

Upptäckten av gravitationsvågor

Peter Johansson
Institutionen för Fysik
Helsingfors Universitet

Fysikersamfundet i Finland - Årsmöte
Helsingfors, 16.03.2016

Vad är gravitationsvågor?

- Gravitationsvågor som ett fenomen förutspåddes av Albert Einstein år 1916 baserad på hans **allmänna relativitetsteori**.

Rymtidens geometri $G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\alpha\beta}$ Rymtidens materia och energi

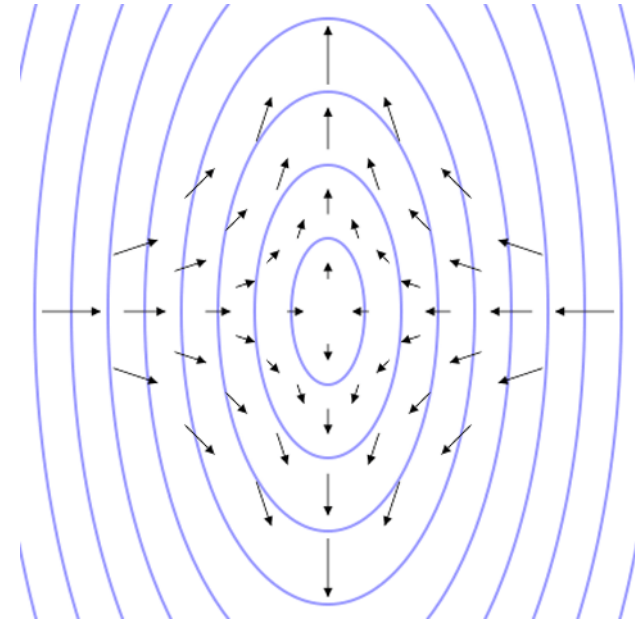
- Gravitationsvågorna är **krusningar i rumtidens metrik** och de transporterar energi som gravitations-strålning, som utbreder sig med ljusets hastighet.
- Genom en linjär approximation kan vi ur Einsteins ekvation härleda: $\square \bar{h}_{\mu\nu} = -16\pi G T_{\mu\nu}$ $\square = -\partial_t^2 + \nabla^2$
- Det här är en vågekvation, där $h_{\mu\nu}$ beskriver gravitationsvågens amplitud (eng. strain), dvs. **den relativa ändringen i avstånd inom rumtiden**:

$$\bar{h}_{\mu\nu} \propto \delta l / l$$



Hur genererar man gravitationsvågor?

- Gravitationsstrålningen uppstår när massfördelningens **kvadrupol-moment varierar i tiden** (jämför med dipolmomentet för elektromagnetisk strålning).
$$\bar{h}_{ij}(t, \bar{x}) = \frac{2G}{r} \frac{d^2 I_{ij}}{dt^2}(t_r)$$
- En passerande gravitationsvåg tänjer på rumtiden i **två ortogonala riktningar**.
- Gravitationsvågor **genereras av starka gravitationsfält, som varierar mycket snabbt**, dvs. med en hastighet nära ljusets hastighet ($v \sim c$).



Animation av gravitationsvågor

$$h \sim \frac{GM}{c^2} \times \frac{1}{r} \times \left(\frac{v}{c}\right)^2$$



Hurdana objekt ger upphov till gravitationsvågor?

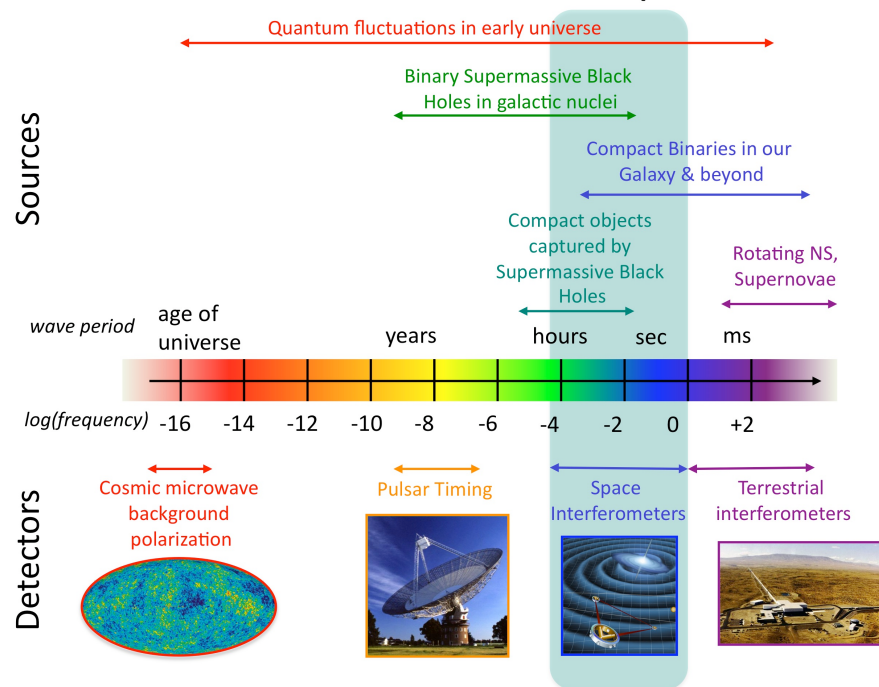
- Svarta hål och neutron stjärnor som roterar runt varandra i en omlopps-bana producerar starkt varierande gravitationsfält: -> gravitationsvågor.

- Uppskattad frekvens f och amplitud h :

$$f = \frac{\Omega}{2\pi} \sim \frac{cR_S^{1/2}}{10R^{3/2}} \quad h \sim \frac{R_S^2}{rR}$$

- $R_S = 2GM/c^2$ är objektets Schwarzschild radie, som är 3 km för ett objekt med en solmassa.

The Gravitational Wave Spectrum



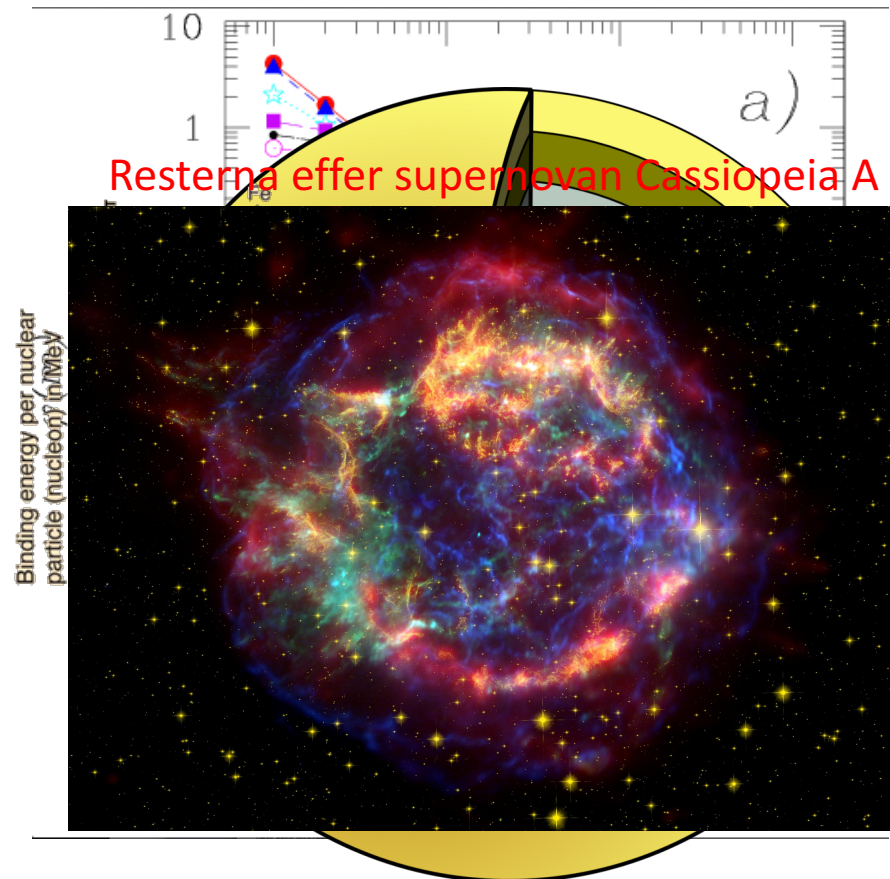
- Två svarta hål med 10 solmassor var i en omloppsbana på ett avstånd av 100 Mpc:

$$f \sim 100 \text{ Hz} \quad h \sim 10^{-21}$$



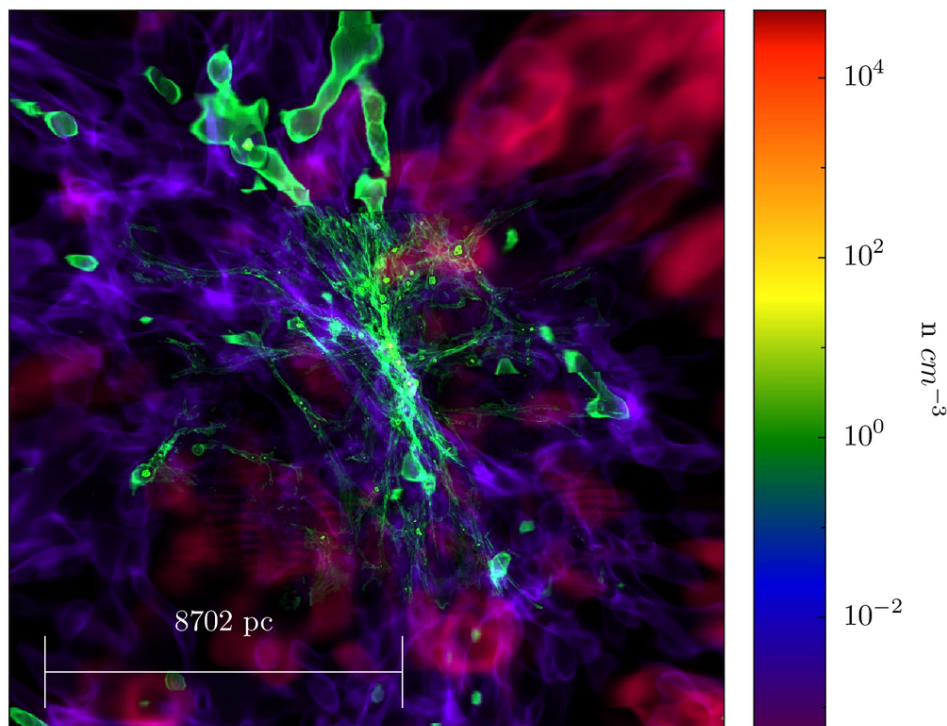
Uppkomsten av små svarta hål

- **Mängden av svarta hål:** Bara massiva stjärnor ($M \geq 15-20 M_{\odot}$) lämnar efter sig svarta hål, då dom dör. De flesta stjärnor har mycket mindre massor, och bara ungefär var tusende stjärna är tillräckligt massiv för att bilda ett svart hål.
- **Stjärnans struktur:** Mot slutet av sitt liv påminner en massiv stjärna en "lök" och fusionen sker i flera olika skal.
- **Slutet på fusionen:** Till slut har stjärnans kärna fusionerat sig hela vägen till järn och här stannar fusionen av, eftersom ytterligare fusion kräver mer energi än vad man får ur processen.
- **Supernova:** Stjärnan blir instabil och dess yttre delar exploderar i en supernova. Kärnan kan kollabera till ett svart hål om dess massa överstiger 3 solmassor.



Uppkomsten av supermassiva svarta hål

En simulation gjord av vår forskningsgrupp som beskriver uppkomsten av ett supermassivt svart hål i det tidiga Universumet.



- **Inga metaller:** I det mycket tidiga Universumet fanns det ännu inga grundämnen, som var tyngre än väte och helium.

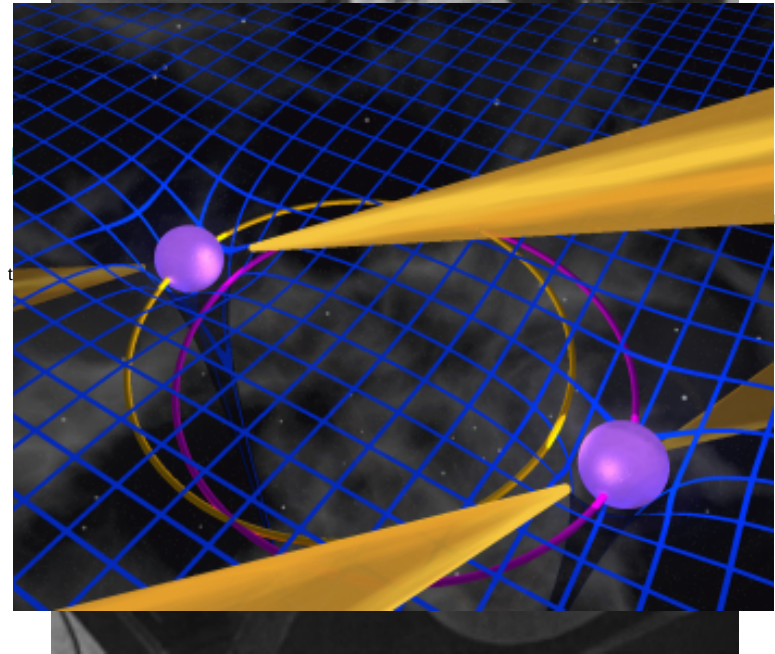
De första stjärnorna: Om det fanns molekylärt väte (H_2) i gasen kunde den kyla ner sig och kollabera. Resultatet blev massiva stjärnor, som senare kunde ge upphov till svarta hål.

Direkta svarta hål: Om det inte fanns molekylärt väte var nedkylningen av gasen mycket ineffektiv och då var det möjligt att stora gasmoln kollaberade direkt till relativt stora svarta hål med massor i storleksordningen: $M_{BH} \sim 10^4 - 10^5 M_{\odot}$.

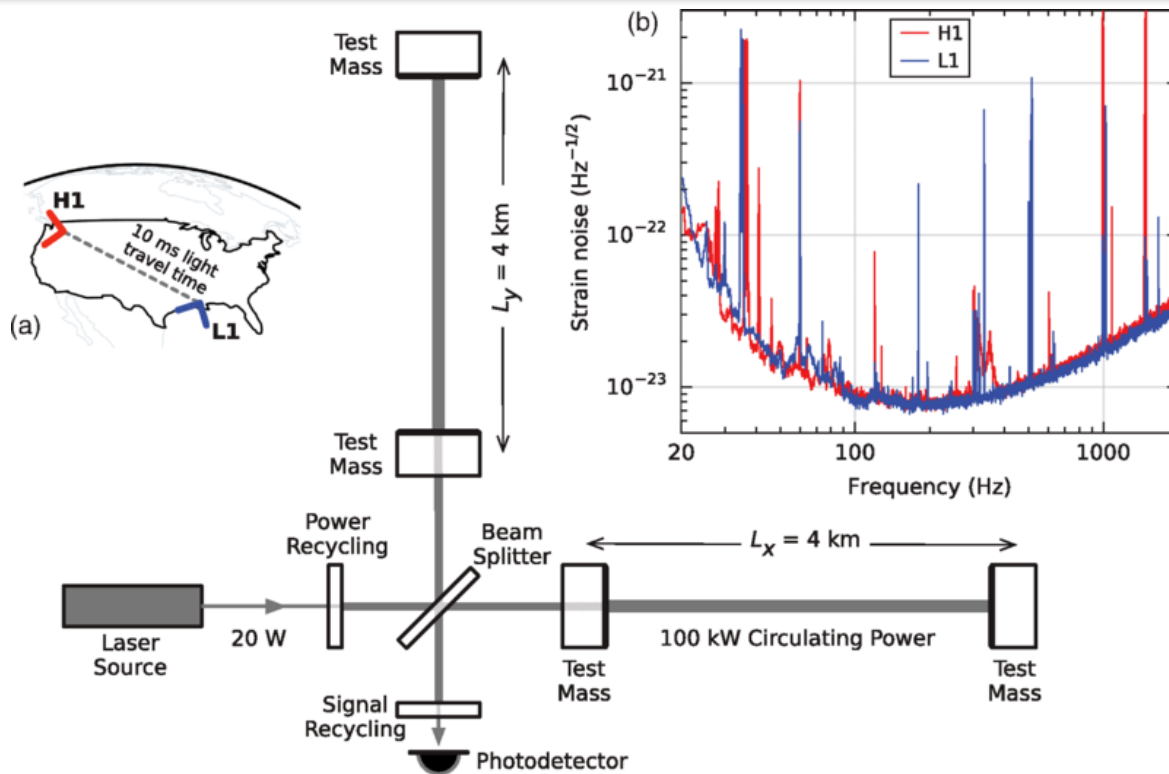


En kort historik: Observationer av gravitationsvågor

- Efter Einsteins förutsägelse år 1916 gick det nästan 50 år innan gravitationsvågorna accepterades som ett reellt fenomen som kan observeras.
- På 1960-talet utvecklade Joseph Weber de första "gravitationsantennerna" som var avlånga metallcylindrar.
- Idé: Gravitationsvågor skulle kunna observeras med en laserinterferometer (1962, Gertsenshtein och Pustovoit; 1972, Rainer Weiss (MIT)).
- Indirekt observation av gravitationsvågor från dubbelpulsaren 1974, Hulse & Taylor Nobelpriset 1993.
- Planeringen av LIGO ledd av Kip Thorne (Caltech) och Rainer Weiss (MIT), 1979.



LIGO: Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory



- LIGO består av **två L-formade laser-interferometrar**, en i Louisiana och en i Washington.
- **Armarna är 4 km långa** och laserstrålen reflekteras fram och tillbaka 400 gånger. Normalt interfererar laser-ljuset destruktivt och man får ingen signal ut.

LIGO II

- Om en av armarna ändrar sin längd bryts interferensmönstret och vi ser en signal.
- **Observatorierna mäter sin omgivning** med seismometrar, accelerometrar, mikrofoner, magnetometrar, radioantennor, väderleksmonitorer, elnätverksdetektorer och detektorer för kosmisk strålning.
- **Svårigheter:** Laserljusets spridning (vakuum), laserns "shot-noise" från enskilda fotoner, skakningar (passiva och aktiva motverkningar), speglarnas värmerörelse, Jordens krökning på 4km, etc.

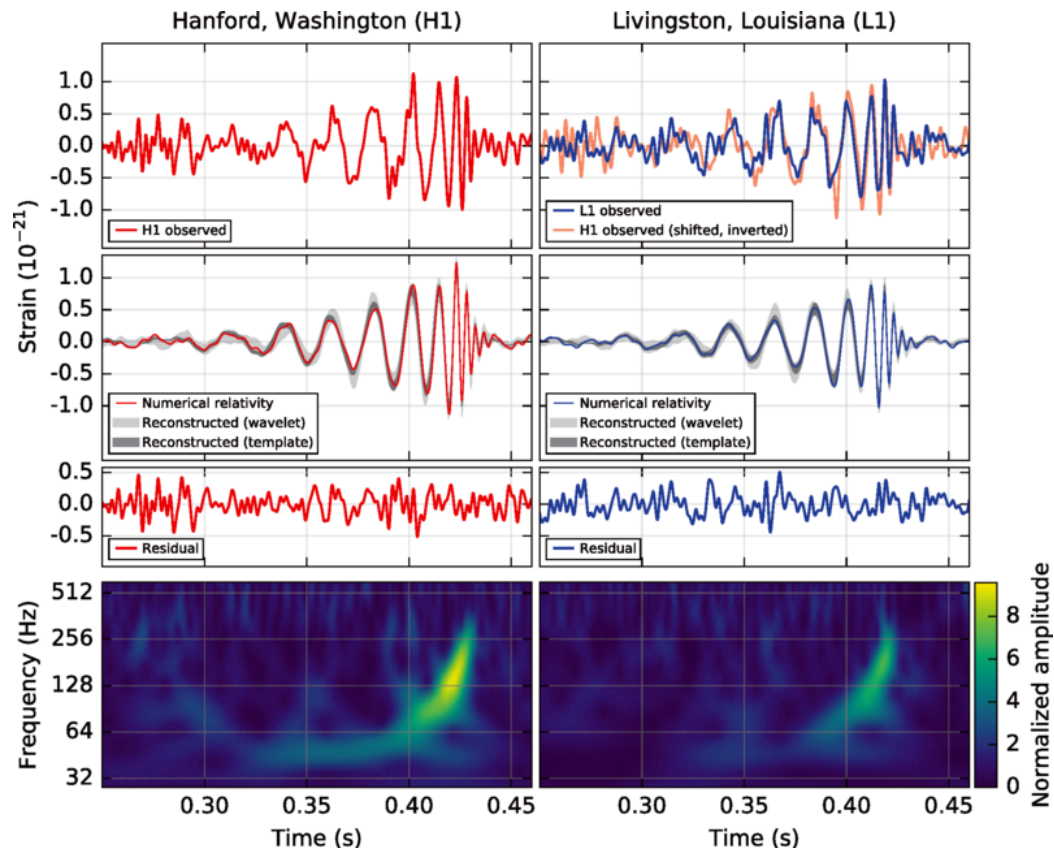


LIGO: Hanford observatoriet i Washington

Observationen av GW150914 I

7 ms tidsskillnad

- **Advanced LIGO** började sina observationer förra sommaren och den 14 September, 2015, 09:50:45 UTC upptäcktes den första gravitationsvågen.
- Under 0.2 s ökar signalen från **35 till 150 Hz över 8 perioder** och den bästa förklaringen är en kollision av **två svarta hål med $M_1=36 M_\odot$ och $M_2=29 M_\odot$** på ett avstånd av **410 Mpc**, som motsvarar en rödförskjutning av $z=0.09$.

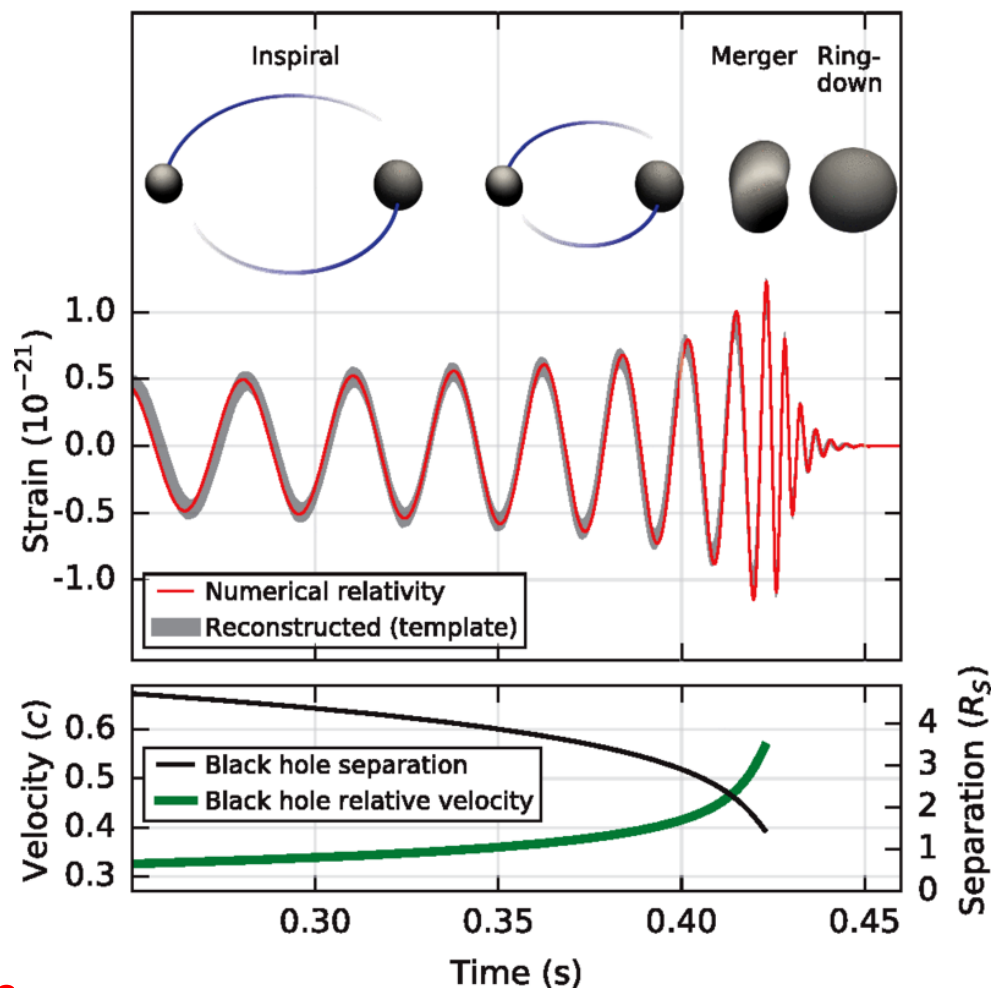


Observationen $h=10^{-21}$ motsvarar en relativ längdförändring som är en 10 000 del av en protons diameter!



Observationen av GW150914 II

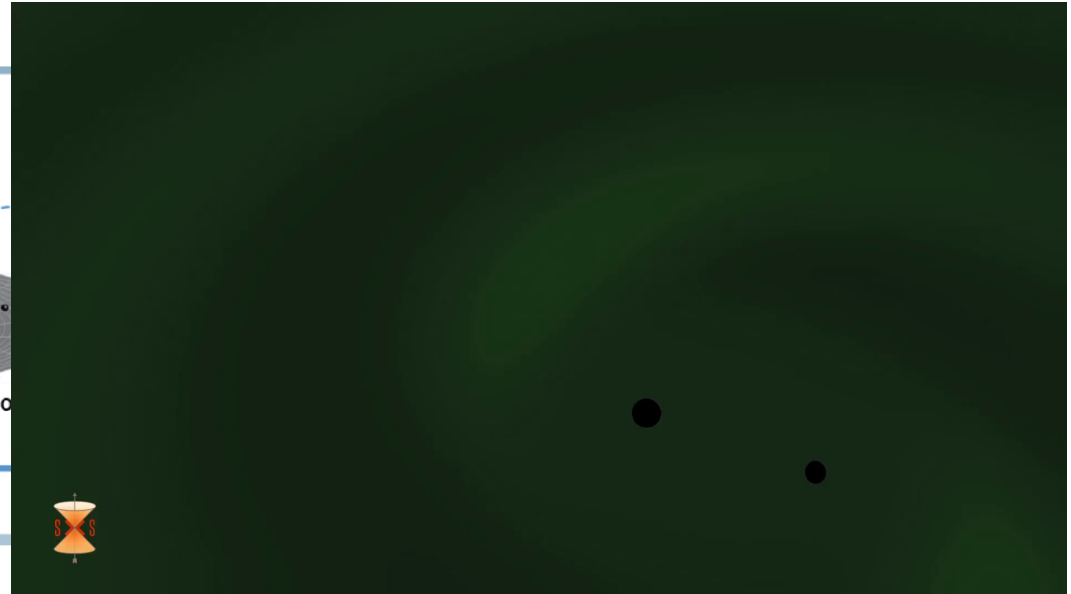
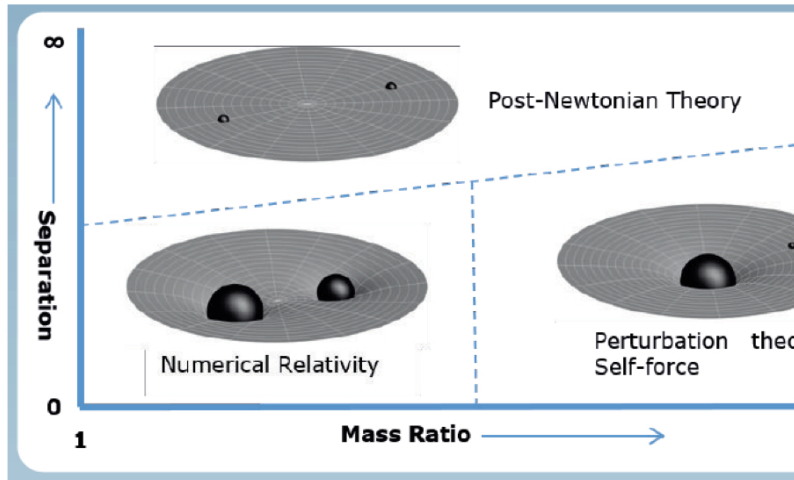
- Objekten **måste vara kompakta svarta hål**, eftersom de rör sig med en banfrekvens av 75 Hz som motsvarar ett avstånd på bara 350 km.
- Efter kollisionen kan vi observera **"ringdown"**-fenomenet i vilket det nya svarta hålet sätter sig i en ny Kerr konfiguration.
- Det nya svarta hålet har en massa på **$62 M_{\odot}$ och $3 M_{\odot}$ strålas bort i gravitationsvågor**.
- I en bråkdel av en sekund strålar objektet gravitationsvågor med en luminositet som är **10 gånger större än ljusenergin från alla galaxer och stjärnor i hela Universumet**.



$$\dot{M} = \frac{(m_1 m_2)^{3/5}}{(m_1 + m_2)^{1/5}} = \frac{c^3}{G} \left[\frac{5}{96} \pi^{-8/3} f^{-11/3} \dot{f} \right]^{3/5}$$

Teori och simulationer

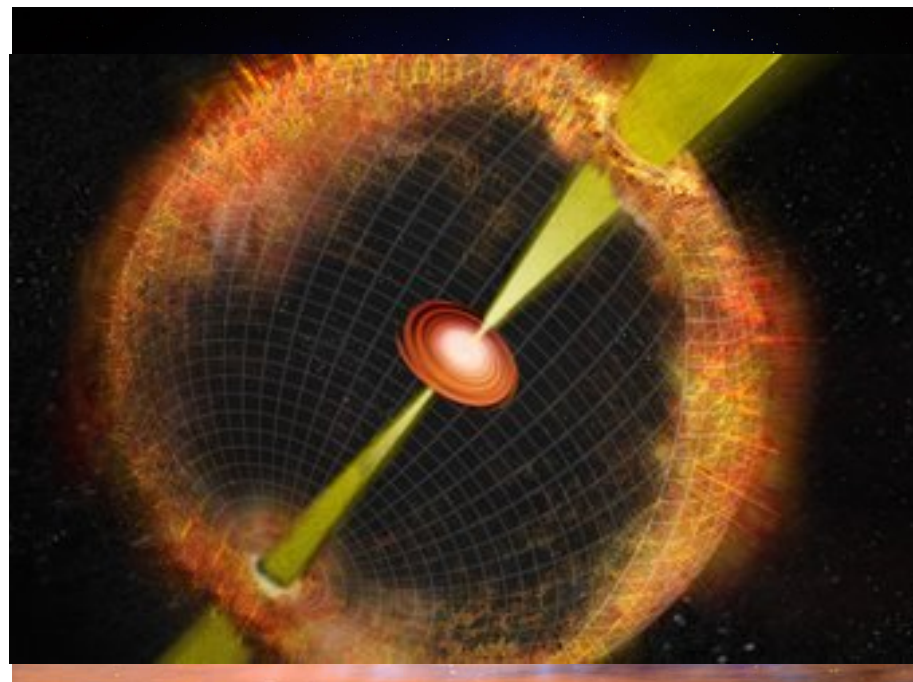
LIGO simulation



- Framstegen inom den numeriska relativitetsteorin har varit också **mycket viktiga**, eftersom vi kan nu förutspå i detalj hur en signal från gravitationsvågor borde se ut.
- Då avståndet mellan de svarta hålen är ännu relativt stort kan vi också beräkna de svarta hålens dynamik med en **Post-Newton teori** i vilken relativistiska termer läggs till Newton's gravitationsacceleration. Fungerar överraskande bra ner till $\sim 10 R_s$.
I vår forskningsgrupp görs den här typen av simulationer också.

Gravitationsastronomi: En ny tidsålder

- **Ett direkt bevis för svarta hål:** Stjärnorna, som gav upphov till de två svarta hålen med 29 ja 36 $M_{\odot}$ var förmodligen väldigt massiva och hade troligen en mycket låg metallicitet.
- **Neutronstjärnor:** Med hjälp av gravitationsvågor kan vi studera neutronstjärnornas inre struktur och deras form.
- **Supernovor:** Varför och hur exakt exploderar supernovor. En asymmetrisk explosion orsakar gravitationsvågor, som kan i framtiden observeras.



Framtiden: Nya observatorier och eLISA

- **Nya gravitations-observatorier** byggs runt om världen: i Europa (GEO-HF och VIRGO), i Indien (INDIGO) och i Japan (KARGA).
- I december 2015 sköt ESA upp **LISA Pathfinder**, vars uppgift är att testa hur exakt gravitationsaccelerationen för fritt fallande kroppar kan mätas i rymden.
- **eLISA** (Evolved Laster Interferometer Space Atnenna) är ett rymdobservatorium som planeras för år 2034.

