

NOBELOVA NAGRADA ODKRITELJEMA PLANETOV DRUGIH ZVEZD

TOMAŽ ZWITTER

Fakulteta za matematiko in fiziko
Univerza v Ljubljani

PACS: 11.11.Aa

Polovico letošnje Nobelove nagrade za fiziko sta dobila Michel Mayor in Didier Queloz z Ženevskega observatorija (slednji je tudi profesor v angleškem Cambridgeu) za »odkritje planeta okoli Soncu podobne zvezde«. Pojasnili bomo, zakaj tako natančna formulacija utemeljitve, dosežke nagrajencev in seveda pomen tega rezultata za plaz odkritij, ki trenutno šteje 4131 planetov drugih zvezd. Z ugotovitvijo, da približno polovico zvezd v vesolju obkrožajo planeti, ki so po velikosti podobni Zemlji, sta nagrajenca nedvomno prispevala k boljšemu razumevanju našega mesta v vesolju, pa tudi dejstva, da z naše pregrevaajoče se Zemlje kljub temu ne moremo nikamor.

NOBEL PRIZE TO DISCOVERERS OF PLANETS AROUND OTHER STARS

Half of Nobel prize for physics in 2019 goes to Michel Mayor and Didier Queloz from the Geneva observatory (the latter is also a professor in British Cambridge) for a »discovery of a planet around a Solar-type star«. A very careful wording of this statement deserves clarification, which will be continued with a description of achievements of the laureates and of their impact on an impressive series of discoveries of 4131 planets around other stars so far. Realisation that approximately every second star in the Universe is encircled by planet(s) of size similar to Earth is clearly a landmark result which contributes to understanding of our place in cosmos, but nevertheless it does not change the fact that we cannot leave our planet which is getting hotter and hotter.

Gibanje zvezd s planeti

Pri iskanju planetov okoli zvezd nas vedno, razen seveda pri našem Soncu, moti slepeča svetloba zvezde. Tako so s slikanjem doslej odkrili le 133 planetov drugih zvezd (pred letom 2004 je bilo znanih le 8 takih planetov). Namesto iskanja skrajno temnih pik v bližini svetlih zvezd je bolje proučevati gibanje zvezde same. Zvezde v naši okolici potrebujejo za en obhod okoli osrednjega dela Galaksije približno 200 milijonov let, torej lahko predpostavimo, da se v času opazovanj gibljejo naravnost. Razen če gre za gravitacijsko vezan sistem dveh ali več zvezd ali če je zvezda obdana s planeti. V slednjem primeru iz tretjega Keplerjevega zakona preprosto izpeljemo,

da bo planet z maso m_p , ki v času P obkroži zvezdo z maso M_* , povzročil nihanje hitrosti zvezde z amplitudo

$$v_* = (2\pi G)^{1/3} m_p P^{-1/3} M_*^{-2/3}, \quad (1)$$

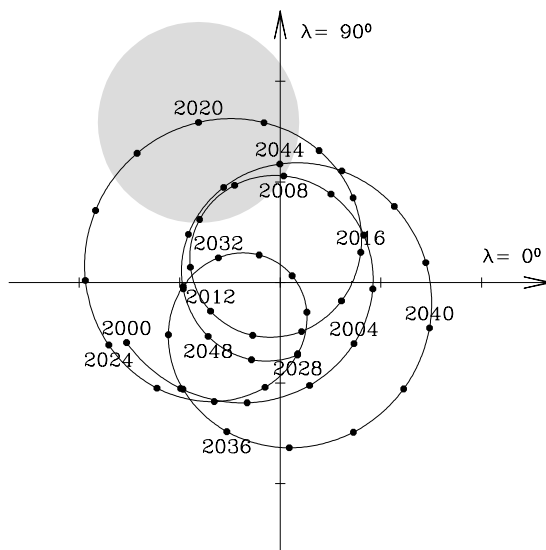
kjer smo predpostavili, da je $m_p \ll M_*$ in je G gravitacijska konstanta. Kroženje planeta povzroči tudi odmike zvezde od ravne poti, ki imajo amplitudo

$$r_* = (2\pi)^{-2/3} G^{1/3} m_p P^{2/3} M_*^{-2/3}. \quad (2)$$

Pri meritvi je treba upoštevati tudi orientacijo tirnice v prostoru. Pri prvi enačbi preko Dopplerjevega premika lahko merimo le projekcijo hitrostnega vektorja na smer proti Zemlji, torej na splošno lahko določimo le spodnjo mejo za maso planeta. Kot omenjamo spodaj, včasih orientacijo tirnice poznamo in ta težava odpade. Tudi sicer pa je malo verjetno, da bo ravnina tira skoraj pravokotna na smer proti Zemlji in bo tako dejanska masa veliko večja od določene spodnje meje. Pri drugi enačbi teh težav ni. Tudi v tem primeru namesto odmika lahko merimo le spremembo smeri proti zvezdi, torej projekcijo tira na ravnino neba. Vendar iz časovnega poteka smeri lahko ugotovimo dejansko obliko tira. Kot primer si zamislimo eliptično sled na nebu: če gre za projekcijo nagnjenega krožnega tira, bo premikanje najpočasnejše ob obeh sekanjih velike polosi, če ima tir zares obliko elipse in leži v ravnini neba, pa bo v enem sečišču hitrost največja, v drugem pa najmanjša.

Žal sta vrednosti, ki ju dosegata levi strani navedenih enačb, majhni. Naš najmasivnejši planet Jupiter tako ob kroženju s periodo $P = 11,86$ leta povzroča Sončeve hitrostne in prostorske odmike z amplitudo 12 m/s in 1,05 Sončevega polmera. Prva številka je kar 25-milijonkrat manjša od svetlobne hitrosti in je zato z meritvijo Dopplerjevega premika ni lahko izmeriti. Pri drugi je treba upoštevati, da Sončev polmer celo na razdalji Soncu najbližje zvezde Proksime Kentavre oklepa le kot 3,6 tisočinke ločne sekunde.

Enačbi povesta, da je lažje od Zemlji podobnih planetov odkriti take, ki dosegajo vsaj maso Jupitra, in da jih je lažje odkriti ob zvezdah z maso, manjšo od Sončeve. Za dopplersko odkrivanje (1) je lažje najti planete s kratko orbitalno periodo. Ker manjša masa zvezde pomeni tudi manjši izsev, taki bližnji planeti vsaj v nekaterih primerih niso prevroči za obstoj tekoče vode na površju. Uporabo enačbe (2) ilustrira slika 1, ki podaja položaj središča Sonca glede na težišče Osončja. Pričakujemo, da bo satelit Gaia Evropske vesoljske agencije, ki natančno meri spreminjanje smeri, v kateri vidimo določeno zvezdo, v prihodnjih letih razkril na tisoče planetov drugih zvezd, večinoma z masami, primerljivimi Jupitrovi.



Slika 1. Gibanje Sončevega središča glede na težišče Osončja, ki je v izhodišču. Osi podajata odmike v ravnini ekliptike v enotah polmera Sonca. Točke označujejo položaje ob začetku posameznih let, osenčen krog pa je velikost in položaj Sončeve krogle 1. januarja 2020. Poglavitni vpliv na gibanje Sonca imata planeta Jupiter in Saturn. Ker bosta leta 2020 in 2040 oba v opoziciji julija oziroma aprila, bo tedaj Sonce daleč od težišča. λ označuje ekliptično dolžino. Pri risanju smo uporabili efemeride [26].

Meritev Dopplerjevega premika

Cilj spektroskopske meritve je ugotoviti čim točnejše položaje čim večjega števila absorpcijskih spektralnih črt, ki so posledica vezano-vezanih prehodov elektronov v različnih atomih v zvezdini atmosferi. Skupni drobnji premik teh črt v valovni dolžini nam preko Dopplerjevega pojava omogoča meritev radialne hitrosti oddaljevanja oziroma približevanja zvezde.

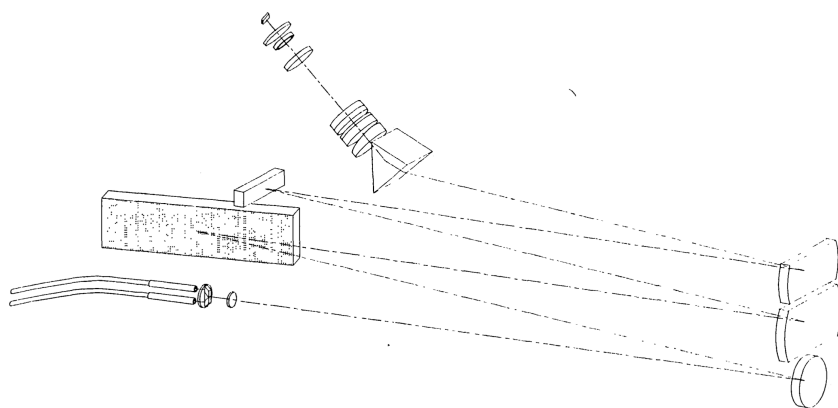
Meritev spreminjanja radialne hitrosti zvezde, ki kaže na prisotnost planeta, zahteva točnost boljšo od približno 10 m/s. Taka meritev mora biti ponovljiva, ni pa potrebno, da je natančna, saj nas zanima spreminjanje radialne hitrosti v obdobjih tednov ali mesecev, ne pa njena vrednost sama po sebi. Zadostuje torej meritev časovnega spreminjanja korelacijske funkcije spektra zvezde in primerne referenčnega spektra.

Taka meritev bo zaznala spremembe radialne hitrosti na nivoju metrov na sekundo, ob tem pa ni rečeno, da ne bodo izmerki glede na dejansko

radialno projekcijo hitrosti težišča zvezde sistematično zamaknjeni tudi za 100 m/s ali več [24]. Zamik je posledica zlasti dveh procesov: (i) Kot prvo je tu konvekcija, ki, podobno kot pri našem Soncu, poteka v površinskih plasteh večine zvezd, ob katerih iščemo planete. Vroč plin se v konvektivni plasti dviga, hladnejši pa spušča. Ker je nastanek spektralnih črt odvisen od temperature, odražajo Dopplerjevi premiki teh črt poleg hitrosti težišča zvezde tudi konvektivne premike. Večinoma so črte močnejše v bolj vročem plinu, zato njihovi Dopplerjevi premiki odražajo dviganje z nekaj 100 m/s in s tem zamik proti krajšim valovnim dolžinam. (ii) Svetloba z zvezde na poti z močno gravitacijsko vezane površine do opazovalca doživi gravitacijski rdeči premik. Za zvezdo Sončevega tipa je ta premik za zelo oddaljenega opazovalca enak 636 m/s, na splošno pa je odvisen od mase in velikosti zvezde, ki ju poznamo z omejeno točnostjo. Omenjena procesa imata praviloma sicer nasproten predznak, vendar se med sabo povsem ne izničita. K sreči pa se za zvezde brez izbruhov ali močnih magnetnih polj v obdobju do nekaj let ne spreminjata s časom. Tako dejanske radialne hitrosti težišča zvezde sicer ne poznamo, še vedno pa lahko merimo njeno spreminjanje. Pri interpretaciji podatkov je seveda treba upoštevati, da smo opazovali z vrteče se Zemlje, ki kroži okoli težišča Osončja. Vendar to ni resnejši problem, saj ustrezno radialno komponento hitrosti lahko izračunamo s točnostjo boljšo od 1 cm/s [23], pri čemer je glavni vir napake efektivni čas opazovanja [9], saj se prosojnost Zemljine atmosfere stalno spreminja.

Leta 1942 rojeni Michel Mayor je vso svojo kariero namenil izboljševanju točnosti spektroskopov. Z Andréjem Baranom sta leta 1981 razvila instrument CORAVEL [3]. Radialno hitrost opazovane zvezde je določil iz odčitkov fotopomnoževalke, ki je zabeležila, koliko svetlobe je v goriščni ravnini prepustila premična kovinska plošča z režami, ki so uokvirjale pričakovane položaje spektralnih črt. Za zvezde podobne Soncu so tako dosegli točnost 300 m/s, kar je omogočalo proučevanje številnih dvojnih zvezd, ni pa zadoščalo za odkrivanje planetov.

V devetdesetih letih se jima je pridružil še Mayorjev doktorski študent Didier Queloz. Leta 1993 so na francoskem Observatoire de Haute-Provence zgradili spektroskop ELODIE [4], ki je prinesel napredek na štirih področjih: (1) svetlobo so vanj speljali z optičnimi vlakni, kar je pomenilo manjše izgube svetlobe kot pri klasičnem Coudéjevem vmesniku, obenem pa je instrument lahko deloval na optični mizi v kontroliranih pogojih; (2) uporabili so običajni stopničasti spektroskop, ki pa so ga zelo pazljivo skalibrirali; (3) namesto fotopomnoževalke so uporabili digitalni ploskovni detektor CCD; (4) za korelacijsko analizo so namesto plošče z režami uporabili računalniški algoritem.



Slika 2. Shema stopničastega spektroskopa ELODIE [4]. S teleskopom zbrano svetlobo v spektroskop pripeljemo z optičnim vlaknom (levo spodaj), nato jo po odboju na zrcalu razklonimo z gosto interferenčno mrežico, katere reže so postavljene navpično. Tako dobimo v vodoravni smeri razklonjeno sled, v kateri pa se v isti smeri širi svetloba različnih interferenčnih redov. Te ločimo s kombinacijo prizme in grizme z vodoravno nanizanimi režami, ki rede razmakneta v navpični smeri. Svetlobo končno z lečami zberemo na detektorju CCD, ki je na vrhu skice.

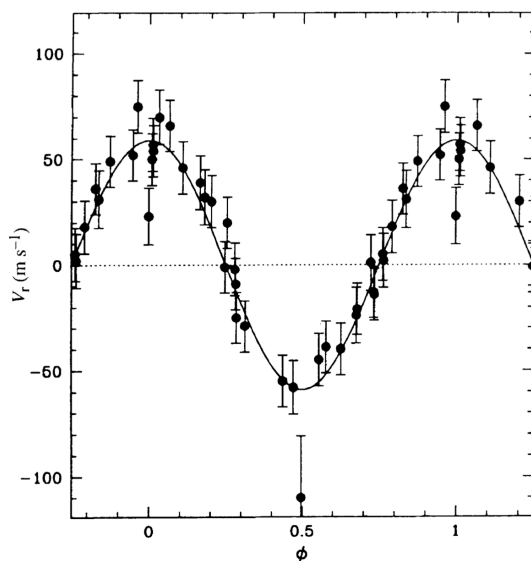
Preprosti spektroskopi z interferenčno mrežico točkasto sliko zvezde razklonijo v sled, vzdolž katere se spreminja valovna dolžina. Tak način ni učinkovit, saj je zabeležena sled relativno kratka in zato s primerno točnostjo lahko pokrije le skromen razpon valovnih dolžin in tako zabeleži položaje le majhnega števila spektralnih črt. Stopničasti spektroskop (fr. *echelle*) svetlobo zvezde razkloni dvakrat (glej sliko 2): najprej z zelo gosto interferenčno mrežico v zelo visokem interferenčnem redu, spektroskop ELODIE beleži svetlobo med 90. in 156. interferenčnim redom¹. Žal se vsi ti redi prekrivajo, zato jih ločimo s še enim razklonilnim elementom, ki svetlobo rahlo razklanja v smeri pravokotni na prvotni razklon. V spektroskopu ELODIE so za drugi razklon uporabili kombinacijo prizme in grizme, to je prizme, ki ima na eni od površin še interferenčno mrežico. Rezultat je $156 - 90 + 1 = 67$ skoraj vzporednih sledi, ki lepo pokrivajo površino detektorja CCD in omogočajo visokoresolucijsko ($\lambda/\Delta\lambda \sim 40.000$) meritev spektra v območju valovnih dolžin med 390,6 in 681,1 nm. Na skupaj približno 67.000 točkah za zvezdo podobno Soncu zabeležimo ~ 5000 spektralnih črt. To omogoča

¹Pot svetlobe med sosednjima režama se na poti do gorišča spektroskopa razlikuje za 90 do 156 valovnih dolžin.

meritev radialne hitrosti s točnostjo $\simeq 15$ m/s. Na teleskopu s premerom primarnega zrcala 1,93 m je za zvezdo 9. magnitude za to potrebna polurna osvetlitev. Tako je bil ELODIE leta 1993 daleč najtočnejši in najučinkovitejši astronomski spektroskop.

Odkritje planeta ob zvezdi 51 Pegaza

Mayor in Queloz sta se takoj lotila sistematičnega opazovanja 142 Soncu podobnih zvezd, za katere so s spektroskopom CORALIE preverili, da so enojne in brez izbruhov ali pulzacij, ki bi zaradi časovno spremenljivega prispevka lahko kontaminirale meritev radialne hitrosti. Med njimi je bila tudi zvezda 51 v ozvezdju Pegaza, ki ima enako površinsko temperaturo kot Sonce in je za $\sim 30\%$ večja od njega. Na razdalji 15,47 pc oziroma 50,45 svetlobnih let (ki jo po zaslugi Gaje poznamo na 0,2 % natančno) je ta zvezda z magnitudo $V = 5,46$ na meji vidnosti s prostim očesom.



Slika 3. Spreminjanje radialne hitrosti zvezde 51 Peg z orbitalno fazo Φ , ki čas meri v enotah obhodnega časa. Ta graf, ki ga razložimo z obstojem Jupitru podobnega planeta, ki to zvezdo obkroži v 4,23 dneva, je avtorjema Mayorju in Quelozu prinesel Nobelovo nagrado. Povzeto po [13].

Queloz je v meritvah radialne hitrosti zaznal rahla, vendar hitra nihanja z amplitudo 59 m/s in periodo 4,229 dneva. Zadnja vrednost je bila povsem nepričakovana, saj imajo planeti v našem Osončju veliko daljše ob-

hodne čase. Celo Merkur za en obhod potrebuje 88 dni. Torej se je potožil mentorju, da nikakor ne najde napake, ki bi razložila čudni rezultat.

Mayor je razumel, za kaj gre, in tako sta 23. novembra 1995 v reviji Nature objavila odkritje planeta z maso vsaj polovice Jupitra, ki kroži okoli Soncu podobne zvezde (slika 3). Planet bi bil lahko tudi nekoliko bolj masiven, saj ni nujno, da Zemlja leži v orbitalni ravnini planeta in je tako amplituda radialne komponente manjša od dejanske hitrosti zvezde. Vendar pa je statistično neverjetno, da bi masa nevidnega telesa dosegala 13 Jupitrovih mas. V tem primeru bi bilo to telo na spodnji meji objektov, ki jim pravimo zvezde in ki energijo pridobivajo z jedrskim zlivanjem. Konkretno zvezdam z masami med približno 13 in 80 masami Jupitra pravimo rjave pritlikavke, ki vsaj nekaj časa v svojih sredicah spajajo devterij in vodik v ${}^3\text{He}$, masivnejše med njimi spajajo tudi litij.

Odkritje planeta je že pred objavo potrdila skupina G. Marcyja na Havajih, leta 2015 pa so opazili tudi rahel presežek v spektru svetlobe, kadar je planet skoraj za zvezdo in odbija proti nam nekaj njene svetlobe [11]. Tako so lahko ugotovili, da je smer proti Zemlji le 10_{-10}^{+19} stopinj od orbitalne ravnine planeta, in da je posledično njegova masa določena na $0,46_{-0,01}^{+0,06}$ mase Jupitra. Ker je od svoje zvezde oddaljen le 8 milijonov km, je vroč in zato nekoliko napihnjen, z dvojnimi Jupitrovimi polmeri. Leta 2015 je Mednarodna astronomska zveza planet poimenovala Dimidium, ki v latinščini pomeni polovica in je sklic na planetovo maso.

Predzgodovina

Kot je to pogosto, imajo pomembna odkritja svojo predzgodovino. Tako je že leta 1989 David Latham, ki je bil leta 1986 moj profesor na poletni šoli Vatikanskega observatorija, objavil odkritje, da ob zvezdi HD 114762 kroži telo, ki bi bilo po masi lahko rjava pritlikavka, torej zvezda, ali masivni planet [10]. Žal mu točnost meritve ni omogočala, da bi se odločil med obema možnostma. Čeprav se je kasneje izkazalo, da gre za planet, s prvenstvom in Nobelovo nagrado ni bilo nič.

Še pred tem je leta 1988 Fruchter s sodelavci objavil, da je ob pulzarju PSR 1957+20 spremljevalka z maso, ki dosega le nekaj odstotkov mase Sonca [7]. Kljub majhni masi, ki bi jo uvrščala med planete, so imeli spremljevalko za zvezdo, ki pa je v bližini hitro vrtečega se pulzarja izgubila že skoraj vso snov. Tako ta objekt razumemo tudi danes. Nato je leta 1991 Bailes s sodelavci objavil [2] odkritje planeta z desetkratno maso Zemlje, ki kroži okoli pulzarja PSR 1829-10. Naslednje leto sta sledila Wolszczan in

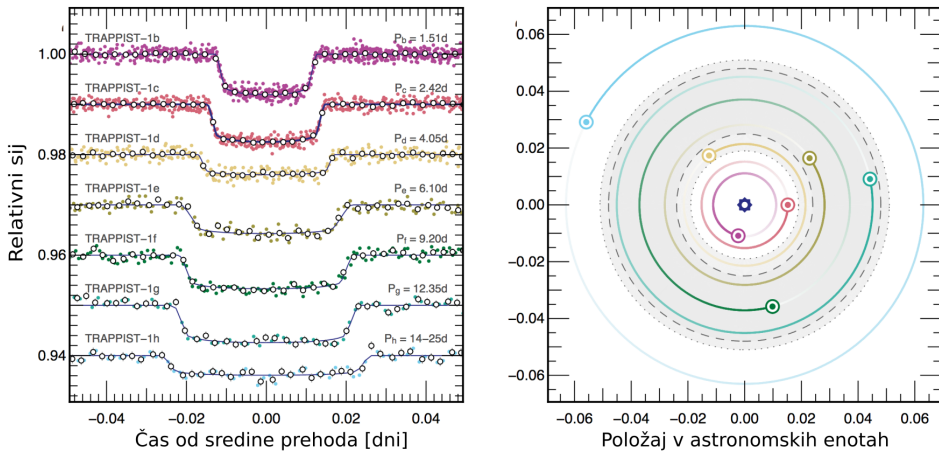
Frail in objavila [22] odkritje dveh planetov okoli pulzarja PSR 1257+12. Pulzarji so izjemno kompaktne nevtronske zvezde, ki imajo ob masi $\sim 1,4$ mase Sonca polmer le ~ 10 km. Ker se zelo hitro vrtijo in imajo močna magnetna polja, je radijska svetloba, ki jo sevajo v polju pospešeni elektroni, modulirana z rotacijsko periodo. Pulzar PSR 1257+12 se zavrti 160-krat v sekundi, Wolszczan in Frail pa sta opazila, da radijski pulzi včasih nekoliko zamujajo ali preHITEVAJO. Opaženo sta lahko razložila s prisotnostjo dveh planetov z masama 2,8 in 3,4 mase Zemlje.

Kljub temu da je obstoj teles planetnih mas v okolici teh nevtronskih zvezd nesporen, Nobelov odbor odkritij ni nagradil. Vzroka sta verjetno dva. Kot prvo so ta odkritja ostala relativno osamljena, saj danes poznamo le 16 planetov okoli pulzarjev, kar je malo v primerjavi z več kot 4000 planeti okoli Soncu podobnih zvezd, ki v svojih sredicah spajajo vodik v helij [25]. Kot drugo pa so ta telesa sicer planetnih mas, vendar z zelo drugačnim nastankom in razmerami, kot vladajo na planetih običajnih zvezd. Pulzarski planeti so verjetno nastali iz materiala, ki je ostal v okolici kljub divji eksploziji supernove, ki iz sredice masivne zvezde rodi nevtronsko zvezdo. Kako je to mogoče, ne vemo, kar pa ni nič presenetljivega, saj imamo pri takih eksplozijah opraviti s skrajno neravnovesnimi razmerami, izjemno močnimi magnetnimi polji in odsotnostjo preprostih simetrij. Tudi razmere na teh telesih so kaj nenavadne: menda bi zadostovalo okoli ekvatorja takega planeta speljati žico, pa bi se v njej inducirala dovolj visoka napetost, da ne bi bilo težav s proizvodnjo električne energije. Če vas seveda ne bi takoj scvrlo.

Nadaljnji razvoj odkrivanja planetov

Spektroskopu ELODIE so z znatnim prispevkom Queloz in Mayorja sledili še točnejši nasledniki, z imeni CORALIE in HARPS. Slednji dosega točnost 0,9 m/s, torej je valovno dolžino sposoben meriti na 9 decimalnih mest. To omogoča odkrivanje planetov po masi podobnih Zemlji (glej npr. [19]). Z meritvijo periodičnih nihanj radialne hitrosti zvezde so doslej odkrili skupaj 863 planetov okoli 640 zvezd [25]. V srečnih primerih je mogoče spektroskopsko tudi analizirati odbito zvezdno svetlobo [11] in po vpijanju zvezdine svetlobe v atmosferi planeta, ko je ta pred zvezdo, določiti tudi kemično sestavo atmosfere [20]. Pričakujemo, da se bo analiza atmosfer planetov v naslednjem desetletju močno razmahnila, saj bo leta 2024 v Čilu začel z opazovanji teleskop ELT Evropskega južnega observatorija, ki bo s primarnim zrcalom s premerom 39 m presegel skupno zbiralno moč vseh sedanjih teleskopov.

Leta 1999 se je opisanim metodam odkrivanja planetov drugih zvezd pridružila doslej najuspešnejša med njimi, saj smo z njo doslej zaznali kar 2969 planetov ob 2230 različnih zvezdah [25]. Če je smer proti Zemlji dovolj natančno poravnana z ravnino tira planeta, se planet po enkrat na orbitalni obhod za nekaj ur znajde med zvezdo in Zemljo in nam tedaj pokrije majhen del ploskvice zvezde. Zato je zvezda med prehodom planeta preko ploskvice videti malenkost temnejša. V osnovi je to klasična metoda, ki medsebojne periodične mrke uporablja za odkrivanje dvojnih zvezd, vendar jo je bilo za odkrivanje planetov težko uporabiti, saj ti lahko pokrijejo le majhen delež zvezdine svetlobe. Pri Jupitru, ki je desetkrat manjši od Sonca, bi taka zvezda potemnela za 1 %, če pa je v igri planet Zemljine velikosti, torej še desetkrat manjši, pade gostota svetlobnega toka le za 0,1 ‰. Tako točnost je z Zemljinega površja težko doseči, saj nas moti spremenljiva prosojnost Zemljine atmosfere. Odkrivanje prehodov planetov preko zvezdnih ploskvic se je zato polno razmahnilo šele s specializiranimi astronomskimi sateliti. Francoskemu COROT-u [1] je sledil izjemno uspešni Nasin satelit Kepler [5], ki ga je sedaj nasledil TESS [15], sredi prihodnjega desetletja pa upamo na misijo PLATO [14] Evropske vesoljske agencije.



Slika 4. Zvezda Trappist-1 ima 7 planetov. Levo je narisan sij zvezde, merjen s Spitzerjevimi vesoljskim teleskopom, ko se pred njo giblje označeni planet. Polne točke so posamezne meritve, prazne pa so povprečja preko časovnih oken. Vse krivulje razen zgornje so navpično zamaknjene. Desno so narisane tirnice planetov, astronomska enota je razdalja Zemlje od Sonca. Osenčen kolobar je območje temperatur, ki dopušča obstoj tekoče vode na planetovi površini. Povzeto po [8].

Prehod preko ploskvice nam omogoča meritev velikosti planetov. Če nam jo uspe združiti z meritvijo nihanja radialne hitrosti zvezde, ki nam da

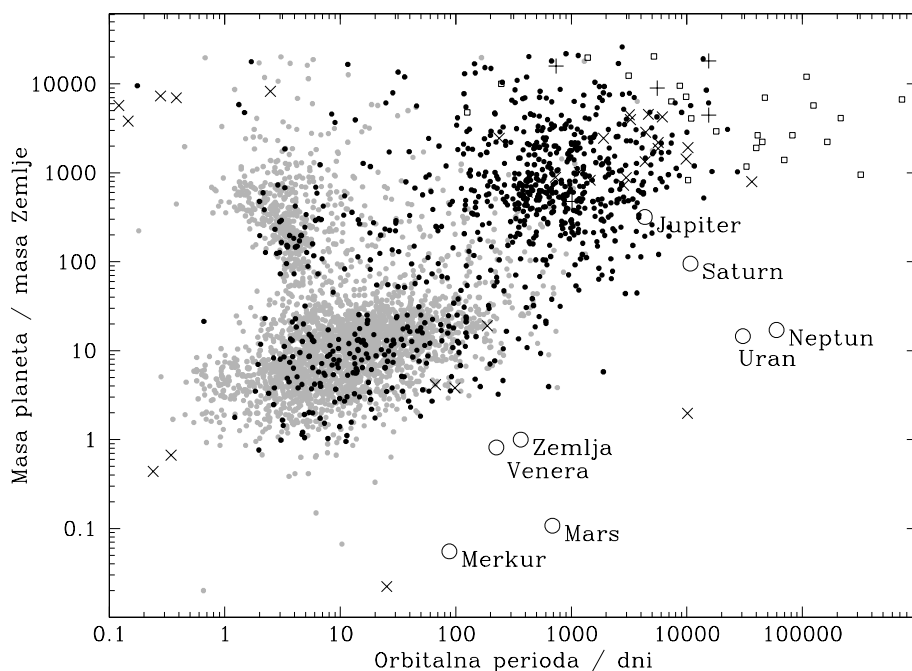
maso planeta, lahko izračunamo povprečno gostoto planeta. Tako prehodi preko ploskvice lepo pokažejo, da gre res za planetna telesa gostote vode ali malo več, nikakor pa ne za kaj bolj eksotičnega, recimo za črne luknje planetnih mas. Slednje bi imele pri masi Jupitra Schwarzschildov polmer enak le $2Gm_p/c^2 = 3$ m, kar je seveda odločno premalo za zaznavno zatemnitev zvezdine ploskvice. Se pa izjemoma zgodi, da se planet giblje natanko pred drugo zelo oddaljeno zvezdo (ne pred tisto, na katero je gravitacijsko vezan). V tem primeru zaradi gravitacijskega lečenja vidimo ojačitev svetlobe zvezde v ozadju.

Vse opisane metode imajo zmožnost odkrivanja zvezd z več planeti. Precej izjemen primer je zvezda Trappist-1, Sneguljčica obdana s sedmimi palčki na poravnanih tirih s planetnimi polmeri med 0,75 in 1,13 Zemljine velikosti [8]. Ker so si planeti tudi zelo blizu (slika 4), se med seboj dovolj gravitacijsko motijo, da so lahko izmerili, da so njihove mase med 0,4 in 1,4 Zemljine. Ker ima ta zvezda 2000-krat manjši izsev od Sončevega, so kljub bližini zvezde ravnovesne temperature znosne, med 170 in 400 K, torej bi bila na štirih od teh planetov na površju lahko tekoča voda. Zvezda Trappist-1 je z razdaljo 40 svetlobnih let relativno blizu Zemlji, torej le malo manj od desetkratne razdalje do najbližje zvezde za Soncem, Proxime Kentavra, ob kateri so tudi že odkrili planet.

Populacijska analiza

Trenutno poznamo 4133 planetov, torej so lastnosti celotnega vzorca bolj zanimive od posameznih primerov. Slika 5 kaže obhodne čase in ocene mas planetov. Označene so lastnosti poznanih planetov, ne pa vseh planetov v neki prostornini v vesolju. Tako je težko odkrivati planete z dolgimi obhodnimi časi, saj moramo variacije radialnih hitrosti opazovati vsaj eno orbitalno periodo, pri prehodih preko ploskvice pa moramo zabeležiti vsaj tri dogodke, da vemo, za kaj gre. Diagram je torej na desni močno nepopoln. Podobno je lažje opaziti masivni in s tem relativno veliki planet, na diagramu torej šele odkrivamo Zemljine dvojnike. Ko primerjamo položaj posameznih planetov s tistimi v našem Osončju, bi kdo lahko zmotno sklepal, da so vsi planeti s kratkimi periodami tako blizu svoji zvezdi, da je na njih izjemno vroče. To je pogosto res, vendar je veliko opazovanih zvezd po izsevu precej temnejših od Sonca, torej omogočajo obstoj tekoče vode na planetovem površju tudi za zelo bližnje planete. Lep primer je zgoraj omenjeni sistem sedmih planetov okoli zvezde Trappist-1.

Slika 5 je torej posledica naših še vedno skromnih zmožnosti odkrivanja planetov. Vendar je tudi vrh ledene gore, ki že gleda iz vode, precej presene-



Slika 5. Obhodni časi in mase planetov za objekte odkrite z metodo radialnih hitrosti (●, enačba (1)), prehodov preko zvezdne plovke (●), astrometrije (+, enačba (2)), meritve pulzarjev (×) in slikanja (□). Za radialne hitrosti je narisana spodnja meja mase, pri prehodih preko plovke pa je masa planeta ocenjena iz njegovega polmera po zvezi $M = R^2$, kjer sta obe količini v enotah Jupitra. Označeni so tudi položaji planetov našega Osončja.

tljiv. Vsekakor nihče ni pričakoval, da bomo odkrivali planete, ki obkrožijo svojo zvezdo v vsega nekaj dneh. Njihov nastanek razumemo kot kombinacijo dveh ali treh mehanizmov: prvi je nastanek *in situ*, pri čemer je moral biti protoplanetarni disk precej drugačen od tistega, ki je botroval našemu Osončju. Drugi je radialna migracija, ko resonančni mehanizmi med planeti povzročajo postopno izgubo vrtilne količine nekaterih planetov in s tem njihov premik bližje zvezdi. Zadnji je Kozai-Lidov mehanizem, ko planet na oddaljeni krožni orbiti povzroči, da drug planet v krožni, vendar nagnjeni orbiti postopoma preide na precej sploščeno, vendar manj nagnjeno tirnico. Taka sploščena tirnica je potem lahko nastavek za radialno migracijo. Relativni pomen teh treh mehanizmov je še nejasen [21].

Pomen resonanc med orbitalnimi periodami planetov opazimo tudi ne-

posredno. Tako za planete Jupitrovih mas vidimo presežek parov planetov, ki imajo orbitalne periode v razmerju 2 : 1 [21], medtem ko pri planetih z manjšimi masami takega presežka ni. Za planete, ki so po masi podobni Jupitru, lahko tudi trdimo, da so lastnosti njihovih zvezd podobne kot pri zvezdah brez planetov: če ima zvezda maso manjšo od 1,16 Sončeve, se vrtilni počasni, tako kot naše Sonce, in je njena vrtilna os približno poravnana z normalo na tirnico (Sončeva vrtilna os oklepa z normalo le kot 6°). Za zvezde z večjo maso je porazdelitev nagibov skoraj izotropna, take zvezde se tudi hitreje vrtijo [21]. Meja pri 1,16 Sončeve mase ustreza spremembi v strukturi zvezde: zvezde z manjšo maso imajo debele konvektivne ovojnice, kar omogoča nastanek močnih magnetnih polj, ki vplivajo tudi na protoplanetarni disk, medtem ko se v zvezdah z večjo maso v zunanjih plasteh energija lahko prenaša le s sevanjem. Tudi lastnosti planetnih tirov so odvisne od mase: pri planetih Jupitrovih mas opazimo tudi močno sploščene tiri. Vendar so zelo eliptični tiri še zlasti prisotni okoli zvezd, ki imajo v svojih atmosferah veliko kemičnih elementov težjih od helija. Vnaprejšnja meritev kovinskosti zvezd je torej pomembna za izbor tarč, ki jih opazujejo tekoči projekti, kot je TESS. Primeri rezultatov takih raziskav, ki smo jih opravili s spektroskopom HERMES v Avstraliji, so opisani v [17], [6] in [18].

Kot smo omenili, je verjetnost za odkritje planeta odvisna od njegovega položaja na sliki 5. Možnost za uspeh je najlažje ovrednotiti za planete, ki jih odkrivamo po spremenljivi radialni hitrosti zvezde, saj se hitrost take zvezde stalno spreminja in je načeloma merljiva, če le normala na orbitalno ravnino ne kaže skoraj natanko proti Zemlji, kar pa je malo verjetno. Ti preprosti geometrijski vplivi prinesejo ugotovitev, da z lahkoto odkrijemo vse planete v zgornjem levem kotu slike, medtem ko je naša uspešnost spodaj desno zanemarljivo majhna. Torej ni težko ugotoviti, kolikšen delež zvezd bi imel planete, če bi nam uspelo odkriti prav vse. Kot rezultat lahko povzamemo [12], da približno vsako deseto zvezdo podobno Soncu obkroža planet podoben Jupitru, ki ima obhodni čas krajši od nekaj let. Če pa se omejimo na planete z masami manjšimi od 30 Zemljinih mas in obhodnim časom krajšim od enega leta, jih najdemo okrog vsake druge zvezde podobne Soncu. Torej so planeti, ki so po velikosti podobni Zemlji, v vesolju res pogosti.

Sklep

Delo, ki sta ga z uvedbo novih metod in prvimi odkritji opravila nagrajenca, je jasno pokazalo, da so zvezde obdane s planeti pravilo in ne izjema. Ob doslej odkritih 4131 planetih okoli drugih zvezd je jasno, da ima večina zvezd

na nočnem nebu ob sebi vsaj še kakšen planet.

Ob tem imajo včasih prav tudi pisci znanstvene fantastike: poznamo vsaj 8 primerov, ko planet kroži okoli dvojne zvezde. Zanimivo je, da je njegova lokacija praviloma na komaj dovoljšnji razdalji, da je tak trojni sistem stabilen in posledično planet ne doživi bližnjega srečanja z eno od zvezd, kar bi se navadno končalo z izvrženjem planeta, ki ne bi bil več gravitacijsko vezan. Tak prosto leteči nekdanji planet bi bilo seveda težko odkriti, nekaj možnosti je le, če bi se planet za krajši čas natanko poravnal s smerjo proti oddaljeni zvezdi in bi potem svetlobo te oddaljene zvezde zaradi gravitacijskega lečenja planeta za nekaj ur videli ojačeno.

Z odkrivanjem planetov okoli drugih zvezd Zemlja postaja vedno bolj običajen svet. Vseeno pa je za nas edinstven, saj je do prvega primerljivega enostavno predaleč. Za primerjavo: če bi hoteli proti najbližji zvezdi za Soncem poslati vesoljsko plovilo, ki bi se z obiska vrnilo v 80 letih, bi moralo potovati tja in nazaj s približno desetino svetlobne hitrosti. Tudi če bi imeli idealen vesoljski pogon, ki bi deloval s 100-odstotnim izkoristkom, bi morali za po dve pospeševanji in zaviranji na poti do tja in nazaj za vsako tono naše vesoljske ladje porabiti toliko energije, kot je celotno človeštvo porabi v 2 dneh. Seveda ena tona za 80-letno potovanje ni dovolj. Misija Apollo 11, ki se je za 10 dni odpravila le do Lune, je ob startu z Zemlje tehtala 3039 ton. Torej ne bomo nikamor šli, preprosto nimamo energije za kaj takega.

Lahko sklenemo, da se moramo ob množici planetov in vedno boljšem razumevanju nastanka in razvoja vesolja tudi končno začeti zavedati, kako nujno se je treba takoj lotiti reševanja podnebne krize, ki jo povzročamo na naši in za nas edini Zemlji.

LITERATURA

- [1] A. Baglin, *COROT: A minisat for pionnier science, asteroseismology and planets finding*, *Advances Space Research* **31** (2003), 345–49.
- [2] M. Bailes, A. G. Lyne in S. L. Shemar, *A planet orbiting the neutron star PSR1829-10*, *Nature* **352** (1991), 311–13.
- [3] A. Baranne, M. Mayor in J. L. Poncet, *Coravel – A new tool for radial velocity measurements*, *Vistas in Astronomy* **23** (1979), 279–316.
- [4] A. Baranne, D. Queloz, M. Mayor, idr., *ELODIE: A spectrograph for accurate radial velocity measurements*, *Astronomy & Astrophysics Suppl.* **119** (1996), 373–390.
- [5] W. J. Borucki, idr., *Kepler Planet-Detection Mission: Introduction and First Results* *Science* **327** (2010), 977–80.
- [6] S. Buder, idr., *The GALAH Survey: second data release*, *Mon. Not. R. Astr. Soc.* **478** (2018), 4513–4552.
- [7] A. S. Fruchter, D. R. Stinebring in J. H. Taylor, *A millisecond pulsar in an eclipsing binary*, *Nature* **333** (1988), 237–39.

- [8] M. Gillon, idr., *Seven temperate terrestrial planets around the nearby ultracool dwarf star TRAPPIST-1*, arXiv:1703.01424; tudi Nature **542** (2017), 456–60.
- [9] S. Halverson, idr., *A comprehensive radial velocity error budget for next generation Doppler spectrometers*, Proc. of the SPIE **9908** (2016), id. 99086, str. 20.
- [10] D. Latham, idr., *The unseen companion of HD114762: a probable brown dwarf*, Nature, **339** (1989), 38–40.
- [11] J. H. C. Martins, idr., *Evidence for a spectroscopic direct detection of reflected light from 51 Pegasi b*, Astronomy & Astrophysics **576** (2015), A134, str. 9.
- [12] M. Mayor, idr., *The HARPS search for southern extra-solar planets XXXIV. Occurrence, mass distribution and orbital properties of super-Earths and Neptune-mass planets*, arXiv:1109.2497 (2011), str. 23.
- [13] M. Mayor in D. Queloz, *A Jupiter-mass companion to a solar-type star*, Nature **378** (1995), 355–359.
- [14] H. Rauer, idr., *The PLATO 2.0 mission*, Experimental Astronomy, **38** (2014), 249–330.
- [15] G. R. Ricker, idr., *Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS)*, J. Astr. Telescopes Instruments & Systems **1** (2015), id. 014003, str. 10.
- [16] S. Udry, idr., *The HARPS search for southern extra-solar planets. XI. Super-Earths (5 and 8 M_{\oplus}) in a 3-planet system*, Astronomy & Astrophysics **469** (2007), L43–47.
- [17] S. Sharma, idr., *The TESS-HERMES survey data release 1: high-resolution spectroscopy of the TESS southern continuous viewing zone*, Mon. Not. R. Astr. Soc. **473** (2018), 2004–2019.
- [18] S. Sharma, idr., *The K2-HERMES Survey: age and metallicity of the thick disc*, Mon. Not. R. Astr. Soc. **490** (2019), 5335–5352.
- [19] S. Udry, idr., *The HARPS search for southern extra-solar planets. XI. Super-Earths (5 and 8 M_{\oplus}) in a 3-planet system*, Astronomy & Astrophysics **469** (2007), L43–47.
- [20] A. Vidal-Madjar, idr., *Magnesium in the atmosphere of the planet HD 209458 b: observations of the thermosphere-exosphere transition region*, Astronomy & Astrophysics **560** (2013), A54, str. 15.
- [21] J. N. Winn in D. C. Fabrycky, *The Occurrence and Architecture of Exoplanetary Systems*, Annual Review Astr. Astrophys. **53** (2015), 409, str. 41.
- [22] A. Wolszczan in D. A. Frail, *A planetary system around the millisecond pulsar PSR1257 + 12*, Nature **355** (1992), 145–47.
- [23] J. T. Wright in J. D. Eastman, *Barycentric Corrections at 1 cm s⁻¹ for Precise Doppler Velocities*, Pub. Astr. Soc. Pacific **126** (2014), str. 838.
- [24] T. Zwitter, idr., *The GALAH survey: accurate radial velocities and library of observed stellar template spectra*, Mon. Not. R. Astr. Soc. **481** (2018), 645–654.
- [25] *Exoplanet Encyclopaedia*, dostopno na exoplanet.eu, ogled 26. 11. 2019.
- [26] *JPL Horizons System*, dostopno na ssd.jpl.nasa.gov/horizons.cgi, ogled 23. 11. 2019.