Dinamička masa ekstrasolarnih planeta

Oskoruš, Luka

Master's thesis / Diplomski rad

2017

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:217:186834

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
FIZIČKI ODSJEK

Luka Oskoruš

DINAMIČKA MASA EKSTRASOLARNIH PLANETA

Diplomski rad

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
FIZIČKI ODSJEK

SMJER: PROFESOR FIZIKE

Luka Oskoruš

Diplomski rad

Dinamička masa ekstrasolarnih planeta

Voditelj diplomskog rada: prof.dr.sc. Krešimir Pavlovski

Ocjena diplomskog rada: _____

Povjerenstvo: 1. _____

2. _____

3. _____

Datum polaganja: _____

Zagreb, 2017.

Zahvaljujem se svom mentoru, prof.dr.sc. Krešimiru Pavlovskom, na strpljenju, vremenu, stručnoj i moralnoj podršci tokom pisanja diplomskog rada. Hvala na mnogobrojnim konzultacijama i savjetima.

Zahvaljujem se svim profesorima na Fizičkom odsjeku, svi ste ostavili duboki trag u mom životu.

Najviše se zahvaljujem svojim roditeljima. Hvala Vam na beskonačnom strpljenju, razumijevanju i ljubavi. Hvala mom braci što je uvijek tu za mene.

Hvala svim prijateljima što su mi uljepšali dane studiranja, hvala na svim sretnim trenucima koje smo dijelili zajedno.

Hvala ti Helena što si tu i što vjeruješ u mene.

Sažetak

Proučavanje ekstrasolarnih planeta posljednjih desetak godina napreduje velikom brzinom, te zauzima veliki dio astrofizičkih istraživanja. Od devedesetih godina prošlog stoljeća do danas otkriveno je preko 3000 ekstrasolarnih planeta, te njihov broj vrtoglavo raste. Kako je ovo područje astrofizike relativno mlado, oskudno je informacijama i tekstovima na hrvatskom jeziku, te su u tu svrhu u ovom diplomskom radu opisani osnovni pojmovi i činjenice vezane uz ekstrasolarne planete i metode detekcije ekstrasolarnih planeta. Središnji problem kod detekcije ekstrasolarnih planeta je određivanje mase koja se dosada određivala samo iz dinamike matične zvijezde kao funkcija mase, ali ne i kao omjer masa između zvijezde i planeta. U diplomskom radu su napravljeni simulacijski proračuni koji nam daju uvid u mogućnost direktnog određivanja mase ekstrasolarnih planeta. Prag detekcije je određen iz simuliranih teorijskih spektara sustava zvijezda-planet, a njihovo raspetljavanje je napravljeno metodikom koja se koristi kod istraživanja dvojnih zvijezda. Dobiveni rezultati daju nam uvid u opažačke uvjete novog 39.3m reflektorskog teleskopa, E-ELT.

Dynamic mass of extrasolar planets

Abstract

The study of extrasolar planets progressed rapidly in the past decade, making a large part of astrophysical research. More than 3000 extrasolar planets were discovered from the 1990s until today and their number is still growing. Given the fact that this area of astrophysics is relatively young, there is still not enough needed information and literature available in the Croatian language. This thesis therefore describes the basic concepts and facts related to extrasolar planets and the methods of its detection. The main problem concerning the process of detection of extrasolar planets is defining the mass, which was until recently defined only by observing the dynamics of the parent star as a function of mass, but not as the ratio between the mass of the star and the planet. This thesis contains simulation calculations, which enable us insights into the possibility of the direct definition of the mass of extrasolar planets. The detection threshold is determined by simulated theoretical spectra of the star-planet systems, and the method used in the research of binary stars is used in their unraveling. The results give us an insight into the observational requirements of the new 39.3M reflector telescope, E-ELT.

Sadržaj

1 Uvod **1**

2 Ekstrasolarni planeti **4**
2.1 Otkrića ekstrasolarnih planeta 4
2.2 Uređaji za otkrivanje ekstrasolarnih planeta 5
2.3 Definicija 7
2.4 Povijest otkrića 8
2.5 Nomenklatura 13

3 Atmosfere **18**

4 Metode detekcije ekstrasolarnih planeta **21**
4.1 Metoda radijalnih brzina 22
4.2 Metoda tranzita 25
4.3 Vremenske promjene 27
4.4 Gravitacijska mikroleća 29
4.5 Izravno snimanje 32
4.6 Astrometrija 34

5 Određivanje dinamičke mase ekstrasolarnih planeta **35**

6 Raspetljavanje kompozitnih spektara **44**

7 Numerička simulacija spektroskopske detekcije ekstrasolarnih planeta **48**

8 The European Extremely Large Telescope (E-ELT) **61**

9 Metodički dio **65**
9.1 Ciljevi učenja 65
9.2 Obrazovni ishodi 65
9.3 Odgojni ishodi 66
9.4 Nastavni sat - Određivanje radijalne brzine zvijezda pomoću spektara . 66

10 Zaključak **76**

Dodaci **78**

A Matematički alati **78**

1 Uvod

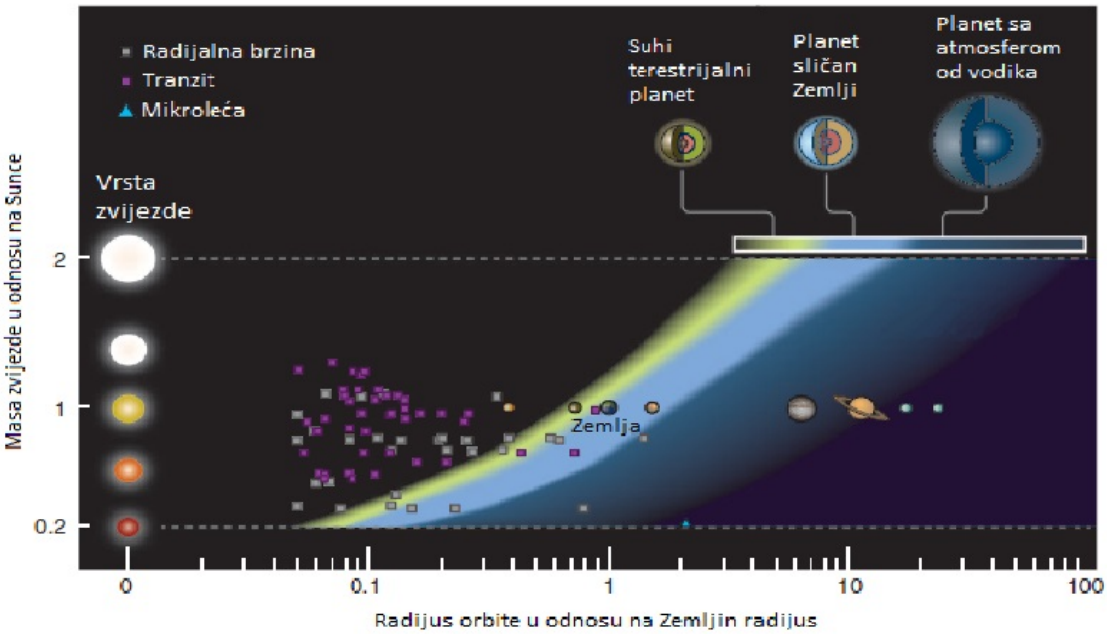
Pogled u zvjezdano nebo tokom ljetnih i vedrih noći s milijardama zvijezda, te s pokojim meteorom za vrijeme Perzeida, ostavlja svakoga bez daha. Sva ta dubina i prostranost nebeskog svoda potencira pitanja je li Sunčev sustav jedini planetarni sustav u svemiru i je li Zemlja jedini planet na kojemu je moguć život. Iako u svemiru postoje milijarde galaksija s milijardama zvijezda trebalo je proći nekoliko tisuća godina da bi čovjek otkrio prvi planet izvan Sunčeva sustava. Neki od planeta u Sunčevom sustavu otkriveni su relativno kasno. Uran je otkriven tek 1781. godine, a Neptun 1846. godine. Stoga ne čudi da je prvi ekstrasolarni planet otkriven početkom 90-tih godina prošlog stoljeća. Prije toga postojanje ekstrasolarnih planeta razmatralo se na filozofskoj razini s razmišljanjem da među tolikim zvijezdama sličnim našem Suncu mora sigurno postojati još planetarnih sustava sličnih našem Sunčevom sustavu.

Kada se bolje sagleda zašto je trebalo toliko dugo da se otkriju prvi ekstrasolarni planeti lako možemo doći do zaključka zašto je to tako. Planeti u Sunčevom sustavu su hladna tijela, te nisu izvor svjetlosti. Ako bi netko iz nekog drugog planetarnog sustava promatrao naš Sunčev sustav ne bi mogao vidjeti planete već bi vidio samo Sunce. Termonuklearnim reakcijama sa Sunca se oslobađa energija u obliku elektromagnetskih valova koji se mogu detektirati na jako velikim udaljenostima. Planeti u Sunčevom sustavu kao što su Mars, Venera, Jupiter, Merkur i Saturn zbog svoje blizine Suncu i veličine vidljivi su sa Zemljine površine golim okom. Svjetlost sa Sunca reflektira se od atmosfere tih planeta i dolazi do naših očiju. No međutim, ta reflektirana svjetlost je puno slabijeg intenziteta od Sunčeve svjetlosti i čini planete nevidljivima na velikim udaljenostima. Omjer intenziteta svjetlosti zvijezda/planet jako je velik, a kako se istraživanja vrše sa Zemljine površine na signal utječe i atmosfera. Zbog toga omjer intenziteta još više raste i otežava istraživanje planeta čiji je signal jako slab.

Bilo je potrebno da se dostupna tehnologija usavrši kako bi se slabi signali ekstrasolarnih planeta mogli detektirati. Zbog zahtjevnosti proučavanja razvijeno je niz metoda detekcije koji omogučavaju da se na velikim udaljenostima mogu uočiti ekstrasolarni planeti. U ovom diplomskom radu je stoga dan kratak pregled svih aktualnih metoda detekcije ekstrasolarnih planeta, te je sa većom pozornošću obrađena metoda detekcije pomoću radijalnih brzina.

Znanstvenici Mayor i Queloz otkrili su prvi ekstrasolarni planet koji se giba oko zvijezde i to oko zvijezde 51 Pegasi. Wolszczan i Frail otkrili su nešto ranije ekstrasolarne planete oko pulsara PSR B1257+12. Ti se planeti ne gibaju oko zvijezde već oko pulsara, te se postavlja pitanje kako su ti planeti preživjeli eksploziju supernove. Kada je otkriveno da postoji još planetarnih sustava osim Sunčevog sustava, logično je za očekivati da je sva pažnja usredotočena na potragu za planetima sličnim Zemlji, tj. za planetima pogodnima za život. Planeti pogodni za život moraju se nala-

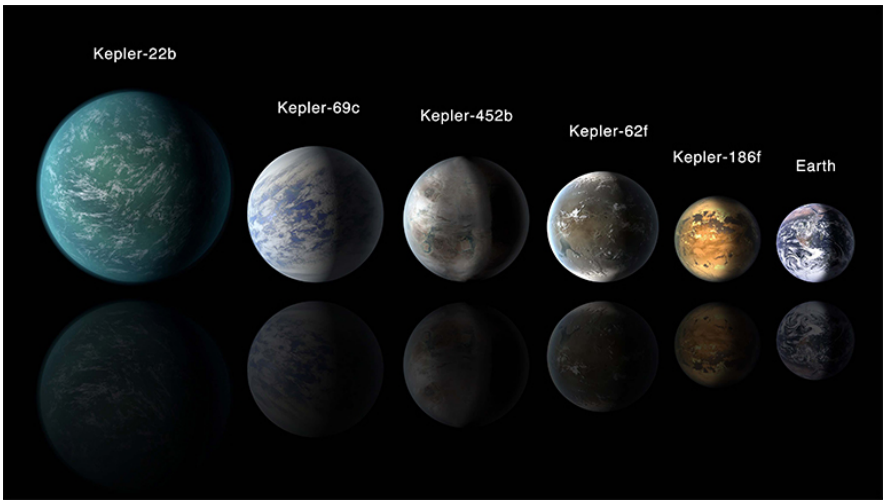
ziti u nastanjivoj zoni oko svoje zvijezde. Nastanjiva zona (eng. habitability zone) je područje oko zvijezde gdje planet ima adekvatnu temperaturu površine za postojanje vode u tekućem obliku. To znači da se planet ne nalazi preblizu zvijezdi kako voda ne bi isparila, ali ne i predaleko od zvijezde kako se voda ne bi smrznula [1]. Postojanje vode ne ovisi samo o udaljenosti planeta od zvijezde već o niz drugih faktora kao što su veličina zvijezde, vrsta zvijezde, starost zvijezde itd. Osim zvijezde oko koje se planet giba, na nastanjivost ima veliki utjecaj i atmosfera planeta. Tako recimo pustinjski planeti s vrlo rijetkom atmosferom s malo vodene pare imaju slabiji efekt staklenika, a to znači da bi se takav planet mogao nalaziti bliže Suncu nego Zemlja i još bi uvijek postojali uvjeti za postojanje vode.



Slika 1.1: Područje nastanjive zone [1].

Područje nastanjive zone u ovisnosti o masi zvijezde i polumjeru orbite prikazano je na slici 1.1. Područje nastanjive zone očigledno je različito za različite tipove planeta. Zelenom bojom je označeno područje nastanjive zone za pustinjske planete, svjetlo plavom bojom za planete slične Zemlji, a tamno plavom bojom je označeno područje nastanjive zone za planete s atmosferom pretežito sastavljene od vodika. Na slici se nalaze i položaji nekih otkrivenih ekstrasolarnih planeta pomoću različitih metoda detekcije, te se može vidjeti da dobar dio tih planeta ulazi u područje nastanjive zone.

Prvi otkriveni ekstrasolarni planet približne veličine kao Zemlja koji se nalazi u nastanjivoj zoni oko zvijezde slične Suncu je Kepler-452b. Otkriven je 2015. godine pomoću metode tranzita [2]. Osim njega postoji još otkrivenih planeta koji svojim fizikalnim i orbitalnim parametrima ukazuju da se nalaze u nastanjivim zonama. Neki od njih prikazani su na slici 1.2. Među njima je i Kepler-186f koji je za oko 10% većeg polumjera od Zemljinog, no međutim zvijezda oko koje se giba nije istog



Slika 1.2: Prikaz i odnos veličina u odnosu na Zemlju nekih ekstrasolarnih planeta koji se nalaze u nastanjivoj zoni [2].

spektralnog tipa kao Sunce [3].

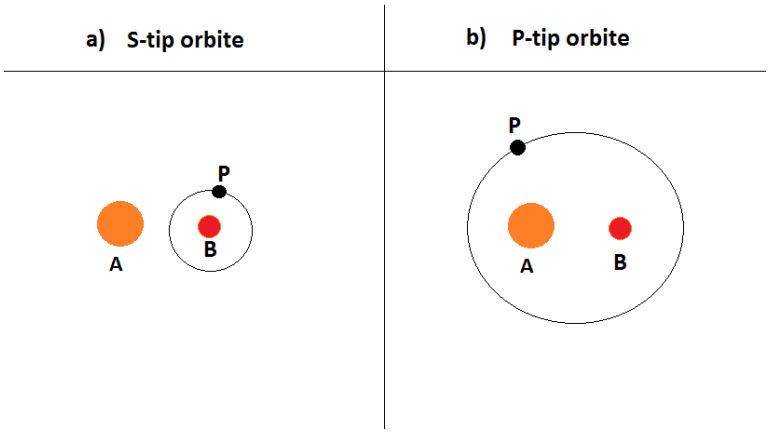
Potraga za novim planetima pa i mogućom novom Zemljom čini istraživanja ekstrasolarnih planeta posebno zanimljivim. Istraživanjem ekstrasolarnih planeta možemo bolje i kvalitetnije spoznati kako su nastali planeti u Sunčevom sustavu, te kako se formirao Sunčev sustav. Možemo bolje zaključivati i o samoj Zemlji, na temelju drugih planeta predviđati promjene koje će možda jednog dana zadesiti Zemlju. Svemir je jako dinamičan, te se u njemu dešavaju razne promjene i možemo reći da se stalno nešto događa, od eksplozija supernova, do formiranja novih planeta i zvijezda. Da bi bolje shvatili sve te promjene potrebno je razvijati tehnologiju i usavršavati metode detekcije ekstrasolarnih planeta. Upravo je to cilj diplomskog rada, pokazati i predvidjeti može li se novim postupcima i tehnološkim napretkom kao što je novi teleskop E-ELT (The European Extremely Large Telescope) direktno odrediti dinamička masa ekstrasolarnih planeta.

2 Ekstrasolarni planeti

2.1 Otkrića ekstrasolarnih planeta

Ekstrasolarni planet je planet koji se giba oko zvijezde koja nije Sunce. Prema zadnjim podacima iz veljače 2017. godine otkriveno je 3575 ekstrasolarna planeta u 2685 planetarna sustava. Od toga su 602 višeplanetarna sustava [3]. Višeplanetarni sustav sastoji se od zvijezde oko koje se gibaju najmanje dva planeta. Planetarni sustav se može sastojati samo od jednog planeta koji se giba oko matične zvijezde. U planetarnim i višeplanetarnim sustavima osim planeta i zvijezda nalaze se ostali svemirski objekti kao što su patuljasti planeti, asteroidi, prirodni sateliti, meteoriti, kometi itd. Sunčev sustav je do sada najveći otkriveni višeplanetarni sustav koji se sastoji od zvijezde Sunce i osam planeta (Merkur, Venera, Zemlja, Mars, Jupiter, Saturn, Uran, Neptun). Zvijezde Kepler-90, HD 10180 i HR 8832 imaju višeplanetarne sustave sa sedam planeta. HD 10180 ima još dva nepotvrđena planeta u svojoj orbiti, te ako se oni potvrde to će onda biti najveći višeplanetarni sustav. Zvijezda Gliese 876 sa svoja četiri ekstrasolarna planeta za sada čini najbliži višeplanetarni sustav Sunčevom sustavu, udaljen je 15 svjetlosnih godina [3].

Kada govorimo o planetima i planetarnim sustavima odmah se prvo misli da su to sustavi u kojima se u središtu nalazi jedna zvijezda, te se zatim planeti po kružnim ili eliptičnim putanjama gibaju oko jedne zvijezde. Takav je slučaj u Sunčevom sustavu. No međutim u svemiru postoje milijarde zvijezda i mnoge od njih imaju pratioce. Zbog gravitacijskog privlačenja mogu nastati dvojni sustavi zvijezda ili dvojne zvijezde gdje se dvije zvijezde nalaze jako blizu jedna drugoj. Otprilike oko pola zvijezda u galaksiji čine dvojne zvijezde. Ekstrasolarni planeti pronađeni su u takvim sustavima. Ovisno o tome kakvo je gravitacijsko privlačenje među zvijezdama i kakav je međusobni razmak možemo imati dvije vrste orbita po kojima se planet giba u dvojnom sustavu zvijezda. Ako se planet giba samo oko jedne zvijezde u dvojnom sustavu zvijezda tada je to S-tip orbite (slika 2.1a), a ako se planet giba oko obje zvijezde jer su zvijezde preblizu tada je to poseban slučaj, P-tip orbite (slika 2.1b) [4]. Prvo otkriće planeta koji se giba prema P-tipu orbite je ekstrasolarni planet Kepler-16b koji se giba oko dvojne zvijezde Kepler-16, višeplanetarni sustav sastavljen od tri planeta koji se giba oko dvojne zvijezde Kepler 47, prvi je otkriveni višeplanetarni sustav koji se giba oko dvojne zvijezde prema P-tipu orbite [5].Da se recimo Sunce nalazi u dvojnom sustavu zvijezda i ako bi se Zemlja gibala po P-tipu orbite to znači da bi s površine vidjeli dva Sunca tj. dvije zvijezde. Osim dvojnog sustava postoje još sustavi s tri i više zvijezda, te se planeti mogu naći i u takvim sustavima. Primjer takvog trojnog sustava je GJ 667 u kojem se oko zvijezde GJ 667 C gibaju dva planeta [3]. Slučaj da se planet giba oko tri ili više zvijezda još nije pronađen. Prema svemu ovome možemo zaključiti da nas svemir stalno iznenađuje svojom raznovrsnošću raznih sustava i pojava, te da ima beskonačno prostora za istraživanje



Slika 2.1: S-tip i P-tip orbite ekstrasolarnih planeta u dvojnom sustavu zvijezda. Slovima A i B označene su zvijezde, a slovom P, planet.

i znanstveni rad.

2.2 *Uređaji za otkrivanje ekstrasolarnih planeta*

Uređaj pomoću kojeg je do sada otkriven najveći broj ekstrasolarnih planeta je zasigurno svemirski teleskop Kepler. Pomoću njega je do sada otkriveno i potvrđeno 2331 ekstrasolarni planet, te je pronađeno još 4696 planeta kandidata (6. veljače 2017.) [6]. Svemirski teleskop Kepler lansiran je 7. ožujka 2009. godine, te mu je primarna namjena otkrivanje ekstrasolarnih planeta u nastanjivim zonama oko zvijezda sličnim našem Suncu. Nakon nešto više od četiri godine rada, 2013. godine došlo je do kvara svemirske letjelice u kojoj je smješten teleskop, pokvarila su se dva od četiri žiroskopa koji su služili za stabilizaciju letjelice. Nakon ovog kvara završio je istraživački program Kepler, te je čak dovedeno u pitanje i daljnje istraživanje. No međutim nakon par mjeseci predstavljen je program K2 koji bi omogućavao daljnju upotrebu ovog teleskopa [7] [8].

NASA je 10. svibnja 2016. potvrdila 1284 nova ekstrasolarna planeta pronađena pomoću svemirskog teleskopa Kepler [9]. To je najveći broj potvrđenih ekstrasolarnih planeta u jednom danu tj. to je gotovo polovica svih do sada potvrđenih ekstrasolarnih planeta. Radi se o objavljenim podacima koji su se prikupljali duže vrijeme i čekalo se da se objave svi podaci istovremeno. No iako je ovaj broj rezultat dugogodišnjeg istraživanja jasno je da istraživanje ekstrasolarnih planeta zauzima bitnu poziciju u astronomskim istraživanjima. Za pretpostaviti je da će u budućnosti pronalazak ekstrasolarnih planeta biti i veći jer ako znamo da u Mliječnom putu postoji oko 200 milijardi zvijezda, a prema dosadašnjim podacima u prosjeku je pronađen jedan planet po zvijezdi za očekivati je da samo u galaksiji Mliječni put postoji barem 200 milijardi planeta.

Veliki broj ekstrasolarnih planeta otkriven je pomoću spektrografa HARPS (High Accuracy Radial Velocity Planet Searcher). Spektrograf je postavljen 2003.

godine na ESO (European Southern Observatory) 3.6 m teleskop na La Sili u Čileu (slika 2.2). HARPS je jedan od najpreciznijih spektrografa koji omogućuje snimanje spektara visoke rezolucije. Za dobivanje visokokvalitetnih i preciznih spektara HARPS koristi tehniku simultanih izvora. Kroz dva optička vlakna istovremeno dolaze snimljeni spektar promatrane zvijezde i kalibracijski spektar sa plinske lampe u kojoj se nalazi torij. HARPS je mehanički stabiliziran te se nalazi u vakuumskoj cijevi gdje promjene tlaka ne prelaze 0.01 mbar. To je izričito bitno jer promjena u tlaku od 1 mbar može uzrokovati pogrešku u određivanju brzine od 100 m/s. To je značajno više od amplitude promjene brzine zvijezde u sustavu zvijezda-planet. Na ovaj način maksimalna pogreška iznosi svega 1 m/s. Osim tlaka kontrolira se i temperatura koja se drži stalnom na 17 °C, a fluktuacija temperature je oko 0.01 °C. To sve omogućuje određivanje radijalnih brzina promatrane zvijezde, te otkrivanje ekstrasolarnih planeta [10] [11].

Slika 2.2: Gornja lijeva slika prikazuje zvjezdarnicu u kojoj je smješten ESO 3.6m teleskop, sam teleskop je prikazan na gornjoj slici desno. Donja slika prikazuje HARPS spektrograf prije nego što je zatvoren u vakuumsku komoru [10].

2.3 Definicija

Riječ planet potječe još iz antičke grčke prema riječi $\alpha\sigma\tau\eta\rho\ \pi\lambda\alpha\nu\eta\tau\eta\varsigma$ ili astēr planētēs što znači "zvijezde lutalice", te se odnosio na tijela na noćnom nebu koja su se kretala u odnosu jedna na drugu za razliku od fiksnih zvijezda koja su imale stalnu poziciju na nebu.

Kada danas govorimo o definiciji planeta potrebno je napomenuti da još uvijek ne postoji univerzalna definicija. Službena definicija planeta prema Rezoluciji B5 koju je donesla IAU (International Astronomical Union) odnosi se samo na planete unutar Sunčeva sustava [12]. Prema toj definiciji planeti i druga tijela u Sunčevom sustavu podjeljena su u tri kategorije:

1. Planet je nebesko tijelo koje:
   (a) se nalazi u orbiti oko Sunca
   (b) ima dovoljnu masu kako bi njegova sila teža svladala kohezijsku silu čvrstog tijela i zadržala ga u hidrostatskoj ravnoteži u gotovo sferičnom obliku
   (c) udaljilo je od sebe svako tijelo koje bi se moglo kretati po orbiti.
2. Patuljasti planet je nebesko tijelo koje:
   (a) se nalazi u orbiti oko Sunca
   (b) ima dovoljnu masu kako bi njegova sila teža svladala kohezijsku silu čvrstog tijela i zadržala ga u hidrostatskoj ravnoteži u gotovo sferičnom obliku.
   (c) nije udaljilo od sebe svako tijelo koje bi se moglo kretati po obližnjoj orbiti
   (d) nije satelit
3. Druga tijela koja se kreću oko Sunca, osim satelita, zovu se mala tijela Sunčeva sustava.

Prema Rezoluciji B6 koja je donesena na općoj Skupštini IAU, 24. kolovoza 2006. godine u Pragu, Pluton više nije bio klasificiran kao planet već kao patuljasti planet [13]. Uzrok tomu je bilo otkriće Erisa koji je kao trans-neptunski objekt imao veću masu od Plutona. Trans-neptunski objekti su svi patuljasti planeti u Sunčevu sustavu koji imaju veću udaljenost od Neptuna, a to je 30 AU.

Za ekstrasolarne planete vrijedi definicija iz 2003. godine koju je osmislila radna skupina za ekstrasolarne planete(Working Group on Extrasolar Planets-WGESP) u IAU [14]. Prema toj definiciji ekstrasolarni planeti su:

1. Objekti koji imaju masu ispod granične mase potrebne za termonuklearnu fuziju deuterija(cca 13 masa Jupitera) i koji kruže oko zvijezde ili oko zvjezdanih ostataka nazivaju se planeti (bez obzira kako su formirani). Minimalna masa koja je potrebna da bi se neki ekstrasolarni objekt proglasio planetom ista je kao i za planete u Sunčevom sustavu.

2. Subzvjezdani objekti s masom iznad granične mase za termonuklearnu fuziju deuterija nazivaju se smeđi patuljci, bez obzira kako su formirani i gdje su locirani.

3. Slobodno putujući objekti u mladim zvjezdanim jatima s masama ispod granične mase za termonuklearnu fuziju deuterija nisu planeti, nego su subsmeđi patuljci.

Termonuklearna fuzija deuterija je fuzijska reakcija koja se događa u drugoj fazi proton-proton lančane reakcije u kojoj se jezgra deuterija spaja sa protonom i stvara jezgru helija-3. Fuzija deuterija se uzima kao glavni argument za razdiobu između planeta i smeđih patuljaka jer smeđi patuljci imaju dovoljno veliku masu za fuziju deuterija, ali ne i dovoljno veliku za fuziju helija, ta granična masa iznosi između 13 i 80 masa Jupitera.

Ako pogledamo glavne kataloge ekstrasolarnih planeta, tada možemo vidjeti da svaki katalog uzima neku svoju graničnu vrijednost mase. Tako naprimjer The Extrasolar Planets Encyclopaedia [3] uzima za granicu 25 masa Jupitera, The Exoplanet Data Explorer [15] uzima u obzir 24 mase Jupitera, dok The NASA Exoplanet Archive [16] uzima u obzir 30 masa Jupitera. To samo dokazuje činjenicu koliko je ovo područje novo u istraživanju jer još nije dobiven koncenzus oko definicije planeta. Problem svakako leži i u tome što se do sada teško mogla odrediti masa ekstrasolarnih planeta, već samo mase izvedene iz kalibracija zvijezde. Razvojem tehnologije i postavljanjem novih većih i preciznijih teleskopa dinamička masa planeta će se sigurno moći odrediti. Granica mase za definiciju ekstrasolarnih planeta će se odrediti usavršavanjem modela.

2.4 Povijest otkrića

Čovjekova okupacija svemirom seže daleko u prošlost. Prve nalaze o ljudskoj spoznaji svemira nalazimo čak u vremenu paleolitika gdje su pronađene slike zviježđa u spiljama. Arheološka otkrića potvrđuju da su drevne civilizacije promatrale zvijezdano nebo i na temelju toga mjerili vrijeme i radili kalendare. Antički filozofi su također bili opčinjeni svemirom, te su promatranjem svemira udarili temelje svoje filozofije. Vrhunac antičke astronomije je Ptolemejeva sinteza astronomskog znanja u okviru geocentričnog sustava. Tek se sredinom 15. stoljeća u Europi javljaja ponovno zanimanje za astronomiju. Nikola Kopernik iz temelja će promijeniti sliku svijeta. U djelu " De revolutionibus orbium coelestium" (O obrtanju nebeskih tijela), objavljeno 1543. godine, Kopernik će izgraditi heliocentrični sustav sa Suncem, a ne Zemljom, u središtu. U drugoj polovici 16. stoljeća danski astronom Tycho Brahe svojim je uređajima sustavno opažao položaje planeta, što će Johannu Kepleru omogućiti izradu tri zakona nebeske mehanike.

Veliku prekretnicu u promatranju zvjezdanog neba napravio je Galileo Galilei

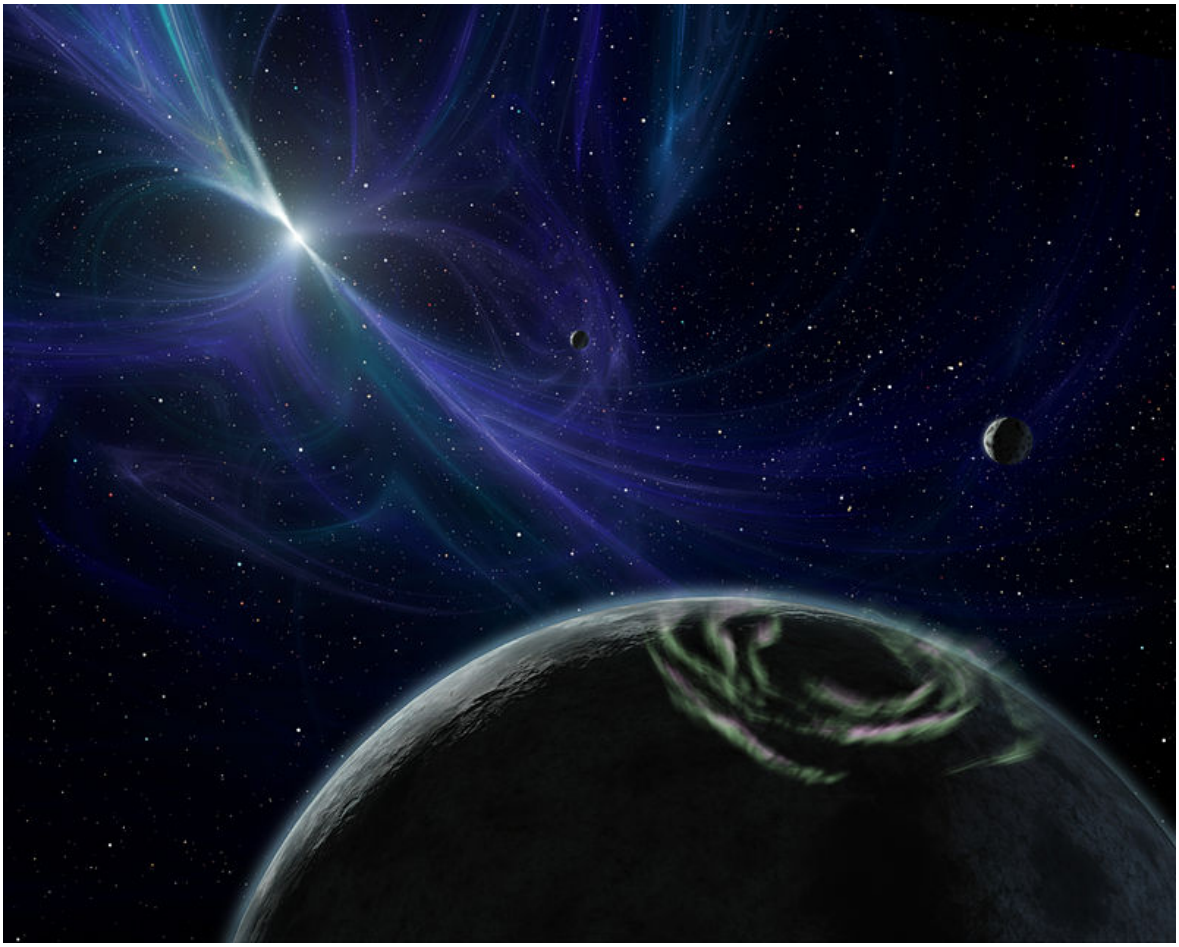
koji je u astronomska istraživanja uveo teleskop. Od Galilea slijedi veliko teleskopsko razdoblje astronomije u kojem su poznati astronomi ostavili svoj trag kao što su Huygens, Romer, Halley, Bradley i mnogi drugi. Želja za istraživanjem svemira gurala je znanstvenike u otkrivanju novih fizikalnih pojava, te time i stvaranju novih tehnologija koje su osim u astronomiji pomogli u razvoju cijelokupnog čovječanstva. Shvaćanje svemira kakvo je postojalo do tada je svakako prekinuo Edwin Hubble koji je između 1923. i 1924. s Mt Wilsona ustanovio da u Andromedinoj maglici postoje promjenjive zvijezde, cefeide. Cefeide imaju fundamentalno svojstvo da je njihov luminozitet povezan s periodom svjetlosnih promjena. Ta je veza omogućila Hubbleu određivanje udaljenosti do Andromedine maglice. Hubble je zaključio da Andromeda nije maglica nego da je galaksija i time otvorio put novim istraživanjima svemira. [17] [18]

Sumnja da postoje planeti van Sunčevog sustava oduvijek je postojala, samo nisu postojali alati kojim bi ih se moglo otkriti i istražiti. 1952. godine Otto Struve prvi je predložio da ne postoji uvjerljiv razlog zašto se planeti ne bi nalazili puno bliže svojoj matičnoj zvijezdi, te je predložio da se pomoću Dopplerove spektroskopije i tranzitne metode mogu detektirati planeti puno veći od Jupitera na jako malim orbitama [19]. Svoju pretpostavku je temeljio na tome da veliki planeti poput Jupitera, ali i veći moraju utjecati na matičnu zvijezdu tako da uzrokuju krivudanje oko svoje putanje zbog toga što se zvijezda i planet gibaju oko zajedničkog centra mase. No tehnologija u to vrijeme nije mogla razlučiti tako fine rezultate, pa je tako pogreška u mjernju radijalne brzine iznosila 1000 m/s, to je činilo podatke neupotrebljivima za detekciju orbitalnih planeta. Očekivane promjene u radijalnim brzinama su jako male. Jupiter utječe na promjenu radijalne brzine Sunca oko 12 m/s u periodu od 12 godina, a Zemlja utječe oko 0.1 m/s u periodu od 1 godine. Očito je bilo da su potrebni instrumenti s jako velikom rezolucijom i preciznošću.

Bilo je potrebno 40 godina da se pomoću ovog prijedloga tj. Dopplerove metode počnu pronalaziti prvi ekstrasolarni planeti. Prvi koji su koristili ovu metodu u otkrivanju ekstrasolarnih planeta bili su Bruce Campbell, Gordon A.H. Walker i Stephenson Yang sa Svučilišta Victoria i Sveučilišta British Columbia [20]. Oni su 1988. otkrili naznaku ekstrasolarnog planeta oko zvijezde γ Cephei. Njihovo nesigurno otkriće potvrđeno je tek 2003. godine (Hatzes sa suradnicima) [21]. Godinu dana kasnije, 1989. godine, David Latham sa suradnicima je detektirao Dopplerov pomak oko HD 114762 s orbitalnim periodom od 84 dana i masom $M_P \sin(i) = 11\ \mathrm{M_J}$ [20]. Kako nisu poznavali kolika je orbitalna inklinacija, očekivali su da bi masa mogla biti i puno veća, te su interpretirali svoje rezultate kao da se radi o smeđem patuljku. Puno kasnije, 2012. godine, potvrđeno je da se ipak radi o ekstrasolarnom planetu. To su bila prva dva otkrića ekstrasolarnih planeta koja su nažalost svoju potvrdu dočekala dosta kasnije od svojih otkrića.

Dana 9. siječnja 1992. godine, radioastronomi Aleksander Wolszczan i Dale Frail pomoću anomalija u periodičnosti pulsara otkrili su dva planeta oko pulsara

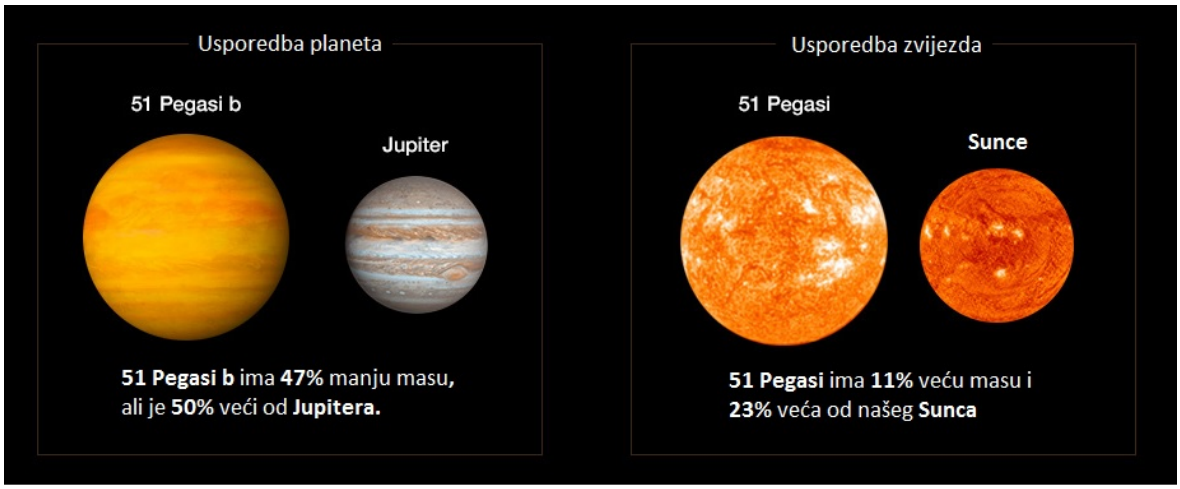
PSR B1257+12 (Slika 2.3) [22]. Ovo je prvo potvrđeno otkriće i smatra se prvim otkrićem ekstrasolarnih planeta. Iznenađenje ovog otkrića bila je činjenica da su planeti otkriveni oko ostataka zvijezde. Štoviše, otkriveni su planeti pretrpjeli eksploziju supernove jer u takvom procesu nastaju pulsari. Prije ovog otkrića smatralo se da planeti mogu orbitirati samo oko zvijezda koje se nalaze u glavnom nizu. Ovo otkriće je promijenilo poimanje planeta, ali i planetarnih sustava. 2015. godine IAU je javnom raspravom odobrila da se ova tri planeta nazovu: Draugr (PSR B1257+12 b), Poltergeist (PSR B1257+12 c) i Phobetor (PSR B1257+12 d), a sam pulsar nazvan je imenom Lich [23]. Do 2015. godine Poltergeist bio planet s najmanjom otkrivenom masom, nešto manjom od dvije mase Mjeseca. Za ove planete se smatra da su kameni ostaci jezgre plinovitih divova uništenih supernovom koja je stvorila ovaj pulsar.



Slika 2.3: Slika prikazuje umjetničku percepciju kako izgleda planetarni sustav oko pulsara PSR B1257+12. Planet koji se nalazi najbliže na slici je Phobetor [24].

6.listopada 1995. godine Michael Mayor i Didier Queloz sa Sveučilišta u Ženevi otkrili su pomoću Dopplerove metode ekstrasolarni planet 51 Pegasi b [25]. Planet su otkrili iz Dopplerovog pomaka spektralnih linija matične zvijezde 51 Pegasi, koristeći spektrograf ELODIE na Observatoire de Haute-Provence u južnoj Francuskoj. 51 Pegasi je zvijezda G-tipa koja je jako slična našem Suncu (slika 2.4), te se nalazi u zviježđu Pegaz. Ustvrdili su da se radi o planetu slične mase Jupiteru s pe-

riodom od 4.23 dana. To je mnogo bliže nego što se Merkur nalazi našem Suncu. Merkur za primjer ima period od 87.969 dana. Znanstvenici prije ovog otkrića nisu smatrali da se tako veliki planeti kao što je Jupiter mogu nalaziti tako blizu matičnoj zvijezdi, te se ovaj pronalazak nije slagao sa teorijama o nastanku planeta. Ovim otkrićem su se još dalje pomaknule granice u dosadašnjim spoznajama o planetima. Od ostalih fizikalnih parametara bitno je napomenuti da 51 Pegasi b ima jako veliku orbitalnu brzinu od 136 km/s, te je temperatura na površini prbližno 1300 K. Zbog velike brzine i mase ovaj ekstrasolarni planet rotira oko svoje osi, ali je rotacija sinhronizirana sa obilaženjem oko matične zvijezde te je jednim dijelom svoje površine uvijek okrenut prema zvijezdi 51 Pegasi, takva pojava naziva se sinhrona rotacija. 51 Pegasi b je za sada jedini otkriveni planet u ovom planetarnom sustavu [3]. Zbog svoje blizine i mase slične Jupiteru ovakvi planeti se nazivaju još i "Vrući Jupiteri". Osim imena 51 Pegasi b ovaj planet su nazivali i Bellerophon prema mitskom junaku koji je jahao Pegaza. No 2015. godine IAU je putem javne rasprave ovaj planet nazvala Dimidium što je latinska riječ za "pola", prema tome što je masa ovog planeta upola manja od mase Jupitera [23]. Ekstrasolarni planet 51 Pegasi b prvi je potvrđeni planet koji je otkriven pomoću Dopplerove metode, te je prvi znanstveno potvrđeni planet koji kruži oko matične zvijezde, te se smatra prvim otkrićem pravog ekstrasolarnog planeta. Ovo otkriće se može smatrati početkom ozbiljnog istraživanja ekstrasolarnih planeta, te početak nove grane astrofizike koja se isključivo bavi proučavanjem ekstrasolarnih planeta, ekstrasolarne planetarne astronomije.

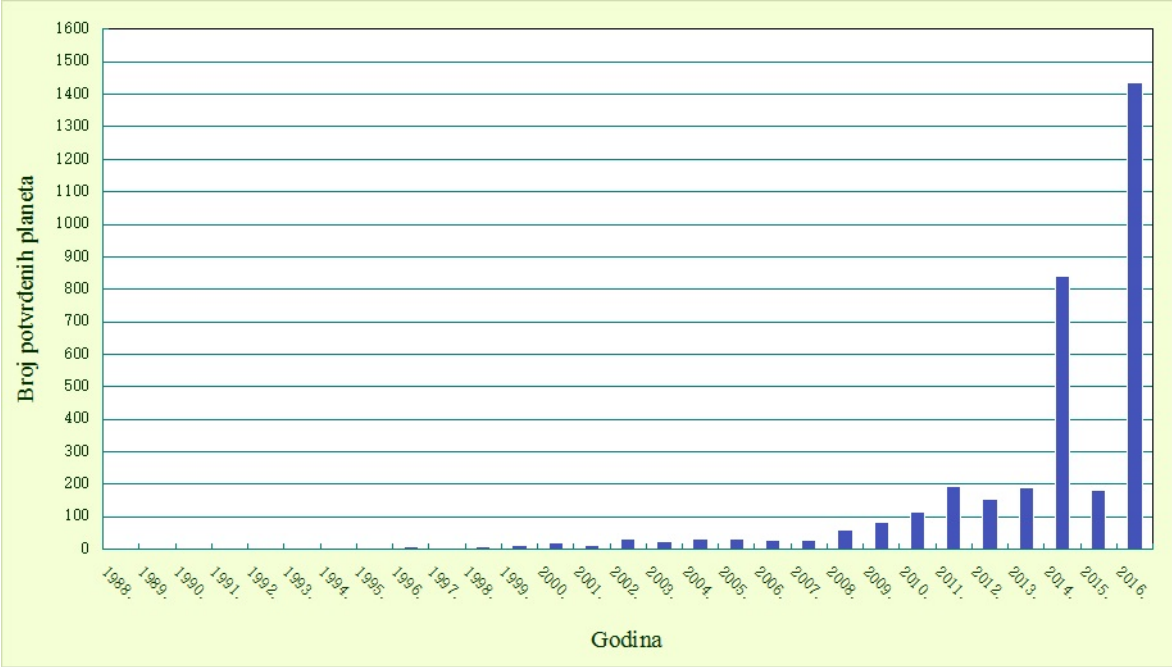


Slika 2.4: Usporedba Jupitera i ekstrasolarnog planeta 51 Pegasi b i usporedba njihovih matičnih zvijezda. [26].

Nakon što su 90-tih godina prošlog stoljeća, otkriveni i potvrđeni prvi ekstrasolarni planeti zanimanje za ovaj dio astrofizike eksponencijalno je počeo rasti. Usprkos tomu što je istraživanje ekstrasolarnih planeta tehnološki zahtjevno do kraja 20-tog stoljeća otkriveno je čak 50-tak ekstrasolarnih planeta. Želja za otkrivanjem novih planeta gurala je razvoj tehnologije, te su se početkom ovog stoljeća počeli razvijati kvalitetniji spektrografi pomoću kojih se mogu dobiti kvalitetni spektri za

Godina	Broj otkrića	Godina	Broj otkrića	Godina	Broj otkrića
1988.	1	1998.	8	2008.	61
1989.	1	1999.	11	2009.	84
1990.	0	2000.	21	2010.	116
1991.	0	2001.	13	2011.	195
1992.	3	2002.	31	2012.	155
1993.	0	2003.	26	2013.	189
1994.	0	2004.	31	2014.	841
1995.	1	2005.	33	2015.	181
1996.	7	2006.	30	2016.	1467
1997.	0	2007.	58	2017.	10

Tablica 2.1: Broj otkrića (potvrđeni ekstrasolarni planeti) ekstrasolarnih planeta po godinama.[1]



Slika 2.5: Grafički prikaz broja potvrđenih planeta kroz godine.[1]

otkrivanje ekstrasolarnih planeta pomoću Dopplerove metode. To je moguće vidjet u tablici 2.1 i na slici 2.5 gdje nakon 2002. godine broj potvrđenih planeta raste, nakon što je počeo sa radom HARPS.

Potom idući skok koji je vidljiv na slici je nakon 2009. godine kada je sa radom započela svemirska letjelica Kepler koja je prvenstveno bila namjenjena detekciji ekstrasolarnih planeta tranzitnom metodom. Tokom ove misije je otkriven

[1]Podaci su preuzeti iz kataloga exoplanet.eu [3]. Podaci se stalno ažuriraju. Podaci za 2017. godinu se odnose na broj potvrđenih planeta do 6.2.2017. godine.

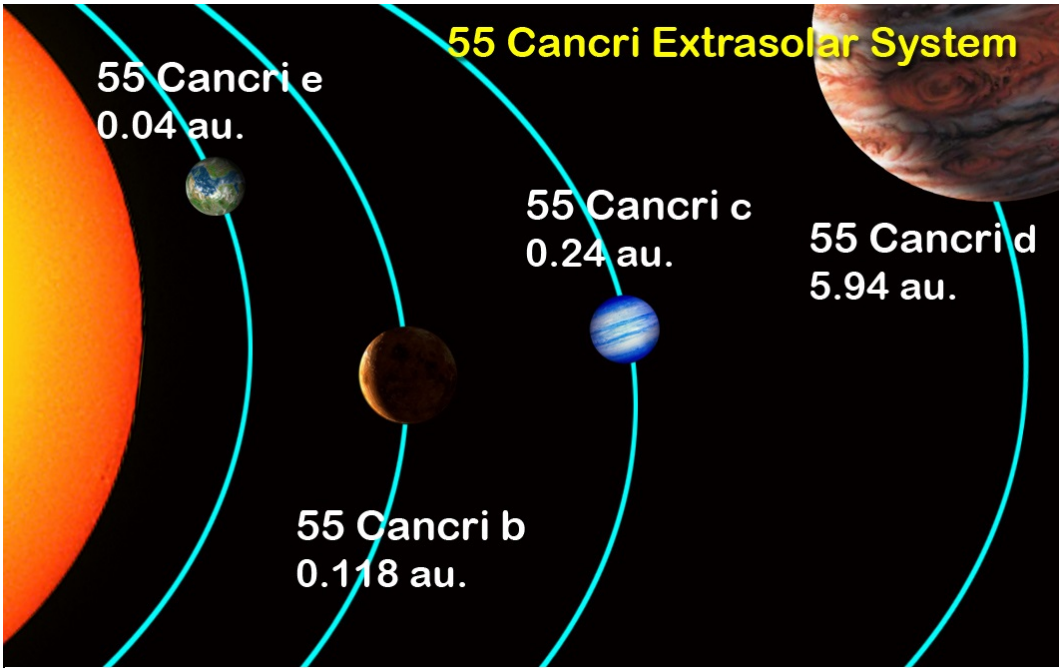
znatan broj ekstrasolarnih planeta, te je tako samo 2016. godine potvrđeno preko 1400 planeta [16]. Bitno je napomenuti da se u tablici i grafu nalaze podaci sa samo potvrđenim planetima, te se tako tablica stalno nadopunjuje. Ponekad je potrebno proći više godina da bi se potvrdili pojedini ekstrasolarni planeti. Tako se recimo i dan danas proučavaju neki nepotvrđeni ekstrasolarni planeti iz 2000-tih godina, kako bi se potvrdilo njihovo postojanje.

2.5 Nomenklatura

Nazivlje ili nomenklatura svemirskih objekata iznimno je važna za snalaženje u velikom broju objekata koji se nalaze u svemiru. Broj objekata koje promatramo u svemiru je iznimno velik, ali osim toga što ih ima puno bitno je razlikovati pojedine objekte međusobno. Potrebno je razlikovati zvijezde od planeta, asteroida, kometa, itd. Na samom početku promatranja svemira imena su se davala prema božanstvima, životinjama, stvarima i bićima koje su ljudi poznavali. Razvojem astronomije i astrofizike broj novootkrivenih zvijezda i ostalih objekata je naglo porastao i više se nije mogla korisiti nomenklatura kao prije. Očito se moralo uz neki naziv početi koristiti kombinacija različitih znakova, brojeva i slova. Tako za višestruke zvjezdane sustave najsjajnija zvijezda u sustavu uz ime sustava dobiva nastavak A. Kako se udaljavamo ostale komponente u sustavu dobivaju redom nastavke B,C, itd. Zvijezde u sustavu koje u svom nazivu imaju u nastavku samo veliko slovo nazivamo glavnim komponentama sustava. No međutim ako u nekom sustavu uz glavnu komponentu kruži neka manja zvijezda tj. podkomponenta tada ona uz veliko slovo dobiva i malo slovo. Podkomponenta je druga hijerarhijska razina. Kako se spuštamo po razinama tako će se dodavati novi znakovi. Za treću hijerarhijsku razinu objekt u zvjezdanom sustavu dobiti će uz veliko i malo slovo i brojku. Naprimjer, neka postoji zvjezdani sustav koji se sastoji od dvije zvijezde koje se gibaju blizu jedna drugoj (dvojna zvijezda), te od treće zvijezde koja je udaljenija. Prema nomenklaturi za zvjezdane sustave, zvijezde koje čine unutrašnju dvojnu zvijezdu dobiti će nastavke Aa i Ab uz naziv zvjezdanog sustava, dok će treća udaljenija zvijezda dobiti nastavak B uz ime zvjezdanog sustava.

Ovakav način nomenklature za višestruke zvjezdane sustave uveo je Washington Multiplicity Catalog (WMC) [27], a od njih je IAU preuzela sličan način nomenklature i za ekstrasolarne planete [28]. Ime ekstrasolarnih planeta se uobičajeno sastoji od imena matične zvijezde, te se tom imenu doda malo slovo abecede. Prvi planet koji se otkrije u sustavu dobiva oznaku "b" uz ime matične zvijezde. Kasnije otkriveni planeti dobivaju redom sljedeća mala slova prema abecednom redu. U slučaju da se nekoliko planeta otkrije u isto vrijeme u istom sustavu, tada najbliži planet zvijezdi dobiva sljedeće malo slovo abecede, zatim ostali planeti prema udaljenosti od matične zvijezde tj. prema veličini orbite. Naprimjer, takav se slučaj dogodio kod zvijezde 55 Cancri. 55 Cancri je dvojna zvijezda u zviježđu Raka, koja se sastoji od zvijezde G-tipa, 55 Cancri A i zvijezde crvenog patuljka, 55 Cancri B. Prvi planet u

ovom sustavu otkriven je 1996. godine i nazvan je 55 Cancri b. Dodatna dva planeta otkrivena su u isto vrijeme 2002. godine, planet koji je bio najbliže zvijezdi dobio je ime 55 Cancri c, a drugi planet je dobio ime 55 Cancri d. Četvrti planet u ovom sustavu je otkriven 2004. godine i dobio je ime 55 Cancri e iako se nalazi bliže zvijezdi nego 55 Cancri b. Posljednji otkriveni planet u ovom sustavu, 55 Cacnri f, nalazi se između 55 Cancri c i 55 Cancri d (slika 2.6) [3] [16]. Prema ovome vidimo da ne

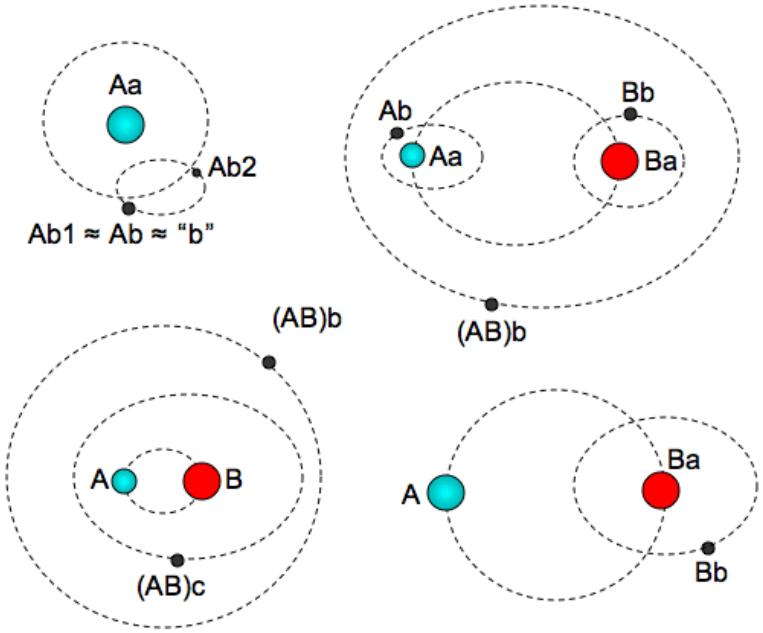


Slika 2.6: Slikovni prikaz planetarnog sustava oko zvijezde 55 Cancri [29].

možemo uvijek samo prema imenu zaključiti koji je planet u sustavu udaljeniji od matične zvijezde. Zadnje slovo abecede koje je bilo potrebno upotrijebiti do sada u nazivima ekstrasolarnih planeta je slovo "j" i to za nepotvrđene planete, dok se za potvrđene planete kotisti abeceda samo do slova "h" [16].

No kao u svemu, tako i u nazivlju ekstrasolarnih planeta postoje iznimke. Ako se planet nalazi u dvojnom planetarnom sustavu koji se sastoji od dvije zvijezde tada se u imenu ekstrasolarnog planeta koristi i veliko slovo abecede koje označava zvijezdu u dvojnom sustavu i malo slovo abecede koje označava planet koji kruži oko zvijezde u dvojnom sustavu. Ekstrasolarni planet 16 Cygni Bb u svom imenu sadržava ime za zvijezdu oko koje se giba, a to je 16 Cygni B. Planeti koji kruže oko primarne zvijezde trebali bi imati nastavak A, no međutim taj se nastavak ponekad izbacuje kao što je slučaj kod ekstrasolarnog planeta τ Boötis b i kao kod dvojne zvijezde 55 Cancri čiji je primjer gore naveden. Svih pet otkrivenih planeta u sustavu 55 Cancri kruže oko zvijezde 55 Cancri A i kada planeti kruže oko glavne komponente onda se nastavak A može ispustiti, da se nalazi planet oko zvijezde 55 Cancri B, tada bi se morao koristiti i nastavak za zvijezdu, pa bi prvi planet imao naziv 55 Cancri Bb. Svakako je potrebno napomenuti da ako se radi o dvojnom zvijezdanom sustavu u kojem obje zvijezde imaju svoj planetarni sustav, potrebno je u imenima planeta na-

pomenuti kojoj zvijezdi pripadaju. Svi mogući slučajevi koji se mogu zateći prikazani su na slici 2.7, te je navedena nomenklatura kako bi se pojedini ekstrasolarni planeti u tim slučajevima nazvali.



Slika 2.7: Primjeri različitih sufiksa za ekstrasolarne planete. Na gornjoj lijevoj slici: ekstrasolarni planet oko jedne zvijezde (npr. 51 Pegasi) plus ako planet ima mjesec. Gore desno: dvojna zvijezda, oko svake kruži planet (npr. HD 41004) plus planet koji kruži oko obje zvijezde. Dolje lijevo: dva planeta koji kruže oko dvojne zvijezde (npr. NN Ser). Dolje desno: planet koji kruži oko druge zvijezde u dvojnom sustavu zvijezda (npr. HD 178911). [30]

Osim posebne nomenklature za dvojne sustave, vidimo da nomenklatura ekstrasolarnih planeta nije naročito zahtjevna ako se poznaje matična zvijezda oko koje kruže ekstrasolarni planeti. Također možemo vidjeti da je dobra nomenklatura jako važna jer iz samog naziva planeta možemo zaključiti oko koje zvijezde planet kruži. Treba biti i oprezan jer samo slovo u nazivu planeta ne može nam reći koji je planet udaljeniji od svoje matične zvijezde u pojedinom planetarnom sustavu.

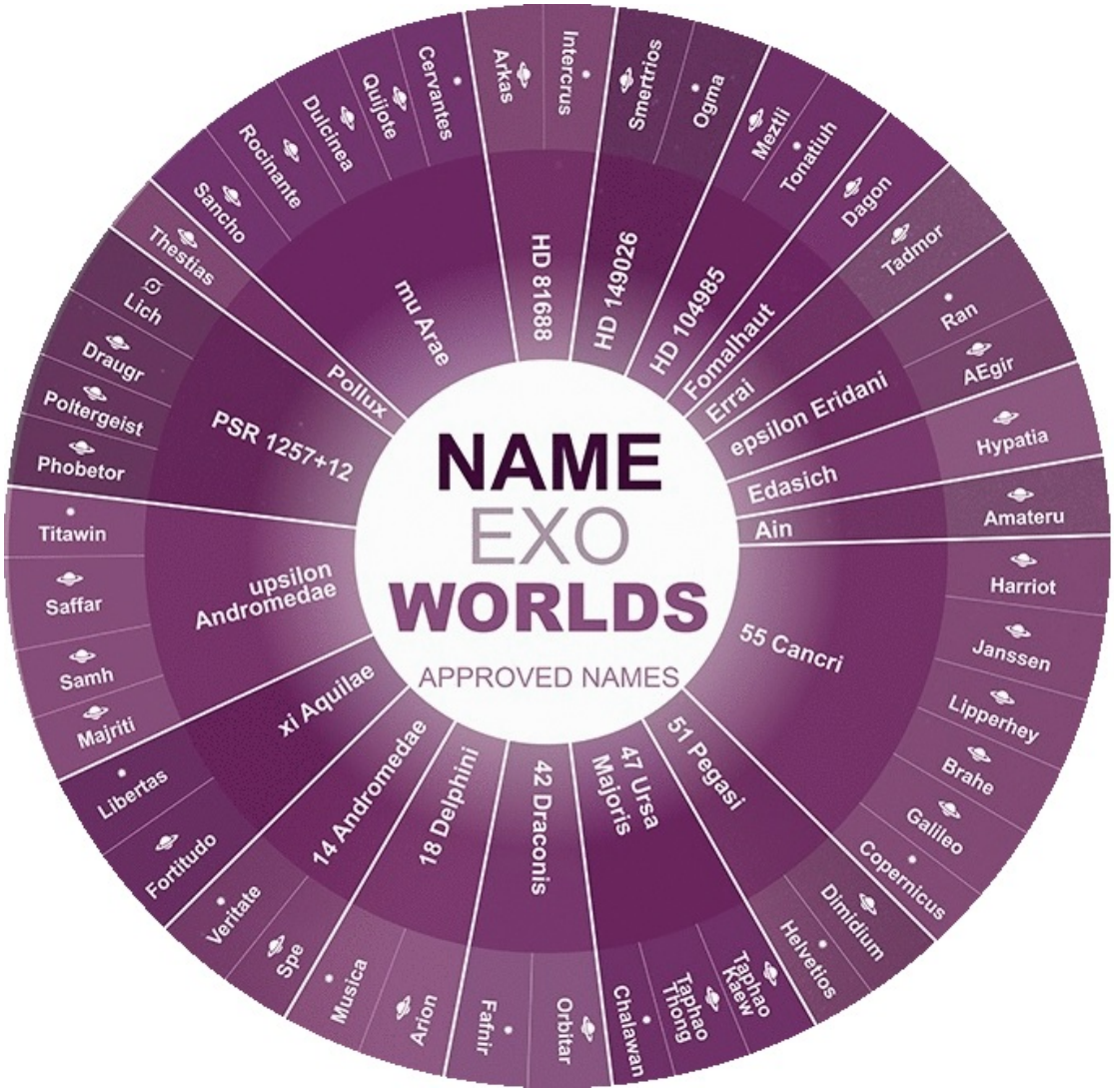
Zbog velike popularnosti ekstrasolarnih planeta IAU je organizirao javnu debatu oko imenovanja ekstrasolarnih planeta. Na taj način je svatko mogao dati svoj prijedlog kako bi glasilo ime nekog ekstrasolarnog planeta. Prilikom imenovanja trebalo se paziti na niz pravila i prema tome ime planeta mora:

- imati najviše 16 znakova
- sastojati se od jedne riječi
- biti lako izgovorljivo
- ne smije biti uvredljivo

- ne smije biti preslično već postojećim imenima za astronomske objekte.

Također, ne smije se predložiti:

- imena kućnih ljubimaca
- imena komercijalne prirode
- imena osoba, mjesta i događaja povezana sa političkim, vojnim i religijskim sadržajima
- imena živih pojedinca
- istog imena kao i matična zvijezda.



Slika 2.8: Imena ekstrasolarnih planeta izabrana putem javne rasprave 2015. godine. [31]

Prilikom procesa mora se dokazati da su ta imena slobodna za javnu upotrebu (npr. ne podliježu autorskim pravima kao što može biti slučaj za imena nastalim u djelima

znanstvene fantastike, kao što su knjige, filmovi, itd.) 2015. godine IAU je objavila prva imena za 14 zvijezda i 31 ekstrasolarni planet putem javne rasprave (slika 2.8). U javnoj raspravi su sudjelovali pojedinci, znanstvenici iz cijeloga svijeta [31].

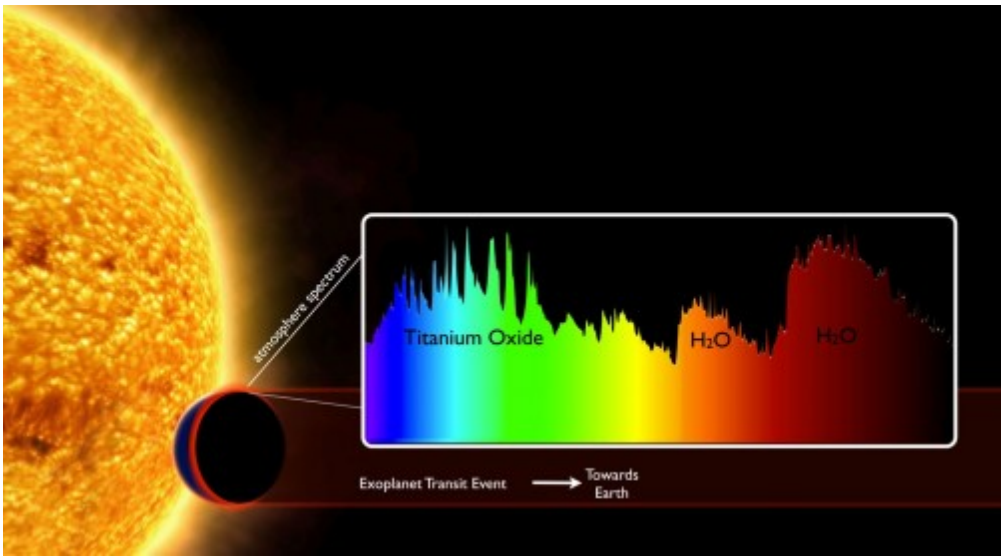
3 Atmosfere

Kada govorimo o planetima prvo pomislimo na krutu stjenovitu tvorevinu okruglog oblika koji se giba oko matične zvijezde. No planet osim što ima krutu strukturu, tj. površinu, on može biti obavijen plinovitim omotačem, atmosferom. Neki planeti nemaju atmosferu, jedan od takvih planeta je Merkur. Proučavajući nastanjivost ekstrasolarnih planeta znanstvenici se primarno oslanjaju na proučavanje atmosfera jer bez atmosfere s odgovarajućim plinovima ne možemo zamisliti postojanje živih organizama u obliku kakvom trenutno poznajemo. Za proučavanje atmosfera planeta sličnih Zemlji biti će potreban daljnji tehnološki razvoj. Trenutno se najviše promatraju atmosfere vrućih planeta kao što su "Vrući Jupiteri" [32]. Oni su najpogodniji za promatranje jer zbog svoje velike temperature omogućuju detekciju spektra. Iz transmisijskog spektra mogu se odrediti atomi i molekule prisutne u planetovoj atmosferi. Spektar koji se snimi i obradi putem spektrografa je od atmosfere planeta, a ne od površine ekstrasolarnih planeta. Svijetlost koja dolazi od zvijezde reflektira se na atmosferi planeta, te sa sobom nosi potpis svih elemenata koji se nalaze u atmosferi tog planeta.

Naznake za postojanje planetarnih atmosfera su se uočile prilikom tranzita planeta ispred Sunca. Neki od prvih uspjeha u analizi atmosfera su identifikacija metana u atmosferi plinovitih divova, ugljikov dioksid u atmosferi kamenih planeta i postojanje atmosfere na Saturnovom satelitu Titanu. Atmosfera ekstrasolarnog planeta po prvi je put otkrivena na planetu HD209458 b. U transmisijskom spektru otkriveno je prisustvo natrija [33]. Upravo je natrij najtraženiji element u atmosferama zato što ima vrlo jake spektralne linije (natrijev dublet D_1 i D_2).

Glavne metode prilikom kojih se može uočiti postojanje atmosfera su za sada izravno snimanje i metoda tranzita. Metoda izravnog snimanja pogodna je za planete koji reflektiraju dovoljno svjetlosti, koji su jako udaljeni od matične zvijezde, te su jako veliki i mladi po nastanku. Takvih slučajeva je jako malo, ali i trenutna tehnologija ne može snimiti adekvatno kvalitetne snimke za pomniju analizu takvih planeta. Druga metoda je metoda tranzita. Prilikom tranzita planeta ispred matične zvijezde dolazi do pomrčine. Postoji primarna i sekundarna pomrčina. Primarna pomrčina je kada planet prolazi ispred zvijezde. Tada kroz planetovu atmosferu prolazi svjetlost sa zvijezde i reflektira se. Spektar koji mi opažamo ima spektralne linije elemenata koji se nalaze u atmosferi planeta. Kod sekundarne pomrčine planet zalazi iza zvijezde, totalni tok svjetlosti opada jer planet više ne utječe na tok svjetlosti. Tada možemo oduzimanjem ukupnog toka od toka svjetlosti sa zvijezde izlučiti samo tok svjetlosti od planeta. Iz njega se može odrediti kompozicija atmosfere planeta i gradijent temperature na planetu [34].

Sastav unutrašnjosti planeta uvelike ovisi o sastavu atmosfere. Planeti prema svom sastavu mogu se podijeliti na tri vrste, a to su stjenoviti, plinoviti i ledeni planeti. Prema tome postoje i različiti tipovi atmosfera. Prema neslužbenoj podijeli



Slika 3.1: Shematski prikaz kako izgleda spektar planeta prilikom tranzita [35].

postoji pet kategorija atmosfera ekstrasolarnih planeta [32]:

1. Atmosfere sa vodikom i helijem kao dominantnim sastavom. Ovakve atmosfere nastaju uhvatom iz protoplanetarnih maglica prilikom formiranja planeta. Masa tih planeta je uobičajeno velika kako bi gravitacijska sila mogla držati tako lagane plinove u atmosferi. Planeti sa takvim atmosferama su plinoviti divovi i ledeni divovi.

2. Atmosfere u kojima prevladava H koji nastaje ispuštanjem s površine planeta. Vodik se kod ovakvih planeta obično u atmosferi zadržava u obliku molekule vodika (H_2). Planeti koji su u mogućnosti zadržati vodik u svojoj atmosferi su u granicama mase od 10 do 30 masa Zemlje, te su hladni. Ovakvi planeti u svojoj atmosferi mogu sadržavati razne spojeve koji uključuju vodik, a to su: H_2, H_2O, CH_4, CO. Planeti s ovim tipom atmosfere ne sadržavaju helij, jer helij nije nastao prilikom nastanka ovakvih planeta.

3. Atmosfere s većinskim udjelom ugljikovog dioksida (CO_2) koji je također došao u atmosferu ispuštanjem s površine planeta. Ovisi o unutrašnjem sastavu planeta, te se ovakva atmosfera nalazi kod planeta koje su izgubile helij i vodik iz atmosfere. Zemlja nema ovakvu atmosferu jer se ugljikov dioksid većinom nalazi zarobljen u stijenama. Nasuprot, atmosfere Venere i Marsa pretežno su građene od CO_2.

4. Atmosfere na takozvanim planetima tipa vruće super Zemlje gdje su temperature veće od 1500 K. Kod takvih atmosfera sav vodik je izgubljen, ali i ostali elementi kao što su C, N, O, S su također nestali uslijed visoke temperature i male mase ovakvih planeta. U ovakvim atmosferama se mogu pronaći silikati obogaćeni sa Ca, Al, Ti.

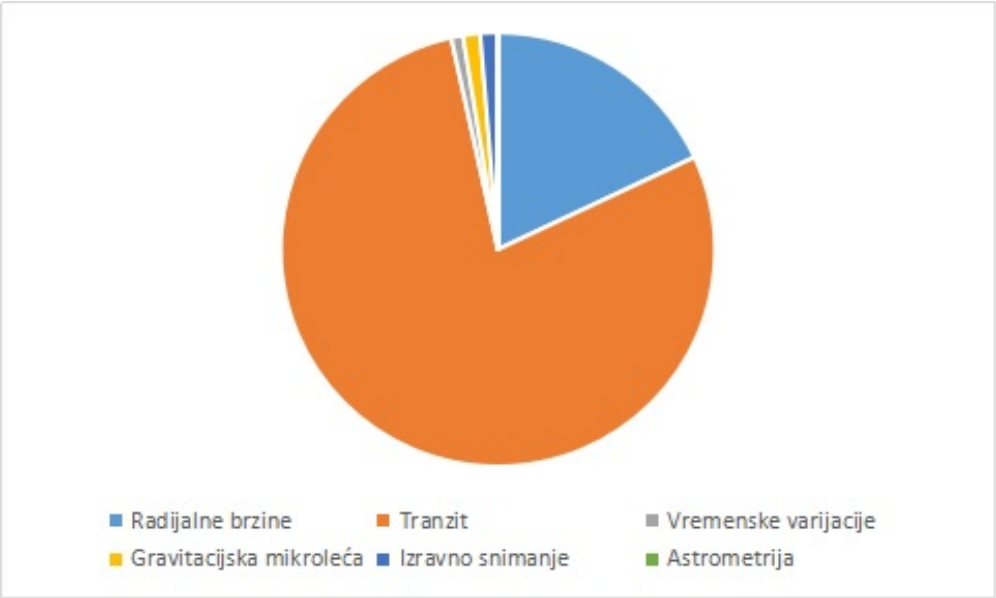
5. Planeti bez atmosfere ili sa zanemarivom atmosferom poput atmosfere na Merkuru.

Ovakva podjela atmosfera još uvijek nije konačno klasificirana, a to ukazuje samo na to koliko je ovo područje zahtjevno za istraživanje. Atmosfere ostalih planeta imaju sličnosti sa atmosferom kakvu imamo na Zemlji. Na ostalim planetima možemo uočiti oblake i različitu vertikalnu strukturu atmosfere baš kao i na Zemlji. Ono u što možemo biti sigurni je to da atmosfere na drugim planetima svakako postoje i ključne su za spektralnu analizu. Boljim razumijevanjem atmosfera drugih planeta i kvalitetnijim prikupljenim spektrima biti ćemo u mogućnosti još bolje razviti neke metode detekcije ekstrasolarnih planeta.

4 Metode detekcije ekstrasolarnih planeta

Otkrićem prvog ekstrasolarnog planeta počele su se razvijati razne metode detekcije ekstrasolarnih planeta. Kao što je već u povijesnom pregledu navedeno, prva metoda koja je služila za otkriće ekstrasolarnih planeta je metoda vremenskih promjena u periodima pulsara. Osim tog izdvojenog slučaja i fenomena, najučinkovitija metoda na počecima istraživanja je bila Dopplerova metoda. Osim tih metoda razvilo se niz drugih metoda kako bi otkrivanje ekstrasolarnih planeta bilo što efikasnije i bolje. Glavne metode detekcije ekstrasolarnih planeta su:

- metoda radijalnih brzina
- metoda tranzita
- vremenske promjene
- gravitacijska mikroleća
- izravno snimanje
- astrometrija.



Slika 4.1: Odnos broja otkrivenih ekstrasolarnih planeta s obzirom na metodu detekcije.[2]

Metoda tranzita i metoda radijalnih brzina su do sada najuspješnije metode detekcije ekstrasolarnih planeta, te je do sada 96% ekstrasolarnih planeta upravo otkriveno pomoću ove dvije metode. To se može vidjeti i na slici 4.1 gdje najveći

[2]Podaci su preuzeti iz kataloga NASA Exoplanet Archive [16]. Podaci se stalno ažuriraju. Podaci za 2017. godinu se odnose na broj potvrđenih planeta do 6.2.2017. godine.

udio zauzima metoda tranzita s više od tri četvrtine otkrivenih ekstrasolarnih planeta. Točan broj otkrivenih ekstrasolarnih planeta prema metodama detekcije nalazi se u tablici 4.1.

Metoda detekcije	Broj otkrivenih ekstrasolarnih planeta
Radijalne brzine	621
Tranzit	2707
Vremenske varijacije	30
Gravitacijska mikroleća	44
Izravno snimanje	44
Astrometrija	1

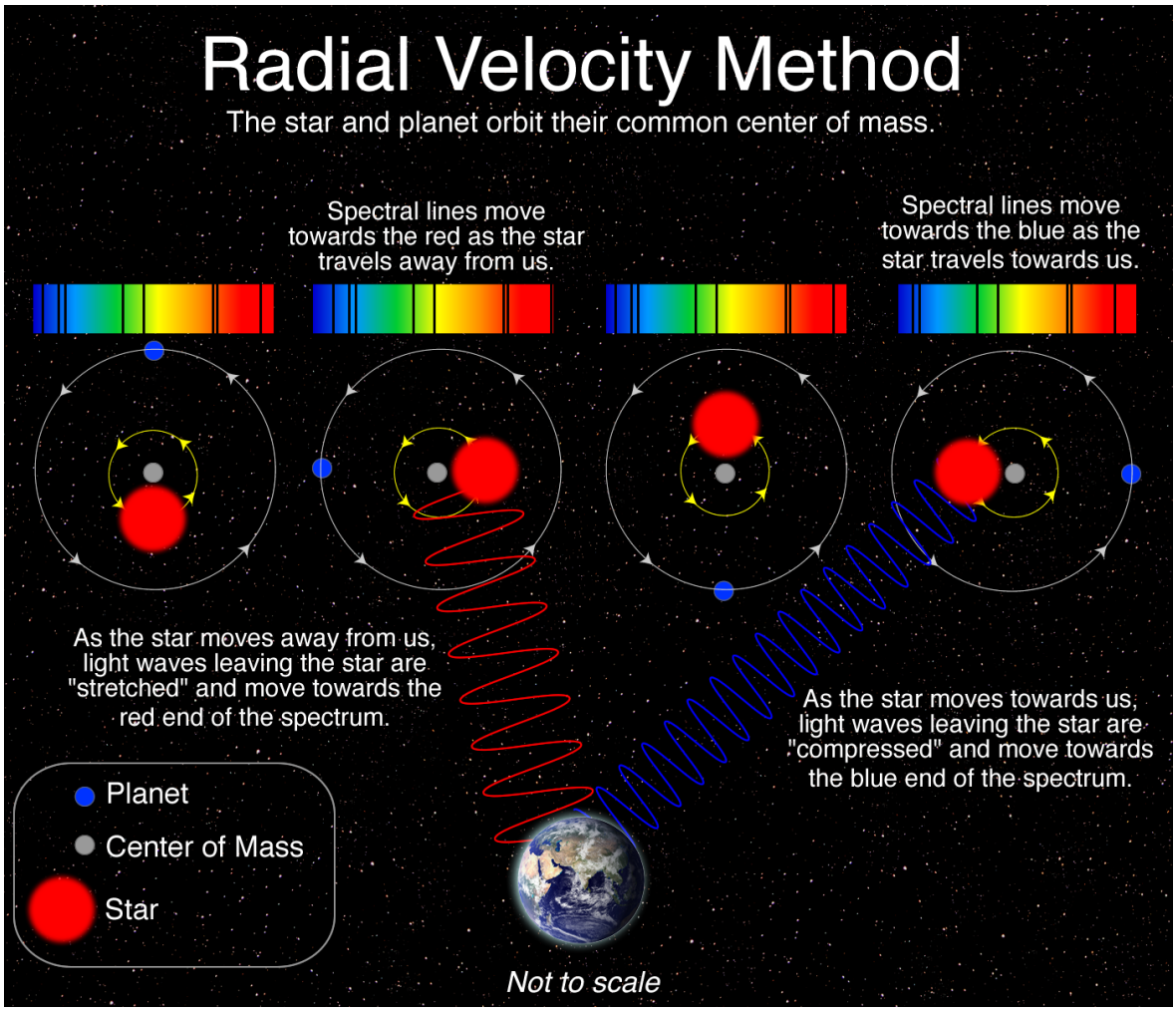
Tablica 4.1: Broj potvrđenih ekstrasolarnih planeta prema metodi detekcije.[2]

Iz tablice se također vidi da je astrometrijskom metodom do sada otkriven samo jedan ekstrasolarni planet, te stoga nije ni vidljiv na grafikonu. Podaci koji se nalazi na grafikonu i u tablici skinuti su sa NASA Exoplanet Archive zato što se podaci mogu izdvojiti i skinuti u obliku excel tablice, te se tako mogu lakše obrađivati. U ovom poglavlju diplomskog rada dat će se kratki opis svih relevantnih metoda detekcije ekstrasolarnih planeta. Valja napomenuti da se pojedine metode mogu podijeliti na još par podvrsta, no one neće biti detaljno obrađene. Svakako će se veći naglasak staviti na Dopplerovu metodu radijalnih brzina koja je i glavni dio ovog diplomskog rada.

4.1 Metoda radijalnih brzina

Sustav zvijezde i planeta kao što je naš Sunčev sustav temelji se na gibanju planeta oko zvijezde. Fizikalno, planeti se ne gibaju oko zvijezde nego oko zajedničkog centra mase. Zvijezda ima veliku masu i centar mase se često nalazi u blizini zvijezde ili čak unutar polumjera zvijezde. Zvijezda se giba po svojoj maloj orbiti zbog utjecaja gravitacije planeta koji se nalaze u tom sustavu. Zbog relativnog gibanja zvijezde u odnosu na opažaća na Zemlji uočavamo pojavu Dopplerovg efekta slično kao i kod zvučnih valova. Kada se zvijezda udaljava od nas to se očituje u povećanju valne duljine, a kada se zvijezda približava nama tada se valna duljina smanjuje. To dovodi i do promjene u radijalnim brzinama ovisno o tome da li se zvijezda udaljava ili približava od opažaća. Pojava se naziva krivudanje (eng. wobbling). Zbog Dopplerovog efekta promjene radijalne brzine zvijezde mogu se uočiti u spektrima zvijezde, tako da su spektralne linije periodično pomaknute ovisno o položaju zvijezde, tzv. Dopplerov pomak [37]. Pomak u spektralnim linijama kada se zvijezda približava planetu nazivamo plavi pomak jer su spektralne linije pomaknute prema plavoj boji u spektru, a kada se zvijezda udaljava od planeta nazivamo crveni

pomak jer su spektralne linije pomaknute prema crvenom dijelu spektra(slika 4.2). Promatranjem ovih pomaka može se zaključiti o gravitacijskom utjecaju planeta na



Slika 4.2: Crveni i plavi pomak u spektru zvijezde zbog utjecaja planeta koji se giba oko nje. Na slici se može vidjeti da su spektralne linije pomaknute prema crvenom dijelu spektra kada se planet udaljava od opažača, a pomaknute prema plavom dijelu spektra kada se približava [38].

zvijezdu, a time i detektirati da li se oko neke zvijezde giba planet. Ova metoda se još naziva i Dopplerova metoda.

Metoda radijalnih brzina mjeri promjene u spektrima zvijezda kako bi potvrdila prisutnost planeta koristeći funkciju mase, a trenutno se promjene u brzini od 1 m/s ili čak i nešto manje mogu otkriti pomoću modernih spektrografa kao što je HARPS [20]. Poluamplituda radijalne brzine zvijezde može se odrediti iz mjerenja, te je dana jednadžbom [20]:

$$K_* = \frac{8.95\ \mathrm{cms}^{-1}}{\sqrt{1-e^2}} \frac{M_{\mathrm{P}\sin i}}{M_\oplus} \left(\frac{M_* + M_{\mathrm{P}}}{M_\odot}\right)^{-2/3} \left(\frac{T}{yr}\right)^{-1/3} \tag{4.1}$$

U jednadžbi (4.1) M_P je masa planeta, M_* masa zvijezde, $M_\odot$ je masa Sunca, e je ekscentricitet orbite, i je inklinacija, a T je period kruženja planeta. Detaljan izvod ove

jednadžbe se nalazi u poglavlju Određivanje dinamičke mase ekstrasolarnih planeta.

Ova metoda se prvenstveno koristi za otkriće planeta velikih masa ili planeta na kratkim udaljenostima od zvijezde. To je tako jer ako pogledamo Newtonov zakon gravitacije možemo vidjeti da gravitacijski utjecaj raste s većom masom i s kvadratom udaljenosti između planeta i zvijezde. Prema tome možemo zaključiti da je ova metoda idealna za planete velike mase koji se nalaze na maloj udaljenosti od zvijezde. Također ova je metoda odlična za otkrivanje planeta koji se gibaju oko zvijezde manje mase zato što ove zvijezde su više pod utjecajem gravitacije planeta, te se ovakve zvijezde iz glavnog niza rotiraju relativno sporo. Otkrivanje planeta oko zvijezda veće mase je lakše ako je ta zvijezda napustila glavni niz jer tada ima manju rotaciju. Ova metoda nije isključivo za planete velike mase ili male orbite, ova metoda se može korisiti i za planete manjih masa, ali na bližim udaljenostima (oko 160 svjetlosnih godina od Zemlje), zato što je signal-šum (eng. SNR) premali na većim udaljenostima i podaci koji bi se dobili ne bi bili upotrebljivi. Sa porastom udaljenosti smanjuje se tok zračenja i šum postaje sve veći, omjer S/N se smanjuje i točnost mjerenja radijalnih brzina opada. Planeti Jupiterove mase mogu se uočiti i na udaljenostima od nekoliko tisuća svjetlosnih godina od Zemlje.

Prednost metode je mogućnost određivanja ekscentriciteta orbite. Međutim, glavni je nedostatak što se masa ekstrasolarnih planeta može procijeniti tek indirektno iz funkcije mase (4.2).

$$f(m_{\mathrm{P}}) = \frac{M_{\mathrm{P}}^3 \sin^3 i}{(M_{\mathrm{P}} + M_*)^2} = \frac{K_*^3 T}{2\pi G}. \tag{4.2}$$

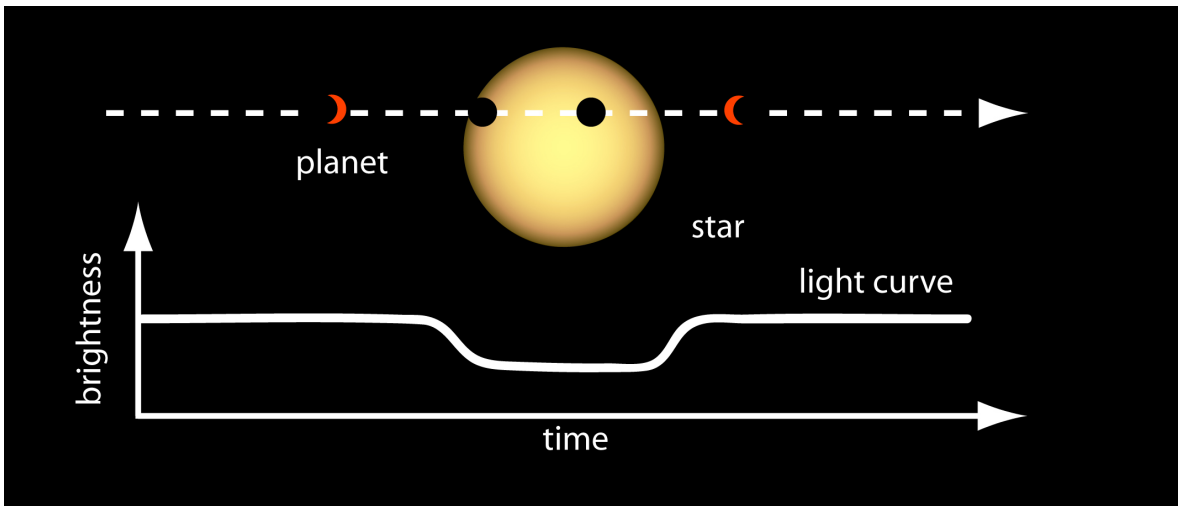
Zbog vrlo malog doprinosa planeta ukupnom toku zračenja, spektar planeta se ne vidi u spektru zvijezde. Masa planeta određuje se kalibracijom mase zvijezde dolaznih spektralnih svojstava. Vidimo da su masa i inklinacija povezane. Kut inklinacije i ne može se odrediti iz samog spektra zvijezde tj. iz radijalne brzine zvijezde. Za to su potrebna komplementarna opažanja npr. tranzit planeta. To do sada nije bilo moguće jer spektar sa planeta je puno slabijeg intenziteta od spektra sa zvijezde. Međutim kada bi mogli razlikovati spektralne linije planeta od spektralnih linija zvijezde tada bi se mogla odrediti radijalna brzina samog planeta.

Problem ove metode je da za detekciju planeta potrebno da promatranja pokriju cijelu orbitu planeta kako bi se izmjerio period gibanja oko zvijezde. Iz tog razloga prvi planeti koji su otkriveni pomoću ove metode imali su jako male periode kruženja. Ponekad je potrebno i više godina, čak i desetljeće, konstantnog praćenja određene zvijezde da se otkrije planet u njezinoj orbiti. Sve do 2011. godine većina ekstrasolarnih planeta otkrivena je upravo pomoću ove metode. Nakon te godine broj otkrića pomoću ove metode opada, a raste broj otkrića pomoću drugih metoda (prvenstveno metode tranzita). Razlog tome nije bila zastarjelost ili neefikasnost ove metode već se pokazalo da se pomoću nje mogu otkriti planeti na puno većim orbitama od matične zvijezde. Takva istraživanja zahtjevaju puno više vremena i to je razlog zašto broj istraživanja ovom metodom opada.

4.2 Metoda tranzita

Metoda tranzita u posljednje vrijeme predstavlja najučinkovitiju metodu detekcije ekstrasolarnih planeta. Više od tri četvrtine ukupno otkrivenih ekstrasolarnih planeta otkriveno upravo pomoću ove metode. Ova metoda se temelji na promjeni ukupnog zračenja sustava zvijezda-planet. [36]. Tranzit je pojava kada planet prolazi točno ispred svoje matične zvijezde, što znači da se nalazi u ravnini ili vrlo blizu nje u kojoj se planet giba oko matične zvijezde (inlinacija je 90°). Tada svjetlost zvijezde koju promatramo opada za mali iznos ovisno o relativnoj veličini planeta i zvijezde. Tok svjetlosti predstavlja broj fotona koji padne na jediničnu površinu u jedinici vremena u jediničnom prostornom kutu. Mjereći promjene toka svjetlosti možemo odrediti takozvanu svjetlosnu krivulju. Orbitalna udaljenost između promatranog planeta i zvijezde ne utječe na dobivene rezultate. Prvi ekstrasolarni planet otkriven ovom metodom bio je HD 209458b, 2000. godine [39]. Od tada do danas broj planeta otkrivenih ovom metodom rapidno raste. Istraživanje se može vršiti teleskopima sa Zemlje. Neki od važnih projekata su Super WASP, KELT, HATNet, MEarth projekt. Osim istraživanja sa Zemlje u svemir su lansirane dvije letjelice Kepler i CoRoT namjenjene otkriću ekstrasolarnih planeta metodom tranzita. CoRoT je Europska svemirska misija koja je započela sa radom 2006. godine, a završila 2013. godine. Za vrijeme svog istraživanja otkriveno je 28 ekstrasolarnih planeta, više stotina je snimljeno i čeka svoju potvrdu. Američka svemirska misija Kepler o kojoj je bilo više riječi u uvodu svakako prednjači po broju otkrivenih ekstrasolarnih planeta jer je njezina i primarna zadaća upravo bila detekcija ekstrasolarnih planeta pomoću tranzitne metode.

Ako planet prolazi izravno ispred zvijezde tok svijetlosti koji dolazi do promatrača privremeno opada i opažač može snimiti taj pad toka pomoću svjetlosne krivulje koja je prikazna na slici 4.3.



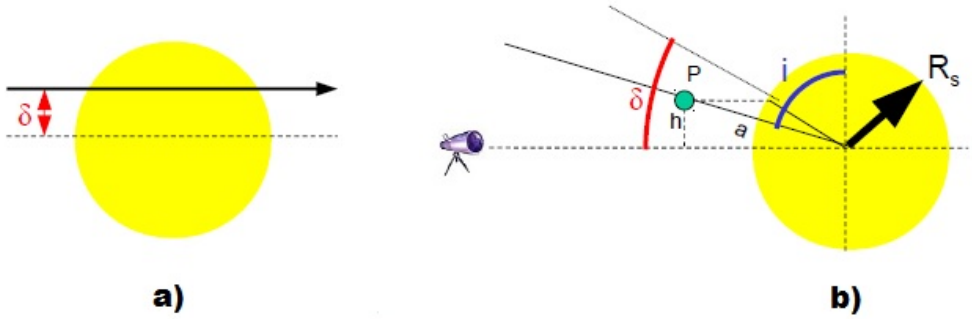
Slika 4.3: Svjetlosna krivulja toka svjetlosti prilikom tranzita planeta [40].

Dubina koja nastaje na svjetlosnoj krivulji zbog tranzita ovisi o polumjerima zvijezde(R_*) i planeta(R_P) i to je upravo promjena toka (ΔF) [36].

$$\Delta F = \left(\frac{R_P}{R_*}\right)^2 \tag{4.3}$$

Ova promjena u toku svjetlosti je jako mala i dosta ju je teško zabilježiti, recimo planet sličan Jupiteru će utjecati samo sa 1% na promjenu toka svjetlosti koja dolazi od zvijezde, dok je to za recimo planete slične Zemlji oko 0.01%.

Ova metoda ima dva glavna ograničenja. Prvi problem je što tranzit planeta jedino moguće promatrati kada je orbita planete savršeno poklopljena s promatračem koji promatra planet (slika 4.4). Vjerojatnost da se planet može uočiti pomoću



Slika 4.4: Ilustracija tranzita. Slika a) prikazuje pogled opažaća izravno prema planetu, tamna linija prikazuje putanju planeta, a δ prikazuje kut pod kojim je planet odmaknut od ravnine rotacije zvijezde. Slika b) prikazuje pogled sa strane i ovisnost položaja planeta i zvijezde. [41]

tranzitne metode je dana pomoću funkcije koja ovisi o planetovoj orbiti, te o radijusu planeta i zvijezde [20].

$$P_{trans} = 0.0045 \left(\frac{AU}{a}\right) \left(\frac{R_* + R_P}{R_\odot}\right) \left[\frac{1 + e\cos(\pi/2 - \omega)}{1 - e^2}\right] \tag{4.4}$$

U jednadžbi 4.2, ω je kut periastrona, a e je ekscentricitet orbite. Vjerojatnost tranzita za planete tipa vrućeg Jupitera s polumjerom većim ili jednakim Jupiteru, te periodom od 3 dana je oko 10%. Ova vjerojatnost se odnosi samo na velike planete i male orbite, omjer se smanjuje za planete s većim orbitama i s manjim polumjerom. Za takozvane planete klase super Zemlje vjerojatnost da će se zateći u stanju tranizita je oko 2.5% , dok je za planete slične Zemlji ta vjerojatnost jako mala i iznosi 0.5%. Za planete koji kruže oko zvijezde slične Suncu na otprilike 1 AJ, vjerojatnost tranzita je 0,47%.

Drugi je problem što je visoka razina pogrešno detektiranih ekstrasolarnih planeta. Za jednoplanetarne sustave razina pogrešno detektiranih planeta raste na 40%. Zbog toga je praksa da se za planete s jednom detekcijom radi provjera pomoću metode radijalnih brzina. Metoda radijalnih brzina također je nužna za provjeru

planeta Jupiterovih veličina ili za veće planete jer takvi objekti obuhvaćaju smeđe patuljke i male zvijezde. Broj pogrešaka je manji kod višeplanetarnih sustava.

Prednosti ove metode su velike. Sustavnim praćenjem velikih područja neba koja sadrži tisuće ili čak stotine tisuća zvijezda, tranzitnom metodom može se pronaći više ekstrasolarnih planeta nego bilo kojom drugom metodom. Najveća prednost ove metode je što se može odrediti veličina planeta, odnosno polumjer planeta iz svjetlosne krivulje.

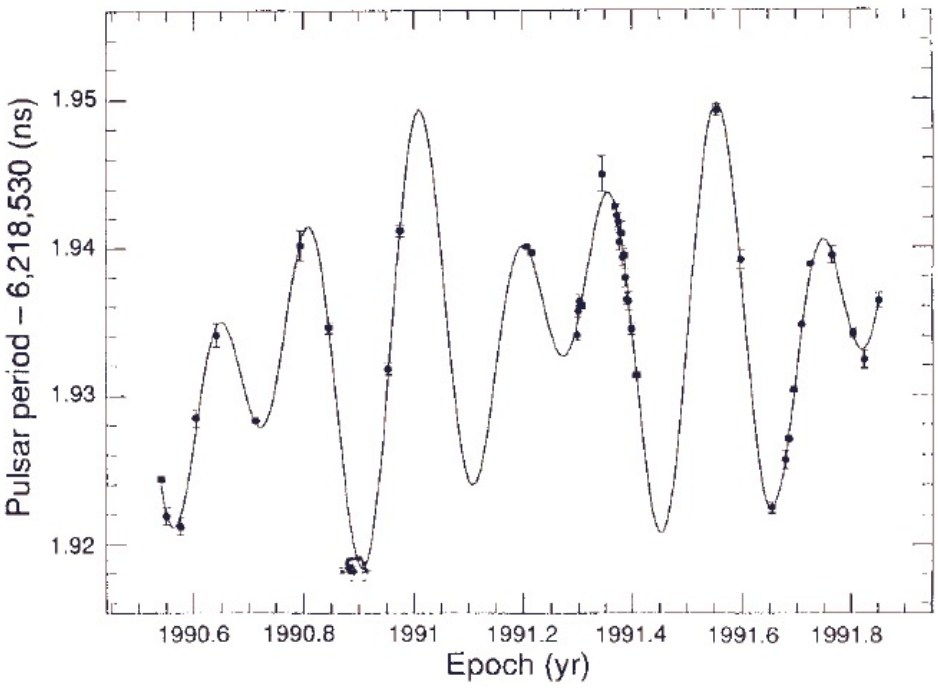
4.3 Vremenske promjene

Metoda detekcije putem vremenskih promjena zasniva se na principu mjerenja promjena u periodu gibanja uslijed gravitacijskog utjecaja u sustavu zvijezda-planet. S obzirom na to koji se objekt promatra možemo podijeliti ovu metodu na vremenske periode:

- pulsara
- promjenjivih zvijezda
- tranzita
- trajanja tranzita
- minimuma sjaja pomrčinskih dvojnih zvijezda.

Pulsari ili neutronske zvijezde su ostaci eksplozije supernove tj. krajnji stadij evolucije zvijezda velikih masa. Prilikom rotacije pulsari emitiraju radio valove tj. pulseve, koji mogu poslužiti za detekciju eventualnih pratioca pulsara. Kako su radio valovi koje emitiraju pulsari iznimno pravilni i pojavljuju se u jednakim peridičkim razmacima bilo kakva anomalija daje naslutiti da se radi o gravitacijskom utjecaju pratioca. Tako je upravo i otkriven prvi potvrđeni ekstrasolarni planet oko pulsara PSR 1257+12 (slika 4.5). Prilikom proučavanja periodičnosti u pulsevima, istraživači su uočili da je periodičnost poremećena prisustvom pratioca i da se pulsar giba oko zajedničkog centra mase. Iz slične je pojave Ole Rømer izmjerio brzinu svjetlosti, promatrajući periodičnost pomrčine Jupiterovih satelita. Proračuni bazirani na vremenskim promjenama pulsara mogu dati podatke o parametrima te orbite. Problem je što nema mnogo otkrivenih pulsara, te su zbog toga i istraživanja na njima ograničena. Osim toga rijetkost je i postojanje planeta u blizini pulsara.

Slično pulsarima postoje zvijezde kojima se sjaj mijenja u kratkom vremenu tako da se čini kao da pulsiraju, te se nazivaju pulsirajuće promjenjive zvijezde [36]. Primjer takvih zvijezda su Cefeide. Isto kao i kod pulsara ako se uoči varijacija u peridima pulseva može se zaključiti da li postoji neki ekstrasolarni planet koji svojim utjecajem remeti rotaciju zvijezde. Međutim, metoda detekcije pomoću vremenskih varijacija promjenjivih zvijezda nije osjetljiva kao kod pulsara jer su periodi duži i



Slika 4.5: Vremenske promjene kod pulsara PSR1257+12 [22].

manje regularni. Detekcija planeta ovisi o periodu pulsacije, pravilnosti pulsacije, masi planeta i udaljenosti planeta od zvijezde. Prvi ekstrasolarni planet otkriven pomoću ove metode je V391 Pegasi b, otkriven 2007. godine [42].

Osim vremenskih oscilacija koje se uočavaju u periodima sa zvijezda ili pulsara oko kojih se planeti gibaju, moguće je prilikom tranzita planeta otkriti da li je period kojim se planet giba oko zvijezde pravilan i da li se pojavljuje u jednakim razmacima. Metoda vremenskih promjena pomoću tranzita ili skraćeno TTV (*eng. Transit timing variations*) omogućava da sada promatranjem planeta uočimo nepravilnosti u gibanju planeta [43]. Kada planet koji se giba oko zvijezde ima pravilan period kruženja možemo zaključiti da je to jednoplanetarni sustav s jednom zvijezdom i planetom. No međutim ako učimo nepravilnost u periodu planeta zaključujemo da mora postojati neki treći objekt koji remeti taj period. Na taj se način pomoću ove metode mogu otkriti višeplanetarni sustavi i planeti u njima koji nisu detektirani pomoću tranzitne metode, ali možemo zaključiti o njihovom postojanju na temelju vremenskih promjena. Ovu metodu koristimo prvenstveno za sisteme udaljene od Sunca kada ih metoda radijalnih brzina ne može otkriti zbog malog omjera signal-šum. Pomoću ove metode se mogu otkriti i puno manji planeti od Zemlje jer se njihov utjecaj na drugi planet može lakše opaziti nego recimo na zvijezdi koja je puno veće mase [44]. Također je puno lakše otkriti planete koji imaju bliske orbite, te ako je jedan planet malo masivniji koji uzrokuje da je orbitalni period manjeg planeta promijenjen. Jedan od problema ove metode je taj što se ne može otkriti puno o planetu, tj. o njegovim fizikalnim parametrima. Kako ne možemo vidjeti ekstrasolarne planete jedino na temelju gibanja drugih tijela možemo zaključiti o njihovom postojanju. Ova

metoda se počela primjenjivati nakon što je u rad krenula svemirska misija Kepler jer je tada bilo omogućeno dulje i kvalitetnije snimanje planeta u tranzitu. Prvi planet otkriven pomoću ove metode je Kepler-19c jer su uočene promjene u periodu planeta Kepler-19b [45].

Osim bilježenja perioda kruženja planeta oko zvijezde i uočavanja nepravilnosti u periodima može se pratiti i promjena u trajanju tranzita planeta. Metoda vremenske promjene u trajanju tranzita ili TDV (*eng. Transit duration variation*) služi nam za potvrdu planeta koji kruže oko dvojnih zvijezda. U bliskim dvojnim sustavima, zvijezda značajno utječe na gibanje planeta, te tako ovisno o međusobnom položaju zvijezda koje se nalaze u dvojnom sustavu i planeta to može promijeniti trajanje samog tranzita kada planet prolazi ispred jedne od zvijezda.

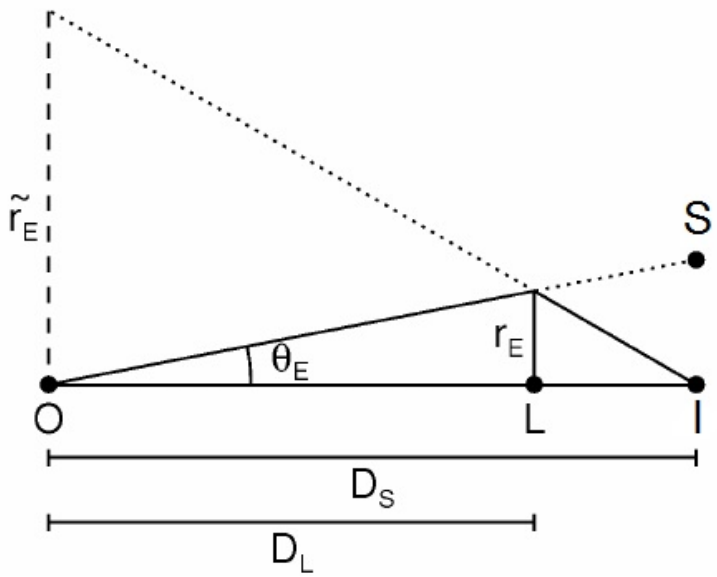
Kod pomrčinskih dvojnih zvijezda također možemo primjeniti metodu vremenskih promjena. Pomrčinske dvojne zvijezde su dvojne zvijezde koje gibanjem oko zajedničkog centra mase prolaze jedna ispred druge, te na taj način zasjenjuju jedna drugu i čine takozvane pomrčine. Kada je sjajnija zvijezda djelomično zaklonjena diskom druge zvijezde to nazivamo primarni (dublji) minimumom sjaja, dok za oko pola orbite kasnije imamo sekundarni (plići) kada zvijezda zaklanja površinu tamnije zvijezde. Ako postoji planet koji se giba oko dvojnog pomrčinskog sustava zvijezda tada će planet svojim gravitacijskim utjecajem utjecati na vrijeme pomrčine tj. minimumi i maksimumi sjaja se neće pojavljivati u istim vremenskim razmacima. Planeti koji se mogu detektirati pomoću ove metode moraju biti masivniji, trebali bi biti bliže dvojnoj zvijezdi ili bi dvojna zvijezda trebala biti manje mase kako bi gravitacijski utjecaj bio što veći.

4.4 Gravitacijska mikroleća

Gravitacijska leća (*eng. Gravitational lensing*) je pojava koja se javlja kada između opažača (teleskop) i izvora svjetlosti (kvazari) postoji masivni objekt (galaksija) koji uslijed gravitacijskog djelovanja i svoje velike mase zakreće svjetlost koja dolazi od izvora do opažača. Zbog toga možemo opaziti izobličenja slike izvora koje se javljaju uslijed gravitacijske leće [36]. Izobličenja koja nastaju su ta da se mogu vidjeti višestruke slike izvora oko same gravitacijske leće ili ako je poravnanje između izvora i leće savršeno tada se može uočiti Einsteinov prsten. Einsteinov prsten je slika izvora koja u cijelosti okružuje gravitacijsku leću kada se izvor svjetlosti nalazi točno iza gravitacijske leće [20]. Izdvojeni slučaj ove pojave se naziva gravitacijska mikroleća (*eng. Gravitational microlensing*) koja se temelji na istom principu, ali se odnosi na objekte puno manje mase. Kod gravitacijske mikroleće, leću predstavlja puno manji objekt od galakasije, a to je zvijezda koja zbog svoje mase može zakriviti put svjetlosti koja dolazi od druge zvijezde. Na razini svemira zvijezde su mikro objekti, te se zbog toga ovaj postupak naziva gravitacijska mikroleća. Efekti koji nastaju kod gravitacijske leće su puno slabiji i teže uočljiviji nego kod gravitacijske leće.

Einstenov prsten neće biti vidljiv jer je premali.

Pojavu gravitacijske mikroleće (slika 4.6) moguće je uočiti kada zvijezda *I* (izvor) prolazi ispred druge zvijezde *L* koja predstavlja gravitacijsku leću ako je kut između zvijezda prema ravnini neba približno oko 1 tisućinke lučne sekunde (mas).[3] Svjetlost izvora *I* zakrivljena je zbog zvijezde leće *L* tako da opažač na Zemlji *O* vidi virtualnu sliku *S* umjesto pravog izvora *I*.



Slika 4.6: Geometrija gravitacijske mikroleće. *O* je opažač, *L* zvijezda koja predstavlja leću, *I* izvor svjetlosti, *S* slika izvora, D_S udaljenost opažača od izvora, D_L udaljenost opažača od zvijezde leće, r_E radijus Einsteinovog prstena, θ_E kut pod kojim se opaža Einsteinov prsten. [20]

Kut pod kojim se vidi Einsteinov presten dan je formulom [20]:

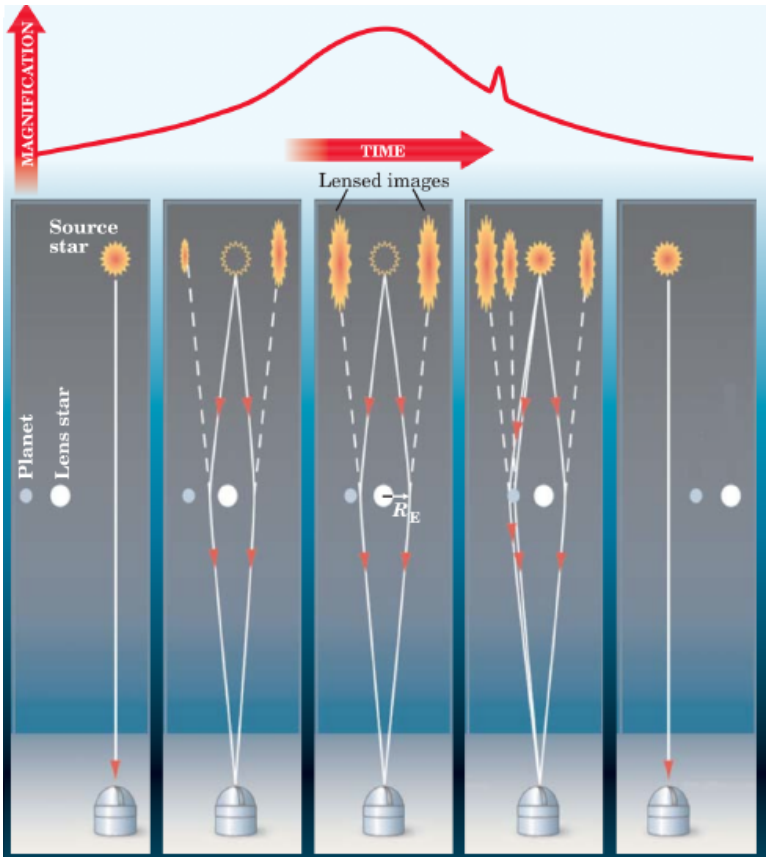
$$\theta_E = \sqrt{8.14mas\frac{M_L}{M_\odot}\left(\frac{1AU}{D_L} - \frac{1AU}{D_S}\right)} \tag{4.5}$$

Polumjer Einstenova prstena možemo izračunati iz pravokutnog trokuta sa slike uz aproksimaciju malih kuteva prema formuli:

$$r_E = D_L\theta_E \tag{4.6}$$

Ako je izvor malo pomaknut tada se uočavaju dvije slike izvora sa svake strane leće približno na mjestu gdje se nalazi Einsteinov prsten. Efekt mikrogravitacijske leće očituje se u blagoj promjeni sjaja. Prisustvo planete rezultirat će u dodatnoj pojavi superpozicije na svjetlosnoj krivulji (slika 4.7) Praćenjem ove pojave bilježi se svjetlosna krivulja. Ako se u blizini zvijezde leće nalazi planet, tada će i on zbog svog gravitacijskog djelovanja zakrenuti svjetlost te će se taj utjecaj zabilježiti na svjetlosnoj krivulji (slika 4.7).

[3]mas - *eng. miliarcsecond* je mjerna jedinica za mililučnu sekundu



Slika 4.7: Detekcija planeta pomoću pojave gravitacijske mikroleće i promjena na svjetlosnoj krivulji uslijed djelovanja planeta [46].

Ova metoda zahtjeva visoku preciznost i ograničena je time što se uvjeti za gravitacijsku mikroleću događaju samo jednom. Pojava gravitacijske mikroleće traje nekoliko tjedana ili mjeseci, zbog toga što postoji stalno kretanje planeta, zvijezda, ali i Zemlje s koje vršimo promatranja. Nakon što ova pojava završi nije ju više moguće ponovno zabilježiti. Gravitacijska mikroleća najpogodnija je za planete koji se nalaze između Zemlje i središta galaksije Mliječni put iz tog razloga što u središtu galaksije postoji veliki broj zvijezda i ostalih svemirskih objekata koji svjetle i na taj način čine pogodan izvor svjetlosti za gravitacijsku mikroleću. Za razliku od ostalih metoda koje imaju najbolje rezultate za planete s malim orbitama, ova metoda pokazuje najbolje rezultate za planete na udaljenosti od 1-10 AJ od zvijezde [20]. Pomoću ove metode moguće je odrediti masu planeta, ali ona ovisi o modelu s nizom parametara. Glavni nedostaci ove metode su ti što nije moguće ponoviti mjerenja zbog toga što se ova pojava događa jednom. U većini slučajeva nije moguće potvrditi planet pomoću neke druge metode jer se radi o planetima koji se nalaze na jako velikim udaljenostima. Osim toga nije moguće odrediti nikakve orbitalne parametre jer pojava koja se događa jako kratko traje. Kako bi ova metoda u budućnosti polučila veće rezultate i otkrila više ekstrasolarnih planeta, nužna je povezanost observatorija na Zemlji tako da je pokrivenost neba koja se promatra što veća. Na taj način proamtranja ne bi bila vremenski ovisna i vjerojatnost uočavanja pojave gravitacijske mikroleće bi porasla.

Naime ova pojava se događa relativno često jer smo postali svjesni da postoji veliki broj ekstrasolarnih planeta, ali je problem što nemamo u svakom trenutku nadzor na svakom dijelu neba. Trenutno najznačaniji projekti za gravitacijsku mikroleću su OGLE (*Optocal Gravitational Lens Experiment*) i MOA (*Microlensing Observations in Astrophysics*). Oni su 2003. godine otkrili prvi ekstrasolarni planet OGLE-2003-BLG-235/MOA-2003-BLG-53Lb upravo pomoću ove metode [20].

4.5 Izravno snimanje

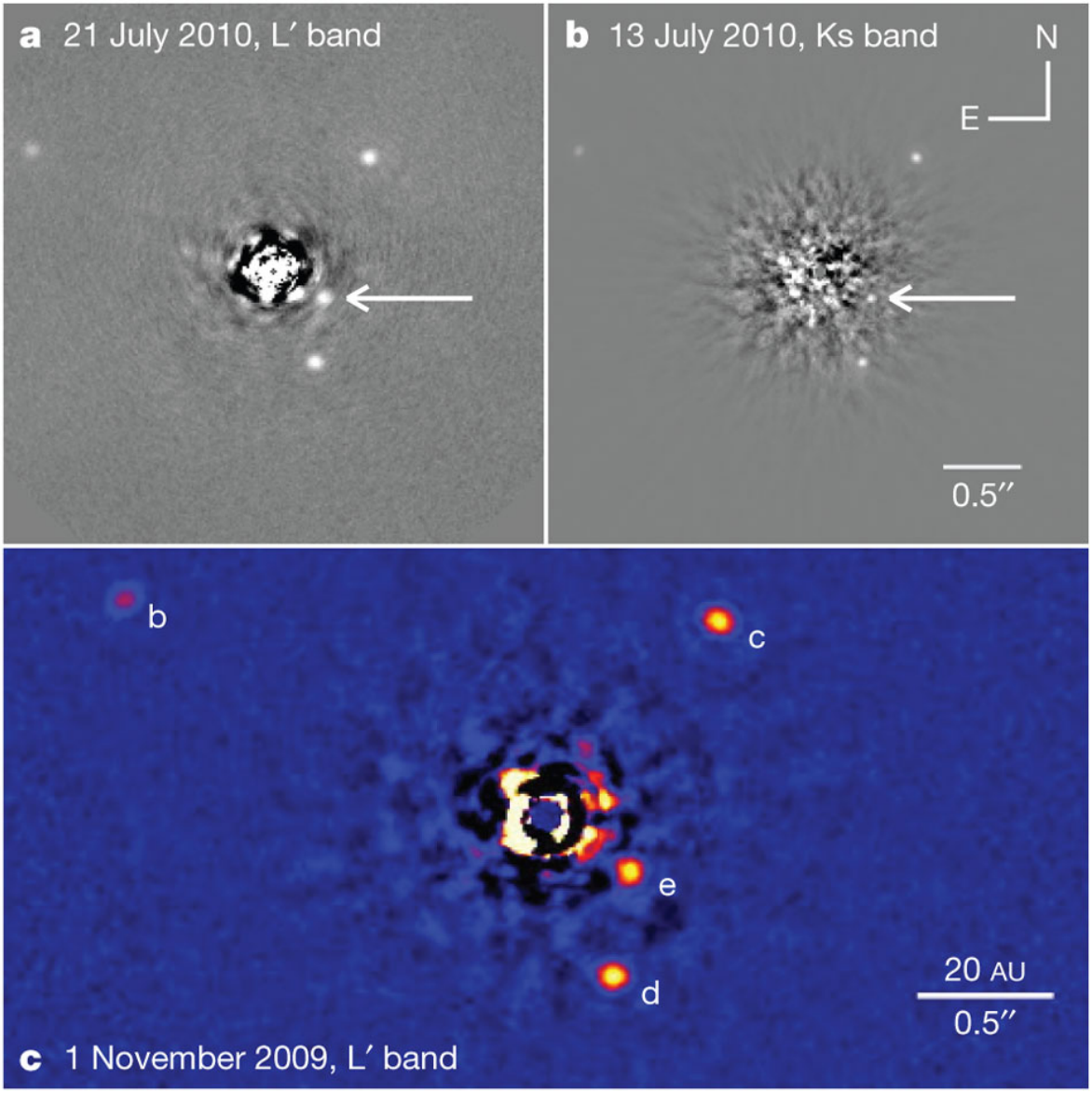
Sve izložene metode odnose se na neizravnu detekciju ekstrasolarnih planeta. To znači da uz pomoć nekog drugog objekta kao što je u većini slučajeva matična zvijezda možemo otkriti planet koji kruži oko te zvijezde. Metoda izravnog snimanja, kao što i samo ime kaže je za sada jedina metoda koja izravno detektira ekstrasolarni planet. Ova metoda je zbog toga iznimno složena i zahtjevna. Sama složenost ove metode je ta da planeti nisu sami izvori svjetlosti i zbog utjecaja zvijezde oko koje se gibaju nisu lako uočljivi, te ih je iznimno teško snimiti. Naime svjetlost koja dolazi sa zvijezde reflektira se od planeta, ali njezin intenzitet je jako mali u odnosu na svjetlost sa zvijezde, tako da se ta reflektirana svjetlost jako teško može uočiti. Iz toga razloga koriste se mnogi tehnološki dodaci kako bi se što više smanjio utjecaj zvijezde na svjetlost koja dolazi sa planeta. Separacija svjetla koje dolaze sa zvijezde i s planeta može se vršiti na dva načina. Prvi način je optički, tako da se na teleskop stavljaju razni koronografi koji mogu blokirati svjetlost sa zvijezde [36].

Upravo zbog tih razloga najlakše se detektiraju veliki planeti koji se nalaze na većim udaljenostima od matične zvijezde. Planeti koji su udaljeniji od svoje matične zvijezde ne reflektiraju dovoljno svjetla tako da je njih moguće snimiti samo u infracrvenom dijelu spektra. Takvi planeti su većinom mlađeg porijekla tj. još su uvijek u fazi formacije tako da je njihova površina još uvijek na visokih 1000-2000 K. Također za planete vrijedi da ako je planet hladniji da mu masa mora biti manja. Iz tog razloga za očekivati je da će se najviše otkriti planeta pomoću ove metode koji su znatno veće mase od Jupitera, a time i puno topliji [20].

Osim što ova metoda jedina omogućava snimanje planeta od ostalih parametara koji se mogu dobiti i nije baš najzahtjevnija metoda. Za masu se može dobiti samo slabo ograničenje mase. Masa se ne može odrediti točno zato što se planet može formirati nekoliko milijuna godina kasnije nakon što je formirana zvijezda. U nekim slučajevima moguće je odrediti približan polumjer planeta s obzirom na temperaturu planeta, snimljene svjetlosti i udaljenosti sa Zemlje. Iz spektra se može odrediti kemijski sastav planeta, te se može mjeriti orbita planeta oko zvijezde.

Za razliku od ostalih metoda za koje je bilo nužno da je poravnanje orbite planeta poravntano sa pogledom sa Zemlje tako da možemo vidjeti kako planet zalazi iza zvijezde. Za ovu metodu je puno bolje da je orbita planeta okomita sa Zemljom tako da možemo izravno vidjeti kako se planet giba oko zvijezde.

Jedno od prvih velikih otkrića ekstrasolarnog planeta pomoću izravnog snimanja je planet 2M1207 b. Ovaj planet ima masu oko pet masa Jupitera, kruži oko smeđeg patuljka 2M1207, te je njegov orbitalni radijus oko 40 AU. Najznačanije otkriće višeplanetarnog sustava pomoću ove metode je svakako otkriće četiri planeta koji kruže oko zvijezde HR8799 (slika 4.8) [47]. Mase dva planeta su $\sim 10\ \mathrm{M_J}$, a



Slika 4.8: Slika nastala izravnim snimanjem višeplanetarnog sustava oko zvijezde HR8799 u infracvenom dijelu spektra [47].

jedan planet ima $\sim 7\ \mathrm{M_J}$. Ovaj planetarni sustav ima sličan disk kao što je Kupierov pojas u Sunčevom sustavu. U budućnosti će se svakako više govoriti o uspjesima ove metode, kako će se sve više razvijati tehnologija, stabilnost i oscilacije teleskopa će se svesti na minimalnu razinu tako da će biti omogućeno i bolje snimanje planeta sličnih Zemlji.

4.6 Astrometrija

Astrometrija je metoda detekcije ekstrasolarnih planeta koja uključuje precizno mjerenje položaja zvijezda na nebeskoj sferi, te kako se mijenja položaj zvijezde u vremenu. Ako se oko zvijezde giba planet tada će se zvijezda zbog gravitacijskog utjecaja planeta gibati oko centra mase sustava. Zvijezda i planet kruže oko zajedničkog centra mase, te kroz duži period mogu se uočiti promjene u poziciji zvijezde na nebu [36]. Slično kao i kod metode radijalnih brzina gdje se zbog slične pojave i utjecaja planeta na zvijezdu mogu uočiti promjene u gibanju zvijezde. Samo se kod metode radijalnih brzina ili takozvani Dopplerov efekt očitovao na promjene na spektrima, a ovdje se radi samo o promjenama u astrometarskim podacima, rektascenziji i deklinaciji zvijezde.

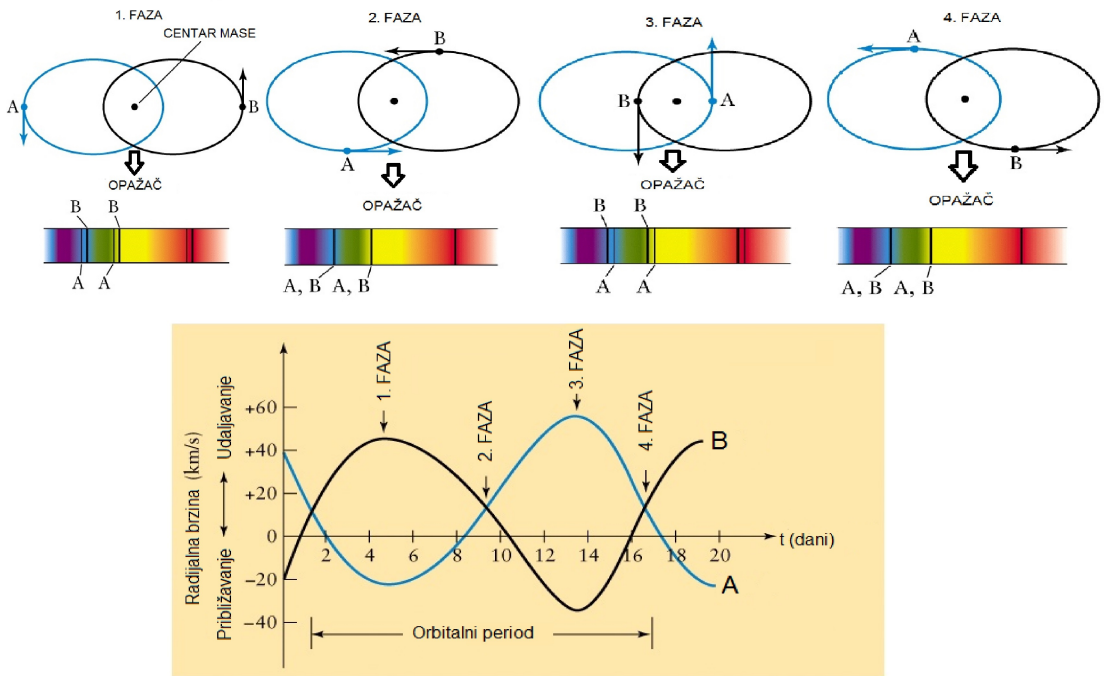
Metoda zahtjeva prvenstveno dugo promatranje određene zvijezde, čak i nekoliko godina ili desetljeća. Osim što je potrebno iznimno dugo vrijeme da se uoči bilo kakava promjena u položaju zvijezde zbog utjecaja planeta, današnjom tehnologijom gotovo je nemoguće kroz tako dugi period zadržati preciznost i stabilnost instrumenata. Upravo iz tih razloga ova metoda se očituje kao najslabija metoda za detekciju ekstrasolarnih planeta sa samo jednim detektiranim ekstrasolarnim planetom. Iako je ova metoda polučila rezultate, očekivanja su u budućnosti dosta velika i predviđanja pokazuju dobre rezultate kroz svemirske teleskope gdje bi se utjecaj Zemljine atmosfere na mjerenja uklonio, a i ostale pogreške zbog rotacije Zemlje bi se svele na minimum.

Prednost ove metode je što se ova metoda može korisiti za provjeru već pronađenih planeta. Također ova metoda daje uvid u sve orbitalne parametre, pa tako i u inklinaciju, pa bi određivanje mase pomoću ove metode bilo dosta jednostavno. Osim toga ova metoda daje najbolje rezultate za planete na većim orbitama oko matične zvijezde, što i nije slučaj kod ostalih metoda, gdje su najbolji rezultati za planete na bližim orbitama [20]. Očekivanja za pronalazak planeta pomoću ove metode su porasla nakon što je u svemir poslan svemirski astrometrijski teleskop Gaia. Iako je Gaia u orbiti od 2013. godine nisu do sada zabilježeni rezultati, a razlog je tome što je potrebno dosta vremena i stalnog promatranja istog dijela neba kako bi se uočile ovako astronomski male promjene. Do sada je otkriven jedan ekstrasolarni planet pomoću ove metode, HD 176051 b [16].

5 Određivanje dinamičke mase ekstrasolarnih planeta

Masa je ključna fizikalna veličina koja određuje glavna svojstva planete. Poznavajući masu ekstrasolarnih planeta možemo bolje razumijeti na koji način su se planeti formirali, koja im je gustoća, te da li je moguć život na njima. Niti jedna metoda detekcije ekstrasolarnih planeta ne daje mogućnost izravnog određivanja mase. Pomoću Dopplerove metode može se odrediti funkcija mase. Masa planeta funkcija je mase matične zvijezde, ali i inklinacije njegove orbite. Masa matične zvijezde procjenjuje se iz spektralnih svojstava, pa se radi o indirektnom određivanju. Nepoznat kut inklinacije orbite daje samo donju granicu za masu planeta.

Analiza gibanja dvojnog sustava zvijezda-planet slična je kao i za dvojne zvijezde. Dvojne zvijezde koje se analiziraju pomoću Dopplerove spektroskopije nazivaju se spektroskopske dvojne zvijezde, te se u njihovim spektrima opažaju pomaci uslijed gibanja zvijezda oko zajedničkog centra mase. Dopplerov pomak spektralih linija je puno lakše uočiti ako se radi o dvolinijskom tipu dvojne zvijezde (SB2) jer se u tom slučaju mogu analizirati oba spektra (slika 5.1) [48].



Slika 5.1: Prikaz četiri ključne faze prilikom gibanja zvijezda u dvojnom sustavu oko zajedničkog centra mase. Na slici se može vidjeti kako su apsorpcijski spektri pomaknuti ovisno o tome da li se zvijezda udaljava ili približava prema promatraču [48].

Analiza sustava zvijezda-planet sličnija je jednolinijskom sustavu (SB1) dvojnih zvijezda jer se kod takvog sustava uočava samo jedan spektar. Isti je slučaj i kod sustava zvijezda-planet. Udio zračenja planete u ukupnom toku zračenja sustava zvijezda-planet gotovo je zanemariv, te se spektar planete niti ne vidi. Prisustvo pla-

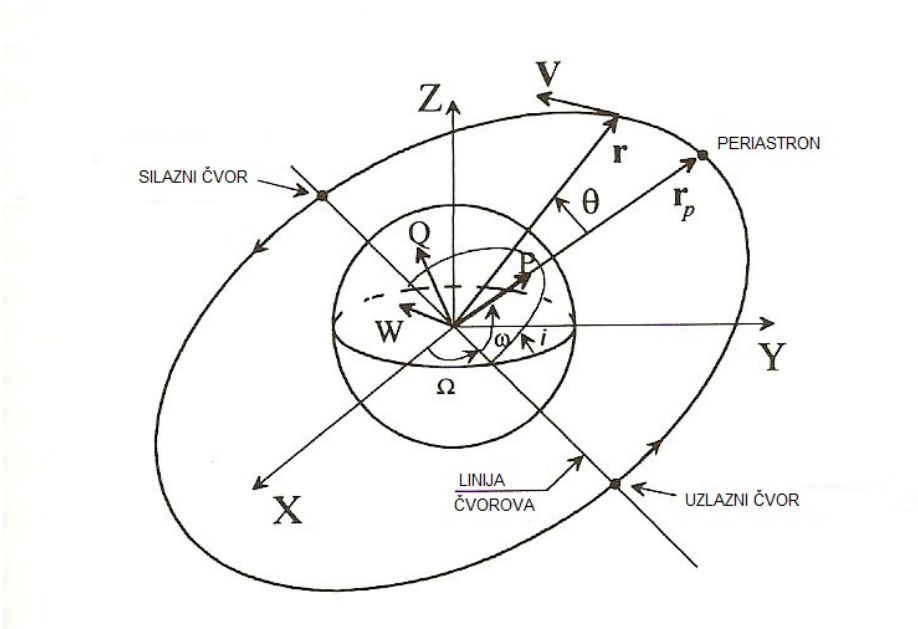
nete očituje se tek u gibanju zvijezde oko zajedničkog centra mase. Kako je masa planete mala prema masi zvijezde radi se o brzinama koje su vrlo male ($v \sim 1-100\,\mathrm{m/s}$). Prilikom metode radijalnih brzina bilježi se apsorpcijski spektar zvijezde koji je uslijed Dopplerovog efekta pomaknut zbog kombinacije radijalne brzine centra mase sustava i orbitalnog gibanja zvijezde i planeta oko centra mase kako se od nas približavaju ili udaljavaju.

Za određivanje stvarne mase planeta bilo bi potrebno poznavati spektar planeta, no to u ovom trenutku i sa današnjom tehnologijom nije moguće. Stoga je moguće odrediti samo funkciju mase tog dvojnog sustava. Za određivanje mase potrebno je poznavati orbitalne parametre koje možemo odrediti iz krivulje radijalne brzine. Orbitalni elementi (slika 5.2) za eliptičnu putanju koji određuju orbitu sustava su [49]:

- Ω - duljina uzlaznog čvora,
- z - os centra mase,
- a - velika poluos elipse (vremenski neovisna veličina),
- i - kut inklinacije orbite (vremenski neovisna veličina),
- ω - argument periastrona (duljina periastrona), kut između smjera uzlaznog čvora i smjera periastrona (vremenski neovisna veličina),
- e - ekscentricitet orbite, omjer udaljenosti fokusa i velike osi orbite (vremenski neovisna veličina),
- p - parametar eliptične orbite $p = a\,(1 - e^2)$,
- a - velika poluos elipse/orbite,
- b - mala poluos elipse/orbite,
- θ - prava anomalija, kut između pozicije planeta i periastrona (vremenski ovisna veličina),
- r - radij vektor planeta koji kruži oko zvijezde $|\vec{r}| = \frac{p}{1+e\cos\theta}$ (vremenski ovisna veličina),
- A - površina elipse $A = \pi ab$,
- T - vrijeme revolucije planeta oko zvijezde u kojoj planet prebriše površinu elipse po kojoj kruži oko planeta.

Promatramo sustav zvijezda-planet koji kruži oko zajedničkog centra mase. Položaj centra mase definiran je sa z osi u odnosu na promatrača. Koordinatu z ćemo definirati pomoću slijedećih orbitalnih elemenata:

$$z = r\sin(\theta + \omega)\sin(i). \tag{5.1}$$



Slika 5.2: Elementi orbite.

Kada znamo položaj, brzinu možemo lako odrediti tako da deriviramo položaj po vremenu:

$$v = \frac{dz}{dt}. \tag{5.2}$$

Uvrstimo (5.1) u (5.2), te pomoću pravila deriviranja, deriviramo [49]:

$$\begin{aligned}
v &= r\frac{d}{dt}\left[\sin(\theta+\omega)\sin i\right] + \left[\sin(\theta+\omega)\sin i\right]\frac{d}{dt}(r) \\
&= r\left[\sin i\frac{d}{dt}\sin(\theta+\omega) + \sin(\theta+\omega)\frac{d}{dt}\sin i\right] + \left[\sin(\theta+\omega)\sin i\right]\dot{r} \\
&= r\left[\sin i\cos(\theta+\omega)\frac{d}{dt}(\theta+\omega) + \sin(\theta+\omega)\cos i\frac{d}{dt}(i)\right] + \dot{r}\sin(\theta+\omega)\sin i.
\end{aligned}$$

Derivacija inklinacije i po vremenu je nula jer i je vremenski neovisna varijabla pa možemo pisati:

$$= r\left[\sin i\cos(\theta+\omega)\left\{\frac{d}{dt}(\theta) + \frac{d}{dt}(\omega)\right\} + \sin(\theta+\omega)\cos i\cdot 0\right] + \dot{r}\sin(\theta+\omega)\sin i.$$

Derivacija argumenta periastrona ω također je nula jer je vremenski neovisna varijabla:

$$\begin{aligned}
&= r\left[\sin i\cos(\theta+\omega)\left\{\frac{d}{dt}(\theta) + 0\right\} + 0\right] + \dot{r}\sin(\theta+\omega)\sin i \\
&= r\left[\sin i\cos(\theta+\omega)\cdot\dot{\theta}\right] + \dot{r}\sin(\theta+\omega)\sin i \\
&= r\dot{\theta}\cos(\theta+\omega)\sin i + \dot{r}\sin(\theta+\omega)\sin i.
\end{aligned}$$

Dobivamo izraz za radijalnu brzinu:

$$v = \left[r\dot{\theta}\cos(\theta+\omega)\sin i + \dot{r}\sin(\theta+\omega)\right]\sin i. \tag{5.3}$$

U jednadžbi (5.3) nalaze se derivacija kuta prave anomalije θ i radij vektora r. Potrebno je ovu jednadžbu drugog stupnja svesti na jednadžbu prvog stupnja. Potrebno je derivirati radij vektor $r = \frac{p}{1+e\cos\theta}$ po vremenu:

$$\frac{d}{dt}(r) = \dot{r} = \frac{d}{dt}\left(\frac{p}{1+e\cos\theta}\right). \tag{5.4}$$

Uvrstimo u (5.4) izraz za parametar elipse $p = a\,(1-e^2)$:

$$\dot{r} = \frac{d}{dt}\left[\frac{a(1-e^2)}{1+e\cos\theta}\right], \tag{5.5}$$

$$\dot{r} = \frac{[1+e\cos\theta]\,\frac{d}{dt}\,[a(1-e^2)]\,\frac{d}{dt}\,[1+e\cos\theta]}{[1+e\cos\theta]^2}. \tag{5.6}$$

Deriviramo prema pravilu za derivaciju razlomka (Dodatak A):

$$\dot{r} = \frac{[1+e\cos\theta]\cdot 0 - [a(1-e^2)]\,\frac{d}{dt}\,[1+2\cos\theta]}{[1+e\cos\theta]^2}. \tag{5.7}$$

Iskoristimo uvjet da su veličine $a, 1, e$ vremenski neovisne, te je njihova derivacija po vremenu jednaka nuli:

$$\begin{aligned}
\dot{r} &= \frac{-\,[a(1-e^2)]\,\left[\frac{d}{dt}(1) + \frac{d}{dt}(e\cos\theta)\right]}{[1+e\cos\theta]^2},\\
&= \frac{-\,[a(1-e^2)]\,\left[0 + e\frac{d}{dt}(\cos\theta)\right]}{[1+e\cos\theta]^2},\\
&= \frac{-\,[a(1-e^2)]\,\left[e\frac{d}{dt}(\cos\theta)\frac{d}{dt}(\theta)\right]}{[1+e\cos\theta]^2},\\
&= \frac{-\,[a(1-e^2)]\,\left[e(-\sin\theta)\dot{\theta}\right]}{[1+e\cos\theta]^2},\\
&= \frac{a(1-e^2)\,\left[e\dot{\theta}(\sin\theta)\right]}{(1+e\cos\theta)\,(1+e\cos\theta)}.
\end{aligned} \tag{5.8}$$

Sada u jednadžbi (5.8)možemo razdvojiti razlomak:

$$\dot{r} = \left[\frac{a(1-e^2)}{1+e\cos\theta}\right]\left[\frac{e\dot{\theta}\sin\theta}{1+e\cos\theta}\right]. \tag{5.9}$$

Prvi član je jednak izrazu za radij vektor $r = \frac{p}{1+e\cos\theta}$ tako da jednadžbu (5.9) možemo svesti na:

$$\dot{r} = \frac{re\dot{\theta}\sin\theta}{1+e\cos\theta}. \tag{5.10}$$

Da bismo odredili $r\dot{\theta}$, iskorisiti ćemo 2. Keplerov zakon koji govori da objekt koji kruži po eliptičnoj putanji u jednakim vremenima prebriše jednake površine na elipsi [50]:

$$\frac{dA}{dt} = \frac{1}{2}r^2\frac{d\theta}{dt}. \tag{5.11}$$

U jednadžbi (5.11) oznaku za derivaciju $\frac{d\theta}{dt}$ zamijenimo s Newtonovom oznakom za derivaciju s točkom $\dot{\theta}$:

$$dA = \frac{1}{2}r^2\frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{2}r^2\dot{\theta}dt. \tag{5.12}$$

Sada jednadžbu (5.5) integriramo:

$$\int dA = \int \frac{1}{2}r^2\dot{\theta}dt,$$

$$A = \frac{1}{2}r^2\dot{\theta}\int_{t=0}^{t=T} dt,$$

$$A = \frac{1}{2}r^2\dot{\theta}\left\{t\Big|_0^T\right\} = \frac{1}{2}r^2\dot{\theta}(T-0),$$

$$\frac{A}{T} = \frac{1}{2}r^2\dot{\theta}. \tag{5.13}$$

Iz jednadžbe (5.13) možemo izlučiti faktor $r\dot{\theta}$:

$$r\dot{\theta} = \frac{2A}{rT}. \tag{5.14}$$

Iskoristimo izraz za površinu elipse $A = \pi ab$ i uvrstimo u (5.14):

$$r\dot{\theta} = \frac{2\pi ab}{rT}. \tag{5.15}$$

Iskoristimo izraz za b iz geometrije elipse (Dodatak A):

$$r\dot{\theta} = \frac{2\pi a^2(\sqrt{1-e^2})}{rT}. \tag{5.16}$$

Izraz (5.16) sredimo da dobijemo povoljniji oblik jednadžbe:

$$r\dot{\theta} = \frac{1}{r}\left[\frac{2\pi a^2(\sqrt{1-e^2})}{T}\right],$$

$$= \left[\frac{1+e\cos\theta}{a(1-e^2)}\right]\left[\frac{2\pi a^2\sqrt{(1-e^2)}}{T}\right],$$

i nakon skraćivanja dobijemo:

$$r\dot{\theta} = \frac{2\pi a(1+e\cos\theta)}{T\sqrt{1-e^2}}. \tag{5.17}$$

U (5.10) uvrstimo dobiveni izraz (5.17) kako bismo dobili izraz za derivaciju radij vektora $\dot{r}$:

$$\dot{r} = \left[\frac{2\pi a(1+e\cos\theta)}{T\sqrt{1-e^2}}\right]\left[\frac{e\sin\theta}{1+e\cos\theta}\right], \tag{5.18}$$

skratimo izraz i dobijemo:

$$\dot{r} = \frac{2\pi ae\sin\theta}{T\sqrt{1-e^2}}. \tag{5.19}$$

Kako bismo dobili konačni izraz za radijalnu brzinu uvrštavamo u (5.3) izraze (5.17) i (5.19), te dobijemo izraz za radijalnu brzinu koja je jednadžba prvog stupnja:

$$v = \left[\frac{2\pi a(1+e\cos\theta)}{T\sqrt{1-e^2}}\cos(\theta+\omega) + \frac{2\pi ae\sin\theta}{T\sqrt{1-e^2}}\sin(\theta+\omega)\right]\sin i. \tag{5.20}$$

U izrazu (5.20) potrebno je izlučiti zajednički faktor i pomoću adicijskih formula (Dodatak A) srediti izraz:

$$\begin{aligned}
v &= \left[\frac{2\pi aT\sqrt{1-e^2}2\pi ae\sin\theta\sin(\theta+\omega)}{T\sqrt{1-e^2}}\right]\sin i \\
&= \frac{2\pi a\sin i}{T\sqrt{1-e^2}}\left[(1+e\cos\theta)\cos(\theta+\omega) + e\sin\theta\sin(\theta+\omega)\right] \\
&= \frac{2\pi a\sin i}{T\sqrt{1-e^2}}\left[\cos(\theta+\omega) + e\cos\theta\cos(\theta+\omega) + e\sin\theta\sin(\theta+\omega)\right] \\
&= \frac{2\pi a\sin i}{T\sqrt{1-e^2}}\left[\cos\theta\cos\omega - \sin\theta\sin\omega + e\cos\theta(\cos\theta\cos\omega - \sin\theta\sin\omega)\right] \\
&\qquad + \left[e\sin\theta(\sin\theta\cos\omega + \cos\theta\sin\omega)\right] \\
&= \frac{2\pi a\sin i}{T\sqrt{1-e^2}}\left[\cos\theta\cos\omega - \sin\theta\sin\omega + e\cos^2\theta\cos\omega - e\cos\theta\sin\theta\sin\omega)\right] \\
&\qquad + \left[e\sin^2\theta\cos\omega + e\sin\theta\cos\theta\sin\omega)\right] \\
&= \frac{2\pi a\sin i}{T\sqrt{1-e^2}}\left[\cos\theta\cos\omega - \sin\theta\sin\omega + e\cos\omega(\cos^2\theta + \sin^2\theta) - e\cos\theta\sin\theta\sin\omega\right] \\
&\qquad + \left[e\sin\theta\cos\theta\sin\omega\right] \\
&= \frac{2\pi a\sin i}{T\sqrt{1-e^2}}\left[\cos\theta\cos\omega - \sin\theta\sin\omega + e\cos\omega + 0\right] \\
&= \frac{2\pi a\sin i}{T\sqrt{1-e^2}}\left[(\cos\theta\cos\omega - \sin\theta\sin\omega) + e\cos\omega\right],
\end{aligned}$$

na kraju se dobije konačni izraz za radijalnu brzinu:

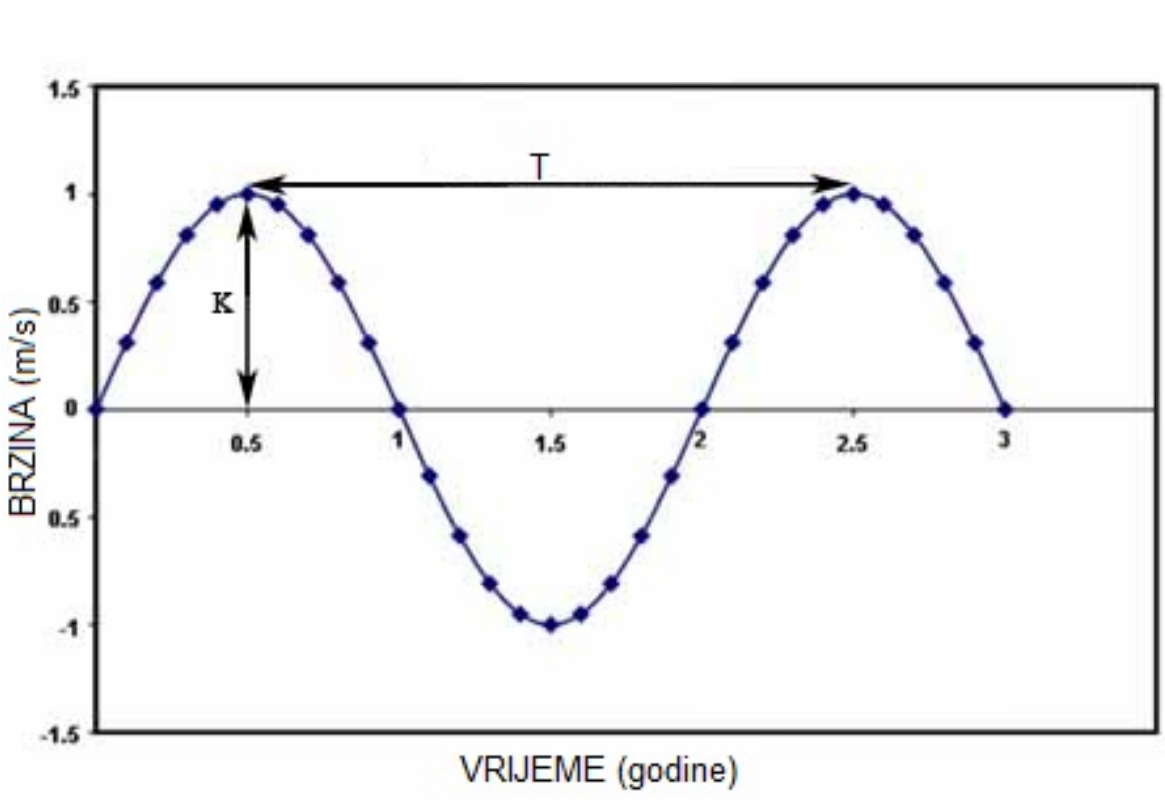
$$v = \frac{2\pi a\sin i}{T\sqrt{1-e^2}}\left[\cos(\theta+\omega) + e\cos\omega\right]. \tag{5.21}$$

Jednadžba radijalne brzine za planet i za zvijezdu razlikuje se samo u faktoru a, velika poluos elipse je drugačija za planet i zvijezdu, ostale veličine su iste. Komponentu sustava planet-zvijezda označimo s indeksom i, te možemo zapisati jednadžbu radijalne brzine komponente i:

$$v_i = v_0 + \frac{2\pi a_i\sin i}{T\sqrt{1-e^2}}\left[\cos(\theta+\omega) + e\cos\omega\right], \tag{5.22}$$

gdje je v_0 brzina centra mase sustava. Površine krivulja moraju biti jednake za brzine ispod i iznad brzine centra mase. U jednadžbi (5.22) možemo definirati poluamplitudu radijalne brzine komponente i:

$$K_i = \frac{2\pi a_i\sin i}{T\sqrt{1-e^2}}. \tag{5.23}$$



Slika 5.3: Krivulja radijalnih brzina za kružnu putanju.

Poluamplituda se može dobiti iz samih mjerenja nakon crtanja krivulje radijalnih brzina, gdje je K poluamplituda grafa koji je sinus funkcija (Slika5.3). Možemo izračunati i razliku maksimalne i minimalne radijalne brzine:

$$v_{max} - v_{min} = v_0 + K_i(e\cos\omega + 1) - v_0 - K_i(e\cos -1) = 2K_i, \tag{5.24}$$

te možemo dobiti vezu za ekscentricitet orbite:

$$e\cos\omega = \frac{v_{max} + v_{min}}{2K_i}. \tag{5.25}$$

Nakon što smo u mogućnosti odrediti radijalnu brzinu, možemo krenuti na određivanje mase dvojnog sustava u ovom slučaju je to sustav zvijezda-planet. Za određivanje mase potrebno je poznavati poluamplitudu radijalne brzine K i period gibanja T, te varijable moguće je odrediti iz krivulje radijalnih brzina. Potrebno je odrediti funkciju mase, te ćemo za to iskoristiti treći Keplerov zakon:

$$GM = \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 a^3, \tag{5.26}$$

gdje je $M = M_* + M_{\mathrm{P}}$, ukupna masa obje komponente. indeks $*$ označava zvijezdu, a indeks P označava masu planeta. Varijabla a je ustvari $a = a_* + a_{\mathrm{P}}$ zbroj velikih poluosi elipse svake komponente. Masu dvojnog sustava možemo zapisati i kao:

$$M = M_* + M_{\mathrm{P}} = M_*\left(1 + \frac{M_{\mathrm{P}}}{M_*}\right) = M_*\left(1 + q\right), \tag{5.27}$$

gdje je q omjer masa sustava zvijezda-planet $q = \frac{M_\mathrm{P}}{M_*}$. Kao što smo raspisali i masu, također možemo raspisati i veliku poluos orbite:

$$a = a_* + a_\mathrm{P} = a_* \left(1 + \frac{a_\mathrm{P}}{a_*}\right), \tag{5.28}$$

sada možemo iskoristiti uvjet centra mase $M_* a_* = M_\mathrm{P} a_\mathrm{P}$, te pomoću momenata možemo pisati da je q jednako:

$$q = \frac{M_\mathrm{P}}{M_*} = \frac{a_*}{a_\mathrm{P}} = \frac{K_*}{K_\mathrm{P}}. \tag{5.29}$$

Omjer masa možemo dakle izračunati samo ako imamo obje radijalne krivulje gdje možemo odrediti obje poluamplitude. To u slučaju otkrivenih ekstrasolarnih planeta nije moguće jer imamo samo krivulju brzina zvijezde. Jednadžbu (5.28) možemo dakle svesti na:

$$a = a_* \left(1 + \frac{M_*}{M_\mathrm{P}}\right) = \frac{a_*}{M_\mathrm{P}}(M_* + M_\mathrm{P}) = \frac{a_* M}{M_\mathrm{P}}. \tag{5.30}$$

Uvrstimo izraz za veliku poluos (5.30) u izraz za treći Keplerov zakon (5.26):

$$GM = \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \frac{a_*^3 M^3}{M_\mathrm{P}^3}. \tag{5.31}$$

Iz izraza za poluamplitudu radijalne brzine planeta (5.23) izlučimo faktor a_* i uvrstimo u (5.31):

$$GM = \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \frac{M^3}{M_\mathrm{P}^3} \left(\frac{K_* T \sqrt{1-e^2}}{2\pi \sin i}\right)^3, \tag{5.32}$$

Nakon skraćivanja i sređivanja izraza dobijemo funkciju mase za planet:

$$f(M_\mathrm{P}) = \frac{M_\mathrm{P}^3 \sin^3 i}{(M_* + M_\mathrm{P})^2} = \frac{K_*^3 T}{2\pi G}(1-e^2)^{3/2}. \tag{5.33}$$

Izraz (5.33) odnosi se na opći slučaj s eliptičnom putanjom. Funkcija mase za idealnu kružnu putanju, bez ekscentriciteta:

$$f M_\mathrm{P}) = \frac{M_\mathrm{P}^3 \sin^3 i}{(M_* + M_\mathrm{P})^2} = \frac{K_*^3 T}{2\pi G}. \tag{5.34}$$

Iz funkcije mase (5.33 i 5.34) se vidi da se masa planeta može odrediti samo ako je poznata masa zvijezde. Zato se moraju koristiti kalibracije za masu i spektar zvijezde. To nosi nepreciznost. Kao drugo, masa se može odrediti samo ako je poznata inklinacija. Inklinacija je nepoznata i može se odrediti samo donja granica. Inklinacija ovisi o trećoj potenciji što još više povećava nepreciznost.

Ako je poznat omjer masa komponenti sustava q i ako je poznata inklinacija orbite prema promatraču, tada je moguće odrediti mase komponenata, odnosno i zvijezde i planete. U suprotnom masa druge komponente M_P i $\sin i$ moraju ostati povezani i možemo odrediti samo minimum mase $m \sin i$. Objekti unutar nekog dvojnog sustava se razlikuju po masi i s obzirom na to možemo imati dva slučaja:

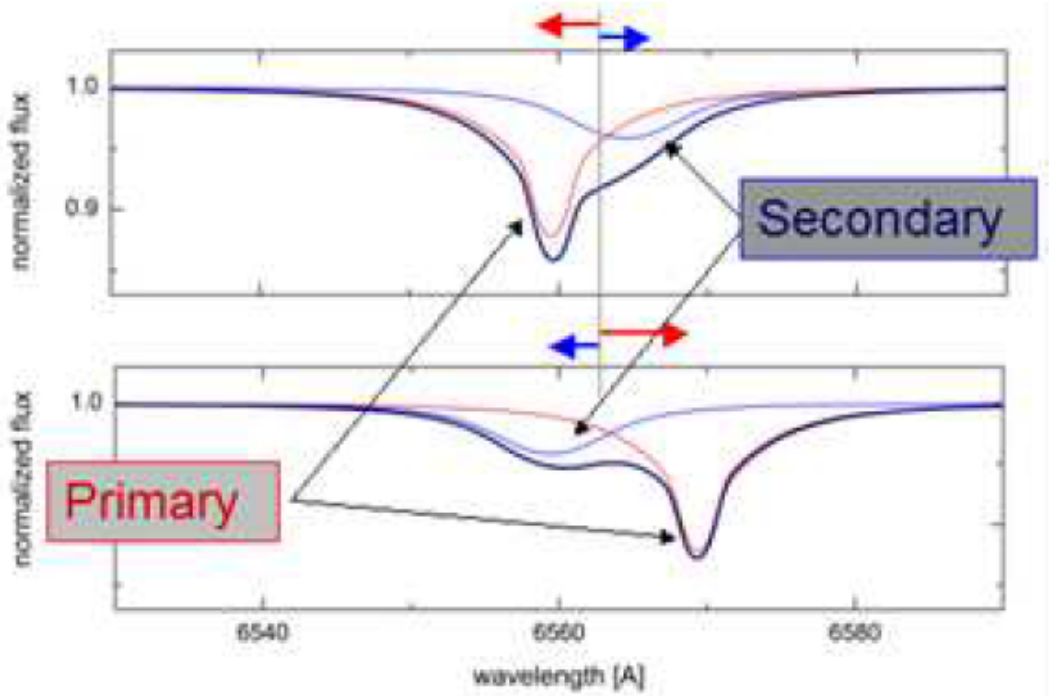
1. ako je $M_* \gg M_\mathrm{P}$ kao u našem slučaju gdje nam je prvu komponentu predstavljala zvijezda koja je puno masivnija od planeta, pa se jednadžba (5.33) može svesti na:
$$f(M_\mathrm{P}) \approx \frac{M_\mathrm{P}^3 \sin^3 i}{M_*^2}, \tag{5.35}$$

2. ako je $M_* \ll M_\mathrm{P}$ to znači da je objekt koji nevidimo puno veće mase od objekta kojeg smo uočili npr. crna rupa, tada jednadžbu (5.33) možemo svesti na:
$$f(M_\mathrm{P}) \approx M_\mathrm{P}^3 \sin^3 i. \tag{5.36}$$

Iz ovoga možemo vidjeti kolika je važnost da se prilikom detekcije ekstrasolarnih planeta pomoću Dopplerove spektroskopije mogu razlučiti oba spektra dvojnog sustava. To bi omogućilo izravno određivanje mase i svih potrebnih parametara.

6 Raspetljavanje kompozitnih spektara

Spektar zvijezde i ekstrasolarnog planeta je kompozitni spektar jer se sastoji od spektara dvaju izvora, zvijezde i planeta. Štoviše, tokom orbitalnog ciklusa, kompozitni spektar se mijenja jer se zbog Dopplerovog efekta spektralne linije zvijezde i planeta pomiču. Slika 6.1 ilustrira dva kompozitna spektra u dvoje orbitalne faze. Temeljni je problem detekcije planeta što je udio toka zračenja u ukupnom toku zračenja sustava vrlo mali i ne današnjoj opažačkoj razini zanemariv.



Slika 6.1: Kompozitni spektar dvojnog sustava je prikazan tamnom plavom linijom. Crvenom linijom je prikazana prva komponenta (zvijezda), a svijetlo plava linija je od druge komponente (planeta). Na slici se mogu vidjeti crveni i plavi Dopplerov pomak.

Spektar sadrži niz informacija bitnih za podrobnu analizu samog sustava zvijezda-planet kao što su ovisnost radijalnih brzina komponenata o orbitalnoj fazi i spektralne značajke komponenata koje se mogu analizirati iz vremenskog slijeda spektra koji je razdjeljen na orbitalne faze. Prilikom gibanja oko zajedničkog centra mase spektralne linije komponenata pokazuje crveni ili plavi pomak ovisno o orbitalnoj fazi u kojoj se dani sustav zatekne. Problem je što jedna komponenta, planet, ima puno manji tok zračenja, te je spektralna linija te komponente prikrivena spektralnom linijom komponente zvijezde. Takvi kompozitni spektri su za spektralnu analizu izrazito zamršeni jer se spektralne linije međusobno prekrivaju i tvore oblike koji se ne mogu otkriti standardnim postupcima. Primarno je iz kompozitnog spektra potrebno razdvojiti spektre komponenata kako bi se mogla odrediti radijalna brzina određene komponente koja nam kasnije služi za određivanje mase. Osim toga po-

moću spektra se može odrediti i sastav atmosfere i temperature planeta. Da bi sve to bilo moguće potrebno je primjeniti složene metode izoliranja spektara pojedinih komponenata pomoću spektralnog razdvajanja i raspetljavanja. Tehnika spektralnog razdvajanja podrazumijeva rekonstrukciju spektara zvijezde i planeta uz odgovarajuće svjetlosne karakteristike, vremenski slijed kompozitnog spektra i odgovarajuće radijalne brzine [51]. Tehnika spektralnog raspetljavanja znači da iz razdvojenog spektra komponente možemo odrediti skup parametara dvojnog sustava. Kao što se vidi očito je da se ovakva metoda može najbolje primjeniti na planete tipa vrućeg Jupitera koja svojom masom utječe na dvojni sustav, te ima dovoljan tok zračenja što nije slučaj kod hladnijih planeta. Za razilku od standardnih metoda kao što su namještanje dobro definiranih linija ili tehnike koja koristi procjenjene predloške spektara od kojih se oduzima kompozitni spektar, ova metoda omogućuje da se izravno bez namještanja i bez uporabe spektralnih predložaka dođe do vrijednih informacija. No ova metoda je računski zahtjevna, te zahtjevna odličan omjer signala i šuma (S/N), te veliki broj mjerenja s kvalitetnim spektrima.

Metoda razdvajanja kompozitnih spektara koristi se za dvojne zvijezde. Ovu metodu je stoga moguće primjeniti i na dvojni sustav zvijezda-planet jer omogućuje detaljno spektroskopsko istraživanje individualne komponente. Cilj ovog rada je upravo određivanje donje granice za omjer toka zračenja između zvijezde i ekstrasolarnog planeta koji bi se ovom metodom još uvijek mogao pouzdano izolirati.

Prikupljanjem podataka pomoću teleskopa i spektrografa dobiva se *N* opaženih spektara koji u sebi sadržavaju iste podatke. Te opažene spektre promatramo kao vektore i zapisujemo ih kao $y_j, j = 1, ...N$. Opažene vektore zajedno možemo zapisati kao jedan ulančani vektor **y**. Definiramo sustav linearnih jednadžbi koje možemo zapisati u obliku:

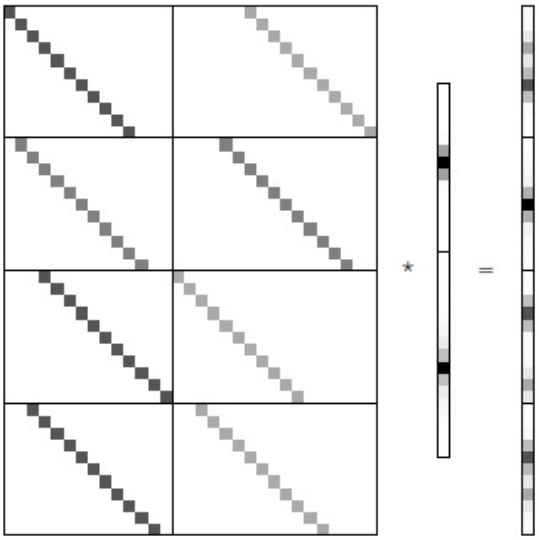
$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{x} = \mathbf{y} \tag{6.1}$$

Na lijevoj strani jednadžbe nalazi se matrica **A** koju množi vektor **x** . Vektor **x** je ulančani vektor koji se sastoji od x_k vektora. Indeks k označava broj komponenata u kompozitnom spektru i u našem slučaju su to dvije komponente,zvijezda i planet, tako da je $k = 1, 2$. Matrica **A** predstavlja amplitude pojedine komponente, te se sastoji od $\mathbf{A}_{jk}$ članova. Sustav linearnih jednadžbi stoga možemo zapisati i u matričnom obliku:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}_{11} & \mathbf{A}_{12} \\ \vdots & \vdots \\ \mathbf{A}_{N1} & \mathbf{A}_{N2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{x}_1 \\ \mathbf{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{y}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{y}_N \end{bmatrix} \tag{6.2}$$

Matrični element **A** u sebi sadrži informacije o radijalnim brzinama komponenti, te o svjetlosnom doprinosu pojedine komponente. Svjetlosni faktor l_{kji} nam govori koliki je doprinos kontinuuma komponente k kontinuumu kopozitnog spektra opaženog na valnoj duljini λ_{ji} u ovisnosti o vremenu t_j. Zbog pojednostavljenja

uzeti ćemo da je svjetlosni faktor neovisan o valnoj duljini i vremenu, tako da svjetlosni faktor samo ovisi o broju komponenata, te ga pišemo samo kao l_{kj}. Radijalna brzina komponente k u vremenu t_j označava se sa β_{kj}. Svjetlosni faktor i radijalne brzine definiraju zapetljanost kompozitnog spektra i zbog toga moraju biti poznati. Svjetlosni faktor (l_{kj}) može biti određen iz analize svjetlosne krivulje, dok radijalne brzine (β_{kj}) se mogu iz kompozitnog spektra odrediti iz namještanja Gaussijana ili pomoću kros-korelacijske tehnike. Ono što mi želimo odrediti iz matrice (6.2) tj. sustava linearnih jednadžbi su čisti spektri $\mathbf{x}_k$ pojedine komponente k. To možemo odrediti tako da odredimo inverz matrice **A**. Ova matrica obično nije kvadratna te zahtjeva posebne metode rješavanja kao što su dekompozicija singularne vrijednosti.



Slika 6.2: Prikaz gustoće linearne jednadžbe (6.1).

Primjer postupka razdvajanja spektara komponenata iz vremenskog niza opaženih spektara ilustriran je na slici 6.2. Na slici 6.2 su prikazana četiri kompozitna spektra za dvije komponente tj. za dva spektra (x_k). Vektori **x** moraju biti duži od opaženih vektora **y** kako bi se mogli uočiti Dopplerovi pomaci. Zbog toga matrica **A** mora imati više redaka nego stupaca. Sama matrica **A** prikazana je lijevo i ona je modelirana umnoškom radijalne brzine (β_{kj}) i svjetlosnog faktora (l_{kj}), tj. matrica **A** u sebi sadrži informacije koje je potrebno izdvojiti iz opaženog spektra **y** kako bi se dobila dva čista spektra komponenti $\mathbf{x}_k$. Indeks j nam označava broj opaženog spektra, te je poželjno da je on što veći, a indeks k nam označava broj komponenti u sustavu i u našem slučaju su to dvije komponente zvijezda i planet. Zbog toga naša matrica ima više stupaca nego redaka. Vrijednosti radijalne brzine i svjetlosnog faktora koje su korištene za ovu sliku su:

$$(\beta_{kj}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -2 & -1 \\ -2 & 0 & 4 & 2 \end{bmatrix}, (l_{kj}) = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & \frac{1}{2} & \frac{2}{3} & \frac{2}{3} \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{2} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \end{bmatrix}. \tag{6.3}$$

Na ovom jednostavnom primjeru može se vidjeti kako funkcionira razdvajanje kompozitnih spektara. Normalno ovaj proces zahtjeva jaku računalnu podršku. Potrebno je pomoću računalnog programa napraviti inverz matrice, ali pošto ova matrica u realnim uvjetima ima puno opaženih spektara zahtjeva je za veličinu memorije.

Nakon što se u postupku razdvajanja dobiju individualni spektri pojedine komponente potrebno je renormalizirati razdvojene spektre u postupku raspetljavanja. Potrebno ih je pomnožiti faktorom obrnuto proporcionalnim koliko svaka komponenta doprinosi ukupnom toku zračenja. Tehnika raspetljavanja kompozitnih spektara nije usmjerena samo na razdvajanje spektara već i na određivanje parametara orbite dvojnog sustava zvijezda-planet. Prilikom te tehnike koeficijenti β_{kj} i l_{kj} su slobodni parametri modela. To je bolje ako su radijalne brzine točnije i one predstavljaju kritični faktor o tome koliko će raspetljavanje biti uspješno. Poznavanje radijalnih brzina se može ograničiti na rješavanje problema dva tijela koje je riješeno u prethodnom poglavlju. Na taj način dobijemo ovisnost radijalne brzine o orbitalnim parametrima koji tada postaju slobodni parametri modela. Ako je riječ o eliptičnoj putanji onda su to ekscentricitet, duljina perihela, globalni fazni pomak, poluamplituda radijalne brzine. Ako je putanja kružna onda su to samo poluamplituda krivulje radijalne brzine.

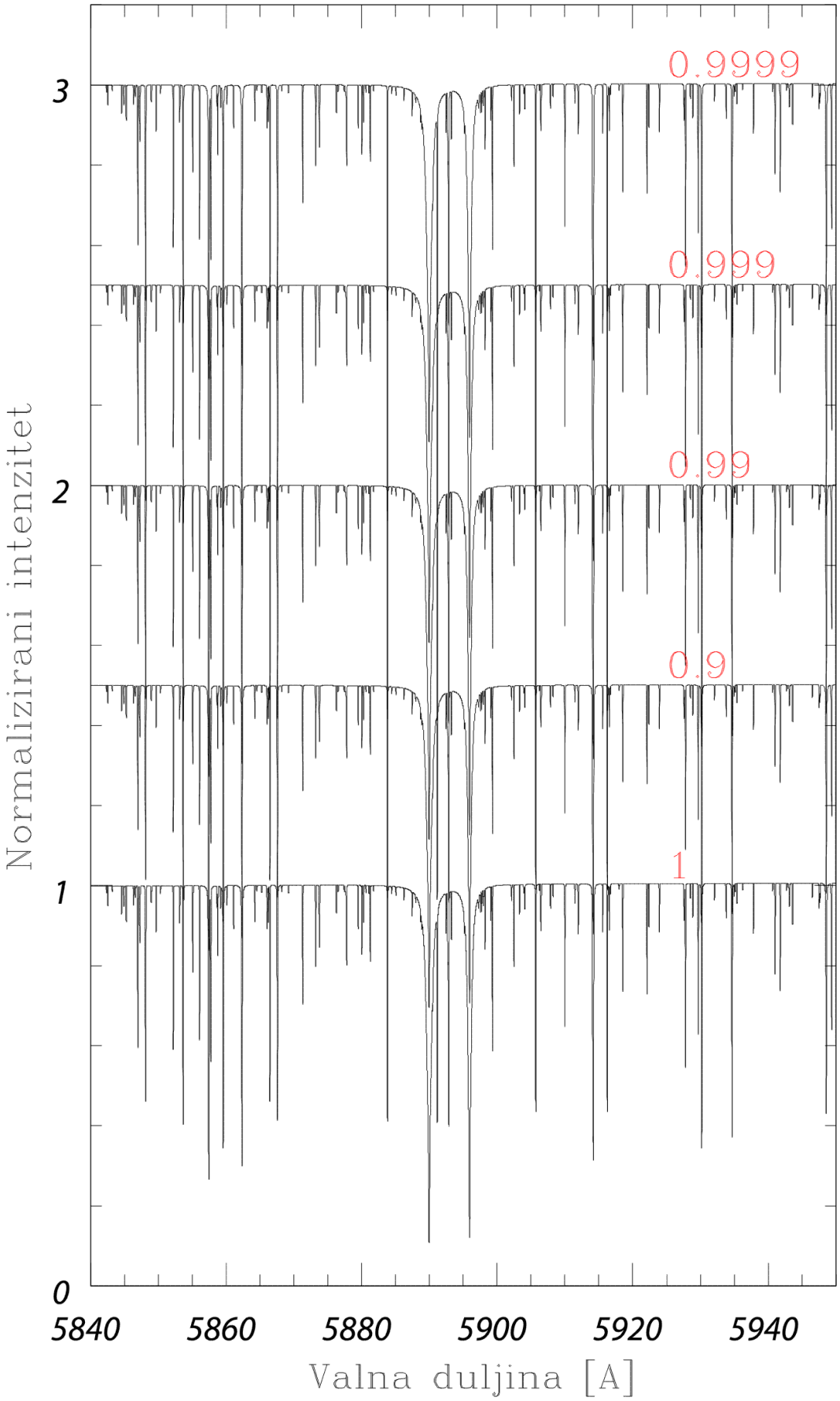
7 Numerička simulacija spektroskopske detekcije ekstrasolarnih planeta

Cilj diplomskog rada je numerička simulacija spektralne detekcije ekstrasolarnih planeta iz serije kompozitnih spektara zvijezde i planeta. U numeričkoj simulaciji sintetizirati će se kompozitni spektri za više modela. Smisao modela je različit udio svjetla ekstrasolarnih planeta u sustavu zvijezda-planet. S obzirom da je nepoznat udio svjetla ekstrasolarnih planeta u sustavu zvijezda-planet simulirani kompozitni spektri pripremljeni su za niz omjera(1:100, 1:1000, 1:10000). Prvi model u kojem je udio svjetla planeta 1:100 služi kao test metode. Planet koji bi imao takav udio svjetlosti u ukupnom toku zračenja nije pronađen, ali će nam u ovom slučaju poslužiti kao ilustracija i provjera metode. Za svaki različit udio svjetla sintetizirano je po 100, 500 i 1000 ulaznih kompozitnih spektara. [51]

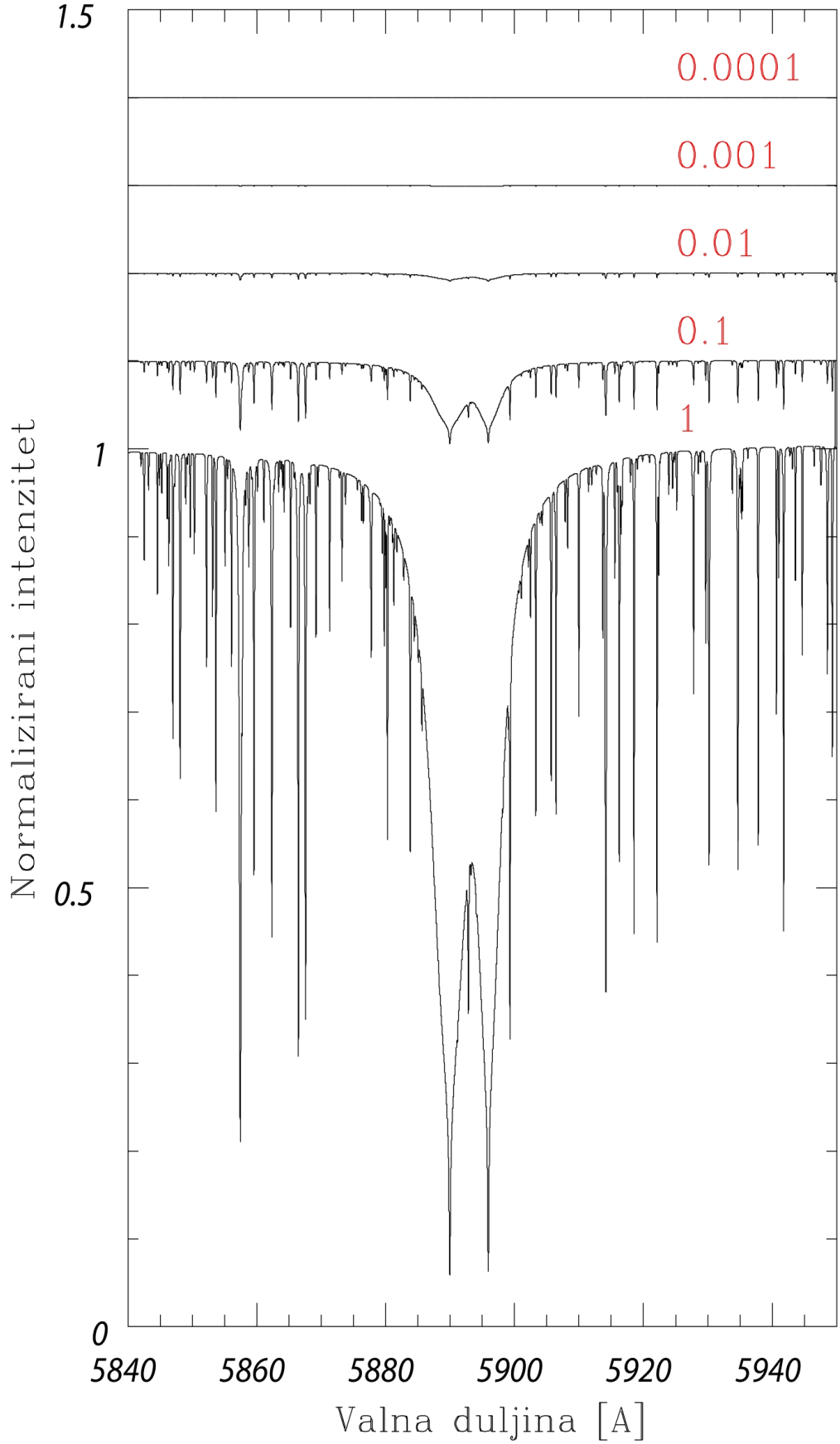
Na slici 7.1 i slici 7.2 prikazani su teorijski spektri koji su sukladno udjelu svjetla zvijezde odnosno planeta umanjeni za proporcionalnu vrijednost. Iz teorijskih ulaznih spektara konstruirane su serije kompozitnih spektara za različite omjere svjetla i za različit broj ulaznih spektara. Na slici 7.2 može se vidjeti smanjenje dubine spektralnih linija kako se smanjuje udio svjetla planeta. Teorijski spektri u kojima planet utječe samo 0.001 i 0.0001 čine se bez povećanja kao gotovo ravne linije bez spektralnih linija. Cilj metode je da se može u kompozitnom spektru odrediti spektar planeta koji ima tako slabo vidljive spektralne linije.

Serija ulaznih kompozitnih spektara rađena je s obzirom na orbitalne elemente. Za sve modele uzeta je kružna orbita tako da račun bude manje zahtjevan jer se ne uzima u obzir eksentricitet orbite. U modelima poluamplituda radijalne brzine zvijezde iznosi $K_* = 50\ \mathrm{m/s}$ i poluamplituda radijalne brzine planeta iznosi $K_\mathrm{P} = 50\ \mathrm{km/s}$. Za takav sustav, orbitalne faze odnosno krivulje radijalnih brzina prikazane su na slici 7.3. Na slici 7.3a plava linija predstavlja raspodjelu brzina za planet, a crvena linija za zvijezdu. Zbog velike razlike u brzinama, crvena linija je ravna. Na drugoj slici 7.3b gdje je skala brzina puno manja može se vidjeti raspodjela brzina i za zvijezdu. Iz krivulja se može vidjeti da su zvijezda i planet u protufazi. Za različite modele tj. za različit ulazni broj spektara u numeričkim simulacijama uzete su ravnomjerno raspoređene orbitalne faze. Za sintezu 100 ulaznih kompozitnih spektara raspodjela je svaka stotinka ili 0.01 dio orbitalne faze, za 500 spektara bilo je potrebno uzeti 0.02 dio, a za 1000 spektara svaki 0.001 dio orbitalne faze.

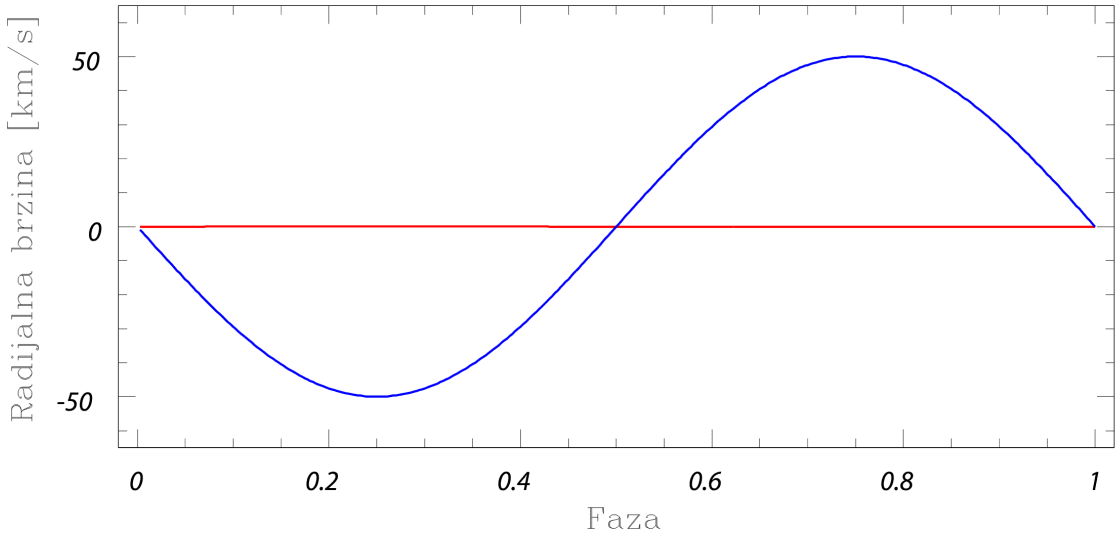
Primjer takve serije kompozitnih spektara prikazana je na slici 7.4 za omjer svjetla 1:10 i za 10 ulaznih spektara. Za raspetljavanje kompozitnih spektara korišten je računalni program FDBinary koji je opisan u radu [52]. Na slici 7.4 gdje planet doprinosi 10% ukupnom udjelu svjetla možemo vidjeti da se u već u kompozitnim spektrima uočava prisustvo planeta, a metoda raspetljavanja daje spektar koji je identičan teorijskom. No ovaj slučaj je samo ilustrativan jer planet sa tolikim udjelom svjetla nije pronađen. Takva serija kompozitnih spektara raspetljana je i re-



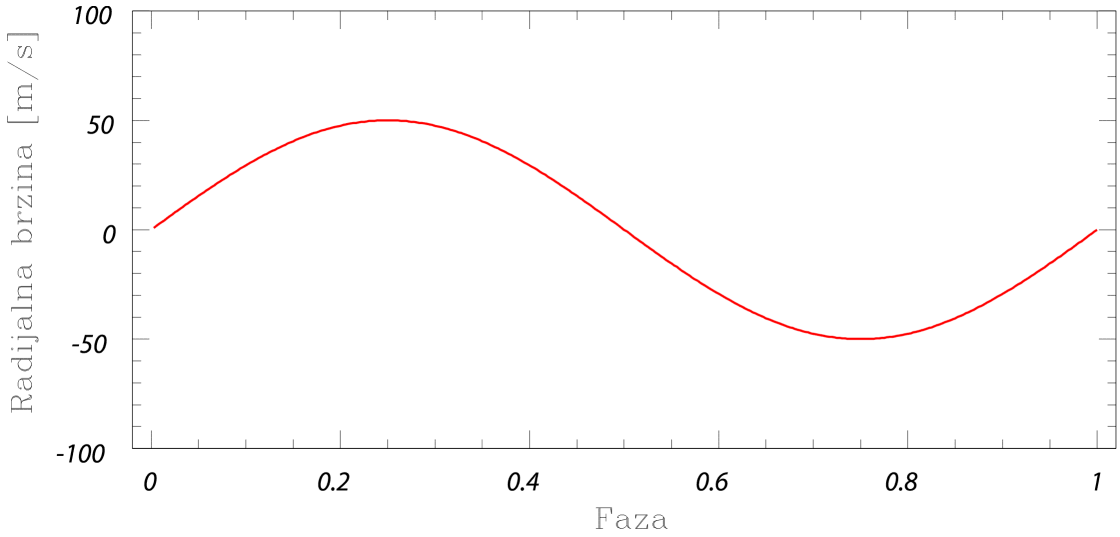
Slika 7.1: Teorijski spektar za zvijezdu.



Slika 7.2: Teorijski spektar za planet.



(a)

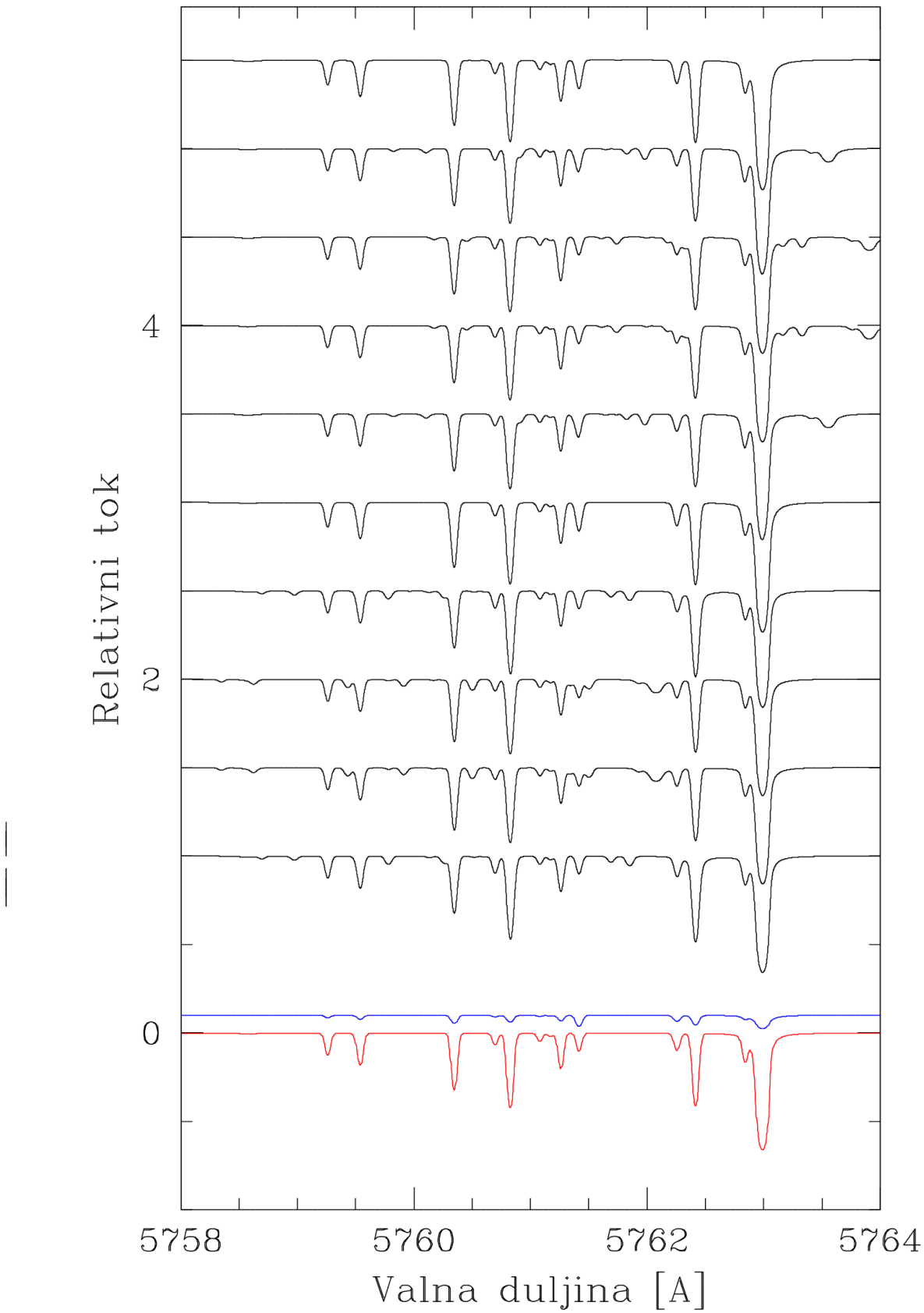


(b)

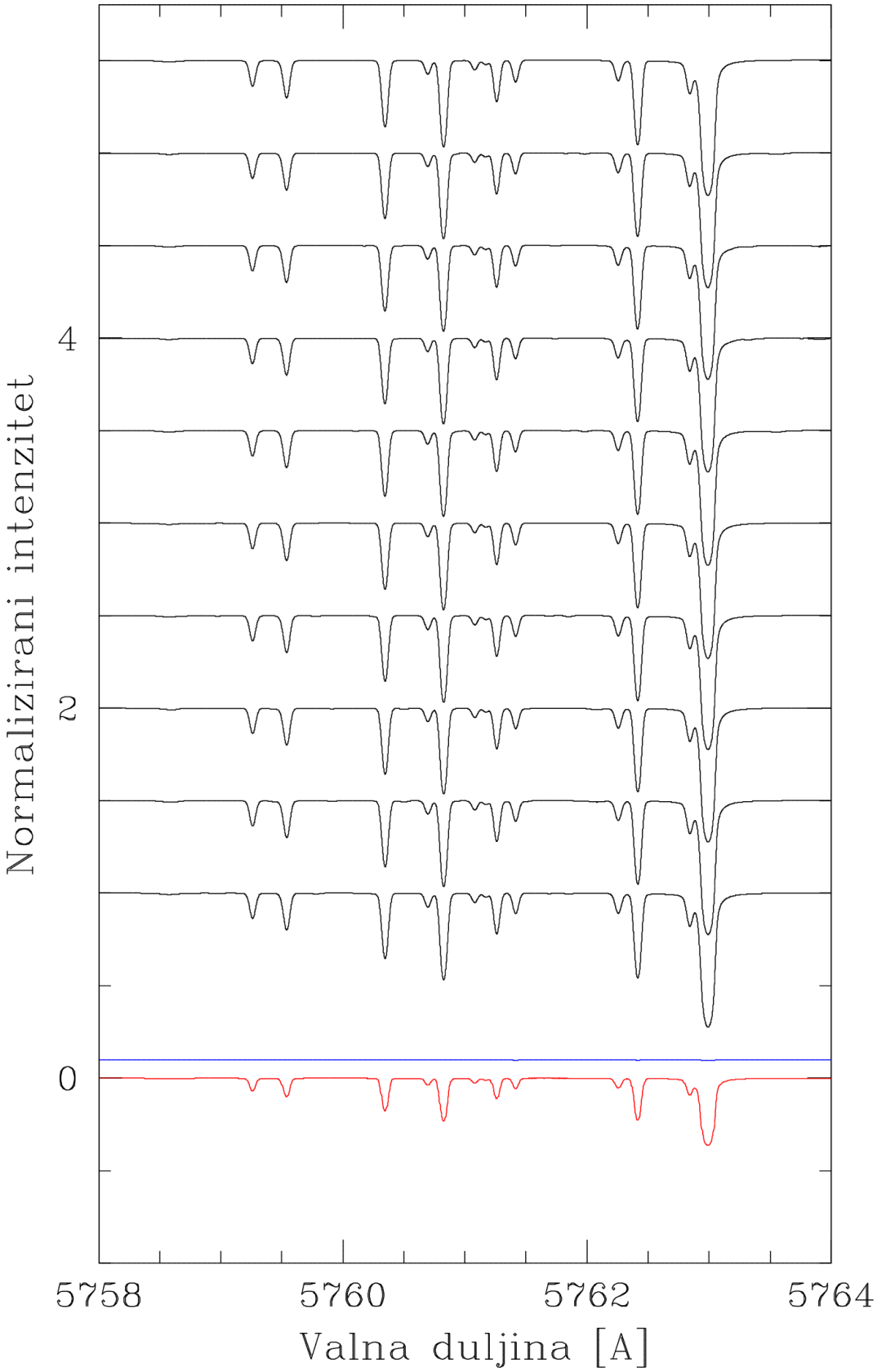
Slika 7.3: Krivulje radijalnih brzina u ovisnosti o orbitalnoj fazi.

konstruirani su ulazni spektri, crveno je spektar zvijezde, a plavo je spektar planeta. Rekonstruirani spektri u potpunosti odgovaraju ulaznim spektrima zvijezde i planeta.

Rezultat jasno nije neočekivan jer je upotreba ove metode omogućila određivanje zvijezde u dvojnom sustavu zvijezda čiji je udio svjetla iznosio samo 1% [53]. S obzirom da su očekivanja da se najveći dobrinos kreće oko 1:1000 puta i manje onda su simulacije rađene za 1:100, 1:1000 i 1:10000 udjela svjetla ekstrasolarnih planeta. Napravljena je simulacija i za slučaj kada je doprinos pratioca samo 1%, te je takav slučaj prikazan na slici 7.5. Metoda je kao što se i očekivalo opet omogučila rekonstrukciju ulaznih spektara, ali je sada teorijski spektar slabije uočljiv,te je za bolju analizu potrebniji veći broj ulaznih kompozitnih spektara. Slučajevi na slikama 7.4 i 7.5 su akademski slučajevi gdje su bez problema rekonstruirani ulazni spektri zvijezde i planeta.



Slika 7.4: Serija od 10 ulaznih kompozitnih spektara za udio sjaja planeta 10%.

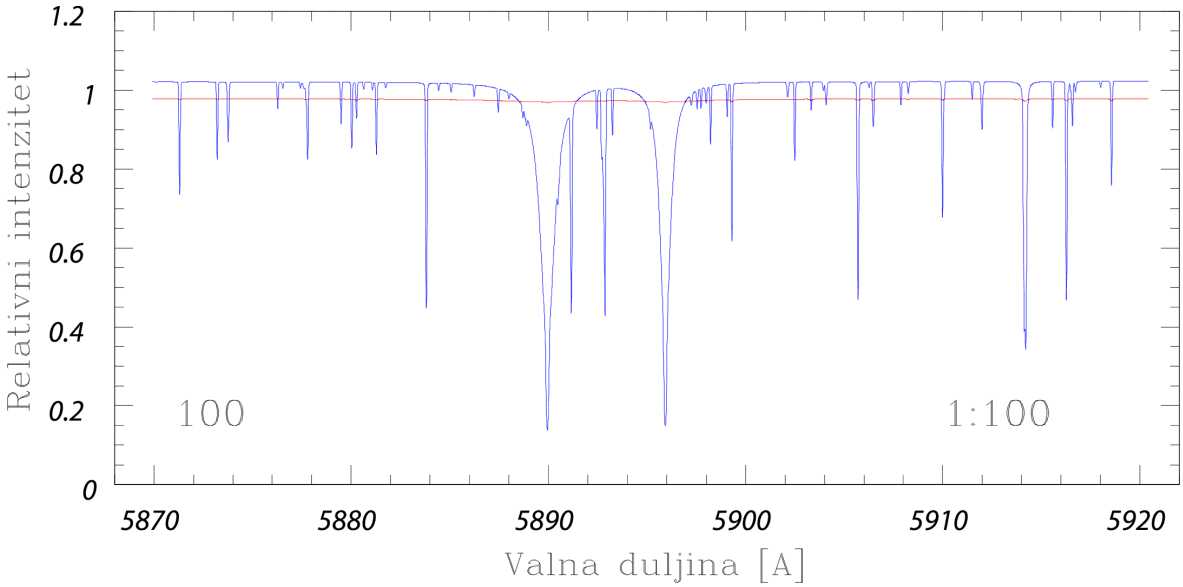


Slika 7.5: Serija od 10 ulaznih kompozitnih spektara za udio sjaja planeta 1%

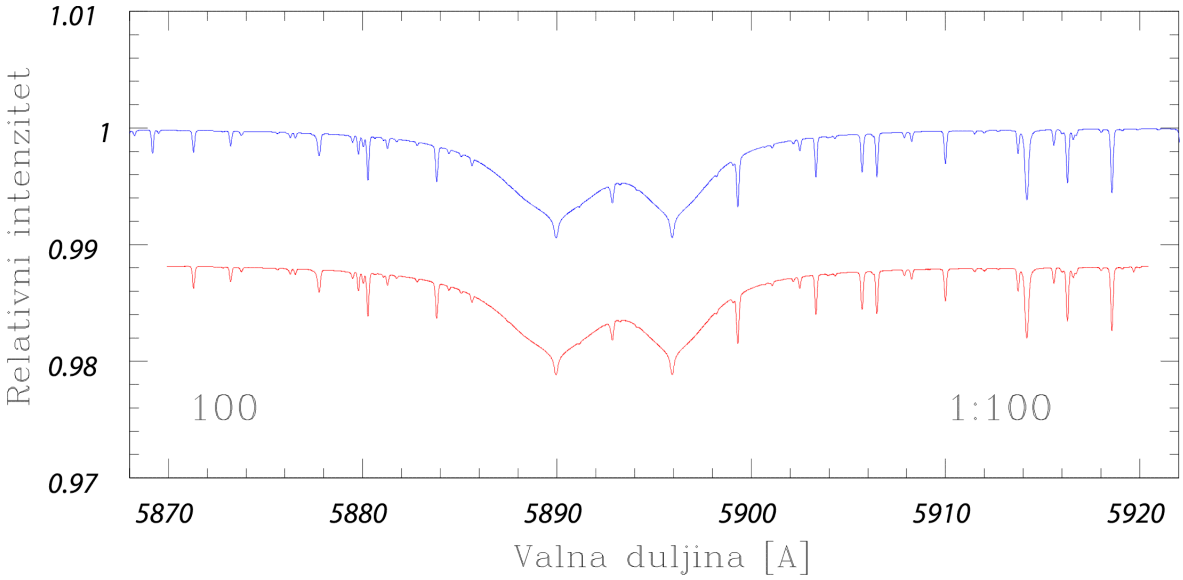
Sada prelazimo na stvarne slučajeve gdje je udio svjetlosti planeta manji od 1:1000. Serije kompozitnih ulaznih spektara pripremljene su za uzorke od 100, 500 i 1000 spektara ravnomjerno raspoređnih po fazama. To predstavlja idealizirani slučaj jer zbog duljih perioda planeta to nije moguće snimiti u realnim uvjetima. Drugo pojednostavljenje koje je napravljeno je da u ovim teorijskim ulaznim spektrima nije dodan šum, tj. omjer signal-šum je beskonačan. Rezultati raspetljavanja, računalnim programom FDBinary, za sve navedene situacije pokazali su uspješnost metode čak i u slučajevima vrlo slabog signala planeta. Spektar planeta rekonstruiran čak i u najmanje povoljnim slučajevima za omjer 1:10000 sa 100 ulaznih spektara. To nije bilo očekivano.

Rezultati za 100 ulaznih kompozitnih spektara za različite udjele sjaja planeta prikazani su na slikama 7.6, 7.7 i 7.8. Na gornjoj slici 7.6a prikazan je segment spektra koji je raspetljan od 5870 Å do 5920 Å. Plavom bojom prikazan je raspetljani spektar zvijezde kojemu udio sjaja iznosi 99%, a crveni je rekonstruirani spektar planeta sa udjelom sjaja od 1%. S obzirom da se rekonstruirani spektar planeta na slici 7.6a gotovo ne vidi, donja slika 7.6b prikazuje rekonstruirani spektar u većoj skali. Na slici 7.6b plavom bojom je označen ulazni spektar, dok je crvenom bojom označen rekonstruirani spektar. Oni moraju biti jednaki ako je rekonstrukcija jednaka, što je ovdje slučaj. To pokazuje da je metoda uspješno uspjela izdvojiti spektar planeta iz kompozitnog spektra. Isto vrijedi i za ostale spektre na slikama 7.7 i 7.8, gdje je slika b samo prikaz u većoj skali kako bi se bolje uočile spektralne linije.

Rezultati za 500 ulaznih kompozitnih spektara za različite udjele sjaja planeta prikazani su na slikama 7.9, 7.10 i 7.11. Kako smo uspjeli pokazati da se već i sa 100 ulaznih spektara može raspetljati spektar planeta ovo je samo ilustracija kako sa više ulaznih spektara možemo dobiti bolje i preciznije rezultate. Također prikaz spektar na slikama b je u većoj skali kako bi se mogle lakše uočiti spektralne linije. Prikaz za 1000 ulaznih spektara nije naveden jer se metoda već pokazala uspješnom i sa 10 puta manjom količinom ulaznih spektara.

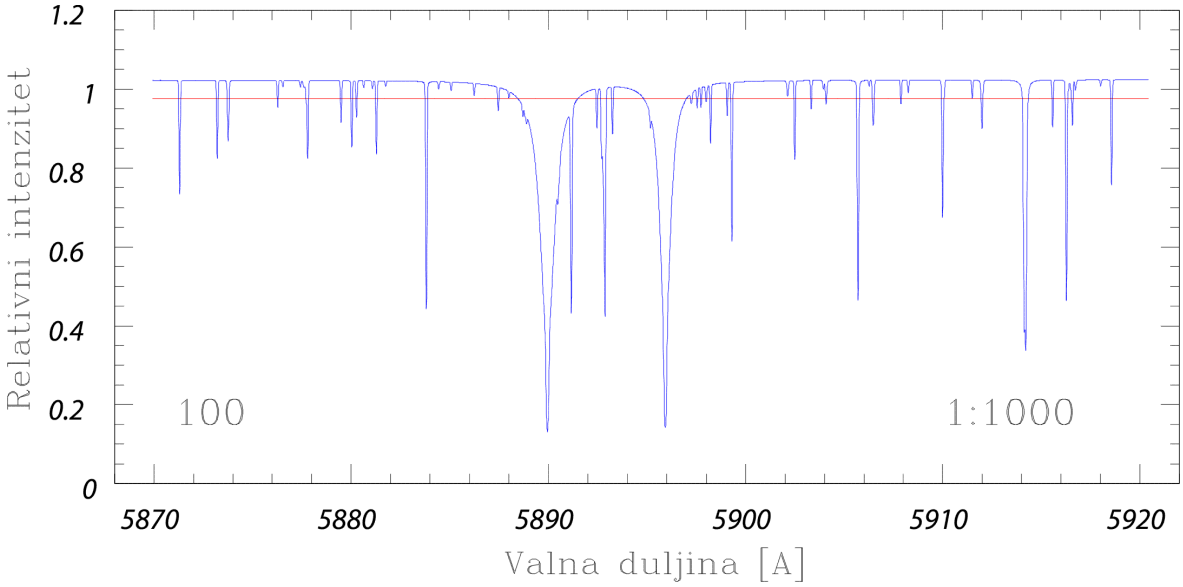


(a)

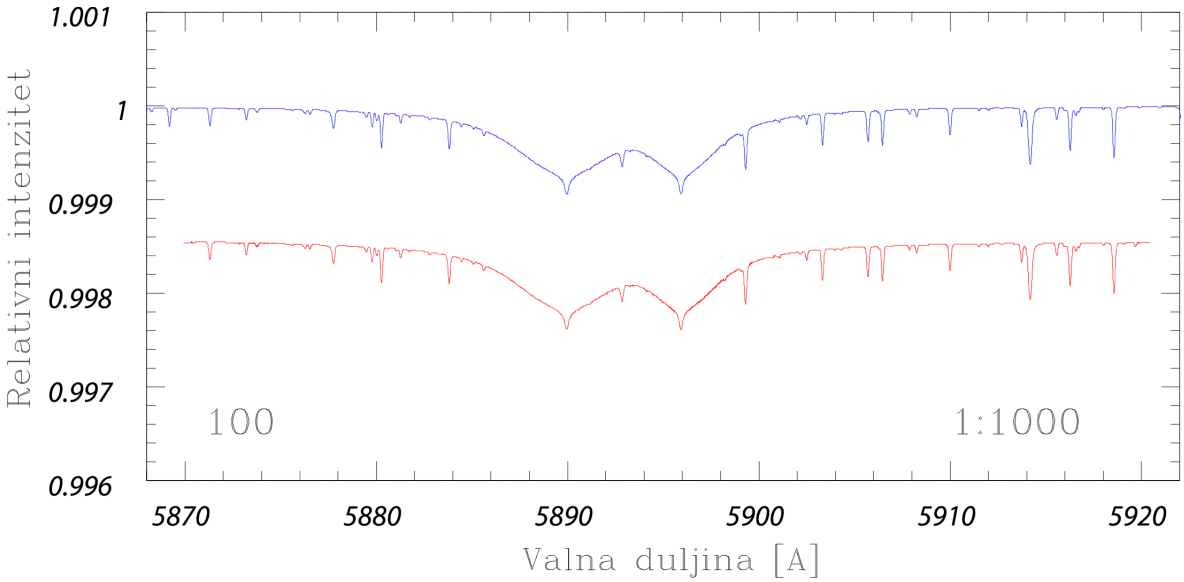


(b)

Slika 7.6: Rezultati raspetljavanja za 100 ulaznih kompozitnih spektara za udio sjaja planeta od 1%.

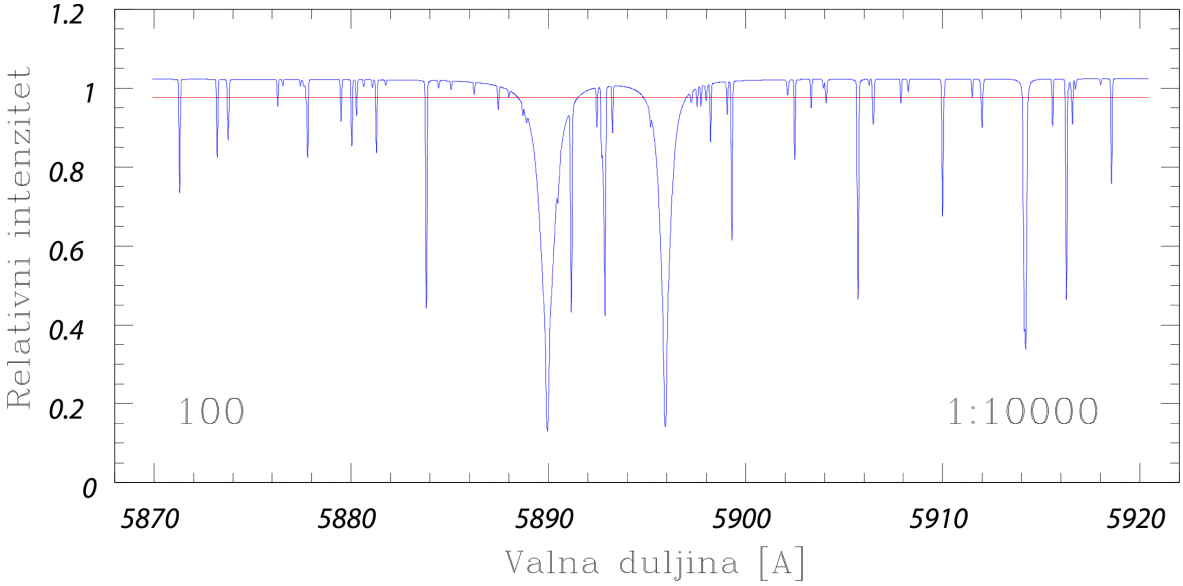


(a)

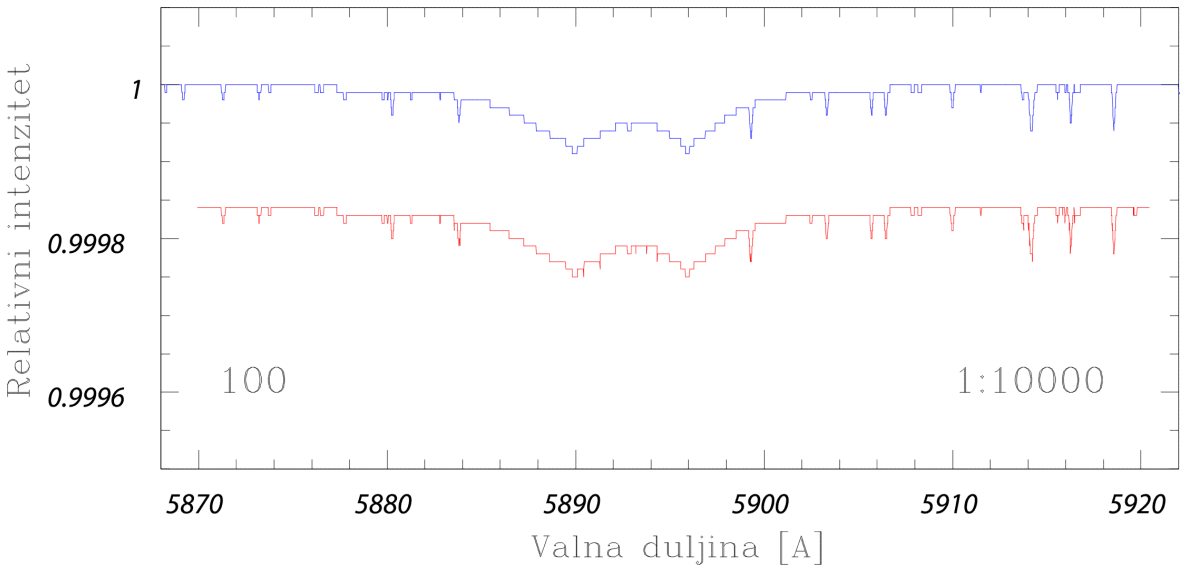


(b)

Slika 7.7: Rezultati raspetljavanja za 100 ulaznih kompozitnih spektara za udio sjaja planeta od 0.1%.

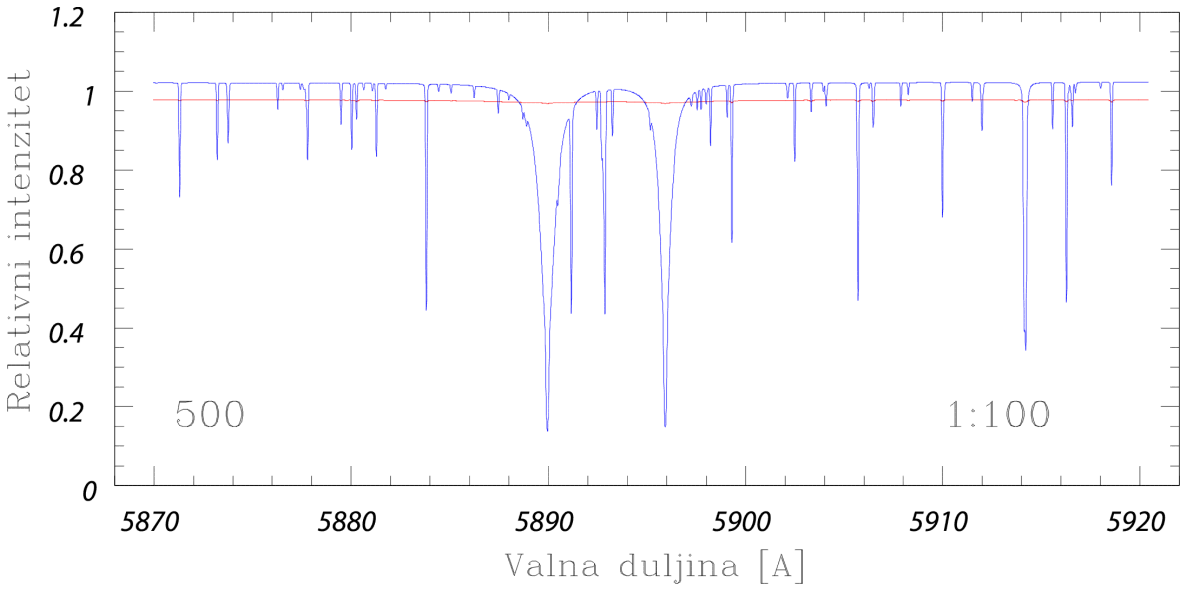


(a)

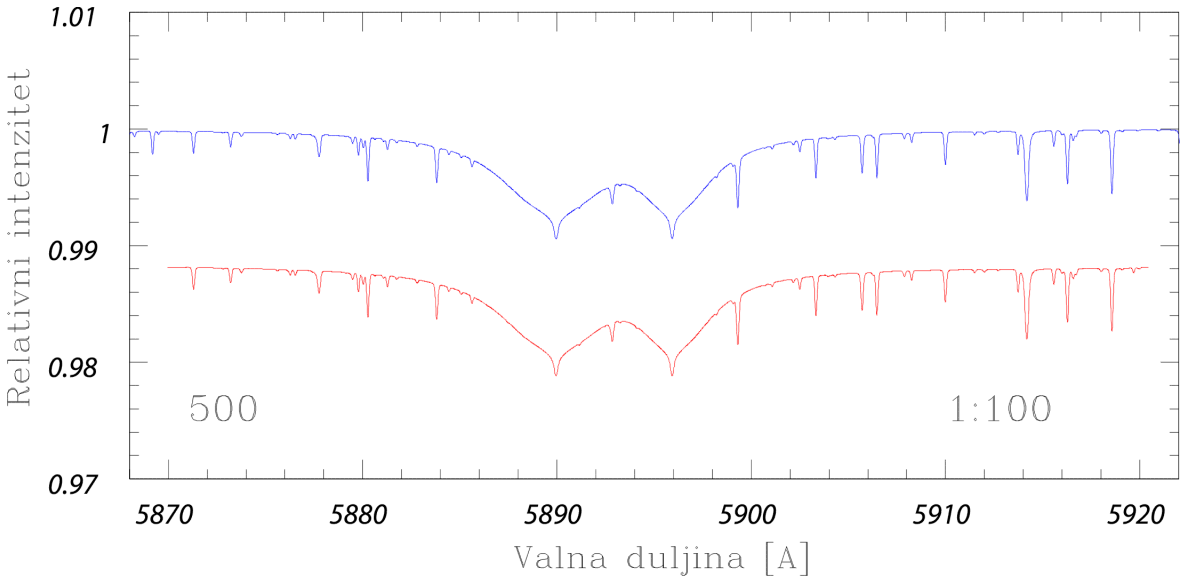


(b)

Slika 7.8: Rezultati raspetljavanja za 100 ulaznih kompozitnih spektara za udio sjaja planeta od 0.01%.

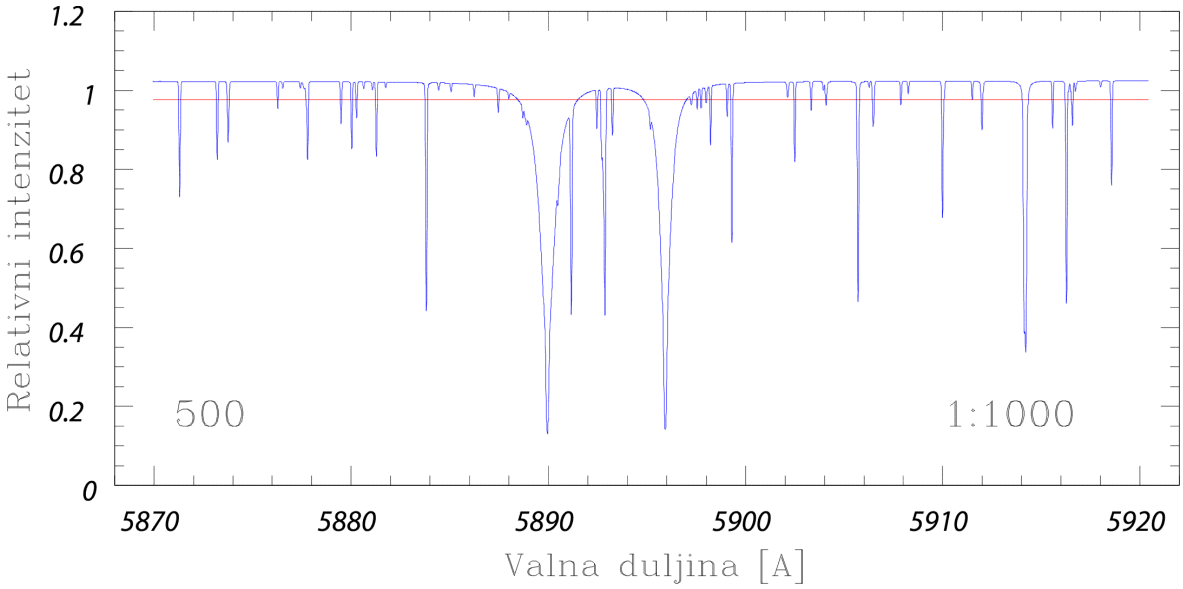


(a)

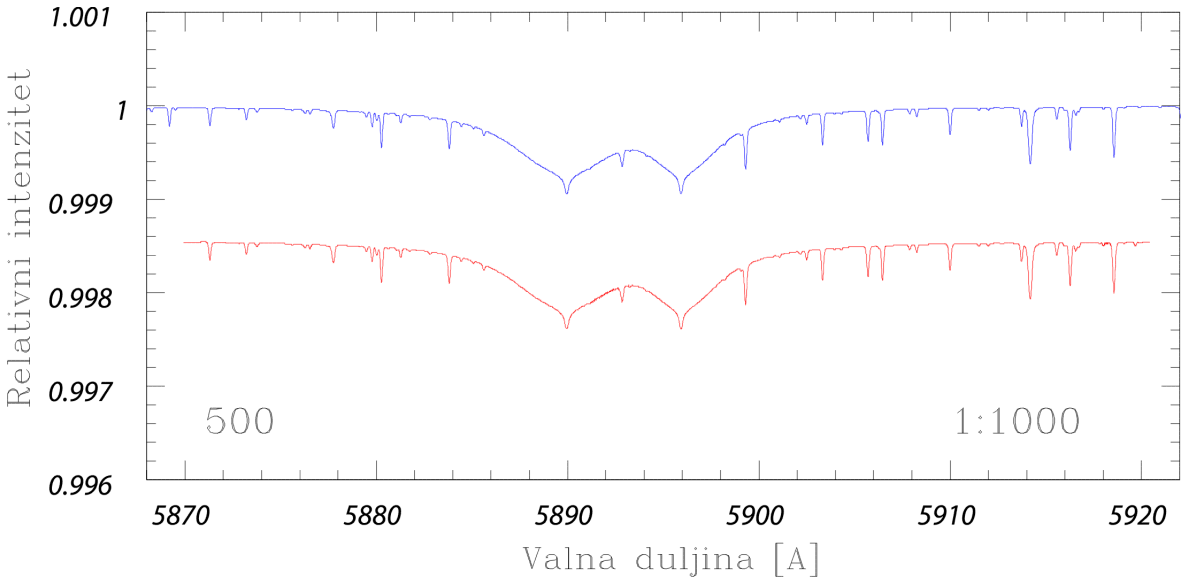


(b)

Slika 7.9: Rezultati raspetljavanja za 500 ulaznih kompozitnih spektara za udio sjaja planeta od 1%.

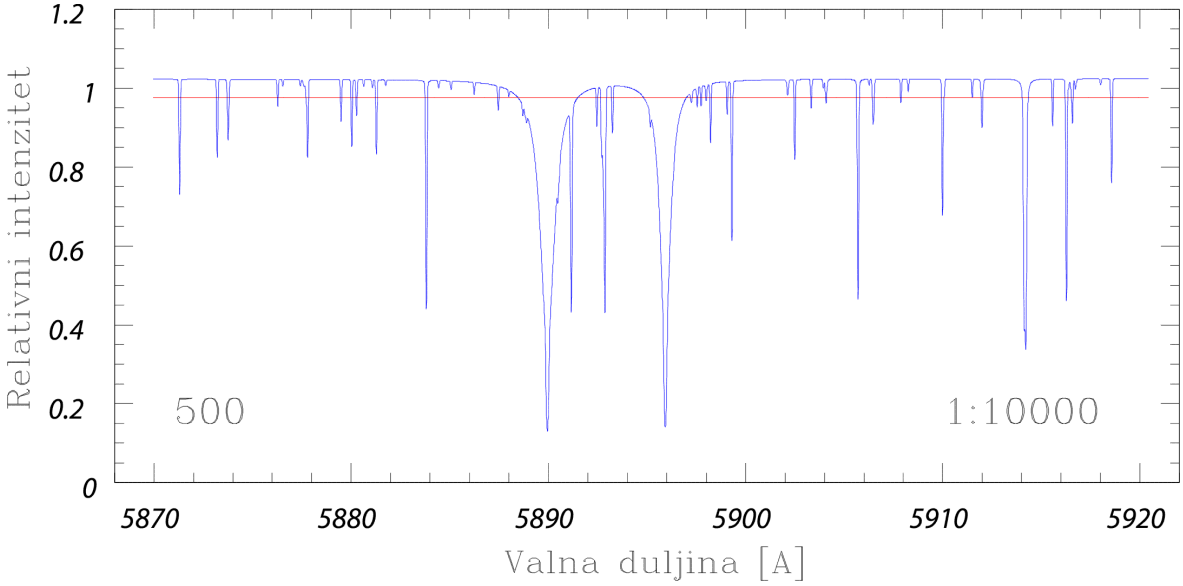


(a)

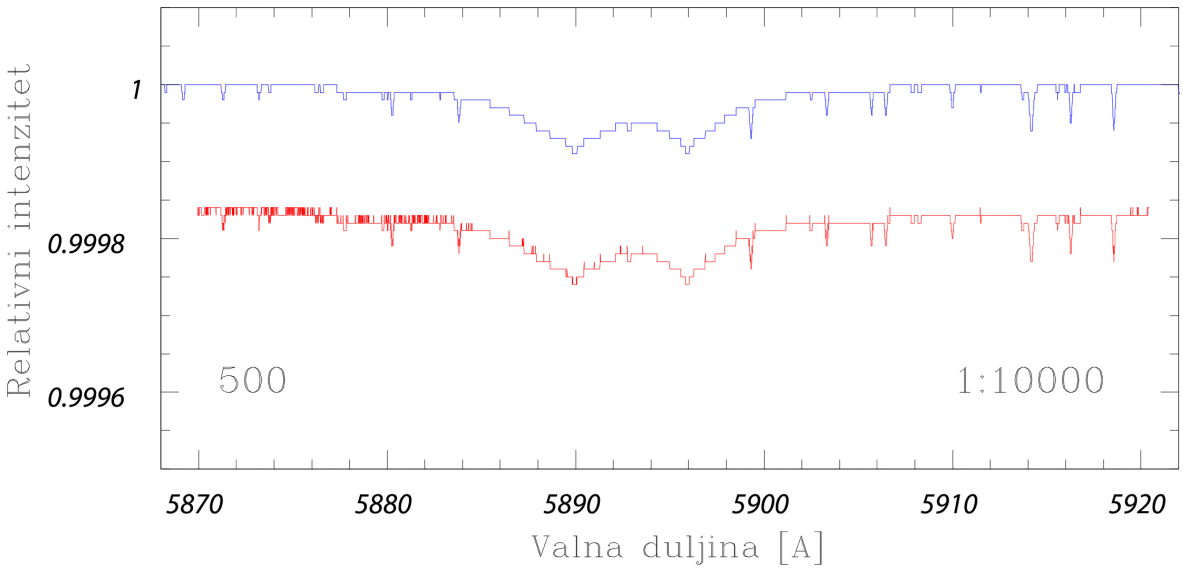


(b)

Slika 7.10: Rezultati raspetljavanja za 500 ulaznih kompozitnih spektara za udio sjaja planeta od 0.1%.



(a)

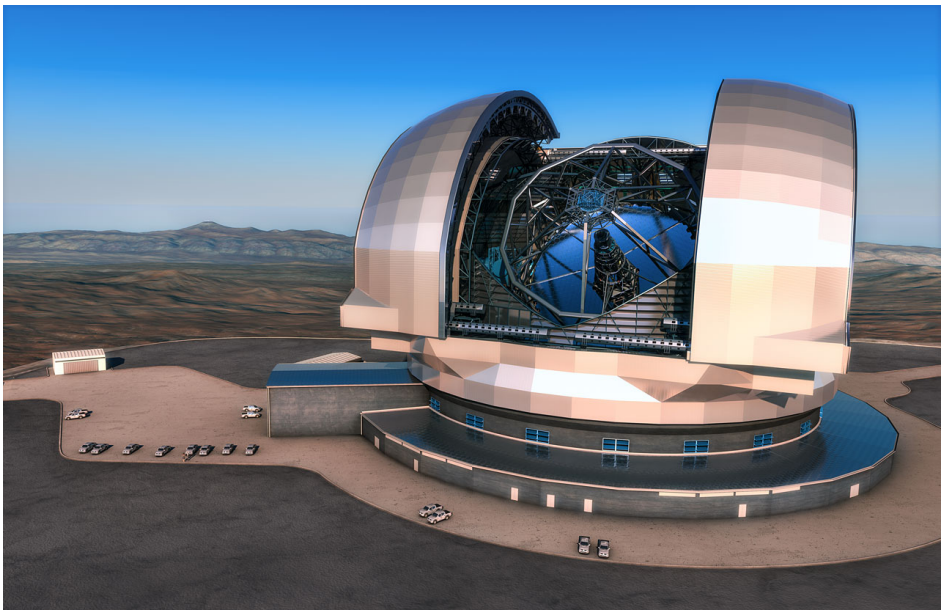


(b)

Slika 7.11: Rezultati raspetljavanja za 500 ulaznih kompozitnih spektara za udio sjaja planeta od 0.01%.

8 The European Extremely Large Telescope (E-ELT)

Tema ovog diplomskog rada poniknula je iz zanimanja hoće li nam buduće tehnologije moći dati odgovor na brojna otvorena pitanja kao što je mogućnost direktnog određivanja mase ekstrasolarnog planeta. Jedna od takvih visoko tehnoloških naprava je svakako budući E-ELT (The European Extremely Large Telescope) koji je pokrenut od strane European Southern Observatory (ESO). ESO je međunarodna institucija za astronomska istraživanja, poput CERN-a u fizici visokih energija. Observatorij raspolaže s brojnim teleskopima koji se nalaze u pustinji Atacama u Čileu. Ponukani dosadašnjim uspjesima ESO je otpočeo izgradnju dosad najvećeg zemaljskog teleskopa s promjerom primarnog zrcala od 39 metara (slika 8.1).

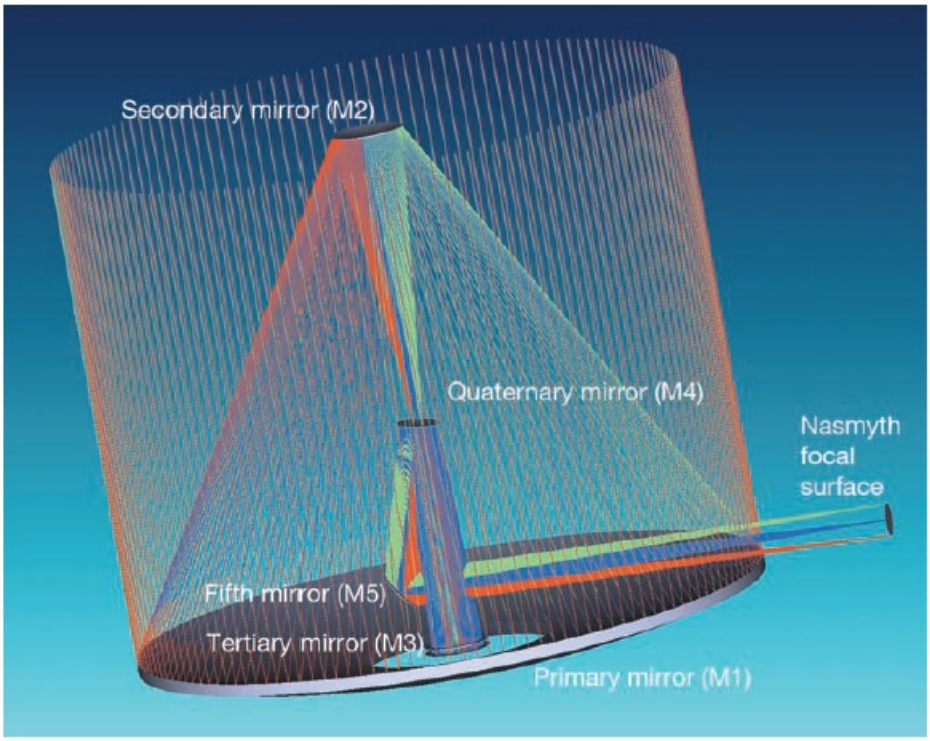


Slika 8.1: Ilustracija kako bi trebao izgledati E-ELT [54].

Za ovako veliki teleskop izuzetno je važno odabrati pravu lokaciju koja zahtjeva da bude na visokom suhom mjestu. Stručnjaci su odabarali mjesto Cerro Armazones u pustinji Atacama. To je planina visine 3060 metara u centralnom dijelu Atacama pustinje u Čileu. Udaljeno je 130 km južno od grada Antofagasta i 20 km od Cerro Paranala gdje je već smješten ESO Very Large Telescope (VLT). To će omogućiti da se novi ekstremno veliki teleskop spoji s postojećim observatorijem u Paranalu i na taj način lakše pristupiti postojećim resursima. To će u konačnici smanjiti troškove gradnje, ali i daljnjeg rada postrojenja. Troškovi gradnje prema procjenama i projektima premašiti će 1 milijardu eura. Gradit će se u dvije faze, gdje će se u prvoj fazi dovršiti kupola i postaviti teleskop, a u drugoj fazi će se nadograditi sa svim najmodernijim uređajima. 13. listopada 2011. godine potpisan je sporazum između ESO i Čilea o donaciji $189\ \mathrm{km}^2$ zemljišta i prava korištenja na 50 godina. 27. listopada 2013. predsjednik Čilea Sebastián Piñera predao je dokumentaciju i projekt E-ELT je mogao službeno početi. Iduće godine 19. lipnja 2014. obilježen je svečani početak

radova. Procjenjuje se da će radovi trajati 11 godina i da će "prvo svjetlo" (*First light*) biti zabilježeno 2024. godine.

E-ELT je reflektorski teleskop koji se sastoji od pet zrcala prikazanih na slici 8.2. U osnovi je to Nasmyythova konstrukcija pri kojoj se snop svjetlosti zakreće prije nego što ponovno dođe do primarnog zrcala. Prva tri zrcala se nalaze na glavnoj osi teleskopa i služe za sužavanje snopa svjetlosti i dobivanja kvalitetne slike. Preostala dva zrcala su sklopiva i ravna kako bi usmjerili snop svjetlosti prema Nasmythovom fokusu. Primarno zrcalo (M1) u promjeru ima 39.3 m i ima žarišnu duljinu od oko 34.5 m ($f/0.88$). U središtu primarnog zrcala nalazi se centralna praznina u promjeru od 11 metara. Sekundarno konveksno zrcalo (M2), veličine 4.1 m vraća snop svjetlosti kroz rupu u četvrtom zrcalu na tercijarno zrcalo. Zanimljivost je da rupa u primarnom zrcalu ima veći promjer od bilo kojeg ESO teleskopa postavljenog u Čileu. Tercijarno konkavno zrcalo (M3) u promjeru je veliko 3.7 m i nalazi se u središtu primarnog zrcala. Svjetlost se zatim reflektira na četvrto zrcalao (M4) veličine 2.4 m. To zrcalo je ravno i podešavajuće, te se nalazi pod kutem od 7.7 stupnjeva. Peto zrcalo (M5) je ravno zrcalo, eliptičnog oblika ($2.6m \times 2.1m$) koje usmjerava snop svjetlosti prema Nasmythovom fokusu. Izlazi snop svjetlosti ima fokalnu dužinu od $f/17.5$. Sama konstrukcija teleskopa imati će masu od oko 3000 tona. Raspon valnih duljina koji će se moći analizirati pomoću ovog teleskopa kreću se od optičkog dijela spektra pa sve do srednje infracrvenih valnih duljina (2.5 prema $25 - 40$ μm).



Slika 8.2: Shema Nasmythove konstrukcije E-ELT-a [54].

Teleskop će pokrivati dio neba deset puta veći od Mjeseca ($\phi_{Mjesec} \sim 0.5^o$), te će prikupljati 15 puta više svjetla od bilo kojeg postojećeg teleskopa. Tehnologija

izrade zrcala ne može proizvesti tako veliko zrcalo, no to ne bi bilo ni dobro jer se tako veliko zrcalo ne bi moglo kvalitetno kontrolirati i upravljati. Primarno zrcalo ovog teleskopa je najveći zahvat u povijesti gradnje teleskopa. Temeljni element primarnog zrcala je hekasgonsko zrcalo sa reflektirajućim premazom, širine 1.4 m širine i 50 mm debljine. Prazan prostor između svakog segmenta iznosi 4 mm. Primarno zrcalo će se sastojati od 798 segmenata podijeljenih u 6 sektora (svaki sektor po 133 segmenta). Vijek trajanja svakog segmenta je oko 18 mjeseci. Do da tada treba zamijeniti sami segment ili nanesti ponovno reflektirajući premaz. Uz toliki broj segmenata to znači da će se na dnevnoj bazi mijenjati jedan ili dva segmenta. Svaki od segmenata mora biti odlično koreliran i balansiran pomoću aktuatora, te će ovaj teleskop imati više od 5000 aktuatora kako bi svaki od segmenata zrcala bio savršeno podešen i davao najbolju moguću kvalitetu slike, anulirajući tako utjecaj atmosfere i drugih turbulencija koje su kvarile sliku. Samo upravljanje tolikim brojem aktuatora koji mogu promijeniti položaj segmenta i do 1000 puta u sekundi predstavlja golemi informatički napor, te će vjerojatno proći dosta vremena do savršenog ugađanja opreme.

U observatoriju osim teleskopa nalazit će se mnogi dodatni instrumenti pomoću kojih će se prikupljeni signali analizirati i dati konkretne znanstvene informacije o promatranim objektima. HARMONI (*High Angular Resolution Monolithic Optical and Near-infrared Integral filed spectrograph*) je spektrograf koji će moći obrađivati signale valnih duljina $0.47 - 2.45\ \mu\mathrm{m}$, te će se pomoću njega moći promatrati i analizirati planeti i galaksije u ranom svemiru. METIS (*The Mid-infrared E-ELT Imager and spectrograph*) će obrađivati valne duljine $3 - 20\ \mu\mathrm{m}$, te će se pomoću njega moći odrediti fizikalni i kemijski parametri planeta. Početak rada ovog instrumenta je predviđen nešto kasnije, tek nakon 2025. godine. MICADO (Multi-AO Imaging Camera of Deep Observations) zajedno sa instrumentom MAORY (Multi-conjugate Adaptive Optics RelaY) predstavljaju zajedno vrhunac metode izravnog snimanja svemirskih objekata. Kamera MICADO zajedno s adaptivnom optikom koju će pružati MAORY dati će izuzetno kvalitetne snimke galaksija, zvijezda i ekstrasolarnih planeta.

E-ELT predstavljat će jedno od najvećih dostignuća tehnologije i čovjekove težnje za stalnim otkrivanjem novoga. Ovakav teleskop će nuditi bezbroj mogućnosti i moći će se koristiti u svim poljima napredne astronomije. Velika su očekivanja od ovog teleskopa, te se znanstvenici nadaju da će pomoću njega moći dati odgovore na pitanja o postanku svemira, postojanju tamne energije, širenje svemira. Pomoću E-ELT-a će se moći proučavati najudaljenije galaksije. Promatranje zvijezda i pratiti formiranje zvijezda svakako će ponuditi neke nove odgovore, kao što je i određivanje mase manjih zvijezda slabijeg intenziteta svjetlosti. No primarno, nakon brojnih otkrića ekstrasolarnih planeta posljednjih desetak godina, prioritet E-ELT-a će svakako biti oktrivanje novih planeta, ali i rasvjetljavanje informacija o već otkrivenim planetima. Očekuje se da će se moći dublje promatrati protoplanetarni diskovi i atmosfere planeta. Metode detekcije ekstrasolarnih planeta kao što su metoda radijalnih brzina

i metoda izravnog snimanja dići će se na višu razinu. Očekuje se da će se pomoću ovog teleskopa i metode radijalnih brzina premašiti granica preciznosti mjerenja od 1 cm/s. To znači da će se moći s lakočom promatrati planeti slični Zemlji koji kruže oko zvijezda sličnim Suncu. Pomoći metode izravnog snimanja očekuje se da će se premašiti granica kontrasta od 10^{-9}. Moći će se snimiti izuzetno kvalitetne snimke planeta, te pomoću njih analizirati atmosfere. Također se postavlja pitanje o fizikalnim parametrima koji će se sve moći odrediti pomoću ovog teleskopa, a jedna od njih je svakako i masa ekstrasolarnih planeta koja će se moći odrediti za masivnije planete. [54]

9 Metodički dio

Sadržaj ove teme diplomskog rada uključuje niz tema koje se obrađuju na nastavi fizike u srednjoj školi. Prema planu i programu nastava fizike prema četverogodišnjem programu izvodi se prema inačici A koja se primjenjuje u matematičkim i prirodoslovnim gimnazijama gdje je satnica fizike tri sata tjedno, te B inačici koja se primjenjuje u općim, jezičnim i klasičnim gimnazijama gdje je satnica fizike dva sata tjedno. Učenici u matematičkim gimnazijama imaju veću satnicu i nastavne cjeline koje uključuju poznavanje elektromagnetskog spektra i Dopplerovog efekta obrađuju se već u trećem razredu. Ostali gimnazijski programi imaju ograničeniju nastavu, te se tako elektromagnetski spektri obrađuju u četvrtom razredu, dok se Dopplerov efekt obrađuje u trećem razredu.

Određivanje radijalne brzine zvijezde iz spektra može se obraditi kao sat primjene gradiva nakon obrađene nastavne jedinice elektromagnetski spektri. Na taj bi način učenici povezali Dopplerov efekt s elektromagnetskim valovima i još bolje učvrstili znanje da je svjetlost val. Osim toga ova tema može poslužiti za učenički samostalni seminarski rad, a može se obraditi i na izbornoj nastavi astronomije, te na taj način s učenicima još bolje utvrditi i protumačiti nastavne jedinice koje su obuhvaćene u redovnom planu i programu.

Nastavni sat određivanja radijalne brzine odvija se prema istraživački usmjerenoj nastavi fizike. Učenici na takvom satu sami traže odgovore na znanstvena pitanja, te u vidu toga sami osmišljaju i analiziraju pokuse. Cilj je da učenici što više samostalno bilježe svoja predviđanja, opažanja i zaključke, te ih nakon toga prezentiraju pred drugima uz argumentiranu raspravu. Ovakav tip sata ostavlja puno veći učinak jer učenik nije samo puki promatrač nego i aktivni sudionik i kreator nastave. Sat je podjeljen na tri dijela: uvodni, središnji i završni dio. U uvodnom dijelu sata cilj nam je zainteresirati učenike za nastavu, te u tom vidu postavljamo uvodno pitanje i pokazujemo opservacijski pokus. Središnji dio sata započinje istraživačkim pitanjem, te učenici na temelju danih apsorpcijskih spektara zapisuju i izvode mjerenja i analizom podataka dolaze do zaključka o radijalnoj brzini zvijezde. Završni dio sata služi za evaluaciju naučenog, te primjenu na novom problemu određivanja radijalne brzine ekstrasolarnih planeta. Osim toga u završnom dijelu učenici će riješiti i par jednostavnih primjera zadataka.

9.1 Ciljevi učenja

9.2 Obrazovni ishodi

Učenici će nakon sata moći:

- nabrojiti potrebne uvjete za postojanje života,
- objasniti što su to ekstrasolarni planeti,

- opisati gibanje dvojnog sustava zvijezda-planet,
- objasniti kako nastaje crveni i plavi Dopplerov pomak u spektru zvijezde,
- primijeniti matematički izraz za crveni i plavi Dopplerov pomak,
- analizirati apsorpcijski spektar i odrediti brzinu zvijezde iz njega
- opisati kako se pronalaze planeti pomoću metode radijalnih brzina.

Učenici će na satu razvijati sposobnosti:

- apstraktnog razmišljanja i logičkog zaključivanja,
- verbalnog, pismenog i slikovnog izražavanja,
- kritičkog razmišljanja,
- promatranja, te analiziranja i iskazivanja opažanja,
- znanstvenog zaključivanja.

9.3 Odgojni ishodi

Učenici će tijekom sata stjecati vrijednosti:

- tolerancije prema drugima i različitim mišljenjima,
- poštivanja autoriteta,
- samostalnosti u radu,
- aktivnog sudjelovanja u nastavi,
- izražavanja vlastitog mišljenja,
- potrebe za stjecanjem novog znanja.

9.4 Nastavni sat - Određivanje radijalne brzine zvijezda pomoću spektara

Prije samog sata učenici moraju biti upoznati sa pojmovima radijalne brzine, Dopplerovog efekta i elektromagnetskog spektra. Kroz ovaj sat učenici će na primjeru iz astronomskih opažanja moći povezati ove pojmove na praktičnom primjeru i uvidjeti vezu između Dopplerovog efekta i elektromagnetskih valova.

Uvodni problem:Jesmo li sami u svemiru?

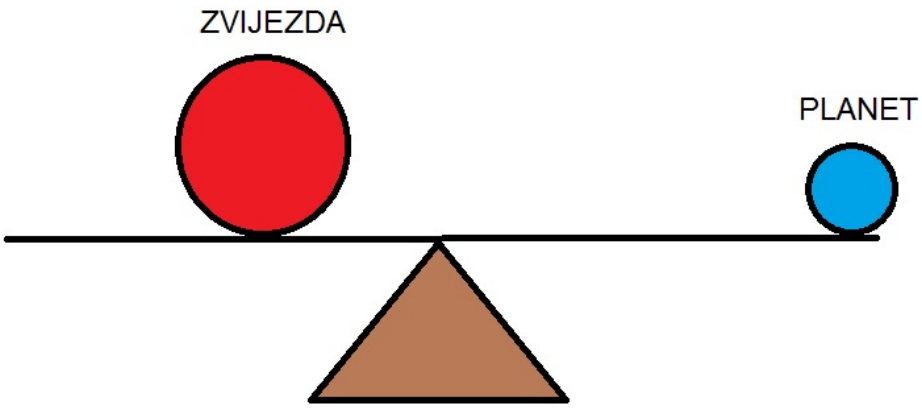
Iako ovo pitanje zvuči populistički i van znanstvenih okvira cilj je zainteresirati učenike. Možemo očekivati žustru raspravu među učenicima sa potvrdnim ili

negativnim stajalištima. Nakon toga nastavnik treba s učenicima raspraviti uvjete za postojanje života u svemiru, te ih upitati koji su to. Očekivani odgovori učenika bi trebali biti kisk, voda, čvrsto tlo...

Koja sve nebeska tijela poznajete i na kojima od njih je moguće ostvariti te uvjete, a na kojima nije i zbog čega? Cilj ovog pitanja je da učenici uoče da su planeti jedini pogodni za postojanje života izvan Zemlje. Učenici nabrajaju nebeska tijela kao što su zvijezde, planeti, asteroidi, galaksije. Zaključuju da su zvijezde prevruće za postojanje bilo kakvog oblika života, asteroidi su premali, nemaju atmosferu i nalaze se u velikim skupinama. Jedino planeti kao što je Zemlja imaju mogućnost za postojanje života. Učenici zatim mogu zaključiti da je za život na Zemlji bitan čimbenik i Sunce koje nam daje energiju i omogućuje biljkama da procesom fotosinteze proizvode potreban kisik za život na Zemlji.

Postoje li u svemiru još koji planeti osim onih u Sunčevom sustavu? Cilj ovog pitanja je da učenici zaključe o postojanju ekstrasolarnih planeta, te da je na njima moguć život. Može se očekivati da učenici neće znati za postojanje ekstrasolarnih planeta, ali bi trebali s obzirom na brojne populističke članke o ovoj temi. Nakon što učenici utvrde da postoje planeti i van Sunčevog sustava potrebno ih je nekako imenovati i nastavnik napiše na ploču da se takvi planeti nazivaju ekstrasolarni planeti. Ovako zanimljiva rasprava potaknuti će učenike za daljnje sudjelovanje na satu, a osim toga učenici mogu saznati o postojanju ekstrasolarnih planeta o kojima možda do sada nisu imali prilike čuti.

Kako se gibaju planeti u Sunčevom sustavu, te koje fizikalne veličine opisuju takvo gibanje? Cilj ovog pitanja je da učenici zaključe da se radi o kružnom gibanju, te da je jedna od fizikalnih veličina koja opisuje ovo gibanje i brzina. Za bolje razumijevanje samog gibanja sustava zvijezda-planet ili dvojne zvijezde, pred učenike stavljamo opservacijski pokus sa klackalicom (slika 9.1). Ako nemamo ekspe-



Slika 9.1: Skica pokusa sa klackalicom. Veća kuglica predstavlja zvijezdu, a manja planet.

rimentalni postav samu klackalicu moguće je izraditi u vlastitoj radinosti. Za izradu

klackalice potreban je oslonac u obliku trokuta, ravna letvica, dvije veće kuglice i jedna manja kuglica koje možemo napraviti od plastelina kako bi bile stabilne na letvici. Prije samog pokusa sa učenicima treba raspraviti da se zvijezda i planet gibaju oko zajedničkog centra mase. Iako bi učenicima to trebalo biti poznato valja ih podsjetiti na to. Nastavnik pita učenike da li samo planeti kruže oko zvijezda ili i zvijezde kruže oko zajedničkog centra mase. Učenici bi se trebali prisjetiti općeg zakona gravitacije, te zaključiti da se cijeli sustav giba oko zajedničkog centra mase. Nakon što je to učenicima jasno sada možemo krenuti na pokus. Prije samog pokusa učenici opisuju što se pred njima nalazi, te kako će pomoću toga prikazati gibanje sustava zvijezda-planet. Učenici bi trebali lako zaključiti da bi nam veće kuglice trebale predstavljati zvijezde koje su veće i masivnije, a manje kuglice planete, dok bi nam trokut trebao predstavljati oslonac, odnosno centar mase. Ako učenici ne mogu sami zaključiti da bi oslonac trebao predstavljati mjesto centra mase to možemo na jednostavan način prikazati učenicima. Stavimo dvije kuglice na različite udaljenosti od ruba letvice. Ispod stavimo oslonac i pitamo učenike što moramo napraviti sa osloncem da bi uravnotežili ovu klackalicu. Učenici zaključuju da oslonac treba pomicati sve dok kuglice ne bi mirovale. Zatim nastavnik kroz raspravu sa učenicima dolazi do odgvora da je ta točka u kojoj kuglice miruju centar mase ovog sustava. Eksperimentalni postav i opažanja učenici skiciraju u bilježnicu, te zapisuju predviđanja što će uočiti u pokusu.

Što ćemo staviti na klackalicu ako želimo prikazati sustav zvijezda-planet? Trebamo postaviti jednu veliku i jednu malu kuglicu. Stavimo ih na klackalicu na jednaku udaljenost od oslonca i pitamo učenike da li se sada ove kuglice mogu gibati odnosno klackati. Učenici će zaključiti da se klackalica nagnula na stranu teže odnosno veće kuglice i da se ovakav sustav ne može gibati. Nastavnik dalje sa pitanjima navodi učenike na zaključak što treba učiniti da se ovaj sustav uravnoteži. Učenici bi trebali zaključiti da je potrebno veću kuglicu približiti osloncu. Nakon što smo upostavili ravnotežu izbacimo klackalicu iz ravnoteže i promatramo gibanje. Nastavnik pita učenike što uočavaju, te učenici na temelju pokus uoče da se veća kuglica giba sporije, a manja brže. Nastavnik odmah to povezuje sa planetom i zvijezdom, te će učenici zaključiti da se zvijezda giba sporije oko centra mase, nego planeti. Nakon što smo kroz ovaj pokus zaključili da je masivnija zvijezda bliže osloncu tj. centru mase od planeta i da se ona giba sporije, možemo prijeći na diskusiju o brzini, te zapisujemo naslov na ploču.

Naslov: Određivanje radijalne brzine zvijezde pomoću spektara

Kako bi izmjerili brzinu kuglica na klackalici? Cilj ovog pitanja je da možemo odrediti samo radijalnu brzinu kada se planet ili zvijezda udaljava ili približava od nas. Ako učenici sami ne dođu do ideje, predložimo učenicima da mogu iskoristiti mjerač brzine kakav koriste policajci. Učenici bi vjerojatno rekli da samo u ravnini klackalice usmjerimo uređaj u kuglicu i da ćemo odmah očitati brzinu. No problem je taj što se kuglice ne približavaju ili udaljavaju od nas i taj uređaj ne može očitati

gibanje gore-dolje. Nastavnik dalje kroz raspravu pokušava sa učenicima doći do rješenja. Rješenje bi bilo kada bi mjerili brzinu iz ptičje perspektive odnosno kada bi naš pogled bio odozgo. Tada bi se za promatrača činilo da se kuglice udaljavaju i približavaju. Sada nastavnik može doći do zaključka da ta brzina koja se očitava kada se planet ili zvijezda udaljava ili približava od promatrača naziva radijalna brzina.

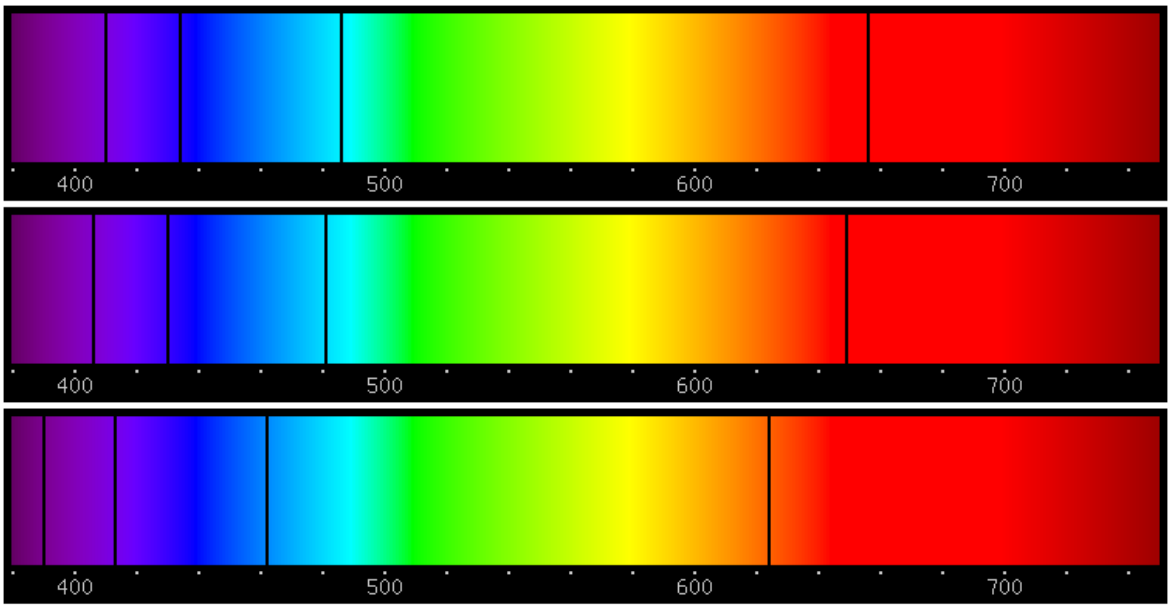
Na kraju uvodnog sata nastavnik utvrđuje sa učenicima da je moguć život onakav kakav poznajemo na planetima sličnim Zemlji, koji imaju vodu u tekućem obliku, atmosferu, ali da je bitno kruženje planeta oko zvijezde koja daje energiju i potrebnu svjetlost, te da možemo odrediti radijalnu brzinu zvijezde.

Istraživačko pitanje: Kako možemo odrediti radijalnu brzinu neke zvijezde ili planeta?

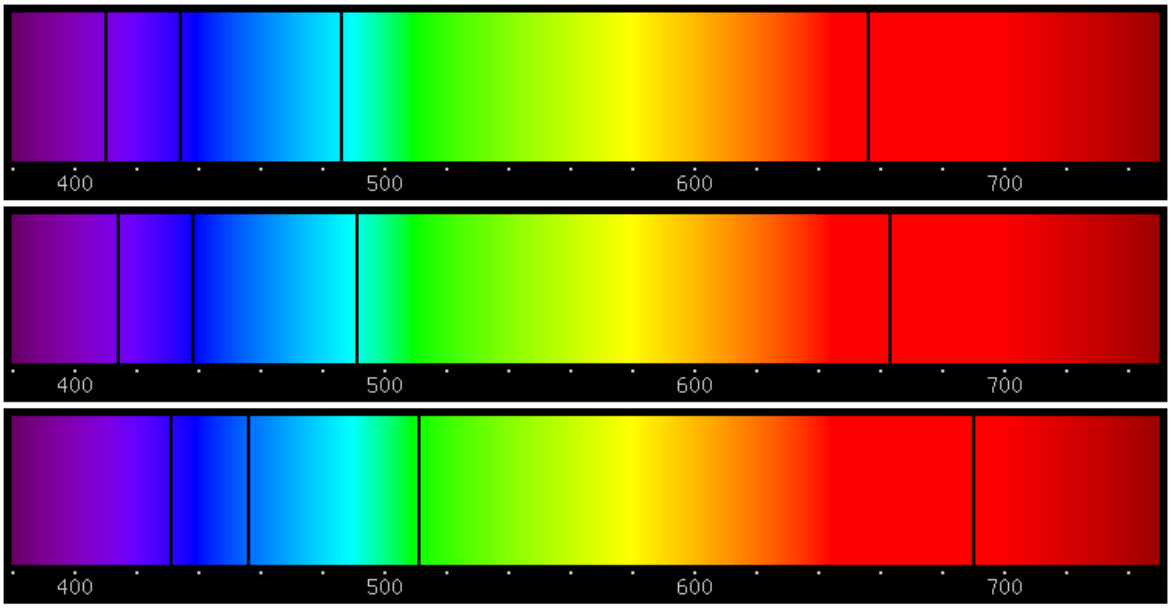
Istraživačko pitanje je potrebno napisati na ploču jer daje učenicima orijentaciju o onome što radimo. Cilj pitanja je da učenici razmisle pomoću čega mogu istražiti radijalnu brzinu zvijezde i o čemu ona ovisi. Učenici će očekivano reći da promatranjem nebeskih tijela možemo uočiti da se ona gibaju, te možemo mjeriti potrebno vrijeme za obilazak jednog punog ciklusa oko zvijezde, ako želimo odrediti brzinu planeta. Učenicima treba napomenuti kako se radi o iznimno velikim udaljenostima, te bi za neke bliže primjerke ovakvih sustava trebalo puno vremena i snimanja da se mogu detektirati takve promjene. Zaključujemo da je većina ovakvih sustava jako udaljena i da je potrebna neka tehnika koja će nam to omogućiti. Kako su sada učenici upoznati sa osnovnim pojmovima prelazimo na dio sata gdje će učenici odrediti brzinu zvijezde iz njezinog spektra.

Na koji način astronomi prikupljaju podatke o zvijezdama i planetima? Cilj pitanja je da učenici dođu do spoznaje da astronomi jedino mogu snimiti spektar nekog udaljenog objekta i iz njega odrediti niz vrijednih podataka o tom objektu. Učenici će vjerojatno odgovoriti da se prikupljanje podataka obavlja pomoću teleskopa, te neće doći do zaključka da je astronomima najbitniji spektar promatranog objekta. Nastavnik u tom trenutku učenike podijeli u par grupa po četiri učenika, te pred njih stavi dvije slike apsorpcijskih spektara koji su prikazani na slikama 9.2 i 9.3.

Objasnite kako nastaju linije u spektru. Kakvi su to spektri? Cilj pitanja je da učenici ponove znanje o apsorpcijskim spektrima. Od učenika se očekuje jer su na prethodnim satima učili elektomagnetski spektar da znaju da spektar nastaje prelaskom atoma iz pobuđenog u osnovno stanje i pri tome nastaje emisijski spektar, a kod prelaska iz osnovnog u neko pobuđeno stanje nastaje apsorpcijski spektar. Učenici prema tome moraju zaključiti da se ovdje radi o apsorpcijskom spektru. Nastavnik kaže učenicima da dobro promotre ove spektre i da uoče razliku među njima. Učenici nakon pomnog promatranja mogu zaključiti da su apsorpcijske linije na prvoj slici 9.2 pomaknute prema plavom dijelu spektra, a na drugoj 9.3 prema crvenom dijelu spektra.

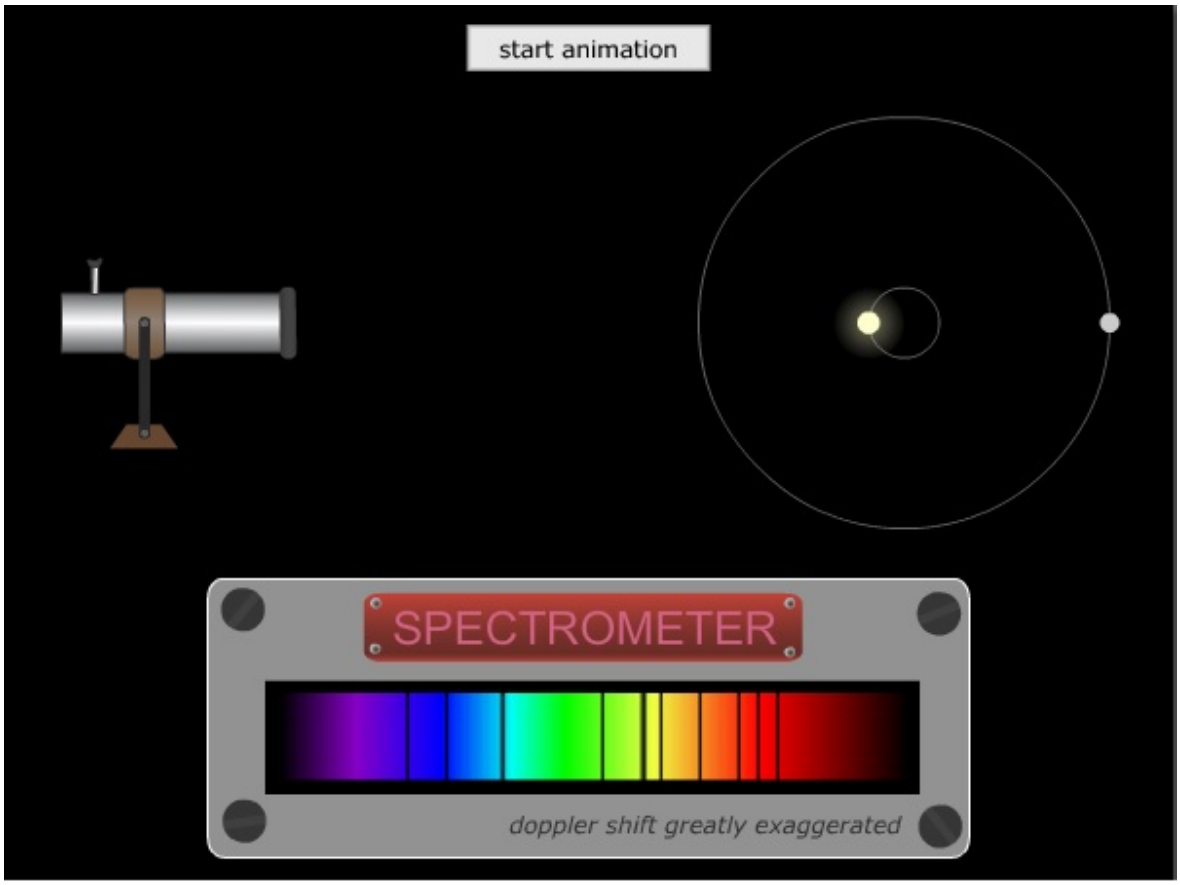


Slika 9.2: Plavi Dopplerov pomak apsorpcijskih linija u spektru vodika. Prvi spektar je za zvijezdu kada miruje, drugi je kada se zvijezda giba radijalnom brzinom od 3000 km/s, a treći spektar kada se giba brzinom 15000 km/s prema opažaću [55].



Slika 9.3: Crveni Dopplerov pomak apsorpcijskih linija u spektru vodika. Prvi spektar je za zvijezdu kada miruje, drugi je kada se zvijezda giba radijalnom brzinom od 3000 km/s, a treći spektar kada se giba brzinom 15000 km/s od opažaća [55].

Nakon što su učenici uočili pomake u spektralnim linijama nastavnik promoću računala i projektora proicira animaciju [56]. Animacija na slici 9.4 prikazuje odnos snimljenog spektra i pozicije planeta dok kruži oko zvijezde. S učenicima je potrebno pomno analizirati što pojedini dio animacije znači. Lijevo se nalazi teleskop koji nam predstavlja opažača i uređaj pomoću kojeg možemo snimiti spektar. Dolje se nalazi spektar koji snimamo za gibanje planeta, dok se desno nalazi prikaz kruženja planeta



Slika 9.4: Animacija za prikaz nastajanja crvenog i plavog Dopplerovog pomaka [56].

oko zvijezde. Nakon toga nastavnik upozori učenike da promatraju što se događa se spektrom i da to povežu sa gibanjem planeta na desnoj strani animacije. Od učenika se učekuju da su u stanju primjetiti da kada se planet udaljava od teleskopa odnosno od opažača da je spektar pomaknut prema crvenom dijelu, a dok se planet približava da je spektar pomaknut prema plavom dijelu spektra.

Jeste li već negdje opazili sličan efekt kod neke druge vrste valova?Cilj pitanja je da učenici zaključe da se radi o Dopplerovom efektu kod zvučnih valova. Učenici će vjerojatno imati problema sa prisjećanjem, ali nastavnik tada navodi učenike da se prisjete koji to valovi imaju drugačiju frekvenciju, a time i valnu duljinu kada se približavaju ili udaljavaju od nepomičnog promatrača. Time nastavnik navodi učenike da dođu do zaključka da se radi o Dopplerovom efektu koji su učenici radili kod zvučnih valova.

Kako se tijelo giba kada je spektar u crvenom dijelu, a kako kada je u plavom dijelu? Cilj je navesti učenike na zaključak kako mogu iz pomaka u spektru očitati kada se zvijezda približava, a kada udaljava. Učenici zaključuju da kada je spektar pomaknut u crveni dio da se planet udaljava, a kada je pomaknut u plavo da se približava. Sada nastavnik može na ploči zapisati što je plavi i crveni Dopplerov pomak, a učenici u svoje bilježnice moraju nacrtati skicu, te opisati opažanje.

Ponovno se vraćamo na apsorpcijske spektre koji su ranije podijeljeni učeni-

cima,te nastavnik objašnjava da prvi spektar u obje slike predstavlja linije vodika za nepomičnu zvijezdu. Ostala dva spektra na svakoj slici su za zvijezdu kada se giba. Učenici moraju sami zaključiti da je gornja slika za tijelo kada se približava, a donja slika za tijelo kada se udaljava. To učenici mogu zaključiti na temelju prethodne analize i naučenog o Dopplerovom pomaku.

Za određivanje brzine iz Dopplerovog pomaka potrebno je prvo zapisati opći matematički zapis za Dopplerov efekt iz kojeg ćemo kasnije izvesti izraz za određivanje brzine. Učenici sami zapisuju matematički izraz za Dopplerov efekt u bilježnicu:

$$f = \left(\frac{c \pm v_o}{c \pm v_i}\right) \cdot f_0. \tag{9.1}$$

Učenici moraju znati koja je oznaka za pojedinu fizikalnu veličinu u izrazu (9.1):

- c - brzina svjetlosti
- v_o - brzina opažača
- v_i - brzina izvora
- f - frekvencija koju očitava opažač uslijed gibanja izvora
- f_0 - emitirana frekvencija izvora

Kolika je brzina opažača? Cilj pitanja je da učenici zaključe da je brzina opažača nula jer je udaljenost između objekta koji se promatra i opažača prevelika.

Koji ćete predznak odabrati ako želi izvesti formulu za plavi pomak? Učenici zaključuju da je plavi pomak kada se izvor svjetlosti (zvijezda) približava nama, pa ćemo odabrati pozitivan predznak. Učenici zatim moraju zapisati samostalno matematički izraz za plavi pomak:

$$f = \left(\frac{c}{c + v_i}\right) \cdot f_0. \tag{9.2}$$

Koji ćete predznak odabrati ako želi izvesti formulu za crveni pomak? Učenici sa lakoćom sada zaključuju da je kod crvenog pomaka u jednadžbi negativan predznak zbog udaljavanja promatranog objekta:

$$f = \left(\frac{c}{c - v_i}\right) \cdot f_0. \tag{9.3}$$

Možete li koristiti ove jednadžbe za izračun radijalne brzine? Učenici zaključuju da ne mogu nego moraju zapisati jednadžbu tako da u izrazu zamjene frekvenciju sa valnom duljinom jer na slikama imaju samo podatke o valnoj duljini. To se lako može učiniti primjenom izraza $c = f\lambda$. Učenici zatim u bilježnici samostalno izvode

izraze za brzinu izvora ovisno o plavom ili crvenom pomaku. Za plavi pomak dobiva se jednadžba:

$$v_{ip} = c\left(\frac{\lambda_0}{\lambda_p} - 1\right), \tag{9.4}$$

a za crveni pomak dobiva se jednadžba:

$$v_{ic} = c\left(1 - \frac{\lambda_0}{\lambda_c}\right). \tag{9.5}$$

Kako ćemo analizirati spektre i koje podatke možemo očitati? Cilj je da učenici sami predlože tijek mjerenja, te da sami konstruiraju tablice potrebne za ovo mjerenje. Vremenski nismo u mogućnosti obraditi sve spektre, tako da će učenici odrediti valne duljine za referentni spektar koji je prvi na obje slike, te za drugi spektar za svaku sliku. Za taj spektar učenici trebaju dobiti da je radijalna brzina zvijezde 3000 km/s. Učenici u bilježnice crtaju tablice za plavi i crveni pomak koje će popuniti sa relevantnim podacima koje mogu iščitati iz slike. U tablicama 9.1 i 9.2 se nalaze već popunjene vrijednosti koje bi približno trebali dobiti učenici.

Plavi pomak		
λ_0/nm	λ_p/nm	$v_{ip}/(m/s)$
410	405	$3 \cdot 10^6$
435	430	$3 \cdot 10^6$
486	481	$3 \cdot 10^6$
655	645	$3 \cdot 10^6$

Tablica 9.1: Izmjereni podaci za plavi pomak iz slike 9.2

Crveni pomak		
λ_0/nm	λ_c/nm	$v_{ic}/(m/s)$
410	415	$3 \cdot 10^6$
435	440	$3 \cdot 10^6$
485	491	$3 \cdot 10^6$
655	660	$3 \cdot 10^6$

Tablica 9.2: Izmjereni podaci za plavi pomak iz slike 9.3

U tablicama se nalaze zaokružene vrijednosti, učenici će možda drugačije zaokružiti vrijednosti valnih duljina, te će dobiti različite rezultate za radijalne brzine. Tada sa učenicima treba provesti račun pogreške, odrediti srednju vrijednost mjerenja i maksimalnu apsolutnu pogrešku.

Prilikom odgovora na istraživačko pitanje učenici su se morali upoznati sa niz novih pojmova. Zaključili su da pomoću spektra mogu odrediti radijalnu brzinu tako

da se uoče Dopplerovi pomaci. Učenici su to vidjeli na animaciji, te su zatim samostalno na temelju znanja od ranije odredili matematičke izraze za radijalnu brzinu. Osim što je odgovor na istraživačko pitanje dan opisno i pomoću formule, učenici su izvršili i mjerenja, te sami odredili radijalnu brzinu jedne zvijezde. Time je odgovor na istraživačko pitanje dan u punom smislu jer su učenici konstruirali fizikalni model, dali matematički opis, te proveli i analizirali rezultate mjerenja.

Završni dio sata nam služi za evaluaciju naučenog. Naučeno gradivo podrebno je primjeniti na nove pojave, te povezati završni dio sa uvodnim problemom.

Možemo li odrediti na isti način i radijalnu brzinu ekstrasolarnih planeta? Cilj pitanja je da učenici zaključe da možemo odrediti radijalnu brzinu planeta ako možemo snimiti njegov spektar. Učenici bi mogli povezati spektar sa izvorom svjetlosti, te zaključiti da je zvijezda izvor svjetlosti i da možemo samo snimiti spektar zvijezde. Prema tome ne možemo odrediti radijalnu brzinu ekstrasolarnih planeta. Nastavnik ovdje navodi da svjetlost od zvijezde prolazi kroz atmosferu planeta, te takav spektar ima apsorpcijske linije elemenata koji se nalaze u atmosferi planeta.

Kako bi izgledao spektar zvijezde koja nema u svojoj blizini planet? Cilj je da učenici zaključe da tada ne bi uočili Dopplerove pomake u apsorpcijskim linijama. Ako učenici ne mogu odmah zaključiti, možemo ih pomoću slika 9.2, 9.3 navesti na odgovor jer je prvi spektar na svakoj slici za zvijezdu kada miruje. Kada zvijezda miruje tada nema gibanja oko zajedničkog centra mase, tj. ne postoji nikakav pratioc u njezinoj blizini koji bi zbog utjecaja gravitacijske sile naveo zvijezdu na gibanje oko zajedničkog centra mase. Nastavnik navodi da se ova metoda upravo i prva koristila za otkriće ekstrasolarnih planeta jer su uočeni Dopplerovi pomaci koji su se mogli jedino pripisati utjecaju ekstrasolarnih planeta na gibanje neke zvijezde.

Za kraj sata ako ostane još vremena, moguće je odrediti i brzinu za preostali spektar na slici. Osim toga učenici mogu riješiti i par računskih zadataka. Kako su učenici već raspoređeni u grupe zadaci se mogu riješiti na interaktivan način rješavanjem u grupama. Nastavnik prolazi po razredu i nadgleda rješavanje zadataka, te zahtjeva od učenika da u svakom zadatku nacrtaju skicu i označe poznate veličine. Osim toga grupni rad je povoljan iz tog razloga što učenici mogu međusobno fizikalno opisati problem, te zapisti jednadžbe koje će im pomoći u rješavanju problema. Nakon rješenja problema, nužno je analizirati rješenje, te da li se ono slaže sa predviđanjima. Neki od primjera zadataka su:

1. Kada se razni kemijski elementi zagrijavaju oni zrače svjetlost u određenom nizu valnih duljina ili spektralnih linija. Mi ćemo uzeti spektralnu liniju vodika na $\lambda = 434nm$ što je u ljubičastom dijelu vidljivog spektra. Ako se udaljena zvijezda udaljava od nas brzinom od 50 000 km/s, odrediti na kojoj će valnoj duljini biti ta spektralna linija za promatrača na Zemlji. (Rj.651.2 nm)

2. Astronom promatra apsorpcijski spektar udaljene zvijezde, te uočava da je spketralna linija vodika $\lambda = 434nm$ pomaknuta na $\lambda = 471nm$. Kolika je radijalna

brzina zvijezde (Rj. 20 000 km/s)

10 Zaključak

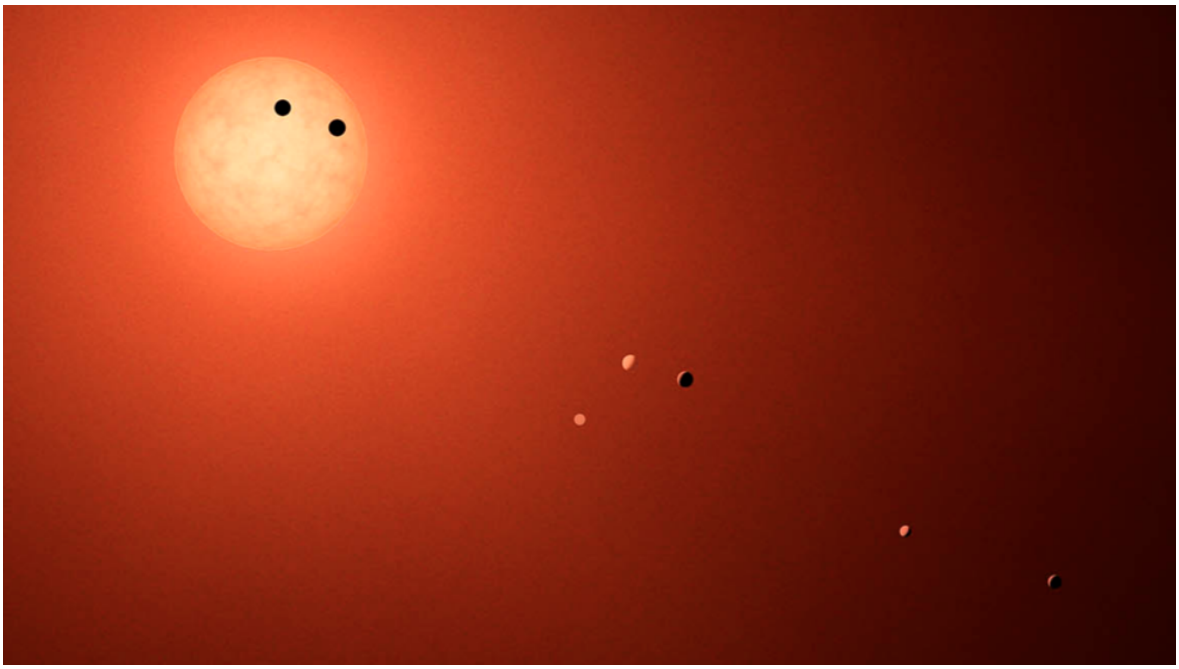
Osnovni cilj ovog diplomskog rada je bio uvid u mogućnost direktnog određivanja mase ekstrasolarnih planeta. U svrhu toga sintetizirani su kompozitni spektri za razne udjele svjetlosti planeta u ukupnom toku zračenja sustava zvijezda-planet. Metodom raspetljavanja uspješno su izdvojeni teorijski spektri zvijezde i planeta. Nije se očekivalo da će ova metoda uspjeti pokazati dobre rezultate sa samo 100 kompozitnih spektara pri samo 0.001% udjelu svjetlosti planeta u ukupnom toku zračenja. Bilo je planirano napraviti simulacije i za 1000 kompozitnih spektara. Pokazalo se da to nije potrebno jer metoda daje odlične rezultate i za manji broj spektara. Istraživanjem je dokazano da je moguće izdvojiti spektar planeta iz kompozitnog spektra sustava zvijezda-planet, te prema tome moći će se odrediti dinamička masa planeta.

Tokom pisanja ovog diplomskog rada grupa znanstvenika je upravo pomoću slične metode uspjela odrediti dinamičku masu ekstrasolarnog planeta 51 Pegasi b [57]. To samo dokazuje koliko je ovo aktualna tema. Iako je ovo otkriće značajno za astrofiziku ekstrasolarnih planeta bilo je potrebno niz promatranja ovog sustava i prikupljanja podataka. Svi prikupljeni spektri kroz niz godina iskorišteni su u ovom istraživanju. Iz tog razloga je izuzetno bitno da se pomoću novog teleskopa E-ELT ove vremenske granice pomaknu. Novim velikim teleskopima moći će se u kraćem vremenskom roku prikupiti veća količina i kvalitetnija količina podataka.

Uz to što je određena dinamička masa prvog ekstrasolarnog planeta, NASA je objavila novo senzacionalno otkriće. Pronađen je višeplanetarni sustav sa sedam planeta [58]. Višeplanetarni sustav otkriven je oko zvijezde TRAPPIST-1 (slika 10.1). Ovim otkrićem približavamo se otkriću višeplanetarnog sustava koji ima jednako ili više planeta od Sunčevog sustava. Ova dva velika otkrića dogodila su se na samom početku 2017. godine. To samo dokazuje koliko je istraživanje ekstrasolarnih planeta aktualno i koliko se brzo razvija ova grana astrofizike.

Osim istraživačkog dijela diplomskog rada napravljen je metodički dio. U metodičkom dijelu prikazana je nastavna priprema za nastavni sat fizike na temu određivanja radijalne brzine zvijezde iz spektra. Iako ova tema nije obavezna u redovnom planu i programu, izuzetno je bitno da se učenici kroz ovakve teme upoznaju sa aktualnim temama iz svijeta fizike. Osim toga ova tema može se primjeniti na izbornom satu astronomije koji se održava u nekim školama. Astronomija u školi može poslužiti kao dio u kojem će se učenici susretati sa sebi zanimljivim temama iz svijeta astronomije, ali opet na neki način povezane sa redovnom nastavom. To je bio i cilj metodičkog dijela. Povezati gradivo elektromagnetskih spektara sa Dopplerovim efektom. Osim toga učenik se mora prisjetiti i općeg zakona gravitacije. Kroz ovaj sat učenik ponavlja sadržaje iz fizike koji se uče kroz sva četiri razreda, te bi doprinos ovakvog sata bio od iznimne važnosti.

Ekstrasolarni planeti predstavljaju najbrže rastuću granu astrofizike. Osim toga zanimanje za ovom temom pokazuju svi. Stoga ne čudi da se u zadnje vrijeme



Slika 10.1: Umjetnički prikaz višeplanetarnog sustava oko zvijezde TRAPPIST-1. [56].

sve više piše o ekstrasolarnim planetima na portalima. Podrobnije istražujući ovu temu, čini mi se da smo samo zagrebali površinu znanja o ekstrasolarnim planetima. U budućnosti nas očekuje puno velikih otkrića koje bi mogla promjeniti trenutno poimanje svijeta.

Dodaci

Dodatak A Matematički alati

Pravilo deriviranja razlomka:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{a}{b}\right) = \frac{b\frac{da}{dt} - a\frac{db}{dt}}{b^2}. \tag{A.1}$$

Jednadžba elipse:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \tag{A.2}$$

Iz jednadžbe elipse se dobije izraz za ekscentricitet:

$$c^2 + b^2 = a^2. \tag{A.3}$$

$$c^2 = a^2 - b^2, \tag{A.4}$$

$$\frac{c^2}{a^2} = 1 - \frac{b^2}{a^2}, \tag{A.5}$$

$$e = \frac{c}{a} = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}}, a > b. \tag{A.6}$$

Izraz za malu poluos orbite b glasi:

$$b = a\sqrt{(1 - e^2)}. \tag{A.7}$$

Adicijske formule:

$$\cos(\theta + \omega) = \cos\theta\cos\omega - \sin\theta\sin\omega, \tag{A.8}$$

$$\sin(\theta + \omega) = \sin\theta\cos\omega + \cos\theta\sin\omega, \tag{A.9}$$

$$\sin^2\theta + \cos^2\theta = 1. \tag{A.10}$$

Literatura

[1] Seager, S. Exoplanet Habitability // Science. Vol. 340, (2013), str. 577-581.

[2] Year in Review: Top 5 exoplanet moments of 2015, NASA Exoplanet exploration, https://exoplanets.nasa.gov/news/243/year-in-review-top-5-exoplanet-moments-of-2015/, 24.6.2016.

[3] The Extrasolar Planets Encylopaedia, Exoplanet.eu,http://exoplanet.eu, 6.2.2017.

[4] Haghighipour, N.; Dvorak, R.; Pilat-Lohinger, E. Planetary Dynamics and Habitable Planet Formation in Binary Star Systems, Planets in Binary Star Systems, Astrophysics and Space Science Library, Volume 366. Springer Science+Business Media B.V., 2010, p. 285

[5] NASA-NASA's Kepler discovers multiple planets orbiting a pair of stars, NASA, http://www.nasa.gov/mission_pages/kepler/news/kepler-47.html, 10.10.2016.

[6] Kepler and K2, NASA, http://www.nasa.gov/kepler/discoveries, 6.2.2017.

[7] Howell, S. B.; Sobeck, C.; Haas, M.; Still, M.; Barclay, T.; Mullally, F.; Troeltzsch, J.; Aigrain, S.; Bryson, S. T.; Caldwell, D.;Chaplin, W. J.; Cochran, W. D.; Huber, D.; Marcy, G. W.; Miglio, A.; Najita, J. R.; Smith, M.; Twicken, J.D.; Fortney, J. J. The K2 Mission: Characterization and Early Results // Publications of the Astronomical Society of Pacific, Vol. 126, Issue 938(2014), str. 398-408.

[8] Kepler's Second Light: How K2 Will Work, NASA, https://www.nasa.gov/kepler/keplers-second-light-how-k2-will-work, 6.2.2017.

[9] NASA's Kepler Mission Announces Largest Collection of Planets Ever Discovered, NASA, https://www.nasa.gov/press-release/nasa-to-announce-latest-kepler-discoveries-during-media-teleconference, 7.2.2017.

[10] HARPS: The Planet Hunter, European Southern Observatory,http://www.eso.org/public/teles-instr/lasilla/36/harps/, 7.7.2016.

[11] Mayor, M.; Pepe, F.; Queloz, D.; Bouchy, F.; Rupprecht, G.; Lo Curto, G.; Avila, G.; Benz, W.; Bertaux, J.-L.; Bonfils, X.; Dall, Th.; Dekker, H.; Delabre, B.; Eckert, W.; Fleury, M.; Gilliotte, A.; Gojak, D.; Guzman, J. C.; Kohler, D.; Lizon, J.-L.; Longinotti, A.; Lovis, C.; Megevand, D.; Pasquini, L.; Reyes, J.; Sivan, J.-P.; Sosnowska, D.; Soto, R.; Udry, S.; van Kesteren, A.; Weber, L.; Weilenmann, U. Setting New Standards with HARPS // The Messenger, Vol.114, 2003., str. 20-24.

[12] Resolution B5(Definition of Planet in the Solar System), IAU,http://www.iau.org/static/resolutions/Resolution_GA26-5-6.pdf, 7.7.2016.

[13] Resolution B6(Pluto), IAU,http://www.iau.org/static/resolutions/Resolution_GA26-5-6.pdf, 7.7.2016.

[14] Boss, A.P.; Butler, R.P.; Hubbard W.B.; Ianna P.A.; Kürster, M; Lissauer, J.J.; Mayer, M; Meech, K.J.; Mignard, F.; Penny, A.J.; Quirrenbach, A.; Tarter, J.C.; Vidal-Madjar, A. Working Group on Ekstrasolar Planets. Oddbjørn Engvold, Reports on Astronomy (str. 183-186), Cambridge, Cambridge University press, 2007.

[15] exoplanets.org, The Exoplanet Data Explorer, http://exoplanets.org/methodology.html, 17.8.2016.

[16] The NASA Exoplanet Archive, IPAC (Infrared Processing and Analysis Center), http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/, 6.2.2017.

[17] Vujnović, V. Astronomija 1. 4. izdanje: Školska knjiga, 2005.

[18] Vujnović, V. Astronomija 2. 3. izdanje: Školska knjiga, 2005.

[19] Struve, O. Proposal for a project of high-precision stellar radial velocity work // The Observatory, Vol.72, 1952., str. 199-200.

[20] Fischer, D.A.; Howard, A.W.; Laughlin, G.P.; Macintosh B.; Mahadevan S.; Sahlmann J.; Yee J.C. Exoplanet Detection Techniques //Protostars and Planets VI, University of Arizona Press, Tucson, 2014., str. 715-737.

[21] Hatzes, A.P.; Cochran W.D.; Endl M.; McArthur B.; Paulson D.B; Walker G.A.H.; Campbell B.; Yang S. A planetary companion to γ Cephei A// Astrophys.J. 599 (2003) 1383-1394

[22] Wolszczan, A.; Frail, D. A. A planetary system around the millisecond pulsar PSR1257 + 12 // Nature, Vol. 355, 6356 (1992.), str. 145–147.

[23] Final Results of NameExoWorlds Public Vote Released, IAU, https://www.iau.org/news/pressreleases/detail/iau1514/, 10.10.2016.

[24] PIA08042:Extreme Planets(Artist Concept), Photojournal, Jet Propulsion Laboratory, NASA,http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA08042, 12.10.2016.

[25] Mayor M.; Queloz D. A Jupiter-mass companion to a solar-type star // Nature, Vol. 378, 6555 (1995.), str. 355-359.

[26] Two Planet Profile - 51 Pegasi b,Photojournal, Jet Propulsion Laboratory, NASA,https://www.jpl.nasa.gov/infographics/infographic.view.php?id=11287, 10.10.2016.

[27] Addresing confusion in double star nomenclature: The Washington Multiplicity Catalog, USNO Astrometry Department, http://ad.usno.navy.mil/wds/wmc/wmc_post191.html, 10.10.2016.

[28] Naming of exoplanets, IAU, http://www.iau.org/public/themes/naming_exoplanets/, 10.10.2016.

[29] Planets are formed as Similar Pairs in Our Solar System and Other Solar-Like stars. http://drenginsayin.blogspot.hr/2011/08/similarities-between-neighbor-planets.html, 10.10.2016.

[30] Hessman, F.V.; Dhillon V.S.; Winget D.E.; Schreiber M.R.; Horne K.; Marsh, T.R.; Guenther, E.; Schwope, A.; Heber, U. On the naming convention used for multiple star systems and extrasolar planets//eprint arXiv:1012.0707, (2010.)

[31] NameExoWorlds, IAU, http://nameexoworlds.iau.org/, 10.10.2016.

[32] Seager S.; Deming D.; Exoplanet Atmospheres// Annual Reviews of Astronomy and Astrophysics, 2010.

[33] Charbonneau D.; Brown T.M.; Noyes R.W.; Gilliland R.,L. Detection an Extrasolar Planet Atmosphere// Astrophys.J.568:377-384,2002

[34] Doyle R.L. Overview of extrasolar planet detection methods, Cambridge University press, New York 2007.

[35] New Technique Finds Gaseous Metals in Exoplanet Atmospheres, WIRED, https://www.wired.com/2010/08/potassium-exo-atmospheres/, 12.12.2016.

[36] Perryman Michael, The Exoplanet Handbook// Cambridge University press, New York, 2011.

[37] Lovis C.; Fischer D. Radial Velocity Techniques for Exoplanets// University of Arizona Press, 2010.

[38] Radial Velocity Method, Las Cumbres Observatory, https://lco.global/spacebook/radial-velocity-method/, 7.2.2017.

[39] Charbonneau D.; Brown T.M.; Latham D.W.; Mayor M.; Detection of planetary transits across a Sun-like star// The Astrophysical Journal, 529:45-48, 2000.

[40] Light Curve of a Planet Transiting Its Star, NASA, https://www.nasa.gov/mission_pages/kepler/multimedia/images/transit-light-curve.html, 7.2.2017.

[41] Finding exoplanets the Transit technique, UCL Certificate of astronomy, zuserver2.star.ucl.ac.uk/~ingo/Lecture_Notes_files/lect11.pdf, 7.2.2017.

[42] Silvotti R.; Schuh S.; Janulis R.; Solheim J.-E.; Bernabei S.; ?stensen R.; Oswalt T. D.; Bruni I.; Gualandi R.; Bonanno A.; Vauclair G.; Reed M.; Chen C.-W.; Leibowitz E.; Paparo M.; Baran A.; Charpinet S.; Dolez N.; Kawaler S.; Kurtz D.; Moskalik P.; Riddle R.; Zola S.; A giant planet orbiting the 'extreme horizontal branch' star V 391 Pegasi // Nature, 449, 189-191 (13 September 2007)

[43] Agol E.; Ste?en J.; Sari R.; Clarkson W.; On detecting terrestrial planets with timing of giant planet transits // Mon.Not.Roy.Astron.Soc.,359, str:567-579, 2005.

[44] Holman M.J.; Murray N.W.; The Use of Transit Timing to Detect Extrasolar Planets with Masses as Small as Earth, Science, 307, str:1288-1291, 2004.

[45] Ballard S.; Fabrycky D.; Fressin F.; Charbonneau D.; Desert J.M.; Torres G.; Marcy G.; Burke C.J.; Isaacson H.; Henze C.; Steffen J.H.; Ciardi D.R.; Howell S.B.; Cochran W.D.; Endl M.; Bryson S.T.; Rowe J.F.; Holman M.J.; Lissauer J.J.; Jenkins J.M.; Still M.; Ford E.B.; Christiansen J.L.; Middour C.K.; Haas M.R.; Li J.; Hall J.R.; McCauliff S.; Batalha N.M.; Koch D.G.; Borucki W.J.; The Kepler-19 System: A Transiting 2.2 $R_\oplus$ Planet and a Second Planet Detected via Transit Timing Variations // The Astrophysical Journal, 743, 200, 2011.

[46] WFIRST-?AFTA Exoplanet Microlensing, University of Notre Dame, https://wfirst.gsfc.nasa.gov/science/sdt_public/.../DBennett.pdf,14.2.2017.

[47] Marois C.; Zuckerman B.; Konopacky Q.M.; Macintosh B.; Barman T.; Images of a fourth planet orbiting HR 8799 // Nature, 468, 1080–1083, (23 December 2010)

[48] Binary Star Systems, Masses of Stars, University of Alberta https://sites.ualberta.ca/~pogosyan/teaching/ASTRO_122/lect13/lecture13.html, 14.2.2017.

[49] Paddock G.F.; The Derivation of the Radial velocity equation // Publications of the Astronomical Society of the Pacific, Vol. 25, No. 149 (1913), pp. 208-211

[50] Clubb K.I.; A detailed derivation of The Radial Velocity Equation, Department of Physics & Astronomy, San Francisco State University, August 2008, http://www.relativitycalculator.com/pdfs/RV_Derivation.pdf, 14.2.2017.

[51] Simon, K. P., Sturm, E., 1994, Disentangling of composite spectra, Astronomy & Astrophysics, 281, 286

[52] Ilijic, S., Hensberge, H., Pavlovski, K., Freyhammer, L.M., 2004, Obtaining normalised component spectra with FDBinary, u Spectroscopically and Spatially Resolving the Components of Close Binary Stars, ASP Conference Series 318, 111

[53] Kolbas, V., Pavlovski, K., Southworth, J., Lee, C.-U., Lee, D.-J., Lee, J.W., Kim, S.-L., Kim, H.-I., Smalley, B., Tkachenko, A., 2015, Spectroscopically resolving the Algol triple system, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 451, 4150

[54] The E-ELT Construction Proposal, The E-ELT Project office, European Southern Observatory `https://www.eso.org/public/products/books/book_0046/`, 14.2.2017.

[55] Doppler Effect Examples, `http://scisyn.com/umuc/astro/ASTR100Notes/doppler-effect-examples.html`, 14.2.2017.

[56] Astronomy Simulations and Animations, Astronomy Education at the University of Nebraska-Lincoln, Extrasolar Planet Radial Velocity Demonstrator, `URLhttp://astro.unl.edu/animationsLinks.html`, 14.2.2017.

[57] Birkby, J.L., de Kok, R.J.,Brogi, M., Schwarz, H., Snellen, I.A.G., 2017, Discovery of water at high spectral resolution in the atmosphere of 51 Peg b, Astronomical Journal (u tisku), arXiv:1701.07257

[58] Gillon, M., Triaud, A.H.M.J., Demory, B.-O., et al., 2017, Seven temperate terrestrial planets around the nearby ultracool dwarf star TRAPPIST-1, Nature, 542, 456