



# Exoplaneten

Keuzeopdracht natuurkunde voor 5/6vwo

## Een verdiepende keuzeopdracht over het waarnemen van exoplaneten Voorkennis: gravitatiekracht, cirkelbanen, spectra (afhankelijk van keuze)

### Inleiding

Al rond 1600 zei de Italiaanse monnik Giordano Bruno dat de sterren zonnen zijn met eigen planeetstelsels. Het duurde nog tot 1995 voordat de eerste planeet rond een andere ster dan de Zon werd gevonden. Deze planeet kreeg de naam 51 Pegasi b en verbaasde alle planeetwetenschappers. 51 Pegasi b is half zo zwaar als Jupiter, staat veel dicht bij zijn ster dan Mercurius en heeft een temperatuur van ongeveer 1.000K. Sinds 1995 zijn er al meer dan 500 exoplaneten gevonden. Je vindt hun gegevens op <http://www.exoplanet.eu>.

Hoe vinden sterrenkundigen deze planeten? Hoe weten we hun afstand tot hun ster? En andere eigenschappen? Daarover gaat deze opdracht.

De opdracht bestaat uit verschillende delen, die je niet allemaal hoeft door te werken. Je begint met de oriëntatie over het vinden van exoplaneten. Daarna kun je door met vervolgonderzoek 1 over planeetbanen en/of vervolgonderzoek 2 over wiebelende sterren. Aan het eind van elk deel staan een aantal vervolgvragen waaruit je een keuze kunt maken. Als je niet veel tijd hebt, kun je ook eerder beginnen aan de afrondingsvragen. Je hebt dus veel verschillende mogelijkheden bij deze opdracht!

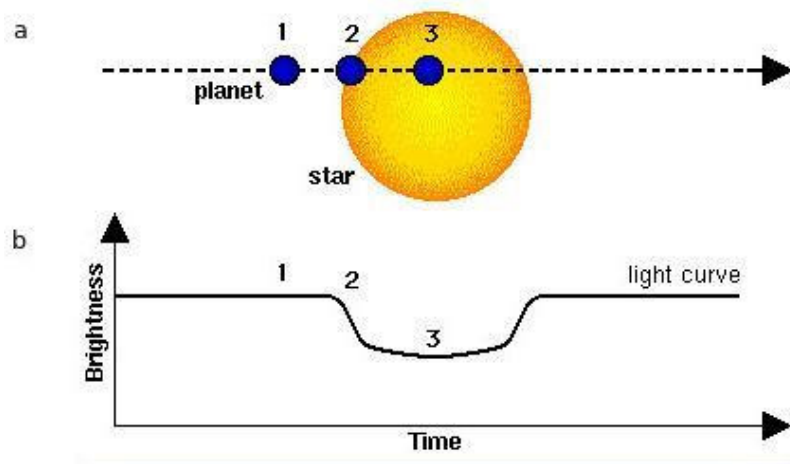
### Oriëntatie: exoplaneten vinden

De planeten en asteroïden in ons eigen zonnestelsel zijn ontdekt doordat men ze aan de hemel kon zien bewegen, met het oog, een telescoop of op een foto. Met exoplaneten werkt dat niet. Sterren geven veel meer licht af dan de planeten die er omheen draaien, makkelijk een factor miljoen tot miljard keer meer, en bovendien staan ze heel dicht bij elkaar aan de hemel. Gelukkig zijn er andere methoden om planeten te ontdekken.

- 
- Venus en Mercurius staan dicht bij de Zon, waarom kunnen we deze planeten wel zien maar planeten bij andere sterren niet.
- 

### De Transit Methode

Als de baan van een exoplaneet en de Aarde in hetzelfde vlak liggen, kun je dit vanaf de Aarde waarnemen. Doordat sterren zo ver weg staan zien we ze op Aarde als punten. Daarom kunnen we een planeet niet zien als een donkere vlek die over de schijf van zijn ster beweegt, zoals bovenaan in figuur 1 is getekend. Wel kunnen we meten dat er tijdelijk minder licht van de ster komt zoals onderaan in figuur 1 staat getekend. Wanneer een planeet voor zijn ster langs schuift noemen we dat een 'planeetovergang' of met een Engels woord 'transit'.



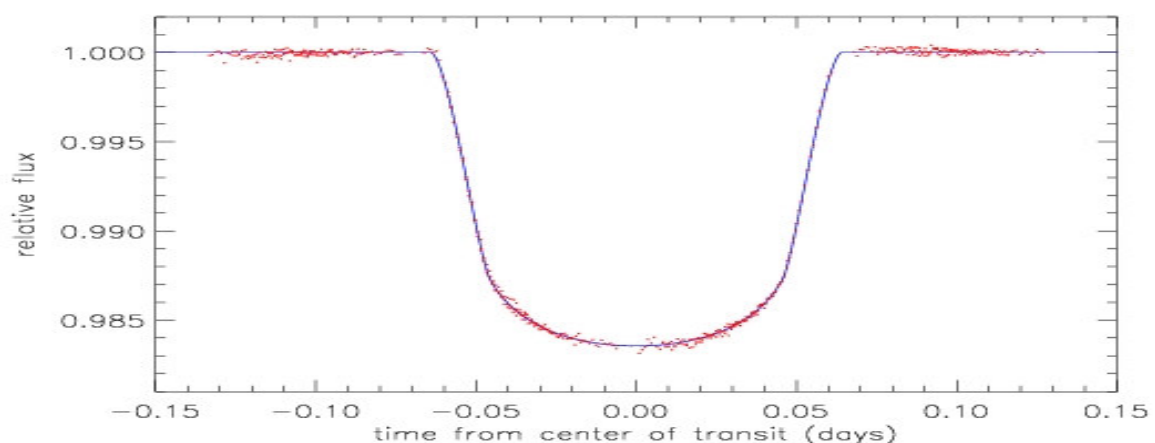
**Figuur 1:** Een planeet beweegt voor zijn ster langs. De planeet zelf kunnen we niet zien, wel kunnen we meten dat er iets minder licht van de ster naar de Aarde komt. In figuur 2 staat een echte waarneming van een overgang bij een andere ster. Bron: <http://www.cornellcollege.edu/physics/courses/phy312/Student-Projects/Extra-Solar-Planets/Extra-Solar-Planets.html>

### Vraag 2. Planeetovergangen

In figuur 1 staat de hoeveelheid licht die van de ster ons bereikt uitgezet tegen de tijd.

Probeer te voorspellen en te schetsen in figuur 1 hoe de vorm van de grafiek verandert als

- De planeet groter is
- De ster groter is
- De planeet sneller beweegt
- De ster meer licht geeft



**Figuur 2:** Metingen van de relatieve flux van de ster HD-209458. Relatieve flux is de gemeten flux op tijdstip  $t$  gedeeld door de maximale flux. De flux is de hoeveelheid energie die per seconde door een vierkante meter gaat. Bron: <http://exoplanet.eu/star.php?st=HD+209458>

### Vraag 3. Een planeet bij de ster HD-209458

- a. Hoe kun je uit het percentage geblokkeerd licht de verhouding tussen de straal van de ster,  $R_s$ , en de straal van de planeet,  $R_p$ , bepalen? In hoeverre is de hoeveelheid licht die van de planeet komt hierbij van belang?

- 
- b. Bepaal aan de hand van figuur 2 de straal van de planeet rond HD-209458. De planeet zelf wordt HD-209458 b genoemd. De straal van HD-209458 is 1,15 keer de straal van de Zon.
- 

### Vervolg vragen

Gebruik een of meer van de vervolgvragen om de transitmethode verder te onderzoeken.

**Tabel 1: Transitgegevens van verschillende exoplaneten. Uit de straal van de ster en de uitdoving kun je de straal van de planeet bepalen.**

Planeet	$R_{ster}(R_{sun})$	$R_{planeet}(R_J)$	Uitdoving (%)
HD-209458 b	1,15		1,52
HAT-P-7 b	1,84		0,63
COROT-4 b	1,15		1,13
WASP-19 b	0,93		2,10
GJ 1214 b	0,21		1,44

### Vraag 4. Vervolg vragen transitmethode

---

- In Tabel 1 vindt je van enkele sterren met exoplaneten de straal van de ster en hoeveel het licht van deze sterren uitgedoofd wordt als de planeet er voor langs schuift. Bepaal hieruit de straal van de planeten. De straal van de ster is telkens gegeven in Zonstralen ( $R_{sun}$ ). Om op eenvoudige getallen uit te komen kun je de straal van de planeten uitdrukken in Jupiterstralen. De waarden van  $R_{sun}$  en  $R_J$  staan in Binas.
- Hoe kun je de transit methode gebruiken om de *periode* van een planeet te bepalen?
- Kun je deze methode voor *alle* exoplaneten gebruiken? Waarom wel/niet?
- Probeer de vorm van de grafiek in figuur 2 te verklaren. Waarom zijn de zijkanten schuin? Waarom is de bodem niet vlak? Wat kun je, behalve de grootte van de planeet, nog meer uit de grafiek bepalen?

De meeste ontdekte exoplaneten zijn grote planeten (half zo groot als Jupiter tot meer dan 10 keer groter) die dicht bij hun ster staan. Deze planeten staan bekend als 'Hete Jupiters' of 'Hot Jupiters' vanwege hun grootte en de hoge temperatuur die ze hebben doordat ze dicht bij hun ster staan.

- Waarom worden vooral dit soort planeten gevonden met de transitmethode?

Je kunt soms ook planeetovergangen in ons eigen zonnestelsel zien, als Mercurius of Venus precies tussen de Aarde en de Zon door beweegt. Dit noemen we dan een Mercuriusovergang of Venusovergang. De volgende Venusovergang zal in 2012 plaatsvinden, en de volgende Mercuriusovergang in 2016.

- Waarom kun je geen planeetovergangen van de andere planeten zien?

Je zou kunnen proberen de straal van Venus te bepalen uit een meting van de hoeveelheid zonlicht voor en tijdens de Venusovergang.

- Hoe nauwkeurig moet je daarvoor de intensiteit van het zonlicht meten? Lijkt je dat haalbaar? Waarom (niet)?
-

## Vervolgonderzoek 1: Planeetbanen bepalen

Met de transitmethode hebben we de grootte van exoplaneten bepaald en hun omlooptijd. Ook interessant om te weten is de straal van de baan van de planeet: hoe dicht staat hij bij zijn zon?

### De 3<sup>de</sup> Wet van Kepler

Johannes Kepler merkte rond 1600 al op dat er een verband bestaat tussen de afstand tussen een planeet en de zon en de omlooptijd of periode van die planeet. Kepler bepaalde dit verband aan de hand van de gegevens die hij had voor de zes toen bekende planeten. Ongeveer een eeuw later gaf Isaac Newton het bewijs voor dit verband.

### Vraag 5. Het verband tussen periode en baanstraal

In tabel 2 staan de zes planeten die Kepler kende. Van elke planeet is ook de omlooptijd rond de zon (de periode) in jaren en de afstand tot de Zon in Astronomische Eenheden (1 Astronomische Eenheid = 1 AU is de afstand tussen de Aarde en de Zon) gegeven.

- Kun je zelf, 'op het oog' of met een beetje puzzelen, het verband tussen de periode en de afstand vinden?

Tabel 2: De zes planeten van Kepler

Planeet	Periode	Afstand
Mercurius	0,24 jaar	0,39 AU
Venus	0,62 jaar	0,72 AU
Aarde	1 jaar	1 AU
Mars	1,88 jaar	1,52 AU
Jupiter	11,9 jaar	5,20 AU
Saturnus	29,5 jaar	9,58 AU

Om het verband tussen periode en afstand te bewijzen gebruikte Newton zijn wet van de zwaartekracht. Hij publiceerde zijn bewijs (en nog veel meer) in drie boeken met de titel *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (Wiskundige principes van de natuurfilosofie).

### Vraag 6. Ophalen van je kennis over zwaartekracht en planeetbanen

Om de volgende opgave te kunnen doen, moet je je kennis van de zwaartekracht en van cirkelbanen gebruiken. Haal die zo nodig op door het hoofdstuk in je lesboek nog eens door te kijken en een opgave te maken.

### Vraag 7. Afleiden van de derde wet van Kepler

- Ga er vanuit dat een planeet in een cirkelbaan rond zijn ster beweegt. Wat geldt er dan voor de krachten die op de planeet werken? Schrijf dit verband uit in de massa van de ster ( $M$ ), de massa van de planeet ( $m$ ), de straal van de baan ( $R$ ), en de omloopsnelheid van de planeet ( $v$ ).
- Gebruik dat de snelheid  $v$  uit te drukken is in  $R$  en de periode  $P$  om  $v$  uit de vergelijking te halen, je houdt alleen  $M$ ,  $R$ ,  $P$  en constanten over. (Sterrenkundigen gebruiken meestal  $P$  voor de periode om verwarring met de temperatuur  $T$  te voorkomen.)

- c. Schrijf het verband dat je bij *b* hebt gevonden om naar een verband tussen *P* en *R*. Deze vergelijking geldt voor *P* in seconden, *R* in meters en *M* in kg. *G* is dan  $6,67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$ . Dit zijn geen handige getallen om mee te rekenen. Daarom schrijven sterrenkundigen meestal *P* in jaren, *R* in astronomische eenheden (AU) en *M* in Zonsmassa's. Om de formule kloppend te krijgen moet gelden  $G = 4\pi^2 \text{ AU}^3 \text{ M}_{\text{sun}}^{-1} \text{ j}^2$ . Kun je laten zien dat dit klopt? Als je deze waarde voor *G* invult in de formule krijg je de 3<sup>de</sup> wet van Kepler.
- d. Klopt de 3<sup>de</sup> wet van Kepler voor de planeten in Tabel 2?
- e. In tabel 3 zie je van enkele planeten hun gemeten omlooptijd en de massa van hun ster. Bepaal hieruit zelf hoever deze planeten van hun ster staan.

**Tabel 3: Uit de omlooptijd van de planeet en de massa van de ster kun je de straal van de baan bepalen. De namen voor de planeten zien er misschien vreemd uit. Dit komt doordat sterrenkundigen planeten systematische namen geven. Deze namen beginnen met een systematische naam van de ster (sterren hebben vaak meerdere 'namen') en een kleine letter. De eerste planeet bij een ster is *b*, de tweede *c* enz. De *a* wordt niet gebruikt voor planeten.**

Planeet	$M_{\text{ster}}(M_{\text{sun}})$	$R(\text{AU})$	$P(\text{Dagen})$	Ontdekking
Aarde	1		365	n.v.t.
51 Pegasi b	1,04		4,23	1995
55 Cancri d	1,03		5218	2002
14 Herculis b	0,9		1773,4	1998
HD 20782 b	1		591,9	2006
Eps Eridani b	0,83		2502	2000
GJ 1214 b	0,157		1,58	2009
HAT-P-7 b	1,47		2,20	2008
Fomalhaut b	2,06		320000	2008

### Vraag 8. Vervolg vraag

Echte planeetbanen zijn nooit perfecte cirkels, maar ellipsen. Welke afstand moet je in dit geval gebruiken om de 3<sup>de</sup> wet van Kepler te laten werken?

## Vervolgonderzoek 2: Wiebelende sterren

De eerste exoplaneet, 51 Pegasi b, werd niet gevonden met de transitmethode, maar doordat zijn ster niet stilstaat maar wiebelt.

### Dopplerverschuiving en radiële snelheid

Sterren zenden licht uit over een groot bereik aan golflengtes. In het spectrum van een ster kun je bij vaste golflengten donkere lijnen vinden, die ontstaan doordat de atomen aan het oppervlak van de ster die golflengte absorberen. Elke atoomsoort heeft zijn eigen specifieke absorptiespectrum waaraan de soort te herkennen is.

Vreemd genoeg zijn bij sommige sterren deze spectraallijnen een klein beetje verschoven. Dit komt door het Dopplereffect, dat je wel kent van geluid: denk maar aan een ambulance die voorbijrijdt. Als een geluidsbron van je af beweegt, klinkt het geluid lager dan als de bron stilstaat. En als de bron naar je toe beweegt, klinkt het geluid hoger. Anders gezegd: komt de bron naar je toe, dan meet je een hogere frequentie (en een lagere golflengte).

Het dopplereffect werkt behalve met geluid ook met andere golven, zoals licht. Dat betekent dat we de verschoven spectraallijnen in een ster kunnen gebruiken als snelheidsmeter.

### Vraag 9. Dopplerverschuiving als snelheidsmeter

Een van de lijnen in het waterstofspectrum zit op 656 nm (de H- $\alpha$  lijn).

- In welke richting beweegt de ster als de H- $\alpha$  lijn wordt gevonden op 640 nm? En bij 670 nm? Hint: Een ambulance die naar je toe rijdt geeft geluid met een .... golflengte, dus een ster die naar de Aarde beweegt geeft licht met een .... golflengte.



Figuur 3: Het spectrum van waterstof in zichtbaar licht. De lijn in het rood is de H- $\alpha$  lijn.

De formule voor Dopplerverschuiving is:  $f_w = f_b \left( \frac{v}{v + v_b} \right)$ .

Hier is  $f_w$  de frequentie die je waarneemt,  $f_b$  de frequentie die de bron uitzendt,  $v$  de snelheid van de golf, en  $v_b$  de snelheid van de bron.

- Bereken hiermee de snelheid van een ster als je de H- $\alpha$  lijn bij 640 nm of 670 nm vindt. Tip: schrijf de formule eerst om naar de waargenomen en uitgezonden golflengten  $\lambda_w$  en  $\lambda_b$ .

Waarom helpt zo'n snelheidsmeting van een ster nu bij het vinden van een exoplaneet? Omdat een ster waar een planeet omheendraait door de zwaartekracht van de planeet ook een klein beetje beweegt. (De derde wet van Newton: actie=-reactie!)

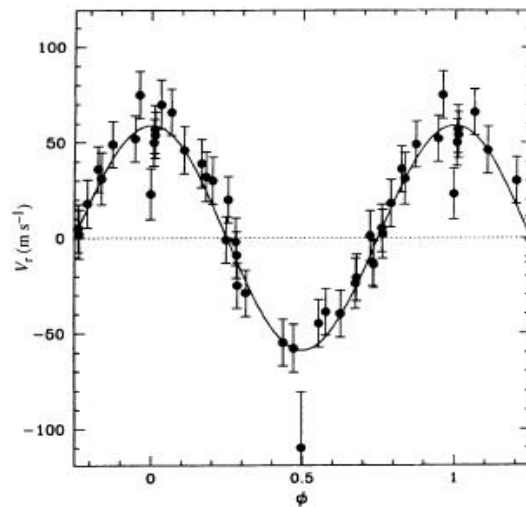
### Vraag 10. Wiebelende ster

- Waarom beweegt de ster maar een klein beetje en de planeet veel meer?
- Hoe ziet de beweging van de ster en planeet samen eruit? Maak bijvoorbeeld een schets van het bovenaanzicht. Teken de zwaartekracht en de snelheden.
- Controleer je antwoord met de volgende twee links die laten zien hoe de banen er van boven en opzij uitzien.

<http://en.wikipedia.org/wiki/File:Dopspec-inline.gif>

<http://en.wikipedia.org/wiki/File:Dopspec-above.gif>

Doordat de ster niet altijd dezelfde kant op beweegt zien we op Aarde een snelheid die de vorm heeft van een sinus,  $v_{\text{waargenomen}} = v_s \sin(2\pi t/P)$ . Hier is  $t$  de tijd. De snelheid waarmee een ster richting de Aarde beweegt wordt de *radiële snelheid* genoemd.



**Figuur 4: De gevonden snelheid van de ster 51 Pegasi als functie van de tijd volgens het artikel waarin de ontdekking van 51 Pegasi b werd aangekondigd. De snelheid is in m/s, de tijd wordt uitgedrukt in de baanfase,  $\phi$ . Bron: Nature 378, 355 - 359 (23 november 1995)**

Aan het wiebelen van een ster kunnen we zien dat die ster (mogelijk) een exoplaneet heeft. Maar er is meer: uit de beweging van de ster kunnen we de massa van de planeet bepalen!

De beweging van de ster is afhankelijk van de massa van de ster,  $M_s$ , de massa van de planeet,  $M_p$ , en de afstand tussen beide. De massa van de ster is meestal al bekend.

- Bij het afleiden van de 3<sup>de</sup> wet van Kepler heb je de kracht van de ster op de planeet gebruikt. De kracht op de ster is even groot. Gebruik dit om een formule voor de massa van de planeet af te leiden als functie van de sterrenmassa en de baansnelheden. Hint: wat is het verband tussen periode, baanstraal en baansnelheid?
- Leg uit hoe je deze formule met de 3<sup>de</sup> wet van Kepler kan combineren om de massa van een planeet te bepalen.
- In tabel 4 zie je van een paar planeten de massa van de ster en de planeet zelf, de baanstraal en de periode. Bereken hieruit zelf de baansnelheid van de planeet en baansnelheid van de ster. De massa van exoplaneten wordt meestal gemeten in Jupitermassa's,  $M_j$ , omdat het moeilijk is kleine planeten te vinden. De waarde van  $M_j$  kun je in Binas vinden.

**Tabel 4: Enkele planeten, de massa van hun ster, hun baanstraal, periode en massa.**

Planeet	$M_{\text{ster}}(M_{\text{sun}})$	R(AU)	P(dagen)	$M_{\text{planeet}}(M_j)$	$v_p(\text{km/s})$	$v_s(\text{m/s})$
51 Pegasi b	1,04		4,23			57,6
55 Cancri d	1,03		5218			42,86
14 Herculis b	0,9		1773,4			83,85
Eps Eridani b	0,83		2502			26,35
GJ 1214 b	0,157		1,58			11,75
HD-209458 b	1,15		3,25			85,83
HAT-P-7 b	1,47		2,20			220,2
COROT-4 b	1,1		9,20			66,7
Aarde	1		365			0,089

### **Vraag 11. Vervolgvragen**

---

- Kun je het gebruik van  $M_J$  begrijpen als je de baansnelheden van de ster ziet? Tip: kijk even terug naar de snelheden die je voor de H- $\alpha$  lijn hebt uitgerekend.
  - Hoe kun je gegevens van de transitmethode en de radiële snelheid combineren om de gemiddelde dichtheid van een exoplaneet te krijgen. Doe dit ook voor de planeten HD-209458 b, HAT-P-7 b en COROT-4 b. Kun je redenen verzinnen waarom je dit zou willen weten? (Hint: wat is bijv. de gemiddelde dichtheid van de Aarde of Jupiter?)
  - Als een planeet niet precies tussen de Aarde en zijn ster door beweegt, hoe verandert dan de massa die je uit de radiële snelheid krijgt?
- 

### **Afsluiting**

Maak als afsluiting van deze opdracht een product waarmee je aan je klasgenoten kunt laten zien wat je geleerd hebt. Gebruik bijvoorbeeld een van onderstaande afrondingsvragen.

### **Vraag 12. Afrondingsvragen**

---

- Kies jouw favoriete exoplaneet en laat zien hoe je zijn eigenschappen hebt bepaald.
  - Kies jouw favoriete exoplaneet en beschrijf zo goed mogelijk hoe het daar is: hoe groot is de planeet, is het gasplaneet of een vaste, wat voor kleur heeft de zon, hoe lang duurt een jaar, hoe warm is het er, etc. Haal je informatie van <http://exoplanet.eu>. Laat ook zo veel mogelijk zien hoe we dat allemaal weten.
  - Zoek de exoplaneet die wat jou betreft het meeste op de aarde lijkt. Haal je informatie van <http://exoplanet.eu>. Leg uit waarom je je keuze hebt gemaakt.
-