

VU Research Portal

Extracting Physics from Gravitational Waves

Li, T.G.F.

2013

document version

Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link to publication in VU Research Portal](#)

citation for published version (APA)

Li, T. G. F. (2013). *Extracting Physics from Gravitational Waves: Testing the Strong-field Dynamics of General Relativity and Inferring the Large-scale Structure of the Universe*.

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal ?

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

E-mail address:

vuresearchportal.ub@vu.nl

POPULAIR-WETENSCHAPPELIJKE SAMENVATTING (NL)

Beschrijving van de planetaire beweging door de tijd heen

De mensheid kijkt al duizenden jaren naar de hemel. In de oudheid volgde de mens de bewegingen van de zon en de maan om kalenders te maken en om ze te associëren met aardse gebeurtenissen zoals getijden en seizoenen. Door de beweging van hemelse objecten te volgen ontstond de notie van de baan van de zon, de maan en de planeten. Claudius Ptolemaeus (90–168) introduceerde, voortbouwend op eerder werk ontwikkeld door Griekse astronomen, een nauwkeurig model van de planetaire banen door de invoering van een kleinere cirkelvormige baan (epicykel) rondom de primaire cirkelvormige baan.

Tijdens de Renaissance begon onze kennis van de hemel te veranderen. Johannes Kepler (1571–1630) introduceerde drie wetten die de planetaire banen beschreven door middel van ellipsen met de zon in het brandpunt. Later toonde Isaac Newton (1642–1727) aan dat de wetten van Kepler kunnen worden afgeleid uit een wet die niet alleen de beweging van planeten beschrijft, maar ook beschrijft hoe alle objecten tot elkaar worden aangetrokken. Newtons gravitatiewet stelt dat alle objecten tot elkaar worden aangetrokken door de zwaartekracht, en dat de sterkte van deze kracht wordt bepaald door de massa van de twee objecten.

Ondanks het succes van Newtons gravitatiewet, kon deze de verschuiving in het perihelium van Mercurius, het punt in Mercurius' baan dat het dichtst bij de zon staat, niet beschrijven. Het was Albert Einstein (1879–1955) die Newtons gravitatiewet verfijnde door de invoering van de algemene relativiteitstheorie. Einsteins algemene relativiteitstheorie stelt dat de kromming van ruimte en tijd de wijze bepaalt waarop materie er doorheen stroomt, en omgekeerd, dat materie de ruimte en tijd kromt. De theorie van Einstein verklaarde de verschuiving in het perihelium van Mercurius, en lijkt tot dusver de juiste beschrijving te zijn van de beweging van planeten, sterren en zelfs sterrenstelsels.

Gravitatiegolven: een nieuw venster op het heelal

De algemene relativiteitstheorie doet meer dan alleen het voorspellen van de beweging van voorwerpen. Deze voorspelt ook een nieuw soort straling, bekend als zwaartekrachtstraling

of gravitatiegolven. Gravitatiegolven zijn rimpelingen in de kromming van ruimte en tijd die zich voortplanten met de lichtsnelheid. Het effect van gravitatiegolven is de periodieke uitdijning en inkrimping van de ruimte en tijd. Het bestaan van gravitatiegolven is slechts indirect afgeleid door de beweging van twee om elkaar heen draaiende sterren.

Grootschalige fysica-experimenten, zoals LIGO in de Verenigde Staten en Virgo in Italië, hebben het doel om voor het eerst in de geschiedenis van de mensheid de invloeden van gravitatiegolven direct waar te nemen. LIGO en Virgo zijn opgezet om kleine veranderingen in afstanden van ongeveer een duizendste van de diameter van een proton te meten. De kenmerken van gravitatiegolven zijn nauw verbonden met de beweging van de bron die de gravitatiegolven heeft uitgezonden. Waar astronomen tot op heden telescopen nodig hebben om de beweging van planeten, sterren en sterrenstelsels te bepalen, kan het meten van gravitatiegolven zorgen voor een extra venster van waaruit we de geheimen van het heelal kunnen verkennen.

Het toetsen van de algemene relativiteitstheorie

Van Ptolemaeus tot Newton en van Newton tot Einstein, de geschiedenis heeft ons geleerd dat onze wetten van de fysica voortdurend verfijning nodig hebben om de natuur met toenemende precisie te beschrijven. De algemene relativiteitstheorie van Einstein mag hierop geen uitzondering zijn. De algemene relativiteitstheorie is echter nog nooit getoetst in de nabijheid van extreem dichte objecten, zoals neutronensterren en zwarte gaten. Neutronensterren zijn stellaire overblijfselen die hoofdzakelijk bestaan uit elektrisch neutrale subatomaire deeltjes genaamd neutronen. Neutronensterren zijn zo dicht dat ze de massa van de zon bevatten in ongeveer de grootte van een stad. Zwarte gaten zijn nog extremere objecten. Ze zijn stellaire overblijfselen die ooit zo dicht waren dat deze sterren hun eigen zwaartekracht niet konden tegenhouden en daardoor implodeerden. Zwarte gaten hebben hun unieke namen gekregen omdat hun aantrekkingskracht zo sterk is dat zelfs licht niet kan ontsnappen als het te dichtbij komt.

Dit proefschrift beschrijft een methode genaamd Test Infrastructure for General Relativity (TIGER), dat een theoretisch kader en een data-analyse algoritme omvat om de algemene relativiteitstheorie te toetsen op een dusdanige manier dat kennis van een eventuele alternatieve theorie niet vereist is. TIGER vergelijkt de beweging van twee om elkaar heen cirkelende neutronensterren met de voorspelling van algemene relativiteitstheorie en wijst een mate van aannemelijkheid toe aan de vraag: “zijn de banen in overeenstemming met de voorspellingen van de algemene relativiteitstheorie?” Een dergelijke test is analoog aan het nauwkeurig meten van de baan van planeten en deze te vergelijken met de voorspellingen de gravitatiewet van Newton.

De TIGER-methode werd getoetst door middel van computersimulaties die gebruik maakten van duizenden computers verspreid over de hele wereld. Het resultaat is de bevestiging dat de TIGER-methode willekeurige afwijkingen in de baan van cirkelende neutronensterren kan waarnemen. Bovendien blijkt uit de resultaten dat men door gebruik te maken van de TIGER-methode voor de analyse van LIGO- en Virgo-data in staat is om de invloed van de

zwaartekracht te toetsen met een precisie die nog niet is behaald.

Als de TIGER-methode een afwijking van de algemene relativiteitstheorie weet te vinden, dan zal dat een nieuwe revolutie betekenen in ons begrip van gravitatie. Wetenschappers zullen nieuwe ideeën introduceren om het gat te vullen in onze kennis van hoe alle dingen in het heelal bewegen. Een mogelijke nieuwe theorie moet echter in staat zijn om de huidige en toekomstige waarnemingen te beschrijven. De cirkel van theoretische modellen die de waarnemingen voorspellen en waarnemingen die de theoretische modellen bevestigen zal waarschijnlijk onbeperkt doorgaan, zolang de mens zijn vermogen om gebeurtenissen in het heelal te beschrijven en te voorspellen continu blijft verfijnen.

Het afleiden van het grootschalige gedrag van het heelal

Sinds de tijd van Ptolemaeus en Newton zijn we meer te weten gekomen over de fonkelende sterren die we aan de hemel zien. We zijn gaan beseffen dat de Melkweg een grote groep van sterren is die door hun gravitationele interactie gebonden zijn, ook wel een sterrenstelsel genoemd. Bovendien blijkt dat sommige van de “sterren” die we aan de hemel zien eigenlijk sterrenstelsels zijn. We weten nu dat er meer dan honderd miljard sterrenstelsels zijn in ons uitgestrekte heelal. Opmerkelijk genoeg kan hun collectieve beweging, die doet vermoeden dat het universum alsmaar sneller uitdijt, beschreven worden met behulp van de algemene relativiteitstheorie. De studie van het grootschalige gedrag van het heelal wordt kosmologie genoemd.

Een manier om de collectieve beweging van sterrenstelsels vast te stellen is om hun afstand van de aarde en hun relatieve beweging ten opzichte van de aarde te meten. Echter, hoe verder een object zich bevindt, des te moeilijker het is om zijn afstand te bepalen. Wetenschappers gebruiken tegenwoordig verschillende meettechnieken om de afstand te bepalen van steeds verdere objecten. Elk van deze meettechnieken is gekalibreerd aan de hand van meettechnieken die gebruikt worden om de afstand van objecten die dichterbij zijn te bepalen. De reeks van verschillende meettechnieken wordt de kosmische afstandsladder genoemd, waarbij elke trede van de ladder een andere meettechniek voorstelt. Een dergelijke constructie is noodzakelijk omdat op dit moment weinig bekend is over de eigenschappen van verre sterren en sterrenstelsels. Echter, de kosmische afstandsladder is nogal gevoelig voor fouten, aangezien elke trede afhankelijk is van de resultaten en de juistheid van de vorige trede. Een kleine fout in de eerste trede kan desastreuze gevolgen hebben voor de afstandsmeting van een ver gelegen object.

Een alternatieve manier om kosmologische afstanden te bepalen die minder gevoelig is voor fouten dan het gebruik van de kosmische afstandsladder, is het meten van gravitatiegolven van twee om elkaar heen cirkelende neutronensterren of zwarte gaten. De algemene relativiteitstheorie beschrijft namelijk de manier waarop de intensiteit van gravitatiegolven zwakker wordt naarmate de waarnemer verder weg is, zoals een lichtbron zwakker lijkt naarmate deze verder van je vandaan is. Het vermogen om te voorspellen hoe de intensiteit van gravitatiegolven afneemt naarmate de waarnemer verder weg is, zorgt ervoor dat wetenschappers de afstand tot een object direct kunnen meten, zonder de hulp van de kosmische

afstandsladder.

Dit proefschrift onderzoekt de mogelijkheden van toekomstige gravitatiegolvendetectoren zoals de Einstein Telescope, om de afstand tot ver gelegen objecten te meten. Wij richten ons op de waarnemingen van de gravitatiegolven van twee cirkelende neutronensterren of zwarte gaten. De systemen met tenminste één neutronenster worden verondersteld ook een lichtsignaal uit te zenden wanneer de twee sterren botsen in de laatste fase van hun dans om elkaar heen. Door de golflengtecompositie van het licht te bepalen kunnen we de beweging van het systeem ten opzichte van de aarde meten. Door het meten van honderden van deze cirkelende neutronensterren of zwarte gaten, kunnen wetenschappers het collectieve gedrag ervan in kaart brengen.

Onze resultaten tonen aan dat toekomstige gravitatiegolvendetectoren de grootschalige beweging van het heelal met dezelfde nauwkeurigheid als de huidige en toekomstige telescopen in kaart kunnen brengen. Maar de kracht van het gebruik van gravitatiegolven is dat het vrij is van mogelijke fouten door het gebruik van een kosmische afstandsladder. Metingen van gravitatiegolven kunnen voor een onafhankelijke verificatie zorgen van de huidige kosmologische paradigma.

Toekomst van de sterrenkunde met gravitatiegolven

De onderwerpen die in dit proefschrift zijn behandeld zijn slechts het topje van de ijsberg van wat kan we kunnen leren van de directe waarnemingen van gravitatiegolven. Door middel van waarnemingen met telescopen hebben we enig idee van wat we kunnen verwachten. Echter, veel over het heelal is nog onbekend. Bijvoorbeeld, de oorsprong van ongeveer 96 procent van de inhoud van het heelal is nog niet begrepen. Gravitatiegolven worden uitgezonden door massieve voorwerpen, waaronder degene die geen licht uitzenden. Dit betekent dat waarnemingen van gravitatiegolven licht kan werpen op zaken die conventionele telescopen niet kunnen waarnemen. Dit opent de mogelijkheid om verschijnselen waar te nemen waar men nog nooit aan heeft gedacht. De eerste waarneming van gravitatiegolven zal een nieuw tijdperk van de astronomie inluiden. Veel wetenschappers werken hard aan de voorbereiding voor de komst van dit tijdperk. De auteur hoopt dat het werk als beschreven in dit proefschrift een plek zal vinden in de wetenschappelijke literatuur. Hij hoopt bovendien dat hij in de nabije toekomst zijn werk toe kan passen op daadwerkelijke waarnemingen van gravitatiegolven.

Tjonnie G.F. Li
Amsterdam, 2013