

Fridegårdsgymnasiet

Gravitationsvågor som forskningsverktyg  
*Utforskning och analys av LIGO-data för källidentifiering av  
gravitationsvågor*

Linnea Danell  
Gymnasiearbete 100 poäng  
TE21  
Teknikprogrammet  
Läsåret 2023/2024  
Handledare:  
Daniel Åkerlund, Nina Andersson

## Abstract

Gravitational waves are ripples in spacetime caused by the acceleration of massive objects, propagating outward at the speed of light, and carrying information about the dynamic interactions of the universe. In 2015, a gravitational wave signal of two merging black holes was detected with the *Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory* (LIGO). This paper gives an overview of LIGO detection principles as well as data interpretation for gravitational wave signals. By using the waveform approximate IMRPhenomPv2, which manages black hole binaries, and altering three different parameters, waveforms are modeled to describe the anticipated signal from real events of similar nature. The altered parameters are the distance to source, the mass of each object, and dimensionless spin of each object. This is done to characterize waveform signals from different events to build further understanding of how event parameters can be determined. A single neutron star binary coalescence was modeled with the waveform approximate TEOBResumS. No parameters were altered for the neutron star binary. A q-scan was done on the neutron star merger GW170817 as well as the black hole merger GW170814. This paper focuses on compact binary coalescence involving black holes and neutron stars. It was found that each of these altered parameters play a crucial role in the generated wave pattern, and it is therefore of most importance that such parameters are studied to identify the signal generating sources in question. Greater mass results in shorter and stronger signals whilst greater distance to events results in longer and much weaker signals. The dimensionless spin  $S$ , which is defined to be  $\frac{cJ}{GM^2}$ , is shown to have great significance in waveforms as well. When two black holes orbit around each other with aligned spin, the gravitational wave signals are modeled smoother than those from black holes with misaligned spin. The neutron star signal generated much longer signals than those of the black holes.

# Innehållsförteckning

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Inledning</b> .....                                | <b>1</b>  |
| <i>Syfte och frågeställningar</i> .....               | 1         |
| <b>Teoretisk bakgrund</b> .....                       | <b>2</b>  |
| <i>Begrepp</i> .....                                  | 2         |
| <i>Tidigare forskning</i> .....                       | 2         |
| Gravitationsvågor och deras signifikans .....         | 2         |
| Interferometerteknik .....                            | 3         |
| Albert Einstein och relativitet .....                 | 4         |
| Våggenererande händelser .....                        | 6         |
| <b>Material och metod</b> .....                       | <b>7</b>  |
| <b>Undersökning och resultat</b> .....                | <b>9</b>  |
| <i>LIGO</i> .....                                     | 9         |
| Teknisk deklARATION .....                             | 9         |
| Isolering och optiska system .....                    | 11        |
| Data- och signalhantering .....                       | 12        |
| <i>Att bedöma parametrar utifrån signalform</i> ..... | 13        |
| <i>Resultterande signalformer</i> .....               | 14        |
| <b>Analys och diskussion</b> .....                    | <b>18</b> |
| <i>Implikationer</i> .....                            | 18        |
| <i>LIGO som hjälpmedel</i> .....                      | 19        |
| <b>Källförteckning</b> .....                          | <b>20</b> |

## **Inledning**

År 2015 upptäckte de två detektorerna vid Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (LIGO) en kort gravitationsvågssignal genererad från sammanslagning av två svarta hål en miljard ljusår härifrån (Abbott, 2016). Vågorna är osynliga för ögat och framstår som variationer i tid och rum när massiva kroppar accelererar asymmetriskt, såsom ett binärt system<sup>1</sup> av svarta hål eller neutronstjärnor.

LIGO representerar en imponerande teknologisk bedrift som, genom sin design och instrumentering, har revolutionerat teknologin för att upptäcka och precis mäta gravitationsvågor. Genom att integrera laserinterferometrar och datateknik har LIGO inte bara lyckats öppna upp för mer moderna observationer inom gravitationsfysiken, utan har också utökat vår kapacitet att förstå och utforska de djupaste och mest fundamentala aspekterna av den kosmiska strukturen.

Att detektera och studera gravitationsvågorna ger människan möjlighet att förbättra observationer av astronomiska händelser genom att erbjuda en komplementär metod för att studera dem (Brandenberger, 2011). Genom att registrera och analysera gravitationsvågor kan forskare erhålla information som både kompletterar och bekräftar de traditionella observationsmetoderna, såsom elektromagnetisk strålning. Detta tillhandahåller en fördjupad förståelse av händelser och möjliggör bättre bestämning av de underliggande fysikaliska processerna som äger rum i universum. Arbetet ämnar utforska den teknologiska strukturen som möjliggör detektion av gravitationsvågor, med specifik inriktning på LIGO och dess speciella teknik. En omfattande dataanalys genomförs där olika parametrar varieras för att simulera signaler från binära system av neutronstjärnor och svarta hål. Denna process strävar efter att differentiera gravitationsvågor som härstammar från olika kosmiska händelser, och därigenom presentera en preciserad förklaring av den information som gravitationsvågor kan tillhandahålla rörande olika kosmiska fenomen.

### **Syfte och frågeställningar**

Syftet med undersökningen är att bygga förståelse för forskningsframstegen som lett till upptäckten av gravitationsvågor. Arbetet redogör för LIGO-teknikens användning i detektion av gravitationsvågor, samt vad gravitationsvågor spelar för roll i vår förståelse av universum. Undersökningen innefattar både modellering av signalformer samt analys av existerande data som ska beskriva hur gravitationsvågor ser ut baserat på olika kosmiska event. Syftet med dataanalysen är att visa på hur gravitationsvågor kan skildra olika händelser i universum genom utseende, information som är essentiella för vidare kunskaper om ämnet. Arbetet behandlar även gravitationsvågor som ett potentiellt verktyg för att särskilja olika teorier inom astrofysik och varför gravitationsvågor är en viktig komponent i framtidens forskning inom astrofysik.

Hur ökar LIGO-tekniken förståelsen för kosmiska event genom numerisk relativitet samt analys av gravitationsvågor?

---

<sup>1</sup> Ett binärt system innebär att två objekt roterar runt varandra i ett system, ungefär som en torktumlare.

# Teoretisk bakgrund

## Begrepp

Gravitationsvågor- härledda från Albert Einsteins allmänna relativitetsteori som säger att gravitation propagerar ut som vågor. Gravitationsvågor förvränger rummet genom att tänja ut en axel och pressa ihop den andra (Riles, 2013).

Interferometer- ett verktyg som används för att mäta interferens mellan vågor från en och samma källa (LIGO Caltech, u.d).

LIGO- *Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory*, ett forskningsprojekt som använder interferometerteknik för att detektera gravitationsvågor (LIGO Caltech, u.d).

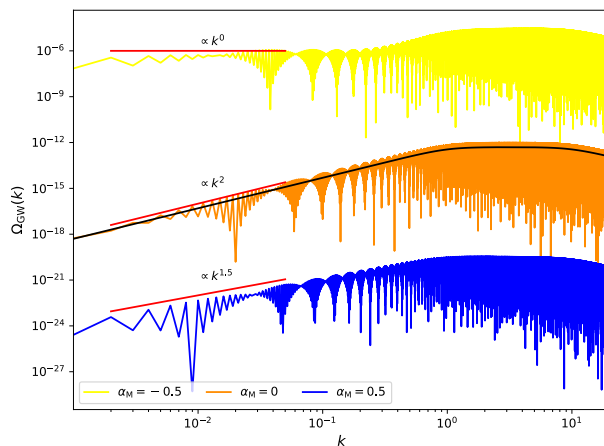
Numerisk relativitet- ett verktyg som simulerar rumtidsgeometrin genom att numerisk lösa Albert Einsteins ekvationer för händelser som kollisioner av svarta hål (Wikipedia, 2024).

## Tidigare forskning

### Gravitationsvågor och deras signifikans

Gravitationsvågor är vibrationer genom rumtiden, orsakade av massiva objekt i acceleration (Riles, 2013). Exempel på event som genererar gravitationsvågor är kollision mellan massiva objekt som befinner sig i ett binärt system. När två kroppar roterar kring varandra tappar de energi i form av gravitationsvågor, vilket resulterar i att de två kropparna i systemet åker närmare varandra för att slås samman. Även vid kollisionen genereras gravitationsvågor men effekterna av detta är inte trivialt. Dessa energiöverförare är en del av Albert Einstein förutsägelse från år 1916, när den allmänna relativitetsteorin presenterades för världen. Teorin påstod att vågorna förvränger rumtiden, koordinatsystemet där tid behandlas som en fjärde dimension. När gravitationsvågor passerar rummet så förlängs och förkortas rummet rätvinkligt från varandra. Gravitationsvågor existerade i teorin i nästan 100 år innan de detekterades. I brist på forskningsframsteg stod tekniken bakom detektion av gravitationsvågor stilla (Abbott, 2016). Detta fortsatte fram till 2015, när de första gravitationsvågorna uppmättes. Upptäckten anses vara revolutionerande, eftersom det som endast var teori innan är nu något kvantitativt.

Gravitationsvågor är en form av informativa signaler som utgör budbärare genom kosmisk rymd. Universums evolution har kategoriserats och strukturerats i olika kosmologiska epoker, vars framträdanden utgör grunden för den kosmologiska standardmodellen (Nationalencyklopedin, 2023). Standardmodellen detaljerar inte bara tidpunkten när all materia blir till, utan framställer även händelserna som karakteriserar varje epok och ger en konceptuell förståelse för universums accelererande expansion. Trots denna förståelse återstår en brist på konkret information om de faktiska händelserna som har inträffat vid olika tidpunkter där vissa event kan erhålla fördjupad förståelse av kosmos. Tillgängligheten av denna information kan vara väsentlig för forskare och många gånger är den endast tillgänglig genom gravitationsvågor.



Figur 1: Energidensiteten i gravitationsvågor över vågtalet, beroende av en kosmisk friktion  $\alpha_M$  (Danell, 2023, s. 8)

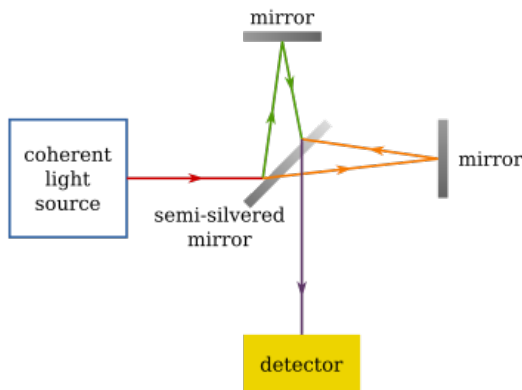
Trots att de första gravitationsvågorna detekterades återstår mycket arbete inom området, inklusive strävan efter att kvantifiera gravitationsvågor i lägre energinivåer. Lägre frekvenser kan ge mer information om karaktären på vågor. Figur 1 (Danell, 2023) illustrerar sambandet mellan energidensiteten i simulerade gravitationsvågor och vågtalet, en parameter som kan likställas med frekvens (Nationalencyklopedin, 2023). Anmärkningsvärt är att graferna uppvisar varierande beteenden beroende på det kosmiska friktionsvärdet, representerat som  $\alpha_M$ . Särskilt märkbart är att de distinkta skillnaderna mellan samtliga grafer endast observeras vid låga värden på vågtalet, mer specifikt längst till vänster i diagrammet. Detta visar hur lägre frekvenser kan avslöja betydande aspekter hos naturen av gravitationsvågor, och är i detta fall avgörande i att precisera friktionsvärdet  $\alpha_M$ . Analysen utgör ett illustrativt exempel på hur avancerad förståelse av lägre frekvenser kan avslöja information om universums egenskaper, vilket sammanfattar vikten i forskning om gravitationsvågor.

### Interferometertechnik

En interferometer används för att interferera en ljusstråle med en annan (LIGO Caltech, u.d). De fungerar genom att slå samman två eller flera ljuskällor för att skapa ett interferensmönster som sedan kan analyseras för att avgöra eventuell förskjutning av signaler. Den användes främst för att mäta ljusets hastighet i olika medium, något som var okänt innan. Albert Einsteins publicerade sina 2 postulat<sup>2</sup> i början av 1900-talet (Wikipedia, 2023). Innan Einsteins förslag om att ljusets hastighet är konstant för samtliga referenssystem genomfördes många experiment vars syfte var att mäta ljusets hastighet. Mest känt är Michelson-Morley experimentet som genomfördes år 1887 av Albert A. Michelson och Edward Morley. Eftersom alla mekaniska vågor propagerar<sup>3</sup> genom ett medium, som luft eller vatten, ville forskare bevisa att även ljus gör det. En teori skapades som byggde på existensen av etern, det medium som ljus påstods propagera genom. Detta gjordes med hjälp av en *Michelson Interferometer*.

<sup>2</sup> Ett påstående som utgår från en teori som inte bevisats

<sup>3</sup> Sprider sig, rör sig



Figur 2 Dagens Michelson interferometer använder samma princip som i experimentet, men en laser används som ljuskälla (Wikipedia, 2023)

På samma sätt som en observatör i en bil på motorvägen uppfattar vindens rörelse bör jordens rörelse skapa en ”vind” genom etern, något som rör sig enligt en observatör som befinner sig på jorden. Interferometern skapades för att mäta denna etervind genom att mäta skillnaden i ljusets hastighet i olika riktningar<sup>4</sup>. Resonemanget byggde på att skillnader i ljushastigheten för ljus som rör sig vinkelrätt mot varandra skulle mätas upp i interferometerens detektor (Wikipedia, 2023). En laserstråle skickas ut och delas upp i två strålar när den når stråldelaren. En del av strålen reflekteras åt ett håll, medan den andra delen reflekteras åt ett annat. Respektive stråle rör sig exakt samma avstånd innan de träffar varsin spegel som reflekterar strålarna tillbaka till stråldelaren. Strålarna reflekteras sedan in i en detektor som känner av när ljuset anländer. Om strålarna anländer vid olika tider implicerar det att ljuset har rört sig i olika hastigheter, eftersom sträckan som ljuset rör sig är exakt lika stor. Det som skulle vara beviset på eterns existens resulterade i stället i misstro om klassiska mekaniken.

### Albert Einstein och relativitet

Isaac Newton publicerade *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* år 1687 (Wikipedia, 2023). Där beskrev Newton sina tre rörelselagar som utgjorde fundamentet för den klassiska mekaniken samt den övergripande ramen för fysikens förståelse.

Under mer än 200 år vilade hela den moderna fysiken på dessa tre lagar:

1. Varje kropp förblir i vila eller likformig rörelse så länge vektorsumman av alla yttre krafter som verkar på kroppen är noll, eller specialfallet då inga krafter alls verkar på kroppen.

$$\sum \vec{F} = 0 \Leftrightarrow \frac{d\vec{v}}{dt} = 0.$$

2. Den resulterande kraften som verkar på en kropp är proportionell mot dess acceleration, och kan uttryckas

$$\vec{F} = m\vec{a}.$$

3. Två kroppar påverkar alltid varandra med lika stora men motriktade krafter. För varje kraft finns en motkraft

$$\vec{F} = -\vec{F}^*.$$

<sup>4</sup> På samma sätt som en båt rör sig snabbare om den åker med vågornas hastighetsriktning, bör ljuset röra sig snabbare om det åker med riktningen av den påstådda etern.

Emellertid fanns brister i dessa laga och därför utvecklades den klassiska mekaniken till kvantmekaniken. Bristerna observeras främst vid höga hastigheter och starka gravitationsfält där Newtons lagar hade tydliga begränsningar (Wikipedia, 2023). År 1905 publicerade Albert Einstein den speciella relativitetsteorin för att hantera dessa brister samt omformulera fundamentala begrepp som tid och rum (Wikipedia, 2023). Genom att ta inspiration från tidigare observationer, som Michelson-Morley experimentet, introducerades begreppet *ljushastighet* som en konstant och därmed även krökningen av rumtid som gravitationsteori. Den speciella relativitetsteorin utformades av två postulat:

1. Fysikens lagar gäller i alla inertialsystem.
2. Ljus färdas alltid med hastigheten  $c$  i vakuum i förhållande till alla observatörer oberoende av vilket inertialsystem de befinner sig i.

Att ljuset rör sig i samma hastighet oberoende observatör och inertialsystem ger konsekvenser som inte stämmer överens med newtonsk mekanik. En konsekvens är att längder och distanser blir relativa eftersom det kommer bero på den relativa hastigheten till referenssystemet. Föreställ ett föremål som rör sig i ett inertialsystem,  $R'$ . Längden av objektet i  $R'$  kommer mätas upp till  $l_0$  enligt en observatör i  $R'$ . Föreställ sedan en observatör,  $O$ , i ett annat inertialsystem,  $R$ . Om referensramen  $R$  rör sig i en hastighet  $v$  relativt till  $R'$  kommer observatör  $O$  mäta upp längden på objektet till

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

där  $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$  kallas för Lorentzfaktorn och är endast betydande för objekt med höga hastigheter (Niklasson, 2021). Eftersom  $v < c$  kommer den största möjliga uppmätta längden vara  $l_0$ . Det sker även en avsevärd längdkontraktion vid högre hastighet. Högre hastigheter  $v$  leder till ett lägre värde på Lorentzfaktorn, vilket i sin tur resulterar i en större längdkontraktion, alltså ett lägre uppmätt värde på  $l$ . Denna faktor var relevant redan innan Einstein när både G.F Fitzgerald och H.A. Lorentz kom fram till samma faktor, utan att ha tankar om vad som händer med tid och rum. På samma sätt som det sker en längdkontraktion sker också tidsdilatation med samma faktor, alltså

$$t = t_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

En klocka i ett referenssystem i rörelse tickar långsammare än vad den skulle göra i ett stationärt system.

Allmän relativitet tar, till skillnad från den speciella, hänsyn till gravitation och ger även en etablerad förklaring till vad gravitation innebär samt hur olika kroppar växelverkar med varandra (Nationalencyklopedin, u.d). Den allmänna relativitetsteorin introducerar gravitationskraften, inte som en kraft, utan som en krökning av rumtiden. Konceptet rumtid var först föreslaget som ett tillägg till speciell relativitet av Hermann Minowski, vilket har gett det namnet *Minowski rumtiden*. Det lägger till en fjärde dimension, tid, till ett euklidiskt rum med tre redan existerande dimensioner. Teorin påstår att en massa kröker rummet runtomkring den. Ett objekt med lägre massa kommer krökas till den större objektet, vilket traditionellt sätt kallas för gravitation. Allmän relativitet gör det möjligt att härleda fram vågekvationen som förutsäger att gravitation är energi som propagerar utåt i form av vågor, vilket är det som kallas gravitationsvågor. Detta sker i olika fall, bland annat när två svarta hål

är fast i ett system som gör att de roterar kring varandra. Dessa händelser sker över miljoner år och genererar gravitationsvågor när de tappar energi, vilket gör att de faller närmare och närmare varandra. När de roterar närmare varandra roterar de snabbare som en följd av bevarandet av rörelsemängdsmomentet. Denna cykel slutar alltid i en kollision av de två objekten (LIGO Caltech, u.d).

### **Våggenererande händelser**

Allt som accelererar asymmetriskt genererar i regel gravitationsvågor (LIGO Caltech, u.d). Olika ursprung av genererade vågor kategoriseras emellertid in i olika klasser. De mest dokumenterade händelserna är sammanfall av binära system. Detta innebär att två objekt roterar kring varandra samt kring ett rotationscentrum i ett system. I denna kategori finns tre subkategorier som varierar beroende på vilka objekt systemet innefattar. Systemen kan innehålla två svarta hål, två neutronstjärnor eller ett svart hål och en neutronstjärna (LIGO Caltech, u.d). Alla dessa genererar unika vågmönster eftersom de innehåller olika parametrar. Detta tillåter studier som resulterar i identifiering av eventen när vågorna når jorden. På så sätt studeras kosmiska event miljarder ljusår härifrån, endast genom att studera vågmönstret. Trots olikheterna i systemen står de fortfarande i samma kategori eftersom alla har samma genererande händelse, vilket är sammanfall av två objekt. Resultatet av sammanslagningen skiljer sig emellertid åt när det gäller olika objekt. Detta beror helt på objektens egenskaper, såsom massa och andra unika egenskaper för exempelvis svarta hål eller neutronstjärnor. Bland annat har neutronstjärnor en strikt begränsning på deras massa där den begränsas av 1,4 och 2,2 solmassor enligt Chandrasekhargränsen och Tolman–Oppenheimer–Volkoff gränsen (Wikipedia, 2024).

Andra gravitationsvågor inkluderar kontinuerliga gravitationsvågor, stokastiska gravitationsvågor och gravitationsvågor som kommer från kortvariga, okända eller oväntade källor. Exempel på kontinuerliga signaler är signaler från ensamt roterande objekt som neutronstjärnor. Om rotationen är konstant kommer signalfrekvensen förbli detsamma över tid, vilket är varför de kallas kontinuerliga. Stokastiska gravitationsvågor innefattar vågor som alltid passerar jorden men har för liten effekt för att kunna detekteras själva. Däremot kan flera signaler från olika event detekteras samtidigt. Dessa blandade signaler är vad som kallas stokastiska gravitationsvågor och skulle kunna innefatta signaler från Big Bang. Att upptäcka detta öppnar helt nya forskningsmöjligheter där forskare kan studera det tidiga universum som annars är oåtkomlig (LIGO Caltech, u.d). Samtidigt som vågorna rör sig genom rymden expanderar universum, vilket ger upphov till rödförskjutning (Virgo, 2019). När universum expanderar kommer energin som rör sig i rymden sträckas ut tillsammans med expansionen, således ökar våglängden som förlänger signalen. Även supernovor kan generera gravitationsvågor men detta har inte upptäckts än och kommer med största sannolikhet ta år att upptäcka eftersom tekniken måste förbättras avsevärt.

## Material och metod

Metoden som används är en skrivbordsundersökning och dataanalys. Detta är speciellt passande vid teoretiska arbeten som i huvudsak utgår från tidigare forskning, vilket denna undersökning gör. De grundläggande principerna som detekterar gravitationsvågor med LIGO-tekniken ska utforskas. Det görs en rigorös informationssökning som utgår från vetenskapsartiklar. Översiktsartiklar har använts flitigt eftersom de inte sammanfattar och beskriver helheten av koncept. I detta fall är dessa användbara för att förstå den grundläggande tekniken bakom LIGO. Specialiserade artiklar ger inte lika mycket till arbetet eftersom de endast beskriver en oansenlig del av större koncept. Av de använda artiklarna är samtliga granskade, vilket innebär att andra sakkunniga i området har bedömt att artikelns innehåll är befogat innan publikation. En hemsida som använts frekvent är *LIGO Caltech* (LIGO Caltech, u.d). Källan hämtas direkt från forskningsgruppen vid LIGO, som publicerade sina resultat som pionjärer inom området. Användning av denna källa förstärker tillförlitligheten i den presenterade informationen, eftersom den direkt härrör från de forskare som genomförde och publicerade de första och mest grundläggande forskningsframstegen inom ämnet.

Emellertid har data som jag tidigare publicerat använts. Datan kommer från artikeln *Determining the Energy Density of Stochastic Gravitational Waves While Considering Cosmic Friction* (Danell, 2023). Arbetet är varken granskat eller skrivet av utbildade forskare, och tillförlitligheten till artikeln går därmed att ifrågasättas. Det som däremot stärker dess pålitlighet är faktumet att det skrevs under uppsyn av doktorand Yutong He på Stockholmsuniversitet (Stockholms universitet, u.d), som opponerat på arbetet samt varit till stor hjälp med att producera resultaten.

Vidare källor som används är däremot Nationalencyklopedin (NE) och Wikipedia. NE specialiserar i korrekt och begriplig information och har ett tvärvetenskapligt synsätt (Nationalencyklopedin, u.d), vilket är en lämpligare typ av källa vid generell och ytlig informationssökning likt förklaring av begrepp. Wikipedia är ett uppslagsverk som förser allmänheten med både generell och specialiserad information där all information i artiklarna kräver verifierbarhet (Wikipedia, 2023). Däremot är Wikipedia en så kallad wiki, vilket innebär att samtliga användare har rätten till att redigera artiklar. Därav kan denna hemsida anses vara en svag informationskälla och bör därför ifrågasättas vid användning. Artiklarna granskas emellertid med jämna mellanrum och kan stängas ner vid fall av felaktig eller tendentiös information. Wikipedia är även en oberoende källa i sin grund och finansieras genom privata donationer, vilket innebär att hemsidan är tillförlitlig och passande till denna undersökning.

För att svara på frågeställningen är det högst relevant att utföra en dataanalys. En dataanalys kommer till nytta genom att praktiskt visualisera hur gravitationsvågor uppträder utifrån ändring i diverse parametrar. Datan som analyseras kommer från LIGO-hemsidan och är därför en förstahandskälla eftersom all data tas från samma organisation som skapade den. Projektet LIGO är väl etablerat och antagandet att denna data stämmer går därför att göra med säkerhet. Dataanalysen genomförs som tidigare nämnt för att urskilja olika kosmiska event från varandra och ska även illustrera hur data från detektioner används. Analysen kommer ske efter all tidigare forskning har samlats eftersom tekniken bakom hur datan hämtas är essentiell för att genomföra och förstå analysen. Datan är tagen från *Gravitational Wave Open Science Center* (GWOSC), tidigare kallat *LIGO Open Science Center*, som skapades för att ge allmänheten tillgång till gravitationsvågdata (Gravitational Wave Open Science Center, u.d). Analysen genomförs i Python där en workshop från GWOSC (GWOSC, 2023) används för att

bygga förståelse för datahantering och tekniken i helhet. Två riktiga event, GW170817 och GW170814, analyseras för att urskilja signaler från neutronstjärnor och svarta hål, samt för att visualisera hur data från verkliga event används i forskningssyfte. Tidigare skapade vågmodeller används även för att kunna dra ytterligare slutsatser om hur parametrarna massa, avstånd till händelsen och dimensionslös spinn påverkar signalformen. Dessa modeller är alltså inte riktiga data utan används vanligtvis för att jämföras med riktiga signalformer för att i sin tur kvantifiera olika eventparametrar. Detta genomförs även för att förbättra förståelsen för processen som leder till estimering av parametrar, eftersom en stor del av frågeställningen rör just detta.

# Undersökning och resultat

## LIGO

Att detektera gravitationsvågor är en utmaning, och även Einstein förmodade att de skulle förbli osynliga för oss människor. Detta beror på vågornas låga amplitud som kan skrivas

$$h = \frac{l_x - l_y}{l}$$

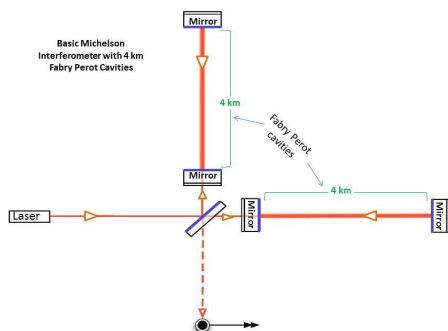
där  $h$  är vågens amplitud och beskrivs som förhållandet mellan längdkontraktionen  $l_x - l_y$  och den ursprungliga längden  $l$ .  $l_x - l_y$  representerar skillnaden i längd av de två armarna på interferometern som annars är lika långa. Amplituden representerar ofta styrkan av gravitationsvågor och de som passerar jorden har en styrka  $h$  på ungefär  $10^{-20}$  (Wikipedia, 2024). Detta innebär att den fraktala skillnaden i interferometerarmarnas längd har ett värde på  $10^{-20}$ . Trots detta har gravitationsvågor detekterats med preciserad interferometerteknik. Världens mest omfattande projekt för att detektera gravitationsvågor är *Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory* (LIGO) och består av två laserinterferometrar, LIGO Livingston och LIGO Hanford, som befinner sig 3000 kilometer ifrån varandra (LIGO Caltech, u.d). En interferometer består i sin tur av två 4 kilometers vakuumböjor av stål. Dessa typer av observatorier skiljer sig däremot från ordinära på flera grunder. Eftersom gravitationsvågor är ett eget fenomen och därav inte tillhör det elektromagnetiska (EM) spektrumet behöver inte LIGO en synfunktion. På grund av den extrema precisionen i LIGO störs detektorn av minimalt brus. Anledningen till att ha två interferometrar beror på osäkerheten i huruvida signalerna som upptäcks i en station härrör från gravitationsvågor eller bakgrundsbrus. LIGO-projektet samarbetar även med VIRGO-projektet, en liknande interferometer utanför Pisa, Italien. Att ha fler centraler som får utslag samtidigt gör signalen mer pålitlig och det går därför att utesluta att det endast är signalbrus som detekteras.

## Teknisk deklARATION

I grunden är LIGO en Michelson interferometer men har ett antal anpassningar. Emellertid används tekniken annorlunda för detektion av gravitationsvågor jämfört med experimenten som genomfördes på slutet av 1800-talet. Innan var det givet att längden på interferometerarmarna var konstanta och att det var ljusets hastighet som varierade. Nu är det trivialt att lasern rör sig med en konstant hastighet  $c^5$  i vakuum, och att det i stället är längden på armarna som varierar när gravitationsvågor passerar. Alltså används samma princip, men med olika förutsättningar. Den främsta skillnaden är storleken på interferometern där Michelson-Morley experimentet använde en med 1,3 meter långa armar,  $1/3000$  av LIGOs armar (LIGO Caltech, u.d). Att öka längden på armarna resulterar i mindre signifikanta mätningar. För att mäta mer precist skulle därför ännu längre armar krävas på interferometern. Däremot finns begränsningar på hur långa armarna kan vara för maximal effektivitet. Därför har andra lösningar införts som gjort att LIGO är känt som världens känsligaste mätinstrument.

---

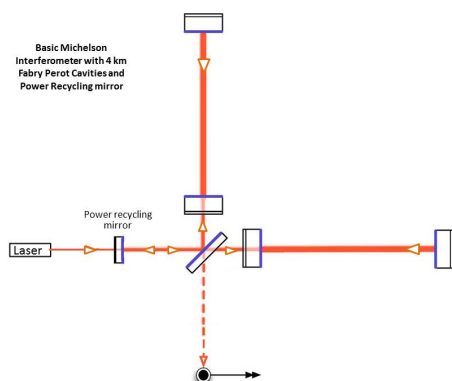
<sup>5</sup> 299 792 458 m/s



Figur 3. Förenklad visualisering av LIGO med fokus på Fabry Perot cavities (LIGO Caltech, u.d)

En av förbättringarna som revolutionerat LIGO-teknik är användningen av *Fabry Perot cavities*. Som visat i Figur 3 genomförs detta genom att lägga till ytterligare speglar på interferometerarmarna. Dessa placeras nära stråldelaren för att lasern ska kunna studsas mellan speglarna i varje arm ungefär 300 gånger (LIGO Caltech, u.d). Efter detta rör de sig mot stråldelaren igen för att tillsammans åka in i detektorn som en enda laserstråle. Denna funktion bygger upp lasern i armarna vilket innebär att fler fotoner rör sig i armarna samtidigt. Ju fler fotoner, desto fler mätningar kan göras på skillnaden i armlängderna, vilket resulterar i mer precisa mätningar. Samtidigt kommer lasern röra sig en längre sträcka, cirka 1200 kilometer jämfört med de initiala 4 kilometerna, vilket ökar den effektiva skillnaden i längden som lasern åker i fallet av att gravitationsvågor passerar. Detta gör det alltså möjligt att mäta en större skillnad än innan, vilket i sin tur ökar precisionen i mättekniken.

Ytterligare en paradox är effekten på lasern. Initialt har den ingående lasern en effekt på ungefär 40 Watt, men för att interferometern ska vara brukbar behöver effekten ha ett värde på cirka 750 kW (LIGO Caltech, u.d).

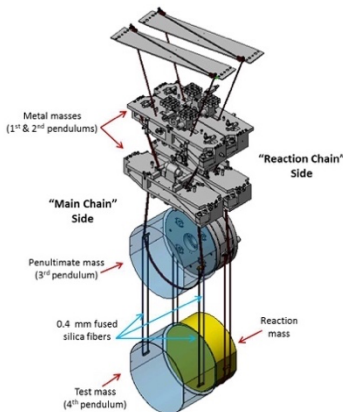


Figur 4. Förenklad visualisering av LIGO med fokus på återvinningspeglar (LIGO Caltech, u.d)

Som visat i Figur 4 används återvinningspeglar som består av en transparent sida och en reflektiv sida. Flertal av dessa speglar används men endast en visas i figuren. Fotoner från lasern passerar den transparenta sidan och rör sig mot stråldelaren för att sedan åka in i interferometerarmarna. Nästintill all laser åker sedan tillbaka till återvinningspeglarna innan den når detektorn. Samtidigt rör sig fler fotoner in i armarna eftersom lasern har ett konstant utskick. Det ljuset som redan rört sig genom armarna reflekteras in igen, vilket ökar lasereffekten som möjliggör ökad precision i detektionen.

## Isolering och optiska system

En av de viktigaste komponenterna i denna teknik är isoleringssystem. På grund av den höga precisionen mäter detektorn brus som kommer störa detektionen av eventuella gravitationsvågor. Detta kan innefatta tåg som kör förbi eller jordbävningar på andra sidan världen (LIGO Caltech, u.d). För att isolera komponenterna från omvärlden används aktiv vibrationsdämpning och passiv vibrationsdämpning. Den aktiva vibrationsdämpningen, även kallat *Internal Seismic Isolation system* (ISI) känner av vibrationer genom att ta upp en stor räckvidd av frekvenser för att sedan skicka in detta i en dator. Datorn modellerar därefter en brusmodell som rensar bort det initiala bruset. Den passiva vibrationsdämpningen består av en pendel som i sin tur består av fyra delar. Pendeln kallas för *Quad* och är till för att isolera detektorn från externt brus.



Figur 5. Illustration av en 4-stegs pendel som minskar bruset i interferometerens speglar (LIGO Caltech, u.d)

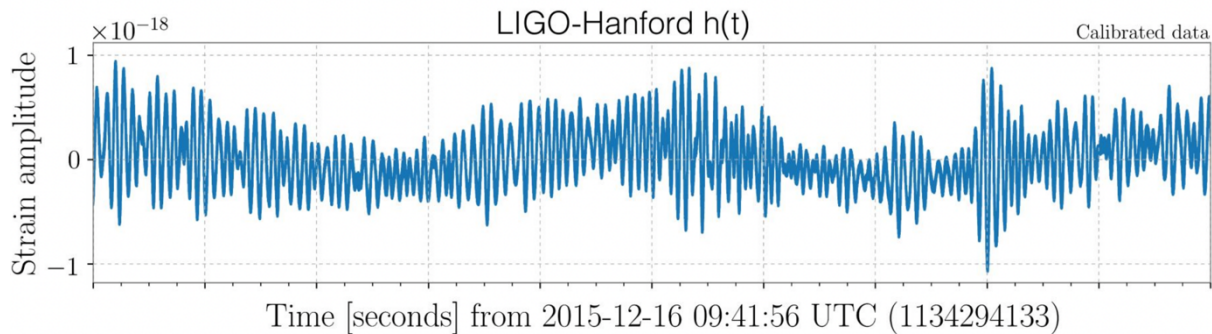
Pendeln består av en reaktionskedja och en huvudkedja. Den reaktiva hänger bakom huvudkedjan och bidrar till att hålla speglarna fria från oväntade vibrationer (LIGO Caltech, u.d). På så sätt lurar speglarna till att tro att de hänger fritt, utan störningar. Själva pendelkonfigurationen möjliggör absorption av näst intill allt brus som inte tas upp av det aktiva systemet.

En annan kritisk funktion för att minimera brus i speglarna är att interferometerarmarna är isolerade och opererar i vakuum. Exempel på problem som uppstår när luftmolekyler kommer in i rören är brus från partiklar som innehar en temperatur över den absoluta nollpunkten (LIGO Caltech, u.d). Samtliga partiklar som har en temperatur över 0 Kelvin rör sig genom deras värmeenergi, vilket stör speglarna i interferometern. När luftmolekyler kommer i vägen för lasern kan den även reflekteras och därav röra sig en längre sträcka än vad den andra strålen gör. Detta skapar ett oönskat interferensmönster i detektorn som kan misstas för gravitationsvågor. Om damm skulle lägga sig på någon av speglarna kan laserstrålen träffa och bränna dammet, vilket kan förstöra speglarna. För att skapa vakuum har metallarmarna värmts upp till temperaturer mellan 150-170°C för att få bort gasmolekyler i metallen. En annan metod som använts är att skapa elektriska laddningar i resterande molekyler för att sedan dra ut dessa med en magnet. På så sätt har ett tryck på  $10^{-12}$  atmosfärer uppnåtts i metalltuberna (LIGO Caltech, u.d).

Ännu en grundläggande del för denna högpreciserade teknik är att alla komponenter arbetar harmoniskt. Lasern som används startar som en laserdiod och transformeras i sinom tid upp till en laserstråle på 200 Watt. Laserdioden producerar en 4 Watts ljusstråle med en våglängd på 808 nanometer. Denna laser rör sig sedan genom två typer av oscillatorer, *Non-Planar Ring Oscillator* samt *High Powered Oscillator*, vars uppgift är att transformera strålen effekten till en stabil laserstråle med 200 Watt (LIGO Caltech, u.d).

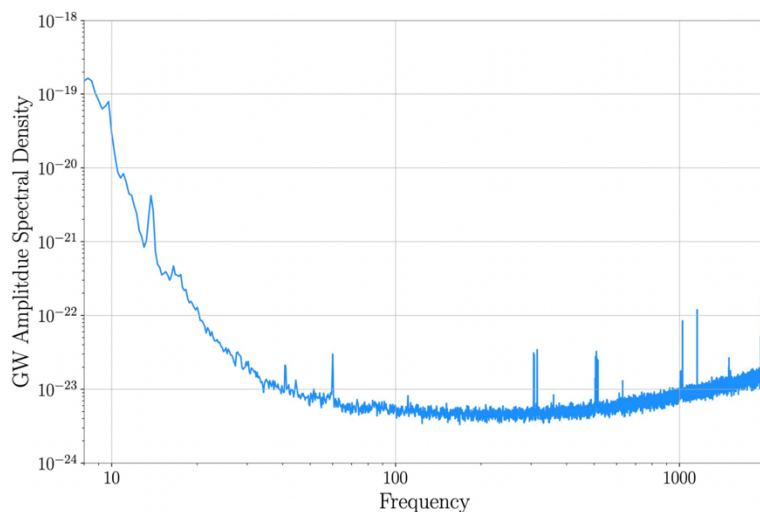
## Data- och signalhantering

LIGO använder sig av strängdata som baseras på skillnaden i armlängderna på interferometern, det som tidigare definierats som  $h$  (Macas, 2023). Strängdatan beskrivs som  $h(t)$  och beskriver därmed skillnaden i längderna över tid. LIGO mäter med en frekvens på 16384 Hz och fr därför 16384 mätningar i sekunden. Strängdatan är emellertid otydbar, och en stor del av datahanteringen handlar om att städa upp den data som tas in.



Figur 6. Strängdatan från LIGO Hanford, en av LIGOs interferometrar (Macas, 2023)

För att lättare tyda denna data kan små tidssegment observeras med hjälp av fourieranalys. Detta innefattar transformering från tidsplanet till frekvensplanet samt att fokusera på de viktigaste frekvenserna. Detektorn är känsligare på vissa frekvenser och är som känsligast runt 200 Hz. Vid lägre frekvenser stör markbruset för mycket, och vid lägre frekvenser tar kvanteffekter över. Eftersom detektorn är känsligare vid dessa frekvenser är det också rimligast att lägga mer tyngd på de frekvenserna. Signaler inom denna räckvidd är därför alltmer signifikanta statistiskt sett.



Figur 7. Medelsensitivitet i detektorn baserat på frekvensen (Macas, 2023)

Figur 7 visar medelsensitiviteten över signalfrekvensen. Denna sensitivitet kallas för spektraldensiteten och används sedan som en faktor i datasignifikansen. När en inkommande signal från strängdatan har en viss frekvens dividerats med spektraldensiteten för att göra signaler mer eller mindre signifikant. Denna process städar upp data som kan innehålla gömda signaler. Ytterligare ett effektivt sätt att observera signaler är genom att beskriva frekvensen beroende av tiden. Här krävs ytterligare transformeringar som q-transform (Macas, 2023). Q-transform tillåter signalrepresentation i tidsdomänen och frekvensdomänen samtidigt och är essentiell vid analys av signaler vars karaktär varierar över tid. Här används diagram med

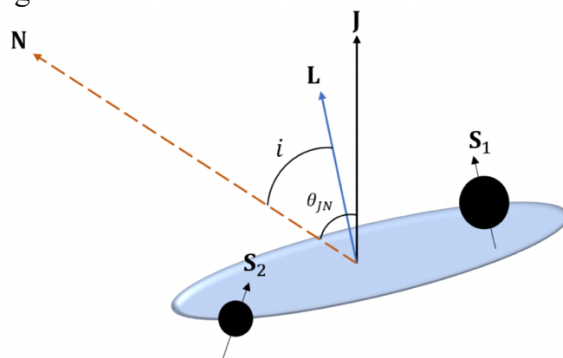
normaliserad energi som visar energin i speglarna för olika frekvenser över tid. Samtliga transformer görs i Python där programmeringsverktyg används för att förenkla processen.

### Att bedöma parametrar utifrån signalform

Beroende på vad som producerat gravitationsvågorna genereras olika signaler, och att veta vad som har producerat signalerna är än idag en utmaning. Olika signaler alternerar i amplitud, längd och generell form och hur signaler från specifika event bör se ut går att härleda från Albert Einsteins allmänna relativitetsteori med hjälp av numerisk relativitet (Wikipedia, 2024). Detta innefattar bruk av numeriska metoder för att approximera allmän relativitet. Bland annat superdatorer används i detta fall för att studera just svarta hål och neutronstjärnor, eftersom detta är omöjligt med penna och papper. Astronomiska event med olika parametrar analyseras omgående för att bygga teorier på hur händelsen ser ut. Vågformer approximeras sedan för olika typer av event. Flera tusentals vågformer har skapats och fungerar som forskningsverktyg där jämförelser görs med riktiga signaler för att bestämma eventuella parametrar. Parametrarna som vågformen ska innefatta beror på hur eventet karaktäriseras, alltså vad källan har för karaktärsdrag. Officiella definitioner av exempelvis svarta hål eller neutronstjärnor används i approximeringar för att skilja ett event från ett annat och många av dessa är fasta parametrar som inte går att ändra. Bland annat kan sammanslagningen av neutronstjärnor få flera olika utfall medan sammanslagning av två svarta hål endast resulterar i ett större svart hål (LIGO Caltech, 2016). Två neutronstjärnor kan slås samman till ännu en neutronstjärna som i sin tur kan snurra och ge ut ytterligare energi i form av gravitationsvågor. Andra parametrar såsom massa och avstånd till eventet, är fullt möjliga att alternera och vågformer kan därav skapas baserat på dessa. En annan parameter som ofta används är den dimensionslösa spinn som binära system innehar. Detta definieras ofta som

$$\frac{cJ}{GM^2}$$

där  $c$  är ljusets hastighet,  $J$  är objektens rörelsemängdsmoment,  $G$  är Newtons konstant och  $M$  är det objektens massa. Här är det dimensionella rörelsemängdsmomentet  $J = Mvr$ , där  $v$  är hastigheten och  $r$  avståndet till masscentrum.

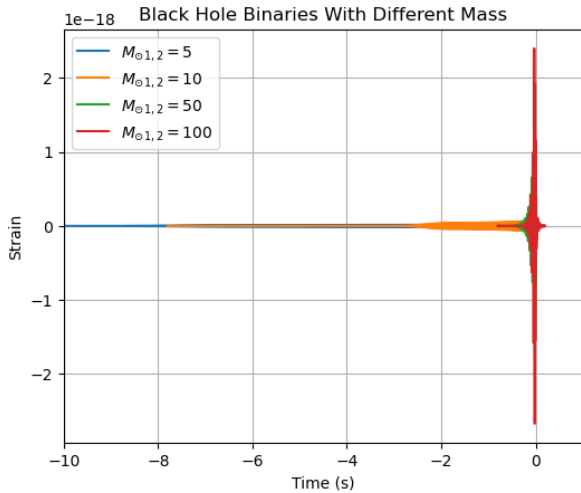


Figur 8. Representation av svarta hål och deras dimensionslösa spinn

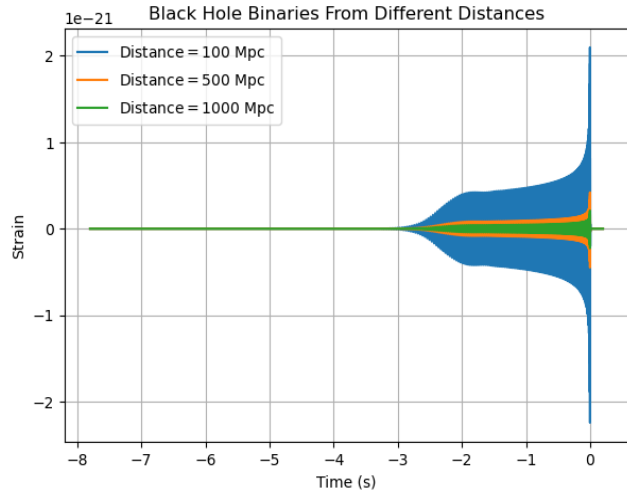
Objekten i systemet roterar alltså inte bara kring en gemensam rotationsaxel, utan roterar även kring en egen axel.

## Resultande signalformer

Genom att importera diverse signalformer in i Python kan parametrar ändras för att skilja på olika händelser. *IMRPhenomPv2* är en vågmodell som används frekvent i forskningssyfte och hanterar kollision av svarta hål med god plats för alternering av massa, avstånd och spinn. *TEOBResumS* är en vågmodell som hanterar kollision av neutronstjärnor. Däremot är det endast signaler upp till den faktiska kollisionen som modelleras eftersom signaler efter detta event inte studerats tillräckligt för att beskrivas med numerisk relativitet.

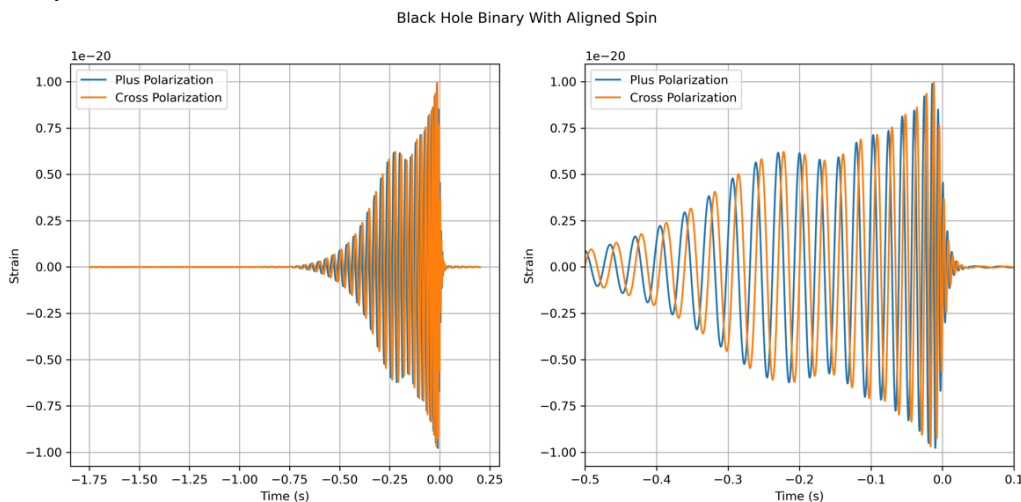


Figur 9. Kollision av svarta hål med olika massa



Figur 10. Kollision av svarta hål med olika avstånd till event

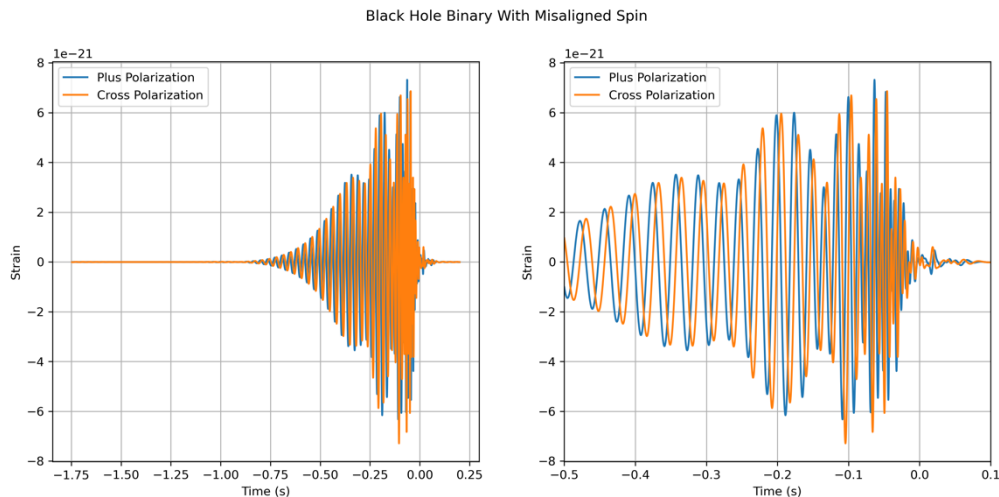
Figur 9 beskriver hur formen bör ändras beroende på massan av de två svarta hålen. Objekten har alltid lika stor massa jämfört med varandra där massenheten är antal solmassor. Ett  $M_{\odot}$ -värde på 5 representerar alltså 5 solmassor. Signalernas längd baseras på en undre frekvens på 30 Hz. Signallängden är per definition hur länge en signal över 30 Hz genereras och når jorden. Tiden 0 definieras som tiden när de två svarta hålen slås ihop. Figur 10 beskriver i stället hur strängdatan bör ändras beroende på avståndet till eventet. Enheten är parsec där 1 parsec är ungefär 3,26 ljusår. Även här har signalen en undre gräns på 30 Hz och tiden 0 definieras på samma sätt som innan.



Figur 11. Kollision av två svarta hål med samma spinn

Figur 11 illustrerar kollision mellan två svarta hål med samma spinn. Spinn kan delas upp i tre olika komponenter i x-, y- och z-led. Att ha samma spin betyder därav att spinnkomponenterna är detsamma för de båda svarta hålen. I figuren används endast z-

komponenten där spinn  $S_z$  har ett värde på 0,6 för båda objekten. Den högra figuren är samma data som den vänstra där skillnaden är att den högra har infört gränser på tidsaxeln. Utgångarna för denna graf är "plus" och "kors" polariseringar av gravitationsvågssignalen. Gravitationsvågor är, likt elektromagnetiska vågor, kategoriserade in i olika polariseringar (Wikipedia, 2024). Dessa polariseringar kallas ofta för plus (+) och kors (x)-polarisering och refererar till mönstret av rummets sträckning och kompression när gravitationsvågen passerar.

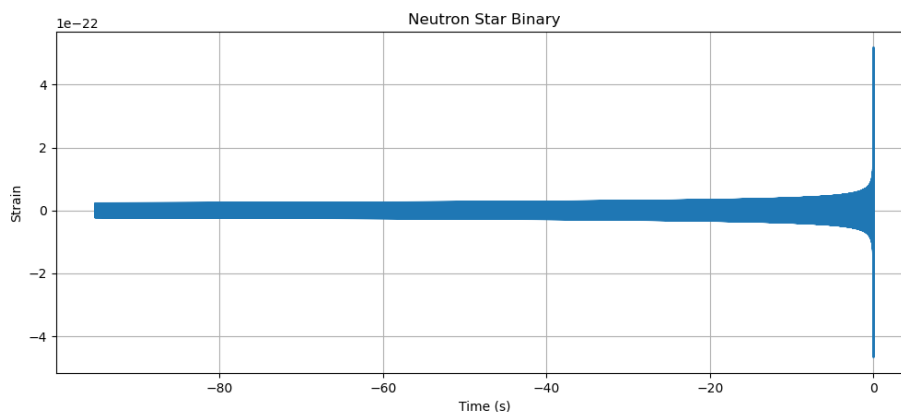


Figur 12. Kollision av två svarta hål med olika spin

Figur 12 visar hur en kollision mellan två svarta hål med olika spinn bör se ut. Samtliga spinnkomponenter bestämdes som följande:

$$S_{1x} = 0,1; S_{1y} = 0,6; S_{1z} = 0,6; S_{2x} = 0,5; S_{2y} = 0,2 \text{ och } S_{2z} = 0,5.$$

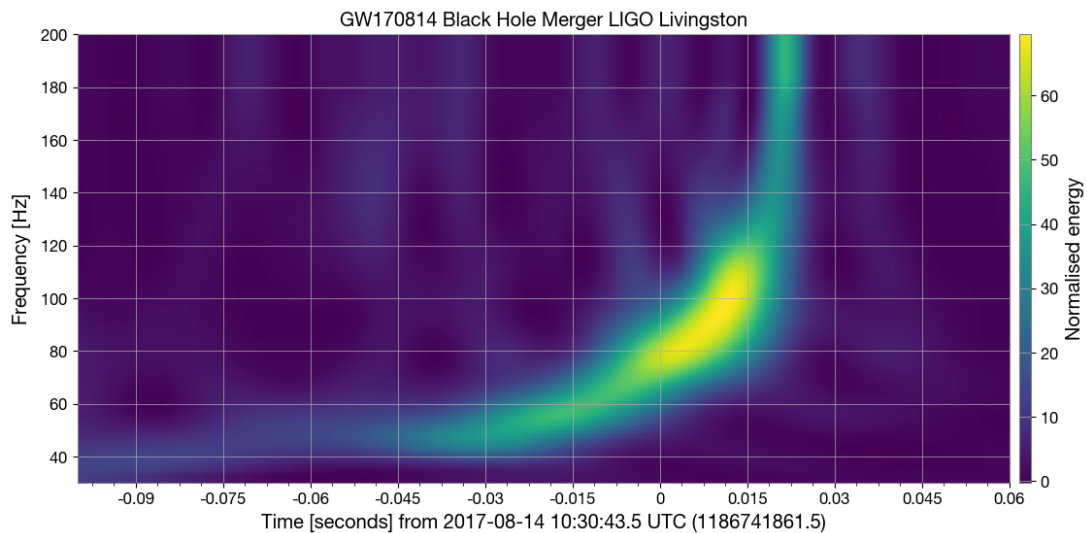
Spinnvärdena bestämdes slumpmässigt eftersom målet var en illustration av hur olika spinnvärden påverkar signalformen. Utgångarna för denna graf är plus- och korspolarisering. Den högra figuren är samma data som den vänstra där skillnaden är att den högra har infört gränser på tidsaxeln.



Figur 13. Kollision av neutronstjärnor

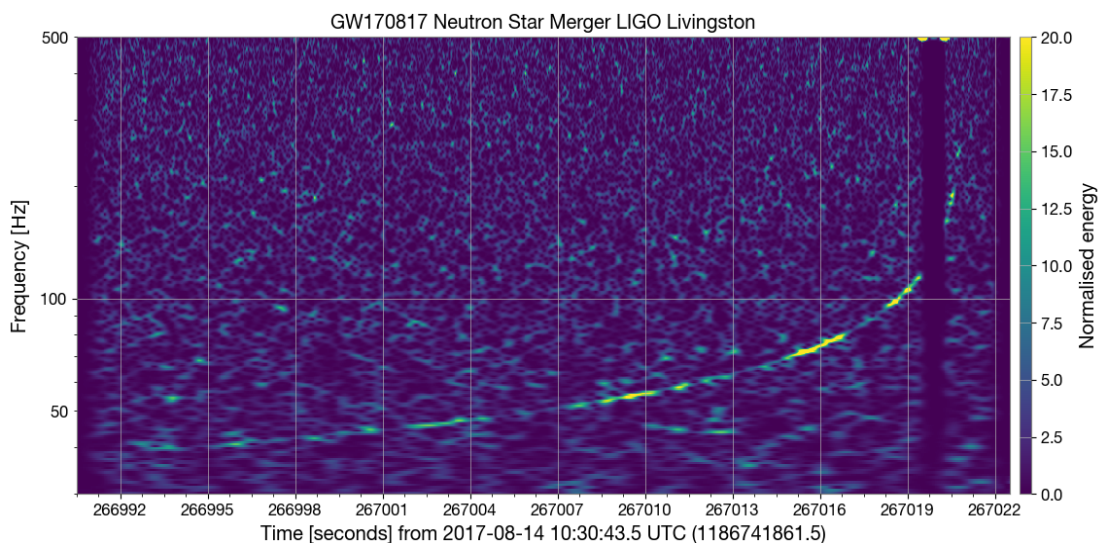
Figur 13 beskriver hur signaler från en kollision mellan två neutronstjärnor bör se ut. Här används approximationsmodellen *TEOBResumS* och som nämnt så modellerar denna endast signaler fram till kollisionen. Avståndet till det genererade eventet bestämdes till 40 megaparsec och signalen har en undre gräns på 30 Hz.

Förutom modellering av signaler i detta plan går det att representera signaler på ytterligare vis. Genom spektrografi kan signalerna representeras i frekvens- och tidsplanet samtidigt. En tredje dimension definieras som intensiteten av en viss frekvens vid en viss tidpunkt (Wikipedia, 2024). Spektrogram visar spektraldensiteten för varje tid vid representation av tid och frekvens. Denna data går sedan att filtrera genom q-transform som gör det möjligt att välja ut olika karaktärer vid olika frekvenser. Genom att ladda ner GPS-tiden från olika event samt dess data från *Gravitational Wave Open Science Center* (GWOSC, 2020) kan riktiga event analyseras genom spektrografi. Detta skiljer sig från innan där endast modelleringar använts.



Figur 14. Spektrogram av event GW170814

Figur 14 beskriver eventet GW170814 som har sitt ursprung i sammanslagningen av två svarta hål. Bakgrundsfärgen representerar bakgrundsbruset i speglarna vilket är energin som speglarna normalt rör sig med när inga större signaler påverkar dem. För enkelhetens skull benämns detta som nollenergin. Mellan  $t = 0$  och  $t = 0,015$  utsöndras mest energi och detta sker vid frekvenserna 80-120 Hz. Tiden 0 är den tiden som signalen från sammanslagningen inträffar. Den fullständiga signalen är synlig i cirka 0,12 sekunder. Data från detektorn LIGO Livingston användes.



Figur 15. Spektrogram av event GW170817, den första detekterade kollisionen av två neutronstjärnor

Figur 15 beskriver eventet GW170817 som har sitt ursprung i sammanslagningen av två neutronstjärnor. Detta var den första detekterade sammanslagningen av neutronstjärnor och konfirmerades även elektromagnetiskt när en gammablixt detekterades av bland annat Fermifarkosten (Wikipedia, 2024). Signalen är i diagrammet synlig i cirka 30 sekunder och genererar mest energi vid 50 Hz vid  $t = 267010$  samt vid cirka 75 Hz vid  $t = 267016$ . Det saknas information mellan  $t = 267019$  och  $t = 267022$  vilket beror på en störning i detektorn under denna tidpunkt. Här används *gating* som är en metod för att ta bort störningar som uppkommit. Detta slår ut störningen och raderar den data som var involverad. Det är ungefär vid den tidpunkten som sammanslagningen av neutronstjärnorna sker. Detektorn LIGO Livingston användes för att illustrera hantering av datastörningar.

## Analys och diskussion

### Implikationer

Resultat presenterades som tydligt skildrar hur somliga parametrar påverkar signalformen från gravitationsvågor. Figur 9 illustrerar hur signalen påverkas av parametern massa. Lägre massa resulterade i längre signaler med lägre amplitud än de med större massa. Detta kan bero på att lägre massa på objekten inte attraherar varandra lika mycket som en större massa hade gjort. Därför kan det ta längre tid för sammanslagningen att ske. En annan slutsats som är möjlig att göra gällande amplituden är ju lägre massa, desto mindre våldsamt är sammanslagningen. Detta kan förklara varför amplituden minskar signifikant vid just sammanslagningen för svarta hål med lägre massa. Två svarta hål med relativt stora massor, i detta fall som högst 100 solmassor, kan ge kortare signaler eftersom de påverkas av en större kraft och kommer därför accelerera in i varandra snabbare än vad svarta hål med relativt låg massa gör. Sammanslagningen mellan de två svarta hålen med 5 solmassor som massa går att observera i cirka 10 sekunder, medan sammanslagningen som involverade svarta hål med 100 solmassor som massa endast är observerbar i ungefär 1 sekund. Ökningen på en faktor 20 för massan resulterar därför i en signal som endast är en tiondels så lång som den var innan. Viktigt att notera är att dessa endast är modeller och förenklingar av verkligheten genom numerisk relativitet. Däremot får slutsatser fortfarande att dras eftersom förändringar i parametrarna klart och tydligt tyder på dessa implikationer.

Figur 10 illustrerar hur signalen påverkas av avståndet till eventet, det vill säga, hur långt ifrån jorden som sammanslagning sker. Högre avstånd till eventet resulterar i kortare signaler med högre amplitud än de signalerna som kommer från event längre bort. Detta kan bero på ett antal saker, bland annat kosmisk friktion och rödförskjutning. Som nämnt genom Figur 1: Energidensiteten i gravitationsvågor över vågtalet, beroende av en kosmisk friktion  $\alpha M$  (Danell, 2023, s. 8) tror forskare att det finns en sorts kosmisk friktion i rymden. Denna friktion kan minska energidensiteten i gravitationsvågorna vilket, vid en lång färd för att nå jorden, resulterar i lägre energi och därav lägre signalamplitud. Detta kan vara en faktor till resultaten men det förklarar inte varför signaler från event längre bort är signifikant längre än de nära oss. Detta kan förklaras med fenomenet rödförskjutning som inte bara påverkar elektromagnetiska vågor utan även gravitationsvågor. När universum expanderar förlängs vågorna som propagerar genom rymden i takt med att rummet förstoras. Det går att liknas med två punkter på en gummisnodd med ett absolut avstånd mellan varandra men som ändras om gummisnodden dras ut. På samma sätt som avståndet mellan dessa två punkter blir längre när gummisnodden dras ut, trots att det är samma punkter, kan signalvågorna förlängas avsevärt om de propagerar genom rymden tillräckligt länge. Vetenskapen om detta skulle kunna ge upphov till en ny och komplementär metod till att beräkna universums expansion genom att analysera förskjutningen i våglängden för gravitationsvågor. Om andra parametrar, såsom massa och spinn, studeras tillräckligt bör man kunna ta hänsyn till hur signalen skulle sett ut om eventet var oss närmare. På så sätt kan man modellera rödförskjutning för att i sin tur bestämma universums expansion, som således kan hjälpa forskare precisera universums ålder.

Figur 13 samt Figur 15 är de enda resultaten som representerar sammanslagning av neutronstjärnor. Neutronstjärnor är statistiskt sett underrepresenterade och det krävs mer forskning för att kunna precisera teorier bakom dessa. Däremot visar båda figurer längre signaler än de från svarta hål. Figur 13 visar en signal som pågår i mer än 100 sekunder upp till kollisionen. Signalformen vid kollisionen ska inte tas hänsyn till eftersom modellen som användes inte modellerar denna tidpunkt. Eftersom neutronstjärnor har en lägre massa än

svarta hål är en möjlig anledning till denna fördröjda signal just att objekten inte accelererar in i varandra lika snabbt som objekt med större massa. När neutronstjärnor slås ihop kan detta även resultera i ännu en neutronstjärna som i sin tur genererar kontinuerliga gravitationsvågor. Därför kan signalerna fortsätta efter kollision, men eftersom dessa modeller endast behandlar signaler från en sammanslagning kan inte detta sägas med säkerhet. Det går däremot att anta att dessa signaler kommer se annorlunda ut jämfört med de från sammanslagningen.

### **LIGO som hjälpmedel**

LIGO är ett etablerat forskningsprojekt som blir mer och mer precis för varje dag. Tekniken spelar en avgörande roll i detektion av gravitationsvågor samt parameteruppskattning av kosmiska event genom att validera teoretiska modeller härledda från numerisk relativitet. Egenskaper hos detekterade event uppskattas dels genom jämförelse med förutspådda signalformer, dels genom otrolig precision. Genom att inkorporera interferometerteknik, isolering och brusmodellering opererar LIGO med världsklassig precision där längden så små som en tusendel av en proton ger utslag i detektorerna. Genom bland annat spektrogram, transformering och ytterligare komplex dataanalys kan signalerna som kommer in i detektorn gå från otydbara data till exakta kopior av förutspådda vågformer. Genom att kombinera data från LIGO och andra gravitationsvågsobservatorier runt om i världen kan noggrannheten i parameteruppskattning förbättras vilket minskar osäkerheten i signalerna. Emellertid står LIGO inför tekniska besvär där det finns absoluta gränser för hur små skillnader i längd som går att mäta. Vid höga frekvenser dominerar kvanteffekter och det blir, med denna teknik, omöjligt att mäta gravitationsvågor med högre frekvens. Även kontinentalplattornas rörelse kan påverka precisionen vilket resulterar i tekniska utmaningar som inte går att lösa här på jorden. Ambitioner att göra ett större projekt i rymden kan därför tas hänsyn till. Samtidigt som olika störningar som jorden tillför försvinner så kan en rymdbaserad interferometer stå för andra hinder som rymdskrot eller annat som kolliderar med interferometern. Trots brister är LIGO-projektet banbrytande för forskning på gravitationsvågor och garanterar en mycket lovande framtid inom fältet gravitationsvågor.

Upptäckten av gravitationsvågor stärker den allmänna relativitetsteorin. Eftersom de direkt härleddes från fältekvationerna för den allmänna relativitetsteorin står gravitationsvågor som ett starkt stöd i att denna teori även stämmer övergripande. Existensen av gravitationsvågor är inte bara ett verktyg för att stärka fysikaliska teorier, utan används också för att testa nya teorier och sätta andra på prov. Att kunna observera händelser utan elektromagnetisk strålning tillhandahåller ett effektivt forskningsalternativ som bland annat kan precisera expansionen av universum. Den kosmologiska modellen, som både delar in universum i olika eror och säger att universums expansion accelererar, är fundamental för en förståelse av världen vi lever i. Däremot finns fortfarande frågor som modellen inte svarat på ännu. Att studera gravitationsvågor från olika källor och tider i universum kan ge oss en förklaring till hur universum i sig har bildats. Trots att denna forskning inte kan svara på varför universum expanderar kan studier göras på gravitationsvågor från bland annat den kosmiska inflationen vilket är en tid vi inte vet mycket om. Att kunna utforska händelser från universums begynnelse är essentiellt för vår förståelse om universum, och detta är något som gravitationsvågor har potential att utföra.

## Källförteckning

Abbott, B. P., 2016. Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger. *Physical Review Letters*, 12 Februari, pp. 1-2.

Brandenberger, R., 2011. Introduction to Early Universe Cosmology. *Proceedings Of Science*, 11 Mars, pp. 1-2.

Danell, L., 2023. *Determining the Energy Density of Stochastic Gravitational Waves While Considering Cosmic Friction*, Bålsta: Research Academy For Young Scientists.

Gravitational Wave Open Science Center, u.d. *About GWOSC*. [Online]  
<https://gwosc.org/about/>  
[Använd 4 December 2023].

GWOSC, 2020. *Observatory Data Sets*. [Online]  
<https://gwosc.org/data/>  
[Använd 27 Mars 2024].

GWOSC, 2023. *Gravitational Wave Open Data Workshop*. [Online]  
<https://gwosc.org/odw/odw2023/>  
[Använd 27 Mars 2024].

LIGO Caltech, 2016. *LIGO Celebrates First Anniversary of Historic Gravitational Wave Detection!*. [Online]  
<https://www.ligo.caltech.edu/news/ligo20160914>  
[Använd 27 Mars 2024].

LIGO Caltech, u.d. *About*. [Online]  
<https://www.ligo.caltech.edu/page/about>  
[Använd 27 Mars 2024].

LIGO Caltech, u.d. *Sources and Types of Gravitational Waves*. [Online]  
<https://www.ligo.caltech.edu/page/gw-sources>  
[Använd 3 Mars 2024].

LIGO Caltech, u.d. *What Is An Interferometer?*. [Online]  
<https://www.ligo.caltech.edu/page/what-is-interferometer>  
[Använd 14 December 2023].

LIGO Caltech, u.d. *What is LIGO?*. [Online]  
<https://www.ligo.caltech.edu/page/what-is-ligo>  
[Använd 14 Februari 2024].

Macas, R., 2023. *Data Quality*. New Delhi, Gravitational Wave Open Science Center. Nationalencyklopedin, 2023. *kosmologi*. [Online]  
<https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/kosmologi>  
[Använd 11 10 2023].

Nationalencyklopedin, 2023. *Vågtal*. [Online]  
<https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/v%C3%A5gtal>  
[Använd 7 September 2023].

Nationalencyklopedin, u.d. *Om oss*. [Online]  
<https://www.ne.se/info/om-oss/>  
[Använd 4 December 2023].

Nationalencyklopedin, u.d. *Relativitetsteorin*. [Online]  
<https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/relativitetsteorin>  
[Använd 24 Januari 2024].

Niklasson, V., 2021. *Speciell relativitetsteori i gymnasieskolan*, Uppsala: Uppsala universitet.  
Riles, K., 2013. Gravitational waves: Sources, detectors and searches. *Progress in Particle and Nuclear Physics*, u.d u.d, pp. 1-54.

Stockholms universitet, u.d. *Yutong He*. [Online]  
<https://www.su.se/english/profiles/yuhe7392-1.513126?open-collapse-boxes=>  
[Använd 6 December 2023].

Wikipedia, 2023. *Michelson–Morley experiment*. [Online]  
[https://simple.wikipedia.org/wiki/Michelson%E2%80%93Morley\\_experiment](https://simple.wikipedia.org/wiki/Michelson%E2%80%93Morley_experiment)  
[Använd 30 December 2023].

Wikipedia, 2023. *Newtons rörelselagar*. [Online]  
[https://sv.wikipedia.org/wiki/Newtons\\_r%C3%B6relselagar](https://sv.wikipedia.org/wiki/Newtons_r%C3%B6relselagar)  
[Använd 15 Januari 2024].

Wikipedia, 2023. *Speciella relativitetsteorin*. [Online]  
[https://sv.wikipedia.org/wiki/Speciella\\_relativitetsteorin](https://sv.wikipedia.org/wiki/Speciella_relativitetsteorin)  
[Använd 30 December 2023].

Wikipedia, 2023. *Wikipedia:Grundprinciperna*. [Online]  
<https://sv.wikipedia.org/wiki/Wikipedia:Grundprinciperna>  
[Använd 7 December 2023].

Wikipedia, 2024. *Chandrasekhar limit*. [Online]  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Chandrasekhar\\_limit](https://en.wikipedia.org/wiki/Chandrasekhar_limit)  
[Använd 21 Mars 2024].

Wikipedia, 2024. *Gravitational wave*. [Online]  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Gravitational\\_wave](https://en.wikipedia.org/wiki/Gravitational_wave)  
[Använd 7 Februari 2024].

Wikipedia, 2024. *GW170817*. [Online]  
<https://en.wikipedia.org/wiki/GW170817>  
[Använd 28 Mars 2024].

Wikipedia, 2024. *Numerical relativity*. [Online]  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Numerical\\_relativity](https://en.wikipedia.org/wiki/Numerical_relativity)  
[Använd 27 Mars 2024].

Wikipedia, 2024. *Spectrogram*. [Online]  
<https://en.wikipedia.org/wiki/Spectrogram>  
[Använd 27 Mars 2024].

Virgo, B. A. e. a. (. S. C. a., 2019. GWTC-1: A Gravitational-Wave Transient Catalog of Compact Binary Mergers Observed by LIGO and Virgo during the First and Second Observing Runs. *Physical Review*, 4 September, p. 49.