

VU Research Portal

Dynamics of Extreme-Mass-Ratio binaries

d'Ambrosi, G.

2016

document version

Publisher's PDF, also known as Version of record

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

citation for published version (APA)

d'Ambrosi, G. (2016). *Dynamics of Extreme-Mass-Ratio binaries: Extraction of gravitational waves beyond Last Stable Orbit and introduction of spin in the particle limit*.

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

Samenvatting

“On September 14, 2015 at 09:50:45 UTC the two detectors of the Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory simultaneously observed a transient gravitational-wave signal” is het begin van het allereerste artikel zwaartekrachtsgolven-astronomie, uitgegeven op 12 februari 2016 [1], precies honderd jaar na de eerste voorspelling van zwaartekrachtsgolven door Einstein zelf [2]. De detectie van gravitatiegolven was een langverwachte gebeurtenis¹, is het resultaat van langdurige inspanningen en draagt er aan bij dat we ons in een interessant tijdperk bevinden. Deze ontdekking is niet alleen fundamenteel belangrijk omdat deze de huidige theorie van de zwaartekrachtige interactie -Algemene Relativiteit (AR)-volledig bevestigt in gebieden waarin we haar hiervoor nooit konden testen, maar ook omdat zij de eerste van een reeks soortgelijke waarnemingen vertegenwoordigt, die gezamenlijk ons een geheel nieuwe blik op het heelal geven.

Twee detectoren zijn betrokken bij deze ontdekking, één bij Hanford, Washington, en de andere bij Livingston, Louisiana in de Verenigde Staten. Beide *interferometers* maken deel uit van het LIGO experiment, en hun gegevens, waaronder de genoemde formidabele detectie, zijn door de gezamenlijke samenwerking van LIGO en Virgo (een interferometer experiment in Italië, dat binnenkort begint te meten) geanalyseerd. In eenvoudige bewoordingen, een interferometer is een groot apparaat met lasers en spiegels, waarin de laserstralen langs twee loodrechte armen reizen en vervolgens met elkaar recombineren. Het doel van de opstelling is, dat als een zwaartekracht-golf door de interferometer gaat de laser kleine vervormingen ondergaat, die kunnen worden opgemerkt wanneer de lasers recombineren. Het principe is niet anders dan vergelijkbare optische set-ups, maar om een gravitatiegolf te voelen is een ongelooflijke precisie nodig. Om een idee te geven: het apparaat moet zo gevoelig zijn dat het een afstandsvariatie kleiner dan een atoom op de afstand van de aarde naar de zon kan meten!

Het duurt lang en het heeft technologische vooruitgang en inspanningen nodig om dergelijke gevoeligheden te bereiken, en dit is allemaal gerechtvaardigd door de zoektocht naar gravitatiegolven. Deze zijn eerst theoretisch voorspeld, maar wat wetenschappers overtuigd heeft om hun tijd en energie te investeren in de jacht naar gravitatiegolven, was de verzameling van indirecte bewijzen van hun bestaan dat we tot vandaag bijeen hebben gebracht. Het beroemdste indirecte bewijs was de observatie van een binaire pulsar² (een

¹Het detectie-evenement is GW150914 aangeduid, met een duidelijke verwijzing naar de datum.

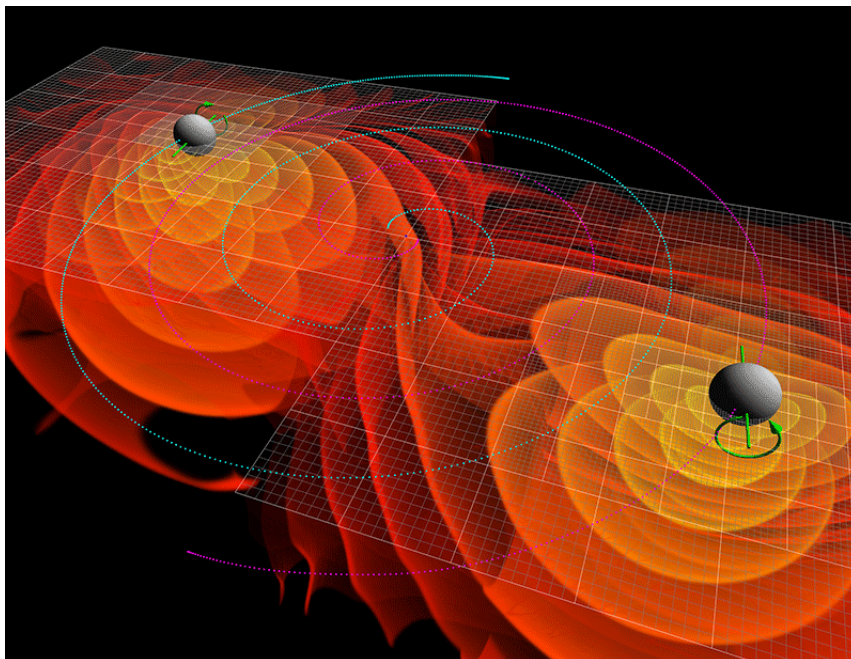
²De pulsar wordt PSR B1913+16 genoemd, ook bekend als de Hulse-Taylor binaire pulsar, naar de namen van de ontdekkers. Na deze pulsar zijn soortgelijke anderen gevonden.

paar tollende neutronensterren die een bundel elektromagnetische straling uitzenden) wier gedrag alleen met gravitatiegolf emissie kon worden verklaard. Deze ontdekking was een Nobelprijs in 1974 waard. Veertig jaar later zagen we GW150914, een dubbel systeem van zwarte gaten die gravitatiegolven uitstralen.

Voor GW150914 waren we in staat om de hemel te bekijken alleen met behulp van elektromagnetische straling, zij het licht (met onze blote oog, kijkend naar de hemel op een heldere nacht, of met krachtige telescopen in afgelegen observatoria), zij het andere niet-zichtbare straling (gevangen door gigantische antennes, zoals in radiotelescopen of andere apparaten). Nu kunnen we het heelal “horen” met een ander gereedschap, interferometers, en dit is net als de overgang van de oude stomme films tot films tegenwoordig: een geheel nieuwe verpakking van informatie die nu voor ons beschikbaar is. Bovendien brengt de eerste detectie van gravitatiegolven andere ontdekkingen mee, die op zichzelf relevant zijn, namelijk de gedetecteerde golven afkomstig uit een systeem van twee zwarte gaten, die steeds dichterbij elkaar heen draaien en vervolgens met elkaar versmelten. Dit is een bevestiging van het bestaan van dubbelsystemen van zwarte gaten (black-hole binaries) en ook de allereerste detectie van een fusie van zwarte gaten. Natuurkundigen hebben veel goede redenen om opgewonden te zijn.

Al deze fascinerende verschijnselen, gravitatiegolven en zwarte gaten, komen uit de algemene relativiteitstheorie voort, die we vooral hebben te danken aan het werk van Einstein, en die experimenteel de beste verklaring voor de zwaartekracht vormt. Zonder deze theorie zouden we deze astrofysische wonderen niet kunnen voorspellen en dus zouden we ze nog niet kunnen waarnemen. Er is een lange ontwikkeling geweest sinds de eerste experimenten van Galileo over vrije val, en de wet van de universele zwaartekracht van Newton, die de empirische wetten van Kepler voor de beweging van planeten uitlegt, tot tegenwoordig satellieten en GPS-systemen. In Einsteins algemene relativiteitstheorie zijn ruimte en tijd niet onafhankelijk, maar ze zijn wel samen gekoppeld in een nieuwe entiteit: ruimtetijd. Terwijl in Newtoniaanse zwaartekracht de aarde door de zwaartekracht van de zon wordt aangetrokken, is de aarde vrij bewegend in de nieuwe algemeen-relativistische beeld, maar in een geometrie die gebogen is door de massa van de zon, daarom beweegt ze niet in een rechte lijn, maar volgt ze een elliptische baan rond de Zon. Het gewone beeld van ruimtetijd door AR is dat van een tapijt, dat zich over ruimte en tijd uitbreidt, waarop astrofysische objecten bewegen volgens de krommingen en buigingen van het tapijt zelf. In deze beeldende representatie zijn gravitatiegolven rimpelingen, trillingen van het tapijt zelf, die zich langs ruimtetijd voortplanten, en zwarte gaten zijn gaten, gootstenen, die alles verzwelgen, wat te dicht bij hen komt, over de zogenaamde “event horizon” van het zwarte gat. Zelfs licht kan niet aan hen ontsnappen, dus ze zijn zwart.

Niettemin, zwarte gaten bewegen en daarmee wordt het ruimtetijdtapijt gerimpeld en de rimpelingen propageren: het verplaatsen van zwarte gaten, of meer in het algemeen bewegende massa, genereert gravitatiegolven in de ruimtetijd. We hebben specifieke “antennes” -de interferometers- gebouwd om deze golven te voelen en onlangs zijn we hierin geslaagd. Hadden we niet de eerste voorspellingen ontwikkeld om het signaal te detecteren en hadden we geen modellen ontwikkeld voor de zwarte gaten die het signaal genereren, zou dit niet mogelijk zijn geweest.



Numerieke simulaties van de gravitatiegolven (in rood/oranje), geproduceerd door inspiralende zwarte gaten. De blauwe en paarse kromme lijnen vertegenwoordigen hun banen, en de groene pijlen hun spins. Simulatie door C. Henze/NASA Ames Research Center.

Het proefschrift

Dit proefschrift gaat over de studie van paren van compacte objecten -binary systems, dit kunnen zwarte gaten of andere astrofysische objecten zijn, zoals neutronensterren³. Dit onderzoek is voornamelijk gewijd aan modellen voor de baan van deze objecten en aan de invloed van andere parameters, zoals de spin (de inhoud van het tweede deel van dit proefschrift), om voorspellingen voor de uitgezonden gravitatiestraling te maken. Bijvoorbeeld, een dubbelsysteem van zwarte gaten is een systeem van twee zwarte gaten, die lange tijd rond elkaar draaien en uiteindelijk in een enkel zwart gat opgaan. Dit hele proces wordt ook wel “coalescence” (coalescentie) genoemd, uit het Latijn *coalescere*, samen voegen. De aard van de coalescence en zijn gedrag zijn strikt afhankelijk van de massa’s van de twee zwarte gaten en hun spins. De zwarte gaten in het dubbelsysteem gedetecteerd door GW150914 hebben massa’s van respectievelijk 36 en 29 M_{\odot} , dus vergelijkbare massa’s⁴. Wanneer de massaverhouding van de twee objecten kleiner is dan 1 op 100.000, of beter gezegd één van de twee heeft een massa van ten minste 10^5 maal groter dan de andere, wordt het dubbelsysteem een “Extreme Mass Ratio binary” (EMR) genoemd. Normaal gesproken is de enige mogelijkheid, dat de zwaardere massa een superzwaar zwart gat

³Neutronensterren zijn de dichtste en kleinste sterren die in het heelal bestaan. Ze zijn bijna volledig uit neutronen samengesteld; gravitatiegolven uit systemen van neutronensterren kunnen ons hun innerlijke structuur helpen bepalen.

⁴ $M_{\odot} = (1.98855 \pm 0.00025) \times 10^{30}$ kg is de solar mass, de massa van de zon.

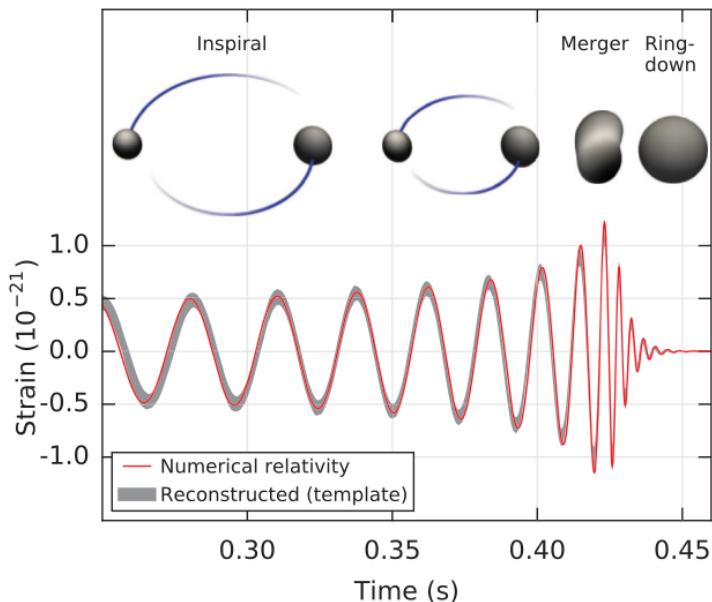
met een massa $\sim 10^6 M_\odot$ is, om dergelijke massa's te rechtvaardigen. Dit onderscheid tussen dubbelsystemen met vergelijkbare massa's en EMR dubbelsystemen is cruciaal bij het identificeren van de tijdschaal van de bestudeerde verschijnselen, de frequentie van de uitgezonden gravitatiegolven, en de technieken die kunnen worden gebruikt om deze systemen te beschrijven. Extreme-mass-ratio binaries⁵ zijn het belangrijkste onderwerp van het onderzoek van dit proefschrift.

Ondanks deze verschillen, is het kwalitatieve gedrag van dubbelsystemen met verschillende massa-verhoudingen hetzelfde: het eerste, lange deel bestaat uit de twee objecten die rond elkaar draaien in langzaam kleiner wordende banen, ofwel ze spiralen naar elkaar toe. Dit gebeurt doordat ze tijdens hun beweging ze energie verliezen door emissie van gravitatiegolven. Na deze fase, *inspiral* genoemd, versnellen de twee lichamen hun beweging in korte tijd. De amplitude en de frequentie van de uitgezonden straling nemen toe: de zwarte gaten zijn aan het smelten -de *merger* fase- en het eindresultaat van de coalescence is een enkel massief object. Vervolgens komt de *ringdown* fase, waarin het grootste deel van de energie al is uitgestraald en het systeem in een pasgeboren ster stabiliseert, of meer algemeen, een pasgeboren zwart gat. Voor een extreme-mass-ratio binary ligt het zwaartepunt van deze beweging praktisch in het grote lichaam, dus het is meer intuïtief om alles te beschrijven als het kleinere lichaam dat een baan doorloopt rond zijn metgezel (dat kan altijd met een juist gekozen coördinatensysteem). Men ziet dan, dat de baan van het kleine lichaam tijdens Inspiral verandert van een excentrische tot een cirkelvormige baan, totdat de laatste stabiele baan (Last Stable Orbit) wordt bereikt. Daarna wordt de beweging meer radiaal en deze fase wordt vaak aangeduid als *plunge* (duiken), omdat het kleine lichaam in de andere lijkt te duiken voor het smelten.

Zoals men al begrijpt uit de titel van het proefschrift, richt de studie van extreme-mass-ratio binary zich vooral op dit laatste stadium van de coalescentie na de laatste stabiele baan, door toepassing van een speciaal soort hiervoor ontwikkelde banen, de *ballistische* banen. We noemen ze ballistische banen omdat ze kunnen worden gebruikt om een lichaam te beschrijven dat van het zwarte gat naar de ruimte wordt geschoten, en dat dan kan terugkomen. Met enige wiskundige aanpassingen bieden ze unieke eigenschappen, die geschikt zijn om de laatste fase van de EMR binaire te beschrijven. Dat wordt beschreven in [3] en hoofdstuk 3 van dit proefschrift. Een manier om een aantal problemen in verband met deze banen aan te pakken, met behulp van methoden van baanverstoring (methode van geodetische deviatie) wordt in hoofdstuk 4 besproken, door de ballistische banen om te vormen in een zeer veelzijdig hulpmiddel voor binaire coalescences.

In het tweede deel van het proefschrift introduceren we een nieuwe formalisme om de spin, de rotatie van het kleinere lichaam, te behandelen. Dit is een oud thema in de wetenschappelijke literatuur gewijd aan algemene relativiteit, waarvoor verschillende benaderingen worden gebruikt, en het is van essentieel belang om de effecten van rotatie van de componenten van een dubbelsysteem te beschrijven, zie [4, 5] of hoofdstuk 5 van dit proefschrift. Veelvoorkomende compacte objecten, die betrokken zijn in dubbelsystemen, zoals neutronensterren of zwarte gaten, roteren en hebben dus spin. Dit beïnvloedt de orbitale beweging en de door het dubbelsysteem uitgezonden gravitatiegolven. Daarom

⁵Soms verwijzen mensen naar EMRI's, EMR Inspirals, in plaats van simpelweg EMR binaries, maar de *Inspiral* is slechts één fase van de coalescence van een dubbelsysteem, niet de hele evolutie.



Afbeelding uit het artikel van de GW150914 ontdekking[1]. De figuur toont de gereconstrueerde gravitatiegolf samen met de bijbehorende verschillende fasen van het dubbelsysteem van zwarte gaten, vertegenwoordigd door de twee zwarte vormen.

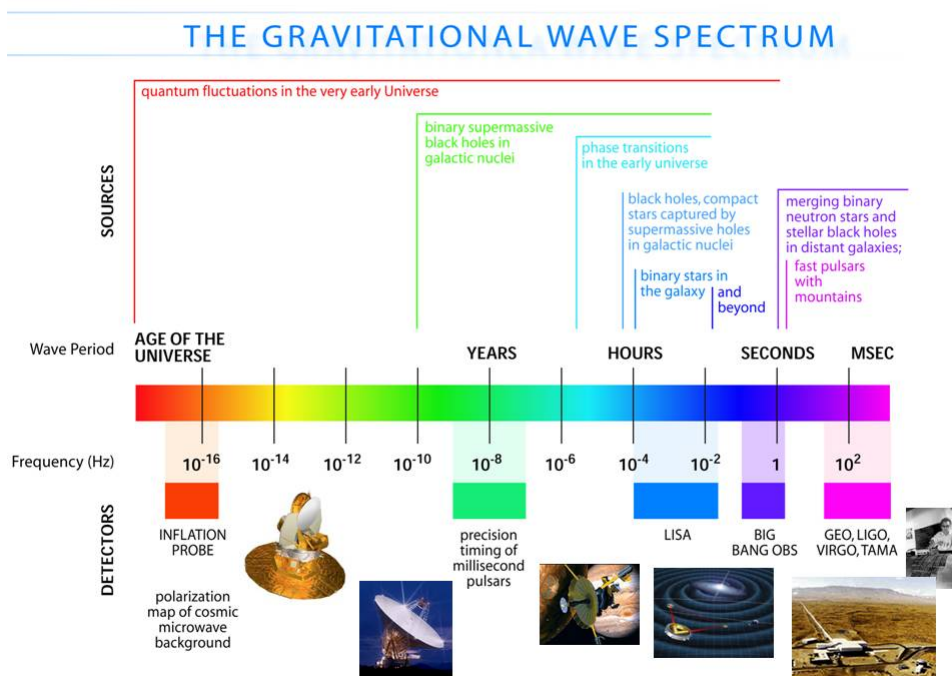
is het belangrijk om de rotatie in de beschrijving bij binary coalescences mee te nemen.

De toekomst

Zoals we al vermeld hebben, hebben de zwarte gaten, die ontdekt zijn door de zwaartekrachtsgolven interferometer LIGO, vergelijkbare massa's, terwijl de zwarte gaten in EMR binaries, een groot massa verschil hebben. De interferometers op aarde, zoals LIGO, Virgo, en de toekomstige detectoren, die in Japan en India zullen worden opgebouwd, zijn niet groot genoeg om de kleinere frequenties van gravitatiegolven uitgezonden door EMR binaries te detecteren. We hebben langere armen nodig, we hebben meer ruimte nodig, dus moeten we de ruimte in gaan. Dit is de reden, dat we nu een interferometer voor in de ruimte bouwen, die uit drie satellieten in een baan om de aarde bestaat: eLISA (vanuit *evolving* LISA, upgrade van het vorige experiment). De internationale samenwerking ter ondersteuning van dit experiment is er tot nu toe in geslaagd om een deel al de ruimte in op te sturen, zoals Lisa Pathfinder, maar de volledige voltooiing en de lancering van de missie is in 2034 gepland. Hopelijk zullen we de extreme-mass-ratio binaries ook dan detecteren en kunnen we ook naar andere zachtere zwaartekrachtsgeluiden uit het heelal luisteren.

Overigens, voordat dat gebeurt, moeten we de mogelijke bronnen van gravitatiegolven bestuderen en moeten we ons goed voorbereiden met voorspellingen van het signaal. Het onderzoek in dit proefschrift is een volgende stap in die richting, en er moet zeker meer

worden gedaan. Bovendien kunnen we ons gelukkig prijzen, omdat de detecties afkomstig van interferometers op aarde ons meer informatie zullen geven, hetgeen ons zal helpen met het begrijpen van EMR binaries. Zoals we al zeiden, is het tijdperk van de sterrenkunde met zwaartekrachtsgolven pas net begonnen.



Het spectrum van gravitatiegolven. Momenteel hebben we alleen toegang tot de rechterkant van het spectrum; eLISA zal ons informatie geven over superzware zwarte gaten en extreem-massa-verhouding binaries.

De studie van binary coalescences, de detectie van gravitatiegolven, en de technologische vooruitgang maken allemaal deel uit van dezelfde wetenschappelijke zoektocht gericht op het uitleggen van de meest voorkomende fysieke interactie in ons dagelijks leven: de zwaartekracht. Het moet inmiddels duidelijk zijn dat zwaartekrachtsgolven niet een toevallige ontdekking zijn, een geval van serendipiteit, zoals de ontdekking van penicilline door A. Fleming, maar eerder het resultaat van decennia-lange inspanningen en de samenwerking van veel mensen. Deze ontdekking en de inhoud van dit proefschrift, vormen een deel van het onderzoek naar de algemene relativiteitstheorie. In deze theorie is gravitatiestraling eerst voorspeld. Met dit paradigma van de zwaartekrachtsinteractie zijn zwarte gaten en compact binaries geboren en is de zoektocht naar experimentele bevestiging gestart. Algemene Relativiteitstheorie, Einsteins schepsel, heeft opnieuw bewezen, dat ze een succesvolle verklaring voor de zwaartekrachtsinteractie is. Hoewel we weten, dat we haar op de een of andere manier met de kwantummechanica moeten verzoenen, aangezien er nog veel problemen op microscopische schaal op de loer liggen, zullen we misschien al nieuwe fundamentele feiten leren met behulp van zwaartekrachtsgolvenas-

tronomie⁶. Immers, eerst konden we alleen zien, maar nu kunnen we ook horen: het is aan ons om het heelal te verkennen.

The success of a paradigm -whether Aristotle's analysis of motion, Ptolemy's computations of planetary positions, Lavoisier's application of the balance, or Maxwell's mathematization of the electromagnetic field- is at the start largely a promise of success discoverable in selected and still incomplete examples. Normal science consists in the actualization of that promise, an actualization achieved by extending the knowledge of those facts that the paradigm displays as particularly revealing, by increasing the extent of the match between those facts and the paradigm's predictions, and by further articulation of the paradigm itself.

Few people who are not actually practitioners of a mature science realize how much mop-up work of this sort a paradigm leaves to be done or quite how fascinating such work can prove in the execution.

-T.S. Kuhn, *The Structure of Scientific Revolutions*

⁶De ontdekking GW150914 stelde ons bijvoorbeeld in staat grenzen aan de massa van het graviton te bepalen: we weten nog niet of het echt bestaat, maar als het bestaat, kan het niet zwaarder zijn dan $1.2 \times 10^{-22} eV/c^2$.

Bibliography

- [1] B. Abbott *et al.*, “Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger,” *Phys. Rev. Lett.* **116** (Feb, 2016) 061102.
<http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.116.061102>.
- [2] A. Einstein, “Die Grundlagen der Allgemeinen Relativitätstheorie. (German) [The foundations of the Theory of General Relativity],” *Annalen der Physik* **354** (1916) no. 7, 769–822.
- [3] G. d’Ambrosi and J. van Holten, “Ballistic orbits in Schwarzschild space-time and gravitational waves from EMR binary mergers,” *Class. Quant. Grav.* **32** (2015) no. 1, 015012, [arXiv:1406.4282](https://arxiv.org/abs/1406.4282) [gr-qc].
- [4] G. d’Ambrosi, S. Satish Kumar, and J. W. van Holten, “Covariant hamiltonian spin dynamics in curved spacetime,” *Phys. Lett.* **B743** (2015) 478–483, [arXiv:1501.04879](https://arxiv.org/abs/1501.04879) [gr-qc].
- [5] G. d’Ambrosi, S. Satish Kumar, J. van de Vis, and J. van Holten, “Spinning bodies in curved spacetime,” *Phys. Rev.* **D93** (2016) no. 4, 044051, [arXiv:1511.05454](https://arxiv.org/abs/1511.05454) [gr-qc].

