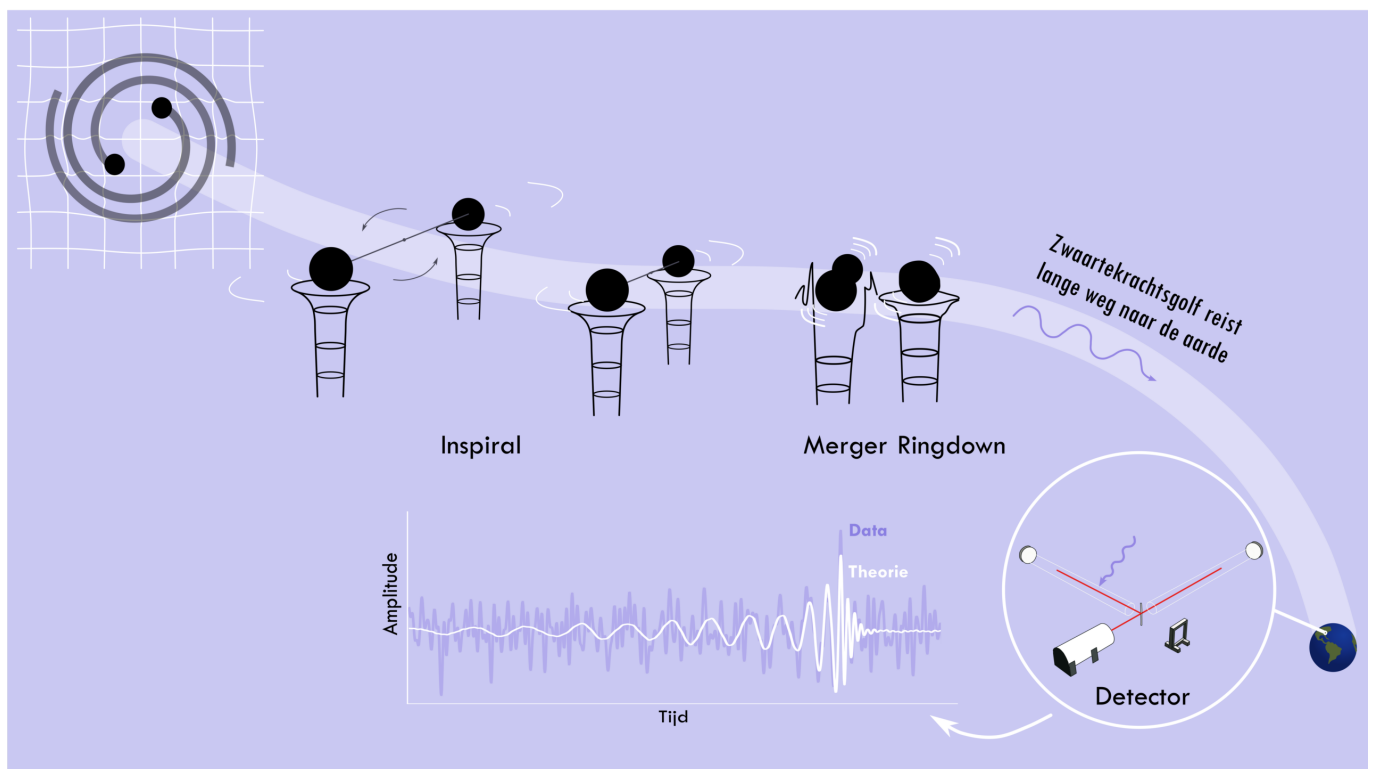


Achter de wolken schijnt een zwart gat

Wat zou er gebeuren als de zwaartekracht anders zou werken dan we tot nu toe dachten? Hoe zien zwarte gaten en [zwaartekrachtsgolven](#) er dan uit en zouden we de verschillen kunnen detecteren? Met deze vragen heb ik mij beziggehouden tijdens mijn promotieonderzoek. In dit artikel vertel ik meer over de interessante natuurkunde die om de hoek komt kijken in een andere zwaartekrachtstheorie.



Zwaartekrachtsgolven van zwarte gaten. Als twee zwarte gaten in een binair systeem om elkaar heen draaien, maken ze golven in het veld van de ruimtetijd: zwaartekrachtsgolven. Deze golven kunnen we detecteren op aarde. De theoretische golffunctie (wit) geeft een unieke ‘vingerafdruk’ voor verschillende soorten zwarte gaten en voor effecten in de omgeving ervan. Door te zoeken welke golffunctie (wit) het beste matcht met de data (paars) krijgen we informatie over de eigenschappen van de zwarte gaten en

hun omgeving.

Een alternatieve theorie voor de zwaartekracht

Eerst de hamvraag: waarom zouden we een andere zwaartekrachtstheorie bestuderen? Er zijn al genoeg verschijnselen in ons universum die we niet goed begrijpen, zoals [donkere materie](#) en [donkere energie](#). Laten we het niet nog ingewikkelder maken door ook de zwaartekrachtstheorie aan te passen... right? Onze huidige beschrijving van hoe zwaartekracht werkt is de [algemene relativiteitstheorie](#) van Albert Einstein, die de effecten van de zwaartekracht toeschrijft aan de kromming in het veld van de ruimtetijd. Deze theorie beschrijft de effecten van de zwaartekracht heel accuraat op bijvoorbeeld de schalen in ons zonnestelsel. De theorie 'breekt'¹ echter als je de zwaartekracht wil beschrijven op de allerkleinste schalen waar de quantummechanica belangrijk wordt of waar de zwaartekracht zo extreem wordt dat de kromming van de ruimtetijd oneindig groot wordt, zoals [in een zwart gat](#). Daarnaast zouden toevoegingen aan de algemene relativiteitstheorie ook de rol kunnen spelen van donkere materie of donkere energie. Genoeg motivatie dus om eens aan te nemen dat we ons in zo'n alternatieve theorie bevinden, en te kijken wat er dan gebeurt!

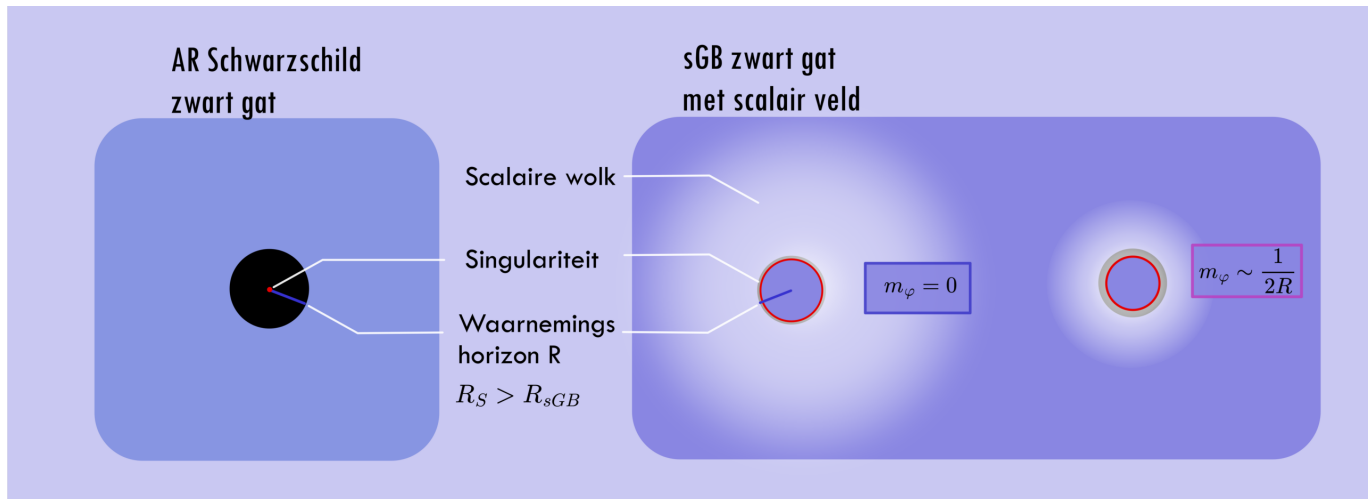
Wat voor alternatieve theorie is dan interessant om te bestuderen? Ten eerste wil je wel dat de zwaartekracht in ons zonnestelsel vrijwel hetzelfde wordt beschreven als in de algemene relativiteitstheorie, aangezien die beschrijving goed overeenkomt met de waarnemingen. Maar onze waarnemingen van situaties waar de zwaartekracht een heel stuk sterker is, bijvoorbeeld rondom zwarte gaten, zijn nog niet zo nauwkeurig, dus daar zouden wel nieuwe effecten aanwezig kunnen zijn. Daarnaast is het interessant om naar een theorie te kijken die daadwerkelijk een ander soort zwart gat toelaat dan volgens de algemene relativiteitstheorie mogelijk is. De eenvoudigste manier om zo'n theorie op te stellen is door dingen toe te voegen aan de algemene relativiteitstheorie zelf – dingen die alleen een belangrijke bijdrage gaan leveren op de schalen waarop de zwaartekracht sterk wordt. Door de algemene relativiteitstheorie uit te bereiden met het meest eenvoudige soort [veld](#) in de natuurkunde, een scalair veld², en dit veld te koppelen aan de kromming van de ruimtetijd, beschrijft deze theorie zwarte gaten die anders zijn dan in de algemene relativiteitstheorie. Bovendien heeft het scalaire veld alleen een grote invloed rondom sterke kromming van de ruimtetijd, en dus niet in ons zonnestelsel. Deze uitbereiding van de algemene relativiteitstheorie heeft een

naam; 'scalaire Gauss-Bonnet-zwaartekracht'. Wat het scalaire veld natuurkundig precies is, wordt in deze theorie algemeen gehouden. Er bestaat een grote groep donkere-materievoorstellen die worden beschreven door een scalair veld, dus dat maakt deze algemeen toepasbare theorie extra interessant.

Binnen deze scalaire Gauss-Bonnet-zwaartekracht zijn er nog bepaalde vrijheden: de sterkte van de interactie tussen het scalaire veld en de kromming van de ruimtetijd, α , en de massa van het scalaire veld, m_ϕ . Dat een veld een massa kan hebben klinkt misschien gek, maar met een veld kan je een deeltje associëren. m_ϕ kan je vervolgens relateren aan de [massa](#) van dat bijbehorende scalaire deeltje. De waarden van α en m_ϕ zijn onbekend en moeten worden vastgesteld door de theoretische voorspellingen te vergelijken met waarnemingen.

Zwarte gaten met scalaire wolk

Laten we nu verder in de zwarte gaten in scalaire Gauss-Bonnet-zwaartekracht duiken. Door de vergelijkingen van scalaire Gauss-Bonnet-zwaartekracht op te lossen in vacuüm onder bolvormige symmetrie, aannemend dat er geen rotatie is, krijg je de oplossing van een zwart gat met een waarnemingshorizon die iets kleiner is dan die voor een [Schwarzschild-zwart gat](#) in de algemene relativiteitstheorie. Wat in die oplossing het meeste opvalt is de wolk van het scalaire veld rondom het zwarte gat. Als $m_\phi = 0$ strekt het scalaire veld zich uit tot het oneindige. Bij het groter maken van m_ϕ krimpt de wolk. Preciezer: hoever de wolk zich uitstrekt is omgekeerd evenredig met m_ϕ . Dit is interessant: als zo'n scalair veld dat zich oneindig ver uitstrekt echt zou bestaan, is het opmerkelijk dat we dit nog niet hebben waargenomen. Een oneindig scalair veld zou ook invloed hebben op een hele grote schaal bijvoorbeeld op de evolutie van het universum. Een massa die niet gelijk is aan nul lijkt daarom een meer fysische situatie.



Zwarte gaten vergeleken. Vergelijking tussen een Schwarzschild-zwart gat in de algemene relativiteitstheorie (links) en een zwart gat met scalaire wolk in scalaire Gauss-Bonnet-zwaartekracht (rechts).

Iets anders opmerkelijks is dat bij een Schwarzschild-zwart gat in algemene relativiteitstheorie in het midden een punt is waarbij het zwaartekrachtsveld tot in het oneindige kromt. Zo'n punt heet een *singulariteit*. Bij het zwarte gat in de scalaire Gauss-Bonnet-zwaartekracht zit de singulariteit niet in het midden maar op een bepaalde straal vanaf het middelpunt als een bolvormige schil. Een grotere waarde van $\langle a \rangle$ of een kleinere waarde van $\langle m_\varphi \rangle$ schuift de straal van de singulariteit dichterbij de waarnemingshorizon, of zelfs erbuiten. Potentieel kan dit een probleem geven. Binnen de natuurkunde is er een [formeel vermoeden](#) opgesteld dat de singulariteit van een zwart gat binnen zijn waarnemingshorizon moet blijven. Vanuit dit argument kunnen we daarom al een eerste maximale waarde voor $\langle a \rangle$ per waarde van $\langle m_\varphi \rangle$ toekennen om ervoor te zorgen dat de singulariteit binnen het zwarte gat blijft.

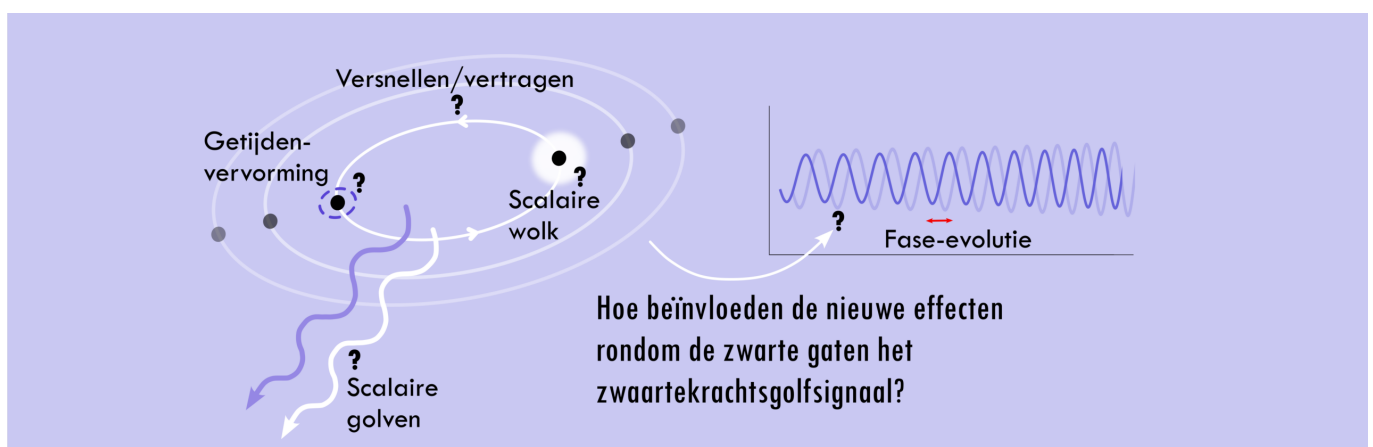
Impact op zwaartekrachtsgolven

Zouden we deze verschillen ten opzichte van een zwart gat in de algemene relativiteitstheorie ook kunnen waarnemen? Naast de scalaire wolk en de kleinere waarnemingshorizon is het zwaartekrachtsveld rondom het zwarte gat in de nieuwe theorie ook anders. Dit direct waarnemen, bijvoorbeeld door te kijken hoe [licht](#) rondom het zwarte gat beweegt, zal lastig zijn. De verschillen zijn klein en zullen wegvallen binnen de (on)nauwkeurigheid van de waarneming. Enter [zwaartekrachtsgolven](#). Het voordeel van het zoeken naar de genoemde verschillen met behulp van zwaartekrachtsgolven is dat een

verschil in het signaal zich kan versterken over de vele cycli van de zwarte gaten die om elkaar heen draaien. In mijn onderzoek heb ik daarom gefocust op de eerste fase van het uiteindelijk samensmelten van zwarte gaten, waarbij de zwarte gaten nog op redelijk grote afstand van elkaar om elkaar heen draaien en ze ook nog niet te snel bewegen ten opzichte van de lichtsnelheid. In deze fase maken de zwarte gaten veel cycli waarbij kleine verschillen kunnen optellen. Ik heb hierbij in eerste instantie gekeken naar een scalaire veld met $(m_\phi=0)$.

Verschillende processen zijn van belang. Als eerste zorgt het scalaire veld ervoor dat er niet alleen zwaartekrachtsgolven uit het binaire system komen, maar ook scalaire golven. Deze zouden we niet direct kunnen detecteren, maar hun bestaan zorgt er wel voor dat er meer energie wegstraalt, waardoor de zwarte gaten sneller dicht bij elkaar komen. Deze versnelling van het proces zul je ook terugzien in de zwaartekrachtsgolven die we wél kunnen detecteren.

Als laatste heb ik ook nog naar een ander effect gekeken dat er alleen is als de twee zwarte gaten ook een scalaire wolk hebben: interacties tussen de wolken via getijden. Vergelijkbaar met hoe de zwaartekracht van de maan ervoor zorgt dat de watermassa op aarde wordt vervormd, zo gebeurt hetzelfde bij zwarte gaten. Er blijkt echter dat zwarte gaten zelf niet vervormen door de getijden van de zwaartekracht, maar de scalaire velden onder elkaars getijdenveld wel. Deze scalaire getijden effecten zorgen ervoor dat de zwarte gaten wat minder snel naar elkaar toe bewegen, wat weer effect heeft op de zwaartekrachtsgolven. Dit effect is wel een stuk kleiner dan dat van de extra scalaire golven.



Nieuwe fysica. De nieuwe fysica in een binair systeem in scalaire Gauss-Bonnet-zwaartekracht zijn onder andere de scalaire wolk, golven en getijdenvervorming. Deze

effecten zorgen voor een verandering in hoe snel de zwarte gaten naar elkaar toe bewegen. In de golf functie van de zwaartekrachtsgolven komt dit tot uiting via een veranderend fase-verschil – dat wil zeggen: een verschuiving van de pieken en dalen van de golven – ten opzichte van algemene relativiteitstheorie.

Voor verschillende massa's van de zwarte gaten heb ik de golf functies van de zwaartekrachtsgolven in algemene relativiteitstheorie en in scalaire Gauss-Bonnet-zwaartekracht met elkaar vergeleken. Het versnellen/vertragen van hoe snel de zwarte gaten naar elkaar toe bewegen, leidt tot een veranderend faseverschil (fase-evolutie) tussen de twee golf signalen: de pieken en dalen van de golven verschuiven ten opzichte van elkaar. Voor twee zwarte gaten met een kleine massa en een groot verschil in hoeveelheid scalaire wolk om zich heen, kan het veranderende faseverschil met zwaartekrachtsgolven in de algemene relativiteitstheorie rond het detecteerbare regime komen. Dit is echter wel alleen nog in theorie; in de praktijk moet je ook rekening houden met de detector, die voor verschillende frequenties van de golven verschillende nauwkeurigheid heeft in de metingen. Daarnaast is er ook veel ruis. Hoe dan ook: de resultaten geven een indicatie van welke zwartegatensystemen interessant zijn voor het zoeken naar dit soort verschillen. Om te kunnen onderscheiden welk deel van het faseverschil in het zwaartekrachtsgolfsignaal komt door de getijdeneffecten, hebben we meer nauwkeurigheid nodig van de detectoren. Daarnaast zijn er ook andere effecten van de veranderingen in de ruimtetijd in scalaire Gauss-Bonnet-zwaartekracht die een vergelijkbare impact hebben op het zwaartekrachtsgolfsignaal. Na verder onderzoek blijkt dat het vergelijken van de zwaartekrachtsgolven in een heel vroeg stadium van het binaire systeem met die in een later stadium hier een uitkomst zou kunnen bieden, omdat deze effecten zich in deze verschillende stadia wel verschillend gedragen!

Door dit onderzoek wordt duidelijker welke effecten rondom zwarte gaten en in de zwaartekrachtsgolven te verwachten zijn bij het uitbreiden van algemene relativiteitstheorie met een gekoppeld scalair veld. Niet alleen is er interessante nieuwe natuurkunde rondom en in het zwarte gat, ook de fase-evolutie in de zwaartekrachtsgolven ten opzichte van de algemene relativiteitstheorie kan in het detecteerbare regime zitten. Het effect op de zwaartekrachtsgolven lijkt nog interessanter te worden als het scalaire veld een massa heeft. Dan gaan de scalaire golven uit het binaire systeem opeens 'aan' als de wolken in elkaars invloedssfeer komen. Dit is het vervolgonderwerp binnen mijn onderzoek – stay tuned!

Dit artikel is gebaseerd op de volgende publicaties:

I. van Gemeren, B. Shiralilou en T. Hinderer, [Dipolar tidal effects in gravitational waves from scalarized black hole binary inspirals in quadratic gravity](#), *Phys. Rev. D* **108** (2023), 024026.

I. van Gemeren, T.Hinderer en S.Vandoren, [Massive scalar clouds and black hole spacetimes in Gauss-Bonnet gravity](#), *SciPost Phys. Core* 7, 069 (2024).

[1] Met het 'breken' van een theorie wordt in de natuurkunde bedoeld dat de theorie beschrijft dat, in dit geval, de zwaartekracht oneindig groot of klein wordt en geen kloppende beschrijving meer kan geven van de zwaartekracht op die schaal.

[2] Een scalair veld kent aan elke locatie een bepaalde waarde toe, denk aan een temperatuurmap op een landkaart.