



Vlaamse Sterrenkunde Olympiade 2026

Oplossingen

8 april 2026

In dit document worden oplossingen voorgesteld voor de vragen van de Vlaamse Sterrenkunde Olympiade 2026. Het spreekt voor zich dat andere methodes eventueel ook tot correcte oplossingen kunnen leiden.

Vlaamse Sterrenkunde Olympiade
Vereniging Voor Sterrenkunde
Zeeweg 96
8200 Brugge

Het organiserend comité van de Vlaamse Sterrenkunde Olympiade 2026: Luka Banović, Robin Chan, Yari Depaep, Myrthe Flossie, Wout Goesaert, Thomas Mattheussen, Frank Tamsin, Jelle Vandernickt.

*<http://www.sterrenkundeolympiade.be>
info@sterrenkundeolympiade.be*

Meerkeuze vragenreeks

1. Hoeveel kleiner of groter zal de oppervlakte van de zonneschijf aan de hemel voor een rover op Mars lijken aan het einde van dit jaar (2026) in vergelijking met het begin van dit jaar?

- a) **25% kleiner**
- b) 13% kleiner
- c) geen verschil
- d) 15% groter
- e) 33% groter

De afstanden d tussen de Zon en Mars zijn te vinden in efemeriden (bijvoorbeeld <https://astropixels.com/ephemeris/planets/mars2026.html>):

$$d_{\text{begin}} = 1,42869 \text{ AE en } d_{\text{einde}} = 1,64607 \text{ AE.}$$

Zij R de straal en θ de schijnbare hoekdiameter van de Zon, dan vinden we dat

$$\frac{\theta}{2} \approx \tan \frac{\theta}{2} = \frac{R}{d}$$

De verhouding van de schijnbare groottes is dan

$$\left(\frac{\theta_{\text{einde}}}{\theta_{\text{begin}}}\right)^2 = \left(\frac{d_{\text{begin}}}{d_{\text{einde}}}\right)^2 = 0,75$$

waaruit het antwoord volgt.

2. De Galileïsche manen (naar ontdekker Galileo Galilei) behoren tot de grootste in ons zonnestelsel. Doorheen afgelopen decennia sterkten observaties het geloof dat op drie van die manen – Europa, Ganymedes en Callisto – een zoute oceaan te vinden is, onder een oppervlaktelaag ijs. Zijn de omstandigheden in die oceanen geschikt voor de ontwikkeling van leven? De vraag leeft steeds meer. De ESA lanceerde op 14 april 2023 de Jupiter Icy Moons Explorer (JUICE) ruimtesonde, met de Galileïsche manen als bestemming. Welke van volgende uitspraken is correct?

- a) De ruimtesonde zal de oceanen bestuderen door stalen te nemen, die lokaal te analyseren en informatie over de compositie door te seinen naar de Aarde.
- b) **De ruimtesonde zal de oceanen bestuderen door het zwaartekrachtsveld van de manen, en variaties in dat veld omwille van maan-maan interacties, in kaart te brengen.**
- c) De ijsslagen zijn zo dik dat ze ons verhinderen enige informatie te verkrijgen over de omstandigheden in de oceanen.
- d) Zowel a) als b) zijn correct.
- e) Geen enkele van bovenstaande antwoorden is correct.

De Jupiter Icy Moons Explorer (JUICE), gelanceerd door de European Space Agency, zal geen stalen nemen van de oceanen onder het ijs. Dat is momenteel technisch niet haalbaar, omdat de ijsslagen op manen zoals Europa, Ganymedes en Callisto kilometers dik zijn. In plaats daarvan gebruikt JUICE indirecte meetmethode

3. Hoe verschillen vulkanen op de polen van het Jupitermaantje Io van vulkanen op de evenaar?

- a) Vulkanen aan de polen geven minder energie af dan vulkanen aan de evenaar.
- b) Aan de polen komen minder vulkanen voor dan aan de evenaar.
- c) Vulkanen aan de polen geven meer energie af dan vulkanen aan de evenaar.**
- d) Aan de polen komen meer vulkanen voor dan aan de evenaar.
- e) Er is geen enkel onderscheid tussen vulkanen aan de polen en vulkanen aan de evenaar.

Vulkanen op Io komen op alle breedtes voor, maar aan de polen zijn de uitbarstingen gemiddeld krachtiger en geven ze meer materiaal en energie af dan die rond de evenaar. Dit heeft te maken met getijdenkrachten.

4. Je staat op de Maan op 12 augustus 2026. Wat is absoluut onmogelijk?

- a) Je ziet de schaduw van de Maan op de Aarde.
- b) Je ziet in één oogopslag tegelijkertijd plekken op de Aarde waar de Zon opkomt en andere plekken waar de Zon ondergaat.
- c) Je ziet de Aarde en de Zon hoog aan de hemel staan.**
- d) Je ziet het oppervlak van de Maan.
- e) Niets van de bovenstaande zaken is onmogelijk.

Op 12 augustus 2026 vindt er een totale zonsverduistering plaats. Dan staat de Maan dus precies tussen de Zon en de Aarde in en werpt de Maan een schaduw op de Aarde. Deze schaduw op de Aarde is zichtbaar vanop de Maan. Als je van de schaduwkant van de Maan naar de Aarde kijkt, zie je dus ook het volledige verlichte gedeelte van de Aarde, dus de volledige dagkant. Je ziet dan aan de oostkant van de planeet plekken waar het zonsondergang is en op de westkant van de planeet plekken waar het zonsopkomst is. Uiteraard kun je ook het oppervlak van de Maan zien, je staat er immers op. Het is echter onmogelijk dat zowel de Aarde als de Zon hoog aan de hemel staan vanop jouw positie op de Maan. Dat komt omdat de Aarde en de Zon 180 graden uit elkaar staan aan de hemel omdat de Maan precies tussen hen in staat.

5. Het interval tussen twee opeenvolgende opposities van een bepaalde planeet is 373,1 dagen.

Welke planeet is het?

- a) Mars
- b) Jupiter
- c) Saturnus
- d) Uranus
- e) Dit is niet mogelijk.**

Volgende formule geeft het verband weer tussen de synodische periode (de tijd P_{opp} tussen twee opposities), de siderische periode P (omlooperperiode) van de planeet en de omlooptijd P_{\oplus} van de Aarde:

$$\frac{1}{P_{\text{opp}}} = \frac{1}{P_{\oplus}} - \frac{1}{P}$$

wat $P = 47,5$ jaar oplevert. Dit geldt voor geen enkele planeet in het zonnestelsel (... , Saturnus: 29,46 jaar, Uranus: 84,02 jaar, ...).

6. Welke uitspraak over zonnevlekken is correct?

- a) Ze zijn heter dan hun omgeving maar lijken donker door lagere emissiviteit.
- b) Ze hebben een sterker magnetisch veld dan hun omgeving.**
- c) Ze bestaan uit kouder, maar dichter plasma.
- d) Ze ontstaan door kernreacties aan het oppervlak.
- e) Geen van bovenstaande uitspraken is correct.

Zonnevlekken zijn gebieden op het oppervlak van de Zon met een sterker magnetisch veld dan hun omgeving. Dat sterke veld remt de convectie van heet plasma vanuit het binnenste, waardoor er minder warmte naar het oppervlak komt.

7. De Zon roteert differentieel: de evenaar draait sneller dan de polen. Wat is een direct gevolg van deze differentiële rotatie?

- a) Magnetische veldlijnen van de Zon worden getwist en opgehoopt, wat zonnevlekken en coronale massa ejecties veroorzaakt**
- b) De vorm van de Zon verandert significant.
- c) De fotosfeer wordt homogeen van temperatuur.
- d) De kernrotatie vertraagt en de energieproductie neemt af.
- e) De differentiële rotatie heeft geen invloed op de hierboven vermelde fenomenen.

Door de differentiële rotatie van de Zon (snellere rotatie aan de evenaar dan aan de polen) worden magnetische veldlijnen voortdurend uitgerekt en opgewonden.

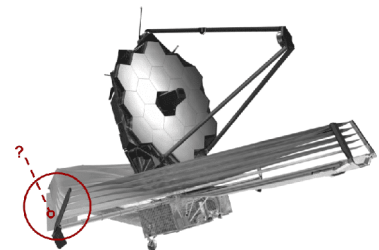
8. Een zonnecyclus duurt ongeveer 11 jaar. Welke van de volgende eigenschappen verandert systematisch tijdens een zonnecyclus?

- a) De gemiddelde temperatuur van individuele zonnevlekken.
- b) De gemiddelde helderheid van de fotosfeer.
- c) Het aantal zonnevlekken en hun magnetische polariteit.**
- d) De massa van de Zon.
- e) De centrale temperatuur van de Zon.

Dit wordt mooi weergegeven door het bekende “vlinderdiagram” (de wet van Hale).

9. Wat is de naam van de JWST-component die hiernaast is aangeduid?

- a) Antenne
- b) Zonneschild
- c) Optisch subsysteem
- d) Stabilisatieklep**
- e) Geen van bovenstaande



10. Welk instrument is geen onderdeel van de Very Large Telescope?

- a) MUSE
- b) X-SHOOTER
- c) **MICADO**
- d) MATISSE
- e) Alle genoemde instrumenten maken deel uit van de VLT.

MICADO is een geplande (maar nog niet operationele) camera voor de Extremely Large Telescope (ELT), de volgende generatie telescoop van ESO.

11. De Euclid ruimtetelescoop is ontworpen om waar te nemen op een golflengte van 550 nm tot 2 μ m. De primaire spiegel is cirkelvormig en heeft een diameter van 1,20 meter. Wat is de beste hoekresolutie die deze telescoop kan halen?

- a) **0,115''**
- b) 0,176''
- c) 0,419''
- d) 1,76''
- e) 2,4''

Gebruik het Rayleigh-criterium om de beste resolutie θ te berekenen:

$$\theta = 1.22 \cdot \lambda / D$$

met D de diameter van de spiegel en λ de kortste golflengte omdat die de hoogste resolutie zal opleveren: $\theta = (1.22 \times 550 \text{ nm} / 1,2 \text{ m}) = 5,59 \cdot 10^{-7} \text{ radialen} = 0,115''$.

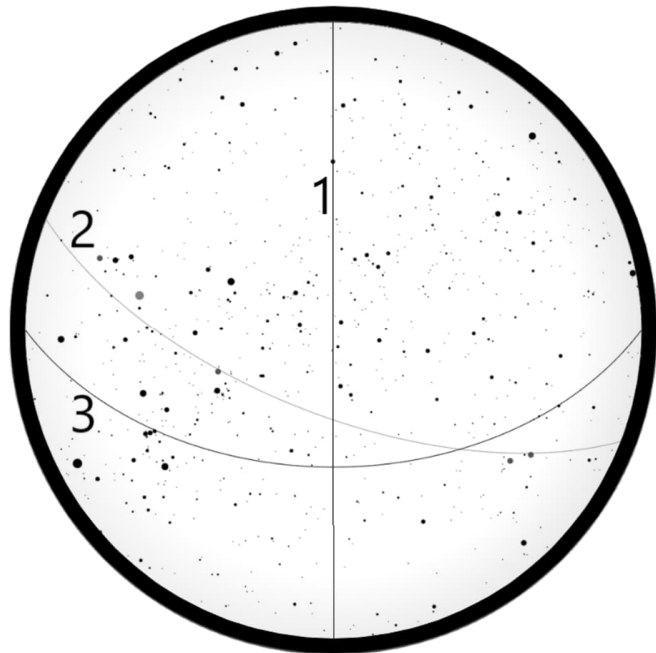
12. Surf naar <https://nso.edu/for-public/exciting-events/>. In welk van onderstaande landen zal de totale zonsverduistering in augustus 2026 mooi te zien zijn? Je kan hiervoor de Solar Eclipse Map gebruiken die terug te vinden is op bovenstaande website.

- a) Duitsland
- b) België
- c) **Spanje**
- d) Verenigd Koninkrijk
- e) Zwitserland



13. Benoem elk van de genummerde lijnen op de figuur hiernaast.

- a) 1 - Ecliptica; 2 - Hemelevenaar; 3 - Lokale meridiaan
- b) 1 - Lokale meridiaan; 2 - Ecliptica; 3 - Galactische evenaar
- c) 1 - Galactische evenaar; 2 - Hemelevenaar; 3 - Ecliptica
- d) 1 - Lokale meridiaan; 2 - Ecliptica; 3 - Hemelevenaar**
- e) 1 - Lokale meridiaan; 2 - Hemelevenaar; 3 - Ecliptica



Lijn 1 verbindt de noordelijke en zuidelijke windrichtingen en loopt door het midden van de kaart (het zenit), dus moet deze overeenkomen met de lokale meridiaan. Een goede referentie om te zien dat deze lijn de noordelijke en zuidelijke windrichtingen verbindt, is dat de ster Polaris (α UMi) zich zeer dicht bij deze lijn bevindt.

Lijn 2 loopt door dierenriemconstellaties zoals Kreeft, Tweelingen, Ram, Vissen en Waterman. Deze lijn is dus de ecliptica. Een andere manier om te herkennen dat deze lijn de ecliptica is, is door te kijken naar de verschillende planeten die zich er dichtbij bevinden.

Lijn 3 verbindt de oostelijke en westelijke windrichtingen. Bovendien is een andere goede referentie dat deze lijn zich zeer dicht bij de gordel van Orion bevindt, meer specifiek bij de ster Mintaka (δ Ori). Dit is dus de hemelevenaar.

14. Waarom zien we verschillende sterrenbeelden op verschillende momenten van het jaar?

- a) De richting waarin we 's nachts naar de hemel kijken, verandert doordat de Aarde rond de Zon draait.**
- b) Sterren bewegen door de ruimte, waardoor hun positie ten opzichte van elkaar over de tijdspanne van een jaar verandert.
- c) De rotatie-as van de Aarde verandert van richting doorheen het jaar.
- d) Sterrenbeelden draaien één keer rond de Aarde in de loop van een jaar.
- e) De sterrenbeelden blijven hetzelfde, maar doordat de Aarde rond de Zon draait, kijken we doorheen het jaar vanuit een andere hoek waardoor hun projectie aan de hemel anders lijkt.

De aardse omloop rond de Zon zorgt ervoor dat we elke nacht in een andere richting naar de sterrenhemel kijken.

15. Wat is het grootste bereik van breedtegraden ϕ waarvoor de verbindingslijn tussen de sterren Rigel ($\alpha_R = 5^h 14^m 32^s$, $\delta_R = -8^\circ 12' 5.9''$) en Betelgeuse ($\alpha_B = 5^h 56^m 33^s$, $\delta_B = 7^\circ 24' 40.3''$) op een bepaald moment van de dag verticaal lijkt? Geef het antwoord met een nauwkeurigheid van 5 graden.

- a) $-15^\circ < \phi < +15^\circ$
- b) $-25^\circ < \phi < +25^\circ$
- c) $-35^\circ < \phi < +35^\circ$
- d) $-45^\circ < \phi < +45^\circ$
- e) $-55^\circ < \phi < +55^\circ$

Rigel en Betelgeuse definiëren een grote cirkel. Deze lijkt verticaal wanneer het zenit zich op deze grote cirkel bevindt.

De twee sterren staan dicht bij elkaar aan de hemel, waardoor we het gebied dat ze aan de hemelbol beslaan bij benadering als vlak kunnen beschouwen. De helling die de verbindingslijn tussen de twee sterren maakt met de hemelevenaar kan dus benaderd worden aan de hand van de goniometrische formules voor rechthoekige driehoeken, zodat

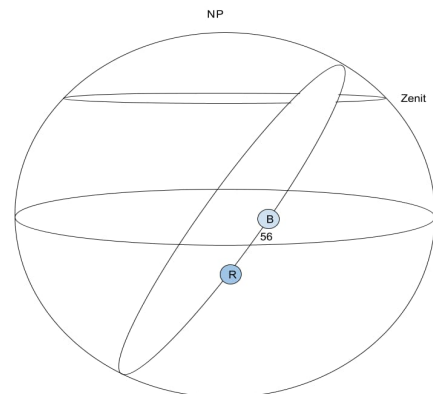
$$\tan \theta = \frac{\delta_B - \delta_R}{\alpha_B - \alpha_R}$$

De hoek die hun grote cirkel met de hemelevenaar maakt, is de waarde θ . De rechte klimming van het snijpunt blijkt er niet toe te doen.

In de loop van een dag beweegt het zenit zich langs een kleine cirkel met hoogte ϕ boven de evenaar, waarbij ϕ de plaatselijke breedtegraad is. De maximale breedtegraad waarvoor dit mogelijk is

$$\arctan \frac{\delta_B - \delta_R}{\alpha_B - \alpha_R} \approx 56^\circ$$

zoals te zien is op de figuur rechts.

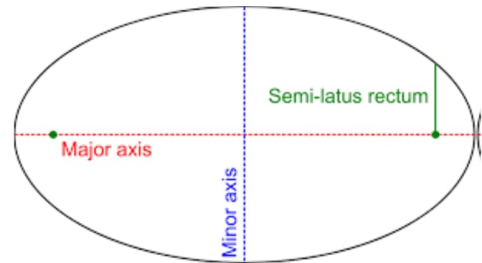


16. De baan van een komeet heeft een excentriciteit $e = 0,12$ en de lengte van de halve lange baanas bedraagt $a = 4$ AE (astronomische eenheden). Als de komeet op Aarde zichtbaar was in 2025, in welk jaar zal ze dan opnieuw te zien zijn?

- a) 2030.
- b) 2031.
- c) 2032.
- d) **2033.**
- e) 2034.

Volgens de derde wet van Kepler staan de lengte van de halve lange baanas bedraagt a (uitgedrukt in astronomische eenheden) en de omlooperperiode P (uitgedrukt in jaar) met elkaar in verband volgens $P^2 = a^3$. Hiermee vinden we dat $P = 8$ jaar.

17. De zogenoemde semi-latus rectum van een ellips is de afstand tussen een van de brandpunten en het punt op de ellips dat zich direct erboven of eronder bevindt, zoals weergegeven op de figuur hiernaast. Beschouw een planeet met een zeer excentrische baan met een semi-latus rectum die bijna honderd keer kleiner is dan de halve grote as. Wat is de excentriciteit van de baan van deze planeet?



- a) 0,99
- b) 0,995**
- c) 0,9999
- d) 0,99995
- e) 0,999999

Noemen we ℓ de lengte van de semilatus rectum en zij y de afstand tussen het punt L op de ellips behorend bij de latus rectum en het andere brandpunt (het brandpunt dat er niet direct onder ligt), dan vormen de twee brandpunten en L een rechthoekige driehoek. Als a de lengte is van de halve grote as van de ellips en e de excentriciteit, dan is de afstand tussen de twee brandpunten ae .

Aldus vinden we volgend verband:

$$y^2 = \ell^2 + (2ae)^2 \quad (1)$$

Nu is een ellips zodanig gedefinieerd dat voor elk punt dat tot de ellips behoort, geldt dat de som van de afstanden tot de twee brandpunten constant is en meer bepaald gelijk is aan $2a$, zodat

$$y + \ell = 2a \quad (2)$$

We kunnen nu (1) omvormen tot

$$(y - \ell)(y + \ell) = (2ae)^2 \quad (3)$$

Vervolgens delen we vergelijking (3) lid aan lid door vergelijking (2) en bekomen zo

$$y - \ell = 2ae^2 \quad (4)$$

Eliminatie van y tussen de vergelijkingen (2) en (4) leidt dan tot

$$\ell = a(1 - e^2) \quad (5)$$

waaruit verder volgt dat

$$e = \sqrt{1 - \frac{\ell}{a}} \quad (6)$$

Er is verder gegeven dat $a = 100 \ell$. Als we dit invullen in (6) bekomen we het resultaat.

18. Welke voorwaarde is nodig om een gas als plasma te beschouwen?

- a) De temperatuur moet hoger zijn dan 10^6 K.
- b) Het gas moet elektrisch geladen zijn.
- c) De afmetingen van het systeem moeten veel groter zijn dan de Debye-lengte en er moeten veel deeltjes in een Debye-sfeer zitten.**
- d) Het gas moet enkel uit ionen bestaan.
- e) Alle vier bovenstaande voorwaarden moeten voldaan zijn.

De Debye-lengte is de karakteristieke afstand waarbinnen elektrische velden worden afgeschermd in een plasma. De Debye-sfeer is een denkbeeldige bol met straal gelijk aan de Debye-lengte rond een geladen deeltje.

Er bestaan ook plasma's bij veel lagere temperaturen dan 10^6 K (bijvoorbeeld in neonlampen). Een plasma is quasi-neutraal, niet gewoon 'geladen'. Een plasma bestaat niet alleen uit ionen, er moeten ook vrije elektronen zijn.

19. Welke grootte bepaalt rechtstreeks de piekgolflengte van het spectrum van een ster?

- a) Massa
- b) Straal
- c) Oppervlaktetemperatuur**
- d) Lichtkracht
- e) Magnetische veldsterkte

Dit wordt beschreven door de verschuivingswet van Wien.

20. De totale lichtkracht van de fictieve ster Arat is $150\times$ groter dan de lichtkracht van onze Zon. Arat is een K-type ster. Hoe verhoudt de straal van Arat zich tot die van onze Zon?

- a) Tussen 27 en 43 keer groter.
- b) Tussen 15 en 27 keer groter.**
- c) Tussen 11 en 15 keer groter.
- d) Tussen 8 en 11 keer groter.
- e) Tussen 4 en 8 keer groter.

We kunnen aan de hand van de wet van Stefan-Boltzmann ($L = 4\pi R^2 \sigma T^4$) berekenen dat voor een lichtkracht van $L = 150 L_{\odot}$ en een temperatuur van $T \approx 4300$ K (typisch voor een K-type

ster), de straal gelijk moet zijn aan: $\frac{R_*}{R_{\odot}} = \sqrt{\frac{L_*}{L_{\odot}} \cdot \frac{T_{\odot}^4}{T_*^4}} = \sqrt{150 \cdot \left(\frac{5780 \text{ K}}{4300 \text{ K}}\right)^4} \approx 22$.

21. Welke uitspraak over witte dwergen is juist?
- Ze worden ondersteund door thermische druk.
 - Hun straal neemt toe met toenemende massa.
 - Ze bestaan voornamelijk uit neutronen.
 - Ze worden ondersteund door elektronen-degeneratiedruk.**
 - Geen van bovenstaande uitspraken is correct.

Een witte dwerg is het compacte overblijfsel van een ster zoals de Zon. De zwaartekracht probeert de ster verder samen te drukken, maar dat wordt tegengehouden door de elektronen-degeneratiedruk (kwantummechanisch effect door het uitsluitingsprincipe van Pauli).

Bij witte dwergen is de thermische druk onvoldoende om de zwaartekracht te weerstaan.

Hoe groter de massa van een witte dwerg, hoe kleiner de straal.

Neutronensterren bestaan voornamelijk uit neutronen, maar dat is niet het geval bij witte dwergen.

22. De Orionnevel heeft een hoekdiameter van 1° aan de hemel en bevindt zich op een afstand van 412,1 parsec van de Aarde. Wat is de beste schatting voor de tijd die een lichtfoton nodig heeft om de gehele diameter van de nevel te doorkruisen?

- 1,21 jaar
- 13,92 jaar
- 23,47 jaar**
- 563,40 jaar
- 1345,01 jaar

We gebruiken de kleine-hoekbenadering: $D \approx d \cdot \theta$

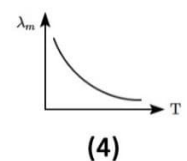
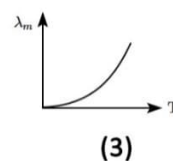
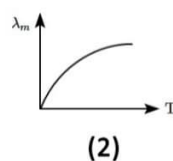
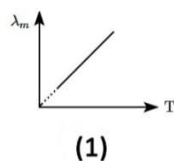
waarbij D de ruimtelijke diameter is van het object, θ de hoekdiameter uitgedrukt in radialen en d de afstand. Aangezien $1^\circ \approx 0,01745$ rad vinden we hiermee $D \approx 412,1 \text{ pc} \cdot 0,01745 \approx 7,19 \text{ pc}$.

Dit komt overeen met 23,47 lichtjaar, en een foton reist uiteraard aan de lichtsnelheid.

23. Als λ_m de golflengte is waarbij de stralingsintensiteit van een ster maximaal is en T de effectieve temperatuur is, welke van de grafieken hiernaast geeft dan het

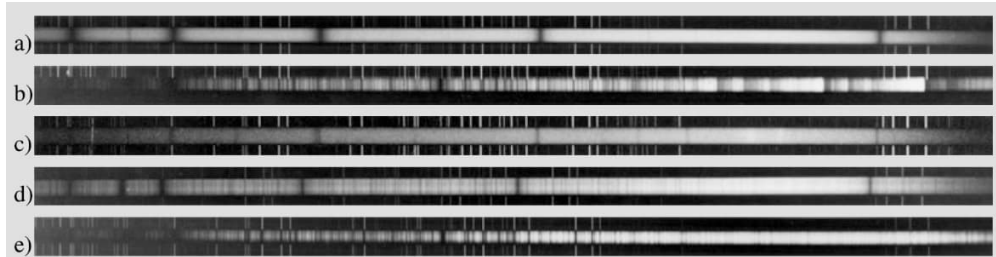
verband tussen λ_m en T schematisch weer?

- (1)
- (2)
- (3)
- (4)**
- Dit kan niet afgeleid worden uit de gegeven informatie.



Het verband tussen λ_m en T wordt beschreven door de verschuivingswet van Wien, waaruit volgt dat $\lambda_m \sim \frac{1}{T}$. De grafiek wordt dus weergegeven door een hyperbool en moet uiteraard dalend zijn.

24. Het beeld hiernaast toont de spectra van vijf hoofdreekssterren in het zichtbare deel van het spectrum. Welke van deze sterren heeft de laagste oppervlaktetemperatuur?



- a) a
b) **b**
c) c
d) d
e) e

Spectra b en e hebben de piekintensiteit in het roodere deel van het spectrum (nabij de rechterrاند) en de laagste intensiteit in het violette deel (links), wat betekent dat ze koeler zijn dan de rest. Verder heeft het spectrum b de meer prominente TiO-absorptiebanden in het rode deel van het spectrum, wat kenmerkend is voor M-type sterren.

25. Twee sterren, A en B zitten beide op de hoofdreeks en fuseren waterstof tot helium via de proton-proton reactie. Beide sterren hebben dezelfde samenstelling en opaciteit. In een eerste orde benadering, kennen we schalingswetten voor temperatuur T , dichtheid ρ , druk P en lichtkracht L in termen van straal R , massa M , samenstelling (via het gemiddeld moleculair gewicht μ) en opaciteit κ . Hieruit kan je een evenredigheid afleiden tussen straal en massa. Welke is de juiste?

Je mag aannemen dat $L \propto M \rho T^\nu$, $L \propto \mu^4 M^3 \kappa^{-1}$, $T \propto \mu M R^{-1}$, $P \propto M^2 R^{-4}$, $\rho \propto M R^{-3}$.

- a) $R \propto M^{(\nu-1)/(\nu+3)}$
b) $R \propto M^{\nu-1/\nu+3}$
c) $R \propto M^{(\nu+3)/(\nu-1)}$
d) $R \propto M^{\nu+3/\nu-1}$
e) Geen van bovenstaande

Gegeven zijn volgende relaties:

$$L \propto M \rho T^\nu \quad (1)$$

$$L \propto \mu^4 M^3 \kappa^{-1} \quad (2)$$

$$T \propto \mu M R^{-1} \quad (3)$$

$$P \propto M^2 R^{-4} \quad (4)$$

$$\rho \propto M R^{-3} \quad (5)$$

We vertrekken van (1) en vullen we (5) en (3) in, wat leidt tot

$$L \propto M M R^{-3} \mu^\nu M^\nu R^{-\nu} = M^{2+\nu} R^{-3-\nu} \mu^\nu \quad (6)$$

Vervolgens maken we gebruik van (2), zodat

$$R^{-3-\nu} M^{2+\nu} \mu^\nu \propto \mu^4 M^3 \kappa^{-1}$$

Deze uitdrukking kan nu omgevormd worden naar

$$R^{3+\nu} \propto M^{2+\nu} \mu^\nu \mu^{-4} M^{-3} \kappa = M^{\nu-1} \mu^{\nu-4} \kappa$$

zodat

$$R \propto M^{\frac{\nu-1}{\nu+3}}$$

26. Welke van de volgende beweringen zijn waar voor een sterrenhoop bestaande uit hoofdreekssterren?

- (P) Voor twee sterrenhopen met dezelfde totale massa zal de sterrenhoop met het grootste aantal sterren helderder zijn, gemeten in lichtkracht per massa-eenheid.
- (Q) Het afbuigingspunt van de hoofdreeks voor sterrenhopen ligt bij hogere temperaturen naarmate ze ouder zijn.
- (R) Het afbuigingspunt van de hoofdreeks voor sterrenhopen ligt bij lagere lichtkracht naarmate ze ouder zijn.

Neem aan dat de massa-lichtkrachtrelatie $L \sim M^{3.5}$ geldt voor hoofdreekssterren.

- a) Zowel P als R zijn waar.
- b) Enkel P is waar.
- c) Enkel R is waar.**
- d) De drie uitspraken (P, Q en R) zijn waar.
- e) Zowel P als Q zijn waar.

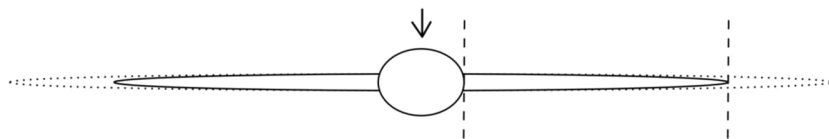
Voor de gegeven massa-lichtkrachtrelatie is lichtkracht per massa-eenheid $L/M \sim M^{2.5}$. Deze waarde zal dus groter zijn wanneer er minder zware sterren zijn, in tegenstelling tot wanneer er veel lichte sterren zouden zijn.

Het afbuigingspunt voor sterrenhopen ligt bij hogere temperaturen als ze jonger zijn.

Hoofdreekssterren met een hoge temperatuur zijn meestal kortlevende sterren en zullen dus niet voorkomen in een oude sterrenhoop. Sterren met een lage lichtkracht zijn meestal langlevende hoofdreekssterren en zullen dus nog steeds voorkomen in een oude sterrenhoop.

27. Wat is de naam van het gebied dat is aangegeven in de schets hiernaast van het 'zijaanzicht' van het Melkwegstelsel?

- a) galactisch centrum
- b) galactische bulge**
- c) galactische schijf
- d) galactische halo
- e) galactisch continuüm



Het gebied dat met de pijl aangegeven is op die schets van het zijaanzicht van het Melkwegstelsel is de centrale verdikking van sterren, beter bekend als de galactische bulge.

28. Twee sterrenstelsels ver weg staan op dezelfde afstand van ons in dezelfde richting. Eén van de twee zendt merkbaar meer blauw licht uit dan de andere. Wat leert dit ons dit?

- a) **Het blauwere stelsel is jonger dan de rodere.**
- b) Het rodere stelsel is jonger dan de blauwere.
- c) Het blauwere stelsel heeft meer sterren dan het rodere.
- d) Het rodere stelsel is heter dan het blauwere.
- e) Het blauwere stelsel bevat meer stof dan het rodere.
- f) We kunnen hieruit niets afleiden zonder meer informatie.

De twee sterrenstelsels staan op dezelfde afstand zodat de roodverschuiving niet van belang is. Ze staan ook in dezelfde richting, waardoor verschillen door het interstellair medium ook geen rol spelen. Blauwe sterren zijn heet en massief, maar leven kort. Een sterrenstelsel dat relatief blauw lijkt, heeft dus veel jonge sterren (recente stervorming).

29. Welke uitspraak klopt wél over “green valley” sterrenstelsels?

- a) De meeste green valley stelsels zitten midden in een overgang van een quiescent stelsel naar een stervormend stelsel.
- b) **De activiteit van een actieve galactische kern kan ervoor zorgen dat een stelsel in de green valley terechtkomt.**
- c) Green valley stelsels staan ook wel bekend als “green peas” omdat ze groen zijn (door sterke OIII-emissie) en compact in afbeeldingen.
- d) Green valley stelsels hebben meestal geen bulge.
- e) Geen van bovenstaande uitspraken klopt.

Actieve galactische kernen kunnen stervorming “uitzetten” door koud gas te verwijderen van een sterrenstelsel. Daardoor beweegt het stelsel van de actieve stervormende groep weg in de richting van passieve “quiescent” stelsels. Op weg daarheen bewegen ze door de zogenoemde green valley.

30. Welk van de onderstaande is een van de redenen waarom we in het huidige universum relatief weinig grote, massieve sterren waarnemen in vergelijking met kleinere sterren met een lagere massa (zoals de Zon)?

- a) Massieve sterren kunnen enkel ontstaan in het centrum van sterrenstelsels, terwijl sterren met een lagere massa overal in het universum kunnen ontstaan.
- b) **Massieve sterren hebben een veel kortere levensduur dan sterren met een lagere massa, omdat ze hun brandstof veel sneller verbruiken.**
- c) Massieve sterren ontstaan enkel door botsing en samensmelting van twee of meerdere sterren, en zulke gebeurtenissen zijn vrij zeldzaam.
- d) Massieve sterren ontstonden enkel tijdens de beginfase van het heelal, dus de meeste ervan zijn al vergaan.
- e) Massieve sterren komen even vaak voor als sterren met een lagere massa, maar zijn moeilijker waarneembaar omdat ze minder licht uitstralen.

We zien relatief weinig grote, massieve sterren omdat ze minder vaak ontstaan dan kleine sterren en ze bovendien snel sterven door hun hoge fusiesnelheid. Het overgrote deel van de sterren zijn dus kleine, langlevende sterren, terwijl massieve sterren eerder zeldzaam zijn.

Vraag	Antwoord	Bronvermelding
1.	A	
2.	B	
3.	C	
4.	C	
5.	E	
6.	B	
7.	A	
8.	C	
9.	D	
10.	C	
11.	A	
12.	C	
13.	D	
14.	A	
15.	E	
16.	D	
17.	B	
18.	C	
19.	C	
20.	B	
21.	D	
22.	C	
23.	D	
24.	B	
25.	A	
26.	C	
27.	B	
28.	A	
29.	B	
30.	B	

Open vragenreeks I: Proba 3

Voor deze vragenreeks kan onder andere gebruikgemaakt worden van volgende gegevens:

Universele gravitatieconstante: $G = 6,67259 \times 10^{-11} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}\text{s}^{-2}$

Straal van de Zon: $R_{\text{zon}} = R_{\odot} = 696340 \times 10^3 \text{ m}$

Astronomische eenheid: $1 \text{ AE} = 149597871 \times 10^3 \text{ m}$

Massa van de Aarde: $M_{\text{aarde}} = M_{\oplus} = 5,97 \times 10^{24} \text{ kg}$

Straal van de Aarde: $R_{\text{aarde}} = R_{\oplus} = 6371 \times 10^3 \text{ m}$

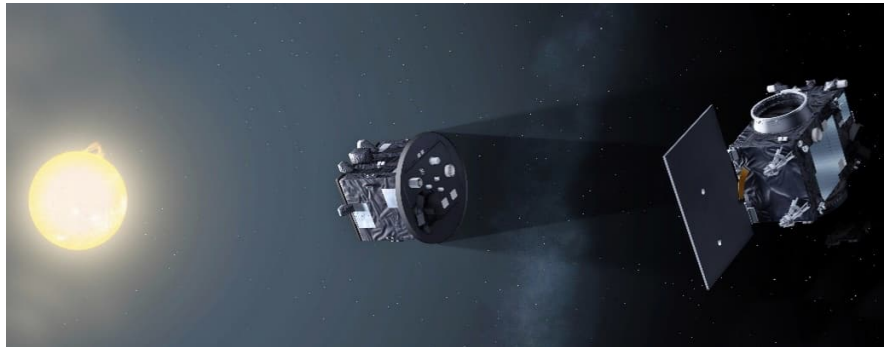
Vraag 1.

De Proba-3 satelliet is de nieuwste ruimtemissie van de ESA die observaties zal maken van de Zon. De satelliet werd succesvol gelanceerd in 2025, en is voor een deel gemaakt in België. België is tevens hoofdonderzoeker voor de data van deze missie. Proba-3 bestaat uit twee satellieten die tijdens de metingen nauwkeurig in formatie vliegen.

- a) Leg in enkele zinnen uit waarom de missie twee satellieten gebruikt en welk voordeel dit biedt ten opzichte van een traditionele coronagraaf.

De missie gebruikt twee satellieten zodanig dat de occulter-satelliet een langdurige, zeer nauwkeurige zonsverduistering kan creëren voor de andere satelliet om de corona te observeren tot vlak tegen de buitenrand van de Zon. Bij een traditionele coronagraaf wordt een schijfje op vaste afstand voor de camera gehangen, maar de zonsverduistering is dan minder nauwkeurig en kan ook minder lang worden aangehouden.

Veronderstel nu dat de twee satellieten op een gegeven punt in hun baan in lijn met elkaar staan waarbij de “camera-satelliet” zich op een afstand $D = 1 \text{ AE}$ (astronomische eenheid) van het centrum van de Zon bevindt (zie de figuur). De camera op de



camera-satelliet beschouwen als een puntbron. De “afdek-satelliet” beschouwen we als een cirkelvormige schijf en bevindt tussen de camera en de Zon.

- b) Maak een berekening om de afstand tussen beide satellieten te vinden waarbij de afdek-satelliet het zonsoppervlak exact afschermt van de camera (dit wil zeggen de camera mag niets meer van het zonsoppervlak zien, maar tegelijk mag er ook niet meer dan enkel het zonsoppervlak afgedekt worden); daarbij mag de Zon als een perfecte bol beschouwd worden. Geef je berekening weer en geef ook aan welke andere gegevens je gebruikt in je berekening. Druk je resultaat uit in meter en rond af tot 2 cijfers na de komma.

De te bepalen afstand kan gevonden worden via goniometrische gelijkheden op basis van onderstaande schets (niet op schaal). We vinden

$$\sin \theta = \frac{R_{\odot}}{D}$$

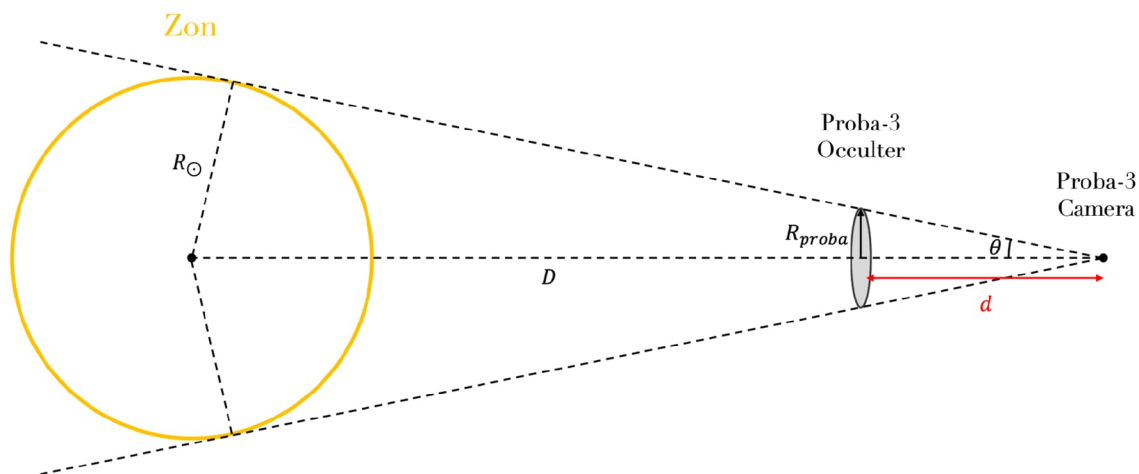
waaruit dan θ volgt.

De afstand d tussen beide satellieten vinden we dan via

$$\tan \theta = \frac{R_{Proba}}{d}$$

zodat

$$d = \frac{R_{Proba}}{\tan \theta} = \frac{R_{Proba}}{\tan(\arcsin \frac{R_{\odot}}{D})} = \frac{0,7 \text{ m}}{\tan(\arcsin \frac{696340 \text{ km}}{149597871 \text{ km}})} = 150,38 \text{ m}$$



- c) Leg tot slot in enkele zinnen uit waarom een volledige afdekking van het zonsoppervlak essentieel is voor de observaties die Proba-3 tot doel heeft.

Het zonsoppervlak is zeer, zeer fel in vergelijking met de zonnecorona. Om de transparantere structuren in de corona te kunnen zien, moet het zonsoppervlak volledig afgedekt worden. Zoniet zou het intense licht van het zonsoppervlak domineren in de camera, waardoor de corona niet meer zichtbaar is.

Vraag 2

Veronderstel dat de Proba-3 satellieten in formatie in een cirkelvormige baan rond de Aarde bewegen, waarbij de radiale afstand tussen beide banen constant is. Als beide satellieten passief (dit wil zeggen zonder bijsturing) in hun baan rond de Aarde vliegen, zullen ze niet meer perfect opgelijnd blijven na één of meer omwentelingen. In deze vraag kwantificeren we dit in een zeer vereenvoudigde situatie. Veronderstel daartoe dat beide satellieten in een cirkelvormige baan rond de Aarde cirkelen, met de radiale afstand tussen beide banen deze die je in vraag 1 hebt gevonden. Neem aan dat de camera-satelliet het laagst vliegt (bekeken vanop Aarde) op een cirkelvormige baan op een hoogte $h = 600 \text{ km}$ boven het aardoppervlak. Voorts kunnen we

veronderstellen dat de massa van beide satellieten verwaarloosbaar klein is ten opzichte van de massa van de Aarde. Om onder deze assumpties in een stabiele baan rond de Aarde te blijven, kan de snelheid van de satelliet benaderd worden als

$$v_s \approx \sqrt{\frac{G \cdot M_{\oplus}}{R}}$$

waarbij G de gravitatieconstante is, M_{\oplus} de massa van de Aarde en R de straal van de satellietbaan ten opzichte van het middelpunt van de Aarde.

- a) Bereken onder bovenstaande aannames de omwentelingsperiode T voor beide satellieten, dat is de tijd die nodig is om één volledige omwenteling rond de Aarde te maken. Geef je berekeningen en tussenstappen duidelijk weer, druk je antwoord uit in seconden en rond je resultaat af tot op 2 cijfers na de komma.

Onder de veronderstelling dat beide satellieten op een cirkelvormige baan bewegen, is de omwentelingsperiode gegeven door

$$T = \frac{2\pi R}{v_s} = 2\pi R \sqrt{\frac{R}{G \cdot M_{\oplus}}} = 2\pi \sqrt{\frac{R^3}{G \cdot M_{\oplus}}}$$

We maken gebruik van de hoger gegeven waarden voor G en M_{\oplus} .

Voor de laagste satellietbaan geldt $R_l = (6371 + 600) \cdot 10^3$ m.

Voor de hoogste baan is $R_h = ((6371 + 600) \cdot 10^3 + 150,38)$ m.

We vinden dan de periodes

$$T_l = 2\pi \sqrt{\frac{((6371+600) \cdot 10^3 \text{ m})^3}{6,67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2} \cdot 5,97 \times 10^{24} \text{ kg}}} = 5795,25 \text{ s}$$

$$T_h = 2\pi \sqrt{\frac{(((6371+600) \cdot 10^3 + 150,38) \text{ m})^3}{6,67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2} \cdot 5,97 \times 10^{24} \text{ kg}}} = 5795,44 \text{ s}$$

- b) Hoeveel afstand moet de afdek-satelliet nog afleggen in zijn baan om een volledige omwenteling te voltooien op het moment dat de camera-satelliet één omloop gemaakt heeft? Druk je antwoord uit in kilometer en rond af tot op 2 cijfers na de komma.

De buitenste satelliet (afdek-satelliet) doet er $\Delta T = 0,19$ s langer over om één volledige omwenteling te maken. Gedurende deze tijd legt deze nog volgende afstand af in zijn baan om terug tot zijn startpunt te komen:

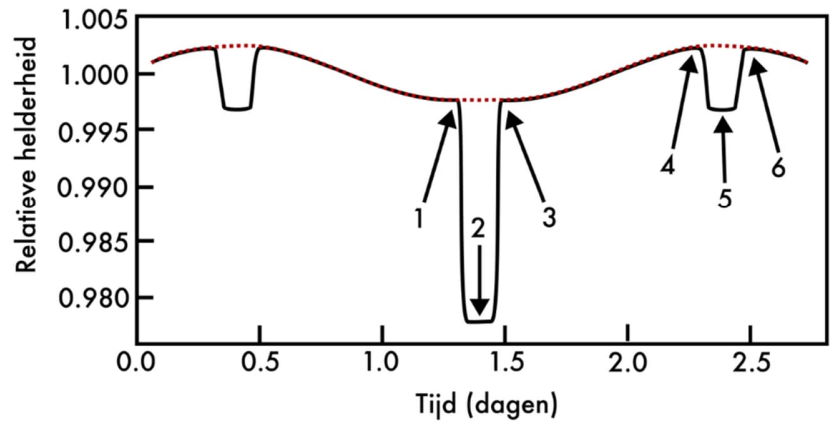
$$\Delta R = 2\pi R_h \cdot \frac{\Delta T}{T_h} = 2\pi ((6371 + 600) \cdot 10^3 + 150,38) \text{ m} \cdot \frac{0,19}{5795,44} = 1435,99 \text{ m}$$

of

$$\Delta R \approx 1,44 \text{ km}$$

Open vragenreeks II: exoplaneet Anirul

Hiernaast is een schets weergegeven van de lichtcurve in zichtbaar licht van een fictief exoplaneetsysteem waarin een planeet voor zijn ster langs beweegt (een zogenaamde transiterende planeet). De planeet zullen we Anirul noemen en de ster Arat. De relatieve helderheid van Arat staat als een volle zwarte lijn getekend als functie van de tijd in dagen. De rode stippellijn duidt de vorm aan van de curve als er geen dipjes zouden geweest zijn en is enkel relevant voor deelvraag 1b.



Vraag 1: de lichtcurve

a) Verklaar voor elk punt in de lichtcurve dat aangeduid is met een getal wat er op dat punt gebeurt met Anirul en Arat. Dit kan in één enkele zin per getal.

- 1: Eerste contact van de primaire transit, de planeet raakt vanuit ons perspectief de rand van de ster.
- 2: Maximum van de primaire transit, de schijf van de planeet staat vanuit ons perspectief volledig voor de schijf van de ster.
- 3: Laatste contact van de primaire transit, de planeet raakt de rand van de ster.
- 4: Eerste contact van de secundaire transit, de planeet raakt de rand van de ster.
- 5: Maximum van de secundaire transit, de ster bedekt de planeet.
- 6: Laatste contact van de secundaire transit, de planeet komt weer tevoorschijn van achter de ster.

b) Waarom lijkt er een golfpatroon in de curve te zitten (rode stippellijn)? Leg uit hoe dit komt.

Dit komt doordat Anirul licht weerkaatst in onze richting. Vanuit ons perspectief heeft Anirul schijnvormen: wanneer deze zich aan de achterkant van Arat bevindt, zien we de belichte kant van Anirul en wanneer deze zich aan de voorkant bevindt, zien we de schaduwkant. Die toevoeging van de planeet aan de totale gemeten helderheid verandert dus doorheen de baan van de planeet waardoor we een golfpatroon te zien krijgen.

- c) Aan de hand van de transit methode vinden we voornamelijk planeten met een korte periode (ongeveer 1 tot 100 dagen) terwijl we met de radiële snelheidsmethode planeten vinden met periodes tot wel 10000 dagen. Leg uit hoe dit komt. Er zijn meerdere redenen mogelijk.

Er zijn twee voorname redenen.

De eerste reden is puur geometrisch. De kans dat een planeet ooit voor de ster schuift, is veel groter als de planeet dicht bij de ster staat omdat er dan meer speling zit in de inclinatie die de planeet nog mag hebben om vanuit ons perspectief voor de ster te schuiven. Voor planeten die ver weg staan, moet de inclinatie bijna perfect 90 graden zijn, en dat is onwaarschijnlijk. Omdat planeten die verder weg staan een langere baanperiode hebben (derde wet Kepler), is het dus veel moeilijker om met de transit methode planeten te vinden met een lange omlooptijd. De radiële snelheidsmethode heeft hier geen last van.

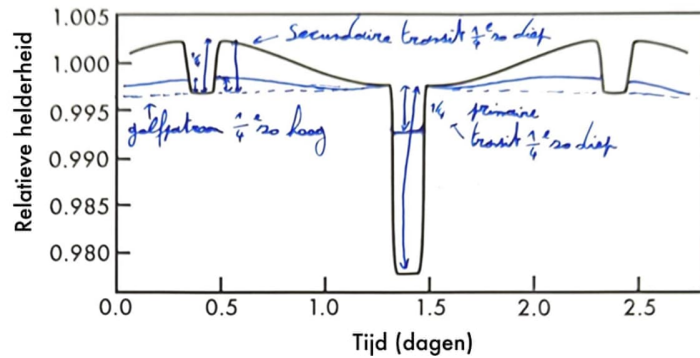
De tweede reden heeft te maken met de tijdsduur waarover data verzameld wordt. Hoe langer de omlooptijd, hoe meer tijd er zit tussen transits. En omdat je niet weet wanneer een transit zal komen bij een ster, moet je dus veel langer op regelmatige basis een ster observeren om de transit te “vangen”. Bij exoplaneten met een periode van 1 dag moet je veel minder lang onafgebroken meten en dat maakt het detecteren van planeten met een korte periode gemakkelijker. De radiële snelheidsmethode heeft hier minder last van omdat er voor de radiële snelheidsmethode geen continue regelmatige observatie nodig is.

- d) Wat kun je zeggen over de inclinatie van de baan van Anirul ten opzichte van ons? (Geen gedetailleerde berekening nodig.)

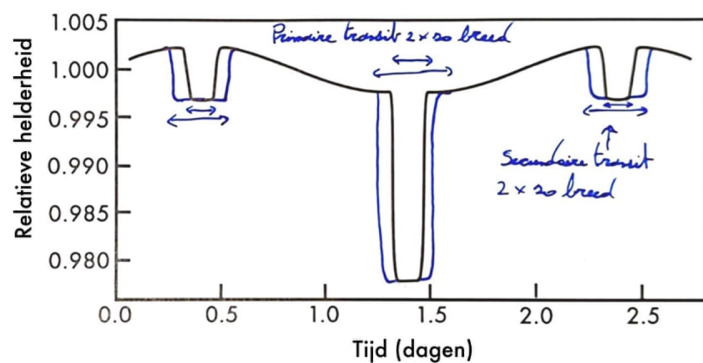
De inclinatie is bijna 90 graden, anders zouden we Anirul niet voor Arat zien schuiven.

e) Hieronder is de lichtcurve drie keer opnieuw getekend. Overteken op deze figuren met een andere kleur hoe de lichtcurve eruit had gezien als:

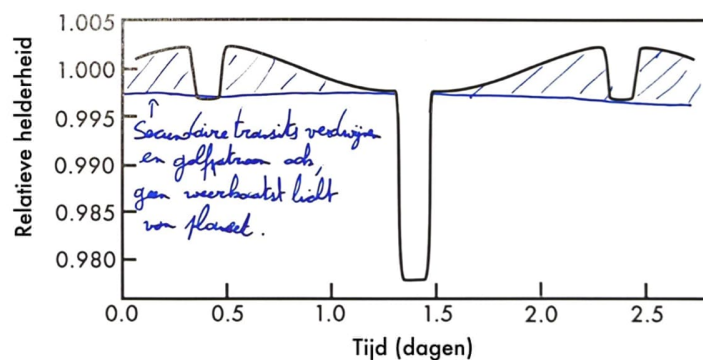
1) De straal van Anirul half zo groot was.



2) De straal van Arat tweemaal groter was. Je mag aannemen dat de massa en lichtkracht van Arat gelijk blijft.



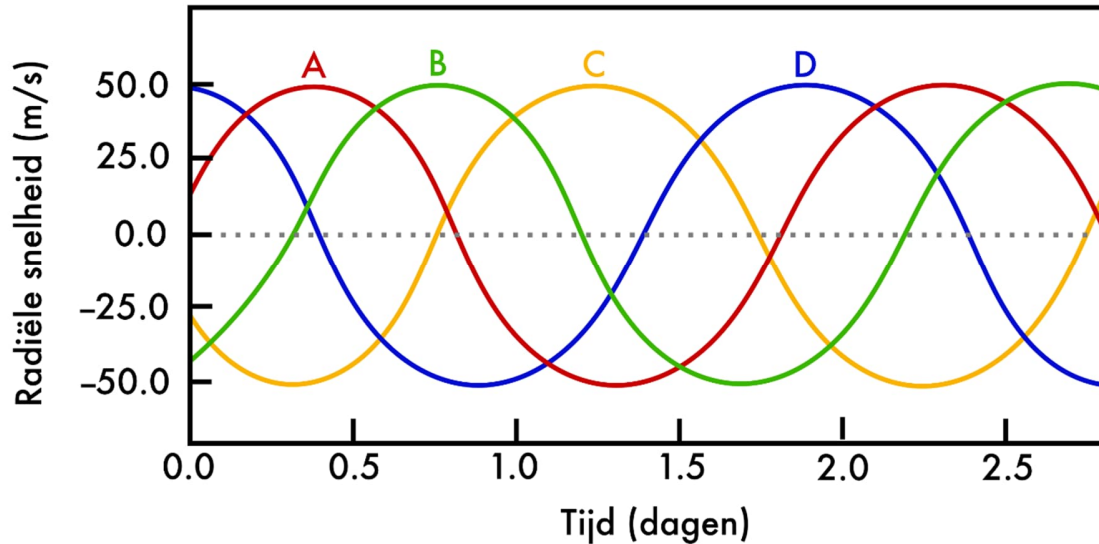
3) Anirul een pikzwarte planeet is met een albedo gelijk aan nul.



Let op! Denk goed na welke aspecten veranderen aan de lichtcurves. Duid ook aan met een pijl en enkele woorden wat er verandert en in welke mate.

Vraag 2: de radiële snelheidscurve

Hieronder staat de radiële snelheidscurve getekend van Arat die gemaakt is door naar de verschuiving van spectrale absorptielijnen in het licht van Arat te kijken.



- a) Er is echter een probleem: de tijdstempel van de data is corrupt door een bitflip in het geheugen van de telescoop. We weten wel dat één van de bovenstaande curves juist moet zijn. Welke van deze vier curves is de juiste? Beargumenteer waarom.

Curve D is de juiste. Wanneer de Anirul een transit doet, bewegen zowel de ster als de planeet haaks (transversaal) op onze gezichtslijn en moet de snelheid dus nul zijn. Aangezien de primaire transit plaatsvond rond $t = 1,4$ d, en curve D de enige is die op dat moment 0 km/s heeft, moet D wel de juiste curve zijn.

- b) De standaard formule voor de amplitude A_{RV} van de radiële snelheidscurve wordt gegeven door:

$$A_{RV} = \left(\frac{2\pi G}{P}\right)^{\frac{1}{3}} \frac{M_P \sin(i)}{(M_* + M_P)^{\frac{2}{3}} \sqrt{1 - e^2}}$$

Benoem eerst wat de betekenis is van elke parameter.

Vorm deze vergelijking vervolgens om naar een eenvoudiger vergelijking, zodat je de massa van de planeet kunt bepalen. Neem hierbij aan dat de massa van de planeet verwaarloosbaar is ten opzichte van de massa van de ster, dat de planeet zich in een cirkelbaan bevindt en overweeg welk antwoord je hebt gegeven bij vraag 1d. De vergelijking die je zoekt is dus een (heel goede) benadering van het exacte antwoord.

A_{RV} is de amplitude van de RV curve (in dit geval 50 m/s), G is de zwaartekrachtsconstante, P is de periode, M_P de massa van de planeet, M_* de massa van de ster en e de excentriciteit van de baan van de planeet.

Omdat gegeven is dat $M_P \ll M_*$, is $M_P + M_* \approx M_*$ en kunnen we bovenstaande uitdrukking vereenvoudigen tot

$$A_{RV} \approx \left(\frac{2\pi G}{P}\right)^{\frac{1}{3}} \frac{M_P \sin(i)}{M_*^{\frac{2}{3}}} \frac{1}{\sqrt{1-e^2}}$$

Ook weten we dat $i \approx 90^\circ$, dus $\sin(i) \approx 1$ en omdat Anirul in een cirkelbaan zit, is $e \approx 0$ en vinden we dus

$$A_{RV} \approx \left(\frac{2\pi G}{P}\right)^{\frac{1}{3}} M_P \cdot M_*^{-\frac{2}{3}}$$

waaruit volgt dat

$$M_P = A_{RV} \left(\frac{2\pi G}{P}\right)^{-\frac{1}{3}} M_*^{\frac{2}{3}}$$

- c) Bepaal de massa van de ster Arat. Gebruik hiervoor de informatie dat de parallax van Arat $\pi = 3,00 \cdot 10^{-3}$ boogseconden bedraagt en dat het een F-type hoofdreeks ster is met een gemeten flux van $F = 9,60 \cdot 10^{-13} \frac{J}{s \cdot m^2}$. Tip: reken eerst de lichtkracht uit.

Hoofdreekssterren hebben een vast verband tussen hun totale lichtkracht en massa, zie onderstaande vergelijkingen:

$$\begin{aligned} \frac{L}{L_\odot} &\approx 0,23 \left(\frac{M}{M_\odot}\right)^{2,3} && (M < 0,43 M_\odot) \\ \frac{L}{L_\odot} &\approx \left(\frac{M}{M_\odot}\right)^4 && (0,43 M_\odot < M < 2 M_\odot) \\ \frac{L}{L_\odot} &\approx 1,4 \left(\frac{M}{M_\odot}\right)^{3,5} && (2 M_\odot < M < 55 M_\odot) \\ \frac{L}{L_\odot} &\approx 32000 \frac{M}{M_\odot} && (M > 55 M_\odot) \end{aligned}$$

We hebben eerst de lichtkracht nodig om de massa te kunnen bepalen. We gebruiken hiervoor dat de afstand tot een ster gegeven wordt door $d [pc] = 1/\pi ["]$ met d de afstand in parsec en π de parallax in boogseconden. Invullen levert $d = 333$ pc. Vervolgens bepalen we de lichtkracht met de omgekeerde kwadratenwet: $F = \frac{L_*}{4\pi d^2}$ zodat $L_* = 1,27 \times 10^{27} W = 3,33 L_\odot$

Aangezien Arat een F-type hoofdreeks ster is, moet de massa van de ster tussen 1,1 en 1,6 M_\odot gelegen zijn. We gebruiken dus de tweede vergelijking voor de berekening van de massa:

$$M_* = \left(\frac{L_*}{L_\odot}\right)^{\frac{1}{4}} M_\odot = 2,69 \times 10^{30} \text{ kg} = 1,35 M_\odot$$

- d) Bereken dan nu de massa van onze fictieve planeet Anirul. Geef deze in kg en geef aan hoe deze massa zich verhoudt tot die van de Aarde en die van Jupiter.

Op de lichtcurve en radiële snelheidscurve kunnen we een periode opmeten van $P = 2,0$ dagen. We gebruiken de formule die we hebben afgeleid bij vraag 2 b:

$$M_P = 50 \frac{m}{s} \left(\frac{2\pi \cdot 6,674 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}}{2,0 \cdot 24 \cdot 3600 \text{ s}} \right)^{-\frac{1}{3}} (2,69 \times 10^{30} \text{ kg})^{\frac{2}{3}} = 7,2 \times 10^{26} \text{ kg}$$

Dit komt overeen met 120 M_{Aarde} of 0,38 M_{Jupiter} .

Anirul is dus zwaarder dan de Aarde maar lichter dan Jupiter.

- e) Door het spectrum van Arat te fitten met een model van een zwarte straler, vinden we dat deze een temperatuur heeft van 6500 kelvin. Gebruik de wet van Stefan-Boltzmann voor een perfecte zwarte straler om de straal van Arat te berekenen. Vergelijk deze straal met de straal van de Zon.

De wet van Stefan-Boltzmann luidt:

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4$$

We gebruiken de waarde $T = 6500 \text{ K}$ en $\sigma = 5,670 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ is de constante van Stefan-Boltzmann. Daarmee vinden we

$$R_* = \sqrt{\frac{L_*}{4\pi\sigma T^4}} = 1,00 \times 10^9 \text{ m.}$$

De straal van Arat is dus $1,00 \times 10^9 \text{ m}$. Dit is ongeveer 44% groter dan onze eigen Zon.

- f) Je hebt nu genoeg informatie om ook de straal van Anirul te bepalen. Wat is de straal van Anirul? Bereken ook hoe deze straal zich verhoudt tot die van de Aarde en die van Jupiter.

Uit de lichtcurve meten we dat de relatieve diepte van de primaire transit 0,02 bedraagt. Dit betekent dat de straal van Anirul $\sqrt{0,02} = 0,14$ keer die van Arat is, oftewel $R_p = \sqrt{0,02} R_* = 1,4 \cdot 10^8 \text{ m} = 22 R_{Aarde} = 2,0 R_{Jupiter}$. Dus Anirul is groter dan zowel Jupiter als de Aarde.

- g) Bereken nu de dichtheid van de planeet. Denk je dat Anirul een rots- of een gasplaneet is?

De dichtheid vinden we aan de hand van het volume van een bol:

$$\rho_p = \frac{M_p}{V_p} = \frac{M_p}{\frac{4}{3}\pi(R_p)^3} = 63 \text{ kg m}^{-3}$$

Ter vergelijking, de dichtheid van de Aarde is ongeveer 5500 kg m^{-3} en die van Saturnus is 690 kg m^{-3} . De dichtheid van Anirul is dus nog lager dan die van Saturnus en we kunnen er dus vanuit gaan dat Anirul een gasplaneet is.

Vraag 3: the one ring to Anirul them all

De lichtcurve die we tot nu toe hebben bestudeerd werd twaalf jaar geleden verzameld door de Kepler missie. Er is in de tussentijd echter iets bijzonders gebeurd. Er is een gasplaneet genaamd "Wensicia" heel erg dicht in de buurt van Anirul gekomen. Wensicia is met een straal van $1,2 \times 10^7 \text{ m}$ veel kleiner dan Anirul en was om die reden nog niet eerder gedetecteerd door Kepler.

*Tip: als het niet gelukt is om de vorige vraag op te lossen, mag je in deze vragen aannemen dat Arat een straal heeft van $9,00 \times 10^8 \text{ m}$ en Anirul een straal van $1,30 \times 10^8 \text{ m}$. We trekken hier geen extra punten af voor doorrekenfouten van waarden uit de vorige vraag. Voor zij die de vorige vraag wel hebben gevonden: dit zijn **niet** de juiste antwoorden; de waarden dienen enkel om het nakijken te vergemakkelijken.*

- a) Op zijn dichtste punt kwam Wensicia op een afstand van $2,2 \times 10^8 \text{ m}$ van het middelpunt van Anirul te staan. Bepaal de Rochelimit van Wensicia. Zorgde deze ontmoeting ervoor dat

Wensicia uit elkaar viel of overleefde ze? Je mag aannemen dat de massa van Wensicia $1,6 \times 10^{23}$ kg bedraagt en als benadering de Rochelimiet gebruiken voor een star lichaam.

De dichtheid van Wensicia is gelijk aan $\rho = \frac{1,6 \times 10^{23} \text{ kg}}{\frac{4}{3}\pi \cdot (1,2 \times 10^7 \text{ m})^3} = 22 \text{ kg m}^{-3}$.

Voor een star lichaam is de Rochelimiet gegeven door:

$$d = R_M \left(2 \frac{\rho_M}{\rho_m} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Hierbij is R_M de straal van het primaire object (in dit geval Anirul), ρ_M de dichtheid van het primaire object en ρ_m de dichtheid van het secundaire object (hier Wensicia). Invullen geeft:

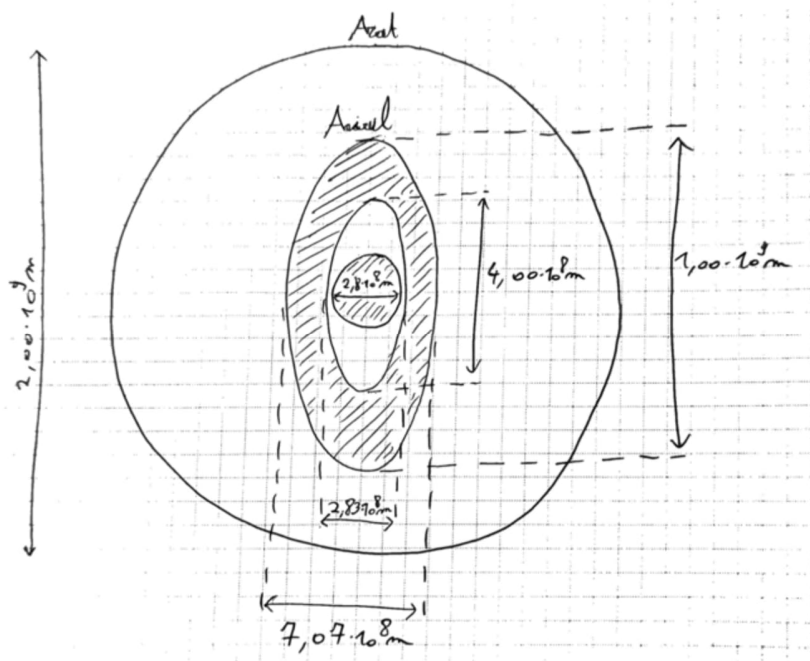
$$d = 1,4 \cdot 10^8 \text{ m} \left(2 \frac{63 \text{ kg m}^{-3}}{22 \text{ kg m}^{-3}} \right)^{\frac{1}{3}} = 2,5 \cdot 10^8 \text{ m}$$

De Roche limiet is dus $d = 2,5 \cdot 10^8$ m en aangezien Wensicia tot op $2,2 \cdot 10^8$ m van de kern van Anirul is genaderd, is Wensicia dus uit elkaar gevallen. Het gas van Wensicia is dus waarschijnlijk in een grote ring veranderd rond Anirul.

Door deze ontmoeting kreeg Anirul een ring van gas die nog mooier is dan de ringen van Saturnus en die zich uitstrekt van $r_{in} = 2,00 \cdot 10^8$ m gemeten vanaf het middelpunt van Anirul tot een afstand van $r_{out} = 5,00 \cdot 10^8$ m van de kern. Nu is de vraag: als we na de vorming van deze ringen opnieuw met Kepler naar het licht van Arat zouden kijken, zouden we de ringen dan kunnen detecteren?

- b) Maak een schets van hoe het systeem op het hoogtepunt van de primaire eclips eruit zou zien vanuit ons perspectief. Welk deel van de schijf van de ster zou op dat moment bedekt zijn vanuit ons perspectief? Arceer de delen van de ster die bedekt zijn. Neem aan dat de ring een inclinatie heeft van 45° ten opzichte van ons. Merk op dat de inclinatie niet hetzelfde is als de positiehoek van een sterrenkundig object. De positiehoek kennen we niet en mag je dus willekeurig kiezen. Zoek voor de zekerheid op wat het verschil is. Je mag ervan uitgaan dat de inclinatie van de baan van Anirul precies gelijk is aan 90° . Probeer de verhoudingen tussen de verschillende afmetingen ongeveer juist te tekenen.

Zie de schets.



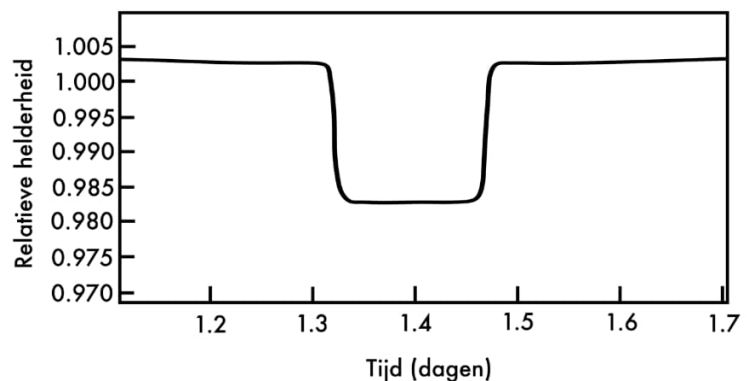
- c) Wat is de diepte van de primaire transit nu deze ring toegevoegd is aan Anirul? Neem aan dat de ring van Anirul 6% van het licht dat erop valt blokkeert. De ring heeft dus een transparantie van 94%.

De ringen hebben een oppervlakte van $A_r = \pi r_{out}^2 - \pi r_{in}^2$ maar doordat we onder een hoek van 45° graden kijken, worden de ringen in één richting een factor $\sqrt{2}$ kleiner en omdat de ringen maar 6% van het licht tegenhouden, is de effectieve geprojecteerde oppervlakte gelijk aan $A_{r,eff} = \frac{0,06}{\sqrt{2}} (\pi r_{out}^2 - \pi r_{in}^2)$. Belangrijk hierbij is om zich te realiseren dat de geprojecteerde binnenste straal van de ring gelijk is aan $r_{in} = 1,41 \times 10^8$ m, wat groter is dan de straal van de planeet. Er bestaat dus geen overlap tussen de schijf van de planeet en de ring en we kunnen de oppervlakte van beide dus gewoon optellen om de totale bedekking te vinden:

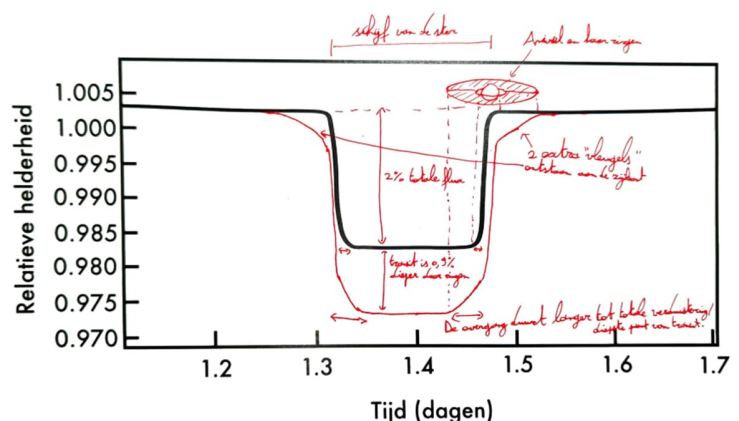
$$A_{tot} = A_{r,eff} + A_p = \frac{0,06}{\sqrt{2}} (\pi r_{out}^2 - \pi r_{in}^2) + \pi r_p^2 = 2,80 \times 10^{16} \text{ m}^2$$

We vinden dan dat de diepte van de primaire transit gelijk is aan: $\frac{A_{tot}}{A_*} = 0,0289$.

- d) Wat zou het effect zijn van deze ring op de vorm van de lichtcurve? Overteken op de figuur hiernaast (die gewoon een ingezoomde versie is van de oude lichtcurve) hoe je verwacht dat de nieuwe lichtcurve eruit zou zien. Duid opnieuw aan met pijlen en enkele woorden wat er verandert en in welke mate.



De transit wordt 0,9% dieper en de overgang aan de rand duurt langer (begint eerder en eindigt langer) doordat de ringen groter zijn dan de planeet. Hierdoor ontstaan twee "vleugels" aan de zijkanten en duurt het maximum korter zoals hiernaast getekend.



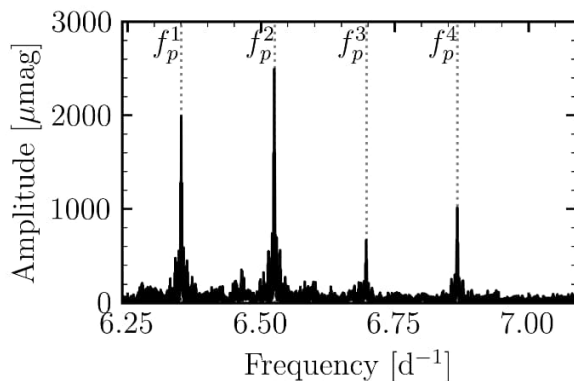
We onderzoeken tot slot nog of het mogelijk is om de ringen te detecteren met de Kepler telescoop (we negeren even dat Kepler in 2026 niet meer actief is). Kepler heeft twee observatiemodi: in Long Cadence mode neemt Kepler een opname met een integratietijd van ongeveer 29,4 minuten en in Short Cadence mode neemt Kepler opnames van 59 seconden. In principe detecteert Kepler elke seconde ongeveer 100 fotonen afkomstig van de ster Arat. Volgens de Poisson statistiek betekent dit dat als Kepler een opname zou maken met een integratietijd van 1 seconde, dat de onzekerheid (standaardafwijking) op de gemeten fluxwaarde 10% zou zijn. Zoek online op hoe onzekerheid werkt bij Poisson statistiek.

e) Hoeveel seconden moeten we dan met de Kepler telescoop per datapunt minstens meten om de aanwezigheid van de ringen te kunnen detecteren? Hebben we Long Cadence observaties nodig of volstaan Short Cadence observaties?

Het verschil in transitdiepte tussen de situatie met en zonder ringen is 0,89%. De standaarddeviatie in Poisson statistiek is gelijk aan $\sigma_N = \sqrt{N}$ waarbij N het aantal gemeten fotonen is. De relatieve onzekerheid op de meting is dan gelijk aan $\frac{\sigma_N}{N} = \frac{\sqrt{N}}{N} = \frac{1}{\sqrt{N}}$. Als we dus een relatieve onzekerheid willen behalen van 0,9% op de gemeten flux, dan moet $\frac{1}{\sqrt{N}} = 0,0089$ of dus $N = 1,2 \times 10^4$. We moeten dus minstens $1,2 \times 10^4$ fotonen waarnemen. En aangezien er 100 fotonen per seconde aankomen van de ster Arat, duurt dit ongeveer 120 seconden of 2 minuten. We hebben dus de Long Cadence mode nodig, want Short Cadence heeft een integratietijd die te kort is.

Open vragenreeks III: asteroseismologie

Sommige sterren hebben sterbevingen! Deze sterbevingen zijn zoals golven die over het oppervlak van de ster bewegen. Sterbevingen vervormen het oppervlak van de sterren waardoor de hoeveelheid licht dat ze uitzenden een klein beetje verandert. De frequenties van de trillingen vertellen ons veel over de interne structuur en gedrag van de ster. De figuur hieronder toont waargenomen frequenties van een zware ster op de hoofdreeks en de tabel bevat de frequentiewaarden in omwentelingen per dag (dit wil zeggen hoeveel keer de sterbevingen rond de ster draait in een dag). Een ster kan verschillende “modi” hebben op andere frequenties. Het gedrag van deze modi geeft ons informatie over andere delen van de ster.



Naam	Frequentie [omwenteling per dag]
f_p^1	6,36
f_p^2	6,53
f_p^3	6,70
f_p^4	6,87

Vraag 1.

- a) “Omwentelingen per dag” is niet de enige manier om de frequentie van de sterbevingen voor te stellen. Vertaal deze frequenties naar “radialen per seconde”.

Eén cyclus per dag (1 c/d) is $2\pi/86400$ radialen per seconden. We vinden dus

Naam	Frequentie [radialen per seconde]
f_p^1	0,0004618
f_p^2	0,0004741
f_p^3	0,0004872
f_p^4	0,0004996

- b) De frequenties in de figuur zijn splitsingen van éénzelfde modus. Over welke parameter geven deze splitsingen informatie en waarom zien we deze splitsing? Geef ook een benaderende waarde van deze parameter.

Deze splitsingen geven een directe meting van de rotatie van de ster! Als de pulsatie over het oppervlak beweegt, zien we de versnelling (vertraging) van de frequentie als deze met de (tegen

de) rotatie in gaat. Dit is het dopplereffect van geluid, maar dan op sterpulsaties. De constante splitsing tussen deze modi geeft ons een rotatiesnelheid van 0,17 c/d.

Vraag 2.

- a) Sterbevingen kunnen radieel of niet-radieel zijn. Radiële pulsaties zijn zo dat de ster als geheel uitzet en inkrimpt; ze zijn sferisch symmetrisch op het oppervlak. Niet-radiële pulsaties zijn niet sferisch symmetrisch en zien er anders uit over het oppervlak. Is de modus die we zien radieel of niet-radieel en hoe weet je dit?

Dit moet een niet-radiële pulsatiemodus zijn, aangezien we rotatiesplitsingen zien. Een radiële modus is sferisch symmetrisch en kan dus geen verschil opleveren afhankelijk van de draairichting.

- b) Een gedetailleerde modellering geeft aan dat deze ster 12 keer de massa van de Zon heeft. Welk type pulsator is deze ster dan waarschijnlijk?

Een pulsator van dergelijke massa op de hoofdreeks is een ster van het type beta Cephei.

- c) Als je weet dat de ster nu aan het einde van de hoofdreeks is met een leeftijd van 16 miljoen jaar, welke volgende stappen van de evolutie zullen er dan nog aankomen tot de laatste vorm die deze ster zal aannemen? Denk je dat dit nog langer duurt dan dat de ster al heeft geleefd?

De ster is nu waterstof aan het verbranden op de hoofdreeks. Als die op is, zullen er zwaardere elementen gefuseerd worden tijdens de superreus fase. Hier worden zwaardere elementen geproduceerd zoals koolstof, neon, zuurstof, silicium en ijzer.

Na ijzer zal de ster ontploffen in een supernova en wordt waarschijnlijk een neutronenster of een zwart gat gevormd.

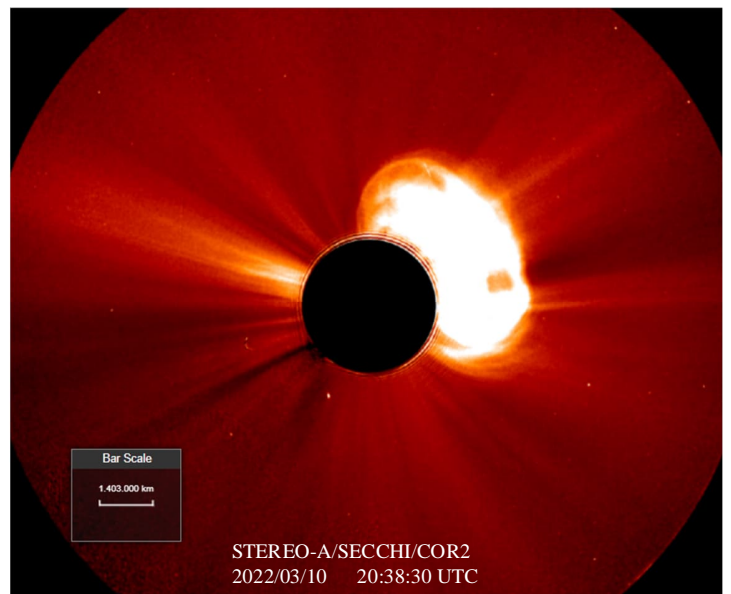
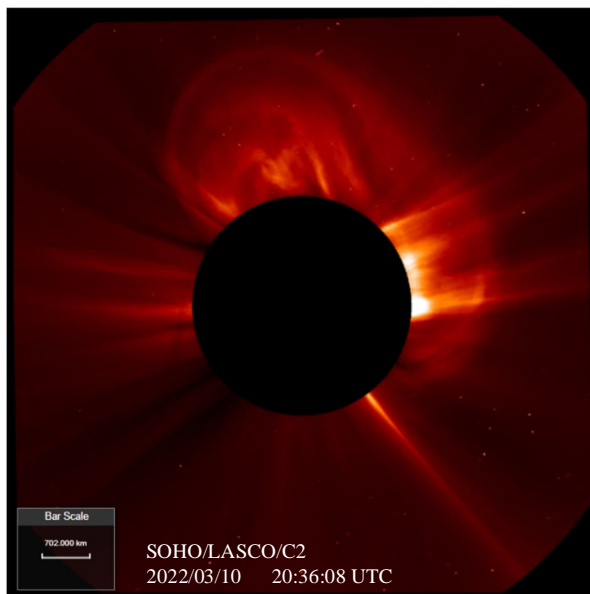
Deze fases gebeuren telkens sneller en sneller, zodat de supernova binnen de 2 miljoen jaar wordt verwacht, een oogwenk binnen de sterrenkunde!

Open vragenreeks IV: coronale massa-ejecties

Plasmawolken of coronale massa-ejecties (CME's) zijn plotselinge uitbarstingen van plasma van de Zon de ruimte in. Bijzonder sterke CME's kunnen, als ze op de Aarde gericht zijn, interageren met de magnetosfeer van de Aarde. Dit kan op zijn beurt satellieten in een baan om de Aarde beschadigen, verstoringen veroorzaken in navigatie- en communicatiesystemen, aanleiding geven tot aurora's, of in het slechtste geval grote schade aan de elektrische infrastructuur op de grond toebrengen (bijvoorbeeld het Carrington-incident in 1859 of de geomagnetische storm van maart 1989). Daarom wordt er veel moeite gedaan om deze gebeurtenissen te analyseren om onze voorspellingsmogelijkheden te vergroten. De wetenschappelijke discipline die zich richt op de effecten die de Zon op Aarde en haar directe omgeving kan veroorzaken, staat bekend als ruimteweer.

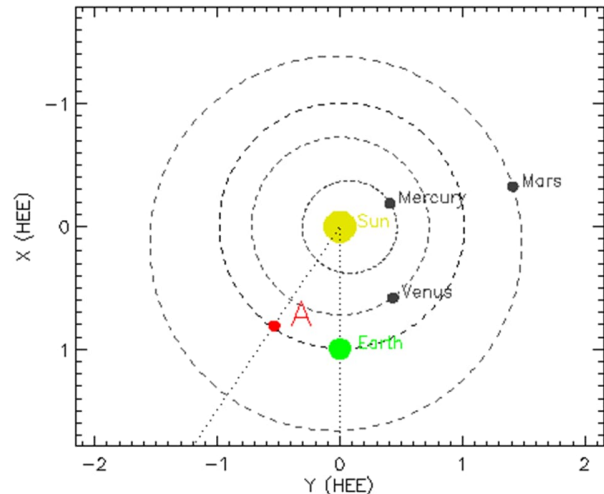
Vraag 1: Coronagraafafbeeldingen

Onderstaande beelden tonen een CME op bijna hetzelfde moment (net na 20:30 UTC op 10 maart 2022) zoals gezien door twee verschillende coronagrafen aan boord van twee verschillende ruimtevaartuigen (SOHO en STEREO-A) in zichtbaar licht. Coronagrafen zijn instrumenten die het licht dat rechtstreeks van de Zon komt blokkeren om de zonnecorona rond de Zon beter zichtbaar te maken (hetzelfde effect treedt op tijdens een zonsverduistering). Op deze manier kunnen we CME's in hun beginfase van expansie gemakkelijker zien in de zonnecorona.



- a) Waar bevonden de ruimtetuigen SOHO en STEREO-A zich op het ogenblik dat de opnamen werden gemaakt (op 10 maart 2022 net na 20:30 UTC)?

SOHO bevindt zich dicht bij de Aarde (de afstand is altijd tussen 1 en 2 miljoen km). De locatie van STEREO-A is op de figuur rechts te zien; die kan op elk moment worden nagegaan op https://stereo-ssc.nascom.nasa.gov/cgi-bin/make_where_gif.



- b) Beschrijf wat je op de afbeeldingen ziet (denk aan locatie, zichtbare objecten, enzovoort). Geef een hoofdrede waarom de beelden, hoewel ze tegelijk zijn genomen, er zo verschillend uitzien.

De beelden tonen de zonnecorona op afstanden van het centrum van de Zon tussen ongeveer 2,5 en 7,5 R_{\odot} (SOHO) en 2,5 en 15 R_{\odot} (STEREO). Er is een CME-uitbarsting zichtbaar: in beide beelden lijkt de CME zich uit te breiden naar het noorden en westen (rechterkant), waarbij de CME in de SOHO-afbeelding een groter gezichtsveld bedekt. Men kan ook radiale heldere structuren zien die van de Zon uitgaan, waarvan sommige in beide beelden coronale streamers zijn. Ook zijn er een handvol heldere punten zichtbaar op de achtergrond die enkele van de helderdere sterren of mogelijk planeten vertegenwoordigen.

Het meest opvallende verschil tussen de beelden is de positie en de schijnbare grootte van de CME (en ook de coronale streamers). De verschillende schijnbare grootte is te wijten aan de verschillende grootte van het gezichtsveld van de instrumenten. Het verschil in positie komt doordat de instrumenten de Zon vanuit verschillende hoeken bekijken. Ten tijde van deze uitbarsting is de hoekafstand tussen SOHO (dicht bij de Aarde) en STEREO-A ongeveer 34° .

- c) Is het mogelijk dat deze opgenomen CME de Aarde raakt? Waarom (niet)?

Ja dat is mogelijk. Vanuit het STEREO-A perspectief wordt de CME naar de westelijke rand uitgeworpen, terwijl het feit dat de CME een groot gezichtsveld in de SOHO-afbeelding bestrijkt, aangeeft dat de CME niet ver van de lijn Zon-Aarde wordt uitgeworpen (hoewel alleen de SOHO-afbeelding ons niet kan vertellen of de CME naar de Aarde of de naar tegenovergestelde kant wordt uitgeworpen). Dus beide beelden samen zijn nodig om te concluderen dat de CME in de algemene richting naar de Aarde wordt uitgeworpen.

- d) Geef een ruwe schatting van het volume van de CME op dit moment in eenheden van zonnevolume. (Het correct schatten van de CME-eigenschappen is in werkelijkheid geen gemakkelijke opgave, dus er wordt verwacht dat je een redelijke, maar niet perfect nauwkeurige schatting geeft.)

Op basis van de schaal van het STEREO-A beeld bestaat de CME uit ongeveer $4,5 R_{\odot}$ in radiale omvang en ongeveer $7,5 R_{\odot}$ in de tangentiële richting. Dit komt overeen met het SOHO-beeld. Daarom zou de CME een vergelijkbaar volume moeten hebben als een bol met een straal van ongeveer $3 R_{\odot}$ ($2,5-3,5 R_{\odot}$), wat een volume van ongeveer 27 zonnevolumes (15-43 zonnevolumes) oplevert.

Vraag 2: snelheid schatten tijdens de CME-passage bij de Aarde: initiële expansie

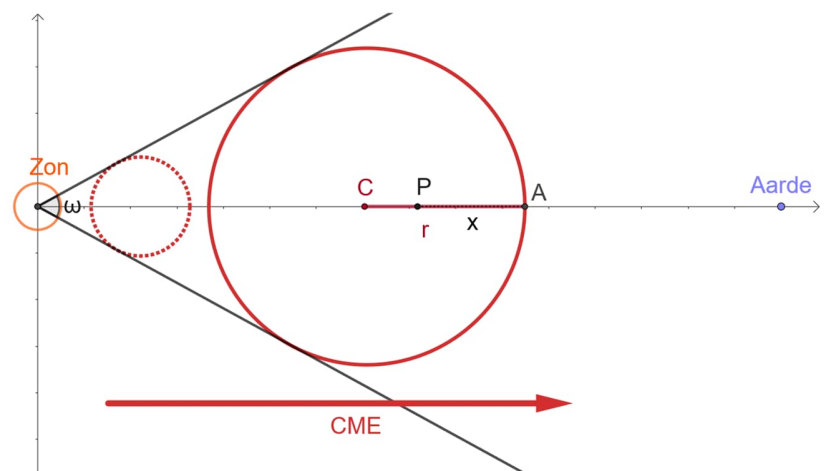
Er zijn verschillende grootheden die men wil schatten voor een gegeven CME, waarvan één de snelheid is.

In de beginfase breidt de CME zich uit, weg van de Zon. Een van de gemakkelijkste manieren om een CME in deze periode te modelleren, is door die te behandelen als een plasmabal die radiaal uitzet vanaf het centrum van de Zon. Specifiek kun je je voorstellen dat een CME ontstaat als één enkel punt vanuit het middelpunt van de Zon en zich uitbreidt met een constante hoekdiameter ω

zoals gezien vanaf het centrum van de Zon, waarbij elk punt binnen de CME slechts een radiale

snelheidscomponent heeft die constant is in de tijd (maar niet in alle delen van een CME hetzelfde is!).

Voor de eenvoud gaan we ervan uit dat de CME direct naar de Aarde wordt uitgestoten. Dit betekent dat we de snelheid willen vinden van de punten binnen de CME langs de verbindinglijn Zon-Aarde. Zie de figuur hiernaast (objecten niet op schaal).



- a) Gegeven de snelheid v_0 van het voorste punt A (dat het punt is van de CME dat het dichtst bij de Aarde ligt) en de hoekdiameter ω , bereken de snelheid v_{c0} van het middelpunt van de CME, aangeduid met C.

Duid de afstand aan tussen het middelpunt van de Zon en punt C als c op tijdstip t , wanneer de CME straal r heeft. Merk op dat $c = \frac{r}{\sin(\omega/2)}$. Aangezien de punten A en C met constante

snelheden bewegen, $v_0 = \frac{c+r}{t}$ en $v_{c0} = \frac{c}{t}$. Deze drie uitdrukkingen worden vervolgens

gecombineerd om uit te komen op $v_{c0} = \frac{v_0}{1 + \sin(\omega/2)}$.

- b) Laat een punt P binnen de CME op de lijn Zon-Aarde liggen, zodat op het moment dat de CME een straal r heeft, de afstand AP gelijk is aan x (dus $x \in [0, 2r]$). Laat zien dat de snelheid bij punt P gelijk is aan

$$v_{P0} = \frac{v_0}{1 + \sin(\omega/2)} (1 + (1 - k) \sin(\omega/2)),$$

waarbij $k = x/r$. Merk op dat de waarde van k constant blijft voor het punt P tijdens de voortplanting van de CME. Wat is de waarde van k voor de punten A en C?

Dit lijkt op voorgaande oefening, waarbij we nu bekomen dat

$$\begin{aligned} v_{P0} &= \frac{c+x}{t} = v_0 \frac{c+r-x}{c+r} = \frac{v_0}{1+r/c} \left(1 + \frac{r-x}{c}\right) = \frac{v_0}{1+\sin(\omega/2)} \left(1 + \frac{r-x}{c}\right) \\ &= \frac{v_0}{1+\sin(\omega/2)} \left(1 + \frac{r-x}{r} \sin(\omega/2)\right) = \frac{v_0}{1+\sin(\omega/2)} (1 + (1 - k) \sin(\omega/2)) \end{aligned}$$

Voor punten A en C is k gelijk aan respectievelijk 0 en 1.

- c) Voor de CME van 10 maart 2022 wordt geschat dat $v_0 = 800$ km/s, $\omega = 130^\circ$ en dat de aankomsttijd van de uitbarsting (waarbij je kunt aannemen dat het leidende punt op 1 AE is) 19:00 UTC is. Hoe lang duurt na de uitbarsting bereikt de voorkant van de CME de Aarde?

Vooreerst dienen we op te merken dat er een fout staat in deze vraagstelling. De tekst had moeten zijn: "...en dat de aanvangstijd van de uitbarsting (waarbij je kunt aannemen dat het leidende punt in het zonnecentrum ligt, aangezien de Zon veel kleiner is dan de afstand tussen de Zon en de Aarde) 19:00 UTC is".

De aankomst van CME wordt gemarkeerd door het moment dat het leidende punt A de Aarde bereikt. De tijd die daarvoor nodig is, is gelijk aan $1 \text{ AE} / v_0 \approx 52$ h. Daarom is de geschatte aankomsttijd 23:00 UTC op 12 maart 2022.

- d) Hoe lang duurt het vooraleer de CME de Aarde volledig is gepasseerd?

Om te bepalen hoeveel tijd het duurt voordat de CME de Aarde passeert, moeten we bepalen wanneer het staartpunt (waarvoor $k = 2$) de Aarde bereikt. Door alle gegevens in de formule van de vorige vraag in te vullen, krijgen we 39,3 km/s als snelheid van de staart. Dit brengt de reistijd van de staart voor een traject van 1 AE op 1056 uur. Dit betekent dat de Aarde zich (verbluffend lang!) 1004 uur, of bijna 42 dagen, binnen de CME zou bevinden.

Vraag 3: snelheid schatten tijdens de CME-passage op Aarde: interactie met de zonnewind

In werkelijkheid worden CME's omringd door zonnewind, wat een continu, gestage uitstroom van plasma van de Zon is. In de loop van de tijd reageert een CME op de zonnewind, wat bijvoorbeeld de snelheid van een CME beïnvloedt tijdens zijn reis naar de Aarde. Denk aan een ballon die je in een sterke wind laat gaan: zelfs als je de ballon tegen de wind in duwt, wordt de ballon al snel door de wind meegevoerd met dezelfde snelheid.

Een vergelijkbaar effect tijdens de voortplanting van de CME kan als volgt worden gemodelleerd. Tot $20 R_\odot$ van de Zon, is deze interactie beperkt, dus houden we ons aan het model van de vorige

vraag waarbij elk punt binnen de CME met constante snelheid reist. Wanneer een punt $20 R_{\odot}$ bereikt, gaan we ervan uit dat het punt de effecten van de interactie tussen CME en zonnewind begint te voelen. Specifiek,

$$v_{P1}(t) = \begin{cases} v_{P0}, & \text{onder } 20 R_{\odot} \\ w + \frac{v_{P0} - w}{1 + \gamma(v_{P0} - w)t}, & \text{boven } 20 R_{\odot} \end{cases}$$

In deze uitdrukking is t de tijd gemeten vanaf het moment dat P $20 R_{\odot}$ bereikt, w zonnewindsnelheid en γ een constante.

Bovendien zal het achterste deel van de CME langzamer zijn dan de zonnewind die erachter komt. Gezien de grote afstand tussen de Zon en de Aarde kunnen we veilig aannemen dat de delen van de CME die langzamer zijn dan de zonnewindsnelheid tegen de tijd dat CME de Aarde bereikt, zullen worden ingehaald. Dus hebben we dat eindelijk

$$v_P(t) = \max(w, v_{P1}(t)).$$

In deze vraag kun je de specifieke waarden van de CME van 10 maart 2022 gebruiken die eerder zijn gegeven. Rond deze tijd was de snelheid van de zonnewind ongeveer $w = 340$ km/s. We nemen ook $\gamma = 0,2 \cdot 10^{-7}/\text{km}$.

- a) Voor welke waarde van k plant het punt P zich voort met de snelheid van de zonnewind? We geven deze waarde aan als k' en dit specifieke punt als P'.

We vullen simpelweg de waarden in in de snelheidsuitdrukking uit vraag 2 b), met $v_{P0} = w$ en onbekende k . Het resultaat is $k' = 1,21$, dus niet ver achter het CME-centrum.

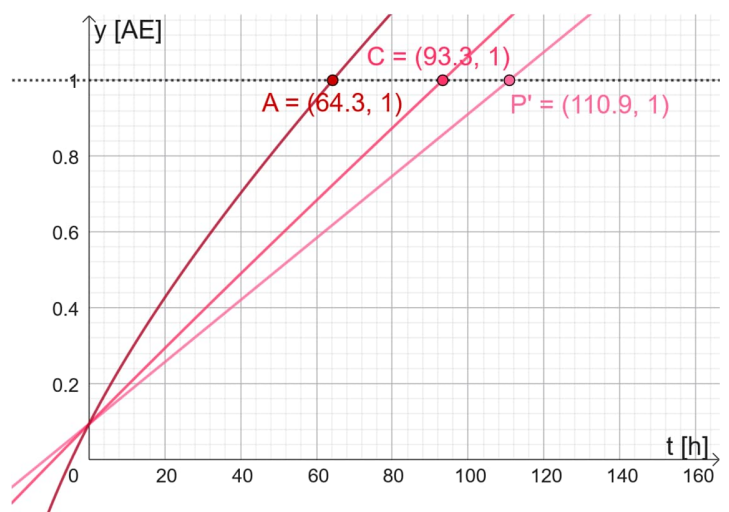
- b) Uit bovenstaande vergelijkingen kunnen we afleiden dat de positie van een punt P waarvoor $k < k'$ (of equivalent $v_{P0} > w$) verder dan $20 R_{\odot}$ wordt gegeven door

$$d(t) = 20 R_{\odot} + wt + \frac{1}{\gamma} \ln(1 + \gamma(v_{P0} - w)t).$$

(Er wordt niet gevraagd om dit aan te tonen.)

Gebruik een plotsoftware (bijvoorbeeld [Geogebra](#) of [Desmos](#)) om d versus t te plotten voor punten A, C en P'. Gebruik dit plot om tijden (in UTC) te bepalen waarop A, C en P' de Aarde bereiken. Hoe verhoudt de aankomsttijd van de CME zich tot de eenvoudigere berekening in vraag 2c)?

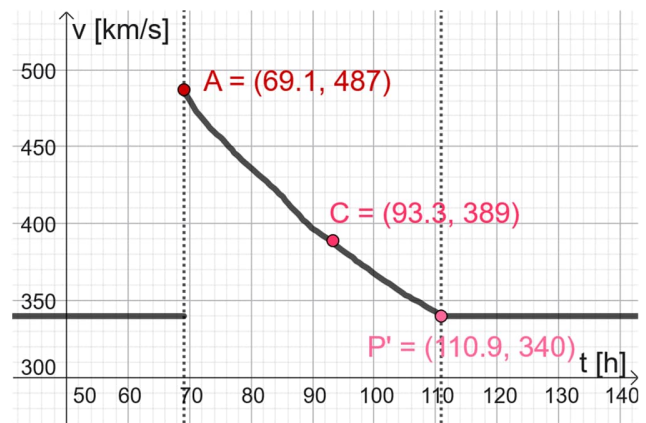
De figuur wordt hiernaast getoond. Let erop dat we hier de baan van elk punt uitzetten, beginnend vanaf het moment waarop de respectieve punten $20 R_{\odot}$ bereiken. Om de exacte aankomsttijden af te leiden, moeten we daarom de tijd die elk punt nodig had om $20 R_{\odot}$ te bereiken optellen bij de waarden die in de grafiek worden getoond. Voor punten A, C en P' zijn dit respectievelijk 4,8, 9,2 en 11,4 uur. Dit betekent dat punten A, C en P' de Aarde bereiken ongeveer om 13/03 om 16:00 UTC, 15/03 1:30 UTC en



15/03 21:15 UTC, respectievelijk. De CME wordt verwacht 17 uur later aan te komen, in vergelijking met de resultaten uit vraag 2 c).

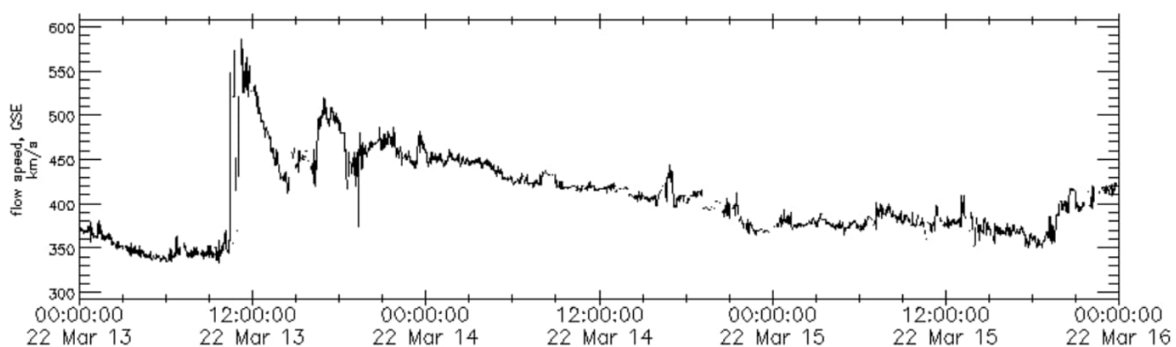
- c) Schets tenslotte hoe de plasmasnelheid in de loop van de tijd zou veranderen, zoals gemeten op Aarde vóór, tijdens en na het passeren van de CME.

Om de schets te maken, berekenen we de snelheden van punten A, C en P' wanneer ze de Aarde bereiken, wat we nu gemakkelijk kunnen doen aangezien we hun aankomsttijden kennen. Voor en na het aankomst zal de snelheid gelijk zijn aan de snelheid van de zonnewind. De resulterende schets is hiernaast rechts te zien. De tijd wordt weergegeven in uren sinds de uitbarsting van de CME.



Vraag 4: in-situ metingen

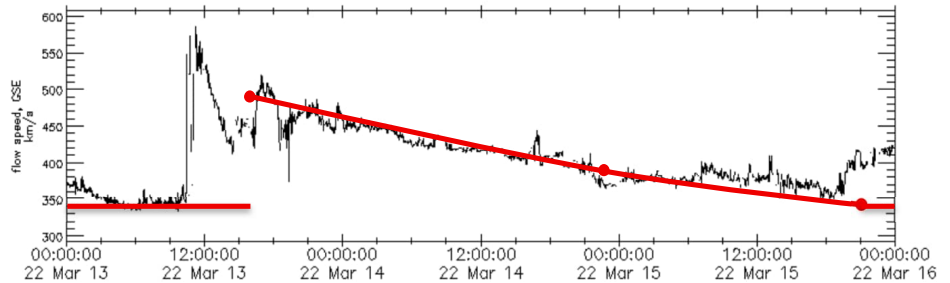
Nu is het tijd om te zien hoe ons eenvoudige model overeenkomt met de waarnemingen. Het ruimtevaartuig Wind meet plasma-eigenschappen in situ, dat wil zeggen op de positie waar het ruimtevaartuig zich bevindt (in plaats van een afstand, zoals bij het maken van beelden met coronagrafen). Dit ruimtevaartuig bevindt zich ongeveer op de lijn Zon-Aarde, wat ons vooraf informatie geeft over het naderende plasma.



- a) In bovenstaande figuur zie je plasmasnelheid in km/s, gemeten door het Wind-ruimtevaartuig tijdens de CME-passage, verschoven in de tijd zodat de tijden overeenkomen met plasma dat de Aarde bereikt in plaats van de satelliet. (Daarom behandelen we dit eigenlijk als metingen op Aarde.) Wanneer kwam de CME eigenlijk aan? Hoe verhoudt dat zich tot onze eerdere schattingen? Wat zijn de belangrijkste overeenkomsten en verschillen tussen de voorspelde en werkelijke snelheidsmetingen? Leg uit waar de verschillen vandaan kunnen komen.

De CME arriveerde eigenlijk rond 10:30 UTC op 13 maart, wat ongeveer 5,5 uur vóór de schatting van vraag 3 is en 11,5 uur later dan de schatting in vraag 2.

De overlay van het snelheidsprofiel uit vraag 3



d) wordt hier getoond bovenop de daadwerkelijke data. De twee profielen komen over het algemeen heel goed overeen. De snelheid tijdens het grootste deel van de passage en de tijd waarin de CME volledig de Aarde passeert en gevolgd wordt door een iets snellere zonnwind worden uitstekend voorspeld. Twee belangrijkste overgebleven verschillen zijn:

- De snelheidspiek wordt in onze voorspellingen met bijna 100 km/h onderschat; dit is logisch omdat we voorspellen dat de CME te laat zal arriveren, wat consistent is met de CME met een lagere snelheid. In werkelijkheid kan de waarde van de parameter γ met meer dan één orde van grootte verschillen tussen verschillende CME's, wat een grote mate van onzekerheid brengt in aankomsttijden en snelheden, maar dit weten wordt natuurlijk niet verwacht van studenten.
- De daadwerkelijke data is niet glad, maar kent voortdurend kleine (en af en toe grote) variaties; in onze voorspellingen gebruiken we een heel eenvoudig model dat niet veel details meeneemt (hier kunnen redelijkerwijs veel zaken worden genoemd, zoals plasmaturbulentie en het negeren van de interne structuur van CME zijn enkele van de meest plausibele punten).

b) Zoals al genoemd, geeft Wind ons vooraf waarschuwingen over de naderende CME's vanwege zijn positie. Waar bevond het Wind-ruimtetuig zich op dat ogenblik?

Het Wind-ruimtevaartuig bevindt zich ongeveer 1,5 miljoen kilometer voor de Aarde.

c) Hoe ruim van tevoren kregen we de waarschuwing over deze aankomende CME? Gebruik de hierboven getoonde snelheidsmetingen.

De pieksnelheid van de CME is ongeveer 580 km/s, dus uitgaande van het feit dat de snelheid tussen de satelliet en de Aarde niet veel verandert, geeft het quotiënt van de twee waarden het antwoord: ongeveer 43 minuten.

Dit is het einde van de eerste ronde van
de Vlaamse Sterrenkunde Olympiade 2026.

