

# EKSOPLANETI V NAŠI SOSEŠČINI

## URŠKA POJE

Fakulteta za matematiko in fiziko  
Univerza v Ljubljani

Prvi eksoplanet je bil odkrit leta 1992. Od takrat je število odkritih eksoplanetov zelo naraslo zaradi izboljšanih instrumentov in tehnik opazovanja. Iz opazovanj in meritev lahko izvemo planetov polmer in maso, iz teh dveh podatkov pa lahko izračunamo njegovo gostoto. Poleg gostote planeta so pomembni faktorji, ki odločajo o tem, ali je planet primeren za življenje, tudi njegova oddaljenost od zvezde in sestava atmosfere. V zadnjem letu so znanstveniki odkrili planet okoli naše najbližje zvezde Proksime Kentavra in sistem Trappist-1, v katerem sedem planetov kroži okoli rdeče pritlikavke. Trije izmed planetov okoli Trappist-1 in Proksima b so potencialni kandidati za planete, ki so primerni za razvoj življenja na njihovem površju.

## EXOPLANETS IN OUR NEIGHBOURHOOD

In the year 1992 the first exoplanet was discovered. Since then the number of found exoplanets has grown because of the better instruments and observation methods. From observations we can obtain many informations about new discovered exoplanet. The most important parameters are exoplanet's radius, mass and and from these two parameters we can caculate exoplanet's density. If the exoplanet will be in the habitable zone mostly depends on distance from star to exoplanet and atmosphere compositon. In the last year scientists have discovered an exoplanet that orbits our closest star Proxima Centauri and planetary system Trappist-1, where there are seven exoplanets that orbit a red dwarf. Three exoplanets from Trappist-1 and Proxima b are candidates for planets, on which life can develop.

### 1. Uvod

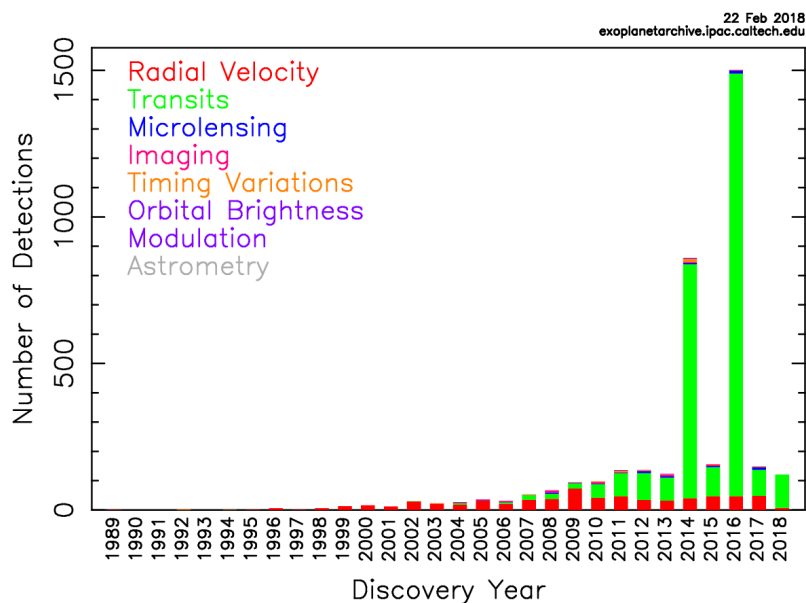
Že v Antični Grčiji so ljudje predvidevali, da poleg našega planeta v vesolju obstajajo tudi drugi planeti, kjer bi se lahko razvilo življenje. Ko je na začetku 20. stoletja Edwin Hubble odkril, da obstaja na milijarde zvezd tudi izven naše Galaksije, je to pomenilo, da imamo ogromno območij, kjer bi se potencialno lahko razvilo življenje. Vseeno pa je minilo skoraj stoletje, preden so odkrili prvi planet, ki se ne giblje okoli našega Sonca. Takim planetom pravimo eksoplaneti.

Da je nebesno telo planet, mora izpolnjevati tri pogoje: mora biti v tirnici okoli Sonca, mora biti dovolj masivno, da je v hidrostatičnem ravnovesju in mora počistiti svojo tirnico [1]. Podobno velja za eksoplanete s to razliko, da se morajo le-ti gibati okoli neke druge zvezde.

Prvi eksoplanet so odkrili šele leta 1992. Ker se planet giblje okoli pulzarja, je zelo izpostavljen rentgenskemu sevanju, zato na njem življenje, kot ga poznamo, verjetno ne obstaja. Prvi eksoplanet okoli zvezde, ki je podobna našemu Soncu, so odkrili leta 1995. Njegova masa je podobna Jupitrovi, zvezdo 51 Pegaza pa obkroži v zgolj 4 dneh, kar pomeni, da je dvajsetkrat bližje svoji zvezdi, kot je Zemlja Soncu, in je zato temperatura na površju eksoplaneta zelo visoka. Take eksoplanete danes imenujemo »vroči Jupitri« in so precej pogosti med odkritimi eksoplaneti, čeprav do takrat, ko so odkrili prvega, nihče ni verjel, da sploh lahko obstajajo [2]. Kmalu po odkritju 51 Peg so odkrili še eksoplanete okoli dveh drugih Soncu podobnih zvezd, kar je bil očiten znak, da planeti okoli drugih zvezd niso redki [3]. Aprila 2001 so našli prvi eksoplanet, ki se giblje okoli zvezde v območju primernem za življenje, kjer je temperatura primerna za obstoj tekoče vode. Prelomno leto pa je bilo leto 2009, ko so izstrelili vesoljski teleskop Kepler. Po izstrelitvi je število najdenih eksoplanetov skokovito naraslo in tako imamo danes potrjenih že 3704 (26. 2. 2018) eksoplanetov, 4496 pa jih še čaka na potrditev [4]. Odkrivanje eksoplanetov je sedaj postalo rutina, zato pa je toliko večji dosežek, če odkriješ Zemlji podoben planet, ki ima primerne pogoje za razvoj življenja.

V zadnjih dveh letih sta bili odmevni predvsem dve odkritji - odkritje eksoplaneta Proksima b, ki je v tirnici okoli naše najbližje zvezde Proksime Kentavra in odkritje sedmih eksoplanetov, ki krožijo okoli zvezde Trappist-1. Ti dve odkritji sta zelo pomembni, saj Proksima b in trije od

## Detections Per Year



**Slika 1.** Na grafu je prikazano število eksoplanetov, ki so jih odkrili v določenem letu. Barve prikazujejo metodo, s katero so bili odkriti [5].

planetov okoli Trappist-1 ležijo v območju, kjer lahko obstaja tekoča voda. Zaradi tega obstaja možnost, da na teh planetih obstaja življenje, hkrati pa sta oba sistema dovolj blizu Zemlje, da jih lahko natančno preučujemo.

## 2. Metode za odkrivanje eksoplanetov

Za odkrivanje eksoplanetov poznamo 5 glavnih metod:

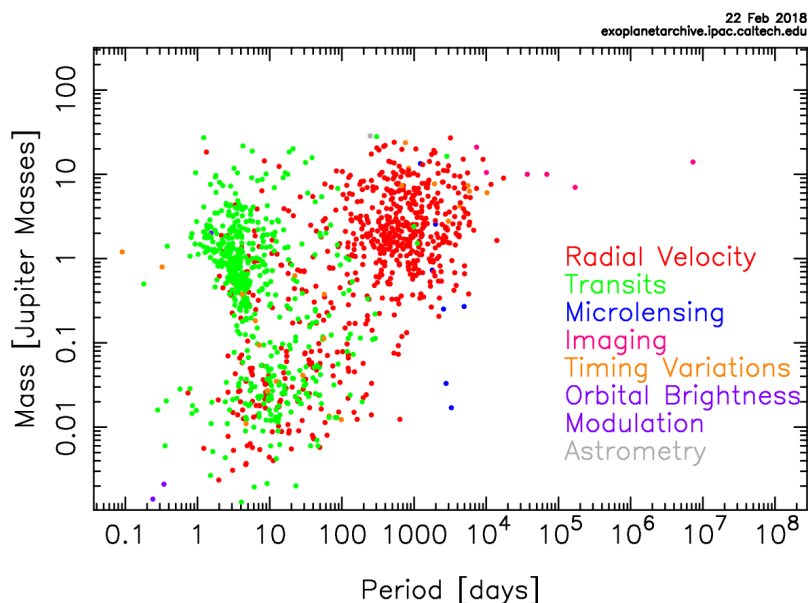
- merjenje radialne hitrosti zvezde,
- opazovanje prehoda eksoplaneta čez zvezdino ploskev,
- direktno slikanje,
- gravitacijsko mikrolečenje in
- astrometrija.

### 2.1 Radialna hitrost

Do leta 2009, ko so izstrelili teleskop Kepler, je bila velika večina eksoplanetov odkrita z merjenjem radialne hitrosti zvezde. Pri tej metodi je potrebno svetlobo zvezde razkloniti v spekter. V spektru lahko opazimo absorpcijske črte, ki nastanejo zaradi absorpcije svetlobe v atomih ali ionih v zvezdini atmosferi. Vsaka snov absorbira svetlobo pri točno določeni valovni dolžini, kar pomeni, da lahko iz položaja absorpcijskih črt v spektru natančno določimo sestavo zvezdine atmosfere.

S proučevanjem spektra pa lahko določimo tudi, ali se okoli zvezde giblje kakšen večji eksoplanet. Zvezda in planet ustvarjata okoli sebe gravitacijsko polje, delujeta eden na drugega z gravitacijsko silo in se zato gibljeta okoli skupnega težišča. Pri takem gibanju se zvezda na enem delu svoje tirnice giblje proti Zemlji, na drugem delu pa stran od nje. Ko se giblje proti Zemlji, se valovne

## Mass – Period Distribution



**Slika 2.** Na grafu je prikazano število eksoplanetov, ki so jih odkrili z določeno metodo. Vidimo, da prevladujeta predvsem merjenje radialne hitrosti in opazovanje prehoda planeta čez zvezdino ploskev [5].

dolžine spektralnih črt premaknejo proti modremu delu spektra, ko pa se giblje stran od Zemlje, se črte premaknejo proti rdečemu delu spektra. Če torej v spektru opazimo, da se črte gibljejo levo in desno, je to jasen znak, da ima zvezda spremljevalno telo, ki je lahko druga, majhna zvezda ali eksoplanet. Če poznamo inklinacijo tirnice telesa, lahko z merjenjem velikosti premika črt natančno določimo maso telesa. Če je masa manjša od minimalne mase zvezde, ki je  $0.08 M_{\odot}$ , sklepamo, da je telo eksoplanet. Potrebno pa je paziti, da gibanje črt slučajno ni posledica pulziranja zvezde ali kakšne druge zvezdine aktivnosti.

Slabost te metode je, da lahko z njo odkrivamo samo bolj masivne eksoplanete, ki so blizu svojih zvezd, te pa ne smejo biti preveč masivne, saj je potem njihova hitrost gibanja majhna in je zato ustrezno majhen tudi Dopplerjev premik spektralnih črt. Z najboljšimi spektroskopi lahko izmerimo hitrosti nad  $0.97 \text{ m/s}$ , Zemlja pa na primer povzroči, da se Sonce giblje komaj  $0.1 \text{ m/s}$ . Tudi če bi naredili tako zmogljiv spektroskop, da bi lahko zaznali zelo majhna gibanja, bi zvezdina aktivnost zasenčila efekt eksoplaneta [6].

## 2.2 Opazovanje prehoda

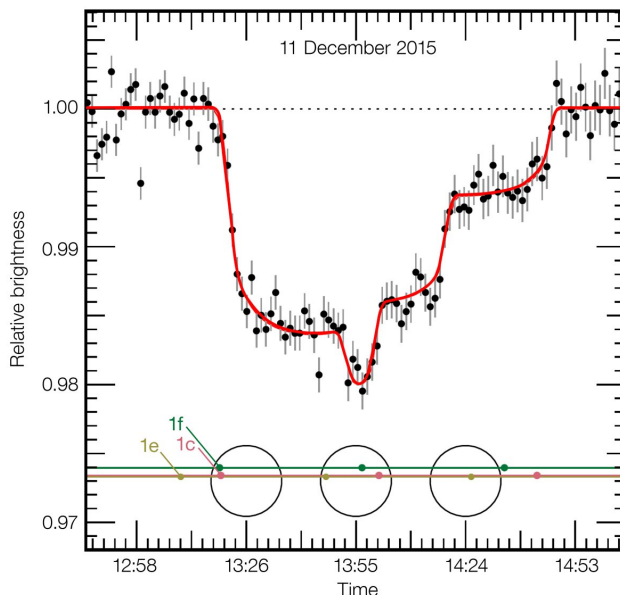
Metoda, s katero lahko odkrijemo tudi manjše eksoplanete, je opazovanje zmanjšanja intenzitete svetlobe zvezde zaradi navideznega prehoda eksoplaneta čez zvezdino ploskev. Ko eksoplanet prečka zvezdino ploskev, zastre del svetlobe, ki jo oddaja zvezda, kar izmerimo kot zmanjšanje toka fotonov. Za koliko se bo zmanjšala intenziteta svetlobe, je odvisno tako od velikosti eksoplaneta kot tudi od velikosti zvezde.

Zvezda bo potemnela za delež, ki je enak razmerju ploščin obeh krogov:

$$\frac{\Delta j}{j} = \left(\frac{R_p}{R_*}\right)^2, \quad (1)$$

kjer je  $\Delta j$  sprememba intenzitete svetlobnega toka,  $R_p$  polmer eksoplaneta in  $R_*$  polmer zvezde. Velikost zvezde lahko dovolj natančno določimo iz njenega spektralnega tipa in izsevnega razreda in tako lahko s pomočjo zgornje enačbe določimo velikost eksoplaneta. Samo s to metodo pa ne

moremo določiti njegove mase. Spektroskopija, s katero lahko določimo maso planeta, in fotometrija se tako lepo dopolnjujeta, saj lahko iz mase in radija planeta izračunamo njegovo gostoto, kar je zelo pomembno pri določanju sestave.



**Slika 3.** Spreminjanje svetlosti zvezde Trappist-1 pri prehodu treh planetov. To je prva svetlobna krivulja, kjer lahko vidimo prehod treh Zemlji podobnih planetov, od katerih sta dva v območju primernem za življenje [7].

Ko eksoplanet navidezno prečka zvezdino ploskev, gre nekaj svetlobe iz zvezde tudi skozi eksoplanetovo atmosfero. Pri katerih valovnih dolžinah se bo svetloba absorbirala, je odvisno od prisotnosti različnih plinov v atmosferi planeta. Če posnamemo spekter med mrkom in od tega odštejemo spekter zvezde, dobimo absorpcijski spekter eksoplaneta in s tem določimo sestavo atmosfere.

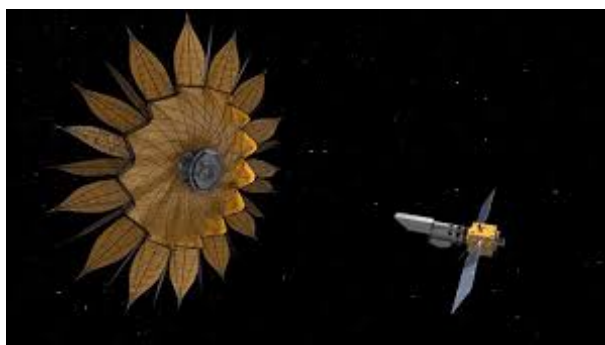
Največja slabost te metode je, da mora eksoplanet prečkati zvezdino ploskev točno med zvezdo in Zemljo, kar se pri večini eksoplanetov ne zgodi. Da lahko z Zemlje opazujemo prehod, mora biti ravnina gibanja eksoplaneta skoraj natančno poravnana s smerjo opazovanja, kar pa je izpolnjeno pri zelo majhnem deležu eksoplanetov. Ostalih eksoplanetov ne moremo odkriti s to metodo. Hkrati pa je to, da lahko opazujemo prehod tudi prednost, saj tako vemo, da je inklinacija blizu  $90^\circ$  in lahko tako bolj natančno določimo maso odkritega eksoplaneta. Naslednji problem je, da prehod traja samo majhen del celotnega časa, ki ga eksoplanet porabi za en obhod okoli zvezde. En obhod lahko traja več mesecev ali let, prehod pa samo nekaj ur ali dni. Zato je zelo malo verjetno, da bomo pri opazovanju zvezde opazili ravno prehod. Za potrditev, da res opazujemo eksoplanet, moramo opazovati več prehodov, kar pa lahko traja zelo dolgo. Za odkritje eksoplanetov, ki imajo zelo dolge obhodne čase, bi potrebovali več desetletij ali celo stoletij dolga opazovanja.

Trenutno je fotometrija najbolj učinkovita in natančna metoda za iskanje planetov izven našega Osončja. Teleskop Kepler, ki je bil izstreljen marca 2009 uporablja prav to metodo. Do maja 2013 je deloval tako, da je ves čas snemal isti del neba s približno 145.000 zvezdami. Kljub temu da je verjetnost, da bo pri katerikoli zvezdi zaznal prehod, zelo majhna, je vseeno posnel veliko prehodov, saj je snemal ogromno zvezd. V teh štirih letih je Kepler potrdil 2341 eksoplanetov, 4496 planetov pa je še na čakalni listi za potrditev [6, 8].

### 2.3 Direktno slikanje

Direktno slikanje eksoplanetov je zelo zahtevno in v večini primerov tehnično neizvedljivo. Zvezde so večinoma veliko presvetle, da bi lahko zraven njih opazili tako temen objekt, kot je eksoplanet. Vseeno pa obstajajo posebni primeri, v katerih je mogoče eksoplanet direktno opazovati.

Eden od načinov za direktno slikanje eksoplanetov je, da zastremo svetlobo, ki prihaja z zvezde. Za zastiranje obstajata dve glavni metodi. Prva se imenuje koronografija, pri kateri je v teleskopu naprava, ki blokira svetlobo zvezde preden le-ta doseže detektor. Koronografi so vgrajeni v teleskop in se večinoma uporabljajo pri teleskopih, ki jih uporabljamo za opazovanje z Zemlje. Pri drugi metodi pa s pomočjo zaslona blokiramo svetlobo zvezde še preden le-ta vstopi v teleskop. Za teleskope, ki so v vesolju, je zaslon na ločenem vesoljskem plovilu in je zasnovan tako, da se sam postavi v pravi položaj in tako blokira svetlobo zvezde, ki jo opazujemo [4].



**Slika 4.** Zaslon, s katerim zakrijejo svetlobo zvezde pri direktnem slikanju eksoplanetov [4].

Julija 2004 je skupina astronomov brez pripomočkov, ki blokirajo svetlobo zvezde, posnela objekt, ki ima več mas Jupitra. Eksoplanet se nahaja zelo blizu rjave pritlikavke 2M1207, ki je od nas oddaljena 200 svetlobnih let. Kasnejša opazovanja so potrdila, da se objekt dejansko giblje okoli zvezde. Na sliki 5 je fotografija tega planeta, ki naj bi bil prvi eksoplanet posnet z direktnim slikanjem. V tem primeru je bilo direktno slikanje mogoče, saj rjava pritlikavka v resnici ni prava zvezda, ker v njeni sredici ne poteka zlivanje vodika v helij. Ravno zaradi tega je veliko šibkejša od ostalih zvezd in zato je eksoplanet, ki se giblje okoli nje, sploh mogoče opazovati brez zastiranja svetlobe zvezde [8].



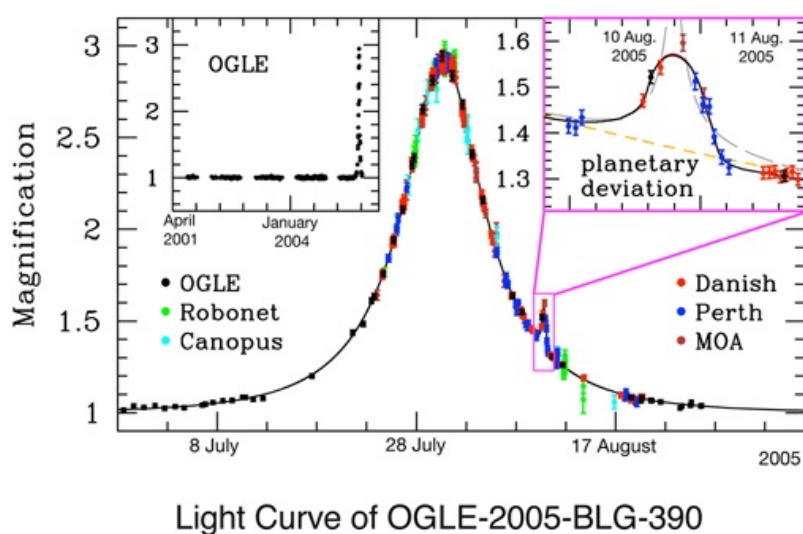
**Slika 5.** Julija 2004 je skupina astronomov posnela sliko planetu podobnega objekta, ki se giblje okoli rjave pritlikavke 2M1207 [9].

Direktno slikanje se še vedno razvija kot metoda za iskanje eksoplanetov. Znanstveniki upajo, da bo v prihodnosti to ena glavnih metod, s katero bi lahko določali tudi sestavo atmosfere in površja eksoplanetov.

## 2.4 Gravitacijsko mikrolečenje

Gravitacijsko mikrolečenje je astronomski pojav, ki ga je v svoji splošni teoriji relativnosti predvidel Albert Einstein. Gravitacija masivnega telesa ukrivi prostor-čas v njegovi okolici, kar povzroči, da se poti žarkov elektromagnetnega valovanja ukrivijo. Masiven objekt tako deluje kot leča, ki ojači svetlobo bolj oddaljene zvezde in zato zvezdo za kratek čas vidimo bolj svetlo kot sicer. Za to, da pojav sploh opazimo, morata biti objekta zelo natančno poravnana z našo smerjo gledanja.

Če je objekt, ki deluje kot leča, zvezda z eksoplanetom, potem tudi planetovo gravitacijsko polje zaznavno ukrivi pot svetlobe. S tem je svetloba zvezde še dodatno ojačana in dobimo na svetlobni krivulji zvezde še en oster vrh. Ker mora biti postavitvev objektov za tak dogodek zelo natančna, moramo hkrati spremljati ogromno število zvezd, da sploh opazimo kakšen tak dogodek.



**Slika 6.** Glavna svetlobna krivulja prikazuje pojav mikrolečenja, okoli 10. avgusta pa je viden vrh oz. ojačitev, ki nakazuje na prisotnost eksoplaneta [10].

Na sliki 6 je graf, ki prikazuje spreminjanje sija oddaljene zvezde zaradi mikrolečenja. Maksimum sija je dosežen ob najboljši poravnavi obeh zvezd. Ko se zvezdi malo razmakneta, sij že začne padati, vendar pa lahko proti koncu krivulje vidimo kratek lokalni maksimum v intenziteti svetlobe, ki je posledica mikrolečenja zaradi prisotnosti eksoplaneta.

Gravitacijsko mikrolečenje je edina znana metoda, s katero lahko odkrivamo eksoplanete, ki so zelo oddaljeni od Zemlje. Z metodo merjenja radialne hitrosti iščemo eksoplanete v naši okolici (do 150 svetlobnih let), s fotometrijo lahko potencialno najdemo eksoplanete na oddaljenosti več sto svetlobnih let. Z mikrolečenjem pa lahko opazimo eksoplanete, ki so od nas oddaljeni več deset tisoč svetlobnih let.

Največja slabost te metode je, da je gravitacijsko mikrolečenje enkraten pojav, kar pomeni, da eksoplanetov, ki so bili odkriti s to metodo, ne bomo opazovali nikoli več. Drugi problem je, da je razdalja od Zemlje do novoodkritega eksoplaneta ocenjena zelo površno, saj so eksoplaneti zelo daleč. Pri velikih oddaljenostih to lahko pomeni napako tudi več tisoč svetlobnih let. Poleg tega v resnici vidimo le, kako daleč v prečni smeri je planet od zvezde. To pomeni, da ne dobimo dejanske razdalje planeta od zvezde, ampak le njeno projekcijo na ravnino neba. Prav tako ne vemo, kako dobra je bila poravnava in zato težko ocenimo maso takega planeta [4, 8, 11].

## 2.5 Astrometrija

Opazovanje Dopplerjevega premika ni edina metoda, s katero lahko ugotovimo, da se zvezda giblje po majhni orbiti zaradi prisotnosti eksoplaneta. Zvezdino gibanje lahko zaznamo tudi preko spremembe položaja zvezde na nebu. Načeloma imajo zvezde neko hitrost glede na Sonce, torej se premikajo v ravni črti. Če pa je prisoten eksoplanet, pa zaradi gibanja okoli skupnega težišča rahlo vijugajo okoli predvidene ravne poti. Tako nihanje je zelo majhno, zato je astrometrija še vedno zelo težko izvedljiva, saj je tako gibanje izjemno težko zaznati. Manjši kot je eksoplanet, manj se zvezda premika, kar pomeni, da je s to metodo skoraj nemogoče odkrivati majhne eksoplanete.

Da lahko sledimo zvezdinemu gibanju, je treba posneti več zaporednih posnetkov iste zvezde, hkrati pa morajo biti na posnetku tudi kontrolne zvezde, na podlagi katerih lahko določimo, ali se je opazovana zvezda premaknila. Na vsaki sliki tako primerjamo razdalje med zvezdami in tako iščemo zvezde z eksoplaneti [4].

Pri astrometriji je pomembno, da lahko zelo natančno določimo položaj fotocentra zvezde. Pri tem je odločilna količina zbrane svetlobe. Potrebno pa se je izgoniti tudi razmazanosti slike zaradi atmosfere. Teoretična ločljivost teleskopa je

$$\Theta = 1.22 \frac{\lambda}{D},$$

kjer je  $D$  premer teleskopa,  $\lambda$  pa valovna dolžina svetlobe, v kateri opazujemo. Teoretično limito je na Zemlji nemogoče doseči zaradi dinamike atmosfere. Za primerjavo si predstavljamo, da opazujemo sistem, ki je podoben našemu Osončju. Predpostavimo, da je ta sistem oddaljen od nas toliko kot naša najbližja zvezda ( $d = 4.2$  svetlobna leta). Skupno težišče Osončja je od Sonca oddaljeno približno  $\Delta = 750\,000$  km. Za kot  $\alpha$ , pod katerim bi s te razdalje videli premikanje zvezde okoli skupnega težišča, velja:

$$\tan \alpha = \frac{\Delta}{d}$$

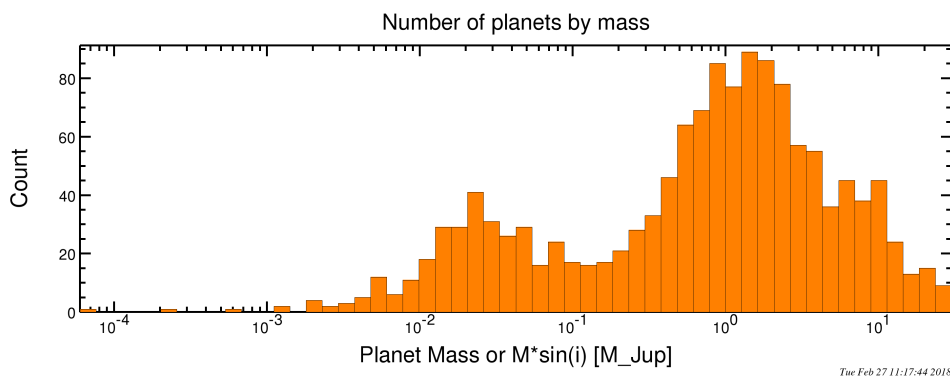
$$\alpha = 0.004''.$$

Očitno je, da je premik premajhen, da bi tak sistem s teleskopi na Zemlji lahko odkrili, saj je razmazanost slike zaradi atmosfere (»seeing«) na najboljših lokacijah za astronomska opazovanja okrog  $0,4''$  [12].

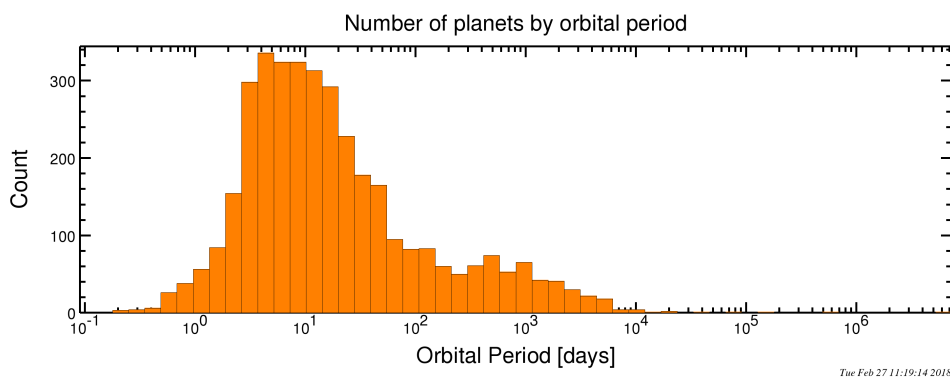
Leta 2013 so v vesolje izstrelili satelit Gaia, ki zelo natančno meri položaj, svetlost in gibanje več kot milijarde zvezd v naši Galaksiji. Gaia sicer ni namenjena iskanju eksoplanetov z metodo merjenja radialne hitrosti, saj spektrometer, ki je nameščen na satelitu, ni dovolj natančen. Lahko pa odkrije eksoplanete z metodo astrometrije.

## 2.6 Statistika lastnosti eksoplanetov

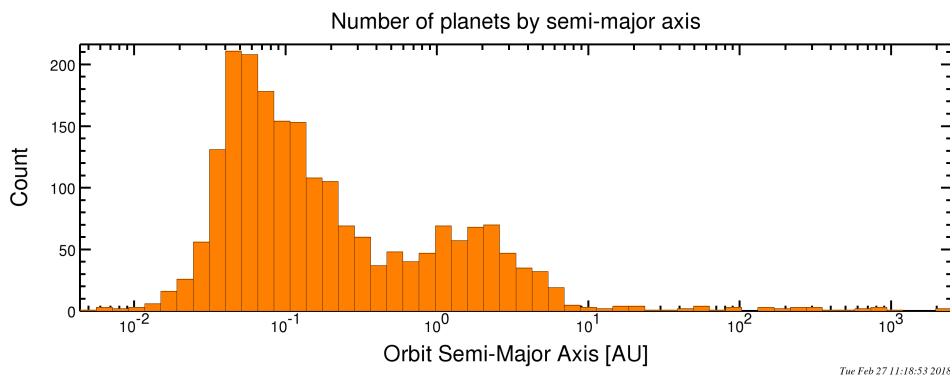
Spodnji grafi na slikah 7, 8, 9, 10 in 11 prikazujejo lastnosti eksoplanetov na dan 27. februar 2018 [5].



**Slika 7.** Masa eksoplaneta izražena v masah Jupitra: kljub temu da so tehnike za odkrivanje eksoplanetov mnogo boljše kot pred nekaj leti, je še vedno največ odkritih eksoplanetov podobnih Jupitru. Vseeno pa lahko vidimo, da je kar nekaj eksoplanetov podobnih Zemlji. Skala na osi x je logaritemska.



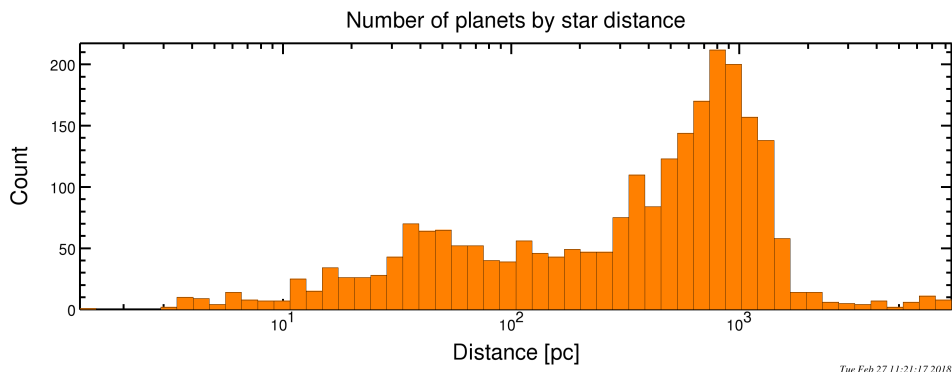
**Slika 8.** Orbitalna perioda eksoplaneta izražena v dnevih: večina odkritih eksoplanetov svojo zvezdo obkroži v nekaj dnevih. Eksoplanete z daljšimi periodami je skoraj nemogoče odkriti, saj bi morali eno zvezdo opazovati dalj časa. Skala na osi x je logaritemska.



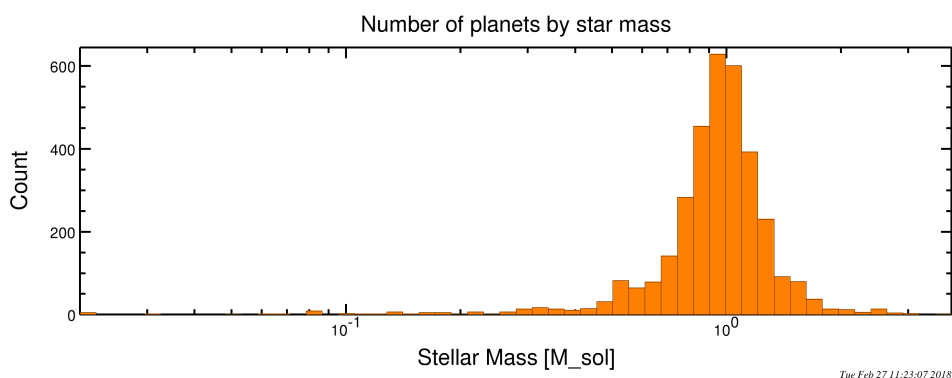
**Slika 9.** Oddaljenost planeta od zvezde (srednja vrednost) v enotah razdalje med Zemljo in Soncem: veliko planetov je zelo blizu svoje zvezde, kar je povezano tudi s kratko orbitalno periodo. Skala na osi x je logaritemska.



## Eksoplaneti v naši soseščini



**Slika 10.** Oddaljenost planetarnega sistema od Zemlje v parsekih: z izboljšanjem metod odkrivanja se je začelo povečevati število planetov, ki so od Zemlje oddaljeni tudi več tisoč svetlobnih let ( $1pc = 3,26sv.leta$ ). Skala na osi x je logaritemska.



**Slika 11.** Masa zvezde v Sončevih masah: večina zvezd s planeti je podobnih Soncu. Skala na osi x je logaritemska.

### 3. Določanje lastnosti eksoplaneta

Najpomembnejši tehniki, s katerima so odkrili največ eksoplanetov, sta merjenje radialne hitrosti in opazovanje prehoda eksoplaneta čez zvezdino ploskev. V idealnem primeru lahko izmerimo tako radialno hitrost zvezde, kot tudi zmanjšanje intenzitete svetlobe zaradi prehoda. Tako iz meritev pridobimo vse potrebne podatke za izračun mase, polmera in oddaljenost eksoplaneta.

Iz opazovanja prehoda lahko zelo natančno določimo zmanjšanje intenzitete svetlobe. Iz tega podatka takoj sledi

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

Če torej poznamo polmer zvezde, lahko določimo tudi polmer planeta. Polmer zvezde je najlažje določiti s pomočjo zvezdinega spektra. Iz njegovih lastnosti (položaja, jakosti in širine spektralnih črt) lahko določimo lastnosti zvezde. Tako med drugim dobimo tudi temperaturo na površju oz. v fotosferi zvezde. Iz enačbe

$$L = 4\pi R_*^2 \sigma T_*^4$$

lahko izrazimo radij zvezde

$$R_* = \sqrt{\frac{L}{4\pi\sigma} T_*^{-2}},$$

kjer je izsev zvezde L:

$$L = j \cdot 4\pi d^2.$$

Pri zadnji enačbi sem predpostavila, da je prostor med zvezdo in nami prozoren za svetlobo. Če poznamo oddaljenost zvezde  $d$ , lahko izrazimo polmer zvezde kot:

$$R_* = \sqrt{\frac{d^2 j}{\sigma}} T_*^2.$$

Iz prve enačbe lahko sedaj izrazimo polmer planeta

$$R_p = R_* \sqrt{\frac{\Delta j}{j}}. \quad (2)$$

Naslednja lastnost, ki nas zanima, je masa planeta. Masa je pomembna predvsem zato, da lahko določimo gostoto in tako ugotovimo, ali je planet plinast ali trden. Ob predpostavki, da se planet giblje po krožnici, je krožilna hitrost planeta okoli zvezde

$$v_p = \sqrt{\frac{GM_*}{r_p}},$$

kjer je  $r_p$  polmer planetove tirnice okoli zvezde in  $M_*$  masa zvezde. Vemo tudi, da je hitrost planeta enaka obsegu krožnice, po kateri potuje, deljeno s časom  $P$ , ki ga porabi za en obhod

$$v_p = \frac{2\pi r_p}{P}.$$

Tukaj smo predpostavili, da se giblje samo planet, kar pa seveda ni res, saj ravno iz gibanja zvezde lahko ugotovimo, da okoli nje kroži planet. Vemo pa, da sta v težiščnem sistemu polmera tirnic planeta in zvezde v obratnem sorazmerju kot njuni masi:

$$r_* = r_p \frac{m_p}{M_* + m_p} = r_p \frac{m_p}{M_*}. \quad (3)$$

V enačbi 3 smo v zadnjem koraku zanemarili maso planeta, saj je masa zvezde veliko večja od mase planeta. Polmer zvezdine krožnice določimo s pomočje njene radialne hitrosti. Velja:

$$v_* = \frac{2\pi r_*}{P} = \frac{2\pi r_p}{P} \frac{m_p}{M_*}. \quad (4)$$

Periodo oz. čas za en obhod lahko določimo tako iz meritve prehoda kot tudi iz meritve radialne hitrosti zvezde.

$r_p$  dobimo iz 3. Keplerjevega zakona

$$\frac{r_p^3}{P^2} = \frac{GM_*}{4\pi}, \quad (5)$$

kjer spet upoštevamo, da je masa planeta mnogo manjša od mase zvezde. To sedaj vstavimo v enačbo 4 in dobimo

$$m_p = v_* \left( \frac{M_*^2 P}{2\pi^2 G} \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (6)$$

Maso zvezde dobimo iz spektra podobno kot temperaturo.

Iz znane mase in polmera lahko izračunamo še povprečno gostoto planeta

$$\rho_p = \frac{m_p}{\frac{4}{3}\pi R_p^3}. \quad (7)$$

Ta izračun seveda velja samo v idealnem primeru, ko leži ravnina gibanja zvezde in planeta v opazovalni ravnini. Če to ne velja, je radialna hitrost zvezde, ki jo izmerimo, odvisna tudi od naklonskega kota, tako da velja

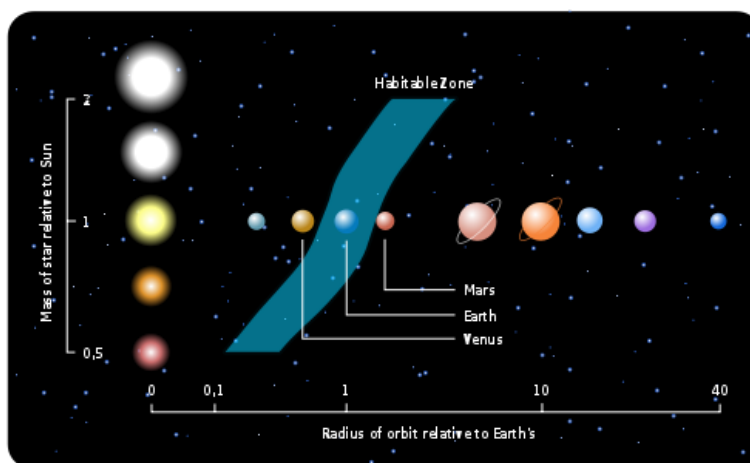
$$v_{izm} = v_* \cdot \sin i,$$

kjer je i naklonski kot tirnice oz. inklinacija. Če ne vemo naklonskega kota, lahko določimo samo spodnjo mejo za maso planeta. Od naklonskega kota je tudi odvisno, ali bomo sploh lahko opazovali prehod planeta. Za večino zvezd lahko izmerimo na primer samo radialno hitrost oz. njeno projekcijo na našo smer gibanja, zato je v teh primerih potrebno za določitev vseh parametrov izvesti še kakšno drugo meritev.

#### 4. Območje primerno za življenje

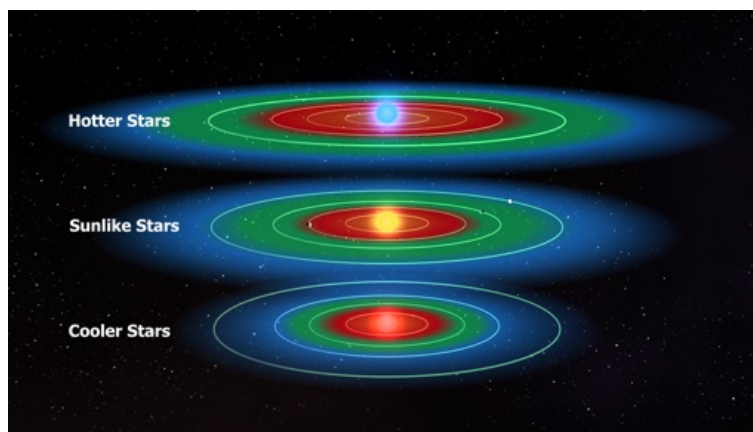
Glede na to da je do sedaj znanih že okoli 3500 planetov izven našega Osončja, danes ni več nenavadno, ko odkrijemo še kakšnega. Zato pa je toliko bolj zanimivo, ko najdemo eksoplanet, ki leži v območju primernem za življenje. Območje primerno za življenje (ang. Habitable Zone) je območje okoli zvezde, kjer je temperatura primerna, da lahko na površju planeta obstaja tekoča voda (med 0 in 100 °C).

Eksoplanete iščemo predvsem okoli zvezd tipa F, G, K in M. Zvezde tipa O, B in A imajo prekratko življenje, da bi se na planetih okoli njih razvilo kompleksno življenje. Prav tako so manj zanimive kot tarče opazovanj, ker je v njihovi bližini težje odkriti eksoplanete, saj so zelo masivne in svetle. Vseeno pa tudi zvezde z zelo majhno maso niso zelo primerne za razvoj življenja, kljub temu da imajo zelo dolgo življensko dobo. Majhnim zvezdam se veliko bolj spreminja izsev kot pa zvezdam Sončevega tipa, kar pomeni, da se pogoji stalno spreminjajo. Če želimo, da je eksoplanet okoli pritlikavke v območju primernem za življenje, se mora gibati zelo blizu svoje zvezde. Sčasoma bo tako tak planet zaradi plimskega vpliva zvezde proti njej obrnjen vedno z isto stranjo (tako kot naša Luna proti Zemlji), kar bi pomenilo, da ne bo menjavanja dneva in noči ter da bo ena stran planeta zelo hladna, druga pa zelo vroča. Vseeno pa to še ne pomeni, da tam življenje ni mogoče, saj se temperaturne razlike lahko izravnavajo, če ima planet atmosfero in s tem tudi vetrove, ki mešajo zrak.



Slika 12. Moder pas prikazuje območje primerno za življenje v odvisnosti od mase zvezde [13].

Na sliki 12 moder pas prikazuje lokacijo območja primerne za življenje. Očitno je, da je za manj masivne zvezde to območje bližje zvezdi, za bolj masivne pa dlje od njih. Na sliki 13 je še en prikaz območja primerne za življenje. Področje označeno z rdečo barvo je prevroče, območje z modro je prehladno, v zelenem območju pa lahko obstaja tekoča voda [13].



Slika 13. Shematičen prikaz območja primerne za življenje za zvezde z različnimi temperaturami [13].

#### 4.1 Temperatura na površju planeta

Temperaturo na površju planeta lahko zelo enostavno ocenimo. Predpostavimo, da se planet nahaja na oddaljenosti  $d$  od zvezde in da ima zvezda izsev  $L$ . Planet obravnavamo kot disk z polmerom  $R_p$ .

Površje planeta, ki absorbira sevanje z zvezde, je  $A_{abs}$  in je samo del celotnega površja planeta  $A_p = 4\pi R_p^2$ . Del prejetega sevanja planet tudi odbije, zato uvedemo parameter, ki ga imenujemo albedo in označuje, kolikšen del vpadnega sevanja bo planet odbil. Če je  $a = 1$ , pomeni, da planet odbije celotno vpadno sevanje,  $a = 0$  pa pomeni, da se celotno sevanje absorbira.

Za absorbirano moč velja:

$$P_{abs} = \frac{LA_{abs}(1-a)}{4\pi r_p^2}, \quad (8)$$

kjer je  $L$  izsev zvezde.

Čeprav planet nima konstantne temperature po celotnem površju, predpostavimo, da bo oddajal sevanje kot črno telo s temperaturo  $T_p$  preko površine  $A_{izs}$ . Tukaj uvedemo parameter  $\epsilon$ , ki označuje emisivnost planeta. Če ima telo  $\epsilon = 1$ , pomeni, da seva kot popolno črno telo. Iz Štefan-Boltzmanovega zakona dobimo moč, ki jo planet izseva

$$P_{izs} = A_{izs}\epsilon\sigma T_p^4. \quad (9)$$

Predpostavimo lahko, da je planet v termodinamskem ravnovesju, kar pomeni, da je izsevana moč enaka absorbirani moči, zato lahko enačimo enačbi 8 in 10. Če planet ni v termodinamskem ravnovesju, se bo ohlajal oz. segreval toliko časa, dokler ne doseže ravnovesja. Ko enačimo enačbi 8 in 10, dobimo oceno za temperaturo na površju planeta

$$T_p = \left( \frac{A_{abs} L(1-a)}{A_{izs} 4\pi\sigma\epsilon r_p^2} \right)^{\frac{1}{4}}. \quad (10)$$

Približek za razmerje med ploščinama je  $\frac{1}{4}$  za hitro vrteča se telesa in  $\frac{1}{2}$  za počasi vrteča se ali plimsko vezana telesa. Razmerje je enako 1 za točko na telesu, kamor sevanje vpada točno pravokotno. Tam je temperatura maksimalna [14].

Vendar pa je potrebno omeniti, da je na tak način izračunana temperatura zgolj teoretični približek, ki odpove pri večini planetov. Glavna krivca za to sta notranji toplotni vir planeta, ki smo ga tukaj zanemarili, ter planetova atmosfera. Venera je odličen primer, kjer se teoretična in prava temperatura zelo razlikujeta. Razlog za to je efekt tople grede, ki omogoča da sevanje vstopi v atmosfero in segreje površje, izstopiti pa ne more, zato se planet ne ohlaja tako močno kot se segreva.

Dober primer efekta tople grede je tudi Zemlja. Če ne bi bilo atmosfere, bi bila temperatura na Zemlji precej pod ničlo in bi bilo površje zato prekrito z ledom.

Velikost območja primerne za življenje je torej odvisna predvsem od zvezdinega izseva, ki določa temperaturo na planetu, in oddaljenosti planeta od zvezde. Možnost obstoja življenja pa je vsekakor odvisna tudi od sestave planetove atmosfere.

## 5. Zaključek

V prihodnosti imamo vsekakor še veliko prostora za izboljšave teleskopov in instrumentov, s katerimi bomo lahko odkrili več eksoplanetov in izvedeli več o njihovi sestavi. Znanstveniki trenutno testirajo teleskop James Webb, ki bo eksoplanete opazoval v infrardeči svetlobi. Iztrelitev je načrtovana za leto 2018. Eden glavnih ciljev Webba bo, da bo s pomočjo spektroskopije določil sestavo atmosfere novoodkritih eksoplanetov. Predvsem bo iskal kemične biomarkerje, kot na primer ozon in metan, ki nastanejo v bioloških procesih.

Glede preučevanj eksoplanetov z Zemlje pa bo v veliko pomoč evropski Izjemno veliki teleskop (Extremely Large Telescope - ELT). Njegovo zrcalo bo imelo polmer 39 m in bo s tem največji optični teleskop na svetu. Omogočal bo direktno slikanje večjih eksoplanetov in mogoče celo določanje njihove sestave, zagotovo pa bo preučeval tudi atmosfere planetov. Z njim bo mogoč vpogled v začetne faze razvoja planetov in tako bomo lahko zaznali vodo in organske molekule že v protoplanetarnih diskah. Upamo pa tudi, da nam bo odgovoril na vprašanje, ali smo v vesolju sami [4].

## LITERATURA

- [1] Introduction to exoplanets [http://spiff.rit.edu/classes/resceu/lectures/intro/intro\\_notes.html](http://spiff.rit.edu/classes/resceu/lectures/intro/intro_notes.html) (zadnji dostop 25. 2. 2018)
- [2] A brief personal history of exoplanets <https://palereddot.org/a-brief-personal-history-of-exoplanets-by-paul-butler/> (zadnji dostop 23. 2. 2018)
- [3] Discovery of two new planets <http://www.berkeley.edu/news/media/releases/96legacy/releases.96/14301.html> (zadnji dostop 23. 2. 2018)
- [4] Exoplanet exploration <https://exoplanets.nasa.gov/> (zadnji dostop 27. 2. 2018)
- [5] NASA Exoplanet Archive <http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/> (zadnji dostop 25. 2. 2018)
- [6] How to find an extrasolar planet? [http://www.esa.int/Our\\_Activities/Space\\_Science/How\\_to\\_find\\_an\\_extrasolar\\_planet](http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/How_to_find_an_extrasolar_planet) (zadnji dostop 27. 2. 2017)
- [7] ESO [www.eso.org](http://www.eso.org) (zadnji dostop 27. 2. 2018)
- [8] The Planetary Society <http://www.planetary.org/> (zadnji dostop 27. 2. 2018)
- [9] 2M1207 <https://en.wikipedia.org/wiki/2M1207> (zadnji dostop 27. 2. 2018)
- [10] OGLE <http://ogle.astrouw.edu.pl/atlas/> (zadnji dostop 25. 2. 2018)
- [11] Gravitational Microlensing [https://en.wikipedia.org/wiki/Gravitational\\_microlensing](https://en.wikipedia.org/wiki/Gravitational_microlensing) (zadnji dostop 26. 2. 2018)
- [12] Lectures [http://zuserver2.star.ucl.ac.uk/ingo/LectureNotes\\_files/](http://zuserver2.star.ucl.ac.uk/ingo/LectureNotes_files/) (zadnji dostop 27. 2. 2018)
- [13] The Habitable Zone <https://www.e-education.psu.edu> (zadnji dostop 27. 2. 2018)
- [14] Effective temperature [https://en.wikipedia.org/wiki/Effective\\_temperature](https://en.wikipedia.org/wiki/Effective_temperature) (zadnji dostop 27. 2. 2018)
- [15] Anglada-Escudé, G. et al. A terrestrial planet candidate in a temperate orbit around Proxima Centauri. *Nature*. **536**. 7617 (2016)
- [16] Gillon, M. et al. Seven temperate terrestrial planets around the nearby ultracool dwarf star TRAPPIST-1. *Nature*. **542**. 7642 (2017)