



**university of
 groningen**

**faculty of science
 and engineering**

**kapteyn astronomical
 institute**

SRON

Netherlands Institute for Space Research

Exoplaneten en SETI

Paul Wesselius

24 november 2023

Metius te Alkmaar

Inhoud

- Geschiedenis en Waarnemen
- Soorten Exoplaneten
- Atmosferen exoplaneten
- SETI

Bronnen

- Planetenjagers, Lucas Ellerbroek, Prometheus, 2014, vlot geschreven boek
- Exoplaneten, Joris Janssen, Pocket Science, 2017
- Exoplanets, Summers en Trefil, Smithsonian Books, 2017
- The Planet Factory, Tasker, Bloomsbury, 2017, een goed boek, wel moeilijk
- Demographics of Exoplanetary Systems, Biazzo en kollegae, Springer, 2022, heel moeilijk
- The little book of Exoplanets, Joshua Winn, Princeton, 2023, een aanrader
- Overigens veel verwijzingen naar websites op de slides

Websites

- <https://exoplanets.nasa.gov> goede site
- <https://nexsci.caltech.edu/> exoplanet science institute
- <http://exoplanet.eu>: The Extrasolar Planets Encyclopaedia.
- <http://www.openexoplanetcatalogue.com/> iedereen kan bijdragen aan deze site
- <https://coolcosmos.ipac.caltech.edu/page/exoplanets>
- <https://www.zooniverse.org/projects/ianc2/exoplanet-explorers> ontdek zelf exoplaneten (hebben nu even geen data om te bewerken)

Klassificatie

- De IAU heeft in 2006 een planeet definitie (eigen zonnestelsel) gegeven:
 - Draait in een baan rond de zon,
 - Is zwaar genoeg om de bolvorm aan te nemen,
 - Heeft zijn baan schoongeveegd
- Definitie is toe te passen op exoplaneten:
massa van ster, massa van planeet en gemiddelde afstand ster-planeet zijn te meten voor exoplaneten
→ af te leiden of exoplaneet zijn baan heeft schoon geveegd

GESCHIEDENIS EN WAARNEMINGEN

Ontdekking 1^{ste} exoplaneet

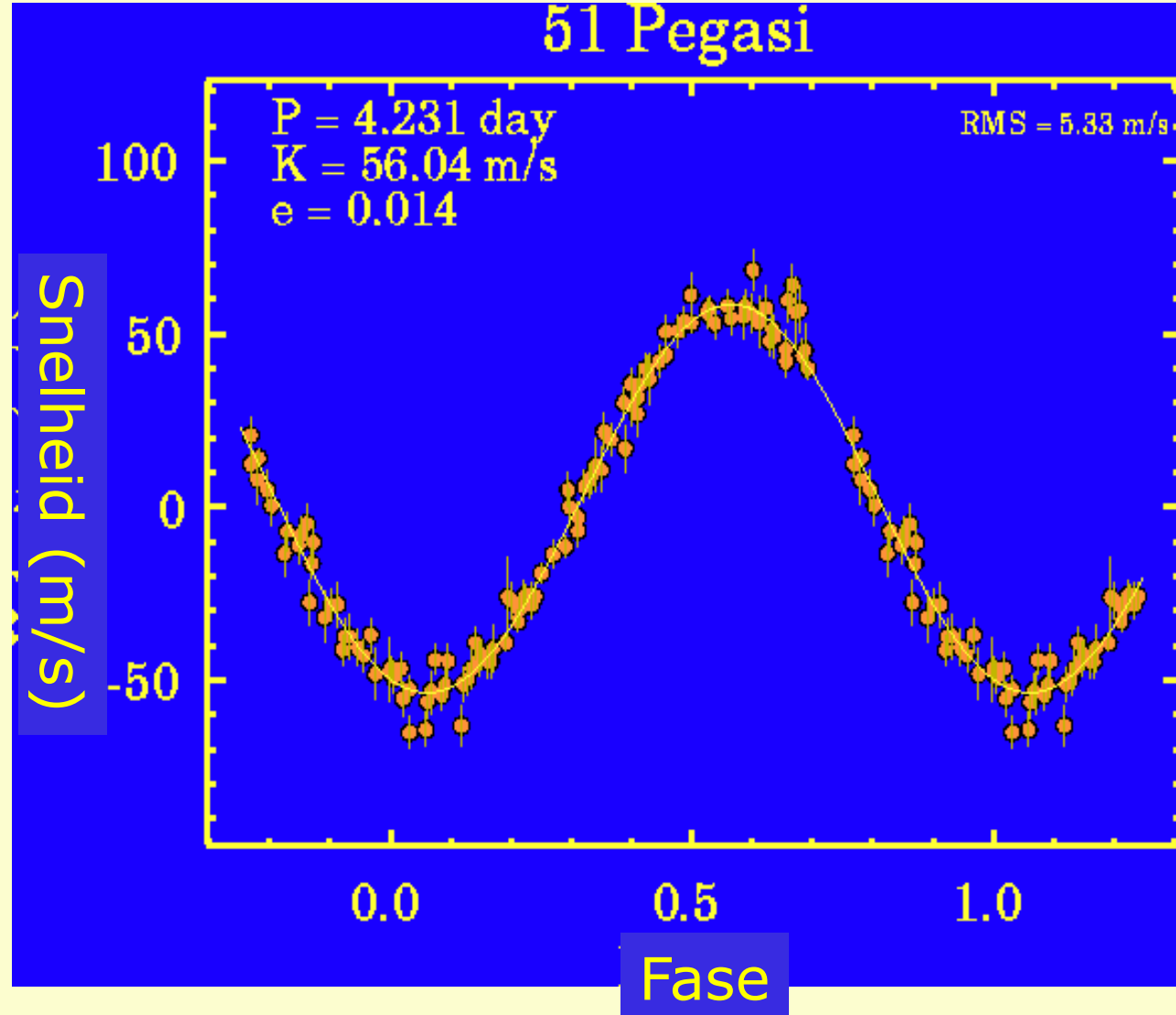
- Michel Mayor, uit Genève, Zwitserland, ontwikkelt spectrometers om de radiale snelheden (snelheden van ons af en naar ons toe) van sterren te meten
- Met Didier Queloz ontwikkelde hij Elodie; die kon een nauwkeurigheid van 15 m/sec halen
- In juli 1995 hebben zij een exoplaneet ontdekt die in 4 dagen om de ster 51 Pegasus draaide, half zo zwaar als onze Jupiter

Zo zouden 51 Pegasus en zijn exoplaneet er uit kunnen zien, vlakbij elkaar.

<https://vignette2.wikia.nocookie.net/planetpedia/images/5/5b/51pegasi-b.jpg/revision/latest?cb=20110423162504>

Planeet om 51 Pegasi

Op 48 licht jaren,
G2IV ster (lijkt
op onze Zon).
Planeet, wat
kleiner dan
Jupiter
(omlooptijd 12
jaar!), draait in
slechts 4,2
dagen rond zijn
moederster.
Nauwkeurigheid:
1 op 10 miljoen!!
($\Delta\lambda/\lambda = v/c$)

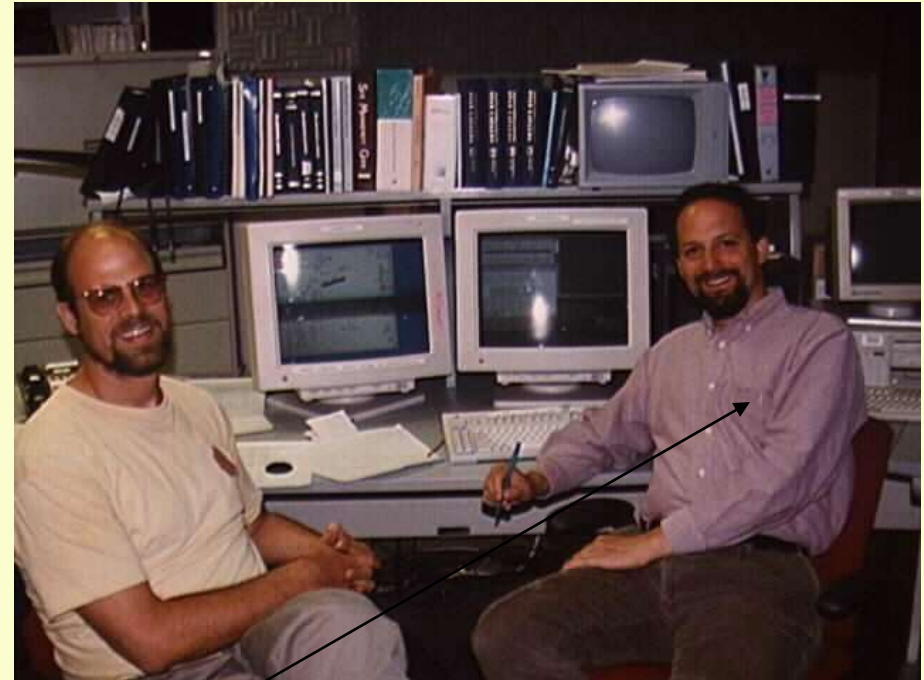


Ze heten nu Helvetios en Dimidium 8

Ontdekkers



De ontdekkers van een planeet om 51 Peg in 1995: Michel Mayor en Didier Queloz



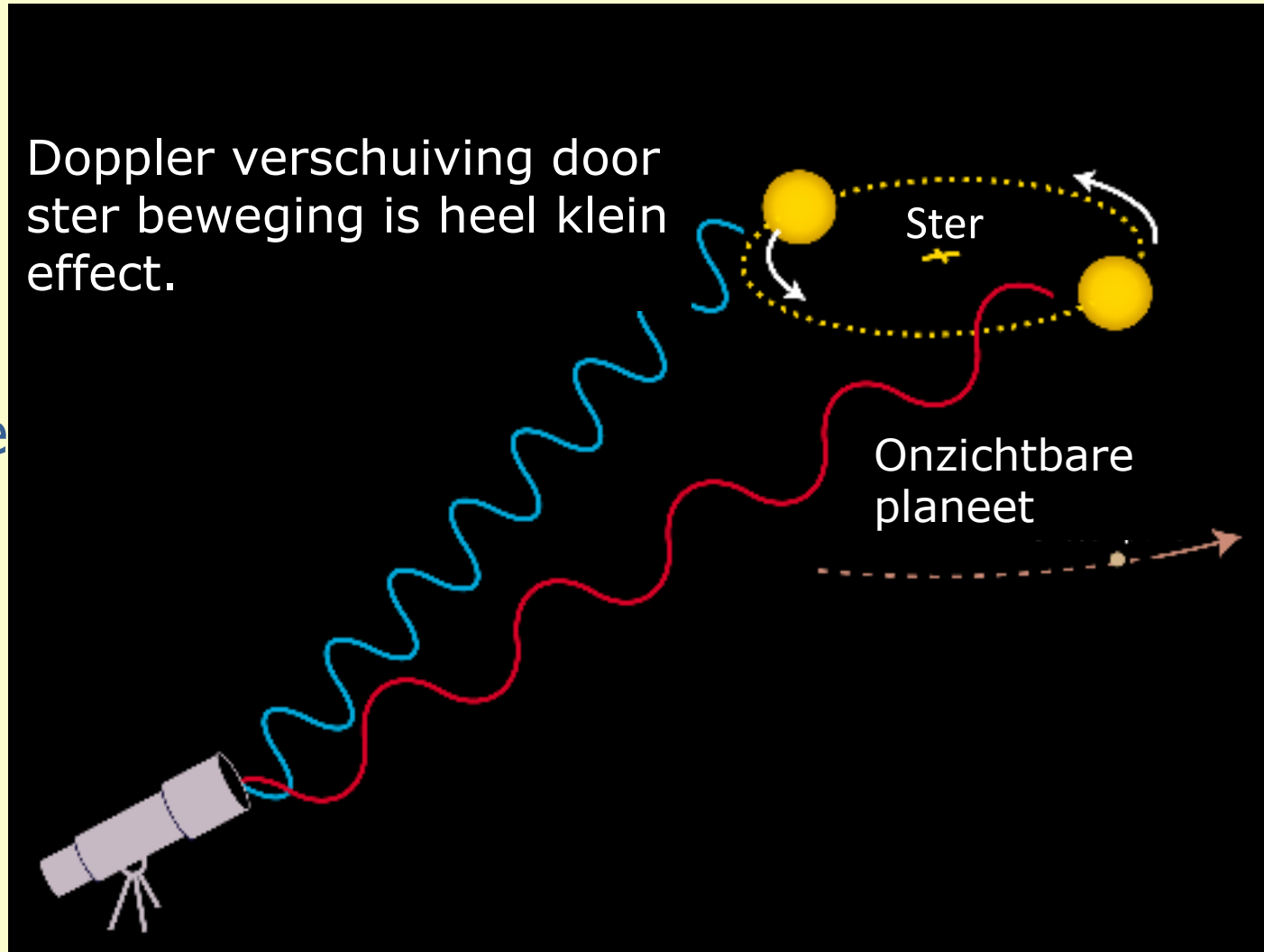
Geoff Marcy en Paul Butler zochten naar 'Jupiters' met omlooperperioden van ~ 12 jaar

Mayor en Marcy kregen in 2005 de 'Shaw' prijs van 1 million \$ in Hongkong. Mayor en Queloz kregen helft van de Nobelprijs in 2019. ⁹

Beweging naar ons toe en van ons af

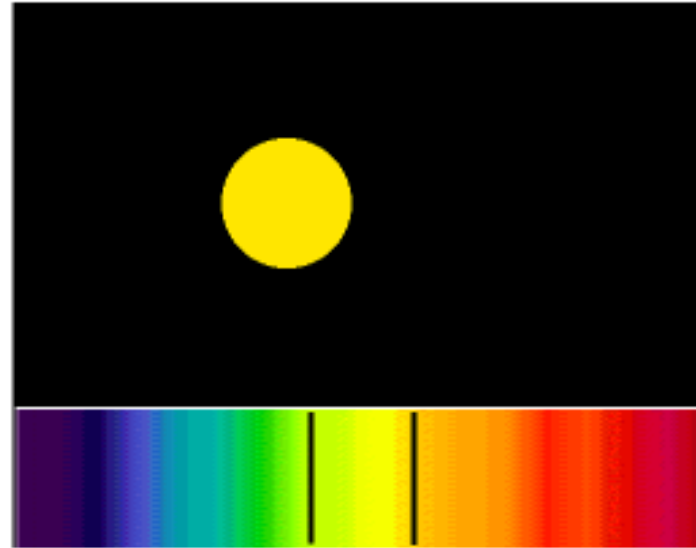
Doppler
formule:
 $\Delta\lambda/\lambda = v/c$.
Bekend van
geluid:
langskomende
trein.
Minstens
nauwkeurig-
heid 1 op 10
miljoen is
nodig, zelfs
om een
zware planeet
te vinden.

Doppler verschuiving door
ster beweging is heel klein
effect.



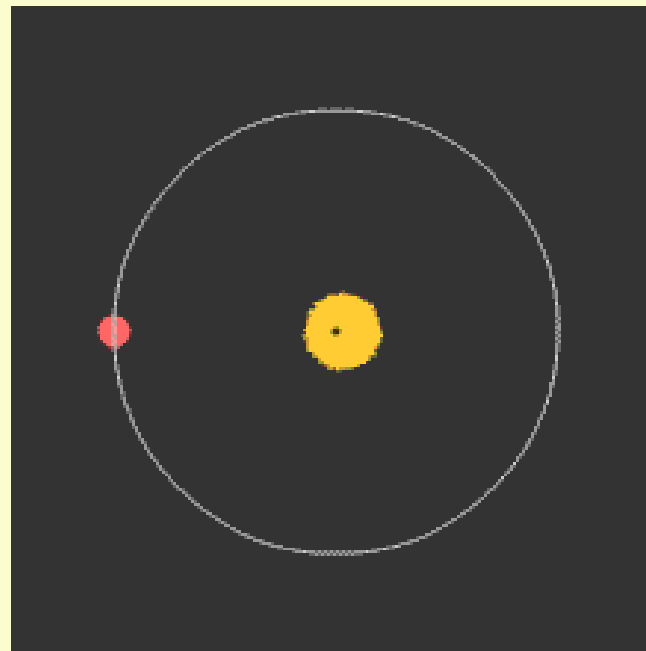


What is happening

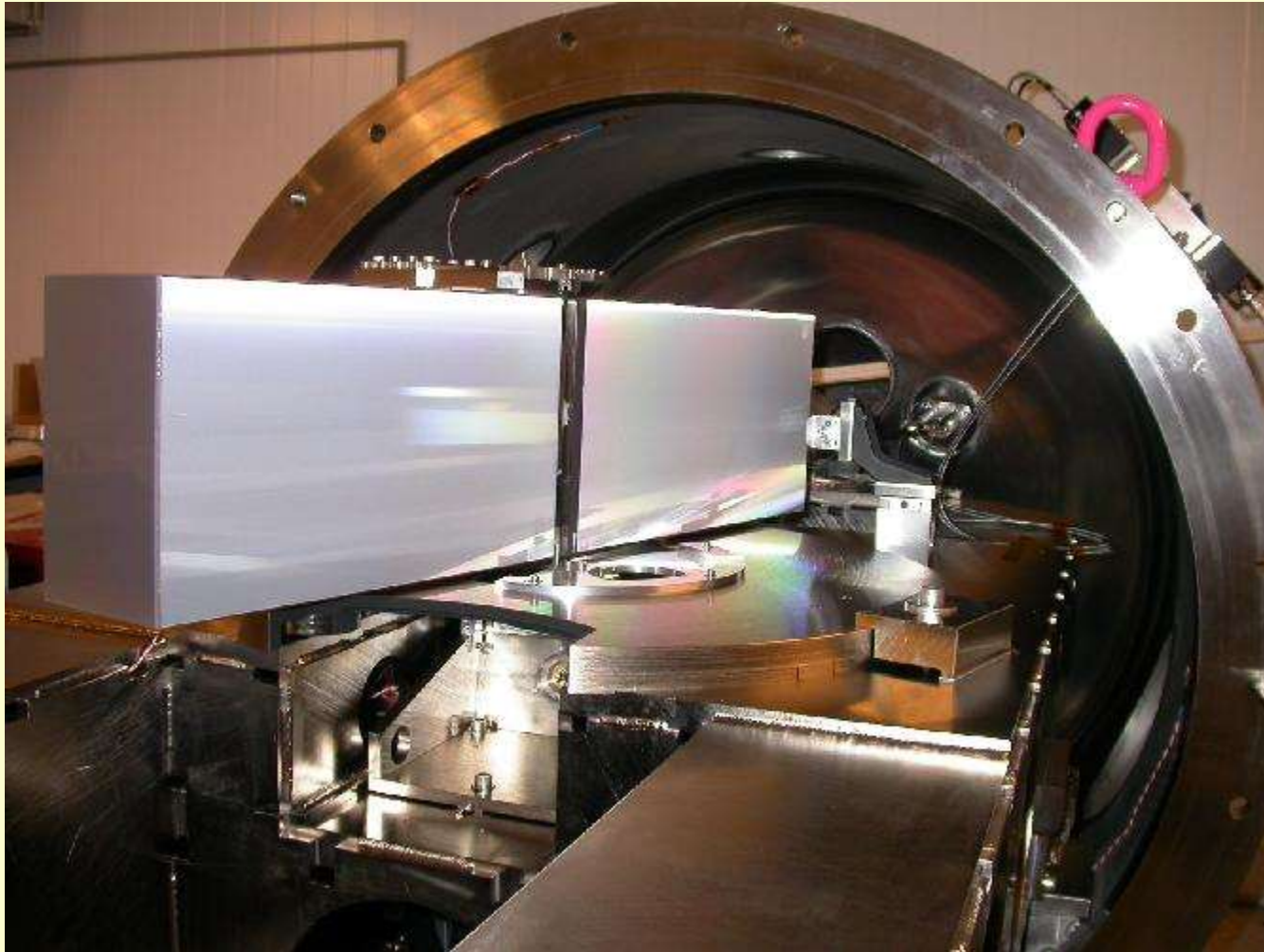


What we see

Meet ook in nabij infrarood om valse detecties te vermijden



HARPS, van Mayor, bij ESO

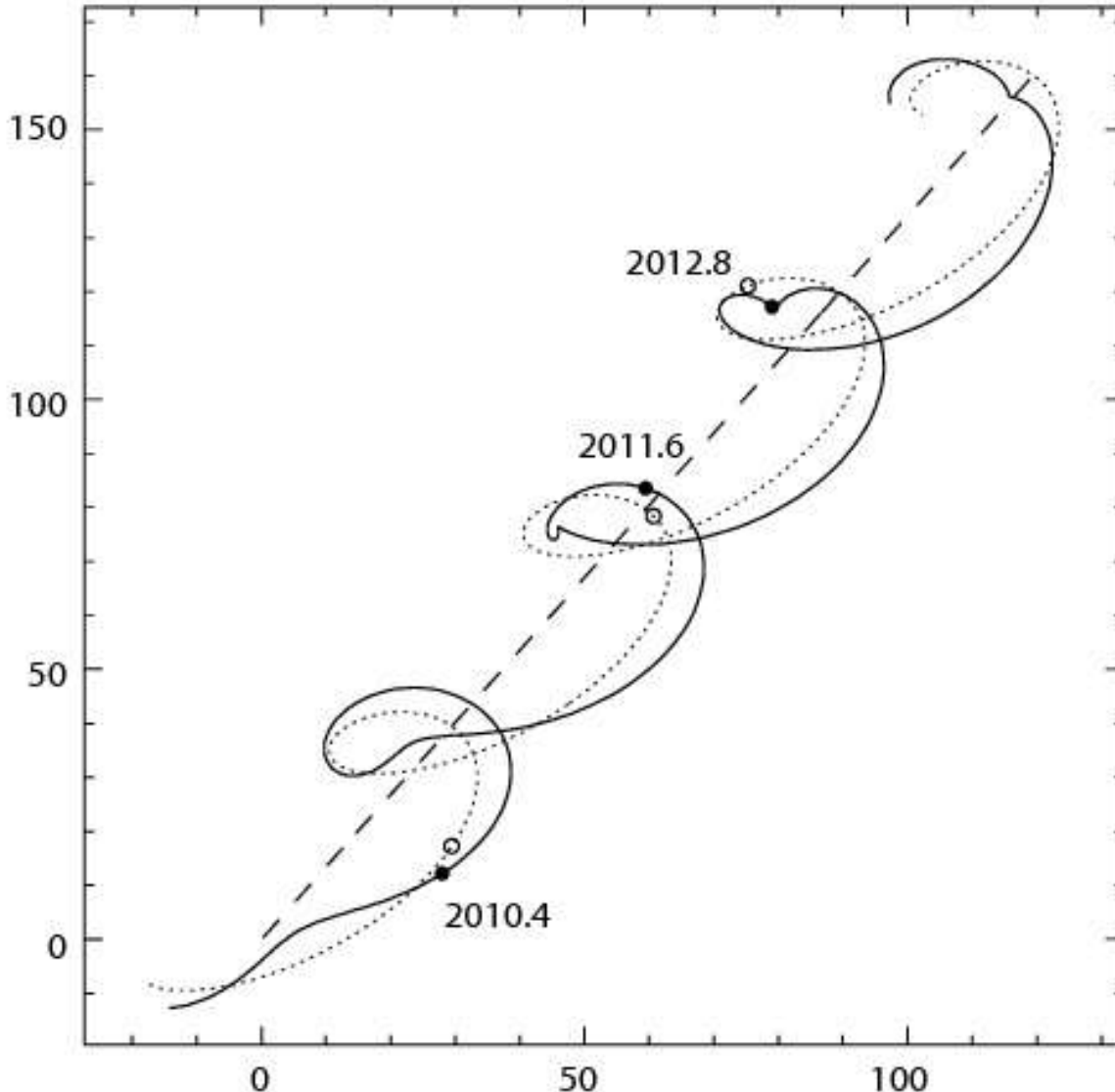


1 meter/seconde snelheidsnauwkeurigheid (1 op 300 miljoen!!)

Beweging aan de Hemel

<http://nccr-planets.ch/faqs/how-do-we-search-and-find-exoplanets-2/>

Declinatie (milli boogseconden)

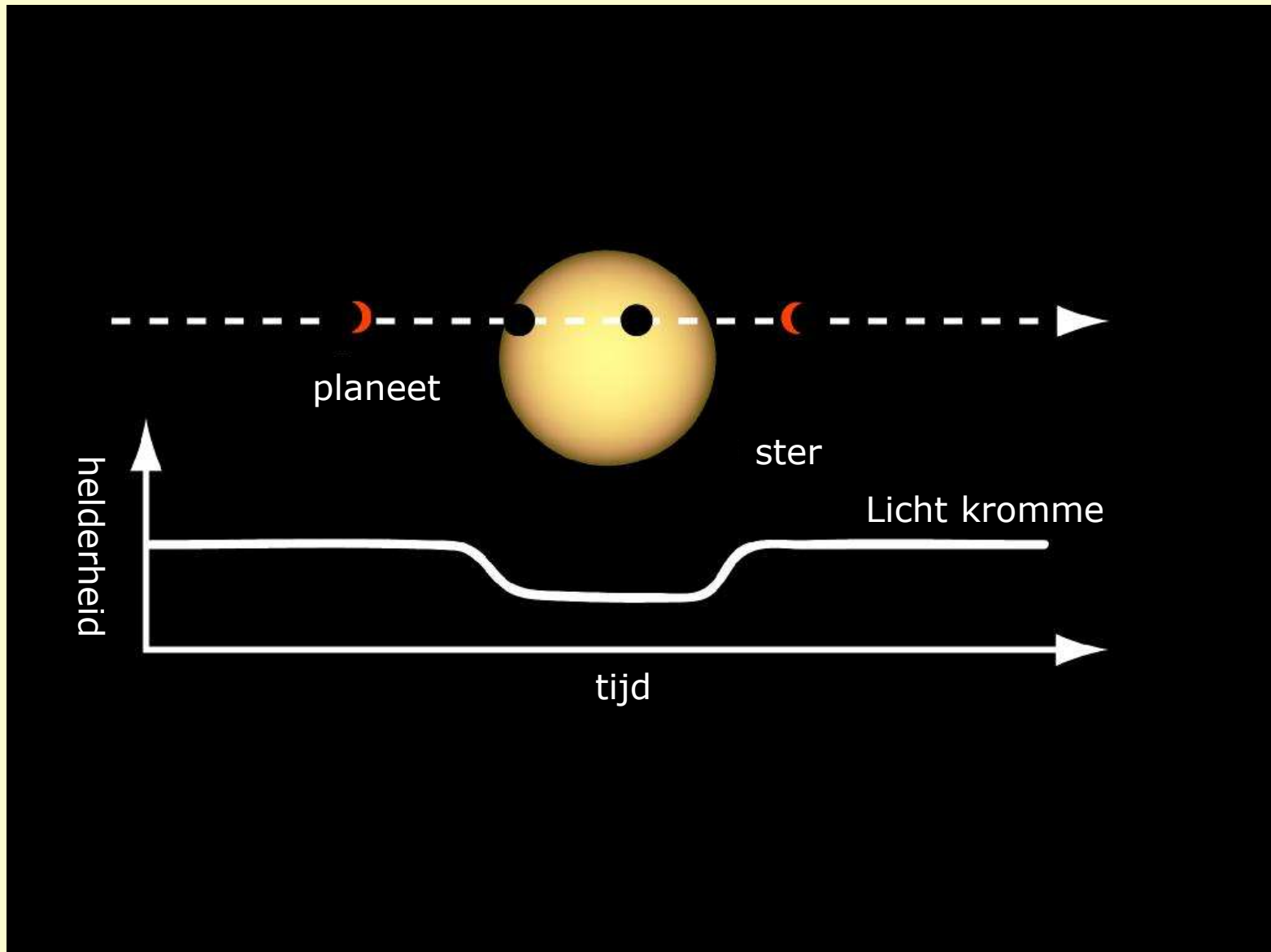


Rechte klimming (milli boogseconden)

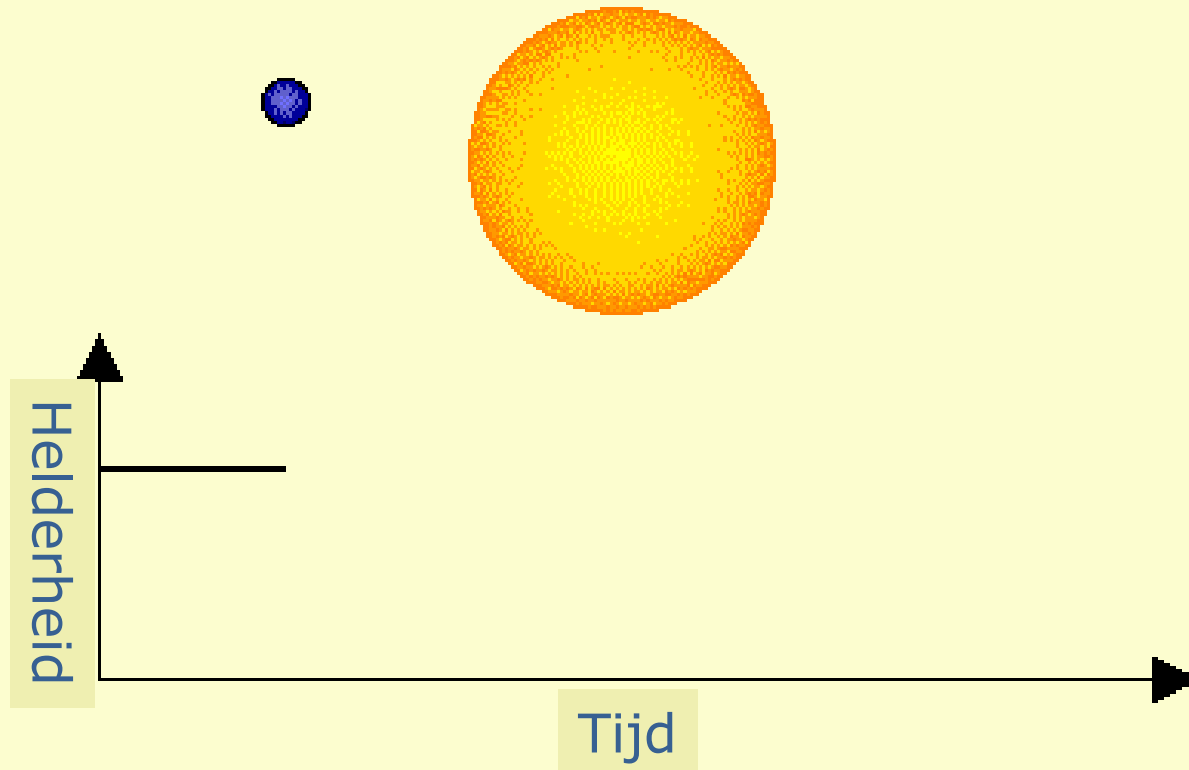
Ster op 50 pc,
eigenbeweging 50
milli boogseconde
per jaar, planeet van
 $15 M_{\text{jupiter}}$, draait 0,6
AE van zijn ster en
heeft eccentriciteit
0,2.

milli = 1/1000; ons
oog kan 1
boogminuut zien;
dat is 60
boogseconden.

Ster bedekt door een planeet

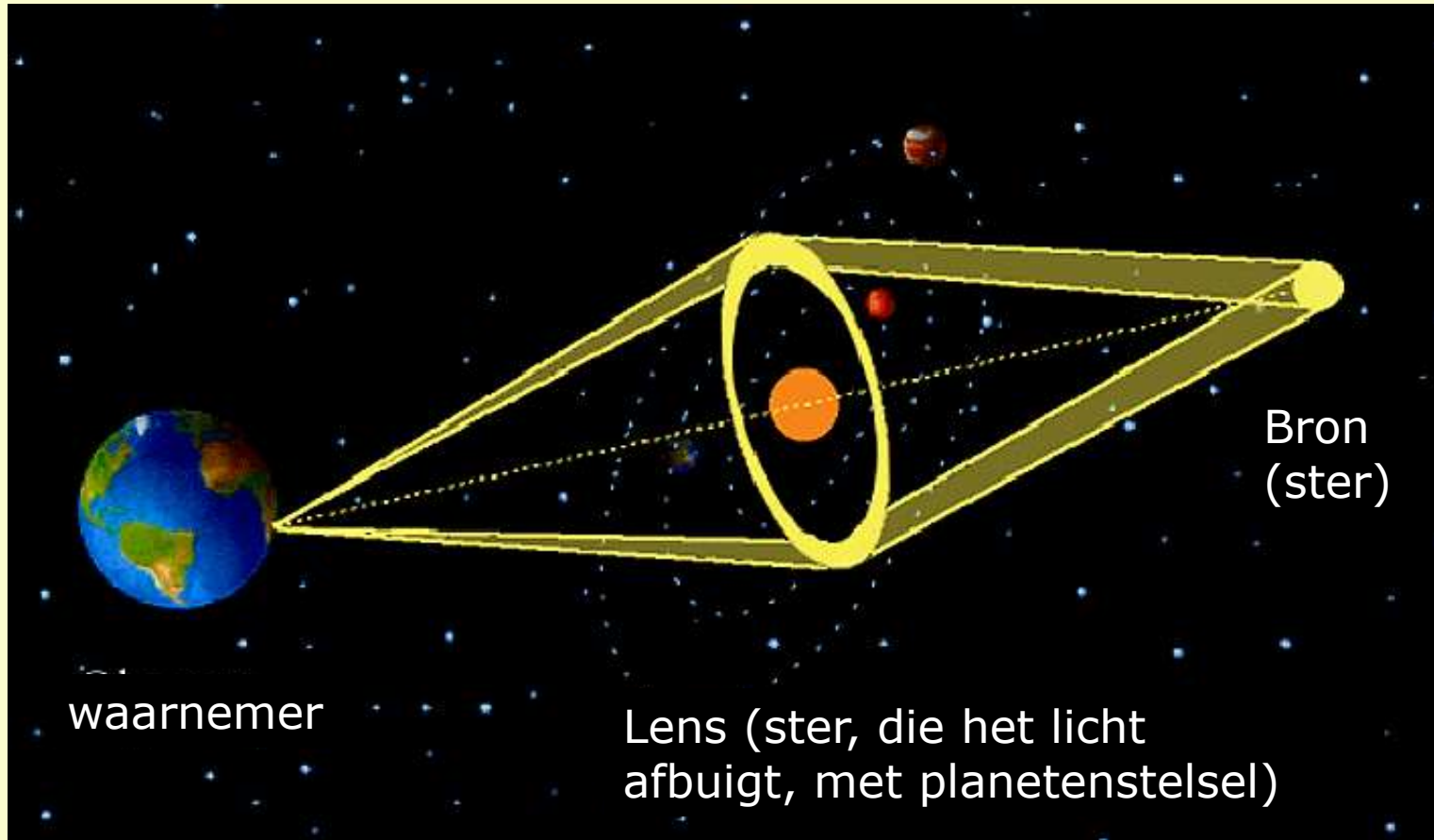


Planeet loppt over ster



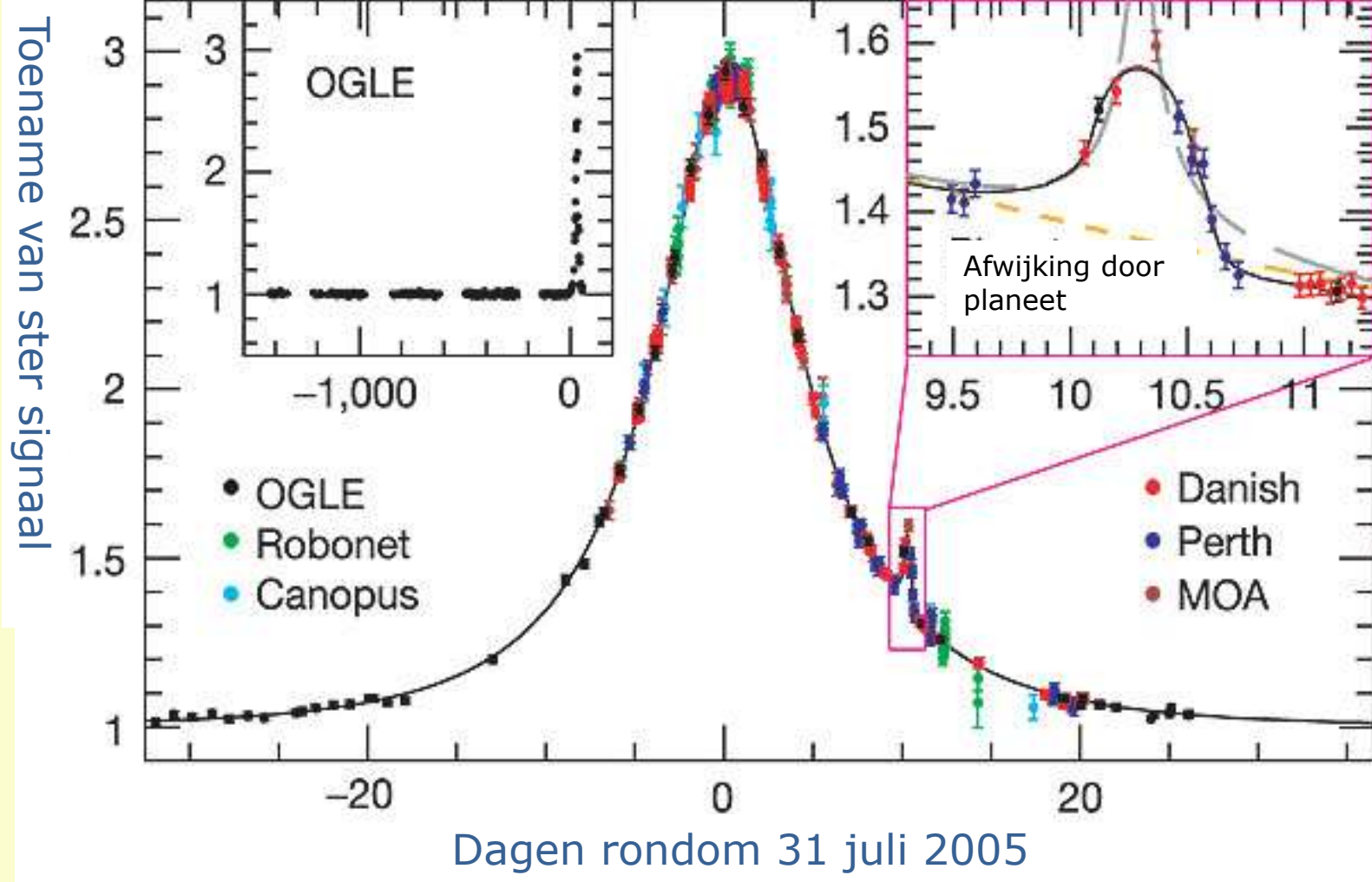
<https://fluxphysics.github.io/img/exoplanets/transit.gif>

Zwaartekrachtenlens



<https://medium.com/starts-with-a-bang/starts-with-a-bang-podcast-43-gravitational-microlensing-23750590430f>

Gravitatielens versterking



http://www.nature.com/nature/journal/v439/n7075/fig_tab/nature04441_F1.html

Directe metingen

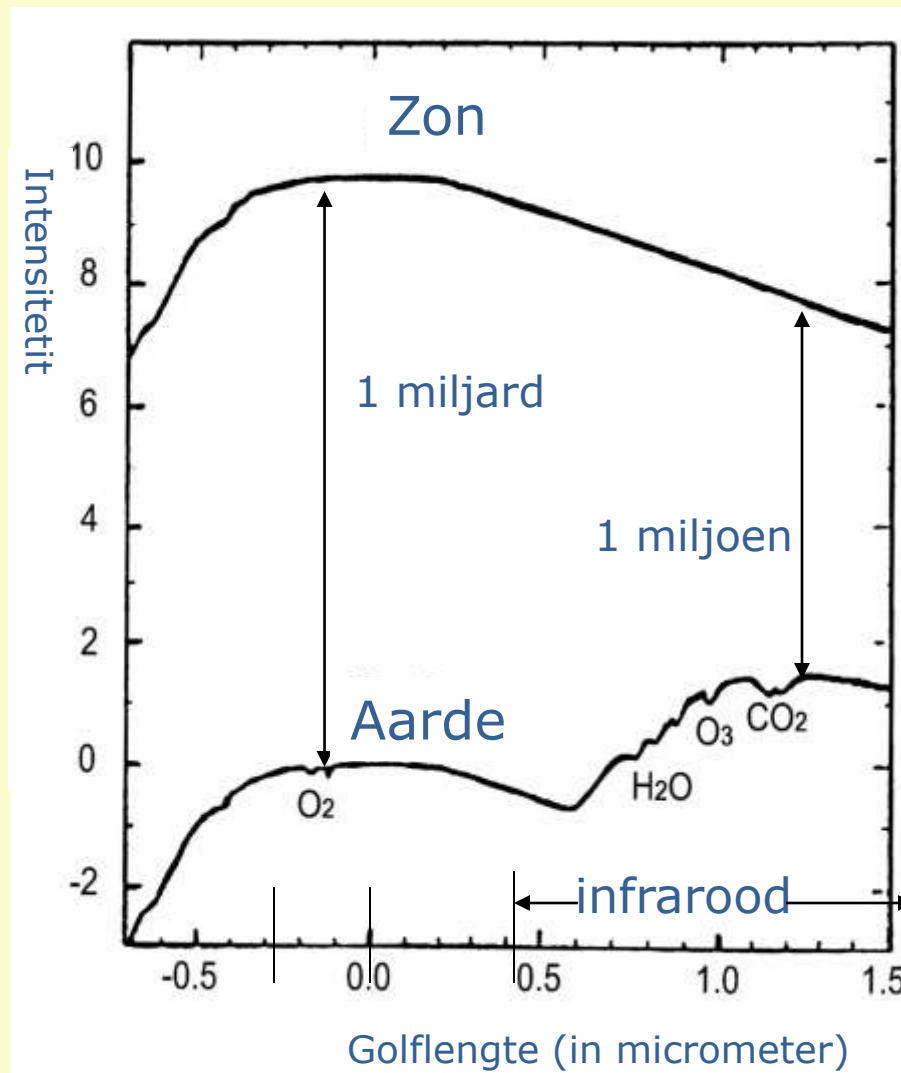
Planeten vinden bij een ster is als een vuurvliegje zien bij een vuurtoren



Het vuurvliegje



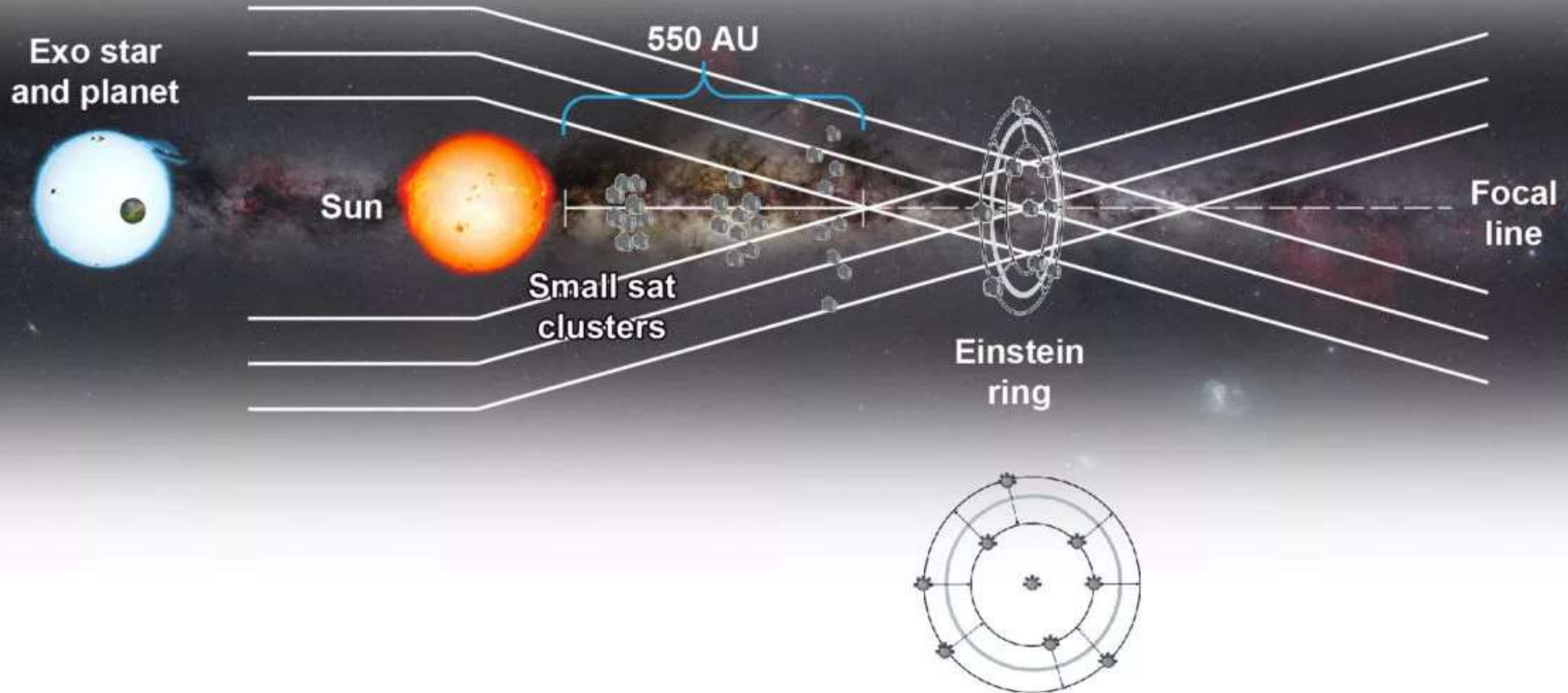
Infrarood waarnemingen



Scheelt 'maar' een factor miljoen in infrarood

Veel nieuwe instrumenten

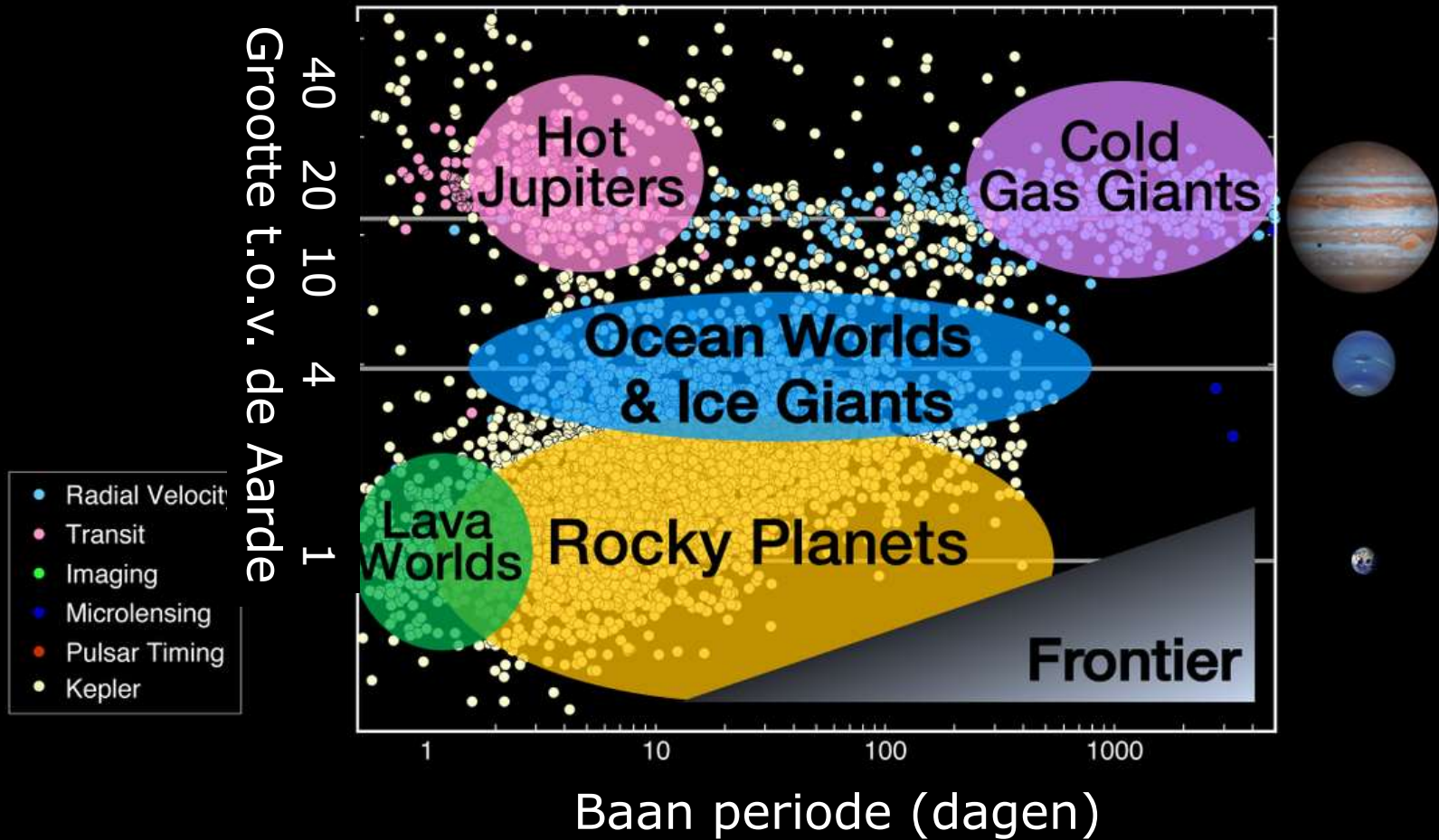
- Veel radiale snelheid en 'transit' metingen vanaf de grond; vaak automatisch; vooral ook voor heldere sterren
- TESS (NASA): lancering 2018, 0,5 miljoen sterren
- CHEOPS (ESA): lancering 2019, bekende sterren met planeten in detail bestuderen
- PLATO (ESA): lancering 2026, heldere sterren en asteroseismologie → ster massa en straal veel beter bekend → ook planeet massa en straal beter bekend



<https://www.planetary.org/space-images/solar-gravity-lens-telescope> Zwermen van kleine satellieten met grote zeilen, voortbewogen door de fotonen van de Zon, vliegen naar een plaats waar onze Zon het licht van een nabij ster systeem enorm versterkt (Einstein ring). Op die plek zouden we een scherp beeld kunnen maken van een exoplaneet. Dat heet Zon zwaartekracht telescoop.

SOORTEN EXOPLANETEN

Soorten exoplaneten



Kepler statistieken

- Minstens zoveel planeten als sterren
- Eén op de tien sterren heeft minstens één planeet zo groot als de Aarde
- De helft van de Kepler planeten zitten in meervoudige planeet systemen
- Die draaien over het algemeen rond in één vlak en dicht bij elkaar
- Uit bekende straal en massa van een ster en de Kepler metingen aan een overtrekkende planeet → straal planeet en baangrootte (Kepler's derde wet)
- Verstoringen van regelmaat bij meerdere planeten rond één ster zijn te meten → het zijn echt planeten

Lissauer et al, Nature 513, 336, 2014

Als je de straal en de massa kent kun je de dichtheid uitrekenen.

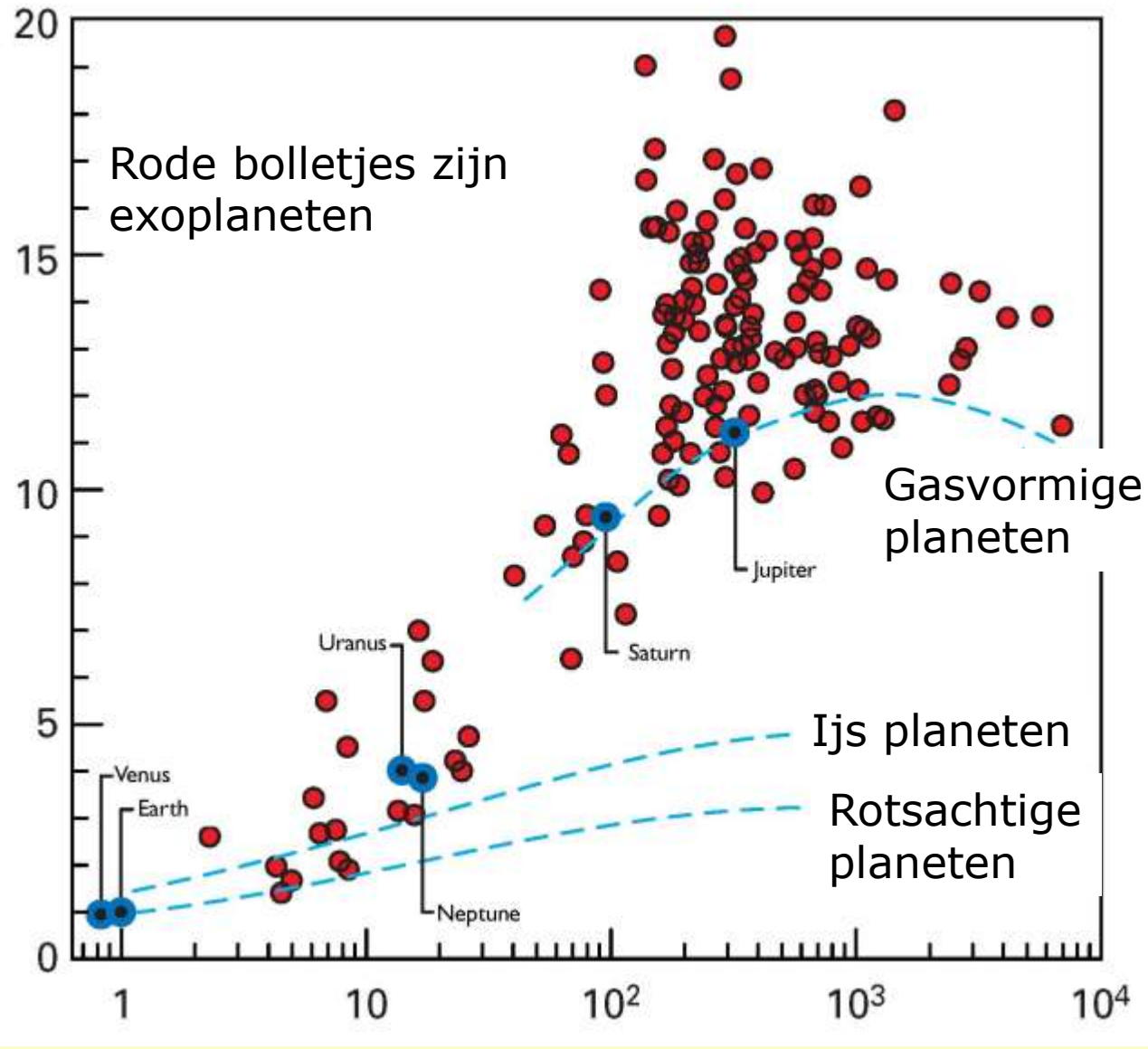


'Rotsachtige planeten':
Steen (3), ijzer (8),
gemiddelde ~ 5

'Ijs planeten':
Bestaan geheel uit
water (vnl in
ijsvorm) ~ 1

'Gasvormige planeten':
H/He en een vaste
kern van ten
hoogste 10% massa

Straal exoplaneet (in aard stralen)

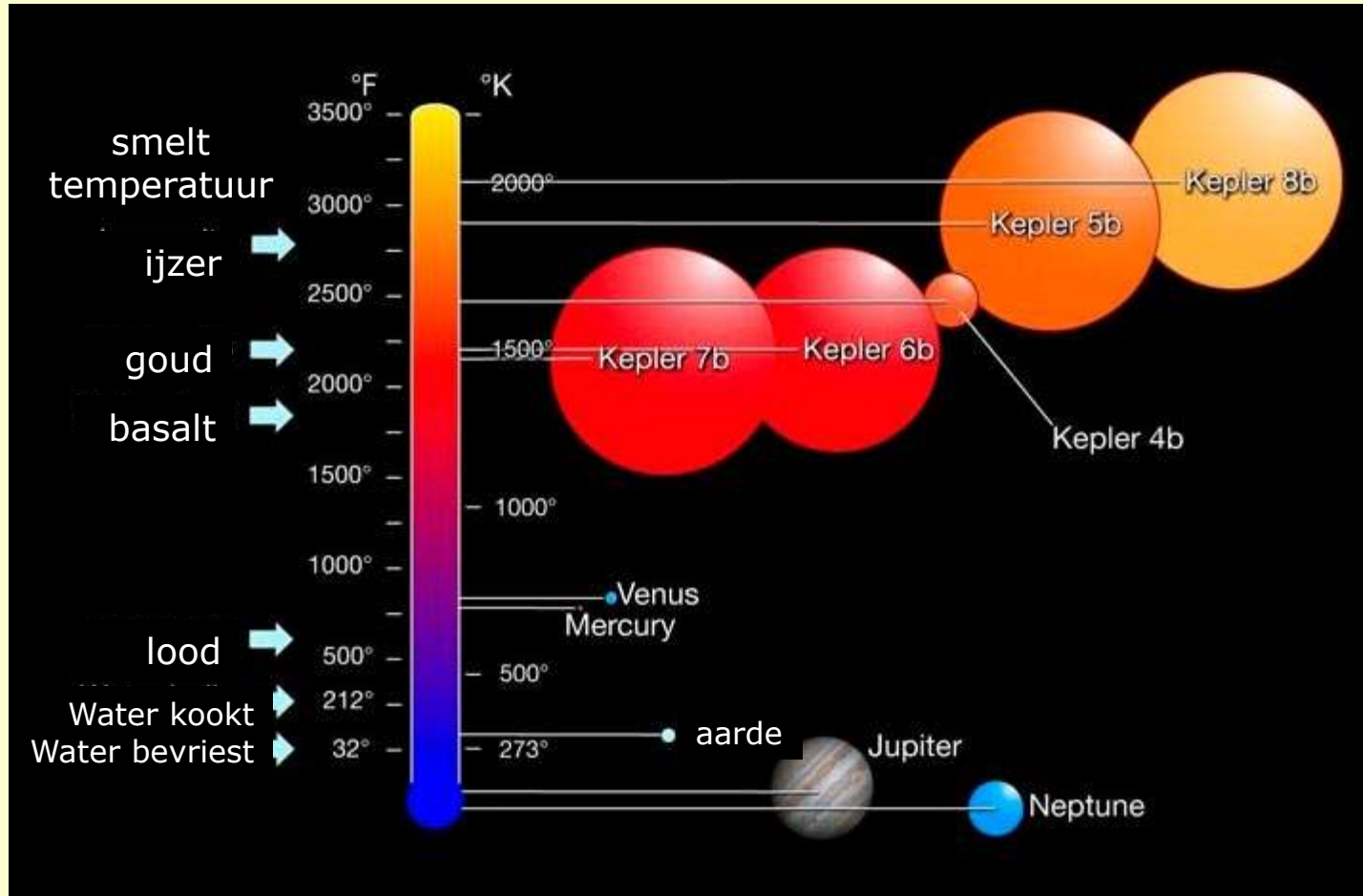


Massa exoplaneet (in aard massa's)

<https://pressbooks.online.ucf.edu/astronomybc/chapter/2-1-5-exoplanets-everywhere-what-we-are-learning/>
(figuur ziet er nu anders uit.)

Eerste 5 Kepler exoplaneten

<http://physicsworld.com/cws/article/news/2010/jan/05/kepler-unveils-its-first-five-exoplanets>



Deze 5 reusachtige exoplaneten zijn het eerst gevonden door Kepler. Domweg omdat ze door hun omvang en korte omlooptijd (minder dan 5 dagen) het makkelijkst te vinden waren.

Interactie schijf en planeet

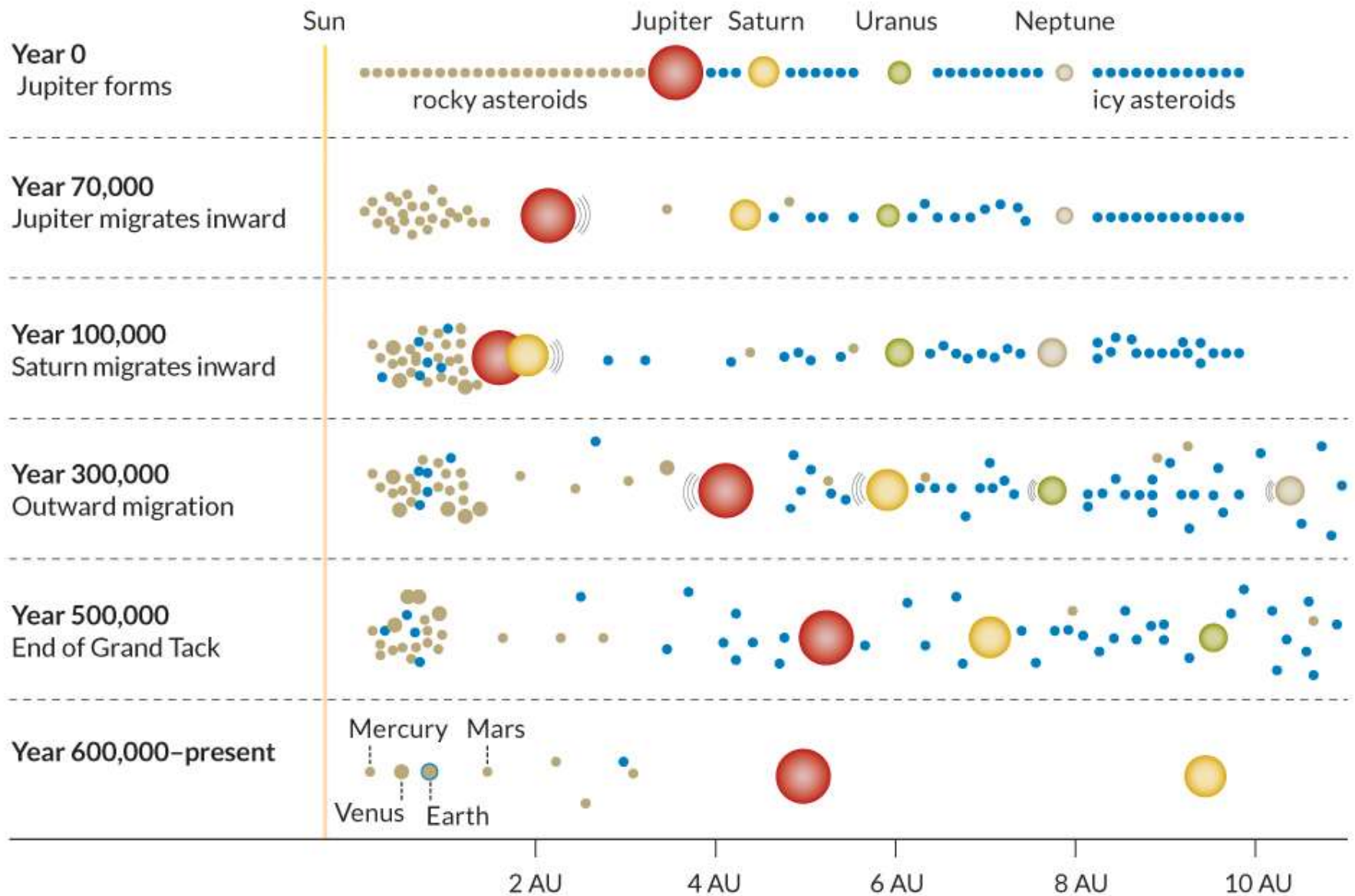
- Planeten worden vrijwel gelijktijdig met hun moederster gevormd en bevinden zich dan in een protoplanetaire schijf, bestaande uit gas en (met de tijd steeds meer) stof, tot kiezelsteentjes aan toe
- Tot 1995 kenden we slechts één planetenstelsel, ons Zonnestelsel, en hadden we een 'sluitende' theorie over de vorming van onze planeten
- Die theorie kon de prullenbak in en we moeten de wisselwerking tussen schijf en planeten veel beter bestuderen om te begrijpen hoe al die andere soorten exoplaneten gevormd zijn

Baan eigenschappen

- Wisselwerking met de jonge schijf zorgt er voor dat de planeten in nette cirkelbanen lopen in het vlak van de protoplanetaire schijf
- Het vinden van een hete Jupiter, ooit gevormd ver weg van zijn moederster (?) en nu op haar lip zittend, lijkt baan veranderingen van planeten noodzakelijk te maken
- Planeten verhuizen misschien voortdurend – in de eerste paar miljoen jaar heel sterk en soms ook honderden miljoen jaren later – door deze wisselwerking

Grand Tack model

- Nature 2011, Walsh en Morbidelli
- Verklaart verrassend kleine Mars
- Verklaart bestaan van de planetoiden gordel tussen Mars en Jupiter
- Legt uit waarom Uranus en Neptunus zover weg staan; in dat gebied is onvoldoende gas en stof om zulke grote planeten te vormen → moeten meer naar binnen gevormd zijn

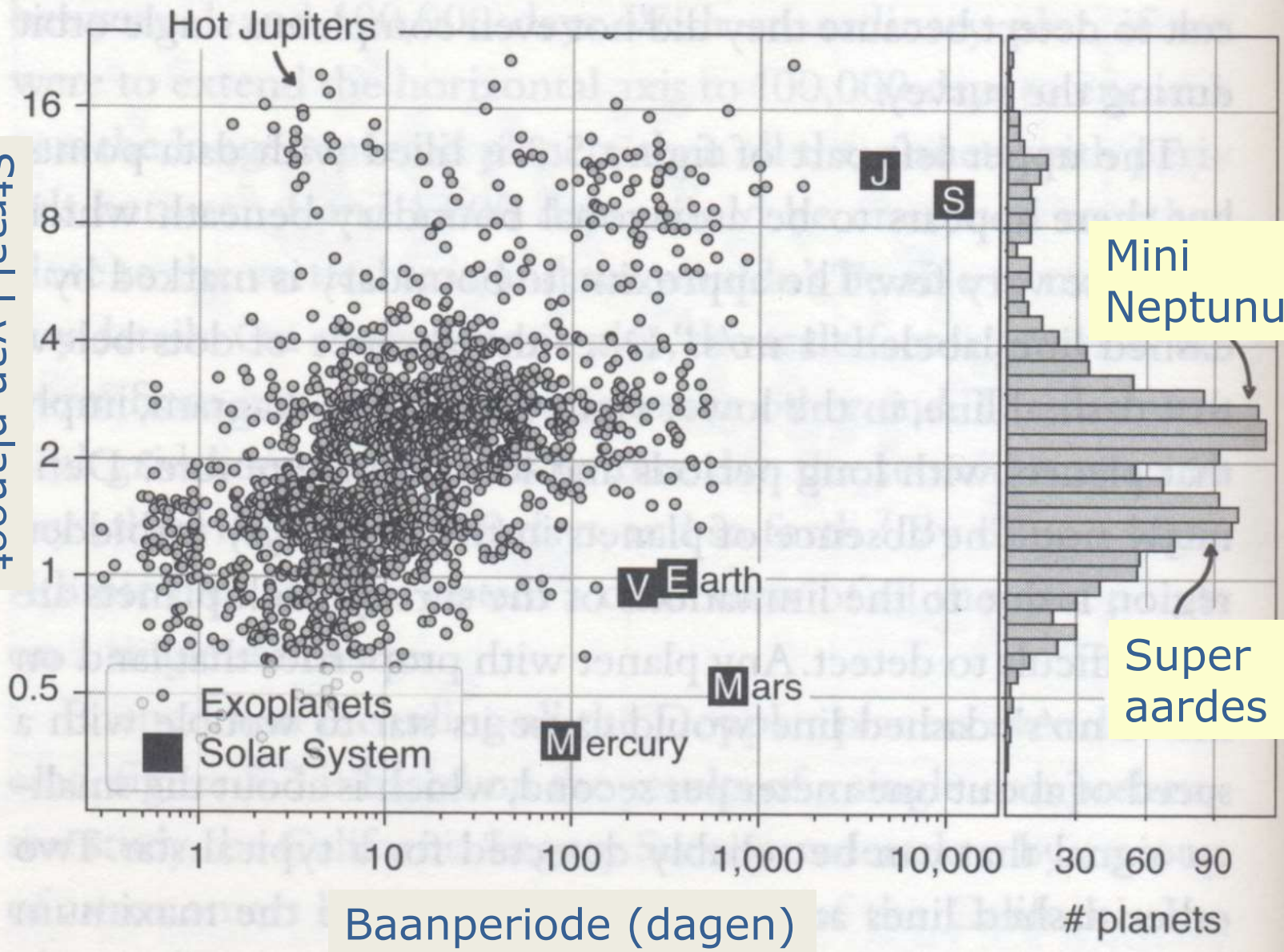


Grand Tack plaatje. Tamelijk ingewikkeld scenario.

https://www-n.oca.eu/morby/C4PO/grand_tack_05162015.jpg

Zie ook: https://en.wikipedia.org/wiki/Grand_tack_hypothesis

Straal I van planeet

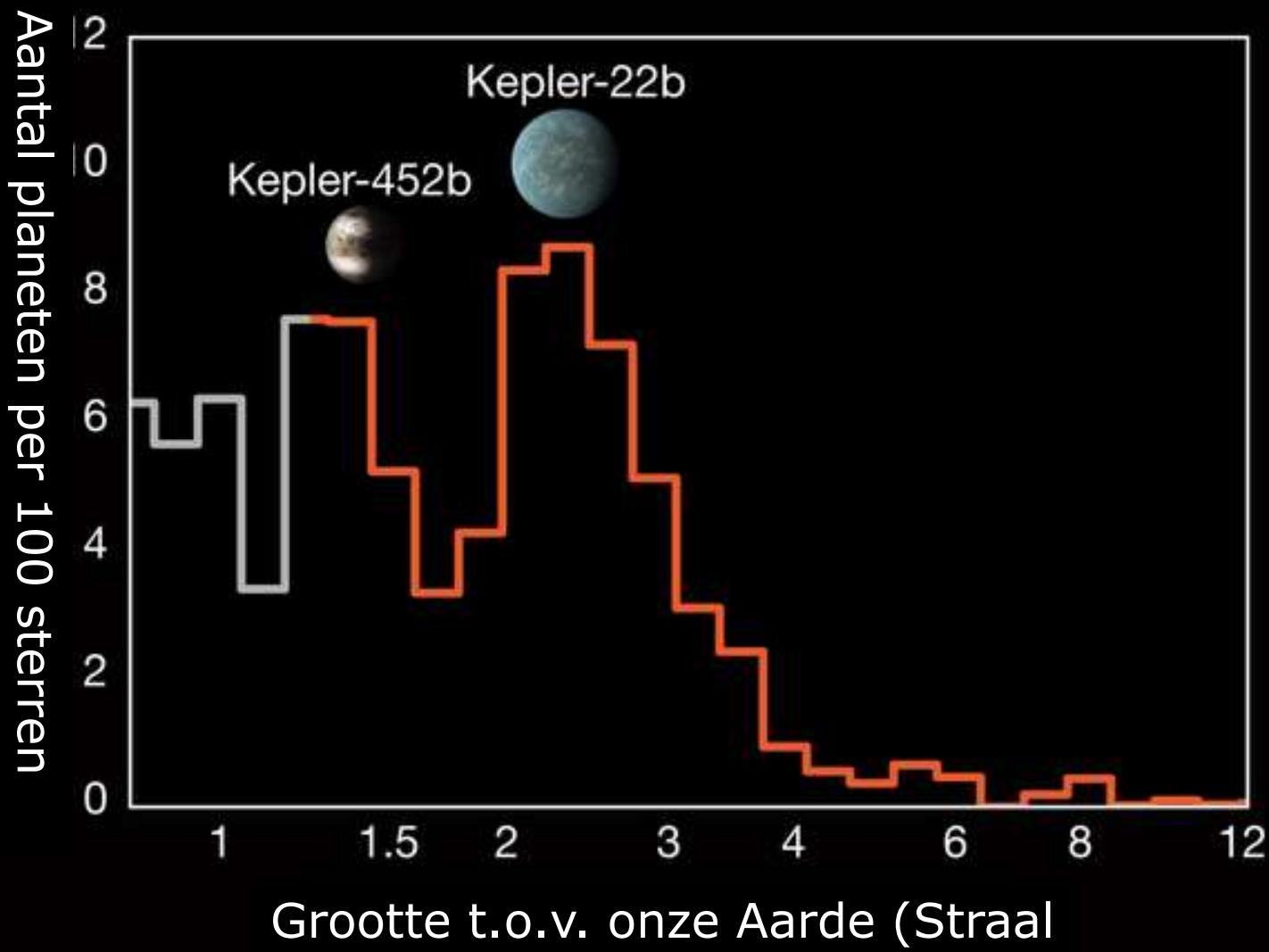


Baanperiode (dagen)

Mini Neptunussen

Super aardes

Figuur 5.4 van boek Winn. In het gebied 1 tot 4 aardstralen zijn heel veel planeten, met veel kleinere afstanden tot hun moederster dan onze Aarde. Zulke planeten hebben wij niet.



<https://www.spaceflightinsider.com/missions/space-observatories/kepler-discovers-10-earth-like-exoplanets-219-planet-candidates/>

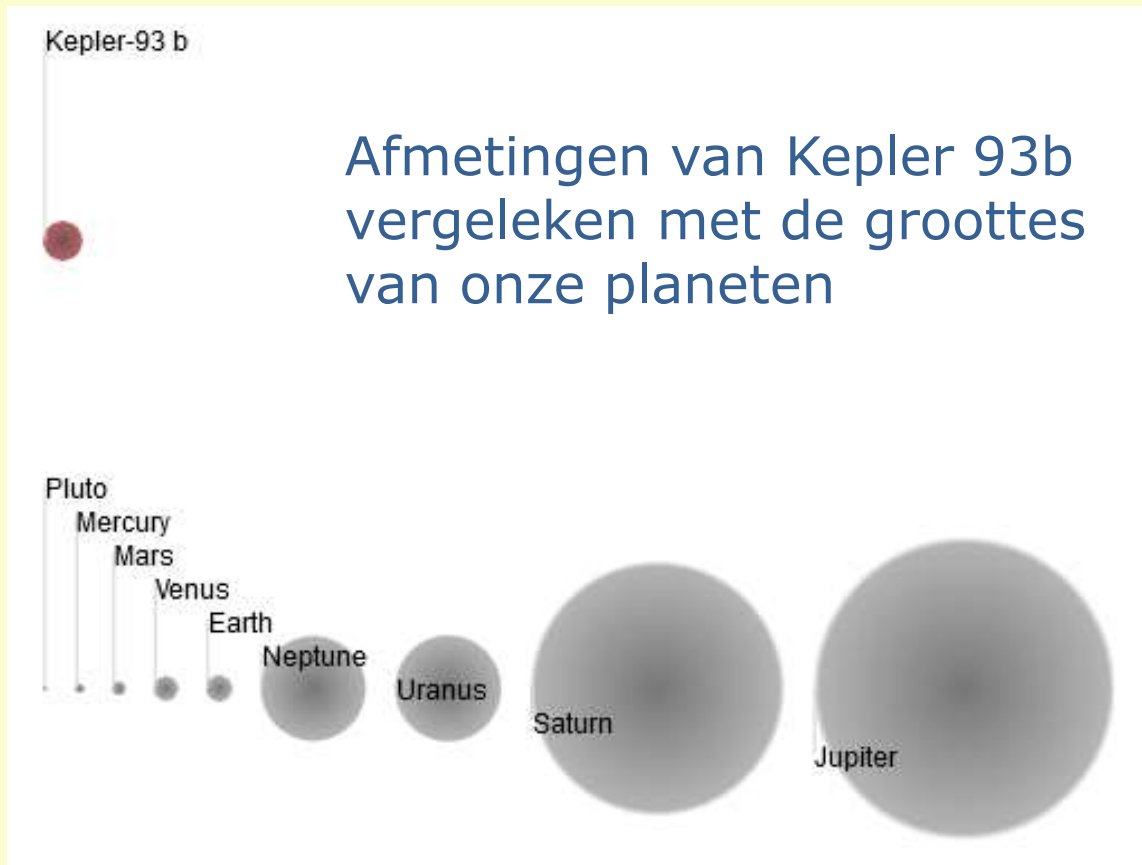
Er is een gat gevonden in de verdeling van planeet groottes. Exoplaneten van twee soorten: super-Aardes en mini-Neptunussen. Zulke planeten hebben we niet in ons zonnestelsel! Plaatje van NASA / Ames / Caltech / University of Hawaii (B. J. Fulton)

Superaardes

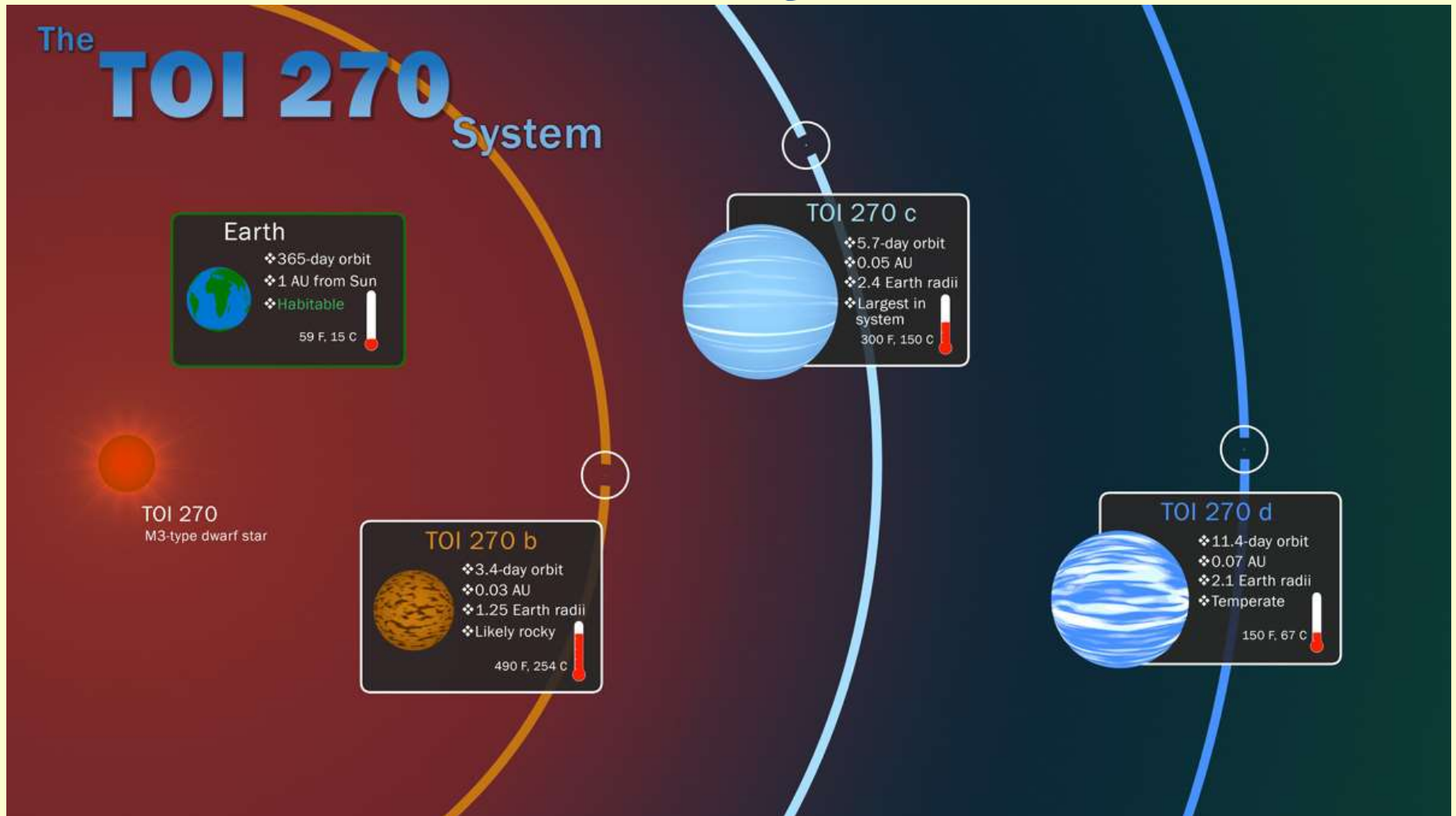
- Super Aardes vormen een klasse van planeten die niet lijken op enige planeet in ons zonnestelsel
- Ze zijn zwaarder dan onze Aarde (2-10 x zo zwaar) en toch lichter dan de ijsreuzen zoals Neptunus en Uranus
- Als we hun grootte en gewicht kennen kunnen we de dichtheid bepalen
- We vinden allerlei dichtheden, soms wijzend op een rotsachtige planeet, maar ook veel minder dicht dan de Aarde: een combinatie van veel gas en rots, of heel veel water en rots
- Super aardes komen veel voor, maar hun aard is onduidelijk, omdat we ze in ons zonnestelsel niet tegenkomen

Kepler-93

- Is een ster zoals onze Zon, op 315 lichtjaar
- Zijn planeet (b) (de ster is 'a') is 4 x zo zwaar en 1,5 keer zo groot als de Aarde, lijkt rotsachtig, draait in 5 dagen rond op 0,05 AE



TOI 270 systeem



TOI 270 b, c, d wegen 2, 7, 5 keer de massa van de Aarde; gevonden door de TESS satelliet; b is rotsachtig, c en d zijn als Neptunus (op 0,03; 0,05 en 0,07 AE van hun moederster.)

Kepler-90 System Planet Sizes

(Artist's Concepts)



Kepler 90h staat dichterbij
zijn moederster dan onze
Aarde.

Solar System

Planet sizes are to scale; distances are not.

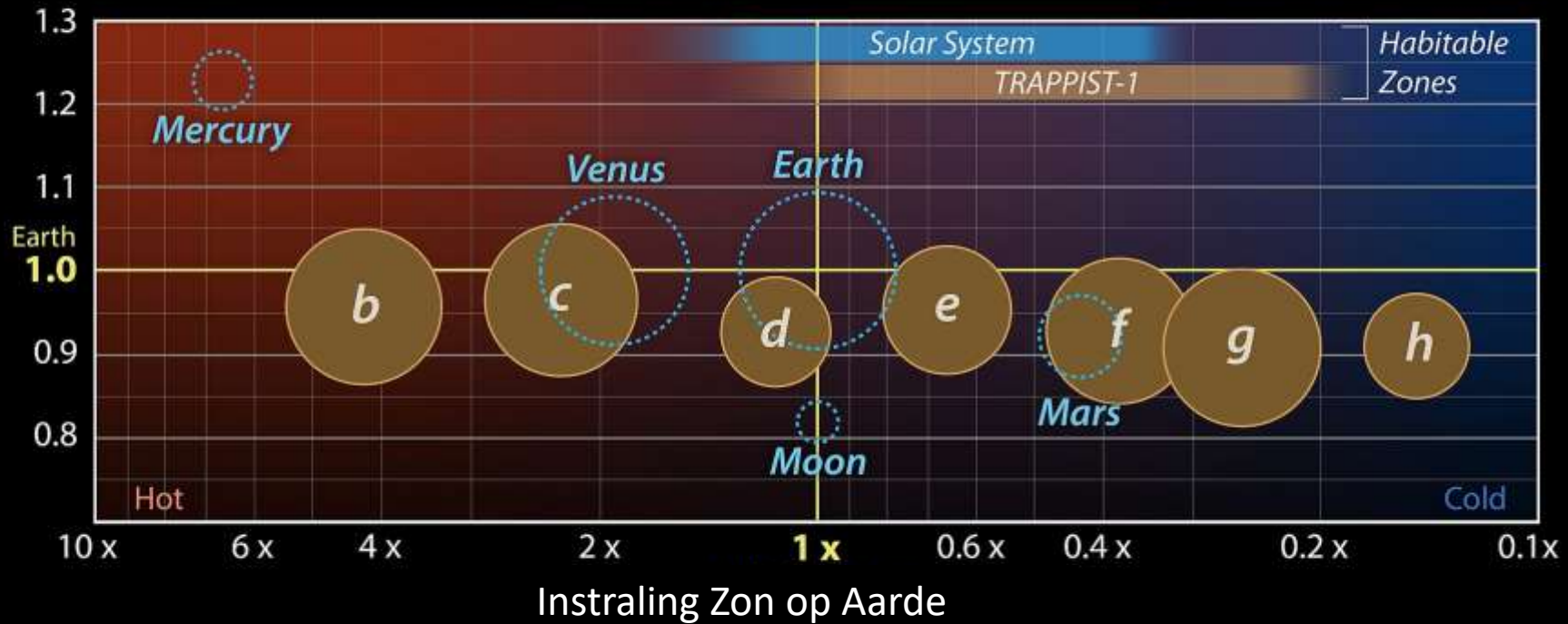
Kepler 90 is een G0 ster (wat heter dan de Zon) op 2800 lj. In het plaatje kun je alleen de groottes van de planeten vergelijken; de afstanden betekenen niets.

By NASA/Ames Research Center/Wendy Stenzel

<https://photojournal.jpl.nasa.gov/jpeg/PIA22193.jpg> , Public Domain ,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=64818984>

Trappist-1 vergeleken met ons zonnestelsel

Planeet dichtheid t.o.v. Aarde



Instraling door de moederster

De Trappist-1 planeten staan veel dichterbij hun ster (0,01 tot 0,06 AE), maar hun ster is veel kouder dan onze Zon (2550 versus 5500 K). Dus kunnen daar best prettige temperaturen zijn.

By NASA/JPL-Caltech <https://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA24371> , Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=99200023>

Jupiter & Major Moons



TRAPPIST-1 System



Inner Solar System



De planeten draaien om een dwerg ster heen, veel kleiner en kouder dan onze Zon

Trappist 1 systeem

- In 2017 is dit planeet systeem gevonden, 7 aardachtige planeten (5 zo groot als de aarde, 2 tussen Aarde en Mars in)
- Tenminste 3 van deze planeten zouden vloeibaar water op hun oppervlak kunnen hebben
- De banen zijn strikt in één vlak en de planeten zitten zeer dicht op elkaar; de baangroottes zijn meer vergelijkbaar met Jupiter en zijn manen dan ons Zonnestelsel
- De afstand tussen b en c is 1,6 keer de afstand van de Aarde tot de Maan
- Een jaar op de dichtsbijzijnde planeet is 1,5 Aardse dagen, terwijl de verste planeet in 18,8 dagen om zijn moederster draait



Zonsondergang op de Star Wars planeet Tatooine, met twee zonnen. Zulke planeten rond dubbelsterren zijn gevonden!

<https://www.cbr.com/scrapped-star-wars-spinoff-tatooine-return/>

Oceaan planeet

- Wikipedia definieert: Een oceaan planeet, oceaan wereld, water wereld of aquaplaneet is een type aardse planeet die een aanzienlijke hoeveelheid water bezit óf aan zijn oppervlak óf onder zijn oppervlak
- Op water werelden zou Leven kunnen ontstaan en in stand blijven gedurende miljarden jaren. Ons zonnestelsel telt tenminste 4 water werelden: Europa, Enceladus, Ganymedes, and Callisto. Ook zijn kandidaten: Dione, Pluto, Triton, en Ceres en zelfs misschien: Mimas, Eris, en Oberon.

Veel water werelden?

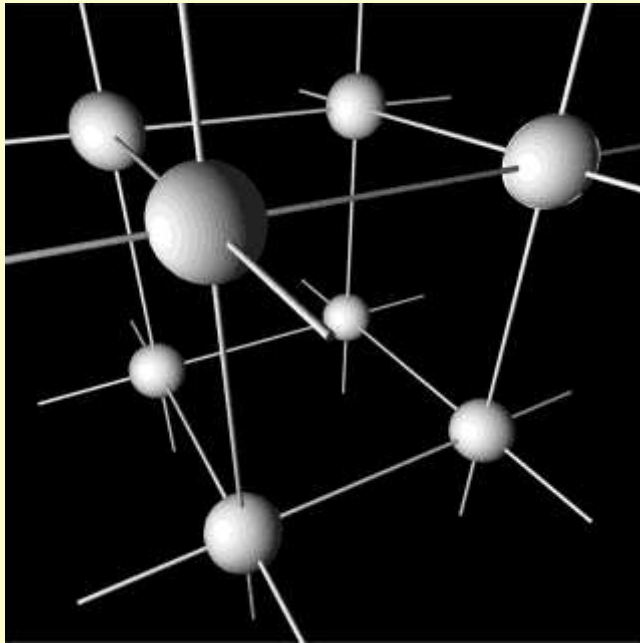
- Zowel modellen als waarnemingen wijzen er op dat waterwerelden veel zouden moeten voorkomen
- Diverse kandidaat-waterwerelden zouden bevestigd kunnen worden door metingen met de James Webb Space Telescope
- Sommige Trappist-1 planeten zouden waterwerelden kunnen zijn

Eigenschappen

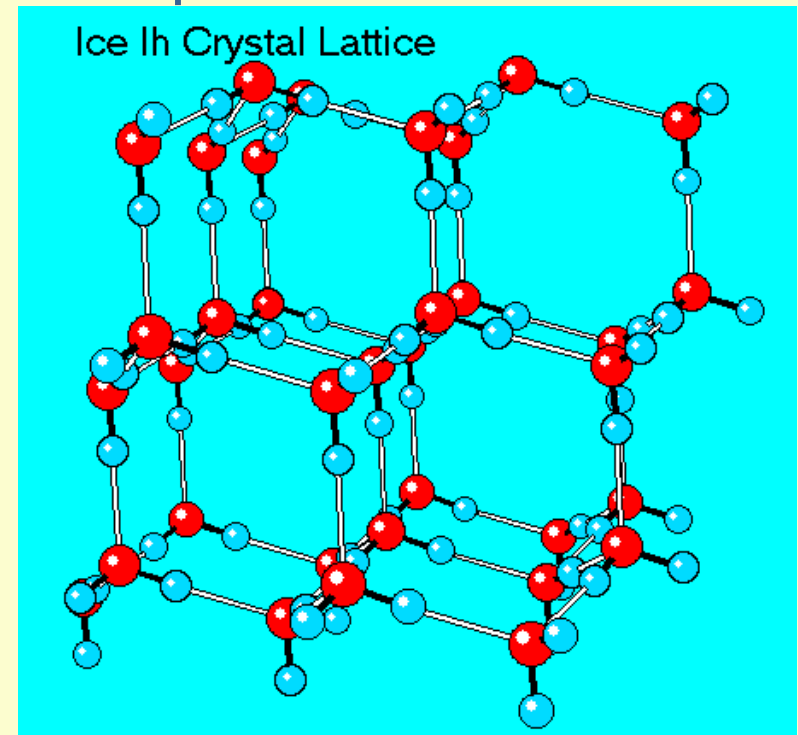
- Exoplaneten met massa $< 2 M_{\text{aarde}}$ en gewichtspercentage water boven 0,1 %; dan steekt er al geen land meer boven het water uit
- Water komt vrij als de magma oceaan stolt en komt aan het oppervlak voor als stoom, water of ijs
- Silicaten en water vormen dan twee aparte lagen
- Hogedruk ijs op de oceaanbodem kan de uitwisseling van voedingsstoffen verhinderen tussen silicaat binnenste en het oppervlak
- Echter, convection door het hogedruk ijs heen zou deze uitwisseling toch mogelijk maken

Klimaat op oceaan planeet

- Aangezien er geen continenten zijn zal alleen verwerking op de zeebodem een rol spelen voor Leven.
- Op de bodem van een 100 km diepe oceaan zal er hoge-druk ijs zijn: ijs-VII



Kubus structuur van ijs VII.
Melcom, CC BY-SA 3.0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3173870>



Hexagonale structuur van 'gewoon' ijs. O = rood, H = blauw. Van:
<https://www.its.caltech.edu/~atomic/snowcrystals/ice/iceIh.gif>



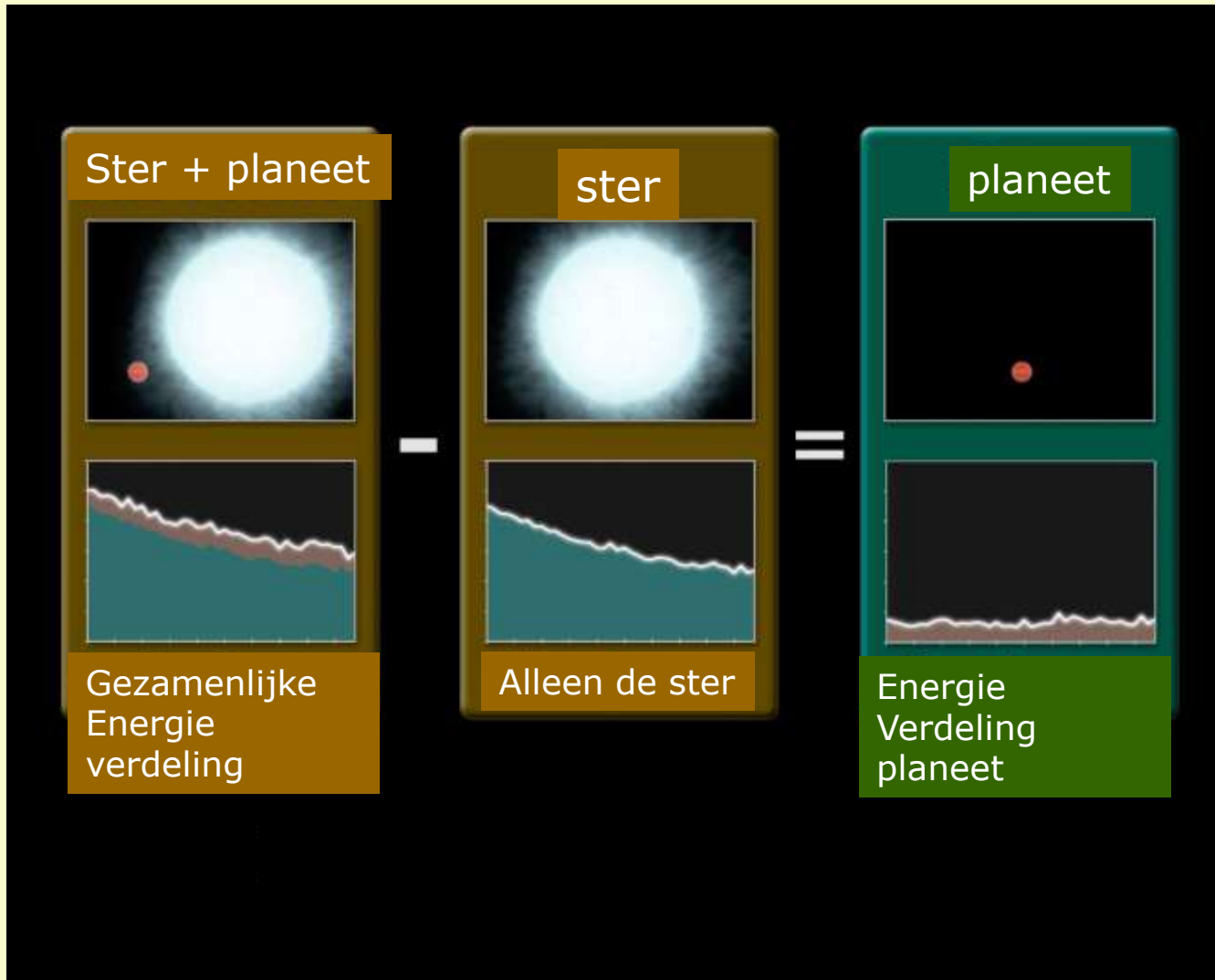
An artist's rendering of GJ 1214b, a newly-confirmed waterworld shrouded in a thick, steamy fog. NASA, ESA, and D. Aguila

GJ1214b, 2,7 keer zo groot als de Aarde, lijkt een waterwereld. De atmosfeer bestaat uit dikke, natte mist. 50% van de massa kan water zijn en het is 450 °C aan het oppervlak. Hij draait om een rode dwergster heen op 40 lichtjaar afstand. Van:

<https://theweek.com/articles/477945/waterworld-strange-planet-covered-big-hot-ocean>

ATMOSFEREN EXOPLANETEN

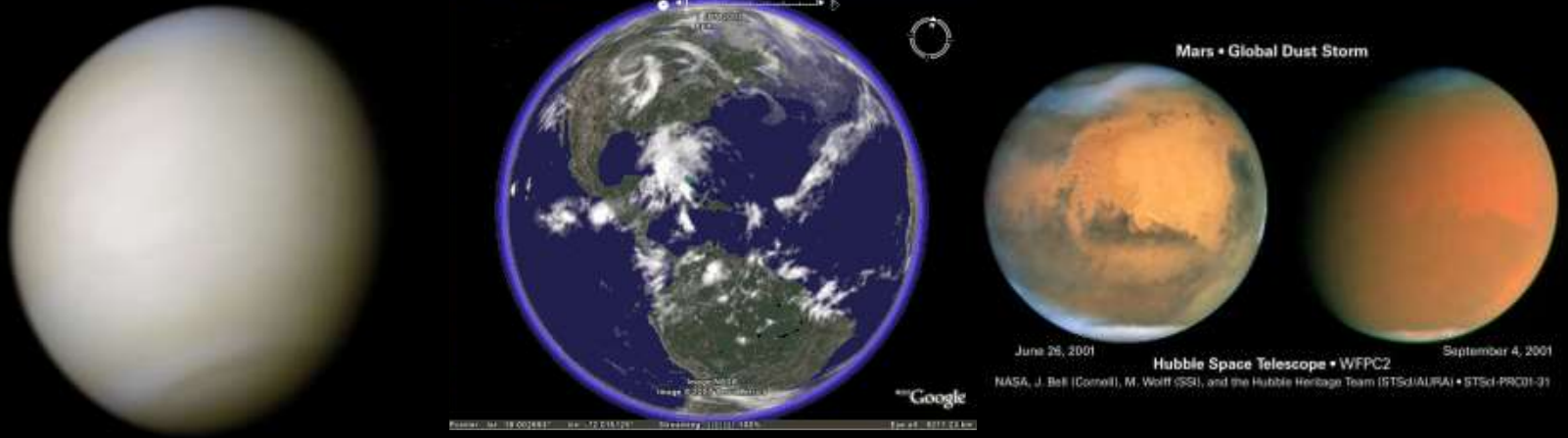
Planeet spectrum waarnemen



Verticaal staat er uitgezonden energie en horizontaal de golflengte.

Grote verschillen

'Onze' rotsachtige planeten tonen een enorme verscheidenheid

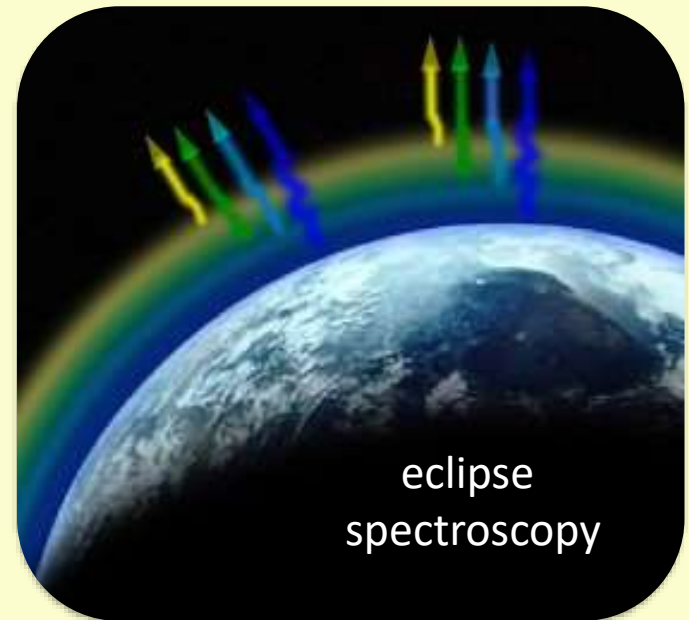
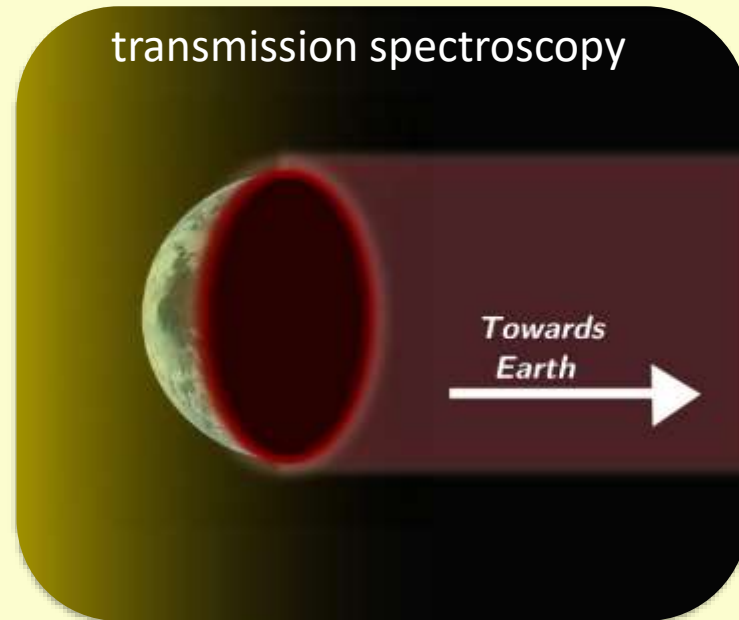
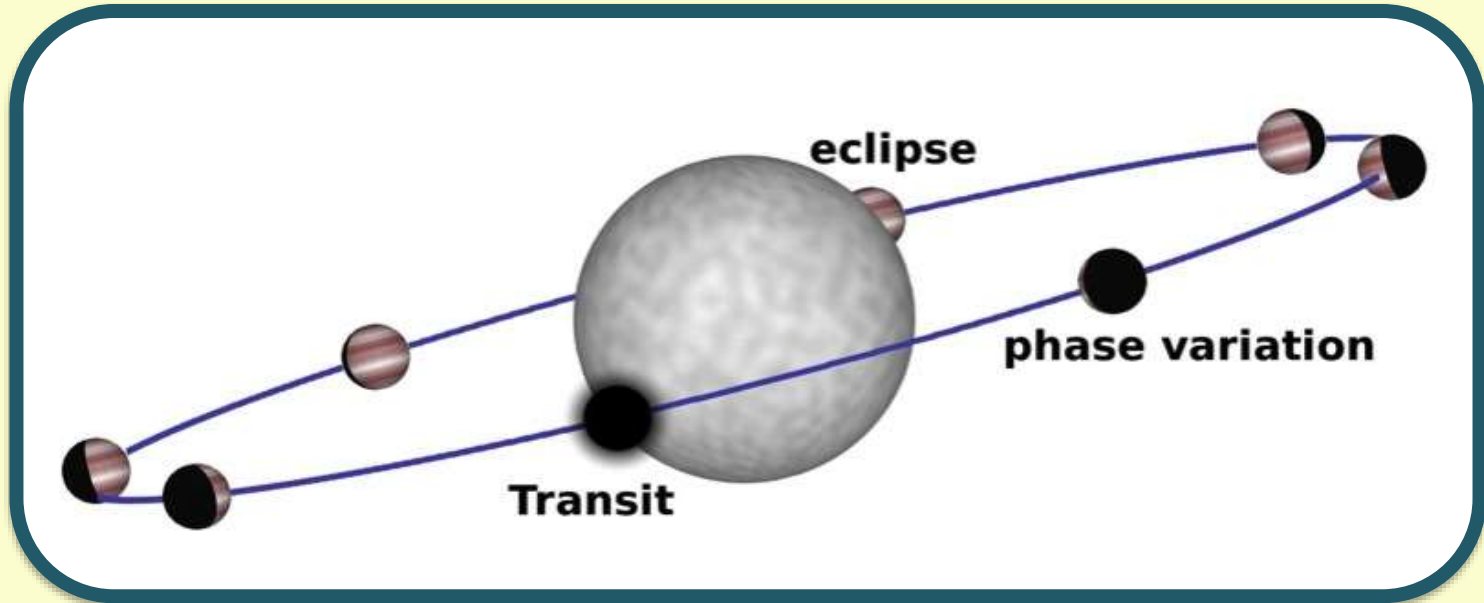


Venus heeft dichte CO₂ atmosfeer, langzame rotatie (243 dagen)

Aardatmosfeer is dun, vooral stikstof met biologische zuurstof

Mars heeft een ijle CO₂ atmosfeer, met (soms) sporen van methaan

Variaties met de tijd



Transmissie spectrum

- Ster schijnt door planeet atmosfeer
- Planeet lijnen zijn 'slechts' 40.000 keer zwakker dan ster lijnen voor hete Jupiters, omdat:
 - Atmosfeer oppervlak is slechts ~ 100 kleiner dan ster oppervlak en temperatuur is slechts een factor 100 lager
 - Schaalhoogte atmosfeer is ~ 300 km
 - Absorptie werkt tot 5 schaalhoogtes (1500 km)
- Ter vergelijking: zuurstof in de aardatmosfeer absorbeert slechts tot 100 km

SETI

Boeken

- Zijn wij alleen in het heelal? Govert Schilling, Aramith, 2002
- Where is everybody? Webb, Copernicus, 2002
- Rare Earth, Ward en Brownlee, Copernicus books, 2004
- Confessions of an Alien Hunter, Seth Shostak, National Geographic Society, 2009, heel goed boek
- The Hunt for Alien Life, Peter Linde, Springer, 2013

Websites

- <https://www.zooniverse.org/projects/ucla-seti-group/are-we-alone-in-the-universe>
burgerwetenschap project
- https://www.wikiwand.com/nl/Buitenaards_leven
- <https://ntrs.nasa.gov/citations/19730010095>
project Cyclops
- Zie verwijzingen in de slides

Fermi paradox

- De natuurkundige Enrico Fermi: als er veel intelligent leven in de melkweg zit, waarom melden ze zich dan niet?
- Een paar mogelijke oplossingen van deze paradox:
 - Ze zijn er niet; mensheid uniek in het universum
 - We 'zien' ze niet
 - Zij bestuderen ons zonder dat we dat merken
 - Technologische beschavingen bestaan maar heel kort



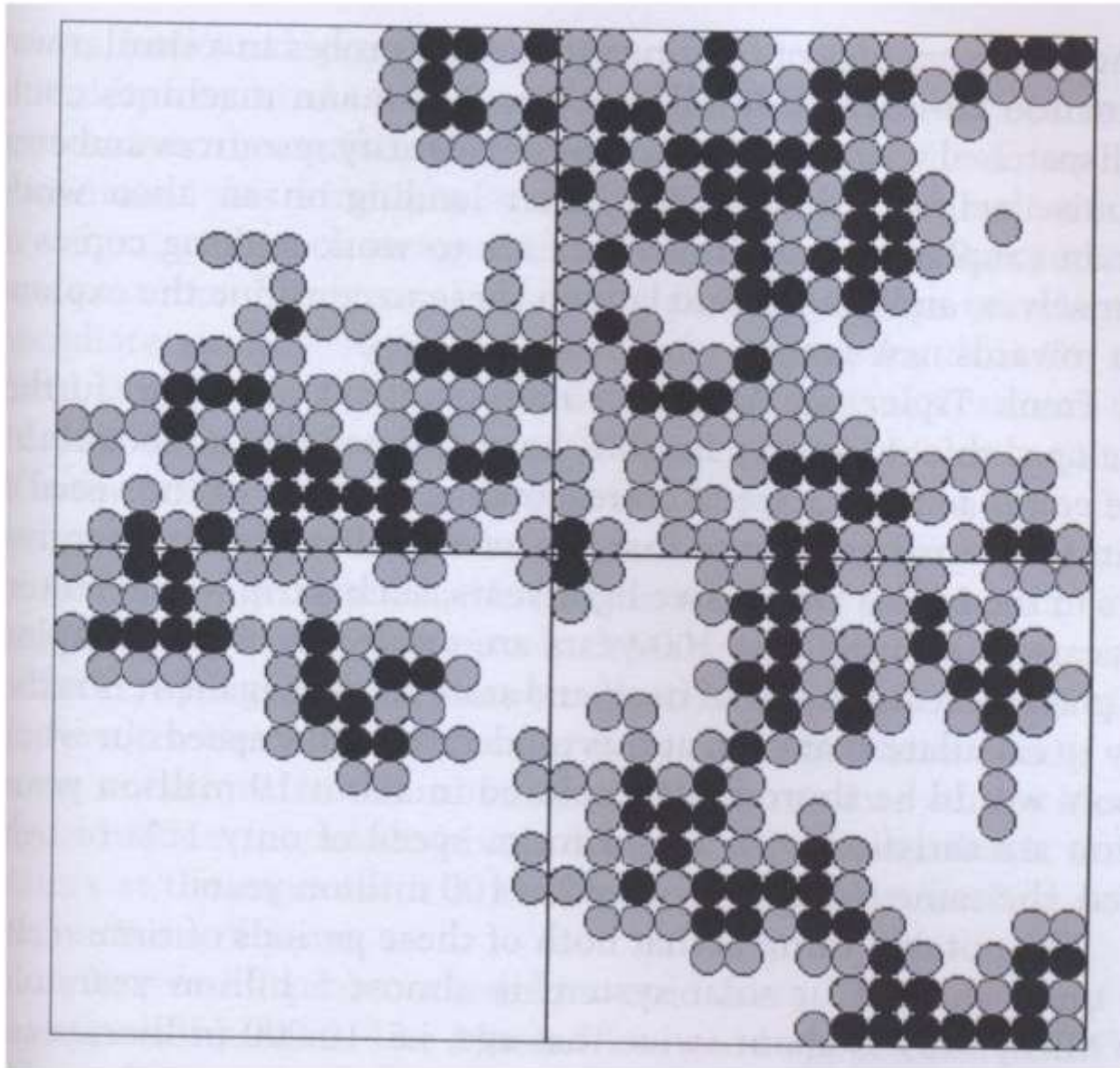
Enrico Fermi, van:
<https://www.spacepage.be>

Melkweg bevolken

- Stel een ETI (ExtraTerrestrial Intelligence) is in staat om met een snelheid van $0,001 c = 300 \text{ km/sec} = 1 \text{ miljoen km/uur}$ naar een andere planeet te reizen
- Die kunnen ze ook gaan bewonen en vandaar trekken ze verder naar de volgende geschikte planeet draaiend om een andere moederster
- Dan kun je de gehele Melkweg koloniseren in een paar 100 miljoen jaar
- Volgens het Cyclops rapport (zie verderop) lijkt dit technisch eventueel wel haalbaar, maar economisch onmogelijk

Lage massa sterren bevolken

- Galactic Settlement of Low-mass Stars as a Resolution to the Fermi Paradox, Haqq-Misra en Fauchez, 2022, *Astronomical Journal* **164**, 247
- Geen uniforme expansie van ETI om Fermi paradox te verklaren
- ETI ontstaat bij G sterren (6%) en migreert naar K (13%) of M (73%) sterren, als die toevallig in de buurt komen → men blijft dus steeds in zijn eigen buurt
- Zal lukken in ~ 2 miljard jaar
- Dan hoef je maar 0,3 lichtjaar te reizen naar M sterren en 2 lichtjaar naar K sterren



Plaatje van het model van Landis van de kolonisatie van de Melkweg. Donkere cirkels zijn van ETI die willen doorgaan met koloniseren, grijze cirkels zijn van ETI die gestopt zijn met de kolonisatie. (Blz 241 van boek Linde, *The Hunt for Alien Life*, Springer, 2013)

Aarde is uniek?

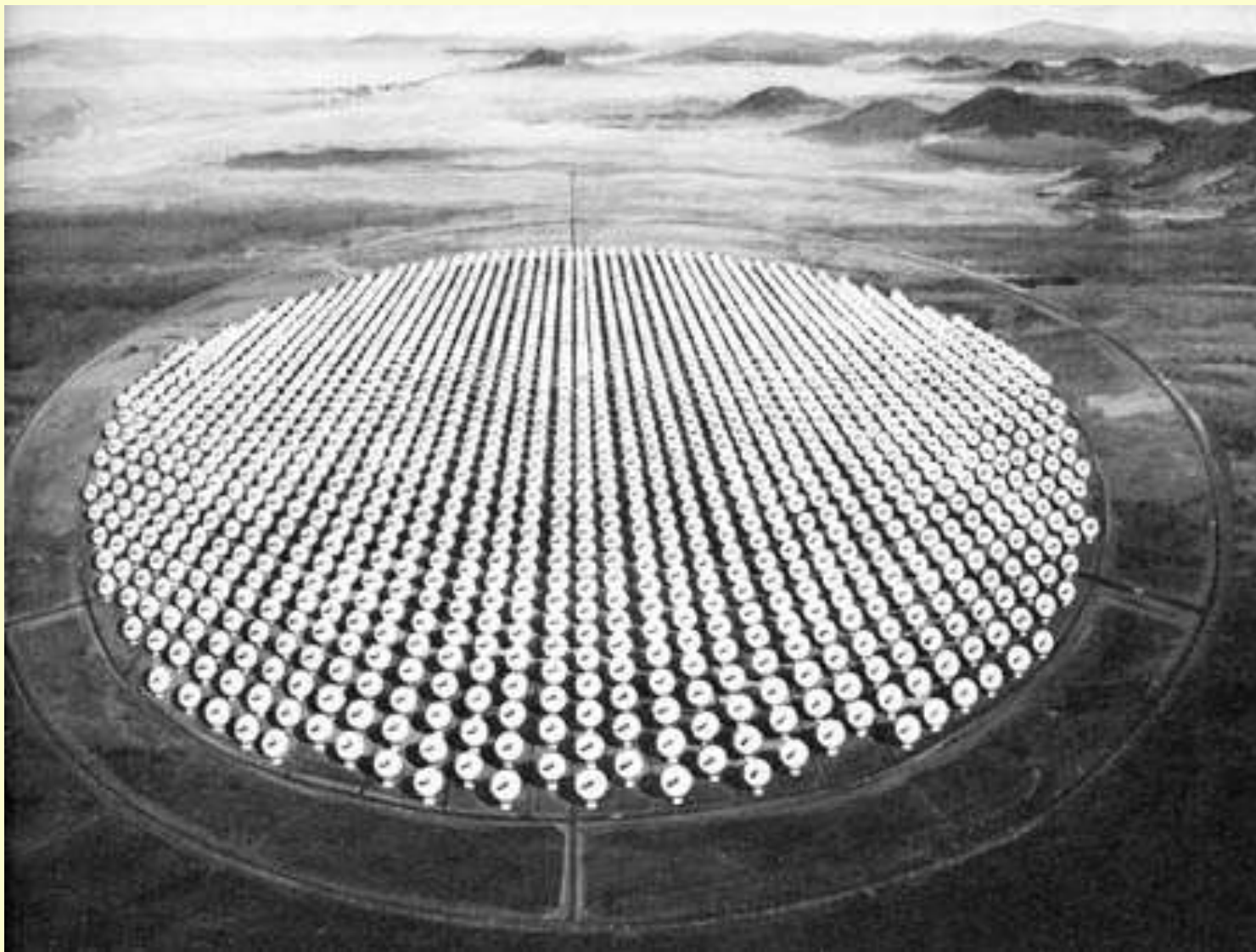
- Het boek *Rare Earth* (Ward en Brownlee, Copernicus, 2004) beschrijft uitvoerig dat de Aarde zoveel bijzondere eigenschappen heeft dat het wel eens lastig zou kunnen zijn om een evenbeeld te vinden
- Hun conclusie dat er daarom wellicht alleen intelligent Leven zou zijn op Aarde gaat wel heel ver
- Het is niet eenvoudig is om een planeet net zoals onze Aarde te vinden
- Maar is dat nodig om Leven te maken uit scheikundige processen?

Cocconi en Morrison

- In 1959 schreven beide heren in een artikel in Nature **184**, 844-846 dat er nog geen betrouwbare schattingen zijn van:
 1. Planeet vorming (in 2023 **wél!**)
 2. Oorsprong van Leven
 3. Ontwikkeling van beschavingen met grote wetenschappelijke kennis en kunde
- Langdurige beschavingen vinden planeten rond de Zon wellicht geschikt voor intelligent Leven
- Zij hebben een communicatie kanaal geopend en wachten op antwoord van ons; bij de 21 cm lijn van waterstof?

Project Cyclops

- In 1971 kwamen 25 experts bijeen om NASA 's ruimte programma uit te breiden met een SETI afdeling: er verscheen een rapport over Project Cyclops (~ 250 bladzijden!)
- 1000 radio telescopen van 100 meter diameter binnen een straal van 5 km: een veel te ambitieus voorstel
- Wel zijn alle overwegingen om te zoeken naar signalen van een buitenaardse beschaving (SETI) hier heel goed verwoord
- Zoeken naar signalen bij radio golflengtes lijkt het beste
- SKA, wordt gebouwd in Australië en Zuid-Afrika, komt een eind in de richting van Cyclops, gaat zelfs verder, met techniek van tegenwoordig



<https://space.nss.org/wp-content/uploads/fig1306-project-cyclops.jpg> Vele (te) dure schotels waren nodig om de radio straling op te vangen.

Seth Shostak werkt bij het SETI instituut in Mountain View, Californië.

Hij werkte in Groningen van 1975 tot 1988.

Daar ontmoette hij in 1981 Jill Tarter van SETI. Zij zochten 4 uur met de Westerbork telescopen (SIGNAL) naar ETI in de richting van het Melkwegcentrum.

<http://www.seti.org/>





Allen telescoop, gefotografeerd op 22 mei 2018 door Seth Shostak, SETI instituut.

<https://www.seti.org/allen-telescope-array-gallery>

ETI = machine

- Seth Shostak denkt dat er een robot met bewustzijn kan ontstaan door robotica, nanotechnologie en genetica: onsterfelijk en vrijwel onbeperkt in zijn mogelijkheden
- Tot nu toe hebben veel proeven nog steeds geen denkende machine opgeleverd
- Zulke robots kunnen in hoog tempo betere robots maken
- → ETI zal bestaan uit machines, volgens Seth
- Die robots kunnen interstellair reizen, ze leven toch oneindig lang en hebben alleen behoefte aan energie, en materie om kapotte onderdelen te vervangen

Techno signalen

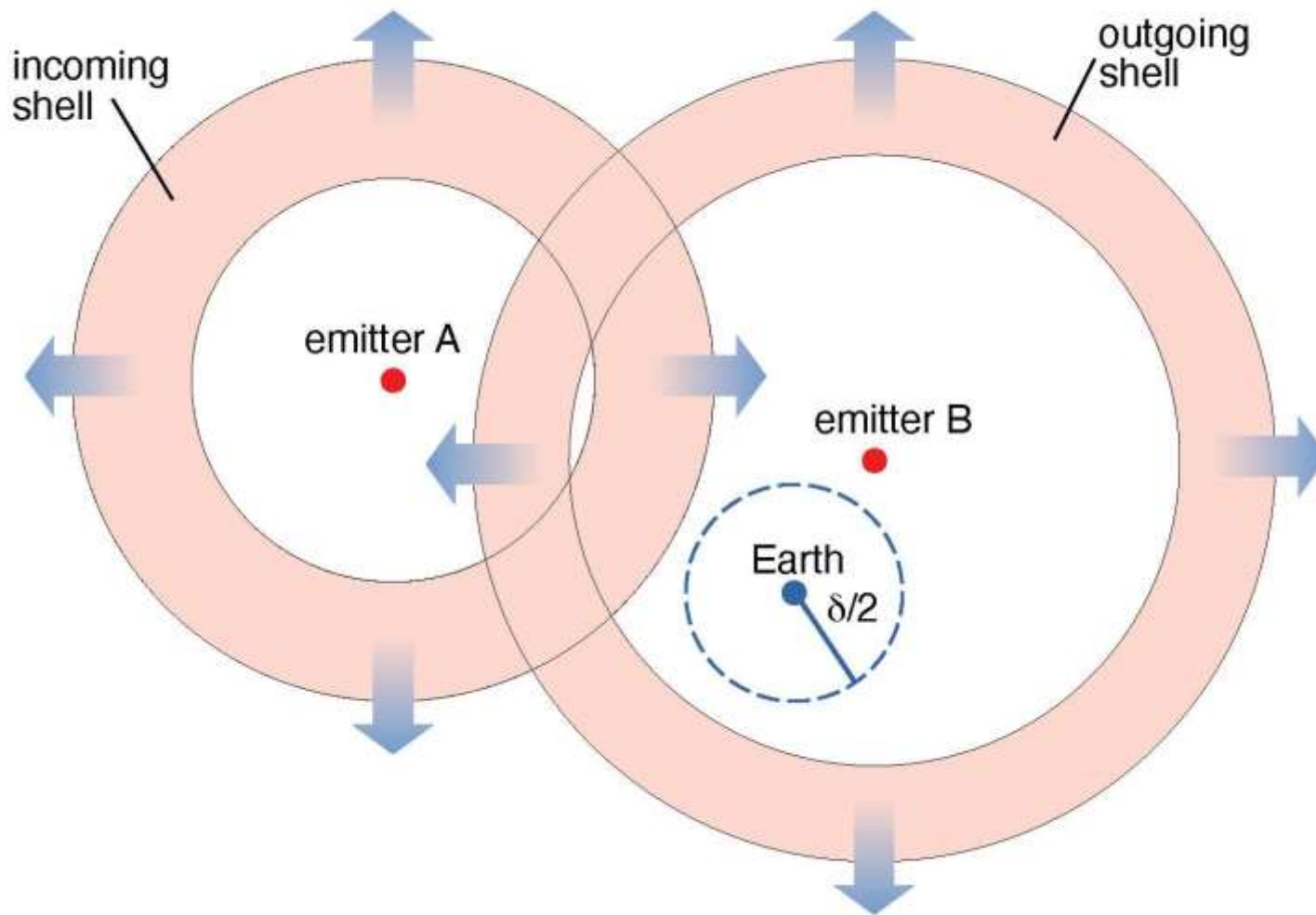
- Socas-Navarro en anderen, Acta Astronautica **182**, 446-453, 2021; <https://arxiv.org/abs/2103.01536>):
1. Bestaande metingen anders bekijken
 2. Spectra van atmosferen van exoplaneten
 3. Zoeken naar laser pulsen van ETI
 4. Restwarmte detectie, b.v. Dyson bol (zie verderop voor uitleg)
 5. Radio metingen vanaf achterkant Maan
 6. Langs de Aarde scherende planetoiden (sommige van ETI?)
 7. ETI artefacten op lichamen in ons zonnestelsel

Panspermia

- Stukken rots (meteorieten) komen voor op Aarde afkomstig van Mars, de Maan, zelfs van de dwergplaneet Ceres (met soms ingewikkelde organische moleculen)
- Als één hemellichaam in een zonnestelsel Leven zou hebben ontwikkeld zou dat verspreid kunnen zijn
- Microben via planetoïden van een ander zonnestelsel lijkt heel onwaarschijnlijk
- Toch heeft een planetoïde van buiten ons zonnestelsel, 'Oumuamua, ons zonnestelsel in 2017 bezocht en was na enkele jaren weer onzichtbaar
- Daarna zijn er nog enkele bezoekers van buiten ons zonnestelsel gezien

Von Neumann machines

- Robots die naar de dichtstbijzijnde ster kunnen reizen en zichzelf kunnen kopiëren (von Neumann machine) kunnen vele planeten bezoeken in de gehele Melkweg
- Met een realistische snelheid van 100 km/s kan een robot Proxima Centauri bereiken in 13.000 jaar
- Daar kopieert hij zichzelf; daarna reizen 'het'zelf en zijn kopie elk naar een andere planeet
- Zo kan de gehele Melkweg verkend worden in 300 miljoen jaar (vergelijk met leeftijd heelal: 13,8 miljard jaar)
- 20.000 keer verdubbelen de robots zich dan
- Een alternatieve von Neumann machine zou (ook?) microben kunnen verspreiden: 'directed panspermia'

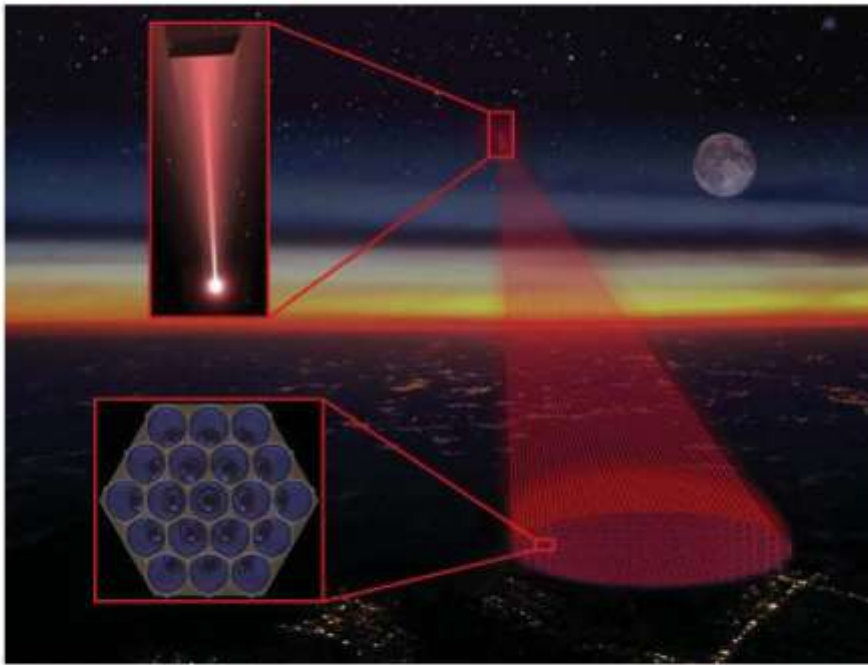


Breedte van
oranje schillen
geeft de
tijdsduur van
het uitzenden
van signalen
aan door een
bepaalde ETI.

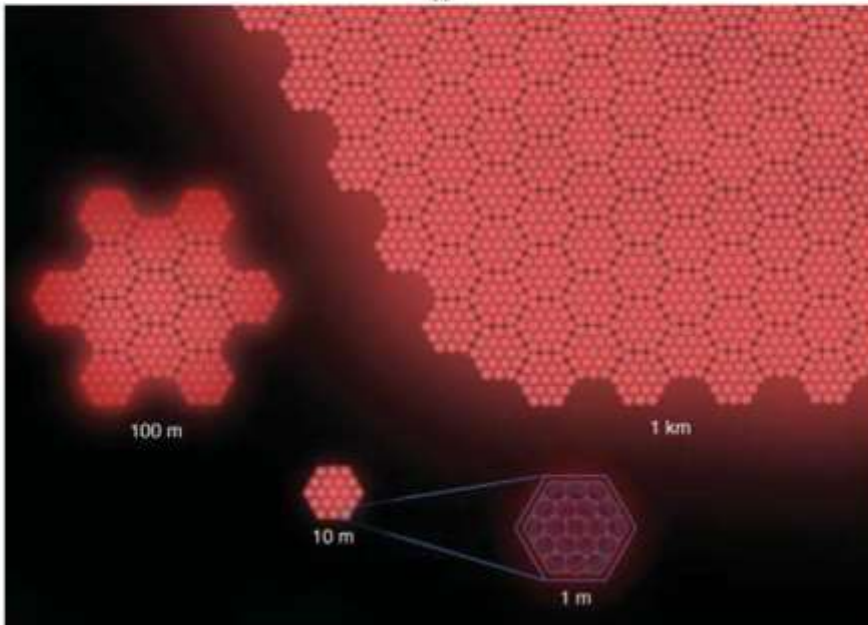
Figuur 1 van Grimaldi, <https://arxiv.org/abs/2301.07165> . Stel we hebben de hemel goed afgezocht in de laatste 60 jaar en nog steeds niets gevonden. Dat zou betekenen dat we nog minstens tientallen jaren moeten zoeken.

Robots als interstellaire reizigers

- Lantin en co-auteurs, 2022, Acta Astronautica, **190**, 261, bespreken NASA's Starlight programma
- Zend kleine voertuigen met relativistische snelheden ver buiten ons zonnestelsel
- Deze kunnen als robots verkenningen doen, maar kunnen ook zaden en organismes vervoeren
- Zend fotonen van een rijtje lasers op de grond naar een heel licht groot zeil met voertuig daaraan vast; zo kun je relativistische snelheden bereiken
- Eventuele organismes moeten tegen micro zwaartekracht, enorme versnellingen, straling en vacuüm kunnen



(a)



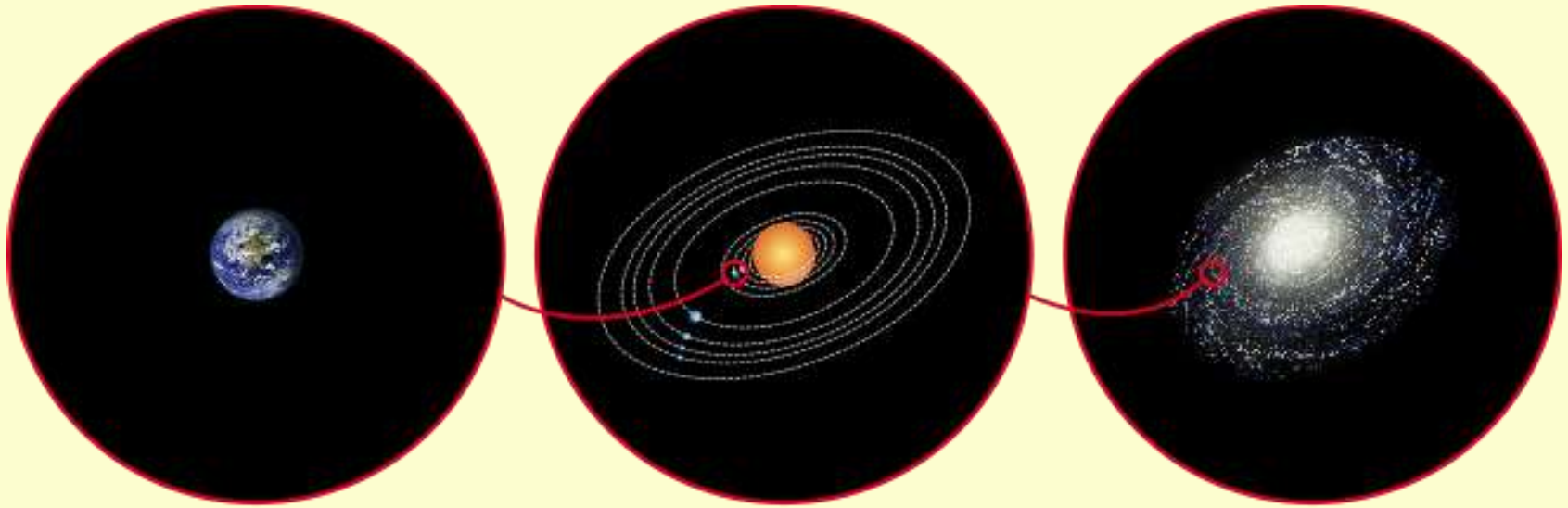
(b)

Lantin en collegae tonen hoe een rijtje lasers een zeil versnellen door de impuls van hun fotonen. De laser array bestaat uit vele kleine modulaire sub-elementen die uitgebreid kunnen worden van 1 meter, tot 10 meter, tot 100 meter, tot een kilometer.

Kardashev schaal

- De Kardashev schaal deelt beschavingen in op grond van hun energieverbruik
- De schaal kent 3 categorieën
- Een Type I, 'planetaire' beschaving; deze kan alle energie van de ster die op de planeet valt gebruiken (zo ver zijn we nog lang niet)
- Type II beschaving kan de gehele energie van zijn moederster gebruiken (b.v. via een Dyson bol)
- Een Type III beschaving kan de energie van zijn gehele sterrenstelsel manipuleren
- De schaal (uiteraard hypothetisch) is voorgesteld door de Soviet astronoom Nikolai Kardashev, in 1964

Kardashev types



Type I : 10^{16} W

Type II : 10^{26} W

Type III : 10^{36} W

In 2015, leidde een studie van sterrenstelsel infrarood emissies tot de conclusie dat Kardashev Type-III beschavingen zeer zeldzaam zijn of niet bestaan in ons lokale heelal. Op 14 oktober 2015 ontdekte men een vreemd lichtpatroon rond de ster KIC 8462852 wat had kunnen duiden op een Dyson bol (nu fysische verklaring).



https://spore.fandom.com/wiki/Fiction:Dyson_Sphere Een enorm grote structuur om een gehele ster heen, die een groot deel van het uitgezonden sterlicht opvangt. Een dergelijk omhulsel lijkt natuurkundig vrijwel onmogelijk te zijn. Seth oppert een Dyson Zwerm: een set enorme zonnepanelen om je moederster heen. 74

Ivanov Indeling

- In: Qualitative classification of extraterrestrial civilizations, Valentin Ivanov en coauteurs, Astronomy Astrophysics, volume 639, 94, 2020
- Classificatie gebaseerd op het vermogen van ET's om hun omgeving aan te passen en daar mee te integreren
- Klasse 0: gebruik omgeving zoals die is
- Klasse 1: verander de omgeving naar je behoefte
- Klasse 2: verander jezelf om te passen bij de omgeving
- Klasse 3: ET is volledig geïntegreerd met zijn omgeving