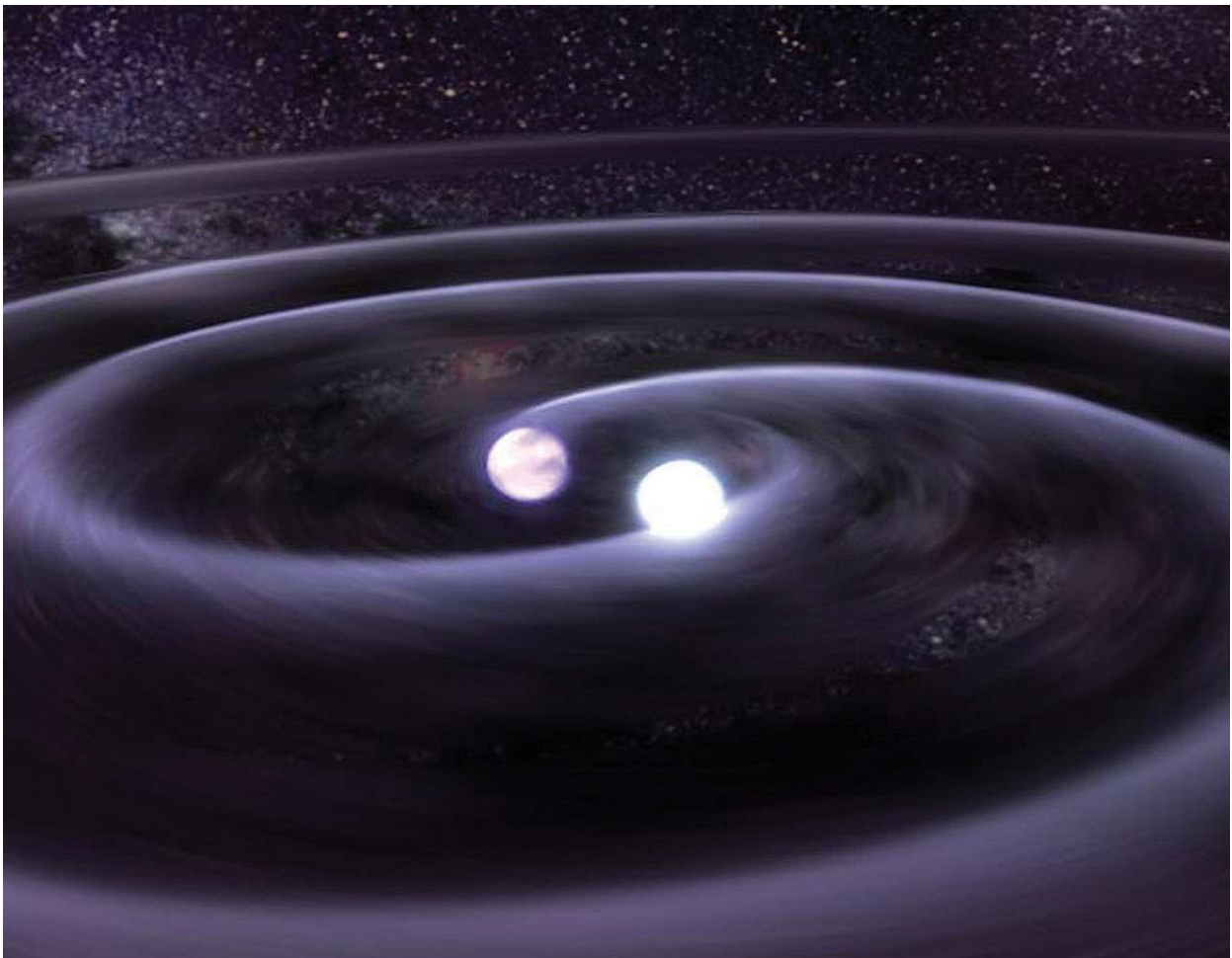


# De achtergrondruis van dansende witte dwergen

Het heelal is gevuld met sterren die zich ophopen in sterrenstelsels zoals onze Melkweg. Hoewel een groot deel van hen alleen door het leven gaat, zijn er heel wat die door de zwaartekracht verbonden zijn met een partner in een soort kosmische dans.



Impressie van een twee witte dwergen die op het punt staan met elkaar te botsen, terwijl ze zwaartekrachtgolven uitzenden. Beeld: Dana Berry CXC

**Er zijn verschillende mogelijkheden voor de afloop van deze dans: zo kunnen twee zware sterren eindigen als zwarte gaten die uiteindelijk met elkaar botsen. Zulke botsingen produceren zwaartekrachtgolven die we hier op aarde kunnen waarnemen. Tijdens onze masteronderzoeksprojecten hebben wij beargumenteerd dat een bepaalde bron van zwaartekrachtgolven wel eens belangrijker zou kunnen zijn dan gedacht voor de toekomstige ruimtemissie LISA.**

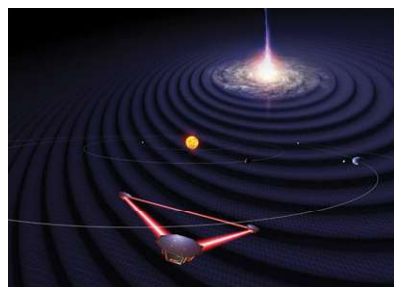
**D**e relativiteitstheorie van Albert Einstein beschrijft zwaartekracht als het gevolg van de kromming van de ruimtetijd, de vierdimensionale unificatie van de ruimte en tijd zoals wij die ervaren. Uit zijn vergelijkingen wordt het echter snel duidelijk dat alleen heel zware objecten een significante kromming kunnen veroorzaken, zoals sterren, zwarte gaten of complete sterrenstelsels. Deze kromming bepaalt dan hoe andere objecten, zoals planeten en kometen, bewegen door deze ruimtetijd. Net zoals een steen in een vijver werpen golven veroorzaakt, kunnen botsende zwarte gaten tot trillingen in de ruimtetijd leiden. Deze zwaartekrachtgolven hebben we voor de eerste keer kunnen waarnemen in 2015 met behulp van de twee LIGO-detectoren in de Verenigde Staten. Deze zwaartekrachtgolven geven ons een nieuwe kijk op het universum. Deze kijk is complementair aan wat we kunnen detecteren met optische telescopen, omdat deze andere informatie geeft over gebeurtenissen waarbij geen licht ontstaat.

Het is al lange tijd duidelijk dat het interessant is om het heelal te bestuderen in verschillende golflengtes, en net als bij lichtgolven willen wetenschappers ook zwaartekrachtgolven over een brede waaier aan frequenties meten. De LIGO-detectoren zijn gebaseerd op het principe van een Michelson-interferometer. Net als andere gelijkaardige experimenten op aarde, bijvoorbeeld Virgo en KAGRA, proberen zij zwaartekrachtgolven met frequenties tussen de 10 en 1000 hertz waar te nemen. In dit regime kunnen wetenschappers signalen opvangen van botsende zwarte gaten en neutronensterren. Het doel van de toekomstige LISA-missie is om ook golven met lagere frequenties, rond 1 millihertz, te detecteren. LISA zal bestaan uit drie satellieten, die op een onderlinge

afstand van 2,5 miljoen kilometer in een driehoeksformatie achter de aarde aan vliegen in dezelfde baan. Zij zullen lasers naar elkaar toe schieten, waarmee zwaartekrachtgolven gemeten kunnen worden. In dit regime met lagere frequenties kunnen we naast zwarte gaten en neutronensterren ook witte dwergen en superzware zwarte gaten (miljoenen tot miljarden keren zo zwaar als onze zon) zien botsen. De verwachting is dat LISA veel meer signalen zal meten dan onze huidige zwaartekrachtgolfdetectoren. Naast individuele gebeurtenissen is er ook de hoop dat deze missie een zogenaamde achtergrondruis zou kunnen ontdekken – een opeenhoping van zwaartekrachtgolven die individueel te zwak zijn, maar samen wel detecteerbaar zijn. De som van al deze zwaartekrachtgolven zou ons enorm veel leren over de verzameling van bronnen in haar geheel. Om dit signaal goed te begrijpen, is het dus belangrijk om te begrijpen welke bronnen we in dit frequentiedomein kunnen verwachten.

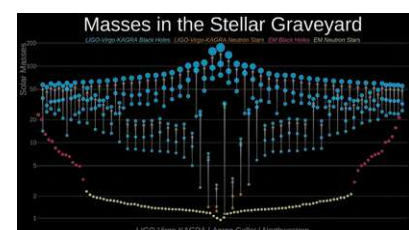
### Het initiële idee

Na enkele omwegen belandde ik, Seppe Staelens, in 2022 bij prof. Gijs Nelemans op kantoor, nadat hij me



Figuur 1. Illustratie van de LISA-satellieten die lasers naar elkaar uitzenden, met op de achtergrond het zonnestelsel, een sterrenstelsel in de verte, en de zwaartekrachtgolven die deze laatste uitzendt. Beeld: (University of Florida / Simon Barke (CC BY 4.0) )

wist te vertellen dat hij een masterproject in gedachten had. Nelemans had het vermoeden dat de astrofysici die nadachten over de achtergrondruis die LISA hopelijk in de toekomst zal meten iets over het hoofd zagen. De algemene consensus was dat een achtergrondruis gemeten door LISA ons iets zou leren over de dubbele zwarte gaten in het universum. Dit zou in mindere mate het geval zijn voor neutronensterren en witte dwergen, aangezien zwarte gaten een stuk zwaarder zijn en sterkere signalen produceren. Maar, zei Nelemans, dubbele witte dwergen zijn dan misschien wel lichter, er zijn er wel veel meer van in het universum. Zijn vermoeden was dat de achtergrondruis daarom voornamelijk bepaald wordt door deze laatste duo's. Met deze vraag ging ik aan de slag, en gebaseerd op een publicatie uit 2003 [1], probeerde ik uit te zoeken of Nelemans gelijk had. Gedurende dit onderzoek werden zijn vermoedens bevestigd: het feit dat er zoveel meer dubbele witte dwergen in het heelal zijn, blijkt genoeg om de ruis van de



Figuur 2. Zwaartekrachtgolven die tot dusver zijn waargenomen door de LVK-collaboratie. Elke detectie bestaat uit twee cirkels (blauw voor zwarte gaten, oranje voor neutronensterren) die met pijlen eindigen in een derde cirkel: dit geeft de twee initiële massa's weer die samensmelten tot een zwart gat met de derde massa. Geel (rood) zijn neutronensterren (zwarte gaten) die met lichttelescopen zijn ontdekt. Beeld: LIGO-Virgo-KAGRA / Aaron Geller / Northwestern

zwarte gaten te overstemmen. Een resultaat dat, hoewel onverwacht, wel belangrijk zal zijn wanneer LISA ons haar metingen stuurt en dus bijgevolg is gepubliceerd [2].

### Witte dwergen: het eindpunt van onze zon

Het merendeel van de sterren in ons heelal (zo'n 95 procent) eindigt als een witte dwerg. Dit geldt bijvoorbeeld ook voor de zon. Deze zogenoemde eindfase wordt bereikt nadat alle bronnen voor kernfusie (elementen zoals waterstof, helium, enzovoort) opgebruikt zijn. Wanneer er geen 'brandstof' meer is voor de fusie, stort de kern van de ster in elkaar, terwijl haar buitenste lagen afgeworpen worden. Wat overblijft is een heel compact object: de massa is vergelijkbaar met die van de oorspronkelijke ster, maar het volume is ongeveer gekrompen tot dat van de aarde.

Hoewel witte dwergen vaak alleen door het leven gaan, komt het ook regelmatig voor dat ze met zijn tweeën om elkaar heen draaien. Zo'n systeem wordt ook wel een dubbele witte dwerg genoemd: zij vormen de basis van ons onderzoek. Helaas zijn dubbele witte dwergen erg lastig te detecteren: witte dwergen produceren relatief weinig licht en daarbij is het lastig om een enkele witte dwerg te onderscheiden van een dubbele witte dwerg. Het is helaas niet mogelijk om zo'n systeem na te bootsen in een laboratorium en veel theorieën over het ontstaan van deze witte dwergen zijn nog onzeker. Hopelijk kan een detectie van de achtergrondruis die geproduceerd wordt door deze systemen ons meer duidelijkheid bieden over hun vorming.

### Aannames onder de loep: hadden Gijs en Seppe gelijk?

Het jaar nadat Seppe is afgestudeerd, heb ik, Sophie Hofman, met mijn masteronderzoek hierop verder gebouwd. Seppe had tijdens zijn onderzoek gekeken naar één aanname voor elk van drie verschillende processen: de theorie achter de vorming van de dubbele witte dwergen, de zogeheten metalliciteit van het universum en de geschiedenis van de stervorming.

Op het moment zijn er verschillende ideeën over de vorming van dubbele witte dwergen. Seppe had één bepaald scenario gekozen, terwijl ik ook andere heb onderzocht. Voor de metalliciteit van het universum, de hoeveelheid elementen zwaarder dan waterstof en helium, heeft Seppe een standaardwaarde gebruikt (de metalliciteit – of het metaalgehalte – van de zon). Ik, daarentegen, heb gekeken naar vijf andere waarden. De laatste aanname die tijdens het onderzoek is gedaan heeft betrekking op de geschiedenis van de stervorming: waar Seppe een geschiedenis van de stervorming gebruikte die alleen afhankelijk is van de tijd, heb ik een geschiedenis gebruikt die daarnaast ook van de metalliciteit afhangt. Nu was dus de vraag: is de achtergrondruis van witte dwergen nog steeds dominant over die van zwarte gaten wanneer we deze aannames aanpassen? Zijn de conclusies van Gijs Nelemans en Seppe nog altijd correct? Dit bleek inderdaad het geval te zijn. Na het verwerken van deze resultaten en conclusies, kreeg ook ik de mogelijkheid om deze te publiceren in het tijdschrift *Astronomy & Astrophysics* [3].

### Conclusie

Ons resultaat – dat dubbele witte dwergen waarschijnlijk de dominante bron zullen zijn voor een astrofysische achtergrondruis in het spectrum dat LISA kan waarnemen – zal belangrijk zijn om de metingen te interpreteren die LISA ons hopelijk binnen een tiental jaar zal toesturen. Het feit dat ook wij als masterstudenten ons steentje hebben kunnen bijdragen aan nieuwe inzichten in de astrofysica, onder begeleiding van prof. Gijs Nelemans, illustreert hoe een opleiding in de natuurkunde een enorm verrijkende ervaring kan zijn.

### REFERENTIES

1. A.J. Farmer en E.S. Phinney, The gravitational wave background from cosmological compact binaries, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **346**(4), 1197-1214 (2003).
2. S. Staelens en G. Nelemans, Likelihood of white dwarf binaries to dominate the astrophysical gravitational wave background in the mHz band, *Astronomy & Astrophysics*, **683**, A139 (2024).
3. S. Hofman en G. Nelemans, Uncertainty of the white dwarf astrophysical gravitational wave background, *Astronomy & Astrophysics*, **691**, A261 (2024).

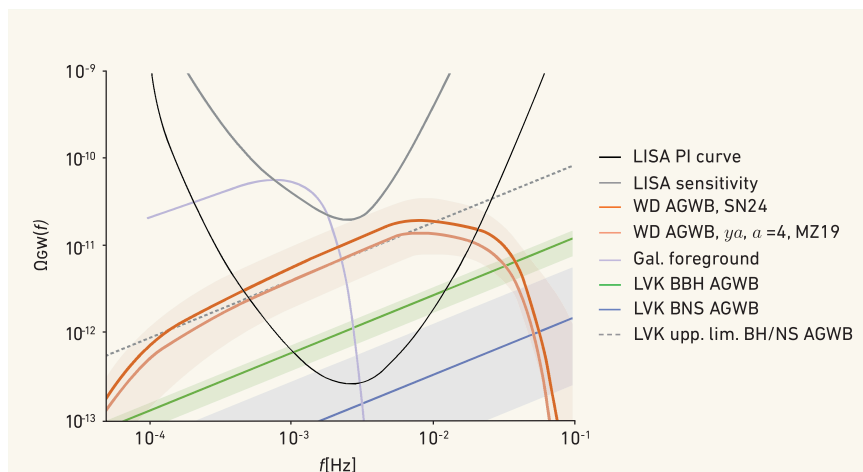


Fig 8 uit: Hofman, S., & Nelemans, G. Uncertainty of the white dwarf astrophysical gravitational wave background. *Astronomy & Astrophysics*, 691, A261 (2024).

Dit figuur vat ons onderzoek samen. De groene (blauwe) lijn en band geven de voorspelling weer voor de sterkte van de achtergrondruis van dubbele zwarte gaten (neutronensterren) als functie van de frequentie. De donker- en lichtoranje lijnen (en band) geven de hoofdresultaten weer uit beide papers; hierbij kan de lichtoranje lijn als de meest recente worden beschouwd. De zwarte volle lijn geeft de ondergrens aan van alles wat LISA zou kunnen detecteren na vier jaar aan observaties. De paarse/lichtblauwe lijn is de ruis van witte dwergen in de Melkweg zelf, die al langer bekend was.