

Fysiikan kandiohjelma
Eksoplaneetat ja niille matkustaminen
Kanditaatin tutkielma

Tekijän tiedot: Pietiläinen Santeri
Sähköpostiosoite : sanpieti21@student.oulu.fi
Tieteen ala: Matemaattisten -ja fysikaalisten-
tieteiden tutkinto-ohjelma
Päiväys: 28.8.2024
Työn ohjaaja: Aku Venhola

Sisällys

1	Tiivistelmä	3
2	Eksoplaneettatutkimisen historiaa	3
2.1	Ylikulkumentelmä	3
2.2	Radiaalimittaukset ja radiaalinopeusmenetelmät	4
2.2.1	Spektroskooppinen identifointi	8
2.3	Suora havainto	9
2.4	Gravitaatiomikrolinssi	10
2.5	Suuret kartoitukset	11
3	Lähimmät eksoplaneetat	13
4	Kuinka päästä eksoplaneetalle - nykyinen teknologia ja teoreettiset mallit	14
5	Lopputulokset	17

1 Tiivistelmä

Tässä työssä tulen tarkastelemaan aurinkokunnan lähimpiä tähtiä ja niitä kiertäviä eksoplaneettoja. Käyn läpi, miten näitä planeettoja löydetään, ja miten niistä saadaan informaatiota. Käyn myös läpi, fysiikan näkökulmasta, niille tehtävien matkojen haasteita nykYTEKNOLOGIAN avulla, sekä teoreettisten mallien pohjalta.

2 Eksoplaneettatutkimisen historiaa

Vaikka eksoplaneettojen löytäminen ja tutkiminen on käytännössä todella uusi tieteenhaara, ovat ihmiset ainakin spekuloineet maan ulkopuolisten, eli eksoplaneettojen, olemassaoloa ainakin siitä lähtien, kun Copernicus ensimmäistä kertaa ehdotti aurinkokeskeistä maailmankatsomusta [33]. Kopernikuksen jälkeen meni peräti yli 400 vuotta, ennen kuin saatiin ensimmäisiä havaintoja eksoplaneetasta. Ensimmäinen varmistettu havainto eksoplaneetasta saatiin vasta 1992 [43]. Tämä löytö tehtiin käyttämällä Arebico observatorion 305 metristä radioteleskooppia[6], joka mittasi PSR1257 +12 nimisen pulsarin pulsseja, ja siitä pystyi päättelemään ainakin kahden planeetan olemassaolosta. PSR B1257+12 c ($4,3 \pm 0,2M_{\oplus}$) ja PSR B1257+12 d ($3,9 \pm 0,2M_{\oplus}$). Kolmas planeetta PSR B1257+12 b ($0,02M_{\oplus}$) löydettiin 1994. Tämän jälkeen ensimmäinen eksoplaneetta, joka löydettiin Auringon kaltaisen tähden kiertoradalta, löydettiin 1995 (51 Pegasi b)[27]. Planeetta löydettiin käyttämällä radiaali-nopeus menetelmää, ja instrumenttina käytettiin ELODIE-nimistä spectrografia[10].

Eksoplaneettoja on siis löydetty eri menetelmillä ja monesti myös sattumalta, mutta nykyään suurin osa eksoplaneetoista, jotka on löydetty, on ollut systemaattisten tutkimusprojektien ansiota, joista kerrotaan lisää kappaleessa 2.5. 2.6.2024 mennessä, eksoplaneettoja on löydetty 5638 kappaletta[1]. Näissä on käytetty monia eri menetelmiä. Tärkeimmät ja tuottavimmat keinot ja kartoitukset käydään seuraavaksi läpi.

2.1 Ylikulkumentelmä

Tähden kirkkaus voi vaihdella useasta syystä, mutta yksi mahdollinen säännöllisen kirkkauden vaihtelun syy voi olla eksoplaneetta. Himmenemiset nähdään graafisesti aika-kirkkaus koordinaatistossa, pienenä kuoppana. Säteilyn himmeneminen on yleensä vähäistä, mutta mikäli se toistuu periodisesti, voidaan olla aika varmoja siitä, että sen aiheuttaa jokin kiertolainen, yleensä planeetta.

Tätä menetelmää kutsutaan ylikulkumenetelmäksi ja se on yksi yleisimmistä tavoista, miten eksoplaneettoja etsitään ja löydetään. Tällä hetkellä tehokkaimpia teleskooppeja ylikulkumenetelmällä etsimiseen ovat TESS (Transiting exoplanet survey satellite) ja Hubbleteleskooppi[17][24]. Jo päättynyt Kepler avaruusteleskooppi on myös kerännyt paljon dataa planeettojen ylikuluista, 9 vuoden uransa aikana[28]. ylikulkumenetelmällä on monia hyötyjä, muihin etsintätapoihin verrattuna. Sillä saadaan tietoon planeetan kiertoaika, seuraamalla kuinka pitkä himmenemisen aikaväli on. Myös planeetan koko saadaan tietoon, kun tiedämme tähden koon ja kirkkauden ja tarkastelemme, kuinka paljon himmenemistä

tapahtuu. Kaava, josta saamme tietoon planeetan koon, voidaan johtaa kaavasta

$$\Delta F \approx \left(\frac{R_p}{R_s}\right)^2, \quad (1)$$

Jossa ΔF on 'flux', minkä planeetta aiheuttaa tähdestä saapuvalle valolle, R_p on planeetan säde ja R_s on tähden säde.

Tästä saamme ratkaistua helposti planeetan säde

$$R_p \approx \sqrt{\Delta F} \cdot R_s. \quad (2)$$

Huomaamisen arvoista on se, että koko saadaan vain approksimaationa, sillä yleensä tähden koon mittaukseen liittyy epävarmuutta, joten tarkkaa sädettä ei voida saada. ylikulmenetelmässä kanssa käytetään myös usein valon radiaalinopeuden mittauksia.

2.2 Radiaalimittaukset ja radiaalinopeusmenetelmät

Koska kaikki massalliset kappaleet vetävät gravitaation vaikutuksesta toisiaan puoleensa, aiheuttaa tähteä kiertävä planeetta tähden huojuntaa. Tämä johtuu siitä, että vaikka tähti on yleensä massiivisin kappale systeemissä (oma Aurinkomme kattaa 99,8% Aurinkokunnan massasta), voi sitä kiertävillä kappaleilla olla silti sen verran massa, että koko systeemin massakeskipiste ei sijaitse tähden keskustassa. Aurinkokunnan massakeskipiste sijaitsee hieman Auringon ulkopuolella [16]. Tämä aiheuttaa sen, että tähden nopeus vaihtelee systeemin ulkopuolisen koordinaatiston suhteen periodisesti, ja tämä nopeusvaihtelu voidaan nähdä tähden lähettämän säteilyn doppler-siirtymänä.

Johdetaan radiaalinopeus, eli suhde kappaleen kiertoradan kohda ja sen säteittäisnopeuden kanssa. [36]:n kappaleen 'radial velocities techniques for exoplanets' (kirjoittanut Depra A. Fishcer) mukaan kahden toisiaan kiertävän kappaleen 1 ja 2 tapauksessa kappaleen 1 isoakselin puolikas, a_1 , laskea seuraavasti

$$a_1 = \frac{m_2}{m_1 + m_2} a \quad (3)$$

m_1 ja m_2 ovat nyt kappaleiden massoja.

Kun tunnetaan kappaleiden suhteellisen radan isoakselin puolikas, a , ja kappaleiden massat m_1 ja m_2 . Kun esitämme, toisen kappaleen kiertoradan massakeskipisteen ympäri polaarikoordinaatistoissa, saamme kaavan muotoon

$$r_1 = \frac{a_1(1 - e^2)}{1 + e \cdot \cos f} = \frac{m_2}{m_1 + m_2} \cdot \frac{a(1 - e^2)}{1 + e \cos f} \quad (4)$$

Missä r_1 on ensimmäisen kappaleen etäisyys massakeskipisteestä, e on radan eksentrisyys, eli kuinka lähellä tai kaukana kiertorata on täydellisestä ympyrästä ja f on kulma kappaleen paikan kiertoradalla ja periastronin välillä. Nämä lasketaan massakeskipisteestä. F saadaan käyttämällä Keplerin yhtälöitä. Nämä eivät ratkea analyttisesti, vaan täytyy käyttää numeerisia keinoja. Haluamme saada säteittäisnopeuden ja f :n suhteen. Tarvitsemme tavan

saada selville säteittäisnopeuden niin, että systeemin ulkopuolinen tarkastelija voi sen laskea.

Karteesisessa koordinaatistossa, missä nollakohta on massakeskipisteessä ja paikka periastronissa, paikkakoordinaatti voidaan esittää yhtälöllä

$$\mathbf{r}_1 = \begin{pmatrix} r_1 \cos f \\ r_1 \sin f \end{pmatrix} \quad (5)$$

derivoidaan \mathbf{r}_1 ja saadaan nopeusvektori.

$$\dot{\mathbf{r}}_1 = \begin{pmatrix} \dot{r}_1 \cos f - r_1 \dot{f} \sin f \\ \dot{r}_1 \sin f + r_1 \dot{f} \cos f \end{pmatrix} \quad (6)$$

Derivoidaan yhtälö (4), jotta saamme nopeusvektorin.

$$\dot{r}_1 = \frac{r_1^2 \dot{f} \sin f}{(1 + e \cos f)^2} = \frac{e r_1^2 \dot{f} \sin f}{a_1 (1 - e^2)} \quad (7)$$

Sijoitetaan saatu nopeusvektori yhtälöön (6) ja saamme lopulta yhtälön

$$\dot{\mathbf{r}}_1 = \frac{h_1}{m_1 a_1 (1 - e^2)} \begin{pmatrix} -\sin f \\ \cos f + e \end{pmatrix} \quad (8)$$

missä $h_1 = m_1 r_1^2 \dot{f}$. Tämä myös tunnetaan ensimmäisen kappaleen kulmaliikemääränä ja on täten myös vakio. Tämä voidaan myös esittää ellipsin parametreinä a ja e , jolloin saadaan yhtälö

$$h_1 = \frac{m_2}{m_1 + m_2} h = \sqrt{\frac{G m_1^2 m_2^4 a (1 - e^2)}{(m_1 + m_2)^3}} \quad (9)$$

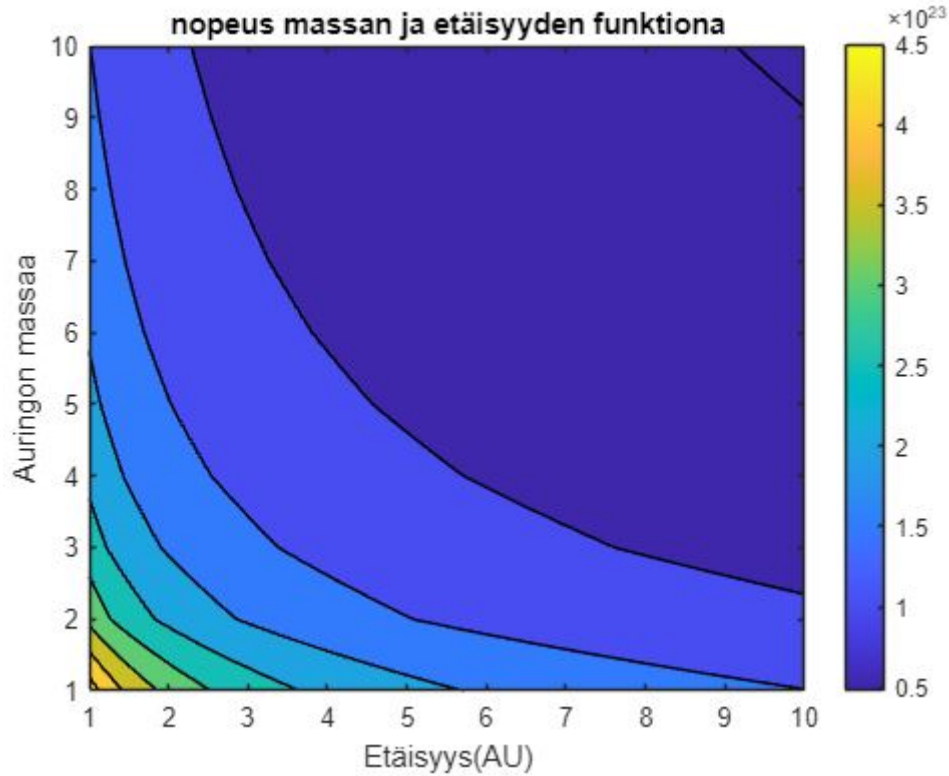
Tämä voidaan sijoittaa nyt yhtälöön (8), jolloin saamme yhtälön

$$\dot{\mathbf{r}}_1 = \sqrt{\frac{G m_2^2}{m_1 + m_2} \frac{1}{a (1 - e^2)}} \begin{pmatrix} -\sin f \\ \cos f + e \end{pmatrix} \quad (10)$$

Koska nopeusvektori halutaan saada siten, että se on hyödyllinen systeemin ulkopuolisen tarkastelijan näkökulmasta, täytyy se projisoida se tarkastelijan suhteen. Projisointi tehdään polaarikoordinaatistossa, johon tarvitsemme periastronia ja kiertoradan inkliinaatiota i , joka on otettu kulmana, joka muodostuu tarkastelijan muodostamaa janan kohtisuoran tason ja kiertoradan välisenä kulmana. Näillä voimme nyt esittää vektoria \mathbf{k} , joka on

$$\mathbf{k} = \begin{pmatrix} \sin \omega \sin i \\ \cos \omega \sin i \\ \cos i \end{pmatrix} \quad (11)$$

Radiaalinopeuden kaava saadaan nyt, kun nopeusvektori projisoidaan vektorille \mathbf{k} .



Kuva 1: Maan massaisen planeetan aiheuttama radiaalinopeuden suuruuden kuvaaja eri tähdille, jotka ovat Auringon massan moninkertoja.

$$v_{r,f} = \dot{\mathbf{r}}_1 \cdot \mathbf{k} = \sqrt{\frac{Gm_2^2}{(m_1 + m_2)a(1 - e^2)}} m_2 \sin i \cdot (\cos(\omega + f) + e \cos \omega) \quad (12)$$

Tämä kaava voidaan nyt esittää Maan massaiselle planeetalle eri Tähten massojen ja etäisyyden funktiona. Kuvassa 1 näkyy nyt maksimaalinen radiaalinopeus massan ja etäisyyden funktiona, missä massana on Auringon massan moninkerta. Tässä on oletettu radan inkliinaatio olevan 90 astetta, radan olevan ympyrärata ja periastronin, sekä $f : n$ olevan 0.

Olemme saaneet selvitettyä radiaalinopeuden kaavan siten, että se on hyödyllinen systeemin ulkopuoliselle tarkastelijalle. Miksi tähden radiaalinopeuden selvittäminen on tärkeää? Vastaus löytyy, kun tarkastelemme tähden valoa silloin, kun tähti liikkuu tarkastelijasta pois päin, ja verrata tähden lähettämän säteilyn aallonpituutta siihen, kun tähti liikkuu tarkastelijaan päin, olettaen että massakeskipisteen ja tarkastelijan välinen etäisyys ei muuttuisi. Sähkömagneettinen säteilyn nopeus on nimittäin aina vakio, liikkuisi tähti pois päin vaikka 0,9-kertaista valonnopeutta. Ainoastaan sen aallonpituus muuttuu sen nopeuden funktiona. Tätä kutsutaan Dopple-siirtymäksi.

Doppler-siirtymän kaava tarkoitukseemme on

```

%suureet
clear;
AU = 149597871000 %m           %Maan etäisyys Aurinkoon
a = (1:0.1:10).*AU; %AU         %Isoakselin puolikas(ympyräradalla säde)
G = 6.6743*(10^-11); %m^3/kg*s^2 %gravitaatiiovakio
m_1 = ((1.9891:1.9891:19.891).*10^30)';%kg           %Maan massa
m_2 = 5.9737*(10^24); %kg     %Auringon massa(1-100 Auringon massaa)
e = 0;                               %kiertoradan eksentrisyys(1 = ympyrärata)
omega = 0;                             %periapsis
f = 0;                                 %periatsronin(omega) ja planeetan välinen kulma
i = 90;                                %orbitaalin inkliinaati referenssitason
x = 1.9891*10^30
%maksimaalinen radiaalinopeus
v_max = (sqrt((G.*m_2.^2)./(m_1+m_2).*a*(1-e^2))).*m_2.*sin(i)+(cos(omega + f)+e*cos(omega));
%3d kuva maksimaalisesta nopeudesta
contourf(a/AU, m_1/x, v_max);
hold on;
title('nopeus massan ja etäisyyden funktiona')
xlabel('Etäisyys(AU)')
ylabel('Auringon massaa')

```

Kuva 2: Matlab koodi, jolla saadaan mallinnettua maksimaalista radiaalinopeutta eri systeimin suureilla.

$$\lambda = \lambda_0 \frac{1 + \frac{1}{c} \mathbf{k} \cdot \mathbf{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (13)$$

Täytyy myös ottaa huomioon avaruuden kaareutuminen, sillä emittoitunut säteily, jonka varassa mittaukset ovat, on yhtäläillä altis kaareutumiselle, kuin itse kiertävät kappaleet. Täten kaavaan täytyy tehdä lisäys ja saamme sen muotoon,

$$\lambda = \lambda_0 \frac{1 + \frac{1}{c} \mathbf{k} \cdot \mathbf{v}}{1 - \frac{\phi}{c^2} - \frac{v^2}{2c^2}} \quad (14)$$

Tässä nyt Φ on Newtonin gravitaatiopotentiaalitermi, joka on itsessään muotoa $\Phi = GM/r$, missä M on pallosymmetrinen massa ja r etäisyys.

Koska mittaukset tehdään maasta käsin, tai maan läheisyydessä, on observoiija itse myös kiertoradalla, jonka takia täytyy tehdä tiettyjä korjauksia, jotta voimme saada tarkkoja tuloksia. Fischerin mukaan yleisesti hyväksytty referenssipiste, jonka suhteen mittaukset tehdään on International Celestial Reference System (ICRS). Piste sijaitsee Aurinkokunnan massakeskipisteessä.

$$\lambda_B = \lambda_{obs} = \frac{1 + \frac{1}{c} \mathbf{k} \cdot \mathbf{v}_{obs}}{1 - \frac{\phi_{obs}}{c^2} - \frac{v_{obs}^2}{2c^2}} \quad (15)$$

Tässä mittauksissa otetaan huomioon tehty korjaus, mutta tarkempi kuvaus ei ole tämän johdon kannalta oleellista.

Säteittäismittauksissa käytettävät nopeudet ovat paljon pienempiä kuin valonnopeus. Tämän takia yhtälön (15) nimittäjän termit antavat hyvin pieniä muutoksia yhtälön suu-

ruuteen. Fischer mainitsee, että mikäli säteittäisnopeus mittauksiin ei tarvita mittauksia jotka ovat pienempi kuin $0,1 \text{ m s}^{-1}$, ei kaavan tarvitse olla niin yksityiskohtainen. Yksinkertaisempi kaava olisi täten

$$\lambda_B = \lambda_{obs} \left(1 + \frac{1}{c} \mathbf{k} \cdot \mathbf{v}_{obs} \right) \quad (16)$$

Mikäli kuitenkin tarvitaan yksityiskohtaisempaa kaavaa, ja tehdään korjaukset liittyen mittauksen tekijän liikkeeseen tarkasteltavan objektin suhteen voidaan kaavaa merkitä seuraavanlaisesti. Kuitenkin kun tarkoituksena on etsiä eksoplaneettoja, on taajuusvaihtelut hyvin hitaita, ei tätä tarvita, vaan saamme tutumman tavan esittää säteittäisnopeus.

$$\lambda_B = \lambda_* = \frac{1 + \frac{1}{c} \mathbf{k} \cdot \mathbf{v}_*}{1 - \frac{\phi_*}{c^2} - \frac{v_*^2}{2c^2}} \quad (17)$$

Fischers vielä painottaa, ettei tämä tapa ole tietenkään täysin tarkka, sillä koko systeemi on altis monelle eri häiriölle, jotka voivat lisätä saatuihin tuloksiin jopa 1 km s^{-1} . Kuitenkin koska mittaukset otetaan yleensä melko pitkältä aikaväliltä, voidaan silti saada melko tarkkoja tuloksia. Fischers vielä kehottaa lukijaa perehtymään Lindegrenin ja Dravin julkaisuun[25]. Tässä käydään tarkemmin läpi, kuinka saada tarkempia tuloksia, mutta tässä kävimme vain päällisin puolin kuinka mittauksia tehdään, joten emme perehdy tässä tarkennuksiin sen tarkemmin.

Siirtymän suuruuteen vaikuttaa usea tekijä. Planeetan massa vaikuttaa siihen, kuinka suuri sen painovoiman aiheuttama vetovoima on tähteen, joka taas määrittää, kuinka kaukana tähden keskustasta massakeskipiste sijaitsee. Massiivisempien planeettojen tapauksessa massakeskipiste sijaitsee kauempana. Myös tähden oma massa vaikuttaa massakeskipisteen etäisyyteen, sillä kevyempi tähti on paljon alttiimpi planeetan gravitaation vaikutukseen. Planeetan etäisyys, eli sen kiertoaika, vaikuttaa siihen, kuinka usein vaihtelua tapahtuu, eli v_{min} ja v_{max} , etäisyyksin ajallisesti. Lyhyempi periodi on helpompi nähdä datasta.

2.2.1 Spektroskooppinen identifointi

Spektroskooppinen identifikaation perustuu säteilyn eri aallonpituuksien tarkasteluun. Sitä käytetään monella eri tieteenalalla, mutta eksoplaneettojen tapauksissa toiminta perustuu systeemin lähettämän säteilyn tarkasteluun, jossa keskitytään tarkastelemaan säteilyn absorptioviivoja. Absorptioviivat syntyvät, kun osa tähden valosta, jota eksoplaneetta kiertää, osuu planeetan ilmakehään ja jatkaa siitä matkaa kohti omaa planeettaamme. Myös planeetan omaa emittoimaa säteilyä voidaan käyttää mittauksissa, mutta vain tietynlaiset planeetat lähettävät säteilyä, ja sekin säteily on yleensä infrapuna -eli lämpösäteilyä. Isoin haaste siis tulee, kun yritämme erottaa eksoplaneetasta heijastunutta säteilyä, sillä tähden valo on paljon kirkkaampaa. Suhdeluvut voivat vaihdella muutamasta tuhannesta, muutamaan miljardiin[12]. Tämän takia kunnollista mittausdataa on vaikea saada, sillä tarvitsemme tapoja erottaa planeetan lähettämän säteilyn tähden säteilystä. Isoin tekijä tämän onnistumiseen on mahdollisimman iso resoluutio.

Instrumentin resoluutio määritetään sen kyvyllä erottaa kaksi eri aaltoa, tietyllä aallonpituudella. Resoluutiovoiman yhtälö on,

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} \quad (18)$$

Tässä λ on aallonpituus, ja $\Delta\lambda$ on pienin ero mitä teleskooppi voi vielä erottaa tietyllä aallonpituudella. Birkbyn julkaisussa tarkastellaan resoluutioita, joiden suuruus on $R \sim (25000 - 100000)$. Yksi käytetyimmistä teleskoopeista on Euroopan avaruusjärjestön Very Large Telescope (VLT)[41], jossa on mukana instrumentti nimeltään cryogenic high-resolution cross-dispersed infrared echelle spectrograph (CRIRES).

Mikäli käytämme Maan päällisiä teleskooppeja, on niillä haasteita saada kunnollista mittaustietoa Maan ilmakehän takia, jonka lämpöväreily vääristää kuvaa. Myös suhteellisen korkea lämpösäteily, ympäristöstä ja teleskoopista itsestään, aiheuttaa häiriöitä datassa. Miksi sitten käytämme myös maan päällisiä teleskooppeja, emmekä pelkästään avaruusteleskooppeja? Avaruusteleskoopit ratkaisevat nämä kaksi isointa ongelmaa. Vastaus on yksinkertainen. Avaruusteleskoopin resoluutio on yleensä pienempi, kuin maanpäällisen teleskoopin, sillä isompi resoluutio tarkoittaa isompaa peiliä, joka tarkoittaa isompaa teleskooppia. Teleskooppien saaminen avaruuteen ei ole ilmaista eikä helppoa, joten jos voimme korjata maanpäällisen sijainnin aiheuttamat häiriöt, on paljon helpompaa ja halvempaa rakentaa isompi teleskooppi maan päälle.

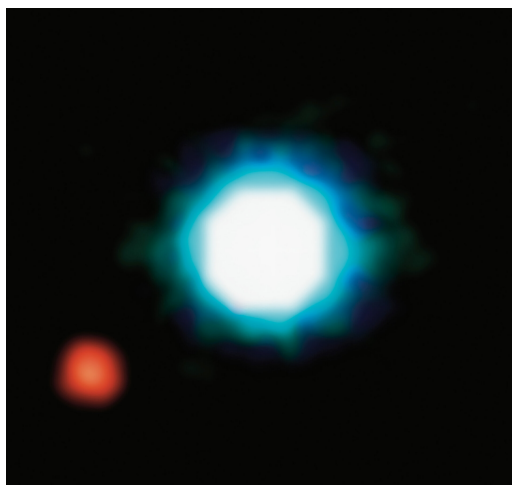
VLT teleskoopilla on esimerkiksi 2021 tarkasteltu WASP-81 systeemissä planeettaa (WASP-81b)[38]. Planeetan massa on $0,52M_{\text{J}}$ (Jupiterin massa). Planeetan säde silti $1,63R_{\text{J}}$ (Jupiterin säde). Tämän takia planeetan keskimääräinen tiheys on vain $0,11\rho_{\text{J}}$ (Jupiterin tiheys). Planeetan erikoinen tiheys johtuu sen lämpötilasta, joka on ilman ilmakehää arvioitu olevan 1740K ($1466,85\text{ }^{\circ}\text{C}$). Kuumuus johtuu sen etäisyydestä tähden, joka on $0,06438\text{AU}$ (Maan etäisyys Aurinkoon). Sen pienen tiheyden takia se on oiva kandidaatti ilmakehän tarkastelulle.

Kuitenkin avaruusteleskooppeja käytetään ilmakehien mittaamiseen. Nasan James Webb-avaruusteleskooppi on onnistunut mittaamaan eksoplaneetan ilmakehää.[21] Avaruusteleskooppi havaitsi muun muassa hiilidioksidia (CO_2) Wasp-39b nimisellä eksoplaneetalla.[4] Myös Hubble on onnistunut tässä[37]. Hubble mittasi 2002 eksoplaneettaa nimeltä HD 209458b[15]. Eksoplaneetan ilmakehää tutkittiin aallonpituuksilla $581,3\text{nm} \geq \lambda \geq 638,2\text{nm}$ ja resoluutioilla $R = 5540$. Vaikka ilmakehää saatiin mallinnettua hyvin ei lopullisia varmoja tuloksia ilmakehän koostumuksesta saatu, mutta merkit viittasivat natriumin olemassaoloon ilmakehässä erillisissä olomuodoissa ja yhdisteissä.

2.3 Suora havainto

Spektroskopinen identifikaatio on planeetasta heijastuneen, tai planeetan itsensä lähettämän säteilyn, tutkimista. Siinä resoluutio ratkaisee, että kuinka tarkkoja tuloksia saadaan. Tämän takia, mikäli resoluutio on tarpeeksi suuri, voimme suoraan kuvantaa planeettaa, eli niin sanotusti, ottaa planeetasta kuva. Tällä tavalla, voimme saada suoraan tietoa planeetan kiertoradasta sen muoto ja etäisyys. Tämä onnistuu, kun otamme useamman kuvan eri aikaväleiltä.

Planeetan lähettämä säteily riippuu sen lämpötilasta. Aallonpituus saadaan laskettua Wienin siirtymäläistä[42]. Yhtälö on muotoa



Kuva 3: Ensimmäinen kuva eksoplaneetasta(2004). Kuvassa oikealla(sininen) on ruskea kääpiö(2M1207) ja vasemmalla(oranssi) on planeetta(2M1207b). Systeemi sijaitsee hydran tähdistössä, 230 valovuoden päässä. [3]

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T} \quad (19)$$

Tässä λ_{max} on lämpötilassa T olevan mustan kappaleen lähettämän säteilyn aallonpituus ja b on wienin siirtymävakio $b = 2,897771955 \cdot 10^{-3} m \cdot K$.

Planeetan lähettämän säteilyn aallonpituus ja intensiteetti riippuu planeetan lämpötilasta Wienin siirtymälain mukaisesti, ja kuten kappaleessa 2.2.1 totesimme, eksoplaneetan lämpötila riippuu taas sen etäisyydestä tähteen. Omassa aurinkokunnassamme Auringon lämpötila on 5700K. Wienin siirtymälaila aallonpituus on siis

$$\frac{2,897771955 \cdot 10^{-3} m \cdot K}{5700K} \approx 5,08381 \cdot 10^{-7} \approx 508,4 \text{ nm} \quad (20)$$

Kyseinen aallonpituus vastaa vihreää valoa. Säteily tulee silti paljon tämän alueen molemmilta puolelta, jonka takia Aurinko näyttää avaruudessa valkoiselta, eikä vihreältä. Maan keskeislämpötila on kuitenkin vain $15C \circ$ (288,15K), jolloin oman planeettamme lähettämän spektrin suurin intensiteetti tulee aallonpituudelta

$$\frac{2,897771955 \cdot 10^{-3} m \cdot K}{288,15K} = 1,00565 \cdot 10^{-5} = 10,06 \mu m \quad (21)$$

Tämä vastaa infrapunasäteilyä.

Kuvassa 3 on Esan ja Nasan julkaisema ensimmäinen kuva eksoplaneetasta. Kuva on otettu käyttäen VLT-teleskooppia.

2.4 Gravitaatiomikrolinssi

Kaikki massalliset kappaleet aiheuttavat avaruuden kaareutumista, ja tämä nähdään gravitaatiovoimana. Tämä avaruuden kaareutuminen aiheuttaa valon etenemisen vääristymistä, joka on massaton. Tämän takia jotkin kappaleet saattavat näyttää vääristyneiltä, mikäli

niistä tuleva valo ohittaa jonkin suuren massan. Mikrolinssi-ilmiössä havaitaan tähtiä, jotka yleensä ohittavat toisen tähden. Koska kaikki havaittavat kohteet ovat käytännössä pistemäisiä, jää ainoana havaittavan suureena kirkkauden vaihtelu. Mikrolinssi-ilmiössä tarkastellaan juuri näitä kirkastumisia, kun kaksi tähteä ohittavat toisensa näkösäteellä. Tämä ylikulku alkaa ensin kirkastumisella, kun tähdet lähenevät näkösäteellä toisistaan, ja kun kirkkauden intensiteetin huippu on saavutettu, alkaa hidas himmeneminen. Tämä prosessi kestää yleensä muutamasta viikosta jopa muutaman kuukauden. Mikäli edessä olevalla 'linssitähdellä' on kiertoradallaan planeetta, on mahdollista, että tämä planeetta aiheuttaa omalla massallan poikkeamia tähtien kirkkausvaihteluun. Tällaiset 'anomaliat' kestävät vain joitain päiviä[39].

2.5 Suuret kartoitukset

Kuten edellisissä kappaleissa käytiin läpi, eri menetelmiä eksoplaneettojen etsimiseen, on monia. Eksoplaneettojen ja niiden kehityksen tutkimus ovat myös kiinnostava tieteenhaara, jonka takia monet eri tahot ovat alkaneet etsiä, edellä mainittuja menetelmiä käyttäen, eksoplaneettoja. Etsintöjä voidaan jaotella sen perusteella, mistä ja miten niitä on suoritettu. Avaruusteleskoopeilla loogisesti saadaan parhaat tulokset, sillä silloin ei tarvitse välittää maan ilmakehästä, joka vääristää kuvaa, pienentäen täten tarkkuutta. Myös saatava informaatio riippuu kartoitustavasta. Listataan nyt tähän joitain menestyksekkäitä etsintöjä, jaotellen ne maanpäällisiin etsintöihin ja avaruudesta käsin tehtyihin etsintöihin, sekä tarkemmin eri mittausmenetelmät. Maanpäällisistä kartoituksista menestyksekkäimpiä olivat WASP (Wide Angle Search for Planets), HARPS(High Accuracy Radial velocity Planet searcher) ja HAT (HATnet and Hatsouth projects)[9] [32][29].

WASP on kansainvälinen projekti jossa on mukana Isaac Newton group, IAC(Instituto de Astrofísica de Canarias) ja 6 muuta UK:n yliopistoa. WASP koostuu kahdesta robotiobservatoriosta, joissa on kiinni 8 kameraa. Toinen observatorioista, WASP-north, sijaitsee La Palma nimisellä saarella, joka kuuluu Kanarian saariin, Espanjassa. Isaac Newton Group (ING) vastaa tästä observatoriosta. WASP-south sijaitsee Etelä-afrikan astronomisessa observatoriossa (SAAO). Yhdessä nämä observatoriot kattavat koko taivaan ja operoivat ympäri vuoden, kuvaten tuhansia tähtiä. WASP planets-nimisen sivuston mukaan, 3.2.2024, WASP oli löytänyt 192 eksoplaneettaa, vaikka osasta ei löydykään tietoa, viitaten siihen, että planeettaa ei välttämättä ole varmistettu, tai on todettu vääräksi[2]. Todennäköisesti planeettoja on löytynyt lisää, sillä projekti on edelleen aktiivinen.

HARPS on ESO:n kehittämä, valon radiaalimittauksiin, perustuva maan päällinen teleskooppi, joka sijaitsee La Silla-observatoriossa, Chilessä. HARPS on osa ESO 3.6-metrin teleskooppia. HARPS aloitti toimintansa lokakuun ensimmäinen päivä, vuonna 2003. Marraskuussa 2017, HARPS oli löytänyt 134 eksoplaneettaa. HARPS-N (High Accuracy Radial velocity Planet Searcher for the Northern hemisphere) on pääpiirteiltään hyvin samallinen, kuin HARPS, mutta se sijaitsee pohjoisella pallonpuoliskolla, La Palman saarella. HARPS-N on asennettu Italialaiseen teleskooppiin 'Telescopio Nazionale Galileo', ja on osa Roque de los Muchachos observatoriota.

HATnet(Hungarian Automated Telescope Network) on "HAT" teleskooppien muodosta

verkko, joka muodostuu kuudesta pienestä teleskoopista, josta viisi sijaitsee Fred Lawrence Whipple observatoriossa, joka on Hopkins vuoren päällä, Pohjois-Ameriikassa. Vuori sijaitsee eteläisessä Arizonassa. HATnet teleskoopit käyttävät transit-menetelmää eksoplaneettojen löytämiseen ja on löytänyt 31.3.2024 mennessä 63 eksoplaneettaa. Hatnet on ollut operatiivinen vuodesta 2001. Teleskoopit käyttävät 11cm mittaista Canonin linssiä. Kaikki teleskoopit ovat automatisoituja. Yksi HAT teleskooppi toimii Wisen observatoriossa. HAT-south on lisäys HATnet ohjelmaan, jossa vuonna 2009, Australiaan, Namibiaan ja Chileen Vietiin myös teleskoopit. HAT-south toi lisäyksenä 71 löydettyä eksoplaneettaa.

Maan päälliset teleskoopit ovat siis löytäneet ~ 600 eksoplaneettaa. Vaikka se on jo vaikuttava määrä, ei se ole kuin murto-osa kaikista löydetyistä eksoplaneetoista. Suurin osa eksoplaneetoista löydetäänkin avaruusteleskoopeilla. Menestyksekkäimpiä avaruusteleskoopilla suoritettuja eksoplaneetta etsintöjä on Kepler, K2 ja TESS.

Kepler on Johannes Keplerin mukaan nimetty avaruusteleskooppi, jolla valtaosa nykyään tunnetuista eksoplaneetoista on löydetty[28]. Se laukaistiin kiertoradalle 6.3.2009 ja toimi yhdeksän vuotta, kuvaten yli puolta miljoonaa tähteä, yrittäen löytää, transit-menetelmää käyttäen, eksoplaneettoja. 16.6.2023 keplerin datasta oli varmistettu 2 778 eksoplaneettaa. Kepler käytti 1.4 metristä peiliä, ja 95cm linssiä. nämä ovat yksiä suurimmista avaruusteleskoopin linseistä-peili yhdistelmistä. Kepler suunniteltiin löytämään maan kaltaisia planeettoja, joiden massa vaihtelisi puolentoista -ja kahden maan massan välillä, vaikka sillä löydettiin massiivisempia planeettoja.

Kepler suunniteltiin aluksi toimimaan vain kolme ja puoli vuotta, mutta datan laatu oli sen verran heikkoa, että operaatiota pidennettiin. Operaation oli tarkoitus jatkaa vuoteen 2016 asti, mutta 4.5.2012, yksi neljästä, keplerin reaktiopyörästä lopetti toimimisen. Kepler pysyi vielä toiminnassa, sillä se pystyi kääntämään teleskooppia kolmella pyörällä. Valitettavasti 11.6.2013, toinen reaktiopyörä lopetti toimimisen ja samalla lopetti datan keräyksen. NASA:n vastaus ei ollut lopettaa operaatiota vaan muokata sitä. 16.5.2014 NASA julisti operaation nimeltä K2 ”second light”. Operaatio keskittyi löytämään asutettavia planeettoja, himmeämpien punaisten kääpiötähtien ympäriltä. 18.4.2018 NASA julisti, että kepler jätetään eläkkeelle ja operaatiot lakkautetaan.

Toinen avaruusteleskooppi-jättiläinen on tietysti Hubble avaruusteleskooppi. Hubble on nimetty Amerikkalaisen astrofyysikon Edwin Hubble mukaan[37]. Hubble laukaistiin kiertoradalle 25.4.1990 ja on edelleen aktiivisesti toiminnassa. Vaikka Hubble on monitoiminen teleskooppi, ja eksoplaneettojen etsiminen ei ollut yksin Hubblen päätavoitteista, sillä on silti onnistuttu tutkimaan eksoplaneettoja, erityisesti niiden ilmakehiä.[11] Vuonna 2001, Hubble käyttäneet fyysikot julkaisivat ensimmäisen havainnon eksoplaneetan ilmakehästä. Kyseessä oli siis spektroskooppinen havaitseminen. Vuonna 2008 Hubble havaitsi ensimmäisen orgaanisen molekyylin eksoplaneetalla. Planeetan nimi on HD 189733b, ja se on noin jupiterin kokoinen. Orgaaninen molekyyli oli metaani, jota on löydetty usealla planeetalla, omassa aurinkokunnassamme. Vaikka löytö ei ollut mikään valtava merkki elämästä eksoplaneetalla, oli se silti valtava harppaus sen etsimisessä.

Kun Kepler viimein lakkautettiin, tarvittiin sille jatkaja. 18.4.2018 NASA laukaisi kiertoradalle TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite), nimisen avaruusteleskoopin. Nimensä

```
%otetaan talteen etäisyydet ja nimet
nimet = PSCompParsfiltteroity.pl_name
etaisyydet = PSCompParsfiltteroity.sy_dist

%muodostetaan uusi taulukko johon nimet ja etäisyydet tallennetaan
taul1 = [nimet, etaisyydet];

%otetaan etäisyyksistä talteen ne jotka ovat alle 15 valovuoden päässä
idx = etaisyydet < 4.6;
%Filtteröidään vain ne planeetat jotka täyttävät edell mainitun ehdon
taul_ly15 = taul1(idx,:);
disp(taul_ly15)
```

Kuva 4: koodi jolla etsittiin nasan eksoplaneetta katalogista lähimmät eksoplaneetat

mukaisesti, TESS keskittyy etsimään eksoplaneettoja ylikulkumenetelmää käyttäen, ja Nasan sivujen mukaan[35], TESS on jo varmistetusti löytänyt 432 eksoplaneettaa ja sillä on yli 7000 eksoplaneetta-kandidaattia. Kuten tavallista TESS:in oli tarkoitus olla operatiivinen vain pari vuotta, mutta operaatiota pidennettiin ja TESS on edelleen aktiivinen, löytäen uusia eksoplaneettoja melkein päivittäin.

3 Lähimmät eksoplaneetat

Tässä kappaleessa tarkastellaan meistä lähimpien eksoplaneettojen eri piirteitä kuten etäisyyttä, massaa ja kokoa. Näkökulmana on mahdollisen miehittämättömän tai miehitetyn lennon kohdistamista kyseiselle planeetalle.

Nasa pitää yllä arkistoa kaikista tällä hetkellä löydettyistä eksoplaneetoista ja koko arkisto on ladattavissa 'Nasa exoplanet archive'- nimisellä sivustolla. Seuraavan analyysin tiedot saatiin käyttämällä Matlab nimistä ohjelmaa, jolla yli 5600 planeetan seasta, voidaan etsiä sopivia yksilöitä.

Skripti, jolla tiedonhaku tehtiin, on esitetty kuvassa 4.

Tämä tuotti 29 kappaletta planeettoja. Lähin planeetta näistä oli 1,30119 parsekin päässä, joka vastaa 4,2419 valovuotta. Tämä vastaa planeettaa nimeltä 'Proxima Centauri b'. Proxima b on aurinkoa lähin, tunnettu planeetta, joka kiertää punaista kääpiötähteä. Se kiertää tähteä 0,05 astronomisen yksikön päässä, joka siis vastaa 0,05 kertaista etäisyyttä maasta aurinkoon. Siltikin se on oman tähtensä elinkelpoisuus vyöhykkeen sisällä, eli siellä teoriassa voi esiintyä nestemäisiä vettä. Tämä tekee Proxima b:stä oivan kandidaatin tulevaisuuden miehittämättömälle tai miehitetylle lennolle, sillä se on myös kiviplaneetta, jonka massa on vähintään 1,27 -ja enintään 3 maan massaa[22].

Seuraavaksi lähin planeetta, jonka massa on lähellä maan massaa on Ross 128 b (Massa $1,19 - 1,61M_E$). Tämä on myös lupaava planeetta, sillä se kiertää myös tähtensä elinkelpoisuusvyöhykkeen sisällä, ja sille on arvioitu lämpötila, ilman ilmakehää, olevan $213K - 294K$ eli $-61,1^\circ C - 19,85^\circ C$ [18]. Planeetta kiertää tähteä, jonka massa on 0,18-kertainen Auringon massa verrattuna[31]. Teegardenin tähden planeetat TGB ja TGC (Teegarden's star b ja

Taulukko 1: planeettoja alle 15 valovuoden säteellä maasta. Suurinosa planeetoista on etsitty Nasan eksoplaneetta katalogista. M_E = Maan massa ja M_J = Jupiterin massa [8][19][7][20][13][30]

Nimi	etäisyys maahan(ly)	massa M_E/M_J
Proxima Centauri b	4,2419	$(1,27 - 3)M_E$
epsilon Eridani b	10,445	$(0,65 - 0,9)M_J$
Ross 128 b	11,006	$(1,19 - 1,61)M_E$
GJ 15 A b	11,6186	$(2,59 - 3,49)M_E$
GJ 15 A c	11,6186	$(18 - 61)M_E$
GJ 1061 b	11,9790	$(1,4 - 1,8)M_E$
YZ Ceti b	12,1072	$(0,13 - 0,75)M_E$
YZ Cet c	12,1072	$(0,14 - 0,98)M_E$
YZ Cet d	12,1072	$(0,17 - 1,14)M_E$
Teegarden's star b	12,4943	$(1,05 - 1,28)M_E$
Teegarden's star c	12,4943	$(0,92 - 1,19)M_E$
Teegarden's star d	12,4943	$(0,65 - 0,99)M_E$
Kapteyn's star b	12,7527	$(3,8 - 5,7)M_E$
Kapteyn's star c	12,7527	$(6,0 - 8,2)M_E$

c) ovat myös tähtensä elikelpoisuusvyöhykkeen sisällä ja täten niillä voi mahdollisesti olla pinnallaan nestemäistä vettä. kuten Ross 128 b, Planeetat kuitenkin kiertävät M-tyypin tähteä. teegardenin tähti on massaltaan $0.089 - 0.009$ Auringon massaa [40]. Tämän tyyppisten tähtien ympärillä olevat planeetat ovat tähden gravitaatiovuorovaikutusten vuoksi yleensä vuorovesilukkiutuneita, eli sama puoli planeetasta osoittaa aina kohti tähteä. Esimerkiksi Kuu on vuorovesilukkiutunut. Tämän takia on vaikea sanoa, kuinka hyvät elämän edellytykset planeetoilla on. Kummatkin tähdet sijaitsevat myös lähes kolme kertaa kauempana kuin Proxima b.

Mikäli siis suunnitellaan matkaa eksoplaneetalle, on elämän edellytykset yksi suurin tekijä planeetan valitsemisessa, sekä sen etäisyys. Otollisin realistinen vaihtoehto olisi siis Proxima b, sillä vaikka Ross 128 b tai TGB ja TGC ovat todennäköisemmin lähempänä Maan massaa, on Proxima noin kolme kertaa lähempänä, jolloin matka sinne on myös sen verran nopeampi.

4 Kuinka päästä eksoplaneetalle - nykyinen teknologia ja teoreettiset mallit

Entä matkustaminen aurinkokunnan ulkopuoleiselle planeetalle? Tällä hetkellä sellainen ei ole realistisesti mahdollista, mutta silti asiasta puhutaan paljon, ja monia kiinnostaa kuinka sellainen on mahdollista nykypäivänä tai tulevaisuudessa.

Tällä hetkellä ainoastaan kaksi satelliittia on lähetetty Aurinkokunnan ulkopuolelle. Nämä ovat tietysti Voyager 1 ja 2.[26] Aurinkokunnan pakonopeus ei ole mikään helppo homma saavuttaa ja siihen on myös erilaisia keinoja, miten se voidaan saavuttaa.

Johdetaan pakonopeuden kaava. Lähdetään liikkeelle merkitsemällä painovoiman aiheutta-

ma potentiaalin.

$$F_G = G \frac{M \cdot m}{r}, \quad (22)$$

missä m ja M ovat kappaleiden massat, r on etäisyys ja G on gravitaatiovakio. Tämän täytyy olla yhtä suuri kuin kappaleen liikenopeus

$$G \frac{M \cdot m}{r} = \frac{1}{2} m v^2. \quad (23)$$

Tästä saamme ratkaistua pakonopeuden v

$$v_{esc} = \sqrt{\frac{2GM}{r}} \quad (24)$$

Johdettu kaava on kovin yksinkertainen, eikä se ota huomioon esimerkiksi ilmanvastusta tai ilmakehän häiriöitä. Kaavalla (23) saamme vain nopeuden, jonka raketin täytyy saavuttaa, jotta se pystyy poistumaan Maan painovoimakentästä. Maan pakonopeus saadaan nyt siis sijoittamalla arvot yhtälöön (23).

$$\sqrt{\frac{2 \cdot (6,6743 \cdot 10^{-11} \frac{nm^2}{kg^2}) \cdot (5,9737 \cdot 10^{24} kg)}{6371000m}} = 11187,56989 \frac{m}{s} \approx 11,2 \frac{km}{s} \quad (25)$$

Kun olemme saaneet raketin maan kiertoradalla, pitää se vielä saada pois auringon painovoimakentästä, jotta pääsemme tähtienväliseen avaruuteen. Kaava (23) antaa auringon pakonopeudeksi

$$\sqrt{\frac{2 \cdot (6,6743 \cdot 10^{-11} \frac{nm^2}{kg^2}) \cdot (1,989 \cdot 10^{30} kg)}{696340000m}} = 617633m19798 \frac{m}{s} \approx 617,7 \frac{km}{s} \quad (26)$$

Tämä on Auringon pakonopeus sen pinnalta. Jos haluamme saada tietoon pakonopeuden maan kiertoradalta, pitää säde muuttaa astronomiseen yksikköön, joka on $1AU = 149597870691m$.

$$\sqrt{\frac{2 \cdot (6,6743 \cdot 10^{-11} \frac{nm^2}{kg^2}) \cdot (1,989 \cdot 10^{30} kg)}{149597870691m}} = 42128,16524 \frac{m}{s} \approx 42,13 \frac{km}{s} \quad (27)$$

Lopuksi täytyy miettiä itse tähtien välistä matkaa. Etäisyys lähimmälle tähdelle, joka on tarkoituksellemme tarpeeksi tarkka etäisyys eksoplaneetalle, on 1,30119 parsekkia (Proxima Centauri b), joka on kilometreinä $\approx 4,015 \cdot 10^{14} km$. Auringon pakonopeudella tällaiseen matkaan menisi

$$t = \frac{s}{v} = \frac{4,015 \cdot 10^{23} km}{42,13 \frac{km}{s} \cdot 31536000s} \approx 3,02199 \cdot 10^{14} y \quad (28)$$

Kuten yhtälöstä (27) huomataan, matkaan menisi pakonopeudella erittäin pitkä aika. Huomataan vielä, että tämä nopeus on pelkästään aurinkokunnan pakonopeus. Tällä hetkellä ainoat satelliitit, jotka ovat poistuneet aurinkokunnasta ovat Voyager 1 ja 2, joista Voyager 1:llä on isompi nopeus. Tämä on Nasan mukaan noin $17 \frac{km}{s}$. Voyager 1:llä menisi siis vielä pitempään päästä lähimmälle eksoplaneetalle. Teoriassa tämä on suurin nopeus,

mihin voimme nykyteknologian avulla päästä.

Tarkastellaan nyt eri teoreettisia vaihtoehtoja, miten voisimme saada sateliitin tai aluksen Proxima Centauri b:lle, realistisessa ajassa. Otetaan aikaväliksi 100 vuotta. Soveltamalla yhtälöä (29) saamme tarvittavaksi nopeudeksi

$$v = \frac{s}{t} = \frac{4,015 \cdot 10^{25} m}{3153600000 s} = 1,3451 \cdot 10^7 \frac{m}{s} \quad (29)$$

Tämä vastaa noin 4,49% valonnopeudesta.

Aurinkopurje on alus, joka käyttää säteilypainetta aluksen kiihdyttämiseen. Vaikka fotonit ovat massattomia, on niillä energiaa, ja täten liikemäärää, jota ne voivat luovuttaa. Aurinkopurjeen purje, on lähes täysin heijastavaa materiaalia, jolloin fotonin siihen osuessa, se luovuttaa osan liikemäärästään alukselle. Tästä saadaan pieni, mutta jatkuva, kiihdytys, joka on erittäin tehokasta, sillä aurinkopurje ei täten tarvitse erikseen polttoainetta[23].

Saatava yhtälö aurinkopurjeen kiihdytykselle on

$$a_c = \frac{2P}{cM} \quad (30)$$

Tässä a_c on saatu kiihtyvyyden määrä yhden AU:n etäisyydelle (= $1370 \frac{W}{m^2}$), c on valonnopeus ja M on aluksen massa.

Jos oletetaan aurinkopurjeen olevan 100 kg , saadaan tällä kiihtyvyydeksi

$$= \frac{2 \cdot 1370 \frac{W}{m^2}}{2,99 \cdot 10^8 \frac{m}{s} \cdot 100 \text{ kg}} \approx 9,16388 \cdot 10^{-8} \frac{m}{s^2} \quad (31)$$

Tämä vaikuttaa pieneltä, mutta tämä on lähes vakiokiihtyvyyden sekunnissa. Pitkällä matkalla ($\sim 1 \text{ AU}$) joudutaan kuitenkin ottamaan huomioon kiihtyvyyden pieneneminen etäisyyden kasvaessa. Tämän takia Auringon säteilypainetta, ei voida olettaa vakioksi, jos haluamme saada lopullisen nopeuden.

Tähden säteilypaine saadaan yhtälöstä

$$P(r) = \frac{I}{c} \left(\frac{AU}{r} \right)^2 \frac{A}{M} \quad (32)$$

Tässä P on säteilyteho etäisyydellä r , c on valonnopeus, I on intensiteetti pinta-ala yksikköä kohden, A on purjeen pinta-ala ja M on sen massa. Loppunopeus saadusta säteilypaineen kiihtyvyydestä saadaan integroimalla yhtälö (32) etäisyyden eli r :n mukaan.

$$v = \int \frac{I}{c} \left(\frac{AU}{r} \right)^2 \frac{A}{M} dr = -\frac{I}{c} \frac{AU^2}{r} \frac{A}{M} \quad (33)$$

Lasketaan saatu nopeus 200 AU :n etäisyydellä auringosta, aloittaen maan etäisyydeltä alukselle, jonka paino on 100 kg ja pinta-ala 100 m^2 . $I = 2,04 \cdot 10^7 \frac{W}{m^2}$, $c = 2,98 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$

$$v = \frac{2,04 \cdot 10^7 \frac{W}{m^2} \cdot AU^2 \cdot 100 \text{ m}^2}{2,89 \cdot 10^8 \frac{m}{s} \cdot 100 \text{ kg}} \left(\frac{1}{200 AU} + \frac{1}{AU} \right) = 0,0681141 \frac{km}{s} \quad (34)$$

Tämä on verrattain melko pieni loppunopeus, joka johtuu alkuetäisyydestä. Mikäli kiihdytys alkaisi lähempänä Aurinkoa, voitaisiin sillä saada paljon suurempia nopeuksia. Mikäli integroinnin alaraja laitettaisiin Auringon säteeksi, olisi loppunopeus $\approx 14,7 \frac{km}{s}$.

Aurinkopurjeesta on myös ehdotettu versiota, missä Auringon säteilypaineen sijasta, ammutaan purjetta Maasta käsin usealla laaserilla, jolloin saatu kiihtyvyyss säteilypaineesta riippuu suurimmalta osin pelkästään laasereiden määrästä ja tehokkuudesta[34]. Tavoiteltu nopeus on jopa 20% valonnopeudesta, jolloin matka Proxima Centaurin tähtisysteemiin kestäisi vain 20 vuotta. Myös suuremmat nopeudet, kuten 0,9-kertainen valonnopeus on ehdotettu mahdolliseksi. Haasteena tulee vääjäämättä kustannukset niin suuresta määrästä energiaa. Koska nopeudet ovat relativistisia, tuo Doppler-siirtymä omia haasteitansa aluksen kommunikoinnin kanssa. Hyötynä on juuri suuri nopeus, joka mahdollistaisi huomattavasti tarkemmat mittaukset eksoplaneetasta.

Käsitellyt nopeudet ovat nopeuksia aika-avaruuden halki, jossa on universaali nopeusrajoitus, eli valonnopeus. Valitettavasti valonnopeus tähtienvälisellä skaalalla on todella hidask. Tämän takia on tarkasteltu vaihtoehtoisia menetelmiä suuren nopeuden saavuttamiseksi. Pääasiallisesti menetelmiä, jossa ei kuljeta aika-avaruuden läpi.

Miguel Alcubierre ehdotti vuonna 1994 alusta, joka voisi taittaa suuria matkoja nopeasti, ilman että sen tarvitsisi saavuttaa relativistia nopeuksia aika-avaruuden suhteen[5]. Ajatuksena on tiivistää avaruutta aluksen edessä, ja laajentaa sitä takana, joka aiheuttaisi ulkopuoleiselle katselijalle näennäisen valoa nopeamman nopeuden. Analogisesti se oli kuin vauva, joka kiskoo alla olevaa lakanaa edessään ja potkii sitä takanaan. Tähän tarvitaan silti negatiivinen energiatiheys, jota ei tällä hetkellä pystytä tekemään, eikä ole varmuutta, että voiko sitä fysiikan lakien mukaan tehdä. Tähän myös tarvitaan erittäin suuria määriä energiaa (muutamana Auringon massan verran energiaa)[14].

5 Lopputulokset

Eksoplaneettoja löydetään koko ajan lisää kasvavalla vauhdilla, ja niitä etsitään usealla eri tavalla, joista jokaisella on vahvuutensa ja heikkoutensa. Ylikulkumenetelmällä saadaan selville mahdollisten eksoplaneettojen olemassa olosta, niiden arvioidusta halkaisijasta ja melko tarkkaan eksoplaneetan kiertoaika. Ylikulku on tosin melko harvinainen tapahtuma, mikä tekee siitä epäedullisen etsintätavan, mikäli tarkoituksena on etsiä suuria määriä planeettoja. Radiaalinopeuden mittauksilla saadaan tietoon planeetan kiertoaika, mutta myös planeetan massa, jolla paremmin voidaan mallintaa planeetan ominaisuuksia. Radiaalinopeus on siitä hyvä, että sillä voidaan havaita eksoplaneetta todennäköisemmin, sillä sen radan asennon ei tarvitse olla tasossa Maahan nähden, vaan sillä voi olla enemmän inkliinaatiota, mutta mikäli rata on kohtisuorassa Maahan nähden, ei se aiheuta tähden huojuntaa Maahan nähden. Planeetasta voidaan myös kerätä tietoa sen lähettämästä, tai heijastamasta säteilystä spektroskopisilla menetelmillä, jolloin voimme saada tietoon planeetan ilmakehän koostumusta, jolla voidaan potentiaalisesti etsiä elämän aiheuttamia biosignaaleja.

Tällä hetkellä ei valitettavasti ole mitään tehokasta keinoa matkustaa eksoplaneetalle, sillä vaadittavat nopeudet ovat niin suuria, että ei niitä nykyteknologialla voida saavuttaa. Siltikin koko ajan tulee uusia tutkimuksia, joissa tähän tavoitteeseen koitetaan päästä.

Viitteet

- [1] Eksoplaneettojen määrä. https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/docs/counts_detail.html. Accessed: 2024-06-02.
- [2] Eksoplaneettojen määrä. <https://wasp-planets.net/>. Accessed: 2024-06-05.
- [3] Ensimmäinen eksoplaneetta. <https://science.nasa.gov/resource/2m1207-b-first-image-of-an-exoplanet/>. Accessed: 2024-06-02.
- [4] Identification of carbon dioxide in an exoplanet atmosphere. *Nature*, 614(7949):649–652, 2023.
- [5] G. Abellán, N. Bolivar, and I. Vasilev. Alcubierre warp drive in spherical coordinates with some matter configurations. *The European Physical Journal C*, 83(1):7, 2023.
- [6] D. R. Altschuler. The national astronomy and ionosphere center’s (naic) arecibo observatory in puerto rico. In *Single-Dish Radio Astronomy: Techniques and Applications*, volume 278, pages 1–24, 2002.
- [7] G. Anglada-Escude, P. Arriagada, M. Tuomi, M. Zechmeister, J. S. Jenkins, A. Ofir, S. Dreizler, E. Gerlach, C. J. Marvin, A. Reiners, et al. Two planets around kapteyn’s star: a cold and a temperate super-earth orbiting the nearest halo red dwarf. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, 443(1):L89–L93, 2014.
- [8] N. Astudillo-Defru, R. F. Diaz, X. Bonfils, J. Almenara, J.-B. Delisle, F. Bouchy, X. Delfosse, T. Forveille, C. Lovis, M. Mayor, et al. The harps search for southern extra-solar planets-xlii. a system of earth-mass planets around the nearby m dwarf yz ceti. *Astronomy & Astrophysics*, 605:L11, 2017.
- [9] G. Á. Bakos. The hatnet and hatsouth exoplanet surveys. *arXiv preprint arXiv:1801.00849*, 2018.
- [10] A. Baranne, D. Queloz, M. Mayor, G. Adrianzyk, G. Knispel, D. Kohler, D. Lacroix, J.-P. Meunier, G. Rimbaud, and A. Vin. Elodie: A spectrograph for accurate radial velocity measurements. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, 119(2):373–390, 1996.
- [11] L. Ben-Jaffel and G. Ballester. Hubble space telescope detection of oxygen in the atmosphere of exoplanet hd 189733b. *Astronomy & Astrophysics*, 553:A52, 2013.
- [12] J. L. Birkby. Exoplanet atmospheres at high spectral resolution. *arXiv preprint arXiv:1806.04617*, 2018.
- [13] X. Bonfils, N. Astudillo-Defru, R. Díaz, J.-M. Almenara, T. Forveille, F. Bouchy, X. Delfosse, C. Lovis, M. Mayor, F. Murgas, et al. A temperate exo-earth around a quiet m dwarf at 3.4 parsec. *Astronomy & Astrophysics*, 613:A25, 2018.
- [14] C. V. D. Broeck. Awarp drive’with more reasonable total energy requirements. *arXiv preprint gr-qc/9905084*, 1999.

-
- [15] D. Charbonneau, T. M. Brown, R. W. Noyes, and R. L. Gilliland. Detection of an extrasolar planet atmosphere. *The Astrophysical Journal*, 568(1):377, 2002.
- [16] R. G. Cionco and D. A. Pavlov. Solar barycentric dynamics from a new solar-planetary ephemeris. *Astronomy & Astrophysics*, 615:A153, 2018.
- [17] H. J. Deeg and R. Alonso. Transit photometry as an exoplanet discovery method. *arXiv preprint arXiv:1803.07867*, 2018.
- [18] S. Dreizler, S. Jeffers, E. Rodríguez, M. Zechmeister, J. R. Barnes, C. Haswell, G. Coleman, S. Lalitha, D. Hidalgo Soto, J. Strachan, et al. Reddotts: a temperate 1.5 earth-mass planet candidate in a compact multiterrestrial planet system around gj 1061. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 493(1):536–550, 2020.
- [19] S. Dreizler, R. Luque, I. Ribas, V. Koseleva, H. Ruh, E. Nagel, F. Pozuelos, M. Zechmeister, A. Reiners, J. Caballero, et al. Teegarden’s star revisited—a nearby planetary system with at least three planets. *Astronomy & Astrophysics*, 684:A117, 2024.
- [20] F. Feng, R. P. Butler, S. S. Vogt, B. Holden, and Y. Rui. Revised orbits of the two nearest jupiters. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 525(1):607–619, 2023.
- [21] J. P. Gardner, J. C. Mather, R. Abbott, J. S. Abell, M. Abernathy, F. E. Abney, J. G. Abraham, R. Abraham, Y. M. Abul-Huda, S. Acton, et al. The james webb space telescope mission. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 135(1048):068001, 2023.
- [22] C. Garraffo, J. J. Drake, and O. Cohen. The space weather of proxima centauri b. *The Astrophysical Journal Letters*, 833(1):L4, 2016.
- [23] L. Johnson, R. Young, N. Barnes, L. Friedman, V. Lappas, and C. McInnes. Solar sails: technology and demonstration status. *International journal of aeronautical and space sciences*, 13(4):421–427, 2012.
- [24] M. D. Lallo. Experience with the hubble space telescope: 20 years of an archetype. *Optical Engineering*, 51(1):011011–011011, 2012.
- [25] L. Lindegren and D. Dravins. The fundamental definition of “radial velocity”. *Astronomy & Astrophysics*, 401(3):1185–1201, 2003.
- [26] S. K. Matsumoto. Voyager interstellar mission: Challenges of flying a very old spacecraft on a very long mission. In *14th International Conference on Space Operations*, page 2415, 2016.
- [27] M. Mayor, D. Queloz, G. Marcy, P. Butler, R. Noyes, S. Korzennik, M. Krockenberger, P. Nisenson, T. Brown, T. Kennesly, et al. 51 pegasi. *International Astronomical Union Circular*, 6251:1, 1995.
- [28] L. Molnár, R. Szabó, and E. Plachy. Variable stars with the kepler space telescope. *arXiv preprint arXiv:1610.02004*, 2016.

- [29] F. Pepe, M. Mayor, B. Delabre, D. Kohler, D. Lacroix, D. Queloz, S. Udry, W. Benz, J.-L. Bertaux, and J.-P. Sivan. Harps: a new high-resolution spectrograph for the search of extrasolar planets. In *Optical and IR telescope instrumentation and detectors*, volume 4008, pages 582–592. SPIE, 2000.
- [30] M. Pinamonti, M. Damasso, F. Marzari, A. Sozzetti, S. Desidera, J. Maldonado, G. Scandariato, L. Affer, A. F. Lanza, A. Bignamini, et al. The hades rv programme with harps-n at tng-viii. gj15a: a multiple wide planetary system sculpted by binary interaction. *Astronomy & Astrophysics*, 617:A104, 2018.
- [31] J. S. Pineda, A. Youngblood, and K. France. The m-dwarf ultraviolet spectroscopic sample. i. determining stellar parameters for field stars. *The Astrophysical Journal*, 918(1):40, 2021.
- [32] D. L. Pollacco, I. Skillen, A. C. Cameron, D. Christian, C. Hellier, J. Irwin, T. Lister, R. Street, R. G. West, D. Anderson, et al. The wasp project and the superwasp cameras. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 118(848):1407, 2006.
- [33] S. Rabin. Nicolaus copernicus. 2004.
- [34] J. Rice, R. Hamiltona, K. Bowersa, and M. Harta. Preliminary model for radiometric design and analysis of the breakthrough starshot initiative. *Proc. AO4ELT6*, 2019.
- [35] G. R. Ricker, J. N. Winn, R. Vanderspek, D. W. Latham, G. Á. Bakos, J. L. Bean, Z. K. Berta-Thompson, T. M. Brown, L. Buchhave, N. R. Butler, R. P. Butler, W. J. Chaplin, D. Charbonneau, J. Christensen-Dalsgaard, M. Clampin, D. Deming, J. Doty, N. De Lee, C. Dressing, E. W. Dunham, M. Endl, F. Fressin, J. Ge, T. Henning, M. J. Holman, A. W. Howard, S. Ida, J. M. Jenkins, G. Jernigan, J. A. Johnson, L. Kaltenegger, N. Kawai, H. Kjeldsen, G. Laughlin, A. M. Levine, D. Lin, J. J. Lissauer, P. MacQueen, G. Marcy, P. R. McCullough, T. D. Morton, N. Narita, M. Paegert, E. Palte, F. Pepe, J. Pepper, A. Quirrenbach, S. A. Rinehart, D. Sasselov, B. Sato, S. Seager, A. Sozzetti, K. G. Stassun, P. Sullivan, A. Szentgyorgyi, G. Torres, S. Udry, and J. Villaseñor. Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS). *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, 1:014003, Jan. 2015.
- [36] S. Seager and J. J. Lissauer. Introduction to exoplanets. *Exoplanets*, pages 3–13, 2010.
- [37] D. K. Sing, F. Pont, S. Aigrain, D. Charbonneau, J.-M. Désert, N. Gibson, R. Gilliland, W. Hayek, G. Henry, H. Knutson, et al. Hubble space telescope transmission spectroscopy of the exoplanet hd 189733b: high-altitude atmospheric haze in the optical and near-ultraviolet with stis. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 416(2):1443–1455, 2011.
- [38] P. Spyratos, N. Nikolov, J. Southworth, S. Constantinou, N. Madhusudhan, A. L. Carter, E. J. de Mooij, J. J. Fortney, N. P. Gibson, J. M. Goyal, et al. Transmission spectroscopy with vlt fors2: a featureless spectrum for the low-density transiting exoplanet wasp-88b. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 506(2):2853–2870, 2021.
- [39] Y. Tsapras. Microlensing searches for exoplanets. *Geosciences*, 8(10):365, 2018.

-
- [40] A. Wandel and L. Tal-Or. On the habitability of teegarden's star planets. *The Astrophysical Journal Letters*, 880(2):L21, 2019.
- [41] G. Wiedemann. Science with the vlt: high-resolution infrared spectroscopy. *The Messenger*, vol. 86, p. 24-30, 86:24–30, 1996.
- [42] B. W. Williams. A specific mathematical form for wien's displacement law as $v_{\max}/t = \text{constant}$. *Journal of Chemical Education*, 91(5):623–623, 2014.
- [43] A. Wolszczan and D. A. Frail. A planetary system around the millisecond pulsar psr1257+ 12. *Nature*, 355(6356):145–147, 1992.