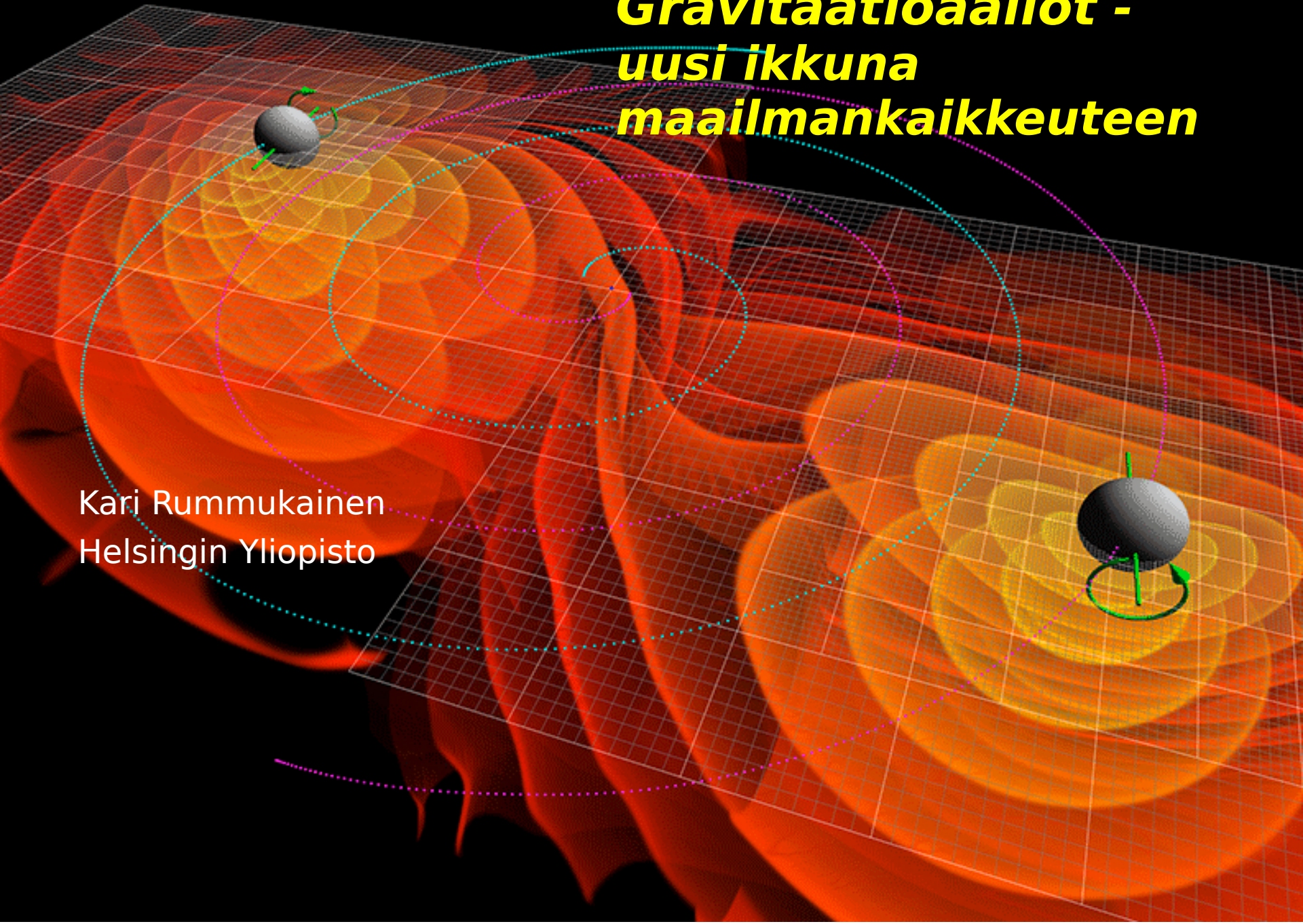
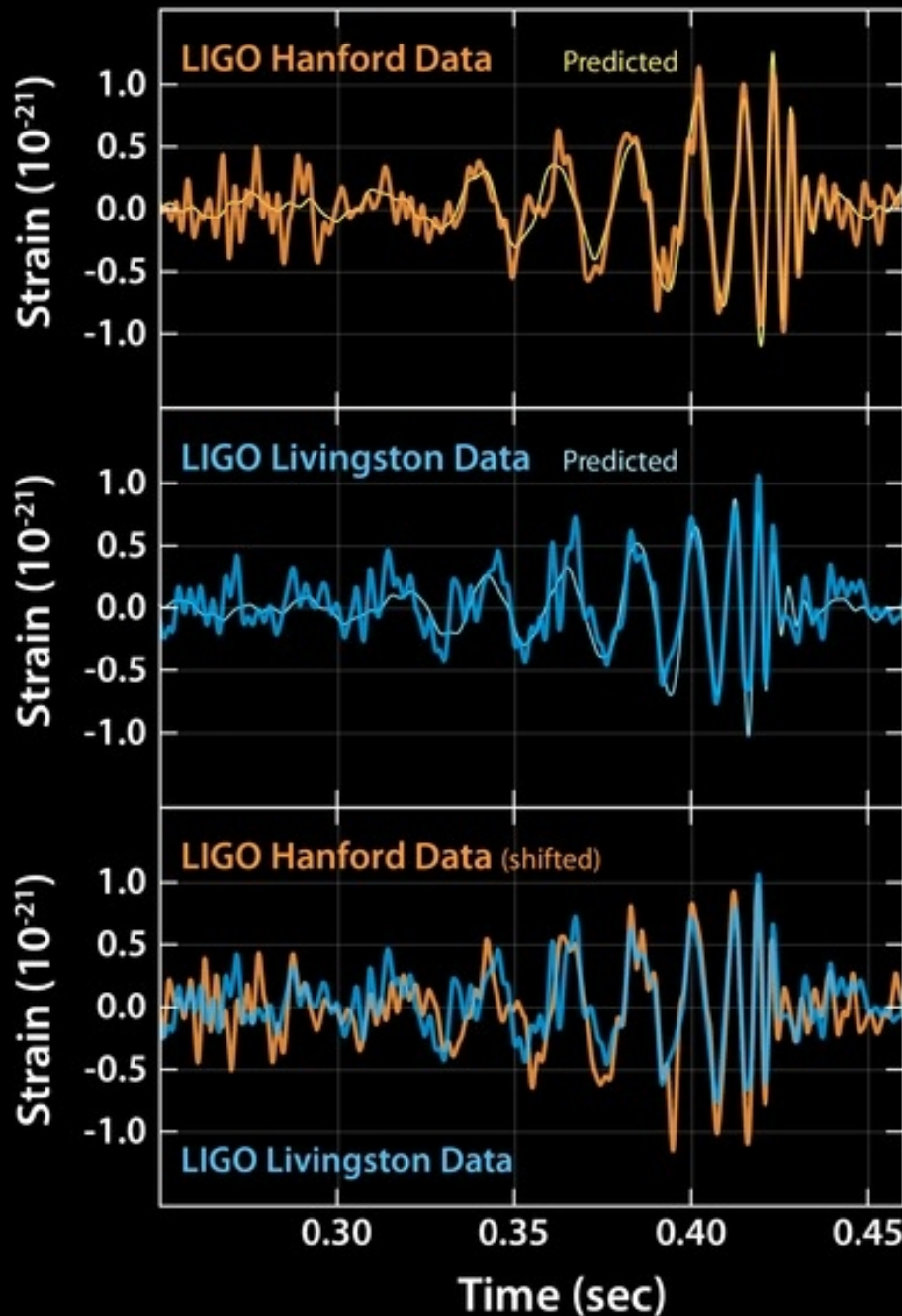


Gravitaatioaallot - uusi ikkuna maailmankaikkeuteen

Kari Rummukainen
Helsingin Yliopisto





14.9.2015
kello 12:50:45
Suomen aikaa: pulssi
gravitaatioaaltoja
läpäisi maan.

LIGO:
Ensimmäinen havainto
gravitaatioaaltoista.

Syntyi 29 ja 36
aurion massaisen
mustan aukon
törmäyksestä, etäisyys
Maasta 1.3 miljardia
valovuotta.

Uusi ikkuna
maailmankaikkeuteen!

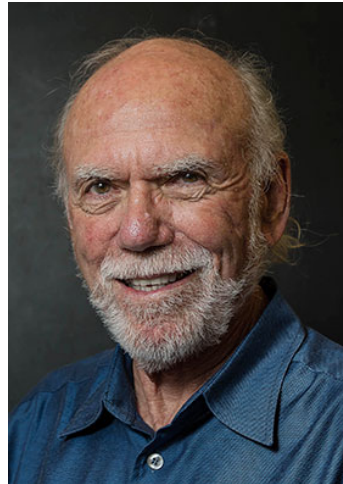
Gravitaatioaalto syntyy kun kaksi mustaa
aukkoa törmäsivät toisiinsa



"For the greatest benefit to mankind"
Alfred Nobel

2017 NOBEL PRIZE IN PHYSICS

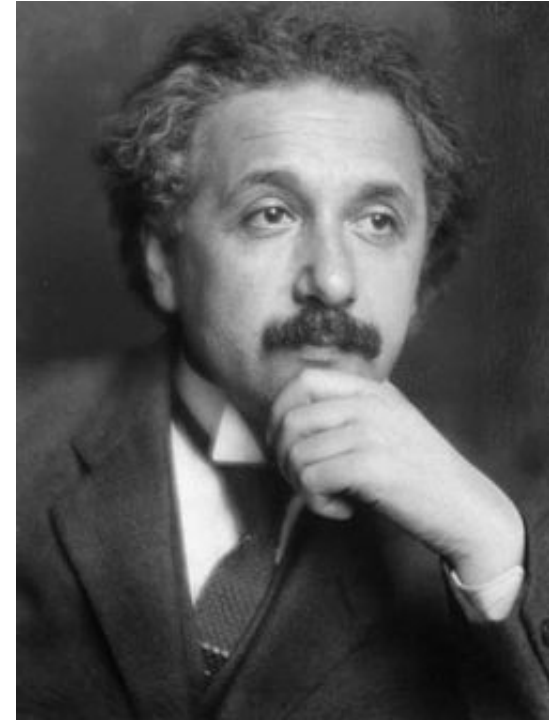
Rainer Weiss
Barry C. Barish
Kip S. Thorne



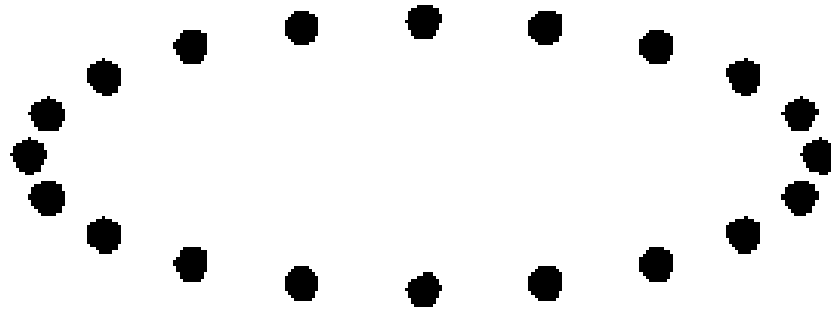
LIGO-havaintolaitteen rakentamisesta ja
gravitaatioaaltojen havaitsemisesta

Historiaa:

- 1915: Yleinen suhteellisuusteoria
- 1916: Linearisointi → aaltoyhtälö, ennustus gravitaatioaalloista
- Aika-avaruusaaltoja?
Ovatko ne olemassa?
- 1936 Einstein itse “osoittaa” että gravitaatio-
aaltoja ei ole olemassa (väärin!)
- Olemassaoloon uskottiin varmasti vasta 1950-
luvulla

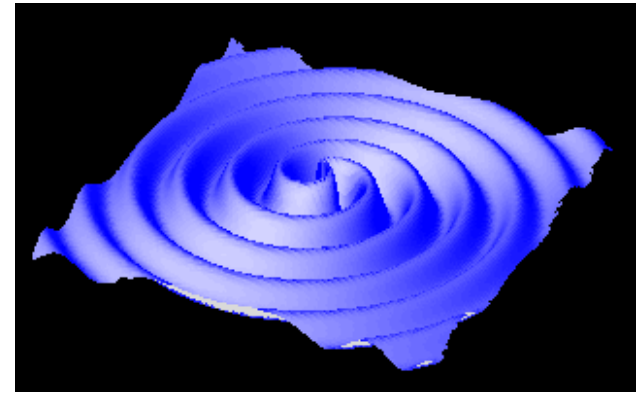


Mitä gravitaatioaalto tekee?

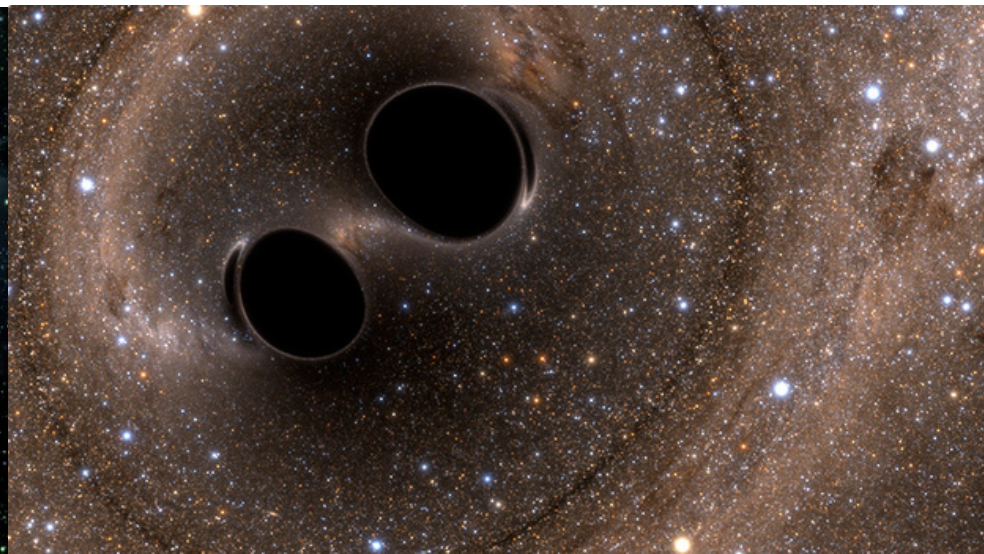


Gravitaatioaaltojen lähteet

- Liikkuvat massat → gravitaatioaaltoja
- Jotta voidaan havaita, tarvitaan suuri massa ja suuri nopeus
 - Maa-aurinko ~ 200 W
- Neutronitähdet
- Mustat aukot



[LIGO projekti]



Animaatioita

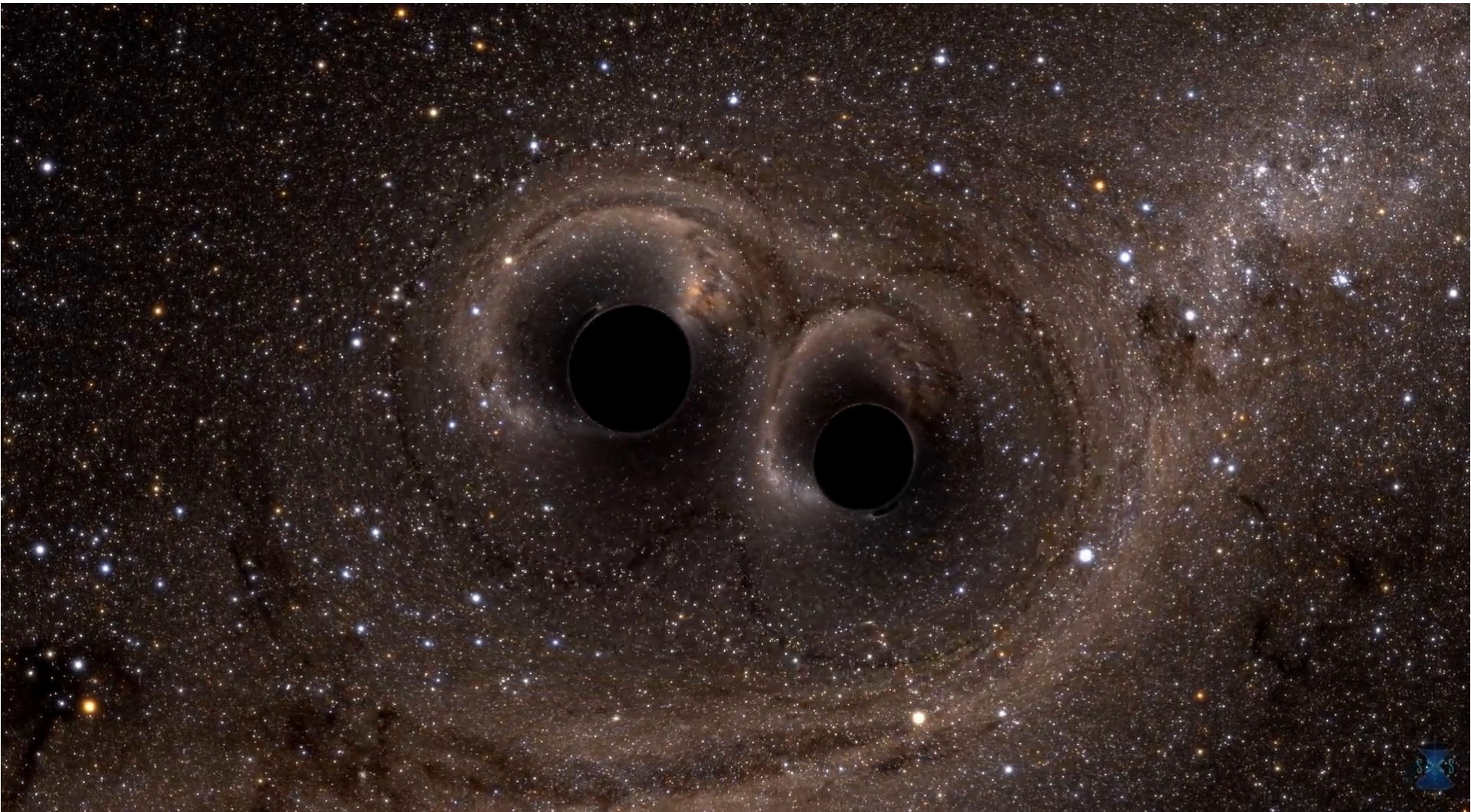
(SXS project)

Miltä törmäys näyttää?

Avaruuden kaareutumisen törmäävien mustien aukkojen ympärillä



Miltä mustien aukkojen törmäys näyttää?



Sxs project <http://www.black-holes.org>

Painovoima-aaltojen synty





Scale of Effect Vastly Exaggerated

Sxs project <http://www.black-holes.org>

Tapahtuma “GW 150914” numeroina:

- **2 mustaa aukkoa, ~ 36 ja 29 auringon massaa**
- **Etäisyys ~ 1.3 miljardia valovuotta**
- **Energiantuotto ~ 3 auringon massaa 0.5 s.**
 - 3×10^{49} W, 50 kertaa maailmankaikkeuden
 - kaikkien tähtien yhteenlaskettu energiantuotto!
- **Havaittu suhteellinen venymä maassa ~ 10^{-21}**
 - 1/1000 protonin koosta 4 km:n yli!
- **Suunta ~ Magellanin pilven suunta**

Havaintojen historiaa

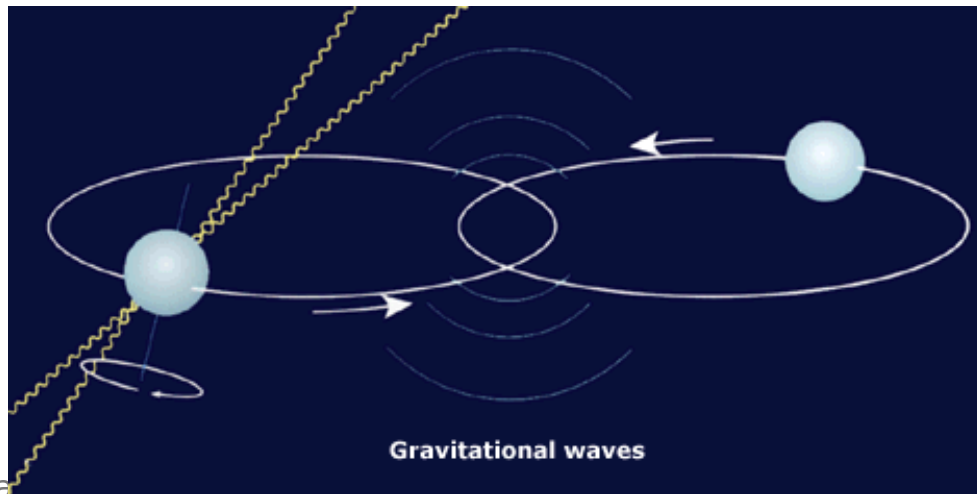
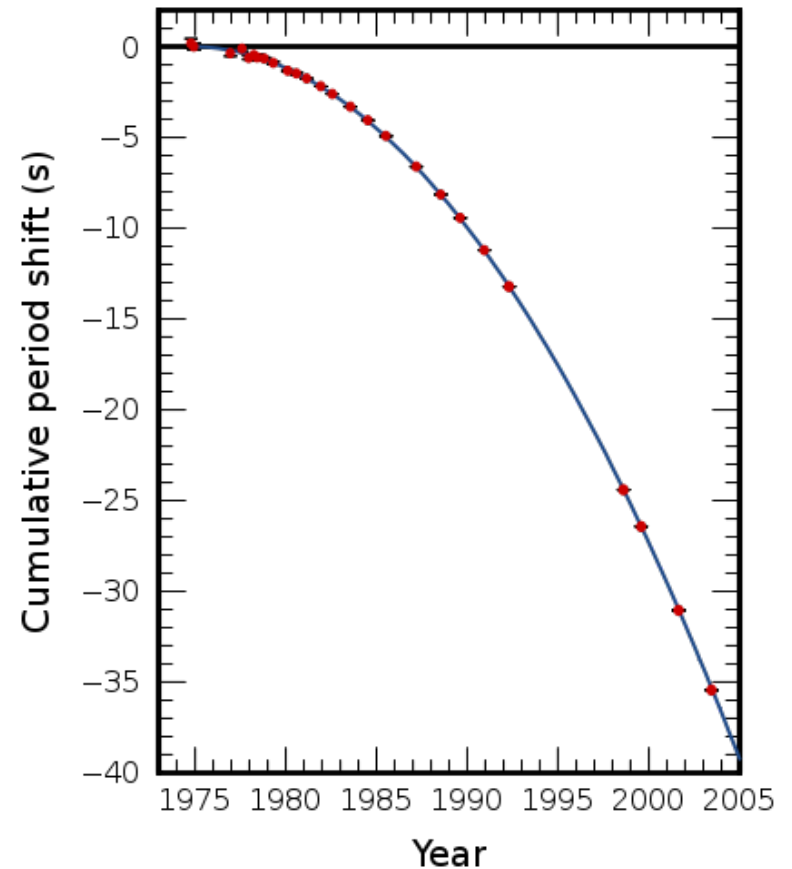
- Joseph Weberin resonaattorit 1960-70 -luvulla
- Väitetty havainto, muut eivät pystyneet varmistamaan

Kuva: University Of Maryland Archives



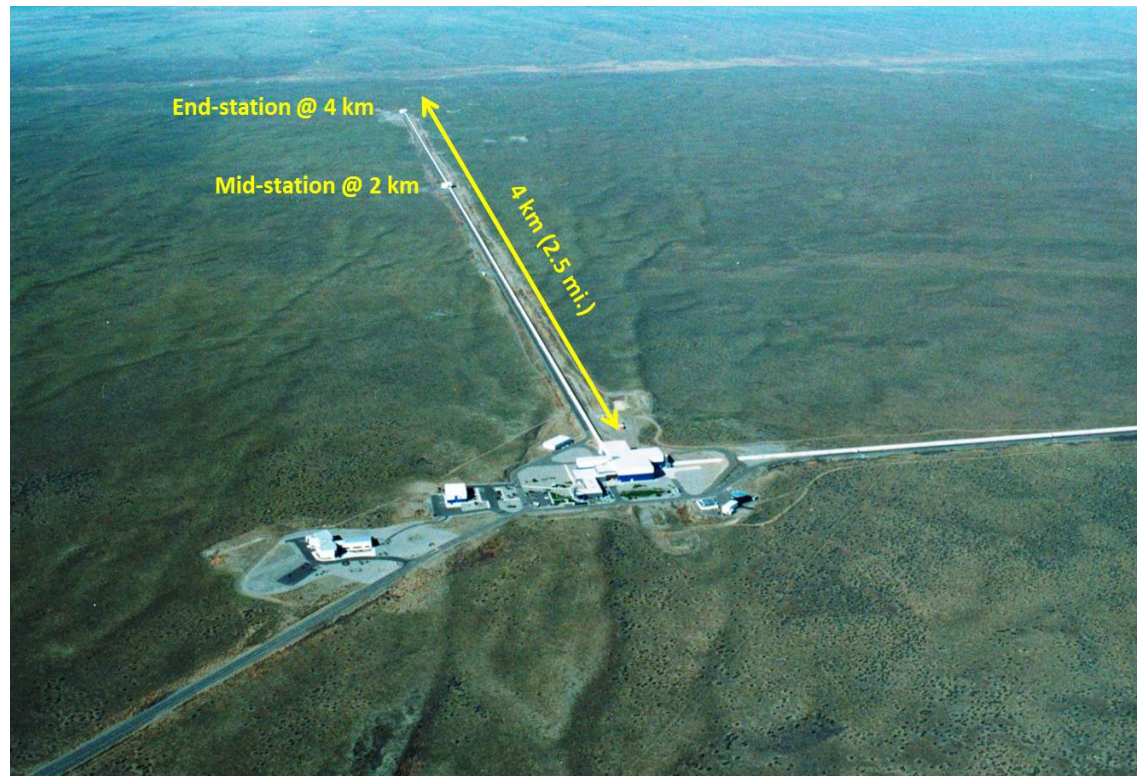
Havaintojen historiaa

- Taylor-Hulse kaksoispulsari
 - 1974-82
 - Kiertoaika 7.75h, hidastuu gravitaatiohäiriön vuoksi
 - Ensimmäinen epäsuora havainto gravitaatioaalloista!
 - Nobel 1993

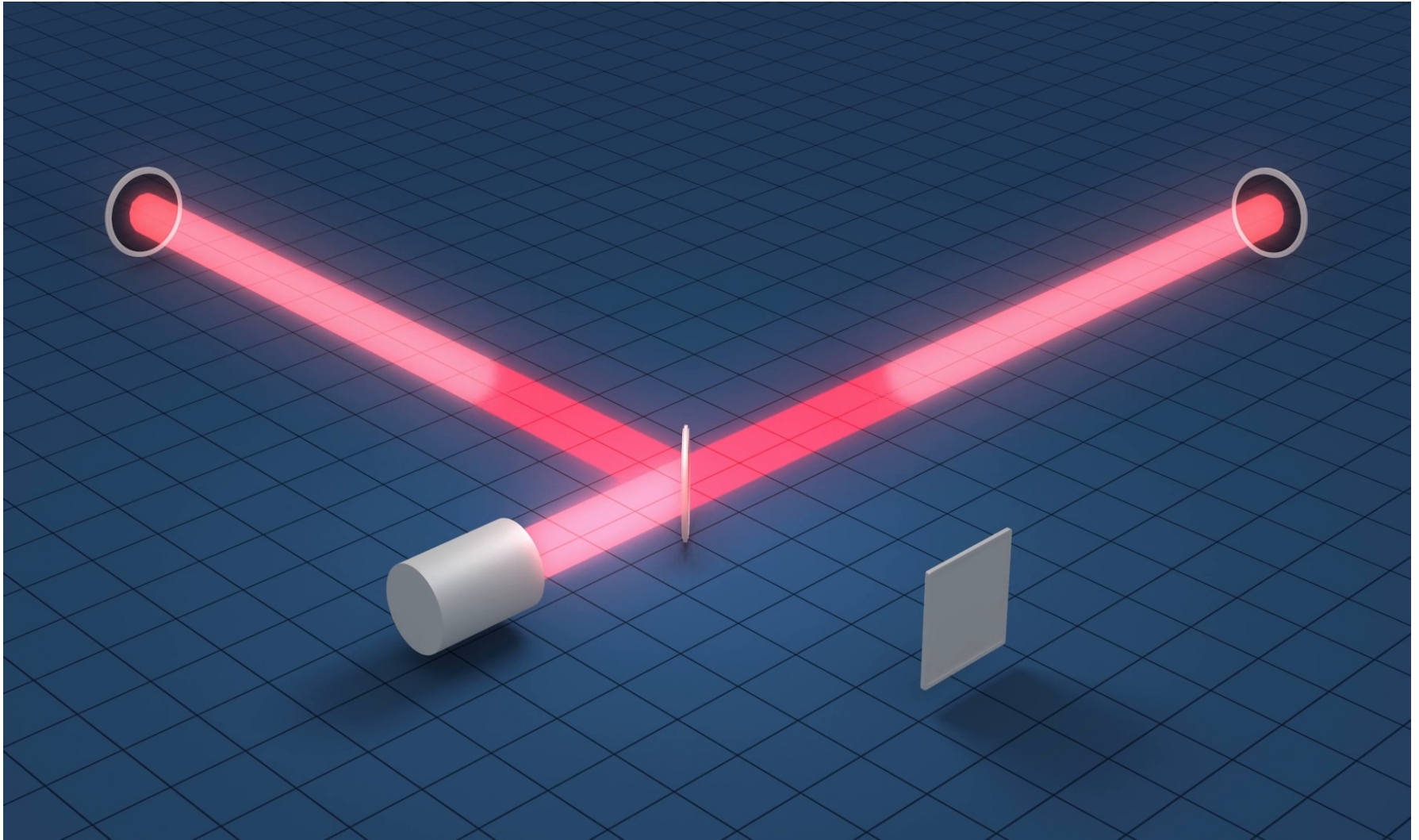


Laser-interferometria

- 1962 Gertsenshtein ja Pustovoit ehdottavat lasersäteiden interferenssiä gravitaatioaaltojen mittaamiseksi
- 1984 Thorne, Drever, Weiss → LIGO projekti
 - Paljon käynnistysvaikeuksia tekniikassa ja rahoituksessa
 - Barish tulee mukaan; 1994 rakentaminen alkaa Washingtonissa ja Louisianassa
- 2002-10 LIGO käynnissä, ei havaintoja
- 2010-15 syyskuu päivitys “Advanced LIGO”
- 14.9.2015 havainto!

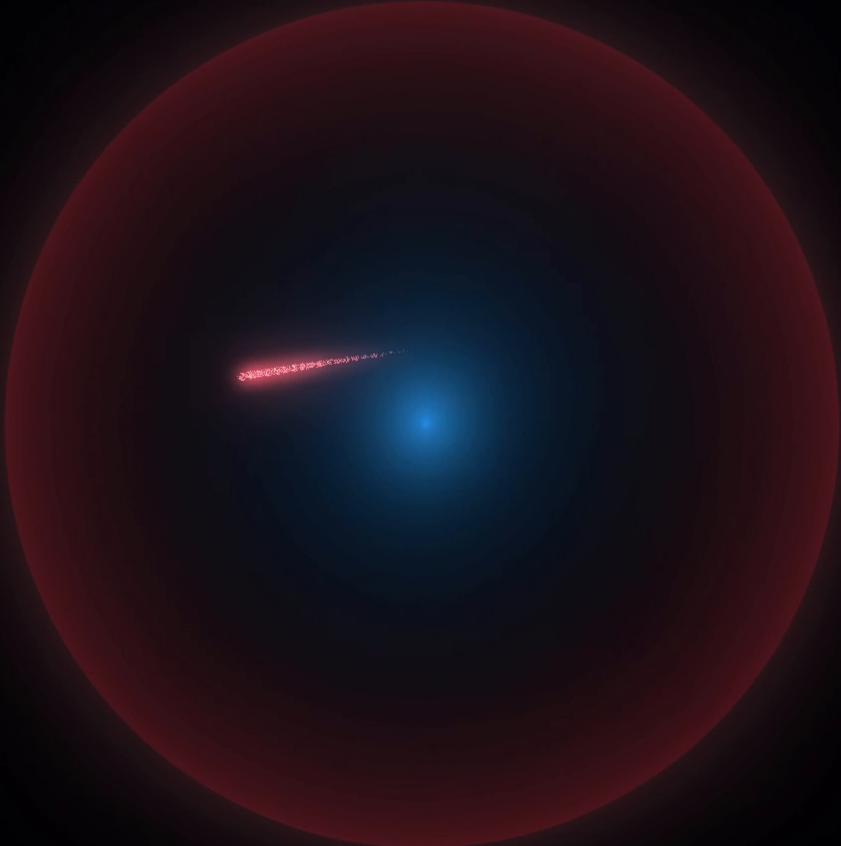


Interferometrin toiminta



Ligo collaboration

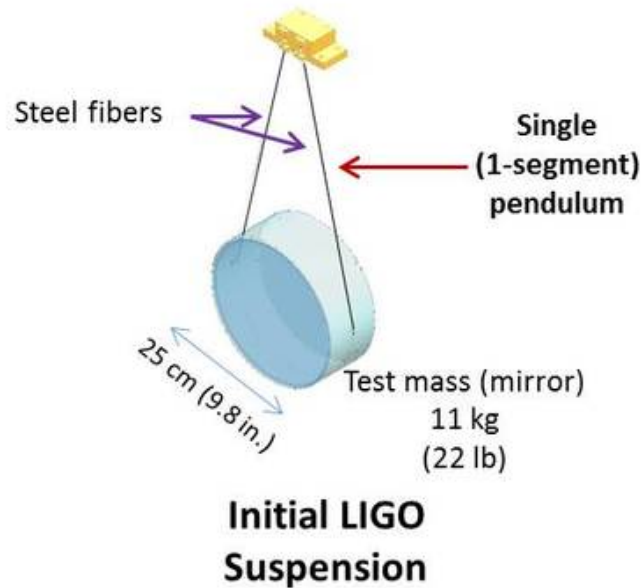
Peilien siirtymä: 1/1000 atomiytimen koosta!



- Herkkä häiriöille – seismologia, liikenne jne.
- Tarvitaan usempi mittauspaiikka
- Washington, Louisiana
- Virgo (Italia)



Kari Rummukainen

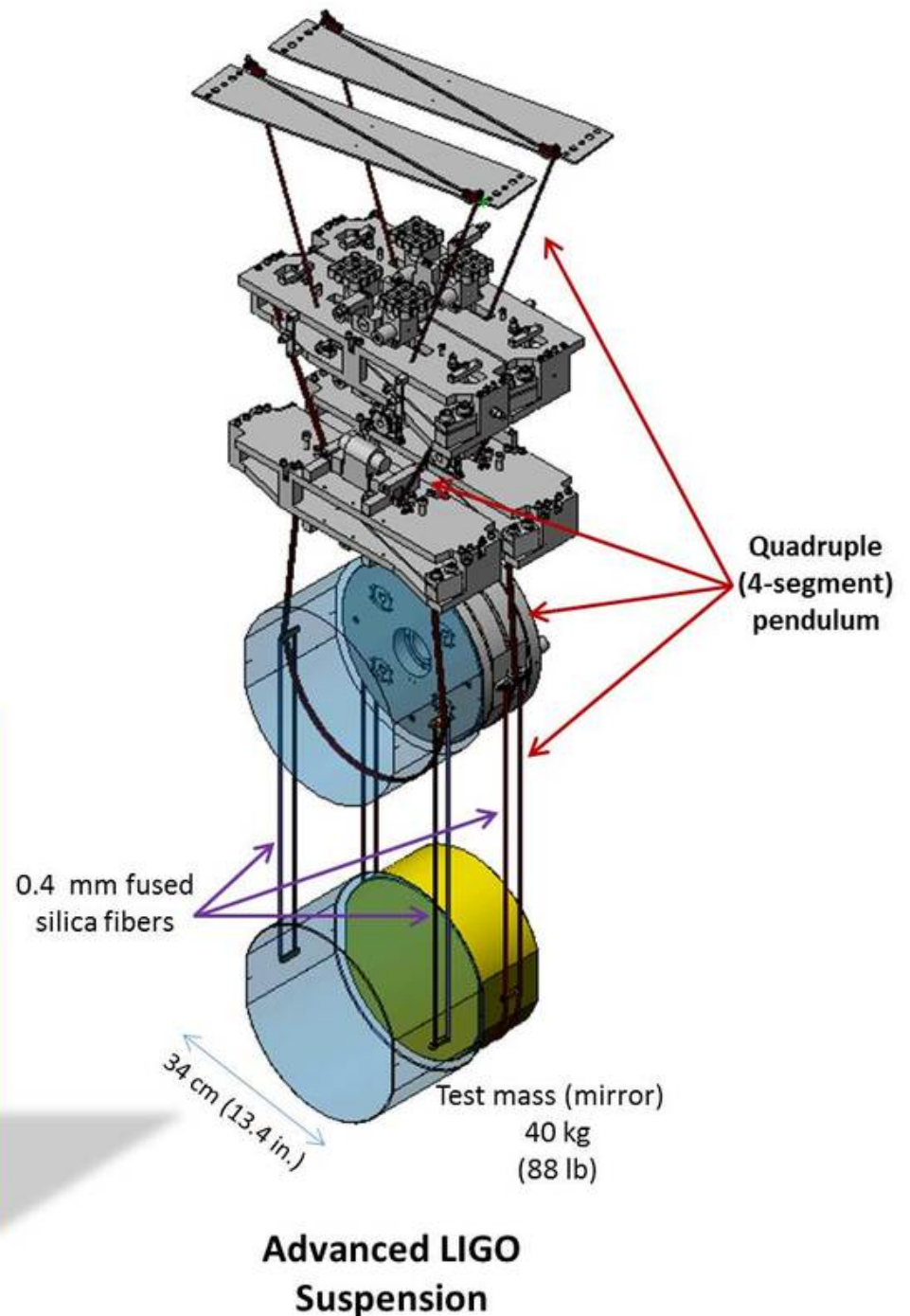


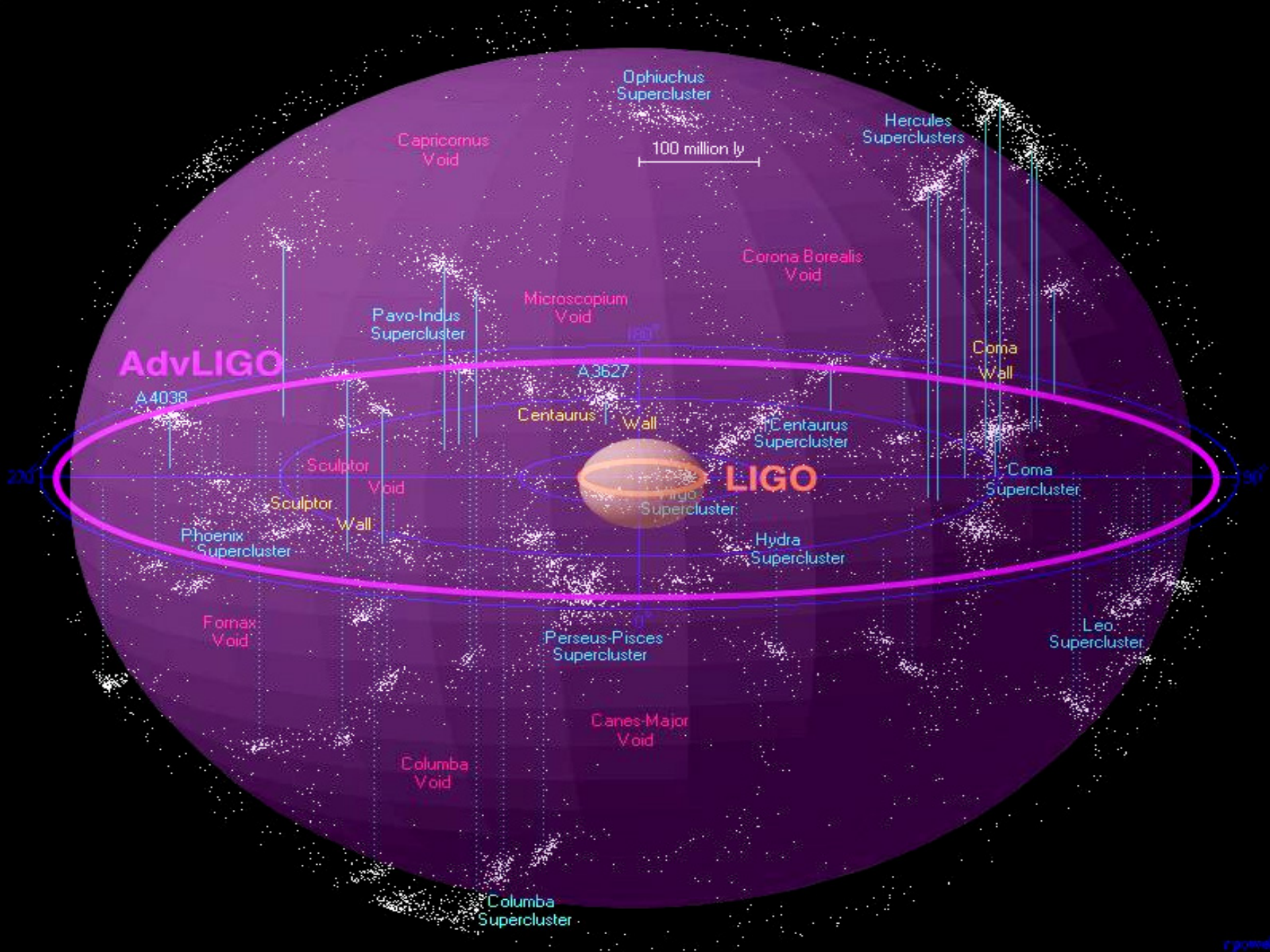
iLIGO vs aLIGO suspension systems

These engineering drawings illustrate the striking differences between Initial- and Advanced LIGO's suspensions. The suspensions are shown to scale.

Initial LIGO's suspension was a single pendulum design with an 11 kg (22 lb) 'test mass' (mirror) hung by steel fibers.

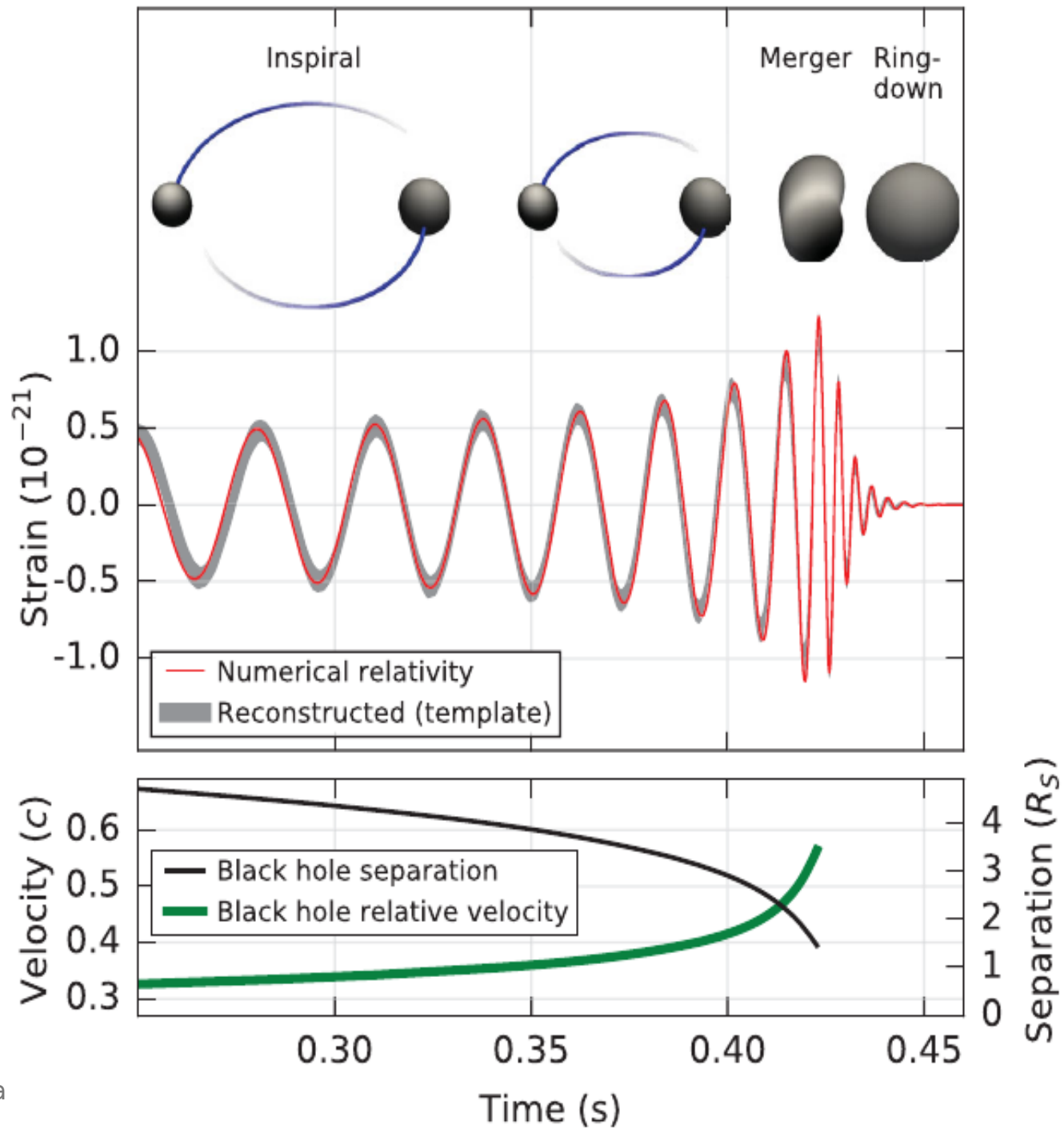
Advanced LIGO's suspension system is a **much** heavier quadruple ("quad") pendulum with a 40 kg (88 lb) 'test mass' (mirror) hung by fused silica fibers.





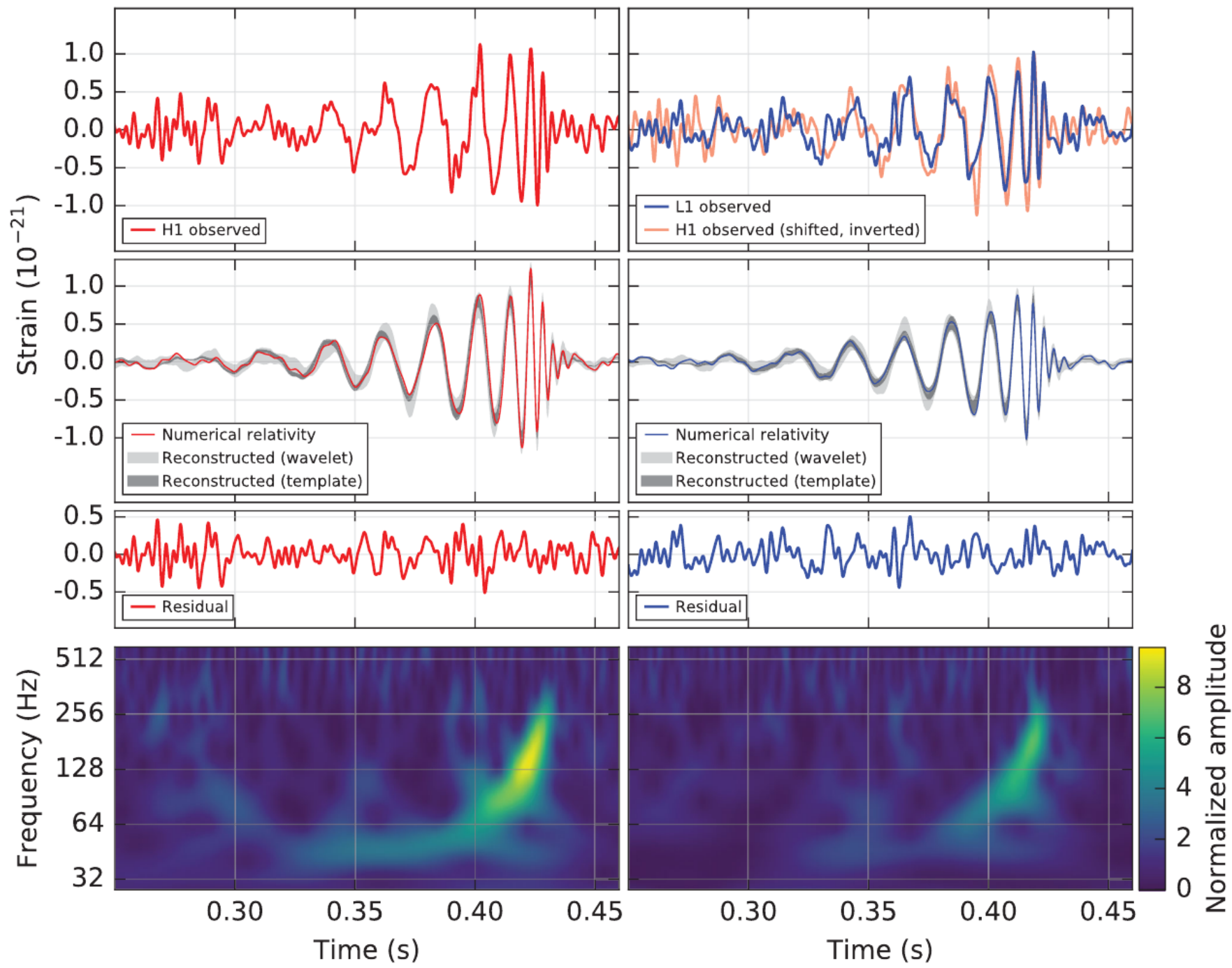
Toimivat ja suunnitellut gravitaatioaalto-detektorit



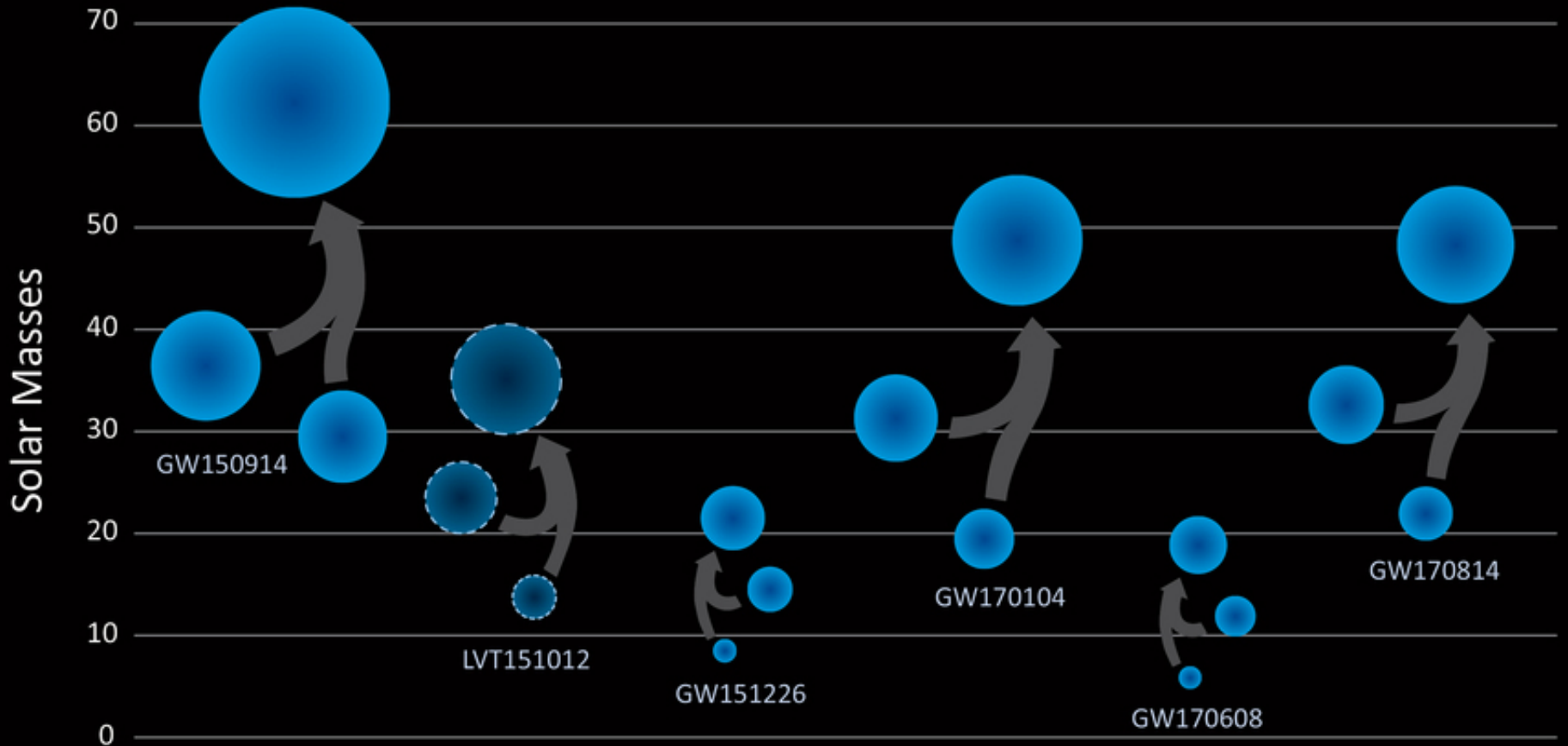


Hanford, Washington (H1)

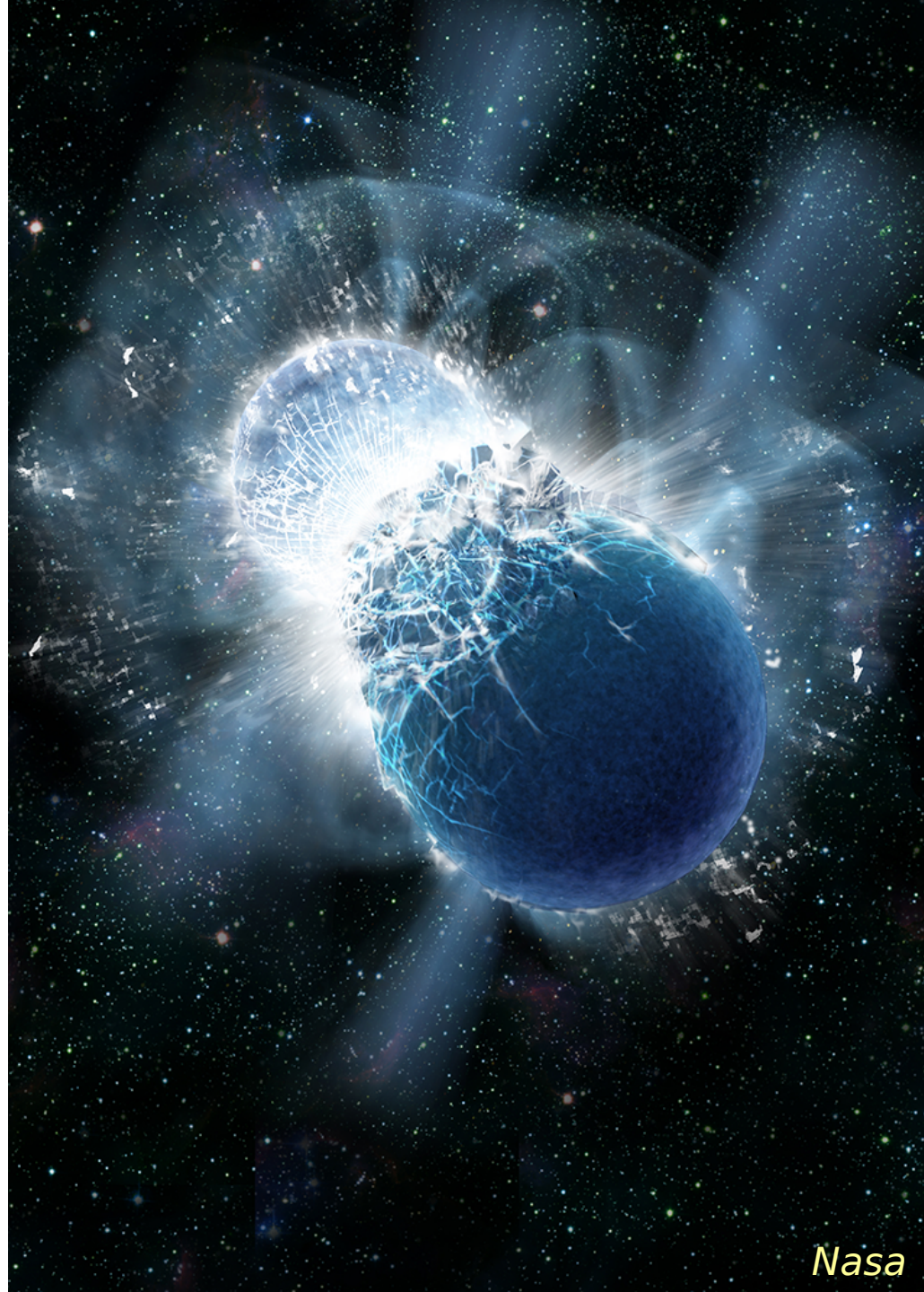
Livingston, Louisiana (L1)



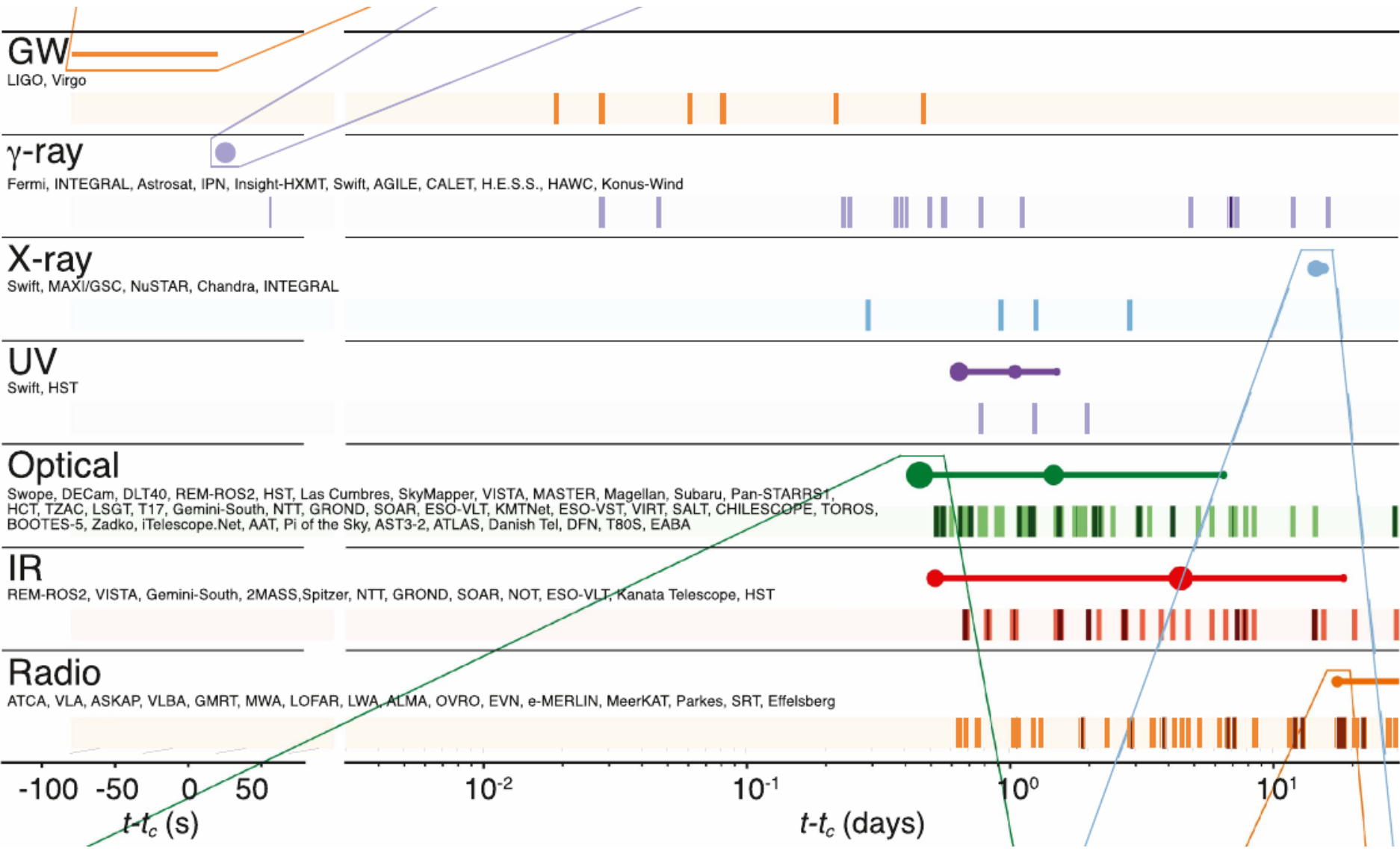
Black Holes of Known Mass



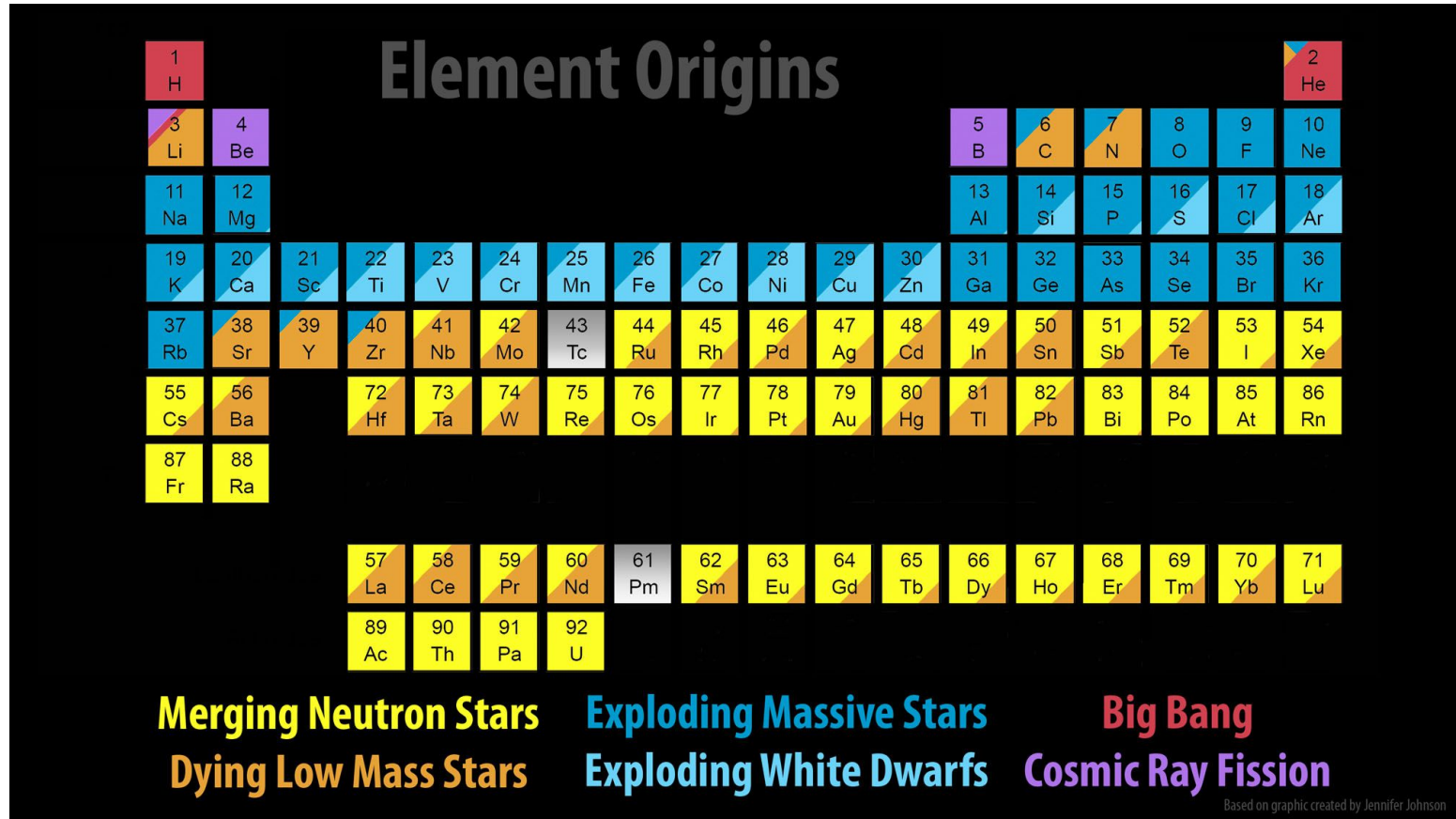
- Elokuu 17 2017: LIGO ja Virgo näkevät 2 neutronitähden törmäyksen
- Nähtiin myös gamma-säteilyssä ja optisesti
- 1.1 ja 1.6 auringon massaa







- Törmäyksessä havaittiin syntyvän runsaasti raskaita alkuaineita:



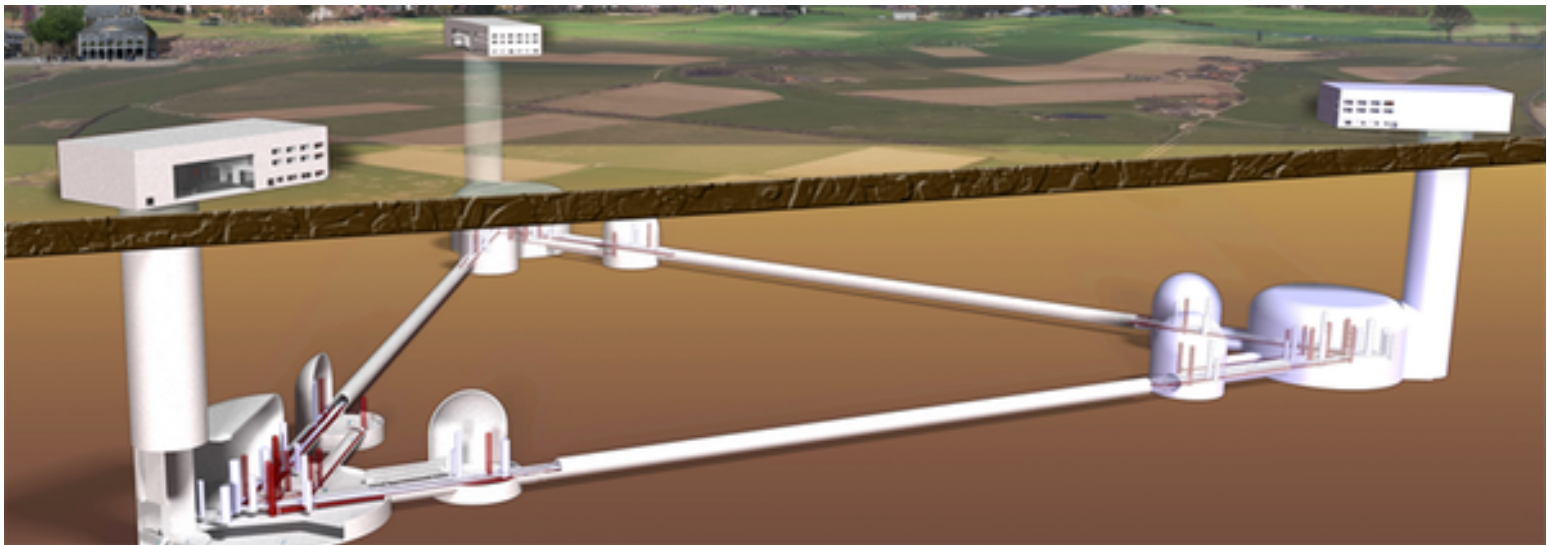
- mm. kultaa noin 200 ja platinaa noin 500 maapallon massan verran

Löytöjen merkitys:

- Suhteellisuusteoria on oikeassa (jälleen) ja gravitaatioaaltoja on olemassa
- Ensimmäinen suora havainto **mustista aukoista**
- Neutronitähtien törmäykset
- ***Uusi ikkuna maailmankaikkeuteen***
- Tulee mullistamaan tietomme mustista aukoista ja neutronitähdistä
- **Tulevaisuudessa: kosmologia:**
 - Kosmiset jätteet
 - Olomuodon muutokset
 - Inflaatio

Tulevaisuuden havaintolaitteita:

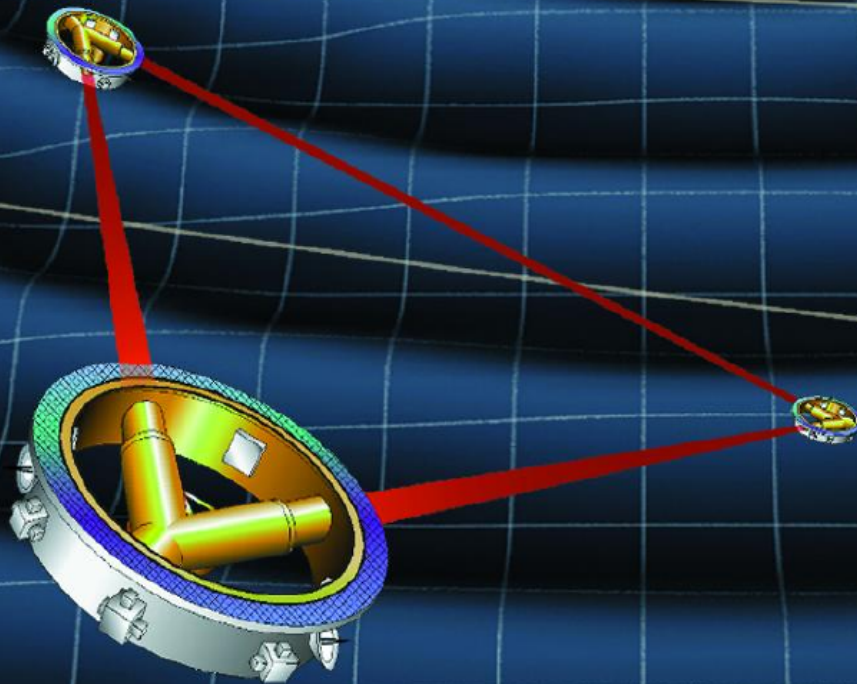
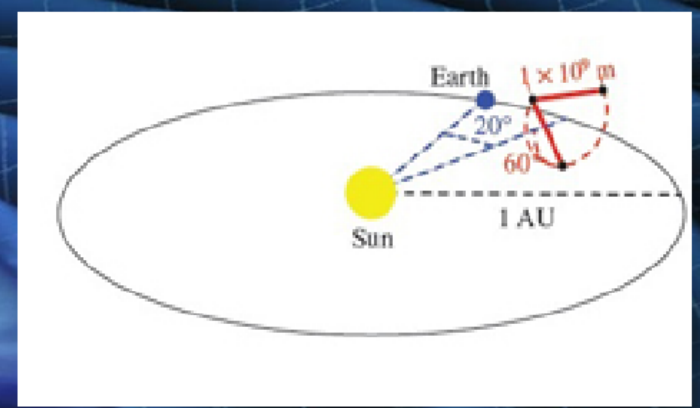
- Einstein telescope (ET):
 - Kolmio, 10 km sivu
 - “Design study”

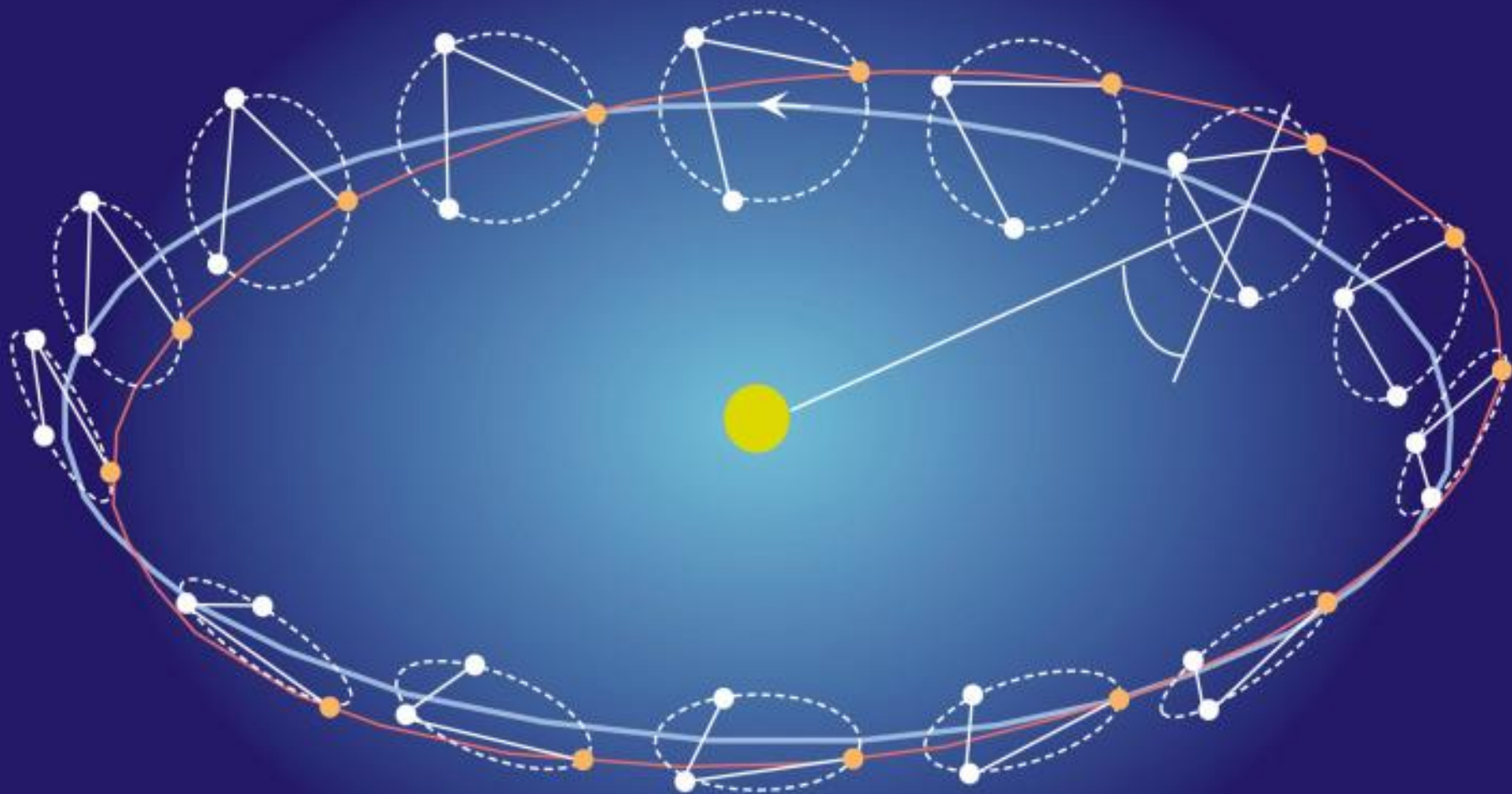


- LISA (Laser Interferometer Space Antenna)
 - 3 satelliittia, 2.5 milj. km kolmio
 - Suunniteltu laukaisu 2034

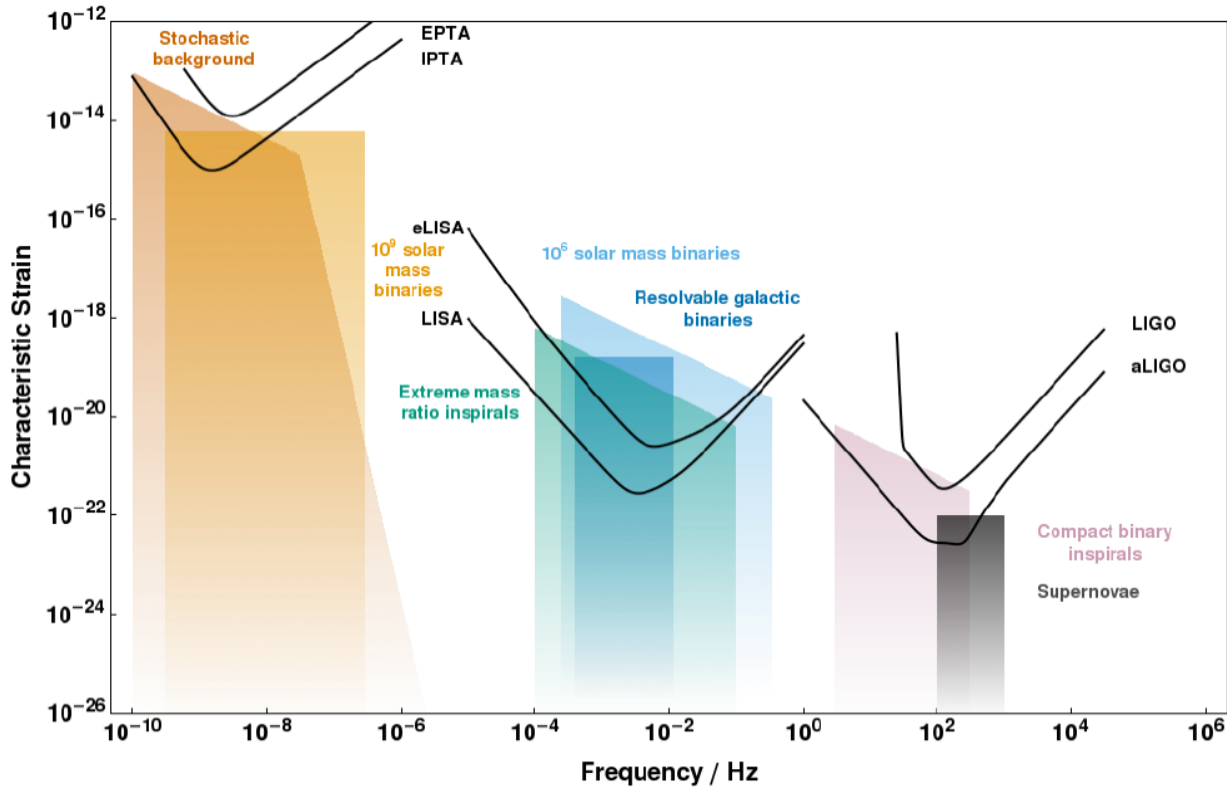
eLISA mission 2034

Arm length $\sim 1\text{e}6$ km





[Moore, Cole, Berry 2014]



[ESA]

Suuri koko → matala taajuus

- Voi havaita mustien aukkojen ja neutronitähtien kieppumista vuosien ajan ennen törmäystä
- Supermassiiviset mustat aukot
- Kosmologia

Siispä:

- **Gravitaatioaallot on vihdoin havaittu 100 vuotta teorian jälkeen**
- **Gravitaatioastrofysiikan aika on alkanut!**
- **Kaikkein eksoottisimmat ja muilla tavoilla vaikeimmin tutkittavat taivaankappaleet:**
 - **Neutronitähdet**
 - **Mustat aukot**
 - **Supernovat**
 - **Kosmologia**