



Universiteit  
Leiden  
The Netherlands

## Gravitational waves through the cosmic web

Garoffolo, A.

### Citation

Garoffolo, A. (2023, July 4). *Gravitational waves through the cosmic web*. *Casimir PhD Series*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/3628463>

Version: Publisher's Version

License: [Licence agreement concerning inclusion of doctoral thesis in the Institutional Repository of the University of Leiden](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/3628463>

**Note:** To cite this publication please use the final published version (if applicable).

# Samenvatting

De directe detectie van zwaartekrachtgolven (ZG) is een baanbrekende wetenschappelijke prestatie van het afgelopen decennium. Het betekende onder andere het begin van de ZG-kosmologie: de mogelijkheid om het heelal, vanaf de oerfase tot vandaag, te bestuderen met behulp van deze nieuwe fascinerende detectiemethode. Gravitatiegolven bevatten waardevolle informatie over hun bronnen en de ruimtetijd waarin ze zich voortplanten. Daarom kunnen ze inzichten onthullen in het homogene en isotrope heelal en de kosmische structuren die hierdoor verstoord worden. Hoewel de huidige technologie voor de detectie van deze golven geen kosmologische gegevens van vergelijkbare kwaliteit kan leveren als die vanuit elektromagnetische signalen worden verzameld, blijft het inherente potentieel van gravitatiegolven bestaan. Vooruitkijkend naar toekomstige missies beoogt dit proefschrift te begrijpen wat gravitatiegolven ons kunnen vertellen over de dynamiek van het heelal op kosmologische schalen, met een bijzondere nadruk op donkere energie en grootschalige structuren. Na **Hoofdstuk 1**, waarin we alle noodzakelijke concepten betreffende kosmologie en gravitatiegolven introduceren, is de rest van het proefschrift verdeeld in drie onderdelen:

1. In het eerste deel wordt een poging ondernomen de kracht van de fluctuaties in de helderheidsafstand van gravitatiegolven te benutten als een robuust instrument om scalar-tensor theorieën van de zwaartekracht te onderzoeken. Dit zijn uitgebreide zwaartekrachttheorieën waarin een scalaire veld een extra zwaartekrachtinteractie bemiddelt. De aanwezigheid van het scalaire veld laat sporen na in de zogenaamde *relativistische effecten*: vervormingen van de ZGen door de aanwezigheid van kosmische structuren langs het voortplantingstraject. Aangezien het groeipatroon van de zwaartekrachtpotentialen van de materie afhangt van de zwaartekrachttheorie, dragen relativistische effecten informatie over het scalaire veld. De analyse wordt uitgevoerd in het geometrische optica regime, waar de frequentie van de gravitatiegolven veel groter is dan de karakteristieke energieschaal van de ondervonden obstakels. **Hoofdstuk 2** stelt een nieuwe schattingsfactor voor, die gebruik maakt van ZG en Type-Ia Supernovae observaties, om de onderscheidende signaturen geassocieerd met de lopende Planck massa en de clustering van donkere energie te detecteren. Volgens onze analyse is in het meest optimistische scenario nabij  $10^{14}$  effectief aantal gebeurtenissen nodig om dergelijke signaturen op

te sporen. **Hoofdstuk 3** verlegt de aandacht naar de zwakke lensing convergentieterm, het meest prominente relativistische effect. We onderzoeken de mogelijkheden ervan om de parameters van het uitgebreide kosmologische model in te perken, waarbij we ZG-missies alleen of in combinatie met sterrenstelselonderzoeken beschouwen. Wij concluderen dat ZGen het inperkend vermogen kunnen vergroten als hun statistiek vergelijkbaar wordt met die van sterrenstelsels.

2. Het tweede deel van het proefschrift formuleert aanvullende testen voor scalair-tensor theorieën van de zwaartekracht. Opnieuw werkend in de hoge frequentie benadering, introduceerden we in **Hoofdstuk 4** de energie-impuls-tensor voor zwaartekrachtsgolven in de subklasse van dergelijke theorieën waar de tensormodi zich voortplanten met de lichtsnelheid. Uit dit resultaat hebben we de zwaartekrachtgolffastheden afgeleid,  $d_L^{GW}$  en  $d_A^{GW}$ , en aangetoond dat beide expliciet gewijzigd kunnen worden door de aanwezigheid van het scalaire veld. We hebben ook de geldigheid van de reciprociteitswet van Etherington bewezen en de implicaties van ons resultaat in de context van sterke lensing tijdsvertraging onderzocht. **Hoofdstuk 5** onderzoekt de mogelijkheden van directe detectie van scalaire veldgolven met de focus op twee screeningsmechanismen: *chameleon* en *symmetron*. Wil een scalair-tensor theorie namelijk aanvaardbaar zijn, dan moet deze voorzien zijn van een mechanisme dat het scalaire veld onderdrukt in gebieden met een hoge dichtheid, zoals bijvoorbeeld het Zonnestelsel. Wij tonen aan dat in beide scenario's de interactie tussen de scalaire golven en de testdeeltjes wordt onderdrukt. Daarom concluderen wij dat scalaire golven in deze theorieën niet waarneembaar zouden moeten zijn.
3. In het derde deel onderzoeken we de voortplanting van ZGen in het golfoptische regime binnen de algemene relativiteitstheorie. De reden achter deze keuze is om aan te tonen dat bepaalde effecten, die gewoonlijk worden toegeschreven aan bijkomende dynamische veldinhoud, degeneratie kunnen vertonen met golfoptische effecten. In **Hoofdstuk 6** hebben we laten zien dat de voortplantingseffecten zelfs in de algemene relativiteitstheorie waarneembare scalaire en vectoriële polarisatiemodi kunnen voortbrengen. Hoewel de verkregen resultaten van toepassing blijven op opgeloste ZG-gebeurtenissen, hebben we ons in dit deel gericht op de *stochastische ZG-achtergrond* en de polarisatie-inhoud hiervan. Voor het eenvoudige geval van een ongepolariseerde, Gaussische, statistisch homogene beginachtergrond hebben we laten zien dat de interactie met materiestructuren geen netto verschil veroorzaakt in de hoeveelheid links- en rechtsdraaiende tensormodi. Wij hebben ook geconstateerd dat, om Q- en U-polarisatiemodes te produceren, een hexadecapool anisotropie vereist is.