, 1996.
- [5] PlanetQuest: Exoplanet Exploration – <http://planetquest.jpl.nasa.gov>
- [6] The Extrasolar Exoplanet Encyclopaedia – <http://exoplanet.eu>
- [7] Astronomia – astronomický server Fakulty pedagogické ZČU v Plzni – <http://www.astro.pef.zcu.cz>
- [8] Český rozhlas Leonardo – <http://www.rozhlas.cz/leonardo/portal>
- [9] Observatoire de Haute-Provence (OHP) – <http://www.obs-hp.fr>
- [10] Wikipedie, otevřená encyklopedie – <http://cs.wikipedia.org>
- [11] Observatoire de Geneve – <http://www.unige.ch/sciences/astro/>
- [12] Gemini Observatory – <http://www.gemini.edu/>
- [13] Wikipedia, the free encyclopedia – http://en.wikipedia.org/wiki/Main_Page
- [14] Aldebaran – <http://www.aldebaran.cz>
- [15] Mauna Kea observatories – <http://www.ifa.hawaii.edu/mko>

11 Seznam obrázků

- Obr. 1: Objevitelé první exoplanety 51 Peg b Michel Mayor a Didier Queloz
- Obr. 2: Výtvarné pojetí: Exoplaneta 51 Peg b se svou mateřskou hvězdou
- Obr. 3: Graf znázorňující hranice obyvatelná zóny
- Obr. 4: Změna vlnové délky při pohybu hvězdy
- Obr. 5: Funkční schéma HARPS
- Obr. 6: Dalekohled Evropské jižní observatoře o průměru 3,6 m
- Obr. 7: Cassegrainův vláknový adaptér
- Obr. 8: Spektrograf HARPS v Evropské jižní observatoři La Silla
- Obr. 9: Detektor
- Obr. 10: Poloha barycentra pro hvězdu a planetu
- Obr. 11: Kolísání polohy hvězdy na obloze způsobené planetou
- Obr. 12: Průběh změny jasnosti při přechodu planety přes kotouč hvězdy
- Obr. 13: Výtvarné pojetí – přechod planety přes kotouč hvězdy
- Obr. 14: Metoda gravitační mikročocky
- Obr. 15: Metoda gravitační mikročocky
- Obr. 16: Objevitelka prvního pulsaru Jocelyn Bell
- Obr. 17: Zbytek po výbuchu supernovy
- Obr. 18: Umělecké pojetí planety MOA-2007-BLG-192Lb
- Obr. 19: Tři superzemě obíhající kolem hvězdy HD 40307
- Obr. 20: Observatoř na vrcholku Mauna Kea na Havaji
- Obr. 21: Snímek hvězdy GSC 6213-1358 a exoplanety obíhající kolem ní
- Obr. 22: Dva dalekohledy Keckovy observatoře o průměru 10 m
- Obr. 23: Snímek exoplanety 2M 1207 b
- Obr. 24: Umělecké pojetí exoplanety 51 Pegasi b a její mateřské hvězdy
- Obr. 25: Umělecké pojetí exoplanety Epsilon Eridani b
- Obr. 26: Umělecké pojetí exoplanety MOA-2007-BLG-192-L b a její mateřské hvězdy
- Obr. 27: Umělecké pojetí exoplanety PSR B1620-26 c
- Obr. 28: Umělecké pojetí exoplanety HD 189733 b
- Obr. 29: Umělecké pojetí exoplanety GSC6213-1358

12 Seznam grafů

- Graf 1: Počet objevených exoplanet v jednotlivých letech
- Graf 2: Křivka radiální rychlosti hvězdy 51 Peg získaná pomocí spektrografu Elodie v observatoři Haute-Provence
- Graf 3: Počet planet v závislosti na hmotnosti
- Graf 4: Rozložení velkých orbitálních poloos známých planet
- Graf 5: Rozložení oběžných dob známých planet
- Graf 6: Rozložení orbitálních excentricit jako funkce velké poloosy pro všechny objevené planety, u kterých je známá excentricita
- Graf 7: Rozložení excentricit jako funkce hmotnosti
- Graf 8: Rozložení orbitální excentricity versus velká poloosa pro přecházející planety
- Graf 9: Rozložení hmotností planet jako funkci předpokládané vzdálenosti planety od mateřské hvězdy
- Graf 10: Vztah hmotnost – poloměr obřích exoplanet

13 Seznam tabulek

Tabulka 1: Příklady názvů exoplanet

Tabulka 2: Optické parametry spektroskopu

Tabulka 3: Vlastnosti čipů

Tabulka 4: Seznam přímo zobrazených exoplanet

Tabulka 5: Údaje o exoplanetě 2M 1207 b

Tabulka 6: Údaje o exoplanetě 51 Peg b

Tabulka 7: Údaje o exoplanetě Epsilon Eridani b

Tabulka 8: Údaje o exoplanetě MOA-2007-BLG-192-L b

Tabulka 9: Údaje o exoplanetě PSR B1620-26 c

Tabulka 10: Údaje o exoplanetě HD 189733 b

Tabulka 11: Údaje o exoplanetě GSC 6213-1358 b