Vlaamse Sterrenkunde Olympiade 2018

Oplossingen

4 april 2018

In dit document worden oplossingen voorgesteld voor de vragen van de Vlaamse Sterrenkunde Olympiade 2018. Het spreekt voor zich dat andere methodes eventueel ook tot correcte oplossingen kunnen leiden.

Vlaamse Sterrenkunde Olympiade
Vereniging Voor Sterrenkunde
Oostmeers 122c
8000 Brugge

Het organiserend comité van de Vlaamse Sterrenkunde Olympiade 2018: Robin Baeyens (KULeuven), Robin Björklund (KULeuven), Jelle Dhaene (UGent), Frank Tamsin (VVS), Sébastien Viaene (UGent) en Walter Van Rensbergen (VUB).

http://www.sterrenkundeolympiade.be
info@sterrenkundeolympiade.be

Meerkeuze vragenreeks

1. Een typische amateurtelescoop voor beginners heeft een diameter van 10 cm, terwijl gevorderde amateurs eerder zullen gebruikmaken van een telescoop van 40 cm. Hoeveel keer groter is het lichtverzamelend vermogen van de grotere telescoop?
a) 2 keer.
b) 4 keer.
c) 8 keer.
d) 16 keer.
e) Er is meer informatie over de telescopen nodig om dit te kunnen bepalen.

Het aantal verzamelde fotonen is evenredig met de oppervlakte van de kijkeropening, en deze is uiteraard evenredig met het kwadraat van de diameter. Als de diameter 40 / 10 = 4 keer groter is, dan zullen $4^2 = 16$ keer meer fotonen ontvangen worden.

2. Op 5 september 2016 heeft de Rosetta-missie de lander Philae kunnen terugvinden op de komeet 67P/Churyumov-Gerasimenko. De lander Philae (met afmetingen van 1 m × 1 m × 1 m) was te zien op een beeld van de hogeresolutiecamera met 2048 × 2048 pixels en een beeldveld van 2,2° × 2,2° als een object van 25 × 25 pixels. Vanop welke afstand van Philae heeft Rosetta de lander gefotografeerd?
a) 1,1 km.
b) 2,1 km.
c) 12,2 km.
d) 26,8 km.
e) 42,5 km.

De hoekgrootte van een pixel bedraagt $\frac{2{,}2°}{2048} = 0{,}0011 \frac{°}{px} = 1{,}87 \cdot 10^{-5}\ \frac{rad}{px}$.
Het beeld werd dus genomen op een afstand van $\frac{1\ m}{25\ px \times 1{,}87 \cdot 10^{-5}\ \frac{rad}{px}} = 2133\ m.$

3. Wanneer men waarneemt vanuit België, in welk seizoen staat de volle maan dan het hoogst aan de hemel?
a) in de lente.
b) in de zomer.
c) in de herfst.
d) in de winter.
e) Dit verschilt van jaar tot jaar (en is dus geen seizoenseffect).

De baan van de Maan is ongeveer 5° geheld ten opzichte van de ecliptica. Tijdens de winter heeft de Zon de kleinste declinatie (negatief). De volle maan is in oppositie met de Zon en bevindt zich dus aan de tegenovergestelde kant van de hemel, en bereikt dan haar grootste declinatie en zal dus het hoogst aan de hemel staan. Uiteraard bereikt de Maan elke maand een uiterste positieve en een uiterste negatieve declinatie, maar de vraag gaat hier specifiek over de volle maan.

4. Zoals in vele Amerikaanse steden kent New York (en dus ook Manhattan) een rechthoekig stratenplan. De ‘avenues’ in Manhattan lopen grofweg tussen noord en zuid. De ‘streets’ lopen tussen oost en west. Wanneer de Zon opkomt of ondergaat in het verlengde van de ‘streets’ spreekt men van ‘Manhattanhenge’. Dit fenomeen doet zich vier keer per jaar voor (twee keer bij zonsopkomst en twee keer bij zonsondergang). Veronderstel dat het fenomeen zich voordoet bij zonsondergang op 11 juli. Op welke datum is er dan nog eens ‘Manhattanhenge’ bij zonsondergang?

a) 30 mei.
b) 30 juni.
c) 11 december.
d) 11 januari.
e) Dit kan niet uit de gegevens afgeleid worden.

Het ‘Manhattanhenge’ fenomeen voor opkomende en ondergaande Zon zal zich een gelijk aantal dagen voor en na respectievelijk het winter- en zomersolstitium voordoen (ongeveer op 21 juni en 21 december). Gezien 11 juli 21 dagen na het begin van de zomer valt, is de gezochte datum 21 dagen voor het begin van de zomer (voor de ondergaande Zon).

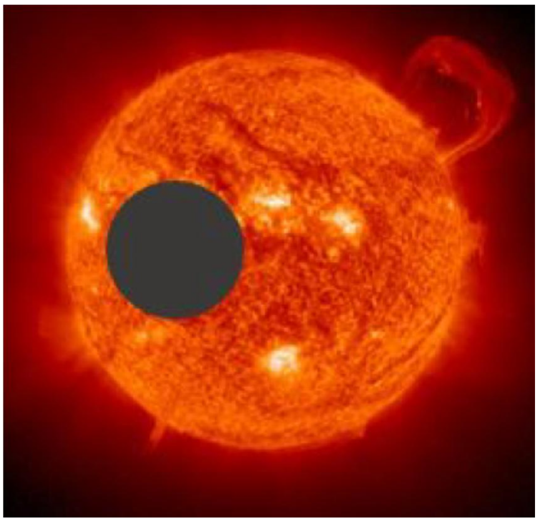
5. Stel je voor dat je je op 21 december op de Zuidpool bevindt. Welk van volgende uitspraken beschrijft het best je schaduw op die dag?

a) Op 21 december is de Zuidpool de hele dag in het donker gehuld; het is dus poolnacht en er is dan uiteraard helemaal geen schaduw zichtbaar.
b) Op de middag is er geen schaduw te zien, omdat de Zon dan in het zenit staat; de rest van de dag is er wel schaduw te zien.
c) De Zon bevindt zich de hele dag recht boven je hoofd, zodat er geen schaduw te zien is.
d) De Zon bevindt zich de hele dag boven de horizon en je schaduw zal in de loop van de dag een cirkel van 360° beschrijven.
e) Je schaduw wijst de richting van de Noordpool aan.

Bij de winterzonnewende gaat de Zon op de Zuidpool niet onder. Het fenomeen om geen schaduw te hebben op de middag kan zich enkel voordoen tussen 23,5° noorderbreedte en 23,5° zuiderbreedte; buiten deze zone kan de Zon nooit in het zenit (het punt recht boven de waarnemer) komen. Op het zuidelijk halfrond zal je schaduw wijzen in de richting van de Zuidpool, behalve wanneer je je exact op de Zuidpool zelf bevindt. In dit laatste geval zal de basis van je schaduw (aan je voeten) zich op de pool bevinden, terwijl de top van je schaduw (de schaduw van je hoofd) een cirkel van 360° zal beschrijven in 24 uur (ongeveer).

6. Op 24 april 2017 nam een satelliet een foto van de Maan die voor de Zon passeert. Schat aan de hand van deze foto de afstand tussen de Maan en satelliet die de foto heeft genomen. De hoekdiameter van de Zon is 32'.

a) $5{,}56 \cdot 10^5$ km.
b) $1{,}12 \cdot 10^6$ km.
c) $2{,}24 \cdot 10^6$ km.
d) $1{,}12 \cdot 10^7$ km.
e) $2{,}24 \cdot 10^7$ km.



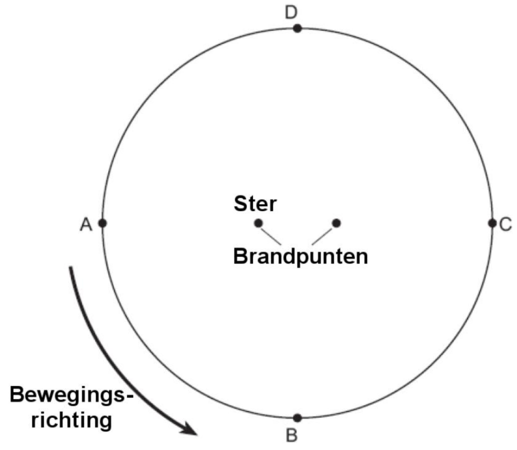
Door meting op de foto kan men vaststellen dat op dit beeld de straal van de Zon ($R_{\odot}$) en de straal van de Maan ($R_{☾}$) zich verhouden als $\frac{R_{\odot}}{R_{☾}} = 3$.
Gegeven is dat de hoekdiameter van de Zon 32' bedraagt, waaruit dan uiteraard volgt dat de hoekdiameter van de Maan $\frac{32'}{3} = 10{,}667'$ bedraagt. Noemen we d de afstand tussen de satelliet en de Maan, dan geldt dat $d \times \left(\frac{10{,}667'}{60} \times \frac{\pi}{180}\right) = 2R_{☾}$. De straal van de Maan $R_{☾} = 1739\ km$.
Aldus vinden we $d = \frac{2R_{☾}}{\frac{10{,}667'}{60} \times \frac{\pi}{180}} = 1{,}12 \times 10^6\ km$.

7. In 2017 kon vanop Aarde een komeet waargenomen worden waarvan de lengte van de halve as van de baan a = 4 AE (astronomische eenheden) bedroeg en met excentriciteit e = 0,12. In welk jaar kan deze komeet opnieuw zichtbaar zijn?

a) 2021.
b) 2022.
c) 2023.
d) 2024.
e) 2025.

Als a uitgedrukt is in astronomische eenheden, dan vinden we de periode P (uitgedrukt in jaar) via de derde wet van Kepler: $P^2 = a^3$. Dit resulteert in een periode $P = 8$ jaar. De komeet zal dus terug te zien zijn in 2017 + 8 = 2025.

8. De figuur rechts geeft schematisch de beweging weer van een planeet op een elliptische baan rond een ster. Op de baan zijn vier punten aangegeven (A, B, C en D). Bij de beweging van de planeet van positie A naar D zal de baansnelheid



a) continu afnemen;
b) continu toenemen;
c) eerst afnemen en dan toenemen;
d) eerst toenemen en dan afnemen;
e) de hele tijd gelijk blijven.

Dit is een gevolg van de tweede wet van Kepler die stelt dat de voerstraal tussen de planeet en de ster in gelijke tijdsintervallen gelijke oppervlakten beschrijft. Dit impliceert dat de planeet sneller beweegt wanneer die het dichtst bij de ster staat en het traagst wanneer die het verst van de ster staat.

9. De energie voor de vulkanische activiteit op Io (een maantje van Jupiter) is afkomstig van
a) radioactieve stoffen in het inwendige van Io;
b) chemische reacties;
c) getijdenwerking;
d) energie uitgestraald door Jupiter en de Zon;
e) zowel radioactieve stoffen als chemische reacties (a en b).

De energie voor de vulkanische activiteit op Io wordt waarschijnlijk geleverd door getijdenwerking tussen Io, Jupiter en twee andere grote manen van Jupiter, Europa en Ganymedes. Hoewel Io altijd met dezelfde zijde naar haar moederplaneet wijst, hebben de effecten van Europa en Ganymedes tot gevolg dat de maan ietwat wiebelt. Dit gewiebel strekt en buigt het oppervlak ongeveer 100 meter en genereert warmte door interne wrijving.

10. Wat is de hoofdreden dat we niet denken dat Pluto een ontsnapte maan van Neptunus is?
a) De massa van Pluto is te klein.
b) Pluto heeft zelf satellieten.
c) De baan van Pluto is te veel geheld ten opzichte van de ecliptica.
d) De excentriciteit van de baan van Pluto is te groot.
e) Dit is niet correct: vermoedelijk is Pluto wel degelijk een ontsnapte maan van Neptunus.

Een botsing die Pluto van bij Neptunus zou weggeslagen hebben, is erg onwaarschijnlijk (zij het niet onmogelijk). De ontdekking van Charon heeft dit idee versterkt. De massa van de planet en de excentriciteit van de baan spelen hierbij eigenlijk niet echt een rol: er zijn andere maantjes die meer of minder massa hebben, en andere objecten die in een baan rond de Zon bewegen met een lagere of hogere excentriciteit. De inclinatie van de baan van Pluto is mogelijks wel een – zij het niet al te sterk – argument waarom Pluto ooit een satelliet van Neptunus zou kunnen geweest zijn.

11. Als Mars omstreeks de middag opkomt, in welke configuratie bevindt de planeet zich dan ten opzichte van de Aarde en de Zon?
a) conjunctie.
b) oppositie.
c) kwadratuur.
d) grootste elongatie.
e) Dit kan op basis van deze gegevens niet bepaald worden.

Bij een conjunctie bevindt Mars zich in dezelfde richting als de Zon en bij een oppositie bevinden Mars en de Zon zich diametraal ten opzichte van elkaar aan de hemel. Bij kwadratuur staan de planeet en de Zon 90° van elkaar. Grootste elongatie komt enkel voor bij binnenplaneten.

12. Welke uitspraak over de vorming van ons planetenstelsel is niet waar?
a) De asteroïdengordel tussen Mars en Jupiter is ontstaan door twee rotsachtige planeten die op elkaar gebotst zijn.
b) De samenstelling van de gaswolk waaruit ons planetenstelsel gevormd is, bestond voor 98% uit waterstof en helium.
c) Ons zonnestelsel is ongeveer 4,5 miljard jaar oud.
d) Zonder de aanwezigheid van de gasreuzen zou er geen water op Aarde zijn.
e) Afhankelijk van de plaats in het zonnestelsel waar ze zijn ontstaan, bestaan planetesimalen uit metaal, steen of ijs.

Het ontstaan van de planetoïdengordel is vrij eenvoudig te verklaren: terwijl in het prille zonnestelsel overal planetesimalen tegen elkaar botsten, samenklonterden en planeten vormden, lukte dat op de plaats tussen Mars en Jupiter niet. Vermoedelijk zit de grote aantrekkingskracht van Jupiter hier voor iets tussen.

13. Voor welk van volgende factoren in de formule van Drake mag in de nabije toekomst wellicht een betrouwbare schatting verwacht worden?
a) de fractie van sterren die planeten hebben;
b) de fractie van planeten waarop leven voorkomt;
c) de fractie van planeten met leven, waarop intelligent leven voorkomt;
d) de fractie van intelligent leven dat communicatief is;
e) de gemiddelde levensduur van een technische beschaving.

Er wordt momenteel zeer intens onderzoek gedaan naar exoplaneten. Daardoor ontstaat een beter beeld bij welke sterren al dan niet planeten voorkomen.

14. Twee hoofdreekssterren A en B hebben een effectieve temperatuur van respectievelijk 10000 K en 5700 K. De diameters van de sterren A en B verhouden zich als 3 tot 2. Wat is het verschil in absolute magnitude tussen beide sterren?
a) 2,89.
b) 3,32.
c) 3,67.
d) 4,32.
e) 4,75.

De verhouding van de lichtkrachten L_1 en L_2 van twee sterren en hun verschil in absolute magnitude $M_1 - M_2$ kan berekend worden op basis van de formule van Pogson:

$$\frac{L_2}{L_1} = \left(\sqrt[5]{100}\right)^{M_1 - M_2}$$

of nog

$$M_1 - M_2 = 2{,}5 \cdot \log \frac{L_2}{L_1}$$

De wet van Stefan-Boltzmann geeft het verband tussen de lichtkracht *L* van een zwarte straler, en de straal *R* en de temperatuur *T* ervan, volgens $L = 4\pi R^2 \sigma T^4$ waarbij $\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8}$ W m^{-2} K^{-4} de constante van Stefan-Boltzmann (of eerste stralingsconstante) is.
Hieruit kunnen we afleiden dat $\frac{L_2}{L_1} = \frac{4\pi R_2^2 \sigma T_2^4}{4\pi R_1^2 \sigma T_1^4} = \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^2 \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^4 = \left(\frac{3}{2}\right)^2 \left(\frac{10000}{5700}\right)^4 = 21{,}31$
zodat $M_1 - M_2 = 2{,}5 \cdot \log 21{,}31 = 3{,}32$.

15. Welk soort object is M57?
a) een bolvormige sterrenhoop.
b) een spiraalstelsel.
c) een planetaire nevel.
d) een open sterrenhoop.
e) een stervormingsgebied.

Messier 57 is de Ringnevel in het sterrenbeeld Lier.

16. Hoe groot is de ontsnappingssnelheid van een planeet die twee keer de massa van de Aarde heeft en 1/3 van de aardstraal?
a) 9,2 km/s.
b) 11,2 km/s.
c) 13,7 km/s.
d) 21,2 km/s.
e) 27,4 km/s.

De ontsnappingssnelheid v van een hemellichaam kan berekend worden aan de hand van de formule $v = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$ waarbij M de massa van het hemellichaam voorstelt, R de straal van het hemellichaam is en G de universele gravitatieconstante ($G = 6{,}674 \cdot 10^{-11}$ N·m^2·kg^{-2}). Uit de opgave volgt dat $M = 2M_{\oplus} = 2 \times 5{,}9722 \cdot 10^{24}\ kg$ en $R = \frac{1}{3}R_{\oplus} = \frac{1}{3} \times 6{,}373 \cdot 10^{6}\ m$. Hieruit vinden we $v = 27395\ m/s$.

17. Een ster heeft een schijnbare magnitude van 5,7 en bevindt zich op een afstand van 26,3 parsec van ons. Veronderstel dat de interstellaire extinctie 2 magnituden bedraagt. Hoe groot is dan de lichtkracht van deze ster?
a) 1,6 keer de lichtkracht van de Zon.
b) 8,0 keer de lichtkracht van de Zon.
c) 9,8 keer de lichtkracht van de Zon.
d) 19,6 keer de lichtkracht van de Zon.
e) 25,6 keer de lichtkracht van de Zon.

We berekenen eerst de absolute magnitude M van die ster via de afstandsformule $M = m + 5 - 5\log d - A$ waarbij m de schijnbare magnitude is, d de afstand in parsec en A de interstellaire extinctie. Hieruit volgt $M = 1{,}60$. De lichtkracht volgt dan uit de formule $\frac{L}{L_{\odot}} = \left(\sqrt[5]{100}\right)^{M_{\odot}-M}$, en rekening houdend met $M_{\odot} = 4{,}83$, zodat $\frac{L}{L_{\odot}} = 19{,}58$.

18. Wat is de piekgolflengte in de elektromagnetische straling die uitgezonden wordt door een ster met een oppervlaktetemperatuur van 5000 K?
a) 580 ångström.
b) 5800 ångström.
c) 4600 ångström.
d) 2900 ångström.
e) 58000 ångström.

Het verband tussen de golflengte λ_{max} waarbij een ster van temperatuur T maximaal straalt, en de effectieve temperatuur van de ster wordt gegeven door de verschuivingswet van Wien:

$$\lambda_{max}.T = b$$

waarbij b = $2{,}897756 \cdot 10^{-3}$ K·m.
Merk op dat 1 ångström = 1 Å = 0,1 nm = 10^{-10} m.

19. We beschouwen drie sterren X, Y en Z. De golflengte waarop ster X het meest energie uitzendt, is 650 nm. Bij ster Y is dit bij 400 nm. Ster Z heeft een oppervlaktetemperatuur van 5800 K. Wat is de correcte rangschikking van de drie sterren, in volgorde van stijgende oppervlaktetemperatuur?
a) X – Y – Z.
b) X – Z – Y.
c) Y – X – Z.
d) Y – Z – X.
e) Z – X – Y.

Dit kan beschouwd worden als een toepassing op de wet van Wien. Een eenvoudige redenering kan gebaseerd worden op de kleuren van de sterren. Een golflengte van 650 nm (ster X) zit in het rode deel van het spectrum (komt overeen met temperatuur 4462 K), terwijl 400 nm (ster Y) in het violet deel zit (temperatuur 7250 K). Ster Z is met een oppervlaktetemperatuur van 5800 K vergelijkbaar met onze Zon en heeft haar energiepiek in het gele deel van het spectrum.

20. We nemen een ster waar met een oppervlaktetemperatuur van 10000 K. Tussen ons en de ster bevindt zich een waterstofwolk met een temperatuur van 20000 K. Deze waterstofwolk beweegt zich van ons weg naar de ster toe. Het waargenomen spectrum
a) bevat een continu spectrum en roodverschoven emissielijnen van waterstof.
b) bevat een continu spectrum en roodverschoven absorptielijnen van waterstof.
c) bevat een continu spectrum en blauwverschoven emissielijnen van waterstof.
d) bevat een continu spectrum en blauwverschoven absorptielijnen van waterstof.
e) bevat een continu spectrum met alle lijnen op de verwachte plaats, zoals men die ziet in een laboratorium.

De ster mag beschouwd worden als een heet dicht object dat als een ideaal zwart lichaam mag benaderd worden, en zal dus een continu spectrum uitzenden. De waterstofwolk heeft een hogere temperatuur dan de ster en zal dus aanleiding geven tot emissielijnen. Gezien de waterstofwolk zich van ons weg beweegt, zullen deze lijnen naar het rood verschoven zijn.

21. Ster X heeft een oppervlaktetemperatuur van 10000 K en bij ster Y is dit 20000 K. Beide sterren hebben dezelfde straal. Welk van volgende uitspraken is correct?
a) Ster Y zendt 2 keer meer energie uit dan ster X.
b) Ster Y zendt 4 keer meer energie uit dan ster X.
c) Ster Y zendt 8 keer meer energie uit dan ster X.
d) Ster Y zendt 16 keer meer energie uit dan ster X.
e) Ster X zendt 16 keer meer energie uit dan ster Y.

Volgens de wet van Stefan-Boltzmann is de uitgestraalde energie per seconde evenredig met de vierde macht van de temperatuur en met het kwadraat van de straal. De twee sterren hebben dezelfde straal. Gezien de temperatuur van ster Y het dubbele bedraagt van die van ster X, zendt ster Y $2^4 = 16$ keer meer energie uit dan ster X.

22. Het Hertzsprung-Russell-diagram is een erg belangrijk instrument in de sterrenkunde. Voor welk van volgende problemen kan dit diagram nuttig aangewend worden?
a) Het schatten van de leeftijd van het heelal.
b) Het schatten van de massa van een ster.
c) Het bepalen van de samenstelling van een ster.
d) Het bepalen van de schijnbare magnitude van een ster.
e) Het bepalen van de eigenbeweging van een ster.

In het Hertsprung-Russell-diagram is de lichtkracht van een ster uitgezet tegenover de temperatuur. De massa speelt een belangrijke rol bij de lichtkracht.

23. Wat is het eindstadium in de evolutie van een G1 ster met een massa van 1,1 keer de massa van onze Zon?
a) Rode reus.
b) Witte dwerg.
c) Zwart gat.
d) Neutronenster.
e) Bruine dwerg.

Zie bijvoorbeeld https://www.e-education.psu.edu/astro801/content/l6_p3.html voor meer informatie.

24. Een type Ia supernova wordt waargenomen in een sterrenstelsel met roodverschuiving $z = 0{,}03$. De afstand van de supernova wordt bepaald op $1{,}3 \cdot 10^8$ parsec. Welke Hubble-tijd kan uit deze waarneming afgeleid worden?
a) $1{,}41 \cdot 10^{10}$ jaar.
b) $1{,}41 \cdot 10^{10}$ seconden.
c) $1{,}33 \cdot 10^9$ jaar.
d) 47,1 jaar.
e) $1{,}33 \cdot 10^9$ seconden.

Hiervoor kan de wet van Hubble gebruikt worden: $v = H_0 d$, met v de verwijderingssnelheid en d de afstand van de galaxie. De parameter H_0 wordt de constante van Hubble genoemd en wordt meestal uitgedrukt in km/s/Mpc. De Hubble-tijd is de inverse van de Hubble-parameter H_0. Gezien de roodverschuiving $z = 0{,}03$ laag is, kan de verwijderingssnelheid v berekend worden als $v = zc$, waarbij c de lichtsnelheid voorstelt. De Hubble-tijd is derhalve

$$\frac{1}{H_0} = \frac{d}{v} = \frac{d}{zc} = \frac{1{,}3 \cdot 10^8\ pc}{0{,}03 \times 3 \cdot 10^8 m/s} = \frac{1{,}3 \cdot 10^8 \times 3{,}08567758 \cdot 10^{16} m}{0{,}03 \times 3 \cdot 10^8 m/s} = 4{,}457 \cdot 10^{20}\ s = 1{,}41 \cdot 10^{10}\ jaar.$$

25. Om exoplaneten te vinden worden diverse technieken gebruikt. Welke van volgende technieken is het meest geschikt om de massa van een exoplaneet te schatten?
a) De methode van de radiële snelheid.
b) De methode van de transit timings.
c) Microlensing.
d) Direct imaging.
e) Eigenbeweging.

Dit vormt eigenlijk een toepassing op de derde wet van Kepler.

26. Alle veranderlijke sterren van het RR Lyrae type hebben dezelfde absolute magnitude M van ongeveer 0,75. Stel dat we een dergelijke ster waarnemen met een schijnbare magnitude van 16,0. Wat is dan de afstand van deze ster (kpc = kiloparsec)?
a) 11,2 kpc.
b) 17,6 kpc.
c) 27,3 kpc.
d) 36,5 kpc.
e) 47,7 kpc.

Volgens de afstandsformule staan de absolute magnitude M, de schijnbare magnitude m en de afstand d van een object met elkaar in verband als $M = m + 5 - 5 \log d$, waarbij d dan noodzakelijk is uitgedrukt in parsec. Hieruit volgt dat $d = 10^{\frac{m-M+5}{5}} = 10^{\frac{16-0,75+5}{5}} = 11220\, pc$.

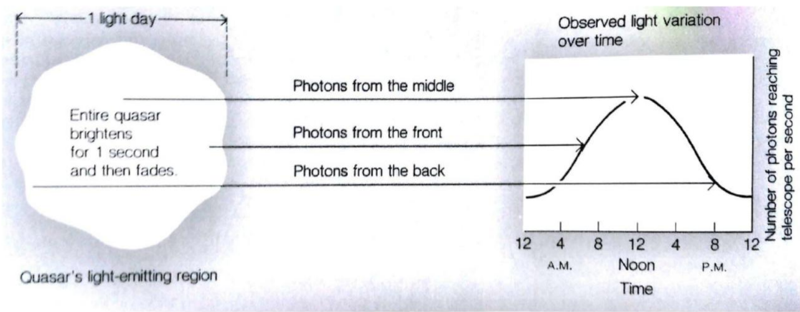
27. Welk van volgende elementen kan initieel énkel gecreëerd zijn door een ster die een supernova-explosie heeft ondergaan?
a) waterstof;
b) zuurstof;
c) koolstof;
d) stikstof;
e) fosfor.

Op fosfor na maken alle andere genoemde elementen deel uit van de koolstof-stikstofcyclus.

28. Hoe groot zou de straal van de Zon zijn als de Zon een zwart gat zou worden (wat uiteraard zeer onwaarschijnlijk is)?
a) 1 km.
b) 2 km.
c) 3 km.
d) 4 km.
e) 5 km.

De Schwarzschildstraal is de afstand van waar licht (snelst mogelijke fysische snelheid) nog net aan de gravitatie van het zwarte gat kan ontsnappen. Nu kan de ontsnappingssnelheid *v* van een object met massa *m* aan een ander object met massa *M* berekend worden door de wet van behoud van energie toe te passen: $\frac{GMm}{r} = \frac{mv^2}{2}$. Hierin stelt *r* de afstand van het object met massa *m* voor ten opzichte van het object (zwart gat) met massa *M*. Het linkerlid stelt de potentiële energie voor die overwonnen moet worden. Het rechterlid is de kinetische energie van het voorwerp met massa *m* en snelheid *v*. Hieruit kan berekend worden dat de ontsnappingssnelheid geschreven kan worden als $v = \sqrt{\frac{2GM}{r}}$. Nu kan voor de Schwardzschildradius R_s de ontsnappingssnelheid gelijkgesteld worden aan de lichtsnelheid c, waaruit volgt: $\mathrm{R_s} = \frac{2\mathrm{GM}}{\mathrm{c}^2}$. Met de massa van de Zon $M = 1{,}99 \cdot 10^{30} kg$ vinden we dan $\mathrm{R_s} = \frac{2\times 6{,}674\cdot 10^{-11}\ \mathrm{N{\cdot}m^2{\cdot}kg^{-2}} \times 1{,}99\cdot 10^{30} kg}{(3\cdot 10^8 m/s)^2} = 2{,}95 \cdot 10^3\ m$.

29. We nemen een quasar waar waarvan de helderheid schommelingen vertoont in minder dan een dag. Wat is op basis van deze informatie de beste schatting voor een bovengrens voor de afmetingen van deze quasar?
a) 8 kpc (kpc = kiloparsec).
b) 170 AE (AE = astronomische eenheid).
c) 3 AE (AE = astronomische eenheid).
d) 3 R⊙ (R⊙ is de straal van de Zon).
e) 1 pc (pc = parsec).



Welke ook de bron van het licht van de quasar moge wezen, de afmetingen ervan kunnen niet groter zijn dan de tijd van de helderheidsschommelingen vermenigvuldigd met de lichtsnelheid. Immers, afhankelijk van welk deel van de bron het licht afkomstig is, neemt het een verschillende duur in beslag om ons te bereiken (zie figuur). De diameter van de quasar kan dus hoogstens $86400\ s \times 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s} = 2{,}6 \cdot 10^{13} m \approx 170\ AE$ bedragen.

30. Welk van volgende karakteriseringen beschrijft het best de kosmische achtergrondstraling zoals we die tegenwoordig kunnen waarnemen?
a) Een heldere uniforme röntgengloed.
b) Een zwak uniform radiosignaal.
c) Zwakke uniforme röntgenstraling.
d) Een zwak en onregelmatig radiosignaal.
e) Een zwakke achtergrond van kosmische neutrino’s.

Zie bijvoorbeeld https://nl.wikipedia.org/wiki/Kosmische_achtergrondstraling voor meer informatie.

1.	**D**
2.	**B**
3.	**D**
4.	**A**
5.	**D**
6.	**B**
7.	**E**
8.	**C**
9.	**C**
10.	**B**

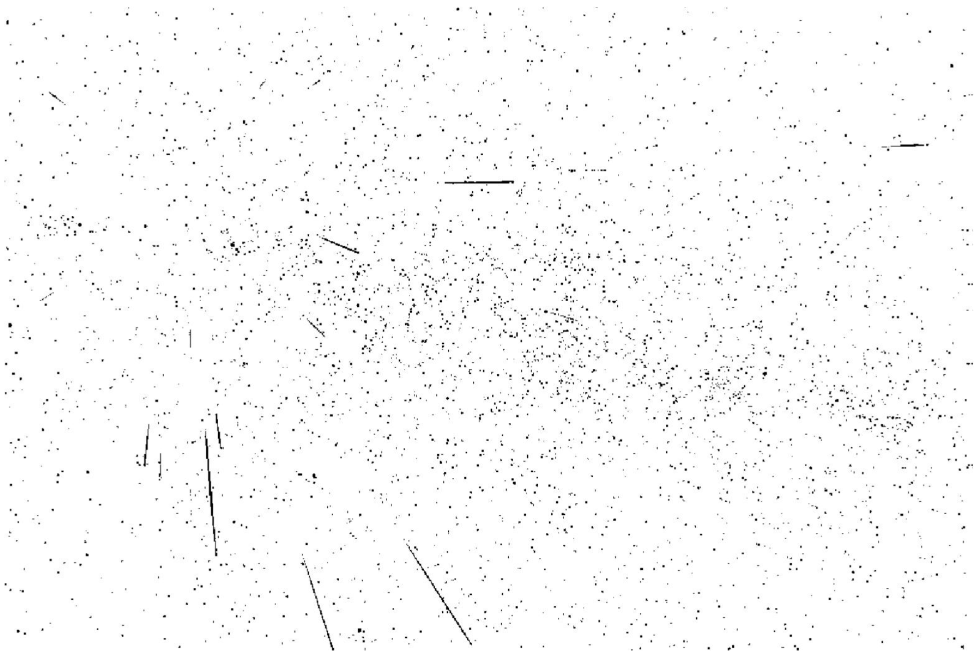
11.	**C**
12.	**A**
13.	**A**
14.	**B**
15.	**C**
16.	**E**
17.	**D**
18.	**B**
19.	**B**
20.	**A**

21.	**D**
22.	**B**
23.	**B**
24.	**A**
25.	**A**
26.	**A**
27.	**E**
28.	**C**
29.	**B**
30.	**B**

Open vragenreeks I: astronomische observaties

Bij de volgende vragen worden telkens een of meer opnamen getoond van een astronomisch fenomeen. De vraag is telkens om het fenomeen te identificeren en kort te beschrijven.

Vraag 1.
Dit is een lang belichte opname van een gedeelte van de hemel.
a) Leg uit wat er te zien is.
b) Maak een schatting hoe lang deze opname ongeveer zou belicht zijn (seconden, minuten, uren, dagen, …) en verklaar deze schatting.



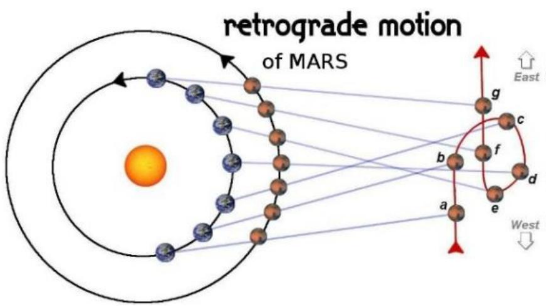
Dit is een (negatief) opname van een meteorenzwerm. Wanneer we de trajecten van de meteoren aan de hemel achterwaarts verlengen, lijken die allemaal vanuit hetzelfde punt aan de hemel te komen (de radiant).
Op de foto is alvast een stukje van de Melkweg te zien. Door vergelijking met sterrenkaarten of een planetariumprogramma kunnen we het sterrenbeeld Perseus herkennen en zien we ook dat de radiant in dit sterrenbeeld gelegen is. We hebben te maken met de Perseïden meteorenzwerm.
Op basis van het aantal zichtbare meteoren dat tijdens het maximum van de zwerm kan verwacht worden, lijkt een kwartier als een redelijke schatting voor de duur van de opname. Dit betekent ook dat er tijdens de opname moet gevolgd zijn op de sterren, want anders zouden er merkbare stersporen moeten zijn. Een andere mogelijkheid is evenwel dat meerdere korter belichte beelden op elkaar werden gestackt om tot het getoonde resultaat te komen.

Vraag 2.
a) Leg uit wat op dit beeld te zien is.
b) Maak een schatting hoe lang deze opname ongeveer zou belicht zijn en verklaar deze schatting.

Dit is een occultatie of bedekking van Saturnus door de Maan, waarbij – vanuit ons gezichtspunt – de Maan vóór Saturnus passeert. De bedekking start hier vanaf de niet verlichte maanrand. De belichtingstijd voor zo'n opname ligt in de orde van minder dan een seconde tot hooguit enkele seconden. Met hedendaagse technieken is het evenwel waarschijnlijker dat diverse zeer kort belichten opnamen tot een enkel beeld werden samengevoegd.

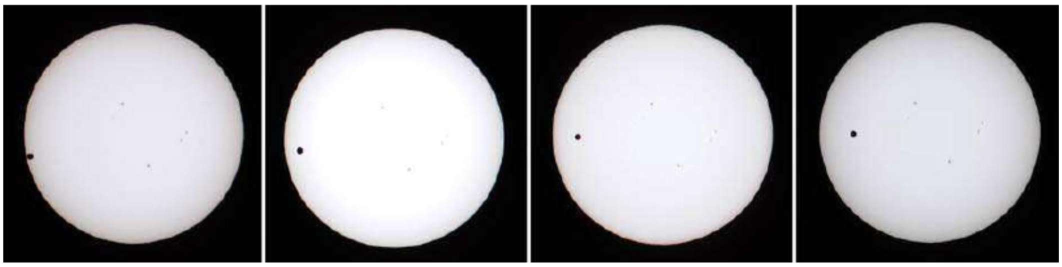
Vraag 3.
Het beeld hiernaast bevat meerdere (samengevoegde) opnamen van hetzelfde gebied aan de hemel, maar op verschillende tijdstippen.
a) Leg uit wat er te zien is.
b) Over welke periode zouden deze opnamen gemaakt zijn?

Deze (negatief) opname stelt de retrograde beweging voor van een buitenplaneet (in dit geval Mars) aan de hemel. We beschouwen de beweging van een buitenplaneet, die trager rond de Zon draait dan de Aarde. Wanneer de Aarde zich het verst van de planeet bevindt, versterkt de beweging van de Aarde die van de planeet, en zien we de planeet vrij snel voorwaarts (in dezelfde zin als Aarde en Maan) bewegen tussen de sterren. Wanneer de Aarde haar dichtste stand bij de planeet nadert, haalt de Aarde de planeet echter in, waardoor we de planeet zien teruglopen aan de hemel. Enige tijd later wordt de voorwaartse beweging terug hervat.



De lus die de planeet zo aan de hemel beschrijft, noemen we een oppositielus. De retrograde beweging van Mars duurt ongeveer drie maand. De hele opname werd dus naar schatting over ruim een half jaar gerealiseerd.

Vraag 4.



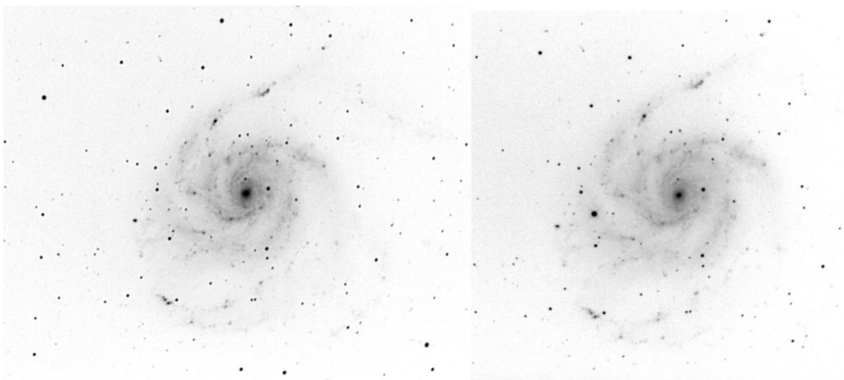
Elk van deze beelden toont hetzelfde object, maar op een verschillend tijdstip (chronologisch van links naar rechts).

a) Leg uit wat er te zien is.

b) Over welke periode zouden deze opnamen gemaakt zijn?

Deze beelden tonen een transit of overgang van een binnenplaneet over de zonneschijf. Op basis van de grootte van het schijfje lijkt het om een Venusovergang te gaan. Concreet gaat het om de Venusovergang van 6 juni 2012 (af te leiden uit de posities van de zonnevlekken).
De duur van een overgang is onder andere afhankelijk of de planeet centraal of minder centraal over de zonneschijf trekt, maar een zestal uur is een goede schatting. Op de getoonde fotoreeks is enkel het eerste gedeelte van het fenomeen te zien, zodat deze reeks opnamen gemaakt zijn over een periode in de orde van een uur.

Vraag 5.



Deze twee opnamen tonen hetzelfde object op twee verschillende tijdstippen. Leg uit wat er te zien is.

Beide (negatief) beelden tonen een en hetzelfde extragalactisch spiraalstelsel. Op de tweede opname is evenwel een bijkomende 'nieuwe' heldere ster te zien.
Het gaat hier dus om het verschijnen van een supernova.
In dit concrete geval gaat het om supernova SN 2011fe in het stelsel Messier 101 (het Windmolenstelsel). Dit was een type Ia supernova.

Open vragenreeks II: planetenstelsels

In 2017 werd een uitgebreid planeetsysteem rond de ster TRAPPIST-1 ontdekt. Zeven rotsachtige planeten die in heel dichte banen rond de moederster draaien, werden gedetecteerd via de transitmethode en naargelang hun afstand tot de moederster respectievelijk TRAPPIST-1b tot en met TRAPPIST-1h genoemd.

Vraag 1.
Een belangrijk verschil met ons eigen zonnestelsel is dat de ster TRAPPIST-1 een M-dwerg is.
a) Leg uit wat een M-dwerg is en waarom het relatief gemakkelijk is om rotsachtige planeten te detecteren bij M-dwergen.

M-dwergen of rode dwergen zijn de lichtste en dus koelste hoofdreekssterren. Ze hebben typisch een massa van minder dan 0,5 $M_\odot$ en een temperatuur lager dan ~ 3800 K. Omwille van hun lage oppervlaktetemperatuur zijn ze zeer lichtzwak. Daardoor is het helderheidscontrast bij planeet-transits groter dan bij helderder sterren en kunnen er dus kleinere planeten met een kleinere afname in de lichtcurve gedetecteerd worden. Dit geldt overigens niet enkel voor de transitmethode; een M-dwerg zal ook grotere radiële schommelingen vertonen door zijn lage massa.

b) TRAPPIST-1 heeft een effectieve temperatuur van 2600 K en een straal van $0{,}117\ R_\odot$. Bereken de lichtkracht van de ster. Hoeveel zwakker is TRAPPIST-1 vergeleken met onze Zon ($T_\odot = 5800\ K$)?

De ster wordt beschouwd als een zwarte straler en we maken gebruik van de wet van Stefan-Boltzmann:

$$\frac{L}{L_\odot} = \frac{4\pi R^2 \sigma T^4}{4\pi R_\odot^2 \sigma T_\odot^4} = \left(\frac{R}{R_\odot}\right)^2 \left(\frac{T}{T_\odot}\right)^4 = (0{,}117)^2 \left(\frac{2600}{5800}\right)^4 = 0{,}0005$$

De lichtkracht van TRAPPIST-1 is derhalve 0,05 % van die van de Zon.

Vraag 2.
De bewoonbare zone rond een ster wordt gedefinieerd als het gebied waarin een aardachtige planeet kan voorkomen met vloeibaar water aan het oppervlak. Het bepalen van de bewoonbare zone rond een ster is niet triviaal, aangezien er rekening moet worden gehouden met de atmosfeer van de planeet, de grootte, interne warmte, etc.
a) Toch kan een simpele berekening ons al veel leren. Als we bijvoorbeeld de afstand bepalen waarop een planeet evenveel energie krijgt van haar ster als de Aarde krijgt van de Zon, is dit al een goede schatting voor de positie van de bewoonbare zone. Bereken deze afstand voor TRAPPIST-1.

De lichtkracht afkomstig van een ster op afstand d wordt uitgespreid over de oppervlakte van een denkbeeldige sfeer met straal d en is dus is gelijk aan $\frac{L_*}{4\pi d^2}$. De stralingsenergie van de Zon op de Aarde (dit is de zonneconstante) bedraagt 1360 W/m^2. Daaruit volgt dat

$$\frac{L_*}{4\pi d^2} = \frac{L_\odot}{4\pi(1\,AE)^2} = \frac{3{,}839\cdot 10^{26} W}{4\pi(149{,}6\cdot 10^9 m)^2} = 1360\ \frac{W}{m^2}$$

We vinden dus

$$d = \sqrt{\frac{L_*}{L_\odot}}\, AE = 0{,}024\ AE$$

Dit betekent dat we op een afstand van ongeveer 0,024 AE van TRAPPIST-1 (onder aardse omstandigheden) mogelijk vloeibaar water kunnen aantreffen.

b) In onderstaande tabel staan alle planeten van het TRAPPIST-systeem, samen met hun omloopperiodes (in dagen).

b	c	d	e	f	g	h
1,511	2,422	4,050	6,100	9,207	12,353	~20

Kan je, op basis van de informatie uit de tabel en de vorige vraag, bepalen of er één of meerdere planeten mogelijk vloeibaar water bevatten? Zo ja, welke? De massa van de ster TRAPPIST-1 bedraagt $0{,}08\ M_\odot$.

Via de derde wet van Kepler kunnen de gemiddelde afstanden (of halve grote assen) a van alle planeten bepaald worden: $\frac{P^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{G(M+m)}$, waarbij P de omlooptijd voorstelt, G de universele gravitatieconstante, M de massa van de ster en m de massa van de planeet. Gezien $m \ll M$ vinden we dat $a = \left(\frac{GMP^2}{4\pi^2}\right)^{\frac{1}{3}}$.
Daarmee bekomen we volgende resultaten:

Planeet	b	c	d	e	f	g	h
P (dagen)	1,511	2,422	4,050	6,100	9,207	12,353	~20
a (10^{-3} AE)	11	15	21	28	37	45	~62

Daaruit kunnen we besluiten dat – op basis van onze ruwe schatting – de planeten d en e op de juiste afstand staan om mogelijk vloeibaar water te hebben. (Merk op dat een grondige analyse met behulp van computermodellen aantoont dat eveneens f en zelfs g kandidaten zijn voor vloeibaar water.)

Vraag 3.
a) Voor de ontwikkeling van intelligent leven is er voldoende tijd nodig. De tijd die een ster op de hoofdreeks doorbrengt (τ) hangt af van de aanwezige brandstof (~ M, de massa van de ster) en de snelheid waarmee die brandstof opgebruikt wordt (~ L, de lichtkracht van de ster). Bereken de verwachte tijd die TRAPPIST-1 zal doorbrengen op de hoofdreeks. Gebruik hiervoor de massa-lichtkrachtrelatie $L \sim M^{3,5}$. Schaal je berekening aan de hand van de Zon ($\tau_\odot = 10^{10}$ jaar).

De tijdschaal waarop een ster evolueert op de hoofdreeks kan bepaald worden via $\tau \sim \frac{M}{L}$.
Aangezien $L \sim M^{3,5}$, resulteert dit in

$$\frac{\tau}{\tau_\odot} \approx \frac{\frac{M}{M_\odot}}{\frac{L}{L_\odot}} \approx \frac{\frac{M}{M_\odot}}{\left(\frac{M}{M_\odot}\right)^{3,5}} = \left(\frac{M}{M_\odot}\right)^{-2,5}$$

zodat

$$\tau \approx \tau_\odot \left(\frac{M}{M_\odot}\right)^{-2,5}$$

en dus

$$\tau \approx 10^{10}\ (0{,}08)^{-2,5}\ jaar$$

of uiteindelijk

$$\tau \approx 5 \cdot 10^{12} jaar$$

Dit is uiteraard veel langer dan de Zon doorbrengt op de hoofdreeks en dit is dus voordelig voor de ontwikkeling van hogere levensvormen.

b) Uit voorgaande vragen blijkt dat planeten rond M-dwergen veelbelovende plaatsen zijn voor sterrenkundigen om te zoeken naar leven. Maar planeetsystemen rond M-dwergen vertonen ook een aantal fenomenen die erg nadelig zouden kunnen zijn voor de ontwikkeling van intelligent leven. Welke?

Lichtere sterren zoals M-dwergen vertonen vaak fotosferische activiteit en een veranderlijk oppervlak. Dit kan gepaard gaan met hevige uitbarstingen die de atmosfeer van planeten in de buurt kunnen aantasten en de ontwikkeling van leven onmogelijk kunnen maken. Een ander potentieel probleem is de sterke getijdenwerking. Omdat de bewoonbare zone zo dicht bij de ster ligt, treden er sterke getijdenkrachten op die ervoor zorgen dat de planeet vastzit in een synchrone rotatie met de moederster. Eén kant van de planeet wordt dan permanent belicht en verwarmd, terwijl de andere kant in eeuwige duisternis gehuld blijft.

Open vragenreeks III: zonnewind

De Zon verliest voortdurend massa. Dit doet ze onder andere door een constante zonnewind. Het massaverlies van de Zon hierdoor is ongeveer

$$\frac{\Delta M}{\Delta t} = 10^{-14} M_{\odot}/jaar$$

waarbij $M_{\odot}$ de massa van de Zon voorstelt.
Voor wie vertrouwd is met afgeleiden, merken we op dat het correcter is te stellen dat

$$\frac{dM}{dt} = \dot{M} = 10^{-14} M_{\odot}/jaar$$

Via behoud van massa geldt de volgende vergelijking

$$\frac{\Delta M}{\Delta t} = 4\pi r^2 \rho(r) v(r)$$

met $\rho(r)$ de dichtheid van de wind en $v(r)$ de snelheid op een bepaalde afstand *r* van de Zon.

Vraag 1.
De snelheid van deze wind kunnen we benaderen met een eenvoudige vergelijking:

$$v(r) = 2{,}6 \cdot v_{esc} \left(1 - \frac{R}{r}\right)^{\beta}$$

In deze formule is R de straal van de Zon en de exponent β voor de zonnewind is gelijk aan 0,5.
a) Bereken de ontsnappingssnelheid v_{esc} van de Zon. De formule hiervoor kan gevonden worden uit het behoud van kinetische en gravitationele potentiële energie.

Het behoud van energie betekent dat $\frac{1}{2}mv^2 = \frac{GMm}{r}$. Aangezien $v = v_{esc}$ bij $r = R$, vinden we dat $v_{esc} = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$. In het geval van de Zon levert dit $v_{esc} = 617589\ m/s$.

b) Gebruik alle gegevens om de dichtheid ρ van de wind te berekenen op r = 1 AE (AE = astronomische eenheid = de gemiddelde afstand van de Aarde tot de Zon).

Uit de vermelde vergelijking voor het behoud van massa, kunnen we de dichtheid halen:

$$\rho(r) = \frac{1}{4\pi r^2 v(r)} \frac{\Delta M}{\Delta t}$$

waarbij ook gegeven is dat $v(r) = 2{,}6 \cdot v_{esc} \left(1 - \frac{R}{r}\right)^{0,5}$.
Mits alles in de juiste eenheden om te rekenen, vinden we hieruit

$$\rho(1\ AE) = 1{,}3995 \cdot 10^{-21} \frac{kg}{m^3} = 1{,}3995 \cdot 10^{-24} \frac{g}{cm^3}$$

c) Ga ervan uit dat de wind enkel bestaat uit waterstofkernen, dus protonen. Bereken hoeveel deeltjes per kubieke centimeter in de wind op 1 AE zitten.

De massa van een proton bedraagt $m_p = 1{,}6726 \cdot 10^{-27} kg = 1{,}6726 \cdot 10^{-24} gram.$
De deeltjesdichtheid is dus $n = \frac{\rho}{m_p} = 0{,}8367$ protonen/cm^3.

Vraag 2.
Hoe meer deeltjes in de zonnewind, hoe groter de kans op poollicht, doordat meer deeltjes botsen met de magnetosfeer van de Aarde. Een waarde van 20 deeltjes/cm^3 is een start van een sterke geomagnetische storm. Dit is echter geen garantie voor poollicht omdat de snelheid en het magnetische veld ook een rol spelen.
Massieve sterren (met een massa groter dan 15 $M_\odot$) verliezen ook massa in een sterke wind. Deze kan miljoenen keren zo sterk zijn als de zonnewind met

$$\frac{\Delta M}{\Delta t} = 10^{-6} M_\odot/jaar$$

a) Geef een reden waarom de wind van een massieve ster zo krachtig kan zijn.

Massieve sterren zijn erg helder en het is dit groot aanbod aan straling dat zorgt voor een sterke wind, ondanks de grote ontsnappingssnelheid.

b) Doe berekeningen uit vraag 1 (a, b en c) opnieuw voor een massieve ster, waarbij $M = 30\ M_\odot$, $R = 8\ R_\odot$ en thans is $\beta = 0{,}8$.

We vinden achtereenvolgens:

$$v_{esc} = 1195957\ m/s$$
$$\rho(1\ AE) = 7{,}4324 \cdot 10^{-14}\ \frac{kg}{m^3} = 7{,}4324 \cdot 10^{-17}\ \frac{g}{cm^3}$$
$$n = 4{,}4436 \cdot 10^7 \text{ protonen/cm}^3.$$

c) Verklaar het verschil tussen het resultaat uit vraag 1c en 2b en breng dit in verband met de kans om poollicht te zien.

Vooral door het enorme verschil in $\dot{M}$ is de dichtheid op de afstand van de Aarde veel groter. Bij zo'n grote deeltjesdichtheid zou de Aarde gebombardeerd worden door protonen en zou de kans op poollicht veel hoger zijn.

Vraag 3.
De Zon verliest echter niet enkel massa via de constante zonnewind, maar er zijn af en toe ook gebeurtenissen waar er veel massa in één keer wordt weggeslingerd, zogenaamde coronale massa ejecties (CME).
Bespreek kort de eigenschappen van zo'n CME en wat het effect zou zijn op het poollicht.

Een CME is een enorme explosie van plasma en magnetisch veld van de corona van de Zon. Ze komen frequent voor tijdens actieve periodes van de Zon. Indien gericht naar de Aarde zorgen ze voor een toename in snelheid en dichtheid van de deeltjes die met onze magnetosfeer botsen. Ze kunnen dus zorgen voor een geomagnetische storm en intens poollicht.

Open vragenreeks IV: dubbelsterren

Een neutronenster met een massa van 1,4 zonsmassa's en een straal van 10 km bevindt zich in een binair stersysteem met een hoofdreeksster. In dit system vloeit massa van de hoofdreeksster naar de neutronenster. Per seconde wordt er zo 10^{14} kg overgedragen.

In de oplossing hierna zullen we gebruikmaken van volgende constanten:

$\mathrm{G} = 6{,}67408 \times 10^{-11}\ \mathrm{m^3kg^{-1}s^{-2}}$

$\mathrm{M_{zon}} = 1{,}98892 \times 10^{30}\ \mathrm{kg}$

$\sigma = 5{,}670367 \times 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}$

$k = 8{,}6173303 \times 10^{-5} eV\ K^{-1}$

$b = 2{,}8977729 \times 10^{-3}\ m\ K$

De gegevens uit de opgave noteren we als volgt:

$\mathrm{M_n} = 1{,}4\ \mathrm{M_{zon}}$

$\mathrm{r_n} = 10\ \mathrm{km}$

Vraag 1.
a) Hoeveel bedraagt de overgedragen massa, uitgedrukt in zonsmassa's per seconde?

De overgedragen massa bedraagt

$$\Delta m = \frac{10^{14}\ kg/s}{1{,}98892 \times 10^{30}\ kg/M_{zon}} = 5{,}03 \times 10^{-17} \frac{M_{zon}}{s}$$

b) Ga ervan uit dat alle potentiële energie van de invallende materie omgezet wordt in straling. Wat is dan de lichtkracht (luminositeit) van de neutronenster?

De lichtkracht kan als volgt geschreven worden:

$$L = \frac{GM_n\Delta m}{r_n} - \frac{GM_n\Delta m}{r}$$

waarin r de afstand tot de hoofdreeksster voorstelt. Aangezien $r \gg r_n$, kan dit vereenvoudigd worden tot:

$$L = \frac{GM_n\Delta m}{r_n} = 1{,}858 \times 10^{30} J/s$$

c) Veronderstel dat het oppervlak van deze neutronenster alle energie die ze opvangt ook terug uitzendt als straling. Wat is dan de temperatuur van deze ster?

De uitgestraalde energie kan geschreven worden als: $L = \sigma T^4 S_{bol}$ (wet van Stefan-Boltzmann), met $S_{bol} = 4\pi r_n$ de oppervlakte van de neutronenster. Hieruit volgt dat:

$$T = \sqrt[4]{\frac{L}{4\pi\sigma r_n^2}} = 1{,}27 \times 10^7 K$$

d) Welk type elektromagnetische straling zendt de neutronenster dan uit? (Toon aan met behulp van een berekening.)

De verschuivingswet van Wien stelt dat de piekgolflengte waarop straling uitgezonden wordt door een zwarte straler gelijk is aan:

$$\lambda_{piek} = \frac{b}{T} = \frac{2{,}8977729 \times 10^{-3}\ m\ K}{1{,}27 \times 10^{7}\ K} = 0{,}228\ nm$$

hetgeen leidt tot een energie $E = \frac{hc}{\lambda} = 5{,}44\ keV$.
Anderzijds kan met behulp van de Boltzmann constante de gemiddelde kinetische energie van een zwarte straler op een bepaalde temperatuur berekend worden:

$$E = kT = 8{,}6173303 \cdot 10^{-5} eV\ K^{-1} \times 1{,}27 \cdot 10^{7} K = 1{,}09\ keV$$

Dit is een stuk lager dan de piekenergie. De gemiddelde energie van de fotonen uitgezonden door de neutronenster komt dus overeen met straling in het (zachte) X-stralen gebied.

e) Met welke telescoop zou je deze neutronenster dan kunnen waarnemen?

Deze vorm van elektromagnetische straling kan waargenomen worden met een röntgentelescoop zoals bijvoorbeeld Chandra X-Ray Observatory.

Vraag 2.
Negeer voor het vervolg van deze vraag de massaoverdracht tussen beide sterren. De omlooptijd van de neutronenster rondom het massamiddelpunt bedraagt 36 dagen en de omloopsnelheid van de neutronenster rondom het gemeenschappelijk massamiddelpunt bedraagt 153 km/s.
a) Hoe ver staat de neutronenster van het gemeenschappelijk massamiddelpunt. (Ga ervan uit dat de neutronenster zich op een cirkelvormige baan bevindt.)

De gegevens uit de opgave noteren we als volgt:

$$P = 36\ dagen = 3110400\ s$$
$$v = 153\ km\ s^{-1}$$

Voor een cirkelvormige beweging geldt: $2\pi r_n = vP$.
Hieruit volgt:

$$r_n = \frac{vP}{2\pi} = 75{,}7 \times 10^{6}\ km$$

b) Wat is de massa van de hoofdreeksster?

Uit de gravitatiewet van Newton en de centripetale kracht volgt:

$$\frac{M_n v^2}{r_n} = \frac{G m M_n}{(r_n + r_h)^2}$$

Met m en r_h respectievelijk de massa van de hoofdreeksster en de afstand van de hoofdreeksster tot het gemeenschappelijk massamiddelpunt.
Op basis van behoud van impuls kan gesteld worden dat:

$$r_h = \frac{M_n r_n}{m}$$

Beide vergelijkingen combineren levert:

$$Gm^3 - v^2 r_n m^2 - 2v^2 r_n M_n m - v^2 r_n M_n^2 = 0$$

Het oplossen van deze derdegraadsvergelijking (analytisch of numeriek) levert een massa voor de hoofdreeksster:

$$m = 15{,}82\ M_{zon} \approx 3.15 \cdot 10^{31}\ kg$$

c) Hoe ver staat de hoofdreeksster van het massamiddelpunt van het systeem?

Via de wet van behoud van impuls vinden we:

$$r_h = \frac{M_n r_n}{m} = \frac{1{,}4 \times 75{,}7 \cdot 10^6\ km}{15{,}82} = 6{,}7 \times 10^6 km$$

d) Met welke snelheid beweegt de hoofdreeksster zich rondom het gemeenschappelijk massamiddelpunt?

Voor een cirkelbeweging geldt dat $2\pi r_h = v_h P$.
Aldus vinden we:

$$v_h = \frac{2\pi r_h}{P} = 13{,}5 \frac{km}{s}$$

e) Maak een schatting voor de temperatuur van deze hoofdreeksster.

Een hoofdreeksster met een massa van 15,82 zonsmassa's komt ongeveer overeen met een ster van type B0. De gemiddelde temperatuur van zo'n ster ligt rond de 30000 K.

f) Hoe zal de overdracht van massa van de hoofdreeksster naar de neutronenster de positie van het massamiddelpunt in dit systeem beïnvloeden in functie van de tijd?

De massaoverdracht zal ervoor zorgen dat de hoofdreeksster massa verliest. Dit zal tot gevolg hebben dat het massamiddelpunt relatief gezien naar de hoofdreeksster toe zal bewegen.

Open vragenreeks V: sterrenstelsels

Het interstellair medium is de open ruimte tussen de sterren waar zich een rijke mengeling van gas en stofdeeltjes bevindt. Het gas bestaat voornamelijk uit waterstof en helium, en dient als de reservebrandstof voor het maken van nieuwe sterren.
Waterstof in atomaire vorm kan worden gedetecteerd via de 21 cm straling afkomstig van de hyperfijntransitie van het waterstofatoom. Wanneer de flux F_{21cm} en de afstand D tot een sterrenstelsel gekend zijn, kan de hoeveelheid atomair waterstof (HI) bepaald worden via de formule:

$$\frac{M_{HI}}{M_\odot} = 2{,}53 \times 10^5 \cdot D^2 \cdot F_{21cm}$$

waarbij $M_\odot$ de massa van de Zon voorstelt, D uitgedrukt wordt in megaparsec en F_{21cm} in jansky per km/s.
De hoeveelheid moleculair waterstof is veel moeilijker te bepalen want de H_2 molecule laat zich niet gemakkelijk observeren in het koude interstellair medium. Een goede vuistregel is echter dat er 100 maal meer moleculair gas is dan interstellair stof.

Vraag 1.
a) Uit welke chemische elementen bestaan deze interstellaire stofdeeltjes voornamelijk?

Stof bestaat vooral uit Si, C en H, met kleine hoeveelheden Fe, Mg en Al:

- amorfe koolwaterstoffen, gaande van 10 tot 100 nanometer in doorsnede;
- amorfe silicaten zoals bijvoorbeeld olivijn en pyroxeen, 100 tot 200 nanometer in doorsnede.

b) Bespreek de eerste stap in het stervormingsproces, namelijk hoe atomair waterstof wordt geconverteerd in moleculair waterstof in het interstellair medium.

Koude en dichtheid zorgen ervoor dat atomair gas H_2 moleculen kan vormen.
Op zich is een gas van neutrale waterstofatomen vrij inert en stabiel: interne druk zorgt ervoor dat het gas niet onder zijn eigen zwaartekracht in elkaar zakt. Het gas in het interstellair medium wordt echter bestraald door de vele sterren, en bevat metalen en stof. Dit laatste zorgt voor een cruciale koppeling, door energie van het gas op te nemen en uit te stralen zodat het gas kan koelen. Wanneer waterstofatomen voldoende gekoeld zijn, kunnen ze zich nestelen op stofdeeltjes. Dit maakt het voor hen gemakkelijker om aan elkaar te binden en waterstofgas te vormen. Zo zijn stofkorrels een belangrijke katalysator bij de vorming van moleculen in het interstellair medium.

Vraag 2.
a) Voor een sterrenstelsel wordt uit de 21 cm lijn een roodverschuiving van 0,034 gemeten, en een flux van 1,8 Jy/km/s. Bereken de massa atomair waterstof in dit systeem.

Vooreerst berekenen we de afstand D. Hiervoor kan de wet van Hubble gebruikt worden: $v = H_0 D$, met v de verwijderingssnelheid en D de afstand van de galaxie. De parameter H_0 wordt de constante van Hubble genoemd en wordt meestal uitgedrukt in km/s/Mpc. De verwijderingssnelheid v kan berekend worden als $v = zc$, waarbij c de lichtsnelheid voorstelt. Bijgevolg is $D = \frac{zc}{H_0} = \frac{0{,}034 \times 3 \cdot 10^5\ km/s}{70\ km/s/Mpc} = 145{,}7\ Mpc$.
Vervolgens vinden we $M_{HI} = 2{,}53 \times 10^5 \cdot (145{,}7)^2 \cdot 1{,}8 = 9{,}67 \cdot 10^9 M_\odot$.

b) Uit ver-infrarood waarnemingen wordt de totale stofmassa in dit sterrenstelsel op $5{,}1 \cdot 10^{37}$ kg geraamd. Wat is de totale hoeveelheid brandstof (zowel in moleculaire als atomaire vorm) die dit systeem nog heeft om sterren te vormen?

De massa van het stof bedraagt $M_{stof} = \frac{5{,}1 \cdot 10^{37}}{1{,}99 \cdot 10^{30}} M_\odot = 2{,}56 \cdot 10^7 M_\odot$.
Zoals eerder aangegeven wordt de hoeveelheid moleculair gas een factor 100 hoger ingeschat dan het interstellair stof, zodat $M_{H_2} = 100\ M_{stof} = 2{,}56 \cdot 10^9 M_\odot$.
De totale beschikbare massa voor de stervorming is bijgevolg

$$M_{totaal} = M_{HI} + M_{H_2} = 9{,}67 \cdot 10^9 M_\odot + 2{,}56 \cdot 10^9 M_\odot = 1{,}2 \cdot 10^{10} M_\odot.$$

Vraag 3.
a) De verhouding tussen totale gasmassa en stervormingsgraad (in zonsmassa's per jaar) wordt ook wel de uitputtingstijd genoemd. Dit getal geeft weer hoe lang het duurt, aan het huidige stervormingstempo, om al het gas op te gebruiken. Gemiddeld genomen is de uitputtingstijd voor lokale sterrenstelsels ongeveer 2 miljard jaar. Schat hieruit de stervormingsgraad.

De uitputtingstijd $t = M_{totaal}/SVG$ waarbij SVG de stervormingsgraad voorstelt.
Bijgevolg is $SVG = \frac{M_{totaal}}{t} = \frac{1{,}2 \cdot 10^{10} M_\odot}{2 \cdot 10^9\ jaar} = 6 \frac{M_\odot}{jaar}$.

b) Veronderstel nu dat het sterrenstelsel sinds zijn geboorte 12 miljard jaar geleden aan hetzelfde constante tempo nieuwe sterren vormde. Hoeveel waterstofgas was er dan minstens aanwezig bij de geboorte van dit sterrenstelsel?

Dit is misschien wel een beetje een strikvraag.
Er is $SVG \times 12 \cdot 10^9 jaar = 7{,}2 \cdot 10^{10} M_\odot$ aan sterren gevormd in de afgelopen 12 miljard jaar. Dat betekent dat er $7{,}2 \cdot 10^{10} M_\odot$ aan atomair waterstof aanwezig moet geweest zijn. Hierbij laten we buiten beschouwing dat een deel van het gas in stralingsenergie wordt omgezet. Bij deze $7{,}2 \cdot 10^{10} M_\odot$ komt nog het huidige gasreservoir (uit de vorige vraag):
$7{,}2 \cdot 10^{10} M_\odot + 1{,}2 \cdot 10^{10} M_\odot = 8{,}4 \cdot 10^{10} M_\odot$. Dit is een grove schatting van het initiële gasreservoir bij geboorte van het sterrenstelsel.

Dit is het einde van de eerste ronde van
de Vlaamse Sterrenkunde Olympiade 2018.