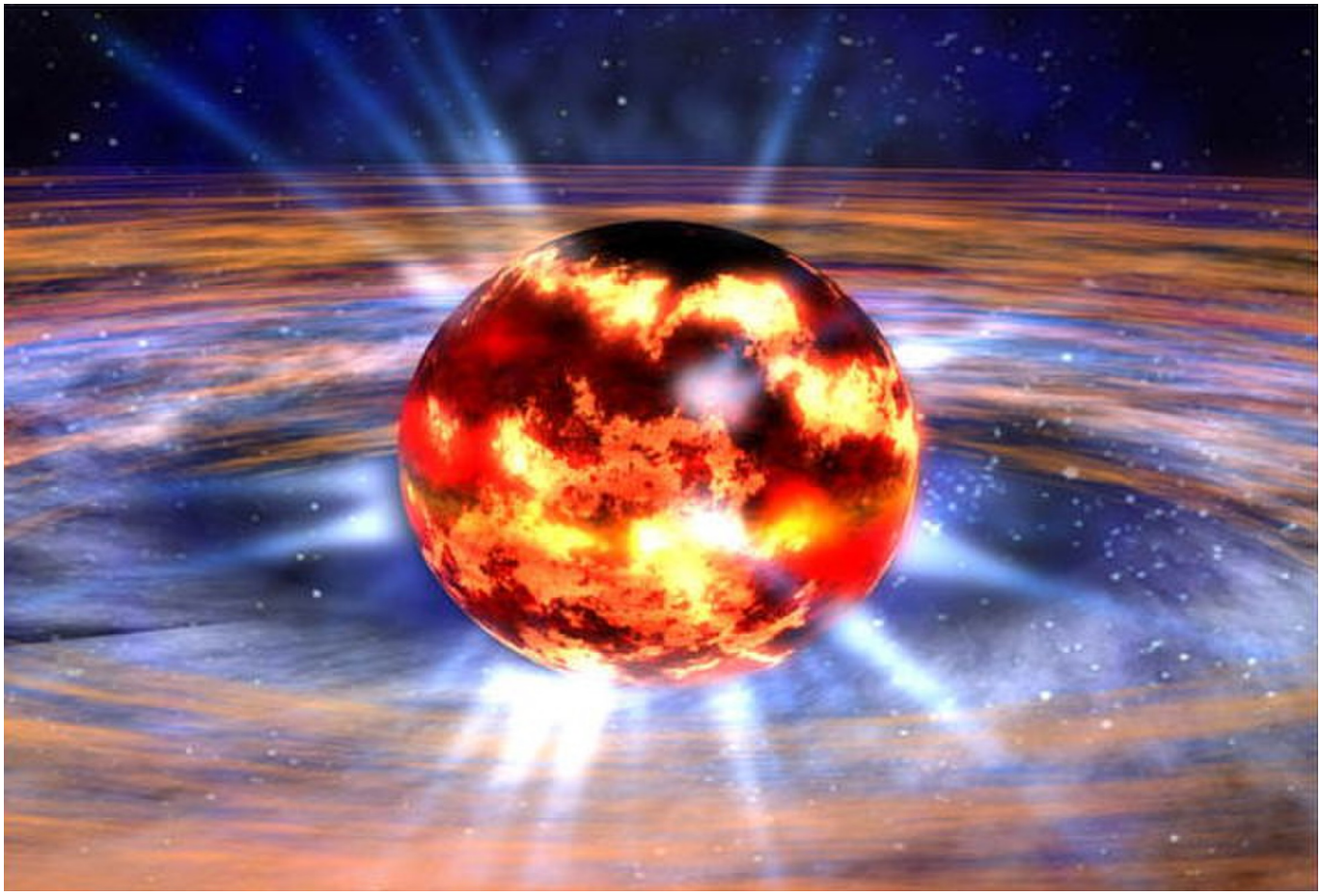
Echo's van exotische compacte objecten

Astrofysici weten dat massieve kosmische objecten die bestaan uit de ons bekende materie, een onoverschrijdbare massalimiet hebben. Wanneer een neutronenster, het zwaarst bekende object, nóg zwaarder en dus compacter zou worden, is zij gedoemd in te storten in zichzelf. Wat die ster dan moet worden, volgens de gangbare theorie, is een punt met oneindige dichtheid, een singulariteit, een massief punt dat de ruimtetijd zodanig verbuigt, dat er rond het punt een waarnemingshorizon ontstaat waarvoorbij zelfs licht gedoemd is gevangen te blijven. Alles wat nog kleiner en tegelijkertijd massiever is dan een neutronenster, móét met andere woorden volgens astrofysici wel een zwart gat worden. Of niet?



Afbeelding 1. Een neutronenster.Normaal gesproken wordt een neutronenster gezien als het kleinste compacte object dat materie kan vormen voor het ineenstort tot een zwart gat. Maar is dat ook zo – en zo niet, kunnen we dat dan meten? Afbeelding: NASA / Dana Berry.

Een alternatief voor zwarte gaten: exotische compacte objecten

Het hierboven beschreven verhaal is geen nieuwe kennis; maar is het wel correcte kennis? Met de klassieke beschrijving van een zwart gat, of het nou stilstaand of roterend is, is immers wel een aantal problemen geassocieerd.

Een van die problemen kennen we als de zogenaamde informatieparadox. Deze puzzel komt indirect voort uit de aanwezigheid van de *waarnemingshorizon*, de bolvormige grens rond de singulariteit van het zwarte gat die alle materie en straling gevangenhoudt. Toen Stephen Hawking deze ultieme eenrichtingsstraat in de jaren zeventig onderzocht vanuit een quantummechanisch standpunt, ontdekte hij dat zwarte gaten toch niet helemaal zwart zijn, maar een klein beetje straling moeten uitsturen. Deze zogenaamde *Hawkingstraling* bracht een opwindende wervelwind teweeg in de theoretische gemeenschap, maar ook een bekende

paradox. De informatie die uit de Hawkingstraling te lezen valt, leek principieel onvoldoende om te weten wat voor materie of straling ooit door het zwart gat opgeslorpt was.

Een zwart gat lijkt dus, omwille van het feit dat het een waarnemingshorizon heeft, een kosmische informatieversnipperaar: het vernietigt informatie permanent. Aangezien het absoluut verlies van informatie volgens de quantummechanica én de relativiteitstheorie – de twee ingrediënten van Hawkings berekening – principieel onmogelijk is, is de informatieparadox een ernstig probleem. Er zijn al oplossingen geopperd, maar er blijft onenigheid in wetenschappelijke kringen. Misschien, wordt er ook gesuggereerd, kan een dergelijke waarnemingshorizon daarom gewoon helemaal niet bestaan?

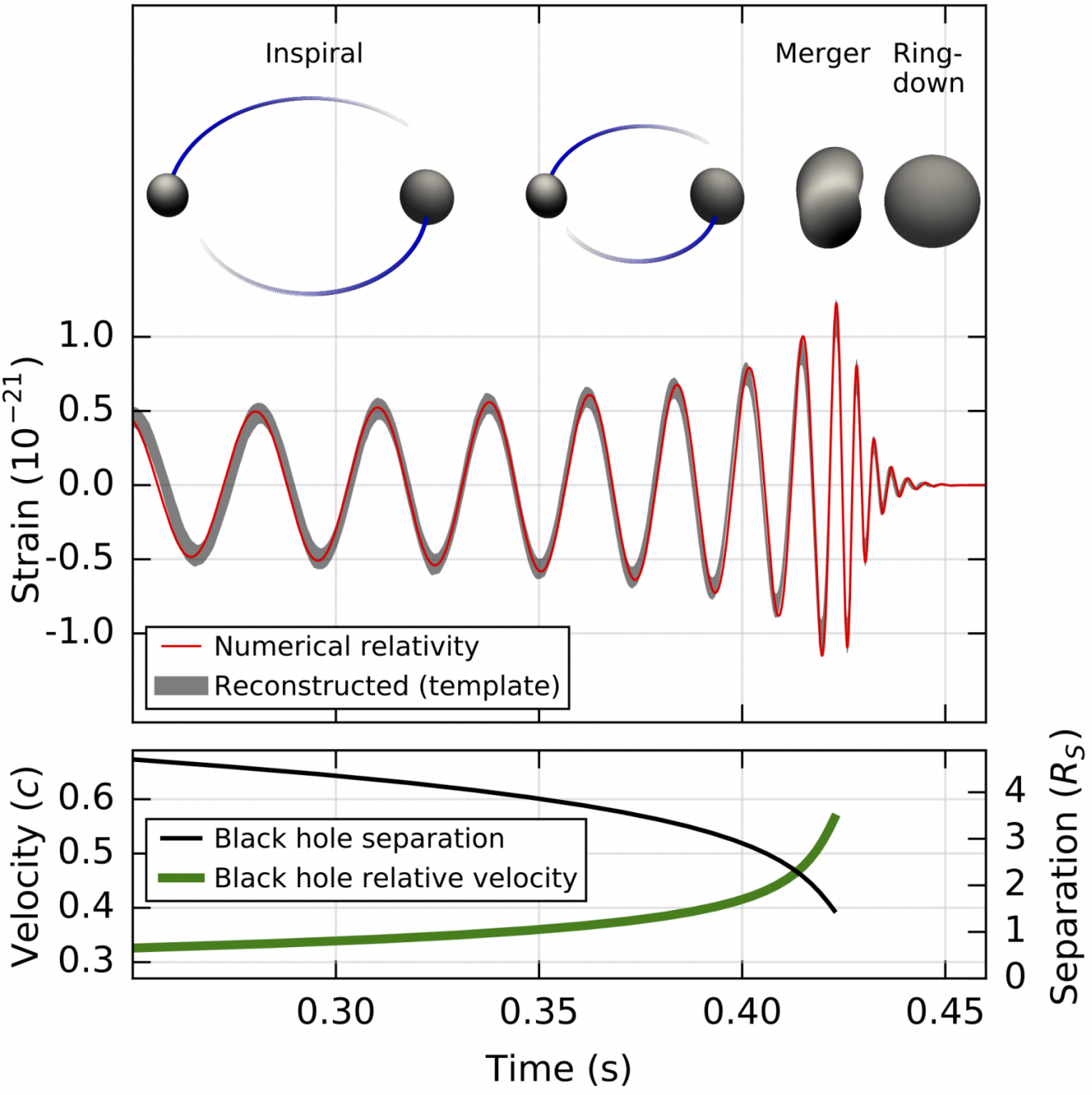
Een tweede reden om verder te kijken dan het klassieke verhaal van zwarte gaten, is de grote hoeveelheid alternatieve modellen voorgesteld in de kosmologie. Dat theoretisch natuurkundigen een grote vindingrijkheid hebben, is al langer duidelijk. De lijst aan extravagante alternatieven voor zwarte gaten – of modellen die nog tussen de neutronenster en het zwarte gat ín kunnen bestaan – is daar nogmaals getuige van. Theoretisch fysici spreken over ultracompacte sterren bestaand uit donkere materie, over gravasterren, bosonsterren en nog veel meer. Er is geen tijd om diep in te gaan op elk van deze exotische suggesties, maar elk van deze objecten deelt een aantal belangrijke eigenschappen met de andere.

Ten eerste hebben deze objecten geen waarnemingshorizon, maar een ‘hard’ oppervlak *net* buiten de plaats waar voor klassieke zwarte gaten zo’n horizon zou zijn. Ten tweede zijn ze dus wel degelijk kleiner en compacter dan neutronensterren, wat betekent dat ze ook beschikken over een zogenaamde fotonsfeer (iets wat een klassiek zwart gat ook heeft). Deze denkbeeldige bol rond het centrale object is de regio waar straling (zoals licht) zodanig wordt verbogen door de kromming van de ruimtetijd, dat zij een cirkelvormige baan rond dat object omschrijft. Het is met ander woorden de plaats waar je, wanneer je opzij kijkt, de achterkant van je eigen hoofd zou kunnen zien!

Theoretische modellen voor ultracompacte stellaire resten die deze twee eigenschappen hebben (een hard oppervlak en een fotonsfeer), staan in de literatuur bekend als exotische compacte objecten (ECO’s). De volgende vraag is hoe we deze objecten uit het puur theoretisch domein kunnen plukken; als ze bestaan, hoe nemen we ze dan waar?

De vingerafdruk van ECO’s

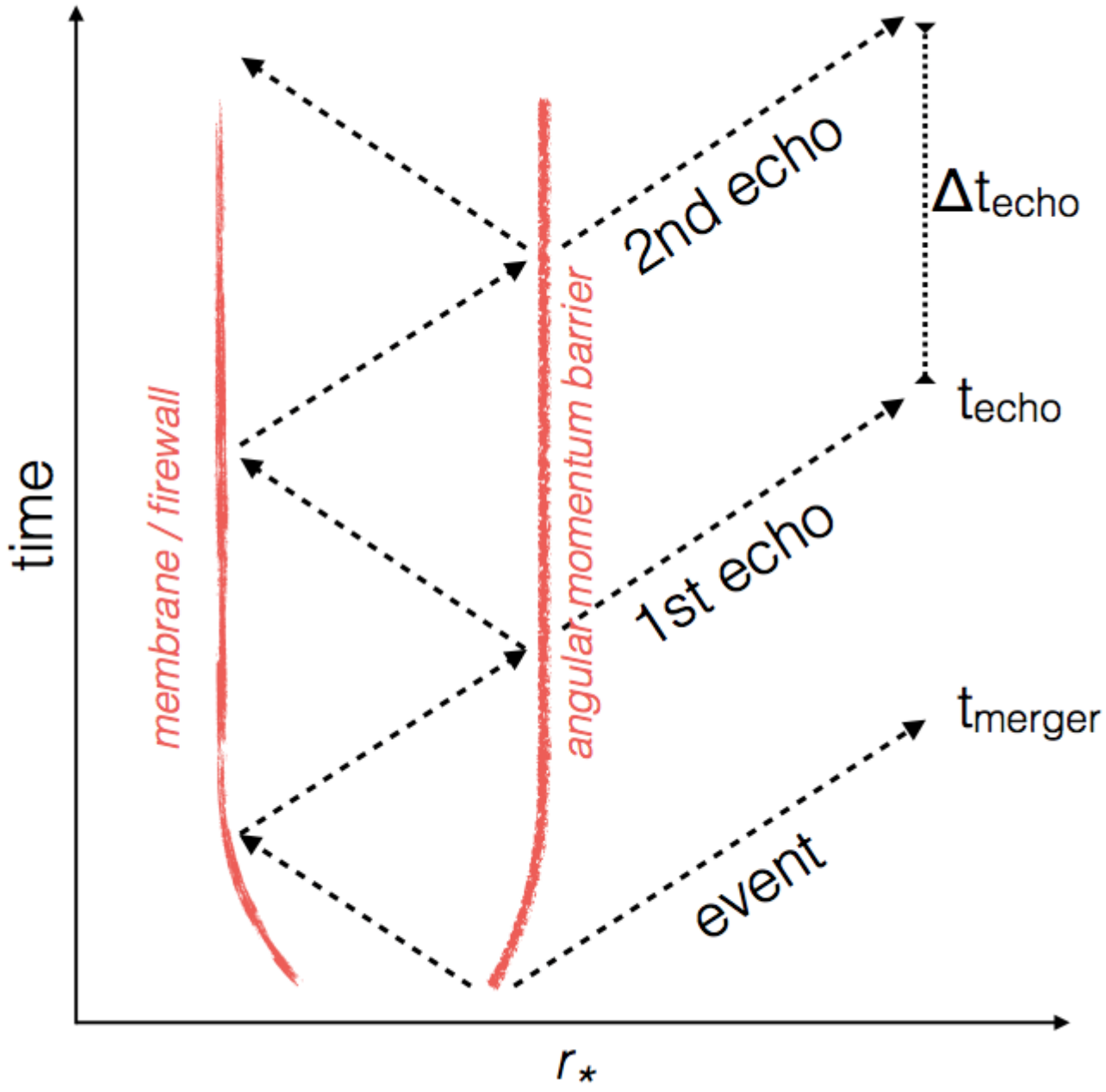
ECO’s lijken heel erg op zwarte gaten: ze zijn piepklein (naar astrofysische normen) en sturen (vrijwel) geen straling uit. Daarbij werd berekend dat ook wanneer ze samensmelten, ze er in het zwaartekrachtgolfspectrum precies hetzelfde uitzien. Dat wil zeggen dat de ontdekkingen van versmeltende zwarte gaten, gemaakt door LIGO/Virgo, misschien wel ontdekkingen van versmeltende ECO’s waren!



Afbeelding 2. Een zwaartekrachtgolfsignaal.Het signaal (midden) dat samensmeltende zwarte gaten volgens berekeningen in zwaartekrachtgolfdetectoren zouden moeten veroorzaken. Het verwachte zwaartekrachtgolfsignaal bij het samensmelten van zwarte gaten ziet er echter vrijwel hetzelfde uit als voor de fusie van ECO's. Bron: LIGO.

Wat de gelijkenissen met zwarte gaten betreft, worden wetenschappers niet echt verder geholpen in hun zoektocht naar ECO's. Waar ze in geïnteresseerd zijn, zijn de *verschillen*. Het belangrijkste verschil met klassieke zwarte gaten, is natuurlijk dat er bij ECO's geen sprake is van een waarnemingshorizon. Dat houdt in dat verschillende soorten straling niet onherroepelijk naar het centrum van het object gezogen zullen worden (zoals bij zwarte gaten), maar zullen weerkaatsen op het harde oppervlak van het exotisch object. Dit heeft erg belangrijke consequenties voor wat er gebeurt met zwaartekrachtgolven net na het samensmelten van twee ECO's. Het betekent namelijk dat, meteen na het samensmelten van de objecten, sommige van de daarbij geproduceerde zwaartekrachtgolven gevangen zullen komen te zitten tussen het harde oppervlak en de voorheen vermelde fotonsfeer. Dit proces is verantwoordelijk voor *echo's* in het zwaartekrachtgolfsignaal.

Laat ons een aantal stappen terugnemen en iets beter nagaan hoe zo'n echosignaal in zwaartekrachtgolven tot stand komt. Eerst en vooral: versmeltende ECO's vormen een erg gewelddadig proces waarbij een grote hoeveelheid zwaartekrachtgolven wordt veroorzaakt. Sommige van die zwaartekrachtgolven worden pas aan het eind van die fusie geproduceerd (wanneer het samengesmolten object nog nazindert van de schok). Ten tweede: de golven worden weerkaatst op het oppervlak van het ECO (in plaats van opgeslokt door een zwart gat). Ten derde: de weerkaatste zwaartekrachtgolven komen aan bij de fotonsfeer, die zich gedraagt als een halfdoorlatende potentiaalbarrière. Dat betekent dat een deel van de zwaartekrachtgolf doorgelaten wordt, maar de rest opnieuw weerkaatst wordt richting het oppervlak van het ECO. Ten slotte wordt de nu iets minder grote golf opnieuw weerkaatst op het oppervlak om zo dezelfde cyclus van weerkaatsing-doorlating te herhalen. Het periodiek 'lekken' van die zwaartekrachtgolven is wat een exotisch compact object onderscheidt van een singulariteit; het is de vingerafdruk van een proces dat niet verklaard kan worden met klassieke versmeltende zwarte gaten.



Afbeelding 3. Echo's.Zwaartekrachtgolven zitten gevangen tussen het harde oppervlak van het ECO en de fotonsfeer, maar lekken er met constante tijdsintervallen gedeeltelijk uit. Bron: Abedi e.a. 2016.

Echo's: eigenschappen en waarnemingen

Zoals je uit de voorgaande uitleg over het ontstaan van dergelijke signalen kan afleiden, is de belangrijkste eigenschap van de lekkende zwaartekrachtgolven dat ze periodiek zijn. De tijd tussen de verschillende doorsijpelende golfpakketten is ongeveer gelijk aan de tijd die zo'n golf erover doet om heen en weer te gaan tussen de fotonsfeer en het oppervlak van het

ECO. Deze repeterende eigenschap is oorzaak voor de naamgeving: we spreken over *echo's* van ECO's. Nog andere algemene eigenschappen blijken interessant te zijn: zo zal bijvoorbeeld elke echo minder sterk zijn dan de vorige. Er wordt immers bij elke echo een bepaald percentage de ruimte ingestuurd van de zwaartekrachtgolf die 'gevangen' zit tussen de fotonsfeer en het harde oppervlak, en die gevangen golf wordt daarbij ook steeds minder sterk. Een derde algemene eigenschap is dat de fotonsfeer het liefst laagfrequente golven doorlaat, en hoogfrequente golven terugkaatst naar het oppervlak. Dit effect, te vergelijken met een laagdoorlaatfilter, zorgt ervoor dat elke echo een gemiddeld lagere frequentie zal hebben dan de vorige.

Zoals hierboven vermeld, zijn er erg veel verschillende modellen voor ECO's, en zijn weinig van die modellen nog in voldoende detail uitgewerkt. Toch is men het eens dat de bovenstaande algemene eigenschappen (zoals het constant tijdsverschil tussen opeenvolgende echo's) in elk model zouden moeten terugkomen, ongeacht de dieperliggende aard van het ECO. Het is ook met die kennis dat er op dit moment methoden ontwikkeld worden – onder meer aan het Nikhef binnen de groep waar ik als masterstudent actief ben – om op zoek te gaan naar echo's in echte zwaartekrachtgolfsignalen die worden gemeten met de LIGO/Virgo-detectoren. Door te zoeken naar signalen die voldoen aan de algemene eigenschappen die we verwachten bij echo's, en die *net* na de signalen van smeltende compacte objecten komen, bestaat de hoop de wetenschappelijke gemeenschap ervan te overtuigen dat het concept 'zwart gat' misschien vervangen of aangevuld moet worden door het begrip 'exotisch compact object'.

Afbeelding 4. Een zwart gat.Als een zware ster instort tot iets wat kleiner is dan een neutronenster, is er volgense de gangbare theorie maar één mogelijke uitkomst: een zwart gat. Maar mochten er toch andere compacte objecten bestaan, kunnen we dat dan meten? En wat leren we dan uit die metingen? Afbeelding: NASA.

Wat een detectie ons kan leren

Hoewel sommige onderzoekers claimen reeds echo’s ontdekt te hebben, is de algemene consensus in de wetenschappelijke gemeenschap dat een echt overtuigende detectie nog moet gebeuren. Wat we van een dergelijke detectie zouden kunnen leren, is enorm!

Ten eerste zou het overtuigend ontwaren van een reeks echo’s erg sterk bewijs zijn voor het feit dat zwarte gaten inderdaad niet bestaan, of in elk geval niet op de manier waarop over hen gedacht werd in de afgelopen decennia. Simpelweg het *bestaan* van ECO’s zou al een schok door de wetenschappelijke gemeenschap jagen.

Ten tweede zouden we beter kunnen gaan kijken naar hoe het echosignaal er precies uitziet. Door het signaal, dat de algemene eigenschappen van echo’s bevat, dieper te analyseren, zou men erachter kunnen komen wat de precieze aard van het ECO is: is het een bosonster, is het een fuzzball, is het een gravaster, …

Ten derde zou de detectie en analyse van dergelijke echo’s de eerste empirische input voor quantumzwaartekracht betekenen. Het is immers een signaal dat veroorzaakt wordt door de dynamiek van het zwaartekrachtveld in werkelijk extreme situaties; situaties die zich vrijwel nergens anders in de kosmos voordoen. Het zijn deze uiterst zeldzame situaties waarin de wetten van de algemene relativiteitstheorie en die van de quantummechanica moeten samenkomen. In dit regime weten we nog maar heel weinig van de wetten van de natuur, en experimentele data hieromtrent is noodzakelijk om wetenschappelijke vooruitgang te maken. Laten we dus volop hopen dat het domein van zwaartekrachtgolfecho’s er een is waar we nog veel van zullen horen!