

# Vlaamse Sterrenkunde Olympiade 2017

31 januari 2017

Welkom bij de Vlaamse Sterrenkunde Olympiade 2017! 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 6 mei 2017. De winnaar mag – naar keuze – gaan waarnemen met de Mercatortelecoop 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 **3 april 2017**. Dit kan elektronisch via e-mail naar *deelnname@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.
- 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 er aan dat opgaven en antwoorden van vorige jaren terug te vinden zijn op onze website [www.sterrenkundeolympiade.be](http://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 keer 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 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 2017: Jelle Dhaene (UGent), Ward Homan (KULeuven), Frank Tamsin (VVS), Sébastien Viaene (UGent) en Walter Van Rensbergen (VUB).

<http://www.sterrenkundeolympiade.be>  
[info@sterrenkundeolympiade.be](mailto:info@sterrenkundeolympiade.be)



# Vlaamse Sterrenkunde Olympiade 2017

## Deelnameformulier

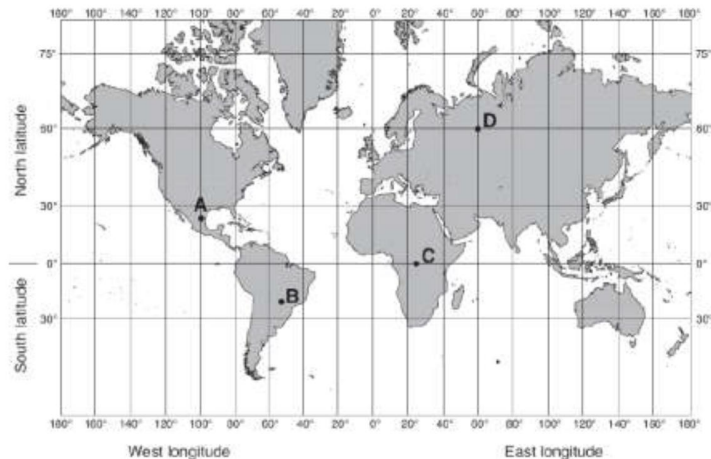
Naam:	.....
Voornaam:	.....
Straat en nummer:	.....
Postcode en gemeente:	.....
Geboortedatum:	.....
E-mail:	.....
Telefoon:	.....
Naam van de school:	.....
Adres van de school:	.....
Leerjaar en studierichting:	.....
Leraar fysica	.....
Leraar aardrijkskunde:	.....
Leraar wiskunde:	.....
Hoe werd je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

Meerkeuze vragenreeks

1. Het feit dat de ontsnappingsnelheid van de Maan kleiner is dan die van de Aarde is voornamelijk te wijten aan:
- de afstand van de Maan tot de Aarde.
  - de kleinere massa (die bij de Maan 81 keer kleiner is dan bij de Aarde).
  - de kleinere straal (bij de Maan ongeveer 4 keer kleiner is dan bij de Aarde).
  - de hogere temperatuur op de Maan.
  - het feit dat de Maan afwisselend dichterbij en verder van de Zon staat dan de Aarde (door de maandelijks beweging van de Maan rond de Aarde).

2. Op welke plaats (weergegeven op de kaart rechts) kan de Poolster in de loop van een jaar nooit waargenomen worden?

- Plaats A.
- Plaats B.
- Plaats C.
- Plaats D.
- geen enkele (i.e. de Poolster kan op elk van de plaatsen A, B, C en D wel eens waargenomen worden in de loop van het jaar).



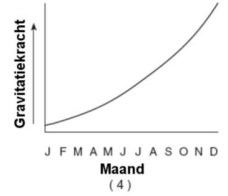
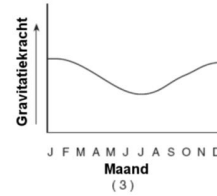
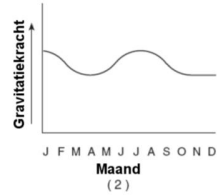
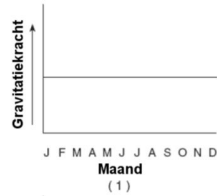
3. Met welk ander object in het zonnestelsel vertoont Venus de grootste gelijkenis op vlak van massa en dichtheid?

- Jupiter.
- Phobos.
- Mars.
- Deimos.
- de Aarde.

4. Zowel op de Maan als op Mercurius zijn er grote temperatuursverschillen tussen dag en nacht. De hoofdreden voor deze variatie is

- het ontbreken van een atmosfeer.
- de rotsachtige samenstelling.
- de afstand tot de Zon.
- de kleine massa.
- geen van bovenstaande.

5. Welk van de hier afgebeelde grafieken geeft het best weer hoe de gravitatiekracht tussen de Aarde en de Zon verloopt tijdens de beweging van de Aarde rond de Zon gedurende het jaar?



- (1)
- (2)
- (3)
- (4)
- Geen enkele van deze grafieken geeft dit ook maar bij benadering weer.

6. Uranus en Neptunus zien er blauw uit

- omdat hun atmosferen blauw licht zeer efficiënt absorberen;
- omdat ze beide een massa hebben die veel lager is dan normaal geacht wordt voor een gasplaneet;
- omdat hun beider oppervlak bedekt is met water en hun wolkendek erg ijl is;
- omdat hun atmosferen rood licht zeer efficiënt absorberen;
- omdat er erg hoge windsnelheden heersen, wat een sterke blauwverschuiving veroorzaakt.

7. De lengte van de halve lange as van de baan van Mercurius bedraagt 0,387 astronomische eenheden. Bij Venus is dat 0,719 astronomische eenheden. Wat is de maximale elongatie (de hoekafstand tussen de Zon en de planeet) van Mercurius gezien vanaf Venus? Er mag verondersteld worden dat beide planeten een cirkelvormige baan beschrijven.

- $15,5^\circ$ .
- $28,2^\circ$ .
- $32,6^\circ$ .
- $42,9^\circ$ .
- $57,4^\circ$ .

8. Een vriend met een massa van 65 kg staat in je buurt. Hoe ver moet die precies staan om dezelfde kracht uit te oefenen als de planeet Mars (met een massa van  $6,4 \cdot 10^{23}$  kg) die op een afstand van 0,52 astronomische eenheden staat?

- 2,3 meter.
- 0,8 mm.
- 0,8 meter.
- 2,3 mm.
- 2,3 km.

9. Een komeet volgt een elliptische baan rond de Zon met een apheliumafstand van 31,5 astronomische eenheden en een periheliumafstand van 0,5 astronomische eenheden. Wat is de periode van deze komeet?

- a) 181 jaar.
- b) 16 jaar.
- c) 64 jaar.
- d) 6,3 jaar.
- e) 32 jaar.

10. Hieronder staan vier uitspraken over wat er zou gebeuren als een komeet zou inslaan op de Aarde:

(I) Grote hoeveelheden gesmolten rots zouden op de Aarde neerkomen en zo grote bosbranden veroorzaken.

(II) De ijskappen aan de polen zouden smelten.

(III) Aanzienlijke hoeveelheden radioactief materiaal zouden de dood veroorzaken van het merendeel van het dierlijk leven op Aarde.

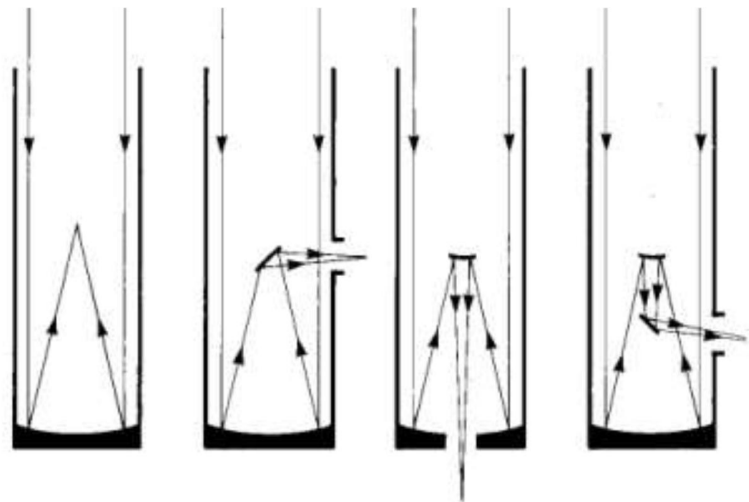
(IV) Er zouden dikke wolken koolstofdioxide gevormd worden die voor langere tijd het zonlicht zouden blokkeren.

Welke uitspraken zijn zeker waar?

- a) (I) en (IV);
- b) (II) en (III);
- c) (I), (II) en (III);
- d) (I), (II) en (IV);
- e) (II), (III) en (IV).

11. Op de figuur rechts zijn enkele configuraties van spiegeltelescopieën weergegeven. Welke volgorde geeft deze configuraties correct weer?

- a) Primair brandpunt – Newton brandpunt – Cassegrain brandpunt – Coudé brandpunt.
- b) Newton brandpunt – Primair brandpunt – Cassegrain brandpunt – Coudé brandpunt.
- c) Newton brandpunt – Primair brandpunt – Coudé brandpunt – Cassegrain brandpunt.
- d) Primair brandpunt – Newton brandpunt – Coudé brandpunt – Cassegrain brandpunt.
- e) Geen van bovenstaande.



12. Welk van volgende sterren is circumpolair in Roemenië (op  $44^{\circ}25'$  noorderbreedte en  $26^{\circ}06'$  oosterlengte)?

- a) z Hercules (rechte klimming 16h41m, declinatie  $+31^{\circ}36'$ ).
- b) b Boötis (rechte klimming 15h01m, declinatie  $+40^{\circ}23'$ ).
- c) q Aurigae (rechte klimming 05h59m, declinatie  $+37^{\circ}12'$ ).
- d) g Draconis (rechte klimming 17h56m, declinatie  $+51^{\circ}26'$ ).
- e) Elk van de genoemde sterren is circumpolair in Roemenië.

13. Wanneer het sterrenbeeld Leeuw aan het ondergaan is, welk ander sterrenbeeld van de zodiak is dan aan het opkomen?

- a) Sagittarius (de Schutter).
- b) Libra (de Weegschaal).
- c) Aquarius (de Waterman).
- d) Cancer (de Kreeft).
- e) Pisces (de Vissen).

14. De baan van een exoplaneet rond een ster heeft een geprojecteerde halve lange as van  $0,24''$ . Welke opening moet een telescoop minimaal hebben opdat de resolutie ervan voldoende zou zijn om die baan te kunnen oplossen in licht van 1000 nm golflengte?

- a) 0,13 meter.
- b) 0,52 meter.
- c) 1,05 meter.
- d) 3,10 meter.
- e) 2,04 meter.

15. Veronderstel dat de absolute magnitude van een bepaalde ster 3,25 bedraagt. Rond de ster bevindt zich een exoplaneet op een afstand van 0,67 astronomische eenheden van de ster. Wat is de schijnbare magnitude van de ster gezien vanaf de exoplaneet?

- a)  $-29,2$ .
- b)  $-28,6$ .
- c)  $-28,3$ .
- d)  $-27,5$ .
- e)  $-26,9$ .

16. Een dubbelster heeft twee componenten A en B. Ster A heeft een massa van 5 zonsmassa's en ster B heeft dezelfde massa als onze Zon. We gaan ervan uit dat de sterren cirkelvormige banen beschrijven. Hoeveel keer dichterbij bevindt ster A zich bij het massacentrum dan ster B?

- a) 1 keer.
- b) 3 keer.
- c) 5 keer.
- d) 10 keer.
- e) 25 keer.

17. Op welke golflengte zendt een ster met een temperatuur van 5000 K het meest straling uit?

- a) 58 nm.
- b) 580 nm.
- c) 460 nm.
- d) 290 nm.
- e) 5800 nm.

18. Een ster heeft een parallax van 0,25 boogseconden. Wat is de afstand van deze ster?

- a) 2 parsec.
- b) 0,5 lichtjaar.
- c) 2 lichtjaar.
- d) 4 parsec.
- e) 0,5 parsec.

19. Twee hoofdreekssterren A en B hebben hetzelfde spectraaltype en schijnbare visuele magnitudes van 17 en 12. Als ster A zich op een afstand van 1 kiloparsec bevindt, wat is dan de afstand van ster B?

- a) 10 parsec.
- b) 100 parsec.
- c) 10 kiloparsec.
- d) 50 parsec.
- e) 100 kiloparsec.

20. De meest bepalende factor voor de tijd die een ster op de hoofdreeks van het Hertzsprung-Russell-diagram doorbrengt,

- a) is de straal van de ster.
- b) is het metaalgehalte van de ster.
- c) is de verhouding tussen waterstof en helium in de ster.
- d) is de massa van de ster.
- e) is de afstand van de ster tot de Aarde.

21. De Grote Orionnevel (M42) in het sterrenbeeld Orion

- a) is een Herbig-Haro object;
- b) is een reflectienevel;
- c) is een emissienevel;
- d) bevat enkel jonge sterren met een lage massa;
- e) is vermoedelijk ongeveer 5 miljard jaar oud.

22. Welk van volgende bekende Messier objecten is te zien in het sterrenbeeld Hercules?

- a) M13.
- b) M31.
- c) M42.
- d) M57.
- e) M83.



23. Aan de rand van een bepaalde oude bolvormige sterrenhoop bedraagt de ontsnappingssnelheid 8,5 km/s. De bolvormige sterrenhoop bevat allemaal rode sterren met elk ongeveer de helft van de massa van onze Zon. De straal van de bolvormige sterrenhoop bedraagt 100 parsec. Schat de massa van deze bolvormige sterrenhoop (uitgedrukt in zonsmassa's;  $1 M_{\odot} = 1,99 \cdot 10^{30}$  kg).
- $1,2 \cdot 10^4 M_{\odot}$ .
  - $6,8 \cdot 10^4 M_{\odot}$ .
  - $3,1 \cdot 10^5 M_{\odot}$ .
  - $5,6 \cdot 10^5 M_{\odot}$ .
  - $8,4 \cdot 10^5 M_{\odot}$ .
24. Welke van onderstaande uitspraken over interagerende (of botsende) sterrenstelsels is waar?
- Bij een botsing tussen twee sterrenstelsels, komt ook het merendeel van de sterren met elkaar in botsing.
  - Hoewel sterrenstelsels kunnen interageren, hebben dergelijke botsingen weinig impact op het uitzicht van de individuele stelsels.
  - Interacties tussen sterrenstelsels zijn het gevolg van sterke elektrische krachten tussen het gas in de stelsels.
  - Er is geen echt bewijs dat sterrenstelsels botsen en hoewel het theoretisch mogelijk is, weten we nog niet of dit ook werkelijk voorkomt.
  - Botsingen tussen sterrenstelsels kunnen kleinere sterrenstelsels volledig uiteenrukken.
25. In het spectrum van een actieve galactische kern (AGN) neemt men een emissielijn van waterstof waar op 687,2 nm golflengte. De rustgolflengte van deze waterstoflijn is 121,6 nm. Bereken de verwijderingssnelheid van dit object ten opzichte van ons.
- $1,40 \cdot 10^5$  km/s.
  - $2,14 \cdot 10^5$  km/s.
  - $2,57 \cdot 10^5$  km/s.
  - $2,82 \cdot 10^5$  km/s.
  - $3,00 \cdot 10^5$  km/s.
26. Welk van volgende verschijnselen is niet bruikbaar om de afstand tussen hemellichamen te bepalen?
- een Venusovergang over de zonneschijf.
  - de wijziging van de positie van sterren zonder meetbare eigenbeweging aan de hemel met een tussentijd van zes maanden.
  - de dopplerverschuiving in het spectrum van sterren.
  - een totale zonsverduistering.
  - de periode van veranderlijke sterren van het Cepheïde type.

27. Een bepaald sterrenstelsel bevindt zich op een afstand van 7 Mpc. Wat is dan (bij benadering) de verwijderingssnelheid van dit stelsel?

- a) 7 km/s.
- b) 10 km/s.
- c) 70 km/s.
- d) 490 km/s.
- e) Op basis van de verstrekte informatie valt dit onmogelijk (zelfs maar bij benadering) te bepalen.

28. Welk van onderstaande uitspraken over gravitatielenzen is foutief?

- a) Elk object buigt licht af, ook als het object niet veel massa bevat.
- b) Als de kromming van de ruimte niet zou beïnvloed worden door massa, dan zouden we nooit gravitatielenzen zien.
- c) Alleen objecten waarvan de massa gedomineerd wordt door donkere materie kunnen licht afbuigen.
- d) Gravitatielenzen kunnen meerdere beelden van eenzelfde object produceren.
- e) Het beeld van sterrenstelsels die zich achter clusters bevinden wordt vaak vervormd door gravitationele lenzing.

29. Wat is de oorsprong van de kosmische achtergrondstraling?

- a) Gammastraling die geproduceerd werd tijdens de eerste seconden na de Big Bang.
- b) Gloeiend gas dat dateert uit de tijd dat het heelal transparant werd.
- c) De eerste sterren die in het heelal gevormd zijn.
- d) Neutrino's die geproduceerd zijn in nucleaire reacties tijdens de eerste 200 seconden na de Big Bang.
- e) De botsing tussen sterrenstelsels.

30. We gaan uit van volgende kosmologische parameters (actuele waarden):

- de dichtheid van donkere energie:  $\rho_L = 6,7 \cdot 10^{-27} \text{ kg/m}^3$
- de dichtheid van donkere materie:  $\rho_{DM} = 2,4 \cdot 10^{-27} \text{ kg/m}^3$
- de dichtheid van normale materie:  $\rho_B = 0,5 \cdot 10^{-27} \text{ kg/m}^3$

Wat is dan de verhouding tussen de dichtheid van donkere energie op het ogenblik van de emissie van de kosmische achtergrondstraling, en de huidige dichtheid van donkere energie?

- a) 0,432.
- b) 2,31.
- c) 1.
- d) 2,5.
- e) 0,5.



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: sterren

Voor onderstaande vragen mag gebruikgemaakt worden van volgende constanten:

- Boltzmann constante:  $k = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$
- Lichtsnelheid:  $c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$
- Gravitationele constante:  $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}\text{s}^{-2}$
- Zonsmassa:  $M_{\text{zon}} = 1,9891 \times 10^{30} \text{ kg}$
- Massa aarde:  $M_{\text{aarde}} = 5,972 \times 10^{24} \text{ kg}$

Berekende massa's dienen steeds uitgedrukt te worden in de eenheid zonsmassa.

Vraag 1: waterstoffusie (omzetten van massa naar energie).

- a) Beschrijf de proton-proton ketting die zorgt voor het merendeel van de energieproductie in de Zon.
- b) Wat is de massafractie die in energie omgezet wordt in deze keten.
- c) In welke vorm komt deze energie vrij?
- d) Hoeveel waterstof wordt er iedere seconde naar helium omgezet in de Zon? Vertrek hiervoor van het gegeven dat de lichtkracht van de Zon  $3,8 \times 10^{26} \text{ W}$  is.
- e) Hoeveel keer per seconde gebeurt de fusiereactie van waterstof in helium in de Zon?

Vraag 2: de ideale gaswet (druk in de Zon).

De druk in de Zon die ervoor zorgt dat deze niet volledig ineenstort onder de invloed van gravitatiekrachten, komt voort uit de thermische beweging van de gasdeeltjes in de Zon. De druk die dit gas uitoefent, kan beschreven worden door de ideale gaswet die de relatie tussen de druk van een gas en de temperatuur en deeltjesdichtheid van het gas beschrijft:

$$P = nkT$$

Hierin stelt  $P$  de druk van het gas voor,  $n$  de deeltjesdichtheid (bijvoorbeeld in deeltjes per kubieke centimeter) en  $T$  de temperatuur (in kelvin).

- a) De kern van de Zon bestaat uit ongeveer  $10^{26}$  deeltjes per kubieke centimeter en heeft een temperatuur van 15 miljoen kelvin. Vergelijk de gasdruk in de kern van de Zon met de gasdruk van de aardse atmosfeer op zeeniveau, waar zich ongeveer  $2,4 \times 10^{19}$  deeltjes per kubieke centimeter bevinden op een temperatuur van 300 kelvin.
- b) Hoe zou de druk in de kern van de Zon veranderen als alle waterstof in de kern omgezet is in helium, ervan uitgaande dat dit gebeurt zonder volumeverandering of temperatuursverandering in de kern? Gebruik uw antwoord om uit te leggen wat er werkelijk zal gebeuren als de kern kan verkleinen en opwarmen. (Ga ervan uit dat de kern van de Zon initieel enkel uit waterstof bestaat dat volledig geïoniseerd is, en eindigt met enkel geïoniseerd helium. Hoe er rekening mee dat de kern van de Zon elektrisch neutraal is.)

Vraag 3: zwaartekracht versus druk.

Een gaswolk kan ineenstorten tot een ster als de inwaartse kracht veroorzaakt door gravitatie groter is dan de uitwaartse kracht die veroorzaakt wordt door de thermische druk. Hiervoor kan een minimummassa van de wolk berekend worden waarbij beide krachten even groot zullen zijn. Deze massa wordt gegeven door:

$$M_{\text{balans}} = 18 \cdot M_{\text{zon}} \cdot \sqrt{\frac{T^3}{n}}$$

waarin  $T$  de temperatuur (in kelvin) voorstelt en  $n$  de deeltjesdichtheid (in deeltjes per kubieke centimeter).

- Een typische moleculaire wolk heeft een temperatuur van 30 K en een gemiddelde dichtheid van 300 deeltjes per kubieke centimeter. Wat is de minimale massa die de wolk moet hebben zodat er een ster kan gevormd worden?
- Naarmate een gaswolk instort, zal de dichtheid toenemen. De temperatuur daarentegen kan aanzienlijk laag blijven zolang de wolk genoeg thermische energie, gegenereerd door de gravitationele samentrekking van de wolk, in de vorm van straling kan uitzenden. Veronderstel dat de dichtheid van een wolk een dichtheid van 300 000 deeltjes per kubieke centimeter bereikt, maar nog steeds een temperatuur van 30 K heeft. Welke massa is dan nodig om de stervorming te laten doorgaan?
- Vergelijk de massa die je in vraag (a) en (b) bekomen hebt met de massa van een gemiddelde ster. Wat kan je hieruit besluiten over stervorming?

Vraag 4: Schwarzschildstraal.

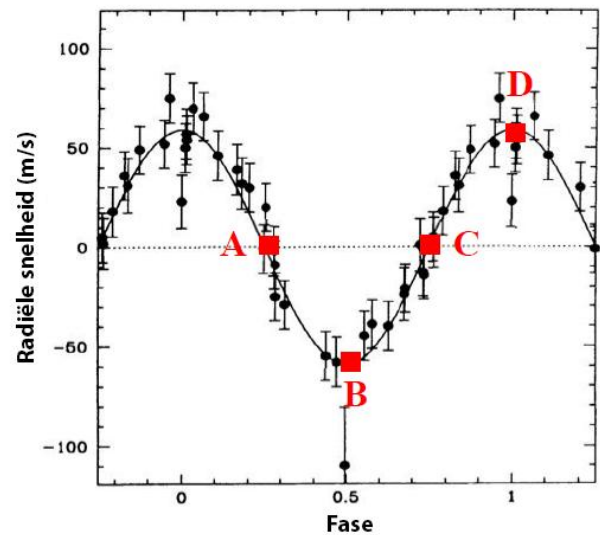
- Leg uit wat de Schwarzschildstraal  $R_s$  van een zwart gat is en toon aan dat deze geschreven kan worden als:

$$R_s = \frac{2GM}{c^2}$$

- Wat is de Schwarzschildstraal van een zwart gat met een massa van  $10 M_{\text{zon}}$ ?
- Zwarte gaten die waargenomen worden in het huidige heelal hebben steeds een massa die de neutronenster limiet overschrijdt; deze limiet is ongeveer gelijk aan drie zonsmassa's. Stephen Hawking en anderen speculeren echter dat veel minder zware mini-zwarte gaten gevormd konden worden tijdens de Big Bang. Veronderstel dat zo'n mini zwart gat de massa van de Aarde zou hebben, hoe groot zou het dan zijn?
- Wat zou het effect zijn op de baan van de Aarde als de Zon vervangen zou worden door een zwart gat met eenzelfde massa?

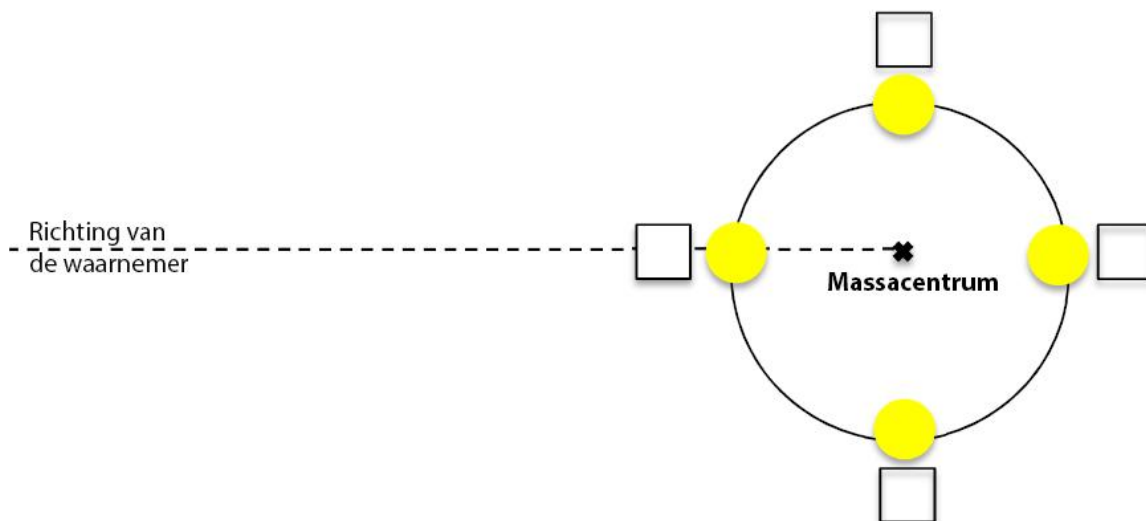
Open vragenreeks II: exoplaneten

In 1995 werd de eerste echte exoplaneet ontdekt, rond de ster 51 Pegasi. Deze ontdekking gebeurde door het spectrum van de moederster te bestuderen en daaruit kleine veranderingen in de radiële snelheid van de ster af te leiden (ten gevolge van de beweging van de planeet en de ster rond hun gemeenschappelijk massacentrum). De planeet bleek een vrijwel cirkelvormige baan te beschrijven met een periode van 4,23 dagen. Deze detectiemethode maakt dus gebruik van de radiële snelheid en is gebaseerd op het dopplereffect. De figuur rechts geeft het verloop van de radiële snelheid van 51 Pegasi weer.



Vraag 1.

a) De figuur hieronder (niet op schaal) geeft schematisch de positie weer van de ster 51 Pegasi ten opzichte van het massacentrum van het systeem ster – planeet (afgeleid uit het verloop van de radiële snelheid zoals weergegeven in de figuur hierboven). Geef in de vakjes aan met welk punt in het verloop van de radiële snelheid (A, B, C, D) elke positie correspondeert, en leg je keuze duidelijk uit! Daarbij mag aangenomen worden dat de ster in wijzerzin beweegt.



b) Bepaal op basis van de eerste figuur de snelheid van de ster rond het massacentrum van het systeem ster – planeet. Geef eveneens een schatting van de gemaakte fout.

Vraag 2.

- a) De ster 51 Pegasi heeft een massa die vergelijkbaar is met die van onze zon. Schat nu de afstand van de gevonden planeet tot de ster 51 Pegasi (uitgedrukt in astronomische eenheden). Daarbij mag verondersteld worden dat de massa van de planeet verwaarloosbaar is ten opzichte van die van de ster.
- b) Schat de massa van de gevonden exoplaneet, uitgedrukt in termen van de massa van Jupiter ( $M_J = 1,9 \cdot 10^{27}$  kg).
- c) Leg uit waarom de zopas gevonden schatting een ondergrens is voor de echte massa van de exoplaneet.

Vraag 3.

Veronderstel nu niet langer dat de massa van de planeet verwaarloosbaar is ten opzichte van die van de ster 51 Pegasi. Bereken dan de massa van de exoplaneet (uitgedrukt in Jupitermassa's). Tip: er kan gebruikgemaakt worden van een uitdrukking die de verhouding van de stralen van de banen van de planeet ( $r_{\text{planeet}}$ ) en van de ster ( $r_{\text{ster}}$ ) rond het gemeenschappelijke massacentrum weergeeft ( $r_{\text{planeet}} / r_{\text{ster}}$ ).

### Open vragenreeks III: sterrenstelsels

In de wereld van sterrenstelsels staan vele eigenschappen met elkaar in verband. Aan de hand van enkele metingen kan men al veel te weten komen over een sterrenstelsel.

Vraag 1.

Zo is er bijvoorbeeld de Tully-Fisher relatie voor spiraalstelsels, die het verband tussen lichtkracht en rotatiesnelheid geeft:

$$L = 3,9 \cdot V_{rot}^4$$

in de K-band, met  $V_{rot}$  in km/s en  $L$  uitgedrukt in eenheden van lichtkracht van de Zon.

- Leg uit wat  $L$  en  $V_{rot}$  zijn.
- Leg uit waarom  $L$  en  $V_{rot}$  met elkaar in verband staan.

Vraag 2.

Voor een spiraalstelsel werden metingen gedaan in het nabije infrarood (K-band) en in het radiogebied (21 cm lijn). Het sterrenstelsel blijkt een schijnbare magnitude te hebben van 16,7. Uit de 21 cm lijn leiden we af dat het roteert aan een snelheid van 150 km/s.

- Gebruik de Tully-Fisher relatie om de afstand tot dit sterrenstelsel te bepalen.
- Verifieer deze afstand aan de hand van de wet van Hubble. Uit de 21 cm lijn blijkt dat het sterrenstelsel van ons weg beweegt met een snelheid van 6790 km/s.

Vraag 3.

De tegenhanger voor ellipsvormige sterrenstelsels is de Faber-Jackson relatie, waar de lichtkracht kan bepaald worden aan de hand van de centrale snelheidsdispersie  $\sigma$ :

$$L = 2 \cdot 10^{10} \left( \frac{\sigma}{200} \right)^4$$

in de V band, met  $\sigma$  in km/s en  $L$  uitgedrukt in eenheden van de lichtkracht van de Zon.

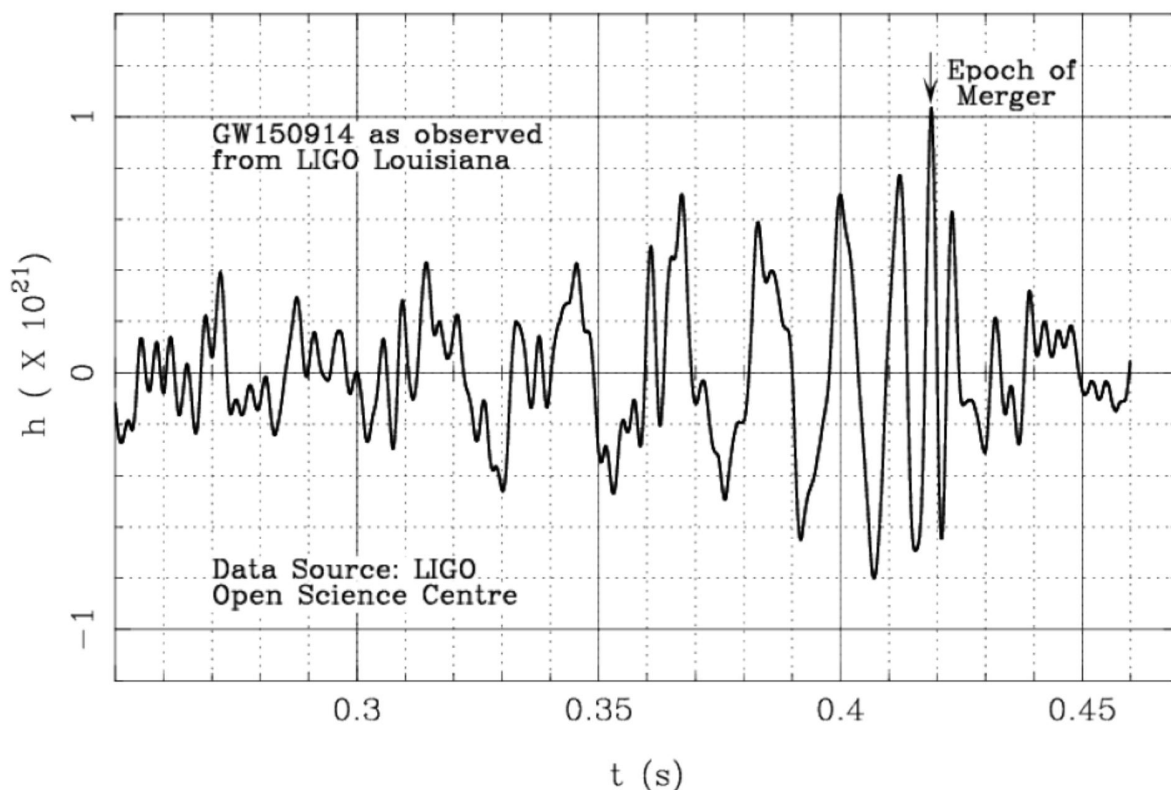
- Stel dat de vorige observatie geen spiraalstelsel was, maar een ellipsvormig stelsel met dezelfde lichtkracht. Wat zou dan de snelheidsdispersie  $\sigma$  zijn?
- Leg het begrip snelheidsdispersie uit.
- Wat is de stellaire massa van dit object? Vermeld je bron voor de K-band massa-lichtkracht verhouding.



Open vragenreeks IV: gravitatiegolven

Op 14 september 2015 konden zwaartekrachtgolven voor het eerst rechtstreeks waargenomen worden. Dat gebeurde met de twee LIGO-detectoren in Hanford en Livingston (USA). Het waargenomen signaal wordt getoond in onderstaande figuur.

Voor deze opgave zullen we veronderstellen dat dit signaal veroorzaakt wordt door een kleine testmassa  $m$  die een baan beschrijft rond een veel grotere massa  $M$  (i.e.  $m \ll M$ ). Daarbij zullen we verschillende modellen bekijken voor de aard van de centrale massa.



Door het uitzenden van gravitatiegolven verliest de testmassa  $m$  energie. Hierdoor wordt de baan kleiner, tot de testmassa uiteindelijk op het oppervlak van het groter object terechtkomt, of in het geval van een zwart gat op de binnenste stabiele cirkelvormige baan (innermost stable circular orbit of ISCO); voor de straal  $R_{\text{ISCO}}$  van deze baan geldt dat  $R_{\text{ISCO}} = 3R_S$  waarbij  $R_S$  de Schwarzschild straal van het zwart gat voorstelt. Dat is het ogenblik van de zogenoemde vermenging of botsing (aangeduid met 'epoch of merger' op de figuur). Dat is ook het moment waarop de amplitude van de gravitatiegolf maximaal is, en ook de frequentie is dan maximaal (en is steeds dubbel zo groot als de baanfrequentie; deze laatste is het aantal omlopen per tijdseenheid).

We zullen ons hier toespitsen op de gravitatiegolven op het ogenblik vlak voor de botsing, waarbij we er van uitgaan dat de wetten van Kepler dan nog gelden. Na de botsing verandert de vorm van het signaal drastisch.

Vraag 1.

- a) Beschouw het signaal van de gravitatiegolven in bovenstaande figuur en schat de periode  $T_0$  van de golf vlak voor de vermenging.  
 b) Bereken hieruit de frequentie  $f_0$  van de golf vlak voor de botsing.

Vraag 2.

Voor sterren op de hoofdreeks in het Hertzsprung-Russell-diagram staan de straal  $R_{MS}$  en de massa  $M_{MS}$  van een ster met elkaar in verband via een machtwet:

$$R_{MS} \sim (M_{MS})^\alpha$$

Hierbij geldt

$$a = 0,8 \text{ voor } M_{MS} > 1 M_\odot$$

$$a = 1,0 \text{ voor } 0,08 M_\odot \leq M_{MS} \leq 1 M_\odot$$

- a) Veronderstel dat het centrale object een hoofdreeksster zou zijn. Stel dan een uitdrukking op voor de maximale frequentie  $f_{MS}$  van de gravitatiegolven, in functie van de massa ( $M_{MS}/M_\odot$ ) van de centrale ster en in functie van  $a$ . Tip: zoals hoger reeds vermeld is de frequentie  $f_{grav}$  van de gravitatiegolf maximaal op het ogenblik net voor de botsing, en is deze dubbel zo groot als de baanfrequentie  $f_{baan}$  van het testobject ( $f_{grav} = 2 f_{baan}$ ).  
 b) Gebruik dit resultaat om de waarde van  $a$  te bepalen die aanleiding zal geven tot de maximaal mogelijke frequentie van de gravitatiegolven  $f_{MS,max}$  voor om het even welke hoofdreeksster.  
 c) Bereken ook deze maximaal mogelijke frequentie van de gravitatiegolven  $f_{MS,max}$ .

Vraag 3.

- a) Witte dwergen hebben een massa die nooit hoger kan zijn dan  $1,44 M_\odot$  (de zogenoemde Chandrasekhar limiet). Voor witte dwergen geldt volgende relatie tussen de massa en de straal:

$$R_{WD} \sim (M_{WD})^{-\frac{1}{3}}$$

De straal van een witte dwerg met dezelfde massa als onze Zon bedraagt ongeveer 6000 km.

Bereken de hoogst mogelijke frequentie  $f_{WD,max}$  van de uitgezonden gravitatiegolven in het geval de testmassa een baan zou beschrijven rond een witte dwerg.

- b) Neutronensterren zijn zeer compacte objecten met massa's tussen 1 en 3 zonsmassa's, en met stralen tussen 10 en 15 km. Bepaal nu het interval van frequenties (dus  $f_{NS,min}$  en  $f_{NS,max}$ ) van de uitgezonden gravitatiegolven in het geval de testmassa een baan zou beschrijven zeer dicht bij een neutronenster.

- c) In het geval de centrale massa een zwart gat zou zijn, heeft de binnenste stabiele cirkelvormige baan van een testobject straal  $R_{ISCO}$  met  $R_{ISCO} = 3R_S$  waarbij  $R_S$  de Schwarzschild straal van het zwart gat voorstelt. Bereken de frequentie  $f_{ZG}$  van de uitgezonden gravitatiegolven in het geval de testmassa een baan zou beschrijven rond een zwart gat, in functie van de massa ( $M_{ZG}/M_\odot$ ) van het zwart gat.

Vraag 4.

a) Hiervoor (vraag 1) werd reeds de frequentie  $f_0$  van de gravitatiegolf vlak voor de botsing bepaald. Op basis van de resultaten van de vorige vragen (vraag 2 en vraag 3), welk soort objecten komen dan al dan niet in aanmerking als centraal object (hoofdreeksster, witte dwerg, neutronenster, zwart gat) bij de botsing die aanleiding heeft gegeven tot de waargenomen gravitatiegolf op 14 september 2015?

b) Maak een schatting voor de massa  $M_{obj}$  van dit centrale object (uitgedrukt in  $M_{\odot}$ ).

Vraag 5.

Men heeft berekend dat bij de gebeurtenis die aanleiding heeft gegeven tot de gravitatiegolf die is waargenomen op 14 september 2015 ongeveer 3 keer de massa van de Zon is omgezet in energie. Er wordt beweerd dat dit overeenkwam met de gezamenlijke energieproductie van alle sterren in het heelal gedurende de 0,2 seconden die de gebeurtenis heeft geduurd. Verduidelijk deze bewering op kwantitatieve wijze, aan de hand van realistische schattingen en aannames.

Dit is het einde van de eerste ronde van  
de Vlaamse Sterrenkunde Olympiade 2017.

Kijk na bij je inzending of je alle gevonden oplossingen hebt ingezonden.

Heel veel succes!