

Meie igapäevased eksoplaneedid

Laurits Leedjärv

Küllap sama kaua, kui inimesed on öötaevas säravaid tähti imetlenud, on mõeldud ka sellele, kas kuskil seal kaugustes võiks leiduda samasuguseid maailmu nagu meie oma. Aastasadu ja -tuhandeid jäid sellised arutlused pelgalt spekulatsioonideks. Alles kahekümnenda sajandi lõpp tõi kindla teadmise, et eksoplaneedid ehk planeedid teiste tähtede juures on tõesti olemas ja Päike pole ainuke planeedisüsteemiga täht. Selle avastuse eest pälvisid Šveitsi astronoomid Michel Mayor ja Didier Queloz 2019. aastal teadlaste ihaldatuima tunnustuse – Nobeli füüsikaauhinna. Nüüd, kui eksoplaneetide otsimine, leidmine ja uurimine on saanud astronoomide igapäevaseks rutiiniks, tasub teha väike vahekokkuvõte. Neli aastat tagasi avaldasin siinsamas Tähetorni Kalendri veergudel ettevaatlikku lootust, et eksoplaneedid saavad ka Eesti astronoomidele oluliseks uurimisteemaks. Enam-vähem nii ongi läinud. 2023. aastal algas meil kolmeaastane projekt EXOHOST, mida artikli lõpus ka lühidalt tutvustame, ning käivad ettevalmistused kosmoseteleskoobi Ariel lennuks. Asjade asetamiseks laiemasse ajaloolisse ja kultuurilisse konteksti tasub kõigepealt siiski meelde tuletada mõned faktid ja mõtted teiste maailmade otsimise pikast ajaloost.

Vanadest kreeklastest Poola agentideni

Me ei tea, mida täpselt mõtlesid taevasse vaadates ürginimesed, aga üsna kindlalt on mõtteid maailmade paljususest avaldatud vähemalt 2400 aastat tagasi. Seda tegi näiteks Vana-Kreeka õpetlane Demokritos (u 460–370 eKr), seesama, kes on tuntud kui atomistika esiisa – kõik asjad koosnevad jagamatutest aatomitest. Eriti ilmekalt väljendas paljude maailmade ideed Demokritose õpilane Metrodorus Chioselt (kelle eluaastate kohta annavad teatmeteosed vaid 4. sajandi eKr): üksik viljapea keset suurt põldu oleks sama kummaline kui üksik maailm lõpmatus ruumis. Loomulikult ei olnud tollal võimalust neid mõtteid teaduslikult tõestada. Vana-Kreeka pärandis jäi ikkagi valitsema Platoni ja Aristotelese ettekujutus ainast Maast kui maailma keskpunktist. Alles umbes tuhat aastat hiljem kerkis idee maailmade paljususest esile keskaja Euroopa õpetlaste Nicole Oresme'i (Oresmi Nicolaus) (u 1320–1382) ja Nicolaus Cusanuse (Kuesi Nikolai) (1401–1464) töödes. Kuulsal Itaalia õpetlasel Giordano Brunol (1548–1600) läks aga hoopis kehvasti: ta põletati tuleriidal ja selle üheks põhjuseks arvatakse olevat tema kosmoloogia, mille kohaselt võib leiduda lõpmata palju teisi päikeseid ja maailmasid, mida võivad asustada meile tuntud loomad ja meietaolised inimesed. Suur geenius Isaac Newton (1643–1727), kes avastas, et planeetide liikumist ümber Päikese juhivad gravitatsioon, arvas, et samamoodi võivad taevakehad tiirelda ka teiste kinnistähtede juures.

Tõsisem teiste maailmade otsimine algas 19. sajandil, kui teleskoopide mikromeetriline täpsus näis seda juba lubavat. Tähtede parallaksi mõõtmisega said

kuulsaks nii Friedrich Georg Wilhelm Struve (1793–1864) tollases Dorpatis kui Friedrich Wilhelm Bessel (1784–1846) Königsbergis. Üliväikeste nurkade täppismõõtmine võimaldaks kindlaks teha ka tähe asukoha väikesi muutusi taevavõlvil, mille võib põhjustada tähe ümber tiirlev nähtamatu (ja seega ilmselt väike ja tume) keha. Üheks astronoomide lemmikuks sel alal sai suhteliselt lähedal (16,7 valgusaastat) asuv kaksiktäht 70 Ophiuchi Maokandja tähtkujus. Sir William Herschel leidis juba 1779. aastal, et tegu on visuaalse kaksiktähaga.

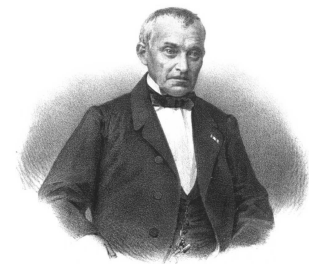


Foto 1. Johann Heinrich Mädler, Tartu Tähetorni direktor aastatel 1840–1865, oli üks esimesi eksoplaneetide otsijaid.

Kui Struve sai 1824. aasta lõpul enda käsutusse tollase maailma parima teleskoobi, Fraunhoferi refraktori, hakkas temagi mõõtma selle kaksiktähe komponentide asukohti, et arvutada orbiidi parameetreid. Sama tegid Struve sõber Bessel ja mitmed teised astronoomid. Üheks oluliseks vaatluste kokkukogujaks ja analüüsijaks sai Johann Heinrich von Mädler (1794–1874), kes Struve ametijärglasena juhatas Tartu tähetorni aastatel 1840–1865. Esimene Mädleri artikkel 70 Oph positsiooni kohta ilmus ajakirjas *Astronomische Nachrichten* 1836. aastal (Mädler, 1836). Nii Struve, Besseli kui Mädleri enda täiendavad vaatlused lubasid 1842. aastal samas ajakirjas ilmunud uues artiklis väita, et see kaksiksüsteem ei käitu täpselt Newtoni seaduste järgi (Mädler, 1842). Üks võimalik põhjus kõrvalekalleteks oleks kolmas, nähtamatu keha.

Kas peaks nüüd hakkama astronoomia ajalugu ümber kirjutama, et anda Tartu tähetornile ka esimese eksoplaneedi leidmise au? Siiski ei ole planeedi olemasolu 70 Oph juures tänapäevani kindlaks tehtud. See täht näib astronoomide narritavat ja eksiteele meelitavat ning on põhjustanud isiklikke tragöödiaidki. Lõunapoolsemates maades on Maokandja paremini nähtav. 1855. aastal avaldas India Madrase observatooriumis töötav Inglise astronoom William Stephen Jacob (1813–1862) artikli (Jacob, 1855), milles peab „ülimalt tõenäoliseks“, et mingi nähtamatu planetaarne keha tekitab süstemaatilisi kõrvalekaldeid kaksiktähe komponentide korrapärasest liikumisest. Keegi seda siiski hiljem ei kinnitanud. 1890-ndatel võttis USA Mereobservatooriumi astronoom Thomas Jefferson Jackson See (1866–1962) 70 Oph uuesti ette – ja rikkus sellega oma karjääri. See väitis üsna kindlas kõneviisis, et 70 Oph süsteemis leidub kolmas massiivne taevakeha, mis tiirleb kaksiktähe ümber 36-aastase perioodiga (See, 1895; 1897). Tema kaasmaalane Forest Ray Moulton (1872–1952) aga avaldas peagi vastulause (Moulton, 1899), milles tõestas, et selline kolmiksüsteem oleks ebastabiilne ega saaks eksisteerida. See ei võtnud kriitikat omaks ja saatis ajakirja toimetusele võrdlemisi ebaviisaka kirja, mis kärbitud kujul ka avaldati. Nii jäi See eluks ajaks ilma võimalusest oma artikleid *Astronomical Journal*-is avaldada. Boikotiga liitusid ka teised ajakirjad. See arrogants ja upsakus rikkusid tema suhted teiste astronoomidega. Tema enda arvates uudseid ja ekstravagantseid teooriaid ei võetud omaks. See olevat kritiseerinud isegi Einsteini ja tema relatiivsusteooriat, kuid suur geenius ei lasknud end sellest häirida. See jäi elu lõpuni üksikuks hundiks ning astronoomia arengusse enam ei panustanud.

Ka mitmed teised tähed on oma mikroskoopiliste asukoha muutustega taevavõlvil ahvatlenud astronoomide eksoplaneete otsima. Olgu ühe näitena mainitud 61 Cygni Luige tähtkujus, samuti oranžide tähtede paar nagu 70 Oph. See oli täht,

mille parallaksi ja sedakaudu kauguse määras Königsbergis Bessel 1830-ndatel, samal ajal, kui Struve mõõtis Tartus Veega parallaksi. Positsiooni võbelemisest oletas planeedi tiirlemist 61 Cyg juures Johannes Wilsing (1856–1943) Potsdamis (Wilsing, 1897). Paraku ei ole see oletus tänapäevani kinnitust leidnud, nagu ka Pulkovo astronoomide 1977. aastal välja pakutud kolm planeeti 61 Cyg süsteemis (Deich, Orlova, 1977). Selliseid valekandidaate leidub veelgi, aga on üks nimi, mida ei tohiks mainimata jätta ükski eksoplaneetide otsimise ajaloost kirjutav lugu.

Piet van de Kamp (1901–1995) sündis Hollandis, õppis Utrechti ja Groningeni, kuid 1923. aastal siirdus Ameerika Ühendriikidesse, kuhu jäi kogu oma töiseks eluks ja kus tema eesnimeks sai Peter. Oma elutöö tegi ta Pennsylvania Swarthmore'i kolledži Sprouli observatooriumis, olles 35 aastat (1937–1972) selle direktor. Selle observatooriumi 24-tollise refraktoriga tegi ta järjekindlalt astromeetrilisi vaatlusi. Üheks eriliseks huviobjektiks oli Barnardi täht – Päikese lähedal (6 valgusaastat) asuv punane täht, mille erakordselt suure omaliikumise avastas 1916. aastal Ameerika astronoom Edward Emerson Barnard (1857–1923). Van de Kamp aga avastas tähe asukoha väikese võbelemise, mille süüdlaseks pidas tähe ümber tiirlevat Jupiteri-taolist planeeti. Esimese teate selle kohta avaldas ta 1963. aastal (van de Kamp, 1963), hiljem järgnes veel mitmeid artikleid. Paraku ei leidnud teised astronoomid samasugust võbelemist. Tekkis kahtlus, et tegemist on mingi salakavala mõõtmisveaga või metodoloogilise probleemiga. Spekuleeriti, et anomaaliad tekivad iga kord pärast seda, kui teleskoobi objektiiviläätse oli puhastatud (selleks tuli lääts teleskoobist välja võtta ja jälle tagasi panna). Kui analoogilisi võbelemisi hakati leidma ka teistel sama teleskoobiga pildistatud fotoplaatidel, läks van de Kampil väga raskeks tõestada, et Barnardi tähe ümber tiirleb planeet. Aga ta ei andnud alla. Kolleegidega tülli minemise hinnaga jäi ta elu lõpuni kindlaks, et on avastanud eksoplaneedi. 2018. aastal näis, et van de Kamp sai postuumselt rehabiliteeritud. Barnardi tähe juures leiti planeet, aga hoopis väiksema massiga, kui van de Kampi mõõtmistäpsus oleks lubanud leida. Mõne aasta pärast seati seegi tulemus kahtluse alla. Barnardi tähe planeet on küll praegu eksoplaneetide kataloogis, kuid märkusega „vastuoluline“. Peter van de Kamp aga suri 1995. aastal mõni kuu enne seda, kui anti teada esimesest kindlast eksoplaneedist 51 Pegasi juures.

Esimesed kindlad tõendid eksoplaneetidest saadi siiski mõned aastad varem ja hoopis üllatavast kohast – pulsari ehk kiiresti pöörleva neutrontähe juurest. Pulsari pöörlemine on äärmiselt täpne kellavärk. Kui pulsari ümber peaks tiirlema mingi väiksem keha, tekitab selle gravitatsioon pulsari signaalide Maale jõudmise ajas väikesi kõrvalekaldeid. Ja maapealsed raadioteleskoobid on võimelised neid nihkeid mõõtma. 1991. aastal teatasidki Jodrell Banki raadioastronoomid Andrew Lyne, Matthew Bailes ja Setnam Shemar, et on avastanud planeedi pulsari PSR 1829-10 juures (Bailes jt, 1991). Artikkel ilmus väarikas ajakirjas *Nature*, aga teadlased otsustasid oma tulemust veelkord kontrollida ... ja leidsid, et Maa liikumist ümber Päikese polnud õigesti arvestatud ning ümberarvutus enam planeeti ei näidanud. Vea aus ülestunnistus Ameerika Astronoomiaühingu aastakoosolekul pälvis marulise aplausi. Päril avastus oli siiski ukse ees. 1992. aastal teatasid Aleksander Wolszczan ja Dale Frail kahest planeedist pulsari PSR 1257+12 juures (Wolszczan, Frail, 1992). See avastus on vett pidanud. Kaks aastat hiljem leiti sama pulsari juurest veel kolmaski planeet, mis on seni teadaolevalt väikseima massiga eksoplaneet – vaid 0,02 Maa massi. Ka selle pulsariga on seotud üks aus ülestunnistus. Poola päritolu Aleksander Wolszczan on kinnitanud ajakirjanike leitud fak-

ti, et ta oli aastatel 1973–1988 Poola julgeolekuteenistuse Szuzba Bezpieczeństwa informaaator. Wolszczan on öelnud, et ta andis edasi vaid ebaolulist informatsiooni ega teinud kellelegi kahju. Siiski loobus ta pärast nende asjaolude ilmsiks tulekut professori kohast Koperniku nimelises Toruńi ülikoolis ja töötas edasi vaid USA Pennsylvania osariigi ülikoolis.

Kui silm ei seleta

Pulsarite planeedid on siiski jäänud nišitooteks, vaid viis-kuus neid teada ongi. Olekski raske ette kujutada planeeti, mis elaks üle pulsari tekkimiseks vajaliku supernoova plahvatuse. Ilmselt on need üksikud eksootilised planeedid tekkinud alles pärast plahvatust, kui teatud füüsikaliste tingimuste kokkulangemisel on neutrontähe ümber jäänud gaasi-tolmuketas, mis sarnaneb planeeditekke ketastega tavaliste tähtede ümber. „Päris“ eksoplaneedid on ikka need, mille avastamise lugu algas 1995. aastal – ja mida keegi näinud pole. Tõsi, umbes 70 planeedist on siiski mingi foto saadud. Enamik umbes 5500 teadaolevast eksoplaneedist (2023. aasta sügisel) on aga tuvastatud kaudsete meetoditega, mida nüüd lühidalt tutvustame.

Dünaamiline ehk radiaalkiiruste meetod. Kujutame ette, et seisame maantee ääres ja läheneb üksik auto. Selle mootori undamine teeb meist möödu-des läbi omamoodi metamorfoosi. Läheneva auto heli on kõrgem ehk suurema sagedusega, eemalduva oma madalam ehk väiksema sagedusega. See on füüsikas hästi tuntud Doppleri efekt, mis toimib igasuguste lainete puhul, mille allikas liigub. Tähed on valguse ehk elektromagnetlainete allikad ja nende liikumisi on astronoomid Doppleri efekti abil ammust ajast uurinud. Tänu sellele teame, et paljud tähed on tegelikult kaksitähed, mille radiaalkiirus (ehk vaatleja suunaline kiiruse komponent) perioodiliselt muutub.



Foto 2. Nobeli füüsikaauhinna 2019 laureaadiid Michel Mayor ja Didier Queloz Nobel Media kunstniku Niklas Elmehedi pilgu läbi.

Tänu Doppleri efektile teame, et Universum paisub – kõik galaktikad eemalduvad meist, nende spektrites esineb punanihe. Planeedid ise valgust ei kiirga, aga nende tekitatud Doppleri efekti võib näha, kui nad panevad oma ematähe liikuma. Tähe spektrijooned hakkavad siis perioodiliselt edasi-tagasi nihkuma. Just sellise võnkumise, perioodiga 4,2 päeva, leidsid päikesetaolise tähe 51 Pegasi spektris tulevased Nobeli laureaadiid Mayor ja Queloz (Mayor, Queloz, 1995). On mõistetav, et mida raskem planeet ja mida lähemal ematähele, seda rohkem ta tähte liigutada suudab. See esimene ja paljud järgmisena leitud eksoplaneedid olid nn kuumad Jupiterid – Jupiteri-taoline planeet teeb tiiru oma tähe ümber vaid mõne päevaga. Nüüdseks on ematähe kõigutamise järgi leitud veidi üle tuhande eksoplaneedi.

Fotomeetiline ehk varjutuste meetod. Astronoomiahuvilised võivad mäletada 9. maid 2016, kui Merkuuri tume vari liikus üle päikeseketta. Aastatel 2004 ja 2012 juhtus sama Veenusega. Kas hüpoteetilised mõistusega olendid mõne teise lähedase tähe juures võinuks neid sündmusi näha? Jah, kui nende tehnoloogiline tase on vähemalt samasugune nagu 21. sajandi alguse Maa elanikel. Tähekettast üle minev planeet nõrgendab tähe valgust enamasti vähem kui ühe protsendi võrra ning seda

me oskame mõõta. Tõsi, maapealseid vaatlusi segab Maa atmosfäär, sellest läbi tulnud valguse mõõtmisel on raske nii suurt täpsust saavutada. Sellepärast on parem viia teleskoop kosmosesse. Esimene pääsuke sel alal oli Prantsuse kosmosekeskuse (CNES) ja Euroopa Kosmoseagentuuri (ESA) koostöös 2006. aastal orbiidile saadetud CoRoT, mis leidis veidi üle 30 eksoplaneedi. Tõeliselt suure saagi andis aga NASA kosmoseteleskoop Kepler, mis oma põhitöö aastatel 2009–2013 ja 2018. aastani kestnud jätkumissioonil K2 on leidnud tänaseks 3326 kinnitatud eksoplaneeti. Ligi 3000 kandidaati ootavad veel kinnitamist. Nimelt tuleb kõigi tähevarjutuste kohta saada maapealsete spektroskoopiliste ja muude võimalike vaatlustega kinnitust, et varjutuse tekitas tõepoolest planeet, mitte näiteks kaksiktähe teine komponent või mingi juhuslik nähtus. Kepleri vaatluste järelkontrolli käigus avaldati aastatel 2014 ja 2016 korrana andmed sadade kinnitatud eksoplaneetide kohta, sellest tulenevad suured hüpped teadaolevate eksoplaneetide arvus (joonis 1). Ja muidugi tasub Kepleri puhul ikka jälle korrata, et selle teleskoobis kasutatakse Naissaarelt pärit Bernhard Voldemar Schmidt (1879–1935) leiutatud laia vaateväljaga optilist süsteemi. Kepleriga analoogilisi vaatlusi teeb praegu 2018. aastal orbiidile saadetud NASA teleskoop TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite), mille saagiks on loo kirjutamise ajaks 402 kinnitatud planeeti, umbes 6900 planeedi kandidaati ja umbes 4600 kandidaadi kandidaati. Kokku on tänaseks varjutuste meetodil leitud üle 4100 kinnitatud eksoplaneedi ehk umbes kolmveerand teadaolevatest.

Gravitatsioonilise mikroläätse meetod. Einsteini üldrelatiivsusteooria ennustab valguse kõrvalekaldumist tugevas gravitatsiooniväljas. Selle tulemusena võib meie suhteliselt lähedal asuv taevakeha võimendada mõne kaugema taevakeha valgust – kui need juhtuvad enam-vähem ühel joonel paistvat. Kaugete galaktikate ja kvasarite puhul on sellist gravitatsiooniläätse efekti vaadeldud juba aastakümneid. Piisava mõõtmistäpsuse saavutamisel ja taeva pideval jälgimisel on võimalik tabada ka tähtede tekitatud mikroläätse efekti. Sellega on umbes 30 aastat tegele- nud suured projektid OGLE ja MACHO. Läätsest toimiv lähedane täht võimendab kaugelt objekti valgust päevadeks, nädalateks, kuudeks või aastateks, tekitades selle heleduskõverale väljaulatuva kükuru. Kui nüüd selle lähedase tähe ümber juhtub tiirlema üks või mitu planeeti, tekitab see omakorda suurele kükurule väikese sälgu. Nende sälkude järgi on praeguseks leitud umbes 200 eksoplaneeti. Mikroläätse meetod on väga töö- ja andmemahukas, iga mikroläätse sündmuse kohta leidub tuhandeid tähti, mille heledus muutub muudel põhjustel. Iga sündmus jääb ühekordseks juhtumiks, tagantjärele ei saa enam midagi kontrollida. Sellest hoolimata on tegemist perspektiivika meetodiga. Näiteks on see praegu ainuke viis leida ilma ematäheta üksi hulkuvaid eksoplaneete, mida mõnedel hinnangutel on Linnutee galaktikas vähemalt sama palju või rohkemgi kui tähtede ümber tiirlevaid planeete.

Veel meetoditest. Nii radiaalkiiruste kui tähevarjutuste meetodiga leitakse kerge- mini tähele lähemal asuvaid suurema massiga (või raadiusega) planeete. Suur osa teadaolevatest eksoplaneetidest asub oma ematähle nii lähedal, et nad on loode- liselt lukustatud – kogu aeg sama küljega tähe poole nagu on meie Kuu Maa poole. Mikroläätse meetodil seda piirangut pole. Otsekujutised – kui õnnestub tähe valgus nullida – aitavad leida just tähest kaugel asuvaid planeete. Nimetatud neli meetodit ongi andnud lõviosa praeguseks teadaolevatest eksoplaneetidest. Muud meetodid, mille hulgas on enamasti kõikvõimalike ajaliste kõrvalekaldumiste otsimine, on ai- danud avastada vaid üksikuid või parimal juhul kümneid planeete, kuid on olulised

varjutuste meetodil leitud planeedikandidaatide kinnitamiseks mitme planeediga süsteemides. Marginaalne on seni olnud ka astromeetriline meetod, mida harrastasid mitmed eespool mainitud 19. sajandi astronoomid. Maine mõõtmistäpsus ei ole ikka veel küündinud päris selleni, et lihtsalt tähe asukoha muutustest taevavõlvil teha kindlaks tähte võbelema pannud planeedi olemasolu. Aga siin on suured lootused ESA kosmoseteleskoobil Gaia. Gaia nurkade mõõtmise täpsus on 24 mikrokaaresekundit. Seda saab iseloomustada nii, et mõõdame inimese juuksekarva läbimõõtu (mis on umbes 100 mikromeetrit) 1000 kilomeetri kauguselt. Lisaks astromeetrilisele meetodile registreerib Gaia ka planeetide tekitatud tähevarjutusi. Seni on Gaia vaatlusandmetest kinnitatud vaid kuus eksoplaneeti, aga pärast Gaia töö lõppu (mis peaks olema aastal 2025) avaldatavast andmekogumist oodatakse palju – kuni 21 000 eksoplaneeti.

Tuli, vesi, jää, ...

Meie Päikesesüsteemis on igal planeedil oma nägu ja iseloomulikud tunnused. Loomulikult ei ole ka 5500 teadaolevat eksoplaneeti ühesugused, nende omaduste varieeruvus on kokkuvõttes palju suurem kui meie planeedisüsteemis. Planeedi kõige olulisemad karakteristikud on mass ja raadius. Kaugus ematahest – teaduslikus keeles orbiidi pikem pooltelg – määrab aja, millega planeet teeb tiiru ümber tähe – see on orbitaalne periood. Erisugused on ka planeetide keemilised koostised. Neid suurusi ja omadusi võrreldes ja kombineerides saame eksoplaneetid üsna mitmel viisil tüüpidesse jagada. Üks võimalus on selline, mida näitab joonis 2 (värvitahvlil lk 94). Nagu näha, leidub planeete, millel kulub tiiruks ümber ematahe vaid 1–3 maist ööpäeva või vähemgi. On arusaadav, et tähele nii lähedal asuval planeedil valitseb põrgukuumus. Kõige kuumemad väikese massiga planeetid ongi laavaplaneetid ehk laavamaailmad, mille pind on kaetud umbes 1000-kraadise vedela laavaga. Lisaks tähe kuumusele soodustab laava väljavoolu aktiivne vulkaaniline tegevus, mille põhjuseks on lähedase ematahe tekitatud võimsad loodejõud. Tuntuimad laavaplaneedi kandidaadid on CoRoT-7 b, Kepler-10 b, Kepler-78 b, 55 Cancri e (Chao jt, 2021). Ilmselt ei ole need maailmad, kust otsida elu.

Ematahest kaugemal annab kuumus järele ja planeetid omandavad meile harjumuspärasema ilme. Kepleri teleskoobiga leitud kiviseid planeete on graafikul laavamaailmadest paremal õige palju. Paljud neist on umbes Maa suurusel, paljud suuremad. Enamasti on nad siiski ematahele lähemal kui Maa Päikesele, kuid planeedi pinnatemperatuur sõltub tugevasti ka ematahe pinnatemperatuurist. Suurem osa ematahti on Päikesest väiksema massiga ja jahedamad ja nii peab planeet Maa-taolise temperatuuri saavutamiseks olemagi tähele lähemal. Väga suur osa teadaolevatest eksoplaneetidest on oma suuruselt ja massilt Maa ja Neptuuni vahepealsed. Neid nimetatakse super-Maadeks või üli-Maadeks. Päikesesüsteemis selliseid ei leidu. Meie Maa võib olla üsna haruldane oma ookeanide ja maismaa vahekorra poolest. Mõned mudelarvutused näitavad, et selliseid planeete (70 protsenti vett ja 30 protsenti kuiva maad) võib olla vaid üks protsent kiviste planeetide koguhulgast (Höning jt, 2019; Höning, Spohn, 2023). Enamasti (80 protsenti) jäävad planeetid täiesti kuivaks või on üleni veega kaetud (19 protsenti).

Pilt on vesine ka siis, kui liigume joonisel 2 Maa-taolistest kiviplaneetidest suuremate ja raskemate poole. Neptuuni mõõtu planeetide hulgas võib leiduda vee- ja jäämaailma ja jäähiidusid. Vee- või jääkiht võib olla kümnete kilomeetrite paksune. Võimalikud on jääalused ookeanid ja struktuur, kus vedel vesi on kahe jääkihi va-

hel. Väga kõrgel rõhul võib tekkida eksootiline jää vorm, mida inglise keeles kutsutakse *ice V*, eesti keeles võiks see siis olla „jää 5“. Selle tihedus on vee omast suurem, $1,24 \text{ g/cm}^3$. Muidu on ju teada, et vesi on väga eriline aine selle poolest, et tema tahke faasi tihedus on väiksem kui vedelal – jää jääb veekogu pinnale ega vaju põhja – ja tänu sellele on vesi elu jaoks ainuke(?) väga sobiv lahusti. Vesi on eluks hädavajalik, aga väga palju vett ei pruugi mitmekesisest elu soodustada. Astrobioloogid peavad veemaailmadel siiski silma peal, nagu ka Päikesesüsteemi jäistel kuu- del Euroopal ja Titanil. Teiste tähtede veemaailmad jäävad meie automaatjaamadele muidugi kättesaamatuks, piirduda tuleb kaugvaatlustest saadava napi infoga ja teoorial rajanevate mudelarvutustega.

Kaudseks jäävad kõik tõendid ka joonisel 2 kõige kõrgemal asuvate hiidplaneetide kohta. Esimesi tähe radiaalkiiruste muutuste järgi leitud planeete hakati nimetama kuumadeks Jupiterideks, sest nende mass ja tihedus meenutab meie suurima planeedi omadusi, lähedus ematähele aga tähendab väga kõrget temperatuuri. Kuumad ja ka külmamad gaasihiiud koosnevad peamiselt vesinikust ja heeliumist, meenutades sellega rohkem tähtede keemilist koostist. Tegelikult ju polegi mingit paksu seina planeetide ja tähtede vahel. Tavaliselt loetakse planeedi massi ülempiiriks 13 Jupiteri massi ja tähe massi alampiiriks 0,08 Päikese massi ehk umbes 80 Jupiteri massi. Vahepealse massiga taevakehad on pruunid kääbused, kus ei toimu tähtedele iseloomulikke termotuumareaktsioone, kuid deuteeriumi tuuma liitumised prootoniga on siiski võimalikud, nende tulemusena tekib heeliumi isotoop ^3He . Pole välistatud, et ka pruunide kääbuste ümber tiirlevad planeetid, aga nende avastamine on oluliselt keerulisem kui tähtede juurest, sest pruunid kääbused isegi annavad endast märku vaid nõrga infrapunakiirgusega. Planeetide omadused sõltuvad märkimisväärselt oma ematähest ja loo lõpuosas pöörame natuke tähelepanu ka tähtedele.

Ariel ja EXOHOST

Täht 51 Pegasi, mille juurest Mayor ja Queloz esimese eksoplaneedi leidsid, on meie Päikesega üsna sarnane, spektriklassist G2. Ta on siiski natuke vanem (6,1 miljardit aastat) ja evolutsioonis kaugemale jõudnud – heledusklass IV ehk allhiid (Päike on III heledusklassi peajada täht). Päikesest veidi suurem on ka 51 Peg mass, raadius, heledus ja metallisaldus. Viimane suurus tähendab astronoomide kõnepruugis kõigi vesinikust ja heeliumist raskemate elementide summaarset sisaldust, ka näiteks süsinik, lämmastik ja hapnik on selles kontekstis metallid. Just metallid on need, mida on planeetide „ehitamiseks“ vaja. Üsna loomulik näib esimeste eksoplaneetide järgi leitud seos, et hiidplaneete omavad tähed on metallirikkamad kui tavalised tähed keskmiselt. Väiksema massiga planeetide ematähtede metallisus varieerub suuremates piirides, Maa-taolisi planeete ja super-Maasid võib leida ka Päikesest metallivaesemate tähtede juures. Üks äärmuslikumaid näiteid on K2-111, milles on Päikesest umbes 3 korda vähem metalle, mille vanus on vähemalt 10 miljardit aastat ja mille ümber tiirleb 8,6-kordse Maa massiga planeet (Fridlund jt, 2017).

Metallisaldus on vaid üks näide planeetide ja tähtede omavahel põimuvatest omadustest. Võib-olla põnevamgi on küsimus kas ja millise keemilise koostisega atmosfääre võib eksoplaneetidel leida. See viib meid jälle sammukese lähemale kõiki erutavale küsimusele elu võimalikkusest. Kui atmosfääri olemasolu ja pakuse kohta võib esialgse hinnangu saada tähe heleduskõverast planeedi ülemine-

kul, siis keemilise koostise määramine on palju keerukam. On vaja lainepikkuste skaalas hästi välja venitatud ehk suure spektraalse lahutusega spektreid – siis, kui planeet on tähe ees ja siis, kui on tähe taga. Kui nüüd teine esimesest lahutada, peaksime saama planeedi spektri. Tegelikult on selline signaal äärmiselt nõrk, korraliku tulemuse saamiseks on vaja väga suurt teleskoopi ja hästi läbi mõeldud meetodikat. James Webbi kosmoseteleskoobi esimesed vaatlused on näidanud, et eksoplaneedi atmosfääri keemilist koostist on võimalik leida (vt ka Kalju Annuki artiklit käesolevas kalendris). Näiteks ühes hiljutises artiklis on Madhusudhan jt (2023) leidnud, et süsinikdioksiidi ja metaani olemasolu ning ammoniaagi puudumine planeedi K2-18 b atmosfääris osutavad ookeaniga kaetud pinnale, mille kohal hõljub vesinikust koosnev atmosfäär.

Kui Webbi teleskoobi jaoks on eksoplaneetide atmosfäärid vaid üks paljudest tööülesannetest, siis ESA plaanib 2029. aastal orbiidile saata spetsiaalselt atmosfääride vaatlemisele pühendatud infrapunateleskoobi Ariel. Olgu selle nime taga siis kas juudi usundi ingel, vaim Shakespeare'i näidendist „Torm“ või Uraani kuu, aga ESA on tuletanud selle lühendina sõnadest *Atmospheric Remote-sensing Infrared Exoplanet Large-survey* ehk suur eksoplaneetide atmosfääride infrapunauuring. Ariel ei hakka otsima uusi eksoplaneete, vaid selle vaatlusprogrammi valitakse välja umbes 1000 teadaolevat planeetidega tähte, mida teleskoop põhjalikult seirama hakkab. Ja nüüd tuleb see, millest idee käesolevaks artiklikuks üldse tärkas – Ariel on esimene ESA teadusmissioon, milles Eesti liikmesriigina ametlikult osaleb. Heade tulemuste saamiseks on vaja vaatlusprogramm korralikult ette valmistada ning selleks on loodud konsortsium, mille liikmeks on mitmed meie astronoomid eesotsas tähefüüsika osakonna juhataja Anna Aretiga. Osaletakse ematähtede iseloomustamise, planeeditekke ja efemeriidide töörühmas. Viimane tähendab seda, et uuritavate tähtede planeetidega varjutamise ajad peavad olema väga täpselt teada, need tuleb enne maapealsete vaatlustega määrata. Maapealseid eelvaatlusi, eriti kõrglahutusega tähespektreid, on vaja ka teistes töörühmades. Arieli esialgu neljaks aastaks plaanitud töö tulemuseks on uued teadmised nii kiviste planeetide kui gaasihiidude atmosfääride kohta, nii üksikute planeetide kaupa kui statistiliste üldistustena, seosed atmosfääride koostise ning ematähtede vanuse, keemilise koostise jm parameetrite vahel, andmed pilvede ja nende muutlikkuse kohta planeetide atmosfäärides ja palju muud huvitavat.

Arieli töö vilju saame nautida umbes kümne aasta pärast. Selle ettevalmistustes täie jõuga osalemiseks on vaja inimesi, teadmisi ja oskusi. Neid hoida ja edasi arendada aitab meil Euroopa Liidu teadusprogrammi Horizon Europe projekt EXOHOST, mis kestab 1. jaanuarist 2023 kuni 31. detsembrini 2025. Sellelgi projektil on pikk ingliskeelne pealkiri, millest lühend on tuletatud: *Building excellence in spectral characterisation of EXOplanet HOST and other stars*. Selle peamine eesmärk on võimendada meie olemasolevaid tugevaid külgi ning arendada uusi teadmisi ja oskusi, et Tartu observatooriumist saaks Põhja- ja Baltimaade juhtiv keskus eksoplaneetide ematähtede tundmaõppimiseks. Tartu Ülikool oma observatooriumi kaudu on projekti koordinaator ja samal ajal natuke ka õpipoisi rollis. Samas on ka partneritel meilt üht-teist õppida. Partneriteks on tuntud teaduskeskused: Uppsala Ülikool, Austria Teaduste Akadeemia Kosmoseuuringute Instituut Grazis ja University College London. Viimane on eriti oluline selles mõttes, et seal töötab abiprofessorina meie oma mees Mihkel Kama, kes on selle projekti peadeoloog. Ja samas töötab ka Arieli konsortsiumi juht Giovanna Tinetti. EXOHOST-i

juht on Anna Aret. Kolmeks aastaks eraldatud 1,5 miljonist eurost saab Tartu Ülikool veidi üle poole, selle eest on võimalik maksta palka, korraldada vastastikuseid visiite, seminare, konverentse, õpetada noori jne. Juba üsna projekti algusest saadik töötab meie majas Indiast pärit doktorant Sandipan Borthakur, kes teise poole oma doktoriõpingute ajast veedab Grazis. Erinevalt paljudest seda laadi europrojektidest lubab EXOHOST otseselt toetada teadustööd nn. pilootuuringutena: neid koordineerib Mihkel Kama ja teemaks on seni sageli ignoreeritud kuumemad tähed, mille ümber võib leiduda planeete või protoplanetaarseid kettaid. Laiemas vaates ei ole sellised lühiajalised projektid ehk parim viis fundamentaalteaduste säilitamiseks ja arendamiseks, aga olemasolevaid võimalusi tuleb kasutada ja nendega kohanduda.

Veel üks võimalus, mida oleme saanud kasutada, on Eesti riigi toetus teaduse infrastruktuuri teekaardi objektidele. Viimaste hulgas on ka Eesti liikmelisus Euroopa Kosmoseagentuuris ESA ja nii oleme saanud peamiselt just Arieli ettevalmistusteks hankida uue spektrograafi meie 1,5-meetrise teleskoobi jaoks. Kalendri trükkimineku ajaks on spektrograaf juba Prantsusmaalt Tõraverre saabunud – täpselt 199 aastat pärast seda, kui Struve sai enda käsutusse kuulsu Fraunhoferi refraktori. Küllap kirjutame uuest spektrograafist ja sellega vaatlemisest mõnes järgmises Tähetorni Kalendris, nagu ka sellest, kuidas meie teleskoop kaugjuhitavaks sai.

Küsimus teistest maailmadest ja nende võimalikest asukatest on inimesi alati huvitanud ja erutanud. Midagi uut saame teada siis, kui meie senised teadmised, oskused ja uurimisevahendid seda võimaldavad. Nagu nägime loo alguses, oli 19. sajandil küll palju tahtmist leida planeete teiste tähtede ümber, aga mõõtmistäpsus seda veel ei võimaldanud. Kindel teadmine tuli alles 20. sajandi lõpul. Kolmveerand 21. sajandist on veel ees. Üsna kindlasti teab inimkond selle sajandi lõpuks eksoplaneetide kohta midagi niisugust, mida me praegu ei oska ette kujutada. Ei ole aga kindel, kas see on teadmine elust kuskil seal kaugel.

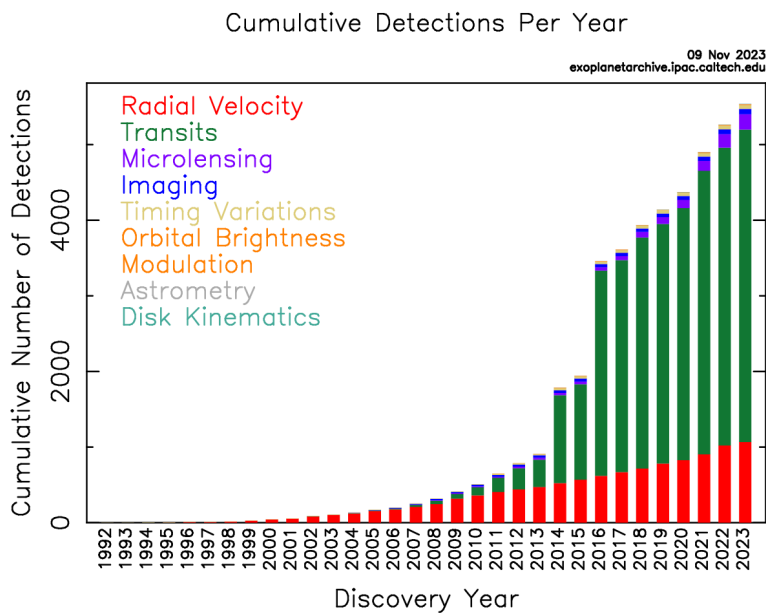
Kasutatud kirjandus

- Bailes, M., Lyne, A. G., Shemar, S. L., 1991. A planet orbiting the neutron star PSR1829-10. *Nature*, vol. 352, Issue 6333, p. 311–313.
- Chao, K.-H., deGraffenried, R., Lach, M., Nelson, W., Truax, K., Gaidos, E., 2021. Lava worlds: from early Earth to exoplanets. *Geochemistry*, vol. 81, Issue 2, article 125735 (32 p.).
- Deich, A. N., Orlova, O. N., 1977. Invisible companions of the binary star 61 Cygni. *Soviet Astronomy*, vol. 21, p. 182.
- Fridlund, M., Gaidos, E., Barragán, O. jt, 2017. K2-111 b – a short period super-Earth transiting a metal poor, evolved old star. *Astronomy and Astrophysics*, vol. 604, A16, 13 p.
- Höning, D., Spohn, T., 2023. Land Fraction Diversity on Earth-like Planets and Implications for Their Habitability. *Astrobiology*, vol. 23, Issue 4, p. 372–394.
- Höning, D., Tosi, N., Hansen-Goos, H., Spohn, T., 2019. Bifurcation in the growth of continental crust. *Physics of Earth and Planetary Interiors*, vol. 287, p. 37–50.
- Jacob, W. S., 1855. On certain Anomalies presented by the Binary Star 70 Ophiuchi. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 15, p. 228–230.
- van de Kamp, P., 1963. Astrometric Study of Barnard's Star. *Astronomical Journal*, vol. 68, No. 6, p. 295–296.

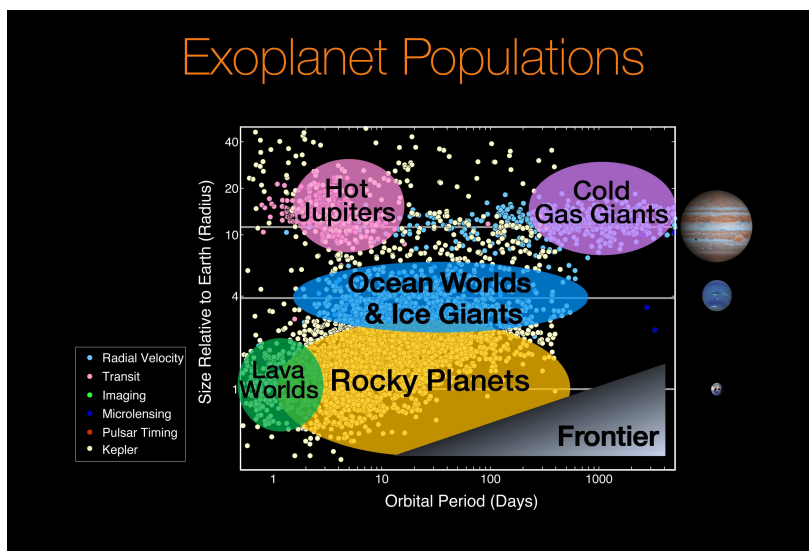
- Madhusudhan, N., Sarkar, S., Constantinou, S. jt, 2023. Carbon-bearing Molecules in a Possible Hycean Atmosphere. *Astrophysical Journal Letters*, vol. 956, Issue 1, L13, 16 p.
- Mayor, M., Queloz, D., 1995. A Jupiter-mass companion to a solar-type star. *Nature*, vol. 378, Issue 6555, p. 355–359.
- Moulton, F. R., 1899. The limits of temporary stability of satellite motion, with an application to the question of the existence of an unseen body in the binary system 70 Ophiuchi. *Astronomical Journal*, vol. 20, Issue 461, p. 33–37.
- Mädler, J. H., 1836. Über die Lage des Doppelsterns 70 Ophiuchi. *Astronomische Nachrichten*, Bd. 13, Nr. 289, S. 9–14.
- Mädler, J. H., 1842. Über den Doppelstern p Ophiuchi. *Astronomische Nachrichten*, Bd. 19, Nr. 444, S. 201–210.
- See, T. J. J., 1895. Perturbations in the motion of the double star 70 Ophiuchi. *Astronomical Journal*, vol. 15, Issue 358, p. 180.
- See, T. J. J., 1897. Micrometrical measures of 70 Ophiuchi, with remarks on the perturbation of the system. *Astronomical Journal*, vol. 17, Issue 407, p. 180–181.
- Wilsing, J., 1897. Untersuchungen über die Parallaxe und die Eigenbewegung von 61 Cygni nach photographischen Aufnahmen. *Publicationen des Astrophysikalischen Observatoriums zu Potsdam*, Bd. 11, Stuck 3, S. 98–153.
- Wolszczan, A., Frail, D. A., 1992. A planetary system around the millisecond pulsar PSR1257+12. *Nature*, vol. 355, Issue 6356, p. 145–147.

Internetialikad

- Aleksander Wolszczan. https://en.wikipedia.org/wiki/Aleksander_Wolszczan (20.09.2023).
- NASA Exoplanet Archive. <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/> (03.10.2023).
- Gaia. https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Gaia (04.10.2023).
- Peter van de Kamp. https://en.wikipedia.org/wiki/Peter_van_de_Kamp (22.09.2023).
- The Extrasolar Planets Encyclopaedia. <http://exoplanet.eu> (03.10.2023).



L. Leedjärv: Joonis 1. Eksoplaneetide avastamise statistika. Punane tähistab radiaalkiiruste, roheline varjutuste ja violetne gravitatsioonilise mikroläätse meetodiga leitud planeete. Ülejäänud meetodid on marginaalsed. NASA Exoplanet Archive.



L. Leedjärv: Joonis 2. Eksoplaneetidid graafikul raadius (Maa raadiuse ühikutes) vs orbitaalne periood (päevades). Värvilised piirkonnad on (alt vasakult ülespoole): laavamaailmad, kivised planeetid, veemaailmad ja jäähiid, kuumad Jupiterid, külmad gaasihiiud. Kiilukujuline hall ala all paremal näitab piiri, milleni meie eksoplaneetide avastamise meetodid veel ei küüni. NASA Exoplanet Archive.