

Op zoek naar exoplaneten

Wat zijn exoplaneten?
En hoe kunnen we deze zien?

*Renaat Frans, Erica Andreotti,
Lise Verbraeken, Jeroen Op den Kelder,*

*University Colleges Leuven-Limburg
Campus Diepenbeek, Belgium
Expertisecel Art of Teaching - Vakdidactiek*



Wat zijn exoplaneten? Waarom zoeken we naar exoplaneten?

Leg uit in eigen woorden...

Astronomy picture of the day

17 September 2019:

artistic representation of exoplanet K2-18b on the right, its parent red dwarf star K2-18 on the left, and an unconfirmed sister planet between them.

~124 lichtjaar afstand van de aarde

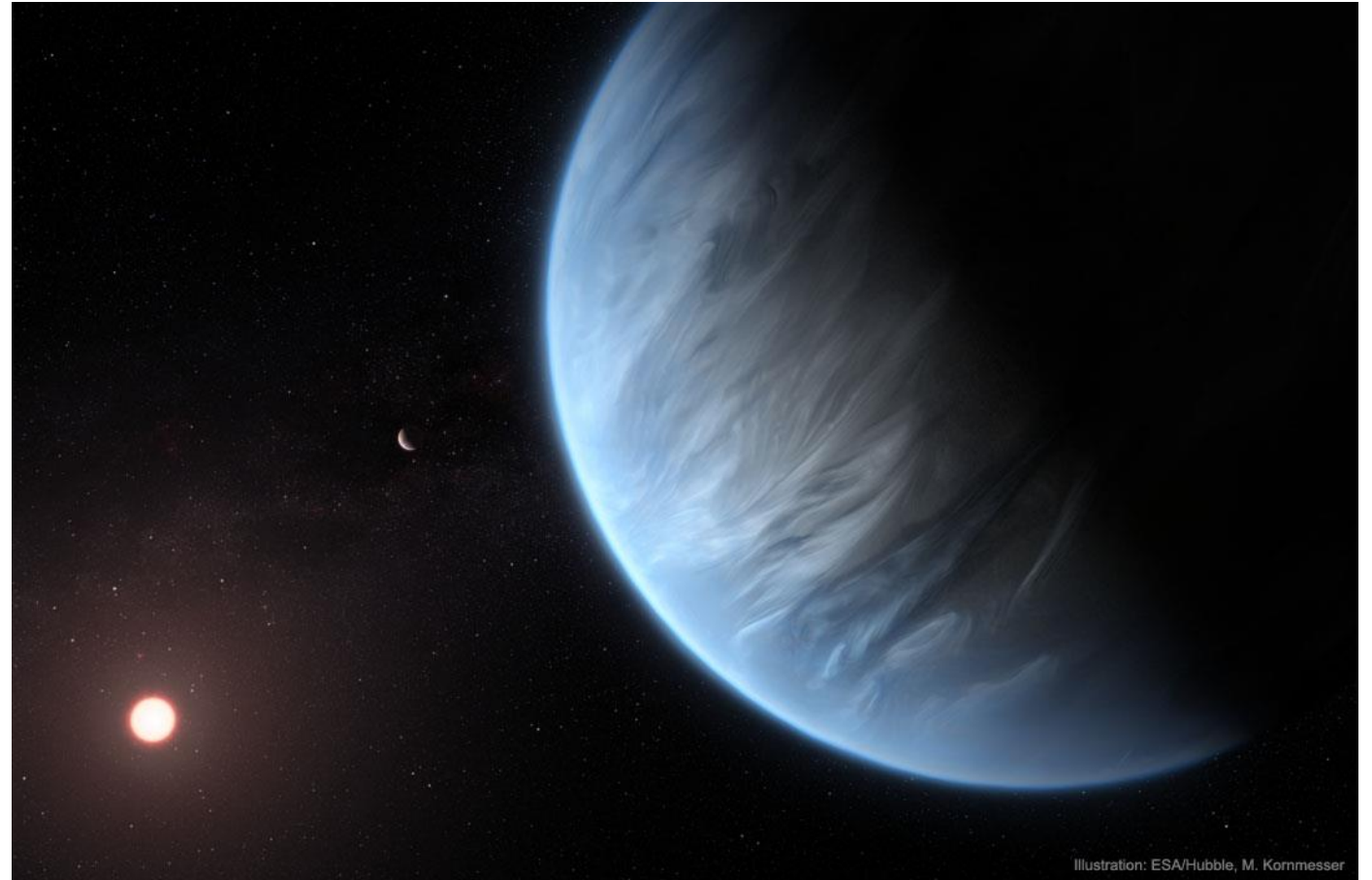


Illustration: ESA/Hubble, M. Kornmesser

Water Vapor Discovered on Distant Exoplanet
Illustration Credit: ESA, NASA, Hubble; Artist: M. Kornmesser

Waar zoeken we naar exoplaneten?

2019: Nobelprijs natuurkunde voor het ontdekken van de eerste exoplaneet – 51 Pegasi b - in 1995

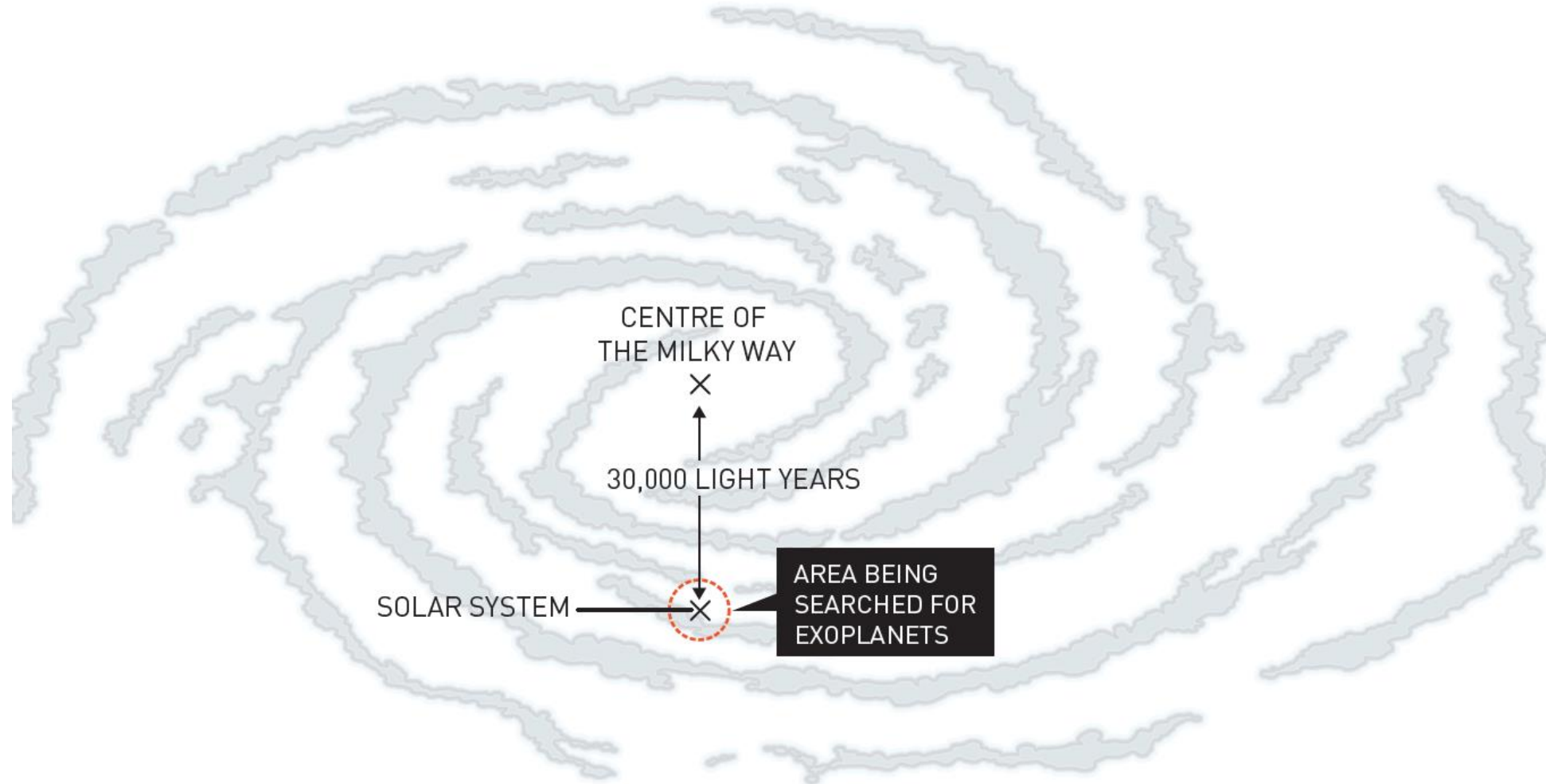
Sindsdien meer dan 4000 exoplaneten ontdekt...

<https://exoplanets.nasa.gov/>

Waar volgens jou?



Area being searched for exoplanets



Waar moeten we juist zoeken?

Powers of Ten™ (1977)

<https://youtu.be/OfKBhvDjuy0>

Heb je planeten zien 'rondvliegen'?
Waar moeten we dan zoeken?



Powers of Ten, Eames office

Hoe worden sterren gevormd?



Hoe worden sterren gevormd?

Zoek de Orion nevel op met [stellarium-web](#)

Wanneer is deze nevel te zien?

Zoek de nevel aan de avondhemel.

Zoek er foto's van op Astronomy picture of the day.

Hebben sterren kleuren?



Zoek de naam van deze sterren op Stellarium

Kijk naar de kleur

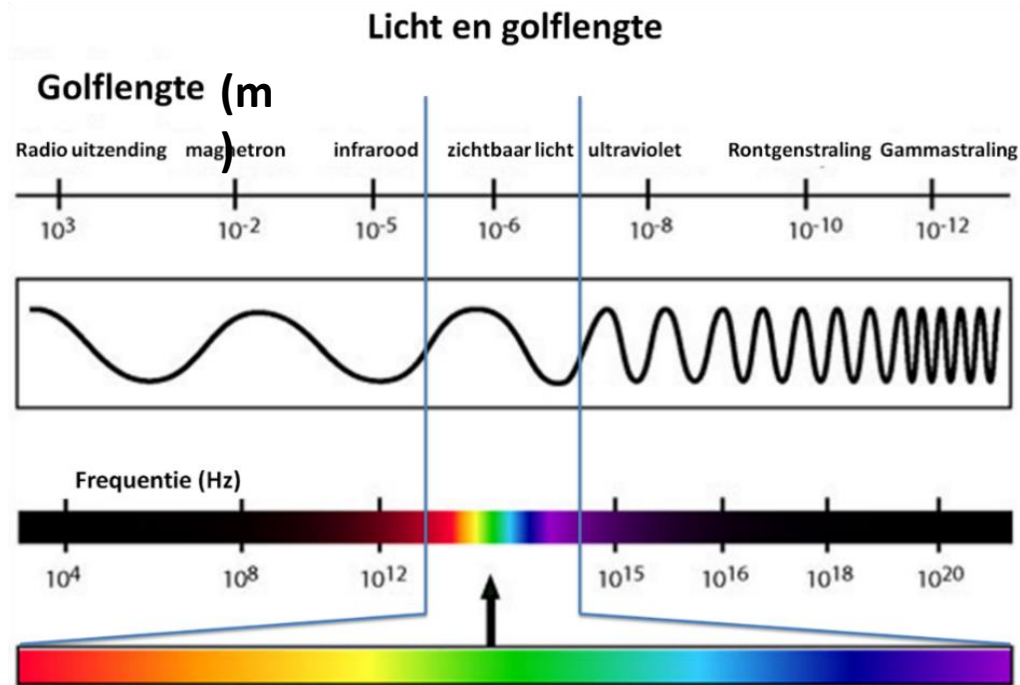
Zoek de temperatuur op van deze sterren en van onze zon

Verband temperatuur - kleur: rangschik ze van kouder naar warmer

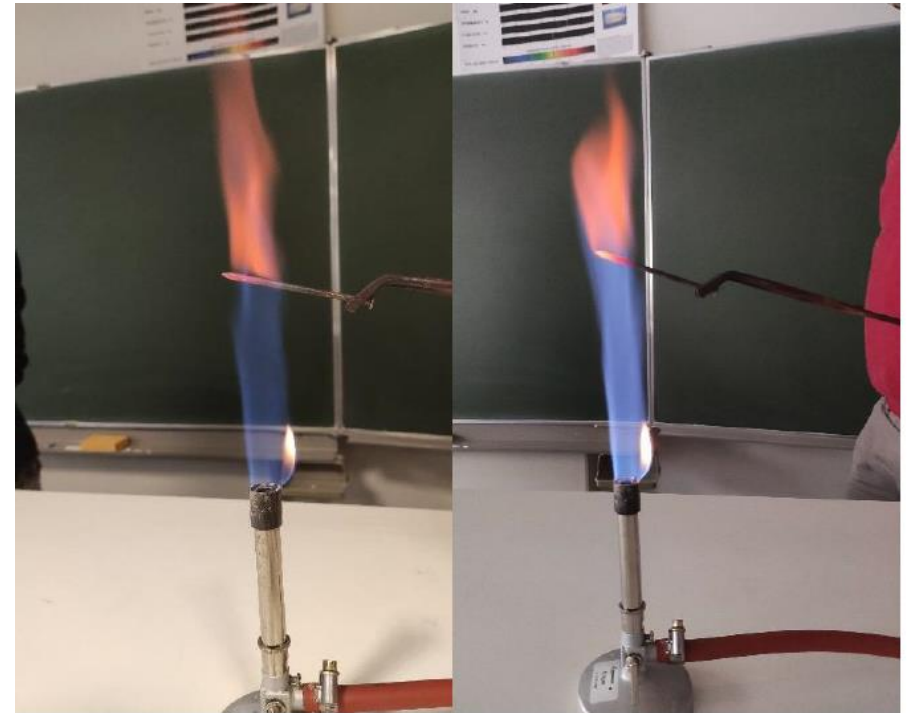
Verklaring verband kleur-temperatuur

Trillende ladingen in de stof zenden een elektromagnetische golf uit:

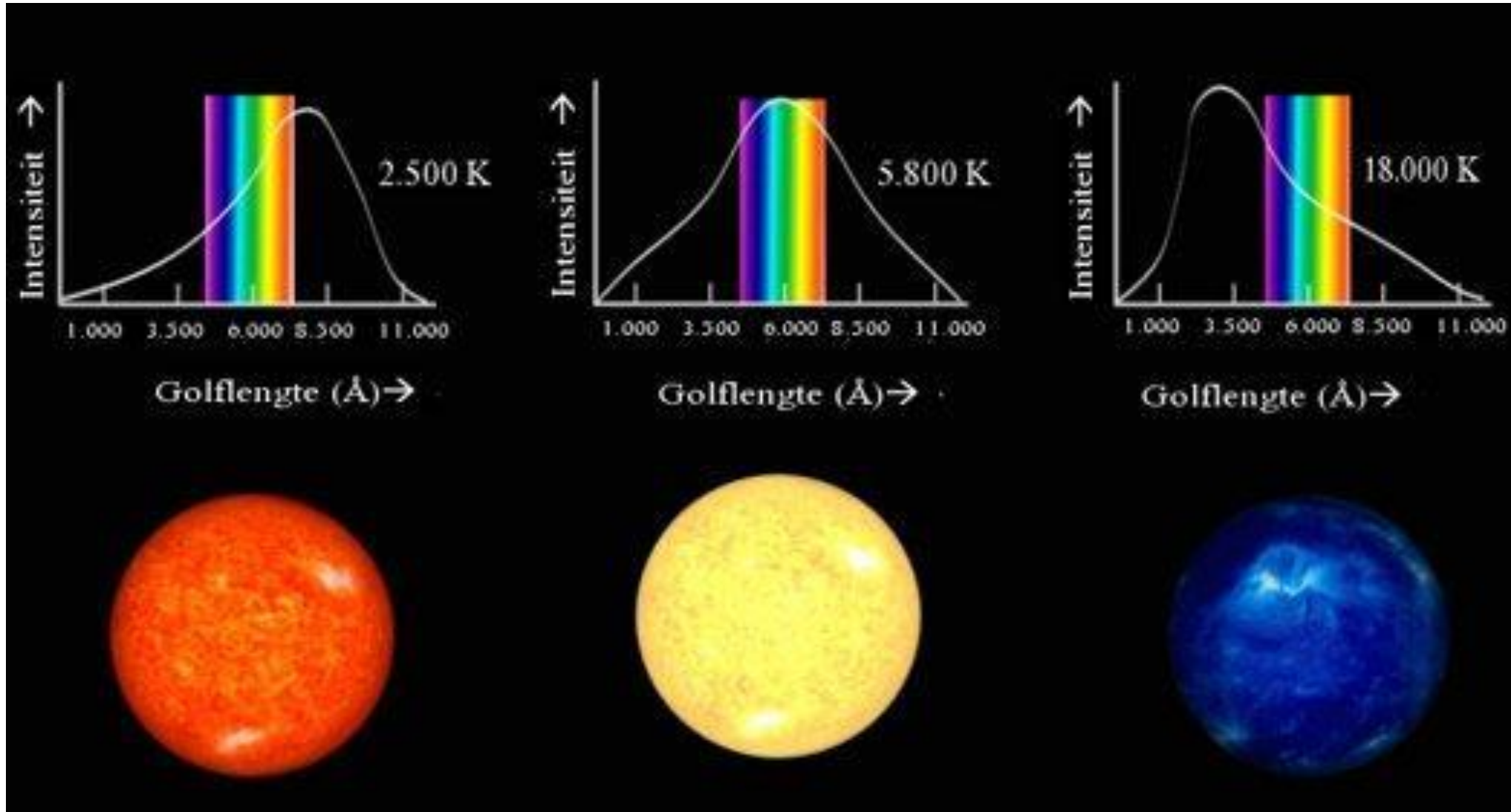
<https://www.compadre.org/osp/EJSS/4126/154.htm>



<http://www.duikkids.nl>



Hebben sterren kleuren?



Kunnen we exoplaneten zien?

Exoplanet time-laps

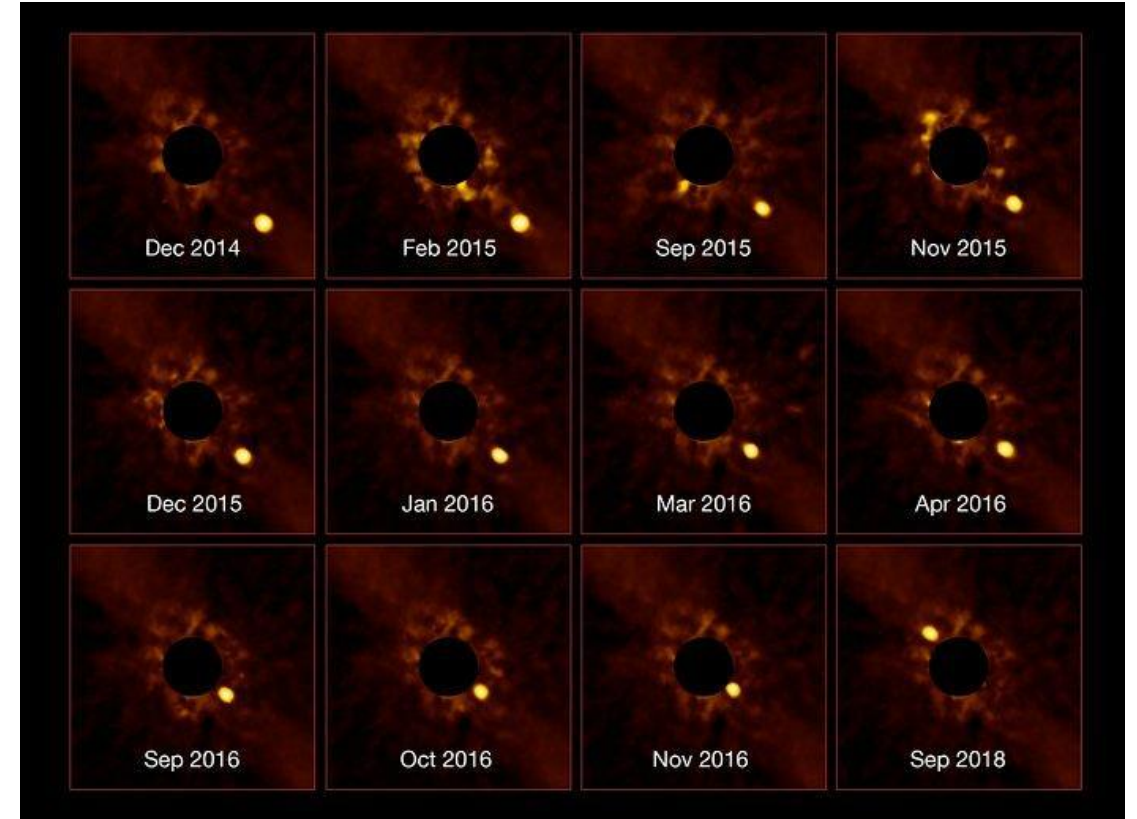
ESO's Very Large Telescope (VLT)
Transit van exoplanet Beta Pictoris b
rond zijn ster (2018)

Directe observatie is eerder
UITZONDERLIJK!

Meeste exoplaneten ontdekt via
INDIRECTE METHODES



Credit: ESO/B. Tafreshi (twanight.org)



Credit: ESO/Lagrange/SPHERE consortium.

Missies

Hubble ruimtetelescoop
(NASA & ESA)



1990-heden

Beeld: NASA

Kepler ruimtetelescoop (NASA)

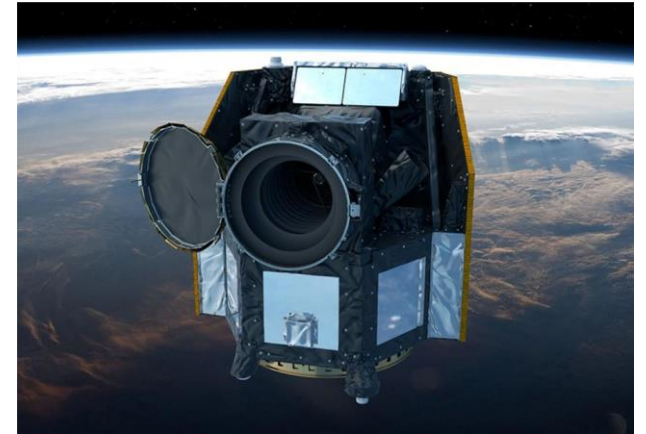


2009-2018

*(Brandstof op maar nog
in de ruimte)*

Beeld: NASA

CHEOPS (ESA)



2019-heden

Beeld: ESA

2018-heden

TESS
(NASA)



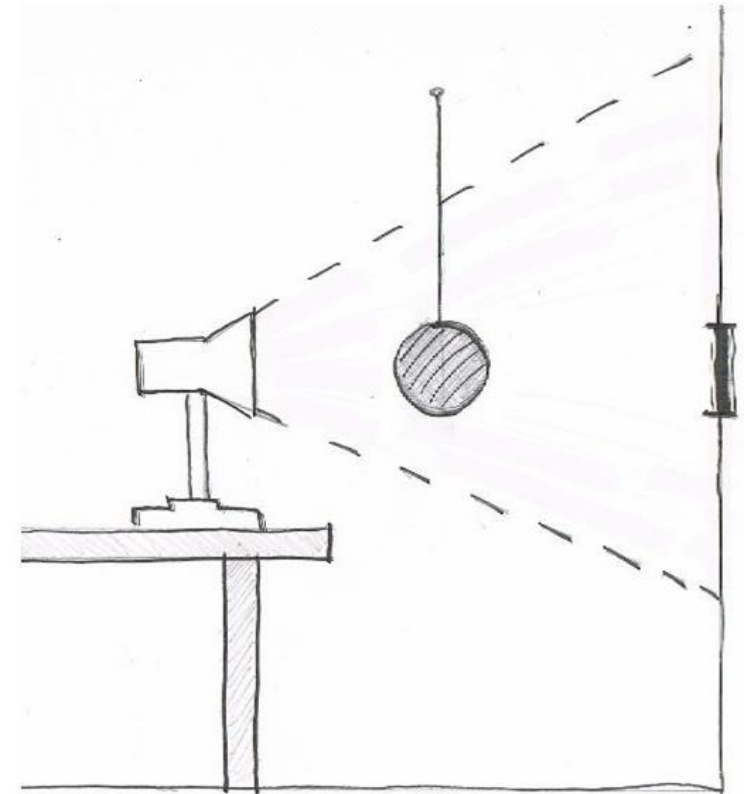
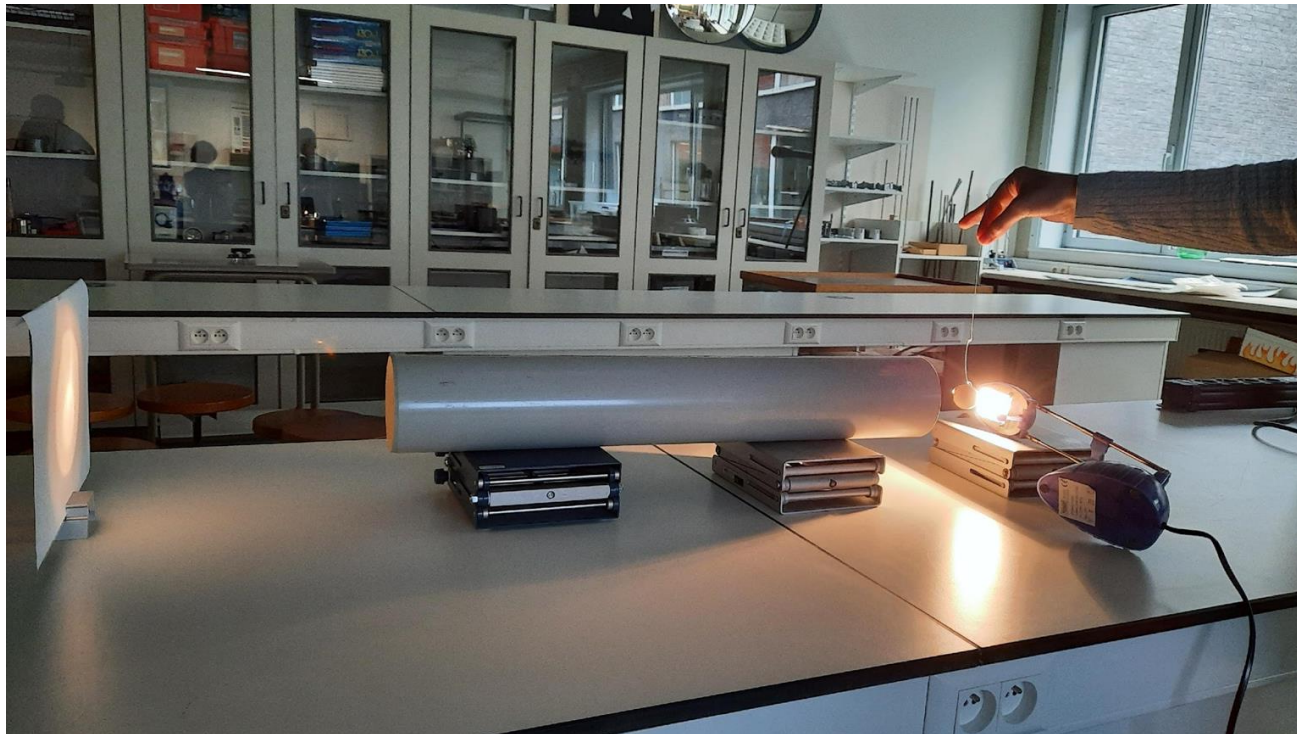
Beeld: NASA

Hoe vinden we een exoplaneet?

Transit methode – 1

Observeren: wat gebeurt er met de lichtintensiteit?

Teken de grafiek van lichtintensiteit over de tijd (LICHTCURVE).



Hoe zoeken we dan naar exoplaneten?

Transit methode

<https://www.esa.int/eseach?q=Transit+method>

Wat zie je?

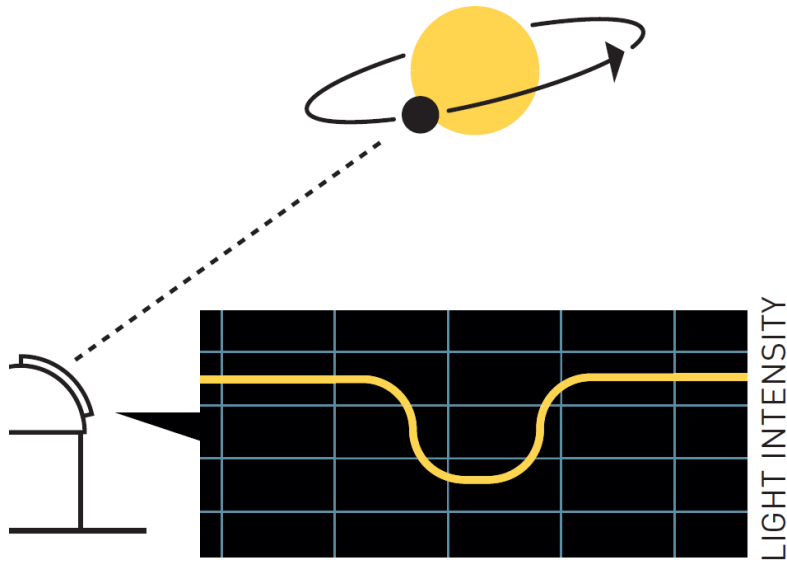
Er is ook een tweede methode: doppler shift

Beide zijn INDIRECTE METHODES

Hoe vinden we een exoplaneet?

Transit methode – 2

Kwantitatief: lichtcurve meten met *phyphox* op smartphone.

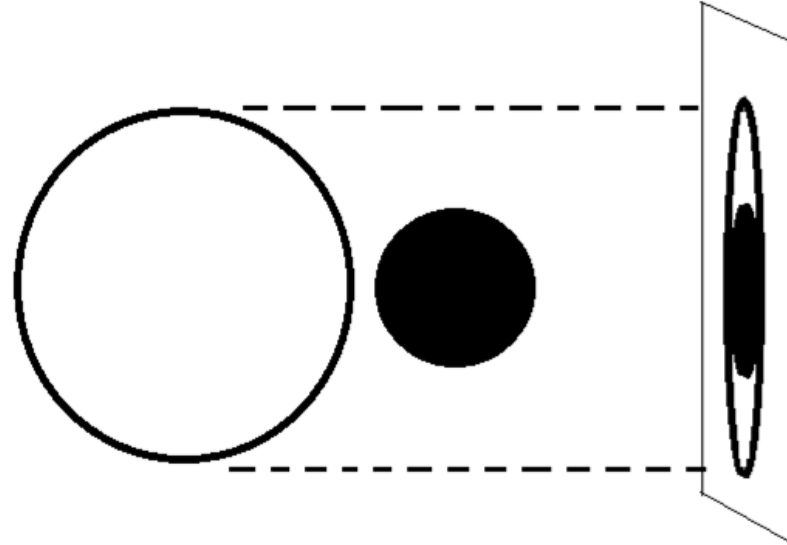


©Johan Jarnestad/The Royal Swedish Academy of Sciences

Straal van exoplaneet bepalen

De straal van de exoplaneet bepalen

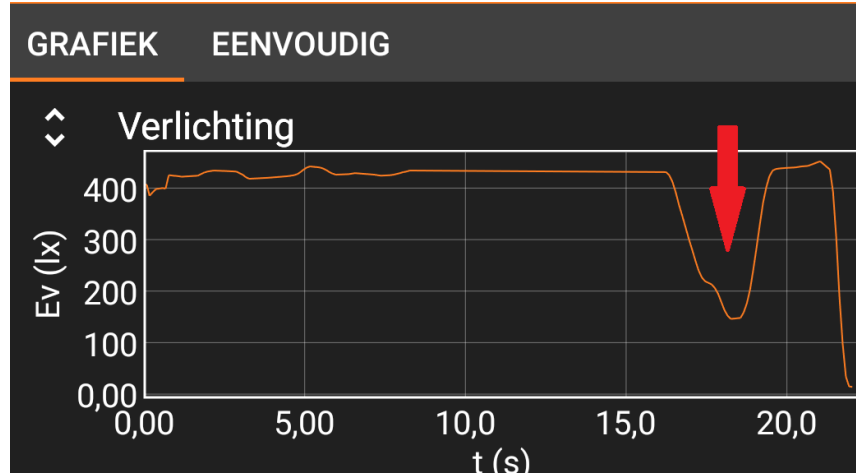
$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{r_{planeet}^2}{R_{ster}^2}$$



De straal van de exoplaneet bepalen

$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{r_{planeet}^2}{R_{ster}^2}$$

$$r_{planeet} = \sqrt{R_{ster}^2 \cdot \frac{\Delta I}{I}}$$

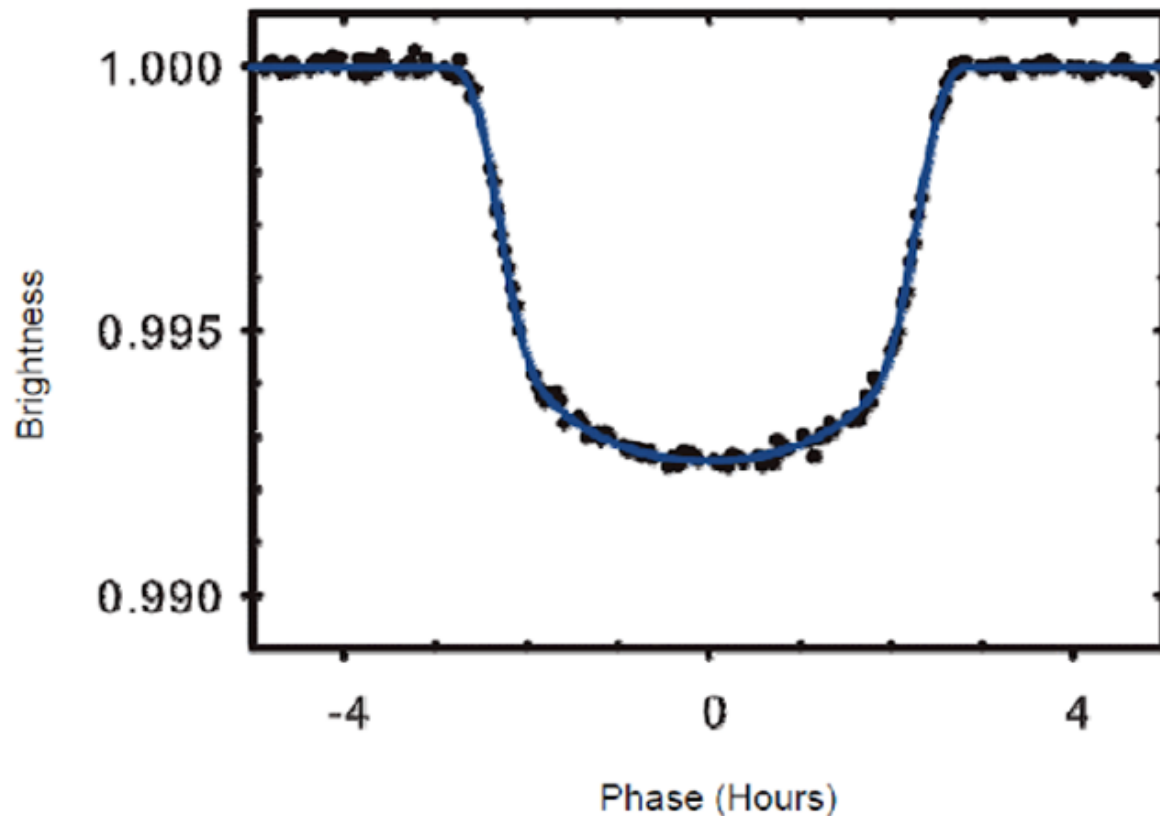


R ster (buis) opmeten en $\Delta I/I$ uit de grafiek aflezen

Ter controle: r balletje opmeten

Oefeningen met echte data

Kepler 7b



Ster Kepler 7: $R \sim 1,843 \cdot R_{\text{zon}}$

Bereken de straal van planeet Kepler 7b a.d.h.v. de afbeelding

$$r_{\text{planeet}} = \sqrt{R_{\text{ster}}^2 \cdot \frac{\Delta I}{I}}$$

Hoe vinden we een exoplaneet?

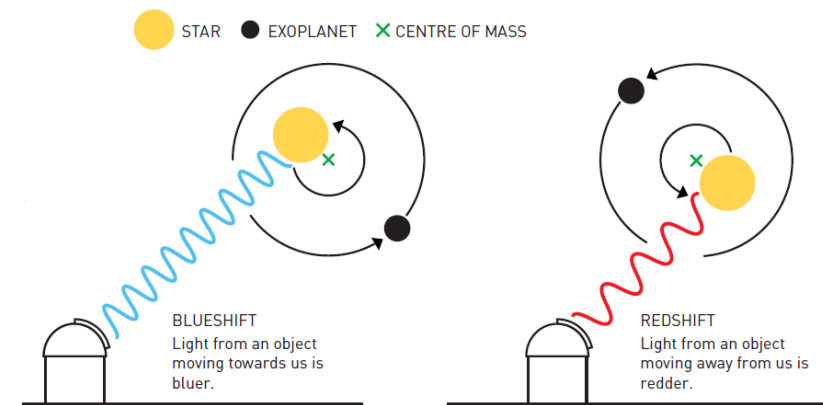
Doppler shift methode – 1

Kwalitatief: geef een voorbeeld uit het dagelijks leven.

Bij sterren: doppler shift van het licht

Hoe zou dat komen?

Ster en planeet wentelen om een gemeenschappelijk **massamiddelpunt**



Hoe vinden we een exoplaneet?

Doppler shift methode – 2

Kwantitatief: radiële snelheid van de ster bepalen

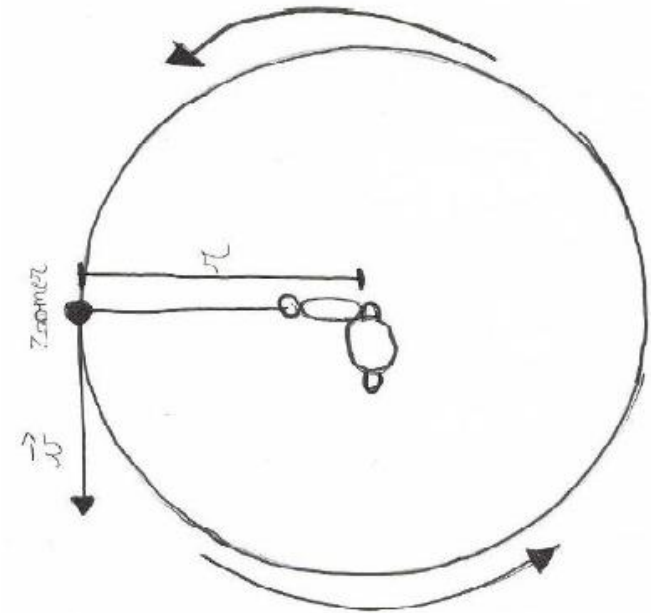
workbench.imuscica.eu

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{v}{c}$$

Uit Doppler

$\Delta\lambda$ = verschil tussen waargenomen
golflengte en golflengte bron

$$f\lambda = c \quad \longrightarrow \quad \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{\Delta f}{f_0}$$



Waarnemer

Hoe vinden we een exoplaneet?

Doppler shift methode – 2

Kwantitatief: radiële snelheid van de ster bepalen

workbench.imuscica.eu

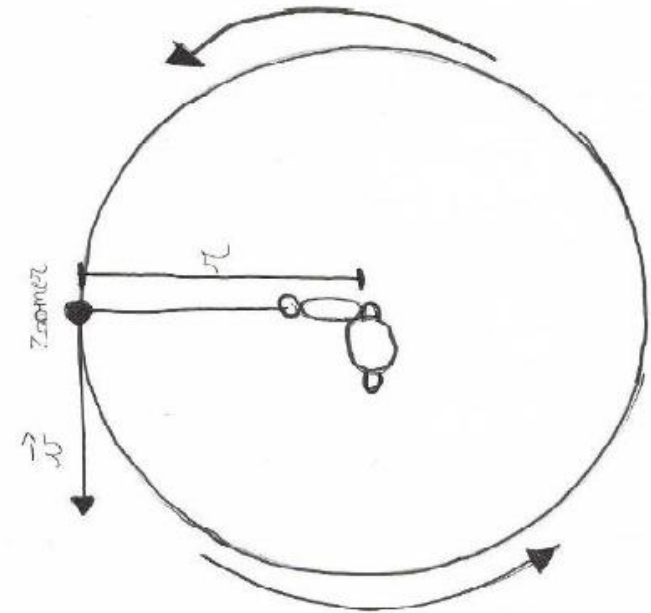
$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{v}{c}$$

Uit Doppler

$\Delta\lambda$ = verschil tussen waargenomen
golflengte en golflengte bron

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{\Delta f}{f_0}$$

➡ $v = ?$



Waarnemer

Hoe vinden we een exoplaneet?

Doppler shift methode – 2

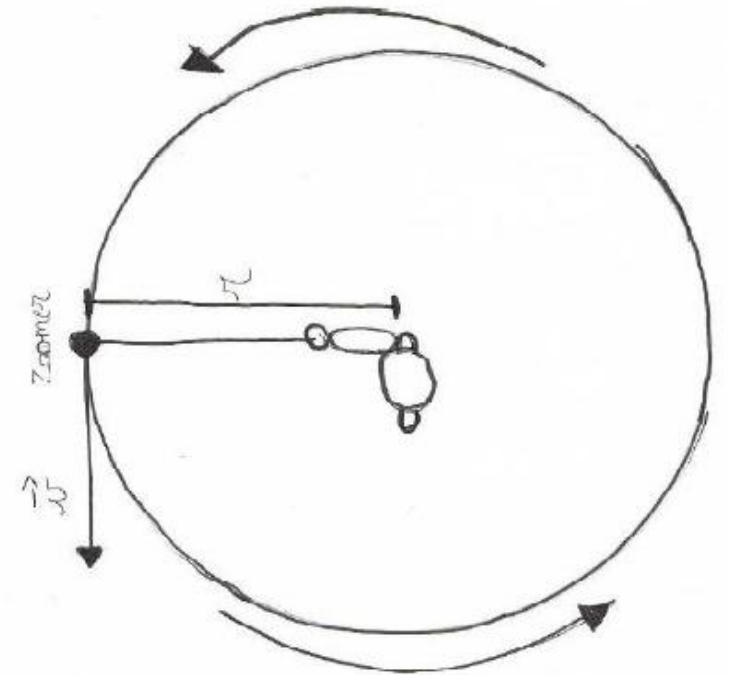
Kwantitatief: controle via mechanica

Eenparige cirkelbeweging

$$v = v_{\text{baan}} = \text{omtrek}/T$$

r meten \rightarrow omtrek

$T \rightarrow$ tijd t meten om 10 omwentelingen te doen $\rightarrow T = t/10$

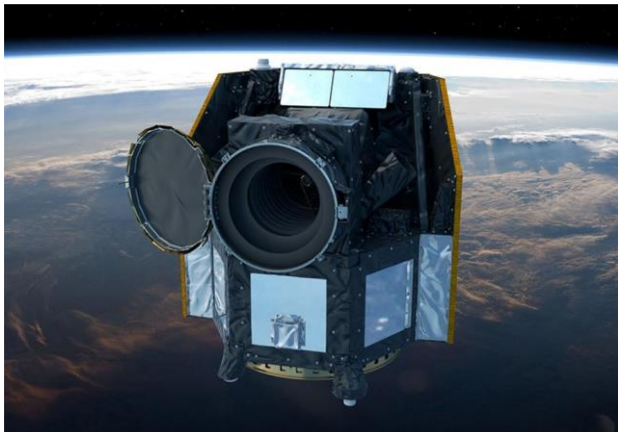


Waarnemer

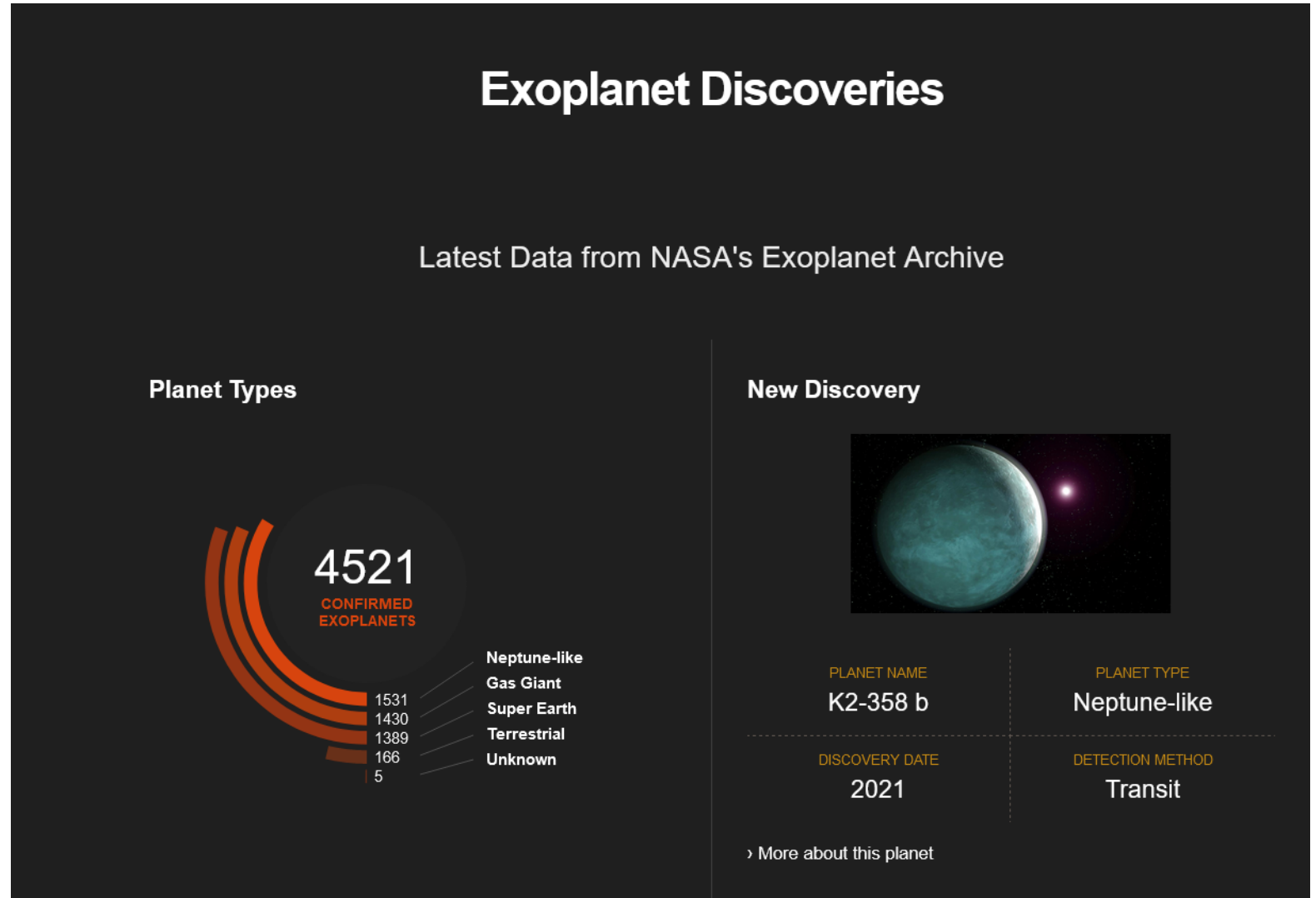
Wat willen we weten over de ontdekte exoplaneten?

<https://exoplanets.nasa.gov/>

CHEOPS (ESA)



Beeld: ESA

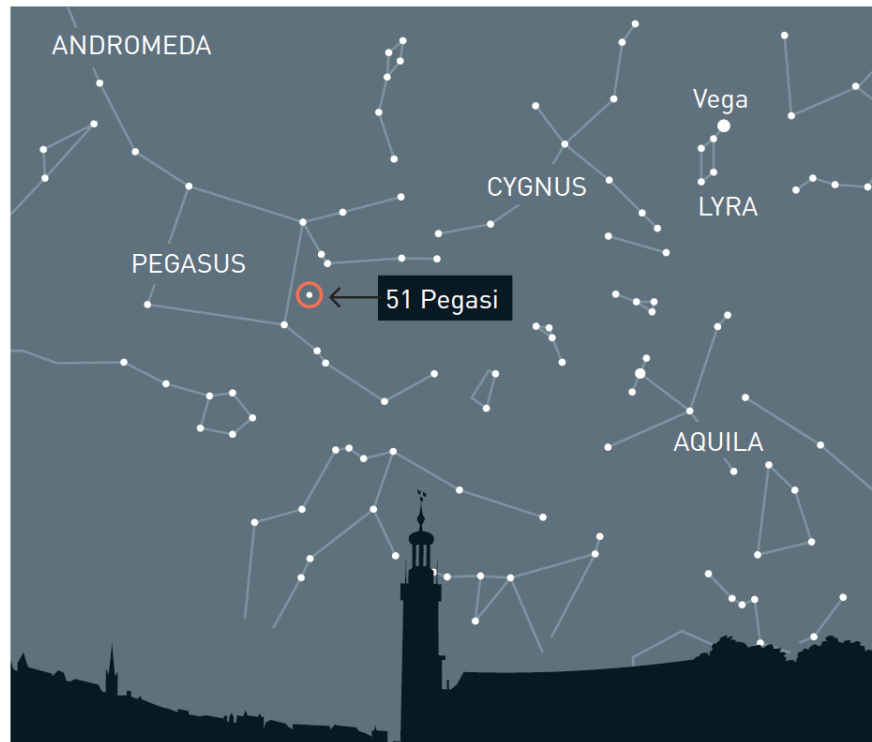


Beeld: NASA

De nobelprijs natuurkunde 2019

2019: Nobelprijs natuurkunde voor het ontdekken van de eerste exoplaneet – **51 Pegasi b** - in 1995

Zoek de ster 51 Pegasi op met stellarium-web (tip: zoek bij het sterrenbeeld Pegasus)



Massadichtheid bepalen van een planeet op 50 lichtjaar...?!
?

-> gasplaneet of aardachtig?

Uitdagende berekening voor geïnteresseerde student

Typische berekeningen en veronderstellingen die sterrenkundigen doen met echte data!

Massadichtheid bepalen van een planeet op 50 lichtjaar...?!

-> gasplaneet of aardachtig?

$$\rho = \frac{m_p}{V} \quad \text{in kg/m}^3$$



Hoe kunnen we dit (het volume) vinden?

Planeet	Massa (kg) . 10 ²⁴	Straal (km)	Volume (km ³) . 10 ¹²	Massadichtheid (kg/m ³) . 10 ³
Aarde	5,972	6 371	1,083	5,51
Jupiter	1898	69 911	1431	1,33
Mars	0,6390	3 389,5	0,1631	3,92
51 Pegasi b	?	135830	?	?

Heeft planeet 51 Pegasi b een vast oppervlak?

Massadichtheid bepalen van de planeet

$$\rho = \frac{m_p}{V}$$

Doppler shift methode

Transit methode

Straal 51 Pegasi b = 135.830 km

Straal Jupiter ~ 70.000 km

Volume bepalen

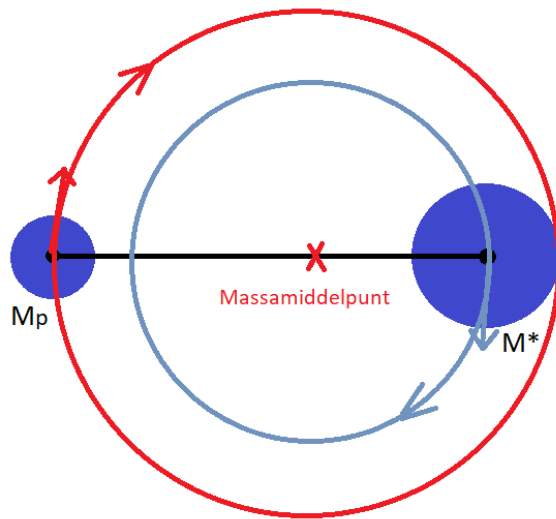
Via Transit methode straal planeet bepalen

Straal 51 Pegasi b = 135830 km

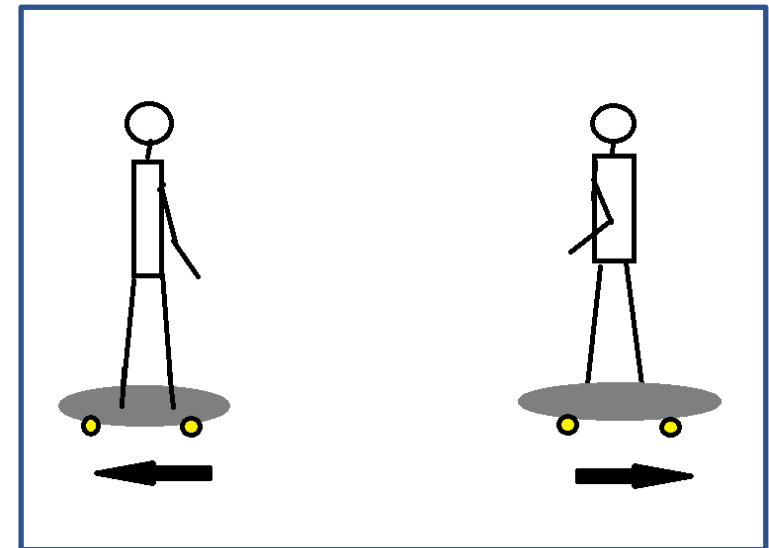
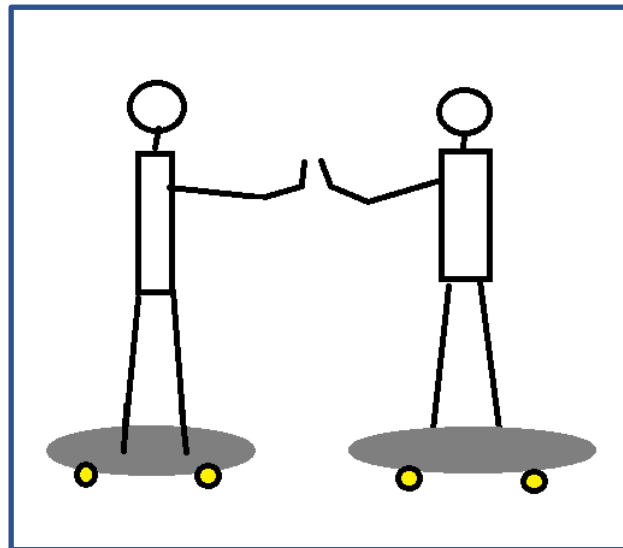
$$V_{\text{bol}} = \frac{4}{3} \pi R_p^3 :$$

De massa van de planeet bepalen? In eenheden M_{sol} M_{\odot}

Behoud van momentum - intuïtief: $M_p v_p + M^* v^* = 0$

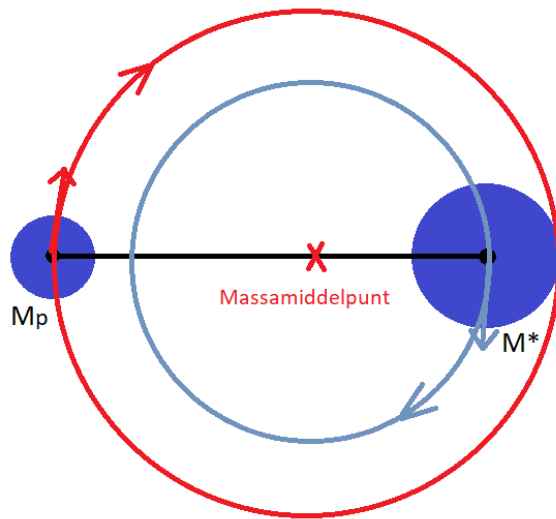


Denk aan het 'ontstaan van dit systeem':
het momentum van het systeem is nul in het systeem van het **massamiddelpunt**



De massa van de planeet bepalen? In eenheden M_{sol} M_{\odot}

Behoud van momentum - intuïtief: $M_p v_p = M^* v^*$



$v_p = 2\pi a / T$ benadering circulaire baan planeet rond ster,
met straal baan = a

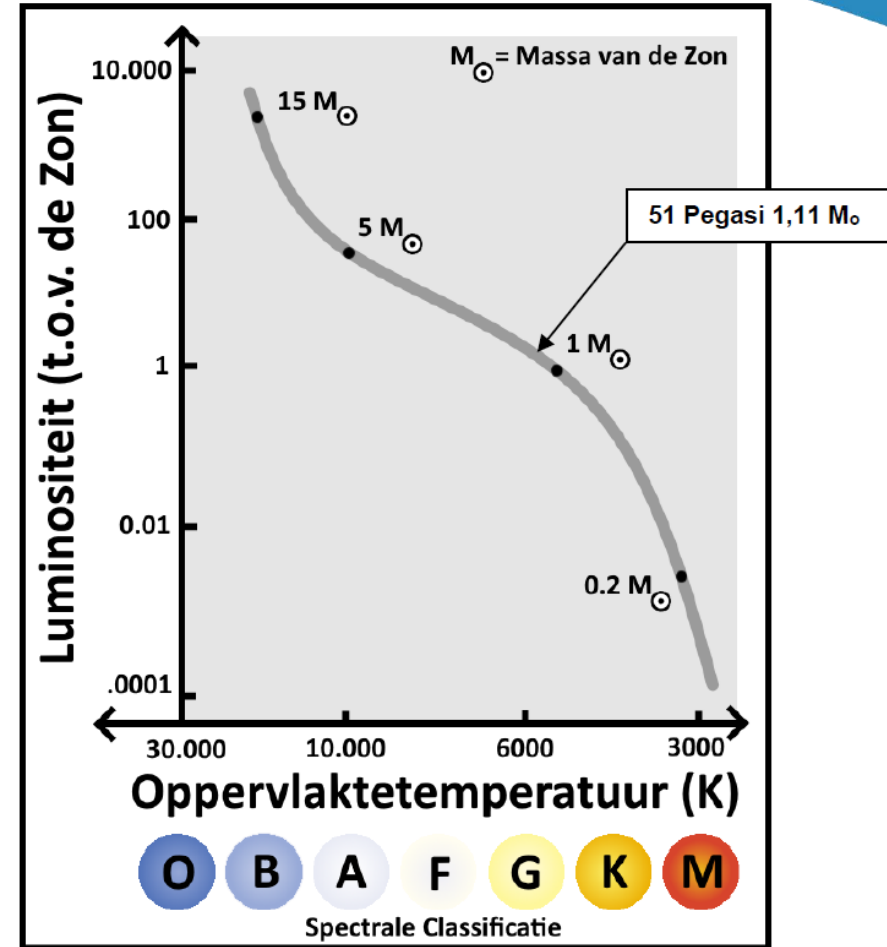
$$M_p = (2,1 \cdot 10^{-4}) \frac{M^* v^* T}{2\pi a}$$

$2,1 \cdot 10^{-4}$ is een conversie factor

Massa ster in M_{\odot}

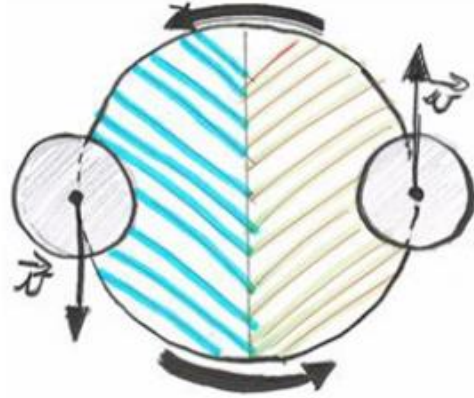
Aan de hand van het HR-diagram

$$M_p = (2,1 \cdot 10^{-4}) \frac{M^* \rho^* T}{2\pi a}$$



Periode T en radiële snelheid ster

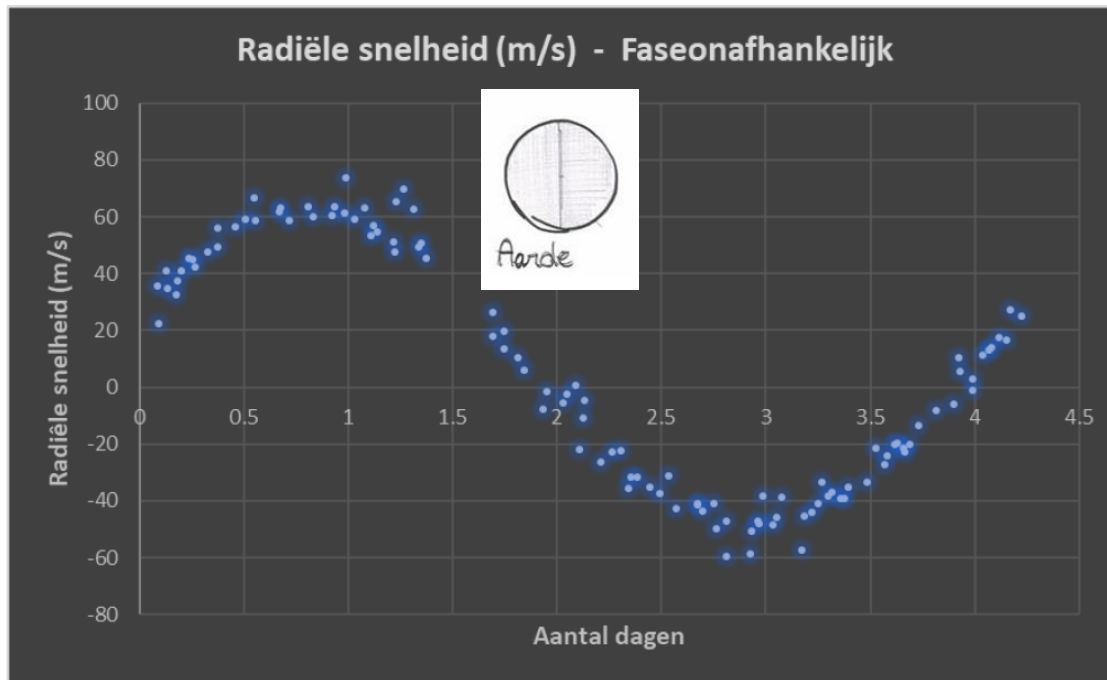
Rotatie ster rond massamiddelpunt



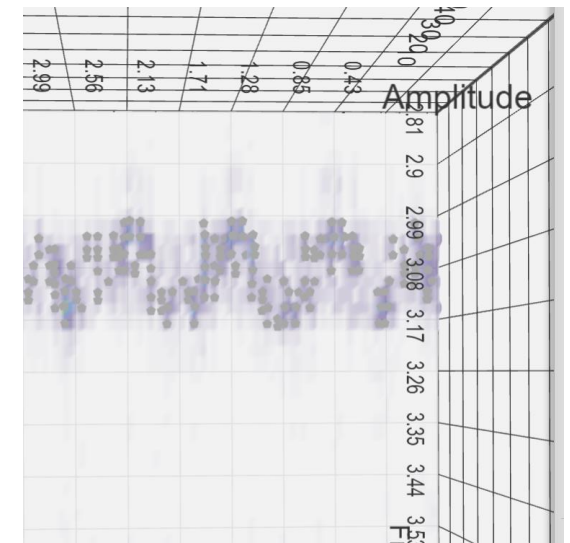
$$M_p = (2,1 \cdot 10^{-4}) \frac{M^* v^* T}{2\pi a}$$

T = omlooptijd periode systeem ster-planeet in jaren
(delen door 365)

Gemiddelde v^* in m/s :
 $(v_{\max} - v_{\min})/2$

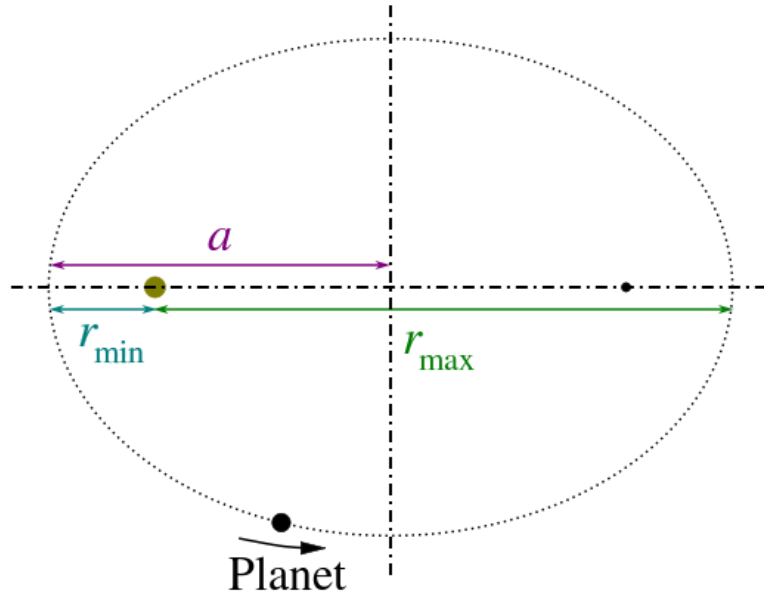


Afbeelding 36: Radiële snelheid Pegasi 51



Echte data!!

Halve grote as a



Afbeelding: Wikipedia

Kepler constante is 1 als

- a in AU
1 AU ~ gemiddelde afstand tussen de Aarde en de Zon ~ 149,6 miljoen kilometer
- T in jaren
- M in M_{\odot}

$$M_p = (2,1 \cdot 10^{-4}) \frac{M^* v^* T}{2\pi a}$$

Derde wet van Kepler

$$T^2 / a^3 = \text{const} = 4\pi^2 / G (M^* + M_p)$$

$$M_p \ll M^*$$

$$T^2 / a^3 = \text{const} = 4\pi^2 / G M^*$$

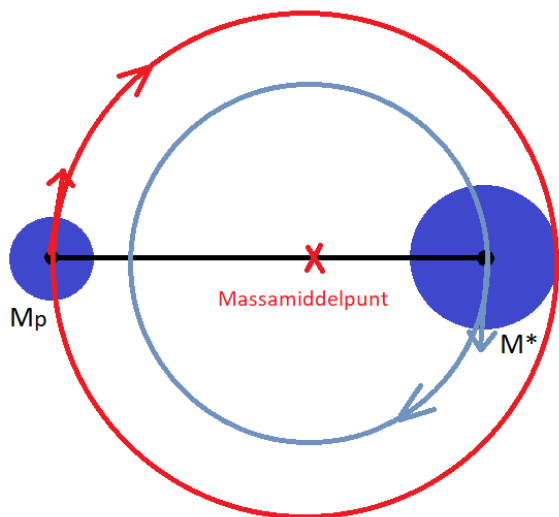
In ons zonnestelsel met juiste eenheden is $4\pi^2 / G = 1$

Derde wet van Kepler - Newton versie:

$$M^* T^2 = a^3$$

$$a = \sqrt[3]{M^* \cdot T^2}$$

De massa bepalen in M_{\odot}



$$M_p = (2,1 \cdot 10^{-4}) \frac{M^* v^* T}{2\pi a}$$

$2,1 \cdot 10^{-4}$ is een conversiefactor om eenheden in orde te brengen

Immers:

- v^* in m/s
- T in jaren
- a in AU

De massa bepalen in M_{Jupiter} en M_{aarde}

$$M_p = (2,1 \cdot 10^{-4}) \frac{M^* v^* T}{2\pi a}$$

M_p in M_{Jupiter} : vermenigvuldigen met 1047 (M_{zon} in M_{Jupiter})

M_p in M_{aarde} : vermenigvuldigen met 318 (M_{Jupiter} in M_{aarde})

Massadichtheid bepalen

-> gasplaneet of aardachtig?

$$\rho = \frac{m_p}{V} \quad \text{in kg/m}^3$$

Planeet	Massa (kg) . 10 ²⁴	Straal (km)	Volume (km ³) . 10 ¹²	Massadichtheid (kg/m ³) . 10 ³
Aarde	5,972	6 371	1,083	5,51
Jupiter	1898	69 911	1431	1,33
Mars	0,6390	3 389,5	0,1631	3,92
51 Pegasi b	? = (0,5 MJ)	135830	?	?

Massadichtheid bepalen

-> gasplaneet of aardachtig?

$$\rho = \frac{m_p}{V} \quad \text{in kg/m}^3$$

Planeet	Massa (kg) . 10 ²⁴	Straal (km)	Volume (km ³) . 10 ¹²	Massadichtheid (kg/m ³) . 10 ³
Aarde	5,972	6 371	1,083	5,51
Jupiter	1898	69 911	1431	1,33
Mars	0,6390	3 389,5	0,1631	3,92
51 Pegasi b	1060,137 = (0,56 MJ)	135830	10500	0,10

Oplossing bepaling dichtheid 51 Pegasi b

1. Massabepaling M_p

$$M_p v_p = M^* v^*$$

$$M_p = \frac{M^* v^* T}{2\pi a}$$



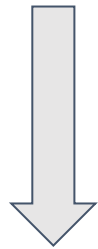
- met M^* , v^* , T aflezen uit HR-diagram en radiële snelheidsgrafiek
- a via 3^{de} wet van Kepler: $a = \sqrt[3]{M^* \cdot T^2} = \sqrt[3]{1,11M_{\odot} \cdot (0,01096 j)^2} = 0,0511 AU$

$$M_p = \frac{1,11 M_{\odot} \cdot 67 \frac{m}{s} \cdot 0,01096 j}{2\pi \cdot 0,0511 AU}$$

Oplossing bepaling dichtheid 51 Pegasi b

1. Massabepaling M_p

$$M_p = \frac{1,11 M_{\odot} \cdot 67 \frac{m}{s} \cdot 0,01096 j}{2\pi \cdot 0,0511 AU}$$



via conversiefactor $\frac{1j}{1 AU} = \frac{365 \cdot 24 \cdot 3600 s}{14957870700 m} = 2,1 \cdot 10^{-4} s/m$

$$M_p = 2,1 \cdot 10^{-4} \frac{1,11 M_{\odot} \cdot 67 \frac{m}{s} \cdot 0,01096}{2\pi \cdot 0,0511}$$

$$M_p = 5,33 \cdot 10^{-4} M_{\odot}$$

Oplossing bepaling dichtheid 51 Pegasi b

1. Massabepaling M_p

$$M_p = 5,33 \cdot 10^{-4} M_{\odot}$$

$$M_p = 0,56 \cdot M_{Jup} \text{ met } M_{\odot} = 1047 M_{Jup}$$

$$M_p = 177,46 \cdot M_{aarde} \text{ met } M_{Jup} = 318 M_{aarde}$$

Oplossing bepaling dichtheid 51 Pegasi b

2. Volume V_p

$$V_p = \frac{4}{3} \pi R_p^3 = \frac{4}{3} \pi \cdot (135830 \text{ km})^3 = 1,05 \cdot 10^{16} \text{ km}^3$$

3. Dichtheid

$$\rho = \frac{m}{V_p} = \frac{5,33 \cdot 10^{-4} M_{\odot}}{1,05 \cdot 10^{16} \text{ km}^3}$$

$$\rho = \frac{5,33 \cdot 10^{-4} \cdot 1,989 \cdot 10^{30} \text{ kg}}{1,05 \cdot 10^{16} \cdot 10^9 \text{ m}^3} = 101 \text{ kg/m}^3$$