

Raznolikost planetarnih sustava : karakterizacija planeta sličnih Zemlji

Ćurjurić, Bruno

Master's thesis / Diplomski rad

2021

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:034994>

Rights / Prava: [In copyright](#)/Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-22**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
GEOFIZIČKI ODSJEK

Bruno Ćurjurić

RAZNOLIKOST PLANETARNIH
SUSTAVA: KARAKTERIZACIJA
PLANETA SLIČNIH ZEMLJI

Diplomski rad

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
GEOFIZIČKI ODSJEK

DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ FIZIKA-GEOFIZIKA
SMJER: METEOROLOGIJA I FIZIČKA OCEANOLOGRAFIJA

Bruno Ćurjurić

Diplomski rad

**Raznolikost planetarnih sustava:
Karakterizacija planeta sličnih Zemlji**

Voditelj(ica) diplomskoga rada: izv. prof. dr. sc. Giuliana Verbanac

Zagreb, 2021.

Zahvaljujem mentorici, izv. prof. dr. sc. Giuliani Verbanac, na pomoći pri izradi ovoga rada te ponajprije što mi je dozvolila temu iz područja koje me zanima. Također zahvaljujem dr. sc. Antunu Markiju te dr. sc. Ivici Soviću na uloženom vremenu i trudu oko korekcija i konstruktivnih kritika, skupa s Ozanom oko lektoriranja. Hvala obitelji na bezuvjetnoj podršci i poticaju da uvijek idem naprijed. Hvala Darii koja je vjerovala da će ovaj rad biti dovršen na vrijeme, kao i Domagoju i Luki koji su znali da ovaj rad neće biti dovršen na vrijeme.

Sažetak

Godina 2020. označava kraj još jednoga desetljeća od otkrića prvog ekstrasolarnog planeta (egzoplaneta) - planeta izvan Sunčeva sustava, čiji je broj ove godine premašio 4300 potvrđenih. Cilj ovoga diplomskog rada jest kroz razne indekse Zemljine sličnosti, granice naseljive zone i sastava planeta utvrditi koji od ovih planeta sa svojim fizikalnim karakteristikama najviše nalikuju Zemlji.

Opisana je teorijska pozadina oblikovanja egzoplaneta te njihova dinamika nakon oblikovanja - planetarna migracija, zajedno s fizikalnim i orbitalnim karakteristikama sustava zvijezda - planet i metodama detekcije takvih planeta. Korišteni podaci sadržani su u NASA-inom egzoplanetarnom arhivu, kao dio programa "Exoplanet Exploration", a sadrži brojne parametre sustava, planeta i zvijezda koji su kontinuirano ažurirani. Dobiveni rezultati pokazuju kako se planeti nalaze u planetarnim sustavima s višestrukim brojem planeta, dok je trenutno najveći broj planeta u jednom takvom sustavu osam, a matične zvijezde dosežu i zvjezdane sustave od četiri zvijezde. U ovome su radu prikazani rezultati metoda detekcija po godinama i misije te opservatoriji koji su ih otkrili. Prednjači metoda tranzita kojom je otkriveno preko 3/4 planeta, a od njih većina preko NASA-inih misija Kepler i K2. Prikazan je položaj egzoplaneta u kontekstu galaksije te je vidljivo kako se planeti nalaze u neposrednoj blizini Sunca, a kao takve najlakše ih je otkriti zbog same prirode metoda. Zvijezde se uglavnom nalaze na glavnom nizu (patuljci glavnog niza) i najčešći spektralni tip je G (poput Sunca), kojeg slijede K i M. Koristi se indeks Zemljine sličnosti (engl. *Earth Similarity Index*, ESI) koji kroz razne fizikalne parametre pobliže opisuje sličnost planeta sa Zemljom, a izveden je preko dvaju formula koje koriste različite definicije. Kreće se od 0 do 1, a za one indeksa većeg od 0,8, takozvane zemljolike planete, provjerava se nalaze li se u naseljivoj zoni, zoni u kojoj se voda na površini nalazi u tekućem stanju. Nakon toga planetima koji se nalaze u naseljivoj zoni utvrđuje se unutrašnja kompozicija na temelju veze mase i radijusa. Planeti kojima je unutrašnjost nalik Zemljinoj, odnosno 67 % čine stijene, a 33 % željezo, najizgledniji su kandidati za planete koji uvelike sličie Zemlji. Dobiveno je šest takvih planeta, od kojih se dva nalaze u istom planetarnom sustavu. Naposljetku se diskutira o postojanju magnetskog polja tih planeta i njegovoj interakciji s matičnom zvijezdom.

Ključne riječi: egzoplanet, oblikovanje planeta, metode detekcije, Kepler, ESI, naseljiva zona, veza masa - radijus, magnetsko polje

Diversity of planetary systems: Characterization of Earth-like planets

Abstract

Year 2020 marks the end of yet another decade since the discovery of the first extrasolar planet (exoplanet) - a planet outside the solar system, which this year exceeded the number of 4,300 confirmed. The aim of this thesis is to determine which of these planets with their physical characteristics resemble the Earth the most through various indices of the Earth's similarity, the boundaries of the habitable zone and the composition of the planets.

The theoretical background of the formation of exoplanets and their dynamics after formation-planet migration, alongside physical and orbital characteristics of the star-planet system and methods of detection of such planets are described. The data is contained in NASA Exoplanet Archive, under the Exoplanet Exploration Program. It contains a vast number of system, planet and star parameters that are continuously being updated. The obtained results show that the planets are located in planetary systems with multiple planets, while currently the largest number of planets in one such system is eight, and the parent stars reach four-star stellar systems. Detection methods by year and mission and the observatories that detected them are presented. Transit method precedes by detection of over 3/4 of the planets, most of them through NASA's Kepler and K2 missions. Exoplanets' location in the Galaxy is displayed and it is evident that the planets are located in the immediate vicinity of the Sun, due to the very nature of the method. The stars are mostly situated on the main sequence (dwarfs stars) and the most common spectral type is G, followed by K and M. The Earth Similarity Index (ESI) is used, which describes the similarity of the planets with the Earth in more detail through various physical parameters, and is derived through two formulas that use different approaches. It ranges from 0 to 1, where those with ESI greater than 0.8, the so-called Earth-like planets, it is examined whether they are located in a habitable zone, a zone in which water on the surface can exist in a liquid state. After that, the internal composition of the selected planets is probed based on the mass-radius relationship. Planets consisting of 67 % rock and 33 % iron are the most likely candidates for Earth-like planets. Six such planets were extracted, two of which happen to be in the same planetary system. Ultimately, the existence of the magnetic field of these planets and its interaction with the host star are discussed.

Keywords: exoplanet, planet formation, detection methods, Kepler, ESI, habitable zone, mass-radius relationship, magnetic field

Sadržaj

| | |
|--|-----------|
| 1. Uvod | 1 |
| 2. Teorijska pozadina | 2 |
| 2.1. Oblikovanje zvijezde i evolucija protoplanetarnog diska | 2 |
| 2.1.1. Oblikovanje terestričkih planeta | 4 |
| 2.1.2. Oblikovanje divovskih planeta | 6 |
| 2.2. Fizikalne i orbitalne karakteristike zvijezda i planeta | 9 |
| 2.2.1. Planetarna migracija | 14 |
| 2.2.2. Naseljiva zona i indeks Zemljine sličnosti (ESI) | 15 |
| 2.3. Metode otkrivanja egzoplaneta | 17 |
| 2.3.1. Metoda tranzita | 17 |
| 2.3.2. Metoda radijalnih brzina | 18 |
| 2.3.3. Direktno motrenje | 19 |
| 2.3.4. Gravitacijsko mikrolećanje | 19 |
| 2.3.5. Mjerenje perioda pulsara | 19 |
| 2.3.6. Astrometrija | 20 |
| 3. Metoda i analiza podataka | 21 |
| 3.1. Podaci | 21 |
| 3.2. Metoda | 24 |
| 4. Rezultati i diskusija | 26 |
| 5. Zaključak | 40 |
| Literatura | 42 |
| Dodatci | 45 |
| A Tablice | 45 |
| B Spektralna klasifikacija zvijezda | 49 |
| C Tipovi planeta po različitim klasifikacijama | 51 |

1. Uvod

Godine 1995. potvrđeno je postojanje prvoga egzoplaneta, nakon toga otkrića broj je rapidno porastao te sada brojimo preko 4000 planeta u preko 3000 planetarnih sustava. Planetarni sustavi mogu se sastojati od samo jednoga planeta, no nije neobično da sadrže i nekoliko njih. Također, broj zvijezda u takvim sustavima može sadržavati i ne samo jednu matičnu zvijezdu. Metode su uglavnom neizravne, budući da planet praktički ne zrači u vidljivom spektru, no njegov se utjecaj na matičnu zvijezdu itekako može opaziti. Gravitacijske perturbacije te promjene sjaja zvijezde zbog planeta koji prelaze preko diska matične zvijezde služe kao neizravne metode pri otkrivanju te se često mogu združiti kako bi se planet potvrdio, a parametri preciznije odredili. Razni opservatoriji sudjeluju u otkrivanju, s raznim metodama detekcije. Kako broj otkrivanja raste, planeti su sve raznolikiji i teorija se polako razilazi s opažanjima, stoga je potrebno preraditi dosadašnje teorije i uspostaviti nove koncepte, poput planetarne migracije koja opisuje zašto je toliko puno masivnijih planeta pronađeno tako blizu svoje matične zvijezde.

Planeti se razlikuju po svojim odlikama, što doprinosi velikoj različitosti u njihovim strukturama, udaljenostima od matičnih zvijezda i orbitalnim konfiguracijama. Kako je sada već jasno da naš sustav nije poseban, postavlja se pitanje postoji li negdje planet istovjetan Zemlji po svojim fizikalnim obilježjima i imamo li ga već u bazi podataka. Kako vrijeme odmiče, sve je više planeta otkriveno, a već potvrđenima preciznije se određuju parametri, stoga se može bolje odrediti koji planeti priliče kandidatima za novu Zemlju. U tu se svrhu koriste razni indeksi za pojedine osobine, poput sličnosti s unutrašnjosti planeta, atmosfere, koliko je planet naseljiv (preko podataka o tome postoji li tekuća voda na površini planeta). Današnjim metodama i raznim pristupima planetu se može odrediti sastav atmosfere, kao i struktura unutrašnjosti na temelju danog polumjera i mase pa je moguće odrediti do koje mjere planet odgovara Zemlji. Poboljšanjem teleskopa sve će veći broj planeta biti otkriven, a njihove fizikalne karakteristike točnije određene. Uz sve to, saznanja o Suncu i Zemljinom magnetskom polju mogu dati bolji uvid u magnetsku konfiguraciju ostalih planetarnih sustava.

2. Teorijska pozadina

2.1. Oblikovanje zvijezde i evolucija protoplanetarnog diska

Zvijezde nastaju zgušnjavanjem molekularnog oblaka koji je najgušća sastavnica međuzvezdane materije, a sastoji se pretežno od molekula vodika te helija. Jeansova masa označava masu iznad koje se oblak urušava sam u sebe, pod pretpostavkom da ga održava samo termalni tlak (bez vrtnje, magnetskog polja i turbulentnog gibanja). Vrtnja može spriječiti nastavak urušavanja materijala i početak nastanka diska oko takozvane protozvijezde - ona postaje dominantan efekt kada se uravnoteže centrifugalna i gravitacijska sila. Materijal s početnom specifičnom kutnom količinom gibanja L_s združuje se u disk na centrifugalnom polumjeru r_{cen} koji je dan s

$$r_{cen} \approx L_s^2/GM, \quad (2.1.)$$

gdje je M masa sve do spomenutog polumjera. Ako se jezgra ubrzano vrti, može se raspasti u dva ili više podoblaka gdje se kutna količina gibanja međusobno preraspodjeljuje. Svaki od njih može se iznova urušiti i postati zvijezda, oblikujući tako dvojni ili višestruki zvezdani sustav. Budući da se jezgra molekularnog oblaka mora sažeti nekoliko redova veličine, čak i početno sporovrteća gruda u sebi sadrži više kutne količine gibanja nego što je konačna zvijezda ima, a da se ne raspadne. Iz toga slijedi da su gotovo sve zvijezde okružene ravnim diskovima u nekom stupnju evolucije; iako je većina mase sadržana u zvijezdi, većina kutne količine gibanja sadržana je u disku.

Urušavanje materijala pretvara gravitacijsku potencijalnu energiju u kinetičku energiju. Ako je ova energija sačuvana, temperatura jezgre raste, a urušavanje prestaje. U slučaju da je energija izgubljena, primjerice zračenjem, urušavanje postaje još više nestabilno, a time i neizbježnije. Pri infracrvenim valnim duljinama oblak je gotovo proziran pa je većina termalne energije izračena te jezgra ostaje relativno hladna. Međutim, povećavanjem gustoće jezgra naposljetku postaje neprozirna, što onemogućuje istjecanje termalne energije.

Oslobađanje gravitacijske potencijalne energije tako dovodi do zagrijavanja jezgre, povećavajući unutarnji tlak dok nije ostvarena hidrostatička ravnoteža (ravnoteža između gravitacijske sile i sile gradijenta tlaka). Kada temperatura postane dovoljno velika, započinju nuklearne reakcije u jezgri. Deuterij se pretvara u helij pri temperaturi od oko 10^6 K. Kada se potroši sav deuterij, zvijezda se sažima povećavajući tako svoju temperaturu dok ne naraste do $\sim 10^7$ K, vrijednost koja je potrebna za sintezu vodika ^1H u toj mjeri da se zaustavi daljnje sažimanje. Proizvedena energija dovoljna je da se tlak suprotstavi daljnjoj kompresiji.

Materijal se nastavlja urušavati sve dok se njegovi spremnici ne isprazne ili dok zvezdani vjetrovi ne postanu dovoljno jaki da preokrenu smjer dotoka materijala. Ispočetka

plin i prašina s vrlo malenom specifičnom kutnom količinom gibanja padaju prema centru oblikujući tako protozvijezdu. S vremenom će materijal s dovoljno velikom kutnom količinom gibanja također padati prema centru, ali će ga i promašiti zbog centrifugalnih sila. Kako smjesa plina i prašine pada prema ekvatorijalnoj ravnini, susreće se s materijalom koji analogno pada sa suprotne strane te se tako okomite sastavnice brzine poništavaju, dok energija prelazi u toplinu kojom se zagrijava disk u formiranju. Ekvatorijalna ravnina rezultatnog diska približno je okomita na os vrtnje početne jezgre urušavajućeg molekularnog oblaka. Kako nema pronađenog plina između planeta, plin je morao biti odstranjen tijekom nekog evolucijskog stupnja, ili preko UV zračenja mlade zvijezde ili obližnjih zvijezda.

Bez obzira na to što su gibanja zrnatog materijala u protoplanetarnom disku združena (engl. *coupled*) s plinom, vertikalna sastavnica zvijezdine sile teže uzrokuje njihovo sporo nanošenje ka središtu ravnine diska. Stapanje zrnaca sudarima tijekom padanja materijala na disk smanjuje vrijeme taloženja, što zauzvrat povećava brzinu stapanja te na taj način materijal prelazi s milimetarskih veličina na centimetarske. Rast čestica centimetarskih veličina do planetezimala, tijela kilometarskih veličina, prvenstveno ovisi o njihovim relativnim gibanjima. Plin u disku uravnotežen je silom gradijenta tlaka u radijalnom smjeru kao otpor zvijezdinoj sili teži. Na taj je način potreban manji iznos centrifugalne sile kako bi se održala ravnoteža i stoga posljedično kruži brzinom manjom od one keplerovske v_c ,

$$v_c = \sqrt{\frac{GM}{r}}. \quad (2.2.)$$

Efektivna sila teže plina u ovom slučaju iznosi

$$g_{eff} = -\frac{GM_{\odot}}{r_{\odot}^2} - \frac{1}{\rho_g} \frac{dP}{dr_{\odot}}, \quad (2.3.)$$

gdje je ρ_g gustoća plina, a M_{\odot} i r_{\odot} redom masa i polumjer zvijezde. Veće čestice koje se gibaju približno keplerovskim brzinama, dakle, nailaze na otpor čestica koje se sporije gibaju, što uzrokuje smanjenje kutne količine gibanja popraćeno spiralnim gibanjem prema zvijezdi. Planetezimali kilometarskih veličina također su nošeni prema zvijezdi zbog malog omjera površine i mase. Kao posljedica ovog, centimetarske veličine prisvojene su većim tijelima. Metarske veličine najbrže su nošene prema centru, stoga materijal koji 'preživi' oblikovanje planeta primoran je prijeći s centimetarskih na kilometarske veličine u izuzetno kratkom razdoblju.

Tijela veličina većih od ~ 1 km suočavaju se s jačim otporom za razliku od tijela veličine oko 10 metara. Budući da je omjer površine i mase znatno veći za razliku od onih kod manjih čestica, orbite tijela dimenzija kilometra nisu značajno promijenjene uslijed međudjelovanja s plinom. Prvenstveni mehanizmi perturbacija na keplerovskim

orbitama kilometarskih veličina i voluminoznih tijela u protoplanetarnom disku jesu međusobna gravitacijska djelovanja i sudari - ove interakcije vode do prirasta planetezimala. Sudari mogu dovesti do srastanja, fragmentacije ili neelastičnog odbijanja. Ishod sudara uvelike ovisi o čvrstoći planetezimala, koeficijentu restitucije (omjer relativnih brzina dvaju tijela odmah nakon sudara) za neelastične sudare te ponajviše o kinetičkoj energiji sudara. Najveća tijela nakon sudara u disku nazivaju se planetarnim embrijima. Kada relativna brzina među planetezimalima postane usporediva ili čak veća od združene brzine oslobađanja (engl. *escape velocity*) od točke dodira, koja je definirana s

$$v_e = \left(\frac{2G(m_1 + m_2)}{R_1 + R_2} \right)^{1/2}, \quad (2.4.)$$

za brzine $v \gtrsim v_e$ vrijedi da je rast približno proporcionalan s R^2 i tada svaka populacija raste jednakim intenzitetom. No, u slučaju kada je relativna brzina mala, $v \gg v_e$, rast je tada proporcionalan s R^4 , gdje planetarni embriji rastu naglije nego drugi planetezimali, što može izazvati njihov nekontrolirani rast. U disku čija je disperzija brzine regulirana planetezimalima mase m , rast embrija mase M razmjernan je $M \propto M^{4/3} m^{-2/3}$. Pod uvjetom da embriji dominiraju gibanjem, vrijedi $M \propto M^{2/3}$ te ako individualni embriji kontroliraju brzinu u vlastitim zonama, većim embrijima treba više vremena da im se masa udvostruči nego manjim, no svi embriji nastavljaju svoj nekontrolirani rast s obzirom na planetezimale. Ovakva faza poznatija je i pod imenom *oligarhijski rast* (Kokubo i Ida, 1998). Nekontrolirani i oligarhijski rast zahtijevaju male nasumične brzine pa tako i male radijalne pomake planetezimala. Zona opskrbe (engl. *feeding zone*) planetezimala samim time ograničena je na prsten planetezimala kojeg može gravitacijski privući tako da im se orbite sijeku. Iz ovoga slijedi da ubrzani rast prestaje kada embrij pripoji gotovo sve planetezimale u okviru svog gravitacijskog dosega. Izolacijska masa naziv je za najveću masu koja se može postići pripajanjem materijala oko diska. Nekontrolirani rast može ustrajati i dalje različitim mehanizmima, npr. raspršenjem planetezimala gravitacijskim perturbacijama ili aerodinamičkim otporom (engl. *gas drag*). Također, gravitacijski momenti mogu inducirati spiralne valove gustoće, koji pak mogu pokrenuti radijalnu migraciju planeta (Tanaka et al., 1981).

2.1.1. Oblikovanje terestričkih planeta

Nagomilavanje embrija u malen broj terestričkih planeta nužno iziskuje stadij karakteriziran velikim orbitalnim ekscentricitetima, izrazitim radijalnim miješanjem i sudarima ogromnih tijela. Pred kraj faze naglog rasta, većina mase sadržana je u velikim tijelima, stoga njihove nasumične brzine više nisu strogo prigušene ekvipartijom energije s manjim planetezimalima. Uzajamno gravitacijsko raspršenje (engl. *gravitational scattering*) može povećati relativne brzine embrija tako da su uspore-

dive s površinskim brzinama oslobađanja najvećih embrija, koje su potom dovoljne da se postigne njihova međusobna akumulacija u planete. Nakon unakrsnih perturbacija, embrijske orbite se sada križaju i njihova kasnija orbitalna evolucija potpomognuta je bliskim susretima i žustrim, vrlo neeleastičnim sudarima. Završno nastaje nekoliko terestričkih planeta (O'Brien et al., 2006). Simulacije pokazuju kako embriji znatno mijenjaju vrijednosti svojih velikih poluosi kao posljedica bliskih susreta, što kao popratnu pojavu ima smanjenje kemijskog gradijenta koji je postojao pri trenutku kada su se planetezimali oblikovali.

Sudari planetezimala opskrbljuju planet ne samo masom, već i energijom, koja povratno zagrijava planet. Radioaktivni raspad elemenata također zagrijava planet - ako planet ili čak omanji planetezimal sadržava dovoljnu količinu kratkoživućih radioizotopa, temperatura može postati dovoljna da se njegovi dijelovi počnu taliti, omogućavajući tako gušćem materijalu da tone i na taj način pokrenuti diferencijaciju. Pored radioaktivnog raspada ostali izvori energije su srastanje planetezimala koje doprinosi i kinetičkom i potencijalnom energijom, kao i gravitacijskom potencijalnom energijom koja je oslobođena kontrakcijom planeta (kao reakcija na povećani tlak). Uz to se još nadovezuje i prije navedena energija prilikom diferencijacije zajedno s egzotermnim kemijskim procesima.

Planet gubi energiju zračenjem u svemir. Energija se unutar planeta može rasprostrirati kondukcijom i konvekcijom, pod pretpostavkom da je planet dijelom rastaljen. Navedeni mehanizmi ili su spori ili imaju dodatne uvjete, pa je temperatura pretežno regulirana ravnotežom između energije srastanja kao posljedice deponiranja na površini, radioaktivnim raspadom te gubitcima zračenjem s površine. Udarima se $\sim 70\%$ kinetičke energije taloži u stijene ispod sraza u obliku topline, a ostatak od $\sim 30\%$ odnosi se izbačajem. U slučaju da je udar jako velik, dolazi do većeg gubitka topline iz unutrašnjosti koja tada može biti izračena u svemir. Ako je materijal udarom završio duboko ispod površine, dolazi do bitnog učinka zadržavanja topline. Na ovaj način planeti mogu postati jako topli, a temperatura im raste povećavanjem polumjera.

Dovoljno masivni planetarni embriji u stanju su oformiti protoatmosferu srastanjem čvrstih tijela. Iznad određene mase, udari (engl. *impact*) su dovoljno snažni da voda krene isparavati. Povećanjem polumjera događa se potpuno otplinjavanje ili deaeracija (engl. *degassing*), odnosno uklanjanje plinova u tekućini. Efekt pokrova (engl. *blanketing effect*) proces je kojim protoatmosfera, dovoljno nepropusna za odlazno zračenje, može zaustaviti transmisiju energije u svemir i na taj način povisiti površinsku temperaturu protoplaneta, čak i više od efekta staklenika. Na ovaj način atmosfera pruža mehanizam kojim se energija oslobođena udarima zadržava, pospješujući tako dodatno zagrijavanje površine i poboljšavajući uzajamno-povratnu spregu. Iznad određene temperature, na kojoj se tali većina planetarnog materijala, novi planetezimali udarima se također tale. Materijal veće gustoće tone, dok na njegovo mjesto dolaze

rjeđi elementi. Ovim procesom, diferencijacijom, oslobađa se velika količina gravitacijske potencijalne energije u unutrašnjosti planeta te se s dostatnom količinom oslobođene energije veliki dio unutrašnjosti može rastaliti, potičući nastavak diferencijacije unutar cijelog planeta.

Atmosferski plinovi oko planeta oblikuju prorijeđeni sloj koji okružuje planete ili njihove mjesece, a obuhvaća manje od 1 % njihove mase. Atmosfere terestričkih planeta vjerojatno su otplinjavane od srastajućeg materijala planetezimala. Zamršeno pitanje postanka atmosfera terestričkih planeta ne svodi se samo u dovođenju volatila (engl. *volatile*), odnosno ledova, budući da je njihov gubitak itekako bitan. Udari planetezimala u planet u nastajanju, okruženog atmosferom, mogu prouzročiti nekoliko pojava:

1. Ako su planetezimali dovoljno mali da ih otpor zraka zaustavi ili da se raspadnu uslijed tlaka kao direktne posljedice gibanja tijela kroz fluide (engl. *ram pressure*) te uzrokovanog relativnim gibanjem fluida prije nego termalnim gibanjem čestica, cjelokupna njihova kinetička energija bit će apsorbirana u atmosferi.
2. Brzina materijala izbačenog prilikom udara većih planetezimala smanjena je zbog atmosfere i njoj predaje svoju kinetičku energiju. Kako atmosfera ima visoku kompresibilnost u odnosu na čvrstu površinu, plinovima temperatura i tlak mogu nakratko jako porasti. Pored toga, pri udaru oslobođena energija širi se po velikoj površini u obliku udarnog vala s periodom od desetinke do nekoliko desetinki sekunde.
3. Ako je udar dovoljno velik, energija predana atmosferi može biti dovoljna da "otpuše" dio atmosfere kroz pojavu hidrodinamičkog bijega (engl. *hydrodynamic escape*). Ako se udarni presjek upadnog materijala podudara ili je veći od karakteristične visine atmosfere, prilikom udara otpuhuje se puno veća masa atmosfere, odnosno masa atmosfere koja se nalazila između površine i tijela. Udarima se materijal može i donijeti na planet. Hoće li ta masa biti veća od one koju je to tijelo istisnulo iz atmosfere ovisi o njegovoj veličini, sastavu volatila i gustoći atmosfere.

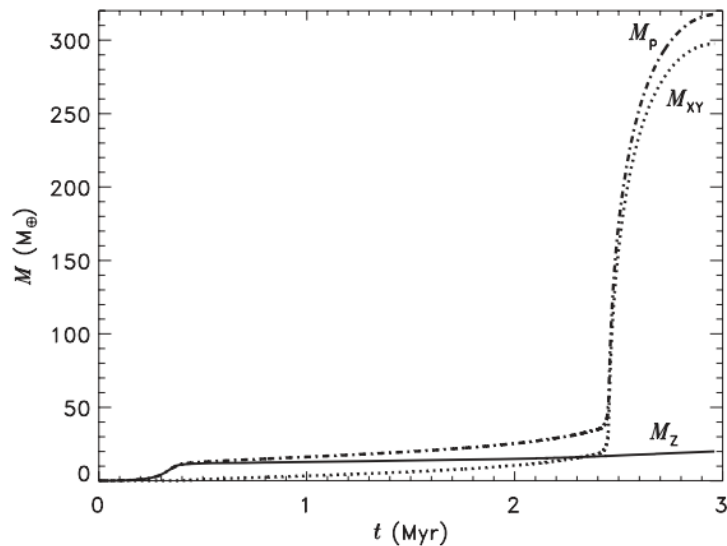
Uz sve navedeno, gubitak atmosferskih plinova može biti ostvaren i Jeansovim bijegom (engl. *Jeans escape*). Kako su vodik i helij najlakši elementi, oni se najlakše otrgnu gravitacijskom utjecaju planeta i najlakše napuštaju atmosferu. Upravo su se ovim mehanizmom i teži plinovi mogli otrgnuti gravitacijskom utjecaju planeta, a zbog relativno visoke temperature rane protoatmofere.

2.1.2. Oblikovanje divovskih planeta

Akreijski model Model kojem je naklonjenija većina znanstvenika naziva se akreijski model (engl. *core nucleated accretion model*), u kojem početna faza razvoja

planeta nalikuje onoj terestričkog planeta, no kada planet postane dovoljno masivan (nekoliko masa Zemlje M_{\oplus}), u mogućnosti je pripojiti znatne količine plina od okolnog protoplanetarnog diska (Hiroshi, 1980).

Ovaj se model zasniva na spoju aglomeracije planetezimala te prikupljanja plina gravitacijom. Prema ovom konceptu početni stadiji srastanja jednaki su onim za terestrički planet. Prašina dolazi do diska gdje se sudarima stapa u sve veće nakupine sve do kilometarskih veličina ili većih planetezimala, koji svoj daljnji rast nastavljaju međusobnim neelastičnim sudarima. Kako niče (proto)planet, gravitacijska potencijalna jama (engl. *potential well*) povećava mu se te, kad mu brzina oslobađanja bude veća od termalne brzine čestica okolnog plina, počinje akumulirati oko sebe plinoviti omotač. Kako gravitacija nastavlja privlačiti plin iz obližnjeg diska prema planetu, tako termalni tlak od već postojećeg omotača ograničava srastanje. Naposljetku porast mase planeta i zračenja energije omogućuje omotaču da se naglo stanji, gdje termalni tlak više nema utjecaja na dovod materijala, već samo koliko je dostupne količine plina u disku.



Slika 2.1. Masa kao funkcija vremena divovskog planeta koji raste do mase Jupitera u jednoj od simulacija akrecijskog modela. Ukupna masa planeta dana je crtkanom linijom, masa čvrste komponente dana je punom linijom, a točkasta linija predstavlja masu plina. Preuzeto iz Lissauer et al. (2009)

Na slici 2.1 prikazana je jedna od numeričkih realizacija modela akrecije. Tijekom nekontroliranog rasta masa (proto)planeta postupno raste, a sukladno s njom i njegova unutarnja temperatura i tlak koji se tako protive plinu da se uruši na protoplanet. Kada je zona opskrbe istrošena, opada brzina srastanja te prema tome i temperatura i termalni tlak, što dozvoljava plinu da pada na planet još ubrzanije. Akumulacija plina progresivno raste sve dok masa plina nije usporediva s masom čvrste komponente planeta. U tom se trenutku srastanje plina drastično ubrzava i odigrava se nekontrolirano srastanje. Kada je planet dovoljno masivan da je njegova gravitacija dostatna za

znatno sabijanje plinovitog omotača, odnosno kada hidrostatička ravnoteža više ne vrijedi, jer se sila gradijenta tlaka više ne može suprotstaviti gravitaciji, daljnje srastanje plina ovisi samo o količini raspoloživog plina u okolici (proto)planeta. Svojim rastom gravitacijskim momentom planet prinačuje disk. Navedeni procesi mogu dovesti do stvaranja procjepa (engl. *gap*) (D'Angelo et al., 2003) i u konačnici do izolacije planeta od okolnog plina. Planet se počinje sažimati u trenutku kada faktor koji ograničava brzinu nakupljanja plina prijeđe s unutarnjeg termalnog tlaka planeta na zalihe plina u disku. U početku se sažimanje događa brzo na Kelvin-Helmholtzovoj skali t_{KH} , koja predstavlja omjer planetarne gravitacijske potencijalne energije E_G i njegovog luminozитета \mathcal{L} (vidi poglavlje 2.2.):

$$t_{KH} \equiv \frac{E_G}{\mathcal{L}} \sim \frac{GM^2}{R\mathcal{L}} . \quad (2.5.)$$

Sažimanje počinje usporavati nakon što omotač postane gušći i manje kompresibilan, a temperatura i luminozitet se počnu snižavati s vremenom. Ovo sporo hlađenje omotača pretežni je izvor viška termalne energije koji je izračen u svemir.

Model nestabilnosti diska Divovski planeti mogu nastati i izravno, sažimanjem i urušavanjem gravitacijski nestabilnih područja protoplanetarnog diska (Boss, 1997). Ova nestabilnost sukladna je gravitacijskoj nestabilnosti koja je preteča zvijezdama te se za razliku od srastajućeg modela u suštini događa trenutno. Dio protoplanetarnog diska posjeduje svoj gravitacijski potencijal kojim nastoji privući okolni materijal, no postoji nekoliko čimbenika koji se protive tome. Jedan od njih jest temperatura, odnosno toplina. Veća temperatura označava brže gibanje čestica plina koji se tako opiru većoj zbijenosti. Također, disk vrteći se oko zvijezde, nosi u sebi rotacijsku kinetičku energiju, koja isto tako pruža otpor komprimiranju. Dio diska bliže zvijezdi giba se brže, dok se dio udaljeniji od zvijezde giba sporije te tako svaki put kada dođe do pokušaja kompresije smicanje mu se opire. Kada gravitacijska potencijalna energija nadjača termalnu i rotacijsku kinetičku, dolazi do urušavanja. Ovakav krah može se relativno jednostavno opisati Toomreovim kriterijem stabilnosti Q , za koji treba vrijediti

$$Q = \frac{c_s \Omega}{\pi G \Sigma} < 1. \quad (2.6.)$$

Ovdje c_s predstavlja brzinu zvuka, odnosno individualnu brzinu čestica plina koja je povezana s temperaturom relacijom

$$c_s \sim \sqrt{\frac{kT}{m}}, \quad (2.7.)$$

gdje je k Boltzmannova konstanta, Ω rotacijska frekvencija diska, a Σ lokalna površinska gustoća plina. Plin u ovoj nestabilnoj regiji naglo postane znatno gušći od svoje okoline. Prema tome slijedi da se Q može povećati povećanjem temperature i/ili bržom vrtnjom, koju izaziva masivnija matična zvijezda. Kako bi došlo do urušavanja potrebno je povećati masu diska, što je smisleno, jer masivniji disk privlači više materijala koji dovodi do urušavanja.

Upravo zbog toga navjerojatnije je da se ovakav scenarij događa u vanjskim dijelovima protoplanetarnog diska, gdje je manja temperatura i postoji više mase za potencijalno urušavanje. Prvobitno će takvi planeti biti homogeni i istog sastava kao i maglica iz koje su nastali. Njihova građa i kompozicija naknadno se mogu promijeniti gravitacijskim prijelazom težih elemenata prema središtu i privlačenjem stjenovitih ili ledenih tijela poput kometa (Spohn et al., 2014, 49).

2.2. *Fizikalne i orbitalne karakteristike zvijezda i planeta*

Sve poznate informacije o zvijezdama koje nisu Sunce dobivene su opažanjem njihovog elektromagnetskog spektra, napose ultraljubičastog, vidljivog i infracrvenog dijela. Svjetlost emitirana sa zvijezde umnogome je određena njenom površinom, temperaturom i kemijskim sastavom njenih vanjskih slojeva. Pomoću ovih saznanja može se doći do podataka kao što su zvjezdana masa, starost i unutarnji sastav, sve iz razloga što oni kroje uvjete opažene na površini.

Luminozitet zvijezde predstavlja količinu energije izračenu po jedinici vremena, najčešće vat. Tok zračenja ukupna je dozračena energija po sekundi po kvadratnom metru promatračevog teleskopa. Ako je zvijezdin sjaj jednak u svim smjerovima, može se procijeniti njezin luminozitet L na temelju izmjerenog toka F , koji je obrnuto proporcionalan kvadratu udaljenosti d :

$$F = \frac{L}{4\pi d^2} . \quad (2.8.)$$

Zvijezde se u znatnoj mjeri razlikuju po svojim iznosima luminoziteta - one najsajjnije su preko milijun puta sjajnije nego Sunce, L_{\odot} , dok su opažene i neke s luminozitetom od $10^{-4}L_{\odot}$. S druge strane, zvjezdane mase kreću se u znatno manjem rasponu od luminoziteta. Najmasivnije zvijezde imaju oko $100 M_{\odot}$. Zvijezda je u suštini nuklearni reaktor i kugla sačinjena od plina veće mase bi izgarala toliko burno da bi samu sebe otpuhala. Najmanje detektirane mase kreću se oko $0,075 M_{\odot}$. S manjom masom nemoguće je dostići temperaturu dovoljnu za početak glavne reakcije sinteze u zvijezdama: pretvorbe vodika u helij. Polumjere zvijezda vrlo je teško utvrditi, budući da nijedna druga zvijezda osim Sunca ne izgleda kao disk gledana sa Zemlje. Obličnijim zvijezdama polumjer se može odrediti interferometrom - praćenjem dimenzija orbite obličnijih dvojnih zvijezda te kada prelaze jedna preko druge može se procijeniti njihov polumjer. Crveni superdivovi, najveće zvijezde, imaju polumjer koji je oko tisuću puta

veći od onog Sunčevog. Najmanje zvijezde, koje još aktivno sagorijevaju nuklearno gorivo, imaju polumjer od oko $0,1 R_{\odot}$.

Spektar zvijezde približno odgovara spektru apsolutno crnog tijela, gdje raspon temperatura obuhvaća vrijednosti od nešto manje od 3000 K, pa sve do 100 000 K. Na temperaturi T , luminozitet L apsolutno crnog tijela polumjera R dan je Stefan-Boltzmannovim zakonom:

$$L = 4\pi R^2 \sigma_{SB} T^4, \quad (2.9.)$$

gdje je $\sigma_{SB} = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W}^{-2} \text{ K}^{-4}$ Stefan-Boltzmannova konstanta. Za zvijezdu luminoziteta L i polumjera R definirana je efektivna temperatura T_{eff} kao temperatura koju bi imalo apsolutno crno tijelo pri istom polumjeru i pri tome emitira jednaku količinu energije. Ova temperatura okvirno je jednaka prosječnoj temperaturi plina zvjezdane 'površine', odnosno njene fotosfere - sloja s kojeg fotoni napuštaju zvijezdu. Najtoplije zvijezde su najplavlje i njihov spektar pokazuje apsorpcijske linije visoko ioniziranih atoma, dok hladne zvijezde emitiraju većinu svoje energije u crvenom ili infracrvenom dijelu spektra te imaju apsorpcijske linije neutralnih atoma i molekula. Harvardska klasifikacija (dodatak B) opisuje zvijezde poredane po jačini svih spektralnih linija. Ovaj niz predstavlja padajući poredak površinskih temperatura zvijezda. Prividna magnituda karakteristika je neke zvijezde koja opisuje koliko se ona doima manje sjajna u odnosu na sjajnu A0 zvijezdu α Lyrae (Vega). Povijesno su najsjajnije zvijezde označene magnitudom $m = 1$, sve do najbljeđe zvijezde vidljive golim okom, magnitude $m = 6$. Drugim riječima - što je zvijezda sjajnija, manja joj je prividna magnituda. Apsolutna magnituda M , s druge strane, definirana je kao prividna magnituda koju bi zvijezda imala da se nalazi na udaljenosti od 10 pc (pc označava parsek, udaljenost na kojoj se jedna astronomska jedinica vidi pod kutom od jedne lučne sekunde). Ako ne postoji prašina ili neki drugi materijal koji bi djelomično prekrivio svjetlost koja se nalazi između promatrača i zvijezde, prividna i apsolutna magnituda povezane su relacijom

$$M = m - 5 \cdot \log_{10} \left(\frac{d}{10 \text{ pc}} \right) \quad (2.10.)$$

Ove magnitude mjerene kroz cijeli spektar valnih duljina koje zvijezda emitira nazivaju se još i bolometrijske magnitude i označene su redom m_{bol} i M_{bol} . Međutim, u praksi detektori mjere tok zračenja sa zvijezde samo u određenom spektru definiranom osjetljivošću detektora. Boja zvijezde može se pedantno odrediti koristeći filtre koji primaju zvijezdin sjaj unutar pojedinih uskih pojava valnih duljina. U standardnom UBV sustavu, zvjezdana prividna magnituda mjeri se kroz tri filtra:

- U , ultraljubičasta magnituda, koja se mjeri kroz filter centriran na 365 nm, s efektivnom pojasnom širinom od 68 nm.

- B , plava magnituda, koja se mjeri kroz filtar centriran na 440 nm, s efektivnom pojasnom širinom od 98 nm.
- V , vizualna magnituda, koja se mjeri kroz filtar centriran na 550 nm, s efektivnom pojasnom širinom od 89 nm.

Koristeći jednadžbu 2.10., zvjezdane apsolutne kolor magnitude M_U , M_B i M_V mogu se odrediti ako je poznata udaljenost. Zvijezdin U-B kolor indeks razlika je između ultraljubičaste i plave magnitude, a B-V kolor indeks razlika između plave i vizualne magnitude:

$$U - B = M_U - M_B$$

$$B - V = M_B - M_V$$

Kako se magnitude smanjuju s povećanjem sjaja, vrijedi da je zvijezda s manjim $B - V$ kolor indeksom plavlja nego zvijezda s većim $B - V$ kolor indeksom. (Carroll i Ostlie, 2017, 91-92)

Astronomi uobičajeno elemente teže od helija nazivaju težim elementima ili metalima, iako se inače tvar/materija poput ugljika, dušika i kisika ne bi definirala metalom. Postoji dobar razlog za odjeljivanje vodika i helija od ostatka elemenata. Naime, manje od pola sata nakon Velikog praska neutroni i protoni razvrstali su se u kombinaciju od oko tri četvrtine vodika, jedne četvrtine helija i litija u tragovima. Nakon toga zvijezde sagorijevaju vodik u helij te helij u teže elemente. Dio mase sastavljen od težih elemenata označava se sa Z . Ako želimo odrediti zastupljenost nekog određenog elementa u zvijezdi, najčešće se koristi njegova zastupljenost u odnosu na Sunce, koristeći logaritamsku skalu:

$$[A/B] \equiv \log_{10} \left\{ \frac{(\text{broj atoma } A/\text{broj atoma } B)_{\star}}{(\text{broj atoma } A/\text{broj atoma } B)_{\odot}} \right\}, \quad (2.11.)$$

gdje \star označava promatranu zvijezdu, a \odot Sunce. Sunčev udio težih elemenata iznosi $Z_{\odot} \approx 0.02$; uz jednu napomenu: $[\text{Fe}/\text{H}]$ se nerijetko koristi za prosječnu zastupljenost težih elemenata u zvijezdi u odnosu na Sunce, no ne mora se uvijek odnositi na udio željeza. (Sparke i Gallagher III, 2007, 100-105)

Pluton, koji je kudikamo najsajjniji objekt u Kuiperovom pojasu, a ujedno i prvi koji je otkriven u tom prostranstvu, klasificiran je kao planet 1930., kada je i otkriven, do 2006. godine. 1 Ceres, prvi otkriveni i neusporedivo najveći objekt asteroidnog pojasa, također je u razdoblju nakon otkrića 1801. godine smatran planetom, kao i naknadno otkriveni asteroidi. Otkrićem ostalih objekata u Kuiperovom pojasu započela je polemika o klasifikaciji Plutona kao planeta, koja je u konačnici urodila plodom: u kolovozu 2006. godine Međunarodna astronomska unija donijela je odluku o razlici

između planeta i patuljastog planeta:

- Planet je nebesko tijelo koje (1) kruži oko Sunca, (2) uspostavljena je hidrostatička ravnoteža (skoro-sferni oblik), i (3) gravitacijski je najdominantniji u svojoj orbiti.
- Patuljasti planet nebesko je tijelo koje (1) kruži oko Sunca, (2) uspostavljena je hidrostatička ravnoteža (skoro-sferni oblik), (3) nije gravitacijski najdominantniji u svojoj orbiti i (4) nije satelit.

Na taj je način degradirala Pluton, a samim time i 1 Ceres, na mjesto patuljastog planeta. Kao utješnu nagradu, Pluton i svi patuljasti planeti izvan Neptunove orbite nazvani su plutoidima, te je tako s nazivom patuljastog planeta preostao jedino Ceres. Cjelokupno znanje o svojstvenim odlikama tijela Sunčevog sustava, uključujući planete, mjesece, komete, asteroide, prstenove i međuplanetarnu prašinu, temeljno je proizašlo iz opažanja, što sa Zemlje, što s umjetnih satelita koji kruže oko Zemlje, ili pak mjerenja izbliza (najčešće *in situ*), odnosno mjerenja prikupljena svemirskim letjelicama. Na taj se način mogu iznjedriti veličine poput orbite, mase i njene raspodjele, veličine tijela, brzine i smjera rotacije, oblika, temperature, magnetskog polja, površinskog i atmosferskog sastava te građe. Uz pomoć raznovrsnih teorija, ova opažanja mogu biti primijenjena kako bi se preciznije odredila planetarna svojstva, poput sastava i unutrašnje građe, dvije značajke koje su ključne u modeliranju nastanka Sunčeva sustava. U 17. stoljeću proizašla su tri zakona gibanja planeta izravno proučavanjem njihovih kretanja na nebeskom svodu, čiji je autor Johannes Kepler:

1. Svi se planeti gibaju po eliptičnoj putanji sa Suncem u jednom od žarišta. Heliocentrična udaljenost r_{\odot} slijedi iz relacije

$$r_{\odot} = \frac{a(1 - e^2)}{1 + e \cos f}, \quad (2.12.)$$

gdje je a velika poluos (prosječna minimalna i maksimalna heliocentrična udaljenost). Ekscentricitet orbite e dan je s

$$e \equiv \sqrt{1 - \frac{b_m^2}{a^2}}. \quad (2.13.)$$

b_m predstavlja manju os elipse. Prava anomalija f kut je između pericentra (točke na orbiti kada su dva tijela najbliže, izraz perihel koristi se za orbite oko Sunca, perigej za orbite oko Zemlje) i trenutnog položaja.

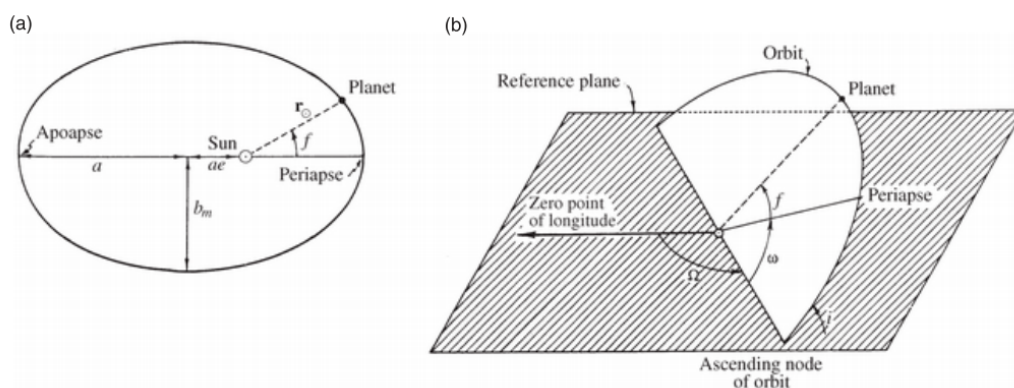
2. Radijvektori Sunca i planeta u jednakom vremenu prebrišu istu površinu \mathcal{A} :

$$\frac{d\mathcal{A}}{dt} = \text{const.} \quad (2.14.)$$

3. Omjer kvadrata perioda planeta oko Sunca i kuba svoje velike poluosi jednak je za sva tijela koja kruže oko Sunca:

$$\frac{P^2}{a^3} = \text{const.} \quad (2.15.)$$

Keplerovi zakoni mogu se izvesti iz Newtonovih zakona gibanja i gravitacije, koji su objavljeni u Principiji krajem 17. stoljeća. Relativistički efekti također utječu na planetarne orbite, no oni su nadasve beznačajni u odnosu na gravitacijske perturbacije uzrokovane djelovanjima među planetima (Lissauer i de Pater, 2019, 11-12,26).



Slika 2.2. (a) Geometrija eliptične orbite. (b) Geometrija orbite u 3D. Preuzeto iz Lissauer i de Pater (2019).

Orbitalna ravnina, unatoč tomu što je fiksna u prostoru, može biti proizvoljno orijentirana u odnosu na bilo koju odabranu ravninu. U pravilu je kao referentna ravnina uzeta Zemljina orbitalna ravnina oko Sunca, imenovana ekliptikom, ili ekvatorijalna ravnina najvećeg tijela u sustavu, ili nepromjenjiva ravnina (engl. *invariable plane*), što je ravnina okomita na vektor ukupne kutne količine gibanja. Potonja ravnina u Sunčevu sustavu gotovo pa se podudara s Jupiterovom orbitom, koja je nagnuta za $1,3^\circ$ u odnosu na ekliptiku. Terminologija i varijable koje se koriste za opisivanje orbite nalaze se na slici 2.2. Sunce se nalazi u jednom od žarišta, a vektor \mathbf{r}_{\odot} označava trenutnu heliocentričnu udaljenost planeta. Velika poluos elipse označena je s a , e predstavlja ekscentricitet, a b_m malu poluos elipse. Prava anomalija f kut je između perihela i trenutnog položaja planeta, i je inklinacija orbite, Ω longituda uzlaznog čvora, a ω argument periaipse. Inklinacija orbite, i , kut je između referentne ravnine i orbitalne ravnine, od 0° i 180° . Dogovorno se za tijela koja kruže u istom smjeru u kojem primarna (masivnija) tijela kruže definira inklinacija u granicama od 0° do 90° i za njih se kaže da su na progradnoj (direktnoj) orbiti. Za tijela koja kruže u suprotnom smjeru od kruženja primarnog tijela definira se inklinacija od 90° do 180° i kaže se da su na retrogradnoj orbiti. U heliocentričnom sustavu Zemljina je orbitalna ravnina većinom upotrijebljena kao referentna. Presjek orbitalne i referentne ravnine

naziva se linija čvorova (engl. *line of nodes*). Mjesta na kojima se navedene ravnine sijeku, kada tijelo prelazi preko orbitalne ravnine, naziva se uzlazni čvor, a silazni čvor kada je smjer suprotan. Usto se odabere i fiksiran smjer referentne ravnine; kut koji zatvara sa smjerom uzlaznog čvora naziva se longituda uzlaznog čvora Ω . Kut između smjera uzlaznog čvora i smjera pericentra naziva se argument pericentra ω . Za orbite oko Sunca, Ω i ω računaju se istočno od proljetne točke. Proljetna točka kružnica je koja prolazi kroz nebeske polove (točke gdje Zemljina os rotacije siječe nebesku sferu) i siječe ekvator na Sunčevoj udaljenosti prvog dana proljeća. Na ovaj način šest orbitalnih elemenata a (velika poluos), e (ekscentricitet), i , Ω , ω i f jedinstveno opisuju položaj tijela u prostoru. Prve tri veličine, a , e , i , glasovite su još i pod imenom glavni orbitalni elementi, budući da opisuju veličinu, oblik i nagib orbite (Lissauer i de Pater, 2019, 29).

2.2.1. Planetarna migracija

Prema dosadašnjim teorijama, planeti su od početka svog nastanka kružili oko matične zvijezde ne mijenjajući svoju radijalnu udaljenost, iz čega proizlazi da bi se terestrički planeti trebali nalaziti bliže matičnoj zvijezdi, a divovski dalje, s obzirom na uvjete koji su prevladavali za vrijeme njihova nastanka. Otkrivanjem sve većeg broja egzoplaneta utvrđeno je da se mnoštvo divovskih planeta, prvenstveno vrućih Jupitera (vidi dodatak C), nalazi jako blizu svojih matičnih zvijezda, što teorija nije u stanju dokazati. Rješenje ove zagonetke započinje problemom male mase Marsa (Hansen, 2009) koje konačno rezultira njegovim rješenjem i razrješenjem problema vrućih Jupitera, koji su nastali izvan linije zaleđivanja (engl. *frost line*) i migrirali zbog induciranih gravitacijskih momenata, takozvanim Grand Tack modelom (Walsh et al., 2011). Nakon vanjske migracije jovijanski se planeti nalaze u kompaktnim orbitama te započinju međusobne gravitacijske perturbacije. Nice model (Gomes et al., 2005; Tsiganis et al., 2005; Morbidelli et al., 2005) objašnjava sadašnju koncentraciju divova, njihove ekscentricitete, kasno teško bombardiranje (engl. *Late Heavy Bombardment*) te postanak Kuiperovog pojasa, kao i Oortovog oblaka.

Planeti mogu migrirati prema matičnoj zvijezdi (i u nekim slučajevima od nje) kao posljedica izmjene kutne količine gibanja protoplanetarnog diska i planeta. Poput mjeseca blizu prstenova, tako su i protoplaneti nošeni od diska s kojim međudjeluju. Za uvjete za koje se nagađa da su ostvareni u većini protoplanetarnih diskova, ukupan gravitacijski moment je negativan te planet gubi kutnu količinu gibanja, što se očituje migriranjem prema zvijezdi. Ako je masa planeta dovoljno mala tako da planet ne stvori procjep oko svoje orbite, tada se oblik migracije pripisuje migraciji prvog tipa. Kada je (proto)planet dosegnuo masu otprilike jednaku masi Jupitera, perturbira disk toliko da stvara procjep u disku oko svoje orbite, čineći tako orbitalnu migraciju nakon stvaranja diska neizbježnom. Brzina ove migracije drugog tipa ne varira ovisno o masi

planeta, osim kada je masa veća od one lokalnog diska; kada masa postane slična, migracija počinje slabjeti (Lissauer i de Pater, 2019, 464).

Migracija je okončana nedostatkom materijala u disku te može biti korigirana uz nazočnost divovskih planeta, kao u Walsh et al. (2011).

Uz interakcije s diskom, planeti mogu migrirati i kao odgovor na odstranjivanje planetezimala unutar gravitacijskog doseg a te njihovo naknadno pripajanje. Distribucija orbita u Kuiperovom pojasu te postojanje Oortovog oblaka čvrst su pokazatelj migracije izazvane raspršenjem planetezimala. Ovaj proces uvelike se razlikuje od onog koji je pobuđen plinom u disku, što je spomenuto ranije. Gravitacijsko kolebanje Urana i Neptuna uzrokuje velike ekscentricitete okolnih planetezimala koji s tako malim perihelom mogu dospjeti do planeta s manjom velikom poluosi, pretočivši tako kutnu količinu gibanja prvotnom planetu. Ovako se planetezimali prosljeđuju od Neptuna preko Urana do Saturna te na koncu do Jupitera koji je dovoljno masivan da ih izbaci iz Sunčeva sustava ili da se nađu na paraboličkim putanjama. Kada su na paraboličkim putanjama dovoljno udaljenima od Sunca, njihove brzine su toliko male da plimne sile galaksije te privlačenje zvijezda u blizini mogu drastično povećati njihov perihel i tako ih preseliti Oortovom oblaku. Ostatak divovskih planeta također je kadar izbaciti planetezimale iz Sunčeva sustava, no vremenske skale znatno su veće od onih kojima se planetezimal prenese do Jupitera. Za planet na kružnoj orbiti, promjena kutne količine gibanja L povezana je s promjenom velike poluosi a relacijom

$$\Delta L = \frac{1}{2} M_p \sqrt{\frac{GM_\odot}{a}} \Delta a. \quad (2.16.)$$

Na taj je način Jupiter, kao najmasivniji planet s najmanjom velikom poluosi, migrirao najmanje, a Neptun najviše (Lissauer i de Pater, 2019, 464-465).

2.2.2. Naseljiva zona i indeks Zemljine sličnosti (ESI)

Naseljiva zona (engl. *habitable zone*, nadalje HZ) prstenasto je područje oko zvijezde u kojemu može postojati voda u tekućem stanju na površini planeta. Udaljenost HZ od matične zvijezde ovisi o luminozitetu zvijezde, koji, za zvijezde glavnog niza, u znatnoj mjeri ovisi o masi zvijezde. Kao unutarnja granica HZ određena je na udaljenosti na kojoj je voda izgubljena kao rezultat nekontroliranog učinka staklenika. Sukladno tomu, vanjska granica označava područje na kojemu staklenički plinovi nisu u mogućnosti održati površinsku temperaturu iznad ledišta bilo gdje na planetu. Granice HZ mogu se aproksimirati pojasom u kojemu površinska temperatura planeta omogućava postojanje tekuće vode pri tlaku od jednog bara,

$$273 \text{ K} < T_s < 373 \text{ K} . \quad (2.17.)$$

Površinska temperatura dana je kao suma ravnotežne temperature i iznosa reziduala temperature dobivenog zbog zagrijavanja uvjetovanog stakleničkim plinovima.

Postoje još i tzv. supernaseljivi planeti, koji su sa svojim fizikalnim karakteristikama još pogodniji za život nego Zemlja (Heller i Armstrong, 2014). Masa takvih planeta iznosi 2 do 3 mase Zemlje M_{\oplus} , s gustoćom otprilike jednakoj Zemljinoj, što odgovara polumjeru od 1,26 do 1,44 polumjera Zemlje, R_{\oplus} . Prosječna površinska temperatura iznosi 25 °C. Supernaseljivi planeti kruže oko K zvijezde (vidi dodatak B). One su manje masivne od Sunca te se nalaze na glavnom nizu dugi niz godina.

Indeks Zemljine sličnosti (engl. *Earth Similarity Index*, ESI), govori o tome koliko su planeti i sateliti slični Zemlji. Indeks se kreće u rasponu od 0 do 1, a Zemlja ima vrijednost 1. Važno je naglasiti da ovaj indeks ne govori je li planet naseljiv, već kako mu se fizikalni parametri odnose prema Zemljinim.

ESI objedinjuje planetarni polumjer, gustoću, brzinu oslobađanja (drugu kozmičku brzinu) te površinsku temperaturu u indeks (Schulze-Makuch et al., 2011). Indeks je dan težinskom funkcijom

$$ESI_x = \left(1 - \left| \frac{x - x_0}{x + x_0} \right| \right)^w, \quad (2.18.)$$

gdje je x planetarni parametar, x_0 Zemljina vrijednost tog parametra, w težinski faktor, a ESI_x mjera sličnosti - broj između 0 (uopće nema sličnosti) i 1 (identičan). Težinskim faktorom regulira se osjetljivost skale. Težinski faktor w za polumjer iznosi 0,57, za gustoću 1,07, brzinu oslobađanja 0,70 te naposljetku za površinsku temperaturu 5,58. Geometrijska težina čini indeks osjetljivijim na manje vrijednosti. ESI je tada za svaki parametar integriran u jednu vrijednost ESI primjenjujući pri tome geometrijsku sredinu. Sličnost među planetima može se podijeliti na: unutrašnju, površinsku i globalnu. Indeks sličnosti unutrašnjosti ESI_I govori u kojoj mjeri planet ima čvrstu, stjenovitu unutrašnjost, dok indeks površinske sličnosti ESI_S govori u kolikoj mjeri planet može održati uvjete kakvi postoje na površini Zemlje. Sličnosti su dane s

$$ESI_I = (ESI_r \cdot ESI_{\rho})^{1/2}, \quad (2.19.a)$$

$$ESI_S = (ESI_{v_e} \cdot ESI_{T_s})^{1/2}, \quad (2.19.b)$$

gdje polumjer r i gustoća ρ definiraju ESI_I , a brzina oslobađanja v_e i površinska temperatura T_s definiraju ESI_S . Unutrašnja i površinska sličnost tada su pretočene u jednu vrijednost kao

$$ESI = (ESI_I \cdot ESI_S)^{1/2}. \quad (2.20.)$$

Kako je za egzoplanete dostupno znatno manje informacija, Habitable Exoplanet Catalog (University of Puerto Rico at Arecibo, 2020) koristi funkciju $ESI(S,R)$ u obliku

kvadratne sredine, posebnog slučaja korijena srednje vrijednosti, za računanje indeksa:

$$\text{ESI}(S, R) = 1 - \sqrt{\frac{1}{2} \left[\left(\frac{S - S_{\oplus}}{S + S_{\oplus}} \right)^2 + \left(\frac{R - R_{\oplus}}{R + R_{\oplus}} \right)^2 \right]}, \quad (2.21.)$$

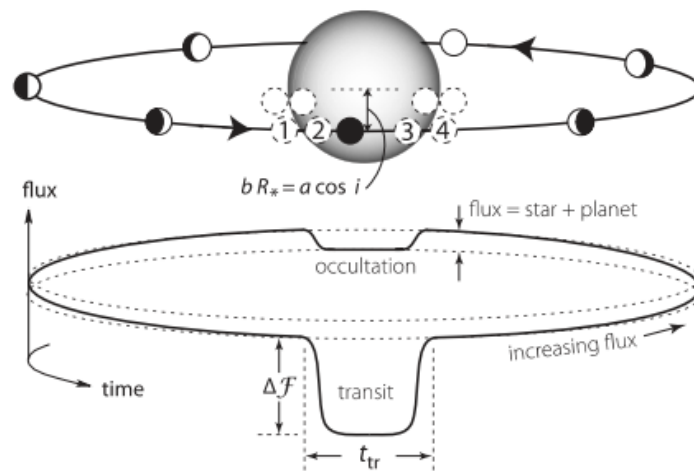
gdje je: S tok zračenja, R polumjer planeta, a S_{\oplus} i R_{\oplus} Zemljini analozi.

2.3. Metode otkrivanja egzoplaneta

Različite metode upotrebljavaju se pri otkrivanju planeta oko drugih zvijezda. Budući da su planeti znatno manje uočljivi od matičnih zvijezda zbog svoje veličine i sjaja, većina metoda indirektna je u smislu da se planet otkriva kroz njegov učinak na svjetlost koja izravno dopire sa zvijezde ili pak na promjene u položaju zvijezde zbog gravitacijskih perturbacija planeta. Neke od metoda uključuju i utjecaj gravitacije planeta na sjaj još udaljenije zvijezde koja se nalazi u naizgled istom smjeru motrenja. Najvažnije i najučestalije primjenjivane metode navedene su u ovom poglavlju.

2.3.1. Metoda tranzita

Ako se Zemlja nalazi približno u smjeru orbitalne ravnine egzoplaneta, taj planet prelazi jednom ispred diska zvijezde (tranzitira) po svojoj revoluciji. Tranzit počinje prvim kontaktom, pri kojemu je planet na položaju (1) na gornjem dijagramu. Planet blokira sjaj zvijezde kada stupa u drugi kontakt (2), gdje pad sjaja opstaje sve do trećeg kontakta (3). Tranzit završava četvrtim kontaktom (4), kada nastupa sekundarna pomrčina (slika 2.3.1.).



Slika 2.3. Skica tranzita planeta na kružnoj orbiti. Preuzeto iz Lissauer i de Pater (2019)

Ova metoda omogućava izučavanje radijusa i perioda planeta. Da bi tranzit mogao biti opažen na teleskopu, orbita mora biti približno 90° od doglednice - pravca koji povezuje motritelja i točku motrenja,

$$\cos i < \frac{R_\star + R_p}{r}, \quad (2.22.)$$

gdje su R_p i R_\star redom polumjeri planeta i zvijezde, a r udaljenost između dvaju tijela kada je planet najbliži promatraču. Iako je vjerojatnost da se opazi tranzit nasumično orijentiranog planeta P_{tr} dana s

$$P_{tr} = \frac{R_\star + R_p}{a(1 - e^2)} \quad (2.23.)$$

jako mala, istovremeno se može promatrati tisuće zvijezda unutar vidnog polja teleskopa, stoga ova metoda može itekako biti učinkovita. Zanimajući varijacije sjaja duž čitavog zvjezdanog diska, prelaskom planeta njezin sjaj se smanjuje, a iznos pada sjaja ovisi o polumjeru planeta i zvijezde kao

$$\frac{\Delta F}{F} = \left(\frac{R_p}{R_\star} \right)^2, \quad (2.24.)$$

gdje je F tok zračenja sa zvijezde, a R_p i R_\star redom polumjeri planeta i zvijezde. Ako se ovo događa periodično, može se zaključiti kako se radi o planetu. Ovom se metodom može dobiti podatak o polumjeru planeta. Jedna važna odlika ove metode jest da se opaženi planeti također mogu promatrati i preko metode radijalnih brzina te tako dobiti pravu masu planeta (budući da je poznata inklinacija iz tranzita). Ovako nadopunjavajuća mjerenja omogućuju poznavanje gustoće planeta, što predstavlja oruđe pri određivanju sastava planeta, koje tim putem postavlja ograničenje na njegovo oblikovanje (Lissauer i de Pater, 2019, 400-401).

2.3.2. Metoda radijalnih brzina

Planet i matična zvijezda gibaju se oko baricentra, zajedničkog središta mase dvaju ili više tijela koja kruže jedan oko drugoga. Zvijezda, iako znatno masivnija od planeta, ipak bilježi mjerljive pomake u apsorpcijskim linijama kako kruži oko baricentra, praćeno varijacijama u brzini kojom se giba prema ili od Zemlje, odnosno varijacijama radijalne brzine zvijezde u odnosu na Zemlju. Iznos radijalne brzine može se odrediti iz pomaka apsorpcijskih spektralnih linija matične zvijezde usljed Dopplerovog efekta. Dopplerov efekt promjena je frekvencije valova koji stižu do promatrača zbog relativnog gibanja njega i izvora. Naime, kada se zvijezda približava, očitavat će se pomak prema plavom, a udaljavanjem pomak prema crvenom dijelu spektra. Pomoću ove metode može se dobiti vrijednost produkta mase planeta i sinusa kuta između doglednice

i orbitalne ravnine, kao i ekscentricitet i period orbite. Ova metoda najosjetljivija je za masivnije planete te planete s vrlo kratkim periodima (Lissauer i de Pater, 2019, 372). Upravo je ovom metodom službeno otkriven prvi egzoplanet (Mayor i Queloz, 1995), za što je autorima 2019. godine dodijeljena Nobelova nagrada.

2.3.3. Direktno motrenje

Planeti su naspram zvijezda zanemarivoga sjaja, jedini sjaj je zapravo onaj reflektiran od matične zvijezde i kao takve jako ih je teško zasebno promatrati. Ipak, kontrast u infracrvenom spektru vrlo je izgledniji kandidat jer je manji i iznosi ~ 3 reda veličine te u tom intervalu emitira najveću količinu energije. Koronagraf je instrument koji se postavlja na teleskop kako bi se blokirala svjetlost koja dolazi sa zvijezde tako da samo planeti ostanu vidljivi. Ovom metodom lakše se detektiraju planeti čije su matične zvijezde bliže Sunčevu sustavu, što je veći planet na što većoj orbitalnoj udaljenosti i, dakako, s većom temperaturom koja se poistovjećuje s većom emitiranom energijom u infracrvenom valnom području. (Lissauer i de Pater, 2019, 403-404)

2.3.4. Gravitacijsko mikrolećanje

U skladu s Einsteinovom teorijom relativnosti, svjetlost koja dopijeva s udaljene zvijezde, a koja prolazi kroz masivni objekt (leću) između promatrača i izvora, sabijena je. Kut sabijanja zrake je neznatan, a efekt se zove mikrolećanje (engl. *microlensing*). Sjaj izvora može se umnogostručiti za nekoliko mjeseci za vrijeme mikrolećanja, a režim promjene sjaja može poslužiti za određivanje svojstva promatranog objekta. Ako leća - u ovom slučaju zvijezda - u svom sustavu obuhvaća i planet, tada on može proizvesti karakteristični trag u krivulji sjaja. Ovakvi događaji zbivaju se kada su izvor i leća vrlo dobro poravnati, pa se treba provoditi neprestano praćenje neba kako bi se povećala mogućnost opažanja planeta. Nadalje, metoda je najkorisnija za planete smještene između Zemlje i centra galaksije, budući da se u tom smjeru nalazi najviše pozadinskih zvijezda. Gravitacijsko lećanje daje uvid u masu planeta, a daje i mogućnost uočavanja sustava s više planeta i/ili s više od jedne zvijezde. Značajni nedostatak ove metode jest nemogućnost ponavljanja, jer je vjerojatnost da se opetovano lećanje dogodi neizmjereno mala. Popratna opažanja u većini slučajeva su problematična, s obzirom na to da su promatrani sustavi, zbog svoje velike udaljenosti, izrazito slabog sjaja. (Lissauer i de Pater, 2019, 402-403).

2.3.5. Mjerenje perioda pulsara

Mjerenje perioda pulsara ujedno je i prva metoda otkrivanja egzoplaneta. Godine 1992. astronomi Aleksander Wolszczan i Dale Frail otkrili su planet koji kruži oko pulsara

PSR 1257+12. Pulsari, neutronske zvijezde polumjera sličnog Zemlji, nastaju eksplozijom supernove koje sadrže jako okretno magnetsko polje, emitiraju radiovalove koji se doimaju kao pojedinačni pulsevi promatraču na Zemlji. Iako su pulsevi odašiljani periodički, s obzirom na to da je brzina svjetlosti konačna, vremena za koja pristižu do odredišta ne moraju biti jednoliko raspodijeljena, primjerice - ako se udaljenost između pulsara i teleskopa mijenja nelinearno. Uzrok toga može biti prisustvo planeta zbog kojeg će se pulsar gibati oko baricentra. Najlakše otkriveni planeti jesu masivni planeti čija se orbitalna ravnina skoro podudara s doglednicom i čiji je period usporediv ili znatno manji od duljine intervala za vrijeme kojeg su dostupna mjerenja. Mada se ovom metodom mogu detektirati planeti mase uvelike manje od Zemljine, manjkavost joj je relativno mali broj pulsara u odnosu na ostale zvijezde. Uz to, ovi planeti zacijelo nastaju pod drukčijim okolnostima (Lissauer i de Pater, 2019, 397).

2.3.6. Astrometrija

Planeti također mogu biti otkriveni preko promjene položaja zvijezde uzrokovane prisutnošću planeta koji je projiciran na nebesku ravninu. Amplituda promjene položaja jednaka je

$$\Delta\theta \leq \frac{M_p}{M_\star} \frac{a}{r_\odot}, \quad (2.25.)$$

gdje je r_\odot udaljenost između zvijezde i Sunčeva sustava, a a duljina velike poluosi orbite. Iz ovoga je očito kako je astrometrijska metoda naklonjenija pronalasku masivnijih planeta koji kruže oko manje masivnih zvijezda relativno blizu Suncu. Ako su r_\odot i a u istim mjernim jedinicama, mjerne jedinice $\Delta\theta$ su u radijanima. Ako je pak r_\odot izražen u parsecima i a u astronomskim jedinicama, tada je $\Delta\theta$ dana u lučnim sekundama. Planete na udaljenijim orbitama uvjerljivo je lakše otkriti ovom metodom, jer je amplituda promjene položaja zvijezde veća, no pronalazak ovakvih planeta podrazumijeva i dulji niz opažanja uslijed većih perioda (Lissauer i de Pater, 2019, 398-399).

3. Metoda i analiza podataka

3.1. Podaci

U ovom radu korišteni su podaci dani u NASA-inom egzoplanetarnom arhivu (Akeson et al., 2013) (nadalje: Arhiv). Podaci su ažurirani redovno, a za ovaj rad koriste se oni prikupljeni zaključno sa 2020. godinom.

Arhiv klasificira objekte kao planete ako zadovoljavaju sljedeće uvjete:

- masa (ili minimalna masa) jednaka je ili je manja od 30 Jupiterovih masa M_J (u tijeku pisanja njih 7 ima veću masu)
- objekt nema matičnu zvijezdu, već slobodno kruži oko središta galaksije (nije odbjegli planet, vidi dodatak C)
- potrebna su naknadna opažanja i potvrda valjanosti kako bi se isključila vjerojatnost pogreške

Gore navedeni podaci zajedno su s orbitalnim i/ili fizikalnim karakteristikama dostupni u recenziranim publikacijama. Za članke koji objave višestruke vrijednosti za parametre egzoplaneta ili njegove matične zvijezde, izdvojena je samo jedna vrijednost kao standardna, no korisnik može pristupiti članku za dodatne vrijednosti. Odabir standardne vrijednosti parametra zasniva se na broju i preciznosti objavljenih parametara, a referenca standardnog parametra prikazana je u tablici s podacima. Članci u kojima su izneseni rasponi vrijednosti parametara egzoplaneta ili matične zvijezde, uzima se srednjak raspona kao jedinstvena vrijednost te raspon podijeljen s 2 kao granice neodređenosti. Drugim riječima, ako je za masu egzoplaneta rečeno da je u rasponu od 6 do 15 masa Jupitera, usvaja se vrijednost mase od 10.5 ± 4.5 masa Jupitera.

U tablici 3.1 dani su parametri koji detaljnije opisuju sastav planetarnog sustava. U tablici 3.2 dani su neki od parametara planeta od važnosti u Arhivu zajedno s popratnim opisom i pripadajućim mjernim jedinicama. Isto tako, u tablici 3.3 dani su i zvjezdani parametri.

Tablica 3.1. Opis planetarnog sustava

| Parametar | Opis |
|------------------------|--|
| Ime matične zvijezde | Ime zvijezde najčešće korišteno u literaturi |
| Ime planeta | Ime planeta najčešće korišteno u literaturi |
| Slovo planeta | Dodijeljeno slovo planetu, počevši od b |
| Broj zvijezda | Broj zvijezda u planetarnom sustavu |
| Broj planeta | Broj planeta u planetarnom sustavu |
| Broj mjeseca | Broj mjeseca u planetarnom sustavu |
| Oznaka dvojnog sustava | Označuje kruži li planet oko dvojnog sustava (1 = da, 0 = ne). Zvezdani parametri (navedeni kasnije u tekstu) za dvojne planete navedeni su za primarnu zvijezdu |
| Koordinate | Lokacija zvijezde u ekvatorijalnom, galaktičkom i ekliptičkom koordinatnom sustavu i njena udaljenost u parsecima |

Tablica 3.2. Planetarni parametri od interesa, njihov opis i pripadne mjerne jedinice

| Parametar | Opis | Mjerna jedinica |
|---|--|--|
| Metoda detekcije | Metoda kojom je planet prvi put utvrđen | |
| Godina detekcije | Godina u kojoj je planet otkriven | |
| Period orbite | Vrijeme ophoda planeta oko matične zvijezde ili sustava | dan |
| Velika poluos | Najveći radijus eliptične orbite, ili, za planete detektirane gravitacijskim mikrolećanjem ili direktnim motrenjem, projicirana separacija na nebeskoj ravnini | AU |
| Polumjer | Duljina linijskog segmenta od središta planeta pa do njegove površine | R_{\oplus} , R_J |
| Gustoća | Količina mase po jedinici volumena planeta | g/cm^3 |
| Masa | Količina materije sadržana u planetu ili minimalna masa planeta izmjerena metodom radijalne brzine | M_{\oplus} , $M_{\oplus} \times \sin i$ M_J , $M_J \times \sin i$ |
| Ekscentricitet | Odstupanje od savršene kružnice | |
| Insolacijski tok (engl. <i>insolation flux</i>) | Drugi način da se dođe do ravnotežne temperature | Zemljin tok |
| Ravnotežna temperatura | Ravnotežna temperatura planeta modelirana tako da je planet apsolutno crno tijelo zagrijavano samo od strane matične zvijezde, ili za planete otkrivene preko direktnog motrenja, efektivna temperatura planeta nužna da se podudara izmjereni luminozitet ako je planet apsolutno crno tijelo | K |
| Orbitalna inklinacija | Kut orbitalne ravnine relativno u odnosu na ravninu okomitu na doglednicu od Zemlje prema promatranom objektu | $^{\circ}$ |

Tablica 3.3. Zvezdani parametri od interesa, njihov opis i pripadne mjerne jedinice

| Parametar | Opis | Mjerna jedinica |
|------------------------|--|----------------------------|
| Spektralni tip | Klasifikacija zvijezde na temelju spektralnih karakteristika Morgan-Keenanovog sustava (vidi dodatak B) | |
| Efektivna temperatura | Temperatura zvijezde gdje je zvijezda smatrana apsolutnim crnoim tijelom koje emitira istu količinu elektromagnetskog zračenja | K |
| Polumjer | Duljina linijskog segmenta od središta zvijezde pa do njene površine | Polumjer Sunca |
| Masa | Količina materije sadržane u zvijezdi | Masa Sunca |
| Metalicitet | Udio metala u odnosu na vodik u fotosferi | dex |
| Omjer metaliciteta | Udio metala u zvijezdi [Fe \ H] | |
| Luminozitet | Količina energije izračena po jedinici vremena | $\ln(L_{\odot})$ |
| Površinska gravitacija | Akceleracija sile teže na površini zvijezde | $\log_{10}(\text{cm/s}^2)$ |
| Starost | Vrijeme provedeno na glavnome nizu | mlrd. g. |
| Gustoća | Količina mase po jedinici volumena zvijezde | g/cm^3 |
| Rotacijski period | Vrijeme potrebno da matična zvijezda izvrši jedan period, uz pretpostavku da je čvrsto tijelo | dan |

Za planete kojima je empirijski dobivena masa M_p , no koji nemaju empirijski dobiven polumjer R_p , bez obzira postoji li empirijski dobivena gustoća ρ_p , poziva se veza između mase i polumjera iz Chen i Kipping (2017) kako bi se odredio polumjer planeta R_p . Relacija je dana s

$$\mathcal{R} = \mathcal{C} + \mathcal{M} \times \mathcal{S}, \quad (3.1.)$$

gdje je $\mathcal{R} = \log_{10}(R_p/R_{\oplus})$, \mathcal{C} = konstantni član (izražen u \log_{10}), $\mathcal{M} = \log_{10}(M_p/M_{\oplus})$, \mathcal{S} = nagib polinoma (engl. *power – law relation*) koji povezuje masu i polumjer, a R_{\oplus} i M_{\oplus} su redom Zemljin polumjer i masa. Parametri korišteni za procjenu radijusa planeta, kojemu je empirijski dobivena masa, iznose:

$$\{\mathcal{C}; \mathcal{S}\} = \begin{cases} \{0,00346; 0,2790\} & \text{ako je } M_p < 2,04M_{\oplus} \\ \{-0,0925; 0,589\} & \text{ako je } 2,04 < M_p/M_{\oplus} < 132 \\ \{1,24; -0,044\} & \text{ako je } 132 < M_p/M_{\oplus} < 26600 \\ \{-2,85; 0,881\} & \text{ako je } M_p \geq 26600M_{\oplus}. \end{cases}$$

S druge strane, za planete koji imaju empirijski dobiven polumjer R_p , no nemaju empirijski utvrđenu masu M_p , bez obzira na empirijski određenu gustoću planeta ρ_p ,

veza mase i polumjera iz Chen i Kipping (2017) preinačena je kako bi se dobila veza polumjera i mase. Oblik kojim se dobiva masa planeta M_p , uz već zadani polumjer planeta R_p , je sljedeći:

$$\mathcal{M} = (\mathcal{R} - \mathcal{C})/\mathcal{S} . \quad (3.2.)$$

Međutim, ključno je naglasiti da, budući da treći član u ovoj relaciji ima negativan nagib (*i.e.* $\mathcal{S} < 0$), postoji raspon vrijednosti planetarnih polumjera R_p gdje se dani R_p ne preslikava u jedinstveni planet mase M_p , stoga se zazire od određivanja mase M_p u tom rasponu, koji se prostire na nekoliko redova veličine (u jedinicama M_p). Proizašla funkcija po dijelovima je stoga:

$$\{\mathcal{C}; \mathcal{S}\} = \begin{cases} \{0, 00346; 0, 2790\} & \text{ako je } R_p < 1, 23R_{\oplus} \\ \{-0, 0925; 0, 589\} & \text{ako je } 1, 23 < R_p/R_{\oplus} < 11, 1 \\ \{-2, 85; 0, 881\} & \text{ako je } R_p \geq 14, 3R_{\oplus}. \end{cases}$$

Planetima kojima su u Arhivu dostupni i polumjer R_p i masa M_p , no za koje ne postoji planetarna gustoća ρ_p , gustoća je izračunata pomoću standardne relacije koja povezuje volumen, masu i polumjer (uz pretpostavku sfernog oblika planeta). Eksplicitna funkcionalna forma dana je s:

$$\rho_p = 3M_p/(4\pi R_p^3) . \quad (3.3.)$$

Za matične zvijezde s poznatim polumjerom R_{\star} i efektivnom temperaturom T_{eff} , no za koje u Arhivu nije poznat luminozitet, L_{\star} , koristi se Stefan-Boltzmannov zakon. Njegova eksplicitna funkcionalna forma dana je s:

$$L_{\star} = 4\pi R_{\star}^2 \sigma T_{eff}^4 . \quad (3.4.)$$

Također su dostupni podaci o naseljivoj zoni (vidi poglavlje 2.2.2.) koji sadrže zvjezdane parametre poput luminoziteta, temperature te polumjera, kao i granice (unutarnje i vanjske) naseljive zone izražene u astronomskim jedinicama, u ovisnosti o matičnoj zvijezdi, a dobiveni su iz Kasting et al. (1993).

3.2. *Metoda*

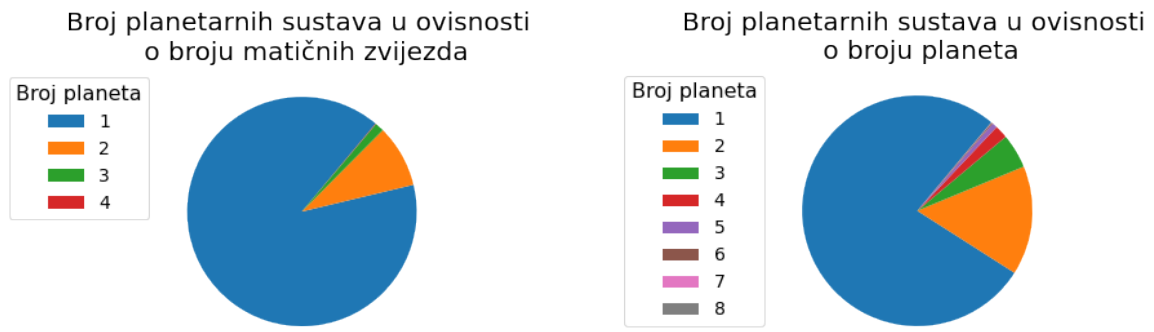
Za sve grafove koristi se Matplotlib (Hunter, 2007) uz paket MW_Plot koji omogućava izradu slika naše galaksije, Mliječne staze, gledano iz "ptičje perspektive" (okomito na disk galaksije) te gledano s ruba galaksije u galaktičkim te galaktocentričkim koordinatama. Korišten je programski paket Pandas (McKinney et al., 2010), sadržan u programskom jeziku Python. Za upravljanje listama i matematičkim operacijama koristi se programski paket NumPy (Harris et al., 2020). Neke konstante potrebne za

račun preuzete su iz paketa `scipy` (Virtanen et al., 2020) (poput gravitacijske konstante G i Ludolfovog broja π). Za preračunavanje jedinica i ostale astronomske prilike korišten je `astropy` (Robitaille et al., 2013), npr. kod preračunavanja koordinata kako bi bile dostatne za daljnje računanje i stavljene u grafove.

4. Rezultati i diskusija

Do sada je potvrđeno postojanje 4324 planeta u 3211 planetarnih sustava koji kruže oko 3216 zvijezda, a nije pronađen niti jedan egzomjesec.

Na slici 4.1 prikazan je grafikon planetarnih sustava s brojem matičnih zvijezda u sustavu u kojem se nalaze. Grafikon (a) prikazuje broj planetarnih sustava koji kruže oko određenog broja matičnih zvijezda. Grafikon (b) prikazuje broj planetarnih sustava koji se sastoje od određenog broja planeta. Grafikon (c) objedinjuje prethodna dva grafikona: prikazuje koliko planetarnih sustava sadrži planete za zadan broj matičnih zvijezda. Većina planetarnih sustava sastoji se od jednog planeta, a najveći broj otkrivenih planeta u sustavu jest osam, kao što je i naš Sunčev sustav, sustav KOI-351. Isto tako, utvrđeno je postojanje samo jednoga sustava sa sedam planeta. Tablica A1 opisuje koliki broj planetarnih sustava pripada kojem broju planeta. Broj zvijezda u zvjezdanom sustavu oko kojega kruži najveći broj planeta jest jedna zvijezda, dok dva planeta kruže oko čak četiri zvijezde. Vrijednosti za svaki zvjezdani sustav mogu se pronaći u tablici A2. Četrdeset planeta kruži oko dvojnog sustava čiji zvjezdani sustavi sačinjavaju dvije ili više zvijezda.



(a) Grafikon broja planetarnih sustava u ovisnosti o broju matičnih zvijezda.

(b) Grafikon broja planetarnih sustava u ovisnosti o broju planeta.



(c) Grafikoni pojedinačnih planetarnih sustava koji se nalaze u raznim zvjezdanim sustavima.

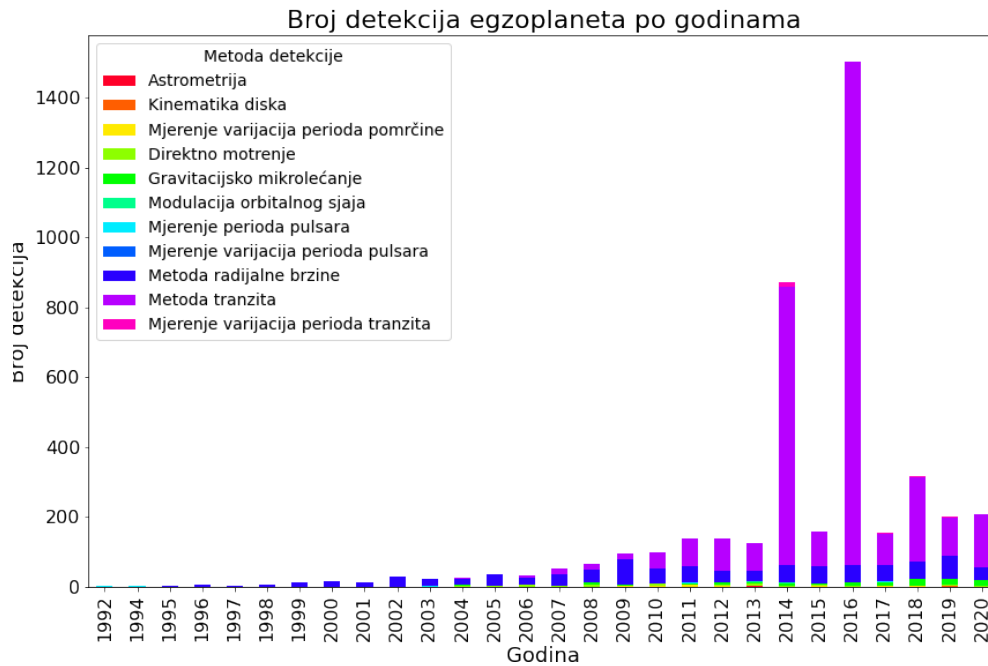
Slika 4.1. Broj planeta i planetarnih sustava u kojima se nalaze potvrđeni egzoplaneti s brojem matičnih zvijezda u zvjezdanim sustavima.

Na slici 4.2a prikazan je broj detekcija egzoplaneta po godinama s pripadnom metodom detekcije. Na početku prednjači metoda radijalne brzine, no ubrzo prevladava metoda tranzita. Veliki skok u broju detekcija godine 2014. i 2016. odgovara misijama Kepler i K2, prikazano na slici 4.2b, koje su tada pustile veći dio podataka na obradu. Tablica A3 predstavlja broj detekcija po godinama. Planet HD 114762 b, iako je njegovo postojanje postulirano još 1989., potvrđen je tek 1992. godine (Cochran et al., 1991), nakon pulsara PSR1257+12, stoga je svrstan u 1992. godinu. Također, planet TOI-251 b uvršten je u 2021., no godina njegova otkrića jest 2020. godina (Zhou et al., 2020). Grafikon na slici 4.3 također prikazuje metode detekcije kao na slici 4.2, no sada njihov međusobni omjer uspješnosti u otkrivanju. Budući da su dvije misije koje su doprinijele više od polovice otkrića egzoplaneta, Kepler i K2, zasnovane na metodi tranzita, ta metoda prevladava među metodama detekcije. Iako je misija K2, a tako i Kepler, završena, novi teleskopi, poput TESS, također koriste metodu tranzita, tako da ta metoda i dalje ostaje najfrekventnija. U tablici A4 prikazan je detaljan broj otkrića planeta u ovisnosti o metodi detekcije.

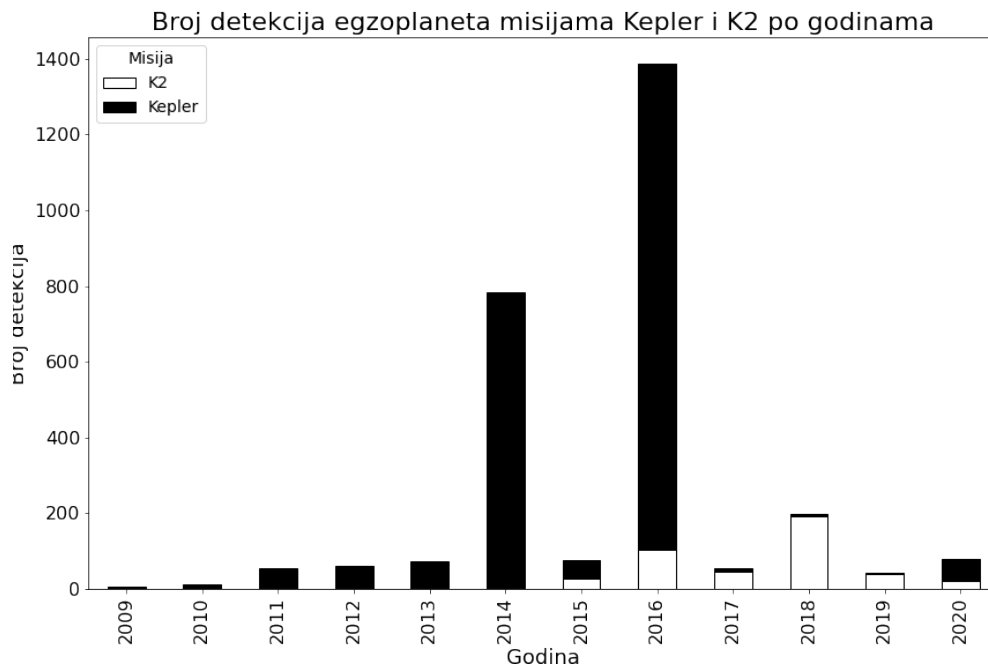
Otkrivanje egzoplaneta obavlja se pomoću različitih teleskopa, a njime se bave različiti opservatoriji diljem svijeta. Na dijagramu 4.4 predočena su imena teleskopa i opservatorija koji sudjeluju ili su sudjelovali s najviše otkrića. Kepler misija učestvuje s pozamašnim brojem otkrića, a slijedi je K2 misija, koja je zapravo nasljednik Kepler misije, a nalazi se na istoj letjelici. Misija TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite), koja zasad ima mali broj otkrića metodom tranzita, za vrijeme trajanja misije pokriva površinu 400 puta veću od Keplerove misije, točnije oko 85 % neba. Iako je misija završila početkom srpnja 2020. godine, nastavlja se analiza njezinih podataka, a produljenje misije omogućava prikupljanje još više podataka, pa tako i planeta kandidata. U tablici A5 predstavljeni su glavni teleskopi i ustanove koje sudjeluju u potrazi za egzoplanetima, zajedno sa svojim kratkim opisima.

Zvijezde oko kojih kruži barem jedan egzoplanet dane su u ekvatorijalnim koordinatama na slici 4.5. Kvadrat s koordinatama RA = 19h22m40s i dec = +44°30'00 u središtu, u zvijezđu Labuda (lat. *Cygnus*), Harfe (lat. *Lyra*) i Orla (lat. *Aquila*), zapravo predstavlja metu svemirskog teleskopa i istoimene misije Kepler, u sklopu koji je u tom području obavljeno promatranje stotina tisuća zvijezda, pa je tako i gustoća u tom dijelu neba najveća. Sa slike je vidljivo da su planeti zastupljeni gotovo u svakom dijelu neba te je jasno da bi unaprijeđenjem teleskopa planeti trebali biti i gušće otkriveni.

Najudaljeniji detektirani planet nalazi se na udaljenosti od 8,5 kpc u smjeru središta galaksije (galaktičke longitude $l = 1.26^\circ$). Položaj potvrđenih egzoplaneta u našoj galaksiji, Mliječnoj stazi, gledan okomito na disk galaksije, predstavljen je na slici 4.6. Sunce i cijeli Sunčev sustav nalaze se na unutarnjoj strani Orionovog kraka, koji se nalazi otprilike na polovici galaksije, između galaktičkog ispupčenja, odnosno središta galaksije, i ruba galaksije. Vidljivi stožac zapravo je glavnina Kepler misije, a nalazi se



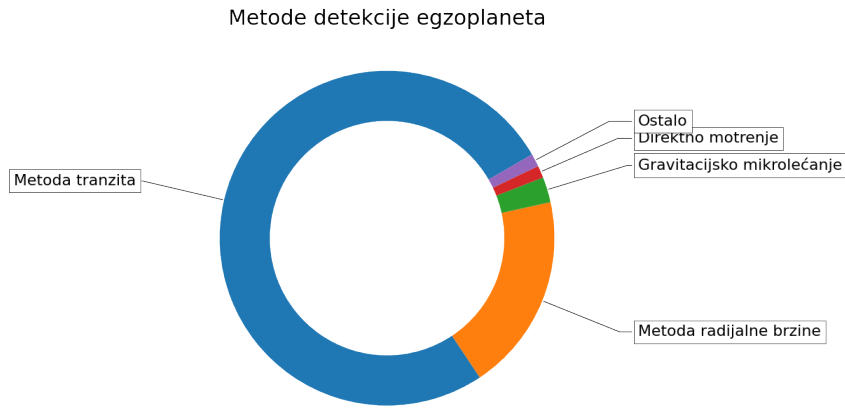
(a) Broj detekcija egzoplaneta po godinama određenom metodom detekcije.



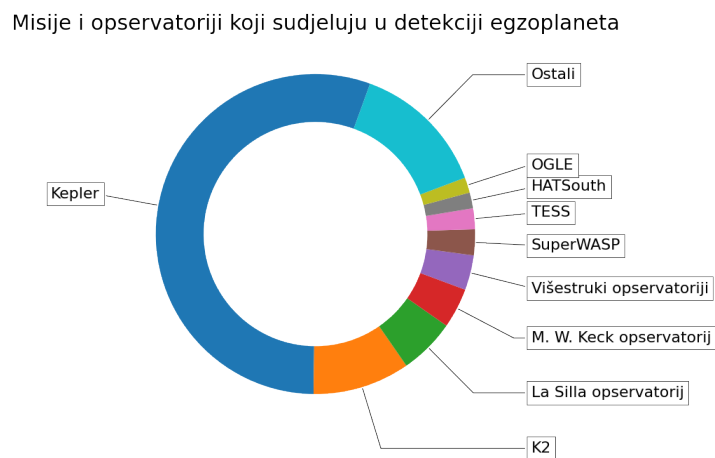
(b) Broj detekcija egzoplaneta misijama Kepler i K2 po godinama.

Slika 4.2. Broj detekcija egzoplaneta na godišnjoj razini sa popratnim metodama detekcije i specifičnim misijama prikazan je redom na dijagramima (a) i (b).

na koordinatama galaktičke dužine $l = -76.32^\circ$ i širine $b = +13.5^\circ$. Isto tako, planeti su otkriveni i duž spojnice Sunce - središte galaksije, budući da je u tom smjeru najveća koncentracija zvijezda, pa samim time i veća vjerojatnost pronalaska planeta. Ipak, većina egzoplaneta nalazi se u blizini Sunca i u svim smjerovima, zbog toga što ih je tako najlakše opaziti. Bliža udaljenost pogoduje preciznijim mjerenjima te su pomaci



Slika 4.3. Međusoban omjer uspješnosti metoda detekcija egzoplaneta.



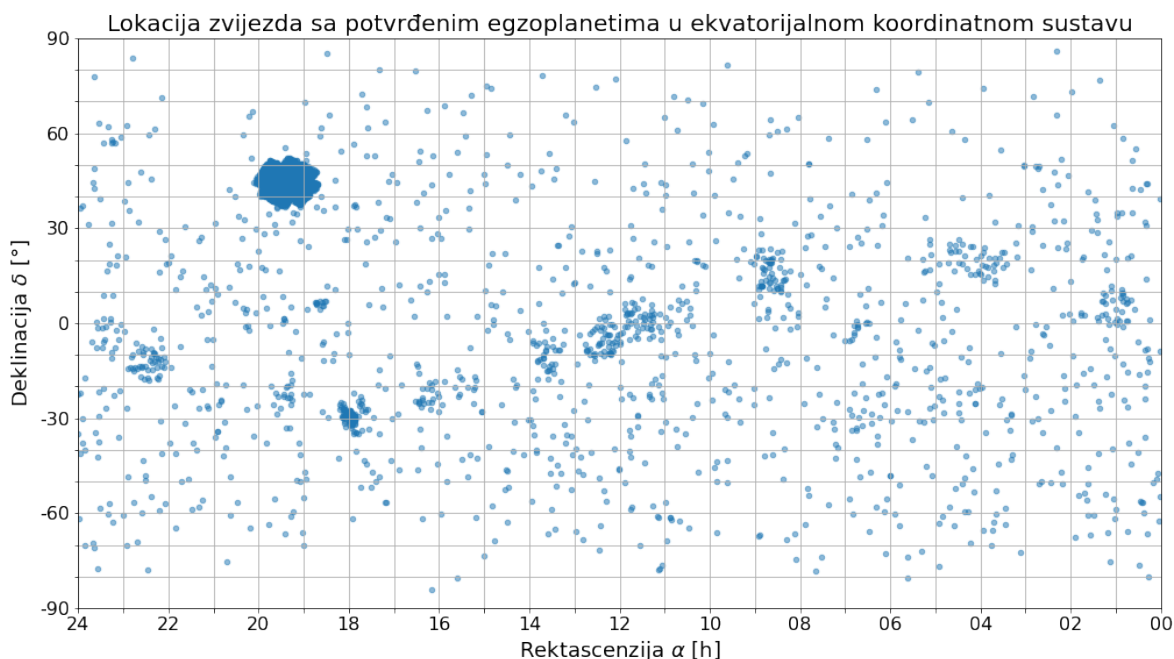
Slika 4.4. Udio potvrđenih egzoplaneta od pojedine misije i teleskopa, odnosno opservatorija.

u spektralnim linijama uočljiviji.

Slika 4.7 također prikazuje položaj egzoplaneta u Mliječnoj stazi, no sada gledano s ruba galaksije. Kvadrat odgovara longitudi -76.32° i latitudi $+13.5^\circ$, odnosno centru Keplerove misije. Slika je vrlo slična slici 4.5, budući da postoji relativno jednostavna veza između ekvatorijalnih i galaktičkih koordinata. Zvijezde s egzoplanetima pokrivaju cijelo noćno nebo u svim smjerovima.

Matične zvijezde mahom se nalaze na glavnome nizu, kao što je prikazano na slici 4.8. Zvijezde G, K i M najčešći su kandidati za otkrivanje planeta upravo zbog same biti Kepler teleskopa - da se pronađu planeti nalik Zemlji. Broj zvijezda u ovisnosti o spektralnom tipu dan je u tablici A6.

Neke od fizikalnih karakteristika planeta ilustrirane su na histogramima na 4.9. Na histogramu su također prikazane najmanje i najveće vrijednosti u Sunčevu sustavu s odgovarajućim planetima za pojedini parametar. Vidljivo je da su egzoplaneti i sustavi općenito većeg ekscentriciteta od onih u Sunčevu sustavu. Planeti s masom do 10 Zemljinih masa, takozvane super Zemlje (vidi dodatak C), najčešće su otkrivani, a



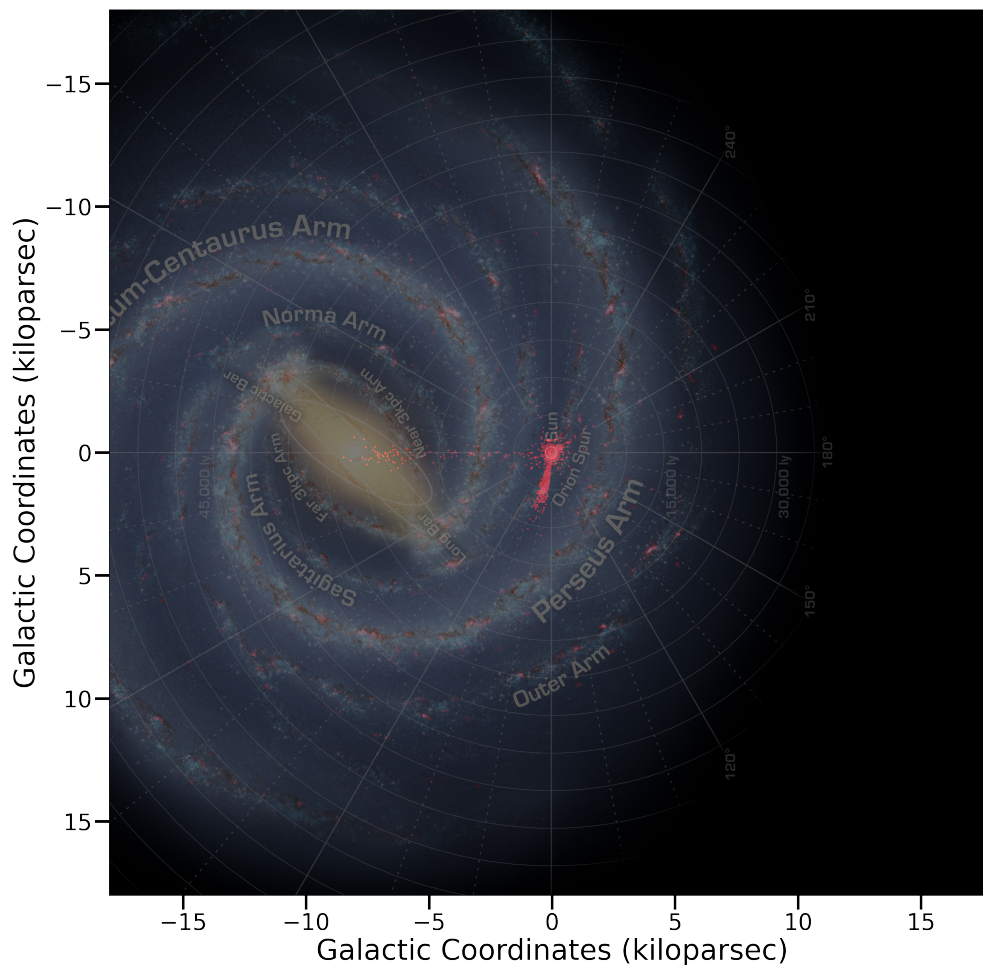
Slika 4.5. Položaj zvijezda s potvrđenim egzoplanetima u ekvatorijalnim koordinatama RA i dec.

zanimljivo je da postoje i planeti s masom većom od najmasivnijeg planeta u Sunčevu sustavu, Jupitera. Razlog ovakve neravnomjerne raspodjele leži u pristranosti metoda detekcije. Naime, lakše je otkriti masivnije planete, budući da gravitacijski jače djeluju na matičnu zvijezdu, pa induciraju i veće pomake matične zvijezde, što oko baricentra, što apsorpcijskih linija. Glavnina egzoplaneta ima period manji od 100 dana, dok je Merkurov period oko 88 dana. Manji period rezultira većim brojem podataka i javlja se periodičnost iza koje se može s većom pouzdanošću utvrditi radi li se zaista o planetu. Uz pristranost detekcije koja je naklonjenija planetima bliže matičnoj zvijezdi, zbog kraćeg perioda, što omogućava veći broj podataka, planeti isto tako i migriraju. Histogrami temperatura planeta slične na histograme perioda i udaljenosti od matične zvijezde, budući da period ovisi o udaljenosti, a udaljenost je proporcionalna temperaturi.

Korištenjem formule Exoplanet Habitability Catalog (EHC), kao dio virtualnog laboratorija planetarne naseljivosti (engl. *Planetary Habitability Laboratory*, PHL), i standardne formule (Schulze-Makuch et al., 2011) ilustrirani su dobiveni podaci za sve egzoplanete i prikazani su na dijagramima 4.10 i 4.11. Na slici 4.10 x-os predstavlja tok matične zvijezde na logaritamskoj skali izražen u tokovima Sunca, a y-os polumjer planeta izražen u polumjerima Zemlje, također u logaritamskoj skali. S druge strane, osi standardnog ESI na slici 4.11 označavaju unutrašnji i površinski ESI.

Za $ESI(S, R)$, jednaka težina daje se polumjeru planeta i toku zračenja sa zvijezde, a kako se tok rasprostire kroz nekoliko redova veličine više od polumjera, tako je i ESI manji. Kataloški $ESI(S, R)$ - EHC korišten je budući da je za egzoplanete poznato

Zvijezde u Mliječnoj stazi s potvrđenim egzoplanetima
u galaktičkim koordinatama

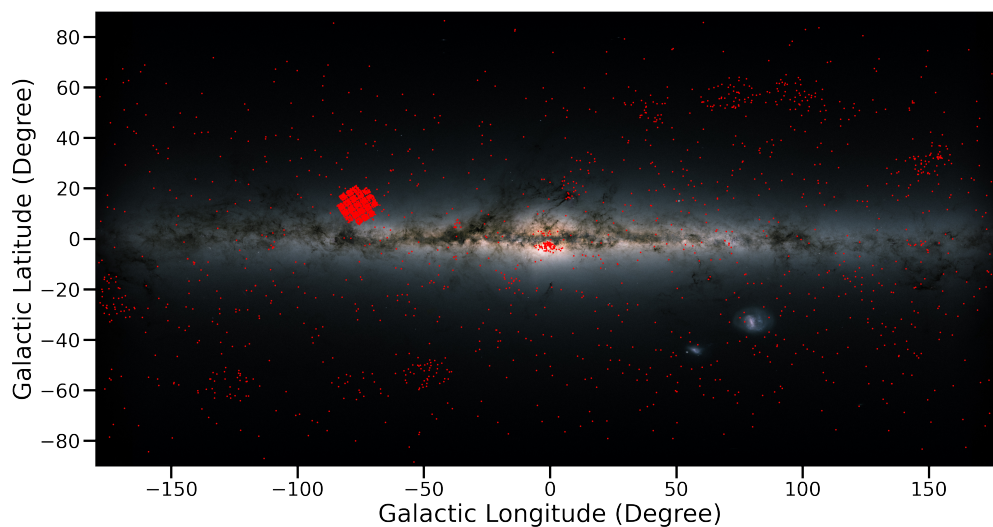


Slika 4.6. Položaj zvijezda u našoj galaksiji s potvrđenim egzoplanetima u galaktičkim koordinatama, gledano okomito na disk galaksije. Pozadinska slika galaksije vlasništvo je NASA/JPL-Caltech/R. Hurt (SSC/Caltech).

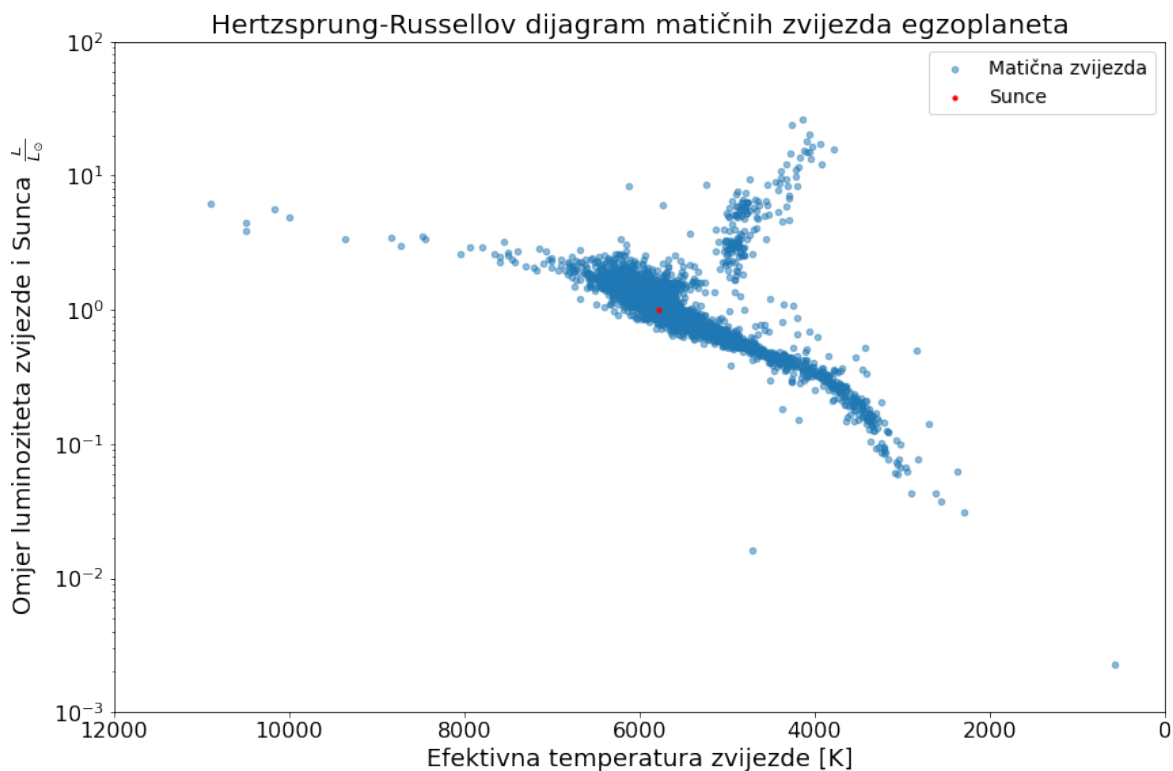
manje parametara, stoga ovaj indeks ne daje stvarnu sliku o npr. gustoći i kompoziciji planeta, već govori samo o polumjeru planeta te o zračenju koje dolazi na njegovu površinu. Znatno broj egzoplaneta za EHC nalazi se na desnoj strani grafa, području koje odgovara većim tokovima zračenja, a što je konzistentno s histogramom temperatura i udaljenosti planeta: veći tok ujedno znači i veću energiju koja dopire do planeta pa tako i temperaturu. U intervalu od 0,2 do 0,4 $ESI(S, R)$ nalazi se skoro 80 % potvrđenih planeta, te ih je samo u tom intervalu više od onih računanih preko standardne formule. U intervalu od 0,8 do 1 ulazi 21 planet.

Standardni ESI, uz polumjer i tok zračenja koji se ispoljava kroz površinsku temperaturu, koristi još i polumjer te brzinu oslobađanja koja je direktno povezana s masom,

Zvijezde u Mliječnoj stazi s potvrđenim egzoplanetima u galaktičkim koordinatama

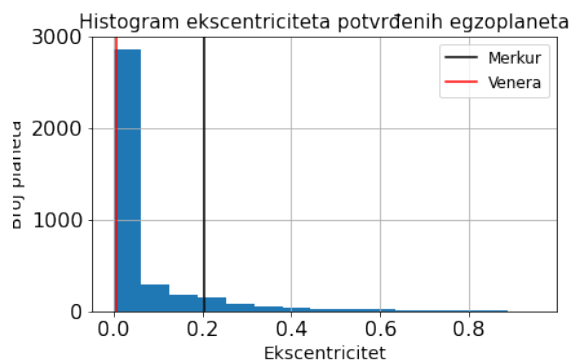


Slika 4.7. Položaj zvijezda u našoj galaksiji s potvrđenim egzoplanetima u galaktičkim koordinatama, gledano s ruba galaksije. Pozadinska slika galaksije vlasništvo je ESA/Gaia/DPAC.

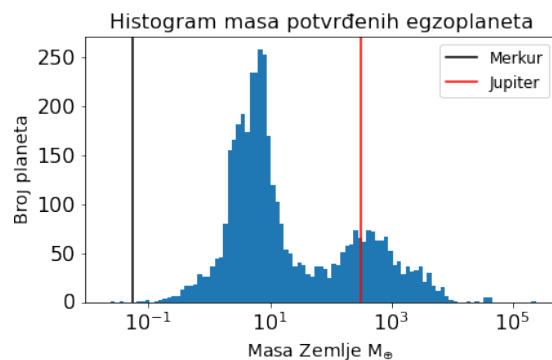


Slika 4.8. HR dijagram zvijezda domaćina koje sadrže podatak o svojoj površinskoj temperaturi te luminozitetu.

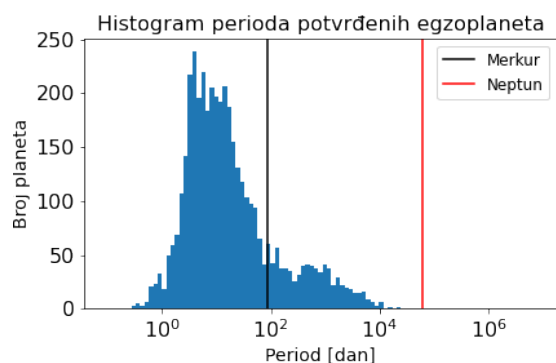
pa je tako i opis planeta bolji i pouzdaniji. Na slici standardnog ESI prikazane su još i granice ESI_I od 0,8 za koje planeti s većim vrijednostima indeksa imaju stjenovitu



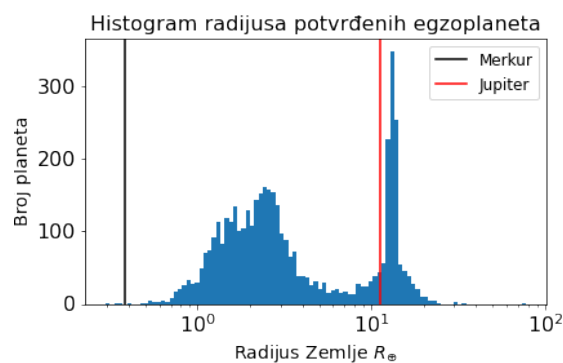
(a) Ekscentriciteti planeta



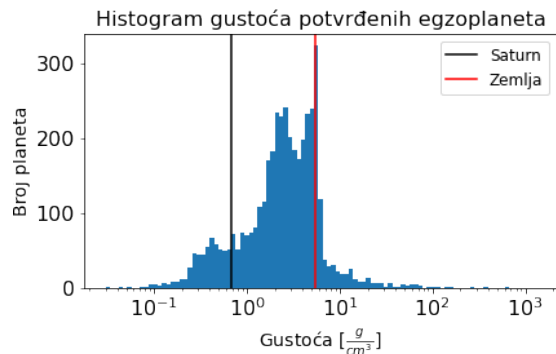
(b) Mase planeta



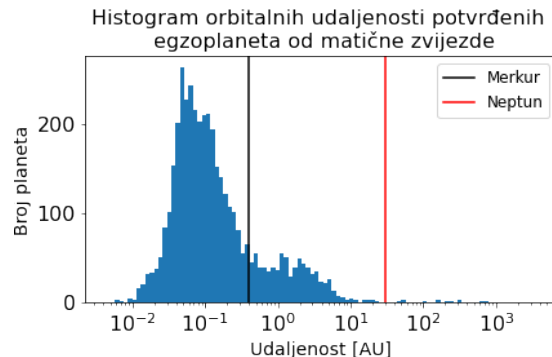
(c) Periodi planeta



(d) Polumjeri planeta



(e) Gustoće planeta

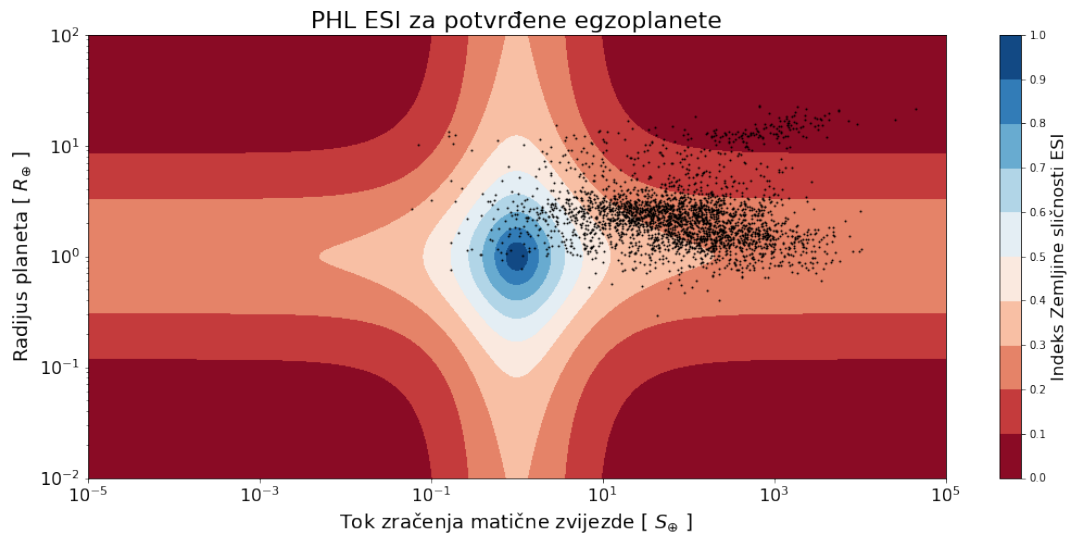


(f) Udaljenosti planeta

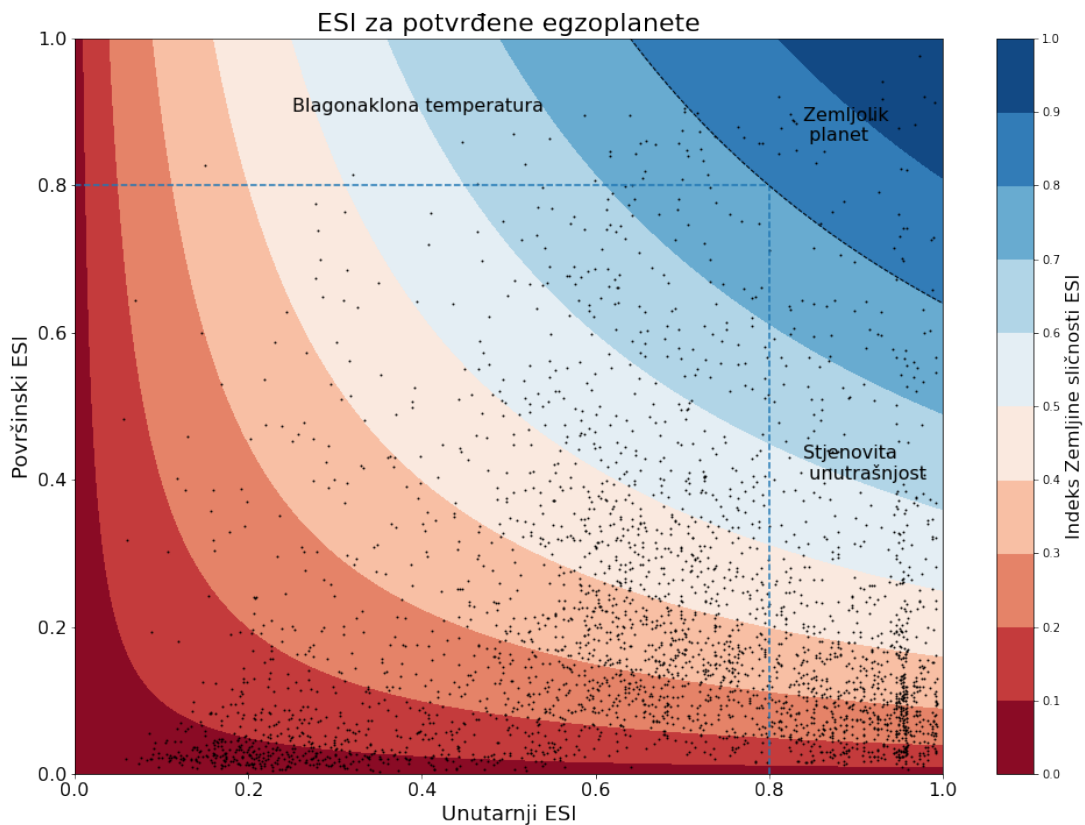
Slika 4.9. Histogrami fizikalnih svojstava detektiranih egzoplaneta sa pripadnim minimalnim i maksimalnim vrijednostima u Sunčevu sustavu.

unutrašnjost, a za $ESI_S > 0,8$ i površinsku temperaturu koja sliči Zemljinoj. Planeti kojima je ukupni ESI veći od 0,8 smatraju se zemljolikim planetima i odvojeni su crtkanom linijom. To su najbolji kandidati za titulu planeta koji asociraju na Zemlju, naravno sa svojim fizikalnim karakteristikama.

Čestine pojedinog ESI (unutrašnji i površinski), kao i ukupni ESI, prikazane su na slici 4.12a. Površinski ESI uvjerljivo broji najviše na nižim vrijednostima, od 0 do 0,2 te pada kako ukupni indeks raste. S druge strane, čestine unutrašnjeg ESI rastu s



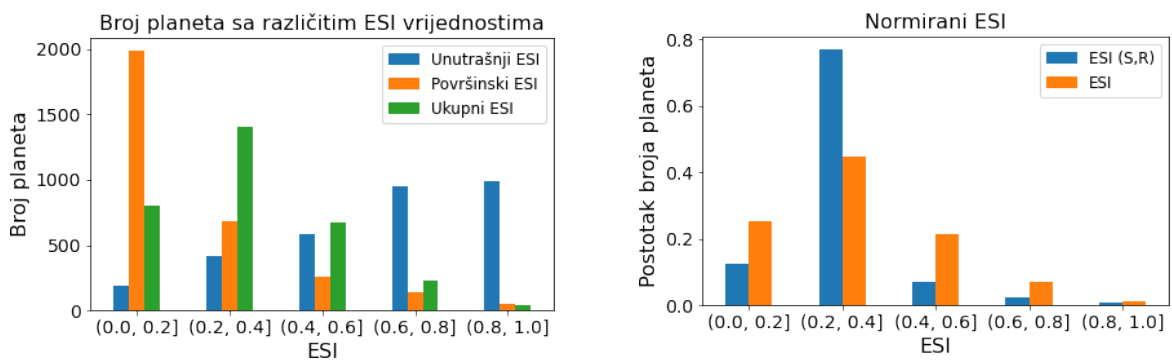
Slika 4.10. ESI potvrđenih egzoplaneta za formulu korištenu od strane Exoplanet Habitability Catalog.



Slika 4.11. ESI potvrđenih egzoplaneta računano preko standardne formule.

povećanjem indeksa te ima otprilike jednako planeta s unutrašnjim ESI u rasponu od 0,6 do 0,8 te od 0,8 do 1. Razlog ovakvoj distribuciji jesu težinski faktori koji su manje osjetljivi na polumjer i gustoću ($w = 0,57, 1,07$ redom), a više na temperaturu ($w = 5,07$). Kako je lakše uočiti planet bliže matičnoj zvijezdi, što automatski sugerira i veću površinsku temperaturu planeta, a što je pokazano i na histogramu 4.9c, većina planeta

ima znatno veću površinsku temperaturu od Zemlje. S druge strane, iz histograma 4.9d uočljivo je kako je dosta planeta ponešto veće od Zemlje, a kako je težinski faktor zamjetno manji ($w = 0,57$), presudno je da površinski ESI daje manje vrijednosti od ESI unutrašnjosti. Štoviše, cilj misija Kepler i K2, takav je da traže planete slične Zemlji, odnosno da im je veličina slična Zemlji (polumjer, masa). Većina planeta ima ukupan ESI od 0,2 do 0,4 te se broj smanjuje kako se ESI približava 1. Indeks veći od 0,8 ima 39 planeta, što ih svrstava u zemljolike. Na slici 4.12b prikazane su normirane vrijednosti kataloškog i standardnog ESI. Kataloški ESI i standardni ESI broje najviše planeta u intervalu od 0,2 do 0,4. Samo u tom intervalu prevladava kataloški, dok je za sve ostale standardni ESI u većem broju.



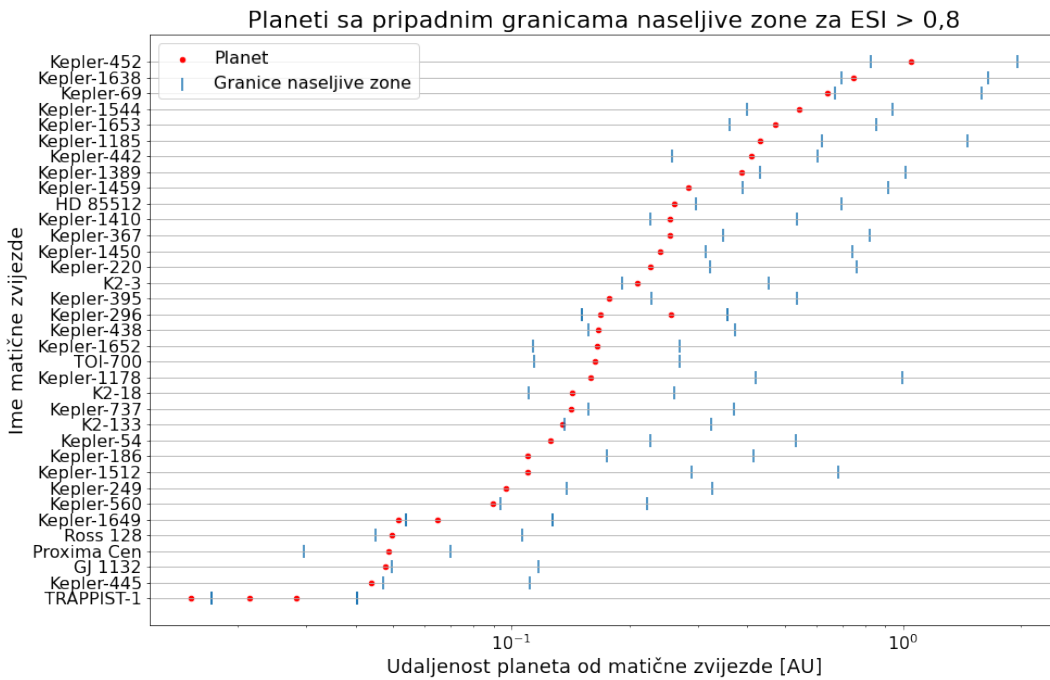
(a) Frekvencije unutrašnjeg i površinskog ESI zajedno sa ukupnim ESI.

(b) Frekvencije pojedinog ESI za različite intervale.

Slika 4.12. Histogrami ESI indeksa dobiveni preko dvije formule. Na slici (a) predstavljen je standardni ESI sa svojim komponentama, unutrašnjim i površinskim, dok se na slici (b) nalaze normirane vrijednosti obaju računanih indeksa.

Podaci dostupni za računanje kataloškog indeksa dostupni su za 2757 planeta, dok je za standardni ESI taj broj jednak 3132. Iz ovog slijedi da uz nedostatak parametara u formuli za karakterizaciju planeta ima još i manje planeta, pa se ova metoda može odbaciti i u nastavku se koristi samo standardni ESI. S obzirom na prijašnju konstataciju uzeti su planeti kojima standardni ESI iznosi više od 0,8, točnije oni koji se smatraju zemljolikima, te su ilustrirane granice naseljive zone za svakog od njih (slika 4.13). Na y-osi nalazi se ime matične zvijezde, dok je na x-osi udaljenost planeta od zvijezde dana u astronomskim jedinicama (AU), u logaritamskoj skali, skupa sa svojom unutarnjom i vanjskom granicom naseljive zone. Većina takvih planeta nalazi se na udaljenosti od 0,1 AU do 1 AU, odnosno zemljolike planete ne nalazimo na udaljenostima gdje se nalaze Mars i jovijanski planeti Sunčeva sustava.

Za planete koji zadovoljavaju uvjet da se nalaze u naseljivoj zoni prikazana je veza mase i polumjera (Fortney et al., 2007) kako bi se preciznije odredila njihova unutrašnja kompozicija. Na slici 4.14 prikazani su planeti koji zadovoljavaju prije navedene uvjete sa svojom kompozicijom. Na x-osi nalazi se masa izražena u masama Zemlje, a na

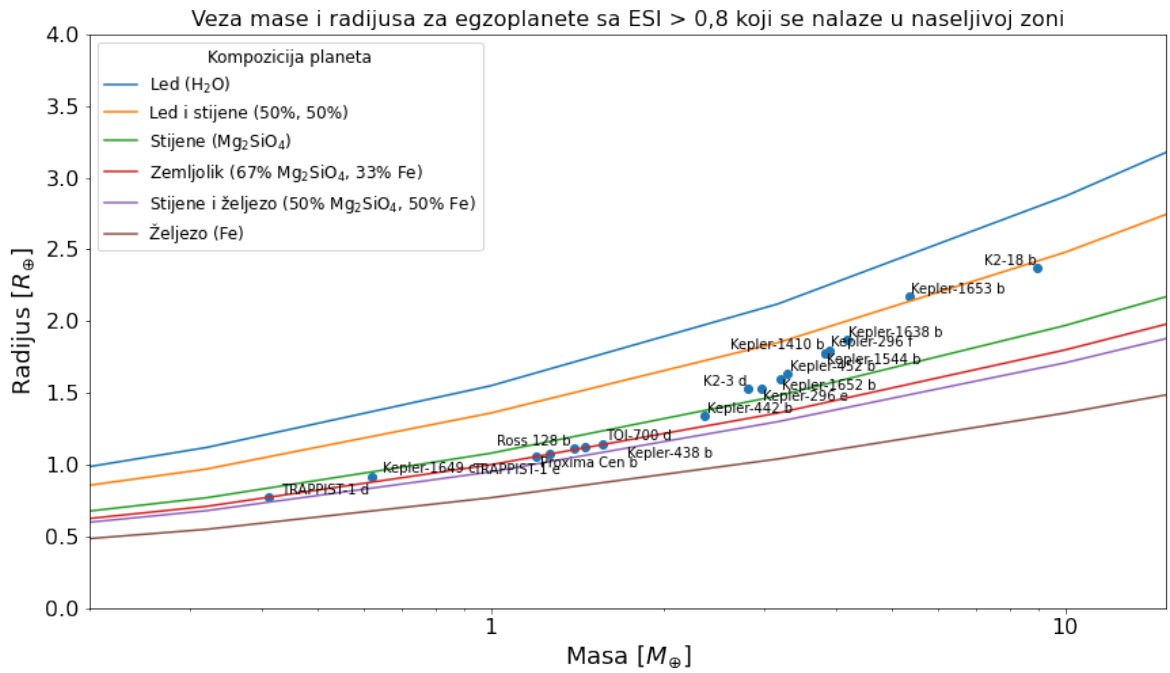


Slika 4.13. Prikaz granica naseljive zone za planete sa $ESI > 0,8$.

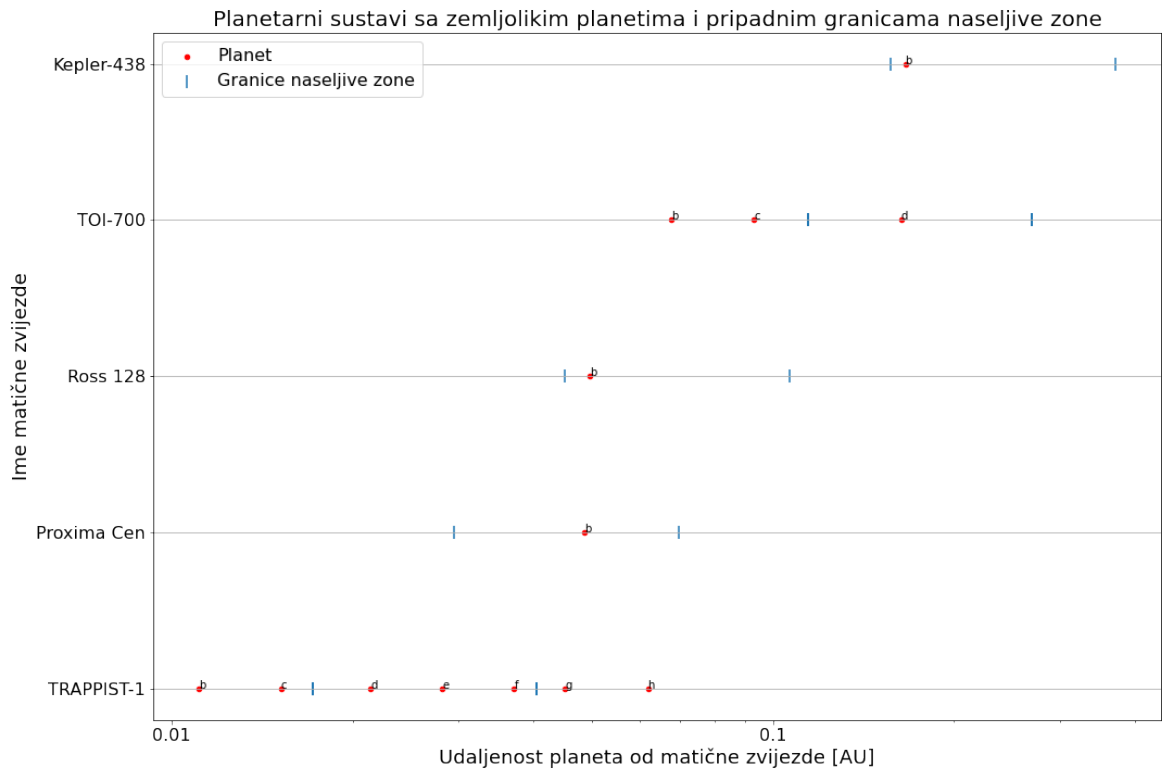
y-osi polumjer planeta izražen u polumjerima Zemlje. Dane su krivulje za homogene planete koji se u čitavosti sastoje od željeza, stijena (Mg_2SiO_4) i leda (H_2O), kao i njihovih kombinacija, planete koji su sačinjeni od leda i stijena te od stijena i željeza. Također je dana i krivulja zemljolikih planeta, onih kojima je unutrašnjost građena od 67 % stijena i 33 % željeza. Veća masa planeta odgovara većem polumjeru, kako bi gustoća otprilike bila jednaka, bliska Zemljinoj, no oni prelaze na 'više' krivulje, odnosno kompozicija im se polako mijenja tako da su planete Kepler-1653 b i K2-18 b sačinjeni od leda i stijena. Najviše planeta ima građu koja je između homogenog stjenovitog planeta i planeta s jednakim udjelom leda i stijena. Šest planeta nalazi se na liniji koja odgovara zemljolikim planetima, odnosno koji su sastavljeni od 67 % stijena i 33 % željeza, a prikazani su u tablici 4.1, skupa sa svojim ESI, polumjerom, masom, gustoćom, površinskom temperaturom te udaljenosti od matične zvijezde.

Planetarni sustavi s ovim najboljim kandidatima za novu Zemlju prikazani su na slici 4.15, gdje je sada na x-osi prikazana njihova udaljenost od matične zvijezde, a na y-osi ime planetarnog sustava. Čak dva planeta pripadaju istom planetarnom sustavu, TRAPPIST-1.

Kao dodatan kriterij za sličnost sa Zemljom može se uzeti mogućnost postojanja magnetskog polja. Magnetsko polje štiti (ili ublažuje) od utjecaja zračenja matične zvijezde, obuhvaćajući zvjezdane vjetrove, koronine izbačaje masa i sl., koji štete razvoju života. Sve matične zvijezde planeta danih u tablici 4.1 pripadaju crvenim divovima, najma-



Slika 4.14. Veza mase i radijusa za planete kojima je $ESI > 0,8$ te koji se nalaze u naseljivoj zoni. Veza između mase i radijusa preuzeta je iz Fortney et al. (2007).



Slika 4.15. Prikaz planetarnih sustava zemljolikih planeta s pripadajućim granicama naseljivih zona.

njim i najhladnijim zvijezdama, odnosno klasi M (dodatak B). Iako ta vrsta zvijezda ima najdulji vijek trajanja, postoji nekoliko prepreka pri ostvarivanju podobnih uvjeta

Tablica 4.1. Fizikalne karakteristike zemljolikih egzoplaneta, poredane od najvećeg ESI. Planetarni sustav TRAPPIST-1 sadrži dva planeta koji odgovaraju svim dosadašnjim uvjetima.

| Ime planeta | ESI | Radijus R_{\oplus} | Masa M_{\oplus} | Gustoća g/cm^3 | Temperatura K | Udaljenost AU |
|---------------|-------|-------------------------|----------------------|----------------------------|------------------|------------------|
| Kepler-438 b | 0,975 | 1,120 | 1,46 | 5,71 | 288 | 0,16600 |
| Ross 128 b | 0,949 | 1,110 | 1,40 | 5,63 | 301 | 0,04960 |
| TRAPPIST-1 d | 0,936 | 0,772 | 0,41 | 4,90 | 288 | 0,02144 |
| TOI-700 d | 0,924 | 1,144 | 1,57 | 5,76 | 269 | 0,16330 |
| TRAPPIST-1 e | 0,856 | 0,918 | 0,62 | 4,40 | 251 | 0,02817 |
| Proxima Cen b | 0,847 | 1,080 | 1,27 | 5,54 | 234 | 0,04850 |

za razvoj života. Planeti su toliko blizu matičnoj zvijezdi da su gotovo svi plimno vezani (Barnes, 2017). Sukladno tomu, jedna je strana planeta u stalnom mraku i hladna, dok je druga izložena neprestanom zagrijavanju te stoga postoje veliki temperaturni gradijenti. Isto tako, ovaj tip zvijezda glavnog niza podložan je velikim promjenama količine energije koju emitira. Crveni divovi učestalo su i bljeskovite zvijezde (uz to što imaju jako magnetsko polje), tip promjenjivih zvijezda koje emitiraju visokoenergetske bljeskove, mijenjajući tako svoj sjaj u vrlo kratkom vremenu (na svojevrsnim skalama). Uvjet da planet koji posjeduje magnetsko polje isto i održi jest unutrašnji dinamo. Da bi imao taj dinamo, planet mora imati deblji sloj koji je vodljiv fluid i podvrgnut konvektivnim gibanjima. Pretpostavlja se da unutrašnjost planeta i većih satelita sadrži električki vodljive fluide: terestrički planeti i sateliti imaju diferencirane jezgre tekućih slitina željeza.

Za održavanje magnetskog polja potpomaže i vrtnja tijela. Kako je otprije navedeno, većina je egzoplaneta plimno vezana za svoje matične zvijezde, što znači da je vrtnja jednaka revoluciji i kao takva ne sudjeluje u održavanju magnetskog polja. Po uzoru na Sunčev sustav, gdje terestrički planeti Merkur i Zemlja imaju magnetsko polje u obliku dipola, navedeni egzoplaneti također vjerojatno imaju magnetsko polje u obliku dipola.

Planeti sustava TRAPPIST-1, TRAPPIST-1 d i TRAPPIST-1 e, imaju najmanje mase, 0,41 i 0,62 mase Zemlje, redom, stoga se može pretpostaviti da im je unutrašnjost ohlađena, odnosno da je došlo do prestanka konvekcije. Shodno tome, magnetsko polje je nepostojano i može se zanemariti. Konfiguracija magnetosfere ovisna je o tome jesu li planeti vodljivi, odnosno jesu li građeni od materijala koji provodi struju. U slučaju da nisu vodljivi, čestice zvjezdanog vjetra izravno pogađaju površinu te se na njoj apsorbiraju. Na noćnoj strani planeta prostor ne sadrži nikakve čestice te se odvija difuzija magnetskog polja kroz planet.

Ako pak slabo vodljiv planet ima atmosferu, no ne i magnetsko polje, zvjezdani vjetar interagira s atmosferom, tj. s nabijenim česticama (ionosferom). Kako se interplane-

tarno magnetsko polje giba skupa s plazmom zvjezdanog vjetra (Hannes, 1942), izloženi ioni su akcelerirani i pokupljeni od strane vjetra. Ove čestice 'ogrnu' linije polja oko planeta, kao što je slučaj kod kometa.

Ako planet ima relativno prostranu ionosferu, tada egzistiraju struje koje koče difuziju interplanetarnog magnetskog polja u planet. Ovakva magnetska konfiguracija uvelike podsjeća na šupljinu koja nastaje međudjelovanjem zvjezdanog vjetra i magnetiziranog planeta, takozvana inducirana ionosfera, kao što je slučaj kod Venere i Marsa.

Ostalim planetima radijus je podjednak Zemljinom, dok im je masa veća, ide i do 1,57 Zemljine (TOI-700 d). Iz navedenog slijedi da se vrlo vjerojatno, kao i kod Zemlje, događa diferencijacija, a zbog gustoće koja je također bliska Zemljinoj ($5,5 \text{ g/cm}^3$ i veća) unutrašnjost im se sastoji od težih elemenata, poput željeza, pa vrlo vjerojatno posjeduju magnetsko polje. Isto tako, zbog veće mase, planeti su u stanju zadržati i teže elemente u svojoj atmosferi, za razliku od planeta u sustavu TRAPPIST-1. Iako su planeti vrlo slični po svojim fizikalnim karakteristikama, razlikuju se po svojim udaljenostima od matičnih zvijezda. Naime, Ross 128 b i Proxima Cen b (0,05 AU) nalaze se za red veličine manje od svojih ekvivalenata Kepler-438 b i TOI-700 d (0,16 AU). Proxima Cen b nalazi se u zvjezdanom sustavu s tri zvijezde, α Centauri A, α Centauri B i α Centauri C (Proxima Centauri), no udaljenost je zvijezda A i B preko 13 000 AU, tako da ne igraju ulogu u formiranju te obliku magnetosfere. Za prvo spomenute planete, zbog izrazite blizine matičnoj zvijezdi i zvjezdanih vjetrova, njihova magnetopauza može doći i sve do površine, koja tada neposredno interagira s ioniziranim česticama, na način objašnjen ranije. Za razliku od njih, nos magnetosfera Kepler-438 b i TOI-700 d manje je sabijen i čestice ulaze samo kroz magnetosferski rep pa se mogu očekivati aurore. Općenito, kako su planeti vrlo blizu matičnoj zvijezdi, a gustoća zvjezdanog vjetra obrnuto je proporcionalna kvadratu udaljenosti, polumjeri magnetosfera su minorni (magnituda vlastitih polumjera planeta).

5. Zaključak

U ovom radu korišteni su podaci dani u NASA-inom egzoplanetarnom arhivu gdje su podaci sakupljeni iz raznih članaka o egzoplanetima. Arhiv sažbi razne parametre (još se i dalje aktivno pridodaju s publikacijom članaka), što fizikalne prirode (*e.g.* gustoća, temperatura, polumjer), što općenito (broj planeta u sustavu, koordinate). Prikazani su rezultati zaključno s krajem 2020. godine. Podaci su obrađeni u programskom jeziku Python koristeći razne module za računanje i izradu dijagrama.

Potvrđena su 4324 planeta izvan Sunčeva sustava koji kruže oko 3216 zvijezda, a nalaze se u 3211 planetarnih sustava. Najveći broj otkrivenih planeta u jednom takvom sustavu iznosi osam planeta, a zvjezdani se sustavi mogu sastojati od jedne pa sve do četiri zvijezde. Oko dvojnog sustava zvijezda kruži 40 planeta.

Koriste se razni opservatoriji, njih 61, s raznim vrstama detekcije kako bi se otkrio planet. Među najučestalijim metodama su: metoda tranzita, metoda radijalne brzine, gravitacijsko mikrolećanje te direktno motrenje. U početku je prevladavala metoda radijalne brzine, no poboljšanjem teleskopa metoda tranzita preuzela je vodeću ulogu. Za svoju vodeću ulogu metoda tranzita treba zahvaliti svemirskim misijama Kepler i K2. Te misije omogućile su otkrivanje preko 2800 planeta metodom tranzita, koja od 2010. godine polako nadjačava metodu radijalne brzine po broju otkrića. Uz navedene svemirske misije, i razni opservatoriji sudjeluju u otkrivanju egzoplaneta, poput opservatorija La Sille u Čileu i W. M. Kecka na Havajima, SAD.

Potvrđeni planeti rasprostranjeni su kroz cijelo noćno nebo, a povećana gustoća (broj planeta po površini) odgovara odredištu pojedine misije (*e.g.* Kepler, K2). Isto tako, povećana je gustoća duž smjera galaktičkog diska kako se zvijezde praktički nalaze u 2D ravnini. Velik broj zvijezda otkriven je duž doglednice prema središtu Mliječne staze, iz razloga što je koncentracija zvijezda najveća te je stoga vjerojatnost da se planet uočiti veća nego u drugim smjerovima.

Većina zvijezda, koji su domaćini planetima, nalazi se na glavnome nizu, odnosno još traje sinteza vodika u helij u jezgri. Kako se sve više opservatorija i misija okreće pronalasku planeta sličnih Zemlji, promatrane zvijezde svojim fizikalnim karakteristikama sve više odgovaraju onim Sunčevim, koji se također nalazi na glavnome nizu.

Usprkos tomu što su zvijezde nalik Suncu, opaženi planeti ni blizu ne odgovaraju Zemlji, kamoli ostatku Sunčeva sustava. Za veći dio toga zaslužna je velika nepristranost metoda te sama osjetljivost teleskopa. Naime, metode detekcije naklonjenije su pronalasku masivnijih i većih planeta, s obzirom da oni induciraju veće promjene u gibanju matične zvijezde i veći pad krivulje sjaja, koji se tako i lakše opažaju te nisu potrebni napredniji teleskopi. Upravo zbog toga opaženi su planeti s masom većom od Jupiterove, najmasivnijeg planeta u Sunčevu sustavu. Periodi im iznose po nekoliko dana, što znači da su i udaljenosti jako male, tolike da cijeli planetarni sustavi stanu u Mer-

kurovu orbitu. Kako je velik raspon polumjera i mase, gustoće također pokazuju veliki raspon, od onih poput Saturnove pa sve do veličina sličnih Zemljinoj. Unatoč pristranosti teleskopa, dosta planeta ima ekscentrične orbite, što je vrlo neobično, budući da su u Sunčevu sustavu gotovo sve orbite planeta cirkularizirane, što dovodi do pitanja traje li još planetarna migracija i/ili jesu li planeti do kraja plimno vezani.

Za pronalazak planeta što sličnijeg Zemlji koristi se ESI, računani preko dvije formule. Jedna formula koristi samo dva parametra s istim težinskim udjelom (energetski tok i temperaturu), dok druga njih nekolicinu (polumjer, gustoća, brzina oslobađanja, temperatura) zajedno s težinskim parametrima, što doprinosi boljoj karakterizaciji planeta. Potonja formula dijeli planete s obzirom na uvjete na površini i građu unutrašnjosti te gleda njihovu kvadratnu sredinu. Planeti s indeksom većim od 0,8 smatraju se zemljolikim: imaju stjenovitu unutrašnjost, a na površini vladaju uvjeti slični onima na Zemlji.

Kako se Zemlja nalazi u naseljivoj zoni, *i.e.* zbog luminoziteta Sunca i udaljenosti od njega omogućeno je postojanje tekuće vode na površini, gleda se koji se od zemljolikih egzoplaneta nalaze u naseljivoj zoni. Nakon tog određivanja, razmatra se njihova unutrašnja struktura. Mada su svi stjenovite unutrašnjosti, mogu biti građeni od leda, stijena, željeza te njihovih varijanti. Pod zemljolike planete ubrajaju se oni kojima se unutrašnjost sastoji od 2/3 stijena (MgSiO_4) i 1/3 željeza.

Od 4324 planeta došlo se do njih šest koji su najizgledniji kandidati za planet najbliži planetu Zemlji, Kepler-438 b, Ross 128 b, TRAPPIST-1 d, TOI-700 d, TRAPPIST-1 e i Proxima Cen b. Za svaki od njih još je diskutirano i postojanje planetarnog magnetskog polja te kako ono interagira s magnetskim poljem matične zvijezde.

Poboljšanjem tehnologija i napretcima u metodama detekcije preciznije će se moći izmjeriti fizikalni parametri planeta te će broj otkrivenih planeta rasti s porastom misija i opservatorija koji se bave otkrivanjem egzoplaneta. Osjetljiviji teleskopi bit će u stanju uočavati planete manjeg polumjera i manje mase te potencijalno sastav njihove atmosfere, što će dodatno ograničiti uvjete za zemljolike planete, kao i potencijalno moći otkriti znakove života na drugim planetima. Uz to, magnetska će polja biti moguće procijeniti i modelirati.

Literatura

- Akeson, R. L., X. Chen, D. Ciardi, et al. (2013). The NASA Exoplanet Archive: Data and Tools for Exoplanet Research. *Astronomical Society of the Pacific* 125(930), 989–999.
- Australian Telescope National Facility (2018). The Colour of Stars. https://www.atnf.csiro.au/outreach/education/senior/astrophysics/photometry_colour.html.
- Barnes, R. (2017). Tidal locking of habitable exoplanets. *Celestial Mechanics & Dynamical Astronomy* 129(4), 509–536.
- Boss, A. P. (1997). Giant planet formation by gravitational instability. *Science* 276(5320), 1836–1839.
- Caroll, B. W. i D. A. Ostlie (2017). *An Introduction to Modern Astrophysics, Second Edition*. Cambridge University Press.
- Chen, J. i D. Kipping (2017). Probabilistic Forecasting of the Masses and Radii of Other Worlds. *Astrophysical Journal* 834(17).
- Cochran, W. D., A. P. Hatzes, i T. J. Hancock (1991). Constraints on the Companion Object to HD 114762. *The Astrophysical Journal* 380(3), L35–L38.
- D’Angelo, G., T. Henning, i W. Kley (2003). Thermohydrodynamics of Circumstellar Disks with High-Mass Planets. *The Astrophysical Journal* 599(1), 548–576.
- Fortney, J. J., M. S. Marley, i J. W. Barnes (2007). Planetary radii across five orders of magnitude in mass and stellar insolation: Application to transits. *The Astrophysical Journal* 659(2), 1661–1672.
- Gabets, G. M. H. J. i J. R. W. Heintze (1981). Empirical bolometric corrections for the main-sequence. *Astronomy and Astrophysics, Supplement Series* 46(1), 193–237.
- Gomes, R., H. F. Levison, K. Tsiganis, i A. Morbidelli (2005). Origin of the cataclysmic Late Heavy Bombardment period of the terrestrial planets. *Nature* 435(7041), 466–469.
- Hannes, A. (1942). Existence of Electromagnetic-Hydrodynamic Waves. *Nature* 150(4), 405–406.
- Hansen, B. M. S. (2009). Formation of the Terrestrial Planets from a Narrow Annulus. *The Astrophysical Journal* 703(1), 1131–1140.

- Harris, C. R., K. J. Millman, S. J. van der Walt, et al. (2020). Array programming with NumPy. *Nature* 585(7825), 357–362.
- Heller, R. i J. Armstrong (2014). Superhabitable Worlds. *Astrobiology* 14(1), 50–66.
- Hiroshi, M. (1980). Formation of the Giant Planets. *Progress of Theoretical Physics* 64(2), 544–557.
- Hunter, J. D. (2007). Matplotlib: A 2D graphics environment. *Computing in Science & Engineering* 9(3), 90–95.
- Kasting, J. F., D. P. Whitmire, i R. T. Reynolds (1993). Habitable Zones around Main Sequence Stars. *Icarus* 101(1), 108–128.
- Kirkpatrick, J. D., I. N. Reid, J. Liebert, et al. (1999). Dwarfs cooler than "M": The definition of spectral type "L" using discoveries from the 2-Micron All-Sky Survey (2MASS). *Astrophysical Journal* 519(2), 802–833.
- Kokubo, E. i S. Ida (1998). Oligarchic Growth of Protoplanets. *Icarus* 131(1), 171–178.
- Lissauer, J. J. i I. de Pater (2019). *Fundamental Planetary Science: Physics, Chemistry and Habitability. Updated Version*. Cambridge University Press.
- Lissauer, J. J., O. Hubickyj, G. D'Angelo, i P. Bodenheimer (2009). Models of Jupiter's Growth Incorporating Thermal and Hydrodynamic Constraints. *Icarus* 199(2), 338–350.
- Mayor, M. i D. Queloz (1995). A Jupiter-mass companion to a solar-type star. *Nature* 378(655), 355–359.
- McKinney, W. et al. (2010). Data structures for statistical computing in python. In *Proceedings of the 9th Python in Science Conference*, Volume 445, pp. 51–56. Austin, TX.
- Morbidelli, A., H. F. Levison, K. Tsiganis, i R. Gomes (2005). Chaotic capture of Jupiter's Trojan asteroids in the early Solar System. *Nature* 435(7041), 462–465.
- Morgan, W. W., P. C. Keenan, i K. Edith (1943). *An Atlas of Stellar Spectra With an Outline of Spectral Classification*. Astrophysical Monographs. The University of Chicago Press.
- O'Brien, D. P., A. Morbidelli, i H. F. Levison (2006). Terrestrial planet formation with strong dynamical friction. *Icarus* 184(1), 39–58.
- Robitaille, T. P., E. J. Tollerud, P. Greenfield, et al. (2013). Astropy: A community Python package for astronomy. *Astronomy & Astrophysics* 558(A33).

- Schulze-Makuch, D., A. Mendez, A. G. Fairen, et al. (2011). A Two-Tiered Approach to Assessing the Habitability of Exoplanets. *Astrobiology* 11(10), 1041–1052.
- Sparke, L. i J. Gallagher III (2007). *Galaxies in the Universe: An Introduction. Second Edition*. Cambridge University Press.
- Spohn, T., D. Breuer, i T. V. Johnson (2014). *Encyclopedia of the Solar System. Third Edition*. Elsevier.
- Tanaka, H., T. Takeuchi, i W. R. Ward (1981). Three-dimensional interaction between a planet and an isothermal gaseous disk. I. Corotation and Lindblad torques and planet migration. *Astrophysical Journal* 565(2), 1257–1274.
- Tsiganis, K., R. Gomes, A. Morbidelli, i H. F. Levison (2005). Origin of the orbital architecture of the giant planets of the Solar System. *Nature* 435(7041), 459–461.
- University of Puerto Rico at Arecibo (2020). The Habitable Exoplanet Catalog. <http://ph1.upr.edu/projects/habitable-exoplanets-catalog>.
- Virtanen, P., R. Gommers, T. E. Oliphant, et al. (2020). SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python. *Nature Methods* 17(3), 261–272.
- Walsh, K. J., A. Morbidelli, S. N. Raymond, D. P. O’Brien, i A. M. Mandell (2011). A low mass for Mars from Jupiter’s early gas-driven migration. *Nature* 475(7355), 206–209.
- Zhou, G., S. N. Quinn, J. Irwin, et al. (2020). Two Young Planetary Systems around Field Stars with Ages between 20 and 320 Myr from TESS. *The Astronomical Journal* 161(1).

Dodatci

A Tablice

Tablica A1. Broj planetarnih sustava u odnosu na broj planeta u sustavu

| Broj planeta u sustavu | Broj planetarnih sustava |
|------------------------|--------------------------|
| 1 | 2475 |
| 2 | 491 |
| 3 | 155 |
| 4 | 59 |
| 5 | 23 |
| 6 | 6 |
| 7 | 1 |
| 8 | 1 |

Tablica A2. Broj matičnih zvijezda u odnosu na broj matičnih zvijezda

| Broj matičnih zvijezda | Broj planetarnih sustava |
|------------------------|--------------------------|
| 1 | 3893 |
| 2 | 376 |
| 3 | 53 |
| 4 | 2 |

Tablica A3. Broj detekcija egzoplaneta po godinama

| Godina detekcije | Broj detekcija |
|------------------|----------------|
| 1992 | 3 |
| 1994 | 1 |
| 1995 | 1 |
| 1996 | 6 |
| 1997 | 1 |
| 1998 | 6 |
| 1999 | 13 |
| 2000 | 16 |
| 2001 | 12 |
| 2002 | 29 |
| 2003 | 22 |
| 2004 | 27 |
| 2005 | 36 |
| 2006 | 31 |
| 2007 | 52 |
| 2008 | 66 |
| 2008 | 95 |
| 2010 | 97 |
| 2011 | 138 |
| 2012 | 139 |
| 2013 | 125 |
| 2014 | 871 |
| 2015 | 157 |
| 2016 | 1505 |
| 2017 | 153 |
| 2018 | 315 |
| 2019 | 200 |
| 2020 | 207 |

Tablica A4. Broj detektiranih egzoplaneta specifičnom metodom

| Metoda detekcije | Broj detektiranih planeta |
|--|---------------------------|
| Metoda tranzita | 3287 |
| Metoda radijalne brzine | 826 |
| Mikrolećanje | 106 |
| Direktno motrenje | 51 |
| Mjerenje varijacija perioda tranzita | 21 |
| Mjerenje varijacija perioda binarne pomrčine | 16 |
| Mjerenje perioda pulsara | 7 |
| Modulacija orbitalnog sjaja | 6 |
| Mjerenje varijacija perioda pulsara | 2 |
| Astrometrija | 1 |
| Kinematika diska | 1 |

Tablica A5. Opis misija i teleskopa koje sudjeluju u detekciji egzoplaneta zajedno sa brojem detektranih egzoplaneta

| Ime misije/teleskopa | Opis | Planeti |
|--|--|---------|
| Kepler | NASA-ina misija, 2009. - 2018.; metoda tranzita | 2394 |
| K2 | NASA-ina misija; nastavak misije Kepler na istoj letjelici | 425 |
| La Silla opservatorij | Astronomski opservatorij sastavljen od tri teleskopa upravljani ESO-om u Čileu | 245 |
| W. M. Keck opservatorij | Opservatorij sa dva teleskopa smještena na vrhu Mauna Kee na Havajima | 175 |
| Višestruki opservatoriji | | 152 |
| SuperWASP-North (WASP - Wide Angle Search for Planets) | WASP svjetski je konzorcij nekoliko akademskih organizacija; metoda tranzita. Smješten je u Roque de los Muchachos opservatoriju u La Palmi na Kanarskim otocima | 113 |
| TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite) | NASA-in svemirski teleskop koji detektira planete pomoću metode tranzita | 91 |
| HATSouth (Hungarian Automated Telescope-South) | Mreža od šest teleskopa za detekciju egzoplaneta oko svijetlih zvijezda vidljivih sa južne polutke, Mađarska 2009. | 69 |
| OGLE (Optical Gravitational Lensing Experiment) | Poljski astronomski projekt Sveučilišta u Varšavi; metoda tranzita i gravitacijskog mikrolećanja | 67 |
| HATNet (Hungarian Automated Telescope Network) | Geografski raspodijeljena mreža sedam malih teleskopa optimiziranih za detekciju egzoplaneta metodom tranzita osnovano u Mađarskoj 2003. | 60 |
| Haute-Provence opservatorij | Opservatorij na jugoistoku Francuske, osnovan 1973. godine | 51 |
| Anglo-australski teleskop | Upravljan od strane Australskog astronomskog opservatorija, smješten u Siding Spring opservatoriju, Australija; izgrađen 1974. godine | 37 |
| CoRoT (Convection, Rotation and planetary Transits) | Svemirski teleskop, spoj Francuske Svemirske Agencije (CNES) i ESA-e; misija završena 2003. godine | 33 |
| SuperWASP-South | Odjeljak WASP-a na Južnoafričkom astronomskom opservatoriju u Sutherlandu u Južnoafričkoj republici | 32 |
| Lick opservatorij | Vlasništvo Sveučilišta u Kaliforniji, SAD. | 32 |

Tablica A6. Broj zvijezda po Harvardskoj klasifikaciji

| Spektralni tip | Broj zvijezda |
|----------------|---------------|
| G | 441 |
| K | 324 |
| M | 261 |
| F | 152 |
| A | 12 |
| B | 7 |
| L | 1 |
| T | 1 |

B Spektralna klasifikacija zvijezda

Moderna Harvardska klasifikacija zvijezda spektralna je taksonomija zvijezda prema jačini njihovih apsorpcijskih linija vodika. Svodi se na poredak po površinskim temperaturama zvijezda, počevši od najvrućih, plavih O zvijezda pa sve do najhladnijih, crvenih M zvijezda. Fotosferska temperatura glavni je čimbenik pri određivanju spektra te ionizacijskih stanja elemenata koji proizvode spektralne linije, koja također ovise o temperaturi.

Zvijezde na početku ovog niza spominju se još i kao 'rane' zvijezde, a one pri kraju kao 'kasne' zvijezde. Ovakva podjela, dakako, nije povezana za zvjezdanom evolucijom; ona samo opisuje položaj u slijedu O-B-A-F-G-K-M. Po uzoru na to, svaka od sedam klasa podijeljena je na 10 podrazreda. Podrazredi su označeni arapskim brojevima, gdje 0 predstavlja 'raniju' zvijezdu, tj. onu sa višom temperaturom, a 9 'kasnu', onu sa hladnijom temperaturom istog razreda. Iako se svodi na apsorpcijske linije vodika, svaki razred zapravo govori o površinskoj temperaturi zvijezde. U tablici B1 dane su neke od karakteristika svakog razreda (Gabets i Heintze, 1981; Australian Telescope National Facility, 2018). Uz pretpostavku da za relaciju masa-luminozitet za zvijezde glavnog niza vrijedi

$$M \sim L^{3.5}, \quad (\text{B1.})$$

dok luminozitet vrijedi

$$L = \frac{E}{t}, \quad (\text{B2.})$$

Koristeći jednadžbe B1. i B2. dobiva se

$$t \sim M^{-2.5}, \quad (\text{B3.})$$

što je istovjetno

$$t_{MS} = t_{\odot} \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^{-2.5}, \quad (\text{B4.})$$

gdje je t_{\odot} vrijeme Sunca na glavnome nizu koje iznosi otprilike 10 milijardi godina, a M_{\odot} njegova masa. Naknadno su još uvedene vrste smeđih patuljaka, L i T (Kirkpatrick et al., 1999).

Ovakva Harvardska spektralna klasifikacija ne opisuje zvijezdu u potpunosti, budući da se ne mogu razaznati zvijezde istih površinskih temperatura, a različitih luminoziteta. Drugim riječima, ne može se procijeniti radi li se o zvijezdama glavnog niza (patuljcima), divovima i superdivovima.

Upravo iz tog razloga proistekla je Morgan-Keenanova klasifikacija (skraćeno MK ili MKK, po inicijalima utemeljitelja ove kategorizacije) ili Yerkes klasifikacija (po imenu opservatorija gdje je izniknula). Prvotno je obuhvaćala rimske brojeve od I (superdivovi) do V (glavni niz), no danas je klasa I podijeljena na Ia-O, Ia i Ib klase, te

Tablica B1. Harvardska spektralna klasifikacija zvijezda sa pripadajućim površinskim temperaturama, njihova boja, masa izražena u masama Sunca, radijus izražen u radijusima Sunca te njihov vijek na glavnom nizu.

| Klasa | Površinska temperatura K | Boja | Masa M_{\odot} | Radijus R_{\odot} | Vijek mlrd. g. |
|-------|-----------------------------|---------------|---------------------|------------------------|------------------------|
| O | > 30 000 | Plava | > 16 | > 6,6 | $< 11 \cdot 10^{-3}$ |
| B | 10 000 - 30 000 | Svijetloplava | 2,1 - 15 | 1,8 - 6,6 | $11 \cdot 10^{-3} - 1$ |
| A | 7500 - 10 000 | Bijela | 1,4 - 2,1 | 1,4 - 1,8 | 1 - 2,6 |
| F | 6000 - 7500 | Bijeložuta | 1,04 - 1,4 | 1,15 - 1,4 | 2,6 - 6,3 |
| G | 5200 - 6500 | Žuta | 0,8 - 1,04 | 0,96 - 1,15 | 6,3 - 10 |
| K | 3700 - 5200 | Narančasta | 0,45 - 0,8 | 0,7 - 0,96 | 10 - 35 |
| M | < 3700 | Crvena | $0,075 < 0,45$ | < 0,7 | > 35 |

su pridodane još i klase VI (subpatuljak) te D (bijeli patuljak). Tablica B2 prikazuje osobine pojedinačne klase MK klasifikacije (Morgan et al., 1943).

Tablica B2. Morgan-Keenanova klasifikacija zvijezda

| Klasa | Zvijezda |
|-------|------------------------------|
| Ia-O | ekstremno sjajni superdivovi |
| Ia | sjajni superdivovi |
| Ib | manje sjajni superdivovi |
| II | sjajni divovi |
| III | divovi |
| IV | subdivovi |
| V | patuljci glavnog niza |
| VI | subpatuljci |
| D | bijeli patuljci |

Da bi se zvijezda do kraja opisala, MK klasifikacija pridružena je izvornoj Harvardskoj klasifikaciji. Naprimjer, nama najbliža zvijezda, Sunce, je G2 zvijezda glavnoga niza; shodno tome klasificirana je kao G2V zvijezda.

C Tipovi planeta po različitim klasifikacijama

Budući da fizikalni procesi oblikovanja planeta ne izgledaju jednako za one koji se nalaze unutar linije zaleđivanja i za one koji se nalaze izvan nje, planeti se bitno razlikuju po svojim fizikalnim karakteristikama. Njihova masa i sastav uvelike ovise o udaljenosti od matične zvijezde na kojoj su nastali. Tijekom nastanka veliku ulogu igra i dinamička evolucija planeta pa se tako planeti razlikuju po svojim orbitama.

Tablica C1. Klasifikacija planeta po masi

| Tip planeta | Opis |
|-----------------|--|
| Divovski planet | Vrlo masivan planet, gusta atmosfera od vodika i helija |
| Mini-Neptun | Do 10 masa Zemlje, atmosfera sačinjena od vodika i helija |
| Super-Zemlja | Masa veća od Zemlje, no manja od Urana i Neptuna, atmosfera sačinjena od vodene pare, ugljikovog dioksida, metana, amonijaka |
| Super-Jupiter | Masa veća od Jupitera |
| Sub-Zemlja | Masa manja od Zemlje i Venere |

Tablica C2. Klasifikacija planeta po tipu orbite

| Tip planeta | Opis |
|----------------------|---|
| Dvojni planet | Planet koji kruži oko dvije zvijezde |
| Vrući Neptun | Fizikalne karakteristike slične Uranu i Neptunu, tipična udaljenost manja od 1 AU |
| Međuzvjezdani planet | Kruži direktno oko galaksije. Još se zove i odbjegli planet |
| Vrući Jupiter | Fizikalne karakteristike slične Jupiteru, no kruži vrlo blizu matične zvijezde |

Tablica C3. Klasifikacija planeta po sastavu

| Tip planeta | Opis |
|--------------------|---|
| Plinoviti patuljak | Planet male mase sačinjen uglavnom od vodika i helija |
| Plinoviti div | Planet velike mase sačinjen uglavnom od vodika i helija |
| Ledeni div | Divovski planet sačinjen uglavnom od leda (voda, amonijak, metan) |
| Terestrički planet | Planet sastavljen od silikatnih stijena ili metala |
| Napuhnuti planet | (engl. <i>puffy planet</i>), divovski planet velikog radijusa i izrazito malene gustoće, nazivaju se još i vrući Saturni |