



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Spin dynamics in general relativity

Saravanan, S.

Citation

Saravanan, S. (2016, July 7). *Spin dynamics in general relativity*. *Casimir PhD Series*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/42443>

Version: Not Applicable (or Unknown)

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

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/42443>

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

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/42442> holds various files of this Leiden University dissertation.

Author: Saravanan, S.

Title: Spin dynamics in general relativity

Issue Date: 2016-07-07

Samenvatting

De mensheid heeft altijd vermoed dat de natuur begrepen en beschreven kan worden met een beperkt aantal concepten. De moderne natuurwetenschap beschrijft de natuur voornamelijk op een kwantitatieve manier: de biologie leert ons dat de cel de fundamentele eenheid van het leven is, in de scheikunde vormen moleculen en atomen de bouwstenen van materialen; voor natuurkundigen zijn ruimte en tijd de enige fundamentele entiteiten, waar al het andere in het universum vanuit begrepen moet worden.

Ruimte, tijd en zwaartekracht

Eeuwenlang werden ruimte en tijd beschouwd als twee verschillende dingen. De ruimte was waar gebeurtenissen in plaatsvinden en de tijd is een maat voor verandering. Uiteindelijk heeft Einstein met zijn Algemene Relativiteitstheorie de manier waarop we over ons universum denken revolutionair veranderd. Zijn elegante vergelijkingen stellen dat ruimte en tijd nauw met elkaar verbonden zijn en met elkaar versmelten tot de ruimtetijd. De aanwezigheid van grote hoeveelheden massa of energie verstoort de ruimtetijd - het weefsel van de ruimtetijd wordt verbogen - en dit nemen we waar als zwaartekracht. De planeten bewegen bijvoorbeeld in rechte lijnen in de kromming veroorzaakt door de zon en het lijkt alsof ze zich in circulaire of elliptische banen om de zon bevinden. Dat is het centrale idee van de Algemene Relativiteit.

Algemene Relativiteit is de meest succesvolle theorie van de zwaartekracht, ze geeft een nauwkeurige beschrijving van alle zwaartekrachtsverschijnselen die we kennen. Bovendien voorspelt ze nieuwe sterke zwaartekrachtsverschijnselen, zoals zwarte gaten, neutronensterren, compacte dubbelsystemen (bestaande uit zwarte gaten en/of neutronensterren), zwaartekrachtsgolven en de Big Bang.

Systemen met een extreme massaverhouding

In dit proefschrift beschrijf ik het onderzoek dat ik heb gedaan met mijn collega's om dubbelsystemen van compacte objecten theoretisch te modelleren en te begrijpen. We bestuderen het specifieke geval waarin één van de objecten in het dubbelsysteem veel kleiner is dan het andere, ofwel een systeem met een extreme massaverhouding. Systemen met een extreme massaverhouding bestaan uit een enorm zwart gat met een massa van een miljoen zonsmassa's in het midden en een kleiner object van een aantal zonsmassa's. Het kleinere object kan een witte dwerg, een zwart gat of een neutronenster zijn en het centrale object is een zogenaamd superzwaar zwart gat.

Dit soort systemen komt normaal gesproken voor in het centrum van sterrenstelsels. Bijna alle heldere sterrenstelsels hebben één of meerdere superzware zwarte gaten in hun centrum. Ons eigen sterrenstelsel, de Melkweg, heeft bijvoorbeeld een superzwaar zwart gat dat vier miljoen maal zo zwaar is als de zon, genaamd Sagittarius A*, waar 28 sterren dicht omheen draaien. Het bestuderen van de kleinere objecten die om zwarte gaten heen bewegen en het maken van modellen van systemen met een extreme massaverhouding zal ons uiteindelijk helpen om de geometrie van het zwarte gat te begrijpen en daarmee de galactische dynamica.

Zwarte gaten zijn objecten waarin een enorme hoeveelheid massa samenge-drukt is in een zeer klein volume. Hierdoor is de omringende ruimtetijd zeer sterk gekromd, waardoor zelfs licht niet kan ontsnappen wanneer het de waarnemings-horizon voorbij gaat. Zelfs het tikken van een klok wordt vertraagd door de zwaartekracht. Zwarte gaten worden beschreven door drie eigenschappen: massa, spin (draaiing) en lading.

Technisch gesproken zijn zwarte gaten oplossingen van de Einsteinvergelijking, de belangrijkste vergelijking in de Algemene Relativiteitstheorie. Een bolsym-metrisch zwart gat dat alleen massa heeft, staat bekend als een Schwarzschild zwart gat. Een massief compact object kan ook impulsmoment hebben, ofwel rotatie om zijn eigen as. In dat geval wordt het zwarte gat beschreven door de Kerr metriek en wordt het een Kerr zwart gat genoemd. Als deze soorten zwarte gaten bovendien lading hebben, staan ze bekend als Reissner-Nordstrøm en Kerr-Newman zwarte gaten. Dit zijn de vier bekende exacte oplossingen van Einsteins veldvergelijkingen in de Algemene Relativiteit.

Dynamica van systemen met een extreme massaverhouding

Een analytische beschrijving van systemen zoals Sagittarius A* is zeer ingewikkeld, aangezien het centrale object ook om zijn eigen as spint en omdat er veel objecten omheen bewegen. Daarom proberen onderzoekers deze systemen stap voor stap te begrijpen: door de dynamica van een enkel object dat beweegt rond een superzwaar zwart gat te beschrijven als een systeem met een extreme massaverhouding. Van

oudsher wordt spin in systemen met een extreme massaverhouding beschreven door middel van het Mattisson-Papapetrou-formalisme.

Mathisson en Papapetrou beschreven de dynamica van spinnende compacte objecten in gekromde ruimtetijd. Een complicatie van hun formalisme is, dat het noodzakelijk is om de interne structuur van het kleinere object bij te houden. Bovendien is een volledig relativistische berekening nog nooit uitgevoerd. Doorgaans gebruikt men een post-Newtoniaanse benadering, waarin wordt aangenomen dat het zwaartekrachtsveld ver weg van het centrale zwarte gat zwak is, zodat de zwaartekrachtswet van Newton gebruikt kan worden. Vervolgens worden de effecten van kromming in de ruimtetijd toegevoegd.

Mijn collega's en ik stellen daarom een alternatieve, complementaire beschrijving voor. Omdat de verhouding tussen de massa's extreem is, verwaarlozen we de interne structuur van het kleinere object en beschouwen we het als een puntdeeltje. We generaliseren hiermee Einsteins beschrijving van lichamen zonder spin. Bovendien is het gravitatieveld rondom een zwart gat sterk, en dus is de ruimtetijd sterk gekromd. Daarom ontwikkelen we geheel relativistische banen voor spinnende objecten door de bekende methode van geodetische afwijking te generaliseren.

We hebben ons nieuwe formalisme toegepast op een systeem van een compact object met spin met een stellaire massa en een superzwaar zwart gat zonder spin (Schwarzschild). In de relativistische limiet vonden we drie soorten banen:

Circulaire banen en binnenste stabiele circulaire banen

Wanneer een stellair object gegrepen wordt door de zwaartekracht van een superzwaar zwart gat, kan het object circulaire banen gaan beschrijven in een constant vlak, zoals geïllustreerd in Fig. 6.4. Dit gedrag wordt gedemonstreerd met een analytische vergelijking in onze theorie. De straal van de circulaire baan wordt bepaald door de parameters van het systeem, zoals de massa's van de objecten en de spin van het kleinere object.

De spin en het baanimpulsmoment van het lichaam worden beschreven door de spin-impulsmoment- en baanimpulsmomentvector. De som van deze vectoren wordt genoteerd als \mathbf{J} , het totale impulsmoment (aangeduid met pijlen). Volgens ons theorema blijft de richting van deze grootheden behouden, voor een stellair object in een vlakke baan.

De kleinste circulaire baan waarin het stellaire object stabiel rondom het zware object beweegt wordt de binnenste stabiele circulaire baan genoemd. Voor een object zonder spin bevindt de binnenste stabiele circulaire baan zich op een afstand van drie maal de Schwarzschildstraal (de straal waarop de waarnemingshorizon zich bevindt) van het centrum van het zwarte gat; dit is een standaard resultaat in de Algemene Relativiteit. De spin van het object dat om het zwarte gat draait beïnvloedt de binnenste stabiele circulaire baan. We vinden dat, wanneer de grootte van de spin toeneemt, de straal van de binnenste stabiele circulaire baan toeneemt

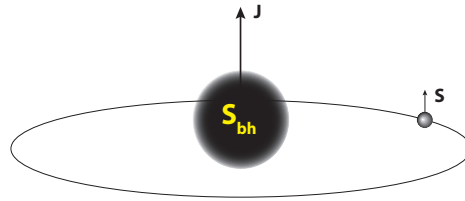


Figure 6.4. Een spinnend zwart gat of neutronenster met stellaire massa beweegt in een circulaire baan rondom een superzwaar zwart gat.

of afneemt, afhankelijk van de oriëntatie. De binnenste stabiele circulaire baan bevindt zich dus op meer of minder dan drie maal de Schwarzschildstraal.

Niet-circulaire banen in het platte vlak en periastronverschuiving

Het draaiende object beweegt zich niet op goed gedefinieerde banen zoals de circulaire banen. Wanneer de baan een klein beetje verstoord wordt, is het nog steeds mogelijk om een baan in een plat vlak te beschrijven. Maar doordat de spin niet constant is, heeft het object twee periodes. Hierdoor gedragen het punt met de kleinste afstand (periastron) en het punt met de grootste afstand (apastron) zich op een ingewikkelde manier, doordat het object steeds een ander maximum en minimum bereikt in variërende intervallen (zie Fig. 6.5).

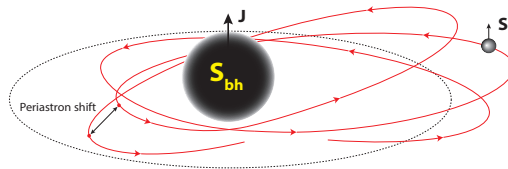


Figure 6.5. De verstoorde baan vertoont periastronverschuiving in het platte vlak. Het spinnende object bereikt verschillende periastra en apastra na variërende intervallen.

Bovendien eindigt het object na elke baan vóór het beginpunt. Deze verschuiving in de hoek van de baan door gekromde ruimtetijd staat bekend als periastron-

verschuiving. Dit is een bekend effect in de Algemene Relativiteit, zoals de door Einstein beschreven perihelionverschuiving van Mercurius. Maar het onregelmatige gedrag van het object met twee periodes is iets nieuws dat in onze theorie naar voren komt!

Geodetische precessie/de Sitter precessie

Voor een verstoord spinnend object met precessie moet de precessie van de spin gecompenseerd worden door het baanimpulsmoment. Het totale impulsmoment \mathbf{J} blijft dus constant. Het object raakt dan in een periodieke beweging boven en onder het vlak om het massieve object. In andere woorden, de gehele baan precesseert om het vlak. Hier- door beweegt het baanimpulsmoment \mathbf{L} langs een kegel. Dit effect wordt Geodetische precessie of de Sitterprecessie genoemd, naar Willem de Sitter.

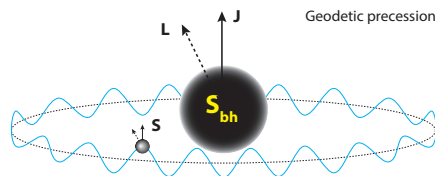


Figure 6.6. De spinprecessie wordt gecompenseerd door de precessie van het baanimpulsmoment \mathbf{L} . Het baanimpulsmoment \mathbf{L} beweegt langs een kegel.

Het geodetische effect werd als eerste voorspeld door de Sitter in 1916. Hij vond relativistische correcties voor de beweging in het systeem van de Aarde en de Maan. Dit effect is later ook gevonden in veel andere systemen. Wij hebben dit effect gevonden in onze dubbelsystemen met een extreme massaverhouding.

Conclusie

We hebben de dynamica van spinnende compacte objecten beschreven in een geheel nieuw formalisme en we hebben drie soorten banen en hun eigenschappen vastgesteld. Het draaiende lichaam kan zich op nog ingewikkeldere manieren gedragen, dit blijft over voor toekomstig onderzoek. Een object dat beweegt met relativistische snelheid zendt bijvoorbeeld zwaartekrachtsgolven uit: rimpelingen in de ruimtetijd.

De Europese Ruimtevaartorganisatie (ESA) werkt aan een zwaartekrachtsdetector, eLISA, die samen met de aarde rond de zon zal draaien en ondertussen rimpelingen in de ruimtetijd zal meten. Het bestuderen van de informatie van eLISA kan de geometrie van het centrale zwarte gat en de massa's en spins van de

daaromheen bewegende sterren onthullen. Bijna alle heldere sterrenstelsels bevatten één of meer centrale zware zwarte gaten. Wanneer sterrenstelsels samensmelten, gaan deze superzware zwarte gaten uiteindelijk ook samen; tijdens dit proces komt een enorme hoeveelheid zwaartekrachtsstraling vrij. Het detecteren van deze signalen zal dus niet alleen de theorieën over zwaartekracht en zwarte gaten testen, maar ook informatie verschaffen over de evolutie en de geschiedenis van het versmelten van sterrenstelsels.

Het is interessant dat Einstein, die de zwaartekrachtsgolven ontdekte in zijn relativiteitstheorie, dacht dat het nooit mogelijk zou zijn om deze ooit te detecteren. Door de recente ontdekking van zwaartekrachtsgolven door LIGO, de meting GW150914, kunnen we met trots zeggen dat we in een tijd leven waarin deze twijfel onjuist is gebleken.