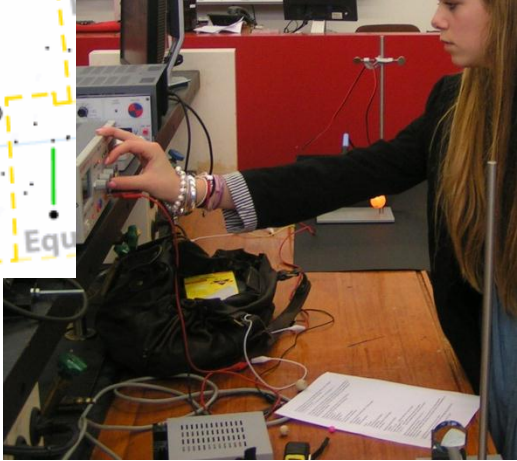
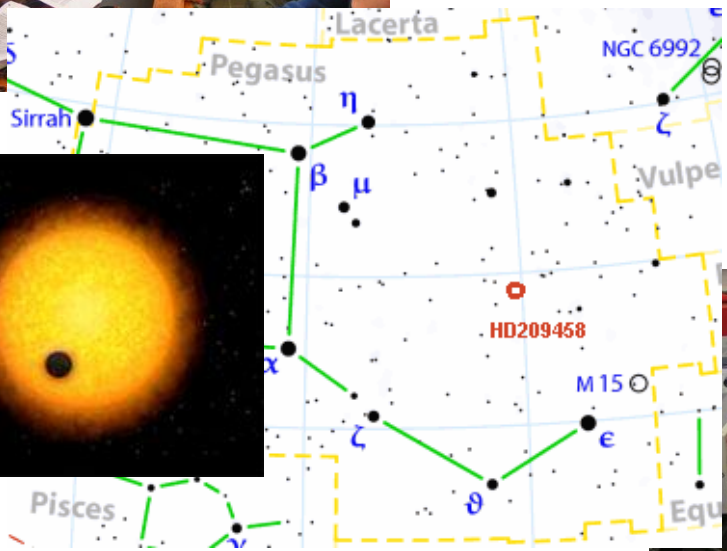
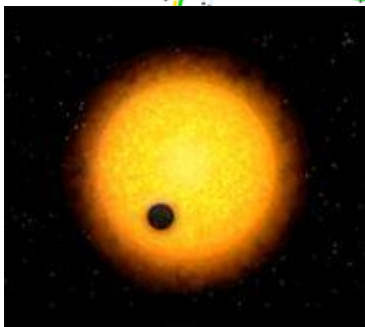
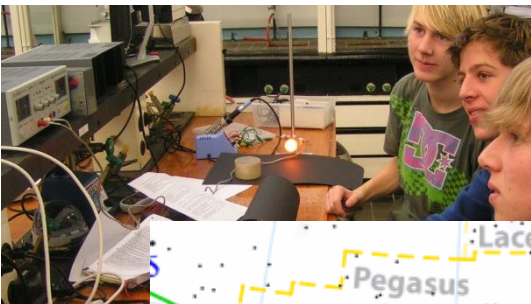


Exoplaneten Ontdekken



Inhoudsopgave

Vooraf	2
Inleiding.....	3
Detectiemethoden	3
Fotografie.....	4
Occultatie (=verduistering)	5
Doppler methode.....	6
radiale snelheid.....	6
Dopplerverschuiving	7
Bepaling van de radiale snelheid van sterren; detectie van planeten.....	8
Bepaling van de baan en massa van de planeet	9
Combinatie van occultatie en radiale snelheid.....	10
De atmosfeer van exoplaneten.....	10
Theoretische opdracht: Onderzoek de planeet HD 209458 b	11
Opdrachten	12
Practicum 1: Meten van een occultatie curve	14
Instellen IPCoach.....	14
Uitlijnen van de opstelling	14
Meetgegevens verzamelen.....	15
Grafiek tekenen.....	15
Extra: Het albedo van de planeet.....	15
Practicum 2: Meten van de radiale snelheid met het dopplereffect.....	16
Richtlijnen voor het verslag	17

Vooraf

Dit is de leerlingenhandleiding voor het practicum Exoplaneten Ontdekken. Het practicum is ontwikkeld voor het Junior Science Lab van de Universiteit Leiden, ter ondersteuning van de sterrenkundige modules voor het vak NLT. Het JSL is er op ingericht een hele klas te ontvangen. Ook kleine groepjes leerlingen kunnen het practicum volgen, bijvoorbeeld als onderdeel van een profielwerkstuk.

In dit practicum ontdekken we hoe exoplaneten ontdekt worden. In Leiden wordt daar veel onderzoek aan gedaan. Je zult zien dat deze ontdekkingstocht met natuurkunde van het VWO goed te begrijpen is.

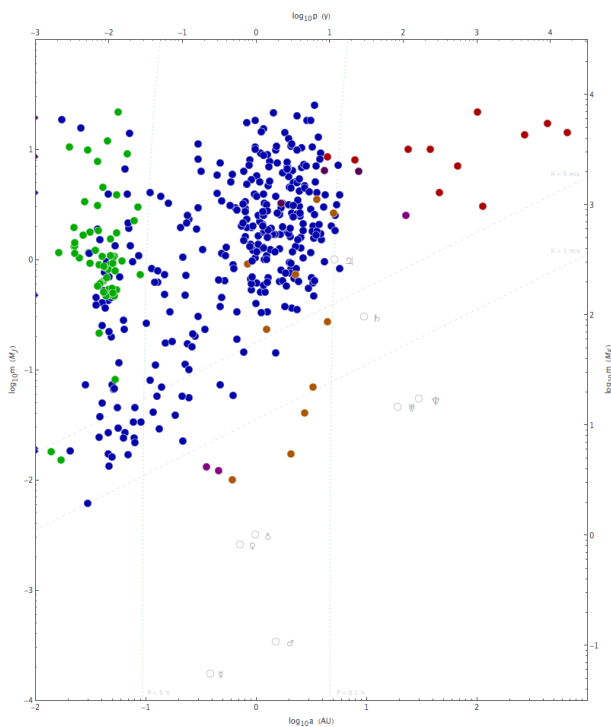
Contact: buisman@physics.leidenuniv.nl

Inleiding

Sinds de ontdekking dat sterren hemellichamen zijn als onze zon en onze zon een ster is zoals miljarden anderen in onze Melkweg hebben mensen zich afgevraagd of er bij andere sterren ook planeten zijn, en of er op deze planeten leven zou kunnen voorkomen. De ontdekking van planeten bij andere sterren, z.g. exoplaneten in de jaren 90 van de vorige eeuw was daarom één van de belangrijkste sterrenkundige ontdekkingen uit de geschiedenis. Dat het zo lang heeft geduurd om exoplaneten te ontdekken heeft alles te maken met de aard van planeten. Planeten zijn veel kleiner dan de sterren waar ze omheen draaien. De aarde is 109 x kleiner dan de zon en de grootste planeet, Jupiter, is 10 x kleiner dan de zon. We zien sterren omdat ze licht uitzenden. Planeten zenden zelf geen licht uit maar zijn alleen zichtbaar doordat ze het licht van de ster reflecteren. Daarbij overstraalt het licht van de ster het licht van de planeet. Hierdoor is het buitengewoon lastig om m.b.v. een telescoop een foto te maken van een exoplaneet. De eerste exoplaneet is dan ook niet met fotografie ontdekt, maar met Doppler spectroscopie, een techniek die astronomen veel gebruiken. Toen de eerste exoplaneten eenmaal ontdekt waren, is er een ware jacht ontstaan door de verandering in lichtsterkte waar te nemen die optreedt als planeten voor de ster langs schieten. In deze module verkennen we deze drie methoden. We zullen zien dat we met de kennis van het VWO aardig wat te weten kunnen komen over het planetenstelsel.

Enige Detectiemethoden

Sinds de eerste ontdekking in 1992 zijn vele exoplaneten ontdekt. Het totaal staat op dit moment (januari 2010) op 422, maar er worden er gemiddeld maandelijks 7 nieuwe ontdekt. Figuur 1 geeft een overzicht van massa en de lange as van de baan van de planeten die tot nu toe zijn ontdekt. De massa is gegeven t.o.v. de massa van de reuzenplaneet Jupiter ($1,8986 \times 10^{27}$ kg), de grootte van de halve lange as van de baan (\sim de gemiddelde afstand tot de ster) is gegeven in astronomische eenheden (AU). Eén AU is de afstand van de aarde tot de zon, $1,50 \times 10^{11}$ m. Je ziet dat de meeste exoplaneten echte kanjers zijn, met een massa groter dan die van Jupiter. Dit komt doordat reuzenplaneten het gemakkelijkst te ontdekken zijn. De kleinste exoplaneet tot dusver heeft een massa die 2 x groter is dan die van de aarde.

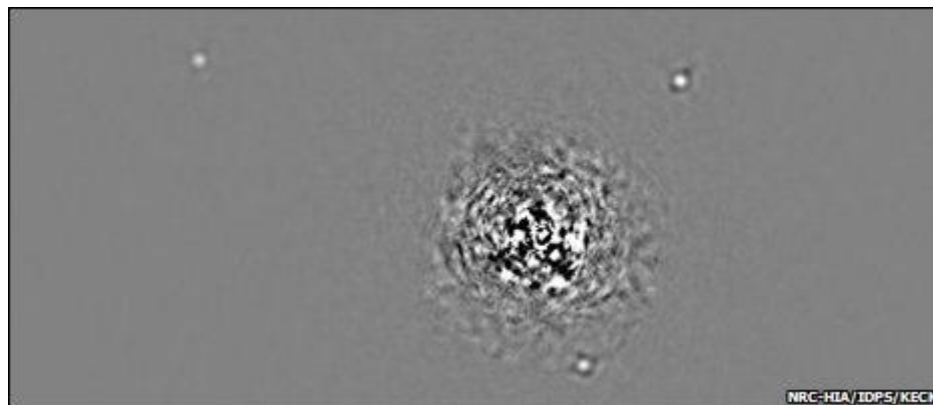


Figuur 1. Diagram van logaritme van de massa (in Jupitermassa's) vs. lange as (in AU, d.w.z. de afstand aarde-zon) voor de tot 28-11-2009 ontdekte exoplaneten. De kleuren corresponderen met de detectiemethode: Blauw = radiale snelheid, groen = occultatie, rood = directe fotografie. Ter vergelijking zijn de planeten van het zonnestelsel aangeduid met grijze cirkels met corresponderende symbolen.

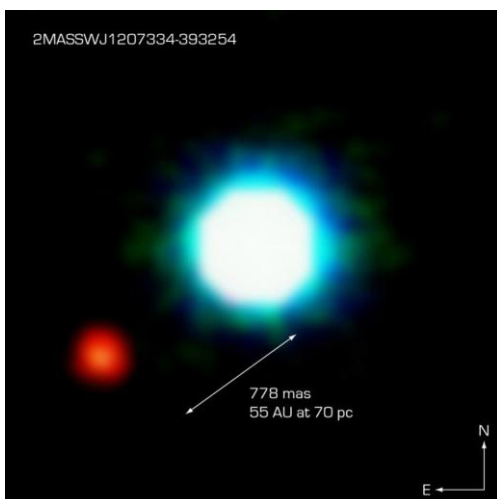
Van de methoden die gebruikt om naar exoplaneten te zoeken bespreken we er drie. Dopplerspectroscopie, occultatie, en directe fotografie. We zullen zien dat deze methoden goed te begrijpen zijn met de natuurkunde van het VWO.

Fotografie

In 2004 is men er voor het eerst in geslaagd om zeer grote exoplaneten te fotograferen. Dat gebeurde met de Very Large Telescope van de European Southern Observatory. Een voorbeeld hiervan zie je hieronder, een afbeelding van de ster HR 8799 met 3 planeten. Elk van deze planeten is ongeveer twee keer groter dan Jupiter.



Figuur 2. De 3 planeten van HR 8799.

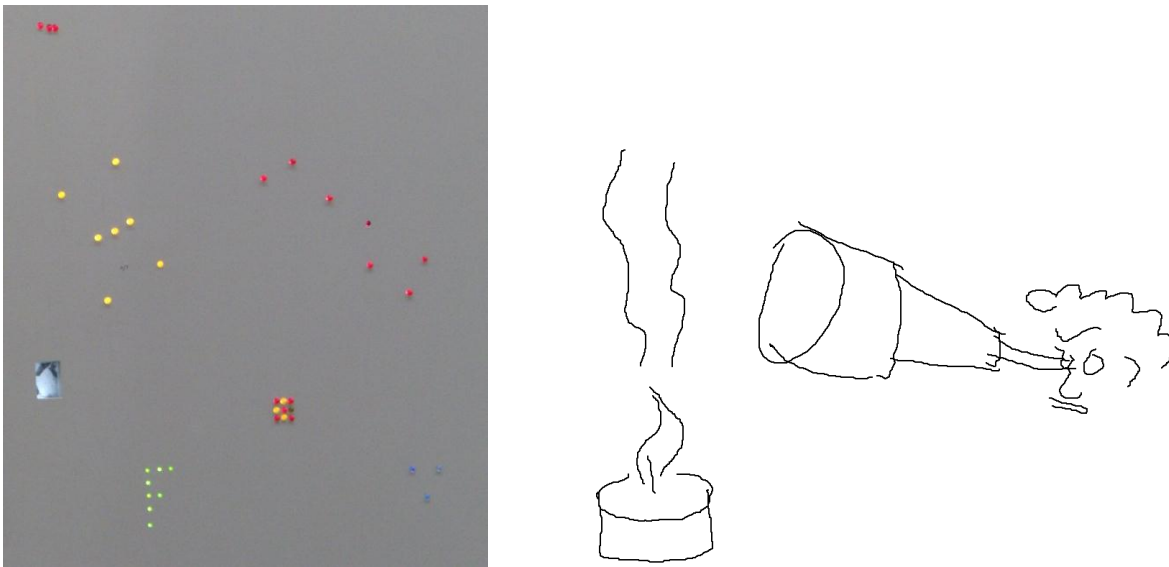


Figuur 2b De eerste gefotografeerde planeet 2M1207 Eso, Naco optica zie tekst

<http://www.eso.org/public/images/eso0515a/>

Er komt heel wat bij kijken om vanaf het aardoppervlak door de atmosfeer een opname als deze te maken. De belangrijkste storende factoren is de turbulentie in de atmosfeer.

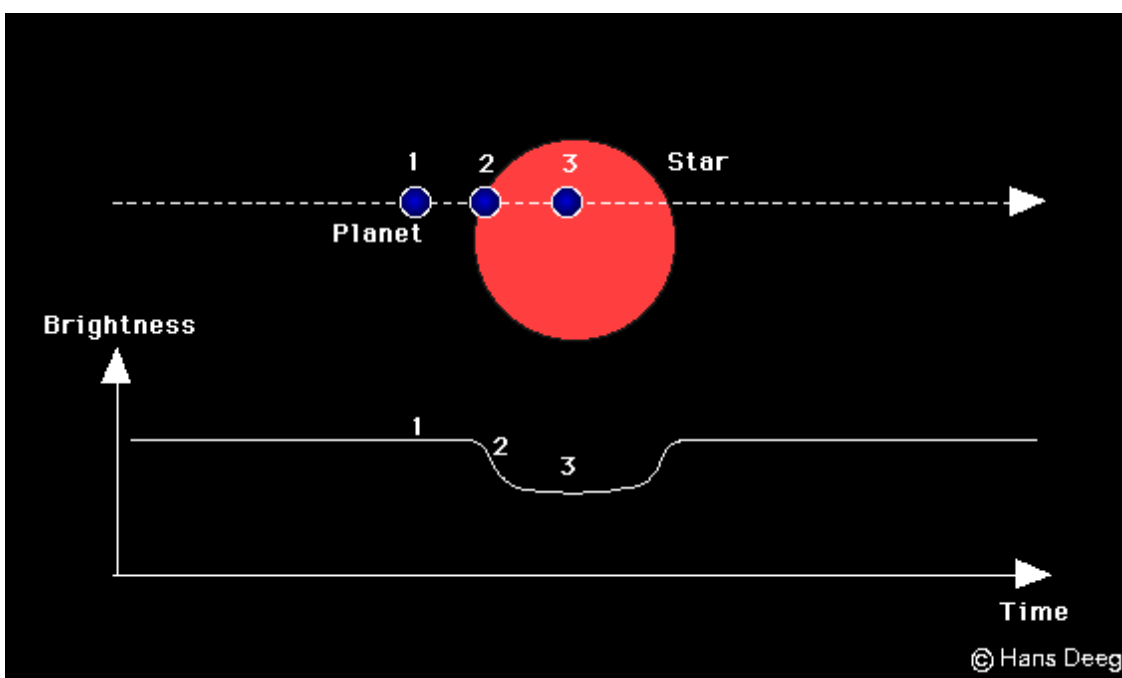
In het JSL staat een opstelling waarmee je de storende invloed van turbulentie duidelijk kunt waarnemen. Op het bord achterin staan wat sterrenbeelden.



Figuur 2c. Turbulentie in de atmosfeer verstoort waarnemingen met een telescoop.

Fotografie is omslachtig, maar geeft een direct bewijs. De meeste exoplaneten zijn op een indirecte manier ontdekt. De twee belangrijkste methoden van indirecte detectie zijn het meten van de regelmatige verandering van de snelheid van de ster t.g.v. de aantrekkingskracht van de planeet (Dopplerspectroscopie) en van de helderheidsafname van de ster als hij gedeeltelijk door een planeet wordt bedekt (occultatie).

Occultatie (=verduistering)



Figuur 3. Schematische weergave van de occultatie van een ster door een planeet.

Figuur 3 laat zien wat er gebeurt met de helderheid van een ster als een planeet voor de ster langs beweegt. Omdat een planeet rond de ster draait, zal de planeet met regelmatige tussenpozen als hij tussen de ster en de aarde instaat een kleine afname in de helderheid van de ster veroorzaken (een occultatie). Met deze methode kun je een aantal eigenschappen van de planeet vaststellen. De afname A van de helderheid (in %) gedurende de occultatie is gelijk aan het percentage van het totale steroppervlak dat door de planeet wordt afgedekt:

$$A = \frac{\pi r_p^2}{\pi r_*^2} \cdot 100\% \quad [a]$$

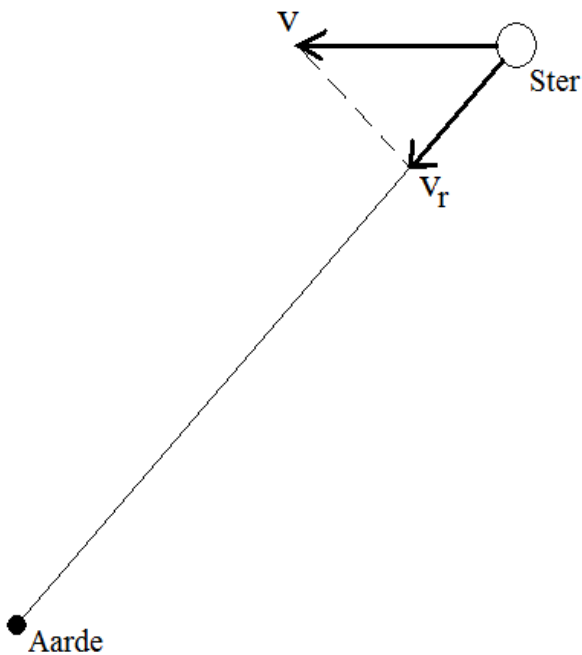
Hierbij is r_p de straal van de planeet en r_* is de straal van de ster. Omdat uit andere waarnemingen de straal van de ster meestal vrij nauwkeurig bekend is, vindt je dan de straal van de planeet. Ten tweede geeft de tijd tussen opeenvolgende occultaties de periode van de baan van de planeet rond de ster. M.b.v. de 3e wet van Kepler kan je daarmee de grootte van de lange as van de planeetbaan uitrekenen.

Een belangrijk nadeel van de occultatiemethode is dat de baan van de planeet en de lijn tussen de ster en de aarde in hetzelfde vlak moet liggen. Hierdoor kan maar ongeveer 0,5 % van alle planeten worden gedetecteerd.

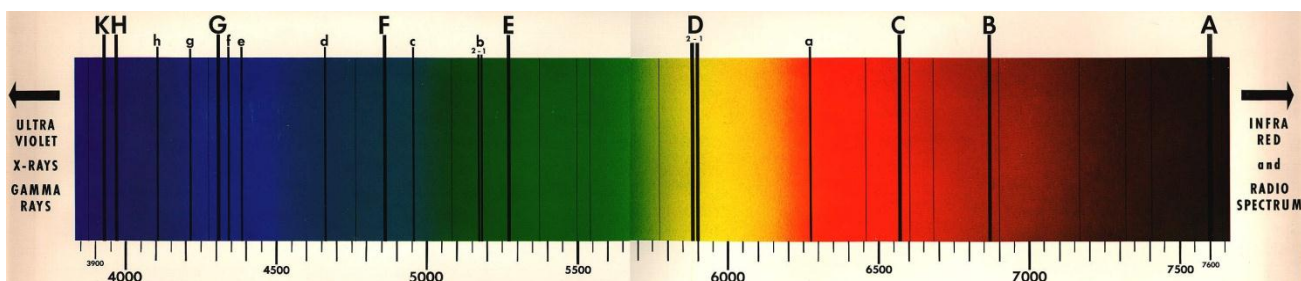
Doppler methode

radiale snelheid

Een planeet draait rond een ster t.g.v. de gravitatiekracht die de ster op de planeet uitoefent. De planeet oefent een even grote aantrekkingskracht uit op de ster. Hierdoor zal de ster ook een omloopbaan beschrijven. Ster en planeet draaien eigenlijk om een gemeenschappelijk zwaartepunt. Figuur 4 toont de situatie met cirkelvormige banen van de planeet en de ster. De banen van planeet en ster hebben een gemeenschappelijk middelpunt M . Tijdens hun beweging blijft M voortdurend op de verbindinglijn tussen het middelpunt van de planeet en het middelpunt m van de ster (zie http://en.wikipedia.org/wiki/Doppler_spectroscopy). De ster en de planeet hebben daarom gelijke omlooptijden. De baansnelheid van de ster gelijk aan v .



Figuur 5. De radiale snelheid v_r is gelijk aan de component van de snelheid van de ster langs de verbindingslijn ster-aarde



Figuur 6. Absorptielijnen in het spectrum van de zon

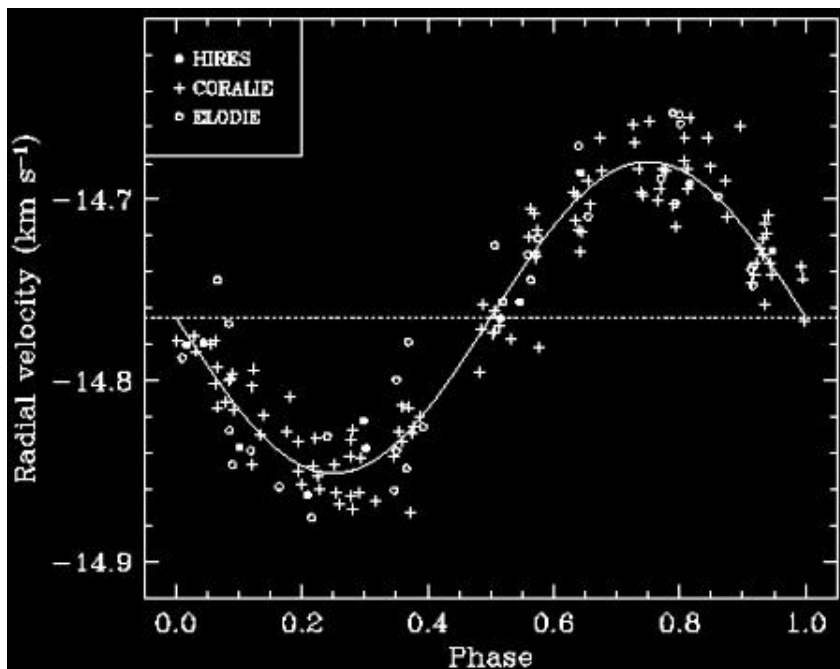
Bepaling van de radiale snelheid van sterren; detectie van planeten

Telescopen zijn meestal uitgerust met spectrometers om de spectra van sterren te kunnen bepalen, b.v. het spectrum van de zon (Figuur 6). Je ziet dat er talloze scherpe lijnen zijn in het spectrum, de z.g. absorptielijnen. Deze worden veroorzaakt doordat de ionen en atomen in de atmosfeer van de zon bepaalde specifieke frequenties van het sterlicht absorberen. De frequentie waarbij verschillende atomen en ionen licht absorberen kan precies worden nagemeten in laboratoria. Als je dus de frequentie van een bepaalde absorptielijn in een sterspectrum meet en deze vergelijkt met de gemeten frequentie in het laboratorium, kan je precies de dopplerverschuiving bepalen. Daaruit volgt via vergelijking b de radiale snelheid van de ster.

Het licht van een ster zal altijd een dopplerverschuiving te zien geven, omdat de sterren niet stil staan t.o.v. de aarde. De radiale snelheden van sterren in planeetsystemen zijn klein, in vergelijking met de snelheden waarmee zij zich bewegen ten opzichte van de aarde. Zij onttrekken zich daardoor aan onze waarneming. Ze vallen echter op doordat zij periodiek zijn De allereerste exoplaneet is op deze wijze ontdekt[ref][ok zo?]. Waar de astronomen naar

zoeken is of een deel van de radiale snelheid periodiek varieert, d.w.z., of er een variatie is die zich steeds herhaalt. Zo'n periodieke verandering wordt dan vaak veroorzaakt door een planeet.

Figuur 7 toont de radiale snelheid als functie van de gereduceerde fase voor de ster HD 209458. De gereduceerde fase is het deel van de omloop dat de ster heeft gemaakt. Hierbij wordt uitgegaan van het beginpunt S (zie figuur 4), die correspondeert met de overgang van een negatieve naar een positieve radiale snelheid. Zoals je ziet heeft deze ster een gemiddelde radiale snelheid van -14,762 km/sec t.o.v. de aarde, d.w.z., hij beweegt naar ons toe. Daarnaast laat de figuur zien dat de radiale snelheid een variabele component heeft met een amplitude van 83 m/s. Deze variatie wordt veroorzaakt door de aanwezigheid van een planeet genaamd HD 209458 b.



Figuur 7. Radiale snelheid van de ster HD 209458 als functie van de gereduceerde fase. De variatie wordt veroorzaakt door de cirkelbeweging die de ster maakt o.i.v. de planeet HD 209458 b.

Bepaling van de baan en massa van de planeet

Bij iedere omloop van de ster herhaalt zich de variatie van de radiale snelheid. De periode van deze variatie is dus gelijk aan de omlooptijd T van de planeet en van de ster en kan uit de metingen worden bepaald. Net zoals bij de occultatie methode kunnen we dan de afstand van de planeet tot de ster (bij een cirkelvormige baan) berekenen met de 3^e wet van Kepler:

$$r^3 = \frac{GM}{4\pi^2} T^2 \quad [c]$$

Hierin is G de gravitatieconstante ($= 6,67428 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$), M_* de massa van de ster en r de afstand tussen de ster en de planeet. Vervolgens kan de baansnelheid van de planeet worden gevonden uit:

$$V_{pl} = \frac{2\pi r}{T} \quad [d]$$

Uit de baansnelheden van de planeet en de ster kan de verhouding van hun massa's worden bepaald. Dit volgt uit de vergelijking voor de middelpuntzoekende kracht voor de baan van de ster of die van de planeet:

$$F_{mpz} = \frac{mv^2}{r} \quad [e]$$

Hierin is r de straal van de baan, v de baansnelheid, m de massa van de planeet of de ster en F_{mpz} de middelpuntzoekende kracht. Deze is natuurlijk gelijk aan de gravitationele aantrekking tussen de planeet en de ster.

Uit [d] en [e] vinden we:

$$F_{mpz} = \frac{2\pi vm}{r} \quad [f]$$

Volgens de 3^e wet van Newton is de kracht waarmee de ster de planeet aantrekt gelijk aan de kracht waarmee de planeet de ster aantrekt, dus is F_{mpz} gelijk voor beide objecten. Verder is ook de omlooptijd T hetzelfde. We zien dus dat het product $v \cdot m$ gelijk is voor beide objecten.

$$V_* \cdot M_* = V_{pl} \cdot M_{pl} [g]$$

Als de baan van de planeet en de verbindingslijn aarde-ster in hetzelfde vlak liggen, zoals in figuur 4, dan is de baansnelheid van de ster V_* gelijk aan de maximale radiale snelheid. Deze kan natuurlijk worden afgelezen uit het (v_r, t) diagram. We kunnen dan de massa van de planeet uitrekenen als de massa van de ster bekend is.

Een nadeel van de radiale snelheid detectie methode is dat de baansnelheid van de ster alleen gelijk is aan de maximaal gemeten radiale snelheid als de baan van de planeet in hetzelfde vlak ligt als de verbindingslijn tussen de ster en de waarnemer (de z.g. gezichtslijn; zie http://en.wikipedia.org/wiki/Doppler_spectroscopy). In het extreme geval dat de baan precies loodrecht staat op de gezichtslijn is de radiale snelheid altijd gelijk aan 0, en is het onmogelijk om planeten te ontdekken met deze methode. In alle tussenliggende gevallen is $0 < V_r < V_*$. In dat geval zal formule [g], wanneer je voor V_* de maximale radiale snelheid invult, een te lage waarde opleveren voor de massa van de planeet.

Combinatie van occultatie en radiale snelheid

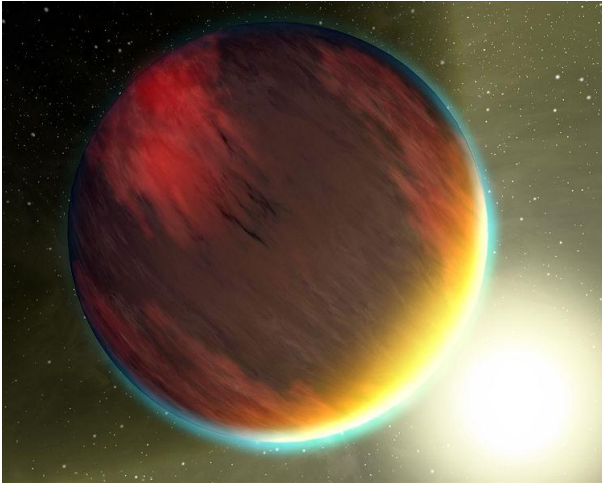
We hebben gezien dat met de occultatiemethode de afstand planeet-ster en de grootte van de planeet kan worden gevonden. De radiale snelheid methode geeft naast de afstand planeet-ster informatie over de massa van de planeet. Nu is er een klein aantal planeten dat zowel door occultatie als d.m.v. de radiale snelheid zijn waargenomen. Van deze planeten kunnen we een aantal extra eigenschappen te weten komen. Ten eerste bewijst het feit dat de planeet periodiek tussen ons en de ster instaat dat de gezichtslijn en de planeetbaan in één vlak liggen. We weten dus dat de maximale radiale snelheid van de ster gelijk is aan de baansnelheid, en kunnen we de massa van de planeet precies bepalen. Bovendien volgt uit de afname van de intensiteit van de ster gedurende de occultatie de grootte van de planeet. Uit deze twee gegevens kan de dichtheid van de planeet worden bepaald.

De atmosfeer van exoplaneten

Zo lang als de planeet voor de ster staat kunnen waarnemingen worden gedaan aan de samenstelling van de atmosfeer van de planeet. Een molecuul, atoom of ion in de planeet atmosfeer zal bij specifieke golflengten de straling die door de ster wordt uitgezonden absorberen. Dit kun je natuurlijk meten met de gevoelige spectroscop. Hierdoor zal de intensiteit van de sterstraling bij deze golflengte worden verzwakt; er ontstaat een zogenaamde absorptielijn in het sterspectrum. Door het spectrum van de ster tijdens de occultatie te vergelijken met het

spectrum van de onbedekte ster kan precies worden vastgesteld bij welke golflengten deze absorptielijnen zich bevinden. Uit golflengte van de absorptielijnen kan worden vastgesteld welk molecuul/atoom/ion zich in de atmosfeer van de planeet bevindt. I.h.a. zullen deze absorptielijnen zich bevinden in het infrarode gedeelte van het spectrum. Op deze manier zijn Na, H, C, O, H₂O, CO₂ en CH₄ ontdekt in de atmosfeer van exoplaneten.

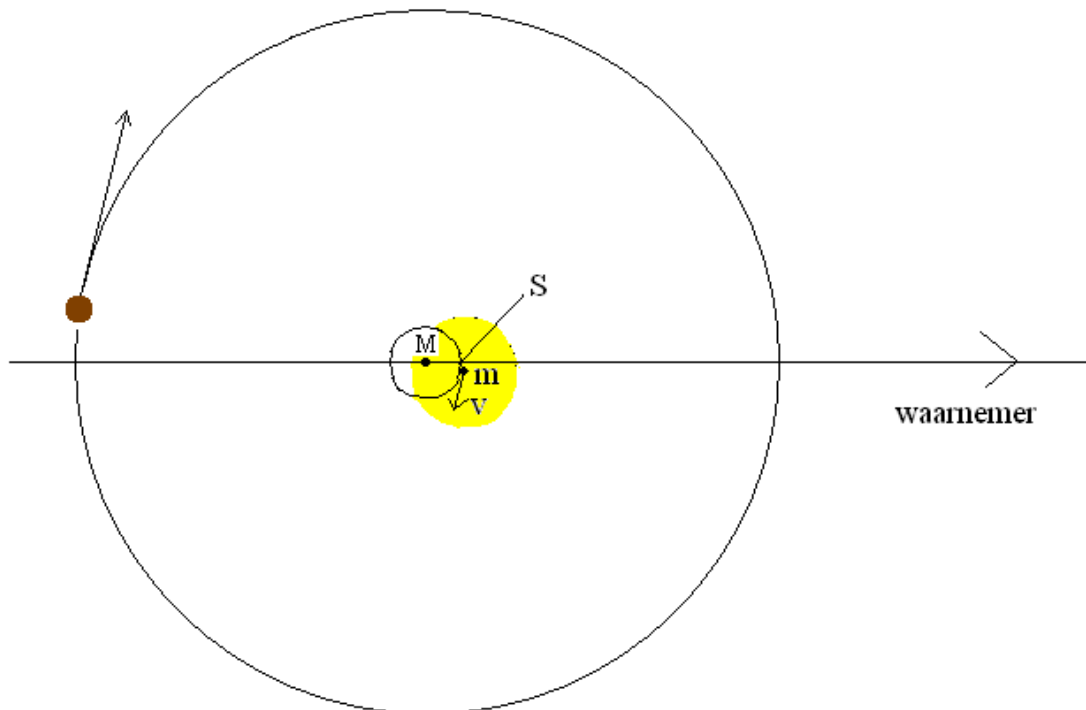
Theoretische opdracht: Onderzoek de planeet HD 209458 b



Figuur 8. Artistieke impressie van HD 209458 b

Misschien wel de best onderzochte exoplaneet is HD 209458 b. Deze planeet draait om de zon-achtige ster HD 209458. Van de aarde af gezien is dit een zwak sterretje in de nabijheid van het sterrenbeeld Pegasus. Omdat de baan van de planeet zich in hetzelfde vlak bevindt als de gezichtslijn kan HD 209458 b zowel door de occultatiemethode en door de radiale snelheid methode worden gedetecteerd. Hierdoor is er over deze planeet veel meer bekend dan voor de meeste exoplaneten.

De massa van de ster HD 209458 is 1,13 maal die van de zon. Zijn straal is 1,14 maal die van de zon. De omlooptijd van HD 209458 b is 3,525 dagen. Gedurende de occultatie vermindert de intensiteit van HD 209458 met 1,7 %.



Figuur 9. Schematische weergave van de bewegingen van de ster HD 209458 en de planeet HD 209458b. De middelpunten van de planeet en van de ster (m) beschrijven een (bij benadering) cirkelvormige baan om een gezamenlijk middelpunt. Hierbij is de baansnelheid van de ster gelijk aan v .

Figuur 7 toont de radiale snelheid van de ster HD 209458 als functie van de gereduceerde fase. De gereduceerde fase toont welk deel van zijn omloop de ster heeft afgelegd op het moment van de meting. Voor het startpunt van de omloop is hierbij het punt S genomen, bij de overgang van een positieve naar een negatieve v_r (Figuur 9).

Opdrachten

Opdracht 1. Bepaal met figuur 7 en de gegevens in de tekst de volgende eigenschappen van HD 209458 b:

- A De afstand planeet – ster
- B De straal
- C De massa
- D De dichtheid

Opdracht 2. Vergelijk de massa, de straal en de dichtheid van HD 209458 b met die van Jupiter. Jupiter is een gasplaneet is die voornamelijk bestaat uit de meest lichte gassen waterstof en helium. Uit theoretische modellen van de vorming van sterren en planeten is het zeer waarschijnlijk dat de samenstelling van HD 209458 b min of meer hetzelfde is. Wat kan je dan concluderen over het gas in HD 209458 b?

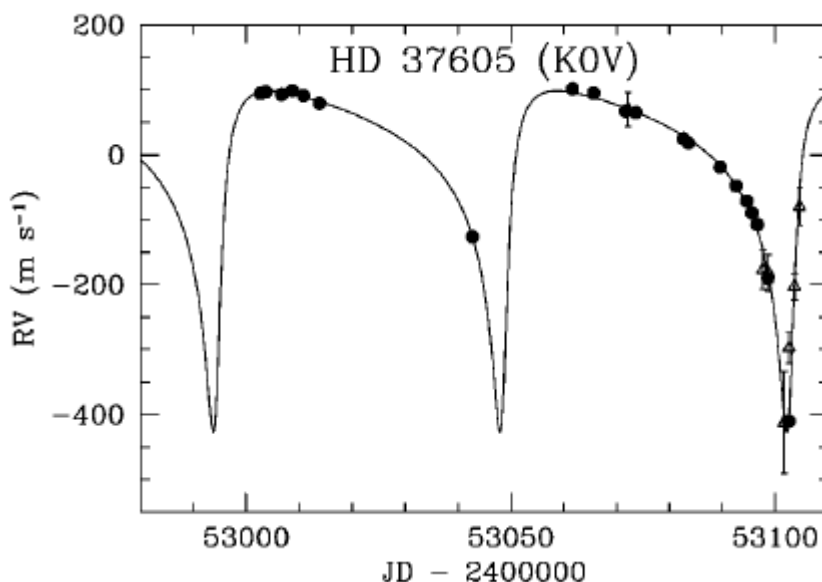
Opdracht 3. Vergelijk de afstand van HD 209458 b tot zijn ster met de afstanden van de planeten Mercurius, Venus, Aarde, Mars en Jupiter tot de zon. Druk de afstanden uit in astronomische eenheden (AU; $1 \text{ AU} = 1,496 \times 10^8 \text{ km}$). Wat is je conclusie?

Opdracht 4. Bedenk hoe de resultaten die je vond bij opdracht 2 en 3 verband met elkaar houden. Neem hierbij in ogenschouw welke invloed de ster zou kunnen hebben op HD 209458 b.

Opdracht 5. Bij het bestuderen van exoplaneten lopen astronomen tegen een aantal opmerkelijke fenomenen aan. Hieronder gaan we een aantal hiervan onder de loep nemen.

De meting van figuur 9a laat de radiale snelheid zien van ster HD 37605. Zoals je ziet vertoont deze een periodieke variatie die veroorzaakt wordt door de aanwezigheid van een planeet. De curve is met dezelfde methode gemeten als die in figuur 7.

A Wat zou hier aan de hand kunnen zijn?



Figuur 9a. De radiale snelheid van HD37605 (Cochran et al. *Astrophysical Journal*, 2004)

Zoals te zien in figuur 1 zijn veel exoplaneten heel anders dan de planeten van ons eigen zonnestelsel. Typisch is hun massa zeer groot, groter dan Jupiter. Bovendien staan ze vergeleken met Jupiter dicht bij de ster, ≤ 3 AU vs. 5 AU voor Jupiter. Voor veel van de reuzenplaneten is de afstand zelfs $< 0,1$ AU!. Dit is zelfs een stuk kleiner dan voor onze binnenste planeet Mercurius (0,39 AU). Deze onverwachte eigenschap leverde de bijnaam “hot Jupiters” op voor deze planeten, want hun temperatuur is vanwege de hitte van de ster meer dan 1000 K. Toch denken astronomen dat de meeste exoplaneten niet zulke extreme eigenschappen hebben, maar dat het feit dat we veel extreme planeten vinden wordt veroorzaakt door de manier waarop we exoplaneten detecteren.

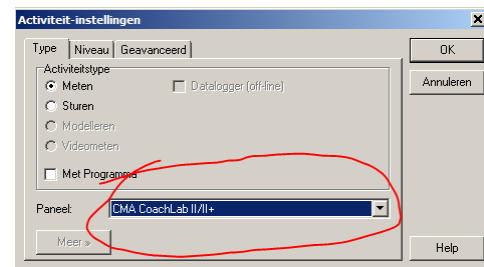
B Leg dit uit.

Practicum 1: Meten van een occultatie curve

We gaan in dit practicum de occultatie van een ster door een planeet simuleren. De opstelling die we daarvoor nodig hebben bestaat uit een gloeilamp in een pingpongballetje (de ster), een setje kralen als planeten, een fotodetector en lens als telescoop om de lichtintensiteit van de ster te meten. Verder is er een pc met bijpassende interface en meetsoftware waarmee we een diagram kunnen maken van de lichtintensiteit vs. de tijd.

Instellen IPCoach

- Start de computer
- Sluit de lichtsensoren aan op het coacheiland
- Start *IPcoach docent* op: wachtwoord 0000 (vier nullen)
- Start een nieuwe activiteit, kies **coach lab II/II+** bij paneel in het scherm Activiteit instellingen
- Rechts-klik op een deelvenster kies plaats een diagram
- Stel de meettijd in op 100 sec, dat werkt makkelijker.

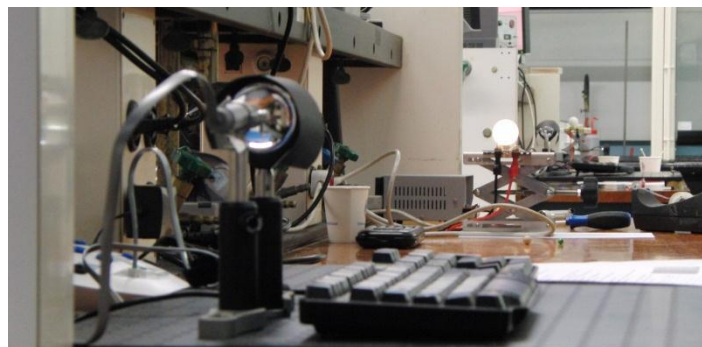


Uitlijnen van de opstelling

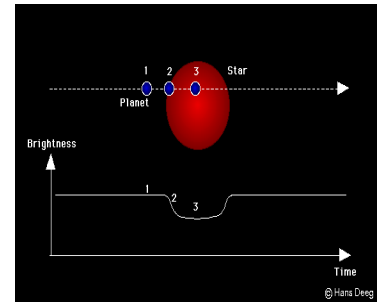
- Plaats de sensor en de lens links op de experimenteertafel en plaats de ster zo ver mogelijk rechts.
- Sluit de ster aan op de voeding (max 6V).
- Beeld de ster af op de sensor.

De sensor geeft maximaal signaal als de sensor in het brandvlak staat. De afstand tussen de voorkant van de sensor en lens moet plm 40 mm zijn.

- Stel de afstand tussen sensor en lens af op een maximaal signaal en verander deze kant van de opstelling daarna niet meer.
- Verplaats de ster in het voorwerpsvlak totdat het signaal maximaal is. De opstelling is nu uitgelijnd.
- Plaats een kapje over de lens, dat vermindert de inval van vals licht aanzienlijk.



Figuur 10a. Overzicht van de opstelling: De "ster" waarvoor zich de "planeet" bevindt, met op de voorgrond (uit focus) de lens die het licht van de ster op de lichtdetector focust



Figuur 10b. Detailopname van fotodetector en lens

Meetgegevens verzamelen

Sterrenkundigen weten de afmetingen van een ster op grond van spectroscopische informatie. Onze ster heeft een diameter van 40 mm.

- Beweeg de planeten voor de ster langs en meet de intensiteitsverandering.
- Leid van deze metingen de diameter af.
- Meet ter controle de diameter van de planeten na met de schuifmaat.

	Intensiteit (verandering)	Opp. berekend uit intensiteit meting	Diameter	Diameter (nagemeten)
	mW/m ²		mm	mm
Zon			40	
P1				
P2				
P3				
P4				

Grafiek tekenen

Start Excel en maak een grafiek van ΔI versus A voor de ster en de planeten

Is de grootte van de planeet te voorspellen uit de occultatie metingen?

Extra: Het albedo van de planeet

Plaats de ster half in beeld. Neem het grootste kraaltje. Je meet nu de intensiteit I als functie van de tijd t terwijl je het kraaltje zo nauwkeurig mogelijk een eenparige cirkelbeweging rond het lampje laat maken. Als je het (I,t) diagram zorgvuldig bekijkt zul je zien dat even voordat de occultatie plaatsvindt de gemeten intensiteit iets toeneemt. Dit komt doordat de "planeet" de straling van "de ster" reflecteert en daardoor de totale lichtintensiteit bij de detector toeneemt. Uit een dergelijke meting kunnen astronomen het z.g. albedo van een planeet bepalen. Het albedo is de fractie van het licht dat op de planeet valt dat door de planeet diffuus wordt gereflecteerd. Een volkomen zwart object zal b.v. een albedo hebben van 0. De aarde heeft een albedo van 0,3, het oppervlak van verse sneeuw van 0,9.

Opdracht: Beschrijf hoe je uit het (I,t) diagram van een ster met een planeet het albedo van de planeet zou kunnen bepalen.

Practicum 2: Meten van de radiale snelheid met het dopplereffect

De opstelling voor het practicum 2 bestaat uit een geluidsbron die aan een arm is bevestigd die kan ronddraaien. Hiermee kan de eenparige cirkelbeweging van een ster waar een planeet omheen draait worden gesimuleerd. I.p.v. elektromagnetische straling werken we bij het practicum met geluid. Omdat de snelheid van het licht ($3,00 \times 10^8$ m/s) zoveel groter is dan de snelheid van het geluid ($3,43 \times 10^2$ m/s) zou je een lichtbron met astronomische snelheden van tientallen km/sec moeten laten bewegen om een waarneembare dopplerverschuiving van de lichtfrequentie te kunnen krijgen. Bij een geluidsbron is een paar m/s al voldoende.

Maak gedurende twee seconden een opname van het geluidsdrukniveau als functie van de tijd als de geluidbron stil staat. Stel vervolgens de draaisnelheid van de arm in op ongeveer 6 m/s, en maak opnieuw een opname. T.g.v. het Doppler effect zal de frequentie van de geluidsbron nu variëren. De relatie tussen de radiale snelheid en de frequentie van het geluid wordt gegeven door:

$$f = \frac{v}{v - v_r} f_0 \quad [\text{h}]$$

Hierbij is v de geluidssnelheid (= 343 m/s bij kamertemperatuur), v_r de radiale snelheid, de snelheidscomponent van de bron langs de verbindingslijn sensor-bron; zie fig. 5, waarbij de ster is de bron en de aarde is de sensor), f is de gemeten frequentie van het geluid, en f_0 is de frequentie van het geluid zoals het door de bron wordt geproduceerd. v_r is positief als de radiale snelheid naar de sensor toe is gericht, en anders negatief.

De dopplerverschuiving zal op 2 momenten van de cirkelbeweging maximaal zijn, namelijk als de bron recht naar ons toe beweegt en recht van ons af beweegt. Op deze 2 momenten is de absolute grootte van de radiale snelheid gelijk

Gebruik het diagram om voor tenminste 10 tijdstippen de geluidsfrequentie te bepalen. Verdeel deze tijdstippen gelijkmatig over 1 periode van de eenparige cirkelbeweging. Dus b.v. als de periode van de cirkelbaan gelijk is aan 1 sec, meet je f voor $t = 0, 0,1, 0,2$ etc. . Laat een gedeelte van het diagram met daarin tenminste 4 oscillaties zien in je verslag en laat aan de hand daarvan zien hoe je de geluidsfrequentie uit het diagram hebt gehaald. Bepaal ook de frequentie voor de stilstaande bron. Gebruik formule h om uit de frequentiemetingen de radiale snelheid te berekenen. Maak een tabel van t , f en v_r voor ieder van de meetpunten. Noteer in deze tabel ook de frequentie van de stilstaande bron. Zet nu v_r uit tegen de tijd. Je zult zien dat het resultaat lijkt op een sinusoïde. Probeer uit het diagram te schatten op welk tijdstip de radiale snelheid maximaal is. Doe voor dat tijdstip nog een extra meting en voeg het resultaat toe aan het diagram.

Vergelijk de gemeten waarde van de baansnelheid met de theoretische waarde. Om deze te vinden moet je de hoeksnelheid van de arm vermenigvuldigen met de lengte van de arm. Check ook of de opgegeven hoeksnelheid overeenkomt met de periode die je haalt uit het (v_r, t) diagram. Verklaar eventuele verschillen die je vindt in de gemeten en theoretische/opgegeven waarden voor de baansnelheid en de periode.

Richtlijnen voor het verslag

Het verslag moet het volgende bevatten:

- De antwoorden op opdrachten 1 – 4 uit sectie 3 met uitleg en berekeningen.
- De resultaten van het practicum meten van een occultatiecurve:
 - De gemeten occultatiecurves
 - Het (I,t) diagram als de planeet een eenparige cirkelbeweging rond de ster uitvoert.
- Bepaling van de grootten van de planeten m.b.v. occultatiecurves met bijbehorende berekeningen, en vergelijking met de werkelijke grootte.
 - Beschrijving van hoe je het albedo van een planeet zou kunnen bepalen
- m.b.v. het (I,t) diagram die gemeten is bij een eenparige cirkelbeweging.
- De resultaten van het practicum meten van de radiale snelheid als functie van de tijd voor een eenparige cirkelbeweging m.b.v. het Doppler effect.
 - Een gedeelte van het diagram van het geluidsdrumniveau als functie van de tijd voor de bewegende bron.
 - Korte discussie over hoe je de frequentie hebt bepaald aan de hand van dit diagram.
 - Tabel van t , f en v_r voor de 11 meetpunten en de frequentie van de stilstaande bron.
 - Diagram van v_r vs. t .
 - Bepaling van de baansnelheid uit het diagram.
 - Vergelijking met de theoretische waarde van de baansnelheid.

Zorg ervoor dat het verslag zinnig is ingedeeld in paragrafen aan de hand van het onderwerp en plaats de figuren en diagrammen zodat ze goed aansluiten bij de tekst. Leg bij iedere bepaling uit wat je doet, inclusief formules en berekeningen. Leg bij ieder diagram uit welke metingen en berekeningen je hebt gedaan om het diagram te maken.