

Voorronde Sterrenkunde Olympiade 2016

10 maart 2016

Leuk dat je meedoet aan de Nederlandse Sterrenkunde Olympiade 2016! Zoals je ongetwijfeld zal weten is dit de voorronde: de 20 beste inzenders zullen worden uitgenodigd voor een tweedaagse masterclass in Leiden. De leerling die de toets aan het einde van de masterclass het beste maakt, krijgt een waarneemreis naar het Canarische Eiland La Palma.

Het is de bedoeling dat je de onderstaande vragen maakt en je antwoorden **voor 1 april 2016** naar dit adres stuurt:

Sterrewacht Leiden, Universiteit Leiden
t.a.v. Merel van 't Hoff, HL 506
Niels Bohrweg 2
2333 CA Leiden

Je mag ook je antwoorden digitaal opsturen naar nesovoorrunde@strw.leidenuniv.nl. Let hierbij op de volgende punten:

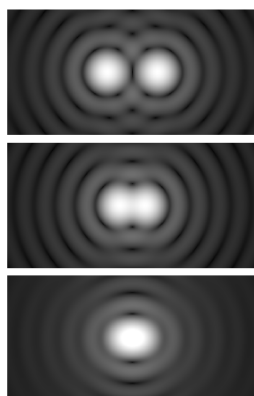
- Maak de opgaven **met een pen** op papier (dus niet digitaal: als je elektronisch wil insturen, scan (dus geen foto's!) dan je antwoorden in). Hierop mag je tekst schrijven, berekeningen doen, diagrammen maken of wat je zelf ook maar nodig acht om de vragen goed te kunnen beantwoorden.
- Schrijf de antwoorden van de open vragen elk op een apart blad.
- Vermeld bij het insturen van de test de volgende persoonlijke gegevens:
 - naam
 - e-mailadres
 - telefoonnummer
- Ook als je niet op alle vragen een (volledig) antwoord hebt gegeven, **stuur toch je uitwerkingen in!** Niet alle vragen zijn even gemakkelijk. Het kan best voorkomen dat er geen enkele deelnemer is die een bepaalde vraag goed heeft. Je hoeft de vragen ook niet op volgorde te maken.
- Bewaar zelf een kopie van je antwoorden, want in april sturen we de uitwerkingen naar alle deelnemers, zodat je zelf kunt kijken hoe je het hebt gedaan.
- Na het opsturen van je antwoorden ontvang je per e-mail een ontvangstbevestiging. Mocht je vijf werkdagen na het opsturen van je antwoorden nog geen bevestiging ontvangen hebben, neem dan contact met ons op via nesovoorrunde@strw.leidenuniv.nl.
- De antwoorden worden nagekeken door een daarvoor aangewezen commissie. Over de uitslag kan niet worden gecorrespondeerd.
- Voor de meerkeuze vragen geldt: er is altijd één antwoord goed. Als je denkt dat er meerdere antwoorden goed zijn, kies dan het meest correcte antwoord.
- Voor sommige opgaven zul je niet alle benodigde informatie voorhanden hebben. Het is dus goed mogelijk dat je een begrip (bijvoorbeeld 'supernova') of een getal (bijvoorbeeld de massa van de Zon) op internet of in een boek wilt opzoeken. Dit mag je dan ook doen waar je dat maar noodzakelijk lijkt. Vermeld bij de **open vragen** welke bronnen je gebruikt hebt.

Heel veel succes!

Vragen

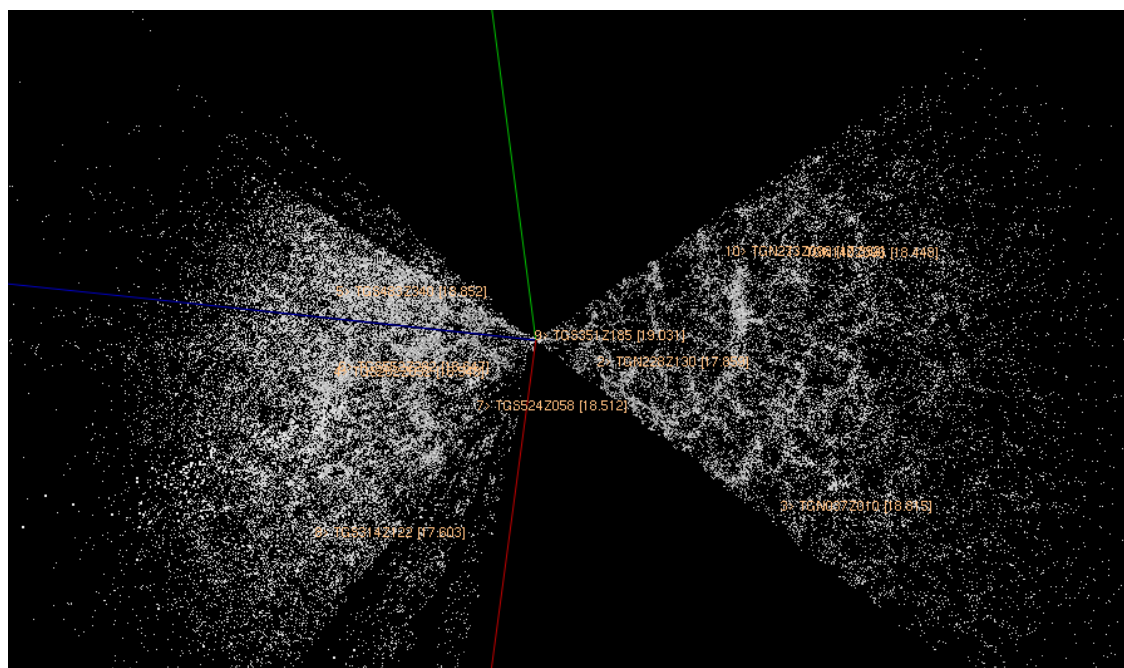
Meerkeuze

1. Als je jarenlang de sterrenhemel zou filmen, dan zie je, als je goed kijkt, dat maar een deel van de lichtbronnen die je waarneemt altijd precies op dezelfde plek staat. Er is een groep lichtbronnen die een cirkelbaan aan de hemel maakt ten opzichte van de bronnen die wel stilstaan. Dit doen deze lichtbronnen met een periode van één jaar. Waardoor komt dit?
 - a De sterren in de Melkweg draaien rond en bewegen daardoor ten opzichte van ons.
 - b Door de beweging van de aarde rond de zon lijken de dichtstbijzijnde sterren te bewegen.
 - c Doordat de aardas gekanteld is zie je de hemel altijd onder een net andere hoek. Hierdoor lijken sterren die dichtbij staan een rondje te draaien.
 - d De sterren en sterrenstelsels buiten de Melkweg bewegen ten opzichte van ons en de sterren in de Melkweg, en beschrijven daardoor een baan aan de hemel.
2. De minimale hoek aan de hemel die twee objecten van elkaar af moeten staan om ze met een telescoop te onderscheiden noemen we de “resolutie” of het “hoek-onderscheidend vermogen” (zie Figuur 1). Dit hoek-onderscheidend vermogen hangt af van de golflengte van het licht (λ) en de grootte van de telescoop (D). In theorie wordt het hoek-onderscheidend vermogen *in radialen* gegeven door $\theta = \frac{\lambda}{D}$. Waarom wordt deze resolutie bij optische telescopen bijna nooit gehaald, maar wordt deze wel gehaald bij radiotelesopen?
 - a Omdat spiegels voor optisch licht niet precies genoeg gemaakt kunnen worden en voor radio telescopen kan dit wel.
 - b Omdat optisch licht afgebogen wordt door stofdeeltjes in de atmosfeer. Radiogolven zijn zo groot dat die geen last hebben van het kleinere stof.
 - c Omdat in de aardatmosfeer warme en koude luchtballen zitten die het optisch licht verstrooien maar de radiogolven niet.
 - d Radio-observaties worden gedaan met veel telescopen tegelijkertijd, dus je kan tekortkomingen van één telescoop opvangen door de andere telescopen.



Figuur 1: Illustratie van het hoek-onderscheidend vermogen. Boven: twee objecten die vergenoeg uit elkaar staan om onderscheiden te worden. Midden: twee objecten die precies even ver uit elkaar staan als het hoek-onderscheidend vermogen van het optisch systeem. Het is hier nog net mogelijk om de punten te onderscheiden. Onder: dezelfde 2 objecten maar nu dichterbij elkaar dan het hoek-onderscheidend vermogen. Het is nu heel moeilijk te zien dat het twee verschillende punten zijn. De ringen rond de punten komen door interactie van het licht met de buiten rand van het optisch systeem.

3. In de levensduur van sterren is de fase waarbij helium wordt gefuseerd veel korter dan de fase waarin waterstof wordt gefuseerd. Wat is de **voornaamste** reden?
 - a Heliumfusie is veel efficiënter dan waterstoffusie, dus gaat veel sneller.
 - b Heliumfusie levert minder energie op dan waterstoffusie, dus helium moet sneller gefuseerd worden.
 - c Er is minder helium tijdens de fase van heliumfusie dan er waterstof was tijdens de periode van waterstoffusie.
 - d In de fase van heliumfusie is de hoeveelheid straling die uitgezonden wordt veel groter dan in de fase van waterstoffusie.
4. Waar komt de meeste energie die een witte dwerg in rust uitzendt vandaan?
 - a Van warmte gevormd in de ster voordat deze een witte dwerg werd.
 - b Van kernfusie van elementen op het oppervlak.
 - c Uit energie die vrijkomt van materiaal dat op het oppervlak valt.
 - d Uit energie die vrijkomt door het ineenkrimpen van de witte dwerg.
5. De zon wordt door de gravitatiekracht in een baan rond het centrum van de Melkweg gehouden. Wat is de bron van het grootste deel van deze gravitatiekracht?
 - a Het zwarte gat in het midden van de Melkweg.
 - b De sterren in het centrum van de Melkweg.
 - c Het gas in de Melkweg.
 - d De donkere materie in de Melkweg.
6. De Hubbleconstante wordt meestal gegeven in eenheden van km/(s Mpc). Wat houdt deze eenheid in?
 - a Versimpelen van de Hubbleconstante geeft een eenheid van 1/s, dus het is de frequentie waarmee “Big Bangs” en “Big Crunches” elkaar opvolgen.
 - b Dat hoe verder een sterrenstelsel van ons afstaat, hoe sneller die van ons weg lijkt te bewegen.
 - c Versimpelen van de Hubbleconstante geeft een eenheid van s, dus het geeft de leeftijd van het heelal.
 - d Dat hoe verder een ster van het centrum van de Melkweg staat, hoe sneller die rond het centrum draait.
7. Zoektochten naar grote hoeveelheden sterrenstelsels worden vaak gedaan in specifieke richtingen (Zie Fig. 2). Waarom doen astronomen dit?
 - a Dat is alleen bij die zoektocht, omdat de telescoop die gebruikt werd niet anders gericht kan worden.
 - b Ze kijken naar gebieden aan de hemel die helemaal leeg lijken te zijn.
 - c Dit is om objecten in het zonnestelsel (asteroïden, kometen) te ontwijken. Het is dus in de richting van de aardpolen.
 - d Dit is om de sterren en het stof in ons eigen sterrenstelsel te ontwijken. Het is dus loodrecht op de schijf van de Melkweg.



Figuur 2: Grafische weergave van de objecten gevonden in de zoektocht 2dFGRS.

8. Een moderne fotocamera maakt altijd kleurenplaatjes, maar astronomische waarnemingen met een telescoop zijn meestal in eerste instantie zwart-wit. Er worden daarna digitaal kleurenplaatjes van gemaakt. Waarom zijn astronomische waarnemingen zwart-wit?
 - a Astronomen kunnen de zeer gevoelige elektronica van kleurenfotocamera's niet gebruiken voor telescopen. De sterren zijn te helder.
 - b Een normale camera maakt snel meerdere foto's achter elkaar in verschillende kleuren. Met sterrenkundige telescopen kan je niet zo snel foto's achter elkaar maken.
 - c Een normale camera heeft pixels die opgedeeld zijn in meerdere subpixels die elke een eigen kleur filteren en opvangen. Bij astronomische waarnemingen zit er maar één filter voor de camera dus er is maar informatie over één kleur.
 - d De meeste objecten in de ruimte hebben geen kleur. De kleur wordt voor de duidelijkheid later digitaal toegevoegd.

9. Waarom draaien alle grote objecten, waaronder de planeten, in ons zonnestelsel rond in hetzelfde vlak?
 - a Dit is niet altijd zo geweest, maar door zwaartekracht-interacties zijn de willekeurige oriëntaties van de objecten in het zonnestelsel samen gekomen tot een schijf.
 - b Alle objecten zijn gevormd uit dezelfde schijf van gas en stof die rond de zon draaide.
 - c De planeten en andere objecten waren eerst allemaal veel verder van de zon verwijderd, maar draaiden er wel langzaam om heen. Door het behoud van hoekmoment zijn ze in een schijf beland toen ze dichterbij de zon kwamen.
 - d Er zit veel donkere materie in een schijf rond de zon en hier binnen worden de planeten en andere objecten vastgehouden.

10. Veel instrumenten voor het waarnemen van licht in het infrarood en submillimeter gedeelte van het spectrum worden afgekoeld tot temperaturen van 4 K (-269 C). Waarom wordt dit gedaan?
- a Bij temperaturen van 4 K is supergeleiding mogelijk en dat scheelt op het energieverbruik.
 - b Bij hogere temperaturen worden infrarood- en millimetergolven niet opgevangen: het gaat hier om warmtestraling en warmte kan niet van iets kouds naar iets warmes gaan.
 - c Er wordt vloeibaar helium gebruikt om de straling op te vangen, en helium wordt pas vloeibaar bij die lage temperaturen.
 - d In infrarood- en millimeter-golflengten wordt veel warmtestraling uitgezonden door de instrumenten zelf. Dit maakt het moeilijk om straling van de objecten uit de ruimte te onderscheiden.
11. Wat is het verschil tussen een Jupiter-achtige planeet en een bruine dwerg?
- a Een Jupiter-achtige planeet wordt gevormd bij een ster, een bruine dwerg wordt los gevormd.
 - b Bruine dwergen zijn zwaar genoeg om al hun deuterium te hebben gefuseerd tot helium, Jupiter-achtige planeten niet.
 - c Een Jupiter-achtige planeet is altijd één van meerdere planeten/objecten die om een ster draaien, een bruine dwerg is altijd het enige object dat rond een ster draait.
 - d Een bruine dwerg heeft waterstof gefuseerd, een Jupiter-achtige planeet niet.
12. Veel grote telescopen hebben tegenwoordig *adaptieve optiek*, dat wil zeggen dat één van de spiegels in de telescoop vervormbaar is. Wat is het voornaamste doel van adaptieve optiek?
- a Tegengaan van vervorming van de grote spiegel door de zwaartekracht.
 - b Compensatie van trillingen in en buiten het gebouw (mensen die lopen, auto's, vrachtwagens).
 - c Tegengaan van vervorming van de spiegel door wind.
 - d Tegengaan van vervorming van de waargenomen beelden door de atmosfeer.
13. Wat is het verschil tussen een hoofdreeksster en een reuzester?
- a Een reuzester is altijd massiever dan een hoofdreeksster.
 - b Een reuzester fuseert nog waterstof terwijl een hoofdreeksster dat niet doet.
 - c Een reuzester is altijd ouder dan een hoofdreeksster.
 - d Een hoofdreeksster fuseert in zijn kern waterstof terwijl een reuzester waterstof buiten de kern fuseert.

14. In de kern van sterren iets zwaarder dan de zon vinden reacties plaats die sterrenkundigen de CNO-cyclus noemen. Welk element wordt hier opgebrand, en wat is het eind product/zijn de eindproducten?
- a Helium tot koolstof, stikstof en zuurstof.
 - b Waterstof tot koolstof, stikstof en zuurstof.
 - c Waterstof tot helium.
 - d Koolstof tot stikstof en zuurstof.
15. Waarom zijn sterrenstelsel die heel ver weg staan (meer dan een miljard lichtjaar) roder dan sterrenstelsels in de lokale groep? (De lokale groep is de groep met sterrenstelsels waar de Melkweg en de Andromedanevel toe behoren.)
- a Sterrenstelsels die verder weg staan hebben oudere sterren en die zijn roder.
 - b Hoe verder je kijkt, door hoe meer stof je moet kijken. Stof neemt meer blauw dan rood licht op, dus de stelsels lijken roder.
 - c De stelsels die verder weg staan bewegen snel van ons af en zijn dus rood verschoven door het Dopplereffect.
 - d Van de fotonen die van het verre stelsel naar ons toe bewegen wordt de golflengte opgerekt door de expansie van het heelal, dus worden de fotonen roder.
16. Elliptische sterrenstelsels zijn veel roder dan bijvoorbeeld ons eigen Melkwegstelsel. Wat is hiervoor de voornaamste reden?
- a Elliptische stelsels bevatten veel stof die het sterlicht roder laat lijken.
 - b Elliptische stelsels zijn zwaarder dan andere stelsels, dus hebben ze een sterker zwaartekrachtsveld en dus is de gravitationele roodverschuiving groter.
 - c Elliptische stelsels vormen geen nieuwe sterren meer en dus zijn alle massieve blauwe sterren opgebrand.
 - d Elliptische stelsels staan verder weg en lijken daarom roder.
17. Waarom kunnen we geen licht zien dat ouder is dan de kosmische achtergrondstraling (Cosmic Microwave Background, CMB)?
- a De CMB is het directe licht van de oerknal en is dus zo oud als het universum. Er is dus niets ouder.
 - b Voordat de CMB werd uitgezonden was er zo veel stof in het heelal dat je er niet door heen kon kijken.
 - c Voordat de CMB werd uitgezonden waren er zo veel vrije elektronen dat de fotonen niet vrij konden bewegen.
 - d De CMB zijn de eerste fotonen die gegenereerd werden. Voordat de CMB werd gegenereerd was er nog geen energie in de vorm van licht.

18. Zowel de Aarde als Venus hebben een dikke atmosfeer met een sterk broeikaseffect. Mars heeft alleen een zeer dunne atmosfeer en dus ook geen broeikaseffect. Waarom heeft Mars een zo veel dunnere atmosfeer dan de Aarde en Venus?
- a Mars was niet massief genoeg om een atmosfeer in te vangen bij de vorming.
 - b Mars is in de afgelopen 50 miljoen jaar betrokken geraakt in een grote botsing waarbij al het gas de ruimte in geslingerd werd.
 - c Mars heeft nooit vulkanisme gehad om gas vrij te maken uit de rotsen waar een atmosfeer mee gemaakt kon worden.
 - d Mars heeft geen magnetisch veld meer waardoor de zonnwind al het gas weg kon blazen.
19. Tegenwoordig worden veel telescopen op het zuidelijk halfrond gebouwd. Waarom wordt dit gedaan?
- a Het is goedkoper om op het zuidelijk halfrond te bouwen.
 - b Er zijn op het noordelijk halfrond geen geschikte plekken meer om een telescoop te bouwen.
 - c Het gedeelte van de hemel dat te zien is vanaf het noordelijk halfrond is al volledig in kaart gebracht. Sterrenkundigen kunnen er dus niets meer leren.
 - d Het grootste deel van de Melkweg is niet te zien vanaf het noordelijk halfrond.
20. Veel nieuwe telescopen staan dicht bij de evenaar. Waarom?
- a Op de evenaar kan, door het jaar heen, het grootste deel van de hemel gezien worden.
 - b Rond de evenaar zijn de hoogste bergen.
 - c Astronomen willen graag waarnemen ergens waar het warm is.
 - d Op de evenaar zijn de meeste nachtelijke uren.
21. Welk hemellichaam is niet waar te nemen om 11 uur 's avonds in de nacht van 2 op 3 juni tijdens de finale van de Sterrenkunde Olympiade 2016?
- a De Maan.
 - b Mars.
 - c Jupiter.
 - d Saturnus.
22. Sterrenkundigen gebruiken de “magnitude” om aan te geven hoe helder een ster is. De magnitude van een ster wordt gegeven door $m = -2,5 \times \log_{10} \left(\frac{F}{F_0} \right)$, met m de schijnbare magnitude van de ster (hoe helder de ster lijkt vanaf de aarde), F , de flux van de ster gemeten op aarde in op een bepaalde golflengte en F_0 de calibratieflux van die golflengte. Een ster met een schijnbare magnitude van 9 staat op 50 parsec. Wat is de schijnbare magnitude van deze ster als die op 5 parsec zou staan?
- a 14.
 - b 4.
 - c 9.
 - d 0,9.

23. De Juliaanse dag wordt door sterrenkundigen gebruikt als absolute tijdmeting. De Juliaanse datum is begonnen met tellen om 12 uur Greenwich Mean Time op 1 januari 4713 v.Chr. in de Juliaanse kalender. Uren en minuten worden als hun decimale fractie van de dag aangegeven: 0,1 JD is dus 2,4 uur. De bekendmaking van de winnaar van de finale zal op 3 juni rond 5 uur zijn, wat is hiervan de Juliaanse datum?
- a JD 2457544,208333
 - b JD 2457543,125000
 - c JD 2457543,166667
 - d JD 2457542,125000

Open Vragen

Specifiek voor de open vragen geldt:

- Geef altijd een motivatie voor een antwoord. Een getal als uitkomst alleen verdient geen punten, evenals een enkel begrip. Laat met een berekening zien hoe je aan een getal komt, of leg uit wat je doet om tot het antwoord te komen. Kun je een getal niet precies uitrekenen, maar weet je wel ongeveer wat je zou moeten doen, schrijf dit dan ook op. Sommige vragen kunnen misschien zelfs meer dan één goed antwoord hebben, afhankelijk van de redenering, dus zonder redenering kunnen ze dan niet beoordeeld worden.
- De laatste opgave (vraag 6) is een bonusopgave en de punten die daar behaald worden tellen niet mee voor de puntentelling in deze voorronde. Voor de inzending met de meeste punten bij deze bonusvraag hebben wij een prijs.

1 Ik zie, ik zie, wat niemand ziet.

Veel natuur- en sterrenkundigen zijn ervan overtuigd dat het grootste deel van de massa in het heelal niet in de vorm van gewone materie (protonen, neutronen, electronen) is. De vorm waarin het grootste deel van de materie zich bevindt, wordt donkere materie genoemd. Deze naam komt van de niet of moeilijk direct waarneembare aard van de donkere materie. Uit wat voor indirecte waarnemingen leiden sterrenkundigen af dat er zoiets als donkere materie moet bestaan? Noem twee waarnemingen en leg uit waarom ze het bestaan van donkere materie aannemelijk maken. **6 pt**

2 Kosmische afstanden.

In de sterrenkunde is het heel belangrijk de afstand tot een object te kunnen bepalen. Dit is nog knap lastig aangezien alle waarnemingen eigenlijk 2D plaatjes zijn.

- Geef drie manieren waarop sterrenkundigen afstanden bepalen en leg kort uit hoe ze werken. **4 pt**
- Geef van elk van de manieren bij (a) aan op wat voor objecten en op welke schaal (de nabije omgeving van de zon, ons sterrenstelsel, de lokale groep, het nabije universum of kosmologische afstand) ze gebruikt kunnen worden. **2 pt**
- Sterrenkundigen gebruiken om de methodes te ijken iets wat we de kosmische afstandscladder noemen. Leg uit wat de kosmische afstandscladder is en hoe het ijken van de methodes in zijn werk gaat. **2 pt**

3 67P/Tsjoerjoemov-Gerasimenko

67P/Tsjoerjoemov-Gerasimenko (67P/C-G) is een komeet die oorspronkelijk uit de Kuipergordel komt. De komeet heeft een totale massa van ongeveer 10^{13} kg en een dichtheid van 0.53 g/cm^3 . De komeet wordt op het moment onderzocht door de satelliet Rosetta die in 2004 is gelanceerd.

- De bekendste kometen zijn kometen die net zoals 67P/C-G in een zeer elliptische baan rond de zon draaien. Deze baan hebben ze niet altijd gehad. Het grootste deel van hun leven draaide deze kometen in een veel rondere baan rond de zon. Hoe kunnen astronomen voor een komeet bepalen waar deze veel rondere baan was? **2 pt**

De satelliet Rosetta had ook een lander, Philae. Deze is vanuit Rosetta naar het oppervlak van 67P/C-G gestuurd. Deze lander was uitgerust met harpoenen om zich te verankeren. Dit is nodig omdat de lander door de lage zwaartekracht niet op zijn plek blijft staan.

- Wat is naast de lage zwaartekracht een andere reden waardoor de lander niet op de plek van bestemming zou kunnen blijven staan? **2 pt**
- Naar Mars worden altijd rovers gestuurd die kunnen rond rijden en dus een veel groter gebied verkennen. Als je aanneemt dat 67P/C-G bolvormig is, wat is dan de maximale snelheid waarmee een rover over het oppervlak kan rijden? **6 pt**

4 Een toevallige ontdekking

Begin december 2015 verschenen er twee wetenschappelijke publicaties waarin geclaimd werd dat er nieuwe objecten aan de buitenrand van het zonnestelsel waren gevonden. Deze objecten zouden toevallig op hetzelfde plaatje te zien zijn als de sterren waar de wetenschappers naar aan het kijken waren met ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array, <http://www.ALMAobservatory.org/>).

- a ALMA is heel gevoelig en kan dus zeer lichtzwakke objecten waarnemen, maar heeft ook een heel klein beeldveld. Het beeldveld van de telescoop is ongeveer $21'' \times 21''$ ($''$ = boogseconde; een boogseconde is $1/3600$ ste graad). In de tijd dat ALMA bestaat heeft het ongeveer 2000 opnamen gemaakt. Welk deel van de hemel heeft ALMA dan bekeken? Ga er van uit dat de opnamen niet overlappen. **4 pt**
- b Stel dat in één van alle opnamen tot nu toe gemaakt met ALMA een object voorkomt zoals in december 2015 is gevonden. Hoeveel van die objecten zou je dan, statistisch gezien, verwachten? Leg uit wat je aannames zijn. **2 pt**

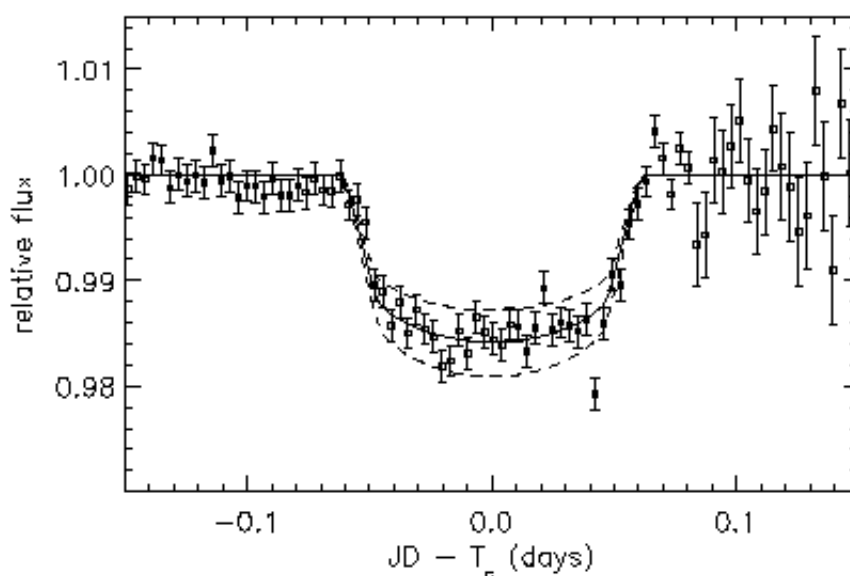
Van één van de objecten die in december naar buiten gebracht zijn wordt beweerd dat het een Trans Neptunian Object (TNO) is met een massa van ongeveer een aardmassa.

- c Uitgaande van je antwoord bij (b), hoeveel massa zit er in totaal dan in deze objecten? Druk je antwoord uit in kg, aardmassa's en zonsmassa's. **2 pt**
- d Vind je het waarschijnlijk dat er zoveel massa in de buitenste rand van het zonnestelsel zit verstopt? Leg uit waarom wel of niet. **2 pt**

5 Het ontdekken van exoplaneten

Het exoplaneten-onderzoeksveld is nog redelijk jong. De eerste observationele aanwijzingen voor exoplaneten werden gevonden in de jaren 1980 maar het duurde nog jaren voordat deze ontdekkingen bevestigd waren. Op het moment zijn er al meer dan 2000 exoplaneten ontdekt en er worden er nog veel meer verwacht de komende jaren.

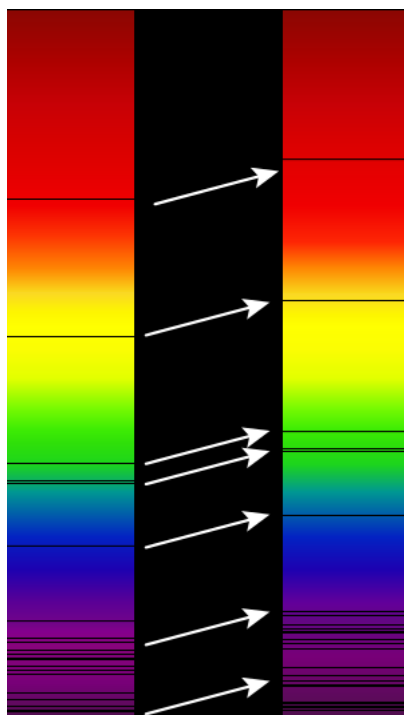
Veel exoplaneten worden tegenwoordig gevonden met de zogehete transitmethode (Engels: transit method). Hierbij beweegt vanaf ons gezien een planeet voor de ster langs en blokkeert zo een deel van het licht. Waarnemingen van zo'n transitie zien er uit als Figuur 3.



Figuur 3: Transit van HD209458b. De lichtflux opgevangen van de ster (y-as) is geschaald naar 1. Op de x-as staat de tijd gemeten vanaf het diepste punt van de transit [Charbonneau et al. 2000].

- a Sommige planeten hebben eigenschappen waardoor ze niet of moeilijk te vinden zijn met de transitmethode. Noem minstens twee van deze eigenschappen en leg uit waarom deze het waarnemen moeilijk maken. **2 pt**
- b De planeet in Figuur 3 draait om een ster heen met een straal $R_{\star} = 1.15R_{\text{zon}}$. Gebruik Figuur 3 om de straal van de planeet uit te rekenen. Vergelijk deze straal met de stralen van de planeten in ons zonnestelsel; op welke planeet lijkt deze het meest? Hint: maak een tekening van wat er gebeurt als een planeet voor een ster beweegt. **3 pt**

Een andere manier om planeten te ontdekken is door gebruik te maken van het Dopplereffect. Alle sterren hebben spectraallijnen waarvan de golflengte zeer nauwkeurig te bepalen is. Als de ster van ons af of naar ons toe beweegt dan treed er een Dopplereffect op in de lijn en zien we die op een andere plek terug dan waar we hem verwachten. (Zie Figuur 4.) Hieruit kan je de snelheid van de ster (naar ons toe of van ons af) bepalen. Als er een planeet rond de ster draait dan beweegt de ster ook een klein beetje (2^e wet van Newton) en dat is te meten. Voor deze ster is een maximale radiële snelheid gemeten van 80 m/s.

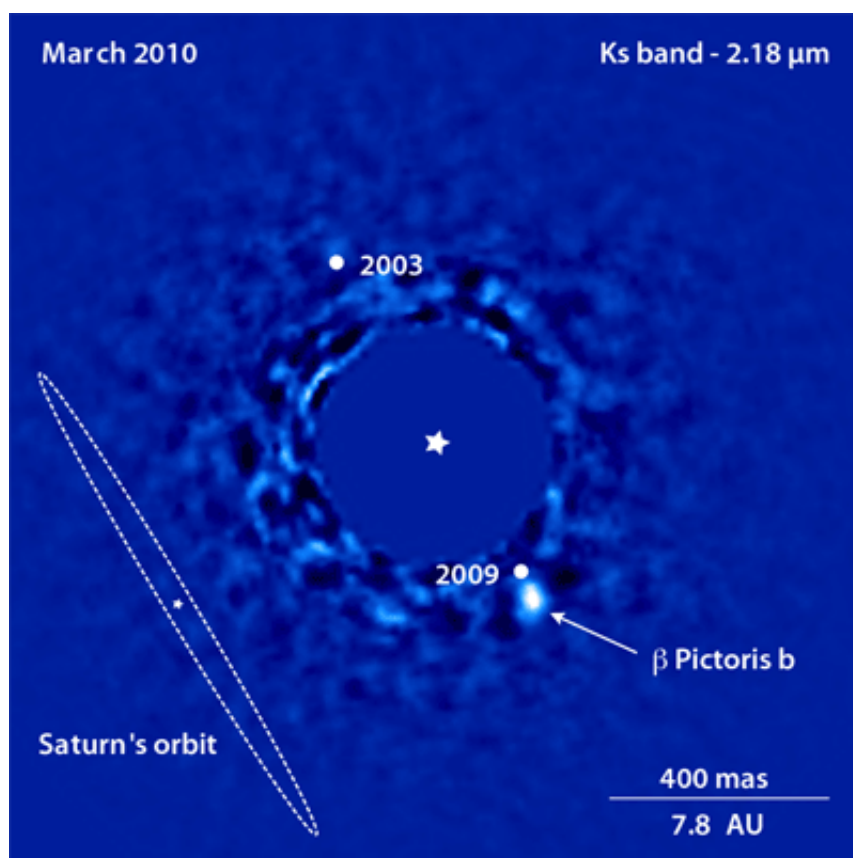


Figuur 4: Een zonnenspectrum (links) met spectraallijnen (zwarte strepen) en het zelfde spectrum uitgezonden door een bron die snel van ons weg beweegt (rechts). Door Georg Wiora (Dr. Schorsch).

- c De periode van de baan van de planeet HD209458b is 3,52 dagen en de ster waar de planeet om heen draait heeft een massa van 1,13 zonsmassa's. Wat is dan de afstand tussen de ster en de planeet en wat is de baansnelheid van de planeet? **4 pt**
- d Druk de snelheid van de ster door de zwaartekracht van de planeet uit in de baansnelheid van de planeet en de massa's van de planeet en de ster. Gebruik dit om de massa van de planeet te vinden. **3 pt**

Het is ook mogelijk om planeten direct waar te nemen. Dit is heel lastig omdat de planeet veel minder helder is dan de ster maar wel heel dichtbij de ster staat. Er zijn tegenwoordig steeds meer technieken om dit toch mogelijk te maken. In Figuur 5 is de planeet β Pictoris b te zien.

- e De meeste hemellichamen zijn te benaderen als zwarte stralers. Gebruik dit om uit te leggen dat het makkelijker is om een planeet direct waar te nemen in het infrarood dan in het zichtbare licht. **2 pt**



Figuur 5: Infraroodopname van β Pictoris b. De ster β Pictoris gaat schuil achter de coronagraaf in het midden [Bonnetfoy et al. 2011].

f Geeft van de volgende variabelen aan of het vergroten of verkleinen ervan het makkelijker maakt om een planeet direct waar te nemen in het optisch en het infrarood (dit hoeft niet hetzelfde te zijn), en leg kort uit waarom: **3 pt**

- i) Afstand tot de ster en de planeten.
- ii) Albedo van de planeet.

De website exoplanets.org houdt een database bij van gevonden exoplaneten.

g Ga naar de website en klik op *plots*. Maak hier een figuur met de volgende informatie: op de x-as de halflange-as van de baan (*semi-major axis*), op de y-as de massa (*mass*) van de planeet en zet deze op een logaritmische schaal (onder *advanced*). Zet de kleurschaal op excentriciteit (*eccentricity*). Print dit figuur uit en voeg het toe aan je opgaven (via *export* kan je het figuur opslaan). **2 pt**

h Gebruik wat je weet over de drie bovengenoemde methoden om de verdeling van de planeten in dit figuur uit te leggen. **2 pt**

6 Bonusvraag: Astronomische knipperlichten

Pulsars zijn neutronensterren; extreem compacte sterren van enkele kilometers in doorsnede en een massa van een paar zonsmassa's. De helderheid van deze sterren wisselt periodiek. Vooral in het radio regime zijn die pieken in helderheid duidelijk waar te nemen.

- a Leid de tijd af dat een object op afstand R er over doet om naar een puntmassa met massa M te vallen. Je mag hierbij aannemen dat de kracht op het object de hele tijd gelijk is aan de kracht op $0,5R$ van het object [**5 pt**] of de algemene uitdrukking geven. [**7 pt**]
- b De formule bij (a) is ongeveer de tijd waarin een ster met straal R en massa M in zou storten als er geen tegendruk zou zijn. Wat is de bron voor de tegendruk bij de zon? [**2 pt**]
- c De snelste pulsar die we nu kennen heeft een straal van 16 km en een massa van 2 zonsmassa's. Wat is de vrije valtijd voor dit object? [**2 pt**]
- d Er zijn sterren die radieel pulseren (dus die groter en kleiner worden). Dit wordt deels gedreven door de zwaartekracht. Wat verwacht je van de periode van de pulsaties? Is die groter of kleiner dan de vrije valtijd? Leg uit waarom. [**3 pt**]
- e De snelste pulsar pulseert met een frequentie van 700 Hz. Hoe verhoudt dit met de vrije valtijd? Denk je dat het pulserende gedrag van een pulsar wordt aangedreven door de zwaartekracht? Leg uit waarom. [**3 pt**]

EINDE