

Vlaamse Sterrenkunde Olympiade 2021

31 januari 2021

Welkom bij de Vlaamse Sterrenkunde Olympiade 2021! Zoals uitgelegd op de website mag je deze Olympiade thuis oplossen, met al het onderzoekwerk dat je nodig acht. De beste vijf inzendingen worden uitgenodigd om deel te nemen aan de tweede ronde van de Vlaamse Sterrenkunde Olympiade en strijden voor de hoofdprijzen. De tweede ronde gaat door op zaterdag 8 mei 2021. De winnaar mag – naar keuze – gaan waarnemen met de Mercatortelescoop op La Palma (Canarische Eilanden), inclusief reis en verblijf, of wordt de trotse eigenaar van een Celestron NexStar 8SE telescoop.

Het is de bedoeling dat je de onderstaande vragen oplost en je antwoorden aan ons bezorgt, uiterlijk op **5 april 2021**. Dit kan elektronisch via e-mail naar deelname@sterrenkundeolympiade.be of per post naar het adres:

Vlaamse Sterrenkunde Olympiade
Vereniging Voor Sterrenkunde
Oostmeers 122c
8000 Brugge

Let zeker op de volgende aandachtspunten:

- De wedstrijd staat open voor alle leerlingen aan een Vlaamse secundaire school.
- Elke inzending moet vergezeld zijn van het standaard deelnameformulier. In principe is het de bedoeling dat de deelnemers de vragen individueel beantwoorden. Een samenwerkingsverband van meerdere deelnemers is mogelijk (maar wordt eigenlijk afgeraden), op voorwaarde dat alle deelnemers vermeld worden. Er kan echter hoogstens één van de deelnemers van dergelijk samenwerkingsverband tot de finale toegelaten worden. Inzendingen van verschillende deelnemers die overduidelijke gelijkenissen met elkaar vertonen, zullen door de jury als één enkele inzending beschouwd worden.
- De opgaven mogen op gewoon papier geschreven worden. Het is dus niet nodig de antwoorden via tekstverwerker op te maken (maar het mag wel natuurlijk). Digitaal insturen kan door de antwoorden te scannen (bij voorkeur in PDF-formaat). Je mag tekst schrijven, berekeningen doen, diagrammen maken of wat je zelf ook maar nodig acht om de vragen goed te kunnen beantwoorden.
- Elke vragenreeks dient op een nieuw (afzonderlijk) blad gestart te worden.
- Schrijf alle antwoorden duidelijk en overzichtelijk op. Zorg ervoor dat je antwoorden duidelijk leesbaar zijn. Let ook op het gebruik van de juiste eenheden.

- Niet alle vragen zijn even gemakkelijk. Raak hierdoor niet ontmoedigd! Deze olympiade is samengesteld om de beste inzenders te kunnen selecteren en wellicht is er geen enkele inzender die de olympiade perfect maakt. Kortom: ook als je maar een deel van de vragen hebt kunnen maken: stuur vooral je uitwerkingen in! Er worden immers ook prijzen verloot onder de inzenders die niet tot de finale doorstoten.
- Denk eraan dat opgaven en antwoorden van vorige jaren terug te vinden zijn op onze website www.sterrenkundeolympiade.be (bij 'voorbeelden'). Dit kan wellicht soms inspiratie opleveren.
- Vragen kunnen bij eerste lezing soms moeilijk of onbegrijpelijk overkomen. Lees in elk geval altijd eerst de volledige vraag, omdat verder in de vraag soms elementen kunnen aangereikt worden die zaken verklaren die eerst onduidelijk leken. Ook meerdere keren een vraag herlezen, kan je in vele gevallen helpen.
- Voor sommige opgaven zal je niet alle benodigde informatie voorhanden hebben. Het is dus goed mogelijk dat je een begrip (bijvoorbeeld supernova, dichtheidsprofiel, ...), getal (bijvoorbeeld de massa van de Zon, de constante van Boltzmann, ...) of symbool (M_{\odot} , ...) op internet of in een boek wil opzoeken. Dit mag je dan ook doen waar je dat maar nuttig lijkt, maar je vermeldt best je bron hierbij. De bronvermelding speelt mee als criterium bij de beoordeling van je antwoorden.
- Voor de meerkeuzevragen is geen motivatie vereist. Daar volstaat het antwoord. Voor elke vraag is er één en slechts één van de geboden antwoordalternatieven correct (tenzij het uitdrukkelijk anders is vermeld); in geval van twijfel geef je het 'beste' alternatief. Ben je er vast van overtuigd dat er toch meerdere goede alternatieven zijn, leg dan zeker uit waarom.
- Voor de open vragen wordt voor elk antwoord een motivatie verwacht. Een getal als uitkomst alleen verdient geen punten. Laat met een berekening zien hoe je aan een getal komt, en leg uit wat je doet om tot het antwoord te komen. Kan je een getal niet precies uitrekenen, maar weet je wel ongeveer wat je zou moeten doen, schrijf dit dan ook op!
- Bewaar een eigen kopietje van je antwoorden, want na het afsluiten van de eerste ronde zetten we de oplossingen en uitwerkingen op onze website, zodat je zelf alvast kunt kijken hoe je het hebt gedaan.
- De olympiade wordt nagekeken door een daarvoor aangewezen commissie. Over de uitslag kan niet worden gediscussieerd.

Heel veel succes!

Het organiserend comité van de Vlaamse Sterrenkunde Olympiade 2021: Robin Baeyens (KULeuven), Robin Björklund (KULeuven), Jelle Dhaene (Cozmix), Frank Tamsin (VVS), Bert Vander Meulen (UGent) en Sébastien Viaene (UGent).

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



Vlaamse Sterrenkunde Olympiade 2021

Deelnameformulier

Naam:	_____
Voornaam:	_____
Straat en nummer:	_____
Postcode en gemeente:	_____
Geboortedatum:	_____
E-mail:	_____
Telefoon:	_____
Naam van de school:	_____
Adres van de school:	_____
Leerjaar en studierichting:	_____
Leraar fysica:	naam: _____
	e-mail: _____
Leraar aardrijkskunde:	naam: _____
	e-mail: _____
Leraar wiskunde:	naam: _____
	e-mail: _____
Hoe werd je op de hoogte	_____
gebracht van de	_____
Sterrenkundeolympiade:	_____

Meerkeuze vragenreeks

1. Veelal zeggen we dat de planeten rond de Zon draaien. Correcter is te stellen dat de Zon en bijvoorbeeld de planeet Jupiter beide een baan beschrijven rond een gemeenschappelijke massamiddelpunt. Bereken de snelheid van de Zon rond het massamiddelpunt door de aanwezigheid van Jupiter.

- a) 6 m/s
- b) 12 m/s
- c) 600 m/s
- d) 1200 m/s
- e) 13 km/s

2. Men vermoedt dat de huidige atmosfeer van de Aarde

- a) bestaat uit overblijfselen van het oorspronkelijke gas van de nevel waaruit het zonnestelsel is ontstaan, en aangetrokken werd door een protoplaneet die dan de Aarde is geworden;
- b) het resultaat is van het smelten en verdampen van gletsjers uit de laatste ijstijd;
- c) hoofdzakelijk bestaat uit waterstof en helium;
- d) opgebouwd is uit gassen die vrijgekomen zijn door het verhitten van rotsen, enige tijd na het ontstaan van de Aarde;
- e) het gevolg is van een botsing tussen de Zon en een andere ster.

3. We verwachten dat de kans om leven te vinden op een planeet rond een ster met een grote massa eerder klein is.

- a) Dit is omdat sterren met een grote massa veel te lichtkrachtig zijn.
- b) Dit is omdat sterren met een grote massa niet lang genoeg leven.
- c) Dit is omdat sterren met een grote massa te heet zijn opdat leven in hun omgeving mogelijk zou zijn.
- d) Dit is omdat planeten geen stabiele banen kunnen beschrijven rond sterren met een hoge massa.
- e) Dit klopt niet: de kans om leven te vinden rond een ster met hoge massa is niet kleiner dan voor een andere ster.

4. Ster A heeft een massa van $3,5 M_{\odot}$ en haar radiële snelheid varieert met een amplitude van 24,2 m/s en een periode van 23,22 jaar. Dit lijkt op de aanwezigheid van een exoplaneet te wijzen. Welk van volgende waarden benadert het best de massa van die exoplaneet, uitgedrukt in Jupiter-massa's (M_J). Er mag verondersteld worden dat de baan van de exoplaneet cirkelvormig is en dat de inclinatie ervan 90° bedraagt. De massa van Jupiter bedraagt $1,898 \cdot 10^{27}$ kg. Verder mag ook aangenomen worden dat de massa van de exoplaneet veel kleiner is dan die van ster A.

- a) 0,7 M_J .
- b) 2,1 M_J .
- c) 5,6 M_J .
- d) 9,9 M_J .
- e) 13,2 M_J .

5. Bij de ster Proxima Centauri is met behulp van de radiële snelheidsmethode een exoplaneet gevonden (Proxima Centauri b). De omlooptijd van Proxima Centauri b bedraagt 11,19 dagen. De ster Proxima Centauri heeft een massa van 0,122 zonsmassa's, een straal van 0,154 keer de straal van de Zon en een effectieve temperatuur van 3042 K. Welk van volgende waarden is dan de beste schatting voor de lengte van de halve grote as van de baan van Proxima Centauri b?

- a) 0,01 AE
- b) 0,05 AE
- c) 0,1 AE
- d) 0,5 AE
- e) 1 AE

6. Stel je voor dat onze Zon plotseling zou vervangen worden door een M-dwerg met een massa die half zo groot is als die van de Zon. Als de lengte van de halve grote as van de baan van de Aarde niet zou wijzigen, wat zou dan de nieuwe omlooptijd van de Aarde rond die M-dwerg zijn?

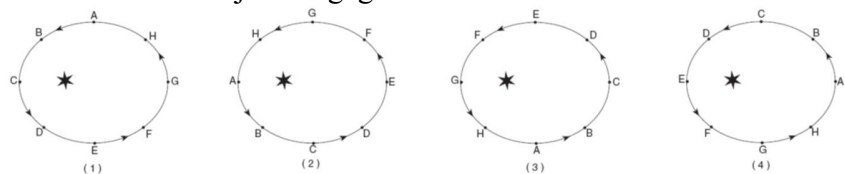
- a) 0,707 jaar
- b) 1 jaar
- c) 1,414 jaar
- d) 2 jaar
- e) Er is onvoldoende informatie om dit te kunnen bepalen.

7. Onderstaande tabel geeft de relatieve grootte weer van de gravitatiekracht tussen een ster en een planeet, en dit op acht posities op de baan van de planeet rond de ster (aangegeven met letters van A tot en met H). Grotere getallen betekenen dat de gravitatiekracht groter is.

Positie van de planeet op haar baan	A	B	C	D	E	F	G	H
Relatieve sterkte van de gravitatie tussen de ster en de planeet	52	42	25	12	10	12	25	42

Welk van de figuren hieronder komt het best overeen met de relatieve sterkte van de gravitatie tussen de ster en de planeet zoals die in de tabel zijn weergegeven?

- a) (1)
- b) (2)
- c) (3)
- d) (4)



e) Met de gegeven informatie is het niet mogelijk om hierover een oordeel te vellen.

8. Planeet Negen is een hypothetische planeet in ons zonnestelsel die een verklaring zou kunnen bieden voor de verdeling van de baanelementen van trans-Neptuniaanse objecten. Veronderstel dat het perihelium van Planeet Negen op 200 AE van de Zon zou gelegen zijn en het aphelium op 1200 AE. Hoe groot zou dan de excentriciteit e van de baan van Planeet Negen zijn?

- a) $e = 0$
- b) $e \approx 0,286$
- c) $e = 0,5$
- d) $e \approx 0,714$
- e) $e > 1$

9. De hoekdiameter van ster A met schijnbare bolometrische magnitude van 2 is 2,5 keer groter dan de hoekdiameter van ster B met schijnbare bolometrische magnitude van 7. Wat is de verhouding van de temperatuur van ster A tot die van ster B?

- a) 2,5
- b) 4
- c) 2
- d) 5
- e) 3,5

10. Bij optische golflengten wordt stervorming sterk verduisterd door stof. Studies van protoplanetaire schijven worden daarom meestal uitgevoerd bij infrarood- of submillimetergolflengten. Waarom worden deze waarnemingen minder sterk beïnvloed door interstellair stof?

- a) De hogere hoekresolutie van interferometers middelt stoeffecten uit.
- b) De thermische emissie van interstellair stof is relatief laag bij langere golflengten.
- c) Stofdeeltjes verstrooien kortere golflengten efficiënter dan langere golflengten.
- d) De optische verduistering is het resultaat van atomaire overgangen die niet aanwezig zijn bij langere golflengten.
- e) Geen van bovenstaande.

11. De rotatie-as van de Aarde wijst momenteel ongeveer in de richting van Polaris (in het sterrenbeeld Kleine Beer), maar Polaris zal niet altijd de Poolster zijn. De richting van de rotatie-as van de Aarde wijzigt met een periode van 26000 jaar; men noemt dit de precessie. We beschouwen nu een ster die zich op een hoekafstand van $26^{\circ}11'$ van Polaris bevindt. Ergens in de toekomst zal deze ster de Nieuwe Poolster worden. Over hoeveel jaar zal dit het geval zijn?

- a) 1500 jaar
- b) 13000 jaar
- c) 2000 jaar
- d) 5000 jaar
- e) 26000 jaar

12. In april 2019 bracht de Event Horizon Telescope de eerste opname uit van het superzware zwarte gat in het centrum van het sterrenstelsel M87. Het zwarte gat heeft een diameter van ongeveer 270 astronomische eenheden en bevindt zich op een afstand van 16,4 Mpc. De waarnemingen werden uitgevoerd bij een golflengte van 1,3 mm. Wat is bij deze golflengte de geschatte minimale basislijn (ook wel effectieve diameter genoemd) die nodig is om het zwarte gat te kunnen afbeelden?

- a) $2 \cdot 10^3$ km
- b) $2 \cdot 10^4$ km
- c) $2 \cdot 10^5$ km
- d) $2 \cdot 10^6$ km
- e) $2 \cdot 10^7$ km

13. Welk van volgende sterren is vrijwel nergens of nooit zichtbaar op het noordelijk halfrond?

- a) α Aurigae
- b) γ Cygni
- c) α Lyrae
- d) σ Octantis
- e) β Orionis

14. Op welke geografische breedte komt de ster Antares (α Sco) nooit op? De declinatie van Antares is $\delta = -26^{\circ}19'$.

- a) $26^{\circ}19'$
- b) $63^{\circ}41'$
- c) $56^{\circ}19'$
- d) $53^{\circ}41'$
- e) Dit komt nergens voor.

15. Waarom 'verbrandt' helium veel sneller dan waterstof in een ster?

- a) De ster gaat een andere stellaire evolutiefase binnen voordat het helium helemaal op is.
- b) De temperatuur van de ster is hoger tijdens de fase van heliumverbranding.
- c) Bij het begin van de evolutie van een ster is de fractie helium veel kleiner dan de fractie waterstof.
- d) De energie die vrijkomt bij elke fusiereactie van helium is veel kleiner dan bij een fusiereactie van waterstof het geval is.
- e) Geen van bovenstaande.

16. We beschouwen een sterrenhoop waarbij het afbuigpunt in het Hertzsprung-Russell-diagram zich bevindt bij een effectieve temperatuur van ongeveer 6000 K. De leeftijd van die sterrenhoop is dan ongeveer:

- a) 10 miljoen jaar
- b) 100 miljoen jaar
- c) 1 miljard jaar
- d) 10 miljard jaar
- e) 100 miljard jaar

17. Na koolstoffusie in een zware ster komt de fusie van neon waarin zuurstof en magnesium geproduceerd wordt, gevolgd door zuurstoffusie tot silicium. Hoewel er wel waterstof, helium, koolstof en zuurstof witte dwergen bestaan, zijn er geen silicium witte dwergen. Hoe komt dit?

- a) De sterren die zwaar genoeg zijn om neon en zuurstoffusie in de kern te hebben, ontwikkelen zich tot andere objecten dan een witte dwerg.
- b) Silicium is te zwaar om de elektronen in een ontaarde toestand te krijgen en een witte dwerg te vormen.
- c) Bij neon en zuurstoffusie komt geen energie vrij omdat deze processen endotherm zijn, hierdoor is er geen energie beschikbaar om een witte dwerg te vormen.
- d) De neon- en zuurstoffusie duren zo kort dat er niet genoeg tijd is om een witte dwerg te vormen bestaande uit silicium.
- e) Het klopt niet: er bestaan wel degelijk silicium witte dwergen.

18. We beschouwen de Schwarzschildstraal van een zwart gat als de straal van dit object. Wat is dan de oppervlakte A van een zwart gat met massa M ?

- a) $A = \frac{16 \pi}{c^4} G^2 M^2$
- b) $A = \frac{4 \pi}{c^4} G^2 M^2$
- c) $A = \frac{4 \pi}{3 c^4} G^2 M^2$
- d) $A = 16 \pi G^2 M^2$
- e) $A = \frac{16 \pi}{c^2} G^2 M^2$

19. Stel: we zien een supernovarestant aan de hemel staan met een totale hoekgrootte van 5 boogminuten. We weten dat het restant zich op een afstand van 250 parsec van ons bevindt. Als we aannemen dat het restant in een bolvorm is geëxpandeerd met een constante expansiesnelheid van 20 km/s, hoe lang geleden heeft deze supernova dan ongeveer plaatsgevonden, zoals gezien vanaf de Aarde?

- a) ongeveer 8900 jaar geleden
- b) ongeveer 5.5 maanden geleden
- c) ongeveer $4,02 \cdot 10^{20}$ seconden geleden
- d) ongeveer 13,7 miljard jaar geleden
- e) er is niet genoeg informatie voorhanden om deze vraag te kunnen beantwoorden

20. Bij een bepaald sterrenstelsel wordt de $H\alpha$ -lijn (die een rustgolflengte $\lambda_0 = 656,28$ nm heeft) waargenomen bij golflengte $\lambda = 814,35$ nm. In de veronderstelling dat deze roodverschuiving louter kosmologisch van aard is, hoe groot schatten we dan de afstand tot dit sterrenstelsel?

- a) 124 Mpc
- b) 356 Mpc
- c) 524 Mpc
- d) 910 Mpc
- e) 1030 Mpc

21. Voor welk soort gas is de absorptielijn van 21 cm een indicator?

- a) Koude neutrale atomaire waterstof
- b) Koude moleculaire waterstof
- c) Warme neutrale waterstof
- d) Warme geïoniseerde waterstof
- e) HII-gebieden

22. Een waarnemer staat op de top van Burj Khalifa, het hoogste gebouw op Aarde (830 meter), gelegen op $25,2^\circ$ noorderbreedte en $55,3^\circ$ oosterlengte. We bekijken de schaduw van het gebouw op de grond in de loop van een jaar. Welk van volgende uitspraken geeft de situatie het best weer?

- a) De schaduw lengte op de middag varieert tussen minimum 10 meter en maximum 1050 meter.
- b) De schaduw lengte op de middag varieert tussen minimum 25 meter en maximum 950 meter.
- c) De schaduw lengte op de middag varieert tussen minimum 35 meter en maximum 850 meter.
- d) De schaduw lengte op de middag varieert tussen minimum 45 meter en maximum 750 meter.
- e) De lengte van de schaduw op de middag blijft het hele jaar door hetzelfde.

23. De ontsnappingsnelheid van een object is de snelheid die nodig is om te ontsnappen aan de zwaartekracht van dit object. De rand van een zwart gat, van waarbinnen er geen ontsnapping meer mogelijk is, heet de waarnemingshorizon. Wat is de ontsnappingsnelheid van een zwart gat als je op de waarnemingshorizon staat?

- a) de kleinst mogelijke snelheid is voldoende
- b) oneindig groot
- c) de lichtsnelheid
- d) dat hangt af van de massa van het zwarte gat
- e) dat hangt af van de massa van de ontsnapper

24. Wat beschrijft het verband tussen de intrinsieke lichtkracht van een spiraalstelsel met zijn asymptotische rotatiesnelheid?

- a) het fundamenteel vlak
- b) de Tully-Fisher relatie
- c) het Press-Schechter formalisme
- d) de Faber-Jackson relatie
- e) het Hertzsprung-Russell diagram

25. Het centrum van het Melkwegstelsel is moeilijk te bestuderen in het visueel gebied. Er bevinden zich namelijk dikke stofwolken tussen de aarde en het centrum van het Melkwegstelsel. Toch kunnen we de massa van het zwarte gat daar bepalen aan de hand van de bewegingen van de sterren. Hoe kunnen astronomen deze sterren waarnemen?

- a) met ruimtetelescopen zoals de Hubble Space Telescope;
- b) met radiotelescopen op aarde;
- c) via telescopen die nabij-infrarood licht meten;
- d) via telescopen die UV licht meten;
- e) met interferometrie.

26. Uit de rotatiekrommes van spiraalstelsels kunnen we afleiden dat deze galaxieën heel wat donkere materie bevatten. Valt daaruit ook af te leiden waar in de sterrenstelsels deze donkere materie zich bevindt?

- a) Ja, het blijkt dat de donkere materie uniform verdeeld is over de galactische schijf;
- b) Ja, het blijkt dat de donkere materie geconcentreerd zit rond het centrum van een galaxie;
- c) Ja, het blijkt dat de donkere materie zich vooral bevindt op grotere afstanden van het centrum van een galaxie, dus in de halo die de schijf omgeeft;
- d) Neen, uit de rotatiekromme valt niets te besluiten omtrent de plaats van de donkere materie.
- e) Donkere materie komt alleen in elliptische stelsels voor en niet in spiraalstelsels.

27. In 1929 publiceerde Edwin Hubble een artikel waarin hij een lineaire relatie beschrijft tussen de radiële snelheden en de afstanden van extragalactische objecten. Bijgaande figuur is uit dat artikel overgenomen, waarbij de snelheden uitgedrukt zijn in km/s (in de oorspronkelijke grafiek ontbreekt dus "s"). De volle lijn toont een 'beste benadering' voor de datapunten. Wat is de waarde van de constante van Hubble die uit deze waarnemingen kan afgeleid worden?

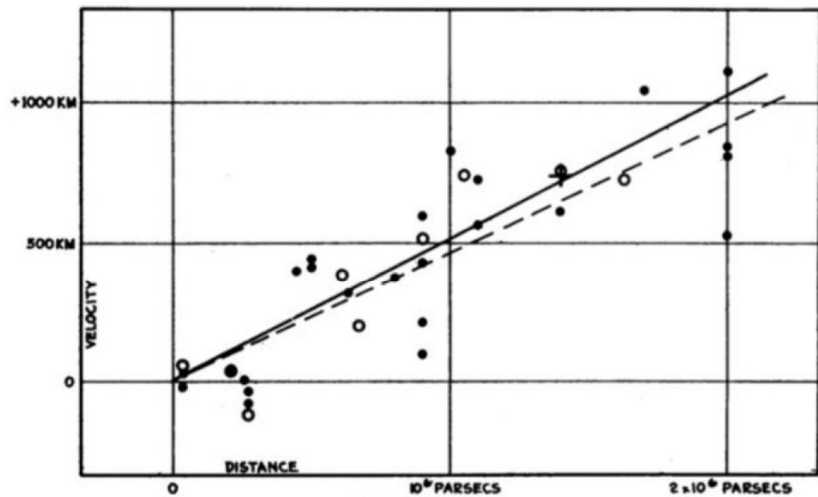


FIGURE 1
Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae.

- a) 500 km/s/pc.
- b) 70 km/s/pc.
- c) 500 km/s/Mpc.
- d) 50 km/s/Mpc.
- e) 70 km/s/Mpc.

28. Om afstanden te bepalen worden in de sterrenkunde heel wat diverse methoden gebruikt, elk geschikt voor een bepaald interval aan afstanden. Rangschik de volgende methoden volgens toenemend afstandsbereik:

- a) Parallax – type Ia supernovae – Cepheïden
- b) Parallax – Cepheïden – type Ia supernovae
- c) Type Ia supernovae – Cepheïden – parallax
- d) Cepheïden – parallax – type Ia supernovae
- e) Cepheïden – type Ia supernovae – parallax

29. Men denkt dat het grootste gedeelte van het helium in het heelal gevormd is:

- a) in rode reuzen.
- b) tijdens de big bang.
- c) in supernovae.
- d) in hoofdreekssterren.
- e) door het uiteenvallen van zwaardere elementen.

30. Waarom is de kosmische achtergrondstraling zo koud?

- a) Interstellaire stofkorrels absorberen de straling waardoor die afkoelt.
- b) Doordat wij zo snel door het heelal bewegen, lijkt het alsof het om koude straling gaat.
- c) Door de expansie van het heelal is de golflengte van de straling toegenomen.
- d) De kosmische achtergrondstraling wordt hoofdzakelijk uitgezonden door koude sterren.
- e) Dit klopt niet; integendeel door de kosmische achtergrondstraling baadt het heelal in een warme gloed.



1.	
2.	
3.	
4.	
5.	
6.	
7.	
8.	
9.	
10.	

11.	
12.	
13.	
14.	
15.	
16.	
17.	
18.	
19.	
20.	

21.	
22.	
23.	
24.	
25.	
26.	
27.	
28.	
29.	
30.	

Open vragenreeks I: supermassieve zwarte gaten

Bij de vragen hieronder mag gebruikgemaakt worden van volgende gegevens:

Massa van de Aarde: $M_{\text{aarde}} = 5,972 \times 10^{24} \text{ kg}$

Massa van de Zon: $M_{\text{zon}} = M_{\odot} = 1,989 \times 10^{30} \text{ kg}$

Lichtkracht van de Zon: $L_{\text{zon}} = L_{\odot} = 3,828 \times 10^{26} \text{ W}$

Absolute magnitude van de Zon: $M_{\odot} = 4,74$

Afstand van de Zon tot het centrum van het Melkwegstelsel: $d_{\text{zon-mw}} = 28000 \text{ lichtjaar}$

Snelheid van de Zon op haar baan rond het Melkwegcentrum: $v_{\text{zon,melkweg}} = 220 \text{ km s}^{-1}$

Hubble parameter: $H_0 = 72 \text{ km Mpc}^{-1} \text{ s}^{-1}$

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

Lichtsnelheid in vacuüm: $c = 299\,792\,458 \text{ m s}^{-1}$

Alle gegevens die nodig zijn om deze vragenreeks op te lossen zijn hierboven vermeld. Er mogen dus geen andere numerieke data gebruikt worden.

Vraag 1.

Een quasar is een extreem lichtkrachtige actieve galactische kern waarin er zich een supermassief zwart gat bevindt dat een massa kan hebben van enkele miljoenen tot miljarden zonsmassa's, omringd door een gasachtige accretieschijf (ook wel groeischijf genoemd). Het gas in deze schijf valt inwaarts naar het zwarte gat toe en de energie die zich in dit gas bevindt, kan terug uitgezonden worden als elektromagnetische straling. In totaal kan ongeveer 10 tot 40% van alle massa die op de accretieschijf valt terug uitgestraald worden.

Veronderstel dat 10% van alle invallende massa terug weggestraald wordt, dan wordt deze uitgestraalde energie gegeven door

$$E = \frac{1}{10} mc^2$$

Deze formule kan gebruikt worden om de massa die invalt op het zwarte gat te bepalen.

We beschouwen een quasar die zich op een afstand 3,26 miljard lichtjaar van ons bevindt, met een schijnbare bolometrische magnitude $m_{\text{bol},Q} = 11,2$.

Gevraagd is volgende vragen te beantwoorden.

- Wat is de absolute bolometrische magnitude van deze quasar?
- Wat is de lichtkracht (luminositeit) van deze quasar?
- Hoeveel keer meer energie zendt deze quasar uit dan onze Zon?
- Hoeveel massa moet er ieder jaar op deze quasar invallen om de gemeten lichtkracht te kunnen verklaren.
- Als we veronderstellen dat 25% van alle invallende massa als energie uitgezonden wordt, hoeveel massa moet er dan ieder jaar invallen op deze quasar om de metingen te verklaren?

Vraag 2.

De massa van supermassieve zwarte gaten kan bepaald worden door de snelheid v te meten van materie die zich in een baan rondom het zwarte gat bevindt, alsook de afstand van de materie tot het zwarte gat.

- a) Toon aan, door gebruik te maken van Newtons universele gravitatiewet, dat de massa binnen een afstand van het galactisch centrum geschreven kan worden als:

$$\mathfrak{M}_r = \frac{r \times v^2}{G}$$

Hierbij stelt \mathfrak{M}_r de massa voor die zich bevindt binnen een afstand r van het galactisch centrum.

- b) Wat is de totale massa van het gedeelte van ons Melkwegstelsel dat zich binnen de omloopbaan van de Zon (rond het centrum van ons Melkwegstelsel) bevindt?
- c) M87 is een sterrenstelsel dat zich op een afstand van 16,4 Mpc van ons bevindt. De maximale roodverschuiving die gemeten wordt voor het geïoniseerde gas dat zich op een afstand van 60 lichtjaar van het centrum van M87 bevindt, bedraagt $z = 0,0066$. Hoe groot is de massa van het zwarte gat dat zich in het centrum van M87 bevindt? Hierbij mag verondersteld worden dat alle massa binnen deze straal zich in het centrum van M87 bevindt. Er mag ook van uitgegaan worden dat het galactisch vlak van M87 voor een waarnemer op Aarde in de gezichtslijn gelegen is.

Open vragenreeks II: de ringen van Saturnus

Bij de vragen hieronder mag gebruikgemaakt worden van volgende gegevens:

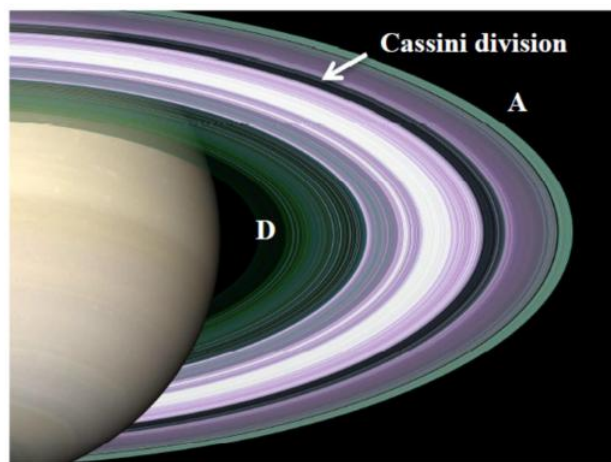
Massa van Saturnus: $M_{\text{saturnus}} = 5.68 \times 10^{26} \text{ kg}$

Straal van Saturnus: $R_{\text{saturnus}} = 60270 \text{ km}$

De dichtheid van ijs: $\rho_{\text{ijs}} = 930 \text{ kg m}^{-3}$

Een mogelijk theorie die kan verklaren waarom de gasreuzen in ons zonnestelsel ringen hebben, is dat deze afkomstig zijn van een kleine maan die de grote planeet te dicht is genaderd. Wanneer getijdenkrachten, die een verschil veroorzaken tussen de inwerkende kracht op de dichte en de verre kant van de maan, groter worden dan de gravitatiekracht die de maan samenhoudt, dan wordt deze uiteen getrokken.

De minimale afstand tot waar de maan de gasreus kan naderen, wordt de 'Roche limiet' genoemd, naar de Franse astronoom Edouard Roche die deze limiet voor de eerste maal berekende. Deze limiet is gedefinieerd als het punt waarop de gravitatiekracht gegenereerd door de maan aan het oppervlak ervan, gelijk is aan de getijdenkracht die aan het oppervlak ervaren wordt op deze afstand.



Vraag 1.

Beschouw een sferische planeet met massa M en straal R , en een perfect starre (i.e. onvervormbare) bolvormige maan met massa m en straal r , wentelend rond deze planeet in een cirkelvormige baan met straal d . Voor een klein deeltje met massa u dat zich op het oppervlak van de maan bevindt, wordt de gravitatiekracht die het ondervindt van de maan zelf gegeven door

$$F_{\text{grav}} = \frac{Gmu}{r^2}$$

en de getijdekracht die het ondervindt onder invloed van de gasreus door

$$F_{\text{tidal}} = \frac{2GMur}{d^3}$$

a) Toon aan, door gebruik te maken van bovenstaande formules, dat de Roche limiet d_{RL} geschreven kan worden als

$$d_{RL} = R \left(2 \frac{\rho_P}{\rho_m} \right)^{1/3}$$

waarbij ρ_P en ρ_m de massadichtheden van respectievelijk de planeet en de maan voorstellen.

- b) Gebruik bovenstaande formule om de Roche limiet voor Saturnus te berekenen, ervan uitgaande dat de maan opgebouwd is uit ijs (water).

Vraag 2.

- a) In de praktijk zal een maan al beginnen vervormen nog voordat deze de Roche limiet bereikt, en er meer als een ellipsoïde gaan uitzien dan als een sfeer. Hierdoor zullen de getijdenkrachten toenemen, waardoor het voorgaande simplistische model eigenlijk slechts een minimum straal voor de Roche limiet voorspelt.

Als we uitgaan van het andere extreme geval, namelijk dat de maan bestaat uit een vloeistof die kan vervormen zonder weerstand (wat een goede benadering is voor sterren in een dubbelstersysteem), dan kan er aangetoond worden dat de formule voor de Roche limiet als volgt geschreven kan worden:

$$d_{RL} \approx 2.44 R \left(\frac{\rho_P}{\rho_m} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Gebruik deze nieuwe formule om de nieuwe Roche limiet te berekenen voor een ijsmaan rondom Saturnus.

- b) De binnenste rand van de ringen van Saturnus (D-ring) bevindt zich op een afstand van $1,11 R_{Saturnus}$ en de buitenste ringen (A-ring) op een afstand van ongeveer $2,27 R_{Saturnus}$. Vallen de ringen van Saturnus tussen de Roche limieten berekend voor de twee extreme gevallen van een perfect starre en vloeibare maan?

Vraag 3.

Edouard Roche was een van de eerste wetenschappers die opperde dat de vernietiging van een maan, die hij Veritas noemde, aan de basis lag van de vorming van de ringen rond Saturnus. Neem aan dat deze maan rond Saturnus draaide in wat nu de 'Scheiding van Cassini' genoemd wordt, een schijnbare opening tussen de ringen op een afstand van ongeveer $2 R_{Saturnus}$. Ga er ook van uit dat de vloeibare Roche limiet de meest relevante van beide limieten is in deze context. Gegeven dat de massa van de ringen ongeveer $3.0 \times 10^{19} \text{ kg}$ bedraagt, schat dan de straal van Veritas.

Open vragenreeks III: astrochemie

Chemie lijkt universeel te zijn. Dit houdt in dat de chemische wetmatigheden overal dezelfde werken: in onze laboratoria, en in verafgelegen moleculaire wolken. De omstandigheden kunnen weliswaar sterk verschillen. Denk maar aan extreem hoge of lage temperaturen. Toch kunnen labmetingen en zelfs industriële toepassingen bijdragen aan een beter beeld van chemie in het heelal.

Vraag 1.

De bouwstenen van alle objecten in het universum zijn atomen. Ze vormen moleculaire wolken, waaruit sterren en planeten ontstaan, die op hun beurt weer groeperen in grotere structuren. Het is dus zeer belangrijk te weten in welke verhoudingen de chemische elementen voorkomen. De Zon is hierbij een referentie. De abundanties van enkele elementen, voor de Zon, staan gegeven in de tabel hieronder.

Atoomnummer	Element	Abundantie
1	H	12,00
2	He	10,93
3	Li	1,05
6	C	8,43
7	N	7,83
8	O	8,69
12	Mg	7,60
13	Al	6,45
14	Si	7,51
20	Ca	6,34
26	Fe	7,50
28	Ni	6,22

De abundantie van elk element, X , is uitgedrukt op een logaritmische schaal, en gegeven door volgende formule:

$$X = \log \frac{n_X}{n_H} + 12,00$$

Hierbij is n_X de molaire fractie van het element X , i.e. de hoeveelheid X -atomen gedeeld door het totaal aantal atomen.

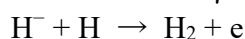
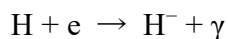
- Bespreek bondig waar de atomen in het universum vandaan komen. Is er een verschil tussen lichte en zware atomen? Waarom is het aantal ijzeratomen relatief hoog voor zulk zwaar element?
- Gebruik de gegeven tabel om te berekenen wat de hoeveelheid helium in het universum is, als je weet dat 92,1% van alle atomen waterstof zijn. Druk je antwoord uit in percent.
- Bereken de hoeveelheid 'andere' elementen, dus zonder waterstof of helium. Druk je antwoord uit in percent.

Vraag 2.

Moleculaire wolken zijn grote nevels waar de dichtheden voldoende hoog zijn voor de vorming van moleculair waterstofgas (H_2). Ze zijn erg belangrijk omdat ze tevens de locaties zijn waar stervorming kan plaatsvinden.

- a) Een moleculaire wolk heeft een typische massa van 5000 zonsmassa's en een doorsnede van ongeveer 5 parsec. Schat met deze gegevens de gemiddelde dichtheid van een moleculaire wolk. Druk je antwoord uit in aantal deeltjes per cm^3 .
- b) De temperatuur binnenin een moleculaire wolk bedraagt ongeveer 10 K. Bepaal de druk binnen de wolk, in pascal.
- c) We bekijken de associatie-reactie van moleculair waterstof (H_2) bij deze condities. Moleculair waterstofgas kan (onder andere) gevormd worden via het volgende reactiemechanisme.

- Stap 1: de absorptie van een elektron door atomair waterstof, met emissie van een foton γ .
- Stap 2: de combinatie van dit negatief geladen waterstofion met een ander H-deeltje, met emissie van een elektron.



Wanneer het effect van straling klein is, is de eerste stap veel trager dan de tweede, en wordt de reactiesnelheid R (uitgedrukt in deeltjes per cm^3 per seconde) voor dit mechanisme bepaald met de formule

$$R = k n_e n_H$$

Hierbij zijn n_e en n_H de concentraties van elektronen en atomair waterstof. De reactiesnelheidsconstante k (met eenheid $cm^3 s^{-1}$) hangt af van de temperatuur via

$$k = 1,4 \cdot 10^{-18} T^{0,928} e^{\frac{T}{16200}}$$

Bereken de reactiesnelheid voor de vorming van H_2 , voor de condities die je in vraag a en b bepaald hebt. Aangezien de ionisatiegraad laag is, mag je aannemen dat er slechts 1 elektron aanwezig is per miljoen H-atomen.

- d) Zoals je wellicht kan opmaken uit het antwoord op vraag c, zijn de reactiesnelheden tussen gasdeeltjes in moleculaire wolken enorm traag. Toch kunnen complexe organische moleculen, zoals methanol en mierenzuur, gevormd worden onder deze lage dichtheden en temperaturen. Hoe is dit te verklaren?

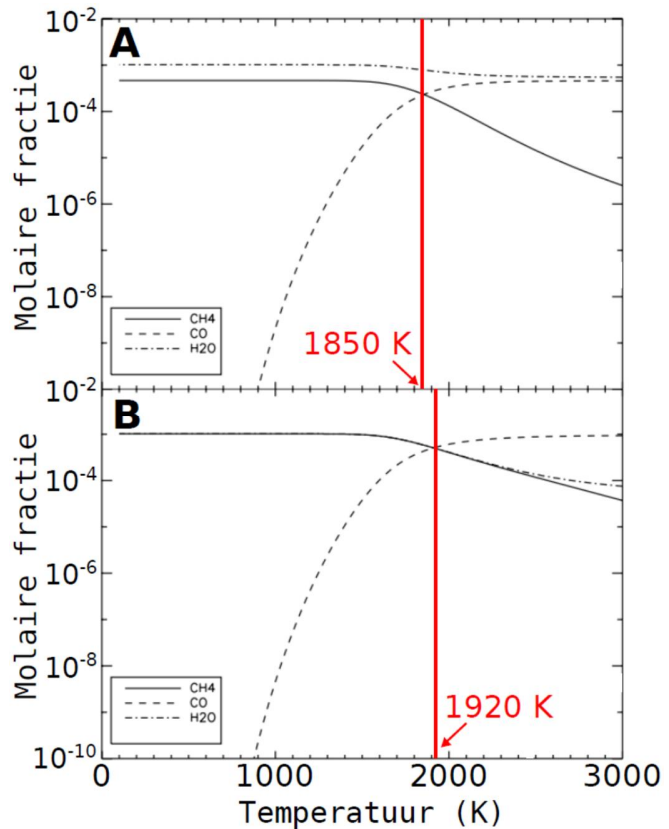
Vraag 3.

De C/O (koolstof-tot-zuurstof) verhouding, is een belangrijke parameter voor astrochemie, die zeer bepalend is voor de chemische stoffen die zich kunnen vormen.

- Leg kort uit welke rol de C/O verhouding heeft in astrochemie, en waarom.
- Bereken de C/O verhouding voor de Zon.

c) De figuren rechts tonen de hoeveelheden methaan (CH_4), koolstofmonoxide (CO) en water (H_2O) in de atmosfeer van een exoplaneet, als functie van de temperatuur. De samenstelling van de elementen is zoals in de Zon, maar de C/O verhouding tussen beide figuren is verschillend. De temperatuur waarop methaan en koolstofmonoxide in gelijke concentraties voorkomen, is aangeduid met een rode lijn. Welke figuur heeft de hoogste C/O verhouding en waarom?

- Een exoplaneet heeft een temperatuur van 800 K. Bij observaties van de atmosfeer wordt vastgesteld dat deze geen methaan bevat (of te weinig om te detecteren). Wat leert ons dit uit de samenstelling van deze planeetatmosfeer?



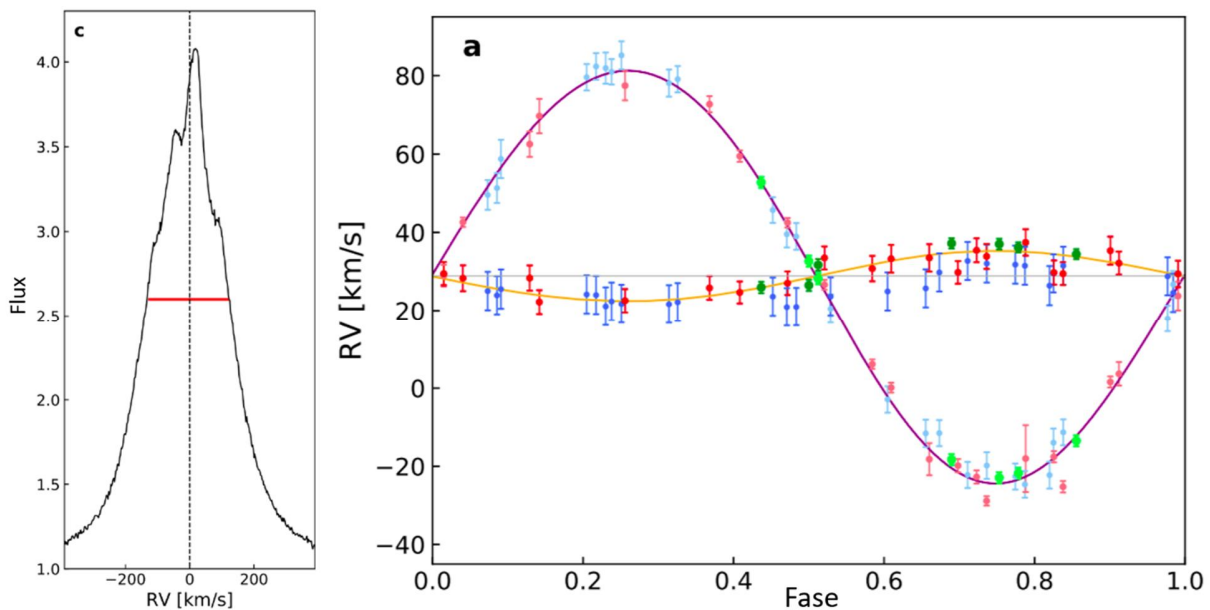
Figuur aangepast van Venot, O. (2012), doctoraatsthesis.

Open vragenreeks IV: LB-1, een dubbelstersysteem dat voor oproer zorgt

In 2019 publiceerden Liu et al. een artikel in *Nature* waarin ze een dubbelster bestuderen, genaamd LB-1, met een van de componenten een zwart gat van 70 zonsmassa's (M_{\odot}). Dit was groot nieuws, want in zulke systemen waren voordien enkel zwarte gaten gevonden met een massa kleiner dan $30 M_{\odot}$ en het roept tevens de vraag op hoe zulk massief zwart gat gevormd kan worden. Uiteraard bestaan er zwarte gaten die massiever zijn en miljoenen keren zwaarder zijn dan de Zon. Het belangrijke onderscheid dat hier echter gemaakt moet worden, is dat het niet gaat om een zwart gat in het centrum van een sterrenstelsel, maar om een exemplaar dat rechtstreeks gevormd wordt na het instorten van een ster.

Vraag 1.

De metingen die Liu et al. gebruikten, waren radiële snelheden (RV) uit het spectrum van het stersysteem. Langs de ene kant werd er variatie gemeten in de absorptielijnen die de primaire ster traceert. Een andere belangrijke spectraallijn in de metingen was een emissielijn van waterstof (links in onderstaande figuur) die volgens de auteurs afkomstig is van de secundaire component. De variatie in RV voor beide componenten wordt getoond in onderstaande figuur (rechts).



Links: Flux van LB-1 in de emissielijn van waterstof ($H\alpha$).
Rechts: RV-curve voor beide componenten in het LB-1 systeem.

De RV-amplitude voor de eerste component haalt men uit het maximum uit de curve en heeft de vorm

$$K_1 = \frac{2 \pi a_1 \sin i}{P \sqrt{1 - e^2}}$$

en analoog voor de tweede component. Hierbij is a_1 de lengte van de halve grote as, i de inclinatie, P de omlooptijd en e de excentriciteit.

De metingen geven $K_1 = 52,8$ km/s voor de primaire ster en $K_2 = 6,4$ km/s voor de secundaire component.

- Gebruik de massa-lichtkracht-relatie voor een B-type ster op de hoofdreeks om een schatting te maken van de massa M_1 van de primaire ster als we een lichtkracht van $L = 3668 L_\odot$ aannemen.
- Vind nu een formule die de amplitude K_1 verbindt met de massa's M_1 en M_2 . Hiervoor gebruik je de derde wet van Kepler en de relaties voor $a = a_1 + a_2$ en $a_1 M_1 = a_2 M_2$. (De formule voor K_2 vind je dan ook als je de indexen 1 en 2 omwisselt.)
- Bereken de massa van het zwarte gat via de bekomen formules met de gegeven RV-amplitudes voor beide componenten en je berekende massa van de primaire ster.
- Wat is de inclinatie van het systeem indien de gemeten waarden van Liu et al. correct zijn en als je weet dat het systeem een circulaire baan met periode $P = 78,9$ dagen heeft?

Vraag 2.

De massa van $70 M_\odot$ van het zwarte gat steunt in grote mate op twee metingen van Liu et al.: namelijk de massa M_1 van de primaire ster en de variatie K_2 in de emissielijn.

- Onderzoek volgend op dat van Liu et al. vindt echter andere parameters voor de primaire ster, en die kunnen een belangrijk verschil maken. De effectieve temperatuur is nu 12700 K en de straal van de ster is $5.4 R_\odot$, wat allebei kleiner is dan in de vorige metingen. Zoek met deze nieuwe waarden de massa van de primaire ster en de secundaire component.
- Verder onderzoek toont aan dat de meting $K_2 = 6,4$ km/s uit de emissielijn een effect is van de primaire ster en dus geen info over de secundaire component levert. Bereken nu met een rekenmachine de minimale massa die de component moet hebben, zonder informatie over K_2 te gebruiken. (Tip: maak hiervoor opnieuw gebruik van de formule voor K_1 die je in luik b van vraag 1 hebt afgeleid.)
- Afhankelijk van de massa die je hebt gevonden voor de secundaire component en het feit dat er geen duidelijke contributie van in het spectrum te zien is, bespreek enkele mogelijke opties van wat voor object het kan zijn.



Dit is het einde van de eerste ronde van
de Vlaamse Sterrenkunde Olympiade 2021.
Kijk na bij je inzending of je alle gevonden oplossingen hebt ingezonden.

Heel veel succes!