

Nederlandse Sterrenkunde Olympiade 2022

Voorronde

4 April 2022

Leuk dat je mee wilt doen aan de Nederlandse Sterrenkunde Olympiade 2022! Voor je heb je de vragen van de voorronde. De voorronde bestaat uit 8 meerkeuzevragen, 6 korte open vragen en 4 lange open vragen. Probeer ze zo goed mogelijk op te lossen, en wie weet word je uitgenodigd voor de masterclasses, excursies en eindronde op 4, 5 en 6 juli in Groningen, waarbij je een waarneemreis naar La Palma kunt winnen! Om in aanmerking te komen voor de eindronde, moet je je antwoorden uiterlijk **zondag 15 mei om 23:59** inleveren op de website sterrenkunde-olympiade.nl.

De vragen zijn niet makkelijk. Daarom is het toegestaan om zo veel mogelijk hulpmiddelen te gebruiken als je nodig hebt, zoals boeken, een rekenmachine, of het internet. Vermeld wel altijd je bron als je informatie hebt opgezocht en let er verder op dat je de vragen echt zelf maakt. Informatie opzoeken mag, maar overleggen niet! Geef altijd een motivatie of uitleg bij je antwoorden op de korte en lange open vragen, dat mag ook met illustraties. Een enkel getal of begrip wordt sowieso fout gerekend. Weet je het antwoord op een open vraag niet helemaal, dan kan het alsnog zijn dat je wel punten krijgt voor een gedeeltelijk antwoord, dus schrijf vooral op wat je wel weet. Bij de meerkeuzevragen is alleen de letter van de antwoordoptie voldoende.

Een aantal belangrijke punten:

- Maak bij je antwoorden een voorblad (dus een aparte pagina!) met de volgende gegevens: voor- en achternaam, adres, telefoonnummer, e-mailadres, eventueel het e-mailadres van een ouder/verzorger, school, niveau en jaarlaag. Vermeld verder op elk antwoordblad je voor- en achternaam.
- Maak de lange open vragen elk op een apart blad
- Als je de vragen op papier maakt, schrijf dan het liefst met blauwe of zwarte pen, zeker niet met potlood. Zorg dat je antwoorden goed leesbaar zijn. Scan je antwoorden in (dus geen foto's).
- Als je de opgaven maakt in een tekstverwerker zoals Microsoft Word, zorg er dan voor dat formules duidelijk worden weergegeven en goed leesbaar zijn.
- Upload je werk als pdf, met als titel `achternaam-voornaam-neso2022.pdf`.
- Je hoeft de vragen niet in één zitting te maken, maar lever ze wel in één keer in.
- Lever je antwoorden uiterlijk 15 mei 23:59 in op de website sterrenkunde-olympiade.nl
- Bewaar zelf een kopie van je antwoorden. De juiste antwoorden worden na 15 mei online gezet.
- 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 de website.
- Een groep van de organisatie kijkt de antwoorden na. Over de uitslag van de voorronde kan niet gecorrespondeerd worden.
- Als je verder nog vragen hebt, neem dan gerust ook contact met ons op via de website!

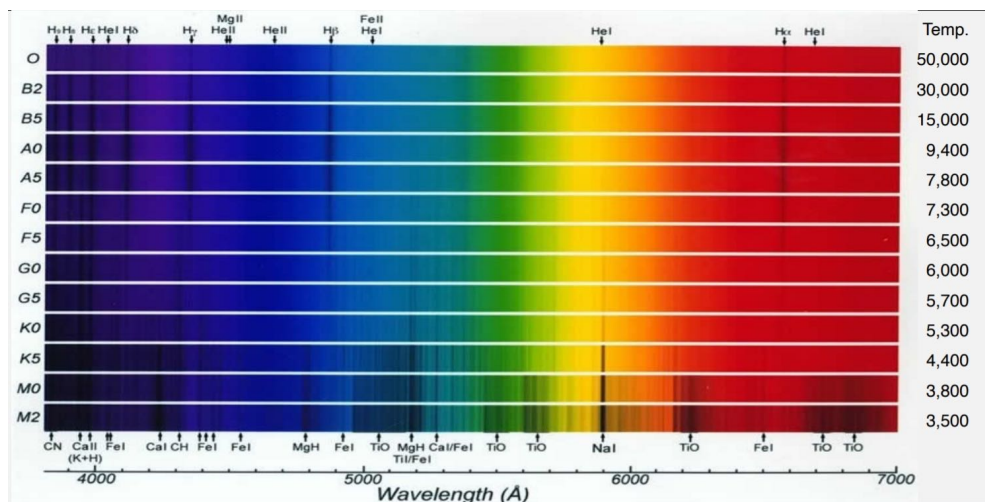
Veel succes! Het NeSO-2022 team: Reynier Peletier, Janke Prins, Nynke Visser, Nikki Zabel, Jake Noel-Storr, Paul Feldbrugge, Annemarijn Zwerver, Sophie van Mierlo, Stefanie Brackenhoff, Femke de Heer, Koojsje Lamers, Meriam Tuinhof

1 Meerkeuzevragen

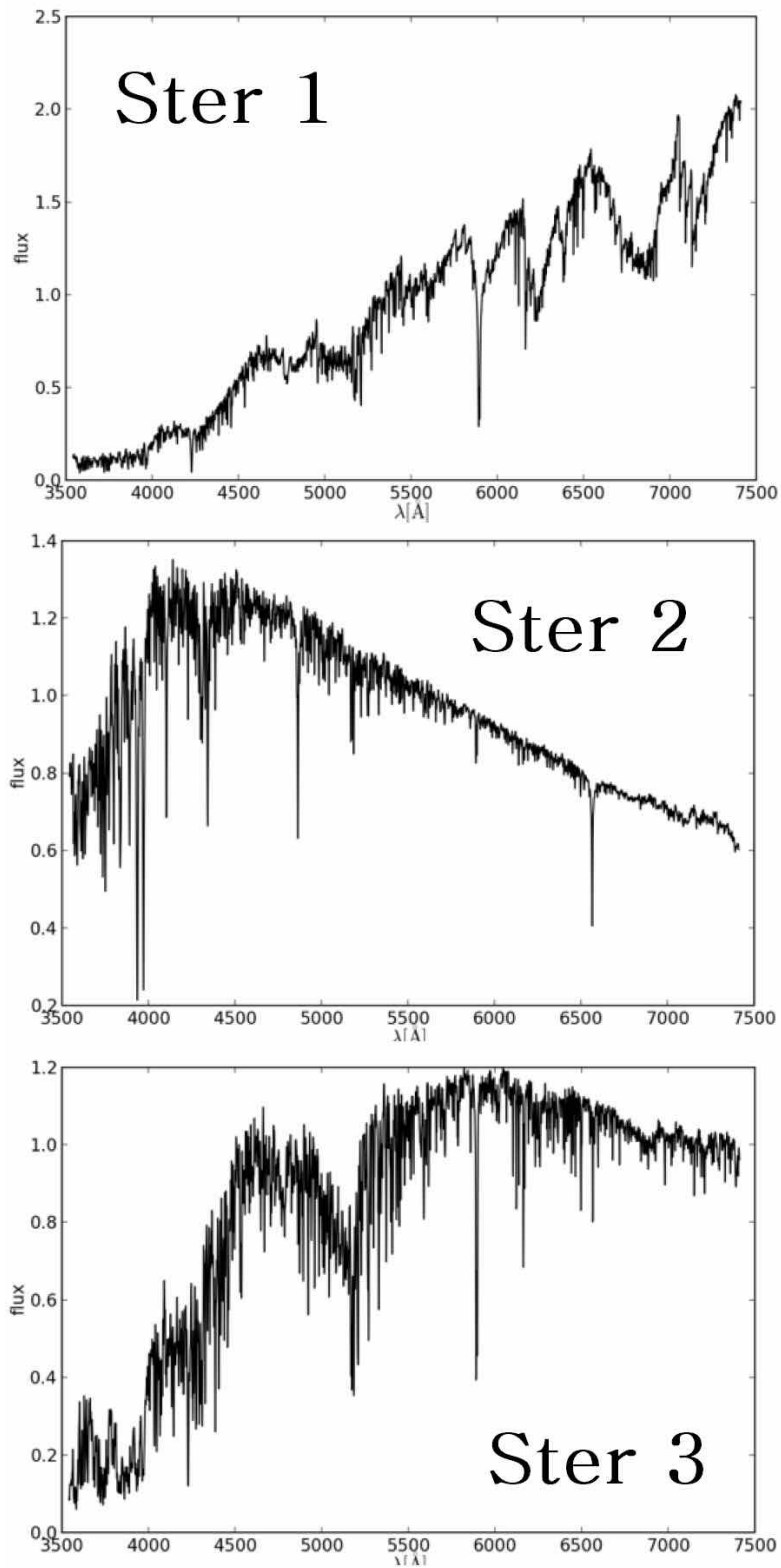
1.1 Spectra van sterren

Sterren zijn onderverdeeld in zogenaamde spectraalklassen, gebaseerd op de kleur en het spectrum van het uitgestraalde licht. Onder de normale hoofdreekssterren onderscheiden we 7 klassen: O, B, A, F, G, K en M (op volgorde van hoge naar lage temperatuur). Verder worden deze klassen nog verder onderverdeeld met een getal tussen de 0 en 9 (waarbij 0 blauwer is dan 9). Figuur 1 laat voorbeelden van zulke spectra zien. In figuur 2 staan spectra van drie sterren. Één ster is van type M6, één van type K4, en één van type F8. Welke uitspraak is waar?

- (a) Ster 1 is type M6, ster 2 is type K4, ster 3 is type F8
- (b) Ster 1 is type M6, ster 2 is type F8, ster 3 is type K4
- (c) Ster 1 is type K4, ster 2 is type M6, ster 3 is type F8
- (d) Ster 1 is type K4, ster 2 is type F8, ster 3 is type M6
- (e) Ster 1 is type F8, ster 2 is type M6, ster 3 is type K4
- (f) Ster 1 is type F8, ster 2 is type K4, ster 3 is type M6



Figuur 1. Voorbeelden van spectra voor de verschillende spectraalklassen, met de temperatuur aan de rechterkant weergegeven



Figuur 2. De spectra van de drie sterren

1.2 Exoplaneten ontdekken met de transitiemethode

Één manier om exoplaneten te ontdekken is via de zogenaamde transitiemethode. Bij deze methode wordt het licht van de ster over een langere tijd gemeten. Als de planeet vanaf de aarde gezien voor de ster langs beweegt, ontvangen we even minder licht van de ster, er zit dus een dip in de lichtcurve.

We observeren twee planeten die om dezelfde ster draaien. Bij planeet 1 is de dip in de lichtcurve breder, maar bij planeet 2 is die dieper. We doen de volgende twee uitspraken:

1. Planeet 1 staat dichterbij de ster
 2. Planeet 2 is groter
- (a) Alleen uitspraak 1 is juist
 - (b) Alleen uitspraak 2 is juist
 - (c) Beide uitspraken zijn juist
 - (d) Beide uitspraken zijn onjuist

1.3 Satelliet

Stel, je bent tijdens midzomernacht in Groningen naar de sterren aan het kijken op het tijdstip midden tussen zonsopgang en zonsopkomst. Je ziet vanuit het noorden een door de zon beschreven satelliet door het zenit, het punt recht boven je hoofd, passeren. De satelliet beschrijft op een hoogte van 750 km een baan rond de aarde precies over de beide polen van de aarde. Tot wanneer kun je deze satelliet zien? Hint: maak een schets van de situatie.

- (a) Totdat de satelliet zich ergens boven België bevindt
- (b) Totdat de satelliet zich ergens boven Frankrijk bevindt
- (c) Totdat de satelliet zich ergens boven de Middellandse zee bevindt
- (d) Totdat de satelliet zich boven Afrika bevindt

1.4 Oppositie

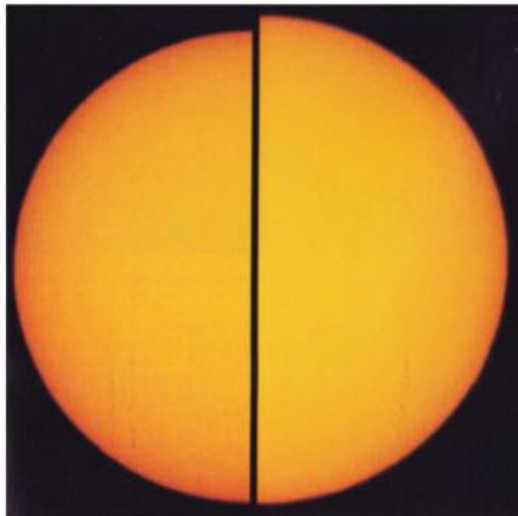
Vanaf de aarde gezien:

1. staat Mars ongeveer één keer per 1,9 jaar in oppositie met de zon
 2. staat Venus ongeveer één keer per 1,6 jaar in oppositie met de zon
- (a) Alleen uitspraak 1 is juist
 - (b) Alleen uitspraak 2 is juist
 - (c) Beide uitspraken zijn juist
 - (d) Beide uitspraken zijn onjuist

1.5 Zonnestraling op aarde

In zijn elliptische baan om de zon passeert de aarde het aphelium en het perihelium, respectievelijk het punt het verst weg van en dichtst bij de zon. Figuur 3 is een samenstelling van zonsbeelden gezien vanuit zowel het aphelium (4 juli 2019) als het perihelium (30 december 2019) met dezelfde telescoop en dezelfde vergroting. Hoe veel procent van de straling die tijdens de periheliumdoorgang de aarde bereikt, vangen we op als de aarde zich in het aphelium bevindt?

- (a) 107%
- (b) 104%
- (c) 96%
- (d) 93%



Figuur 3. De zon tijdens het aphelium en tijdens het perihelium, op schaal. Bron: Leo Aerts, SterrenGids 2021

1.6 Pulsars

Pulsars zijn snel ronddraaiende neutronensterren die vanuit beide magnetische polen een stroom elektromagnetische straling uitzenden. Deze straling kun je vanaf de aarde zien als snelle pulsen. Hoe vaak per rotatie van de ster is zo'n puls te zien?

- (a) 0.5 of 1 keer
- (b) 1 keer
- (c) 1 of 2 keer
- (d) 2 keer

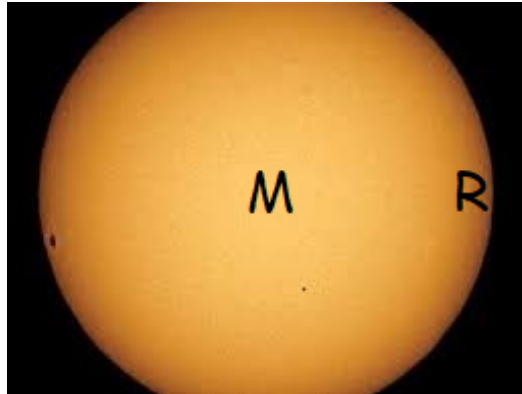
1.7 Schijngestalten

Welk object vertoont geen schijngestalten?

- (a) Jupiter
- (b) De maan
- (c) Venus
- (d) Mercurius

1.8 Randverzwakking

Als je via een optisch filter naar de zon kijkt, kijk je naar de fotosfeer, de buitenste zichtbare gaslaag ervan. Het licht afkomstig van het midden van de zonnescijf aan de hemel is het helderst. Naarmate je verder van dat middelpunt af kijkt wordt het licht minder helder, totdat aan de rand van de zonnescijf het licht het minst helder is. Dit wordt ook wel randverzwakking of *limb darkening* genoemd. In Figuur 4 zie je de zon en het verschijnsel. Met daarop de punten M (midden op de zonnescijf) en R (op de rand van de zonnescijf).



Figuur 4. Randverzwakking van de zon. Het licht is aan de rand (R) donkerder dan in het midden (M).

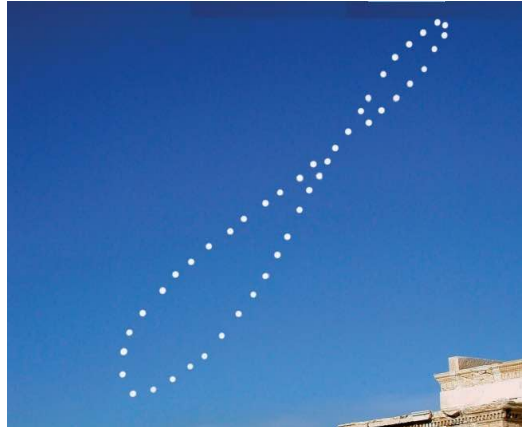
Randverzwakking neem je waar doordat:

1. je via je gezichtslijn vanuit richting M een gebied met hogere temperatuur in de zon kunt waarnemen dan via gezichtslijn vanuit richting R
 2. de temperatuur aan de buitenkant van de fotosfeer lager is dan in diepere lagen ervan.
- (a) Alleen uitspraak 1 is juist
(b) Alleen uitspraak 2 is juist
(c) Beide uitspraken zijn juist
(d) Beide uitspraken zijn onjuist

2 Korte open vragen

1. Waarom is ijzer het zwaarste element dat in de kern van een ster kan worden gevormd?
2. Wat is het verschil tussen een siderische en synodische dag? Hoe lang duurt een siderische dag, en waarom?
3. De sterrenbeelden van de dierenriem volgen een jaarlijks patroon, waarbij ze elk jaar op dezelfde dag op ongeveer dezelfde plaats aan de hemel staan. Dit patroon schuift echter op. Per ongeveer 2000 jaar schuift elk sterrenbeeld één plek op. Waarom is dit het geval? En hoe wordt het mechanisme dat dit veroorzaakt genoemd?
4. Wat is donkere materie? Omschrijf minimaal 1 aanwijzing voor het bestaan hiervan.
5. Hoe zou je (nu of in de toekomst) buitenaards leven kunnen herkennen op een exoplaneet met waarnemingen die gedaan zijn op of in de buurt van de aarde? Geef minstens één methode.

6. Wanneer je een jaar lang met regelmatige tussenpozen op hetzelfde tijdstip van de dag een foto van de zon maakt, is op een combinatie van die foto's een zogenaamde analemma te zien: een figuur van zonsbeelden. Figuur 5 is hier een voorbeeld van. Geef van elk van de volgende factoren aan of ze bijdragen aan de vorming van een analemma of niet en geef per factor een *korte* uitleg.
- De stand van de aardas ten opzichte van het baanvlak van de aarde om de zon
 - De snelheid waarmee de aarde om zijn as draait
 - De excentriciteit van de baan van de aarde rond de zon
 - De snelheid waarmee de aarde om de zon draait



Figuur 5. Een compositiefoto van de zon op hetzelfde tijdstip van de dag op verschillende dagen gedurende een jaar. Het figuur-8 dat vormt is een analemma. Bron: Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde, december 2007

3 Astronomische Eenheid

Om de waarde van een astronomische eenheid (de absolute afstand van de aarde tot de zon) te meten zijn verschillende observaties nodig en hierbij wordt gebruik gemaakt van andere planeten. Eerst moet de relatieve afstand van een andere planeet tot de zon worden berekend: de afstand van die planeet tot de zon in astronomische eenheden. Daarna kan met een andere observatie de absolute afstand van de aarde tot die planeet, en daarmee tot de zon worden berekend.

De relatieve afstand tot één van de binnenste planeten (Mercurius of Venus) is te berekenen met behulp van de maximale elongatie en simpele trigonometrie. De elongatie van een planeet is de hoek tussen de zon en die planeet aan de hemel, gezien vanaf de aarde. De maximale elongatie is dus de maximale waarde die die hoek kan aannemen.

- De maximale elongatie van Venus is 46° . Bereken de afstand van Venus tot de zon in astronomische eenheden.
- Waarom kun je bij de buitenste planeten niet de maximale elongatie gebruiken om de relatieve afstand te berekenen? Hoe zou je de relatieve afstand van één van de buitenste planeten wel kunnen berekenen? Omschrijf één mogelijke methode, je hoeft hem niet wiskundig uit te werken.

Pas in de achttiende eeuw is er een manier ontwikkeld om de absolute afstand van de aarde tot de zon te bepalen. Hierbij werd gebruik gemaakt van de Venusovergangs van 1761 en 1769, in één van de eerste echte internationale wetenschappelijke samenwerkingen. Tijdens een Venusovergang beweegt de planeet Venus in ongeveer zes uur voor de zon langs, en door observaties te doen op verschillende

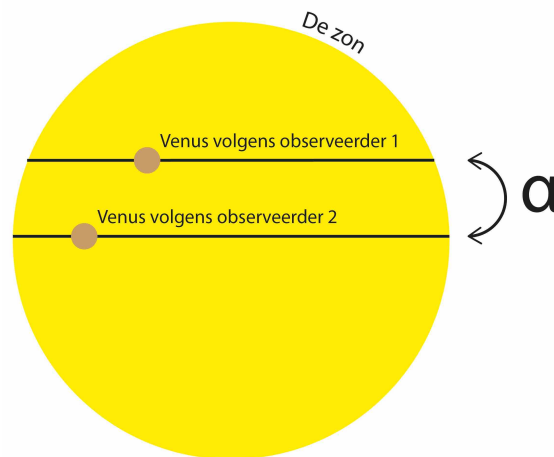
plekken op de aarde kan de afstand van de aarde tot Venus worden bepaald.

Bij deze observaties en berekeningen wordt gebruik gemaakt van parallax.

- (c) Leg uit wat parallax is en hoe je het kunt gebruiken om afstanden te meten.

We kijken naar een versimpelde weergave van een Venusovergang. Ga er bij de volgende vragen wederom vanuit dat de banen van de planeten perfecte cirkels zijn en dat de planeten in hetzelfde vlak bewegen.

- (d) Een laatste aanname die we doen is dat de rotatieas van de aarde een rechte hoek maakt met het vlak waarin de aarde om de zon beweegt. Wat betekent dit voor een waarnemer die zich op de evenaar bevindt?
- (e) Twee waarnemers observeren een Venusovergang. Ze bevinden zich op dezelfde lengtegraad, maar één waarnemer bevindt zich in Kaapstad, Zuid-Afrika en de andere op de evenaar. Ze hebben onderling een parallaxhoek berekend van 20 boogseconden (zie Figuur 6. Ga ervan uit dat de straal van de aarde al bekend is. Wat is de afstand van de aarde tot de zon? Gebruik een illustratie om je antwoord uit te leggen.
- (f) Het berekenen van de onderlinge parallaxhoek is nog best een uitdaging. Hoe zou jij dit aanpakken? Je hoeft geen berekeningen te laten zien, alleen een uitleg van je methode.



Figuur 6. De onderlinge parallaxhoek α van twee waarnemers die een Venusovergang waarnemen

Bij deze berekening worden veel aannames gedaan die in het echt niet gelden. Bij de echte berekeningen in 1761 en 1769 werden wel dezelfde principes gebruikt, maar waren de berekeningen veel complexer. Zo moest de transitie op verschillende breedtegraden worden waargenomen en werd het door meer dan twee waarnemers gedaan.

- (g) Noem drie factoren die de berekeningen complexer maken, en leg hun effect uit.

Slotopmerking: Verder kwamen er nog meer praktische complicaties aan de orde. Zo zat het weer niet voor iedereen mee, was niet voor iedereen de hele transitie te zien omdat de zon niet constant te zien was, hebben sommigen de transitie domweg gemist door problemen tijdens hun reis, moest men ter plekke nog de lengte- en breedtegraad bepalen, was het erg lastig om de parallaxhoek te meten of had men last van het zogenaamde *black drop effect*, dat ontstaat door een combinatie van verschillende optische effecten. Toch wisten de wetenschappers uit te komen op een waarde van 153 ± 1 miljoen kilometer, wat gezien de omstandigheden nog best netjes is.

4 De James Webb Space Telescope

De James Webb Space Telescope (JWST) is een NASA-ruimtetelescoop en is de opvolger van de Hubble Space Telescope (HST). Waar de HST een spiegel heeft met een diameter van 2.4 meter, heeft de JWST een spiegel met een diameter van 6.5 meter en waar de HST voornamelijk in optische en UV golflengtes kijkt, kijkt de JWST voornamelijk in infrarood golflengtes. De twee telescopen hebben een beetje overlap in in het deel van het spectrum dat ze kunnen zien, maar niet veel. De JWST is dus niet zo zeer een vervanger, maar meer een aanvulling op de HST.

Na bijna eindeloze vertragingen, is de JWST op 25 december 2021 eindelijk succesvol gelanceerd en hij is onlangs aangekomen in het zon-aarde Lagrangepunt L2 (zie Figuur 7). Lagrangepunten zijn punten binnen een systeem met twee hemellichamen waar een derde object met verwaarloosbare massa altijd dezelfde positie behoudt ten opzichte van de twee grote hemellichamen. In de praktijk betekent dit voor de JWST dat de telescoop altijd dezelfde positie heeft ten opzichte van de zon en de aarde terwijl de zon om de aarde beweegt. Dit maakt het een bijzonder handige ‘parkeerplek’ voor satellieten: de satelliet kan daar verblijven met een relatief laag brandstofgebruik terwijl het de zon en de aarde altijd op één lijn heeft waardoor hun hinderlijke warmtestraling constant kan worden geblokkeerd met hetzelfde warmteschild.



Figuur 7. De James Webb Space Telescope is ‘geparkeerd’ in Lagrange-punt L2 op afstand x van de aarde en houdt het zonnescild altijd naar de aarde en zon gericht.

- Wat weet je over de omlooptijd van de JWST om de zon?
- Welke (pseudo-)krachten worden er in een lagrangepunt gebalanceerd?
- Bereken hoe ver L2 zich van de aarde bevindt. (Hint: de aanwezigheid van de maan kan genegeerd worden)

Er wordt vaak gezegd dat de JWST ‘13 miljard jaar terug in de tijd’ kan kijken, naar de geboorte van de allereerste sterrenstelsels.

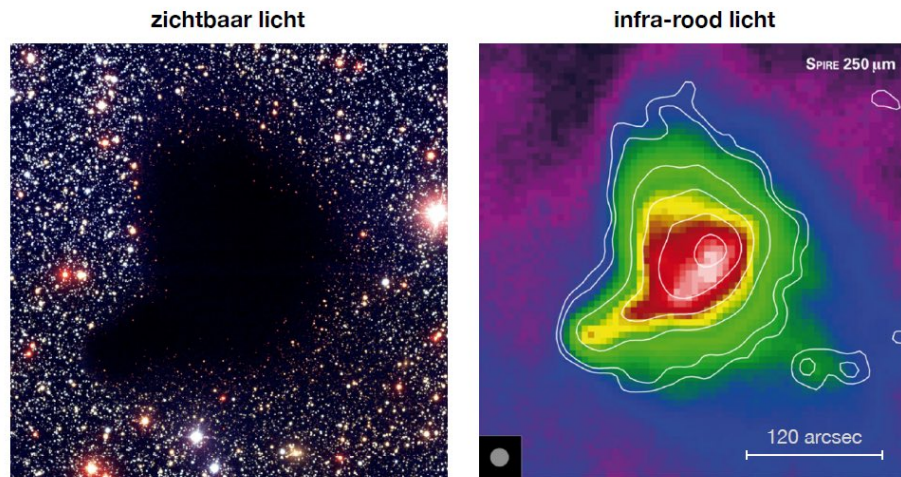
- Hoe kan het dat een telescoop terug in de tijd kan kijken?
- Noem één reden waarom de JWST verder terug in de tijd kan kijken dan de HST

Een belangrijke eigenschap van telescopen is de hoekresolutie waarmee ze kunnen waarnemen. De hoekresolutie is de minimale hoek aan de hemel waarop twee objecten door een telescoop van elkaar gescheiden kunnen worden. Deze waarde is afhankelijk van de golflengte van het licht en de diameter van de spiegel en is ongeveer $\theta \sim \lambda/D$

- Met welke factor verbetert de hoekresolutie van de metingen op een bepaalde golflengte vergeleken met de HST, als de JWST in gebruik wordt genomen?

5 Barnard 68

Sterren vormen in moleculaire wolken in het interstellair medium van de Melkweg en andere sterrenstelsels. In Figuur 8 staan twee afbeeldingen van een dergelijke wolk, Barnard 68. Links toont een opname op visuele golflengtes, waarop Barnard 68 alleen zichtbaar is als een donkere vlek omdat hij het licht van de sterren erachter blokkeert. Rechts staat een opname op infra-rood golflengtes, gemaakt met de Herschel ruimtetelescoop, waarop de warmtestraling van het koude stof te zien is.



Figuur 8. Opnames op verschillende golflengtes van de moleculaire wolk Barnard 68 in onze Melkweg. Deze wolk staat op een afstand van 153 parsec. De schaal is hetzelfde in beide afbeeldingen.

- Uit waarnemingen van Barnard 68 op verschillende infra-rode golflengtes blijkt dat deze wolk het helderst is op een golflengte van $\lambda = 250 \mu\text{m}$. Leg uit hoe je hieruit de temperatuur van het stof in Barnard 68 kan bepalen, en geef de waarde in Kelvin die je op deze manier vindt.
- De wolk bestaat voor het overgrote deel uit H_2 , met verwaarloosbare hoeveelheden van andere moleculen en stof. Uit de helderheid van de emissielijn van één van die moleculen (namelijk N_2H^+) leiden astronomen af dat de dichtheid van de wolk ongeveer $1.4 \cdot 10^5 \text{ H}_2$ moleculen per cm^3 is. Benader Barnard 68 als een bolvormig volume en gebruik de informatie uit Figuur 8. Bereken de massa van Barnard 68, uitgedrukt in zonsmassa's. Leg uit hoe je aan je antwoord komt. (Hint: wat is een parsec?)

De Jeansmassa M_J van een moleculaire wolk is de massa van een wolk gas die bij een gegeven temperatuur en druk minstens bijeen moet zijn om door zwaartekracht samen te kunnen trekken. De Jeansmassa is gegeven als

$$M_J = 4 \left(\frac{kT}{Gm} \right)^{3/2} \rho_0^{-1/2}$$

waar m de massa per deeltje is.

- Als de Jeansmassa is bereikt, begint een wolk dus samen te trekken. Wat gebeurt er vervolgens met de Jeansmassa tijdens het samentrekken? Maakt dit stervorming moeilijker of juist makkelijker?
- Uit vraag a en b heb je als het goed is de massa, dichtheid en temperatuur van Barnard 68 kunnen halen. Wat kun je met deze waarden zeggen over de stabiliteit van deze wolk tegen ineenstorting onder invloed van de zwaartekracht? (Als je een of meerdere van de waardes voor massa, dichtheid of temperatuur mist, neem dan plausibele waarden aan en baseer je antwoord daar op.)

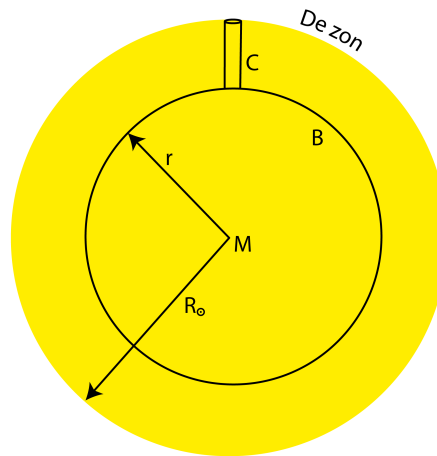
- (e) Een nauwkeurige analyse van de N_2H^+ emissielijn in de richting van het centrum van Barnard 68 laat zien dat de lijn zich daar in tweeën splitst. De verwachte frequentie van de lijn is $9.3174 \cdot 10^{10}$ Hz, maar de twee gemeten lijnen zijn respectievelijk $6.2 \cdot 10^4$ Hz hoger en $6.2 \cdot 10^4$ Hz lager dan dat.

Verklaar dit onder de aanname dat Barnard 68 instabiel is voor ineenstorting onder de eigen zwaartekracht (let op! Dat zegt dus niets over je antwoord bij vraag d) en leid uit deze gegevens een *simpele* schatting af van de tijdschaal voor ineenstorting, uitgedrukt in jaren

6 De binnenkant van de zon

We kunnen van de zon alleen de oppervlakte direct waarnemen. Van de binnenkant van de zon kunnen we (op neutrino's na) niets waarnemen. Toch kunnen we redelijk goed de opbouw van de zon onder zijn oppervlakte in kaart brengen. Ten eerste moeten we daartoe de massa van de zon, de straal en de gemiddelde dichtheid ervan kennen. Deze staan in Binas tabel 32C gegeven als: $M_\odot = 1.989 \cdot 10^{30}$ kg, $R_\odot = 6.96 \cdot 10^6$ m en $\rho_\odot = 1.410 \cdot 10^3$ m⁻³.

Gegeven het feit dat de zon een gasbol is, kunnen we ons binnen de bol van de zon verschillende lagen voorstellen als concentrische schillen rond het middelpunt M, zie Figuur 9. We zien dat de zon niet krimpt of uitzet. Hierdoor nemen we aan dat alle lagen vanaf de oppervlakte tot de kern van de zon elkaar in evenwicht houden door het zogenaamde hydrostatische evenwicht. Zo wordt in de figuur een willekeurige laag B binnen de zon in evenwicht gehouden door de druk naar binnen als gevolg van de zwaartekracht van de totale gaslaag daarboven en de naar buiten gerichte gasdruk aan de binnenkant van die begrenzing.



Figuur 9. Een doorsnede van de zon

- (a) Geef een argument waarom de druk aan het oppervlak van de zon nagenoeg 0 Nm^{-2} is.
- (b) Beargumenteer waarom de gasdruk toeneemt naarmate je dichter bij het middelpunt van de zon komt

We bekijken de cilinder C in Figuur 9. De bodem van die cilinder is in hydrostatisch evenwicht, dus de gasdruk daar komt overeen met het gewicht per oppervlakte van de massa erboven. Dan kunnen we zeggen:

$$F_C = M_C g, \quad (1)$$

$$P_C = F_C/A, \quad (2)$$

met F_C de kracht die de cilinder op de bodem uitoefent, M_C de massa van de cilinder, g de gemiddelde gravitatieversnelling van de cilinder, P_C de gasdruk op de bodem van de cilinder en A de oppervlakte van de cilinder. Dus:

- (c) Schrijf de gasdruk op de bodem van de cilinder als functie van de massa per oppervlakte μ en de gravitatieversnelling.
- (d) Dit geldt uiteraard voor alle waarden van r , dus ook voor het middelpunt van de zon. Toon aan dat μ in het centrum van de zon kan worden geschreven als $\mu \propto \frac{M_\odot}{R_\odot^2}$.
- (e) In het middelpunt van de zon wordt M_C gelijk aan de massa van de hele kolom van het middelpunt tot de rand. Toon aan dat g voor een cilinder massa van het centrum van de zon tot de rand van de zon gemiddeld kan worden geschreven als $g \propto G \cdot \frac{M_\odot}{R_\odot^2}$ en dat de gasdruk in het centrum van de zon kan worden geschreven als $P_M \propto G \cdot \frac{M_\odot^2}{R_\odot^4}$.

De evenredigheidsfactor is op theoretische wijze bepaald en gelijk aan ongeveer 19, dus:

$$P_M = 19G \frac{M_\odot^2}{R_\odot^4} \quad (3)$$

Verder is er een verband tussen de druk van een ideaal gas en de temperatuur (in kelvin) volgens de ideale gaswet:

$$P_M = n \cdot k \cdot T \quad (4)$$

Waar n het aantal gasdeeltjes per volume-eenheid is, k de constante van Boltzmann en T de temperatuur van het gas.

Modelberekeningen hebben uitgewezen dat de dichtheid van het gas in het middelpunt van de zon ca. 110 maal zo groot is al de gemiddelde dichtheid ervan. We nemen aan dat de massa bestaat uit losse ionen en elektronen. Gezien de samenstelling van de zon kunnen we als gemiddelde massa per deeltje ongeveer 0,893u aanhouden.

- (f) Bereken de temperatuur in de kern van de zon.