

Nobelpriset i fysik 2017

Peter Johansson
Institutionen för Fysik
Helsingfors Universitet

Fysik – och Kemidagarna 2017
Stockholm/Helsingfors, 18.11.2017

Prisvinnarna - Nobelpriset i fysik 2017

The Nobel Prize in Physics 2017



Photo: Bryce Vickmark

Rainer Weiss

Prize share: 1/2

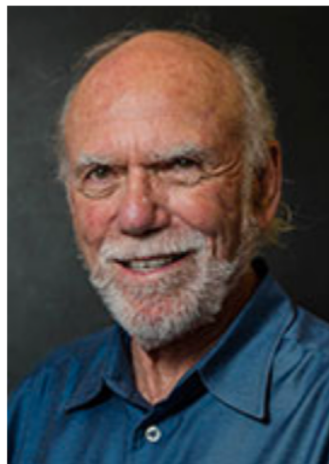


Photo: Caltech

Barry C. Barish

Prize share: 1/4



Photo: Caltech Alumni
Association

Kip S. Thorne

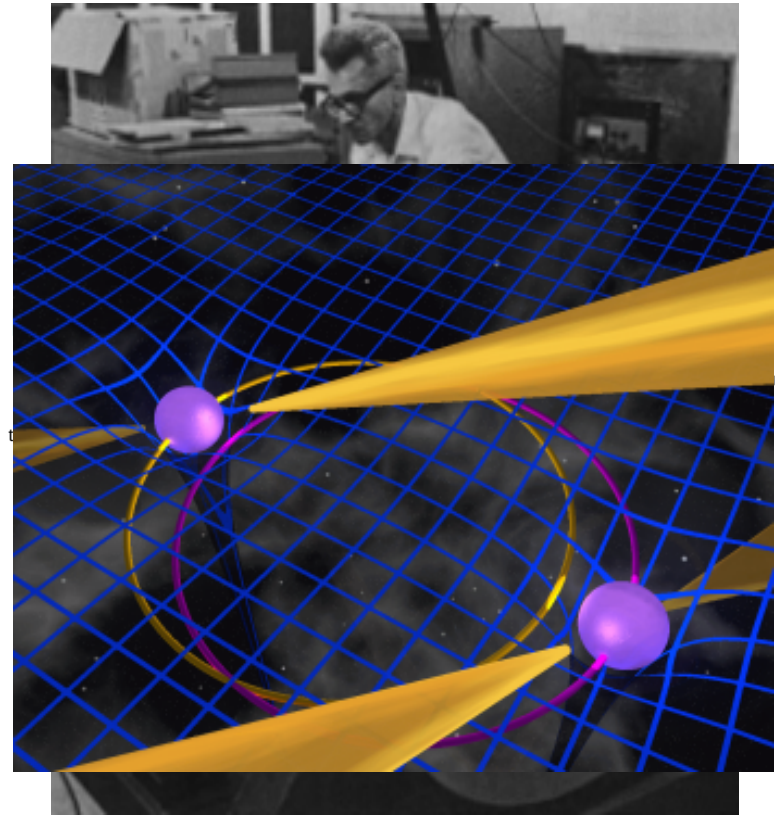
Prize share: 1/4

The Nobel Prize in Physics 2017 was divided, one half awarded to Rainer Weiss, the other half jointly to Barry C. Barish and Kip S. Thorne *"for decisive contributions to the LIGO detector and the observation of gravitational waves"*.



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.



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

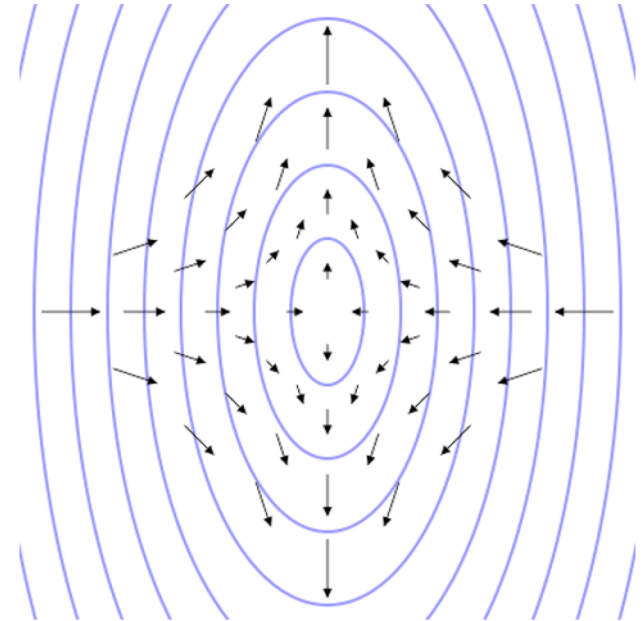
- Gravitationsvågorna är **krusningar i rumtidens metrik** och de transporterar energi som gravitations-strålning, som utbreder sig med ljusets hastighet.
- Genom en linjär approximation kan vi ur Einsteins ekvation härleda: $\square \bar{h}_{\mu\nu} = -16\pi G T_{\mu\nu}$ $\square = -\partial_t^2 + \nabla^2$
- 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?

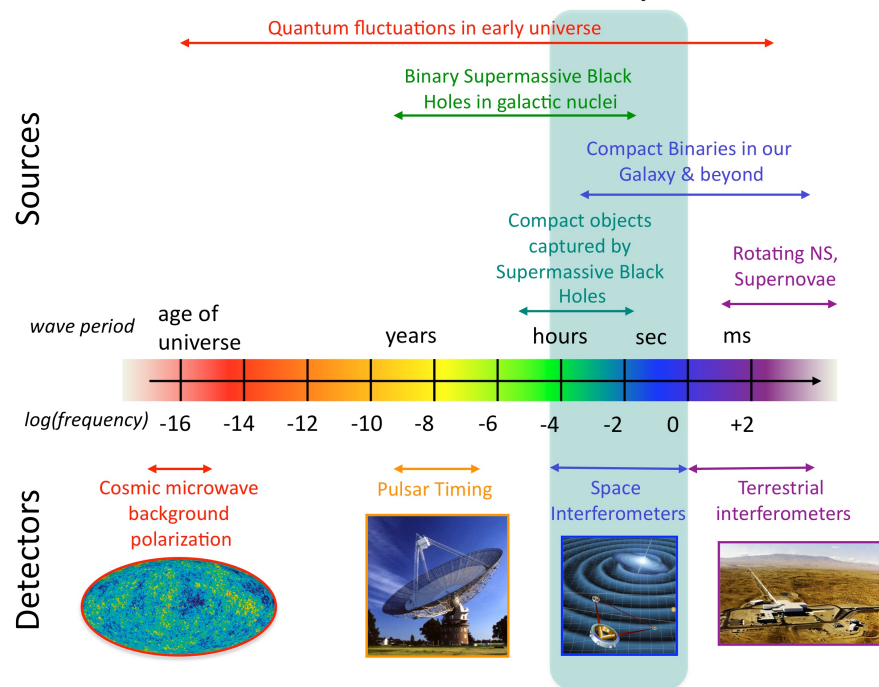
- Svarta hål och neutron stjärnor som roterar runt varandra i en omlopps-bana producerar starkt varierande gravitationsfält: -> gravitationsvågor.

- 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



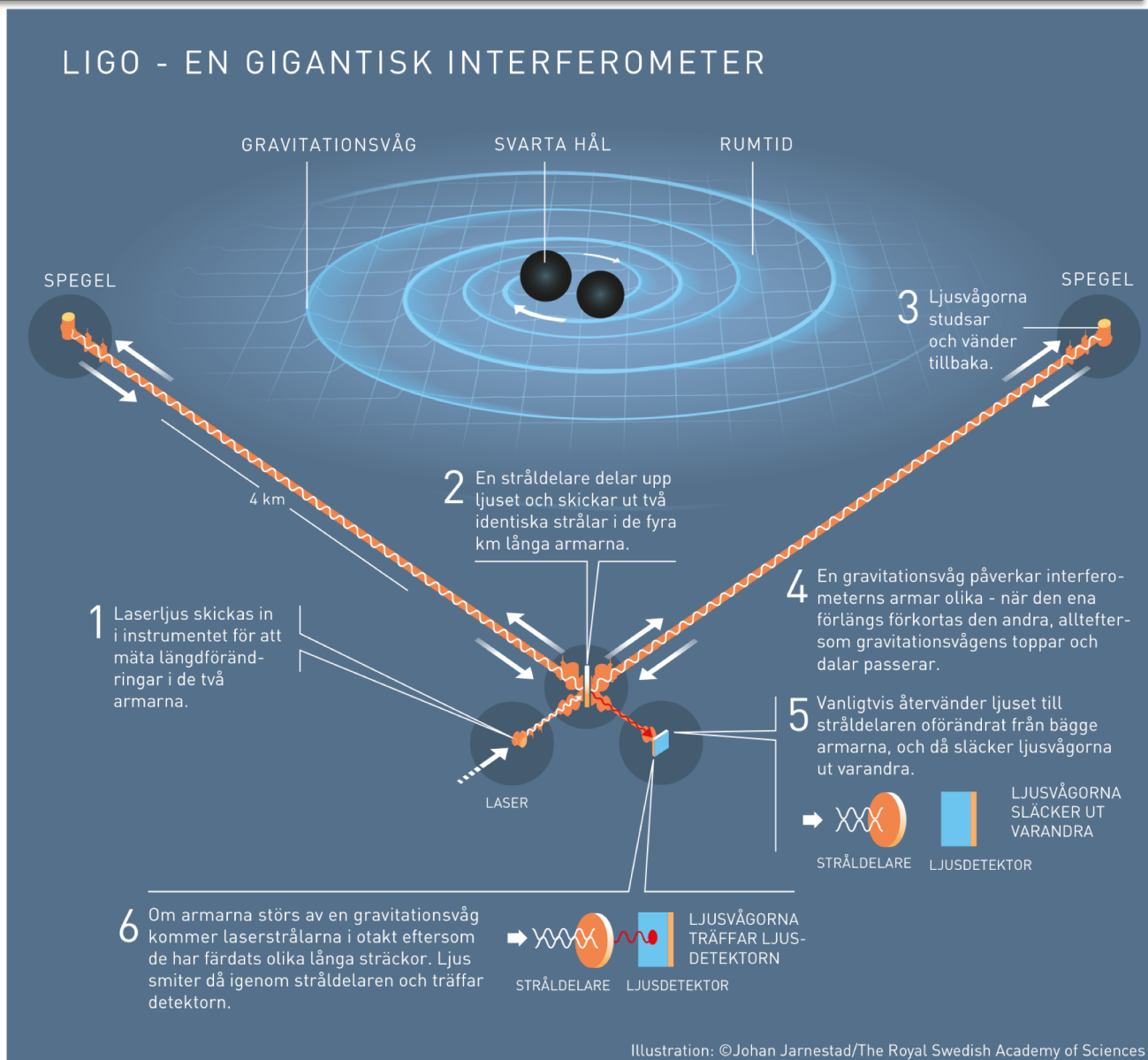
- Två svarta hål med 10 solmassor i en omloppsbana på ett avstånd av 100 Mpc:

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



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 ~ 300 gånger. Normalt interfererar laserljuset destruktivt och man ser ingen signal.



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.



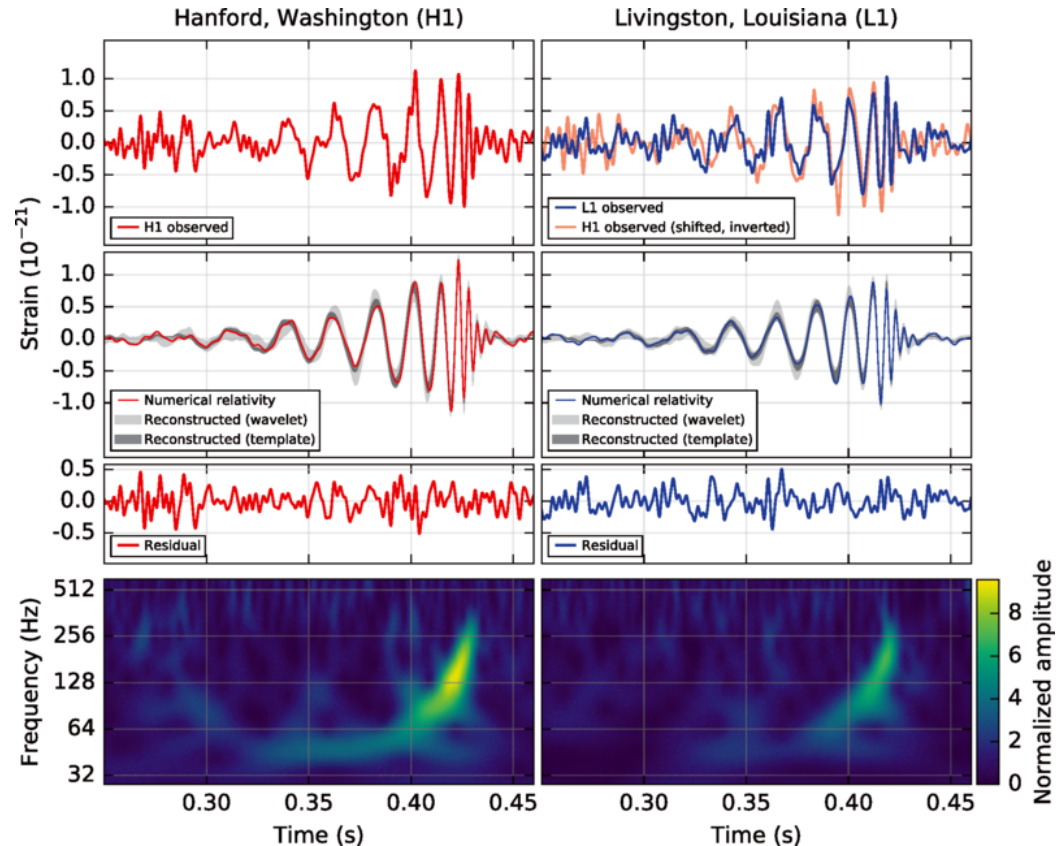
LIGO: Hanford observatoriet i Washington



Observationen av GW150914 I

7 ms tidsskillnad

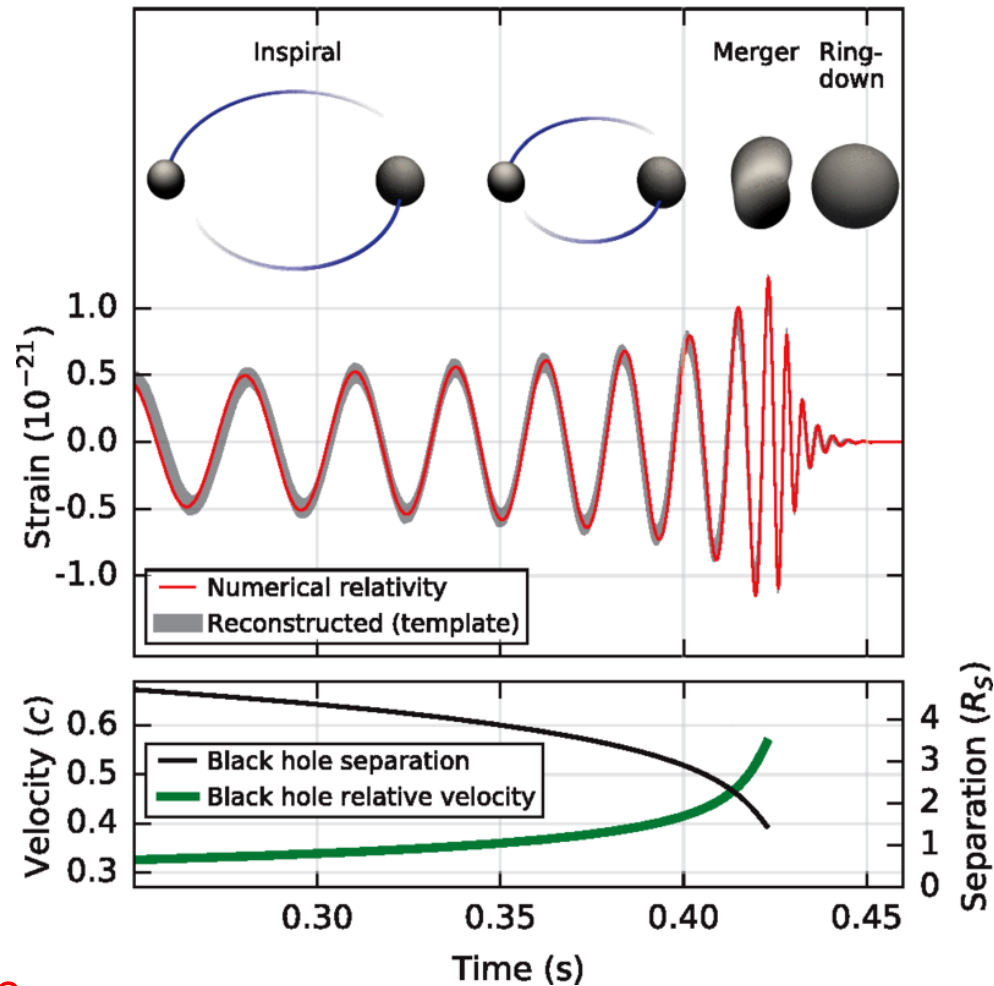
- **Advanced LIGO** började sina observationer sommaren 2015 och den 14 September, 2015, 09:50:45 UTC upptäcktes den första gravitationsvågen.
- Under 0.2 s ökar signalen från **35 till 150 Hz över 8 perioder** och den bästa förklaringen är en kollision av **två svarta hål med $M_1=36 M_\odot$ och $M_2=29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

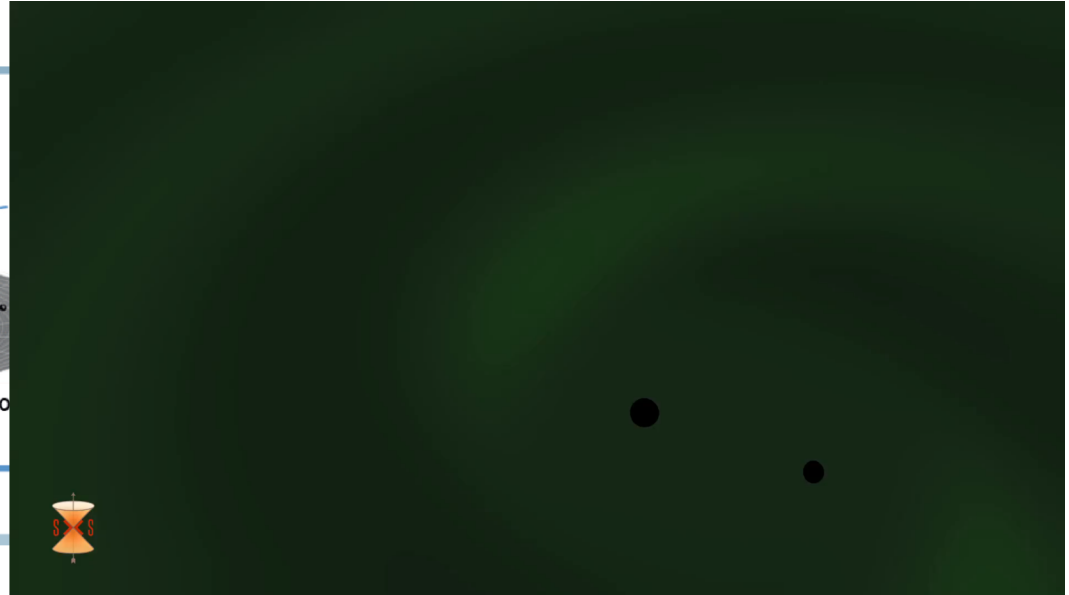
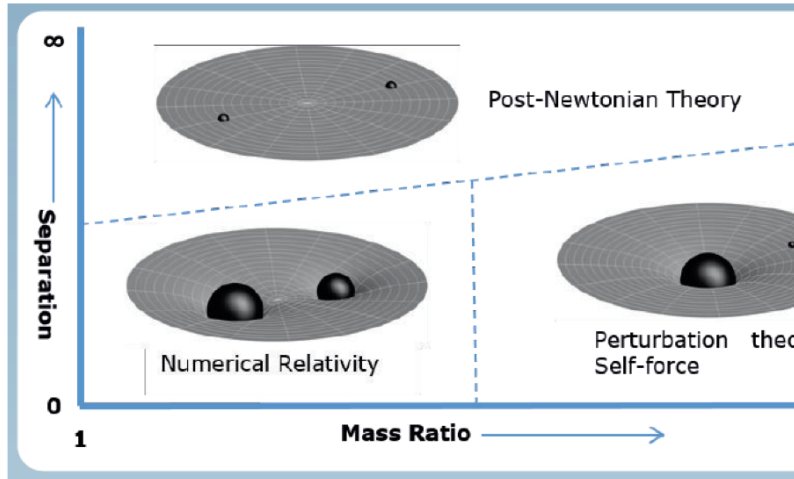
- Objekten **måste vara kompakta svarta hål**, eftersom de rör sig med en banfrekvens av 75 Hz som motsvarar ett avstånd på bara 350 km.
- Efter kollisionen kan vi observera **"ringdown"**-fenomenet i vilket det nya svarta hålet sätter sig i en ny Kerr konfiguration.
- Det nya svarta hålet har en massa 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 Universum**.



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

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.

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 ~2030.

