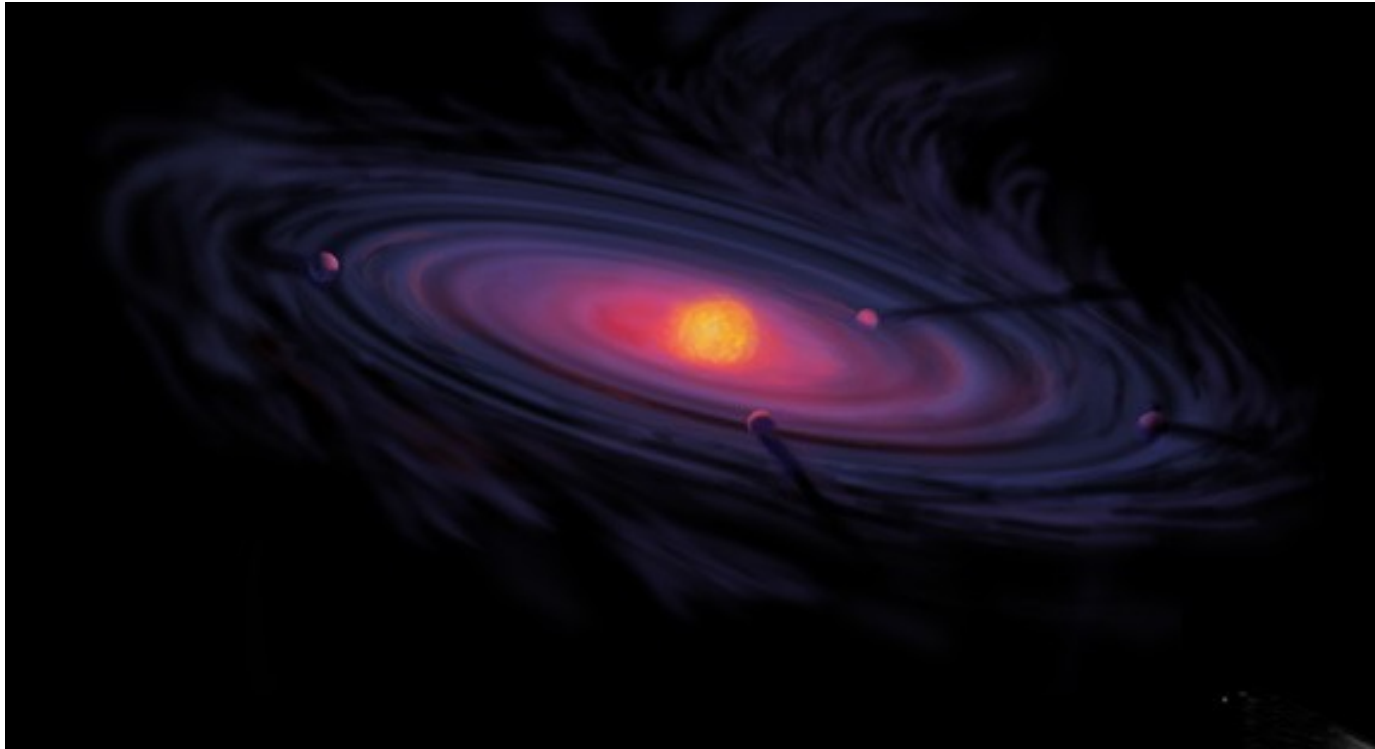


Aurinkokunnan synty



Pat Rawlings

Maailmankaikkeus nyt 2026

Aurinkokunnan synty

- Aurinkokunnan syntyä kuvaavan mallin tulisi selittää:
 - Litteä kiekko missä kaikki isommat kappaleet pyörivät samaan suuntaan (Venuksen ja Uranuksen akselinsa ympäri pyörimistä lukuunottamatta) lähes ympyräradoilla
 - Pyörimismäärästä suurin osa planeetoissa (Aurinko pyörii hitaasti)
 - Kiviplaneetat lähellä Aurinkoa, kaasuplaneetat ulompana
 - Asteroidivyöhyke (kappaleet kivisiä), Kuiperin vyöhyke (kappaleet jäisiä)
 - Kraateroitumiset (*Late Heavy Bombardement* 4.1-3.8 mrd vuotta sitten?)
- Näin meillä, mutta onko aurinkokunta tyypillinen planeettasysteemi? (Palataan tähän myöhemmin...)

Nykykäsityksen pääpointit

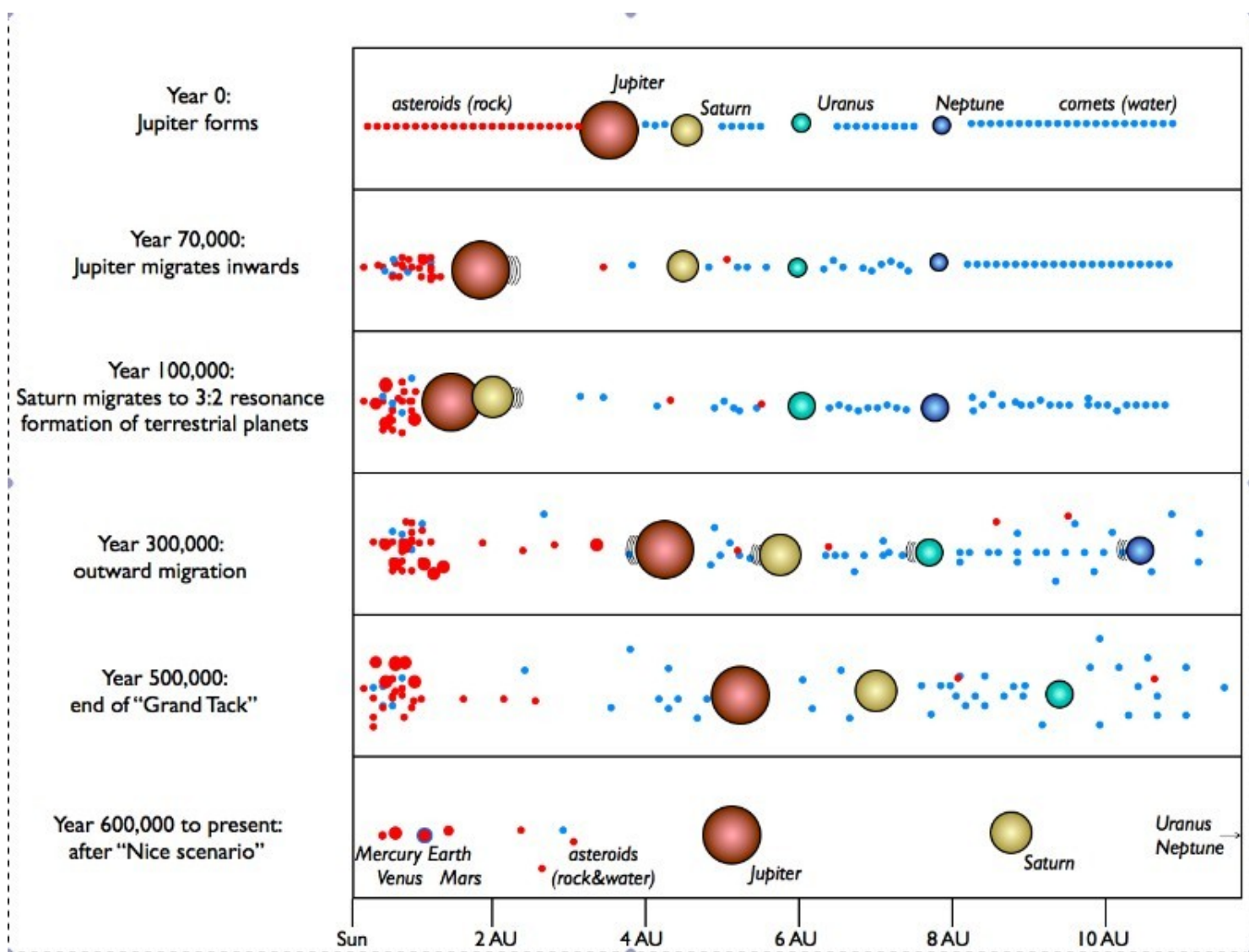
- Kaikki saa alkunsa valtavasta kaasu- ja pölypilvestä, jota gravitaatio vetää kasaan
- Valtaosa aineesta Aurinkoon, yli jääneet rippeet muodostavat protoplanetaarisen kiekon syntyvän tähden ympärille
 - Alkuperäisen pilven pyöriminen hidasta, mutta luhistuessa nopeutuu (pyörimismäärän säilymlaki) – kiekko
- Kiekossa pölyhiukkaset takertuvat toisiinsa ja kasvavat isommiksi
 - Planetesimaalit
- Kun planetesimaali on kasvanut riittävästi, kasvaminen nopeutuu kappaleen oman painovoiman ansiosta
 - Protoplanetat
- Protoplaneetat törmäilevät ja kasvavat siten vielä lisää
- Isoimmat protoplaneetat pystyvät painovoimallaan haalimaan vetykaasua ja kasvavat siten kaasujättiläisiksi – tämä tapahtuu ”jäärajan” takana, missä vesi ja muut jäät pystyvät muodostamaan kiinteitä hiukkasia jotka osallistuivat planeetan kasvattamiseen
- Kun Aurinko lopulta ”sytty”, puhaltaa tähden säteily lopun kaasun ulos ja planeettojen kasvu loppuu – aikaa tähän kuluu noin 10 miljoonaa vuotta



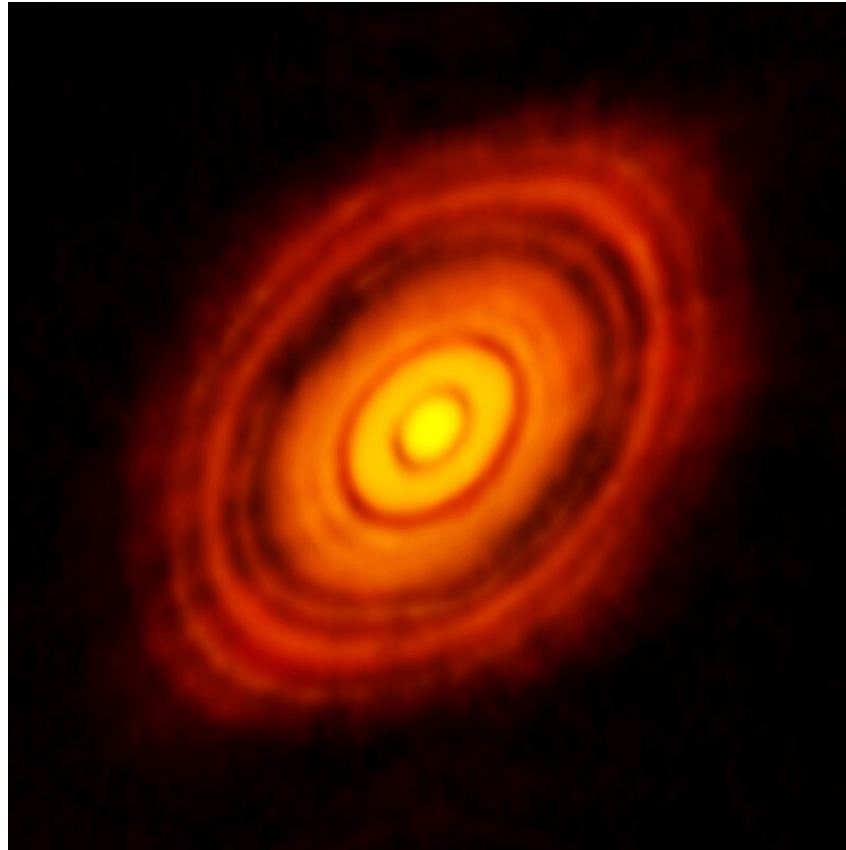
Kuva: NASA/JPL-Caltech

Myöhempää kehitystä

- Grand Tack -hypoteesi: Jupiter vaelsi nuorena aurinkokunnassa lähemmäs, noin 1.5 AU:n etäisyydelle, vetäen Saturnusta mukanaan, kunnes rataresonanssien takia kaksikko palasi takaisin ulommas
 - Selittäisi miksi asteroidivyöhykkeelle ei muodostunut planeettaa, ja miksi Mars jäi selvästi Maata ja Venusta pienemmäksi
- Nizzan malli: Uranus ja Neptunus alunperin eri päin, vaihtoivat paikkaa rataresonanssien takia
 - Selittäisi ulko-osien pienkappaleiden hajanaisen jakauman sekä vahvan kraateroitumisen ajanjakson 4.1-3.8 mrd vuotta sitten (Late Heavy Bombardement; tätä on tosin nyttemmin kyseenalaistettu)
 - <https://www.youtube.com/watch?v=VXeOh3xmrQM>
- Molemmat saavat vahvaa kannatusta



Grand Tack -hypoteesi. Kuva: Walsh et al.



HL Tauri -tähdellä ympärillä on protoplanetaariseen kiekkoon syntymässä planeettoja, joiden radat näkyvät kuvassa.

Kuva: ALMA

Maailmankaikkeus nyt 2026

Eksoplaneetat



Kuva: ESA/Hubble

- Eksoplaneetta kiertää jotain toista tähteä kuin Aurinkoa
- Valtaosalla tähdistä vaikuttaisi olevan planeettoja kumppaninaan
- Ensimmäinen löydettiin 1992 kiertämästä pulsaria
 - 1995 löytyi ensimmäinen ”tavallista” tähteä kiertävä eksoplaneetta 51 Peg b (Nobel palkinto 2019)
- Nyt (7.5.2026) tunnetaan 6278 varmistettua eksoplaneettaa
https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/docs/counts_detail.html
 - Yli 10 000 vahvistamatonta kandidaattia

Haasteet löytämiselle

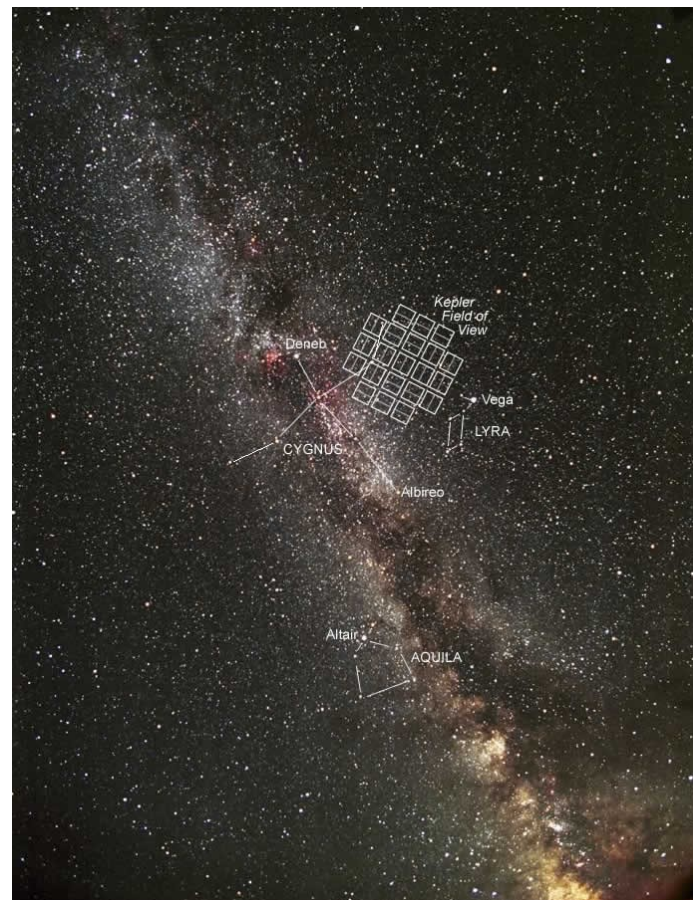
Eksoplaneetat ovat...

- ...kaukana
- ...pieniä
- ...eivät loista näkyvää valoa
- ...sijaitsevat kirkkaan valonlähteen (tähden) vieressä
- Tähdet näkyvät kauas, joten yleensä eksoplaneetat löydetään tutkimalla niiden vaikutusta emotähteensä

Menetelmät eksoplaneettojen löytämiseksi

- Suora kuvantaminen
 - 97 löydettyä eksoplaneettaa
- Ylikulkumenetelmä
 - Tähti himmenee planeetan kulkiessa edestä
 - 4640 löydettyä eksoplaneettaa
 - Kepler, TESS
- Säteisnopeusmenetelmä
 - Planeetan liike huojuttaa tähteä, mikä havaitaan Dopplerin ilmiön kautta säännöllisenä sini/punasiirtymänä
 - 1180 löydettyä eksoplaneettaa
- Astrometria
 - Tähten sijainti taivaalla muuttuu säännöllisesti planeetan huojuttaessa tähteä
 - 6 löydettyä eksoplaneettaa
- Mikrolinssit
 - Heikko gravitaatiolinssi-ilmiö, missä kirkastuvan tähden valokäyrässä näkyy planeetan aiheuttama poikkeama
 - 278 löydettyä eksoplaneettaa
- Pulsariajoitus
 - Pulsarien täsmälliset radiopulssit muuttuvat planeetan vaikutuksesta
 - 8 löydettyä eksoplaneettaa (alkuperäiset planeetat ovat todennäköisesti tuhoutuneet tai sinkoutuneet pois tähden ympäriltä supernovaräjähdyksessä, joten nämä lienevät "myöhempien sukupolvien" planeettoja)

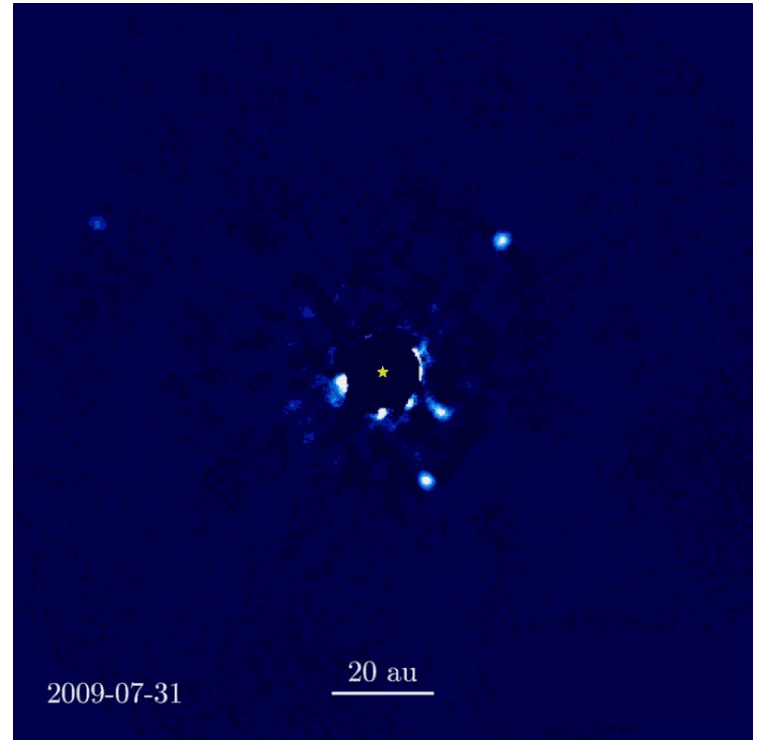
Maailmankaikkeus nyt 2026



Keplerin kuvakenttä, missä suuri osa löydetystä eksoplaneetoista sijaitsee. Kuva: Carter Roberts

Suora kuvaaminen

- Haastavaa, koska planeetta lähellä tähteä
- Mahdollista suurille planeetoille kaukana emotähdestään



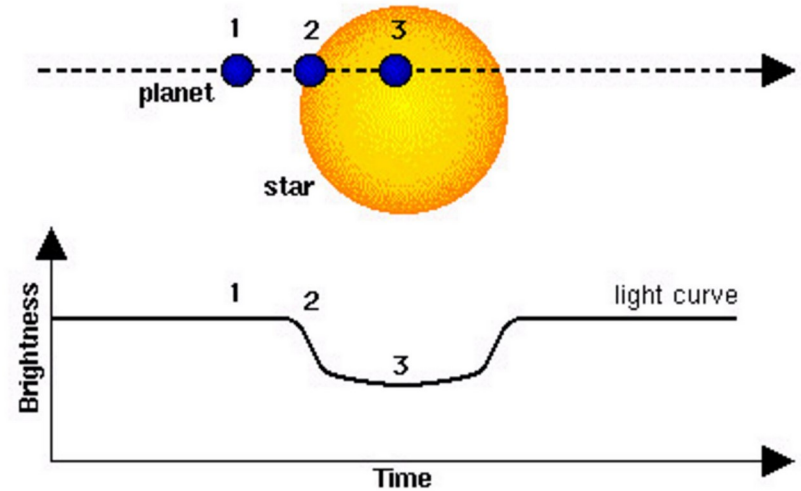
HR 8799 tähteä (peitetty kuvasta) kiertää Keck-teleskoopin kuvassa 4 eksoplaneettaa.

Jason Wang (Caltech)/Christian Marois (NRC Herzberg)

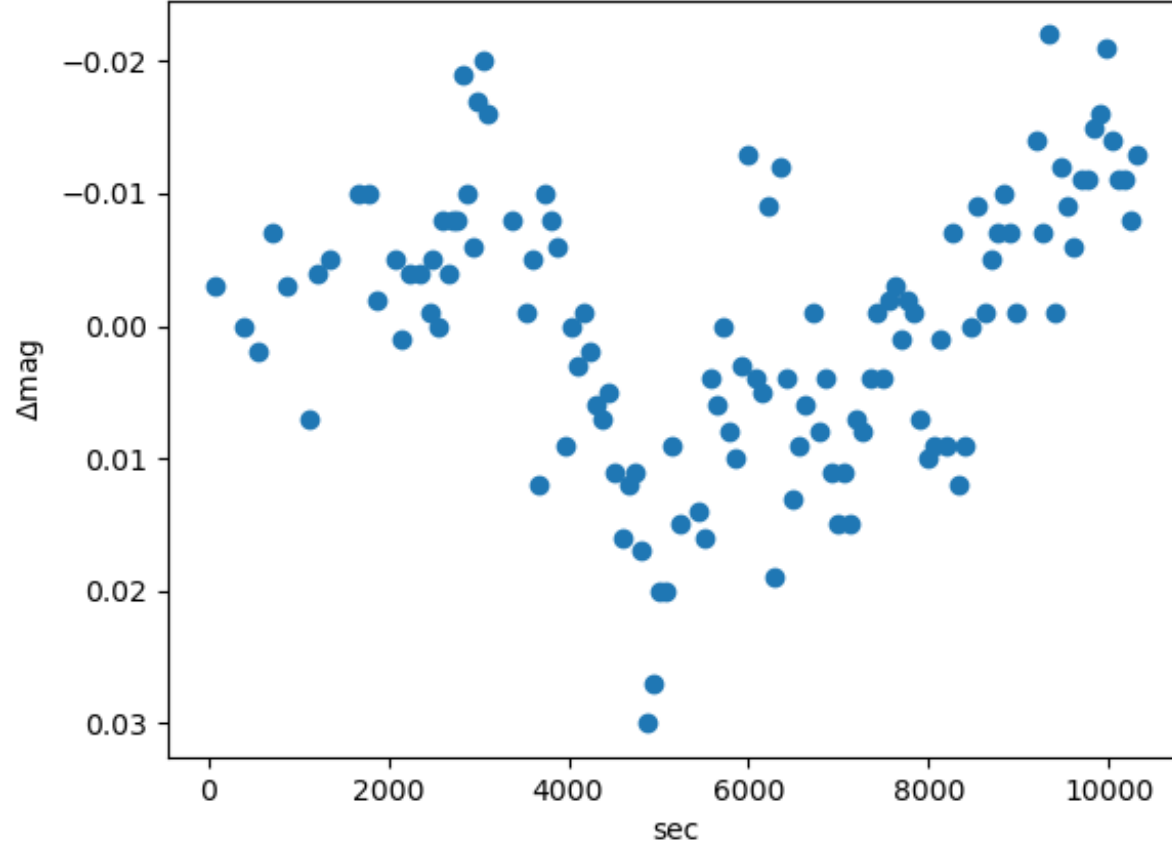
Maailmankaikkeus nyt 2026

Ylikulkumenetelmä

- Planeetta kulkee emotähtensä edestä, peittäen pienen osan tähden valosta
- Tähten valokäyrässä näkyy säännöllisiä ylikulkuja, joista voidaan päätellä planeetan kiertoaika ja koko
- Helppointa löytää isoja planeettoja lähellä tähteä, mutta myös pienemmät kauempana mahdollisia
- Mahdollista vain jos planeetan ratataso on oikeassa suunnassa aurinkokunnan suhteen
- Kepler, TESS avaruusteleskooppien myötä valtaosa löydetyistä eksoplaneetoista tällä menetelmällä



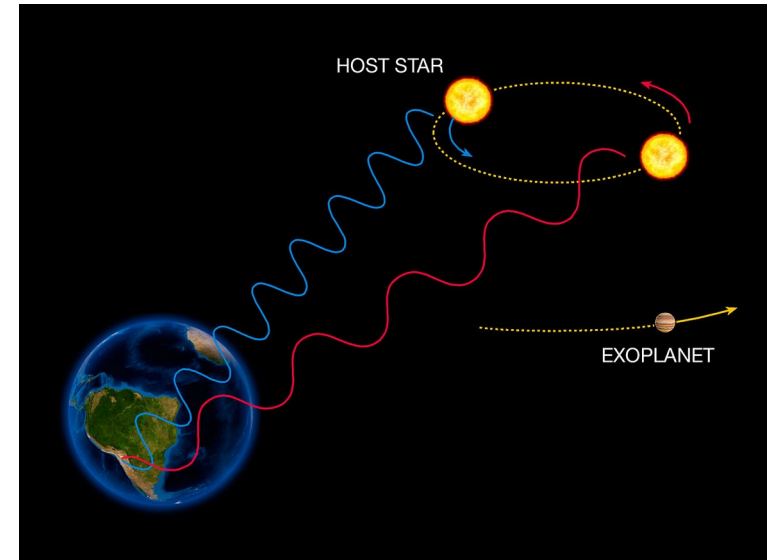
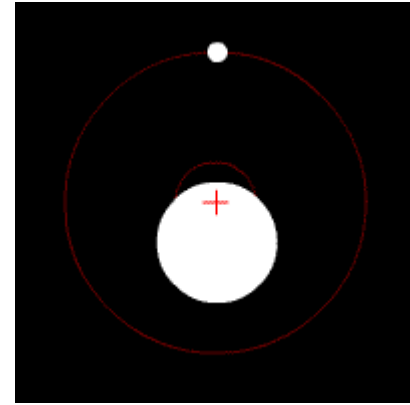
Kuva: Hans Deeg



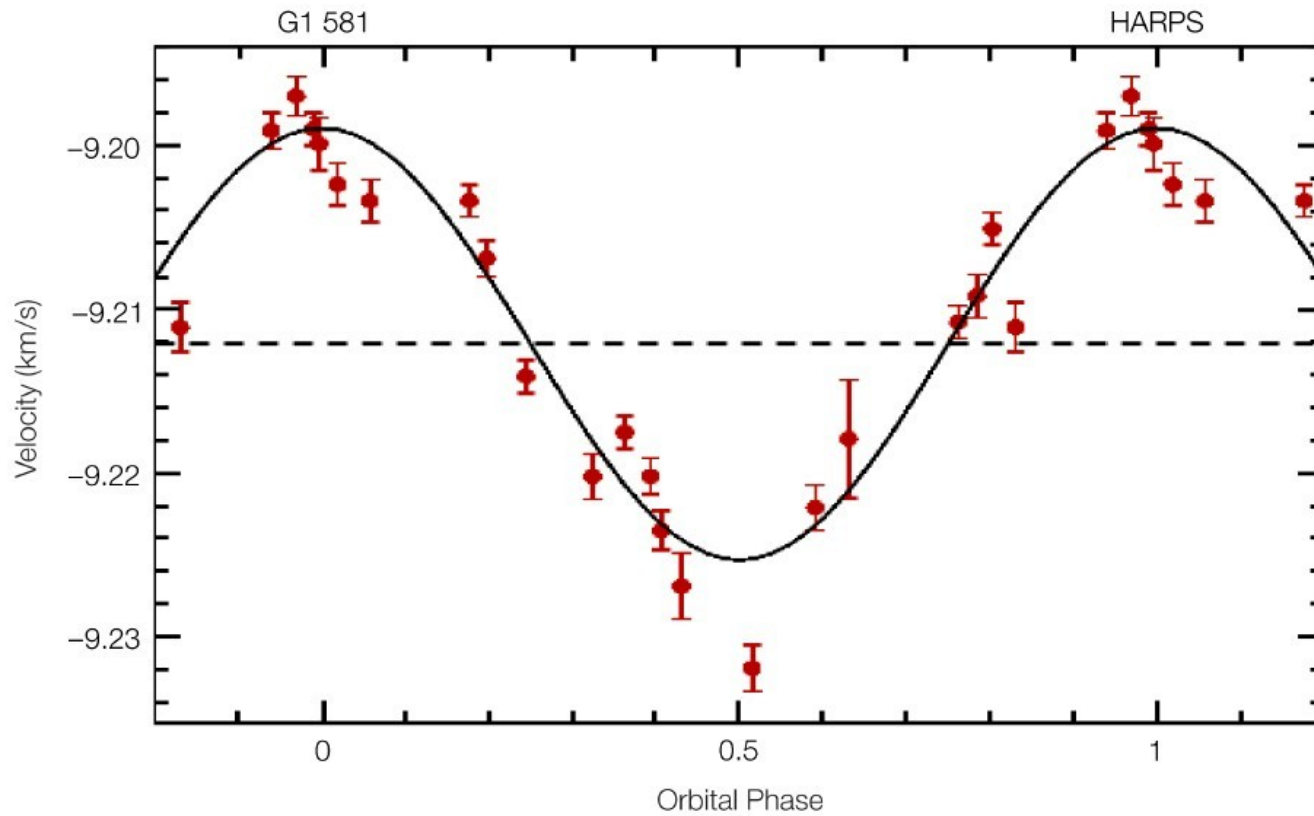
Eksoplaneetan TOI-3856 b ylikulku Kirkkonummen Metsähovista kuvattuna 7.3.2026
Maailmankaikkeus nyt 2026

Säteisnopeusmenetelmä

- Ylikulkumenetelmän ohella menestyksekkäin menetelmä
- Periaatteessa planeetta ei kierrä tähteä, vaan kaikki kappaleet kiertävät systeemin yhteistä massakeskipistettä
 - Planeetta huojuttaa tähteä kiertäessään sitä
- Havaitaan tähden liikkeen jaksollinen Doppler-siirtymä
 - Siirtymän suuruudesta voidaan päätellä planeetan massa, jos ratataso tiedetään => parhaiten tietoa saadaan kun mitataan Dopplersiirtymä ylikulkumenetelmällä löydetyistä planeetoista
- Helpointa löytää massiivisia planeettoja lähellä tähteä
- Sivulta nähdyt ratatasot helpointa löytää, mutta myös kallellaan olevat mahdollisia – mahdotonta löytää suoraan ylhäältä päin nähtyä planeettasysteemiä



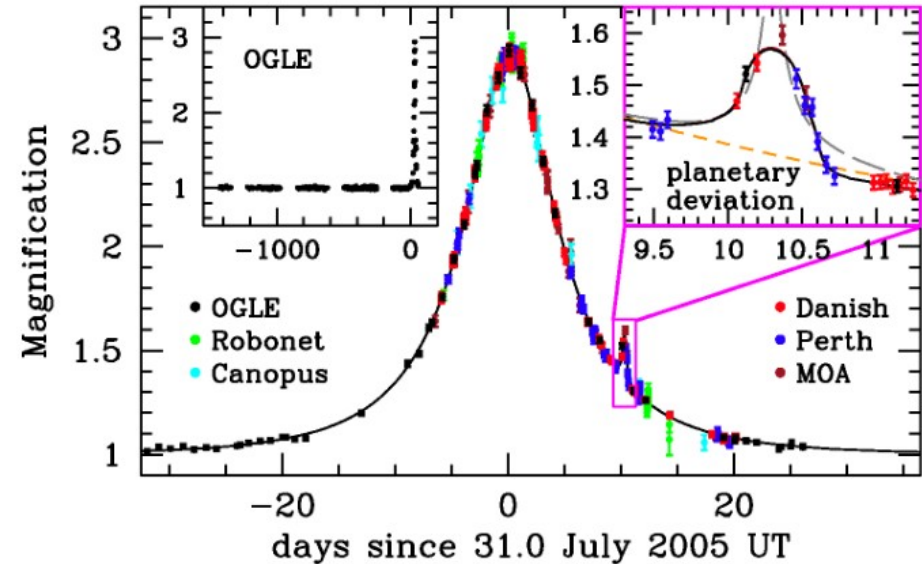
Maailmankaikkeus nyt 2026



Radial Velocity Curve of Gliese 581
(HARPS/3.6-m)

Mikrolinssit

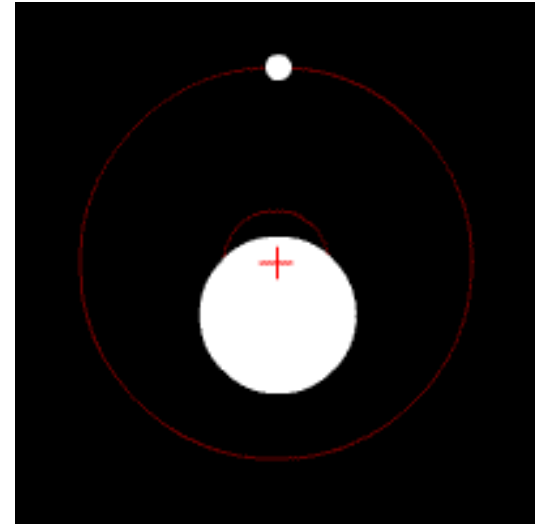
- Suhteellisuusteorian mukaan massiivinen kappale taivuttaa takanaan olevasta kohteesta tulevaa valoa
- ”Gravitaatiolinssi” – mikrolinssin tapauksessa ei havaita taustakohteen sijainnin muutosta, pelkästään kirkastuminen, kun etualan kappale kulkee sen edestä
- Kirkkauden muutos (valokäyrä) muodoltaan yksinkertainen, helposti tunnistettava
 - Linssinä toimivan tähden seuralaisplaneetta saattaa aiheuttaa epäsymmetrisen piikin
- Ääritapauksissa mikrolinssien avulla voidaan myös havaita yksittäisiä tähtiä hyvinkin kaukaisista galakseista
 - Kaukaisin havaittu yksittäinen tähti WHL0137-08 (”Earendel”) sijaitsee 12.9 mrd valovuoden päässä, löydettiin maaliskuussa 2022 Hubblen havainnoista
- Mikrolinssien haaste on, ettei niitä voida ennustaa, eivätkä ne tule toistumaan



OGLE-2005-BLG-390 mikrolinssin valokäyrä.
Kuva: Beaulieu et al. (2006).

Astrometria

- Havaitaan tähden sijainnin muuttumista planeetan kiertäessä sitä
- Mahdollista löytää suoraan ylhäältä nähtyjä systeemejä
- Haastavaa, koska tähden sijainnin pienten muutosten mittaaminen vaikeampaa kuin spektriviivoista mitattava säteisnopeus
 - Gaia



Joitain esimerkkejä

- Mitä sitten on löydetty?
- Suurin osa löydetyistä eksoplaneetoista selvästi Maata isompia, monet myös Jupiteria isompia, koska niitä on helpompi löytää
- Kuumat Jupiterit
 - Miten ovat voineet syntyä? Lähellä tähteä jäät eivät pysty muodostamaan kiinteitä hiukkasia eivätkä siten osallistu planeetan kasvattamiseen
- Supermaapallot/minineptunukset
- Kaikki tähtijärjestelmät eivät muistuta aurinkokuntaa!

Proxima Centauri

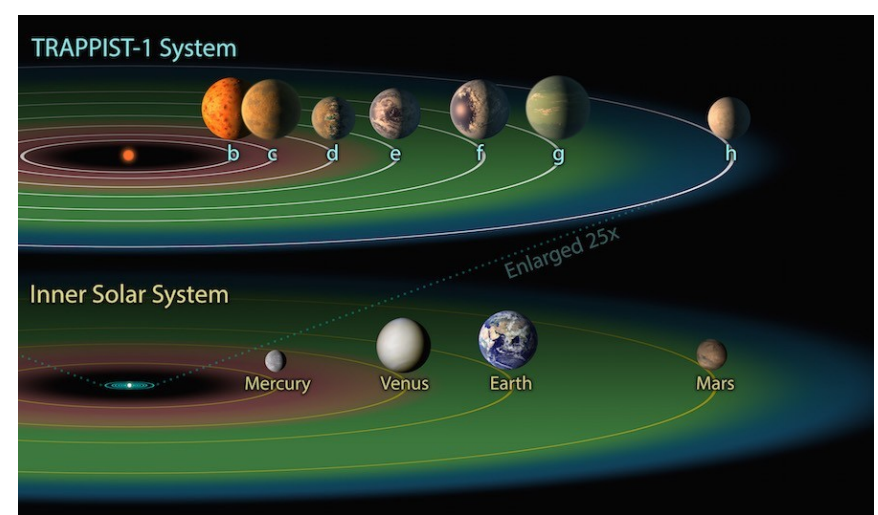


Taiteilijan näkemys Proxima Centauri b:n pinnalta.

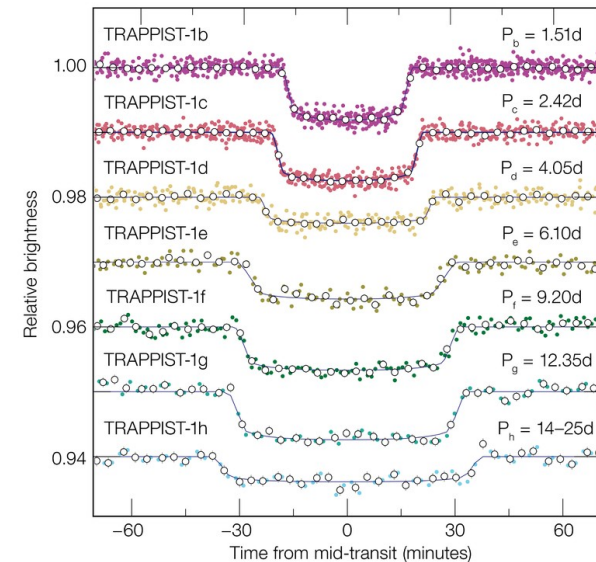
- Lähimmältä naapuritähdeltämme (etäisyys 4.2 valovuotta) on löydetty varmasti kaksi planeettaa, myös yksi vahvistamaton kandidaatti
 - Viittaa siihen, että planeetat ovat hyvin yleisiä
- Löytyi säteisnopeusmenetelmällä
- Mahdollisesti ”elämänvyöhykkeellä”
 - Joskin lähellä emotähteä (punainen kääpiötähti), jonka flarepurkaukset olisivat ongelma mahdollisille elämänmuodoille

TRAPPIST-1

- Seitsemän planeetan systeemi, joista kolme ”elämänvyöhykkeellä” (e, f, g)
 - Emotähti punainen kääpiötähti, jolla luultavasti voimakkaita purkauksia
- Löydetty ylikulkumenetelmällä
- Kaikki planeetat maapallon kokoisia tai vähän pienempiä
- Etäisyys meistä 40 valovuotta



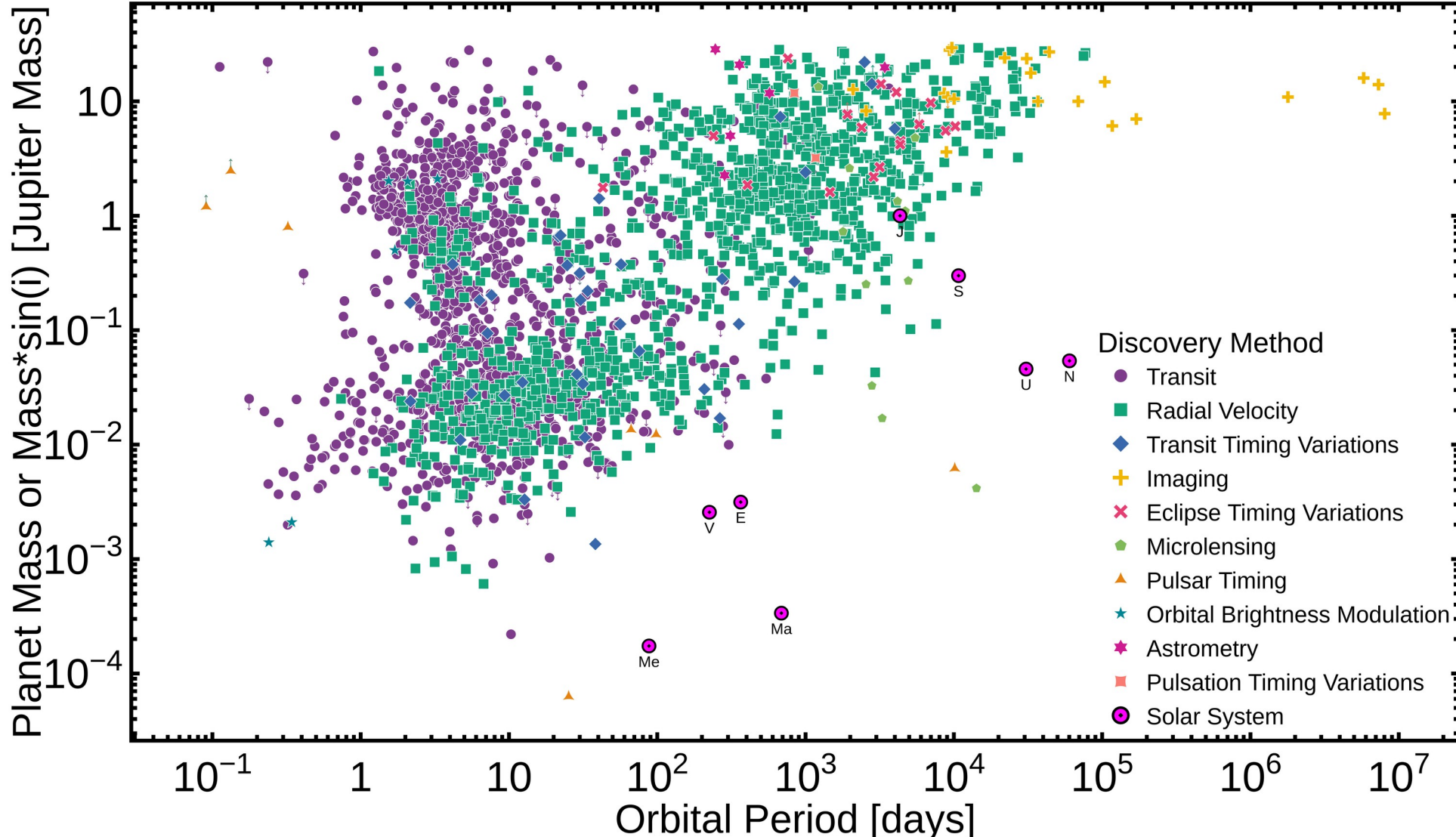
Kuva: NASA



ESO/M. Gillon et al.

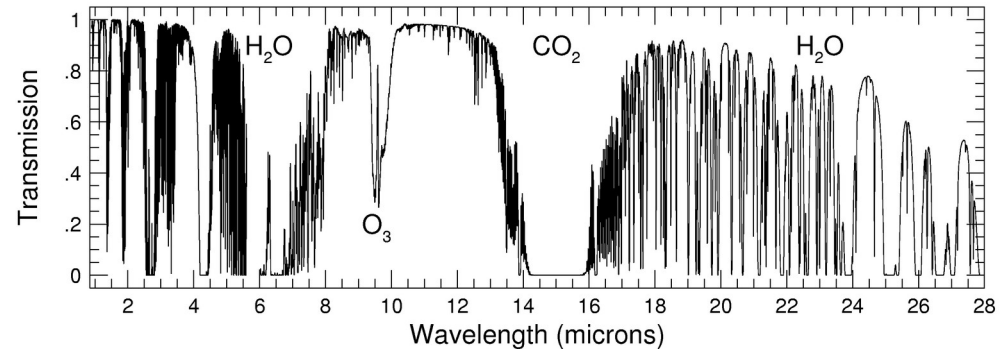
Planet Mass or Mass*sin(i) vs Orbital Period

exoplanetarchive.ipac.caltech.edu, 2026-05-01



Kaasukehät

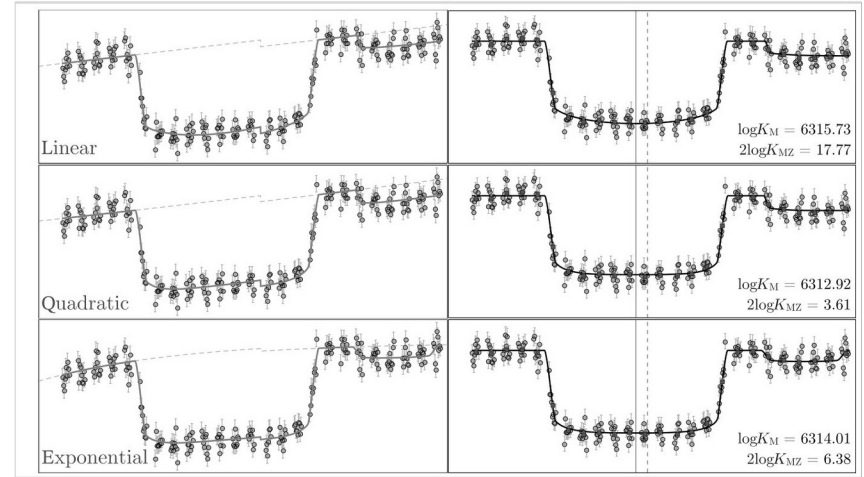
- Suurimmilla teleskoopeilla pystytään tutkimaan joidenkin eksoplaneettojen kaasukehiä
- Tutkitaan tähden spektriä normaalitilanteessa ja kun planeetta kulkee tähden edestä => pieni muutos spektrissä johtuu siitä että osa tähden valosta kulkee planeetan kaasukehän läpi
- Monia kemikaaleja löydetty, kuten vettä, hiilidioksidia ja metaania



Haasteena spektriviivojen hyvien pienien muutosten löytämiseen ovat muista lähteistä, kuten Maan ilmakehästä (kuvassa) peräisin olevat viivat

Eksokuut

- Luultavasti eksoplaneetoilla on myös kuita, mutta näistä ei ole vielä saatu varmoja havaintoja
- Kandidaatteja löytyy jonkin verran



Mahdollisen eksokuun aiheuttama muutos Hubblen mittaamassa Kepler-1625b planeetan ylikulussa. Kyseinen planeetta on 10 kertaa Jupiterin massainen. Jos kuuhavainto on todellinen, täytyisi sen olla Neptunuksen kokoluokkaa!
Teachey & Kipping (2018)

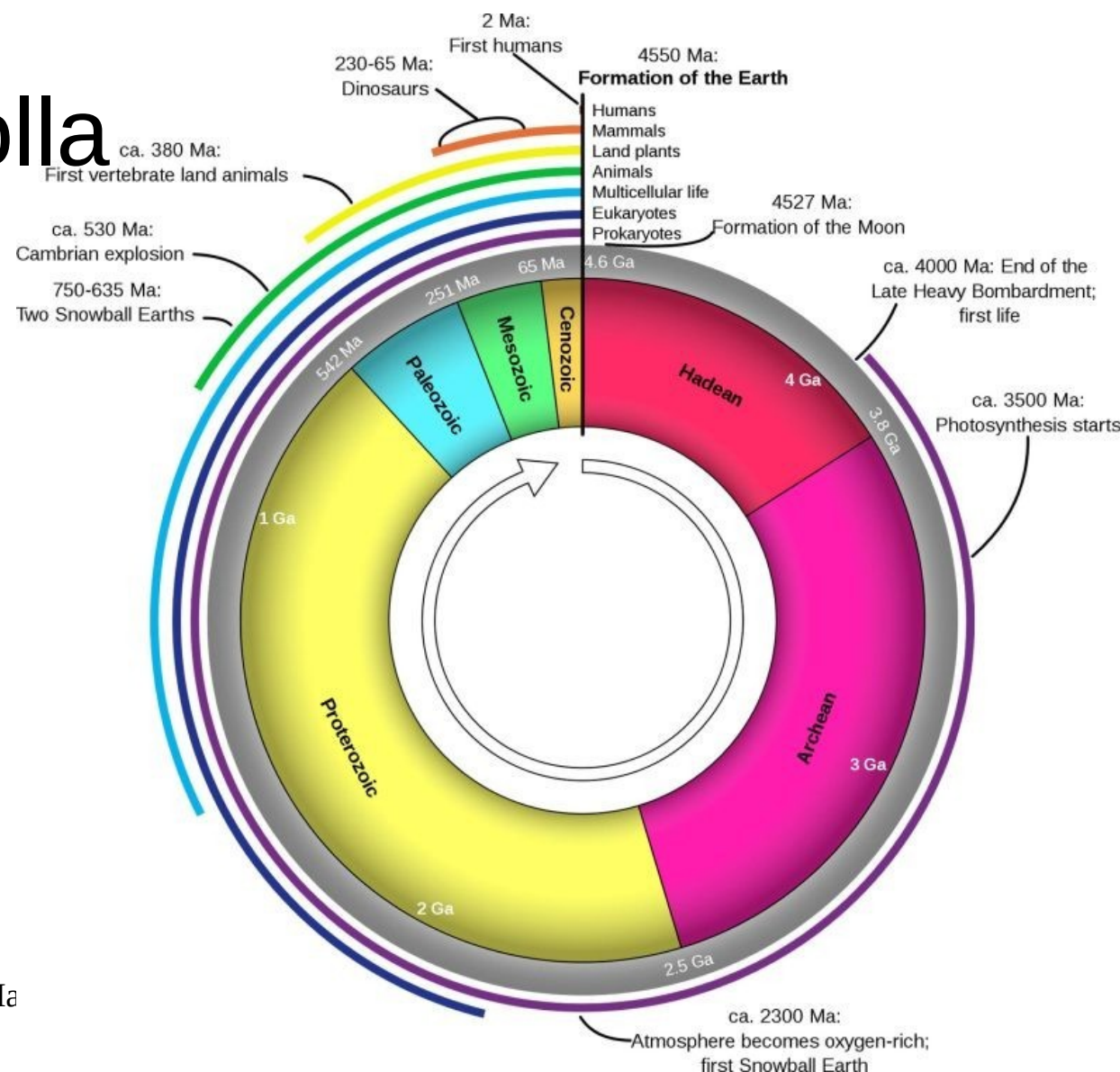
Astrobiologia

- Elämää maapallon ulkopuolella?
- Miten elämä määritellään?

Elämä maapallolla

- Elämä syntyi jo varhain maapallon historiassa, ainakin 3.7 mrd vuotta sitten
 - Elämän synty yleistä?
- Merkittäviä virstanpylväitä mm. fotosynteesi, tumalliset solut, monisolainen elämä, kambriikauden räjähdys, massasukupuutot
- Älyllinen elämä syntyi vasta miljardien vuosien päästä, ja vaati monta sattumaa
 - Harvinaista?

Ma



Mistä elämää kannattaisi etsiä?

- Maankaltaisen elämän edellytyksiä
 - Nestemäistä vettä
 - Elämän vaatimat kemikaalit (vaikuttavat olevan yleisiä)
- Sopiva tähti?
 - Vakaa pitkiä aikoja
 - Ei liian voimakkaita purkauksia (korkeaenergistä säteilyä, hiukkaspommitusta)
- Sopiva planeetta?
 - Oikea etäisyys tähdestä (lämpötila sopiva nestemäiselle vedelle)
 - Sopiva kaasukehä (maan ilmakehän kaltainen?)
 - Jäisen pinnan alainen sula valtameri? (kuten monilla aurinkokunnan ulko-osien kuilla)
- ...mutta onko asia sittenkään niin? Vaikea sanoa 1 tunnetun esimerkin pohjalta

Mitä voi käytännössä etsiä?

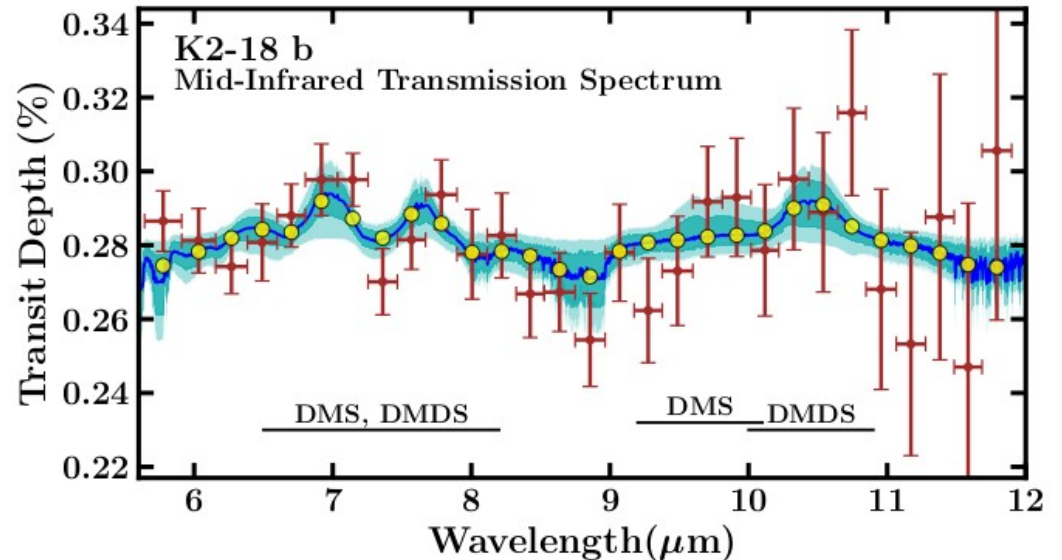
- Viitteitä elämän kemiasta planeetan kaasukehässä (biomarker)
 - Esim. happimolekyylit, hiiliyhdisteet... mutta nämä voivat syntyä myös ilman biologisia prosesseja!
- Merkkejä teknologisista sivilisaatiosta
 - Radioviestejä?
 - Megarakennelmia?

K2-18 b

- 8-9 Maan massainen mahdollinen "valtameriplaneetta", kiertää punaista kääpiötähteä
- Huhtikuussa 2025 raportoitiin että James Webbillä oli löydetty dimetyylisulfidia (DMS) ja/tai dimetyylidisulfidia (DMDS), joita pidetään vahvana elämän merkinä
 - ...vahva elämän merkki Maan olosuhteissa, mutta kyseessä hyvin erilainen planeetta...
 - ...lisäksi tarkempi analyysi osoitti, ettei kyseisten kemikaalien havaintokaan ollut täysin luotettava...

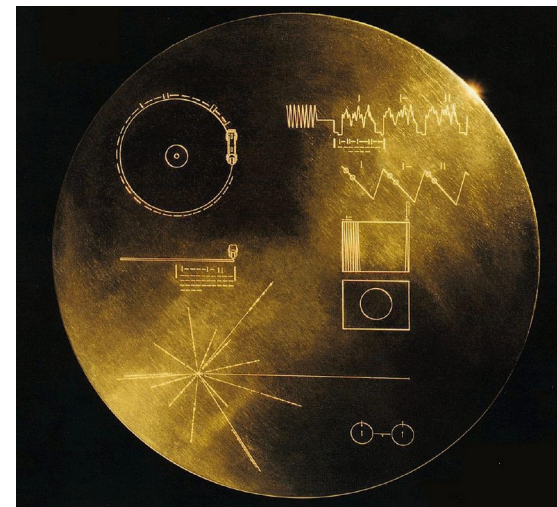
6

MADHUSUDHAN ET AL.

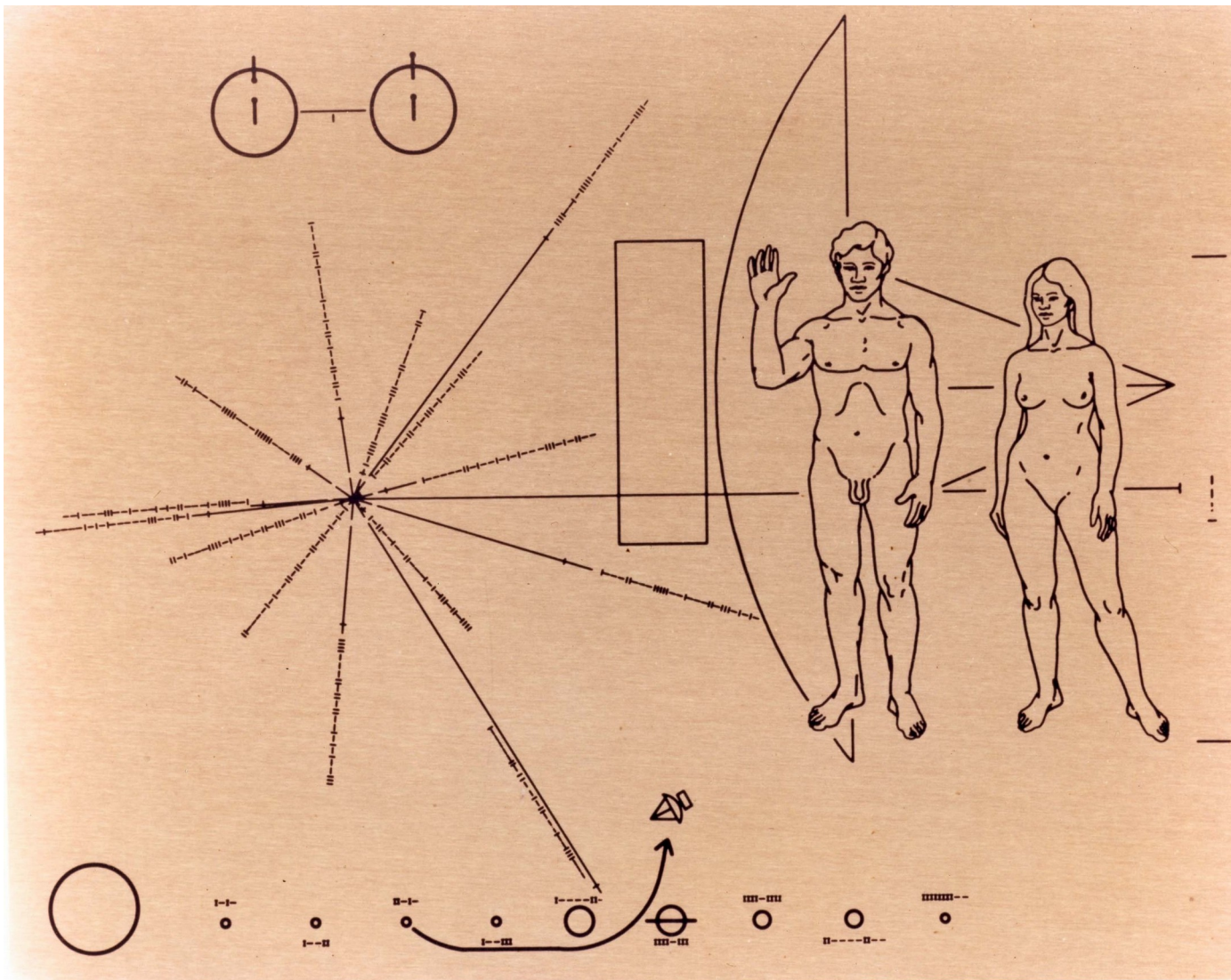


Ihmiskunnan yhteydenottoyrityksiä

- Arecibosta lähetetty radioviesti (vasemmalla) 1974 kohti pallomaista tähtijoukkoa M13 (25 000 valovuoden päässä)
 - Viestin koko 73 riviä x 23 saraketta – molemmat alkulukuja, mikä kertoo viestin keinotekoisesta luonteesta
 - Sisältää tietoa ihmisen kemiasta, ihmispopulaatiosta maapallolla, aurinkokunnasta ja Arecibon teleskoopista
- Voyager-luotainten mukana lähetettiin 1977 kultaiset äänitteet, jotka sisältävät kuvia, musiikkia ja äänitteitä maapallon eri kulttuureista
- Pioneer-luotainten mukana 1972 ja 1973 lähetettiin kullatut laatatat, jotka sisältävät kuvat ihmisistä, sekä tietoa sijainnistamme aurinkokunnassa ja galaksissa
- Lisäksi mm. televisiolähetykset etenevät myös avaruuteen ja ovat periaatteessa havaittavissa



Voyagerien äänitteiden kansi



Pioneer-luotainten mukana lähetetyt laatat

Draken kaava

$$N = R f_p n f_e f_a f_v L$$

- Yhtälö jolla yritetään arvioida Linnunradan kommunikoivien sivilisaatioiden määrää (N)
- Parametreja arvioitavaksi
 - R = Linnunradan tähtiensyntytahti
 - f_p = osuus tähdistä joilla on planeettoja
 - n = näiden tähtien elämälle soveltuvien planeettojen keskimääräinen lukumäärä
 - f_e = todennäköisyys, että tällaiselle planeetalle todella kehittyy elämää
 - f_a = todennäköisyys, että elämä kehittyy älylliseksi
 - f_v = todennäköisyys, että älykäs sivilisaatio alkaa viestiä olemassaolostaan
 - L = viestivän sivilisaation elinikä
- Oikeita arvoja eri parametreille voi vain arvailla...