

Středoškolská odborná činnost

Obor č. 2: Fyzika

Analýza vývoje exoplanet pomocí Rossiterova-McLaughlinova jevu

Jan Herzig

Plzeňský kraj

Domažlice 2025

Středoškolská odborná činnost

Obor č. 2: Fyzika

Analýza vývoje exoplanet pomocí Rossiterova-McLaughlinova jevu

Exoplanet evolution analysis using Rossiter-McLaughlin effect

Autor: Jan Herzig

Škola: Gymnázium J. Š. Baara, Pivovarská 323, 344 01 Domažlice

Kraj: Plzeňský kraj

Konzultant: Jiří Žák, Ph. D. (Astronomický ústav AV ČR, v.v.i.)

Domažlice 2025

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou práci SOČ vypracoval samostatně a použil jsem pouze prameny a literaturu uvedené v seznamu bibliografických záznamů.

Prohlašuji, že tištěná verze a elektronická verze soutěžní práce SOČ jsou shodné.

Nemám závažný důvod proti zpřístupňování této práce v souladu se zákonem č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších předpisů.

V Horšovském Týně dne 20. 3. 2025

Podpis:

Jan Herzig

Poděkování

Na prvním místě bych chtěl poděkovat svému konzultantovi Jiřímu Žákovi, Ph. D. z Astronomického ústavu AV ČR za uvedení do tématu exoplanet a spektroskopie, poskytnuté rady při shromažďování i analýze dat a v neposlední řadě také za jeho odborné připomínky k samotné práci.

Dále bych chtěl poděkovat RNDr. Petru Škodovi, Ph. D. za umožnění letní stáže na Astronomickém ústavu AV ČR a dalším pracovníkům Stelárního oddělení za představení oboru stelární fyziky, které mě motivovalo k napsání této práce.

Na závěr bych chtěl poděkovat také své rodině a přátelům za dlouhodobou významnou podporu mého zájmu o astronomii a vědu obecně.

Anotace

Tato práce se zabývá analýzou vývoje exoplanetárních systémů na základě výzkumu spekter jejich mateřských hvězd. Využívá k tomu doposud neanalyzovaná nebo s velkou odchylkou analyzovaná volně dostupná data z archivů velkých observatoří. Vybírá kandidáty s dostatečně kvalitními pozorovacími daty, u kterých jsou následně na základě křivky radiálních rychlostí zjišťovány hodnoty vybraných parametrů. Jejich porovnáním s aktuálně uznávanými teoriemi vzniku planetárních systémů předkládá hypotézy vzniku zkoumaných exoplanet a vybírá ty vhodné pro další průzkum.

Klíčová slova: exoplaneta; spektroskopie; radiální rychlost; Rossiterův-McLaughlinův jev; protoplanetární disk

Annotation

This work focuses on analyzing the evolution of exoplanetary systems based on the study of spectra from their parent stars. It utilizes freely available data from major observatory archives that have either not been analyzed yet or have been analyzed with a large uncertainty. Candidates with sufficiently high-quality observational data are selected, and selected parameters are determined based on radial velocity curves. By comparing these values with currently accepted theories of planetary system formation, the study presents hypotheses regarding the origin of the examined exoplanets and identifies those suitable for further investigation.

Key words: exoplanet; spectroscopy; radial velocities; Rossiter-McLaughlin effect, protoplanetary disk

Obsah

1	Úvod	1
2	Exoplanety	1
2.1	Historie výzkumu exoplanet	2
2.2	Současný stav výzkumu exoplanet	3
2.2.1	Využívané přístroje	4
2.2.2	Dělení exoplanet	5
2.2.3	Cíle výzkumu a výhled do budoucnosti	7
2.3	Vznik a vývoj exoplanetárních systémů	8
2.3.1	Formace in situ	9
2.3.2	Migrace v disku	9
2.3.3	Migrace mimo disk	10
2.4	Atmosféry exoplanet	10
2.4.1	Metody pozorování	10
2.4.2	Složení a procesy v atmosférách	11
3	Metody objevování exoplanet	12
3.1	Tranzitní metoda	12
3.2	Metoda radiálních rychlostí	15
3.2.1	Spektrografy	16
3.3	Ostatní metody	18
3.3.1	Astrometrie	18
3.3.2	Gravitační mikročočkování	18
3.3.3	Přímé zobrazení	19
3.3.4	Změny časů tranzitů a zákrytů, period pulzace	19
3.3.5	Změny jasnosti během oběhu	19
3.3.6	Kinematika disku	19
4	Rossiterův-McLaughlinův jev	19
4.1	Motivace	19
4.2	Historie	20
4.3	Princip	20
4.4	Matematické vyjádření	21
4.5	Navazující a podobné metody	23
5	Výběr systémů k analýze	23
5.1	Podmínky výběru	24
5.2	Průběh výběru	24
6	Fitování RM jevu	35
6.1	Parametry modelu	36
6.2	Popis systémů	38
6.3	Výsledky fitování	38

7	Diskuze výsledků	43
7.1	Diskuze konkrétních systémů	43
7.1.1	HD 149026 b	43
7.1.2	TOI-560 c	44
7.1.3	QATAR-7 b	44
7.1.4	WASP-85 A b	44
7.1.5	WASP-173 A b	44
7.2	Zařazení do systému	45
8	Možnosti pokračování	45
8.1	Modelování atmosfér	47
9	Závěr	48
10	Seznam literatury	49
11	Seznam obrázků	53
12	Seznam tabulek	56

1 Úvod

Výzkum exoplanet je jednou z nejrychleji se rozvíjejících oblastí současné astrofyziky. Stále výkonnější dalekohledy, kamery i spektroskopy umožňují průzkum rostoucího množství exoplanetárních systémů. Existuje několik metod objevování těchto těles, mezi nejčastější se řadí metoda tranzitů a metoda radiálních rychlostí. S jejich pomocí jsme schopni zjistit celou řadu parametrů vzdálených planetárních systémů. Nejvíce informací je možno získat při pozorování stejného objektu více různými metodami.

U systémů, u nichž dochází k tranzitu a zároveň je u něj možno dostatečně přesně změřit radiální rychlosti, můžeme pozorovat tzv. Rossiterův-McLaughlinův jev. Analýzou tohoto efektu lze následně určit průmět sklonu orbitální rotační osy planety k rotační ose její mateřské hvězdy na oblohu (v angličtině pro tuto veličinu existuje pojem *projected stellar obliquity*). Podle něj můžeme dané exoplanetě přiřadit nejpravděpodobnější teorii jejího vývoje na základě dnes uznávaných modelů. Zvláště zajímavé je sledování tohoto parametru u exoplanet ze skupiny horkých Jupiterů, které nemají ve Sluneční soustavě obdoby a doposud není zcela jasné, jak mohou existovat tak blízko u svých hvězd.

Pozorováním exoplanet se pravidelně zabývají i velké dalekohledy s dostatečně vysokým rozlišením potřebným pro detekci Rossiterova-McLaughlinova jevu. Ne všechna data z nich jsou však okamžitě zpracována a publikována. Po uplynutí určité doby jsou pozorovaná data z vybraných observatoří zveřejňována ve veřejně dostupných archivech.

Hlavním cílem této práce bylo najít v těchto archivech dostatečně kvalitní pozorování systémů, u kterých může být pozorován Rossiterův-McLaughlinův jev a zároveň jeho analýza v těchto systémech ještě nebyla publikována nebo byla s výraznou odchylkou. Následně tato pozorování zpracovat, určit hodnotu *projected stellar obliquity* a předložit teorii vzniku dané exoplanety. Druhým cílem bylo na základě těchto dat vybrat vhodné kandidáty pro další pozorování většími dalekohledy.

Třetím cílem práce bylo poskytnout ucelené informace o problematice výzkumu exoplanet, specificky metody radiálních rychlostí a Rossiterova-McLaughlinova jevu, o kterém v české literatuře doposud existuje minimum zmínek.

2 Exoplanety

Exoplanety jsou vesmírné objekty svými fyzickými parametry shodné s planetami. Liší se od nich svojí lokací. Pojmem exoplaneta totiž označujeme tělesa obdobná planetám, která obíhají kolem jiných hvězd než Slunce.

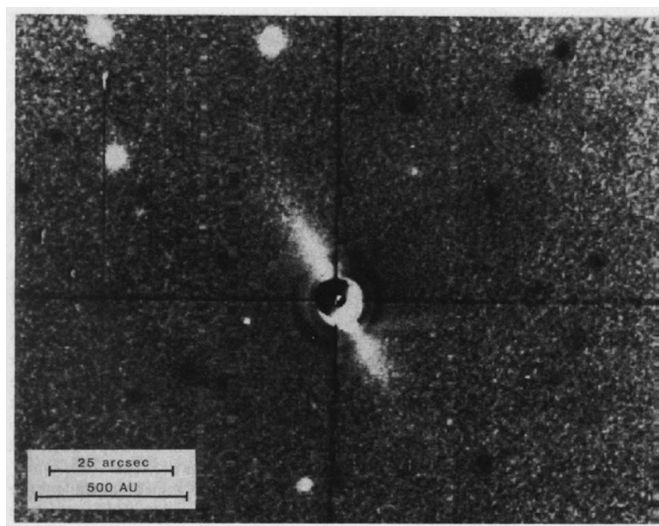
Pojem planeta má svoji ustálenou definici přijatou Mezinárodní astronomickou unií v roce 2006: „Planeta je nebeské těleso, které (a) obíhá kolem Slunce, (b) má dostatečnou hmotnost na to, aby její vlastní gravitace překonala síly tuhého tělesa tak, aby se dostala do hydrostatické rovnováhy a do kulového tvaru, (c) a vyčistila okolí své oběžné dráhy.“[1]

V současné době se vede diskuze o horním hmotnostním limitu exoplanet, jelikož není přesně určeno, která tělesa ještě mají být považována za velké exoplanety a která naopak za nejmenší subhvězdné objekty, hnědé trpaslíky. Mezinárodní astronomická unie má připravenou pracovní definici exoplanety, která by mohla být přijata v nadcházejících letech.[2]

2.1 Historie výzkumu exoplanet

První úvahy o planetách obíhajících kolem jiných hvězd můžeme zaznamenat již v 17. století, kdy o nich hovořil Giordano Bruno. V 19. století se několik astronomů domnívalo, že objevili planetu u jiné hvězdy, žádný z objevů ale nebyl nakonec potvrzen. V roce 1952 poukázal Otto Struve ve svém článku na to, že tehdejší spektrografy by již měly být schopny detekovat pomocí metody radiálních rychlostí přítomnost hmotných exoplanet obíhajících blízko svých mateřských hvězd. První systematické hledání takových objektů bylo zahájeno v roce 1979 týmem astronoma Gordona Walkera.[3]

Roku 1983 byl na základě infračervených emisí předpovězen první cirkumstelární disk. Jeho přítomnost byla potvrzena o rok později u hvězdy Beta Pictoris A prvním optickým pozorováním daného objektu. Cirkumstelární disk je uskupení hmoty obklopující hvězdu, ze kterého se na počátku života hvězd tvoří planety. Někdy je většina materiálu disku spotřebována na tvorbu planet a disk zaniká, někdy však může disk přetrvat i do pozdějších fází života hvězdy. První pozorování takového objektu bylo tedy významným důkazem pro přítomnost planet u jiných hvězd.[4]



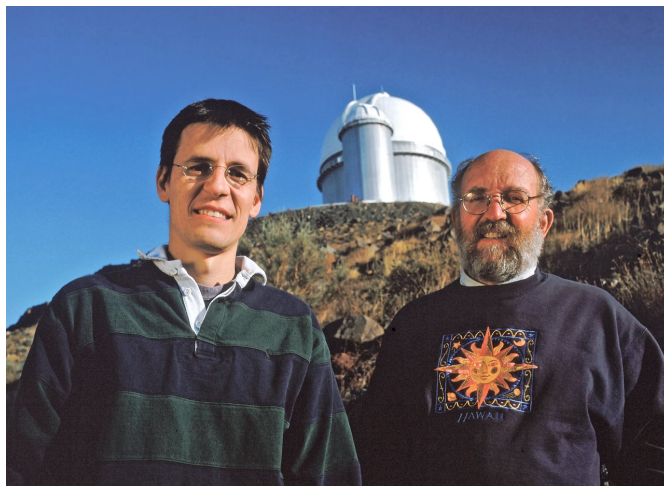
Obrázek 1: První snímek protoplanetárního disku u hvězdy Beta Pictoris A z roku 1984. Převzato z [4].

Výzkum zahájený v roce 1979 čekal dlouho na své první výsledky, jelikož se zaměřoval na hledání planet podobných Jupiteru s periodou oběhu přibližně 12 let. V roce 1988 se jim podařilo objevit první signál odpovídající exoplanetě u hvězdy Gamma Cephei s periodou 2,7 roku. Nebylo však zcela jasné, zdali za amplitudou radiálních rychlostí hvězdy nestojí jiný efekt a později Walkerův tým svoji publikaci stáhl a dále nepovažoval objevený signál za exoplanetu. V roce 1989 publikoval možný objev exoplanety HD 114762 b tým Davida Lathama, později však bylo zjištěno, že se jedná o malého červeného trpaslíka, tedy hvězdu.[3]

K prvnímu potvrzenému objevu planety mimo Sluneční soustavu došlo v roce 1992, avšak stalo se tak u velmi neobvyklé hvězdy. Aleksandru Wolszczanovi a Dalu Frailovi se podařilo detekovat přítomnost exoplanet u pulsaru PSR B1257+12. Pulsary jsou druhem neutronových hvězd. Ty jsou závěrečným stádiem života hmotnějších hvězd, v průměru měří pouze jednotky kilometrů, skládají se výhradně z neutronů a mají extrémní hustotu. Jako pulsary jsou poté označovány neutronové hvězdy se silným magnetickým polem,

kteřé velmi rychle rotují (obvykle s periodou v řádu milisekund) a z okolí svých magnetických pólů emitují intenzivní elektromagnetické záření. Exoplanety u PSR B1257+12 byly objeveny na základě drobných odchylek v době rotace svého pulsaru pozorovaných radioteleskopem.[5]

Následovala však diskuze o tom, zdali je možné vůbec považovat objekty obíhající pulsar za plnohodnotné planety. Jako první objev exoplanety je tedy často považován až objev horkého Jupitera 51-Pegasi b, který oznámili v roce 1995 Michel Mayor a Didier Queloz. Jedná se totiž o planetu u hvězdy hlavní posloupnosti podobnou Slunci. Planeta je svými rozměry srovnatelná s Jupiterem, kolem své hvězdy obíhá ve vzdálenosti 0,05 au¹. Za tento objev byla v roce 2019 udělena část Nobelovy ceny za fyziku.[6]



Obrázek 2: Nositelé části Nobelovy ceny za fyziku za rok 2019, objevitelé exoplanety 51-Pegasi b, Michel Mayor a Didier Queloz před 3,6 metrovým dalekohledem na observatoři La Silla, kde je dnes provozován spektrograf *HARPS*. Převzato z [7].

V roce 1999 je pak poprvé pozorována exoplaneta i tranzitní metodou, HD 209458 b. V následujících letech začíná počet objevených exoplanet narůstat zrychlujícím se tempem. První kosmický dalekohled specificky určený pro průzkum exoplanet nesl název *CoRoT* (Convection, Rotation and planetary Transits). Doposud nejvýznamnějším projektem zaměřeným na hledání exoplanet byla mise dalekohledu *Kepler*. Během necelých deseti let své mise (včetně navazující mise *K2*) se mu podařilo tranzitní metodou objevit 3325 potvrzených exoplanet.² Díky pozorování tranzitní metodou se mu podařilo pozorovat i exoplanety výrazně menší než ty pozorované metodou radiálních rychlostí, včetně planet hmotnostně a rozměrově srovnatelných se zemí. Infračervený kosmický dalekohled *Spitzer* operující mezi lety 2003 a 2020 objevil také několik nových systémů a zaměřoval se i na studium atmosfér exoplanet. Exoplanety zkoumala i astrometrická družice *Gaia*, jejíž mise skončila v lednu 2025.[3]

2.2 Současný stav výzkumu exoplanet

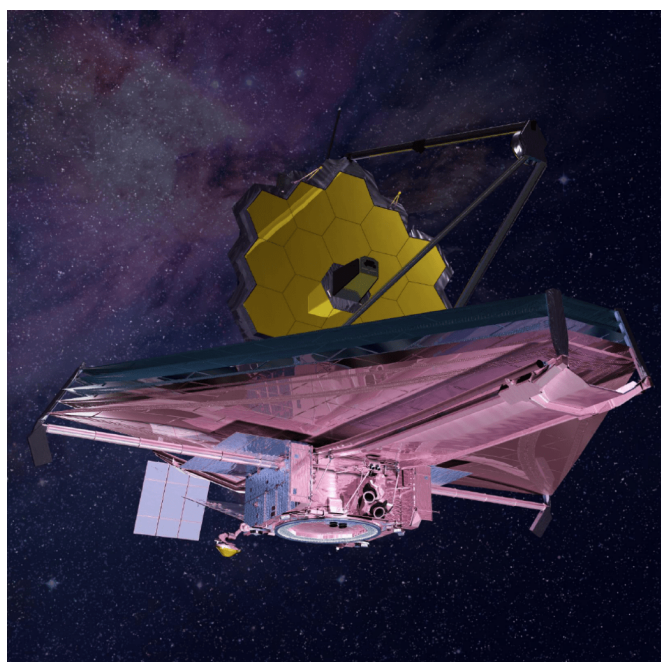
Ke dni 25. 2. 2025 je potvrzen objev 5 839 exoplanet u 4 372 hvězd.[8]

¹Astronomická jednotka = střední vzdálenost Země od Slunce, značka au

²Údaj k 25. 2. 2025.

2.2.1 Využívané přístroje

Na výzkum exoplanet se v současné době zaměřuje mise kosmické sondy *TESS*, Dalekohledu Jamese Webba, teleskopu *CHEOPS* a Hubbleova dalekohledu. *TESS* (Transiting Exoplanet Survey Satellite) disponuje čtyřmi CCD kamerami se širokým zorným polem a systematicky zaznamenává světelné křivky velkého množství hvězd, v nichž jsou následně vyhledávány tranzity exoplanet. Ke dni 24. 2. 2025 se mu podařilo objevit 605 exoplanet a 4 673 kandidátů čekajících na potvrzení.[9]

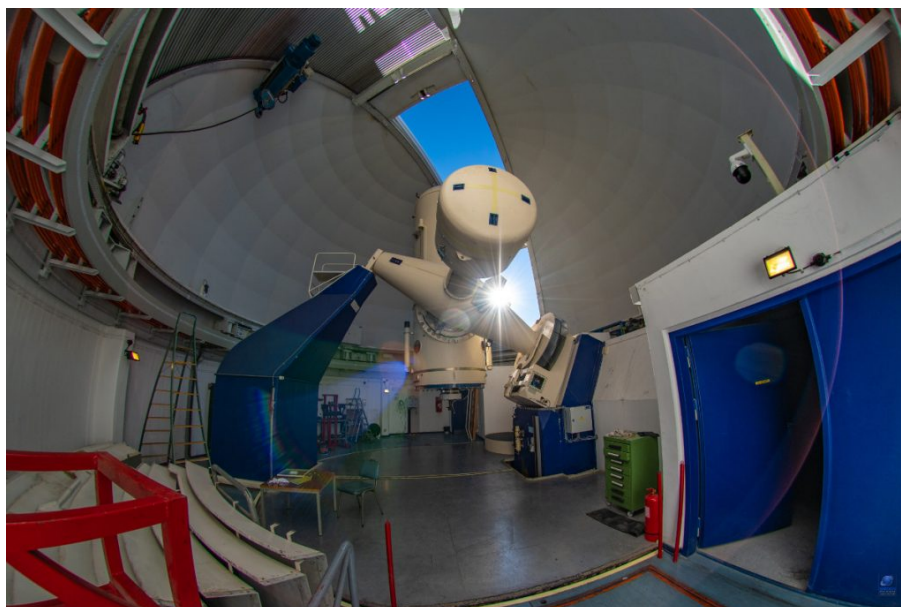


Obrázek 3: Umělecká představa Dalekohledu Jamese Webba. Převzato z [10].

Teleskop *CHEOPS* (CHaracterising ExOPlanets Satellite) se zaměřuje na průzkum blízkých jasných hvězd, u kterých už byla přítomnost exoplanet potvrzena. Jeho cílem je pomocí precizního pozorování tranzitů zpřesnit informace o známých systémech. Vyhodnotí-li nějaký systém jako zajímavý, může být pozorován Dalekohledem Jamese Webba. Ten je považován za nejdokonalejší kosmický teleskop současnosti a pozorovací čas na něm je tudíž velmi omezený, průzkum exoplanet se však řadí mezi jeho hlavní cíle. Zaměřuje se především na spektrální analýzu složení atmosfér exoplanet a podařilo se mu v atmosférách plyných obrů i kamenných planet objevit řadu zajímavých chemických sloučenin. S jeho pomocí bylo i několik planet přímo zobrazeno. Analýzu atmosfér i přímé zobrazování provádí rovněž Hubbleův dalekohled, který je v provozu již od roku 1990.[11]

Mezi nejdůležitější pozemské přístroje se řadí spektrografy *HARPS*, *HARPSN*, *ESPRESSO* nebo *HIRES* a tranzitní přehlídky *NGTS*, *WASP*, *KELT* a *TRAPPIST*. V této práci byla využita pozorovací data ze spektrografů *HARPS*, *HARPSN* a *ESPRESSO*, které proto budou podrobně rozebrány ve třetí kapitole. *KPF* (Keck Planet Finder) je instalován na Keckově observatoři, která disponuje dvěma dalekohledy o průměru objektivu 10 metrů. Podobně jako jeho nedávno vyřazený předchůdce *HARPS* (High Resolution Echelle Spectrometer) je schopen detekovat velmi malé změny radiální rychlosti hvězd. *NGTS* (Next Generation Transit Survey) je soustava robotických dalekohledů na observatoři Paranal v chilské poušti Atacama, která se zaměřuje na detekci menších exoplanet u jasnějších hvězd.

WASP (Wide Angel Search for Planets) je rovněž soustava robotických dalekohledů, které se nachází na dvou lokacích, v Jihoafrické republice a na jednom z Kanárských ostrovů, La Palmě. Monitoruje celou oblohu, současně až několik tisíc jasnějších hvězd. *KELT* (Kilodegree Extremely Little Telescope) jsou dva dalekohledy v Jihoafrické republice o průměru objektivu pouhých 7,1 cm. I přes na profesionální přístroje neobvykle malý průměr zrcadla se tomuto programu podařilo tranzitní metodou objevit už několik desítek exoplanet.



Obrázek 4: Český dalekohled E152 na observatoři La Silla v Chile, na kterém je umístěn spektrograf *PLATOSpec*. Převzato z [12].

TRAPPIST (Transiting Planets and Planetesimals Small Telescope) jsou dva zrcadlové dalekohledy o průměru 60 cm, jeden na observatoři La Silla v Chile, druhý se nachází na observatoři Oukaïmeden v Maroku. Tento projekt objevil známý systém 7 exoplanet TRAPPIST-1, který obsahuje planety i v obyvatelné zóně své hvězdy. *TRAPPIST* je nyní součástí sítě dalekohledů *SPECULOOS* (Search for habitable Planets ECLipsing ULtra-cOOL Stars), který se zaměřuje na detekci exoplanet u velmi chladných trpasličích hvězd a hnědých trpaslíků.[3]

V České republice probíhá pozorování exoplanet na dvoumetrovém Perkově dalekohledu v areálu Ondřejovské hvězdárny. S pomocí přístroje *OES* (Ondřejov Echelle Spectrograph) je možné pozorovat hmotnější exoplanety nebo hnědé trpaslíky.[13] Pod vedením Stelárního oddělení Astronomického ústavu AV ČR funguje také spektrograf *PLATOSpec* na 1,52 metrovém dalekohledu *E152* na observatoři La Silla v Chile. V budoucnu bude využíván k potvrzování objevů nových exoplanet pomocí metody radiálních rychlostí prvně pozorovaných chystanou kosmickou sondou *PLATO* tranzitní metodou.[12]

2.2.2 Dělení exoplanet

Objevené exoplanety můžeme na základě jejich rozměrů, hmotnosti, složení a dalších vlastností rozdělit do několika skupin. Dělení není zcela jednoznačné, jelikož jsou objevovány stále nové planety, které nemusí zapadat do původních skupin a jejich definice se může měnit.

Nejmenší a nejlehčí z nich jsou kamenné (terestrické) planety. Nalezneme na nich pevný povrch a jsou složeny převážně z těžších prvků, jako jsou například kyslík, křemík a kovy. Často mají podobnou strukturu vzniklou díky diferenciaci. V době své formace byly zárodky planet roztaveny, nejtěžší prvky se usadily kolem jádra, lehčí naopak vystoupaly na povrch tělesa. To vedlo ke vzniku kovového jádra, křemenného pláště a povrchové kůry. Tyto planety mohou mít i atmosféru, která může vzniknout třeba působením vulkanické aktivity nebo dopady komet. Do této kategorie planet by se ve Sluneční soustavě řadil Merkur, Venuše, Země a Mars. V rámci této kategorie vydělujeme ještě tzv. lávové planety. Často obíhají blízko svých mateřských hvězd a jejich povrch je celý pokryt lávou.

Další skupinou jsou super-Země. Mohou nabývat až desetinásobku hmotnosti Země a dvojnásobku jejího poloměru. Méně hmotné z nich mají také pevný povrch, hustotu často větší než Země. Hmotnější a větší poté mají kovové jádro obklopené hustou atmosférou a připomínají tak spíše již plynné planety. Kamenné planety s hmotností minimálně desetkrát větší než Země jsou označovány jako mega-Země. Mírně rozměrově větší jsou zástupci skupiny mini-Neptuny. Jedná se o malé plynné planety (někdy jsou označovány také jako plynní trpaslíci). Svojí strukturou připomínají Neptun, mají hustou atmosféru z vodíku a hélia, ve které mohou být ukryty kamenné vrstvy, led nebo oceány z vody či čpavku. Jejich hmotnost může dosahovat až dvacetinásobku hmotnosti Země. Někdy je vyčleňována ještě další skupina, sub-Neptuny, která má podobné vlastnosti, menší rozměry než Neptun, ale větší hmotnost. Členové všech doposud zmíněných skupin mohou být tzv. oceánské planety, jejichž povrch je celý pokryt látkou v kapalném stavu. Ve Sluneční soustavě super-Země, mega-Země, mini-Neptuny ani sub-Neptuny nenajdeme.[3]

Větších rozměrů dosahují ledoví obři. Jedná se o planety bez pevného povrchu, které překračují desetinásobek hmotnosti Země a dvojnásobek jejího poloměru. Mají kamenné jádro, které je obklopeno atmosférou z těžších prvků, jako jsou kyslík, dusík, uhlík a síra v plynné podobě, v kapalně se zde může vyskytovat i voda, čpavek či methan. Vodík a helium tvoří asi jen 20 % z celkového složení jejich obalu. Ve Sluneční soustavě bychom do této skupiny mohli zařadit Uran a Neptun. Planety větší než ledoví obři (v rozsahu 20-80 hmotností Země) jsou označovány jako super-Neptuny nebo sub-Saturny.



Obrázek 5: Umělecká představa exoplanety typu horkého Jupitera tranzitující před svou hvězdou. Převzato z [14].

Největší skupinou planet jsou plynní obři. Skládají se z kovového jádra, kolem kterého je vrstva tekutého vodíku a nad ní atmosféra složená převážně z plynného vodíku a hélia. V nejvyšších vrstvách atmosféry může vznikat oblačnost z vody a čpavku. Tato skupina se dále dělí na dvě další podle toho, kde dané planety kolem své hvězdy obíhají. Chladní obři se pohybují po vzdálených oběžných drahách, jeden oběh jim zabere roky nebo i desítky let. Ve Sluneční soustavě k nim náleží Jupiter a Saturn. Horké Jupitery naopak nalezneme v těsné blízkosti svých hvězd, blíže než obíhá Země kolem Slunce. Jejich orbitální periody se pohybují v řádu jednotek až desítek dnů a vzhledem k blízkosti hvězdy na nich panují vyšší teploty. Ve Sluneční soustavě je nenajdeme, ale řadí se mezi ně první objevená exoplaneta 51-Pegasi b.[15]

Jako horní hranice hmotnosti objektu, aby ještě mohl být považován za exoplanetu, je považován 13násobek hmotnosti Jupitera. Po překročení této hranice totiž může v nitru objektu začít probíhat termojaderná fúze deuteria, což je považováno za základní vlastnost hvězdy. Objekty s mírně větší hmotností jsou označovány jako hnědí trpaslíci. Jedná se o sub-hvězdné objekty, jelikož termojaderná fúze v nich probíhá v mnohem menší míře než u standardních hvězd a vyzařují převážně v infračervené oblasti spektra.[2]

2.2.3 Cíle výzkumu a výhled do budoucnosti

Kolem většiny planet Sluneční soustavy obíhají měsíce. Země má jeden, Saturn jich má dokonce 274. U exoplanet však doposud žádný exoměsíc pozorován nebyl. Pro jeho detekci je zapotřebí ještě přesnějších přístrojů než v případě exoplanet, jelikož je očekáváno, že měsíce budou dosahovat rozměrů srovnatelných nanejvýše s těmi nejmenšími exoplanetami. Bylo nalezeno již několik kandidátů na exoměsíce, žádný ale ještě nebyl potvrzen. Pozorování v současné době probíhají i na Dalekohledu Jamese Webba, ale není jasné, kdy by mohly přinést první potvrzený objev.[16]

Všechny doposud pozorované exoplanety se nacházely v naší Galaxii. Očekává se, že planety obíhají kolem hvězd i v jiných galaxiích. Jejich pozorování je však limitováno tím, že v cizích galaxiích obvykle nejsme schopni rozlišit jednotlivé hvězdy. Není tedy možné pořídit dostatečně kvalitní tranzitní křivku nebo spektrum. V roce 2021 byl oznámen kandidát na exoplanetu v galaxii M51, jeho přítomnost však nebyla definitivně potvrzena. V roce 2023 se však podařilo objevit první protoplanetární disk v jiné galaxii, v systému HH 1177 v sousední trpasličí galaxii Velké Magellanovo mračno.[17]

Dlouhodobým cílem je hledání planet podobných Zemi, které by mohly hostit nějakou formu života. Takové planety by se měly nacházet v tzv. obyvatelné zóně, tedy takovém rozsahu vzdáleností od své mateřské hvězdy, které umožňují přítomnost kapalné vody na povrchu planety. Pomocí spektroskopie je možné zjistit i složení atmosféry planety. Na několika planetách už byly objeveny organické sloučeniny. V budoucnu by tedy mohla být možná detekce sloučenin souvisejících výhradně se životem, a tím první objev existence života mimo Zemi. Současné přístroje však nedostačují na pozorování planet identických se Zemí, jelikož jsou příliš málo hmotné na detekci metodou radiálních rychlostí a mají velmi dlouhé oběžné periody a způsobují velmi malý pokles jasnosti mateřské hvězdy, což je činí obtížně pozorovatelné tranzitní metodou.



Obrázek 6: Vizualizace budovaného dalekohledu ELT po dokončení na hoře Cerro Armazones v Chile. Převzato z [14].

V roce 2026 se do vesmíru vydá evropská sonda *PLATO* (PLANetary Transits and Oscillations of stars), která bude vybavena 26 kamerami, které budou pozorovat jasnější hvězdy s cílem přesně určit parametry planet obíhajících kolem nich a to zejména těch menších, ledových obrů a Zemi podobných planet v obyvatelné zóně.[18] O rok později je v plánu start teleskopu Nancy Grace Romanové, který bude hledat exoplanety i technikou gravitačního mikročočkování. Roku 2028 má vstoupit do provozu největší pozemský dalekohled všech dob, *ELT* (Extremely Large Telescope), který umožní velmi přesné měření metodou radiálních rychlostí.[19] V roce 2029 má odstartovat mise *ARIEL* (Atmospheric Remote-sensing Infrared Exoplanet Large-survey), která má za cíl charakterizovat atmosféry 1 000 exoplanet. Přípravovaná velká observatoř NASA, která naváže Hubbleův a Webbův dalekohled, by měla nést název *Habitable Worlds Observatory*. Jedním z jejích cílů bude přímé zobrazení alespoň 25 planet podobných Zemi. Její start je v plánu však až po roce 2040.[20]

2.3 Vznik a vývoj exoplanetárních systémů

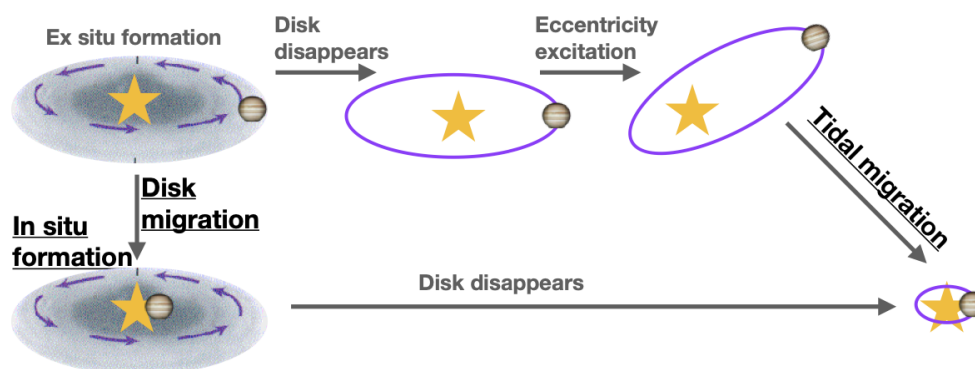
Před objevem prvních exoplanet byly veškeré teorie o vzniku a vývoji planetárních systémů založeny pouze na tom, co jsme věděli o Sluneční soustavě. Na základě tohoto omezeného pohledu na jeden, byť velmi dobře prozkoumaný systém, bylo předpokládáno, že planety se formují z oblaku prachu a plynu, který zkolabuje do disku. Ten se následně rozděluje na dvě oblasti, první kde se může vyskytovat voda v kapalném nebo plynném stavu a druhou, kde pouze v pevném skupenství. Navzájem jsou odděleny tzv. sněžnou čarou³.

Ve vzdálenější oblasti s dostatkem pevných ledových látek i chladnějších plynů se rychle zformovala kamenná jádra, která na sebe nabalila husté plynné atmosféry a vznikly tak plynné planety. Ve Slunci bližší oblasti chyběl dostatek materiálu a ledové látky. Kamenným jádrům proto zabrala formace delší dobu a nebyla schopna nabalit na sebe

³Hraniční vzdálenost od mateřské hvězdy, za kterou je teplota nižší než bod mrazu vody.

plynné atmosféry. Tyto menší zárodky planet proto musely počkat až na rozptýlení protoplanetárního disku a následně vzájemnými srážkami dorostly do dnešní podoby.[21]

Hned první objevená exoplaneta, 51 Pegasi b, však ukázala, že tento model nebude univerzálně aplikovatelný. Tato exoplaneta je svým rozměrem a hmotností totiž podobná Jupiteru, ale kolem své hvězdy podobné Slunci obíhá stokrát blíže než Jupiter kolem Slunce.[6] Na základě v současnosti dostupných dat existují tři hlavní teorie vzniku exoplanet ze skupiny horkých Jupiterů.



Obrázek 7: Znázornění tří teorií vývoje exoplanet ze skupiny horkých Jupiterů, formace in situ (In situ formation), migrace v disku (Disc migration) a migrace mimo disk (Ex situ formation, Tidal migration). Převzato z [22].

2.3.1 Formace in situ

Způsob formace in situ předpokládá vznik exoplanety přímo v oblasti, kde je dnes pozorována, tedy v těsné blízkosti mateřské hvězdy. První teorií, jak by k tomu mohlo docházet, je gravitační nestabilita vedoucí ke zhuštění materiálu v jednom místě a vzniku planety. Vzhledem k rychlé rotaci disku v těsném okolí hvězdy je však nepravděpodobné, že by ke vzniku takových nestabilit mohlo v této oblasti docházet. Rovněž tlak horkého plynu v těsném okolí hvězdy zabraňuje gravitačnímu kolapsu do hustějšího mračka.

Další možností je způsob akrece jádra, tedy postupného nabalování materiálu na kamenné jádro planety. Není však jasné, jak by takto blízko hvězdě mohlo vzniknout kamenné jádro hmotné dostatečně na to, aby na sebe nabalovalo okolní plyn. Pevné látky pro tvorbu takovýchto jader se totiž vyskytují převážně až za sněžnou čarou. Zdali vůbec u horkých Jupiterů může formace in situ probíhat, je doposud nejasnou otázkou.[22]

2.3.2 Migrace v disku

Teorie migrace v disku předpokládá vznik exoplanety ve vzdálenějších částech protoplanetárního disku (několik astronomických jednotek daleko od hvězdy) a jejich následnou migraci do těsné blízkosti hvězdy. K této migraci může docházet díky výměně momentu hybnosti s plynem v protoplanetárním disku. Ta může probíhat dvěma způsoby. Buď plyn před sebou planeta vysílá na vzdálenější oběžné dráhy, nebo si hmotnější planeta přímo otevře cestu v disku v průběhu jeho akrece na hvězdu. Tento princip spolu s možnou přítomností dutin v magnetickém poli zároveň zajišťuje, že se planeta zastaví dostatečně brzy a není pohlcena hvězdou. Migrace může být zastavena i rozptýlením protoplanetárního disku.

Konečná lokace planety poté závisí na vlastnostech konkrétního disku, např. magnetickém poli, viskozitě, slapovým interakcím atd.

Tato teorie se jeví jako velmi pravděpodobná, jelikož pozorované velké poloosy horkých Jupiterů korelují s těmi předpovězenými počítačovými simulacemi. V tomto modelu také zůstává rovina oběhu planety přibližně kolmá na osu rotace hvězdy.[22]

2.3.3 Migrace mimo disk

Model migrace mimo disk rovněž předpokládá formaci planety dále od centrální hvězdy, kde je dostatek vhodného materiálu pro akreci jádra. K migraci do vnitřních částí systému však v tomto případě dochází až po rozptýlení protoplanetárního disku. Aby v takovém případě mohla migrace proběhnout a z chladného Jupitera se stal horký Jupiter, je potřeba zmenšit jeho moment hybnosti a energii.

Díky vlivu nějakého dalšího tělesa, planety, hvězdy nebo pozůstatků disku může planeta přejít ze své přibližně kruhové na vysoce excentrickou⁴ oběžnou dráhu, čímž dojde k redukci momentu hybnosti. Následně slapovými interakcemi při blízkých průchodech kolem mateřské hvězdy zmenšuje svoji orbitální energii a ke hvězdě se přibližuje. Na konci tohoto procesu se nachází již v těsné blízkosti hvězdy. Nová oběžná dráha však může být výrazně skloněna vůči rotační ose hvězdy.[22]

2.4 Atmosféry exoplanet

U některých exoplanet je možno za určitých podmínek získat spektrum jejich atmosfér. To může být velmi užitečným nástrojem pro studium různých fyzikálních, chemických a potenciálně i biologických procesů, které ve vzdušných obalech planet mohou probíhat. Zjištění složení atmosfér však zároveň může pomoci i studiu vzniku a historie vývoje daných těles.

V posledních letech se obor výzkumu exoplanetárních atmosfér rozvíjí velmi rychlým tempem. Je to možné především díky kosmickým dalekohledům. Za tímto účelem byl využit již Spitzerův kosmický dalekohled, nyní jsou pozorování atmosfér prováděna Hubbleovým dalekohledem, ale především Dalekohledem Jamese Webba. Celkem byla doposud detekována přítomnost atmosféry u 265 exoplanet.[23]

2.4.1 Metody pozorování

Atmosféry exoplanet je možné pozorovat třemi různými způsoby. Nejúspěšnější je metoda trazitní spektroskopie, lze však využít i Dopplerovskou spektroskopii s vysokým rozlišením a přímé zobrazení.

Dopplerovská spektroskopie s vysokým rozlišením využívá toho, že při pohybu systému hvězda-planeta kolem hmotného středu soustavy dochází k posunu spektrálních čar hvězdy i atmosféry planety vlivem Dopplerova jevu. Spektrální čáry atmosféry planety je obtížnější detekovat, amplituda jejich pohybu je však přibližně tisíckrát větší než v případě spektrálních čar hvězdy. Spektrální čáry hvězdy jsou na základě toho odečteny ze spektra, čímž je získáno spektrum atmosféry dané exoplanety.

Metoda přímého zobrazení využívá zakrytí hvězdy koronografem. Tím je přímo izolováno samotné spektrum atmosféry exoplanety. Vzhledem k velké jasnosti hvězdy oproti planetě

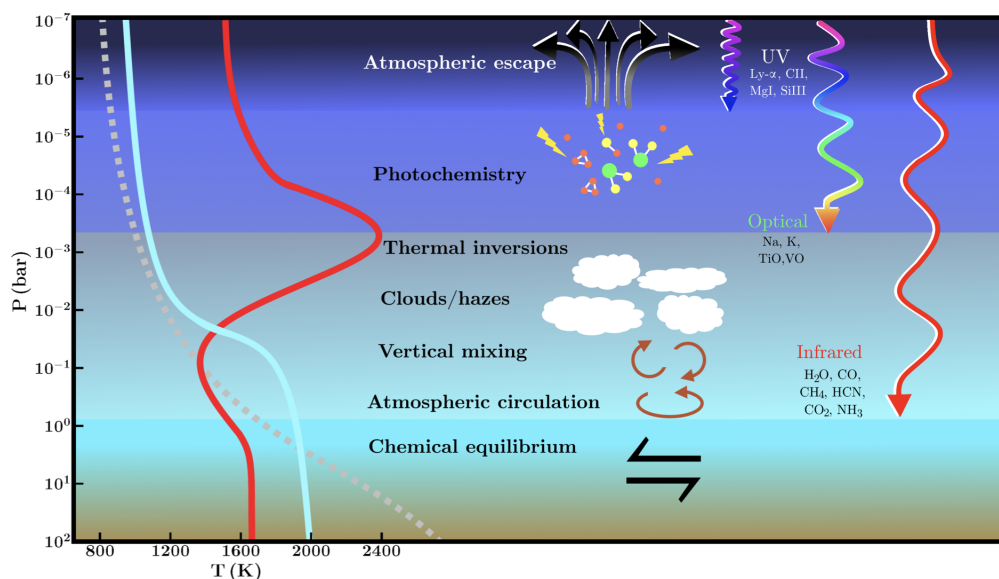
⁴Excentricita = výstřednost oběžné dráhy, čím větší, tím méně se dráha podobá kružnici a jedná se o protáhlejší elipsu.

lze však této metody využít pouze v případě velkých planet ve velké vzdálenosti od svých mateřských hvězd.

Nejdůležitější metodou pro průzkum atmosfér je tranzitní spektroskopie. Využívá tranzitu exoplanety před diskem mateřské hvězdy. Během něj prochází světlo hvězdy i atmosférou exoplanety a interaguje s látkami, které jsou v ní obsaženy. To se projeví ve spektru hvězdy. V průběhu tranzitu v něm tak můžeme pozorovat spektrální čáry (emisní i absorpční), které se v něm mimo tranzit nevyskytují a musí proto náležet atmosféře exoplanety. Podle vlnové délky, na které jsou tyto čáry pozorovány, můžeme porovnáním s měřením v pozemských laboratořích potvrdit přítomnost různých atomů a molekul ve zkoumané atmosféře.[24]

2.4.2 Složení a procesy v atmosférách

Na obrázku 8 vidíme schéma jednotlivých obecných procesů, které je možné v atmosférách pozorovat na různých vlnových délkách. Jednotlivé atmosférické procesy jsou závislé na tlaku v daném místě atmosféry. Hluboko v atmosféře, kde tlak přesahuje hodnotu 1 baru, je teplota, a s ní i hustota a opacita, dostatečně vysoká na zachování termochemické rovnováhy. Chemické reakce zde tedy probíhají rychleji než kinetické procesy.



Obrázek 8: Zobrazení prostupnosti záření a typických atmosférických procesů v závislosti na tlaku v atmosféře planety. Vlevo jsou zobrazeny také tři možné teplotní profily atmosféry. Červený pro případ planety, na kterou dopadá velké množství záření a v její atmosféře dochází k teplotní inverzi. Světle modrý znázorňuje obdobně ozářenou planetu, kde však nedochází k teplotní inverzi. Šedý přerušovaný odpovídá případu planety, na niž dopadá minimum záření. Převzato z [24].

Výše v atmosféře (tlak v rozmezí 1 mbar - 1 bar) začnou převládat odlišné procesy jako vertikální proudění, atmosférická cirkulace nebo teplotní inverze a může zde docházet ke tvorbě mraků. Tyto procesy silně závisí na chemickém složení atmosféry a dopadajícím záření od hvězdy.

V nejvyšších vrstvách atmosféry díky kombinaci nízké hustoty plynu a vysoké intenzity dopadajícího záření převládají fotochemické procesy. Molekuly jsou rozkládány na jednotlivé

atomy a vznikají nové sloučeniny. V případě velmi nízké hustoty může docházet k úniku částic a spolu s ním k hmotnostnímu úbytku atmosféry.

Jednotlivé oblasti atmosféry jsou nejlépe pozorovatelné na odlišných vlnových délkách. Sloučeniny vyskytující se především v nižších vrstvách atmosféry, jako jsou například H_2O , CO , CO_2 a CH_4 , absorbují díky svým rotačně-vibračním přechodům především infračervené záření. Ve středních vrstvách atmosféry jsou pozorovány sloučeniny obsahující těžké kovy (např. TiO , VO , TiH), které absorbují na vlnových délkách viditelného záření. Samostatné atomy, které se vyskytují v nejvyšších vrstvách atmosféry, poté absorbují primárně v ultrafialové oblasti.

Popsanými metodami se v atmosférách exoplanet podařilo doposud objevit 64 různých sloučenin.[23] Mezi potvrzenými látkami můžeme najít prvky vodík, hélium, sodík, draslík, lithium, vápník, hořčík, křemík nebo skandium. V případě sloučenin jsou nejzajímavější pozorování vody, oxidu uhelnatého a uhlíčitého, methanu a složitějších organických molekul. Na základě pozorování lze také učinit hrubý odhad množství daných látek v atmosféře nebo poměr zastoupení dvou důležitých prvků, C/O poměr nebo O/H poměr.

Většina z exoplanet, u kterých byla atmosféra pozorována, náleží do skupiny horkých Jupiterů. V několika případech však byla atmosféra detekována i u menších planet, například ze skupiny sub-Neptunů nebo super-Zemí. Otázkou je, zda by se na těchto exoplanetách podobných Zemi mohl vyskytovat život. Výzkum se proto zaměřuje především na přítomnost vodní páry, jelikož voda je základní součástí života na Zemi, a organických sloučenin, které jsou pro vznik známých forem života také důležité nebo jsou na Zemi živými organismy přímo produkovány.[24]

Mezi nejzajímavější se v tomto ohledu řadí detekce vodní páry v atmosféře sub-Neptunu GJ 9827d [25] nebo nedávná možná detekce dimethyl sulfidu a dimethyl disulfidu v atmosféře planety K2-18b. Už dříve se zde podařilo potvrdit přítomnost vodní páry, oxidu uhlíčitého i methanu, poslední pozorování naznačují i přítomnost dimethyl sulfidu a dimethyl disulfidu, který je na Zemi produkován mořskými organismy.[26]

3 Metody objevování exoplanet

3.1 Tranzitní metoda

Pokud exoplaneta obíhá kolem své hvězdy v rovině pohledu ze Země, můžeme pro její pozorování použít tranzitní metodu. Za uvedené podmínky totiž exoplaneta při každém oběhu jednou na určitou dobu svoji hvězdu částečně zakryje, disk exoplanety přejde přes disk hvězdy (proběhne tranzit). Exoplanety jsou mnohem menší než hvězdy, a zakryjí tak pouze velmi malou část disku hvězdy. Vede to však k poklesu jasnosti, který je možné zaznamenat.

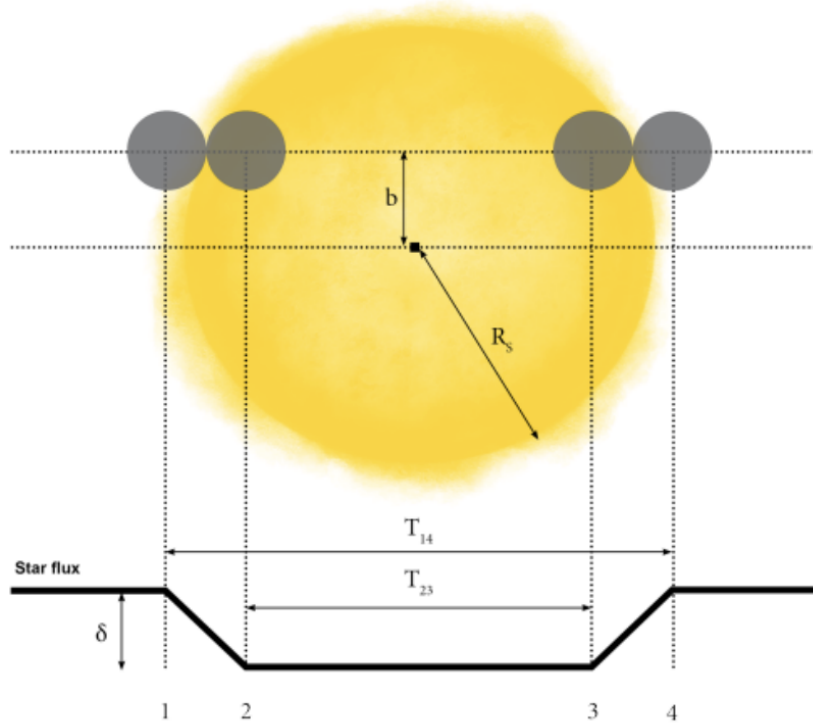
Při zaznamenávání tzv. světelné křivky, tedy závislosti intenzity světla přicházejícího od hvězdy na čase, můžeme pozorovat náhlý pokles. Z míry tohoto poklesu lze vypočítat poměr poloměru planety a hvězdy. Doba, po které se pokles intenzity záření opakuje, odpovídá oběžné době planety P . Za předpokladu, že planeta nevydává vlastní záření, lze poměr poloměru hvězdy a planety určit podle poklesu intenzity záření ze Stefanova-Boltzmannova zákona:

$$\frac{I_z}{I_0} = \frac{\pi R_*^2 \sigma T_*^4 - \pi R_P^2 \sigma T_*^4}{\pi R_*^2 \sigma T_*^4} = \frac{(\pi R_*^2 - \pi R_P^2) \sigma T_*^4}{\pi R_*^2 \sigma T_*^4} = \frac{R_*^2 - R_P^2}{R_*^2} = 1 - \frac{R_P^2}{R_*^2},$$

$$\frac{R_P}{R_*} = \sqrt{1 - \frac{I_z}{I_0}}, \quad (1)$$

kde R_P je poloměr exoplanety, R_* poloměr hvězdy, T_* teplota hvězdy, σ Stefanova-Boltzmannova konstanta, I_z intenzita záření přicházejícího od hvězdy v době přechodu exoplanety a I_0 obvyklá intenzita záření od hvězdy. Výsledný poměr umocněný na druhou je tzv. hloubka tranzitu $D = (\frac{R_P}{R_*})^2$, parametr často využívaný pro charakteristiku exoplanet.

Hmotnost hvězdy lze přibližně odhadnout na základě jejího zářivého výkonu. Ze 3. Keplerova zákona poté za znalosti doby oběhu můžeme vyjádřit velkou poloosu dráhy exoplanety. U tranzitu jsou dále definovány čtyři důležité body; první kontakt, kdy se okraj disku planety dotkne disku hvězdy; druhý kontakt, kdy se opačný okraj disku planety také dostane před disk hvězdy a je tedy před ním již celá planeta; třetí kontakt, kdy první okraj disku planety opustí disk hvězdy a čtvrtý kontakt, kdy druhý okraj disku planety opustí disk hvězdy a planeta se tedy nachází již celá mimo. Lze-li tyto body na světelné křivce dobře odlišit, můžeme určit i absolutní hodnotu poloměru exoplanety.



Obrázek 9: Znázornění tranzitu planety přes mateřskou hvězdu. R_S značí poloměr hvězdy, b impaktní parametr (zde v m). Níže můžeme vidět obvyklou světelnou křivku hvězdy v průběhu tranzitu. Intenzita záření od hvězdy začne klesat po prvním kontaktu (1), minima dosáhne po vstupu celé planety před disk hvězdy (2), začne opětovně růst když planeta začne opouštět hvězdu (3), a dosáhne zpět své obvyklé hodnoty poté co planeta úplně opustí disk (4). Mezi jednotlivými body měříme intervaly dále značené jako Δt_{14} a Δt_{23} . Z poklesu jasnosti můžeme určit hloubku tranzitu D , zde značenou jako δ . Převzato z [27].

Dalším důležitým údajem, který je možné odvodit z pozorování tranzitní metodou,

je impaktní parametr, obvykle značený jako b . Jedná se o kolmou vzdálenost dráhy exoplanety přes disk hvězdy od rovniku hvězdy v jednotkách R_* . Můžeme ho tedy změřit u exoplanet s inklinací dráhy blízkou 90° . Obecně platí [27]:

$$b = \frac{a \cos i_o}{R_*}. \quad (2)$$

Impaktní parametr však lze určit pouze i z časů průchodů kontaktními body a hloubky tranzitu a podle něj lze následně určit velkou poloosu a . Pro rozdíly časů Δt_{14} mezi prvním a čtvrtým kontaktem a Δt_{23} mezi druhým a třetím kontaktem za předpokladu $a \gg R_*$ lze na základě geometrie přechodu psát:

$$\Delta t_{14} \approx \frac{P}{\pi a} \sqrt{(R_* + R_P)^2 - (bR_*)^2}, \quad (3)$$

$$\Delta t_{23} \approx \frac{P}{\pi a} \sqrt{(R_* - R_P)^2 - (bR_*)^2}. \quad (4)$$

S pomocí hloubky tranzitu D lze zapsat poměr těchto časů a následně z něj vyjádřit opět impaktní parametr b :

$$\tau = \frac{\Delta t_{14}}{\Delta t_{23}} = \frac{\sqrt{(R_* + \sqrt{D}R_*)^2 - (bR_*)^2}}{\sqrt{(R_* - \sqrt{D}R_*)^2 - (bR_*)^2}} = \sqrt{\frac{(1 + \sqrt{D})^2 - b^2}{(1 - \sqrt{D})^2 - b^2}}, \quad (5)$$

$$b = \sqrt{\frac{(1 - \sqrt{D})^2 \tau^2 - (1 + \sqrt{D})^2}{\tau^2 - 1}}. \quad (6)$$

Uvedený vztah je platný však pouze pro kruhové dráhy. V případě eliptických drah pro impaktní parametr platí upravená rovnice (2) [28]:

$$b = \frac{a \cos i_o}{R_*} \left(\frac{1 - e^2}{1 + e \sin \omega} \right), \quad (7)$$

kde e je excentricita oběžné dráhy planety a ω argument periapsidy, tedy úhel svíraný vzestupným uzlem dráhy a periapsidou.

Vedle toho je často užívaná i veličina a/R_* , tedy velká poloosa planety v jednotkách poloměru hvězdy. Tento parametr lze vyjádřit rovněž pouze na základě parametrů přímo zjistitelných z tranzitu:

$$\frac{a}{R_*} \approx \frac{2D^{1/4}P}{\pi \sqrt{\Delta t_{14}^2 - \Delta t_{23}^2}}. \quad (8)$$

Pokud známe tento parametr a odhadneme podle nějakých modelů založených na spektrálních vlastnostech a jasnosti poloměr hvězdy, můžeme následně určit velkou poloosu planety i bez znalosti hmotnosti hvězdy.[27]

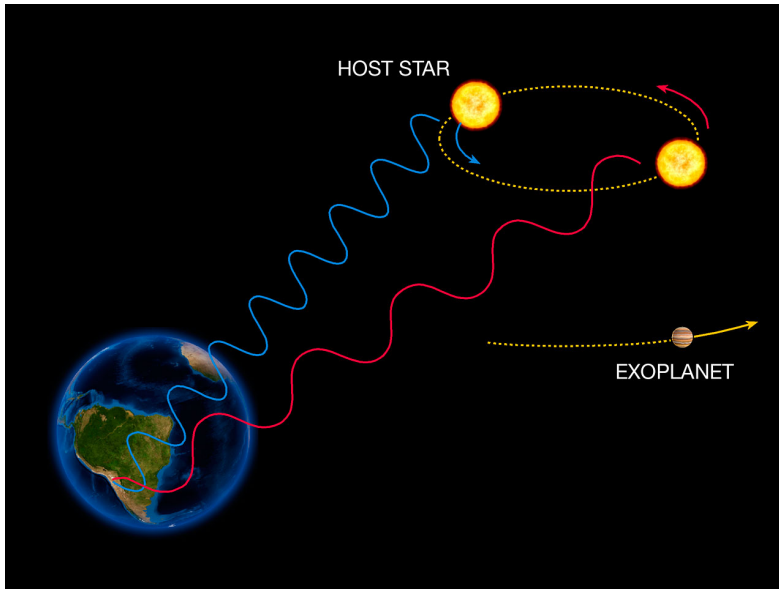
Na pozorování tranzitní metodou stačí i velmi malé dalekohledy o průměru objektivu v řádu jednotek centimetrů. K nim se připojí astronomická kamera, standardně vybavená CCD nebo CMOS čipy, která následně po určitou dobu sleduje hvězdu a zaznamenává intenzitu příchozího záření. Nejčastěji jsou tímto způsobem detekovány exoplanety s malou oběžnou dobou, jelikož u nich stačí krátká pozorovací doba na zaznamenání tranzitu.[29]

3.2 Metoda radiálních rychlostí

Radiální metoda je užitečná univerzálně pro exoplanety s libovolným sklonem oběžné dráhy k rovině oběhu. Každý rotující systém má své centrum hmotnosti, barycentrum, kolem kterého obě tělesa obíhají. Barycentrum se vždy nachází blíže hmotnějšímu tělesu. Závislost hmotnosti těles na vzdálenosti od barycentra je vyjádřena vztahem:

$$M_* r_* = M_P r_P, \quad (9)$$

kde M_* je hmotnost hvězdy, r_* je vzdálenost hvězdy od barycentra, M_P hmotnost planety a r_P vzdálenost planety od barycentra. V případě obvyklého systému hvězda-planeta, kde hvězda je mnohokrát hmotnější než planeta, leží barycentrum v těsné blízkosti hvězdy. V soustavě Země-Slunce leží například pod povrchem Slunce.



Obrázek 10: Znázornění metody radiálních rychlostí. Hvězda se vlivem oběhu planety sama také pohybuje, při pohybu směrem k Zemi dochází k posunu spektrálních čar do modré oblasti spektra (vlnová délka světla se zkracuje), v opačném směru do červené oblasti (vlnová délka světla se prodlužuje). Z míry posunu lze určit radiální rychlost hvězdy. Převzato z [14].

Hvězda však kolem barycentra obíhá stejně jako planeta. Rychlost tohoto pohybu je možné změřit. Využívá se k tomu tzv. Dopplerova jevu. Jedná se o změnu frekvence vlnění (elektromagnetického i mechanického) na základě pohybu objektu vydávajícího dané vlnění vůči pozorovateli. Frekvence je nepřímo úměrná vlnové délce. Spektrografy můžeme zobrazit spektrum hvězdy. V něm lze identifikovat spektrální čáry, kterým náleží specifické vlnové délky, na kterých je vyzařována energie při přechodech elektronů v atomech různých prvků. Pokud se hvězda pohybuje, mají spektrální čáry jinou vlnovou délku, než by měly mít podle laboratorních pozorování. Z této změny vlnové délky lze poté určit radiální rychlost pohybu hvězdy:

$$\frac{v}{c} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}, \quad (10)$$

kde c je rychlost světla, $\Delta\lambda$ je maximální rozdíl pozorované vlnové délky spektrální čáry a její vlnové délky naměřené v laboratoři a λ_0 je vlnová délka naměřená v laboratoři.

Závislost této rychlosti na čase vynesena do grafu je označovaná jako křivka radiálních rychlostí.⁵

Radiální rychlost hvězdy se v průběhu oběhu mění, spektrální čáry se posouvají. Z toho, jak často se tyto posuvy opakují, lze určit periodu oběhu hvězdy kolem barycentra, která je rovná oběžné době planety. Z maximální rychlosti (odpovídající maximálnímu vzdálení spektrální čáry od její střední polohy) následně můžeme určit poloměr dráhy, po které se pohybuje hvězda kolem barycentra systému:

$$v = \frac{2\pi r_*}{T},$$

$$r_* = \frac{vT}{2\pi}. \quad (11)$$

Hmotnost hvězdy je možné přibližně odhadnout dle jejího zářivého výkonu, poloměr (velkou poloosu) dráhy exoplanety určíme opět dle 3. Keplerova zákona a dosazením do vztahu (2) můžeme získat hmotnost exoplanety. Jedná se však pouze o spodní odhad její hmotnosti. Pouze radiální metodou totiž není možné určit sklon orbitální rotační osy exoplanety vůči našemu pohledu, tedy orbitální inklinaci. Vypočítaná rychlost hvězdy tedy odpovídá případu inklinace $i_o = 90^\circ$. V případě jiné inklinace je vypočítaná rychlost svázaná se skutečnou rychlostí vztahem $v_o = V_o \sin i_o$, kde V_o je skutečná rychlost oběhu hvězdy kolem barycentra systému. Hmotnost exoplanety je přímo úměrná rychlosti planety, a proto i zjištěná hmotnost je s tou skutečnou svázaná vztahem $M_P = m_P \sin i_o$, kde m_P je skutečná hmotnost. Přesnou hmotnost exoplanety je tedy možné určit až po zjištění orbitální inklinace planety.[30]

Z rozšíření spektrálních čar hvězdy ještě můžeme určit rychlost rotace hvězdy kolem vlastní osy. Opět však nemůžeme určit přímo její hodnotu, nýbrž pouze parametr $v = V \sin i_*$, i_* je sklon rotační osy hvězdy vůči rovině pozorovatele.

3.2.1 Spektrografie

Pro využití metody radiálních rychlostí je tedy potřeba zaznamenání hvězdného spektra, tj. závislosti intenzity světla přichozího od daného objektu na vlnové délce. K tomu se využívá spektrografu. Jedná se o přístroj složený z úzké štěrby, která propouští pouze světlo pozorovaného objektu. To následně putuje na difrakční mřížku, která ho rozděluje právě podle vlnových délek. Vzniklý obraz je pak zaznamenán CCD nebo CMOS čipem a může být dále interpretován. Součástí spektrografu mohou být i kolimátory, zrcadla nebo korekční desky pro regulaci průchozího světelného paprsku. Pro přesné přiřazení správných vlnových délek získanému spektru se využívá kalibračních lamp. Ta vydává záření známé látky. Napozorováním spektra kalibrační lampy lze provést vlnovou kalibraci, kdy přiřadíme vlnovou délku určitým pixelům na CCD čipu.

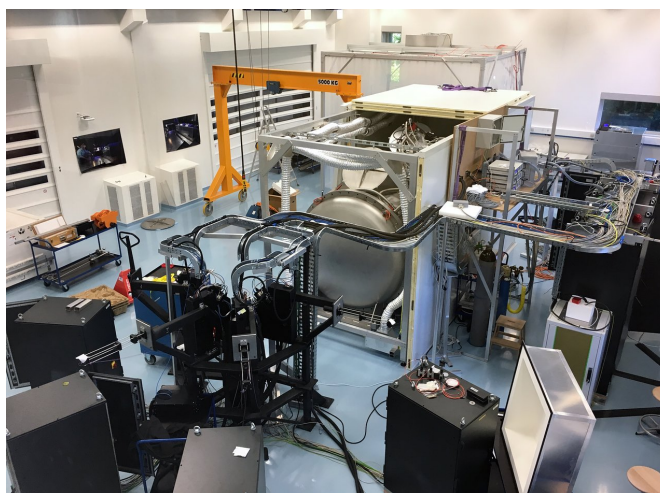
Rozlišujeme dva základní druhy spektrografů, jednořádkový a ešletový. Jednořádkový zaznamená pouze jeden řád spektra o rozsahu daném vlastnostmi přístroje. Jelikož je celý pozorovaný úsek spektra zobrazen pouze do jednoho řádu a čipy mají omezené rozměry, dosahuje jednořádkový spektrograf menšího rozlišení.

V současné době se proto více na měření radiálních rychlostí s cílem objevovat exoplanety používá spektrograf ešletový. Ten má oproti jednořádkovému jednu difrakční mřížku navíc, která je o 90° pootočena vůči první mřížce. To způsobuje rozdělení rozsahu spektra na několik řádů s kratším rozsahem, které jsou poskládány pod sebou. Na zaznamenání

⁵Označovaná krátce jako RV křivka podle anglického výrazu radial velocities.

spektra poté stačí menší čip a lze takto dosáhnout většího rozlišení. Také zobrazí větší počet spektrálních čar, což zvyšuje přesnost metody radiálních rychlostí. Někdy však mají až příliš vysoké rozlišení, což omezuje jejich využití pouze na ty nejjasnější objekty.[31]

Spektrograf *HARPS* (High Accuracy Radial velocity Planet Searcher) je umístěn u 3,6 metrového dalekohledu na observatoři La Silla v Chile, která je součástí Evropské jižní observatoře. Jedná se o ešletový spektrograf, do kterého je světlo přiváděno dvěma optickými vlákny. Jedno vede z Coudé ohniska zmíněného dalekohledu světlo pozorovaného objektu, druhé světlo pozadí oblohy nebo kalibrační thorium-argonové lampy. Přístroj je umístěn ve vakuové komoře, aby se předešlo spektrálním posunům způsobeným změnou teploty a tlaku vzduchu. Pokrývá spektrální rozsah 378 - 691 nm.⁶ Je schopný zaznamenat změnu radiální rychlosti hvězdy o hodnotě 1 m/s.[32]



Obrázek 11: Spektrograf *ESPRESSO* v zázemí observatoře VLT na hoře Paranal v Chile. Převzato z [33].

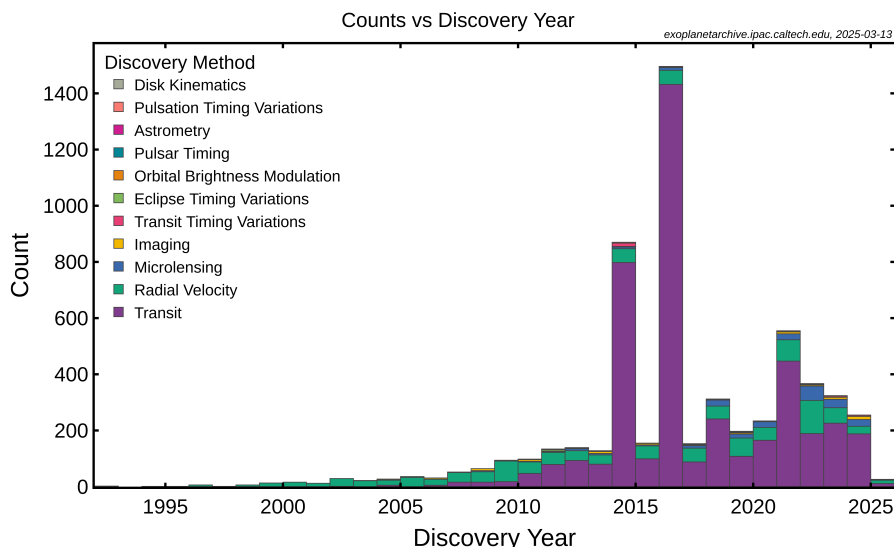
Spektrograf *HARPSN* (High Accuracy Radial velocity Planet Searcher for Northern hemisphere) je přístroj technicky zcela identický s přístrojem *HARPS*, který se nachází na italském dalekohledu TNG (Telescopio Nazionale Galileo) o průměru 3,58 m umístěném na observatoři Roque de los Muchachos na ostrově La Palma. Umožňuje pozorovat objekty severní oblohy, které nejsou *HARPSem* v Chile pozorovatelné.[34]

Spektrograf *ESPRESSO* (Echelle SPECTrograph for Rocky Exoplanets and Stable Spectroscopic Observations) je instalován v nekoherentním kombinovaném Coudé ohnisku dalekohledu VLT (Very Large Telescope) na observatoři Paranal v Chile, která je rovněž provozována Evropskou jižní observatoří. VLT je soustava čtyř dalekohledů o průměru 8,2 m a čtyř menších pomocných dalekohledů o průměru 1,8 m. Dalekohledy dokážou fungovat jednotlivě nebo jako jeden velký interferometr. *ESPRESSO* je také ešletový spektrograf, který dokáže pomocí 13 optických prvků analyzovat světlo z jednoho i všech osmimetrových dalekohledů současně. Uložen je rovněž ve vakuové komoře s kontrolovanou teplotou a tlakem. Světlo je do něj přiváděno skrze dvě optická vlákna, jedno pro pozorované objekty a druhé pro kalibraci.[33]

⁶Rozsah vlnových délek pozorovatelných lidským okem je přibližně 380 až 750 nm.

3.3 Ostatní metody

Převážná většina v současnosti známých exoplanet byla objevena využitím dvou dříve popsaných metod. Existují však i další metody, s jejichž pomocí doposud nebylo příliš exoplanet objeveno.



Obrázek 12: Sloupcový graf počtu objevených exoplanet v jednotlivých rocích. Barevně jsou odlišeny metody využitě k objevu dané planety. Jasně dominuje tranzitní metoda, největší počty jsou dány zásluhou mise *Kepler*. Převzato z [8].

3.3.1 Astrometrie

Jednou z nich je metoda astrometrie. Je velmi podobná metodě radiálních rychlostí, ale rychlost pohybu hvězdy se zde nezjišťuje ze spektra pomocí Dopplerova jevu, ale z přímého pozorování. Vzhledem ke vzdálenosti hvězd a jejich malé rychlosti jsou však posuny hvězd na obloze velmi malé a jde tímto způsobem detekovat pouze ty nejhmotnější exoplanety u blízkých hvězd.[29]

3.3.2 Gravitační mikročočkování

Dalším způsobem je metoda gravitačního mikročočkování. Při ní je využíváno principu obecné teorie relativity. Podle ní je světlo při průchodu kolem hmotného objektu ohýbáno. Díky tomu můžeme ve vesmíru pozorovat efekt gravitační čočky, ke kterému dochází, když se hmotný blízký objekt na obloze nachází před slabým vzdáleným objektem. Světlo ze vzdáleného objektu je v blízkosti bližšího hmotného objektu zakřiveno a vzdálenější objekt se nám jeví jasnější, než ve skutečnosti je. Často je jeho obraz také deformován, vzdálený bodový objekt může být zobrazen jako Einsteinův prstenec kolem bližšího objektu.

Pokud se takto dostane bližší hmotná hvězda před vzdálenější slabou, té vzdálenější se zvýší jasnost. Pokud kolem bližší hmotné hvězdy obíhá exoplaneta, ve chvíli kdy se dostane vedle své mateřské hvězdy před vzdálenou hvězdu, zvýší se jasnost vzdálené hvězdy ještě o něco více. Z tohoto dodatečného zvýšení jasnosti lze zjistit informace o dané exoplanetě. Jelikož je tento efekt velmi malý, hovoříme o gravitačním mikročočkování. Touto metodou je možné objevovat exoplanety až ve vzdálenosti několik desítek tisíc

světelných let od Země. Zároveň jde o jedinou metodu, která je schopna odhalit volné exoplanety, které neobíhají kolem žádné hvězdy.[35]

3.3.3 Přímé zobrazení

Cílem metody přímého zobrazení je pořízení snímku dané exoplanety. Komplikací je, že exoplanety jsou mnohem méně jasné než hvězdy, kolem kterých obíhají, a mateřská hvězda tak typicky exoplanetu přezáří. Proto se využívá tzv. koronografu. Jedná se o přístroj, který stínítkem zakryje hvězdu tak, aby vyniklo její okolí (název odkazuje na sluneční koronu, k jejímuž pozorování byl tento přístroj primárně sestaven). I po zakrytí hvězdy je však možné pozorovat tímto způsobem pouze ty největší exoplanety ve velké vzdálenosti od mateřské hvězdy.[36]

3.3.4 Změny časů tranzitů a zákrytů, period pulzace

V systémech, kde již byla objevena nějaká exoplaneta, lze využít metody změny časů tranzitů. Pokud tranzity první exoplanety nenastávají po proměnlivých časových intervalech, je možné, že je v systému přítomna další, netranzitující planeta. Ze změny časů tranzitů lze odvodit základní informace o této planetě.

Obdobným způsobem funguje i metoda změny časů zákrytů. Zde však nejsou sledovány proměny časů přechodů planety přes disk hvězdy, ale vzájemných zákrytů hvězd v dvojhvězdných systémech.

Obíhající exoplaneta může ovlivnit i periodu pulzace pulsarů. Podobně může obíhající exoplaneta ovlivnit i vlastní periodu pulzace obřích hvězd.[29]

3.3.5 Změny jasnosti během oběhu

Když planeta obíhá kolem své hvězdy, mění se průběžně intenzita záření od hvězdy, které je planetou odraženo, tedy jasnost planety. I když je příspěvek planety k celkové jasnosti systému velmi malý, mění se drobně díky jejímu oběhu i jasnost systému. Tyto změny lze ve vzácných případech detekovat, a potvrdit tak přítomnost obíhající exoplanety.[29]

3.3.6 Kinematika disku

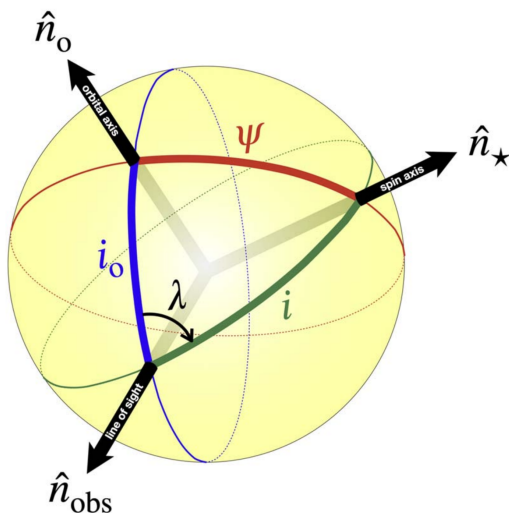
Pomocí této metody lze detekovat exoplanety v nejranějších fázích jejich vývoje. Zakládá se na pozorování protoplanetárního disku, ve kterém vznikají exoplanety. Nejprve je zjištěna rychlost plynu v jednotlivých částech disku. Pokud jsou v této rychlosti zjištěny nějaké nepravidelnosti, mohou být způsobeny právě přítomností exoplanety.[29]

4 Rossiterův-McLaughlinův jev

4.1 Motivace

V převážné většině případů není možné při pozorování disk hvězdy prostorově rozlišit, můžeme pozorovat pouze záření hvězdy integrované přes celou viditelnou polokouli. V kapitole 2.3 bylo dokázáno, že pro analýzu vývoje exoplanetárních systémů je potřeba mimo jiné znalost určitých úhlů, které jsou pro jejich charakteristiku důležité. Naštěstí některé vlastnosti integrované intenzity záření a spektra hvězdy závisí na její orientaci v prostoru a pro určení jistých úhlů lze využít fotometrických a spektroskopických metod. Mezi

základní úhly se řadí sklon orbitální rotační osy planety vůči rovině pohledu. Ten se značí i_o a je možné ho zjistit z analýzy tranzitu planety, jak bylo dokázáno v kapitole 3.1.



Obrázek 13: Znázornění úhlů využívaných k popisu systémů hvězda-exoplaneta. $\hat{n}_*$ značí rotační osu hvězdy, $\hat{n}_o$ orbitální rotační osu exoplanety, $\hat{n}_{obs}$ určuje směr pohledu. Úhel ψ je v angličtině označován jako stellar obliquity, jeho průmět na oblohu se značí λ (anglicky projected stellar obliquity). Převzato z [37].

Dalšími jsou sklon rotační osy hvězdy vůči rovině oběhu i_* a sklon rotační osy hvězdy vůči orbitální rotační ose planety ψ , jehož průmět na oblohu je dále značen jako λ . Úhel λ je možné zjistit několika různými způsoby. Úhel ψ lze dopočítat se znalostí λ a i_* , druhý zmíněný parametr však lze určit pouze za určitých podmínek a hodnota ψ je tak doposud známa jen u několika málo exoplanet. Obecně však můžeme říci, že ψ je vždy blíže 90° než λ . Standardně se uvažuje pouze úhel λ , což bude i případ této práce. Nejčastějším způsobem jeho určení je využití Rossiterova-McLaughlinova jevu, který lze aplikovat v případě tranzitujících planet.[37]

4.2 Historie

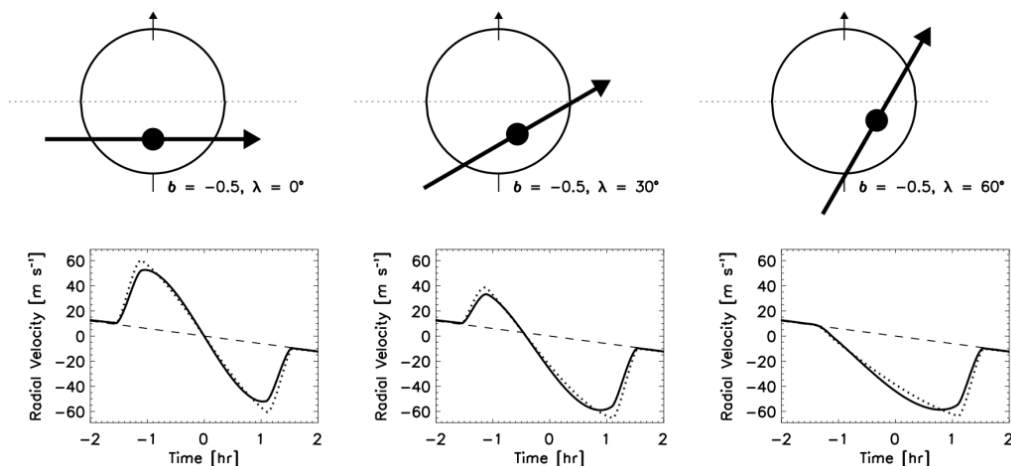
Rossiterův-McLaughlinův efekt (dále jen RM jev/efekt) lze pozorovat nejen u exoplanet, ale analogicky i u dvojhvězd, když menší složka zakryje tu větší. Teoreticky byl proto tento jev předpovězen už J. R. Holtem v roce 1893. V praxi byl poprvé naměřen současně Richardem A. Rossiterem u vícenásobného hvězdného systému β Lyrae a Dean B. McLaughlinem u systému Algol v roce 1924. Pro studium exoplanet ho poprvé použil Didier Queloz v roce 2000 u systému HD 209458. Nejprve byl využíván pouze pro studium planet ze skupiny horkých Jupiterů, díky zlepšování pozorovacích přístrojů je však dnes využíván i pro studium Neptunu podobným exoplanet, sub-Neptunů a dokonce i terestrických planet.[38]

4.3 Princip

Hvězdy obvykle rotují kolem své vlastní osy. Vůči pozorovateli se tedy vlivem rotace jedna polovina hvězdy vždy (kromě případu, kdy rotační osa hvězdy leží přímo v rovině pohledu pozorovatele) přibližuje, zatímco ta druhá se od něj vzdaluje. Za standardní

situace, když můžeme pozorovat celý disk hvězdy, jsou tyto efekty v rovnováze. Ve spektru integrovaném přes celý disk tedy nejsou pozorovány žádné posuny nebo deformace spektrálních čar, pouze jejich rozšíření.

V okamžiku, kdy přes disk hvězdy však přechází exoplaneta, je najednou buď přibližující se polovina, nebo oddalující se polovina disku hvězdy částečně zakryta. Efekty pohybu jednotlivých stran hvězdy tedy již nejsou v rovnováze a najednou začne převažovat světlo posunuté k modré oblasti (pokud je planeta před vzdalující se stranou a více záření tedy přichází od přibližující se strany) nebo červené oblasti (v přesně opačném případě). Ve spektru hvězdy se tato nerovnoměrnost projeví deformací spektrálních čar.



Obrázek 14: Závislost geometrie přechodu exoplanety přes disk hvězdy na podobě křivky radiálních rychlostí. Pokud exoplaneta přechází pouze přes jednu polovinu disku hvězdy, změna radiálních rychlostí je vlivem tohoto efektu výhradně kladná, nebo záporná. Převzato z [38].

To se následně v čase projeví na křivce radiálních rychlostí. Ta je obvykle hladká a její tvar připomíná sinusoidu, přesně závisí na dráze, po které se hvězda pohybuje kolem barycentra. Popsané rozšíření spektrálních čar vlivem přechodu planety přes disk hvězdy se na křivce projeví drobná odchylna. V ideálním případě ($\lambda = 0^\circ$) připomíná odchylna svým tvarem opět sinusoidu. Podle míry zakřivení této odchylny následně můžeme určit hledaný parametr λ . Z amplitudy odchylny pak lze odvodit veličinu $V \sin i_*$, tedy průmět skutečné rotační rychlosti hvězdy do roviny pozorovatele.

Pro využití tohoto jevu je však nutné dobře znát také vlastnosti a chování mateřské hvězdy. Odchylny v radiálních rychlostech totiž mohou způsobovat i skvrny na povrchu hvězdy, její diferenciální rotace, makroturbulence nebo konvektivní modrý posuv.[39]

4.4 Matematické vyjádření

Pokud je na základě tranzitní metody určena hloubka tranzitu a impaktní parametr, jak bylo představeno v kapitole 3.1, můžeme na základě proměn radiálních rychlostí určit parametry λ a $V \sin i_*$. Nyní využijeme obrázku 15. Na něm je schématicky znázorněn přechod exoplanety přes disk hvězdy. Budeme pracovat v režimu jednotek poloměru hvězdy R_* . Pro změnu rychlosti hvězdy v bodě právě zakrytém exoplanetou poté platí:

$$\Delta V(t) = (V \sin i_*) x(t), \quad (12)$$

kde $x(t)$ je kolmá vzdálenost exoplanety od rotační osy hvězdy. Rychlost hvězdy v tomto bodě je někdy označována také jako subplanetární rychlost. Svého minima dosahuje ve chvíli, když se exoplaneta nachází před okrajem modré části hvězdy (v kolmé vzdálenosti x_1 od rotační osy hvězdy), maxima poté, když se nachází před okrajem červené části hvězdy (ve vzdálenosti x_2). V těchto bodech tedy platí [37]:

$$\Delta V_1 = (V \sin i_*) x_1, \quad (13)$$

$$\Delta V_2 = (V \sin i_*) x_2. \quad (14)$$

Pro vzdálenosti x_1 a x_2 můžeme dle geometrie na obrázku 15 psát:

$$\cos \lambda = \frac{x_1}{\sqrt{1 - b^2} - b \tan \lambda},$$

$$\cos \lambda = \frac{x_2}{\sqrt{1 - b^2} + b \tan \lambda},$$

$$x_1 = \cos \lambda \sqrt{1 - b^2} - b \sin \lambda, \quad (15)$$

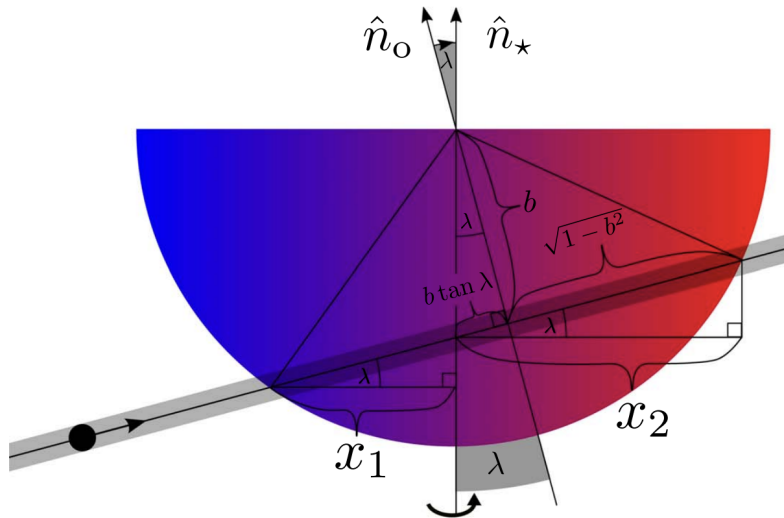
$$x_2 = \cos \lambda \sqrt{1 - b^2} + b \sin \lambda. \quad (16)$$

Na základě těchto vztahů můžeme sestavit následující soustavu rovnic [37]:

$$\Delta V_2 + \Delta V_1 = 2V \sin i_* \cos \lambda \times \sqrt{1 - b^2}, \quad (17)$$

$$\Delta V_2 - \Delta V_1 = 2V \sin i_* \sin \lambda \times b. \quad (18)$$

Pokud ze spektra hvězdy určíme hodnoty ΔV_1 , ΔV_2 a jejich proměny v čase, můžeme řešením této soustavy již získat hledané parametry λ a $V \sin i_*$. Můžeme si povšimnout, že amplituda odchylky závisí na $\cos \lambda$, zatímco její asymetrie na $\sin \lambda$. Vzhledem k tomu, že u hvězdy nemůžeme rozlišit, jestli sledujeme její jižní nebo severní pól, nemůžeme ani určit správné znaménko výsledného úhlu λ .



Obrázek 15: Znázornění přechodu planety přes disk rotující hvězdy, $\hat{n}_O$ je orbitální rotační osa exoplanety a $\hat{n}_*$ osa rotace hvězdy. Převzato z [37].

I když díky RM efektu nedochází k posunu spektrálních čar podle Dopplerova jevu, ale jejich rozšíření, algoritmus na výpočet radiálních rychlostí danému rozšíření přiřadí odpovídající změnu rychlosti:

$$RV_{RM}(t) \approx - \left(\frac{R_P}{R_*} \right)^2 \Delta V(t), \quad (19)$$

která dosahuje maximální hodnoty:

$$RV_{RM(max)} \approx 0.7 \sqrt{1 - b^2} \left(\frac{R_P}{R_*} \right)^2 V \sin i_*, \quad (20)$$

kde faktor 0.7 je dán okrajovým ztemněním disku hvězdy. Hvězdy totiž nevyzařují rovnoměrně z celé plochy pozorovaného disku. Z jeho středu přichází více záření než z okrajů disku.

4.5 Navazující a podobné metody

RM efekt lze vedle přímého zjištění odchylek radiálních rychlostí měřit i několika dalšími způsoby. Prvním je metoda Dopplerova stínu. Ta využívá poklesu jasnosti rozšířené spektrální čáry při přechodu planety. Tento pokles lze vyjádřit jako:

$$\Delta L_{RM}(t) \approx - \frac{\pi R_P}{4 R_*} \frac{1}{\sqrt{1 - x(t)^2}} \quad (21)$$

Jelikož zde vystupuje poměr poloměrů hvězdy a planety v první mocnině, je tato metoda vhodnější pro průzkum menších planet. Může však být více ovlivněna dalšími efekty, které způsobují rozšíření spektrálních čar a nemají původ v průchodu planety.

Veličinu λ je možno v určitých případech určit pouze z fotometrických měření. Pokud planeta prochází před skvrnou na povrchu hvězdy, projeví se to jako drobný nárůst na světelné křivce. Pokud je daná skvrna na povrchu hvězdy delší dobu, mohou nepravidelnosti v přechodu planety přes skvrnu odhalit právě sklon λ .

V budoucnu by mohla nabýt na důležitosti metoda asteroseismologie. Ta využívá vlastních pravidelných oscilací hvězdy k odvození sklonu rotační osy hvězdy k rovině pohledu i_* z fotometrické frekvenční analýzy. Pokud se to povede u hvězdy s tranzitující exoplanetou, můžeme na základě toho určit i hledaný sklon orbitální rotační osy exoplanety k rotační ose hvězdy. U hvězd, které jsou dostatečně blízko na to, abychom byli schopni rozlišit jejich disk, lze určit i_* kombinací spektrometrie a interferometrie.[37]

5 Výběr systémů k analýze

K výběru systémů pro analýzu v této práci byl využit veřejný archiv Evropské jižní observatoře (ESO, European Southern Observatory) [40] a rovněž veřejný archiv italského Galileova národního dalekohledu (TNG, Telescopio Nazionale Galileo).[41]

Cílem bylo nalézt co největší počet systémů, u kterých bude dostatek dostupných již napozorovaných dat pro provedení analýzy RM jevu a u daného systému ještě nebyla analýza tohoto jevu provedena. Popřípadě byla, ale s dosažením malé přesnosti. Systémy, u kterých již byl RM jev analyzován a byla u nich zjištěna hodnota parametru λ , jsou uvedeny v knihovně TEPcat.[42]

5.1 Podmínky výběru

Dle charakteru RM jevu, cílů analýzy a vlastností pozorovacích přístrojů lze určit několik základních podmínek, které by vybrané systémy měly splňovat.

1. Musí se jednat o tranzitující exoplanetu, tj. exoplanetu, jejíž sklon oběžné dráhy vůči rovině pozorovatele je takový, že při pohledu ze Země během svého oběhu určitou dobu přechází před diskem své mateřské hvězdy.

2. Exoplaneta musí mít dostatečně krátkou oběžnou dobu. Na oběžné době závisí přímo délka tranzitu a v případě delšího tranzitu (u exoplanet splňujících přibližně $P > 50$ d) hrozí, že nebude v pozorovací sekvenci (trvající maximálně jednu noc, tedy řádově jednotky hodin) zachycen celý dostatečně kvalitně (pozorování brzy po západu Slunce a krátce před jeho východem již nemusí být dostatečně relevantní).

3. V archivu je pro daný systém dostupná pozorovací série, která obsahuje alespoň 5 pozorování v průběhu jedné noci (a tedy i jednoho tranzitu). S menším počtem pozorování není možné vytvořit průkazný graf, který by bylo možné dále analyzovat.

4. Exoplaneta není doposud obsažena v databázi TEP-Cat nebo je zde uvedena hodnota jejího parametru λ s velkou odchylkou.

Výběr na základě těchto uvedených bodů lze učinit přímo filtrací v daných archivech. Pro zjištění zbylých podmínek je potřeba přímá analýza křivek radiálních rychlostí předvybraných systémů.

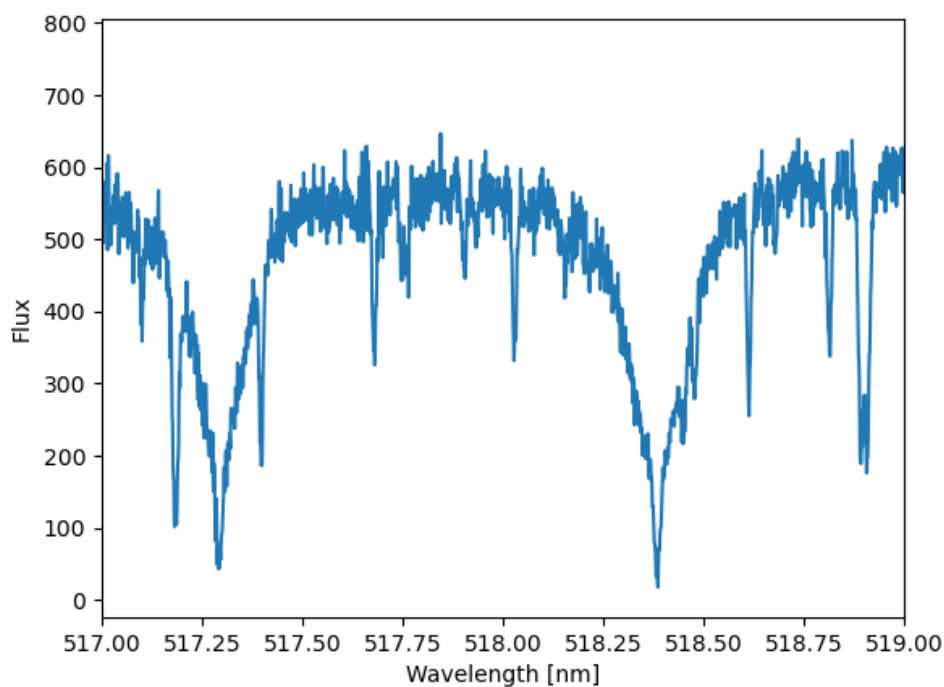
5. Mateřská hvězda má dostatečně velkou rychlost oběhu kolem barycentra systému. Využití spektrografy jsou schopny rozlišit amplitudu rychlostí o minimální velikosti v řádu $\Delta v_{min} \approx 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Pokud by byla rychlost hvězdy podobná řádově této hodnotě, nebylo by možné detekovat odchylku způsobenou RM jevem, jejíž amplituda je obvykle výrazně menší.

6. Analyzované pozorování má dostatečně velký poměr signálu ku šumu, tj. dostatečně malé odchylky. Odchylka způsobená RM jevem má malou amplitudu a v případě nedostatečně přesných naměřených dat ji není možné v křivce radiálních rychlostí identifikovat.

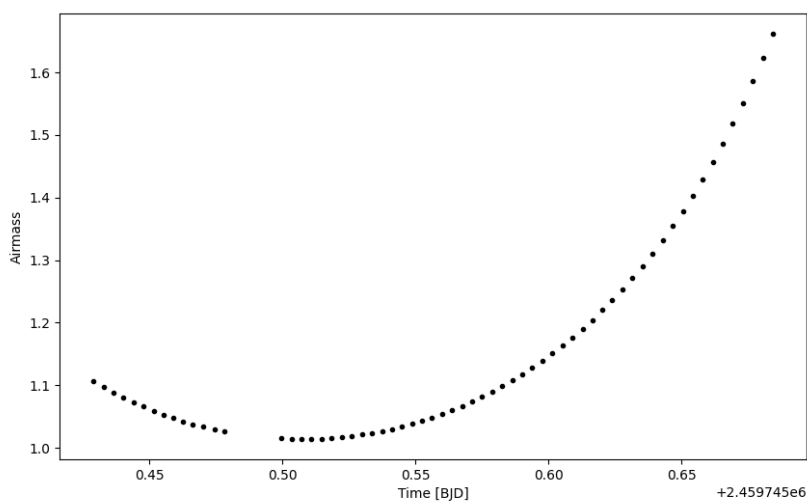
5.2 Průběh výběru

Na základě podmínek 1. až 4. jsem z archivu TNG vybral 16 systémů. Následně bylo nutné ověřit podmínky 5. a 6., k čemuž bylo potřeba vytvořit pro každý systém graf závislosti radiální rychlosti hvězdy na čase v době tranzitu planety. U těchto systémů jsem si proto stáhnul odpovídající napozorovaná data ve formátu FITS souborů. V těchto souborech jsou rovnou uvedeny příslušné radiální rychlosti hvězdy, které jsou určovány podle Dopplerova posuvu spektrálních čar. Vzorové spektrum (tj. graf závislosti intenzity záření na vlnové délce), ze kterého jsou následně rychlosti určovány, je možno vidět na obrázku 16. Každý FITS soubor odpovídá jednomu provedení pozorování, a tedy jednomu bodu ve výsledném grafu. Ve FITS souborech jsou taktéž zaznamenány údaje o vzdušné hmotě⁷, ukázkový graf závislosti vzdušné hmoty na čase v průběhu pozorování je možno vidět na obrázku 17. Ze zdrojových souborů rovněž můžeme zjistit poměr signálu ku šumu. Ukázková závislost této veličiny na čase v průběhu pozorování je zachycena na obrázku 18.

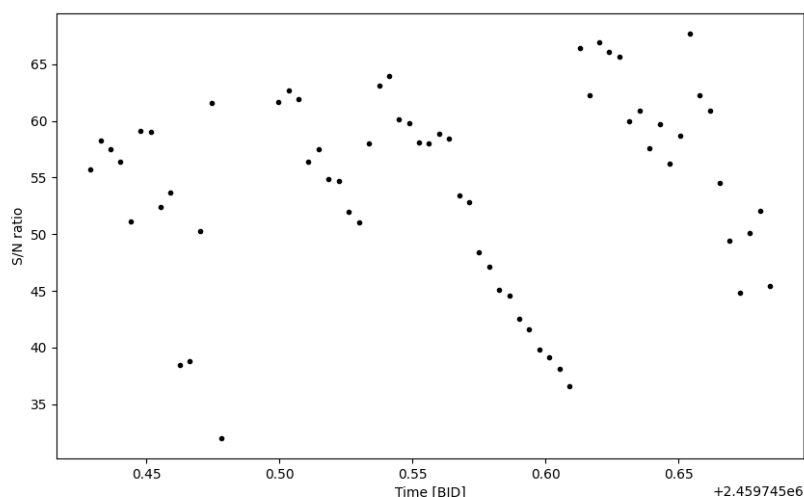
⁷Veličina udávající, nakolik atmosféra ovlivňuje pozorování, tj. kolik vzduchu stojí světlu přicházejícímu od pozorovaného objektu v cestě. Nejmeší je při pozorování v zenitu, s klesající výškou nad obzorem roste.



Obrázek 16: Výřez ze spektra hvězdy WASP-85A zaznamenaného spektrografem HARPSN. Můžeme zde vidět rozsah vlnových délek 517 - 519 nm s výraznými poklesy na vlnových délkách 517,30 nm a 518,40 nm, které odpovídají spektrálním absorpčním čarám.



Obrázek 17: Závislost vzdušné hmoty na čase v průběhu pozorování hvězdy HD 149026.

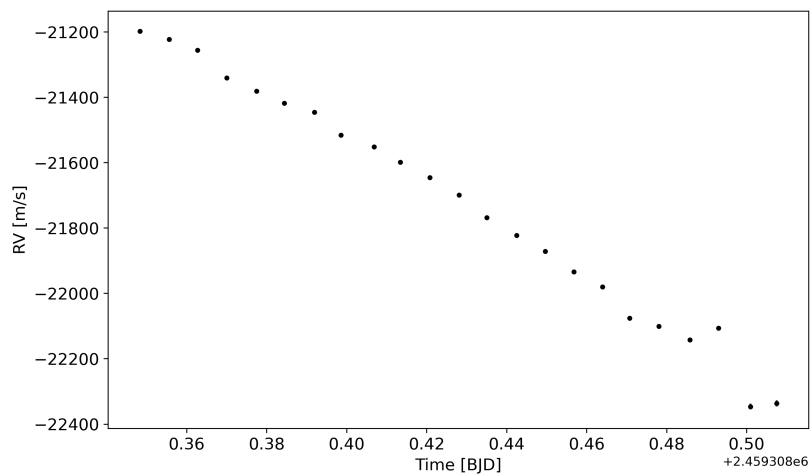


Obrázek 18: Závislost poměru signálu ku šumu na čase v průběhu pozorování hvězdy HD 149026.

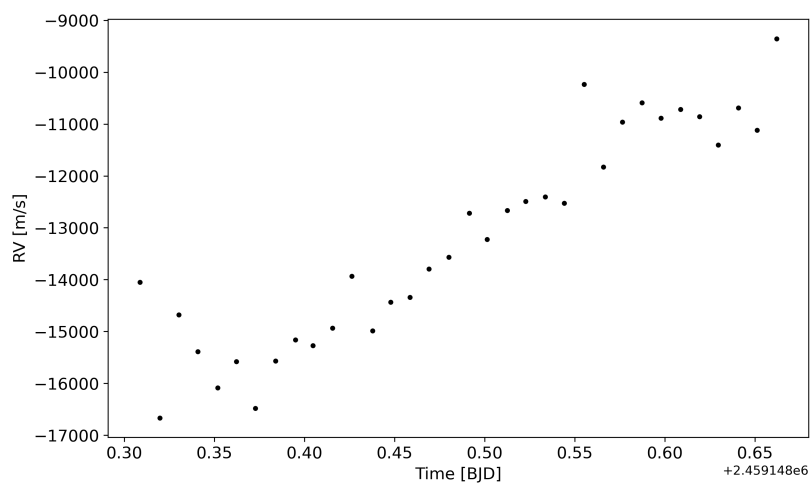
Jednotlivé soubory obsahují mnoho detailních dat o provedeném pozorování, do grafů byly vyneseny hodnoty radiálních rychlostí (RV, na ose y, v jednotkách $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), spolu s jejich odchylkami (vyjádřené chybovými úsečkami u jednotlivých bodů grafu) a juliánské datum (BJD, ve dnech)⁸. Pro určení přesného času tranzitu u nadějných kandidátů bylo později také využito času pozorování, který je obvykle uváděn ve formátu UTC v názvu FITS souboru. V případě kandidátů, u nichž byla dostupná napozorovaná data z více různých nocí, byla vybrána noc s největším počtem jednotlivých pozorování.

Pro vytvoření grafů z těchto dat jsem využil kódu napsaného v programovacím jazyce Python. Na obrázcích 19 - 30 jsou zobrazeny křivky radiálních rychlostí vybraných kandidátů zobrazující data z teleskopu TNG, která již nebyla vybrána k další analýze. Každý je doplněn o stručný komentář toho, proč daný systém nebyl dále analyzován. V jednotlivých grafech je na ose x vynesen čas ve formátu Juliánského data, na ose y poté hodnota radiální rychlosti v m/s.

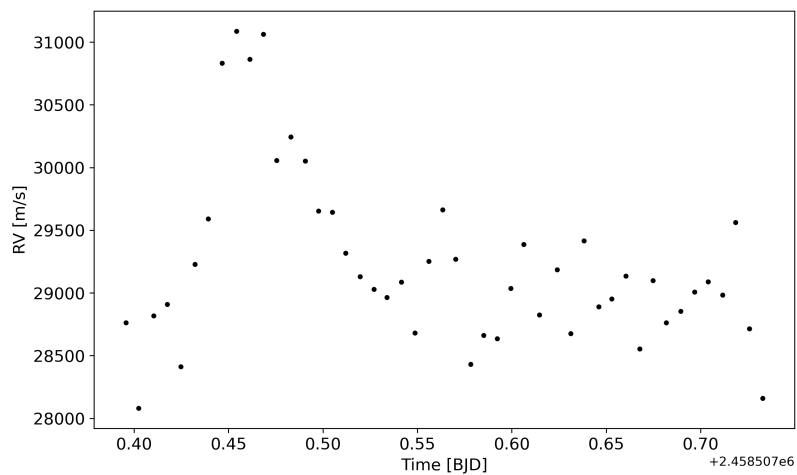
⁸Juliánské datum je standardní časová míra používaná v astronomii a je definována jako počet dnů (úseků dlouhých 86 400 s) uplynulých od poledne světového času (UTC) 1. ledna roku 4713 př. n. l. V grafech radiálních rychlostí bude uváděna ve formátu $x + y$, kde x představuje zlomek probíhajícího dne a y počet celých dní proběhlých od 1. 1. 4713 př. n. l. do posledního poledne UTC.



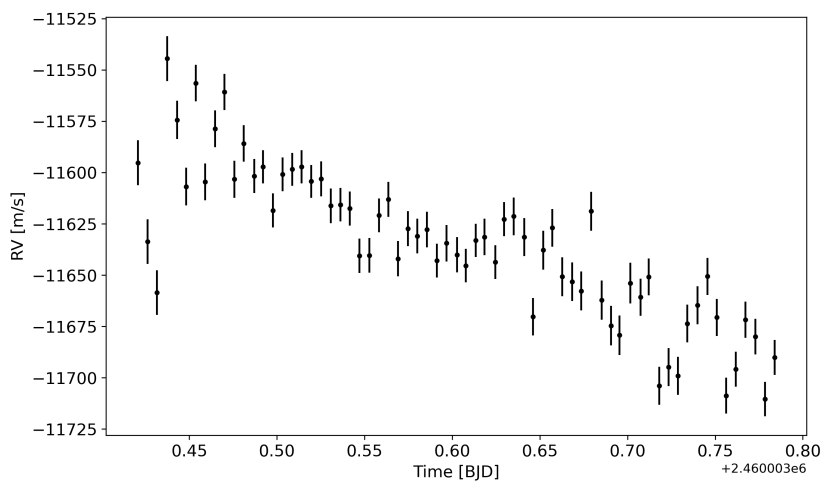
Obrázek 19: RV křivka hvězdy EPIC212036875, odchylku způsobenou RM jevem zde není možné dostatečně dobře rozlišit, křivka je hladká.



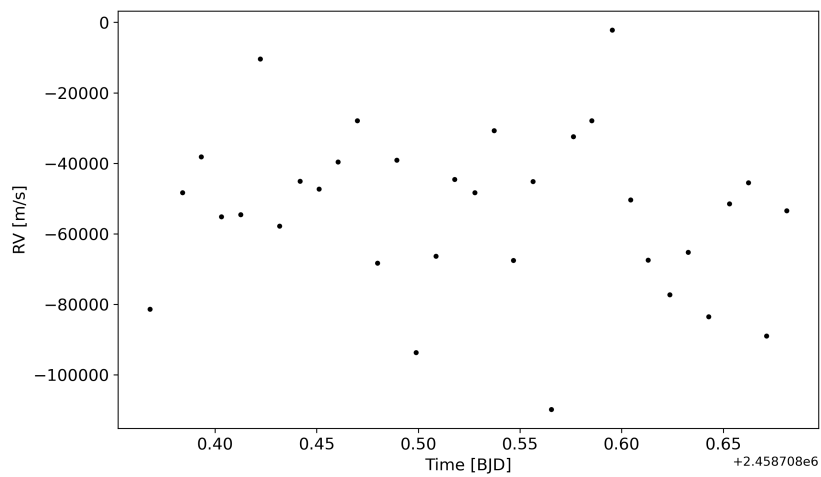
Obrázek 20: RV křivka hvězdy Kelt-1, data jsou příliš rozptýlena a není možné identifikovat konkrétní odchylku, která by mohla být dána RM jevem.



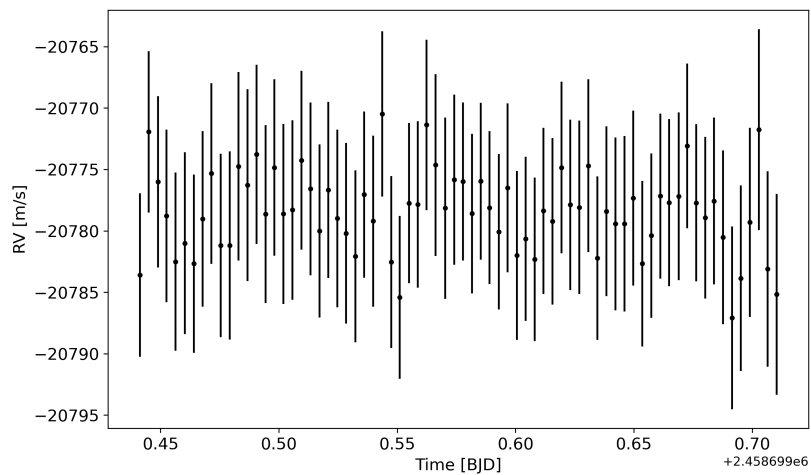
Obrázek 21: RV křivka hvězdy Kelt-17, datové body jsou velmi vzdálené od sebe, pravděpodobně u ní byly i špatně určeny odchylky.



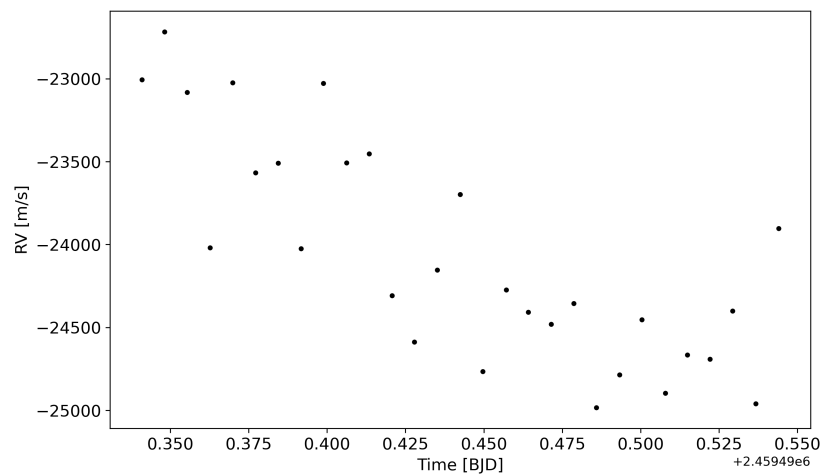
Obrázek 22: RV křivka hvězdy Kelt-18, datové body jsou příliš rozptýleny na to, aby bylo možné idenitifikovat odchylku způsobenou RM jevem.



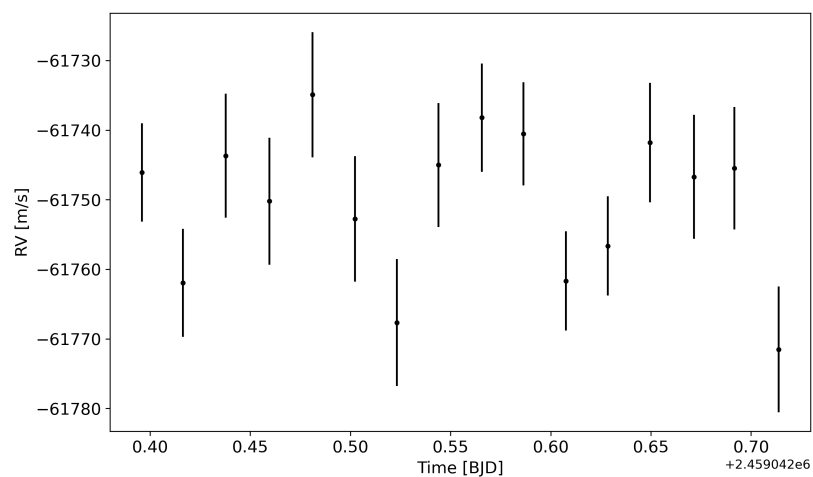
Obrázek 23: RV křivka hvězdy Kelt-21, rychlosti mají nereálně velký rozptyl svých hodnot, jedná se o chybné pozorování.



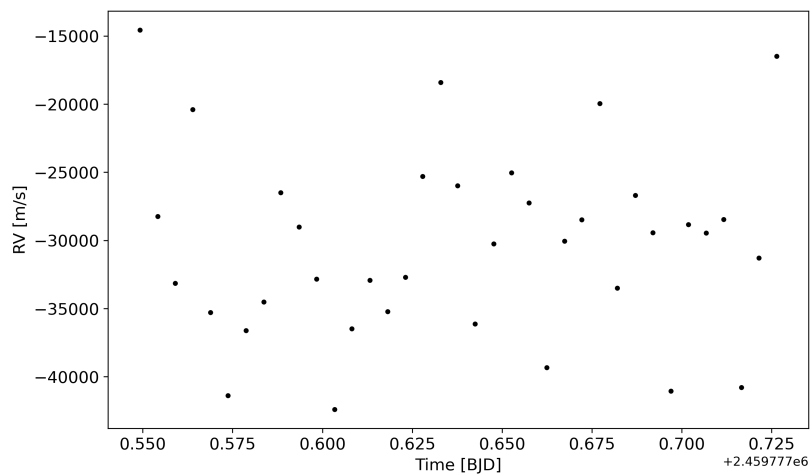
Obrázek 24: RV křivka hvězdy Kepler-68, odchylku způsobenou RM jevem není možné v šumu identifikovat.



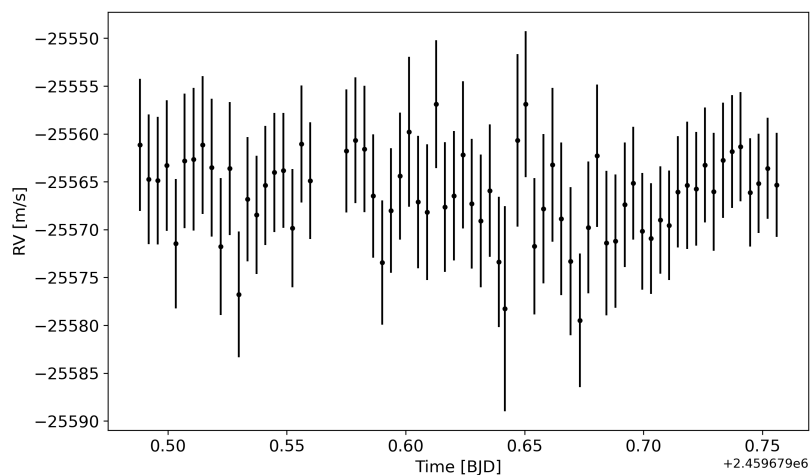
Obrázek 25: RV křivka hvězdy Kepler-1658, velký rozptyl rychlostí a velmi malé odchylky naznačují opět chybné pozorování.



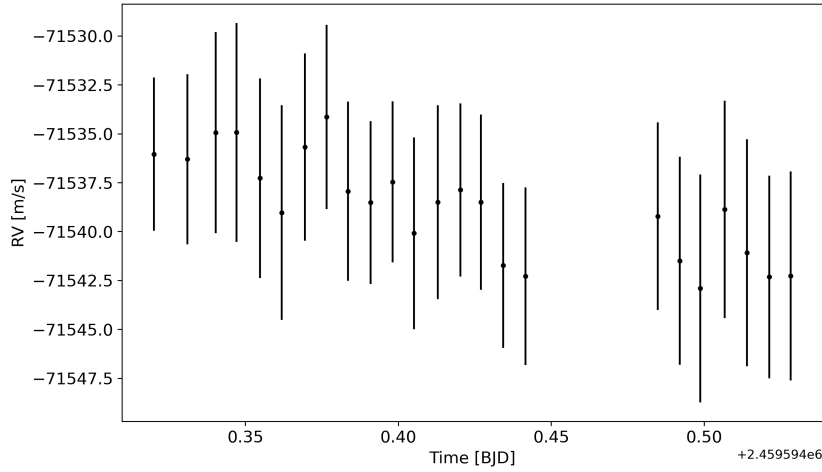
Obrázek 26: RV křivka hvězdy Kepler-91, která má příliš malou rychlost oběhu kolem barycentra, a tudíž nelze v šumu rozlišit RM efekt.



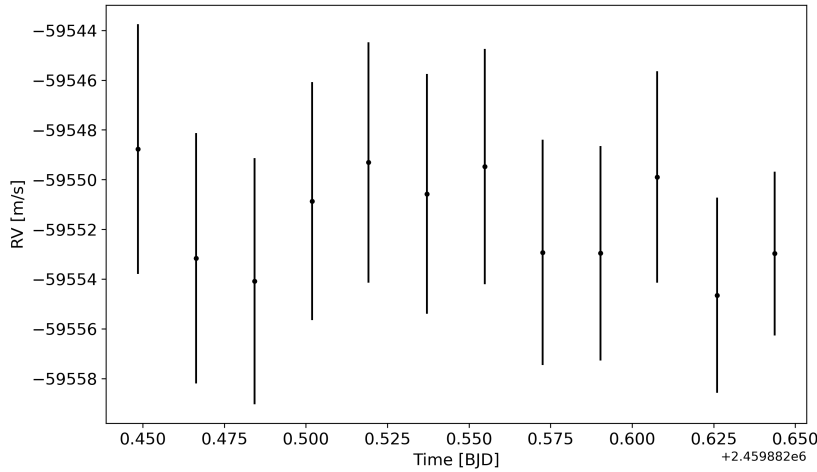
Obrázek 27: RV křivka hvězdy TOI-1355, velmi velké rozpětí datových bodů a jejich nepravidelné rozložení naznačuje další chybné pozorování.



Obrázek 28: RV křivka hvězdy TOI-2018 se vyznačuje drobnými rozdíly radiálních rychlostí v porovnání s odchylkami měření, které znemožňují rozlišení RM efektu.

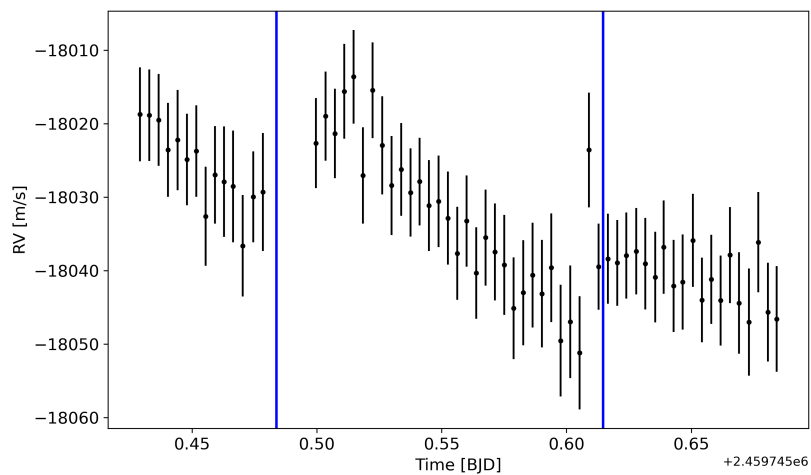


Obrázek 29: RV křivka hvězdy TOI-4524, rozdíly radiálních rychlostí jsou zde příliš malé a chybí pozorovací data z jedné části tranzitu.

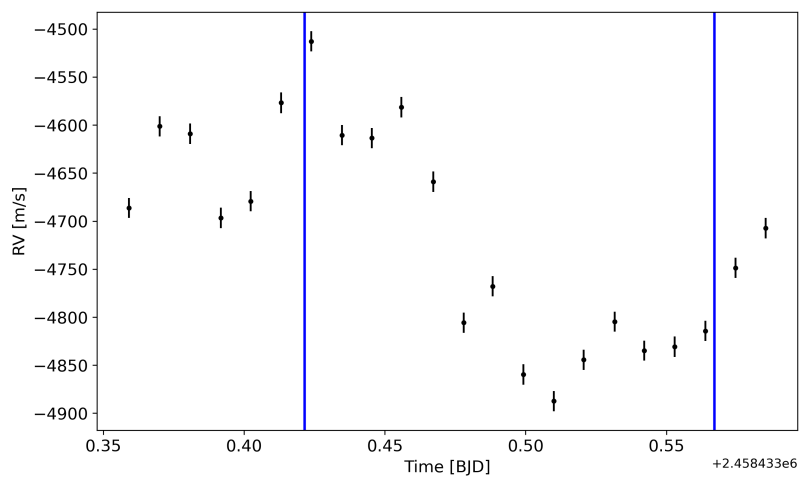


Obrázek 30: RV křivka hvězdy TOI-4527, je zde poměrně malý počet datových bodů, nelze vypořizovat křivku charakteristickou pro RM jev.

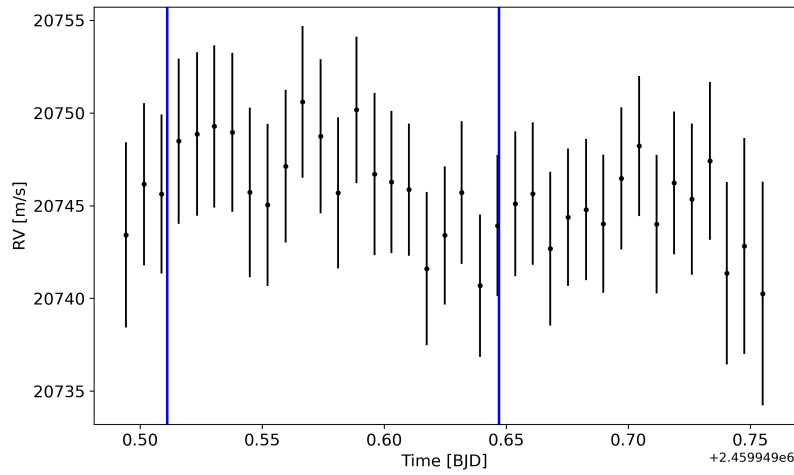
U zbylých 4 systémů byly nalezeny dostatečně hladké RV křivky, na nichž je možné identifikovat odchylky způsobené RM jevem. V těchto grafech byly modrými čarami vyznačeny časové úseky, ve kterých probíhal tranzit planety. K jejich zjištění bylo využito nástroje *Transit and Ephemeris Service* dostupného na stránkách *NASA Exoplanet Archive*[43]. Ten umožňuje po vybrání zkoumaného objektu a pozorovacího místa zadat časový úsek (kam byl zadán časový rozsah 1-2 dnů před a po proběhlém pozorování) a následně vypočítá datum počátku, středu i konce tranzitu ve formátu Juliánského data včetně jejich odchylek.



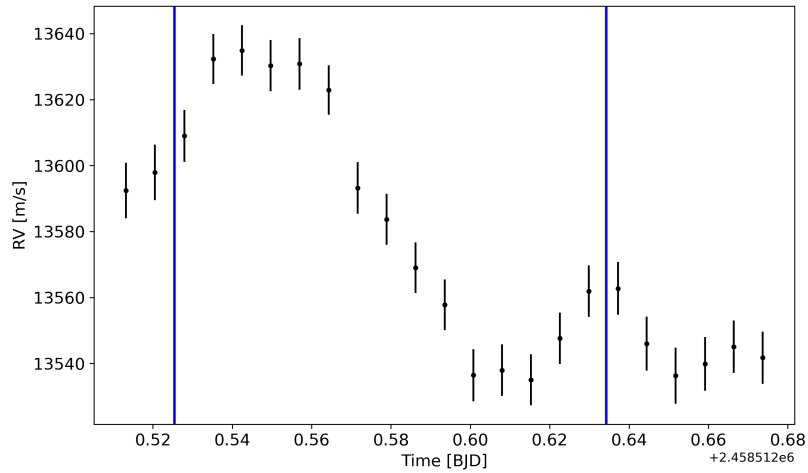
Obrázek 31: RV křivka hvězdy HD 149026, i přes výraznější odchylky měření zde lze rozeznat odchýlení od rovné křivky odpovídající RM jevu.



Obrázek 32: RV křivka hvězdy QATAR-7 je zatížena mírným rozptylem bodů, zakřivení odpovídající RM jevu zde však přesto lze rozpoznat.

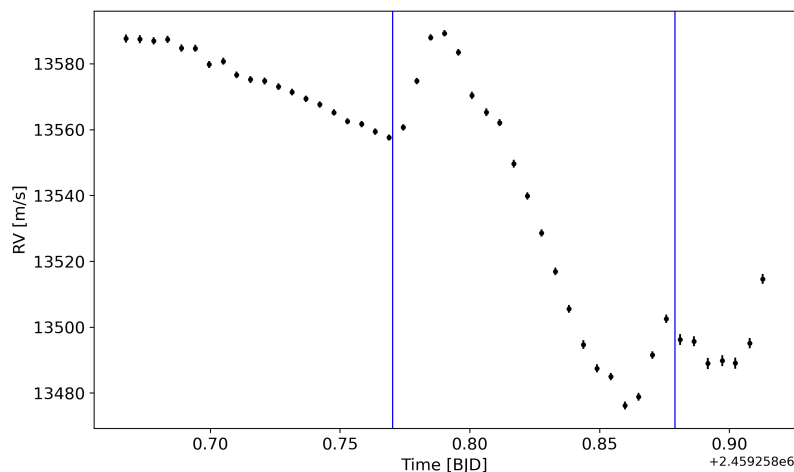


Obrázek 33: RV křivka hvězdy TOI-560, pozorovací odchylky jsou zde výraznější, ale základní tvar křivky RM je možné rozpoznat. Zakřivení křivky přímo nekorresponduje s vyznačeným časem tranzitu, pravý čas tranzitu mohl být ovlivněn přítomností další planety v systému.



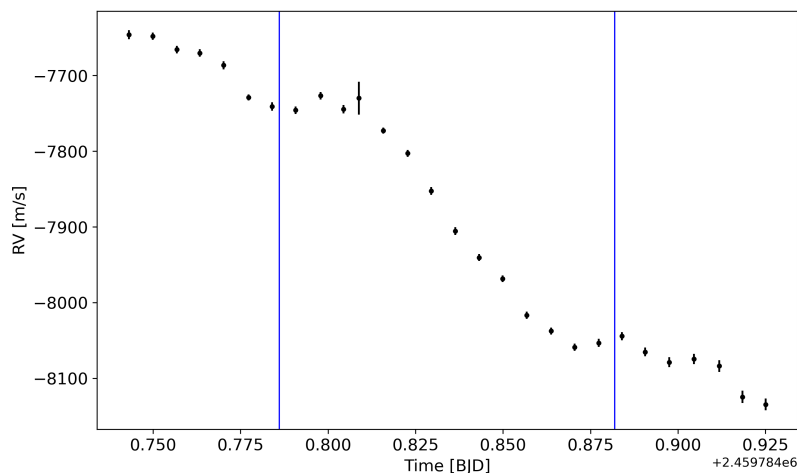
Obrázek 34: RV křivka hvězdy WASP-85, pozorovaná data mají pouze malé odchylky, zakřivení křivky typické pro RM jev je zde jasně patrné.

Hvězda WASP-85 přitom byla pozorována i přesnějším spektrografem *ESPRESSO* a do analýzy proto bylo zahrnuto i toto pozorování. Jejich porovnání je dobrou ilustrací rozdílnosti schopností spektrografů *HARPS* a *ESPRESSO*.



Obrázek 35: RV křivka hvězdy WASP-85 a pozorovaná spektrografem *ESPRESSO*. Můžeme si povšimnout, že odchylky jsou menší a křivka je hladší než v případě pozorování stejné hvězdy spektrografem *HARPS*.

V databázi ESO Exoplanet archive nebyl nalezen větší počet kandidátů splňujících podmínky uvedené v části 5.1. Takový systém byl nalezen pouze jeden. U něho byla publikována analýza RM jevu, ale s velkou odchylkou.[44] Pozorovací data v archivu ESO u něj byla dostatečně kvalitní a byl tedy zahrnut také do analýzy.



Obrázek 36: RV křivka hvězdy WASP-173 A, přestože má hvězda větší amplitudu radiálních rychlostí danou oběhem kolem barycentra než ostatní systémy, lze zde křivku RM efektu dobře rozpoznat.

6 Fitování RM jevu

Pro zjištění parametru λ na základě napozorovaných dat bylo dále potřeba modelovat RM efekt. Vytvořeným modelem byla následně fitována pozorovaná data. Modely pro jednotlivé systémy byly vytvořeny pomocí kódu volně dostupného na stránkách PyAstronomy.

Kód využívá knihoven vytvořených přímo pro analýzu RM efektu. Na základě zadaných vstupních dat je schopen vytvořit model části RV křivky pozorované hvězdy odpovídající okamžiku tranzitu exoplanety, která je zakřivena způsobem charakteristickým pro RM jev.[45] Pro použití v této konkrétní analýze byl kód mírně poupraven.

6.1 Parametry modelu

Modelování RM efektu probíhalo podle široké řady vstupních parametrů. Do modelu byly zahrnuty následující veličiny: sklon oběžné dráhy planety k rovině pozorovatele i_o , velká poloosa oběžné dráhy planety v jednotkách poloměru mateřské hvězdy a/R_* , oběžná doba planety P , excentricita oběžné dráhy planety e , argument periapsidy ω , čas středu pozorovaného tranzitu T_C , poloměr planety v jednotkách poloměru hvězdy R_P/R_* , hledaný parametr λ , koeficienty okrajového ztemnění disku hvězdy U_1 a U_2 , průmět rychlosti rotace hvězdy $V \sin i_*$, koeficient daný rozlišením spektrografu β , rychlost makroturbulencí ζ^9 , Gaussova šířka pozorovaných spektrálních čar σ , amplituda radiálních rychlostí hvězdy způsobená pohybem kolem barycentra systému hvězda-planeta K , radiální rychlost pohybu centra systému RV_{sys} , hmotnost hvězdy v jednotkách hmotnosti slunce M_* , velká poloosa oběžné dráhy planety v au A a hmotnost planety v jednotkách hmotnosti Jupitera M_P . Spolu s hledaným parametrem λ byly fitovány i hodnoty i_o , a/R_* , T_C , $V \sin i_*$

Většinu z těchto hodnot lze pro analyzované systémy dohledat v literatuře. K jejich nalezení bylo využito databáze exoplanet.eu.[46] Koeficienty okrajového ztemnění disku U_1 a U_2 byly zjištěny za pomoci nástroje *Exoplanet characterization toolkit*[47], k jejich modelaci bylo využito kvadratického profilu. Hodnota σ byla určena jako průměr šířek cross correlation function v poloviční výšce maxima¹⁰. Jednotlivé šířky jsou uvedeny pro každé pozorování v příslušném FITS souboru. Přehled hodnot veličin využitých při modelování RM jevu je uveden v Tabulce 1 a 2 včetně jejich nejistot.

Kolem hvězdy TOI-560 obíhají dvě tranzitující exoplanety. Porovnáním časů středů jejich tranzitů s naměřenými daty bylo zjištěno, že napozorovaná data odpovídají přechodu exoplanety TOI-560 c. U planety HD 149026 b již analýza RM efektu byla publikována[48], ale došlo k tomu až po dokončení mé analýzy, a proto jsem se ji do práce rozhodl také zahrnout.

⁹Jedná se o veličinu závislou na teplotě hvězdy, pro zjištění její hodnoty můžeme využít empirický vztah $\zeta = 3,21 + 0,00233(T_{eff} - 5777)$, kde T_{eff} je povrchová teplota hvězdy v Kelvinech.

¹⁰Zjednodušeně se jedná o veličinu určující pro analýzu RM efektu klíčovou šířku spektrálních čar.

Parametr	HD 149026 b	TOI-560 c	QATAR-7 b
i_o ($^\circ$)	84.113 ± 0.526	89.61 ± 0.26	89 ± 1
a/R_*	6.0 ± 0.3	39.15 ± 1.0	4.84 ± 0.07
P (d)	2.87588874	18.8805 ± 0.0024	2.032046 ± 0.0000097
e	< 0.013	0.093 ± 0.13	0
ω ($^\circ$)	109	190 ± 130	—
T_C (JD)	$2459745.54919 \pm 0.002434$	$2459949.57907 \pm 0.001612$	$2458433.49428 \pm 0.066380$
R_P ($R_\odot$)	0.05054	0.0379 ± 0.011	0.11 ± 0.001
U_1	0.459 ± 0.009	0.79 ± 0.001	0.307 ± 0.014
U_2	0.24 ± 0.011	-0.009 ± 0.002	0.29 ± 0.019
$V \sin i_*$ (km/s)	6.1 ± 0.48	< 3	13.8 ± 0.5
β	2.16	2.16	2.16
ζ	4.147 ± 0.035	0.42565 ± 0.14912	4.45422 ± 0.1165
σ	10.2899	6.9389	19.9195
K (m/s)	0.0383 ± 0.0031	0.0015 ± 0.0019	0.239 ± 0.032
RV_{sys} (km/s)	-18.0319 ± 0.0008	13.5946 ± 0.0018	-4.7 ± 0.1
M_* ($M_\odot$)	1.09 ± 0.13	0.702 ± 0.026	1.409 ± 0.026
a (AU)	0.041 ± 0.002	0.1233 ± 0.0015	0.0352 ± 0.0002
M_P (M_J)	0.28 ± 0.03	0.0712 ± 0.0173	1.88 ± 0.25

Tabulka 1: Tabulka parametrů využitých při fitování RM jevu pro exoplanety HD 149026 b, TOI-560 c a QATAR-7 b.

Parametr	WASP-85 A b	WASP-173 A b
i_o ($^\circ$)	89.69 ± 0.11	85.2 ± 1.1
a/R_*	9.0 ± 0.2	4.8 ± 0.2
P (d)	2.6556777 ± 0.00000044	$1.38665318 \pm 0.00000027$
e	0	0
ω ($^\circ$)	—	-150 ± 72
T_C (JD)	$2458512.57987 \pm 0.007432$	$2458410.66200 \pm 0.000124$
R_P ($R_\odot$)	0.13681 ± 0.00316	0.1086 ± 0.0073
U_1	0.458 ± 0.008	0.505 ± 0.005
U_2	0.236 ± 0.011	0.209 ± 0.007
$V \sin i_*$ (km/s)	3.41 ± 0.89	6.1 ± 0.3
β	2.16	2.6
ζ	3.99055 ± 0.06291	3.03059 ± 0.3495
σ	7.4828	10.6036
K (m/s)	0.1733 ± 0.0018	0.612 ± 0.005
RV_{sys} (km/s)	-7.858 ± 0.004	-4.7 ± 0.1
M_* ($M_\odot$)	1.09 ± 0.08	1.05 ± 0.08
a (AU)	0.039 ± 0.001	0.0248 ± 0.0006
M_P (M_J)	1.265 ± 0.065	3.69 ± 0.18

Tabulka 2: Tabulka parametrů využitých pro fitování RM jevu pro exoplanety WASP-85 A b a WASP-173 A b.

6.2 Popis systémů

HD 149026 b je plynný obr s o něco větší hmotností než má Saturn, ale menším poloměrem. Jeho vysoká hustota naznačuje jádro bohaté na kovy. Obíhá v těsné blízkosti své mateřské hvězdy, $25\times$ blíže než Země kolem Slunce. Hvězda HD 149026 je žlutý trpaslík spektrální třídy G0. Vzhledem ke své blízkosti k hvězdě je planeta označována také jako horký Saturn. Údaje byly převzaty z práce [48].

TOI-560 c je exoplaneta ze skupiny mini-Neptunů, přibližně třikrát větší a dvacetkrát hmotnější než Země, tj. o něco menší než Neptun, ale hmotnější. Není jasné, jestli má pevný povrch nebo svou strukturou připomíná spíše ledové obry. Kolem své hvězdy obíhá přibližně desetkrát blíže než Země kolem Slunce, ještě blíže obíhá o něco menší a lehčí planeta TOI-560 b. Hvězda TOI-560 je o něco menší než Slunce, jedná se o oranžového trpaslíka spektrální třídy K4V. Údaje byly převzaty z prací [49], [50] a [51].

QATAR-7 b je typický zástupce skupiny horkých Jupiterů. Je dvakrát hmotnější než Jupiter, jeden oběh kolem mateřské hvězdy jí však trvá pouhé dva dny. To znamená, že od hvězdy ji dělí méně než pětinasobek poloměru hvězdy a řadí se mezi 6 % nejteplejších objevených exoplanet. QATAR-7 je poměrně hmotná hvězda spektrální třídy F4V s vysokým zastoupením kovů. Údaje byly převzaty z práce [52].

WASP-85A b rovněž spadá do skupiny horkých Jupiterů. Svou hmotností i poloměrem je Jupiteru velmi podobný. Jeden oběh kolem mateřské hvězdy mu trvá pouze necelé tři dny. Obíhá kolem hvězdy WASP 85 A, která se řadí do spektrální třídy G a je svými rozměry a hmotností srovnatelná se Sluncem. Součástí systému je i menší hvězda, oranžový trpaslík spektrální třídy K označovaný jako WASP-85 B. Údaje byly převzaty z prací [53] a [54].

WASP-173A b je také horký Jupiter, přibližně čtyřikrát hmotnější než Jupiter ve Sluneční soustavě. Obíhá velmi blízko kolem mateřské hvězdy, každých 1,4 dne. Hvězda WASP-173A náleží do spektrální třídy G3 a je tedy velmi podobná Slunci. Jedná se také o dvojhvězdný systém, druhá složka WASP-173B obíhá asi 1440 au daleko a je méně hmotná. Údaje byly převzaty z práce [55].

6.3 Výsledky fitování

Připravené soubory s odpovídajícími parametry modelu byly následně fitovány dvěma způsoby. Cílem bylo namodelovat křivku, která co nejlépe proloží napozorovaná data a podle jejích vlastností určit parametr λ . Pouze pro informační ověření správnosti souboru byl vytvořen hrubý model na osobním počítači. Výsledný přesný model, podle kterého byl určen hledaný parametr λ , byl vytvořen na počítačovém clusteru, který nabídl dostatečnou výpočetní kapacitu.

Simulací provedenou pomocí clusteru byly upřesněny hodnoty fitovaných parametrů T_C , a/R_* , $V \sin i_*$, RV_{sys} a K a byla určena hodnota hledaného parametru λ . Výsledné hodnoty λ včetně určených odchylek jsou uvedeny v Tabulce 3, fitováním zpřesněné hodnoty dalších parametrů poté v Tabulkách 4 a 5.

Systém	HD 149026 b	TOI-560 c	QATAR-7 b	WASP-85 A b	WASP-85 A b (<i>ESPRESSO</i>)	WASP-173 A b
λ (°)	-5 ± 5	-24^{+34}_{-21}	$-18^{+50.5}_{-32.3}$	-9.6^{+21}_{-17}	-1.1 ± 6.4	5 ± 4

Tabulka 3: Výsledné hodnoty λ pro jednotlivé exoplanety.

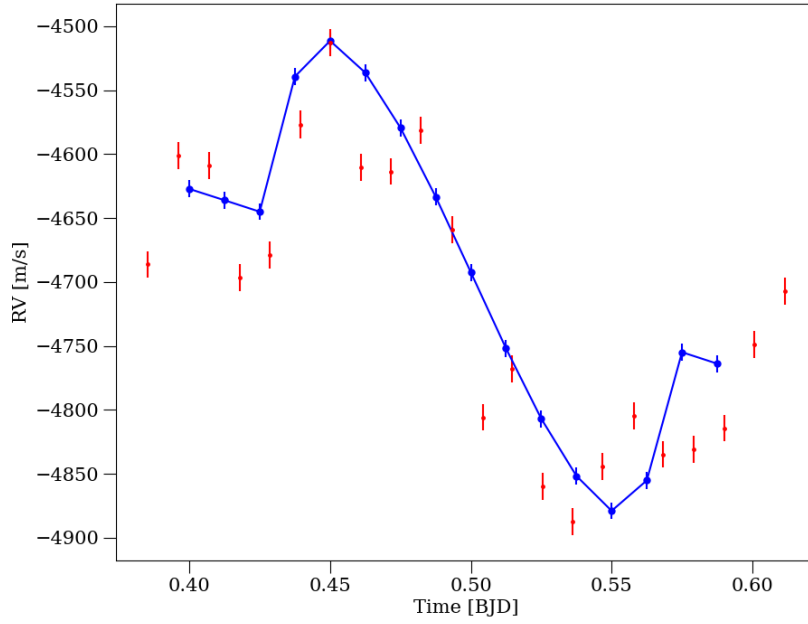
Parametr	HD 149026	TOI-560	QATAR-7
T_C (JD)	2459745.5490 ± 0.002	2459949.5886 ± 0.01	2458433.4738 ± 0.001
i ($^\circ$)	84.03 ± 0.46	89.59 ± 0.25	89.22 ± 1
a/R_*	6.15 ± 0.21	39.03 ± 1	4.88 ± 0.14
$V \sin i_*$ (km/s)	4.4 ± 0.6	1.4 ± 0.4	9.3_{-2}^{+3}
RV_{sys} (km/s)	-18.033 ± 0.001	20.745 ± 0.001	-4.73 ± 0.01
K (m/s)	0.036 ± 0.003	0.0087 ± 0.008	0.22 ± 0.04

Tabulka 4: Fitováním zpřesněné parametry exoplanetárních systémů HD 149026, TOI-560 a QATAR-7.

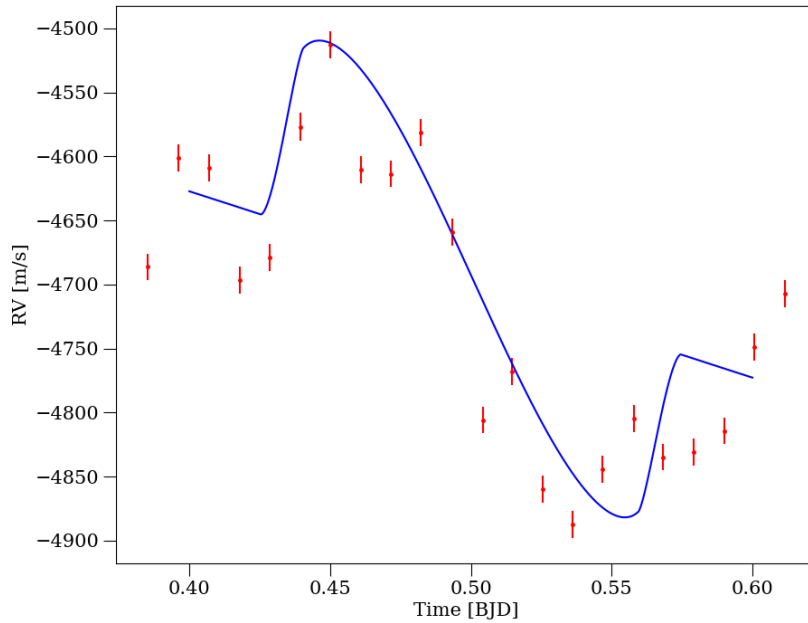
Parametr	WASP-85 A	WASP-85 A (<i>ESPRESSO</i>)	WASP-173 A
T_C (JD)	2458512.5792 ± 0.009	2459266.7923 ± 0.0003	2459784.8368 ± 0.001
i ($^\circ$)	89.7262 ± 0.1	89.73 ± 0.12	85.5475 ± 0.92
a/R_*	8.90 ± 0.09	9.5 ± 0.07	4.7558 ± 0.1287
$V \sin i_*$ (km/s)	1.659 ± 0.15	1.77 ± 0.7	6.5 ± 0.5
RV_{sys} (km/s)	13.5818 ± 0.02	13.530 ± 0.001	-7.8919 ± 0.003
K (m/s)	0.1823 ± 0.0169	0.156 ± 0.002	0.6373 ± 0.01

Tabulka 5: Fitováním zpřesněné parametry exoplanetárních systémů WASP-85 A, WASP-85 A pozorovaného spektrografem *ESPRESSO* a WASP-173A.

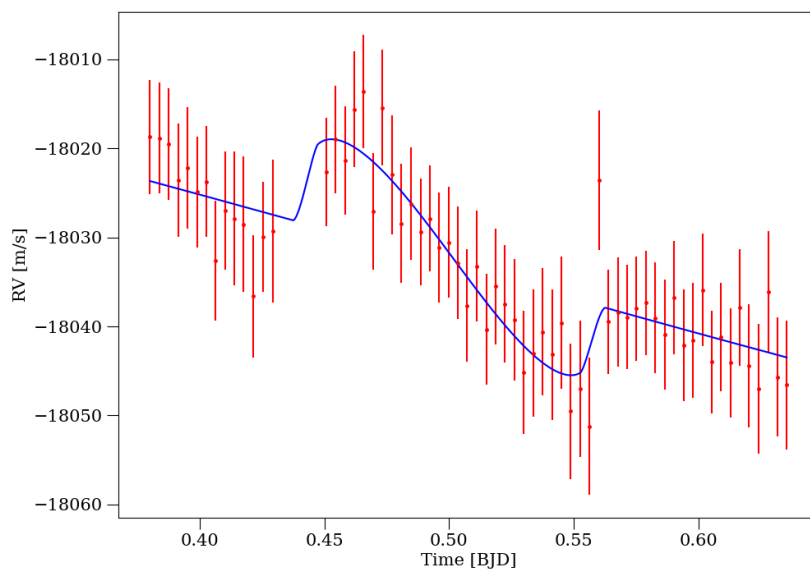
Nové hodnoty byly následně implementovány do původního kódu a byl vytvořen graf s hladkou křivkou odpovídající novým hodnotám fitovaných parametrů. Srovnání modelu vytvořeného osobním počítačem a clusterem je vidět na příkladě systému QATAR-7 na obrázcích 37 a 38. Na obrázcích 39 - 43 jsou poté zobrazeny křivky modelované počítačovým clusterem spolu s napozorovanými daty.



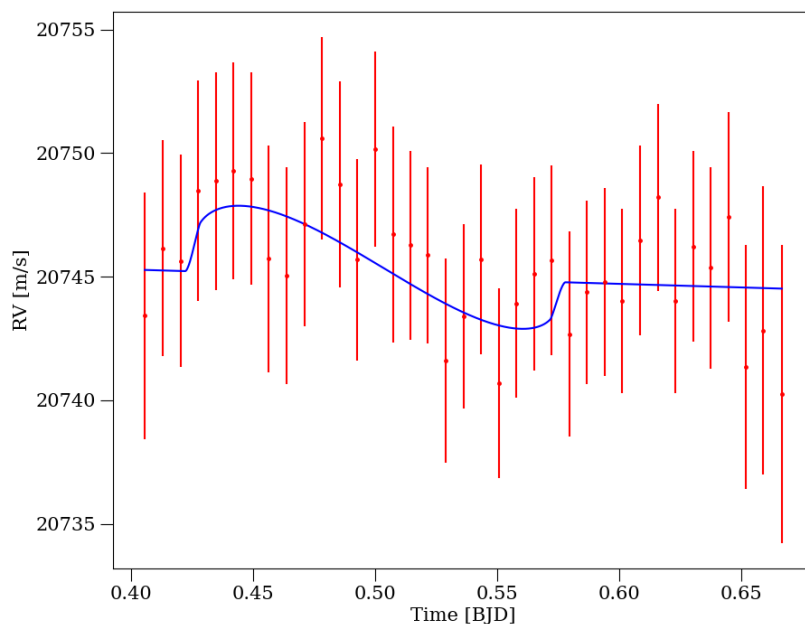
Obrázek 37: Hrubý model část RV křivky zachycující RM jev vytvořený na osobním počítači času tranzitu exoplanety QATAR-7 b spolu s napozorovanými daty ze spektrografu *HARPS*.



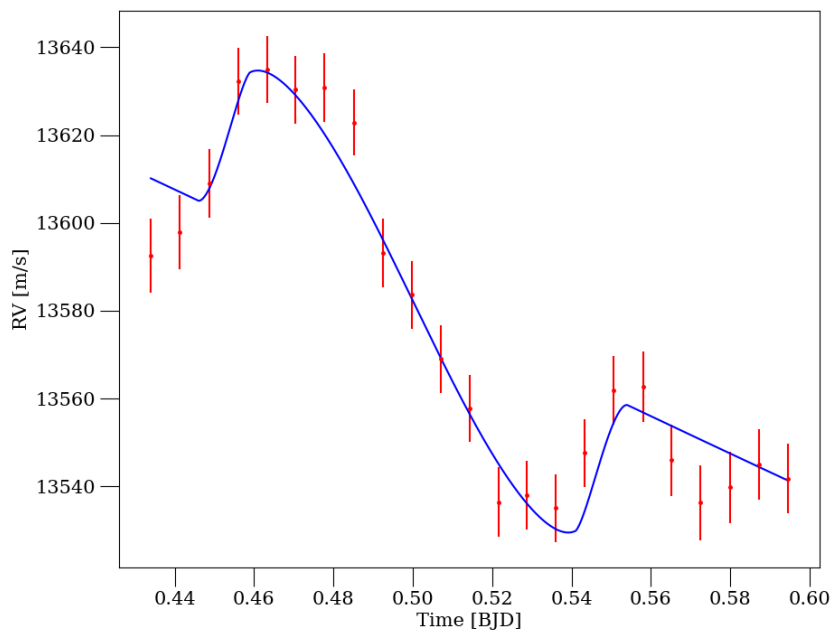
Obrázek 38: Přesný model část RV křivky zachycující RM jev vytvořený na počítačovém clusteru času tranzitu exoplanety QATAR-7 b spolu s napozorovanými daty ze spektrografu *HARPS*.



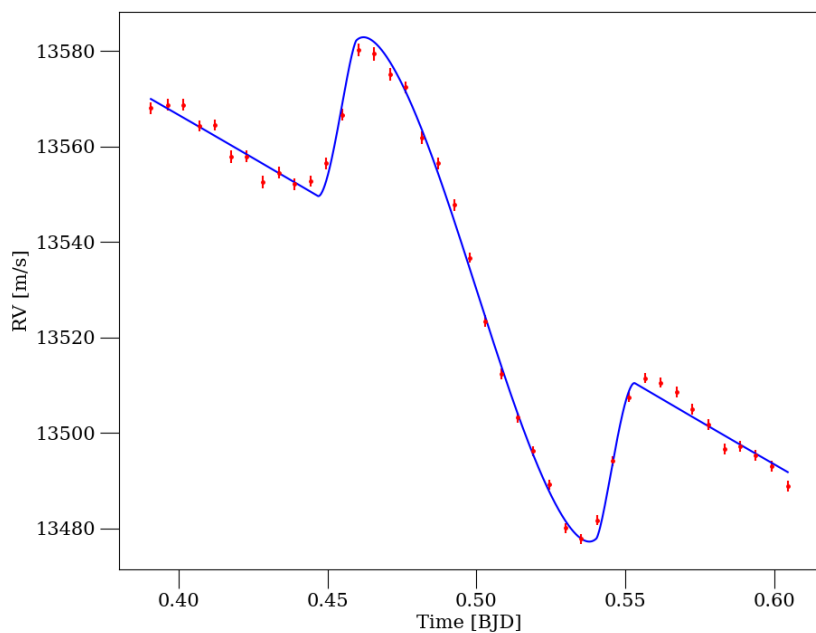
Obrázek 39: Přesný model část RV křivky zachycující RM jev vytvořený na počítačovaném clusteru času tranzitu exoplanety HD 149026 b spolu s napozorovanými daty ze spektrografu *HARPS*.



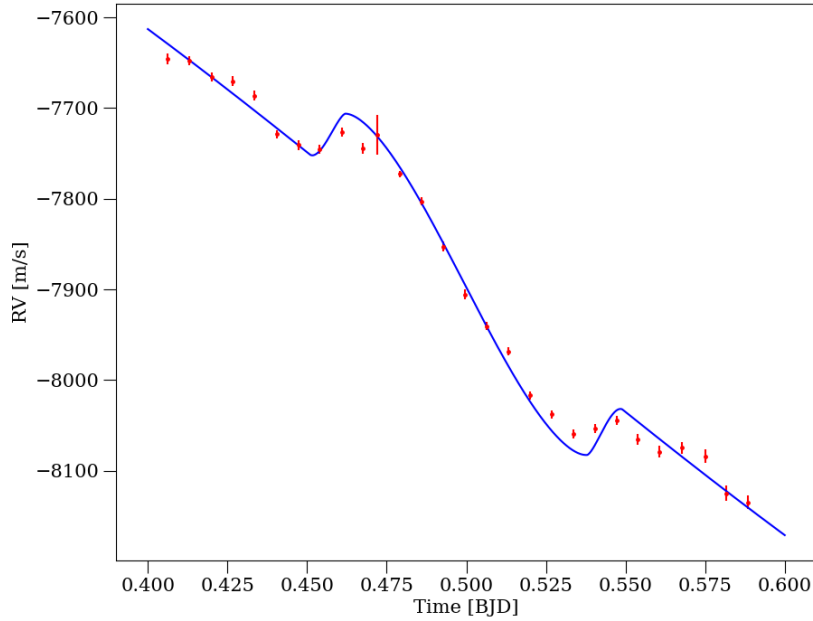
Obrázek 40: Přesný model část RV křivky zachycující RM jev vytvořený na počítačovaném clusteru odpovídající času tranzitu exoplanety TOI-560 c spolu s napozorovanými daty ze spektrografu *HARPS*.



Obrázek 41: Přesný model části RV křivky zachycující RM jev vytvořený na počítačovaném clusteru času tranzitu exoplanety WASP-85 A b spolu s napozorovanými daty ze spektrografu *HARPS*.



Obrázek 42: Přesný model části RV křivky zachycující RM jev vytvořený na počítačovaném clusteru času tranzitu exoplanety WASP-85 A b spolu s napozorovanými daty ze spektrografu *ESPRESSO*.



Obrázek 43: Přesný model části RV křivky zachycující RM jev vytvořený na počítačovaném clusteru času tranzitu exoplanety WASP-173 A b spolu s napozorovanými daty ze spektrografu *ESPRESSO*.

7 Diskuze výsledků

Z nalezených hodnot parametru λ , který představuje průmět úhlu svíraného rotační osou hvězdy a orbitální rotační osou exoplanety na oblohu, můžeme předložit hypotézu formace dané exoplanety. Systémy s $\lambda \approx 0^\circ$ pravděpodobně vznikly podle scénáře teorie migrace v disku. Systémy s $\lambda \approx 90^\circ$ poté nejspíše podle teorie migrace mimo disk. Obě teorie byly blíže představeny v Kapitole 2.[22]

Podle úhlu λ můžeme rovněž určit, zdali je oběžná dráha exoplanety prográdní, polární nebo retrográdní. Za prográdní je označována oběžná dráha s $90^\circ > \lambda$. Exoplaneta v tomto případě obíhá kolem hvězdy ve stejném směru, ve kterém se hvězda otáčí. Polární oběžná dráha je určena podmínkou $\lambda \approx 90^\circ$, těleso na takové dráze obíhá nad póly centrálního tělesa. Retrográdní oběžná dráha poté splňuje podmínku $\lambda > 90^\circ$. Exoplaneta na retrográdní dráze obíhá v opačném směru, než se otáčí její mateřská hvězda. Z povahy měření nejsme schopni určit rozdíl mezi I. a III. a stejně tak II. a IV. kvadrantem, proto určujeme podmínky jen na intervalu $(0^\circ; 180^\circ)$.

Níže jsou rozebrány výsledky analýzy pro každý ze zkoumaných systémů.

7.1 Diskuze konkrétních systémů

7.1.1 HD 149026 b

U horkého Saturna HD 149026 b se podařilo zjistit parametr λ s velmi nízkou odchylkou i přesto, že pro ni jsou dostupná data pouze z méně výkonného spektrografu HARPS. Nalezená hodnota $\lambda = -5 \pm 5$ je v dobré shodě s údaji z práce [48] publikované krátce

po dokončení mé analýzy, kde je uvedena hodnota $\lambda = 2.5040^{\circ+5.3640}_{-5.3317}$. Jelikož moje i zmiňovaná další analýza vycházejí obě z dat spektrografu *HARPSN* pořízených během stejné pozorovací noci, může být jejich shoda dobrým potvrzením správnosti mého postupu. Výsledná křivka modelu velmi dobře sleduje napozorovaná data, mírný rozkol můžeme vidět jen krátce před začátkem tranzitu.

Na základě nalezeného úhlu můžeme určit, že HD 149026 b se vyvíjela s největší pravděpodobností podle teorie migrace v disku. Její oběžná dráha je prográdní.

7.1.2 TOI-560 c

Data ze spektrografu *HARPSN* pro tento systém mají ze všech systémů nejmenší poměr signálu ku šumu. Výsledná hodnota $\lambda = -24^{+34}_{-21}$ proto není příliš přesná. Můžeme to vidět i v grafu na obrázku 40, kde se zejména od časové hodnoty BJD= 0.60 pozorovaná data zatížená většími odchylkami výrazně odchylojí od křivky modelu.

Jako pravděpodobnější se i zde jeví vývoj prostřednictvím migrace v disku, vzhledem k velkým nejistotám však bude k potvrzení této hypotézy potřeba dalších pozorování. S jistotou můžeme určit pouze to, že oběžná dráha TOI-560 c je prográdní.

7.1.3 QATAR-7 b

Výsledná hodnota $\lambda = -18^{+50.5}_{-32.3}$ je zatížena největší odchylkou ze všech systémů. Příčinou bude nejspíše příliš velký rozptyl pozorovaných dat. Na obrázku 38 můžeme vidět, že výsledná křivka modelu je výrazně vzdálena od datových bodů, nejvíce po konci tranzitu. Kvůli tomu se nepodařilo vytvořit dostatečně přesný fit, a tedy ani přesně určit parametr λ .

Za pravděpodobnější bychom mohli i zde označit vývoj popsany teorií migrace v disku. Stejně jako v případě TOI-560 c je však i zde zapotřebí provést další, přesnější pozorování. Oběžná dráha by měla mít prográdní charakter, vzhledem k velké odchylce však ani to nelze s jistotou určit.

7.1.4 WASP-85 A b

Na základě dat získaných spektrografem *HARPSN* byla určena odchylka $\lambda = -9.6^{+21}_{-17}$. Jedná se tedy o hodnotu dostatečně přesnou na určení pravděpodobné teorie vývoje i charakteru oběžné dráhy. Ještě přesnější hodnoty bylo dosaženo po zpracování dat ze spektrografu *ESPRESSO* $\lambda = -1.1 \pm 6.4$.

Podle toho můžeme usuzovat, že tato exoplaneta se pravděpodobně vyvíjela podle teorie migrace v disku a obíhá po prográdní oběžné dráze.

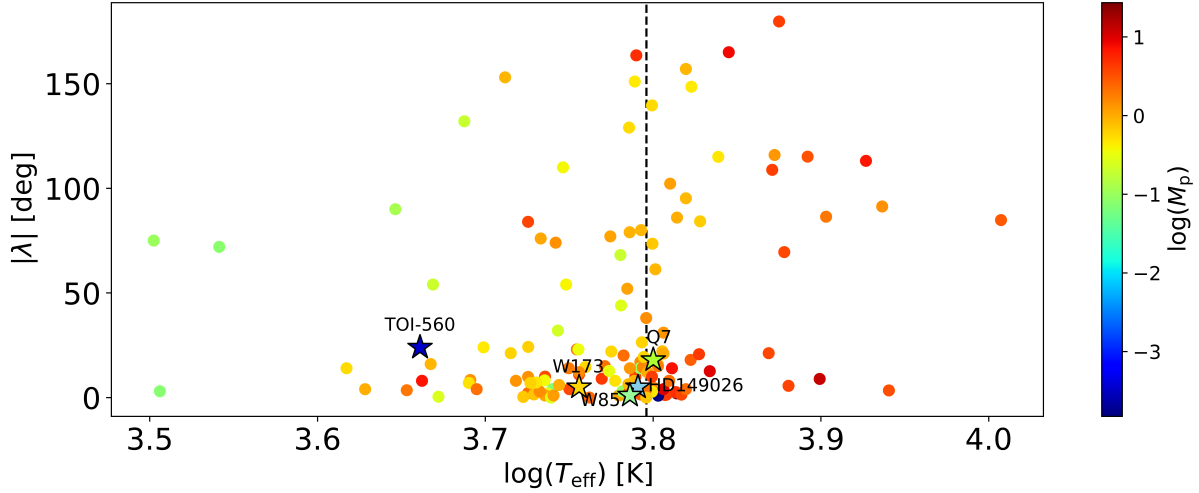
7.1.5 WASP-173 A b

U horkého Jupitera WASP-173 A b byla na základě analýzy dat ze spektrografu *ESPRESSO* určena jako $\lambda = 5 \pm 4$. Jedná se tedy o vůbec nejpřesnější určení hledaného parametru ze všech analyzovaných systémů. Moje analýza upřesňuje tu z dat spektrografu *HARPSN* [55], která uvádí hodnotu 9 ± 5 .

I tato exoplaneta se tedy pravděpodobně vyvíjela způsobem popsany teorií migrace v disku. Kolem své mateřské hvězdy obíhá po prográdní dráze.

7.2 Zařazení do systému

Všechny analyzované exoplanetární systémy se vyznačují malým sklonem své orbitální rotační osy vůči rotační ose hvězdy, můžeme je tedy považovat za zarovnané a pravděpodobně všechny vznikly způsobem migrace v disku. To koresponduje s obvyklou distribucí λ u exoplanet, jak dokazuje obrázek 44. Hodnoty parametru λ byly doposud zjištěny přibližně u 200 exoplanet a ve většině případů jde rovněž o zarovnané systémy. [8]

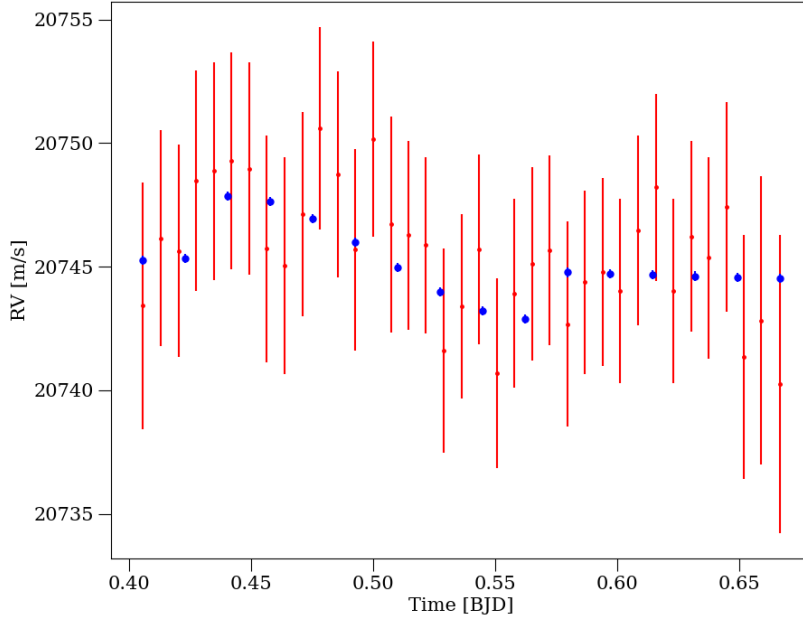


Obrázek 44: Závislost průmětu sklonu orbitální rotační osy exoplanety vůči rotační ose hvězdy na oblohu λ na logaritmu efektivní teploty hvězdy T_{eff} . Barva jednotlivých bodů znázorňuje hmotnost exoplanet v jednotkách hmotnosti Jupitera (M_J) dle logaritmické škály napravo. V grafu jsou zaneseny všechny systémy, u kterých je ke 16. 3. 2025 známa hodnota λ a nachází se v daném rozsahu hodnot, v této práci analyzované exoplanety jsou označeny symbolem hvězdy a popsány. Přerušovaná čára znázorňuje Kraftovu pauzu¹¹. Největší koncentrace systémů je v dolní části grafu, tedy u malých hodnot λ .

8 Možnosti pokračování

Systém TOI-560 byl zatížen největšími odchylkami měření, přesnější určení parametru λ by v jeho případě mohlo být provedeno pomocí spektrografu *ESPRESSO*, jelikož je dobře pozorovatelný i z jižní polokoule. Prostřednictvím nástroje *ESPRESSO Exposure Time Calculator* [56] jsem vypočítal očekávanou odchylku takového pozorování, která by dosahovala $\sigma = 0.49 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, což je přibližně desetkrát méně než v případě mnou analyzovaného pozorování ze spektrografu *HARPS*. Jak by poté mohla vypadat výsledná RV křivka je zachyceno na obrázku 46. Systém by bylo možné zkoumat i prostřednictvím nového spektrografu *PLATOSpec* na českém dalekohledu E152 v Chile. [12]

¹¹Náhly pokles v průměrné rotační rychlosti hvězd nastávající kolem $T_{eff} = 6200 \text{ K}$. Chladnější hvězdy mají konvektivní obálky, tudíž jejich slapové síly jsou efektivnější a mohou přeorientovat dráhy exoplanet za kratší čas.



Obrázek 45: Simulovaná data ze spektrografu *ESPRESSO* (modře), pro porovnání jsou v grafu zobrazena i reálná data ze spektrografu *HARPSN* analyzovaná v této práci.

Přesnější pozorování by pro lepší určení λ bylo potřeba rovněž v případě exoplanety QATAR-7 b. Vzhledem k její vysoké deklinaci $\delta = 37^\circ 01' 19''$ ji však není možné pozorovat prostřednictvím spektrografu *ESPRESSO*. Podobně přesným přístrojem na severní polokouli je spektrograf *KPF* (Keck Planet Finder) umístěný na Keckově observatoři na Havaji.[57] V budoucnu by k přesnějšímu pozorování tohoto systému mohl přispět i chystaný spektrograf *iLocater* v Arizoně.[58]

Analýza systému WASP-85 A b založená na datech přístroje *ESPRESSO* již byla dříve publikována [53] a uvádí hodnotu $\lambda = -16.1554^{+2.9156}_{-2.8791}$. Na rozdíl od mé analýzy zohledňuje místo jedné pozorovací noci tři, ale k výpočtu koeficientů okrajového ztemnění využívá méně přesného lineárního profilu. To může být i důvodem odlišné hodnoty průmětu rychlosti hvězdy, která je v této práci uvedena jako $V \sin i_* = 2.9847^{+0.0508}_{-0.0431}$ a mnou byla určena z dat *ESPRESSO* jako $V \sin i_* = 1.77 \pm 0.7$. Pro zpřesnění těchto dat by proto bylo v budoucnu vhodné lépe prozkoumat vlastnosti a aktivitu samotné hvězdy.

U systémů HD 149026 a WASP-173 A b byla hodnota λ určena s dostatečnou přesností v souladu s předchozími zmínkami v literatuře. Předložená hypotéza jejich vývoje by mohla být dále potvrzena analýzou jejich atmosféry. Očekávané složení atmosféry je totiž odlišné v případě vývoje prostřednictvím migrace v disku a mimo disk. K analýze složení atmosféry by mohlo být využito Dalekohledu Jamese Webba, viz část 8.1.

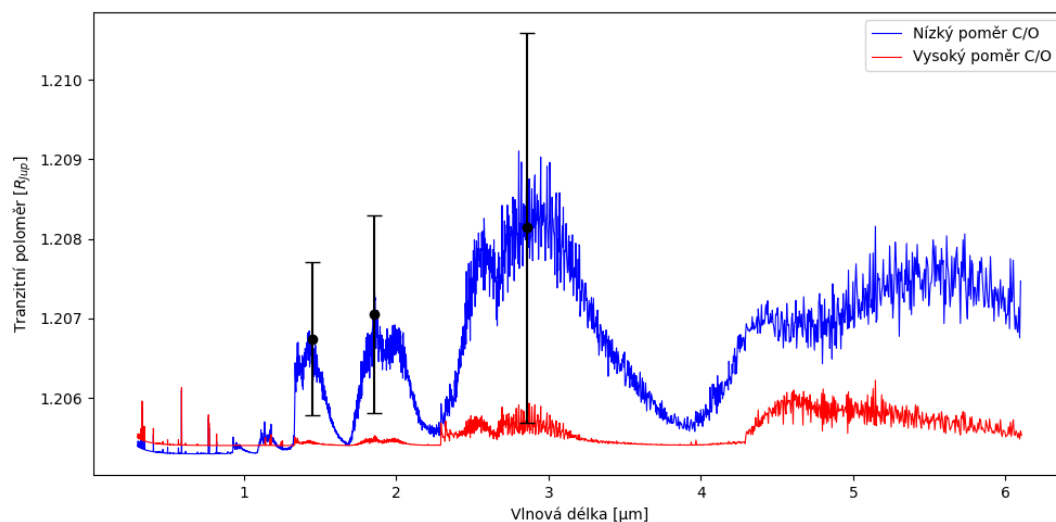
V budoucnu bych rád na práci navázal vyhledáním dalších podobných systémů, na nichž bych aplikoval v této práci otestovaný postup analýzy. Na velkých dalekohledech jsou každoročně vypisovány výzvy k podávání návrhů pozorování, která by bylo možné využít k lepší analýze systémů TOI-560, QATAR-7 a WASP-85. Pozorovací návrh mám v plánu podat i na Dalekohled Jamese Webba, abych měl možnost dále diskutovat vývoj zkoumaných systémů podle složení jejich atmosfér. Výzkum popsany v této práci, případně rozšířený o analýzu dalších systémů nebo přesnější pozorování, bych následně chtěl zpracovat do formy vědecké publikace.

8.1 Modelování atmosfér

Zjištění sklonu orbitální rotační osy exoplanety vůči rotační ose hvězdy nemusí být zcela jednoznačné pro určení správné teorie vývoje daného systému. Ve výjimečných případech mohou mít exoplanety vyvíjející se dle teorie migrace mimo disk oběžnou dráhu zarovnanou podobně jako v případě vývoje popsaného teorií migrace v disku. Zcela jistě se však bude lišit chemické složení jejich atmosféry. Nejpodrobnější informace o vývoji daného systému je proto možné získat kombinací obou metod, jak analýzy atmosféry, tak sklonu orbity.

Nejdůležitějším faktorem je v tomto případě poměr množství uhlíku a kyslíku v atmosféře, takzvaný C/O poměr. Exoplanety vznikající podle teorie migrace mimo disk se vyznačují větší hodnotou tohoto poměru než exoplanety vznikající migrací v disku. U druhé skupiny totiž během formace nedocházelo k akreci pevných látek v takové míře.[24]

Studium složení atmosfér je tak velmi hodnotným doplňkem k analýze sklonu orbitální rotační osy exoplanety vůči rotační ose hvězdy pro vytvoření co nejkomplexnějšího pohledu na období vzniku a vývoje daného planetárního systému. Nejlepším přístrojem schopným výzkumu složení atmosfér je nyní Dalekohled Jamese Webba. Využil jsem proto volně dostupného nástroje petitRADTRANS [59] k modelování atmosféry v této práci analyzované exoplanety WASP-173 A b.¹² Vytvořil jsem dva modely, jeden pro atmosféru s nízkým poměrem C/O, druhý pro atmosféru s vysokou hodnotou tohoto poměru. Tato dvě modelová spektra jsem porovnal s předpokládanou odchylkou měření přístroje NIRSpec Webbova dalekohledu zjištěnou s pomocí nástroje Pandexo.[60] Předpokládané odchylky by mohly být dostatečně malé na rozlišení prominentních spektrálních čar ve spektrech modelových atmosfér a jedná se tedy o vhodného kandidáta pro další výzkum prostřednictvím *JWST*. Tento výzkum by mohl přinést další potvrzení v této práci předložené hypotézy, že se systém WASP-173 A b vyvíjel způsobem, který popisuje teorie migrace v disku.



Obrázek 46: Modely spektra atmosféry exoplanety WASP-173 A b s nízkým, respektive vysokým, poměrem C/O. Na určitých vlnových délkách jsou zobrazeny předpokládané odchylky pozorování v případě využití přístroje *NIRSpec* na *JWST* modelované pomocí nástroje Pandexo.

¹²HD 149026 saturuje detektor a tudíž u ní není možné obdobnou modelaci provést.

9 Závěr

V práci se mi podařilo vybrat z veřejně dostupných archivů exoplanety, u nichž byla dostupná pozorovací data, ale doposud u nich nebyla publikována hodnota průmětu sklonu orbitální rotační osy exoplanety vůči rotační ose hvězdy na oblohu. U vybraných systémů jsem následně vytvořil křivky radiálních rychlostí. Systémy, u nichž byly tyto křivky dostatečně průkazné, jsem pak dále analyzoval.

V literatuře jsem dohledal již známé parametry těchto exoplanetárních systémů a následně jsem prostřednictvím počítačového clusteru vytvořil model Rossiterova-McLaughlinova jevu, který nejlépe vystihoval reálná data. Na základě tohoto modelu se mi u exoplanet HD 149026 b, TOI-560 c, QATAR-7 b, WASP-85 A b a WASP-173 A b podařilo určit hodnoty hledaného parametru λ . Podle dosažených hodnot jsem předložil hypotézu možných způsobů vývoje těchto systémů.

U exoplanet TOI-560 c, QATAR-7 b a WASP-85 A b jsem navrhl způsoby, jak dosáhnout lepší přesnosti při určení klíčového parametru. U exoplanety WASP-173 A b jsem představil dva možné modely vzhledu její atmosféry a možnosti, jak by ji bylo možné pozorovat a tím dále potvrdit předloženou hypotézu způsobu její formace. V budoucnosti bych chtěl vyhledat další systémy, které bych podrobil podobné analýze. Rovněž bych chtěl navázat na studium zde zkoumaných systémů prostřednictvím podání vlastních návrhů na jejich pozorování na větších dalekohledech.

10 Seznam literatury

- [1] INTERNATIONAL ASTRONOMICAL UNION. *Pluto*. [online], n.d., [cit. 2025-03-17]. Dostupné z: <https://www.iau.org/public/themes/pluto/>
- [2] INTERNATIONAL ASTRONOMICAL UNION. *F2 Commission Documents*. [online], n.d., [cit. 2025-03-17]. Dostupné z: https://www.iau.org/science/scientific_bodies/commissions/F2/info/documents/
- [3] PERRYMAN, M. *The Exoplanet Handbook*. Cambridge: Cambridge University Press, druhé vydání, 2018, ISBN 9781108419772, [cit. 2025-03-17]. Dostupné z: <https://www.cambridge.org/gb/universitypress/subjects/physics/planetary-systems-and-astrobiology/exoplanet-handbook-2nd-edition?format=AR>.
- [4] KALAS, P. Beta Pictoris. [online], n.d., [cit. 2025-03-17]. Dostupné z: <https://w.astro.berkeley.edu/~kalas/disksite/pages/bpic.html>
- [5] WOLSZCZAN, A.; FRAIL, D. A. A planetary system around the millisecond pulsar PSR1257 + 12. *Nature*, ročník 355, č. 6356, 1992: str. 145–147, DOI: 10.1038/355145a0, [cit. 2025-03-17]. Dostupné z: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1992Natur.355..145W/abstract>.
- [6] MAYOR, M.; QUELOZ, D. A Jupiter-mass companion to a solar-type star. *Nature*, ročník 378, č. 6555, 1995: str. 355–359, DOI: 10.1038/378355a0, [cit. 2025-03-17]. Dostupné z: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1995Natur.378..355M/abstract>.
- [7] EUROPEAN SOUTHERN OBSERVATORY. *ESO oznamuje: ann19049*. [online], n.d., [cit. 2025-03-17]. Dostupné z: <https://www.eso.org/public/czechrepublic/announcements/ann19049/?lang>
- [8] NASA EXOPLANET SCIENCE INSTITUTE. *NASA Exoplanet Archive*. [online], n.d., [cit. 2025-02-25]. Dostupné z: <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu>. Dostupné z: <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu>
- [9] MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY. *TESS Science Office*. [online], n.d., [cit. 2025-03-17]. Dostupné z: <https://tess.mit.edu>. Dostupné z: <https://tess.mit.edu>
- [10] NASA. *Webb Space Telescope*. [online], n.d., [cit. 2025-03-20]. Dostupné z: <https://science.nasa.gov/mission/webb/>
- [11] EUROPEAN SPACE AGENCY. *ESA's Exoplanet Missions*. [online], n.d., [cit. 2025-03-17]. Dostupné z: https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Exoplanets/ESA_s_exoplanet_missions. Dostupné z: https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Exoplanets/ESA_s_exoplanet_missions
- [12] ASTRONOMICKÝ ÚSTAV AV ČR. *PLATO*. [online], n.d., [cit. 2025-03-17]. Dostupné z: <https://stel.asu.cas.cz/plato/>
- [13] ASTRONOMICKÝ ÚSTAV AV ČR. *Spektrograf OES – Perkův dalekohled, Astronomický ústav AV ČR*. [online], n.d., [cit. 2025-03-17]. Dostupné z: <https://stel.asu.cas.cz/cs/perkuv-dalekohled/pristroje/spektrograf-oes/>
- [14] EUROPEAN SOUTHERN OBSERVATORY. *ESO Public images*. [online], n.d., [cit. 2025-03-20]. Dostupné z: <https://www.eso.org/public/images>

- [15] NASA. *Planet Types*. [online], n.d., [cit. 2025-03-17]. Dostupné z: <https://science.nasa.gov/exoplanets/planet-types/>
- [16] KIPPING, D.; TEACHEY, A. An exomoon survey of 70 cool giant exoplanets and the new candidate Kepler-1708 b-i. *Nature Astronomy*, ročník 6, 2022: str. 367–373, DOI: 10.1038/s41550-021-01539-1, [cit. 2025-03-17]. Dostupné z: <https://www.nature.com/articles/s41550-021-01539-1>
- [17] DI STEFANO, R.; BERNDTSSON, J.; et al. M51-ULS-1b: The First Candidate for a Planet in an External Galaxy. *arXiv preprint arXiv:2009.08987*, 2020, DOI: 10.3847/1538-4357/abf799, [cit. 2025-03-17]. Dostupné z: <https://arxiv.org/abs/2009.08987>
- [18] PLATO Mission. *PLATO Mission*. [online], n.d., [cit. 2025-03-17]. Dostupné z: <https://platomission.com>
- [19] EUROPEAN SOUTHERN OBSERVATORY. *Exoplanets*. [online], n.d., [cit. 2025-03-17]. Dostupné z: <https://elt.eso.org/science/exoplanets/>
- [20] NASA Exoplanet Exploration Program. *Technology Overview*. [online], n.d., [cit. 2025-03-17]. Dostupné z: <https://exoplanets.nasa.gov/exep/technology/technology-overview/>
- [21] HARVARD-SMITHSONIAN CENTER FOR ASTROPHYSICS. *Planet Formation*. [online], n.d., [cit. 2025-03-17]. Dostupné z: <https://www.cfa.harvard.edu/research/topic/planet-formation>
- [22] DAWSON, R. I.; JOHNSON, J. A. Origins of Hot Jupiters. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, ročník 56, 2018: str. 175–214, DOI: 10.1146/annurev-astro-081817-051748, [cit. 2025-03-17]. Dostupné z: <https://arxiv.org/pdf/1801.06117>
- [23] INSTITUTO DE ASTROFÍSICA DE CANARIAS. *Exoplanetary Atmospheres – Instituto de Astrofísica de Canarias*. 2024, dostupné z: <https://research.iac.es/proyecto/exoatmospheres/index.php>. [cit. 2025-05-01].
- [24] MADHUSUDHAN, N. Exoplanetary Atmospheres: Key Insights, Challenges and Prospects. *arXiv preprint*, ročník arXiv:1904.03190, 2019, dostupné z: <https://arxiv.org/abs/1904.03190>. [cit. 2025-05-01].
- [25] PIALUET-GHORAYEB, C.; BENNEKE, B.; et al. JWST/NIRISS reveals the water-rich "steam world" atmosphere of GJ 9827 d. *arXiv preprint*, ročník arXiv:2410.03527, 2024, dostupné z: <https://arxiv.org/abs/2410.03527>. [cit. 2025-05-01].
- [26] MADHUSUDHAN, N.; CONSTANTINOU, M. a. k., Savvas a Holmberg. New Constraints on DMS and DMDS in the Atmosphere of K2-18 b from JWST MIRI. *arXiv preprint*, ročník arXiv:2504.12267, 2025, dostupné z: <https://arxiv.org/abs/2504.12267>. [cit. 2025-05-01].
- [27] AHRER, E.-M. *Low resolution transmission spectroscopy of exoplanet atmospheres using ground-based and space telescopes*. Disertační práce, University of Warwick, 2023, [cit. 2025-03-17]. Dostupné z: <https://wrap.warwick.ac.uk/id/eprint/183009/>
- [28] WINN, J. N. Transits and Occultations. *arXiv*, 2010, [cit. 2025-03-17]. Dostupné z: <https://arxiv.org/pdf/1001.2010>
- [29] ALI, S.; YOUSAF, Z.; et al. Exoplanets Prediction in Multi-Planetary Systems and Determining the Correlation Between the Parameters of Planets and Host Stars Using

- Artificial Intelligence. *arXiv preprint arXiv:2402.17898*, 2024, [cit. 2025-03-17]. Dostupné z: <https://arxiv.org/abs/2402.17898>
- [30] HATZES, A. P. *The Doppler Method for the Detection of Exoplanets*. 2514-3433, IOP Publishing, 2019, ISBN 978-0-7503-1689-7, [cit. 2025-03-17]. Dostupné z: <https://dx.doi.org/10.1088/2514-3433/ab46a3>
- [31] ŠLECHTA, M. *Spektrografya*. [online], n.d., [cit. 2025-03-17]. Dostupné z: <https://stel.asu.cas.cz/~slechta/stelarni/27-spektrografya/>
- [32] EUROPEAN SOUTHERN OBSERVATORY. *HARPS - Overview*. [online], n.d., [cit. 2025-03-17]. Dostupné z: <https://www.eso.org/sci/facilities/lasilla/instruments/harps/overview.html>
- [33] EUROPEAN SOUTHERN OBSERVATORY. *ESPRESSO - Overview*. [online], n.d., [cit. 2025-03-17]. Dostupné z: <https://www.eso.org/sci/facilities/paranal/instruments/espresso/overview.html>
- [34] UNIVERSITÉ DE GENÈVE. *HARPS-N*. [online], n.d., [cit. 2025-03-17]. Dostupné z: <https://plone.unige.ch/HARPS-N>
- [35] NASA. *Microlensing - Roman Space Telescope*. [online], n.d., [cit. 2025-03-17]. Dostupné z: <https://science.nasa.gov/mission/roman-space-telescope/microlensing/>
- [36] ZURLO, A. Direct imaging of exoplanets. *arXiv preprint arXiv:2404.05797*, 2024, [cit. 2025-03-17]. Dostupné z: <https://arxiv.org/pdf/2404.05797>
- [37] ALBRECHT, S. H.; DAWSON, R. I.; et al. Stellar Obliquities in Exoplanetary Systems. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, ročník 134, č. 1038, 2022: článek 082001, DOI: 10.1088/1538-3873/ac6c09, [cit. 2025-03-17]. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1538-3873/ac6c09>
- [38] ŽÁK, J. *Characterization of exoplanets through the Rossiter-McLaughlin effect and transmission spectroscopy*. Disertační práce, Friedrich-Schiller-University Jena, 2024, [cit. 2025-03-17]. Dostupné z: https://www.db-thueringen.de/receive/dbt_mods_00063985
- [39] GAUDI, B. S.; WINN, J. N. Prospects for the characterization and confirmation of transiting exoplanets via the Rossiter-McLaughlin effect. *arXiv*, 2018, [cit. 2025-03-17], astro-ph/0608071. Dostupné z: <https://arxiv.org/pdf/astro-ph/0608071>
- [40] EUROPEAN SOUTHERN OBSERVATORY. *ESO Archive*. [online], n.d., [cit. 2025-03-17]. Dostupné z: http://archive.eso.org/eso/eso_archive_main.html
- [41] INAF - NATIONAL INSTITUTE FOR ASTROPHYSICS. *TNG Archive*. [online], n.d., [cit. 2025-03-17]. Dostupné z: <http://archives.ia2.inaf.it/tng/>
- [42] KEELE UNIVERSITY ASTRONOMY. *Obliquity of Exoplanets*. [online], n.d., [cit. 2025-03-17]. Dostupné z: <https://www.astro.keele.ac.uk/jkt/tepcat/obliquity.html>
- [43] NASA EXOPLANET ARCHIVE. *Transit Visible Tables*. [online], n.d., [cit. 2025-03-17]. Dostupné z: <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/cgi-bin/TransitView/nph-visibletbls?dataset=transits>
- [44] KNUDSTRUP, E.; ALBRECHT, S. H.; et al. Obliquities of Exoplanet Host Stars: 19 New and Updated Measurements, and Trends in the Sample of 205 Measurements. *Astronomy Astrophysics*, 2024, accepted for publication, 2408.09793. Dostupné z: <https://arxiv.org/abs/2408.09793>

- [45] PYASTRONOMY DOCUMENTATION TEAM. *RmcL Ohta Model Documentation*. [online], n.d., [cit. 2025-03-18]. Dostupné z: <https://pyastronomy.readthedocs.io/en/latest/modelSuiteDoc/RmcLOhtaDoc/index.html>
- [46] EXOPLANET.EU. *Exoplanet.eu Homepage*. [online], n.d., [cit. 2025-03-17]. Dostupné z: <https://exoplanet.eu/home/>
- [47] EXOCTK. *Limb Darkening*. [online], n.d., [cit. 2025-03-17]. Dostupné z: https://exoctk.stsci.edu/limb_darkening
- [48] BIASSONI, F.; BORSA, F.; et al. High-resolution transmission spectroscopy of the hot-Saturn HD 149026b. *Astronomy & Astrophysics*, ročník 691, 2024: článek A283, DOI: 10.1051/0004-6361/202451750, [cit. 2025-03-17]. Dostupné z: <https://arxiv.org/abs/2410.10820>
- [49] EL MUFTI, M.; PLAVCHAN, P. P.; et al. TOI 560: Two Transiting Planets Orbiting a K Dwarf Validated with iSHELL, PFS, and HIRES RVs. *The Astronomical Journal*, ročník 165, č. 1, 2023: článek 10, DOI: 10.3847/1538-3881/ac9834. Dostupné z: <https://doi.org/10.3847/1538-3881/ac9834>
- [50] COOKE, B. F.; OWEN, J. E.; et al. WASP-107b's inflated radius and the luminosity of its core. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, ročník 514, č. 2, 2022: str. 1606–1618, DOI: 10.1093/mnras/stac1271. Dostupné z: <https://doi.org/10.1093/mnras/stac1271>
- [51] MCKEMISSH, L. K.; YOUNG, J.; et al. Can highly accurate ab initio dipoles be achieved using standard quantum chemistry methods? The case of methane. *arXiv preprint*, 2021, 2112.13448. Dostupné z: <https://arxiv.org/abs/2112.13448>
- [52] ALSUBAI, K. A.; WEBB, J. R. L.; et al. Qatar Exoplanet Survey: Qatar-7b - a very hot Jupiter orbiting a metal rich F-Star. *arXiv:1812.05601*, 2018, [cit. 2025-03-17]. Dostupné z: <https://arxiv.org/pdf/1812.05601>
- [53] JIANG, Z.; WANG, W.; et al. Atmospheric composition of WASP-85Ab with ESPRESSO/VLT observations. *arXiv preprint*, 2023, 2307.09577. Dostupné z: <https://arxiv.org/abs/2307.09577>
- [54] BROWN, D. J. A.; ANDERSON, D. R.; et al. Three transiting planet discoveries from the Wide Angle Search for Planets: WASP-85 A b; WASP-116 b, and WASP-149 b. *arXiv preprint*, 2014, 1412.7761. Dostupné z: <https://arxiv.org/abs/1412.7761>
- [55] ŽÁK, J.; BOFFIN, H. M. J.; et al. Stellar obliquities of eight close-in gas giant exoplanets. *Astronomy Astrophysics*, ročník TBD, 2025: článek TBD, DOI: 10.1051/0004-6361/20253789. Dostupné z: <https://arxiv.org/abs/2501.05615>
- [56] EUROPEAN SOUTHERN OBSERVATORY. *ESPRESSO - Spectrograph Configuration*. [online], n.d., [cit. 2025-03-17]. Dostupné z: <https://www.eso.org/observing/etc/bin/gen/form?INS.NAME=ESPRESSO+INS.MODE=spectro>
- [57] CALIFORNIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY. *Keck Planet Finder (KPF)*. [online], n.d., [cit. 2025-03-17]. Dostupné z: <https://exoplanets.caltech.edu/kpf/>
- [58] OHIO STATE UNIVERSITY. *iLocater: The New Exoplanet Instrument*. [online], n.d., [cit. 2025-03-17]. Dostupné z: <https://astronomy.osu.edu/ISL/instruments/ilocater>
- [59] MOLLIÈRE, P. a. k. *petitRADTRANS radiative transfer code*. [online], 2024, dostupné z: <https://petitradtrans.readthedocs.io/en/latest/>. [cit. 2025-05-02].
- [60] PONTOPPIDAN, K. M. a. k. *Pandexo Simulation Tool*. [online], 2025, dostupné z: <https://exoctk.stsci.edu/pandexo/dashboard>. [cit. 2025-05-01].

11 Seznam obrázků

1	První snímek protoplanetárního disku u hvězdy Beta Pictoris A z roku 1984. Převzato z [4].	2
2	Nositelé části Nobelovy ceny za fyziku za rok 2019, objevitelé exoplanety 51-Pegasi b, Michel Mayor a Didier Queloz před 3,6 metrovým dalekohledem na observatoři La Silla, kde je dnes provozován spektrograf <i>HARPS</i> . Převzato z [7].	3
3	Umělecká představa Dalekohledu Jamese Webba. Převzato z [10].	4
4	Český dalekohled E152 na observatoři La Silla v Chile, na kterém je umístěn spektrograf <i>PLATOSpec</i> . Převzato z [12].	5
5	Umělecká představa exoplanety typu horkého Jupitera tranzitující před svou hvězdou. Převzato z [14].	6
6	Vizualizace budovaného dalekohledu ELT po dokončení na hoře Cerro Armazones v Chile. Převzato z [14].	8
7	Znázornění tří teorií vývoje exoplanet ze skupiny horkých Jupiterů, formace in situ (In situ formation), migrace v disku (Disc migration) a migrace mimo disk (Ex situ formation, Tidal migration). Převzato z [22].	9
8	Zobrazení prostupnosti záření a typických atmosférických procesů v závislosti na tlaku v atmosféře planety. Vlevo jsou zobrazeny také tři možné teplotní profily atmosféry. Červený pro případ planety, na kterou dopadá velké množství záření a v její atmosféře dochází k teplotní inverzi. Světle modrý znázorňuje obdobně ozářenou planetu, kde však nedochází k teplotní inverzi. Šedý přerušovaný odpovídá případu planety, na niž dopadá minimum záření. Převzato z [24].	11
9	Znázornění tranzitu planety přes mateřskou hvězdu. R_S značí poloměr hvězdy, b impaktní parametr (zde v m). Níže můžeme vidět obvyklou světelnou křivku hvězdy v průběhu tranzitu. Intenzita záření od hvězdy začne klesat po prvním kontaktu (1), minima dosáhne po vstupu celé planety před disk hvězdy (2), začne opětovně růst když planeta začne opouštět hvězdu (3), a dosáhne zpět své obvyklé hodnoty poté co planeta úplně opustí disk (4). Mezi jednotlivými body měříme intervaly dále značené jako Δt_{14} a Δt_{23} . Z poklesu jasnosti můžeme určit hloubku tranzitu D , zde značenou jako δ . Převzato z [27].	13
10	Znázornění metody radiálních rychlostí. Hvězda se vlivem oběhu planety sama také pohybuje, při pohybu směrem k Zemi dochází k posunu spektrálních čar do modré oblasti spektra (vlnová délka světla se zkracuje), v opačném směru do červené oblasti (vlnová délka světla se prodlužuje). Z míry posunu lze určit radiální rychlost hvězdy. Převzato z [14].	15
11	Spektrograf <i>ESPRESSO</i> v zázemí observatoře VLT na hoře Paranal v Chile. Převzato z [33].	17
12	Sloupcový graf počtu objevených exoplanet v jednotlivých rocích. Barevně jsou odlišeny metody využívané k objevu dané planety. Jasně dominuje tranzitní metoda, největší počty jsou dány zásluhou mise <i>Kepler</i> . Převzato z [8].	18
13	Znázornění úhlů využívaných k popisu systémů hvězda-exoplaneta. $\hat{n}_*$ značí rotační osu hvězdy, $\hat{n}_o$ orbitální rotační osu exoplanety, $\hat{n}_{obs}$ určuje směr pohledu. Úhel ψ je v angličtině označován jako stellar obliquity, jeho průmět na oblohu se značí λ (anglicky projected stellar obliquity). Převzato z [37].	20

14	Závislost geometrie přechodu exoplanety přes disk hvězdy na podobě křivky radiálních rychlostí. Pokud exoplaneta přechází pouze přes jednu polovinu disku hvězdy, změna radiálních rychlostí je vlivem tohoto efektu výhradně kladná, nebo záporná. Převzato z [38].	21
15	Znázornění přechodu planety přes disk rotující hvězdy, $\hat{n}_O$ je orbitální rotační osa exoplanety a $\hat{n}_*$ osa rotace hvězdy. Převzato z [37].	22
16	Výřez ze spektra hvězdy WASP-85A zaznamenaného spektrografem HARPSN. Můžeme zde vidět rozsah vlnových délek 517 - 519 nm s výraznými poklesy na vlnových délkách 517,30 nm a 518,40 nm, které odpovídají spektrálním absorpčním čarům.	25
17	Závislost vzdušné hmoty na čase v průběhu pozorování hvězdy HD 149026.	25
18	Závislost poměru signálu ku šumu na čase v průběhu pozorování hvězdy HD 149026.	26
19	RV křivka hvězdy EPIC212036875, odchylku způsobenou RM jevem zde není možné dostatečně dobře rozlišit, křivka je hladká.	27
20	RV křivka hvězdy Kelt-1, data jsou příliš rozptýlena a není možné identifikovat konkrétní odchylku, která by mohla být dána RM jevem.	27
21	RV křivka hvězdy Kelt-17, datové body jsou velmi vzdálené od sebe, pravděpodobně u ní byly i špatně určeny odchylky.	28
22	RV křivka hvězdy Kelt-18, datové body jsou příliš rozptýleny na to, aby bylo možné idenitifikovat odchylku způsobenou RM jevem.	28
23	RV křivka hvězdy Kelt-21, rychlosti mají nereálně velký rozptyl svých hodnot, jedná se o chybné pozorování.	29
24	RV křivka hvězdy Kepler-68, odchylku způsobenou RM jevem není možné v šumu identifikovat.	29
25	RV křivka hvězdy Kepler-1658, velký rozptyl rychlostí a velmi malé odchylky naznačují opět chybné pozorování.	30
26	RV křivka hvězdy Kepler-91, která má příliš malou rychlost oběhu kolem barycentra, a tudíž nelze v šumu rozlišit RM efekt.	30
27	RV křivka hvězdy TOI-1355, velmi velké rozpětí datových bodů a jejich nepravidelné rozložení naznačuje další chybné pozorování.	31
28	RV křivka hvězdy TOI-2018 se vyznačuje drobnými rozdíly radiálních rychlostí v porovnání s odchylkami měření, které znemožňují rozlišení RM efektu.	31
29	RV křivka hvězdy TOI-4524, rozdíly radiálních rychlostí jsou zde příliš malé a chybí pozorovací data z jedné části tranzitu.	32
30	RV křivka hvězdy TOI-4527, je zde poměrně malý počet datových bodů, nelze vypořádat křivku charakteristickou pro RM jev.	32
31	RV křivka hvězdy HD 149026, i přes výraznější odchylky měření zde lze rozeznat odchýlení od rovné křivky odpovídající RM jevu.	33
32	RV křivka hvězdy QATAR-7 je zatížena mírným rozptylem bodů, zakřivení odpovídající RM jevu zde však přesto lze rozpoznat.	33
33	RV křivka hvězdy TOI-560, pozorovací odchylky jsou zde výraznější, ale základní tvar křivky RM jevu je možné rozpoznat. Zakřivení křivky přímo nekoresponduje s vyznačeným časem tranzitu, pravý čas tranzitu mohl být ovlivněn přítomností další planety v systému.	34
34	RV křivka hvězdy WASP-85, pozorovaná data mají pouze malé odchylky, zakřivení křivky typické pro RM jev je zde jasně patrné.	34

35	RV křivka hvězdy WASP-85 a pozorovaná spektrografem <i>ESPRESSO</i> . Můžeme si povšimnout, že odchylky jsou menší a křivka je hladší než v případě pozorování stejné hvězdy spektrografem <i>HARPS</i>	35
36	RV křivka hvězdy WASP-173 A, přestože má hvězda větší amplitudu radiálních rychlostí danou oběhem kolem barycentra než ostatní systémy, lze zde křivku RM efektu dobře rozpoznat.	35
37	Hrubý model část RV křivky zachycující RM jev vytvořený na osobním počítači času tranzitu exoplanety QATAR-7 b spolu s napozorovanými daty ze spektrografu <i>HARPS</i>	40
38	Přesný model část RV křivky zachycující RM jev vytvořený na počítačovém clusteru času tranzitu exoplanety QATAR-7 b spolu s napozorovanými daty ze spektrografu <i>HARPS</i>	40
39	Přesný model část RV křivky zachycující RM jev vytvořený na počítačovaném clusteru času tranzitu exoplanety HD 149026 b spolu s napozorovanými daty ze spektrografu <i>HARPS</i>	41
40	Přesný model část RV křivky zachycující RM jev vytvořený na počítačovaném clusteru odpovídající času tranzitu exoplanety TOI-560 c spolu s napozorovanými daty ze spektrografu <i>HARPS</i>	41
41	Přesný model části RV křivky zachycující RM jev vytvořený na počítačovaném clusteru času tranzitu exoplanety WASP-85 A b spolu s napozorovanými daty ze spektrografu <i>HARPS</i>	42
42	Přesný model části RV křivky zachycující RM jev vytvořený na počítačovaném clusteru času tranzitu exoplanety WASP-85 A b spolu s napozorovanými daty ze spektrografu <i>ESPRESSO</i>	42
43	Přesný model části RV křivky zachycující RM jev vytvořený na počítačovaném clusteru času tranzitu exoplanety WASP-173 A b spolu s napozorovanými daty ze spektrografu <i>ESPRESSO</i>	43
44	Závislost průmětu sklonu orbitální rotační osy exoplanety vůči rotační ose hvězdy na oblohu λ na logaritmu efektivní teploty hvězdy T_{eff} . Barva jednotlivých bodů znázorňuje hmotnost exoplanet v jednotkách hmotnosti Jupitera (M_J) dle logaritmické škály napravo. V grafu jsou zaneseny všechny systémy, u kterých je ke 16. 3. 2025 známa hodnota λ a nachází se v daném rozsahu hodnot, v této práci analyzované exoplanety jsou označeny symbolem hvězdy a popsány. Přerušovaná čára znázorňuje Kraftovu pauzu ¹³ . Největší koncentrace systémů je v dolní části grafu, tedy u malých hodnot λ	45
45	Simulovaná data ze spektrografu <i>ESPRESSO</i> (modře), pro porovnání jsou v grafu zobrazena i reálná data ze spektrografu <i>HARPSN</i> analyzovaná v této práci.	46
46	Modely spektra atmosféry exoplanety WASP-173 A b s nízkým, respektive vysokým, poměrem C/O. Na určitých vlnových délkách jsou zobrazeny předpokládané odchylky pozorování v případě využití přístroje <i>NIRSpec</i> na <i>JWST</i> modelované pomocí nástroje Pandexo.	47

12 Seznam tabulek

1	Tabulka parametrů využitých při fitování RM jevu pro exoplanety HD 149026 b, TOI-560 c a QATAR-7 b.	37
2	Tabulka parametrů využitých pro fitování RM jevu pro exoplanety WASP-85 A b a WASP-173 A b.	37
3	Výsledné hodnoty λ pro jednotlivé exoplanety.	38
4	Fitováním zpřesněné parametry exoplanetárních systémů HD 149026, TOI-560 a QATAR-7.	39
5	Fitováním zpřesněné parametry exoplanetárních systémů WASP-85 A, WASP-85 A pozorovaného spektrografem <i>ESPRESSO</i> a WASP-173A.	39