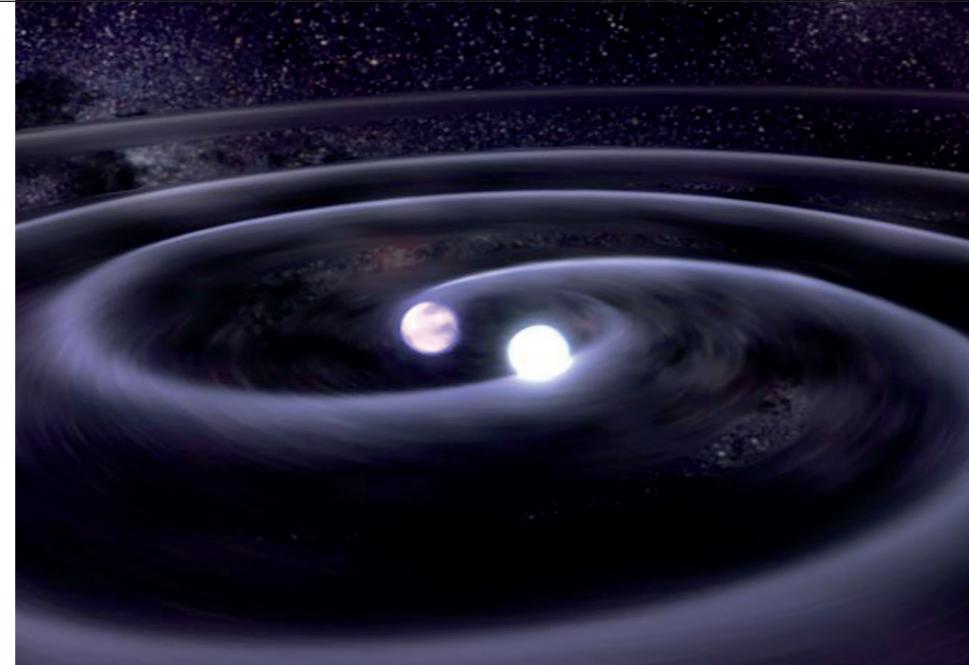


# De achtergrondruis van dansende witte dwergen: samen staan ze sterk

**De tot nu toe gedetecteerde bronnen van zwaartekrachtgolven zijn veelal botsende zwarte gaten met massa's tot ongeveer honderd keer die van de zon.**

**De toekomstige LISA-ruimtemissie zal zwaartekrachtgolven van superzware zwarte gaten van miljoenen zonsmassa in de kernen van sterrenstelsels kunnen detecteren.**

**Daarnaast kan LISA mogelijk een achtergrondruis van zwaartekrachtgolven waarnemen, die naar verwachting veroorzaakt wordt door dubbele witte dwergen.**



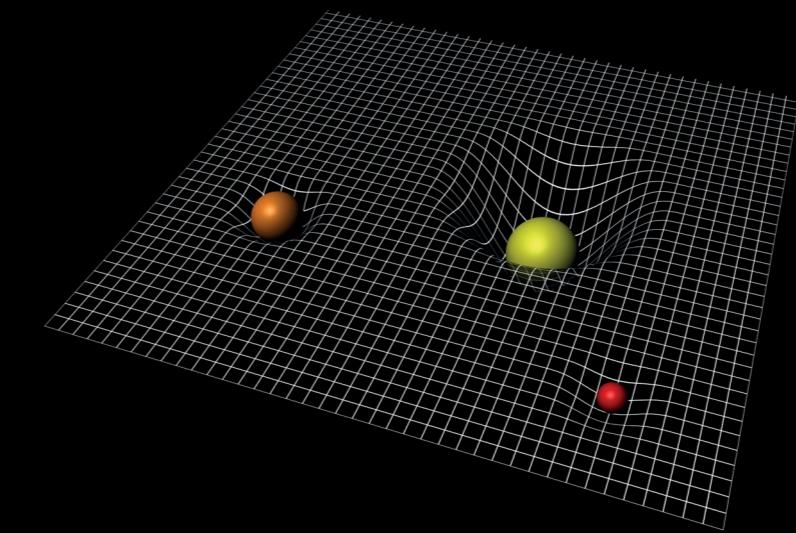
Figuur 1. Impressie van twee witte dwergen die op het punt staan met elkaar te botsen, terwijl ze zwaartekrachtgolven uitzenden. (Dana Berry CXC)

De LISA-ruimtemissie zal aan het einde van volgend decennium gelanceerd worden om het universum verder te ontdekken met behulp van de onzichtbare zwaartekrachtgolven; trillingen van de ruimtetijd die geproduceerd worden door bijvoorbeeld botsende zwarte gaten. Uit recent onderzoek blijkt dat een andere bron van deze golven wel eens belangrijker zou kunnen zijn dan eerst gedacht.

Door Seppe Staelens (Department of Applied Mathematics and Theoretical Physics University of Cambridge) en Sophie Hofman (voorheen: Afdeling Sterrenkunde, Institute for Mathematics, Astrophysics and Particle Physics, Radboud Universiteit)

In 1915 publiceerde Albert Einstein zijn algemene relativiteitstheorie. Die beschrijft zwaartekracht als het gevolg van de kromming van de ruimtetijd, een vierdimensionale unificatie van de ruimte en tijd zoals wij die ervaren. Zware objecten zoals de zon, krommen de ruimtetijd, net

zoals een bowlingbal een trampoline zal doen doorbuigen (Figuur 2). Deze kromming bepaalt hoe lichtere objecten zoals de aarde, bewegen door de ruimtetijd. In onze analogie zal een knikker in een ellipsvormige baan rond de bowlingbal bewegen, net als de aarde rond de zon (Zenit november 2015, blz. 12-16).



Figuur 2. De kromming van een strak gespannen rubber vel door zware kogels boekt de kromming van de ruimtetijd na. (ESA, C. Carreau)



Figuur 3. De Virgo-zwaartekrachtgolfdetector in Italië, met 3 kilometer lange armen. (Virgo Collaboration)

## Zwaartekrachtgolven

Deze revolutionaire theorie is inmiddels uitvoerig getest en tot dusver houdt ze nog altijd heel goed stand (Zenit december 2023, blz. 18-21). Ze voorspelt verder het bestaan van zwarte gaten, de uitdijing van het heelal en zoveel meer. Een van de bijkomende voorspellingen van de algemene relativiteitstheorie is het bestaan van zwaartekrachtgolven; trillingen van de ruimtetijd die ontstaan bij allerlei extreme gebeurtenissen in het universum (Zenit april 2016, blz. 34-37).

De eerste zwaartekrachtgolven zijn

waargenomen in 2015, toen twee zwarte gaten samensmolten nadat ze lange tijd rond elkaar dansten onder invloed van elkaars aantrekking (Zenit december 2016, blz. 12-14).

Het uitzenden van deze golven zorgt ervoor dat het systeem energie verliest, waardoor de lichamen dichter naar elkaar drijven en wat op zijn beurt weer meer zwaartekrachtgolven opwekt.

Deze vicieuze cirkel eindigt pas wanneer de twee objecten op elkaar botsen en samensmelten. De oorspronkelijke zwarte gaten waren ongeveer 36 en 29 keer zo zwaar als de zon en smolten samen tot een nieuw zwart gat van 62 zonsmassa. Volgens Einsteins bekende formule  $E = mc^2$  betekent dit dat ongeveer drie zonsmassa in energie is omgezet – duizend keer meer dan de energie die de zon in heel haar leven zal produceren. Deze botsing vond echter plaats op ongeveer 1,3 miljard lichtjaar van de aarde, waardoor wij bijna niets van deze energie-uitstoot hebben gemerkt. De detectie van de zwaartekrachtgolven is gedaan door de twee LIGO-detectoren in de Verenigde Staten. Om deze zwaar-

tekraftgolven te meten moesten zij met lasers in twee 4 kilometer lange armen van de detectoren een relatieve lengteverschil meten van  $10^{-21}$ : dit is de grootte van een atoomkern op een schaal van duizend kilometer!

## Telescopen

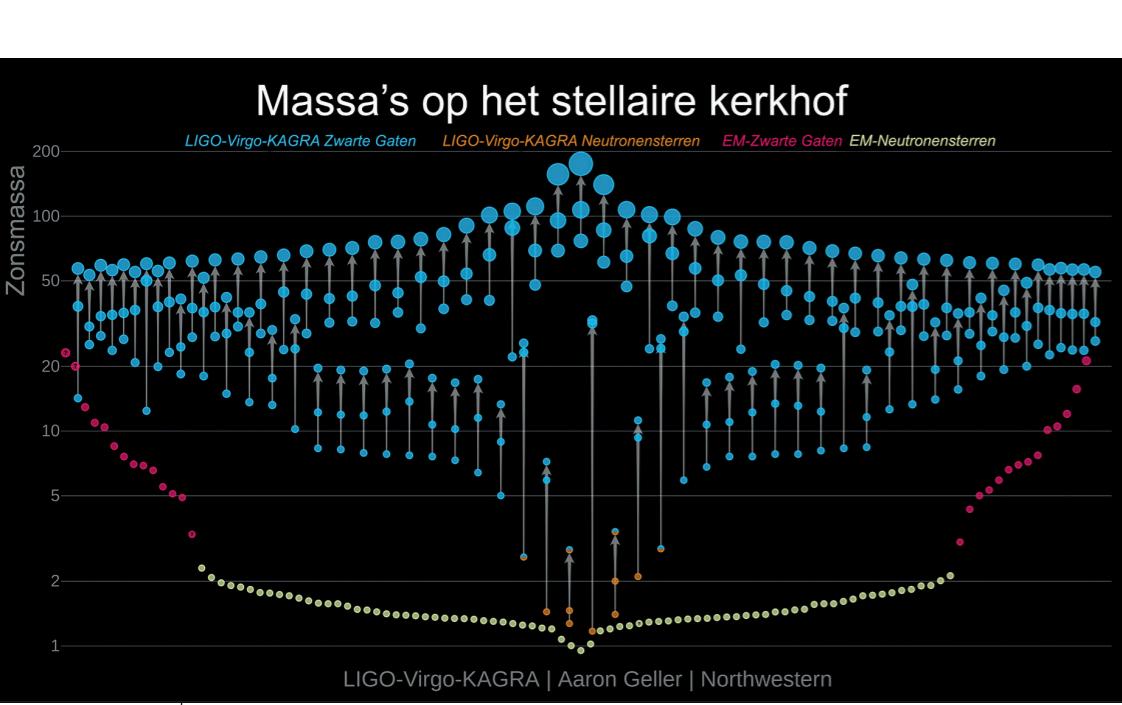
Sinds 2015 hebben de LIGO-detectoren, inmiddels bijgestaan door Virgo in Italië (Figuur 3; Zenit december 2016, blz. 16-19) en KAGRA in Japan, al een honderdtal zwaartekrachtgolven gedetecteerd. Bijgevolg is er in het voorbije decennium ook veel onderzoek gedaan naar zwaartekrachtgolven en wat we van deze golven kunnen leren. Een van de grote voordelen van de detectie van zwaartekrachtgolven is dat die complementair is aan traditionele telescopen die licht (fotonen) waarnemen in allerlei verschillende elektromagnetische golflengtes. Wanneer zwarte gaten botsen wordt er normaal gezien echter geen licht geproduceerd, waardoor telescopen deze gebeurtenissen niet kunnen zien. Zwaartekrachtgolven kunnen ons daarom veel informatie verschaffen over ‘duistere’ gebeurtenissen in het heelal. Zo zijn ze nauw verbonden aan de werking van de zwaartekracht – waarover we door het bestuderen van zwaartekrachtgolven erg veel kunnen leren.

## Frequenties

Net zoals het erg interessant is om met verschillende soorten telescopen het heelal te bestuderen in verschillende golflengtes, is een van de doelstellingen van fysici om ook zwaartekrachtgolven met verschillende golflengten waar te nemen. Net zoals alle andere zwaartekrachtgolfexperimenten op aarde, kan LIGO enkel zwaartekrachtgolven met relatief kleine golflengten (hoge frequenties) meten, ongeveer in het interval 10-1000 hertz. In dit regime kunnen we enkel botsende zwarte gaten (met massa's tot tientallen keren die van de zon) en neutronensterren ontdekken, doordat dit relatief kleine objecten zijn en snel rond elkaar kunnen draaien. Want hoe kleiner de botsende objecten, hoe dichter ze elkaar vlak voor de botsing kunnen naderen, hoe sneller ze daardoor om elkaar draaien en hoe hoger de frequentie van de zwaartekrachtgolven. Er zijn echter nog andere objecten die zwaartekrachtgolven produceren. Zo zijn de zogenoemde Pulsar Timing Arrays (PTA's; Zenit maart 2024, blz. 36-40) op zoek naar zwaartekrachtgolven van supermassieve zwarte gaten (mil-

**Sinds 2015 hebben de LIGO-detectoren, inmiddels bijgestaan door Virgo in Italië en KAGRA in Japan, al een honderdtal zwaartekrachtgolven gedetecteerd.**

## Massa's op het stellaire kerkhof



Figuur 4. Samenvatting van de tot eind 2021 waargenomen zwaartekrachtgolven. Elke detectie bestaat uit twee cirkels (blauw: zwarte gaten, oranje: neutronensterren) die met pijlen eindigen in een derde cirkel: het resulterende zwart gat na de botsing. Geel (rood) zijn neutronensterren (zwarte gaten) die op elektromagnetische golflengten (EM) met gewone telescopen zijn ontdekt. (LIGO-Virgo-KAGRA/Aaron Geller/Northwestern).

joenen tot miljarden keren zo zwaar als de zon). Deze golven hebben veel lagere frequenties, rond 1 nano ( $10^{-9}$ ) hertz (Figuur 5). Er blijft echter nog een groot gat in het spectrum open, van rond de 100 nanohertz tot 1 hertz. Om dit regime te bestuderen heeft het Europees ruimteagentschap ESA begin 2024 toestemming gegeven om de LISA-ruimtemissie voor te bereiden.

### LISA

LISA zal bestaan uit drie satellieten, die op een onderlinge afstand van 2,5 miljoen kilometer in een driehoeksformatie achter de aarde aan vliegen. Zij zullen lasers naar elkaar toe schieten, waarmee voornamelijk zwaartekrachtgolven met frequenties tussen 0,1 en 10 millihertz gemeten kunnen worden (Zenit december 2016, blz. 23-25).

Er zijn tal van redenen waarom detecties van zulke golven interessant zijn. Ze worden bijvoorbeeld geproduceerd door supermassieve zwarte gaten die met elkaar botsen, maar zelfs nog exotischere signalen zou LISA kunnen waarnemen; bijvoorbeeld kosmische snaren of signalen van kort na de oer-knal. De overvloed van signalen zal waarschijnlijk eerder voortkomen uit dubbele witte dwergen (zie verder) in de Melkweg en in mindere mate van dubbele zwarte gaten en neutronensterren in naburige sterrenstelsels. Een groot deel van deze zwaartekrachtgolven zal sterk genoeg zijn om het individuele signaal te kunnen detecteren, wat ons informatie geeft over bijvoorbeeld de massa van de hemellichamen die de golven opwekken.

### Achtergrondruis

Een groot deel zal echter te zwak zijn, wat ertoe leidt dat we enkel het collectieve signaal van deze laatste categorie kunnen meten; dit noemen we de *achtergrondruis* of het *achtergrondsignaal*. Aangezien dit een openstapeling is van een groot aantal individuele zwaartekrachtgolven kan deze achtergrondruis ons veel leren over de kenmerken van de verzameling van bronnen in haar geheel. Het is dus erg belangrijk om goed te begrijpen wat de voornaamste objecten zijn die dit signaal opwekken. De vraag die wij ons hebben gesteld is de volgende: stel dat LISA een achtergrondsingaal zal meten, wordt dit dan vooral bepaald door botsingen van witte dwergen, zwarte gaten of neutronensterren? Hierbij is het belangrijk op te merken dat we ons focussen op het achtergrondsignaal opgewekt door botsende hemellichamen, en niet op een achtergrondsignaal met een meer exotische oorsprong, zoals eerder beschreven.

### Witte dwergen

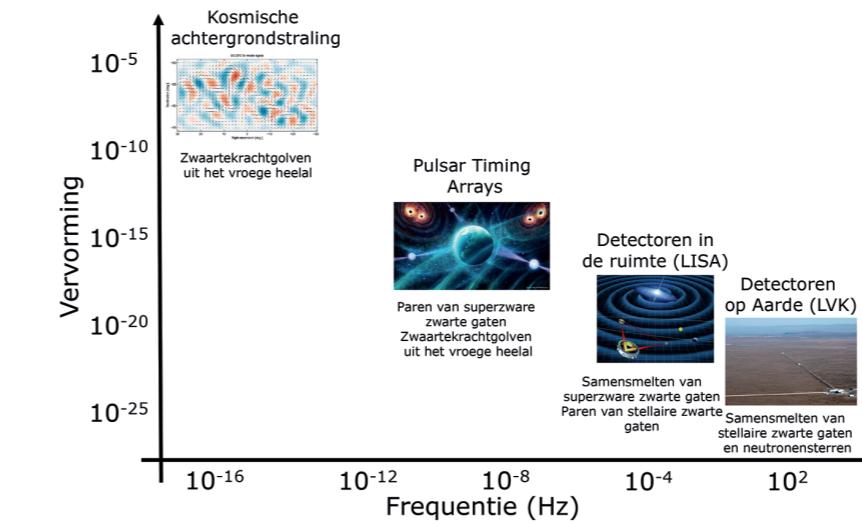
De ster die we allemaal goed kennen en – als het niet bewolkt is – dagelijks zien, is de zon. De zon is momenteel zo'n 4,5 miljard jaar oud. Dit lijkt oud, maar in de nabije toekomst zal ze niet noemenswaardig evolueren. Pas over pakweg 5,5 miljard jaar zal de zon haar eerste grote verandering ondergaan: wanneer alle waterstofkernen in de zon zijn gefuseerd tot helium, in een proces dat kernfusie heet, zal de kern van de zon krimpen. Dit leidt ertoe dat de druk en de temperatuur in de kern een stuk hoger worden, wat

zal leiden tot de fusie van heliumkeren tot koolstof. Dit zorgt ervoor dat de zon zal opzwollen tot een rode reus. Wanneer ook deze energiebron uitgeput is zal de kern onder invloed van de zwaartekracht verder krimpen, terwijl de buitenste lagen van de zon de ruimte in worden geblazen. De compacte kern die overbleeft staat bekend als witte dwerg. Niet alleen de zon eindigt uiteindelijk als een witte dwerg; het is de eindfase van zowat alle sterren met een massa tot ongeveer acht keer die van de zon. Zwaardere sterren eindigen hun leven als een neutronenster of zelfs een zwart gat (Figuur 7).

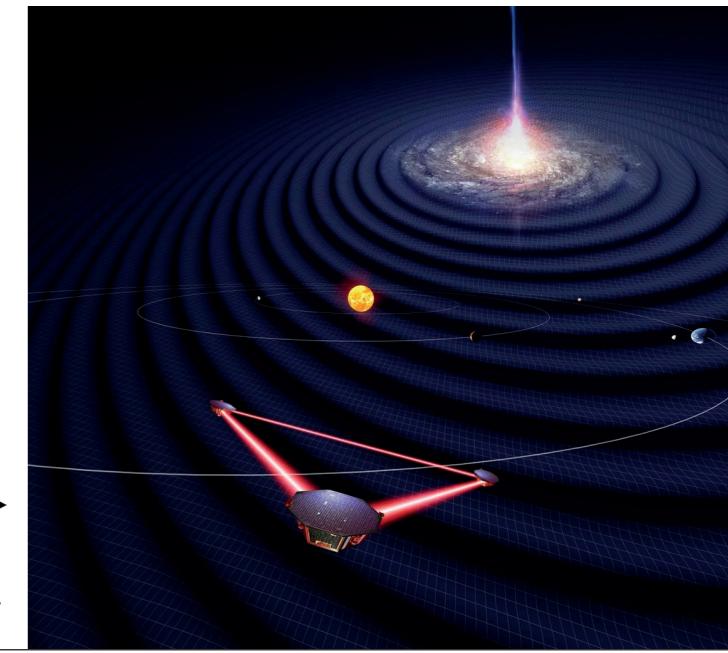
De massa van witte dwergen zit tussen 0,2 en 1,4 maal de massa van de zon, met de meerderheid rond 0,6 zonnsma. Omdat hun straal vergelijkbaar is met die van de aarde, zijn het uiterst compacte objecten, met een typische dichtheid van ongeveer duizend kilogram per kubieke centimeter. Verder zijn witte dwergen erg heet, ze kunnen temperaturen hebben van bijna 100.000 graden Celsius. Gedurende hun verdere leven zullen ze langzaam afkoelen, een proces dat miljarden jaren duurt, om uiteindelijk te eindigen als zwarte dwerg. Gezien de leeftijd van ons universum (13,8 miljard jaar) is er nog geen enkele witte dwerg als zwarte dwerg gevonden.

### Dubbelsterren

Een witte dwerg is erg moeilijk te detecteren. Door hun kleine omvang geven ze niet veel licht af en zijn ze erg zwak. Om deze reden kunnen optische telescopen ze moeilijk detecteren. De reden dat astronomen er toch zeker



Figuur 5. Zwaartekrachtgolven van verschillende frequenties, hun bronnen en manier van detecteren. (Gemma Janssen (ASTRON))



Figuur 6. Illustratie van de LISA-satellieten die lasers naar elkaar uitzenden, met op de achtergrond het zonnestelsel en de actieve kern van een sterrenstelsel in de verte met de zwaartekrachtgolven die deze laatste uitzendt. (University of Florida/Simon Barke)

We weten wel dat we te maken hebben met twee sterren die onder invloed van elkaar zwaartekracht bewegen, en (op mogelijk verschillende momenten) veranderen in witte dwergen wanneer de brandstof voor kernfusie op is. Dit gaat gepaard met massaverlies; de eerste ster verliest een groot deel van haar massa en alleen de kern blijft over. Dit gebeurt daarna ook met de tweede ster. De detectie van een achtergrondsignaal zou duidelijkheid kunnen scheppen over hoe dit nu juist gebeurt.

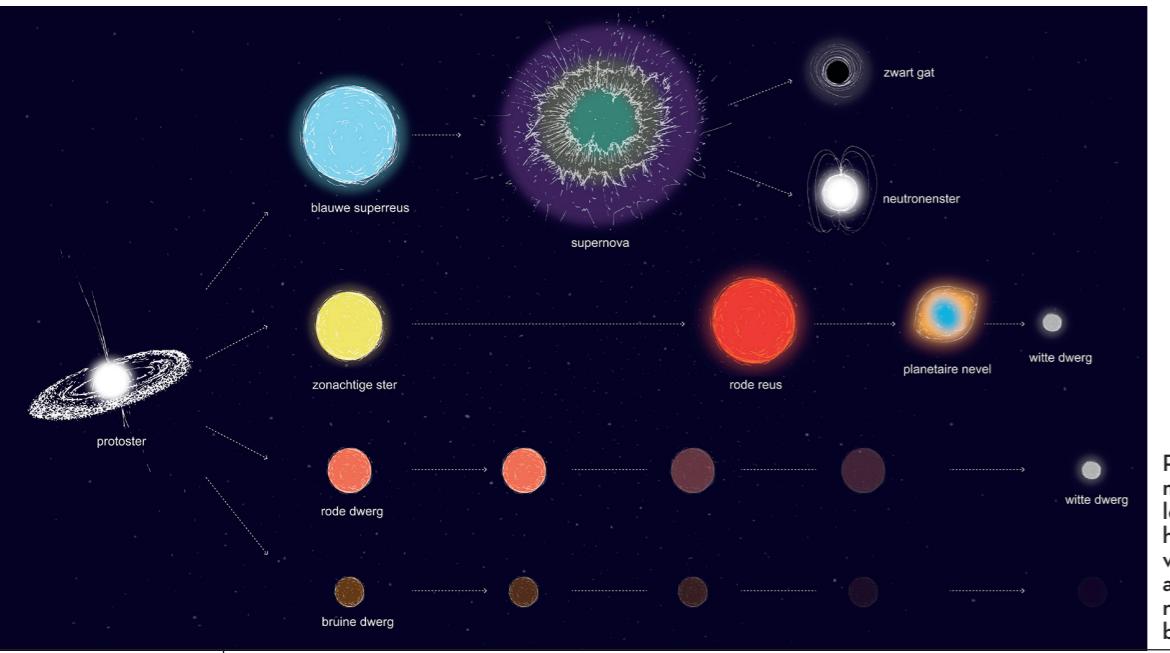
### Bijdragen

Onderzoekers waren tot nu toe vooral geïnteresseerd in wat de achtergrondruis ons zou kunnen leren over zwarte gaten en neutronensterren. Het hoofdresultaat van ons onderzoek is echter dat de achtergrondruis waarschijnlijk vooral gedomineerd wordt door dubbele witte dwergen! Dat dit het geval zou zijn voor de dubbele witte dwergen in de Melkweg, leek al langer duidelijk. Nu blijkt dat deze bronnen ook buiten de Melkweg talrijk genoeg zijn om het achtergrondsignaal van de andere bronnen te overstemmen. De mate waarin dubbele witte dwergen bijdragen aan de achtergrondruis wordt voornamelijk bepaald door de afstand tot het Melkwegstelsel en snelheid waarmee de sterren rond elkaar draaien (in mindere mate door de massa's, aangezien deze allemaal vergelijkbaar zijn). Deze baansnel-

heid bepaalt immers de frequentie van de zwaartekrachtgolven, die ook nog een roodverschuiving ondergaan als de bron zich ver van ons bevindt. Deze vermindering van de frequentie is hetzelfde verschijnsel als de cosmologische roodverschuiving van ver verwijderde objecten als gevolg van de uitdijing van het heelal.

### Ontstaan

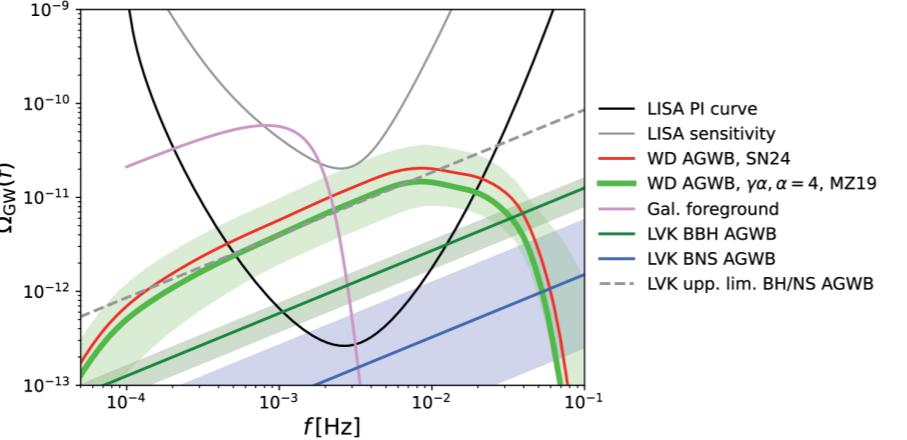
In ons onderzoek hebben we gekeken naar twee verschillende manieren waarop dubbele witte dwergen kunnen ontstaan, het zogeheten *alfa- en gammamechanisme*. Beide mechanismen leiden tot een andere (gesimuleerde) populatie van witte dwergen, en dus een net wat ander achtergrondsignaal. Hiernaast hebben we ook het effect van de metaliciteit (de hoeveelheid metalen) van het universum bekeken. In de sterrenkunde vallen niet alleen de chemische metalen (bijvoorbeeld ijzer en aluminium) onder deze noemer: alles wat geen waterstof of helium is, wordt gecategoriseerd als metaal. Daarnaast hebben we ook gekeken naar verschillende mogelijkheden om de geschiedenis van stervorming in het universum te definiëren. Ook dit is niet gemakkelijk te meten vanaf de aarde: er komen complexe berekeningen en hypotheses aan te pas. Stervorming, zoals de naam al een beetje aangeeft, laat zien hoeveel massa aan sterren per volume en per jaar wordt gevormd. De mate waarin dit gebeurt



Figuur 7. Schematische samenvatting van de mogelijke levenslopen van een ster. Afhankelijk van de initiële massa van de ster zal deze eindigen als een witte dwerg, neutronster of zwart gat. (ESA; bewerking)

varieert gedurende de evolutie van het universum, en hangt bovendien ook af van de metaliciteit.

In ons onderzoek hebben we naar een aantal verschillende modellen gekeken, die stuk voor stuk net wat andere parameters hebben voor de vorming van de dubbele witte dwergen, de metaliciteit en de geschiedenis van de stervorming. De resultaten van al deze scenario's, hoewel verschillend, geven allemaal dezelfde conclusie: de achtergrondruis van zwaartekrachtgolven afkomstig van dubbele witte dwergen domineert zeer waarschijnlijk die van zwarte gaten en neutronensterren. Het resultaat van de meest waarschijnlijke modellen voor de verklaring van de achtergrondruis is te zien in Figuur 8. De rode lijn is de achtergrondruis bepaald in het initiële onderzoek en de oranje lijn is het resultaat van het vervolg waarin meer parameters zijn meegenomen. De oranje band laat de onzekerheden van het voornaamste resultaat van het vervolgonderzoek zien. Verder geven de groene en blauwe lijn aan waar het verwachte achtergrondsignaal van zwarte gaten en neutronensterren zich zal bevinden. De zwarte volle lijn geeft de nauwkeurigheid van LISA aan na vier jaar aan metingen: alles wat zich daarboven bevindt is in theorie detecteerbaar. De roze lijn geeft de ruis weer van dubbele witte dwergen in onze eigen Melkweg. Het lijkt dus zeer waarschijnlijk dat het achtergrondsignaal van dubbele witte dwergen inderdaad dominant is ten opzichte van dat van dubbele zwarte gaten en neutronensterren; tenminste in het gebied waarin LISA zal meten.



Figuur 8. De samenvatting van ons onderzoek. De groene (blauwe) lijn en band geven de voorspelling weer voor de sterkte van de achtergrondruis (y-as) van dubbele zwarte gaten (neutronensterren) als functie van de frequentie (x-as). De rode en oranje lijnen (en band) geven de hoofdresultaten weer van de in de referenties genoemde artikelen. Hierbij kan de oranje lijn als de meest recente worden beschouwd. De zwarte volle lijn geeft de ondergrens aan van alles dat LISA zou kunnen detecteren na vier jaar aan observaties. De roze lijn is de ruis van witte dwergen in de Melkweg zelf, die al langer gekend is. (Uit: Hofman, S., & Nelemans, G. (2024). 'Uncertainty of the white dwarf astrophysical gravitational wave background.' *Astronomy & Astrophysics*, 691, A261)

### Conclusie

Een toekomstige detectie van het achtergrondsignaal met de LISA-missie zou het mogelijk kunnen maken om uit te zoeken welke van de bovengenoemde modellen realistisch zijn. Wellicht geeft het ons een beter beeld over de vorming van dubbele witte dwergen en mogelijk over de geschiedenis van de stervorming in het universum. Zo kunnen we hopelijk onze theorieën over deze onderwerpen verfijnen of, wie weet, zelfs vervangen. Dit is alleen mogelijk als we kunnen vaststellen welke objecten de achtergrondruis bepalen: ons onderzoek suggereert dat dit eerder dubbele witte dwergen zijn dan zwarte gaten en neutronensterren. Verder moeten we ook de achter-

grondruis kunnen onderscheiden van de overvloed aan signalen die LISA zal registreren. Het modelleren hiervan blijft belangrijk onderzoek vandaag de dag, en sommige open vragen zullen pas beantwoord worden wanneer LISA haar blik openstelt naar het universum en ons in staat stelt te zien wat vooralsnog onzichtbaar blijft. ●

Figuren 4 en 7 zijn bewerkt door Mat Drummen.

### Referenties

- Sophie Hofman & Gijs Nelemans (2024). 'Uncertainty of the white dwarf astrophysical gravitational wave background.' *Astronomy & Astrophysics*, 691, A261.
- Staelens, S., & Nelemans, G. (2024). 'Likelihood of white dwarf binaries to dominate the astrophysical gravitational wave background in the mHz band.' *Astronomy & Astrophysics*, 683, A139.



HET GROOTSTE  
VEILINGHUIS

VeilingHuis  
De Jager Goes

VAN ZUID-WEST  
NEDERLAND



Cartier Santos  
Hamerprijs € 5.500,-



Collier, 3 rijen bloedkoraal  
Hamerprijs € 30.000,-



Turmuhr  
Hamerprijs € 34.000,-



Staand horloge  
Hamerprijs € 13.000,-



Diamant 4.20 Ct.  
Hamerprijs € 15.000,-



Empire klok  
Hamerprijs € 16.000,-



19e eeuws ivoor  
Hamerprijs € 46.000,-



Boeken Buffon  
Hamerprijs € 3.400,-



18e Eeuwse tafelklok  
Hamerprijs € 15.000,-

### DE HOOGSTE OPBRENGSTEN TEGEN DE LAAGSTE KOSTEN

Wij kunnen voor u veilen, van 1 item tot een gehele inboedel of verzameling.

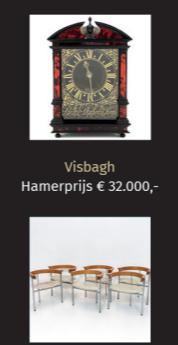
Van kunst tot antiek, van juwelen tot zilver en van design tot aziatica.

Hierover berekenen wij géén inbrengcommissie.

Wij kunnen u van dienst zijn voor het taxeren van een erfenis verdeling.

Uniek door simultaan met de zaal, live te veilen op de 8 grootste internet platforms.  
Door onze persoonlijke en discrete benadering, hét veilinghuis voor al uw kostbaarheden.

**0%**  
INBRENGCOMMISSIE  
U betaalt achteraf slechts € 15 per kavel



Visbagh  
Hamerprijs € 32.000,-



Poul Kjaerholm PK 11  
Hamerprijs € 8.500,-



Barometer, 18e eeuw  
Hamerprijs € 3.200,-



Staand horloge  
Hamerprijs € 22.000,-



Vaas, Copier  
Hamerprijs € 6.000,-



Ikoon  
Hamerprijs € 12.000,-



Borden China  
Hamerprijs € 12.000,-



Zakhorloge  
Hamerprijs € 9.500,-



Wapenschot, 18e eeuw  
Hamerprijs € 22.000,-

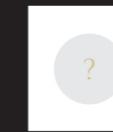


Diamant 4.20 Ct.  
Hamerprijs € 15.000,-

### UW ITEM HIERONDER?



Van 1 Item  
Hamerprijs € ?



tot en met  
Hamerprijs € ?



verzameling  
Hamerprijs € ?



of inboedel  
Hamerprijs € ?



Stoelklok met speelwerk  
Hamerprijs € 17.000,-



Glas, 18e eeuw  
Hamerprijs € 1.900,-



Drakenvaas, China  
Hamerprijs € 56.000,-



Collectie Meissen  
Hamerprijs € 22.000,-



Rolex herenhorloge  
Hamerprijs € 20.000,-



Collier, bloedkoraal  
Hamerprijs € 19.000,-



Kabinet  
Hamerprijs € 24.000,-



Schilderij, Jan Sluijters  
Hamerprijs € 9.500,-



Pendule, ca. 1810  
Hamerprijs € 11.000,-



Broche met diamanten  
Hamerprijs € 8.000,-



Rijtuig horloge  
Hamerprijs € 7.500,-



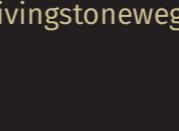
Zakhorloge  
Hamerprijs € 4.000,-



Schotels haringvangst  
Hamerprijs € 3.800,-



Hermes tas, jaren '80  
Hamerprijs € 3.000,-



Kandelaren, 18e eeuw  
Hamerprijs € 26.000,-



Wanli kom ca. 1600  
Hamerprijs € 28.000,-



Schouwklok A'dam  
Hamerprijs € 19.000,-



Kangxi kastel  
Hamerprijs € 24.000,-



Rijtuig horloge  
Hamerprijs € 7.500,-



Livingstone weg 18, 4462 GL Goes

• 0031 (0) 6 42 11 45 42

• info@veilinghuisdejager.nl

WWW.VEILINGHUISDEJAGER.NL