

# Eksoplaneettojen havainnointi ja tutkiminen

TURUN YLIOPISTO  
Tietotekniikan laitos  
TkK-tutkielma  
Tieto- ja viestintäteknikka  
Toukokuu 2024  
Jaakko Mikkola

TURUN YLIOPISTO  
Tietotekniikan laitos

JAAKKO MIKKOLA: Eksoplaneettojen havainnointi ja tutkiminen

TkK-tutkielma, 35 s., 3 liites.  
Tieto- ja viestintäteknikka  
Toukokuu 2024

---

Eksoplaneetta on aurinkokunnan ulkopuolella sijaitseva planeetta. Ensimmäinen varmistettu eksoplaneetta löydettiin vuonna 1992. Siitä lähtien eksoplaneettojen havaitseminen ja tutkiminen on ollut nousussa tähtitieteen alalla. Eksoplaneettojen tutkimiseen ja havaitsemiseen on kehitetty monia menetelmiä ja teknologioita.

Tämä kandidaatintutkielma perehtyy havaitsemismenetelmiin, nykyisiin teknologioihin sekä tulevaisuuden projekteihin. Tutkielman tuloksena saatiin selville, että menestyksekkäimmät menetelmät ovat ylikulku- sekä säteisnopeusmenetelmä. TESS- ja JWST-avaruusteleskoopit ovat nykyaikaisia eksoplaneettojen tutkimisessa käytettäviä teknologioita. Tulevaisuudessa mm. eksoplaneettojen suora kuvaaminen on nousussa. Tässä menetelmässä auttavat koronagraafi-instrumentit. Tällaisia instrumenttejä käyttävät mm. tulevaisuuden avaruusteleskooppiprojektit, kuten Nancy Grace Roman Space Telescope, Habitable Worlds Observatory sekä noin 600 AU:n päässä sijaitsevalle Solar Gravitational Lensille mahdollisesti lähetettävä avaruusalus. Tutkielma tiivistää tulokset liitteenä esitettyihin taulukkoihin. Tutkielman loppu sisältää pohdintaa aiheesta mm. elämän etsimisen tärkeyden sekä rahoituksen näkökulmista.

Asiasanat: eksoplaneetta, avaruusteleskooppi, havaitseminen, ylikulkumenetelmä, säteisnopeusmenetelmä, TESS, JWST, ROMAN, SQL, HWO

# Sisällys

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Johdanto</b>  | <b>1</b>  |
| <b>2</b> | <b>Eksoplaneettojen taustaa</b>                                | <b>5</b>  |
| 2.1      | Eksoplaneetat . . . . .  | 5         |
| 2.2      | Eksoplaneettojen historiaa . . . . .                           | 6         |
| 2.3      | Termistöä . . . . .  | 7         |
| 2.3.1    | Kaarisekunti ja aallonpituus . . . . .                         | 7         |
| 2.3.2    | Mittayksiköt . . . . .   | 8         |
| 2.3.3    | Elämänvyöhyke . . . . .  | 9         |
| <b>3</b> | <b>Eksoplaneettojen havainnointimenetelmät ja -teknologiat</b> | <b>11</b> |
| 3.1      | Ylikulkumenetelmä . . . . .                                    | 11        |
| 3.2      | Säteisnopeusmenetelmä . . . . .                                | 13        |
| 3.3      | Muut menetelmät . . . . .                                      | 15        |
| 3.4      | Havainnointitekniikat . . . . .                                | 17        |
| 3.4.1    | TESS . . . . .   | 18        |
| 3.4.2    | JWST . . . . .   | 20        |
| <b>4</b> | <b>Tulevaisuuden teknologiat</b>                               | <b>22</b> |
| 4.1      | Nancy Grace Roman Space Telescope . . . . .                    | 22        |
| 4.2      | Habitable Worlds Observatory . . . . .                         | 25        |

|          |                                    |           |
|----------|------------------------------------|-----------|
| 4.3      | Solar Gravitational Lens . . . . . | 26        |
| <b>5</b> | <b>Yhteenveto ja pohdinta</b>      | <b>30</b> |
| 5.1      | Yhteenveto . . . . .               | 30        |
| 5.2      | Pohdinta . . . . .                 | 32        |
|          | <b>Lähdeluettelo</b>               | <b>36</b> |
|          | <b>Liitteet</b>                    |           |
| A        | Menetelmät                         | A-1       |
| B        | Avaruusteleskoopit                 | B-1       |

# Kuvat

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 1.1 | Hakuprosessi . . . . .  | 4  |
| 2.1 | Kulmasekunti . . . . .  | 8  |
| 3.1 | Teoreettinen valokäyrä . . . . .  | 12 |
| 3.2 | Kuvitus tähden ja planeetan kiertoradoista yhteisen massakeskipisten ympärillä . . . . .  | 14 |
| 3.3 | Kuvitus valon kaartumisesta massan johdosta . . . . .   | 16 |
| 3.4 | A: Ensimmäinen suora kuva eksoplaneetasta. Lähde: ESO. B: Kuvitus eksoplaneettojen vaikutuksista toisiinsa . . . . .  | 17 |
| 3.5 | A: TESSin kuvaama alue ja aika jota se käyttää kunkin segmentin kuvaamiseen. B: TESSin ensimmäinen kuva C: TESS-avaruusteleskooppi. Lähde: NASA . . . . .   | 19 |
| 3.6 | A: JWST-avaruusteleskooppi. B: Ensimmäiset JWST:n ottamat kuvat. Vasemmalla MIRIn ja oikealla NIRCamin ottamat kuvat. Lähde: NASA . . . . .   | 21 |
| 4.1 | A: Kaavio Romanin instrumentaatio kokoonpanosta. B: Romanin, Keplerin ja TESSin katselusuunnat ja etäisyydet. C: Kuvitus korona-graafin toiminnasta. Oikealla pimennetty keskustähti tuo esiin viereisen eksoplaneetan. Lähde: NASA . . . . . | 24 |
| 4.2 | Kuvituskuva SGL:n toiminnasta ja fokaalilinjasta . . . . .  | 27 |

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 4.3 | Kuvitus fokaalilinjasta . . . . .   | 27 |
| 5.1 | Kuvaaja eksoplaneetoista joille tiedämme ympärysmittan sekä massan. Lähde: Exoplanet.eu . . . . . | 33 |

# 1 Johdanto

Tämän tutkielman on tarkoitus tuoda lukijalle kattava katsaus eksoplaneettojen havainnoinnin ja tutkimisen tämän hetkiseen tilanteeseen. Tutkielma tarkastelee myös tulevaisuuteen suunniteltuja sekä jo rakenteilla olevia projekteja, jotka liittyvät aiheeseen. Tutkielma esittää myös hieman eksoplaneettojen historiaa. Onkin toivottavaa, että tätä läpikäydessään lukija voi ymmärtää, miten ihmiskunta onnistuu varmistamaan maankaltaisten planeettojen olemassaolon sekä keräämään niistä analysoitavaa tietoa, vaikka ne sijaisivat satojen miljardien kilometrien päässä. Tutkielman tarkoituksena ei kuitenkaan ole antaa lukijalle liian tarkkaa teknistä tietoa yksittäisestä teknologiasta taikka menetelmästä, vaan esitellä ne pintapuoleisesti ja ymmärrettävästi. Tutkielma keskittyy eksoplaneettoihin eikä muihin taivaankappaleisiin taikka avaruuden rakennelmiin. Tutkielma tuo lisäksi esille mahdollisia haasteita ja näkökulmia siinä esitettyihin tulevaisuuden teknologioihin liittyen. Tutkielma myös punnitsee näiden perusteella esimerkiksi eksoplaneettojen tutkimisen tärkeyttä.

Kautta aikojen ihmiskuntaa ovat kiehtoneet taivaalla paistavat tähdet. Monet ihmiset minua ennen ovat katsoneet taivaalle miettien, onko loputtomassa tyhjyydessä mitään. Niin myös minua lapsesta asti on kiinnostanut avaruus ja sen etäisyyksien salaamat ihmeet ja mysteerit. Yksi näistä mysteereistä ovat eksoplaneetat.

Minulta löytyy harrastuneisuutta aiheeseen liittyen. Jo muutaman vuoden olen viettänyt öitä katselemassa teleskoopilla aurinkokunnan tähtiä sekä ilmaissut kiin-

nostusta astronomiaan mm. valitsemalla sivuaineekseni tähtitieteen kokonaisuuden. Yhdet aikuiselämäni surrealistisimmat kokemukset ovat olleet Perseidien meteorisateen katseleminen sekä Jupiterin ja sen Galilein kuiden havaitseminen teleskoopin läpi. Mielestäni aikakaudella, jossa oma planeettamme on jo melkein täysin tutkittu, on uusi tutkimuksen ja löydöksen eturintama avaruudessa ja muilla planeetoilla.

Vasta viimeisen 30:n vuoden aikana on ihmiskunta kehittänyt ja saavuttanut teknologioita sekä menetelmiä eksoplaneettojen havainnointiin sekä tutkimiseen [1]. Näitä teknologioita sekä metodeja hyväksikäyttämällä on ihmiskunta löytänyt 5626 eksoplaneettaa [2]. Vaikka lukumäärä vaikuttaa suurelta, ei tämä tarkoita, että jokainen planeetta olisi maan kaltainen kiviplaneetta (vrt. Jupiter on kaasujättiläinen).

Tutkielman on tarkoitus vastata kahteen tutkimuskysymykseen, jotka ovat:

1. Millä menetelmillä ja teknologioilla tällä hetkellä etsimme eksoplaneettoja?
2. Mitkä ovat tulevaisuuden teknologiat eksoplaneettojen havaitsemiseen ja tutkimiseen?

Tutkielma pyrkii vastaamaan näihin kysymyksiin lähdeaineistojen perusteella. Tutkielma esittelee lukijalle tulevaisuuden tehtävät eksoplaneettojen etsimisen ja tutkimisen alalla. Tutkimukseen liittyy myös omaa pohdintaa aiheen tulevaisuuteen liittyen. Lisäksi tutkielma esittelee lukijalle taustaa eksoplaneetoista ja näkökulmia niiden tutkimisen tärkeydestä

Aloitin tutkielman työstämisen luomalla hakulauseen. Hakulause syntyi tutkielman aiheesta ja sen aihepiiristä. Tutkielmassa käytetty hakulause on: *Exoplanet\* AND (Satellite\* OR Telescope\*) AND Techno\**. Termit ”Satellite” ja ”Telescope” piti hakulauseessa laittaa OR-lohkon sisään, sillä esimerkiksi Telescope voi tarkoittaa joko maassa sijaitsevaa teleskooppia taikka avaruudessa sijaitsevaa avaruusteleoskooppia (engl. space telescope). Termin ”Techno” otin mukaan, sillä se rajasi hakua



lähemmäs tutkielman aihetta, joka kattaa itse teknologiat, joita eksoplaneettojen havaitsemiseen käytetään.

Hakulauseen luotuani suoritin alustavaa kirjallisuushakua tunnistaakseni tutkielmalle relevantin tietokannan. Tämän etsinnän aloitin Google Scholarista<sup>1</sup>. Hakulause tuotti noin 16 000 tulosta. Selattuani huomasin ArXivin<sup>2</sup> olevan lähde monelle tulokselle. Käyttämällä samaa hakulauseetta ArXivissä sain 228 tulosta. Näitä rajaamalla julkaisuvuoden ja kielen perusteella tippui tulosten määrä 96:een.

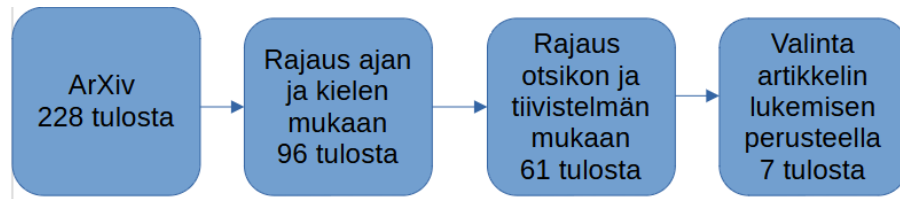
Aloitin lajittelemaan aineistoa saatuani tulokset otsikon ja tiivistelmän perusteella. Lajittelin tulokset viiteen kategoriaan sen perusteella, kuinka osuvia ne olivat tutkielman aiheen kanssa. Tämä tiputti pois 33 tulosta, jotka eivät mielestäni olleet relevantteja. Loput tuloksista kävin lävitse sen perusteella, kuinka osuvia ne olivat tutkielman aiheen kanssa, aloittaen osuvimmista. Tämä jätti minulle 6 päälähdettä. Näihin lukeutuu mm. Slava G.Turyshevin ym. *Direct Multipixel Imaging and Spectroscopy of an Exoplanet with a Solar Gravity Lens Mission* [3] sekä myös Jason Wein *A Survey of Exoplanetary Detection Techniques* [4]. Nämä lähteet sekä muut tutkielmaan päätyneet tulokset valittiin niiden relevanssin perusteella aiheeseen liittyen. Tutkielma käyttää pääasiassa lähteinään virallisia tehtäväraportteja sekä esimerkiksi teknisiä spesifikaatioita NASAn operoimista satelliiteista.

Tutkielman edetessä suoritin lisää hakuja etsiessäni lisätietoa aiheesta tai kun tarvitsin täydentävää tietoa. Näissä hauissa pyrin valitsemaan tieteellisiä lähteitä, vaikkei jokaista näistä hauista tehty tutkielmaan valitusta tietokannassa (ArXiv). Kaikki hakujen tulokset, jotka tutkielmassa esiintyvät on listattu lähdeluettoloon. Osa tutkielmassa viitatuista artikkeleista on myös löydetty sukeltamalla päähaussa löydetyn tuloksen lähteisiin. Sivulla 4 on kuva 1.1, joka esittää päähakuprosessin ja sen vaiheet.

---

<sup>1</sup>Google Scholar URL: <https://scholar.google.com/>

<sup>2</sup>ArXiv URL: <https://arxiv.org/>



Kuva 1.1: Hakuprosessi

Tutkielma on kirjoitettu loogiseen järjestykseen, joka ohjaa lukijan historiasta tulevaisuuteen. Luvussa kaksi tarkastellaan aiheeseen liittyvää termistöä, joka lukijan on hyvä sisäistää, jotta tutkielman edetessä hän ymmärtää mistä puhutaan. Luku sisältää myös eksoplaneettojen historiaa. Luvussa kolme tarkastellaan eksoplaneettojen havainnoinnin tämänhetkinen tilanne. Luku käsittelee mm. nykyisiä avaruusteleskooppeja sekä menetelmiä, joilla eksoplaneettoja voidaan tunnistaa. Luku kolme pyrkii vastaamaan ensimmäiseen tutkimuskysymykseen. Luvussa neljä käsitellään eksoplaneettojen tutkimisen tulevaisuutta. Luku tarkastelee ehdotettuja sekä rakenteilla olevia avaruusteleskooppeja sekä menetelmiä eksoplaneettojen havainnointiin. Luku pyrkii vastamaan tutkimuskysymykseen kaksi, sekä tuo lukijalle kuvan eksoplaneettojen tutkimisen tulevaisuudesta. Luku viisi sisältää yhteenvedon, aiheeseen liittyvää pohdintaa, jatkotutkimusehdotuksia sekä omia mietteitä aiheesta.

## 2 Eksoplaneettojen taustaa

Tämän luvun on tarkoitus avata lukijalle termistöä, eksoplaneettojen taustaa sekä historiaa. Luku pyrkii vastaamaan kysymyksiin kuten: mikä on eksoplaneetta? Milloin ensimmäinen eksoplaneetta löydettiin? Millä tavoin kuvataan taivaan pienen pientä osaa? Luettuaan tämän lukijalla on siis hallussa termit ja taustatieto, jota hän tarvitsee jatkaakseen.

### 2.1 Eksoplaneetat

Jo ennen ajanlaskun alkua on ihmiskuntaa kiehtonut taivas ja siellä loistavat tähdet. Osaa näistä tähdistä kiertää eri muotoisia ja massaisia taivaankappaleita. Näitä taivaankappaleita kutsutaan eksoplaneetoiksi. Nämä tähtiä kiertävät kappaleet ovat nousseet isoksi osaksi tähtitiedettä ja maailmankaikkeuden tutkimusta. Vastata hiljattain on ihmiskunta teorisoinut, kuinka yleisiä tällaiset eksoplaneetat voivat olla. Jopa  $26 \pm 3\%$ :tia auringon kaltaisista tähdistä voi kiertää maapallon kokoinen eksoplaneetta (1-2 kertaa maapallon halkaisijan kokoinen). [5]

International Astronomical Union (IAU) luokittelee eksoplaneetan kappaleeksi, jonka massa on alle 13 kertaa Jupiterin massa (318 Maapallon massaa) ja jonka minimikoko on sama, kuin kappaleella, joka meidän aurinkokunnassamme luokiteltaisiin vielä planeetaksi [6]. Tämän luokittelun perusteella esimerkiksi kolmen valovuoden päässä sijaitsevaa Pluton kokoista kappaletta ei voitaisi luokitella eksoplaneetaksi. Tämä luokittelu ei kuitenkaan ole täysin sitova ja silti kappaleita, jotka eivät si-

sälly näihin parametreihin kutsutaan välillä eksoplaneetoiksi. Esimerkiksi NASAn virallinen eksoplaneettajen arkisto sisältää kappaleita, joiden massat ylittävät nämä parametrit [2].

Eksoplaneettojen nimeämiseen käytetyssä järjestelmässä planeetta saa nimekseen sen kiertämän tähden nimen kirjainliitteellä. Oman aurinkokuntamme lähimpää tähteä, Proxima Centauria, kiertää eksoplaneetta nimeltä Promixa Centauri b. Merkkejä kyseisestä eksoplaneetasta löysi ensimmäisenä suomalainen tähtitieteilijä Mikko Tuomi [7].

## 2.2 Eksoplaneettojen historiaa

Vaikka ensimmäisestä varmistetusta eksoplaneetan havaitsemisesta on vasta runsaat 30 vuotta on idea pyörinyt ihmismielissä jo kauan [1]. Jo ennen kuin aurinkokeskeinen maailmankuva oli laajasti hyväksytty, pistivät muutamat filosofit ja tähtitieteilijät eteenpäin ajatuksen, että muilla tähdillä voisi olla planeettoja. Vuonna 1584 kirjoitti italialainen filosofi Giordano Bruno kirjassaan *De l'infinito, universo et mundi* [8] kuinka :

... On olemassa yksi suuri avaruus, jota voimme vapaasti kutsua tyhjyydeksi... Tässä tyhjyydessä on loputon määrä maailmoja jotka ovat samankaltaisia kuin omamme.

Kuten jo edellä mainittu ensimmäinen paperi varmistetusta eksoplaneetasta julkaistiin vuonna 1992 [1]. Vaikka tätä löytöä pidetään laajalti ensimmäisenä varmistettuna eksoplaneettana, on väitöksiä tällaisista löydöksistä tullut jo aikaisemmin. Vuonna 1855 Kapteeni W. S. Jacob väitti löytäneensä ”eksoplaneetan” kiertämässä kaksoistähteä 70 Ophiuchi laskiessaan tämän kiertoratoja. Myöhemmin vuonna 1988, toi Bruce Campbell ym. esille löydöksensä mahdollisesta tähteä kiertävästä eksoplaneetasta. Nämä löydökset eivät kuitenkaan saaneet varmistusta ennen vuotta

2003 [9]. Tähän mennessä ihmiskunta on löytänyt 5626 varmistettua eksoplaneettaa. Melkein joka päivä löydämme uutta tietoa eksoplaneetoista, ja ymmärryksemme näistä kaukaisista taivaankappaleista laajenee. [2]

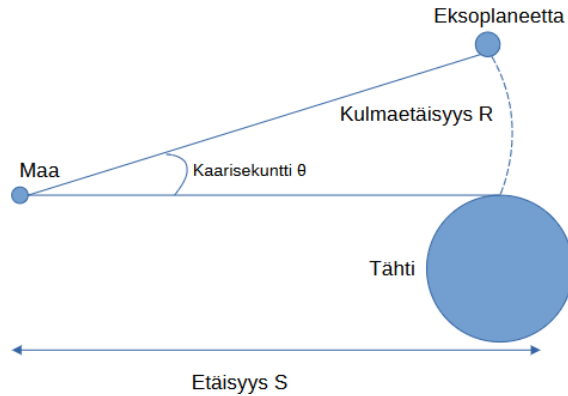
## 2.3 Termistöä

Tämän alaluvun on tarkoitus tuoda lukijalle ymmärrystä tutkielman keskeisistä termeistä, kuten kaarisekunti ja valovuosi. Alaluku siis varmistaa, että lukija ymmärtää, kun tätä termistöä käytetään myöhemmin tutkielmassa. Luku tuo myös esille elämänvyöhykkeen käsitteen ja sen eri luokitukset.

### 2.3.1 Kaarisekunti ja aallonpituus

Kun tähtitieteilijät katsovat avaruuteen ja tutkivat siellä loistavia tähtiä ja niitä kiertäviä kappaleita, he eivät voi käyttää taivaalla etäisyyksiä, kuten metri tai senttimetri. Tähtitieteilijät käyttävät tähän sen sijaan kulmia. Normaalisti käytettävä kulmayksikkö ei kuitenkaan tähän kelpaa, sillä kohteet ovat hyvin kaukana. Kulman sijasta käytetäänkin pienempiä yksikköjä, kuten kaariminuutti sekä kaarisekunti.

Kaariminuutti on  $1/60$  yhdestä asteesta. Kaarisekunti taas on  $1/3600$  yhdestä kulmasta. Kaukaisien etäisyyksien sekä pienien taivaankaistojen vuoksi kaarisekunti on näistä yleisempi. Nämä mittayksiköt auttavat tähtitieteilijöitä selittämään etäisyyksistä taivaalla. Esimerkiksi uuden eksoplaneetan voidaan sanoa kiertävän 40 kaarisekunnin päässä tähdestään. Sivun 8 kuva 2.1 havainnollistaa asiaa. Jos siis kulmaetäisyys  $R$  olisi miljoona kilometriä ja kulma eksoplaneetan ja tähden välillä yksi kaarisekunti, olisi etäisyys  $S$  silloin noin 200 miljardia kilometriä. Toisin sanoen, jotta voisit nähdä kaksi kappaletta, joiden välissä on miljoona kilometriä yhden kaarisekunnin ”sisällä”, pitäisi kappaleiden sijaita korkeintaan 200 miljardin kilometrin päässä. [10] Kun puhutaan eksoplaneetan etäisyydestä sen tähteen tai-



Kuva 2.1: Kulmasekunti

vaalla katsottaen maasta käsin, sanotaan sen kiertävän sitä esimerkiksi kymmenen kaarisekunnin etäisyydeltä. Suurin tähän mennessä löydetty etäisyys on 594 kaarisekuntia [11]. Kaikille löydetuille eksoplaneetoille ei kuitenkaan löydy näin merkittävää etäisyyttä tähdestään[12].

Toinen termi, jonka lukijan olisi hyvä ymmärtää on aallonpituus. Tämän selittäminen tässä tutkielmassa menee kuitenkin hieman asian sivuun mutta mainittakoon, että aallonpituus tutkielman kontekstissa merkitsee sähkömagneettista säteilyä ja sen eri aallonpituuksia. Aallonpituuden vaihtelu merkitsee, että sen havainnointiin tarvittavaan eri instrumentteja. Esimerkiksi eksoplaneettojen havaitsemista voidaan suorittaa mm. näkyvän valon aallonpituudella, radioaalloilla taikka infrapunassa. Tämän pidemmälle ei tutkielman puitteissa kuitenkaan mennä, mutta on hyvä ymmärtää, että eksoplaneettoja voidaan havaita eri päissä sähkömagneettista spektriä.

### 2.3.2 Mittayksiköt

Kun etäisyydet nousevat miljoonista kilometreistä miljardeihin taikka biljooniin on hyvä alkaa käyttää lyhennyksiä näistä suurista etäisyyksistä. Näin syntyvät käsitteet

astronominen yksikkö<sup>1</sup> (Astronomical Unit, AU), parsek<sup>2</sup> (pc) ja valovuosi<sup>3</sup> (Lightyear, ly). Eksoplaneettojen massoja tutkittaessa, niitä yleensä verrataan Jupiterin tai Maapallon massoihin. Tämä pätee myös halkaisijoita tutkiessa.

Yksi AU on maan keskietäisyys auringosta. Tämä etäisyys on 149 597 871 kilometriä. Tätä yksikköä käytetään usein merkitsemään eksoplaneettojen kiertoratojen kokoa kilometrien sijaan. Esimerkiksi jo aiemmin mainittu Proxima Centauri b kiertää keskustähteään noin 0.05 AU:n etäisyydellä. Tästä siirrymme suurempiin etäisyyksiin, eli parsekkiin (engl. parsec). Tämä on etäisyys, jossa yhden AU:n kokoinen kappale tai alue näkyy yhden kaarisekunnin kulmassa. Tämä etäisyys on noin 206 265 AU, eli siis noin 31 biljoonaa kilometriä. Tätä yksikköä käytetään ilmaisemaan tähtien etäisyyksiä maasta. Proxima Centauri sijaitsee 1.3 parsekin päässä auringosta. Saman kaltainen, mutta pienempi, eikä niin yleisesti tutkimuksessa esiintyvä yksikkö on valovuosi. Tämä on pituuden yksikkö, joka merkitsee etäisyyttä joka valolta kestää kulkea tyhjiössä yksi vuosi. Se on noin 0.3 pc tai 9.5 biljoonaa kilometriä. Suurien etäisyyksien vuoksi parsek on yleisemmässä käytössä valovuoteen verrattuna, mutta termi valovuosi esiintyy myös välillä, joten se oli hyvä lukijalle selittää. Se on myös populaarissa mediassa aikaisemmin mainituista yksiköistä yleisin.

### 2.3.3 Elämänvyöhyke

Suosio tutkia eksoplaneettoja kumpuaa lopulta yhdestä elämän suurimmista kysymyksistä: olemmeko yksin? Kun katsomme taivaalle, mietimme voisiko loputtomassa tyhjiydessä olla muuta älyllistä elämää, ja onko se meidän kaltaistamme. Jotta voimme etsiä elämää muilta planeetoilta pitää meidän ensiksi tutkia omaa aurinkokuntaamme ja mitkä ovat ne olosuhteet, jotka täällä vaaditaan elämän esiinty-

<sup>1</sup>Astronominen yksikkö, Wikipedia: [https://fi.wikipedia.org/wiki/Astronominen\\_yksikk%C3%B6](https://fi.wikipedia.org/wiki/Astronominen_yksikk%C3%B6)

<sup>2</sup>Parsek, Wikipedia : <https://fi.wikipedia.org/wiki/Parsek>

<sup>3</sup>Valovuosi, Wikipedia : <https://fi.wikipedia.org/wiki/Valovuosi>

miseen. Tämä tutkimus on luonut käsityksen elämänvyöhykkeestä (Habitable zone, HZ). [13]

Yksinkertaisen arvion mukaan tämä elämänvyöhyke sijaitsisi auringon kaltaisen tähden ympärillä 0.5—2 AU:n etäisyydellä [13]. Omassa aurinkokunnassamme tähän alueeseen kuuluisi Maapallon lisäksi Mars että Venus. Kopperapu ym. [14] puolestaan arvioi elämänvyöhykkeen sijaitsevan välillä 0.99–1.70AU.

Vaikka Venus ja Mars lukeutuvat mukaan tähän elämänvyöhykkeeseen, miksei niiltä löydy elämää? Monet parametrit vaikuttavat planeetan kykyyn ylläpitää elämää. Esimerkiksi Venuksen tiheä kaasukehä aiheuttaa pintalämpötilojen liiallisen nousemisen 464 Celsiuksen keskilämpötilaan. Marsin heikko ilmakehä taas pitää planeetan liian kylmänä. Eksoplaneetta voi myös esimerkiksi kiertää tähteä, joka loistaa kirkkaampana ja kuumempana kuin omamme, loistaa epäsäännöllisesti, tai itse eksoplaneetan kiertorata voi viedä sen välillä liian kauas tähdestä. Planeetta itse voi myös olla kuumempi ja sen kaasukehä tiheämpi, joka silloin puskee sen HZ:n kauemmas tähdestä. Pelkästään siis eksoplaneetan etäisyys sen tähdestä ei lupaa sen ylläpitävän elämää. [13]



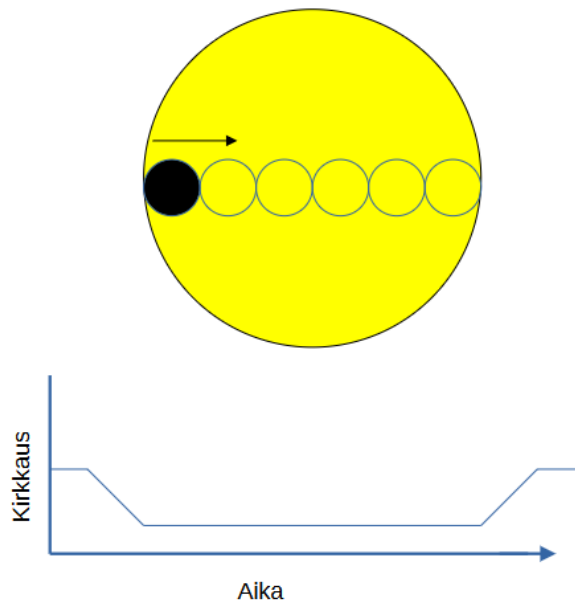
# 3 Eksoplaneettojen havainnointimenetelmät ja -teknologiat

Eksoplaneettojen havainnointi on edistynyt viimeisen 30 vuoden aikana suuresti. Yhä suurempi osa havainnointi projekteista suuntaa avaruuteen. Avaruudessa sijaitsevaa teleskooppia ei häiritse ilmakehän turbulenssi, huonot säätilat taikka lämpötilasta johtuva kohina. Tämän luvun on tarkoitus esittää menetelmät, joilla suurin osa eksoplaneetoista on tähän mennessä löydetty. Tämän lisäksi luku tuo esille muutamia teknologioita, joita tällä hetkellä käytetään eksoplaneettojen havaitsemiseen ja tutkimiseen. Tämä luku vastaa myös tutkielman ensimmäiseen tutkimuskysymykseen: *Millä menetelmillä ja teknologioilla tällä hetkellä etsimme eksoplaneettoja?*

## 3.1 Ylikulkumenetelmä

Yksi tämän hetken menestyksekkäimmistä tavoista löytää uusia sekä tutkia vanhoja eksoplaneettoja on ylikulkumenetelmä (engl. transit method). Sitä hyödynnettiin ensimmäisen kerran vuonna 1999 tutkimaan eksoplaneettojen kiertoratoja. Menetelmän avulla löydettiin ensimmäinen uusi eksoplaneetta vuonna 2002 [15]. Tähän mennessä noin 74% kaikista eksoplaneetta löydöksistä on tehty ylikulkumenetelmällä. [16]

Menetelmä pohjautuu eksoplaneettojen kiertoratoihin. Kun eksoplaneetta kiertää oman tähtensä ohi, peittää se osan tähestä säteilevästä valosta. Tämä pieni muutos tähden valokäyrässä voidaan havaita tarkoilla instrumenteilla maapallolla tai esimerkiksi avaruusteleskoopilla. Menetelmään liittyy kuitenkin rajoitteita, eikä se toimi jokaisessa tähtijärjestelmässä. [4] Kuvassa 3.1 on teoreettinen kuvitus tapahtumasta, jossa eksoplaneetta kiertää oman tähtensä edestä.



Kuva 3.1: Teoreettinen valokäyrä

Isompi ympyrä on tähti, musta täytetty pallo on eksoplaneetta ja ääri viivoitettut pallot kuvastavat eksoplaneetan kulkua tähden ohi. Kuvan alla on teoreettinen käyrä tähden kirkkaudesta. Aluksi tähti loistaa normaalilla kirkkaudellaan. Kirkkaus kuitenkin tippuu, kun eksoplaneetta alkaa kiertämään tähden edestä. Maksimaalinen kirkkauden pudotus on saavutettu, kun koko eksoplaneetta on tähden edessä.

Ylikulkumenetelmä ei kuitenkaan ole täydellinen tapa löytää eksoplaneettoja. Menetelmä vaatii esimerkiksi, että eksoplaneetan kiertorata on havaitsijaa kohti. Jos eksoplaneetta kiertää tähteä ympäri ns. sivuilla, ei sitä voida ylikulkumenetelmällä

havaita. Toisin sanoen, jotta eksoplaneetan voisi havaita menetelmällä pitää sen kulkea tähden ohi maapallosta katsottuna.

Toinen menetelmän ongelma on suuri määrä vääriä positiivisia tuloksia. Jopa 35% ylikulkumenetelmän tuloksista ovat olleetkin vääriä. Tämä johtuu tähden kirkkauteen vaikuttavista luonnollisista tekijöistä, jotka voivat havaitsijalle vaikuttaa ohi kulkevana eksoplaneettana. Todellisuudessa kyseessä voi olla esimerkiksi kaksoistähtijärjestelmän toinen himmeämpi tähti kulkemassa vain osittain kirkkaamman tähden ohi pimentäen koko järjestelmän kirkkautta maapallolta katsottuna.[4]

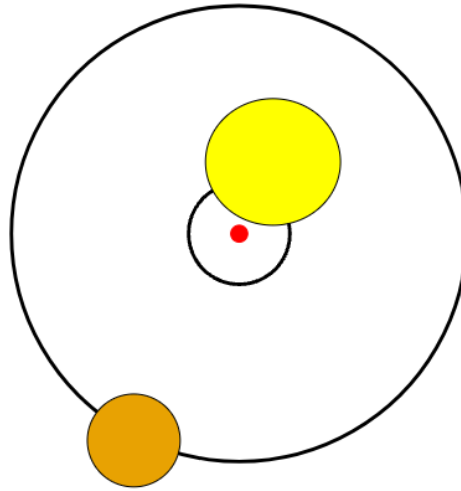
Ylikulkumenetelmällä voidaan laskea tähden ohi kulkevan eksoplaneetan halkaisija [4]. Mitä pienempi on planeetan halkaisija, sitä vaikeampaa on havaita sen tähteen aiheuttama kirkkauden vaihtelu. Varsinkin jos vain osa planeetasta peittää tähden valoa, voi olla vaikea havaita kirkkauden vaihteluja.

## 3.2 Säteisnopeusmenetelmä

Säteisnopeusmenetelmä (engl. Radial velocity method) on yksi varhaisimmista eksoplaneettojen löytämiseen käytetyistä tavoista. Ensimmäinen tällä menetelmällä löydetty eksoplaneetta oli vuonna 1995, vain kolme vuotta ensimmäisen varmistetun eksoplaneetan löytämisen jälkeen. Menetelmällä löydetty eksoplaneetta oli neljäs kaikista löydetyistä. [11] Kyseinen menetelmä oli eksoplaneettojen löytämisessä tuottoisin vielä vuoteen 2014 saakka [4]. Noin 19% kaikista tunnetuista eksoplaneetoista on löydetty tällä menetelmällä [11].

Kun tähtijärjestelmässä on muita kappaleita yhden keskustähden lisäksi, ei koko järjestelmän massakeskipiste ole tähden kohdalla. Jokainen kappale tähtijärjestelmässä vaikuttaa keskustähteen, joka aiheuttaa tähteen liikettä tai ns. heilumista. Tätä liikettä voidaan mitata ja tutkia. Tähden liike siis paljastaa, että tähtijärjestelmässä on muitakin kappaleita keskustähden lisäksi. Tämän liikkeen suuruus määräytyy muiden kappaleiden massan mukaan. [17] Sivun 14 kuva 3.2 on kuvitus

joka esittää tähden ja planeetan kiertoa yhteisen massakeskipisteen ympäri. Kuvan tähden kiertorataa on suurennettu selvennyksen vuoksi.



Kuva 3.2: Kuvitus tähden ja planeetan kiertoradoista yhteisen massakeskipisteen ympärillä

Säteisnopeusmenetelmä perustuu Doppler ilmiöön, jossa maapallosta poispäin tai maapalloa kohti liikkuva tähti aiheuttaa säteilyaaltoihin venymistä tai kasaantumista. [17] Tätä venymistä ja kasaantumista sekä muutoksia niissä voidaan mitata. Näistä muutoksista voidaan päätellä tähtijärjestelmässä olevan muu kappale tähden lisäksi.

Kuten ylikulkumenetelmä, ei säteisnopeusmenetelmä ole myöskään täydellinen tapa löytää eksoplaneettoja. Ensimmäinen ongelma menetelmässä nousee eksoplaneettojen massoista. Jotta tähteen aiheutuisi näkyvää ”heilumista”, täytyy järjestelmässä piilevien eksoplaneettojen olla tarpeeksi suuri massaisia. Esimerkiksi Jupiter aiheuttaa aurinkoon noin 13 m/s liikkeen, kun taas Maapallo 9 cm/s. European Southern Observatoryn ESPRESSO spektrografi-instrumentti pystyy havaitsemaan 10–20 cm/s liikkeen K ja G luokan tähdille. Aurinko on G luokan tähti. [18] Tämä

spektrografi ei ole tarpeeksi tarkka havaitakseen maapallon kokoisen eksoplaneetan aiheuttamaa heilumista auringon kaltaiseen tähteen. Heilumisen suuruuteen vaikuttaa siis eksoplaneetan ja tähden massojen suhde.

Lisää ongelmia menetelmän käyttöön luo eksoplaneetan kiertoradan kulma tarkkailijaan nähden, tähtijärjestelmän tähtien sekä eksoplaneettojen määrä sekä tarkkailtavan tähden etäisyys. Jos eksoplaneetta kiertää keskustähteä ”sivuttain” tarkkailijaan nähden, ei planeetta aiheuta tähteen edestakaista liikettä, joka voitaisiin havaita. Jos tähtijärjestelmään kuuluu monta eksoplaneetta tai keskustähden sijaan järjestelmä on kaksoistähtinen, on menetelmän vaikeampi havaita heilumista. Lisäksi kaukaisia tähtiä on myös vaikea havaita kyseisellä menetelmällä, koska tähden pieni heiluminen ei enää ole tunnistettavissa suurilla etäisyyksillä [4]. Kaukaisin tällä menetelmällä löydetty eksoplaneetta on 1540 parsekin päässä. Tämä etäisyys on verrattuna hyvin pieni, sillä kaukaisin löydetty eksoplaneetta on 8501 parsekin päässä.

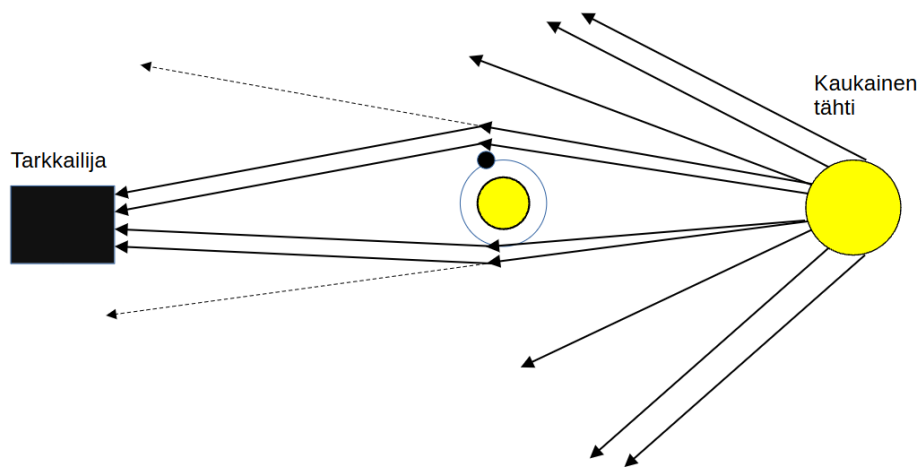
Säteisnopeusmenetelmällä voidaan laskea eksoplaneetan massa [4]. Jos eksoplaneettaan voidaan soveltaa säteisnopeus- sekä ylikulkumenetelmää, voidaan eksoplaneetan massan ja halkaisijan avulla laskea sen tiheys. Tämän tiheyden avulla voivat tutkijat tehdä oletuksia planeetan koostumuksesta ja arvioida sen perusteella tämän elinkelpoisuutta.

### 3.3 Muut menetelmät

Melkein 94% kaikista eksoplaneetoista on löydetty edellä mainituilla menetelmillä. Nämä eivät kuitenkaan ole ainoat menetelmät, joita tutkijat voivat käyttää. Gravitaatiolinssi-, suora kuvaus- ja kiertoaika ajoitus -menetelmillä (engl. microlensing, direct imaging ja transit timing) on löydetty muutama sata eksoplaneettaa. Tämä luku kuvastaa noin 5% kaikista löydettyistä eksoplaneetoista. [16] Loput 1% on löydetty menetelmillä, joihin tämä tutkielma ei perehdy. Suora kuvaus on alalla

nousussa oleva menetelmä ja luku neljä esittelee tulevia projekteja, jotka käyttävät tätä menetelmää [19].

Gravitaatiolinssimenetelmä perustuu massan aiheuttamaan muutokseen valonsäteissä. Kun tarkkailijan ja kaukaisen tähden väliin siirtyy suuri kappale kuten tähti, valo kaukaisesta tähdestä taipuu tämän kappaleen ympäri ja vahvistuu. Jopa ns. tähtienväliset planeetat (engl. rogue exoplanet) voivat toimia tällaisena valoa suurentavana massana. Kuva 3.3 havainnollistaa asiaa.



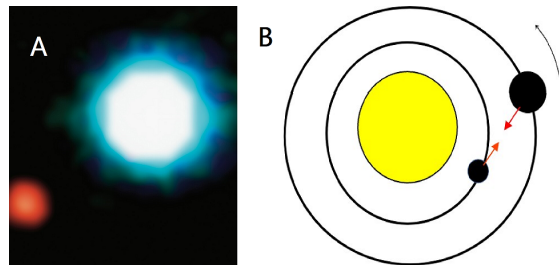
Kuva 3.3: Kuvitus valon kaartumisesta massan johdosta

Nuolet kuvastavat valoa. Edestä kulkevan tähtijärjestelmän massa siis ns. kerää valoa ja kohdistaa sitä. Tämä ”keräys” kirkastuttaa kaukaista tähteä. Tähten kirkastuminen voidaan havaita ja tämän avulla tutkia edestä kulkevaa kappaletta. Jos tähtijärjestelmässä on eksoplaneettoja, nämä eksoplaneetat auttavat kaartamaan valoa. Tätä eksoplaneetan kontribuutiota voidaan havaita. [4]

Suora kuvaus on menetelmä, jossa eksoplaneetoista itsestään otetaan kuvia. Tällä menetelmällä saadaan siis suoraan tietoa eksoplaneetasta, verrattuna edellä mainittuihin epäsuoriin menetelmiin. Suora kuvaus -menetelmään liittyy vielä paljon haasteita, sillä keskustähdestä säteilevä valo on moninkertainen verrattuna eksoplaneetasta heijastuvaan valoon. Jotta himmeistä eksoplaneetoista saataisiin kuvia, pitää keskustähden valoa jotenkin estää. Tähän tarkoitukseen on kehitetty mm.

koronagraafi-instrumentteja (engl. coronagraph). Myös esimerkiksi hyvin kuuman eksoplaneetan infrapunäsäteilyä voidaan mitata ja näin saada siitä kuva. [4], [20] Sivun 17 kuva 3.4A on eksoplaneetasta 2M1207b (Pienempi piste).

Viimeiset mainittavat menetelmät ovat ajoitusmenetelmät. Erilaisia ajoitusmenetelmiä on monia. Tähän mennessä tuottoisin niistä on kiertoaika ajoitusmenetelmä [16]. Tämä menetelmä perustuu muutoksien havaitsemiseen eksoplaneettojen kiertoajoissa. Jos tähtijärjestelmässä on enemmän kuin yksi eksoplaneetta, vaikuttavat nämä toistensa kiertoaikoihin aiheuttaen pientä muutosta niissä. Tämä johtuu eksoplaneettojen massojen ja niistä syntyvien painovoimien takia. Eksoplaneetan kiertäessä keskustähteään kulkee se lopulta toisen eksoplaneetan ohi. Tämä ”ohikulku” aiheuttaa nopeutumista sekä hidastumista eksoplaneetan kiertoajassa. Kuva 3.4B havainnollistaa eksoplaneettojen vaikutusta toisiinsa. Kuvassa sisemmän kiertoradan eksoplaneetan kiertoaika nopeutuu ulomman vaikutuksesta. [21]



Kuva 3.4: A: Ensimmäinen suora kuva eksoplaneetasta. Lähde: ESO. B: Kuvitus eksoplaneettojen vaikutuksista toisiinsa

### 3.4 Havainnointiteknologiat

Edellä mainittuja menetelmiä käyttäviä teleskooppeja on monenlaisia. Tällä hetkellä kuuluisimpien avaruusteleskooppien joukkoon kuuluvat myös seuraavaksi käsiteltävinä olevat TESS- ja JWST-avaruusteleskoopit. Mainittakoon vielä Kepler/K2. Kepler avaruusteleskooppi toi mukanaan uuden aikakauden eksoplaneettojen löytämisessä ja havaitsi toimintansa aikana yli 3000 eksoplaneettaa [16]. Kepler kuitenkin

lopetti toimintansa yli puoli vuosikymmentä sitten, joten sen käsittely jää tutkielman aiheen ulkopuolelle.

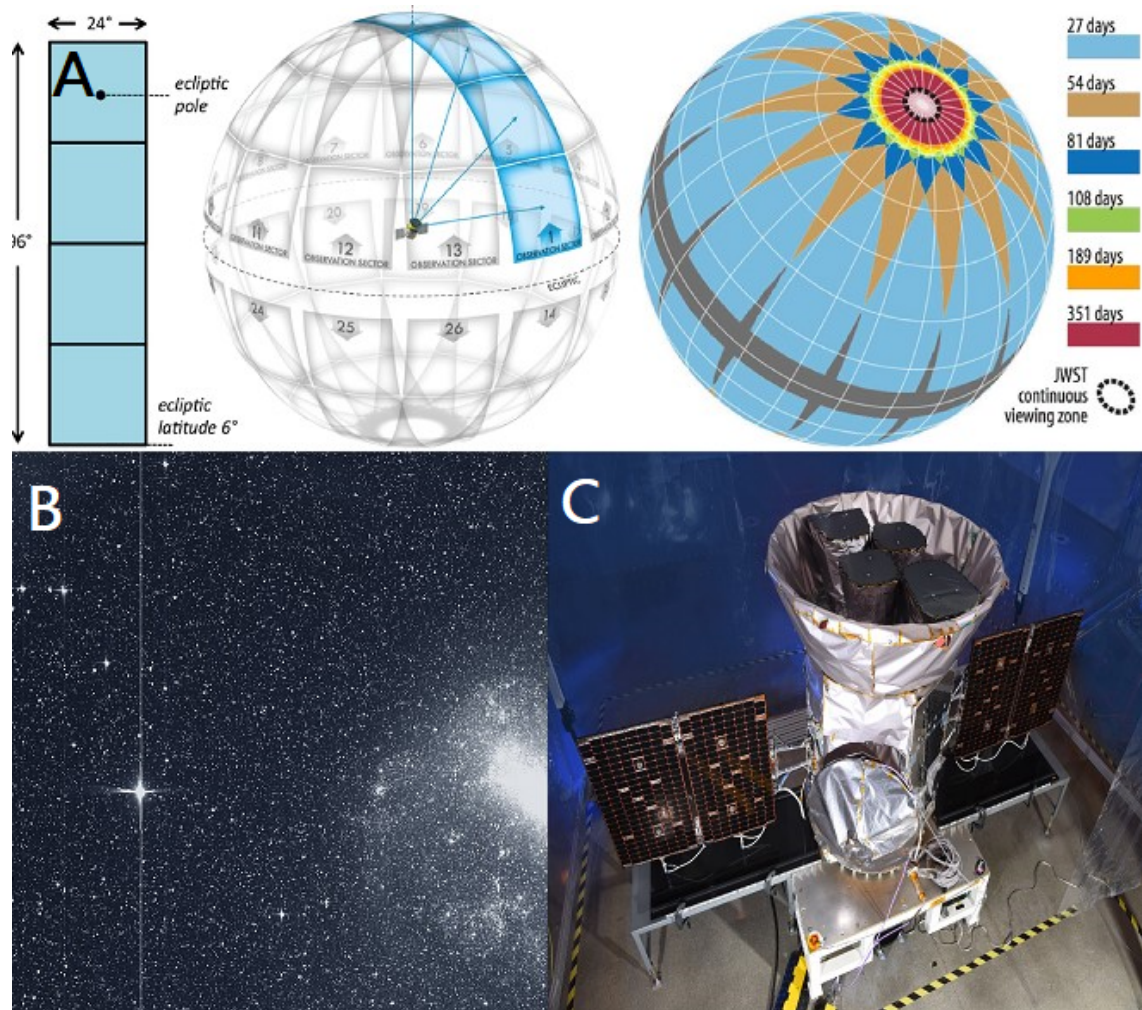
### 3.4.1 TESS

Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS) on NASAn 18. huhtikuuta 2018 laukaisema eksoplaneettoja etsivä avaruusteleskooppi. TESS sai alkunsa vuonna 2006 MIT:ssä, mutta NASA valitsi sen virallisesti projektiksi vasta 2013 [22]. TESS on kiertänyt maata noin 14 päivän kiertoradalla kohta 6 vuotta. Tämän aikana se on löytänyt 432 varmistettua, sekä 7138 kandidaattia eksoplaneetaksi. TESS on edelleen aktiivisena. [23]

TESSin alkuperäinen tarkoitus oli kuvata koko taivasta kahden vuoden ajan. Siinä missä Kepler kuvasi vain 0.25% taivaasta, TESS onnistui päätehtävässään kuvaamaan noin 75% taivaasta. Sen sijaan että TESS kuvaisi kaukaisia ja himmeitä tähtiä pieneltä osaa avaruudesta, kuten Kepler, TESS kuvasi noin 10-100 kertaa kirkkaampia tähtiä ympäri taivasta. TESSin päätehtävä oli kuvata yli 200 000 lähintä tähteä ja etsiä niistä ylikulkumenetelmällä eksoplaneettoja. Sivun 19 kuva 3.5A näyttää TESSin kuvaaman alueen sekä ajan, jonka jokaiseen taivaansektoriin käytetään. Eri ajat johtuvat kuvaamien segmenttien päällekkäisyyksistä. TESS käyttää jokaisen 26 segmenttiin kuvaamiseen 27 päivää. Kuva 3.5B taas näyttää ensimmäinen TESSin ottaman kuva. [22]

TESSin instrumentaatioon kuuluu neljä laajanäkökenttäistä kameraa. Jokainen kamera sisältää 7 optista elementtiä (erilaista linssiä) sekä neljän CCD:n kokoonpanon. Kameroiden päästökaista on noin 600–1000 nm. Niiden yhdistetty näkökenttä on 2300 neliöastetta. Satelliittiin kuuluu myös *Data handling unit* joka hoitaa kameroiden ottamien kuvien prosessoinnin. Kuvat lähetetään maapallolle kahden viikon välein, kun avaruusteleskooppi kiertää lähimpänä Maata. Kuva 3.5C on TESS satelliitista. Kuvassa ylhäällä näkyy edellä mainitut neljä kameraa. [22]





Kuva 3.5: A: TESSin kuvaama alue ja aika jota se käyttää kunkin segmentin kuvaamiseen. B: TESSin ensimmäinen kuva C: TESS-avaruusteleskooppi. Lähde: NASA

TESSin löytämiin eksoplaneettoihin, voidaan kohdistaa lisätutkimuksia jälkikäteen. Koska TESS etsii aurinkokuntaa lähellä olevia eksoplaneettoja voidaan lisätutkimukset suorittaa joko maasta käsin, tai muilla avaruusteleskoopeilla, kuten JWST:llä. Näiden lisätutkimusten avulla voidaan ensinnäkin varmistaa, että kyseessä todella on eksoplaneetta. Toiseksi lisätutkimuksilla voidaan varmistetusta eksoplaneetasta tunnistaa enemmän ominaisuuksia muilla tavoilla, kuten säteisnopeusmenetelmällä. Näin TESSin avulla löydettyjä eksoplaneetoista voidaan selvittää esimerkiksi halkaisija, massa, koostumus sekä mahdollisesti ilmakehän ominaisuuksia.

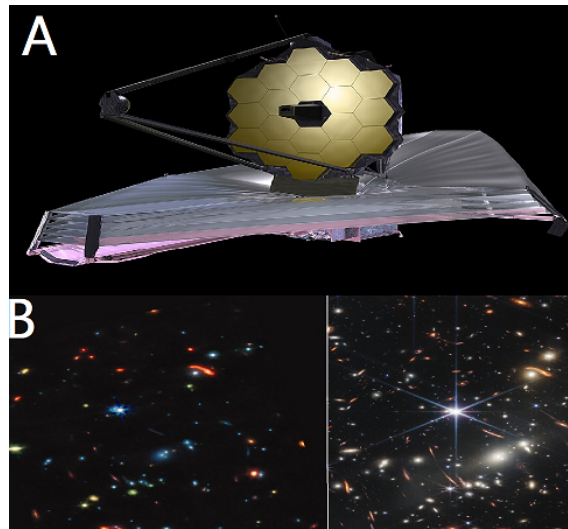
Ilmakehän koostumuksen tutkiminen voi antaa vinkkejä mahdollisesta elinkelpoisuudesta. Tällainen tarkempi tutkimus ei olisi mahdollista kaukaisille eksoplaneetoille.

### 3.4.2 JWST

James Webb Space Telescope (JWST) on 25. joulukuuta 2021 laukaistu avaruusteleskooppi. Teleskooppi rakennettiin yhteistyössä NASAn, ESA:n (European Space Agency) ja CSA:n (Canadian Space Agency) kanssa. Ensimmäiset puheet JWST:sta alkoivat jo 1980-luvulla, mutta avaruusteleskoopin valmistaminen kärsi monista viivästyksistä sekä budjetti ongelmista. JWST toimii infrapunaa aallonpituuksilla. [24] Kuva 3.6A on JWST-avaruusteleskoopista.

JWST-avaruusteleskoopin pääpeilin halkaisija on 6.5 metriä ja teleskooppi sisältää 4 eri instrumenttia: Near-infrared Camera (NIRCAM), Near-infrared spectrophotometer (NIRSPEC), Near-infrared imager and slitless spectrograph (NIRISS) sekä Mid-infrared instrument (MIRI). Näillä neljällä instrumentilla on yhteensä 17 erilaista tilaa. Esimerkiksi Near-Infrared cameralla on koronagraafitila, jota voidaan käyttää suuren kontrastin eksoplaneetta kuvaamiseen. JWST julkaisi ensimmäiset kuvat konfiguroiduilla instrumenteilla 12. heinäkuuta 2022. Kuva 3.6B on yksi näistä. [24]

Tällä avaruusteleskoopiprojektilla on neljä pääteemaa, tai tehtävää. 1) Etsiä valoa ensimmäisistä tähdistä ja galakseista, jotka syntyivät alkuräjähdyksen jälkeen. 2) Tutkia galaksien muodostumista ja evoluutiota. 3) Ymmärtää tähtien sekä planeettojen muodostumista. 4) Tutkia tähtijärjestelmiä ja elämän syntyä. Tutkielman kannalta tärkein näistä on viimeinen, eli tähtijärjestelmien ja näin myös eksoplaneettojen tutkiminen. JWST on tähän mennessä löytänyt mm. hiilidioksidia eksoplaneetta WASP-43b:n ilmakehästä sekä varmistanut TESSin kandidaatteja, kuten eksoplaneetan LHS 475 b. Kyseinen eksoplaneetta on maapallon kokoinen kiviplaneetta. [24], [25]



Kuva 3.6: A: JWST-avaruusteleskooppi. B: Ensimmäiset JWST:n ottamat kuvat. Vasemmalla MIRIn ja oikealla NIRCamin ottamat kuvat. Lähde: NASA

Yhdessä TESS ja JWST puskevat eteenpäin ihmiskunnan tietämystä tähtinaapurustomme tähtijärjestelmistä ja niissä kiertävistä eksoplaneetoista. TESS auttaa uusien eksoplaneettojen löytämisessä ja mm. JWST auttaa varmistamaan nämä kandidaatit. Varmistettuun eksoplaneettaan voidaan ohjata lisätutkimusta, jollaista JWST voi suorittaa tutkiessaan eksoplaneetan ilmakehän koostumusta. Yhdessä nämä nykyajan modernit avaruusteleskoopit päästävät meidät lähemmäs ja lähemmäs vastausta kysymykseen: *Onko muualla avaruudessa elämää?*

## 4 Tulevaisuuden teknologiat

NASAlla on kirjoitushetkellä yhdeksän aktiivista avaruusteleskooppia [26]. Vaikka maanpäällisiä teleskooppeja on monia ja monenlaisia, eivät ne pysty samankaltaiseen tieteelliseen tutkimukseen, kuin avaruusteleskoopit. Tästä syystä tutkijat ja insinöörit ympäri maapalloa työskentelevät kehittääkseen uusia, parempia ja tarkempia teleskooppeja, joilla ihmiskunta voi kurkistaa muihin maailmoihin yhä tarkemmalla silmällä.

Tämän luvun on tarkoitus vastata tutkielman toiseen tutkimuskysymykseen: *Mitkä ovat tulevaisuuden teknologiat eksoplaneettojen havaitsemiseen ja tutkimiseen?* Alaluvut käsittelevät projekteja, jotka on tarkoitus toteuttaa tämän vuosikymmenen sisällä, seuraavan vuosikymmenen aikana sekä mahdollisesti hieman kauempana ihmiskunnan tulevaisuudessa. Nämä projektit ovat Nancy Grace Roman Space Telescope (Roman), Habitable Worlds Observatory (HWO) sekä Solar Gravitational Lens-tehtävä (SGL).

### 4.1 Nancy Grace Roman Space Telescope

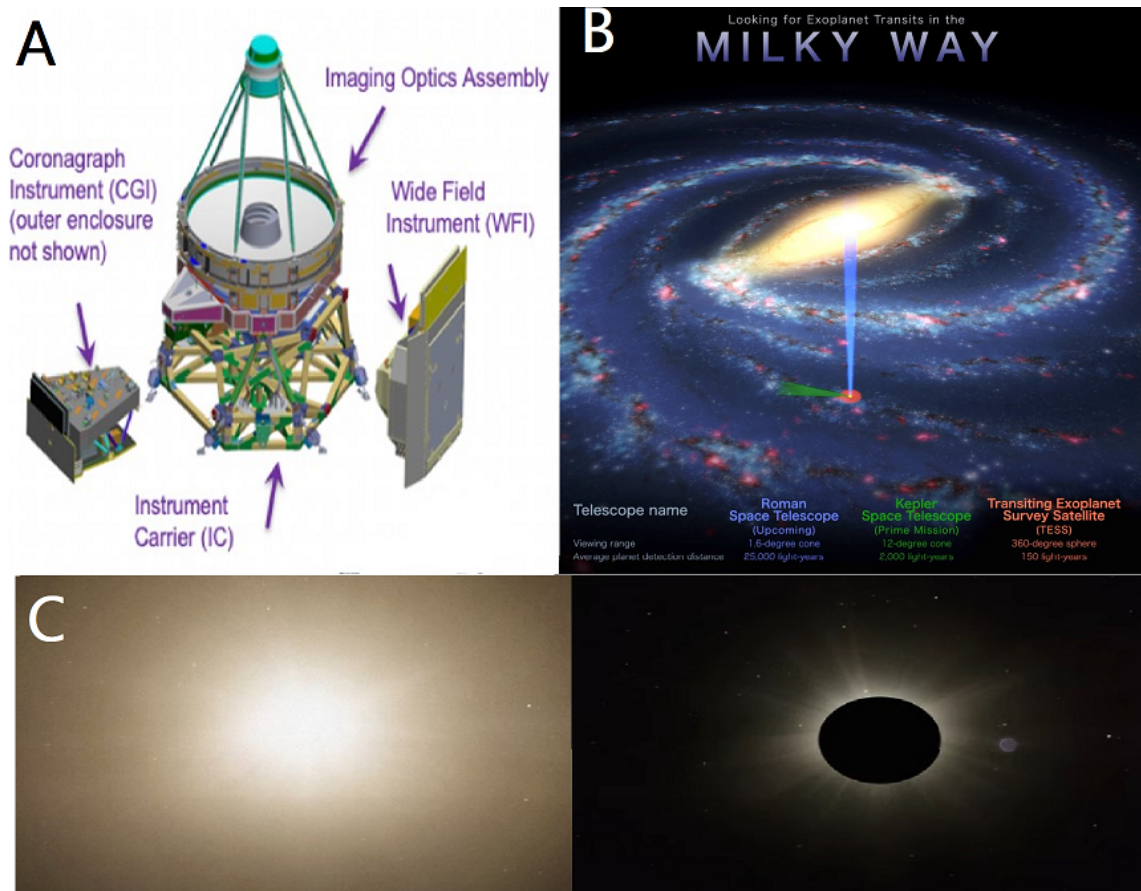
Nancy Grace Roman Space Telescope (lyh. Roman) on NASAn tuleva lippulainen avaruusteleskooppiprojekti, joka on määrä laukaista avaruuteen vuonna 2027. Teleskooppi tunnettiin ennen nimellä WFIRST, mutta nimi vaihdettiin Romaniksi vuonna 2020. Teleskoopin on tarkoitus toimia myös teknologiademonstraationa

ehdotettua HWO-avaruusteleskooppi varten. Roman sisältää kaksi instrumenttia: Wide Field Instrument (WFI) ja Coronagraph Instrument (CGI). [27]

Romanin päätehtäviä ovat pimeän energian ja aineen tutkimus sekä eksoplaneettojen tutkiminen ja löytäminen. Lisäksi Roman tutkii protoplanetaarisia kiekkoja. Roman käyttää eksoplaneettojen tutkimiseen CG-instrumenttiaan ja gravitaatiolinssimenetelmää. Romanin ennustetaan havaitsevan eksoplaneettoja paremmalla kontrastilla, kuin jopa 30 metrin halkaisijan omaavat maaperäiset teleskoopit. Teleskoopin ei kuitenkaan ennusteta saavuttavan HWO:n vaatimaa  $10^{10}$  kontrastia. [28]

Roman-avaruusteleskooppi on kooltaan 2.4 metriä. Avaruusteleskoopin kaksi instrumenttia on sijoitettu optisen kokoonpanon sivuille kuvan 4.1A mukaisesti. WFI mahdollistaa eksoplaneettojen löytämisen gravitaatiolinssimenetelmää käyttäen. Menetelmää käyttäen ennustetaan Romanin löytävän noin 100 tähden sidottua eksoplaneettaa ja noin 16 tähtien välistä eksoplaneetta per kuukausi. Romanin ennustetaan myös löytävän jopa 100 000 eksoplaneettaa käyttäen ylikulkumenetelmää. Kuva 4.1B esittää Romanin katselukulmaa sekä etäisyyttä Kepleriin ja TESSiin verrattuna. Romanin WFI toimii  $0.48\text{--}230\mu\text{m}$  aallonpituuksilla. [27]

Romanin CGI on tarkoitus saavuttaa  $10^{8-9}$  kontrasti. Tämä tarkoittaa, että Roman pystyy tutkimaan eksoplaneettoja, jotka ovat 20–100 kertaa himmeämpiä, kuin ne joita nykyiset maanpäälliset teleskoopit pystyvät tutkimaan. Suorituskyvyn ennusteet ovat esittäneet, että Romanin CGI pystyisi tutkimaan eksoplaneettoja, jotka ovat miljardeja kertoja himmeämpiä, kuin niiden keskustähdet. Tämä tapahtuisi myös vain 0.15 kaarisekunnin etäisyydellä keskustähdestä. Roman voi myös mahdollisesti ottaa ensimmäisen kuvan Jupiter analogista (Aurinkokunnan ulkopuolinen Jupiterin kaltainen eksoplaneetta) heijastuneessa valossa. [27], [29] Koronagraafi toimii yksinkertaistettuna kuin kiekko, joka estää tähdestä säteilevän valon ja jättää tähden viereiset pimeämmät alueet näkyviin. Sivun 24 kuva 4.1C havainnollistaa asiaa, muttei kuitenkaan kuvasta juuri Romanin CGI:n toimintaa. CGI käyt-



Kuva 4.1: A: Kaavio Romanin instrumentaatio kokoonpanosta. B: Romanin, Keplerin ja TESSin katselusuunnat ja etäisyydet. C: Kuvitus koronagraafin toiminnasta. Oikealla pimennetty keskustähti tuo esiin viereisen eksoplaneetan. Lähde: NASA

tää hyväksi ensimmäistä kertaa myös muovautuvia peilejä. Nämä peilit sisältävät tuhansia pieniä mäntiä, joiden avulla peilin muotoa voidaan hienosäätää vähentämään heijastumisesta johtuvia vääristymiä. [29] Romanin GCI toimii 525 – 825nm aallonpituuksilla[27].

Romanin on siis tarkoituksena havaita ja tutkia monia eksoplaneettoja sekä toimia tärkeänä teknologia demonstraationa ja etappina tulevia avaruusteleskooppiprojekteja varten. Romanin ennustetaan löytävän eksoplaneettoja, jotka kiertävät keskustähteään paljon kauempana, kuin suurin osa nykyisistä löydöistä. Roman avaruusteleskooppi ottaa ison askeleen kohti eksoplaneettojen suoraa kuvausta.

## 4.2 Habitable Worlds Observatory

Habitable Worlds Observatory (HWO) on konsepti joka toimisi NASAn seuraavana lippulaivatehtävänä Romanin jälkeen. Suositus sen suorittamisesta tuli vuoden 2020 National Academiesin raportista *Pathways to Discovery in Astronomy and Astrophysics for the 2020s*. Raportti suosittelee noin 6 metrin halkaisijan omaavan avaruusteleskoopin rakentamista. HWO on täyttämässä tätä suositusta. HWO-konsepti rakentaa aiempien *Large Ultraviolet Optical Infrared Surveyor (LUVOIR)* ja *Habitable Exoplanet Observatory (HabEx)* konseptien päälle. Koko tehtävä on vasta alussa ja muutoksia on varmasti vielä edessä. [30]

HWO:n on tarkoitus olla ultravioletilla , näkyvän valon sekä infrapuna-aallonpituuksilla toimiva teleskooppi. Se tulee olemaan ensimmäinen juuri eksoplaneettojen tutkimiseen suunniteltu sekä rakennettu avaruusteleskooppi. NASA on perustanut tehtävälle jo kaksi komiteaa: *The science, technology, architecture review team (START)* sekä *Technical Assessment Group (TAG)*. Näiden komiteoiden on tarkoitus puskea tehtävän vaatimaa teknologiaa sekä edistää sen tiedetavoitteita, kunnes ne ovat valmiita. HWO rakentaa HUBBLE:n, JWST:n sekä Romanin tekemän tutkimuksen ja edistyksen päälle. [30]

Yksi HWO:n tavoitteista on löytää ainakin 25 mahdollisesti elinkelpoista eksoplaneettaa, sekä tutkia niitä. Tähän tutkimukseen sisältyisi esimerkiksi planeetan ilmakehän spektrin tutkiminen. Tästä spektristä voitaisiin tunnistaa biosignatuureja (engl. Biosignatures). Nämä biosignatuurit voivat olla mm. happea tai metaania eksoplaneetan ilmakehässä. Tällaiset kaasut reagoivat nopeasti ja niiden pysyvä ”sisältyminen” planeetan ilmakehässä voi merkitä niiden syntymistä esimerkiksi elävien organismien metabolismin tuotoksena. Myös keinotekoisesti tuotetut kaasut voivat toimia biosignatuureina. CFC-yhdisteet (kloorista, fluorista ja hiilestä muodostuvat yhdisteet) ovat tällaisia. Niitä tuotetaan maapallolla vain keinotekoisesti ja niiden löytäminen eksoplaneetan ilmakehästä voisi vahvasti merkitä elämää. [13], [19]

HWO on selvästi askel lähemmäs elämän löytämistä, sekä eksoplaneettojen tutkimusta. Teleskoopin on määrä suoraan kuvata eksoplaneettoja  $10^{10}$  kontrastilla, kuten ehdotettu HabEx-tehtäväraportissa. Projektin onnistuminen vaatii vielä kuitenkin edistymistä monelta teknologian alalta, kuten koronagraafien, saavuttaakseen sen kaikki tavoitteet. Lisäksi esimerkiksi itse se miltä avaruusteleskooppi näyttää ja mitkä ovat sen lopulliset spesifikaatiot ei vielä ole päätöstä. Työ päämäärän onnistumista kohti on jo alkanut ja NASA on jo julkaissut mahdollisia tähtikohteita, joita HWO voisi tutkia. [31]

### 4.3 Solar Gravitational Lens

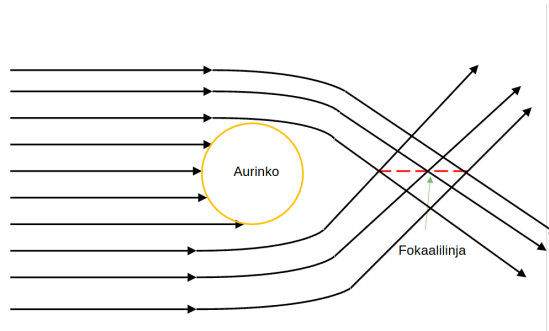
Viimeinen tutkielmassa esiteltävä teknologia tai projekti on Solar Gravitational Lens tehtävä (SGL). SGL on esitetty teoreettinen tehtävä noin 550 AU:n päähän auringosta, jonka avulla ihmiskunta voisi ottaa hyvin tarkkoja kuvia ennalta määritellystä eksoplaneetasta. Kyseisestä eksoplaneetasta, joka sijaitsee 30 parsekin päässä, voitaisiin ottaa kuvia noin 10 kilometrin resoluutiolla. Tällä resoluutiolla voitaisiin eksoplaneetan pinnalta erottaa yksityiskohtia, kuten valtameriä, mantereita, metsiä, pinnanmuotoja ja jopa mahdollisia elämänmerkkejä. [3]

SQL-tehtävä ehdottaisi matkan kestävän edellä mainitulle etäisyydelle noin 25–40 vuotta. Tämä kuitenkin vaatii harppauksia teknologiassa, sillä esimerkiksi Voyager avaruusalus lensi ulos aurinkokunnasta noin 3.5 AU per vuosi nopeudella. Jotta kyseinen aikaraja saavutettaisiin, pitäisi SQL-tehtävän avaruusaluksen lentää noin 20–30 AU per vuosi nopeudella. Teorisoituun tehtävään tarvittavaa teknologiaa ei siis vielä ole kehitetty loppuun asti. [3], [32]

SQL-tehtävän idea pohjautuu gravitaatiolinssimenetelmään. Tehtävässä olisi tarkoitus lähettää keskikoinen avaruusteleskooppi yli 550 AU:n päähän auringosta, ja kääntää teleskooppi aurinkoa kohti. Tutkittava eksoplaneetta sijaitaisi auringon vastakkaisella puolella. Tämä mahdollistaisi auringon toimivan ns. suurennuslasina ja

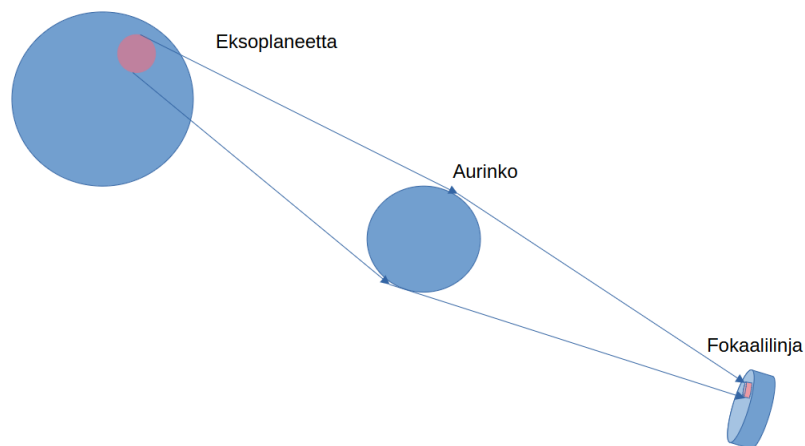


gravitaatiolinssimenetelmässä hyväksikäytettävänä välikappaleena. Eksoplaneetasta säteilevä valo kaartuisi auringon ympäriltä kohdistuen sen fokaalilinjaan (engl. focal line). Kyseisessä tapauksessa fokaalilinja alkaisi 547 AU etäisyydellä auringosta ja jatkuisi ainakin 1500 AU:n etäisyyteen. Kuva 4.2 havainnollistaa asiaa.



Kuva 4.2: Kuvituskuva SGL:n toiminnasta ja fokaalilinjasta

Auringon kaartama valo kohdistuu sylinterin muotoiseen alueeseen, jonka halkaisija on noin 1.3 kilometriä. [3] Kun avaruusalus on saapunut fokaalilinjalle, se jatkaa matkaa auringosta poispäin samalla kuvatun eksoplaneettaa pikseli pikseliltä. Tämä sylinteri kuvastaa ikään kuin kaukaista eksoplaneettaa. Piste sylinterissä on piste eksoplaneetalla. Kuva 4.3 esittää sylinterin. Tämä jokaisen pikselin kuvaamisen enustetaan kestävän 1 metrin halkaisijan teleskoopilla noin vuoden, jos pikseleitä on 1000. [3]



Kuva 4.3: Kuvitus fokaalilinjasta

Avaruusteleskoopin suositeltu koko on 1–2 metriä. Jotta auringosta säteilevä valo ei aiheuta häiriötä kuviin, on avaruusteleskoopissa myös pakko olla koronagraafi. Teleskooppia kantavan sukkulan on myös pakko kantaa mukanaan tarvittava instrumentaatio esimerkiksi liikkumaan fokaalilinjalla pikselistä pikseliin, lähettämään kuvia yli 600 AU:n etäisyyteen ja tietysti operoimaan teleskooppia autonomisesti. Tähän viimeiseen kohtaan on ehdotettu tekoälyä ja koneoppimista. [3]

Jotta tarvittava nopeus aurinkokunnasta poistumiseen tarpeeksi lyhyessä ajassa saavutettaisiin, ehdottaa tehtävätutkielma aurinkopurjeen käyttämistä. Aluksen hyötykuorman pitäisi olla mahdollisimman kevyt ja tehtäväraportissa on sen painoksi ehdotettu alle 100 kiloa. Tämäkin tuo tietysti vaikeuksia, sillä avaruusaluksen tarvitsee käyttää aurinkoa suorittaakseen aurinkoavustetun ponnahtuksen. Tämä vaatii aluksen kulkemaan hyvin läheltä aurinkoa, joko vaati alukselle painavia lämpösuojia, jotka voivat viedä suuren osan hyväksytystä kokonaismassasta. Aurinkopurjeen koon ja massan suhde vaikuttaa aluksen nopeuteen. Jotta avaruusalus saavuttaa halutun 20 AU per vuosi nopeuden, tarvitsee suhteen olla vähintään  $900 \text{ m}^2/\text{kg}$ . eli siis 900 neliometriä, per kilogramma. Esimerkiksi 200m x 200m purje voisi siis kantaa noin 44 kg sukkulan. Tähän sisältyy myös itse purjeen massa. Tämä on yksi tehtävän suurimmista haasteista. [3]

Konsepti monista avaruusaluksista yhden sijaan tuli myös esille tutkimuksessa. Tässä konseptissa fokaalilinjalle lähetettäisiin joukko toistensa kanssa kommunikoi-  
via aluksia, joilla jokaisella olisi oma tehtävänsä. Yksi alus voisi hoitaa kuvaamisen, toinen kommunikoinnin maan kanssa ja kolmas kuvien prosessoinnin. Alukset voisivat myös mahdollisesti liittyä toisiinsa suorittamaan vaativampia tehtäviä. Tämä lähestymistapa vähentäisi yhden aluksen massaa ja näin vaadittavaa aurinkopurjeen kokoa. Lisäksi totaalinen aluksen menetyksen riski on pienempi, sillä alusjoukko voisi operoida ilman kaikkia osiaan. [3]

Yhden avaruusalusjoukon laukaisemisen lisäksi ehdotettu tehtävä voisi hyväksi-

käyttää myös ns. *String-of-pearls* käsitettä, jossa fokaalilinjalle lähetettäisiin joka vuosi uusi joukko aluksia. Tämä vähentäisi vielä enemmän riskiä, sillä joka vuosi lähetetyt halvat alukset voisivat korvata puuttuvia osia vanhoista. Tämä mahdollistaisi myös teknologisten innovaation integroinnin uusimpiin aluksiin. Lähestymistapa helpottaisi myös kommunikointia maapallon kanssa. [3]

Vaikka ehdotettuun tehtävään liittyy paljon haasteita, on teorisoitu, että se kuitenkin olisi mahdollinen tämän vuosisadan loppupuoliskolla. Tehtävä pääsikin NASAn NIAC (NASA Innovative Advanced Concepts) 2020 viimeiseen vaiheeseen. Tutkimus ehdotti monia teknologiademonstraatioita aluksen nopeuteen liittyen. Esimerkiksi nopeat avaruussukkulat aurinkokunnan kaukaisimpiin nurkkiin voisivat toimia hyvinä testeinä tehtävää varten sekä suorittaa tutkimusta alueissa jonne vasta harvat ihmiskunnan lähettämät sukkulat ovat saapuneet. [3], [32]

# 5 Yhteenveto ja pohdinta

Tutkielma on tarkastellut eksoplaneettojen havainnoinnissa käytettyjä menetelmiä sekä näitä hyväksikäyttäviä avaruusteleskooppeja. Tutkielman viimeisen luvun on tarkoitus tuoda yhteen tiedonhaun tulokset sekä vastata tutkielman alussa esitettyihin tutkimuskysymyksiin. Lopuksi esitetään vielä kirjoittajan omaa pohdintaa aiheesta.

## 5.1 Yhteenveto

Tutkielma tarkasteli eksoplaneettojen havainnointia laaja-alaisesti aina historiasta tulevaisuuteen. Menetelmät, jotka dominoivat alalla esitettiin, sekä myös hieman vähemmän menestyksekkäät menetelmät tarkasteltiin. Näistä syntyi vastaus ensimmäisen tutkimuskysymyksen: *millä menetelmillä ja teknologioilla tällä hetkellä etsimme eksoplaneettoja?* Tutkielma tarkasteli menestyksekkäimmät menetelmät, kuten ylikulku-, säteisnopeus- sekä gravitaatiolinssimenetelmät. Ylikulkumenetelmässä tutkitaan eksoplaneetan ylikulkua tähden päältä, säteisnopeusmenetelmässä eksoplaneetan tähteen aiheuttamaa pientä heilumista ja gravitaatiolinssimenetelmässä taas kaukaisen tähden edestä kulkevan tähtijärjestelmän aiheuttamaa valon kaartumista. Myös hieman vähemmän menestyksekkäät, mutta tulevaisuuden kannalta tärkeät menetelmät, kuten suora kuvaus - ja ajoitusmenetelmät käytiin tutkielmassa lävitse. Etenkin suora kuvaus on tulevaisuuden kannalta tärkeä, sillä se on muiden epäsuorien menetelmien sijaan suora menetelmä, jossa itse eksoplaneetasta saadaan

kuva. Tämä suora lähestymistapa on tärkeä elämän etsimisen kannalta. Tämä menetelmä tuo ihmiskunnalle lopulta maapallosta otettujen kuvien kaltaisia näköaloja vieraista planeetoista ja niiden mahdollisista elinoloista. Liitteeseen A on koottu taulukko menetelmistä, joka tiivistää niiden tärkeimmät ominaisuudet.

Ensimmäisen tutkimuskysymyksen toiseen osaan, eli millä **teknologioilla tällä hetkellä etsimme eksoplaneettoja**, vastattiin tutkielmassa seuraavaksi. Tutkielma kävi lävitse tällä hetkellä operoivat avaruusteleskoopit kuten TESS ja JWST, sekä mainitsi jo käytöstä poistetun KEPLERin. TESS käyttää hyväkseen ylikulkumetelmää uusien eksoplaneettojen löytämiseen, kun taas JWST käyttää hyväkseen koronagraafi instrumenttiaan ottaakseen kuvia eksoplaneetoista. JWST tutkii myös eksoplaneettojen ilmakehiä spektrografiaalla ja on esimerkiksi löytänyt hiilidioksidia eksoplaneetan ilmakehästä.

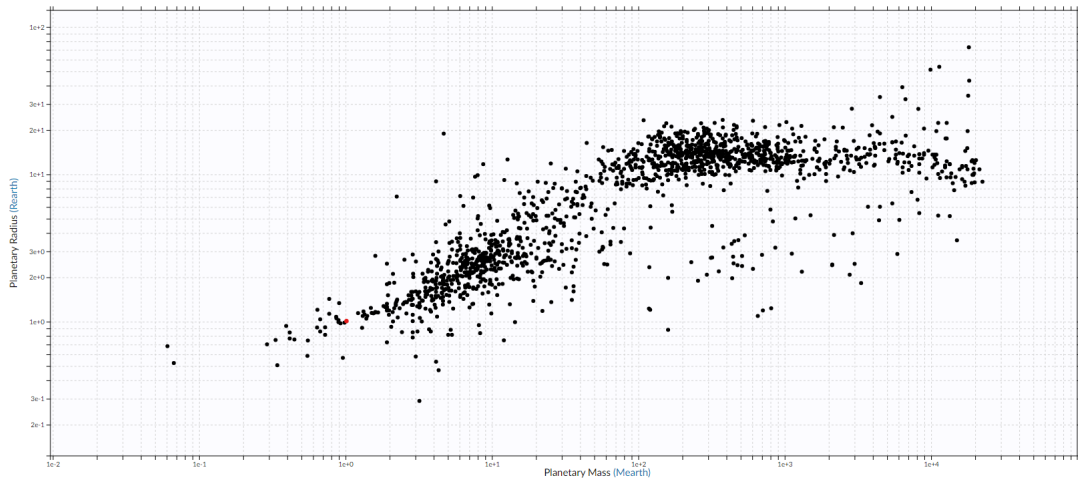
Tutkielman toiseen tutkimuskysymykseen eli *Mitkä ovat tulevaisuuden teknologiat eksoplaneettojen havaitsemiseen ja tutkimiseen?* vastattiin luvussa neljä. Tutkielma toi esille jo rakenteilla olevan Nancy Grace Roman avaruusteleskoopin, tulevaisuuden suunnitteilla olevan Habitable Worlds Observatoryn, sekä teorisoidun tehtävän Solar Gravitational Lensille, joka mahdollistaisi tarkkojen kuvien ottamisen eksoplaneetoista 30 parsekin päässä. Roman toimii teknologiademonstraationa voimakkaalla koronagraafillaan ja pyrkii jopa  $10^9$  kontrastiin eksoplaneettojen suorassa kuvaamisessa. HWO on taas ensimmäinen juuri eksoplaneettojen kuvaamiseen suunniteltu avaruusteleskooppi, ja sen suunniteltu kontrasti saavuttaisi jopa  $10^{10}$ . Eksoplaneettojen suora kuvaaminen onkin siis selvä askel eteenpäin niiden tutkimisessa. Tämä johtaa tutkielmassa viimeisenä esiteltyyn suunniteltuun tehtävään, jossa yli 550 AU:n etäisyydelle lähetettäisiin joukko satelliitteja, jotka voisivat ottaa hyvin tarkkoja kuvia kaukaisesta, ennalta valitusta eksoplaneetasta. Vaikka tähän teorisoituun tehtävään liittyy paljon riskejä ja teknologista valmiutta tähän ei vielä ole, on tehtävä suunta kohti parempaa muiden maailmojen ymmärrystä, sekä

elämän löytämistä. Liitteessä B on taulukko tutkielmassa esitellyistä avaruussatelliiteista sekä niiden ominaisuuksista.

## 5.2 Pohdinta

Tutkielmaa kirjoittaessa on mieleeni ponnahtanut mitä erilaisempia ideoita aina uudeltaisesta avaruuskilpailusta elämän etsimiseen liittyen, taikka unelmista löytää ”oma” eksoplaneetta. Vastaus kysymykseen löytyykö avaruuden paljoudesta muuta elämää, on alkanut kiehtoa minua enemmän ja enemmän tutkielmaa tehdessä. On sääli miten suhteessa vähän ihmiskunta käyttää rahoitusta avaruuden ja muiden maailmojen tutkimiseen. Esimerkiksi NASAn saama budjetti vuonna 2020 oli n. 0.5% koko USA:n liittovaltion budjetista. Avaruuden ja eksoplaneettojen tutkiminen ei auta vain tähtitieteen tutkimuksen alaa. Kamerat ja kaikki avaruusteleskooppissa käytettävät instrumentit voisivat hyödyntää myös muita tieteen aloja, ja näillä projekteilla saadut tutkimustulokset myös edesauttavat niitä. Esimerkiksi tutkimalla muita planeettoja ja niiden syntyä voisi ihmiskunta saada ennalta näkemättömän kuvan omaan alkuumme ja miten elämän rakennuspalaset loksahivat juuri meidän kohdallamme paikoilleen.

Vaikka avaruusmatkailu on vielä mahdollisesti satojen tai jopa tuhansien vuosien päässä, ovat eksoplaneetat lopulta ihmiskunnan seuraava eturintama. Olemme löytäneet sekä tutkineet vasta murto-osan lähi-tähtinaapurustomme tähdistä ja elämää, tai elinkelpoisia planeettoja voisi löytyä kaikkialta. On uskomukseni, että lopulta ihmiskunta suuntaa tähtiin ja muille planeetoilla ja työ, jota teemme nyt tutkiessamme näitä eksoplaneettoja luo kulmakiviä vuosisatojen päässä matkustaville ihmisille. Sivulla 33 on kuvaaja, jossa x-akselilla on massa ja y-akselilla ympärysmitta maapalloon verrattuna. Kohdassa (1,1) on maapallo. Kuvaajasta huomaa miten suurin osa eksoplaneetoista, joille tiedämme massan ja ympärysmitan on maapalloa suurempia koon ja massan suhteen. Onkin siis tärkeää, että jatkamme tutkimusta,



Kuva 5.1: Kuvaaja eksoplaneetoista joille tiedämme ympärysmittan sekä massan. Lähde: Exoplanet.eu

ei vain uusien eksoplaneettojen löytämiseen, mutta myös jo löydettyjen ymmärtämiseen liittyen. Voimme oppia suuresti näistä jo löydettyistä eksoplaneetoista.

Tutkielmassa tuli esille miten suora kuvauksen tärkeys on nousussa. Suurimmat eksoplaneettojen tutkimiseen liittyvät projektit pyrkivät ainakin jotenkin ottamaan kuvia jo löydettyistä eksoplaneetoista. Tämän huomaa mm. koronagraafinstrumenttien sisältymisen yhä useammasta avaruusteleskoopista. Tämän lisäksi myös alternatiiviset menetöt, joita tutkielmassa ei käyty lävitse ovat nousussa, kuten aurinkovarjot (engl. star shades). Nämä toimivat koronagraafien tavoin estäen auringon valoa. Eksoplaneetoista suorien kuvien saaminen voi myös innostaa yleisöä, joka ei kuulu astronomian tutkimukseen tai yhteisöön. Tämä voi esimerkiksi nostattaa erilaisten eksoplaneettojen havainnointiin liittyvien projektien saamaa rahoitusta. Kuten tutkielmassa tuli esille JWST-avaruusteleskoopin rahoitus ylitti arvioidun budjetin monia kertoja, eikä projekti melkein saanut tarvittavaa rahamäärää. Tällainen rahoituksen puute voi suuresti hidastaa tarvittavien teknologioiden kehitystä ja näin siirtää maapallon ulkopuolisen elämän löytämistä. Mielestäni olisi hullua olettaa, ettei muualta löytyisi elämää ottaen huomioon tutkielmassa esille tulleen eksoplaneettojen teorisoidun esiintymismäärän, sekä havaittavan maailman-

kaikkeuden koon ja tähtien määrän. Joku voisi kuitenkin argumentoida, onko viisasta koittaa etsiä taikka kommunikoida ulkopuolisen elämän kanssa. Mitä jos he näkevät meidät, kuin me näemmä muurahaisyhteiskunnan.

Tutkielman lopussa esille tullut Solar Gravitational Lens -tehtävä vaikuttaa paperilla hyvältä vaihtoehdolta tulevaisuuden eksoplaneettojen tutkimiseen, mutta tehtävään liittyy paljon haasteita. Vielä kehityksessä olevan teknologian lisäksi esimerkiksi pitkä tehtäväaika (25-50 vuotta) saa minut miettimään muutamaa ongelmaa. Yli 25 vuotta kestävä lento SQL:lle on pitkä aika, jona teknologian kehitys ei pysähdy. Mitä jos tehtäväaikana saadaan jokin uusi läpimurto alalla? Toinen ongelma on sen tavoite. Tehtävä on tarkoitus lentää ja ”parkkeerata” teleskooppi juuri oikeaan linjaan. Kyseinen kallis ja pitkä tehtävä siis kuvaa vain yhtä eksoplaneetta ja ”lennosta vaihtaminen” ei ole mahdollista. Käyttäen tutkielman materiaalissa esille tullutta teoriaa sain itse laskettua, että viidenkymmenen lähimmän eksoplaneetan kuvaamiseen kymmenen kilometrin pikseli tarkkuudella vaadittaisiin noin 10.2 kilometrin halkaisijan teleskooppia. Tämä teleskooppi pystyisi ottamaan yhtä tarkkoja kuvia eksoplaneetoista, jotka ovat 5 parsekin päässä maapallosta. Tällainen teleskooppi, vaikkakin iso, kallis ja vaikea projekti, ei olisi lähellä 90 km halkaisijan teleskooppia, josta materiaali mainitsi, mutta olisi sovellettavissa kaikkiin 5 parsekin etäisyydellä sijaitseviin eksoplaneettoihin, uusien ja vanhoihin (jos niitä ylipäättänsä pystyy kuvaamaan).

Kaiken tämän kirjoitettuani, mielestäni olisi siis järkevää suunnata jatkotutkimusta yhä parempien koronagraafien ja muiden teknologioiden suunnitteluun ja eteenpäin viemiseen, jotka mahdollistaisivat eksoplaneettojen suoran kuvaamisen ja paremman tutkimisen. Vaikka eksoplaneettoja on hyvä löytää lisää, uusilla menetelmillä ja teknologioilla voimme löytää yhä enemmän maapallon kaltaisia eksoplaneettoja, olisi kuitenkin hyvä myös keskittyä tutkimaan jo löytyneitä eksoplaneettoja ja



selvittää, voisiko niiltä löytyä elämää. Ensimmäinen tarkka kuva toisesta planeetasta on varmasti maailmaa mullistava tulevaisuuden tapahtuma.

Satojen tai tuhansien vuosien päästä, ihmiset tulevat varmasti katsomaan meidän aikaamme samoin, kun nykyihmiset katsovat maailmantutkijoita, kuten Kristoffer Kolumbusta tai Leif Eriksonia. Me olemme ne, jotka ottavat ensimmäiset askeleet katsomaan kauemmas ja kauemmas oman aurinkokuntamme ulkopuolelle. Olen toiveikas ja varovasti varma, että vielä minunkin elämäni aikana saamme vastauksen yhteen elämän suurista kysymyksistä: *Olemmeko yksin?*

# Lähdeluettelo

- [1] A. Wolszczan ja D. A. Frail, ”A planetary system around the millisecond pulsar PSR1257 + 12”, *Nature*, vol. 355, nro 6356, s. 145–147, tammikuu 1992, ISSN: 1476-4687. DOI: 10.1038/355145a0.
- [2] NASA, *NASA Exoplanet Archive*, 2022. url: <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/index.html> (viitattu 20.03.2024).
- [3] S. G. Turyshev, M. Shao, V. T. Toth et al., ”Direct multipixel imaging and spectroscopy of an exoplanet with a solar gravity lens mission”, en,
- [4] J. Wei, *A Survey of Exoplanetary Detection Techniques*, en, arXiv:1805.02771 [astro-ph], toukokuu 2018. url: <http://arxiv.org/abs/1805.02771> (viitattu 21.03.2024).
- [5] E. A. Petigura, A. W. Howard ja G. W. Marcy, ”Prevalence of Earth-size planets orbiting Sun-like stars”, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 110, nro 48, s. 19273–19278, marraskuu 2013, ISSN: 0027-8424. DOI: 10.1073/pnas.1319909110. (viitattu 30.03.2024).
- [6] A. Lecavelier Des Etangs ja J. J. Lissauer, ”The IAU working definition of an exoplanet”, en, *New Astronomy Reviews*, vol. 94, s. 101641, kesäkuu 2022, ISSN: 13876473. DOI: 10.1016/j.newar.2022.101641. (viitattu 30.03.2024).

- [7] J. Aron, *Proxima b: Earth-like planet spotted just 4 light years away*, en-US. url: <https://www.newscientist.com/article/mg23130884-100-proxima-b-closest-earth-like-planet-discovered-right-next-door/> (viitattu 20.05.2024).
- [8] E. Maor, *To Infinity and Beyond: A Cultural History of the Infinite*, en. Springer Science & Business Media, joulukuu 2013, Google-Books-ID: v0btBwAAQBAJ, ISBN: 978-1-4612-5394-5.
- [9] B. Campbell, G. A. H. Walker ja S. Yang, ”A search for substellar companions to solar-type stars”, en, *The Astrophysical Journal*, vol. 331, s. 902, elokuu 1988, ISSN: 0004-637X, 1538-4357. DOI: 10.1086/166608. (viitattu 31.03.2024).
- [10] H. Karttunen, K. Donner, P. Kröger, H. Oja ja M. Poutanen, toim., *Tähtitieteen perusteet*. Ursa, 2022, ISBN: 978-952-5985-34-4.
- [11] P.-Y. Martin, *Planet COCONUTS-2 b*, en, 2021. url: [https://exoplanet.eu/catalog/coconuts\\_2\\_b--7920/](https://exoplanet.eu/catalog/coconuts_2_b--7920/) (viitattu 31.03.2024).
- [12] P.-Y. Martin, *Catalogue of Exoplanets*, en, 1995. url: <https://exoplanet.eu/catalog/> (viitattu 31.03.2024).
- [13] L. Kaltenegger, ”How to Characterize Habitable Worlds and Signs of Life”, en, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 55, nro 1, s. 433–485, elokuu 2017, ISSN: 0066-4146, 1545-4282. DOI: 10.1146/annurev-astro-082214-122238. (viitattu 01.04.2024).
- [14] R. K. Kopparapu, R. Ramirez, J. F. Kasting et al., ”Habitable Zones Around Main-Sequence Stars: New Estimates”, *The Astrophysical Journal*, vol. 765, nro 2, s. 131, helmikuu 2013, ISSN: 1538-4357. DOI: 10.1088/0004-637x/765/2/131.

- [15] W. Cromie, *Harvard Gazette: New, far-out planet is discovered*, elokuu 2009. url: <https://web.archive.org/web/20090827072608/http://www.news.harvard.edu/gazette/2003/01.16/01-ogle.html> (viitattu 02.04.2024).
- [16] NASA, *Exoplanet Catalog | Discovery*, en. url: <https://exoplanets.nasa.gov/discovery/exoplanet-catalog> (viitattu 03.04.2024).
- [17] ESA, *Exoplanets Press kit*, 2010. url: <https://cdn.eso.org/>.
- [18] F. Pepe, S. Cristiani, R. Rebolo et al., "ESPRESSO at VLT: On-sky performance and first results", en, *Astronomy & Astrophysics*, vol. 645, A96, tammi-kuu 2021, ISSN: 0004-6361, 1432-0746. DOI: 10.1051/0004-6361/202038306. (viitattu 03.04.2024).
- [19] NASA, *Habitable Worlds Observatory*, en. url: <https://science.nasa.gov/astrophysics/programs/habitable-worlds-observatory/> (viitattu 04.04.2024).
- [20] NASA, *5 Ways to Find a Planet | Explore*, en. url: <https://exoplanets.nasa.gov/alien-worlds/ways-to-find-a-planet> (viitattu 04.04.2024).
- [21] E. Agol ja D. C. Fabrycky, "Transit-Timing and Duration Variations for the Discovery and Characterization of Exoplanets", teoksessa *Handbook of Exoplanets*. Springer International Publishing, 2018, s. 797–816, ISBN: 9783319553337. DOI: 10.1007/978-3-319-55333-7\_7.
- [22] G. R. Ricker, J. N. Winn, R. Vanderspek et al., "Transiting Exoplanet Survey Satellite", *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, vol. 1, nro 1, s. 014003, lokakuu 2014, ISSN: 2329-4124. DOI: 10.1117/1.jatis.1.1.014003.
- [23] NASA, *Transiting Exoplanets Survey Satellite (TESS)*, en. url: <https://exoplanets.nasa.gov/tess> (viitattu 08.04.2024).

- [24] J. P. Gardner, J. C. Mather, R. Abbott et al., "The James Webb Space Telescope Mission", en, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, vol. 135, nro 1048, s. 068 001, kesäkuu 2023, ISSN: 0004-6280, 1538-3873. DOI: 10.1088/1538-3873/acd1b5. (viitattu 09.04.2024).
- [25] NASA, *NASA's Webb Confirms Its First Exoplanet - NASA*, en-US, Section: James Webb Space Telescope (JWST), tammikuu 2023. url: <https://www.nasa.gov/missions/webb/nasas-webb-confirms-its-first-exoplanet/> (viitattu 09.04.2024).
- [26] NASA, *NASA's exoplanet-hunting space telescopes*, en. url: <https://exoplanets.nasa.gov/discovery/missions> (viitattu 10.04.2024).
- [27] R. Akeson, L. Armus, E. Bachelet, V. Bailey ja L. Bartusek, "The Wide Field Infrared Survey Telescope: 100 Hubbles for the 2020s", tekninen raportti, 2019. url: <https://arxiv.org/abs/1902.05569>.
- [28] B. Mennesson, R. Juanola-Parramon, B. Nemati et al., "Paving the Way to Future Missions: the Roman Space Telescope Coronagraph Technology Demonstration", 2020. arXiv: 2008.05624 [astro-ph.IM].
- [29] V. P. Bailey, E. Bendek, B. Monacelli et al., *Nancy Grace Roman Space Telescope Coronagraph Instrument Overview and Status*, en, arXiv:2309.08672 [astro-ph], syyskuu 2023. url: <http://arxiv.org/abs/2309.08672> (viitattu 10.04.2024).
- [30] AURA, *Home*, en. url: <https://habitableworldsobservatory.org/home> (viitattu 17.04.2024).
- [31] E. Mamajek ja K. Stapelfeldt, "NASA ExEP Mission Star List of Plausible Targets for a Future IROUV Direct Imaging Space Observatory", teoksessa *American Astronomical Society Meeting Abstracts*, sarja American Astronomical Society Meeting Abstracts, vol. 241, tammikuu 2023, 116.07, s. 116.07.

- 
- [32] L. D. Friedman, D. Garber, S. G. Turyshev et al., "A mission to nature's telescope for high-resolution imaging of an exoplanet", *Experimental Astronomy*, vol. 57, nro 1, helmikuu 2024, ISSN: 1572-9508. DOI: 10.1007/s10686-024-09919-x.

# Liite A Menetelmät

Taulukko A.1: Havainnointi menetelmät

| Menetelmä          | Edut   | Rajotteet   | Löydöt (kpl) | Ensimmäinen löytö          | Kohteet   | Teleskooppi         |
|--------------------|--|---|--------------|----------------------------|---|---------------------|
| Yliikku            | Havaitsee tuhansia tähtiä kerralla.  | Vaatii etä eksoplaneetta kulkee tähden yli. Vääriä positiiveja.   | 4171         | OGLE-TR-56 b, 2002         | Iso eksoplaneetta, joka peittää mahdollisimman paljon keskustähdensä. | TESS, KEPLER        |
| Säteisnopeus       | Havaitse monia tähtiä kerrallaan. Ei vaadi jatkuvaa seurainta.   | Planeetan on oltava lähellä tarkkailijaa. Tähden liike maapalloa kohti ja pois päin. Teleskooppi hyvin suuri halkaisijaltaan.   | 1089         | 51 Peg b, 1995             | Iso eksoplaneetta jonka kiertorata maapallon tasossa.                 | HARPS-N, ESPRESSO   |
| Suora kuvaus       | Antaa oikeita kuvia eksoplaneetoista.  | Keskustähdestä säteilevä valo. Vaati täydellisen lämpötilan vakauden optisessa elementissä. Vaikeuksia pysyä kohteessa vakaasti tarvittavan ajan. Eksoplaneetan kiertorata kohtisuorassa tarkkailijaan. | 70           | 2M1207b, 2004              | Iso, kuuma eksoplaneetta lähellä tarkkailijaa.                        | JWST, HUBBLE, ROMAN |
| Gravitaatioliinssi | Havaitse planeetat joilla isot kiertoradat. Herkempi havaitsemaan pieniä planeettoja. Ainut menetelmä joka pystyy havaitsemaan eksoplaneettoja muissa galakseissa. | Kertaluontoinen tapahtuma. Huomattava todennäköisyys, ettei planeetta huomata vaikka gravitaatioliinssi tapahtuisi.   | 217          | OGLE-2003-BLG-235L b, 2004 | Tausta linnunradan keskele. Iso edestä kulkeva tähti.                 | K2, OGLE, MOA       |
| Ajoitus            | Auttaa havaitsemaan muita eksoplaneettoja tähtijärjestelmässä. Tarkka.   | Vaatii usean planeetan tähtijärjestelmän. Planeettoihin toistaan aiheutava liike on havaittavissa maapallolla.  | 29           | Kepler-19c, 2011           | Tähtijärjestelmä, jossa on monta eksoplaneettaa                       | TESS, KEPLER        |



# Liite B Avaruusteleskoopit

Taulukko B.1: Avaruusteleskoopit

| Teleskooppi | Laukaisuvuosi   | Hinta  | Instrumentaatio   | Koko  | Tehtävä  |
|-------------|-----------------|--|---|---|--|
| TESS        | 2018            | 200 miljoonaa USD                            | 4 laaja näkökenttäistä kameraa, joissa jokaisessa 7 optista elementtiä ja 4 CCD kokoonpanoa | Näkökenttä: 2300 neliöastetta. Teleskoopin koko: 3.7x1.2x1.5 metriä | Tutkia suurta osaa taivaasta ja hankkia havaintoja eksoplaneetoista transitmenetelmää hyväksi käyttäen                             |
| JWST        | 2021            | 10 miljardia USD                             | NIRCAM, NIRISS, NIRSPECMIDI, ja näiden 17 eri tilaa   | Pääpeili: 6.5m  | Tutkii eksoplaneettojen ilmakehiä ja varmistaa kandidaatteja   |
| ROMAN       | 2027 (arvio)    | Tähän mennessä 4.3 miljardia USD             | WFI ja CGI  | Pääpeili: 2.4m  | Tutkii eksoplaneettoja ja pyrkii ottamaan suoria kuvia eksoplaneetoista sekä hyväksikäyttämään gravitaatiolinssimenetelmää         |
| HWO         | 2040 (arvio)    | Arvio 11 miljardia                           | Ei rakennettu - varmasti koronagraafi.  | Pääpeili: 6m  | Toimia näkyvässä valossa, infrapunassa sekä ultravioletissa ja löytää ainakin 25 elinkelpoista eksoplaneettaa lisäksi tutkia niitä |
| SQL-tehtävä | 2060-90 (arvio) | Ei arvioita. Lentotestit 10-50 miljoonaa USD | Ei rakennettu - Ennustettu koronagraafi.  | Pääpeili: 1-2m  | Ottaa 10 kilometrin resoluutiolla tarkkoja kuvia ennaltamäärätyistä eksoplaneetasta hyväksikäyttäen SQL:ää                         |