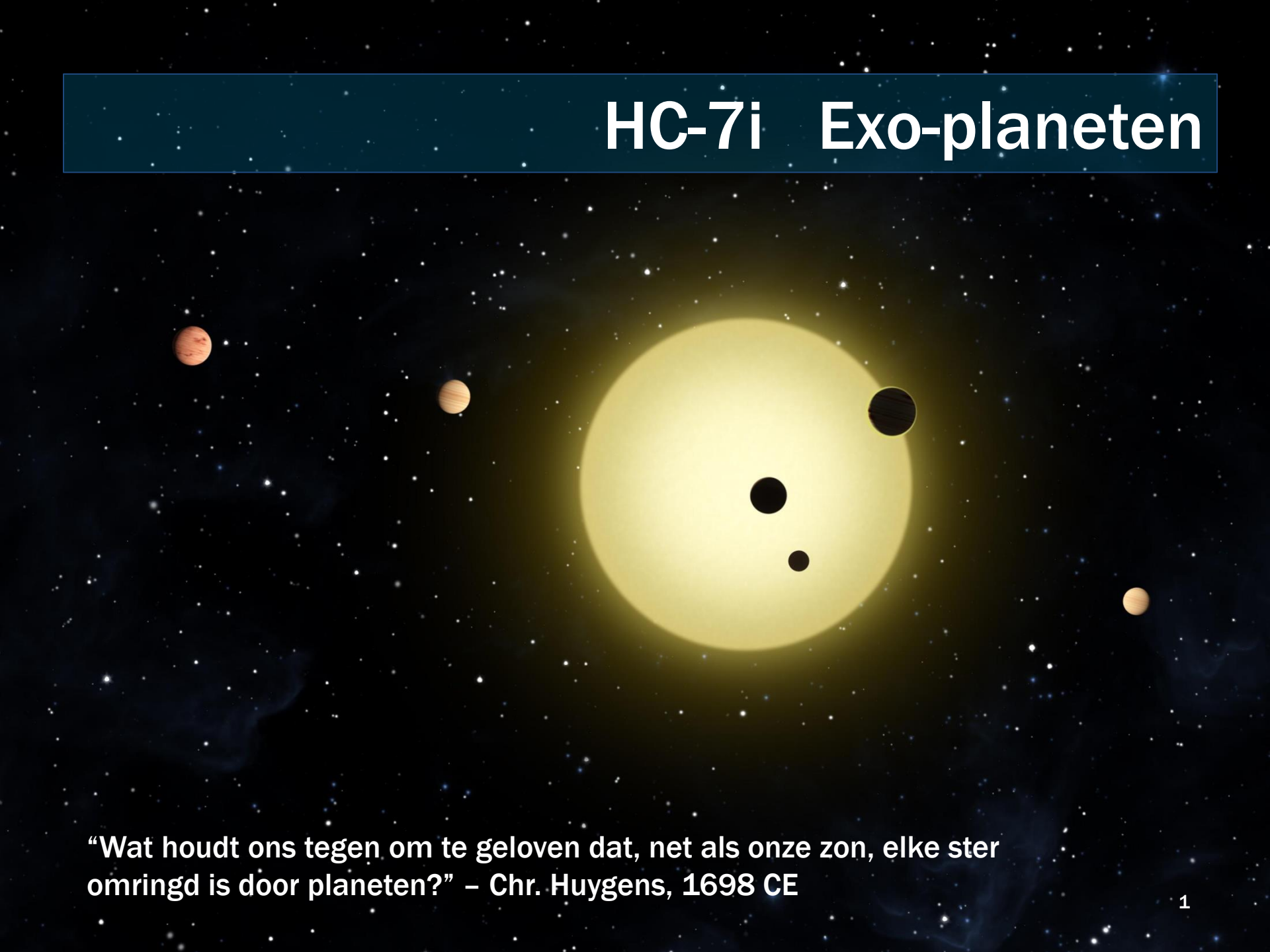
HC-7i Exo-planeten



“Wat houdt ons tegen om te geloven dat, net als onze zon, elke ster omringd is door planeten?” – Chr. Huygens, 1698 CE

NU EEN ‘MAKKIE’, MAAR OOIT BIJZONDER LASTIG

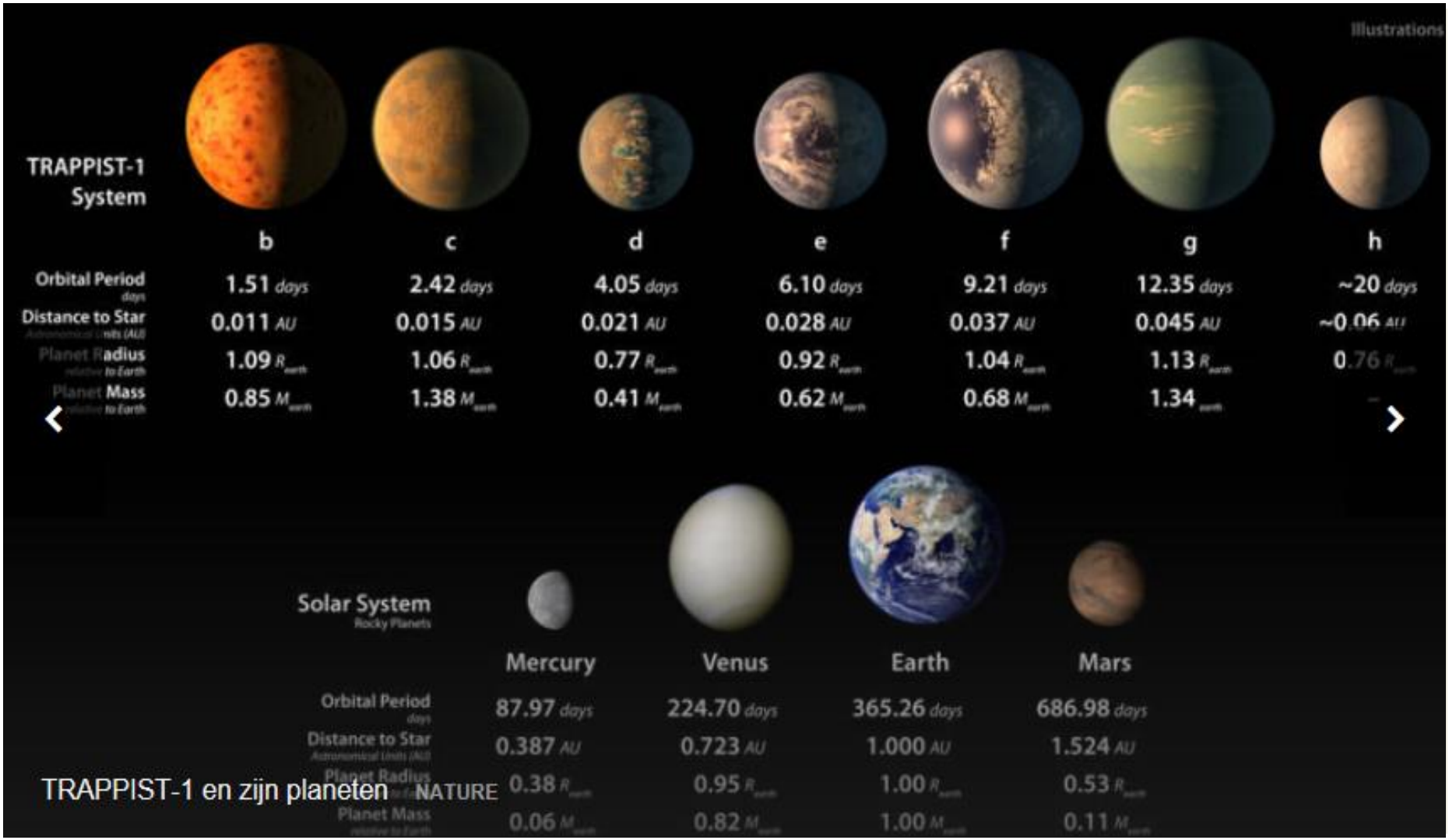
- Realiseer je wat je waarneemtechnisch voor elkaar moet krijgen.

- Een observationele tour-de-force, maar te doen, gebruik de truckendoos.

EEN OVERZICHTJE

- 1991/1992: de eerste exo-planeten ontdekt bij ms pulsar
- Pulsar timing: Variatie in aankomsttijd pulsar-signalen geeft omlooptijd van pulsar rond pulsar-planeet massa-middelpunt.
- Twee planeten, van >2.8 en >3.4 Maarde, maar: zijn dit oude planeten rond deze neutron ster die supernova explosie hebben overleefd, of zijn ze gevormd uit de ejecta van de supernova?
- 1994-1995: de eerste exo-planeten bij reguliere ster.
- 1999: het eerste exo-planeten stelsel is een feit.
- 2006: waarneming van een exo-planeten stelsel zonder Jupiter-achtige planeten.
- 2015: 5-planetenstelsel dat 11.2 miljard jaar oud is.
- 2017: Trappist 1: 7 aardachtige planeten rond bruine dwerg.
- Anno 2017 een groot aantal exo-planeten (stelsels) ontdekt met gebruikmaking van verschillende detectie technieken.
- Op 1 maart 2017 stond de teller op 3586 exo-planeten, waargenomen in 2691 planeetstelsels, waarvan 603 meerdere planeten hebben.

TRAPPIST 1 EN 7 EXO-PLANETEN



TRAPPIST-1 en zijn planeten NATURE

DETECTIE EXO-PLANETEN

Vijf standard detectie methodes (met voor- en nadelen)

1) Astrometrie

Kijk naar een (regelmatige) schommeling van de positie van een ster rond het massa middelpunt van een ster plus planeet.

2) Doppler variatie

Kijk naar de schommeling van spectrale sterlijnen, omdat de radiele snelheid van de ster a.g.v. de zwaarte-kracht van een begeleidende planeet verandert.

3) Transit methode

Kijk naar de lichtcurve van een ster; bij geringe inclinatie is er een primair minimum te zien op het moment dat een planeet 'voorlangs' beweegt. Soms ook secundair minimum te zien.

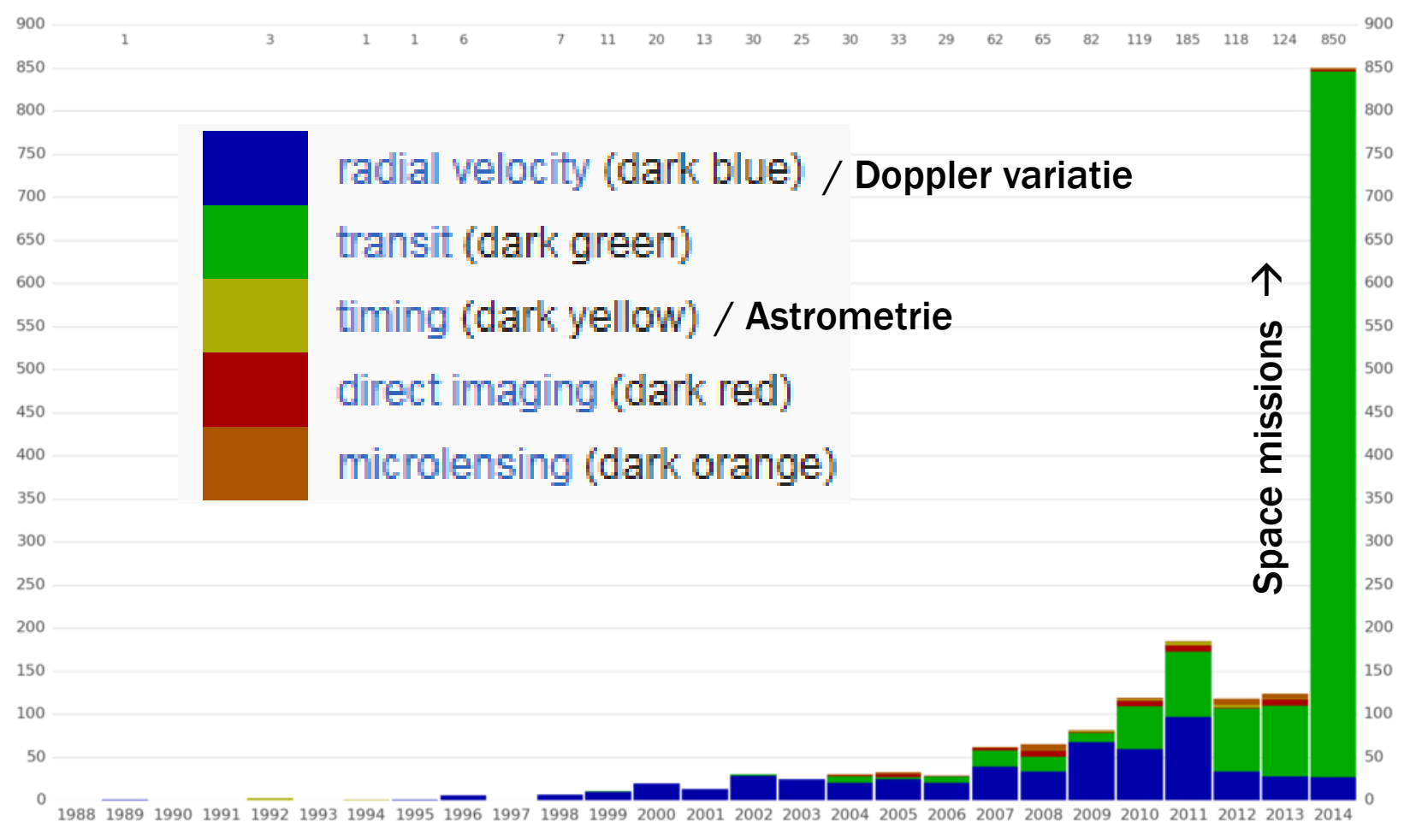
4) Direct imaging

Meest voor de hand liggende methode, maar allesbehalve gemakkelijk omdat de ster vele malen helderder is dan de exoplaneet.

5) Micro lensing

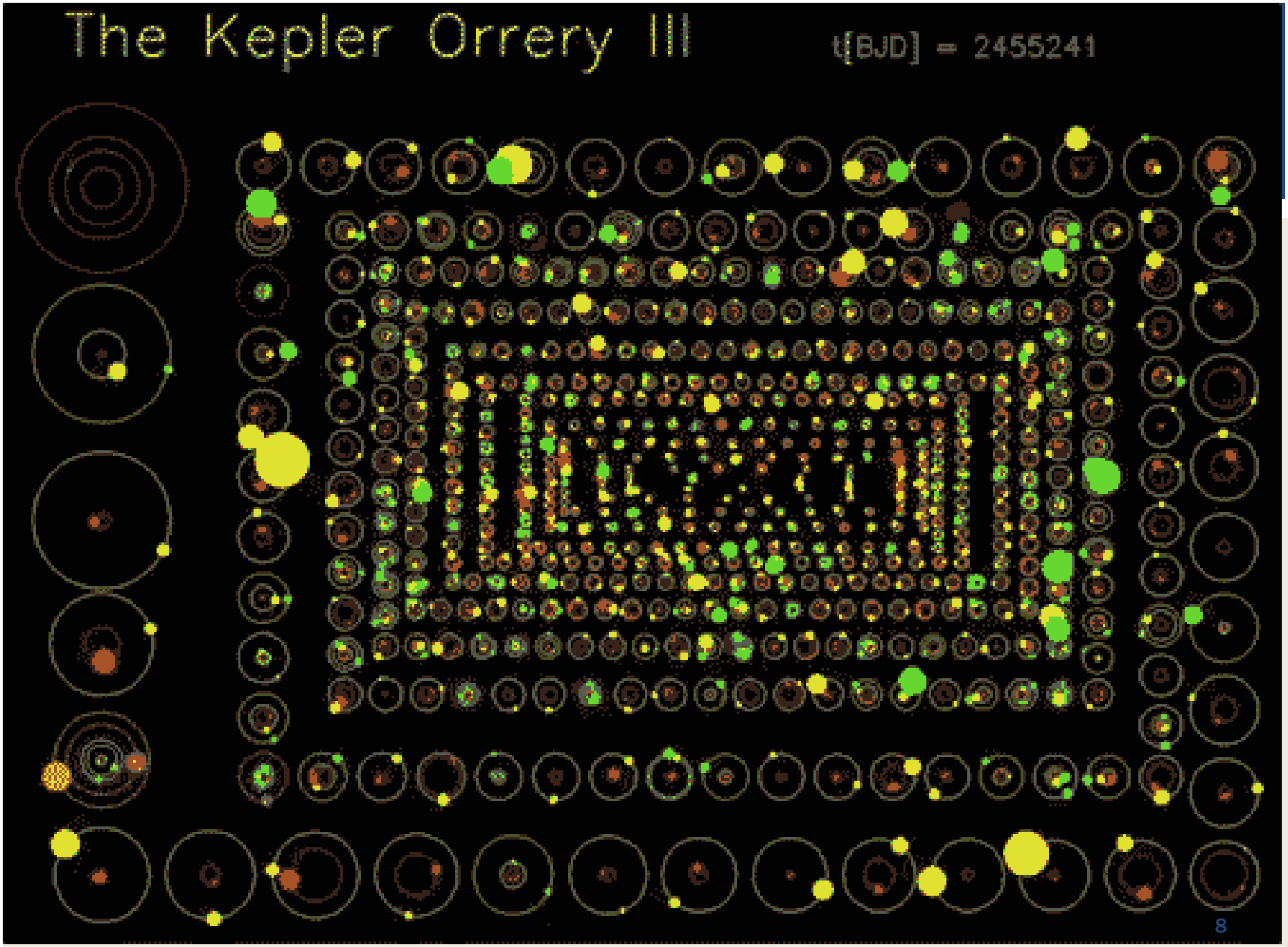
Zwaartekracht werkt als lens en versterkt het licht van een achtergrond ster.

DETECTIE EXO-PLANETEN



TRANSIT METHODE: KEPLER MISSIE

- 0.95m Schmidt telescoop.
- Van 2009-2013 naar sterrenbeeld Zwaan gekeken.
- 190000 sterren in de gaten gehouden.
- Groot beeldoppervlak (veel sterren gelijk-tijdig onderzoeken).
- Groot aantal kandidaat planeten (4000).
- Inmiddels zeer vele daarvan bevestigd.
- Realiseer je: maar een heel klein stuk van de hemel.


The Kepler Orrery III
t[BJD] = 2455241

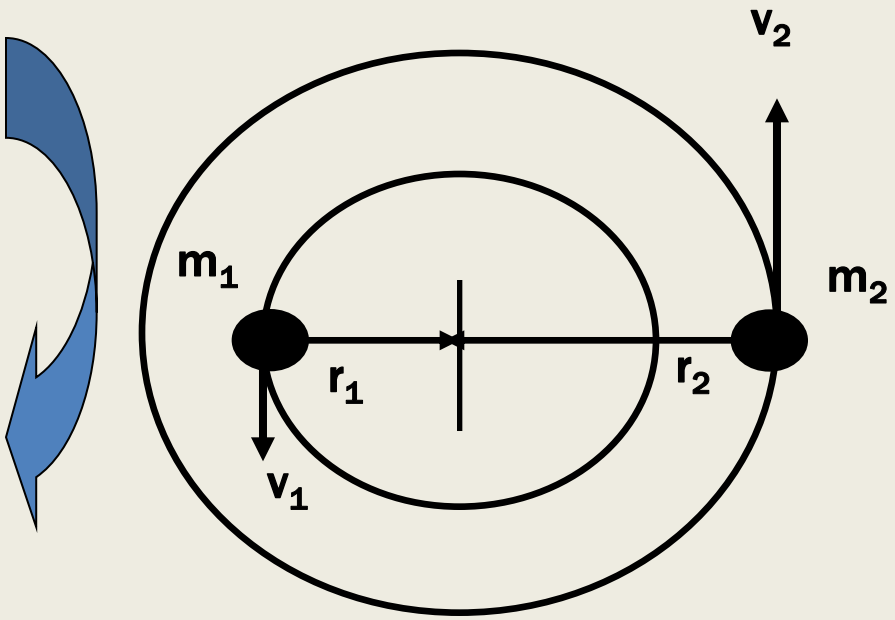
ASTROMETRIE
ZELFDE PRINCIPE ALS DUBBELSTERREN

- Beide sterren bewegen om een gemeenschappelijk zwaartepunt:

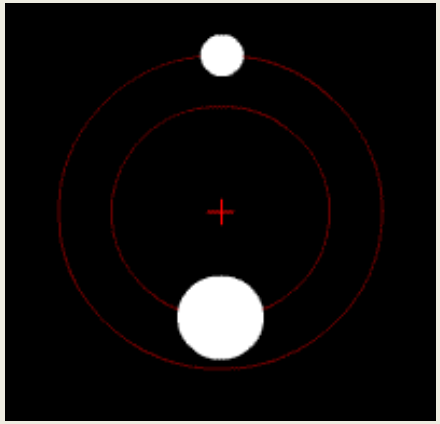
$$m_1 \cdot r_1 = m_2 \cdot r_2$$

  - Zelfde periode P
  - $v_1/v_2 = r_1/r_2 = m_2/m_1$
  - Leid zelf af (met $R = r_1 + r_2$):

$$4\pi^2 R^3/G = (m_1+m_2)P^2$$

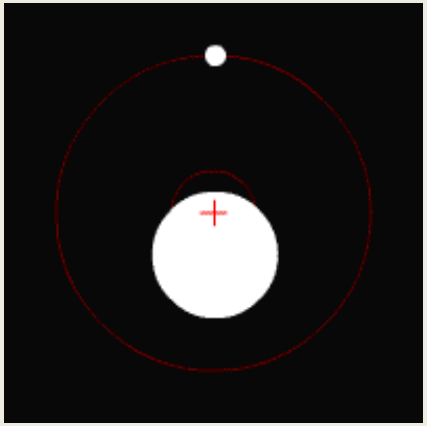


ASTROMETRIE
VOORAL EFFECTIEF BIJ GROTE REFLEX BEWEGING



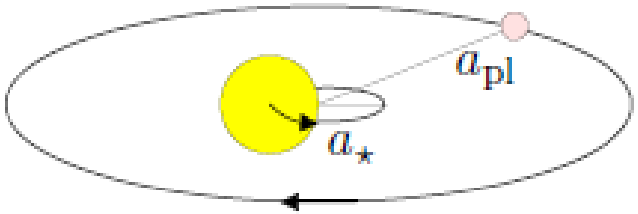
Dubbelsterren

Planeet-ster



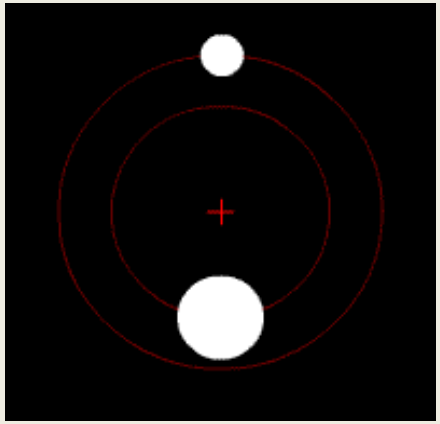
Reflex beweging van de ster: halve lange as $a_\star$

$$a_\star = \frac{m_{\rm pl}}{M_\star}\, a_{\rm pl}$$



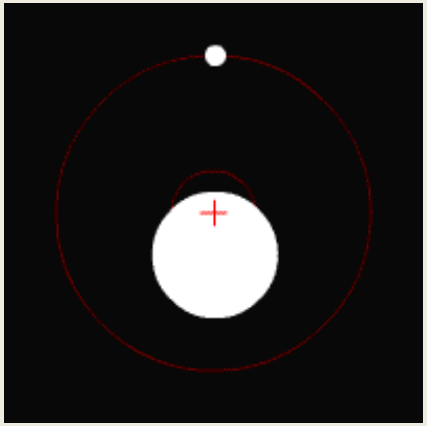
Probeer je voor te stellen dat je een Jupiter-achtige planeet hebt die rond een ster draait op op een afstand van een dikke 40 lichtjaar. Wat is dan beter te zien: Jupiter in de buurt van de ster of Jupiter op redelijke afstand van de ster ?

ASTROMETRIE
VOORAL EFFECTIEF BIJ GROTE REFLEX BEWEGING



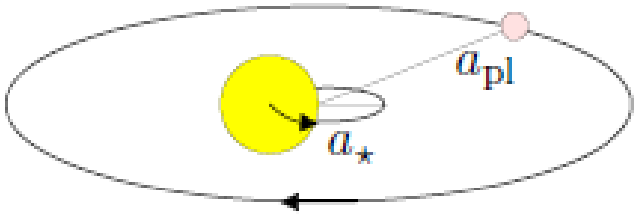
Dubbelsterren

Planeet-ster



Reflex beweging van de ster: halve lange as $a_\star$

$$a_\star = \frac{m_{\rm pl}}{M_\star}\, a_{\rm pl}$$



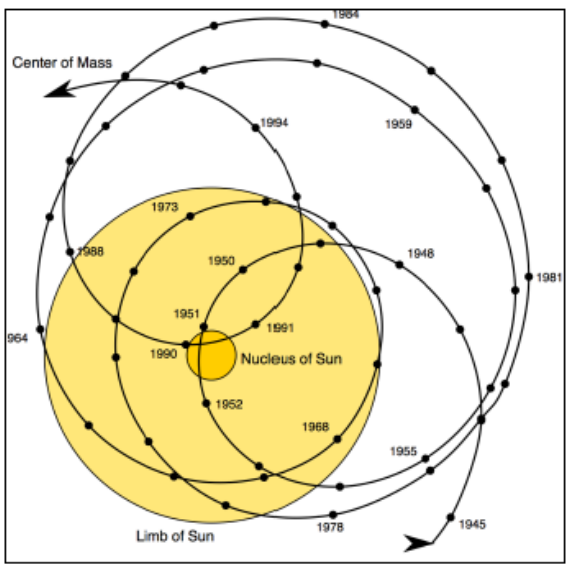
- Jupiter op 10 pc, 5 AU = 0.5"; $M_\odot/M_{\rm Jup}$~1000. → reflex = 0.5 mas ~ 1.1 $R_\odot$
- Jupiter op 10 pc, 0.05 AU = 5 mas, $M_\odot/M_{\rm Jup}$~1000. → reflex = 5 μas

Dus beter voor zwaardere planeet op grotere afstand. (" = as = arc sec)

ASTROMETRIE

Meenemen, ook al is die niet bekend → grenswaarden

- We zien de baan i.h.a. onder een hoek *i*
- Als $M_\star$ bekend is, volgt $\boldsymbol{a}_{\mathbf{pl}}$ uit de periode *P*: $$P^2 = \frac{4\pi^2 a_{\rm pl}^3}{G(M_\star + m_{\rm pl})}$$
- en met $a_{\rm pl}$ volgt dan $\boldsymbol{m}_{\mathbf{pl}}$ **sin** $\boldsymbol{i}$ uit $a_\star$: $$m_{\rm pl} \sin i = M_\star \frac{a_\star \sin i}{a_{\rm pl}}$$

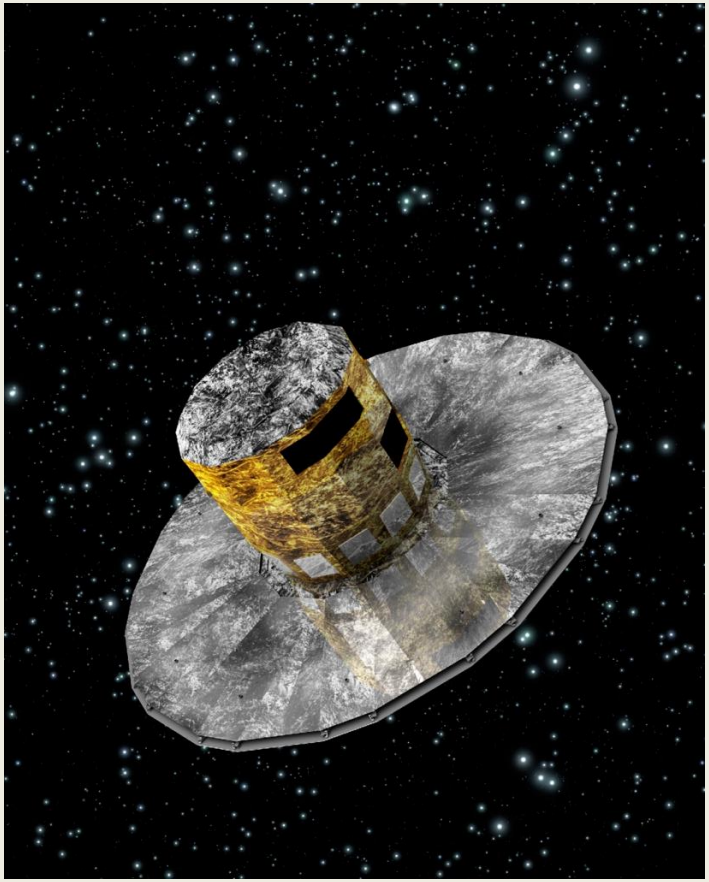


Complex, zeker bij meerdere planeten, kijk maar naar onze zon:

Beweging van het center-of-mass van het zonnestelsel t.o.v. zon. Afgebeeld is de zon en het zwaartepunt ligt soms heel dicht bij de core en ook duidelijk buiten de zon.

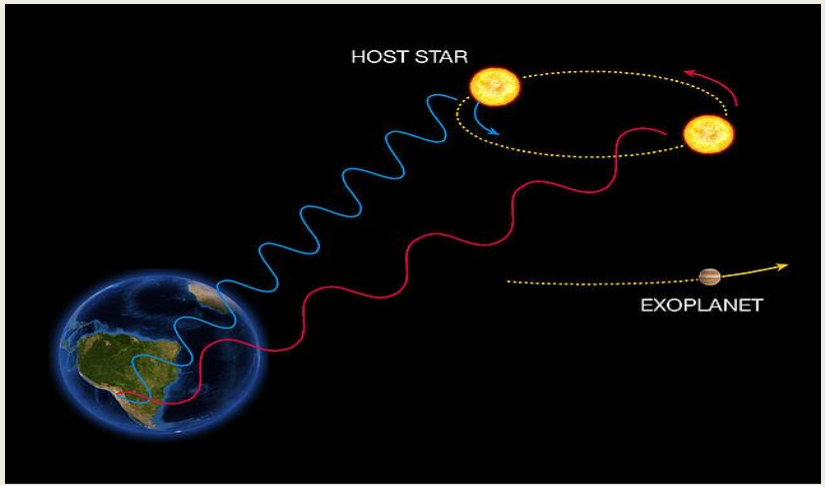
GAIA – THE EXO-PLANET HUNTER

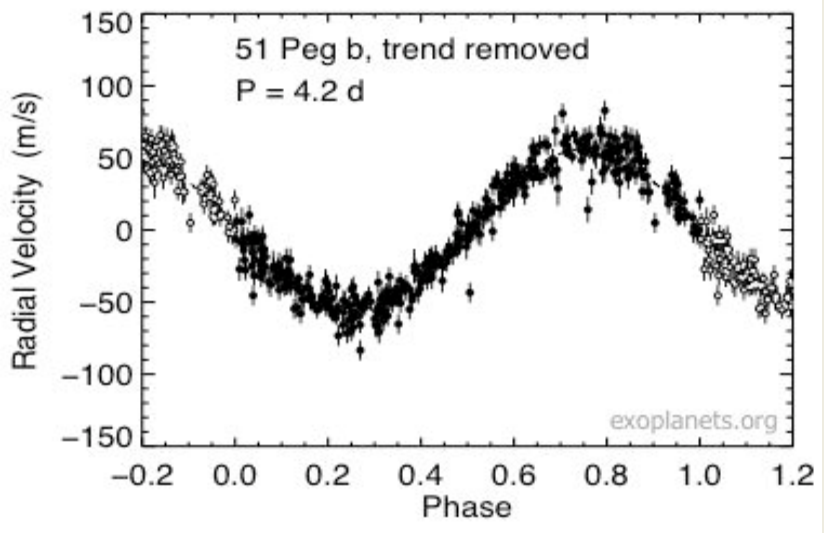
- Vanaf de grond ontbreekt de noodzakelijke astrometrische nauwkeurigheid om objecten van de massa van een planeet te detecteren.
- De ruimtemissie GAIA heeft een astrometrische precisie van µas
- Doel: meest nauwkeurige 3D plaatje van 1 milliard sterren in ons MWS.
- Mjup rond sterren tot 50 pc afstand en periodes van 1.5 – 9 jaar; verwacht 10.000 - 50.000 detecties.



Werkt fantastisch → Eerste grote datarelease was in 2016

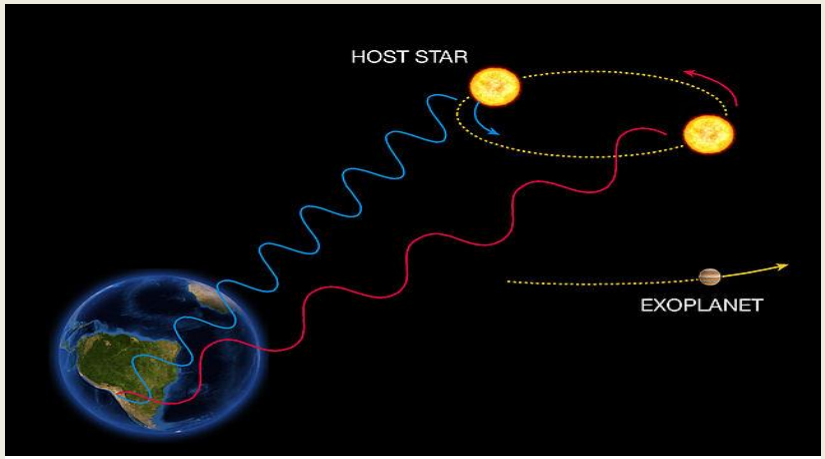
DOPPLER VARIATIE

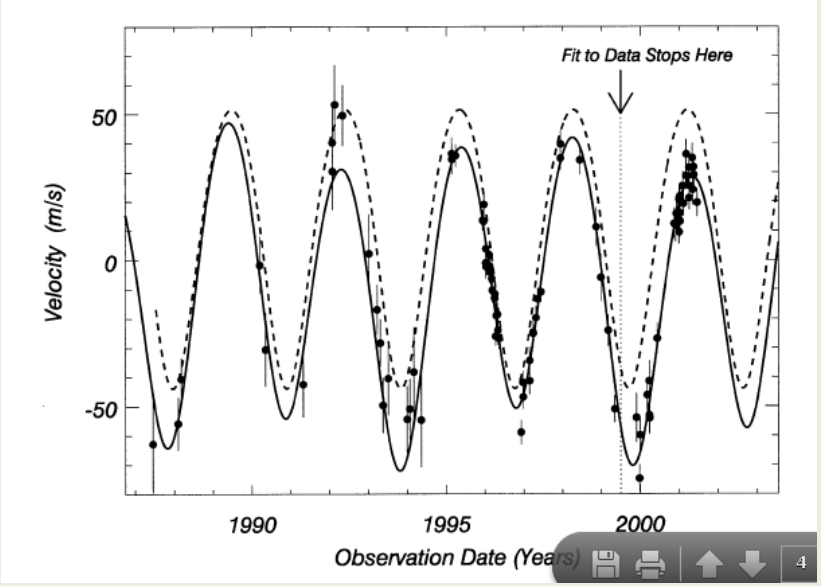




- Ook bekend als radiële snelheidsmethode.
- Gebaseerd op Doppler effect; kijk naar blauw/roodver-schuiving van spectrale lijnen agv de netto verandering van de snelheid langs de gezichtslijn.
- Tot 1 m/s verschillen meetbaar.
- Zeer effectieve methode om exo-planeten te ontdekken.
- Niet toepasbaar op jonge sterren of OBA klasses (te weinig spectraallijnen).
- Inclinatie i is vaak niet bekend en maakt dat methode alleen grenswaardes kan bepalen.

DOPPLER VARIATIE





- Ook bekend als radiële snelheidsmethode.
- Gebaseerd op Doppler effect; kijk naar blauw/roodver-schuiving van spectrale lijnen agv de netto verandering van de snelheid langs de gezichtslijn.
- Tot 1 m/s verschillen meetbaar.
- Zeer effectieve methode om exo-planeten te ontdekken.
- Niet toepasbaar op jonge sterren of OBA klasses (te weinig spectraallijnen).
- Inclinatie i is vaak niet bekend en maakt dat methode alleen grenswaardes kan bepalen.
- Meer dan 1 planeet mogelijk.

DOPPLER VARIATIE

Kijk alleen naar radiële snelheden, v_r, (dus snelheids-component langs de 'line of sight').

Doppler shift: $\Delta\lambda/\lambda_0 = v_r/c$ ($v_r << c$)

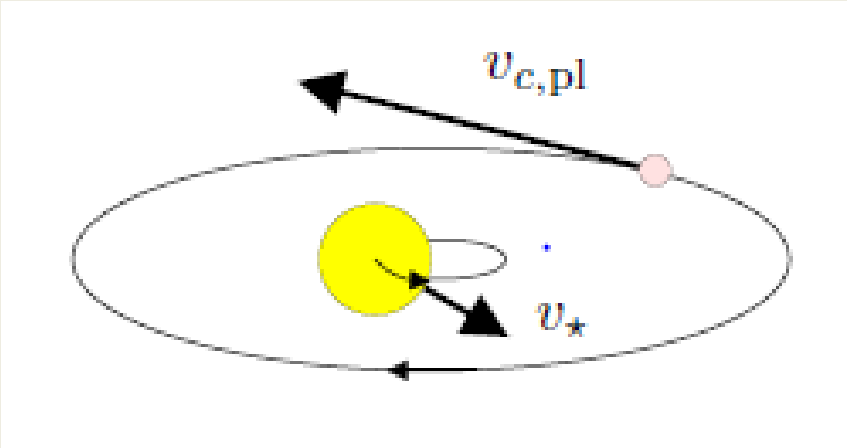
Voor $v_r > 0 \rightarrow \Delta\lambda > 0$: roodverschuiving (van ons vandaan)

Voor $v_r < 0 \rightarrow \Delta\lambda < 0$; blauwverschuiving (naar ons toe)

Via $\lambda.\nu = c$ volgt dan: $\boxed{\Delta\nu/\nu_0 = -\Delta\lambda/\lambda_0 = -v_r/c}$

Methode al bekend voor bepaling massa's van dubbelster systemen (zie Inleiding Astrofysica)

NU VOOR STER EN EXO-PLANEET



$$\sin(i),$$

$$M_{PL} = \frac{M_{star} V_{star}}{V_{PL}}$$

$$r^3 = \frac{G M_{star}}{4\pi^2} P_{star}^2$$

$$V_{PL} = \sqrt{G M_{star}/r}$$

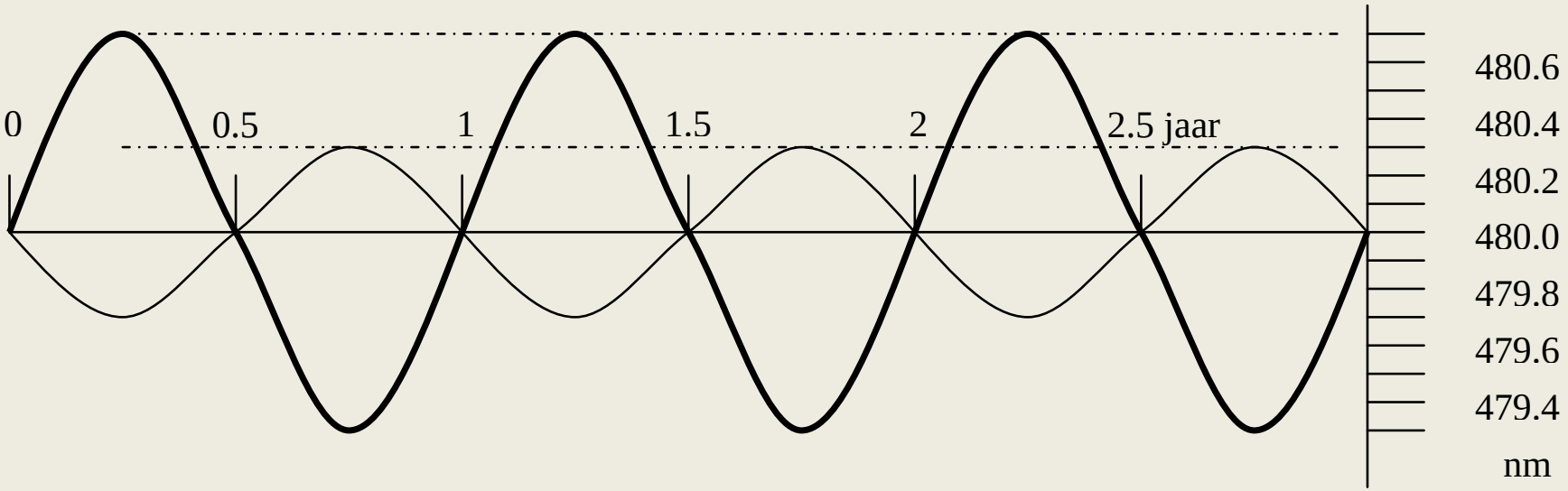
SOME NUMBERS

Radial-velocity comparison tables [edit]

Planet Mass	Distance AU	Radial velocity (v_{radial})	Notice
Jupiter	1	28.4 m/s	
Jupiter	5	12.7 m/s	
Neptune	0.1	4.8 m/s	
Neptune	1	1.5 m/s	
Super-Earth (5 M⊕)	0.1	1.4 m/s	
Alpha Centauri Bb (1.13 ± 0.09 M⊕)	0.04	0.51 m/s	(1[15])
Super-Earth (5 M⊕)	1	0.45 m/s	
Earth	1	0.09 m/s	

OPGAVE

In de figuur is het tijdsopgeloste spectrale gedrag weergegeven voor een emissielijn bij 480 nm van een spectroscopische dubbelster. De horizontale as is in jaren, de verticale as in nm.



a) Zijn de sterren even zwaar ?
b) Bereken de baansnelheden van beide sterren in km/s.
c) Bereken de onderlinge afstand.

OPLOSSING

a) Nee. Uit het diagram volgt dat ze verschillende maximale Dopplerverschuivingen hebben, dus ook verschillende maximale radiele snelheden.

Omdat bij een dubbelstersysteem geldt - $m_1/m_2 = v_2/v_1$ - kunnen m_1 en m_2 niet gelijk zijn.

b) Volgens de Doppler relatie geldt:

→ $\Delta\lambda / \lambda = v/c$

Hieruit volgt voor ster 1 (met de grotere Doppler verschuiving):

→ $v_1 = (\Delta\lambda / \lambda)\, c = [(480.7 - 480.0) \,.\, 10^{-9} / 480.10^{-9}] \,.\, c = 437.5$ km/s

En voor ster 2:

→ $v_2 = (\Delta\lambda / \lambda)\, c = [(480.3 - 480.0) \,.\, 10^{-9} / 480.10^{-9}] \,.\, c = 187.5$ km/s

(Hieruit volgt ook dat $r_1/r_2 = 437.5/187.5$ → $r_1 = 2.33\, r_2$)

OPLOSSING

c) De omlooptijd van de sterren bedraagt 1 jaar (volgt uit diagram). Verder is bekend dat de omlooptijd en baansnelheid gegeven worden door:

→ $P = 2\pi r_1 / v_1$

→ $r_1 = P/2\pi\, v_1 = [(365.25 \,.\, 24 \,.\, 3600) / 2\pi] \,.\, 437.5 = 2.20.10^9$ km

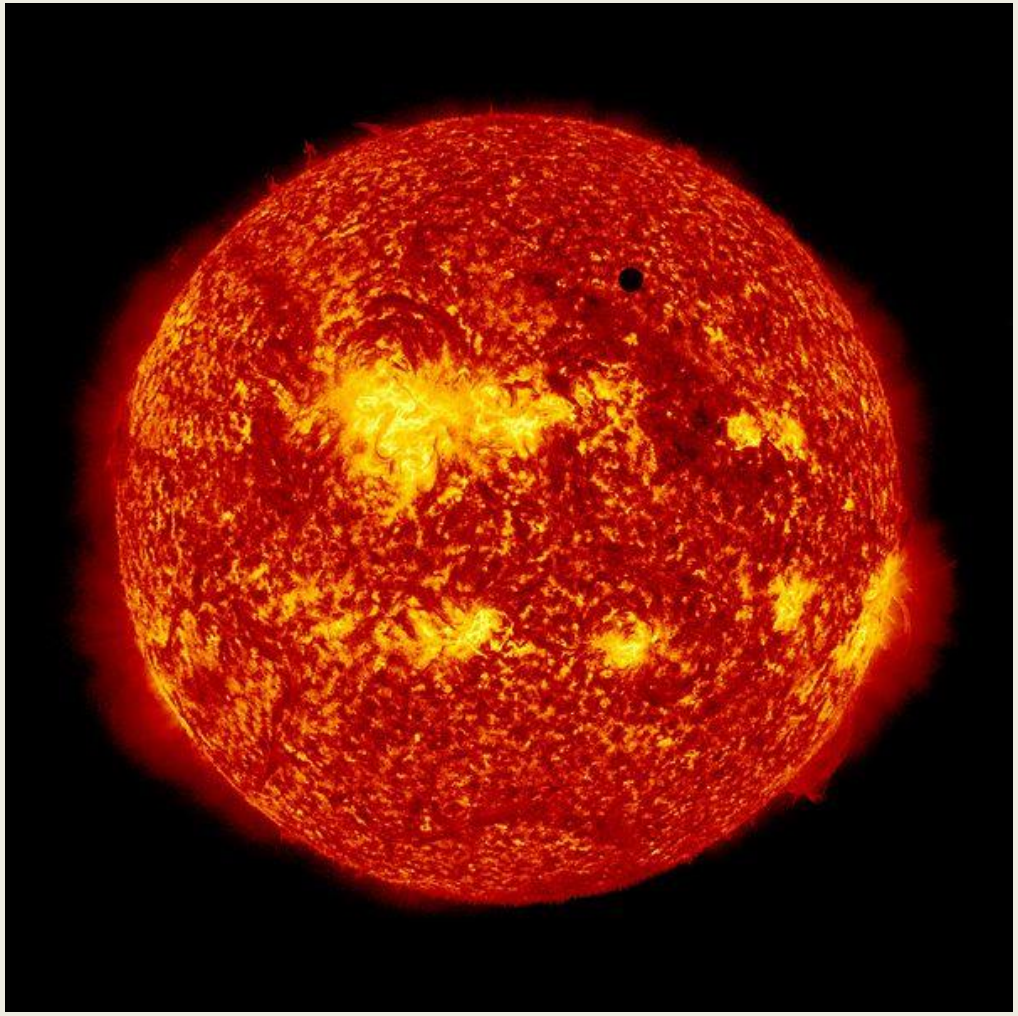
En evenzo:

→ $P = 2\pi r_2 / v_2$

→ $r_2 = P/2\pi\, v_2 = [(365.25 \,.\, 24 \,.\, 3600) / 2\pi] \,.\, 187.5 = 0.94.10^9$ km

Dus $r = r_1 + r_2 = 3.14.10^9$ km ~ 21 AU.

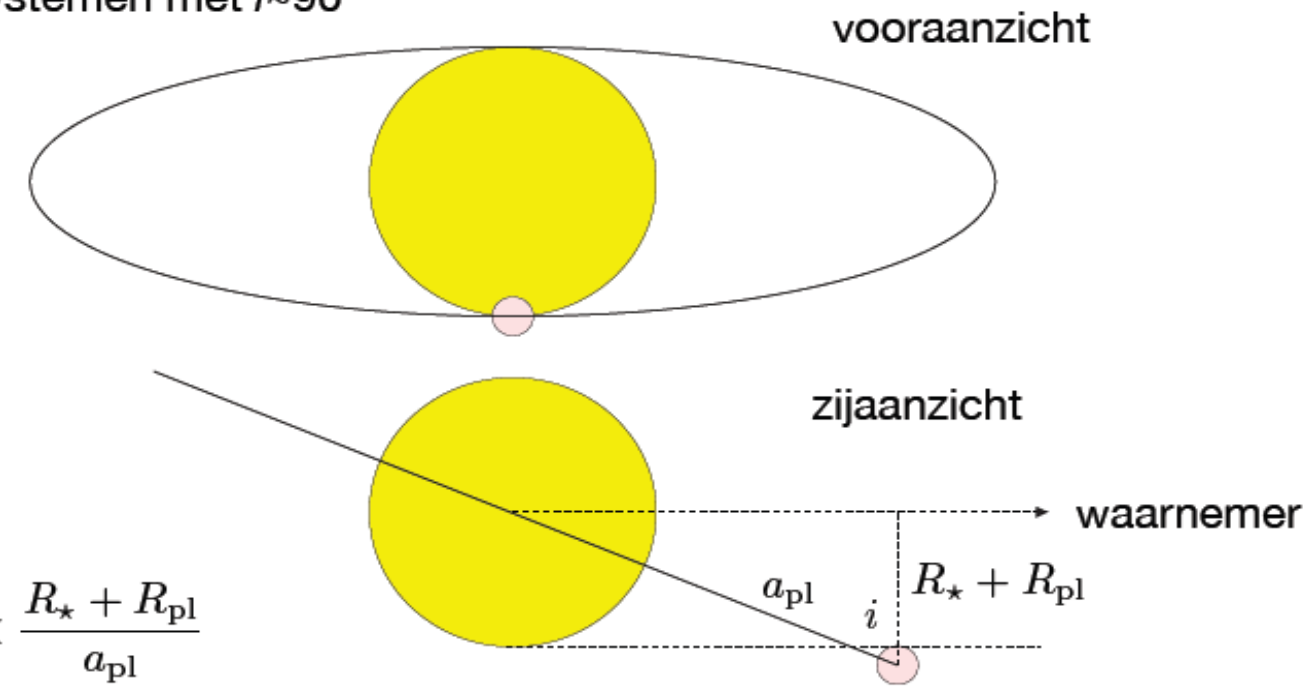
TRANSIT METHODE: VENUS



- Afname in licht intensiteit is vrij goed te meten.
- Zelfde principe als Venus transit.
- 1639, 1761, 1769, 1874, 1882, 2004, 2012, 2117, 2125, …
- Aarde en Venus staan eens in de ~584 dagen op een lijn
- Niet iedere samen-stand resulteert in een bedekking.
- De transit duurt typisch zo'n 4-7 uur.

TRANSIT METHODE

- Voor systemen met i~90°



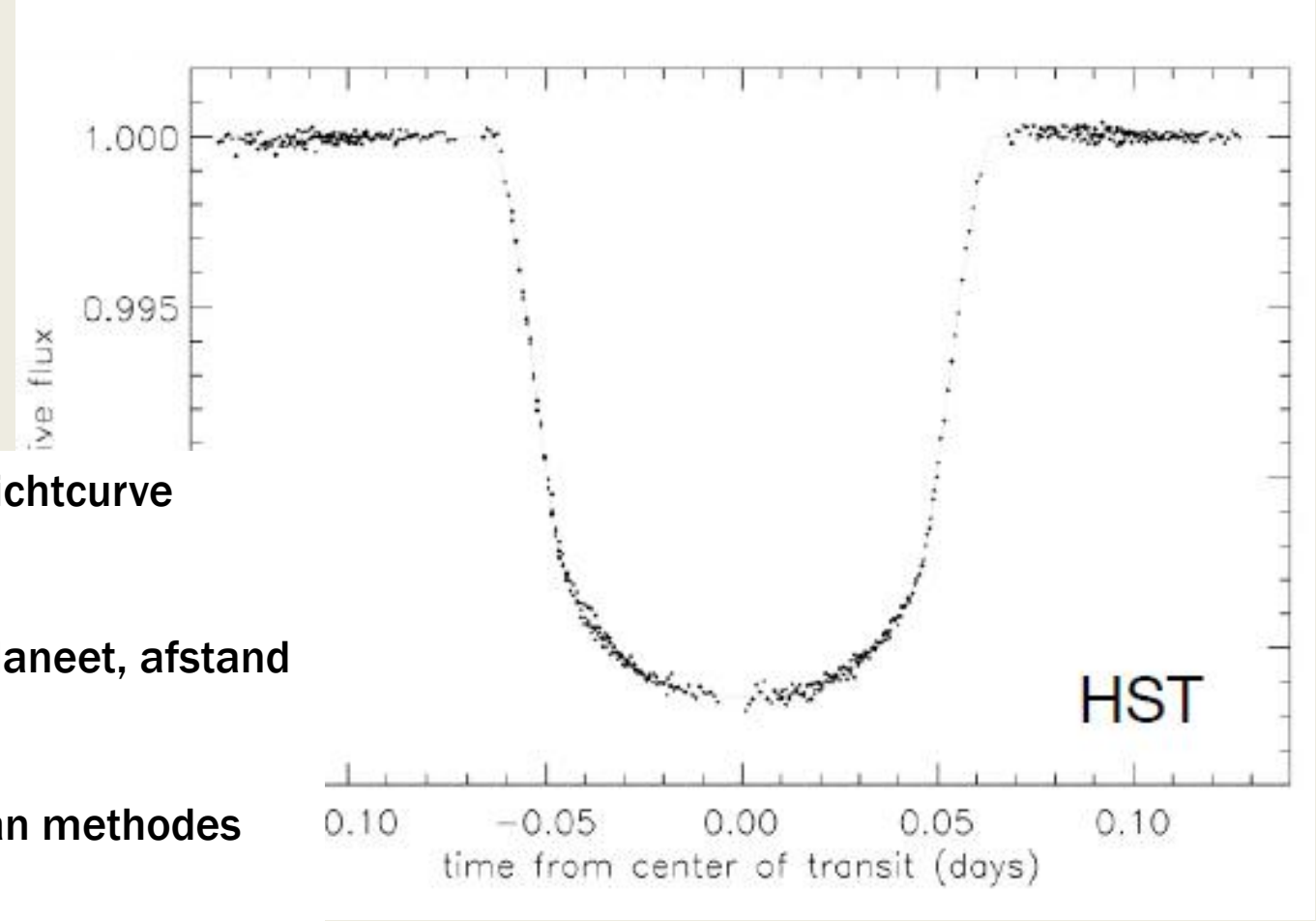
$$\cos i < \frac{R_\star + R_{\rm pl}}{a_{\rm pl}}$$

- Jupiter op 10 pc, 5 AU → $i > 89.9°$
- Jupiter op 10 pc, 0.05 AU → $i > 84.1°$

Wat betekent dit ?

TRANSIT METHODE

- HD209458



Wat kun je uit zo'n lichtcurve berekenen ?

Omlooptijd, straal planeet, afstand planeet-ster, T, ... ?

Soms combinatie van methodes nodig ....

TRANSIT METHODE

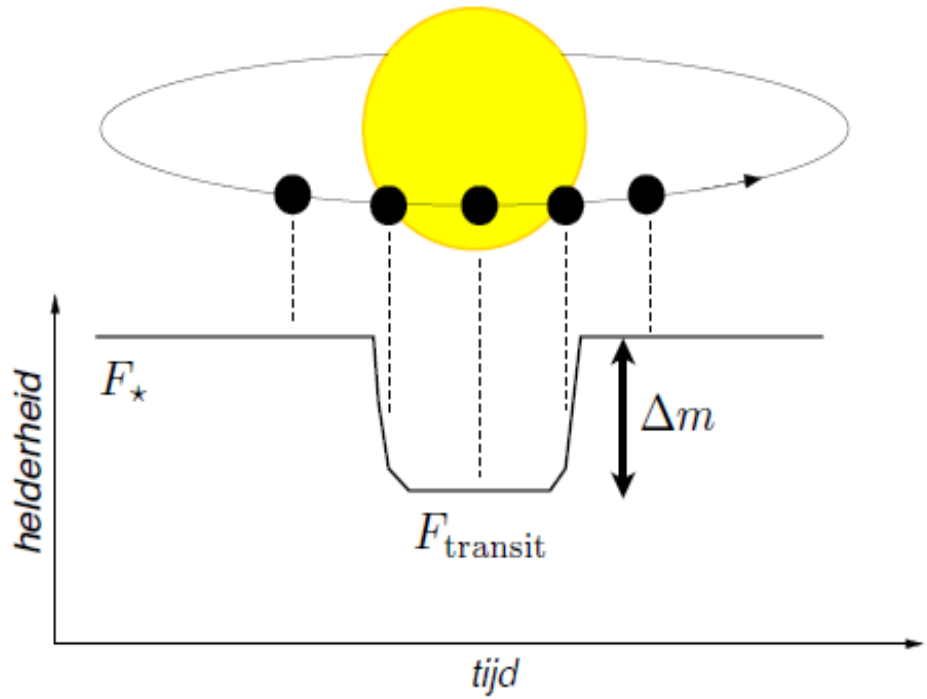
- *Diepte* van de eclips geeft $\boldsymbol{R_{pl}}$

$$F_\star \propto R_\star^2$$

$$F_{\text{transit}} \propto R_\star^2 - R_{\text{pl}}^2$$

$$\downarrow$$

$$\Delta m = -2.5\,{}^{10}\log\left(\frac{R_\star^2}{R_\star^2 - R_{\text{pl}}^2}\right)$$

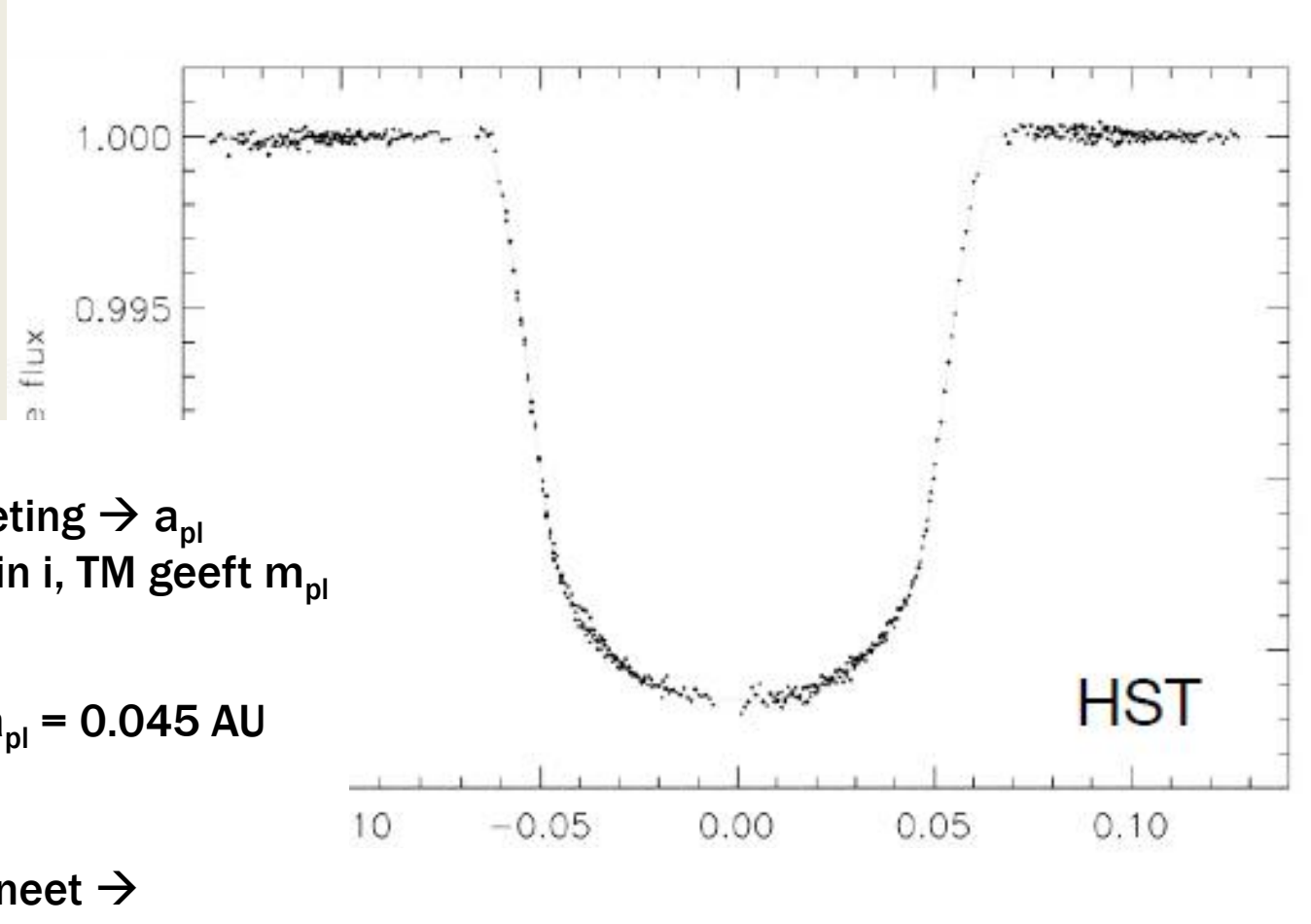


Er bestaat nog een tweede methode om Rpl te bepalen, hou zou die werken ?

- Jupiter, zon→ $F_{\text{transit}} \sim 0.99 \times F_\star$; Δm = 12 millimag

TRANSIT METHODE

- HD209458

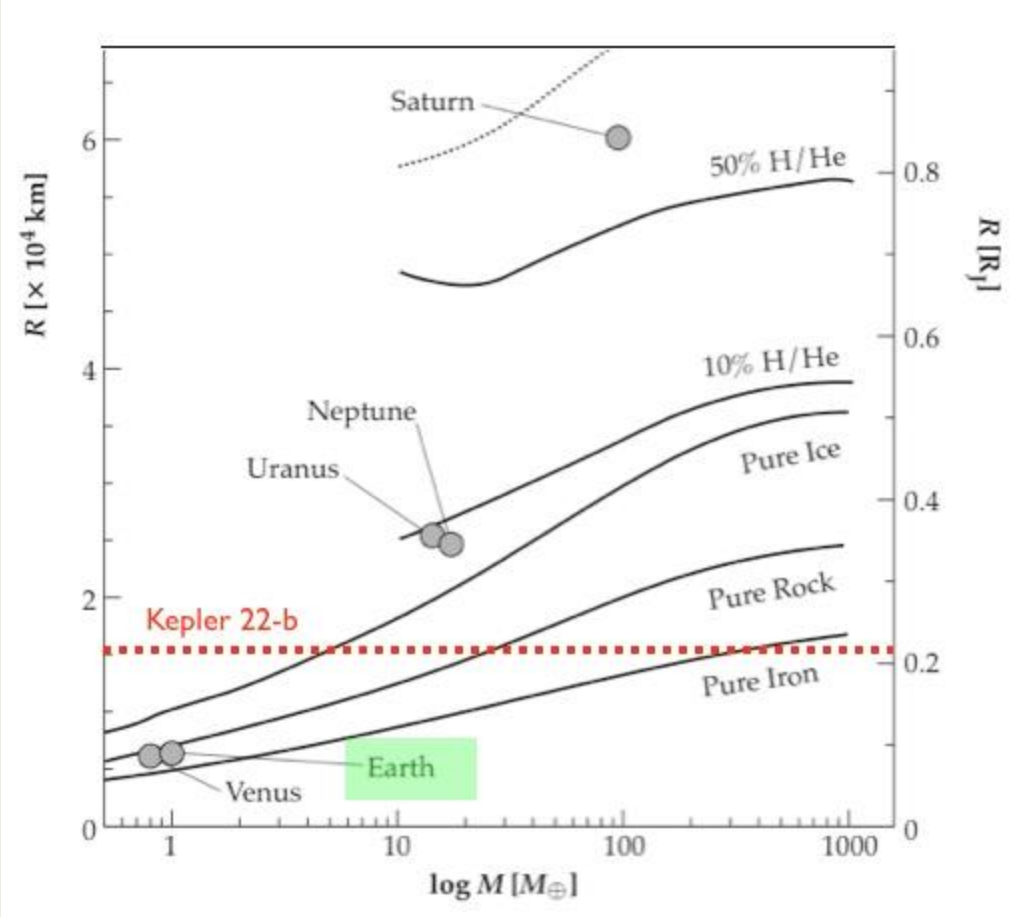


Radiele snelheidsmeting → a_{pl}
RS geeft alleen m_{pl}sin i, TM geeft m_{pl}

→ M_{pl} = 0.69 M_{jup}
→ P = 3.52 dagen, a_{pl} = 0.045 AU
→ R = 1.4 R_{jup}

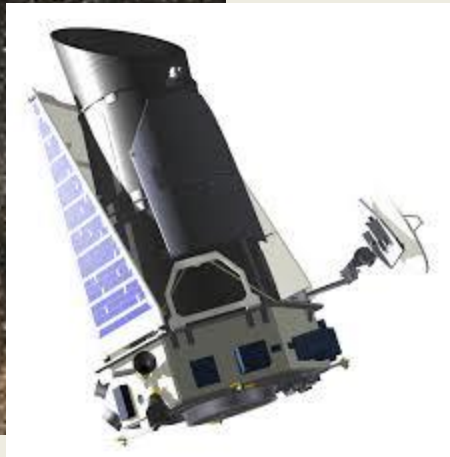
→ Dichtheid van planeet → samenstelling → vooral waterstof → dus gas planeet

IDEE VAN CHEMISCHE SAMENSTELLING EXO-PLANEET



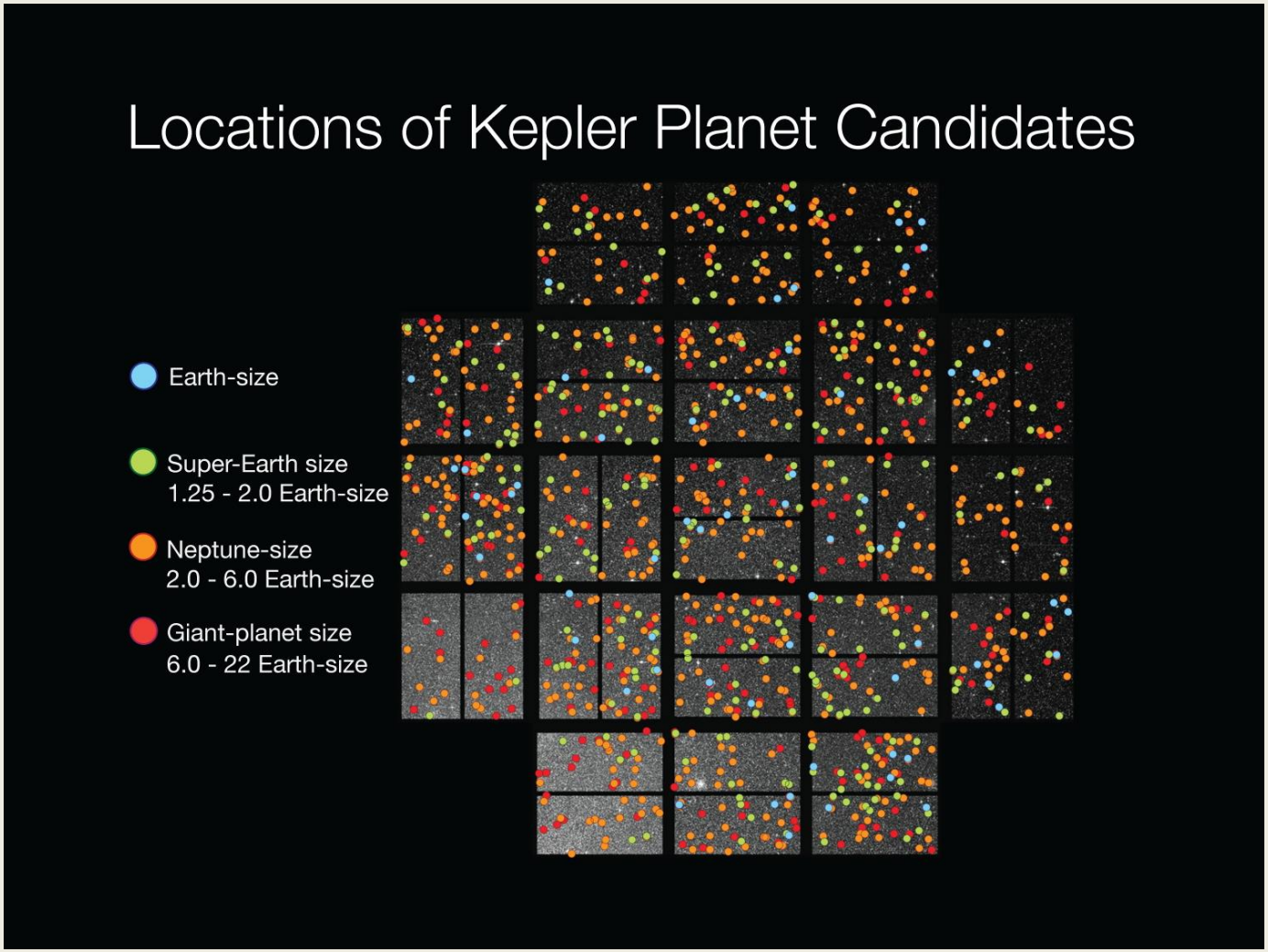
Methodes staan dus toe om inzicht te krijgen in de samenstelling van exo-planeten.

TRANSIT METHODE: KEPLER MISSIE



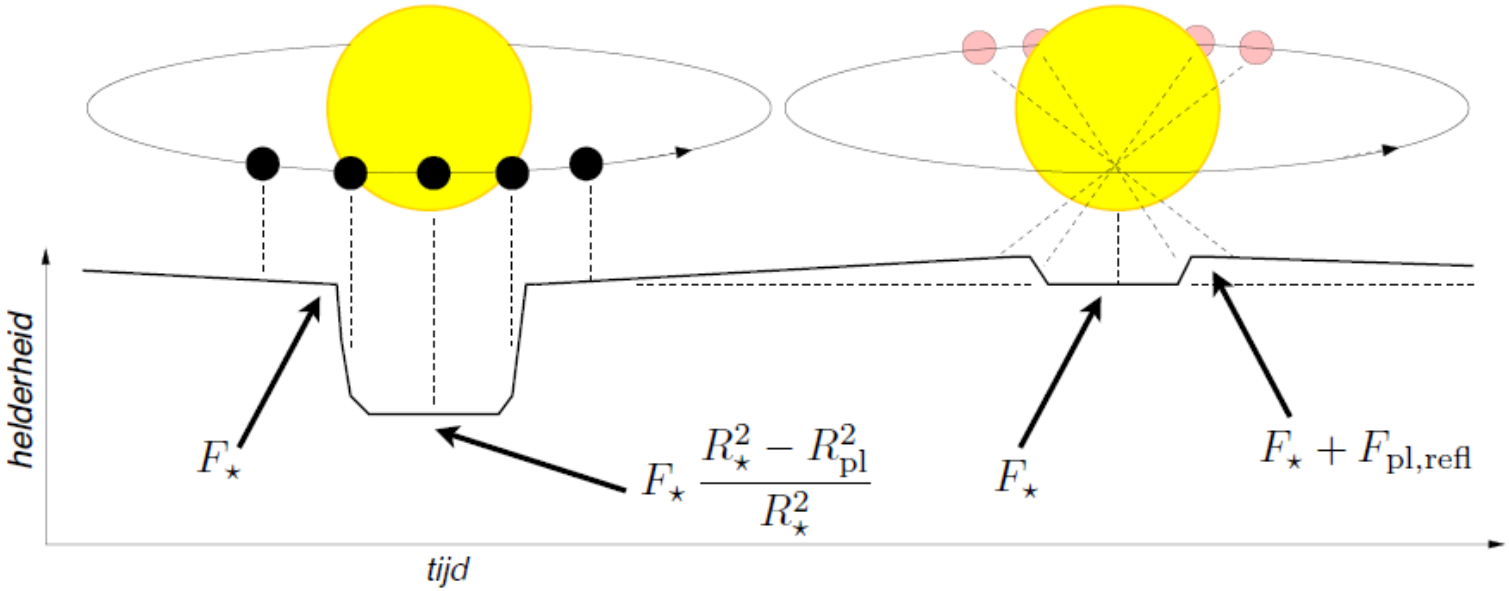
- 0.95m Schmidt telescoop.
- Van 2009-2013 naar sterrenbeeld Zwaan gekeken.
- 190000 sterren in de gaten gehouden.
- Groot beeldoppervlak (veel sterren gelijk-tijdig onderzoeken).
- Groot aantal kandidaat planeten (4000).
- Inmiddels meerdere honderden bevestigd.

TRANSIT METHODE: KEPLER MISSIE



TRANSIT METHODE: REFINED - DE SECONDAIRE ECLIPS -

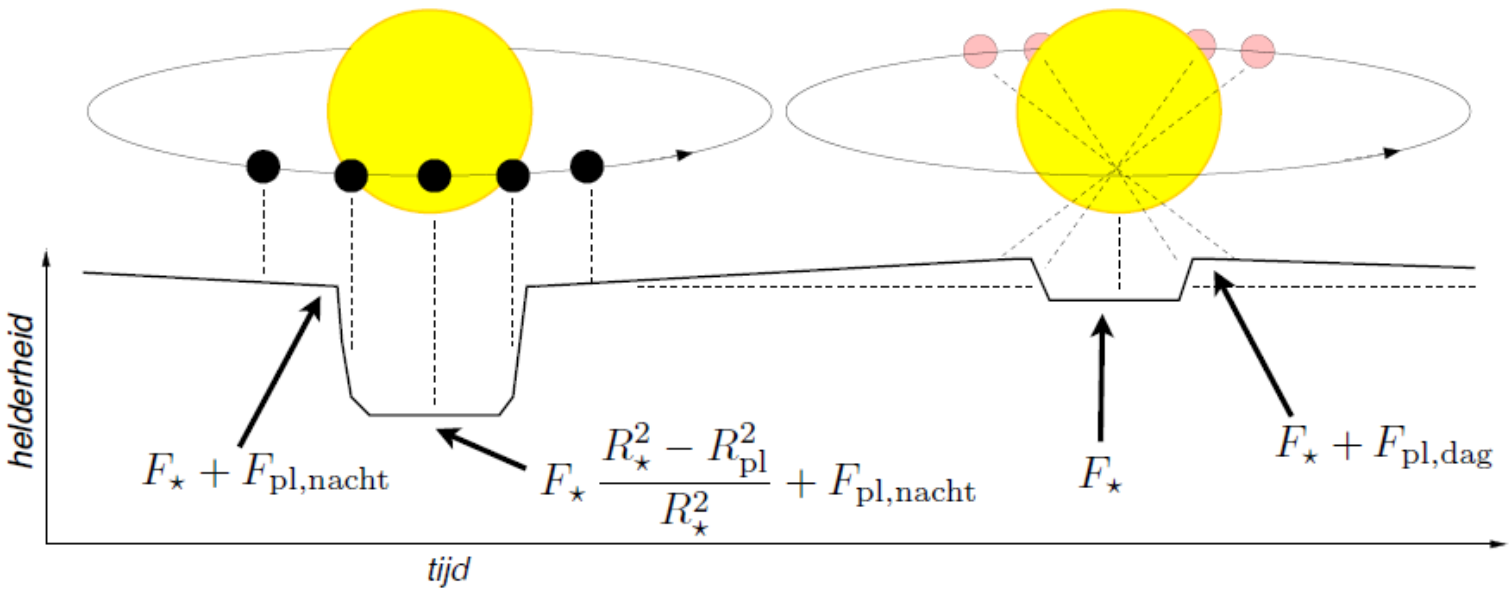
- Ook de planeet wordt verduisterd door de ster
  - In gereflecteerd licht: albedo ***A***
  - Domineert in VIS (visueel)



TRANSIT METHODE: REFINED - SECONDAIRE ECLIPS -

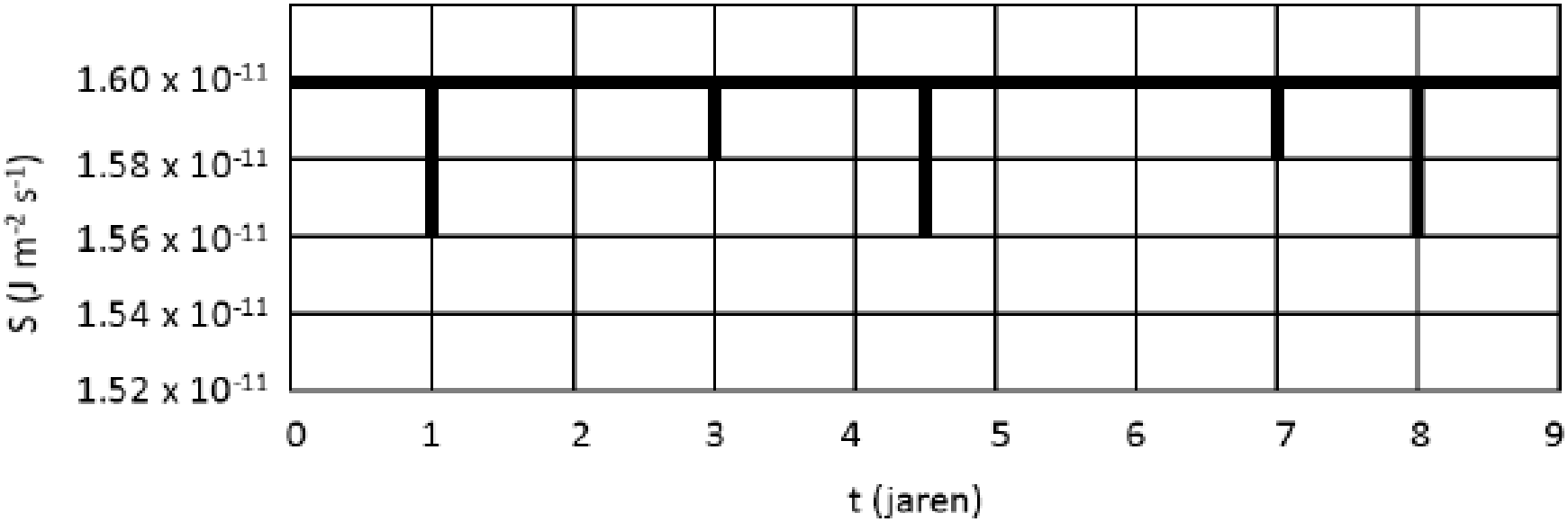
- Ook de planeet wordt verduisterd door de ster
  - In uitgezonden licht: geeft T_{pl}
  - Verschil in temperatuur planeet dag- vs nacht-zijde
  - Belangrijk in thermisch infrarood (IR)

$$F_{\rm uit} = 4\pi R_{\rm pl}^2 \, \sigma T_{\rm eff}^4$$



OEFENOPGAVE TENTAMEN: REKENEN

In de figuur staat de lichtcurve van een ster waar twee exo-planeten omheen draaien. Op de verticale as staat de flux, zoals die op Aarde wordt gemeten, op de horizontale as staat de tijd in jaren.



OEFENOPGAVE TENTAMEN: REKENEN

a) Bereken de afstand van beide exo-planeten tot hun centrale ster.

b) Is het toeval dat beide planeten in hetzelfde vlak blijken te bewegen ?

De ster heeft een parallax van 0.15''. Neem aan dat de ster even zwaar is als de zon (dus massa ~ 1 M_{zon}) en dat $R^* = R_{zon}$. Neem verder aan dat beide planeten precies voorlangs hun ster bewegen.

c) Bereken de absolute magnitude van de ster.

d) Welke kleur heeft deze ster ?

e) Bereken de straal van beide planeten.

f) Stel dat op beide exo-planeten water voorkomt, bereken dan voor iedere planeet in welke toestand zich het water ter plekke bevindt.

OPLOSSINGEN

a) Gebruik derde Wet van Kepler: $P^2/a^3 = 1$ indien P in jaar en a in AU.

Lees uit diagram af: $P_1 = 3.5$ jaar en $P_2 = 4$ jaar, dan volgt:

$a_1 = [(3.5)^2]^{1/3} = 2.30$ AU
$a_2 = [(4)^2]^{1/3} = 2.52$ AU

b) Nee, dit is geen toeval; planeetvorming vindt plaats vanuit een vlak, de proto-planetaire schijf.

c) Twee oplossingen (schijnbaar en afstandsmodulus of absoluut en lichtkracht)

I

$m1 - m2 = -2.5 \log (S1/S2)$, kies S1 ster en S2 zon.

$\rightarrow m^* = -2.5 \log(1.6.10^{-11} / 1.36.10^{3}) - 26.75 = 8.07$

Dan afstandsmodulus: $M - m = 5 - 5 \log D(pc)$, dus

$\rightarrow M = 13.07 - 5 \log (1 / 0.15) = 8.95$

II

$M^* - Mzon = -2.5 \log (L^*/Lzon)$ en $S^* = L^*/4\pi d^2$

waarbij $d = 1/0.15 \,.\, 3.09.10^{16} = 2.06.\ 10^{17}$ m

Dus $L^* = 4\pi d^2 \,.\, S^* = 4\pi\, (2.06.10^{17})^2 \,.\, 1.60.10^{-11} = 8.53.10^{24}$ J s^{-1}

Verder bekend (zonneconstante): $Lzon = 3.83.10^{26}$ J s^{-1}

Dus $M^* = Mzon - 2.5 \log (L^*/Lzon)$

$\rightarrow M^* = 4.72 - 2.5 \log (8.53.10^{24} / 3.83.10^{26}) = 8.85$

OPLOSSINGEN

d) $L^* = 4\pi(R^*)^2.\sigma T^4$ ofwel $T = [L^*/4\pi(R^*)^2.\sigma]^{1/4} =$

$= [8.53.10^{24} / (4\pi(6.96.10^8)^2.\ 5.67.10^{-8})]^{1/4} =$ 2230 K

Met Wien (λ_{max} . T = 0.0029 volgt dan dat l_{max} ~ 1.3 μm, dus de ster zal er dieprood uitzien (maximum ligt in het NIR).

e) Tijdens de bedekking geldt:

$(R^{*2} - R_{exo}^2) / R^{*2}$ = 1.58 / 1.60 = 0.9875 voor planeet 1,
= 1.56 / 1.60 = 0.975 voor planeet 2.

Dus voor planeet 1
$R_{exo}^2 = (R^{*2} - 0.9875\ R^{*2}) = 0.0125\ R^{*2} = 0.0125\ Rzon^2 \rightarrow R_{exo,1} = 7.8.10^7$ m

OPLOSSINGEN

en voor planeet 2

$R_{exo}^2 = (R^{*2} - 0.975\ R^{*2}) = 0.025\ R^{*2} = 0.025\ Rzon^2 \rightarrow R_{exo,2} = 1.1.10^8$ m

f) Formule die kan worden afgeleid (zie college): $T_{exo} = [R^* / 2d]^{1/2}\ T^*$

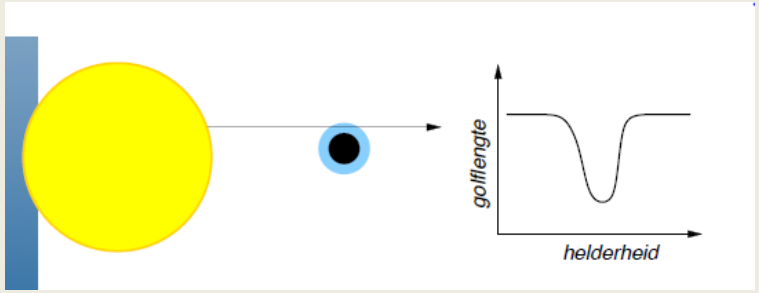
(gebaseerd op aanname dat licht in = licht uit)

Dus $Texo,1 = [6.96.10^8 / 2\ .\ 2.3\ .\ 1.496.10^{11}]^{1/2}\ 2230 = 71$ K

En voor $Texo,2 = 68$ K

Dus bevroren.

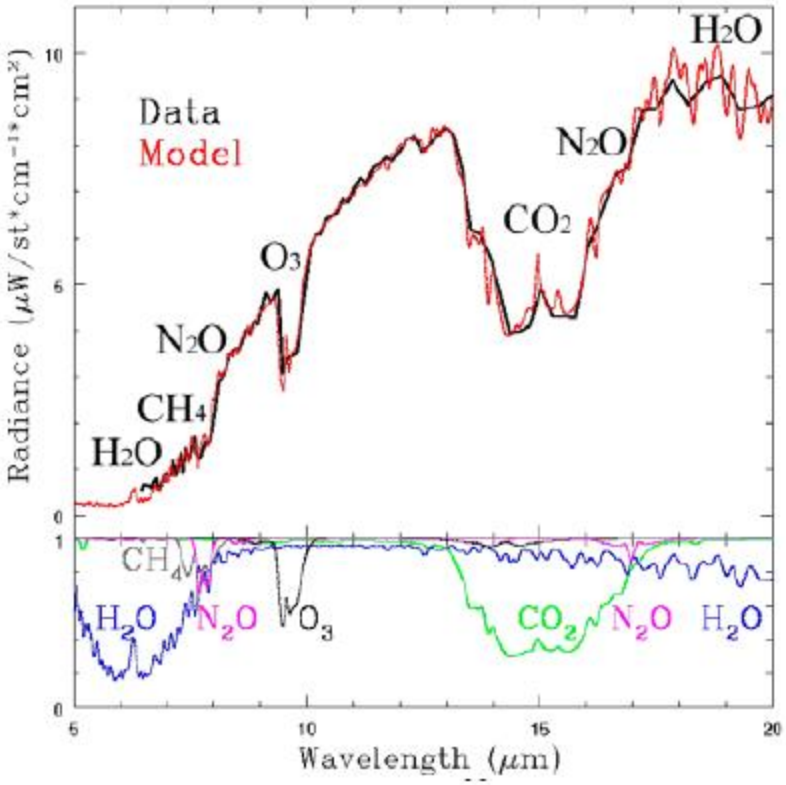
TRANSIT METHODE: REFINED - ATMOSFEREN -



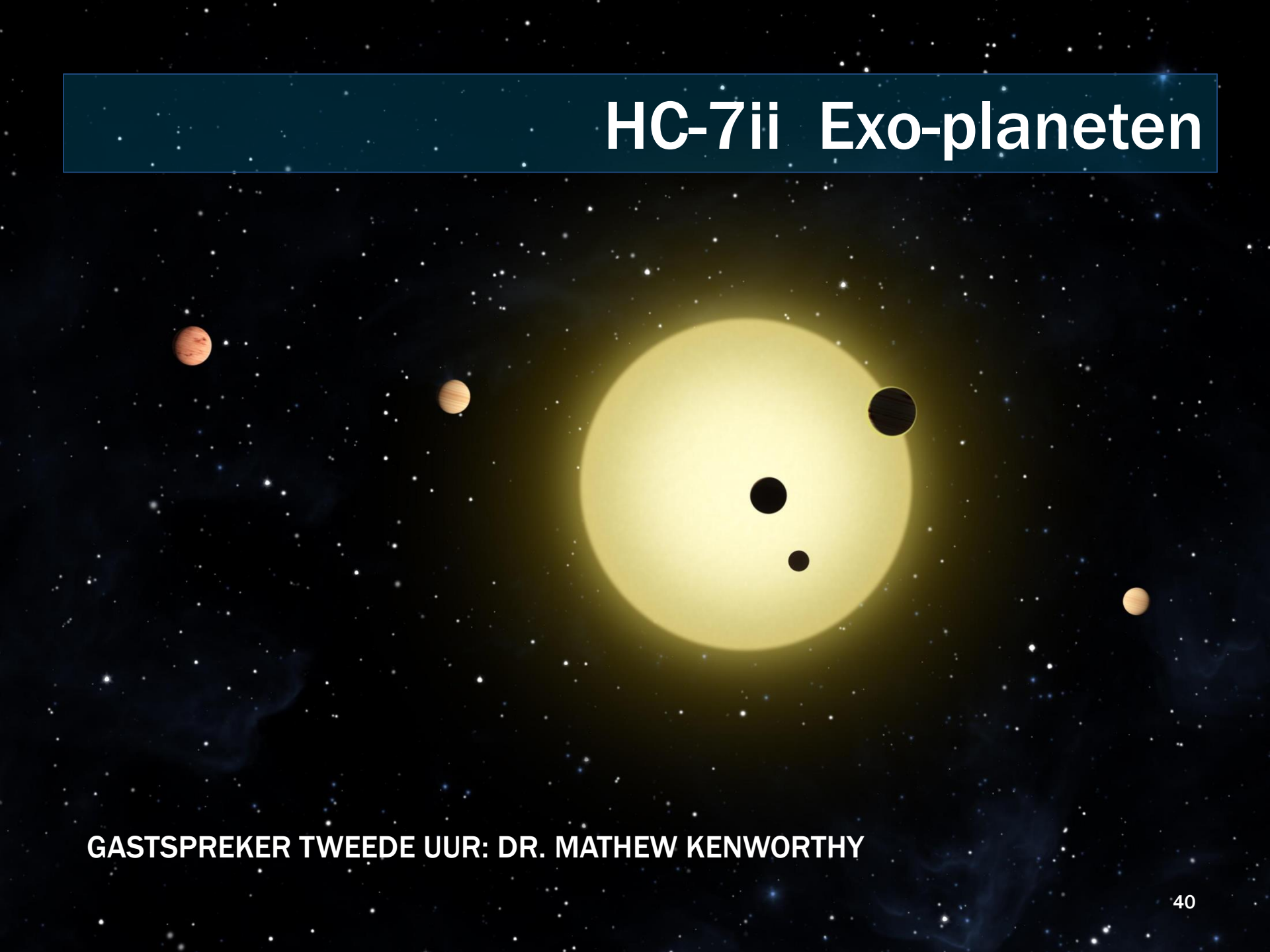
- Onderzoek het licht dat wordt geabsorbeerd door de atmosfeer tijdens de transit, of licht dat wordt uitgestraald aan de nachtkant (tijdens transit) of algemeen tijdens de omdraaiing.
- Erg moeilijk, omdat de spectrale lijnen van de ster vele malen sterker zijn.
- Daarom moeten spectra voor en na transit met elkaar vergeleken worden.
- Planeet lijkt iets groter op golflengtes die absorberen. Waarom ?
- Metingen hebben lage resolutie; tot nu toe alleen H_2O en CO_2 eenduidig aangetoond.
- Doel: biomarkers.
- HOT TOPIC: NWA

ATMOSFEER AARDACHTIGE PLANEET

- Signaal van diverse moleculen in spectrum van atmosfeer
  - CO_2, O_3, CH_4, H_2O: indicatie van aanwezigheid fotosynthese



HC-7ii Exo-planeten



GASTSPREKER TWEEDE UUR: DR. MATHEW KENWORTHY