

# ***Astronomija gravitacionih talasa***

***Bojan Arbutina***

Katedra za astronomiju, Matemati ki fakultet, Univerzitet u Beogradu,  
Studentski trg 16, Beograd, Srbija

e-mail: [arbo@matf.bg.ac.rs](mailto:arbo@matf.bg.ac.rs)



Seminar Katedre za astronomiju, 12. decembar 2017.

*The Royal Swedish Academy of Sciences has decided to award the*

# 2017 NOBEL PRIZE IN PHYSICS



Rainer Weiss

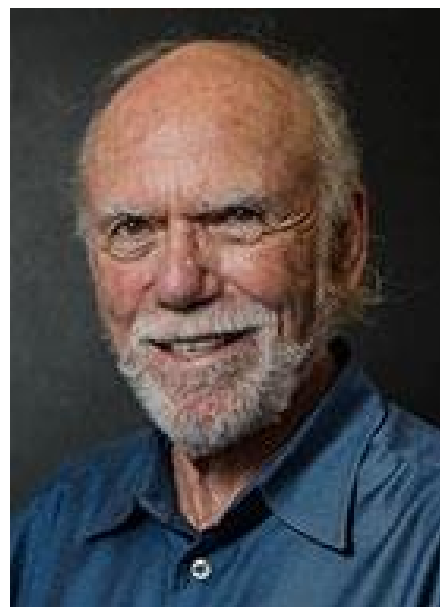
Barry C. Barish

Kip S. Thorne

*"Za presudni doprinos razvoju detektora LIGO i detekciju gravitacionih talasa."*



**Rainer Weiss** (Berlin, 1932 - ), profesor emeritus na MIT i profesor na *Louisiana State University*, zasluflan za razvoj laserske interferometrije primenjenje u projektu LIGO. Bio je rukovodilac nau nog projekta COBE, dobitnik ve eg broja nagrada: *Gruber Prize in Cosmology* (2006, 2016), *Shaw Prize* (2016), *Kavli Prize* (2016), ...



**Barry Barish** (Omaha, Nebraska, 1936 - ), eksperimentalni fizi ar, *Linde Professor* na *Caltech*-u, prvi direktor projekta LIGO. Dobitnik je ve eg broja nagrada, izme u ostalih *Enrico Fermi Prize* (2016).



**Kip Thorne** (Logan, Utah, 1940 - ), *Feynman Professor* na *Caltech*-u, jedan od vode ih svetskih stru njaka za OTR, dobitnik ve eg broja nagrada: *Gruber Prize in Cosmology* (2016), *Shaw Prize* (2016), *Kavli Prize* (2016), ...



- druga nagrada za gravitacione talase! Nobelovu nagradu za fiziku 1993. godine dobili su Russell A. Hulse i Joseph H. Taylor, Jr, öza otkri e nove vrste pulsara i stvaranje mogu nosti za prou avanje gravitacijeö

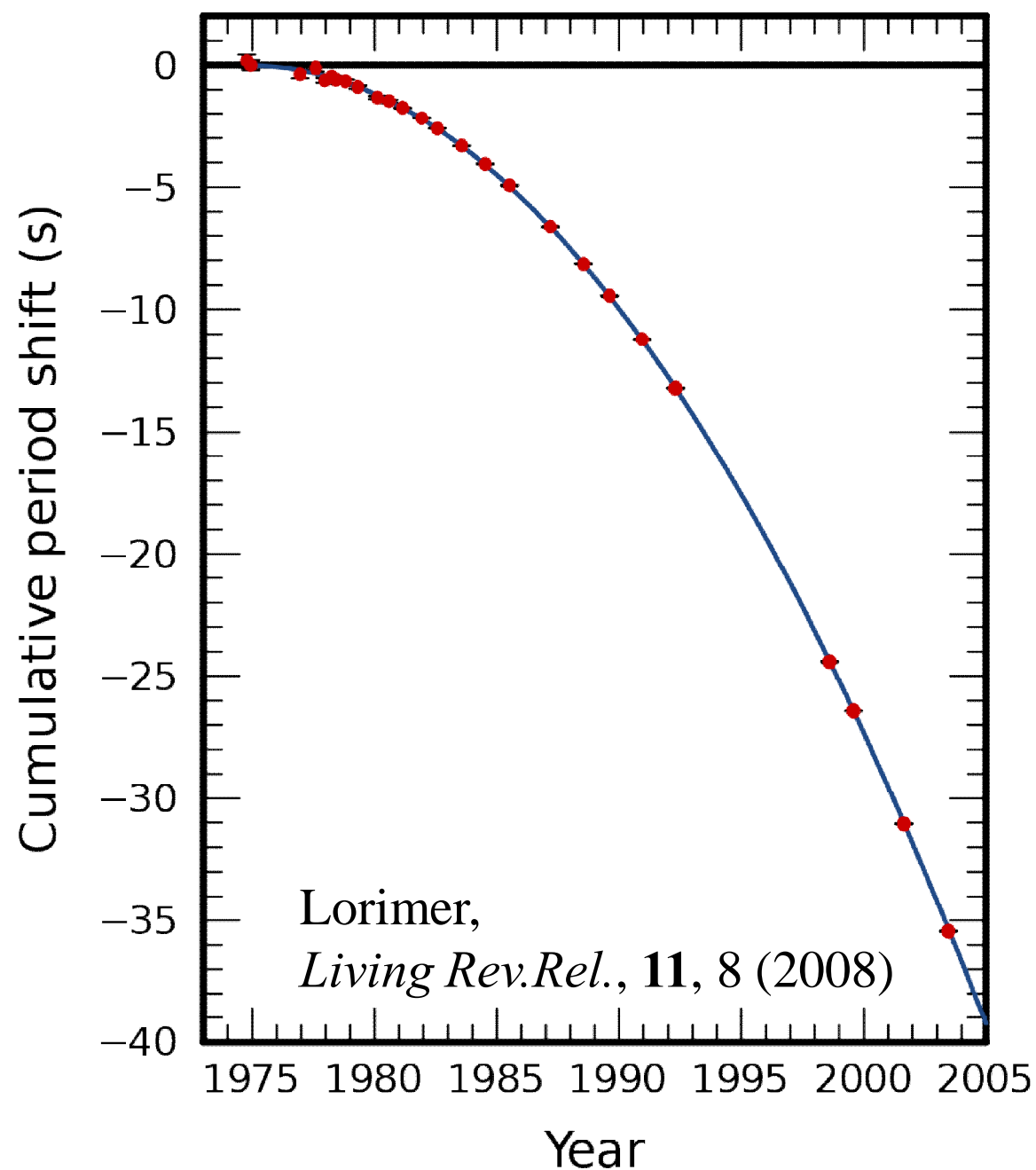


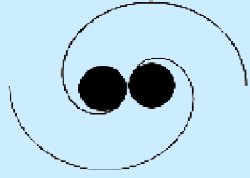
**Russell A. Hulse**  
(New York, 1950 - )



**Joseph H. Taylor, Jr,**  
(Philadelphia, 1941 - )

- godine 1974. Hulse i Taylor su koriste i 300m radio-teleskope Arecibo, Puerto Rico, su otkrili dvojnog pulsara PSR 1913+16





- kompaktni objekti (kona ne faze evolucije zvezda): beli patuljci (WD), neutronske zvezde (NS), crne rupe (BH)

- PSR 1913+16

- pulsar i radio-tiha neutronska zvezda?

$$M_1 = 1.4398,$$

$$M_2 = 1.3886,$$

$$P_1 = 59 \text{ ms},$$

$$a = 1\,950\,000 \text{ km},$$

$$e = 0.617,$$

$$P = 7.75 \text{ h},$$

$$\dot{P} = 76.5 \mu\text{s/yr}$$

$$\dot{\omega} = 4.23 \text{ deg/yr}$$

(Weisberg, Nice & Taylor, *ApJ*, **722**, 1030 (2010))

- PSR J0737 3039

- dvostruki pulsar

$$M_1 = 1.337,$$

$$M_2 = 1.251,$$

$$P_1 = 22.7 \text{ ms},$$

$$P_2 = 2780 \text{ ms},$$

$$a = 877\,000 \text{ km},$$

$$e = 0.088,$$

$$P = 2.45 \text{ h},$$

$$\omega = 16.9 \text{ deg/yr}$$

(Lyne et al., *Science*, **303**, 1153 (2004))

- poznati sistemi WD+WD, WD+NS, NS+NS

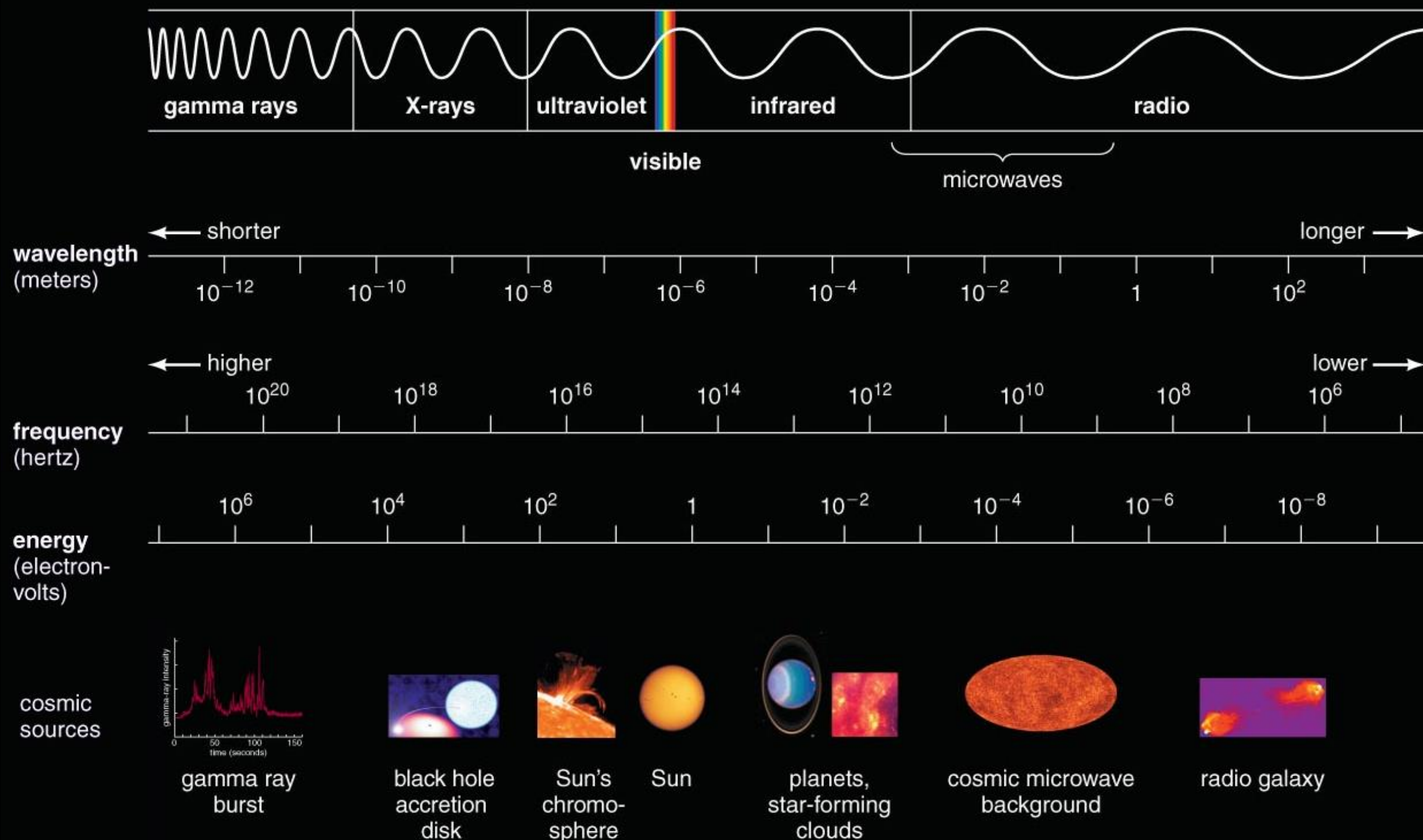
- detekcija sistema WD+BH, NS+BH i BH+BH ?



# Elektromagnetno zračenje

- informacije o astronomskim objektima dobijamo, pre svega, analizom elektromagnetnog zračenja (EM)

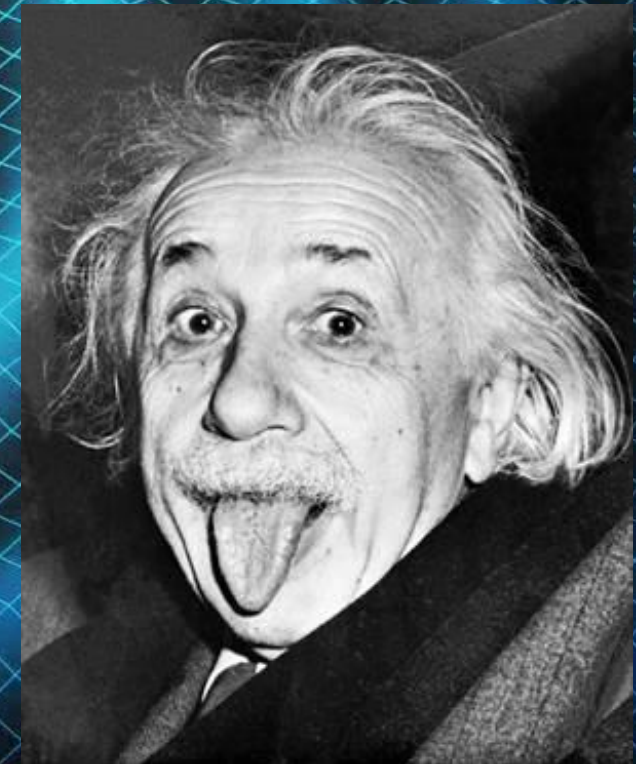
- kosmičko zračenje, neutrini



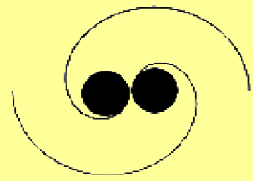


# Šta su gravitacioni talasi?

- oscilacije gravitacionog polja / prostor-vremena koje se prostiru brzinom svetlosti
- kao što ubrzana naelektrisana tela / čestice emituju elektromagnetne talase, ubrzana masivna tela bi trebalo da emituju gravitacione talase (GW)?
- astrofizički izvori: GW kosmološkog porekla, dvojne supermasivne crne rupe, zvezdani izvori: supernove, pulsari, dvojni sistemi sa kompaktnim objektima
- gravitacioni talasi – novi nosioc informacija, komplementaran EM
- EM vs. GW - analogija sa čulom vida i sluha
- teorijski ih je predvideo Albert Ajnštajn 1918. godine







- dinamika prostor-vremena opisana je Ajnštajnovim jednačinama

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

- metrički koeficijenti igraju ulogu gravitacionih potencijala

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$$

- pretpostavimo da je prostor-vreme prostor Minkovskog u kojem imamo malu perturbaciju

$$g_{\mu\nu}(x) = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}(x), \quad |h_{\mu\nu}| \ll 1.$$

- izborom Lorencovog kalibracionog uslova dobija se **talasna jednačina**

$$\partial_\nu \bar{h}^{\mu\nu} = 0, \quad \bar{h}_{\mu\nu} = h_{\mu\nu} - \frac{1}{2} \eta_{\mu\nu} h$$

$$\square \bar{h}_{\mu\nu} = -\frac{16\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}.$$

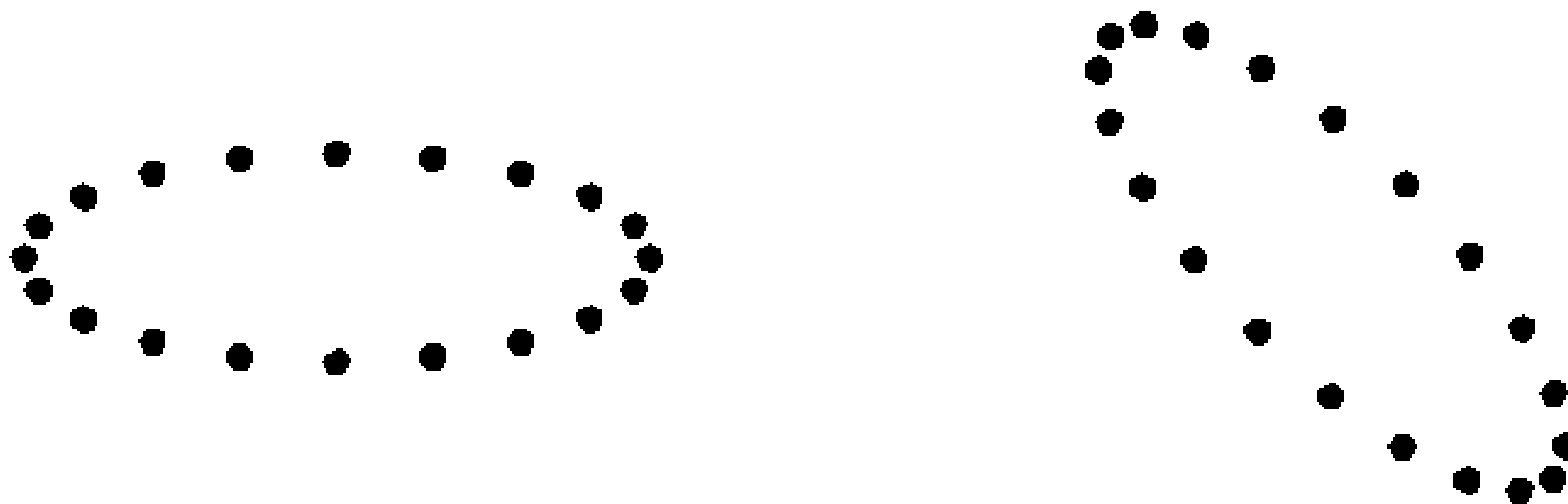




- ako iskoristimo dodatni kalibracioni uslov (TT, *transverse traceless gauge*). od po etnih 10 preostaju nam 2 stepena slobode koji odgovaraju stanjima polarizacije gravitacionog talasa (+ i x)

$$h^{0\mu} = 0, \quad \partial_i h^{ij} = 0, \quad h = 0$$

$$h_{\mu\nu}^{TT}(t, z) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & h_+ & h_\times & 0 \\ 0 & h_\times & -h_+ & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cos \omega(t - z)$$





- zbog o uvanja impulsa i momenta impulsa, dominantno zra enje je kvadrupolno

$$\left(\frac{dE}{dt}\right)_{EM} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left\{ \frac{2\langle|\ddot{\mathbf{d}}|^2\rangle}{3c^3} + \frac{2\langle|\ddot{\mathbf{m}}|^2\rangle}{3c^5} + \frac{\langle|\ddot{\mathbf{D}}|^2\rangle}{20c^5} \right\}$$

- snaga zra enja data je kvadrupolnom formulom (Shapiro & Teukolsky 1983, Misner, Thorne & Wheeler 1973):

$$\left(\frac{dE}{dt}\right)_{GR} = G \frac{\langle|\ddot{\mathbf{I}}|^2\rangle}{5c^5}$$

- Birkhoff-ova teorema: sfernosimetri no polje u vakuumu je opisano Schwarzschild-ovom metrikom - sfernosimetri no telo ne emituje gravitacione talase
- asimetri ne supernove, pulsari (koji nisu osnosimetri ni)
- indirektna detekcija: dvojni sistemi sa kompaktnim objektima
- gubitak energije i momenta impulsa sistema:

$$\frac{dE}{dt} = -\frac{32 G^4 M^3 \mu^2}{5 c^5 a^5}, \quad \frac{dJ}{dt} = \frac{1}{\Omega} \frac{dE}{dt} = -\frac{32 G^{7/2} M^{5/2} \mu^2}{5 c^5 a^{7/2}}.$$

- direktna detekcija: kompakni dvojni sistemi / tesni dvojni sistemi (TDS) sa kompaktnim objektima ó sudari !
- supernove tipa Ia, kratki gama bljeskovi (dugi -> hipernove)





- faze sudara: spiralno približavanje, spajanje, odzvanjanje (*inspiral, merger, ringdown*)
- prva faza može da se opiše u njutnovskoj / post-njutnovskoj aproksimaciji

$$\langle h \rangle = \left( \frac{32}{5} \right)^{1/2} \frac{G^{5/3} \mathcal{M}^{5/3}}{c^4 d} \pi^{2/3} f^{2/3} \quad - \text{amplituda}$$

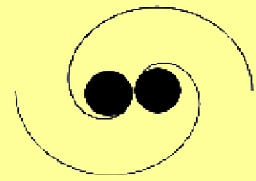
$$\dot{f} = \left( \frac{96}{5} \right) \frac{G^{5/3} \mathcal{M}^{5/3}}{c^5} \pi^{8/3} f^{11/3}$$

$$f = \Omega / \pi = 2 / P \quad - \text{frekvencija} = 2 \times \text{orbitalna frekvencija}$$

$$\mathcal{M} = M^{2/5} \mu^{3/5} \quad - \text{masa oćvrkutaö (eng. chirp)}$$

$$\tau_g = 9.83 \times 10^6 \cdot \left( \frac{P}{h} \right)^{8/3} \left( \frac{\mathcal{M}}{M_\odot} \right)^{-5/3} (1 - e^2)^{7/2} \quad \text{god.} \quad - \text{vreme do sudara}$$

- druga i treća faza (kod crnih rupa) su znatno komplikovanije za opis ó koriste se metode numeričke relativnosti



- direktna detekcija?
- Joseph Weber 1970-ih, prva antena = aluminijumski cilindri pre nika oko 1 m obloženi piezoelektričnim elementima, detektovani signal ó zapravo –um
- Reiner Weiss 1972. dolazi na ideju o laserskom interferometru i diskutuje različite izvore –uma, od samog instrumenta ó lasera, zatim kosmičkog zračenja, termalnog, elektromagnetnog, seizmičkog –uma, itd.
- nekoliko projekata je u toku: LIGO (*Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory*), VIRGO, GEO600, TAMA300 ili u pripremi (LISA ó *Laser Interferometer Space Antenna*, *Einstein Telescope*)
- LIGO ó *enhanced* eLIGO (2002-2010, bez detekcije) -> *advanced* aLIGO (2015-)







LIGO Hanford, Washington



LIGO Livingston, Louisiana





-14. septembra 2015. ó prva detekcija,  
GW150914 !

(LIGO-Virgo Coll, Abbott *et al.*, *Phys. Rev. X*, **6**, 041014 (2016))

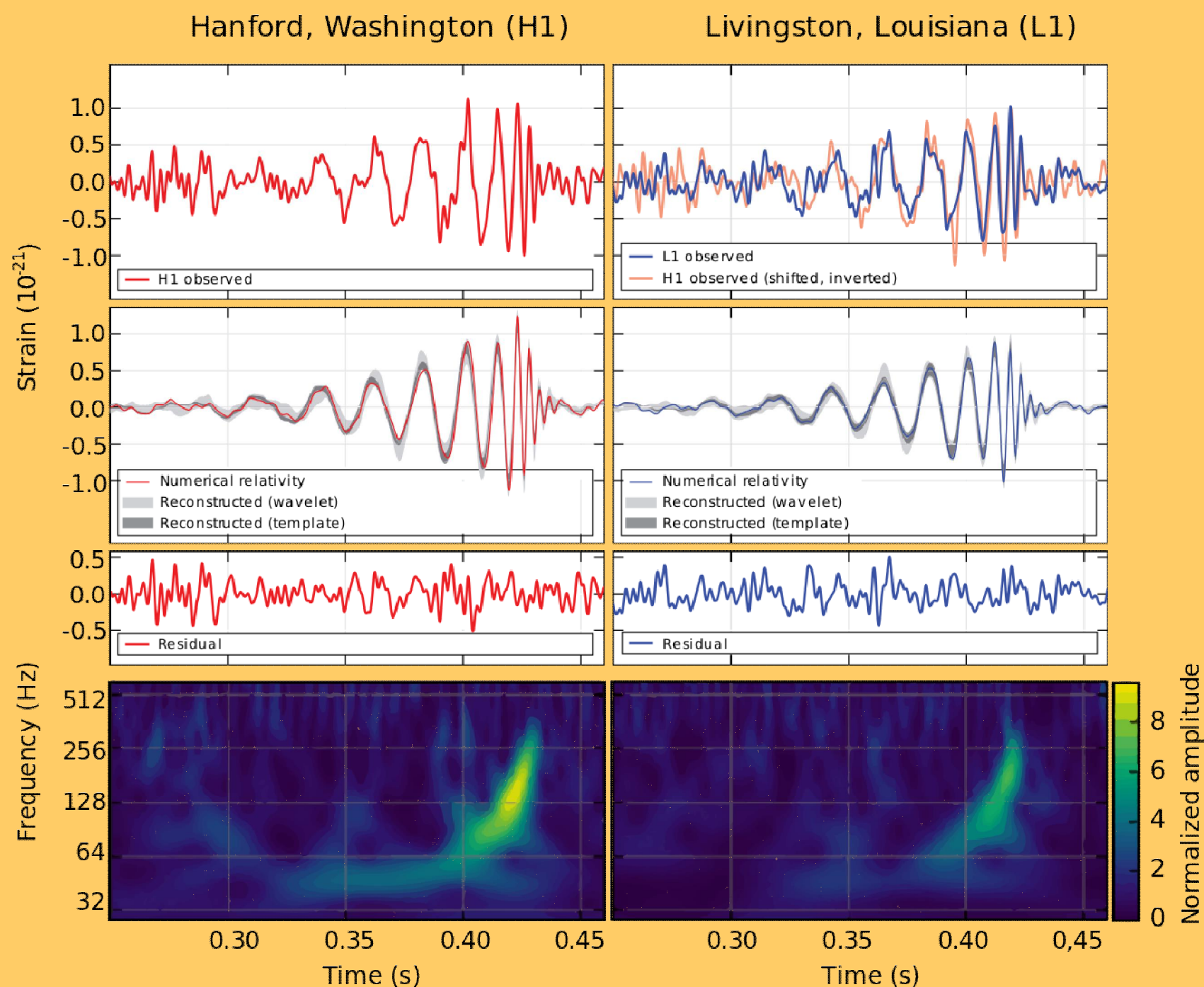
- objavljeno 11. februara 2016.

- signal je trajao 0.2 s, oko 8 ciklusa,  
sa rastu om amplitudom i  
frekvencijom, od 35 Hz do 250 Hz.

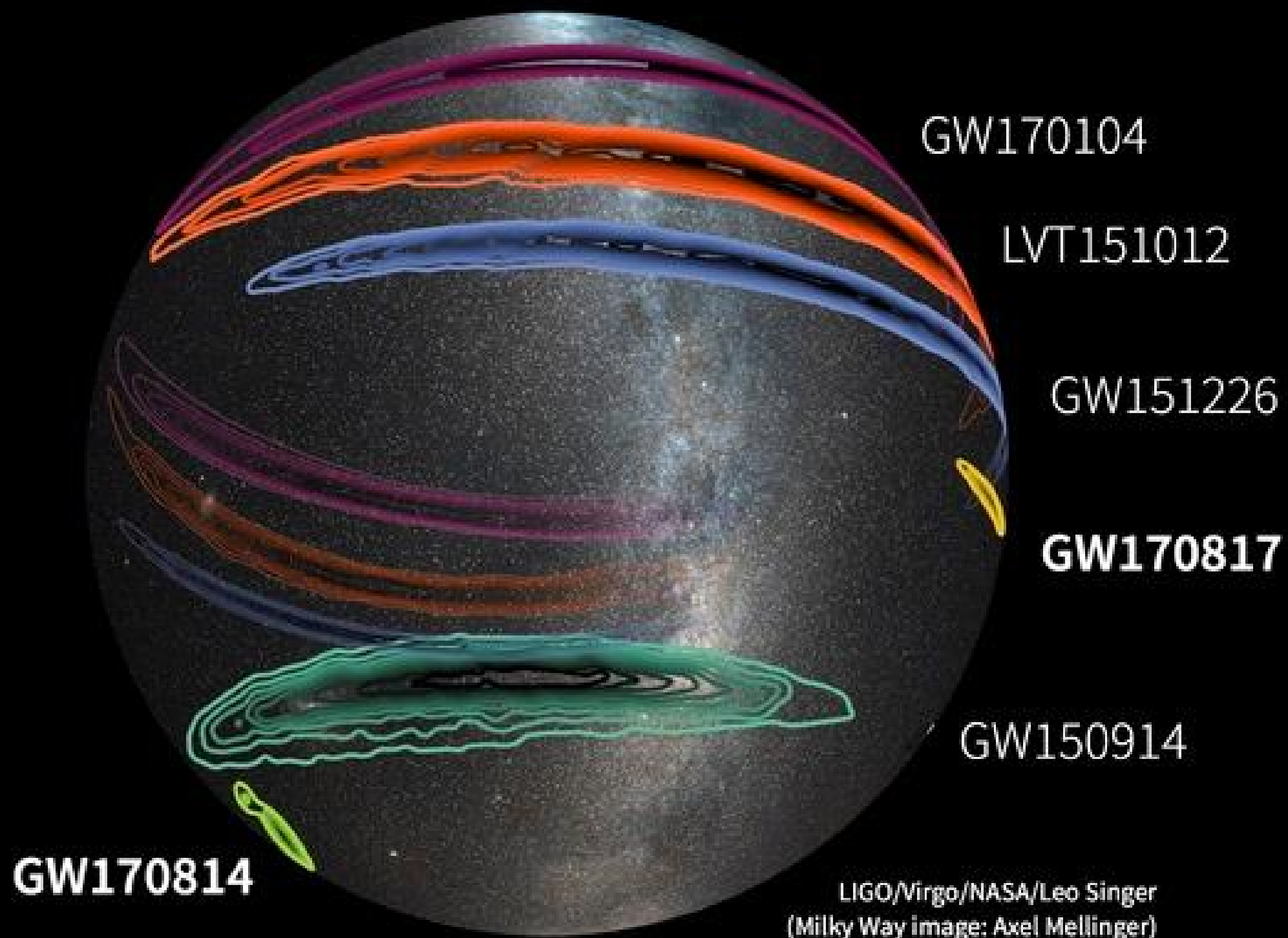
- sudar / spajanje dve crne rupe masa  
 $35+30 = 62$  mase Sunca, na daljini od  
440 Mpc

- Kerova crna rupa sa parametrom  
rotacije  $\sim 2/3$  max.

- zaklju no sa 16. novembrom 2017. objavljeno je jo–5 detekcija!









Virgo, ~Pisa, Italija



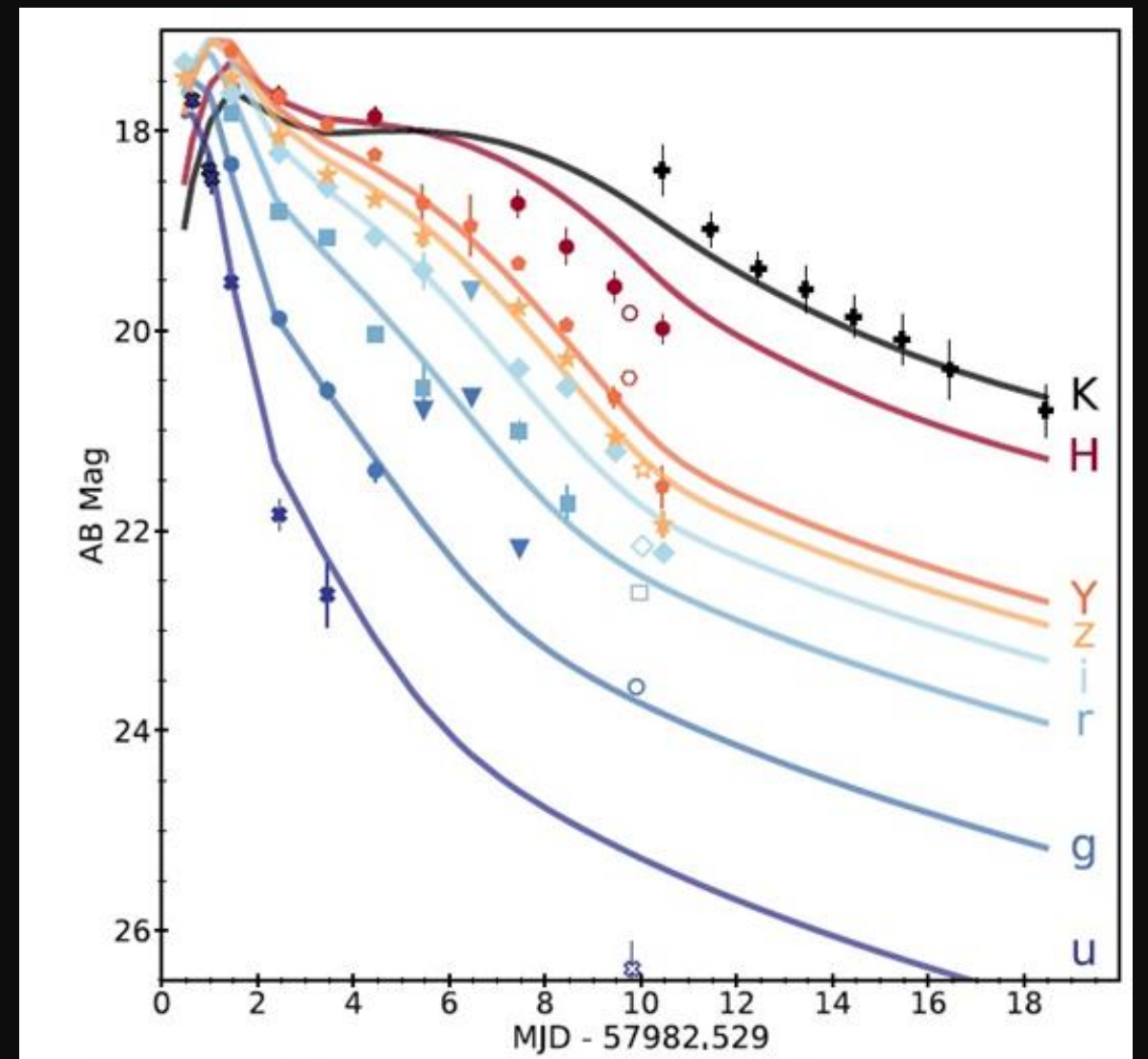
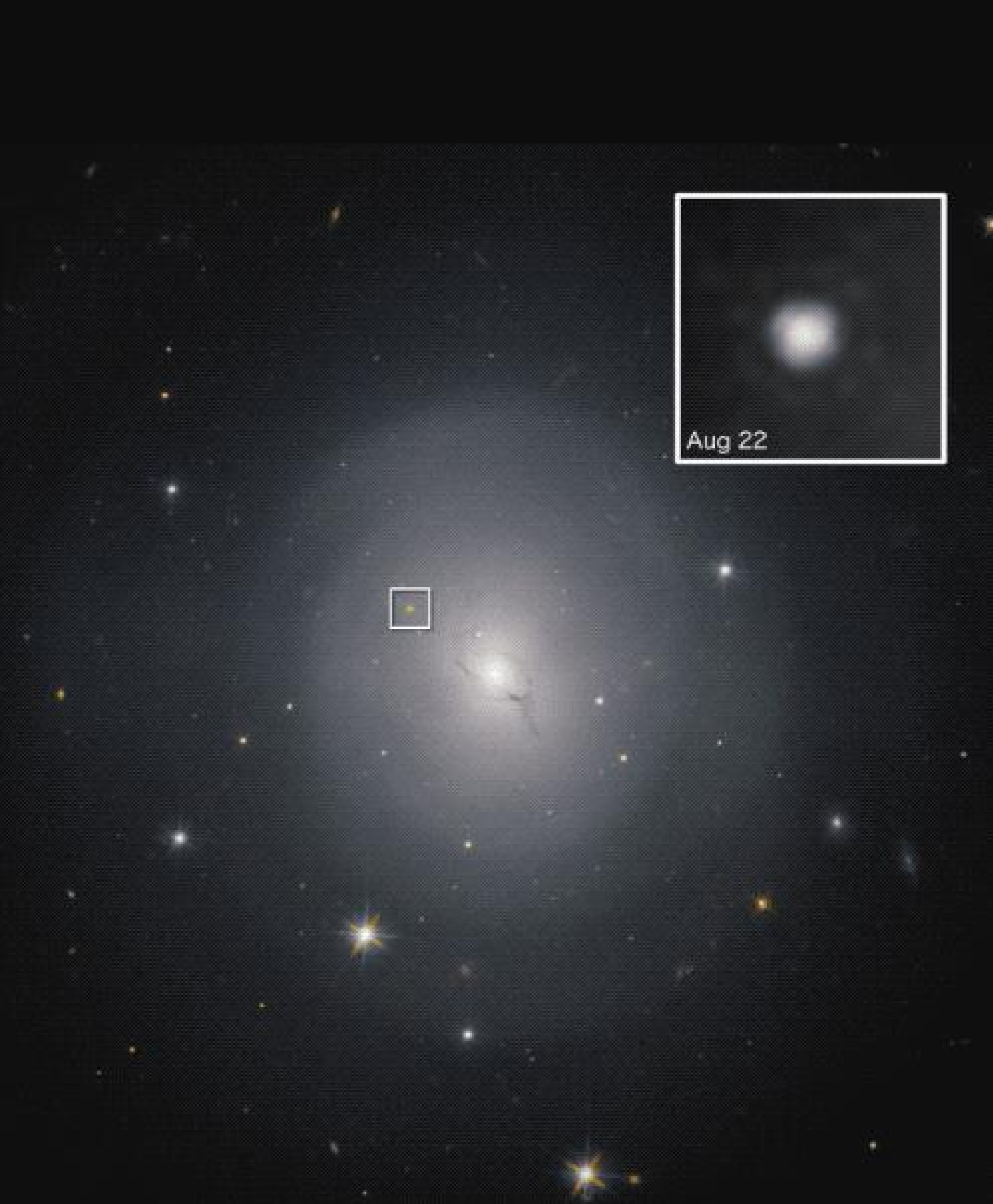


Event	Detection (UTC)	Published	Location area (deg <sup>2</sup> )	d (Mpc)	Energy rad. (c <sup>2</sup> M <sub>⊙</sub> )	Primary		Secondary		Remnant			Notes
						Type	Mass (M <sub>⊙</sub> )	Type	Mass (M <sub>⊙</sub> )	Type	Mass (M <sub>⊙</sub> )	Spin	
GW150914	2015-09-14 09:50:45	2016-02-11	600; mostly to the south	440	3.0	BH	35.4	BH	29.8	BH	62.2	0.68	First GW detection; first BH merger obs. Largest progenitor masses to date
GW151226	2015-12-26 03:38:53	2016-06-15	850	440	1.0	BH	14.2	BH	7.5	BH	20.8	0.74	
GW170104	2017-01-04 10:11:58	2017-06-01	1200	880	2.0	BH	31.2	BH	19.4	BH	48.7	0.64	Farthest confirmed event to date
GW170608	2017-06-08 02:01:16	2017-11-16	520; to the north	340	0.85	BH	12	BH	7	BH	18.0	0.69	Smallest BH progenitor masses to date
GW170814	2017-08-14 10:30:43	2017-09-27	60; towards Eridanus	540	2.7	BH	30.5	BH	25.3	BH	53.2	0.70	First detection by three observatories; first measurement of polarization.
GW170817	2017-08-17 12:41:04	2017-10-16	28; NGC 4993	40	> 0.025	NS	1.36-1.60	NS	1.17 - 1.36	NS or BH	< 2.74		First NS merger obs. First detection of EM counter. (GRB170817A; AT 2017gfo). Closest so far.

- 17. avgusta 2017. - GW170817, detektovan signal dufine ~100s!

- najblifi GW, EM detekcija: GRB170817A; AT 2017gfo - sudar neutronskih zvezda!

(LIGO-Virgo Coll, Abbott *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **119**, 161101 (2017))

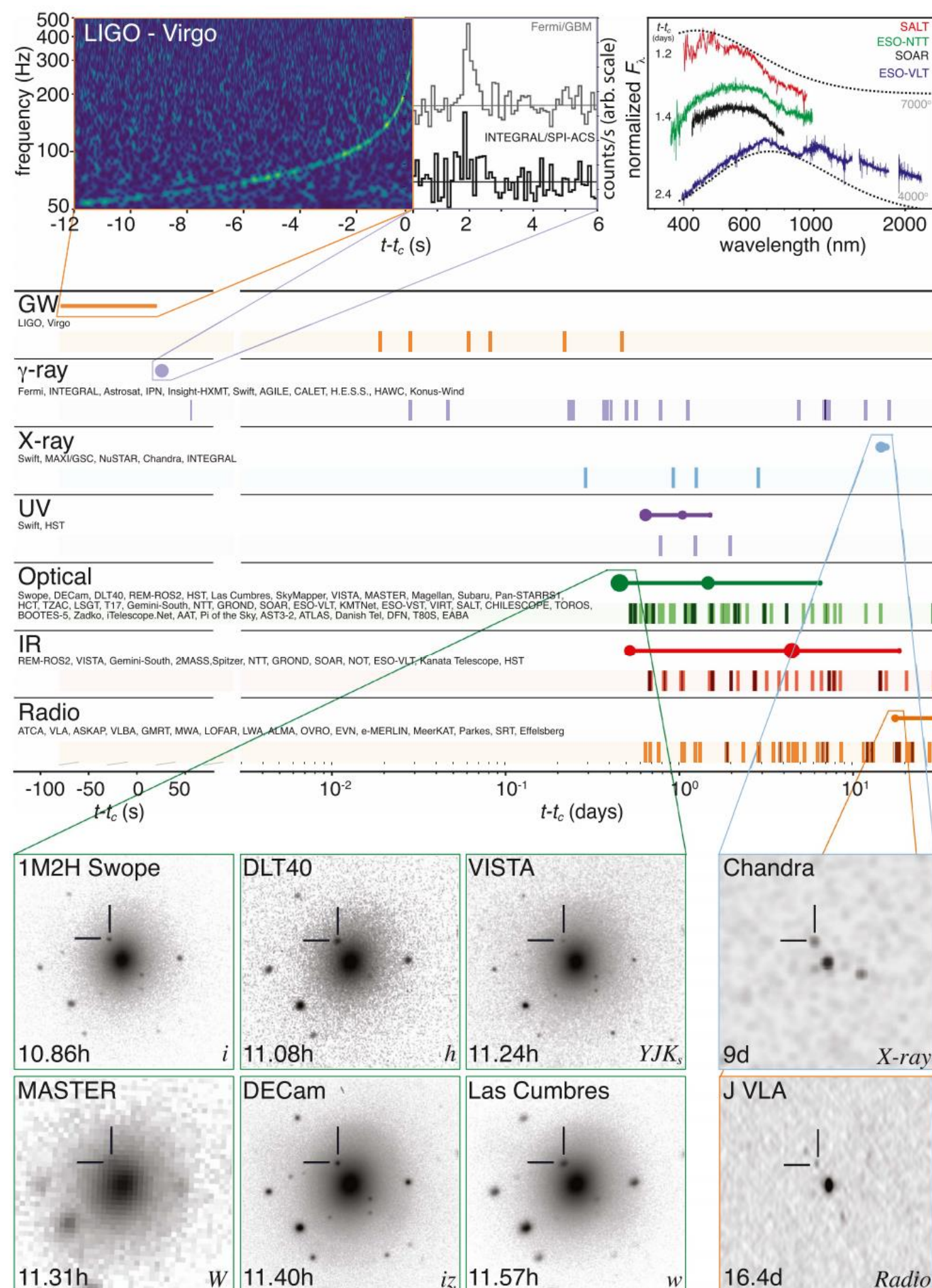


(Cowperthwaite et al., *ApJL*, **848**, L17 (2017))

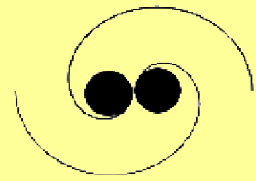
NGC4993 (HST, *Credit: NASA and ESA*)



- multi-frekvenciona kampanja  
(Abbott et al. 2017, *ApJL*, **848**, L12)
- LIGO detektovao sudar u 12:41:04.4 UT
- signal  $\sim 100$  s, od 24 do nekoliko stotina Hz, oko 3000 ciklusa, ka-njenje izme u LIGO detektora oko 20 ms, Virgo bez detekcije, -to je pomoglo u lokalizaciji
- $\sim 2$ s kasnije Fermi *Gamma-Ray Burst Monitor* registruje kratak bljesak
- u 23:33 UTC detektovan opti ki izvor - *Swope Supernova Survey 2017a* (SSS17a), 1m-teleskopom *Swope*, opservatorije *Las Campanas*, ile, preimenovan u AT2017gfo
- mnogobrojna UV, opti ka i IR posmatranja
- nakon 9 (15) dana *Chandra* detektuje X-zra enje
- nakon 16 dana radio-detekcija VLA







## - kilonova!

- oko 1000x sjajnija od nove u maksimumu,  $M_V \sim -15$  (Metzger et al., *MNRAS*, **406**, 2650 (2010))
- poreklo teških elemenata ( $Z > 26$ ) ?
- s-procesi (*slow neutron capture process*, AGB zvezde) i r-procesi (*rapid neutron capture*, eksplozivni procesi)
- sintetizovana ~ 1 masa Zemlje zlata i platine! (Kasen et al. 2017, *Nature*, **551**, 80)

## - standardne sirene

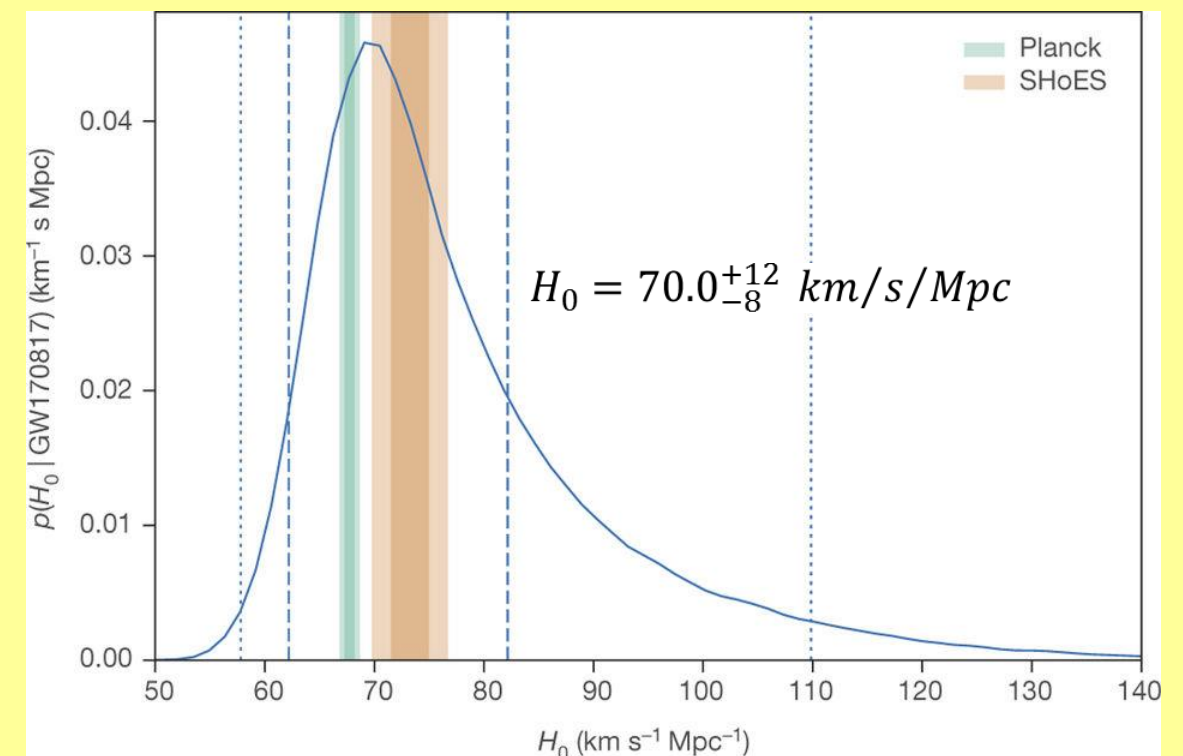
- *multi-messenger astronomy*
- nezavisno određivanje Hablove konstante
- luminozna daljina iz GW, crveni pomak iz EM posmatranja

## Koje informacije imamo na osnovu prvih detekcija

- evolucija zvezda -> masivne BH, ali i BH u TDS

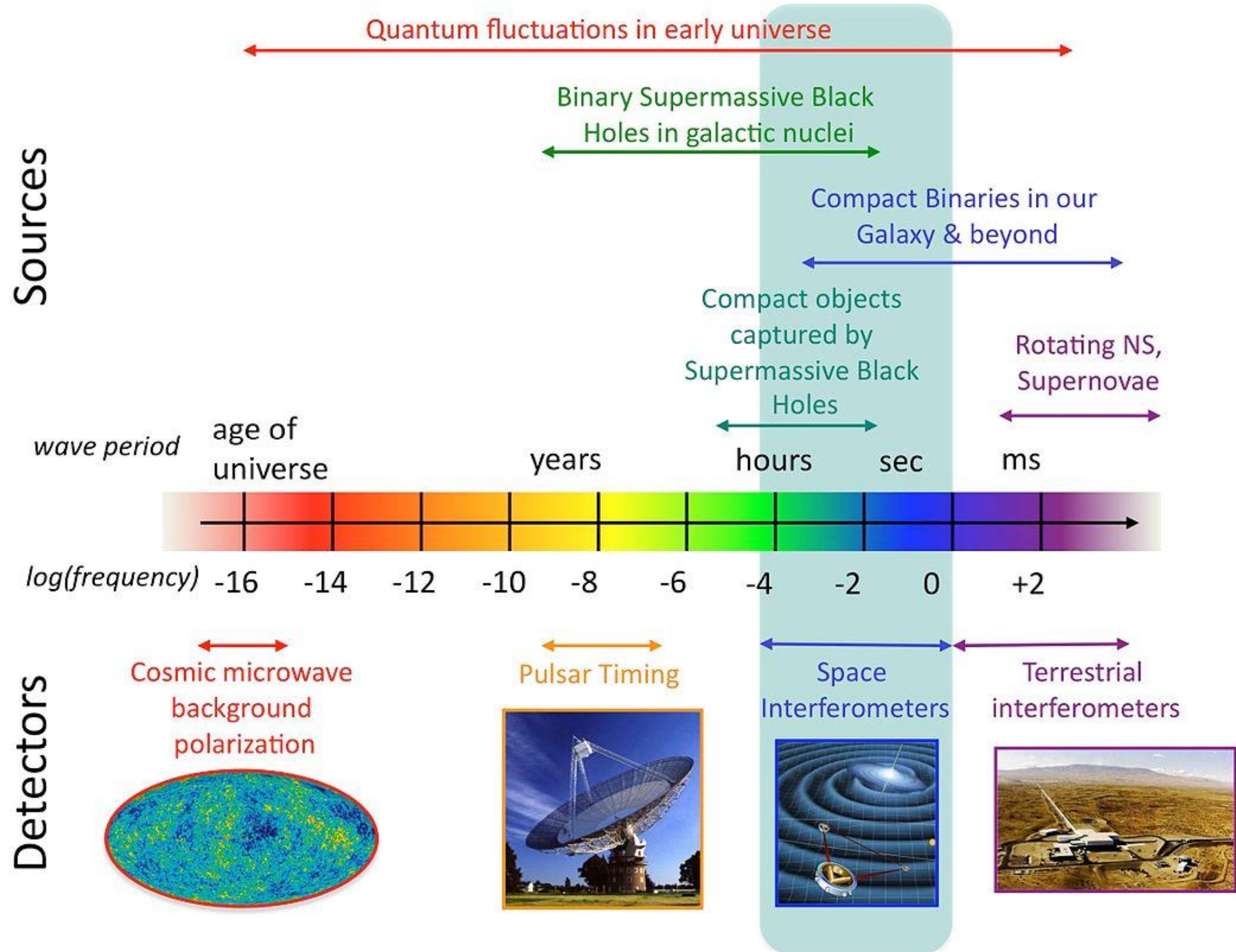
## ta da o ekujemo?

- sudar NS-BH
- GW supernovei

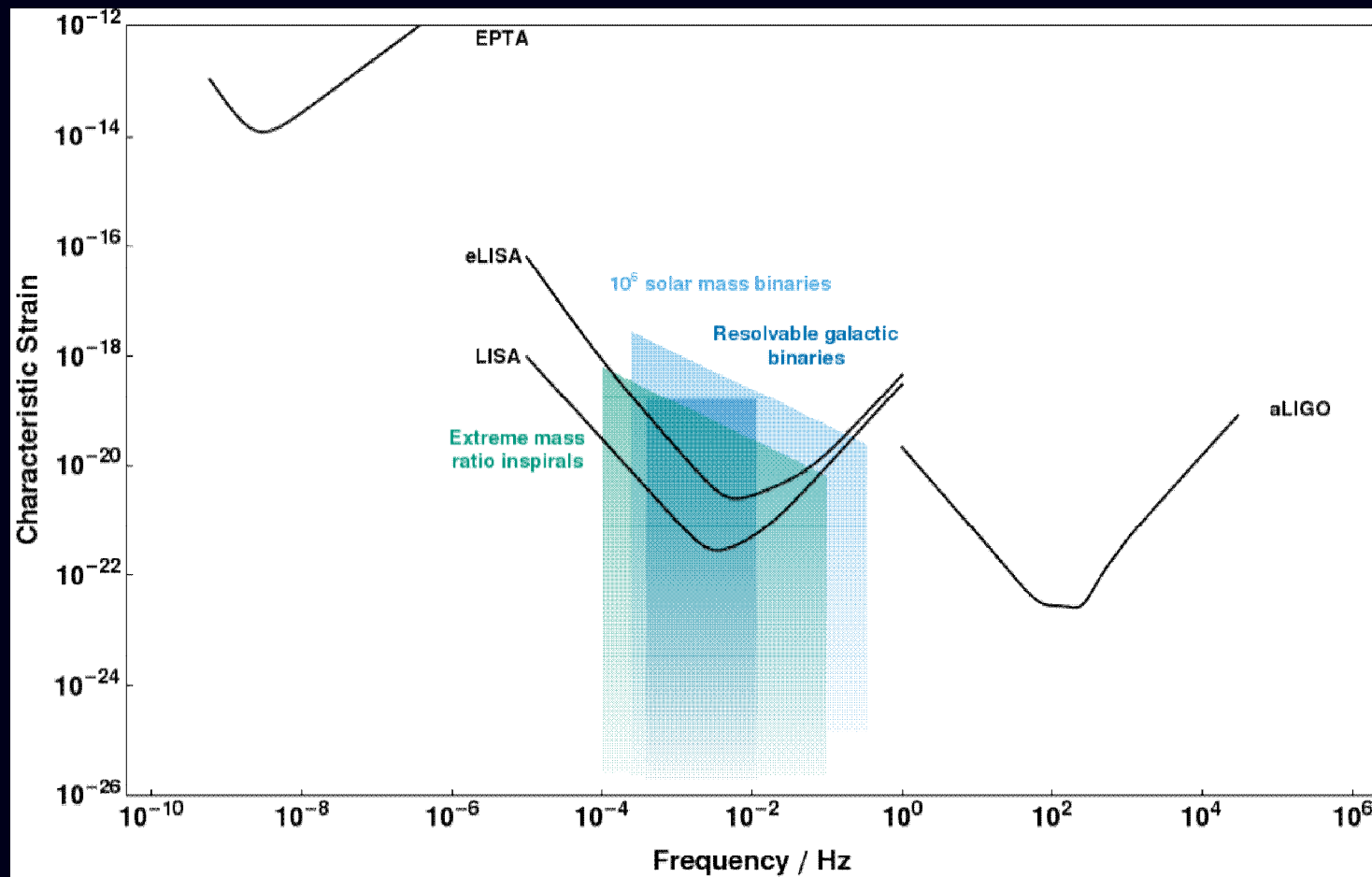


LIGO collab., 2017, *Nature*, **551**, 85

# The Gravitational Wave Spectrum

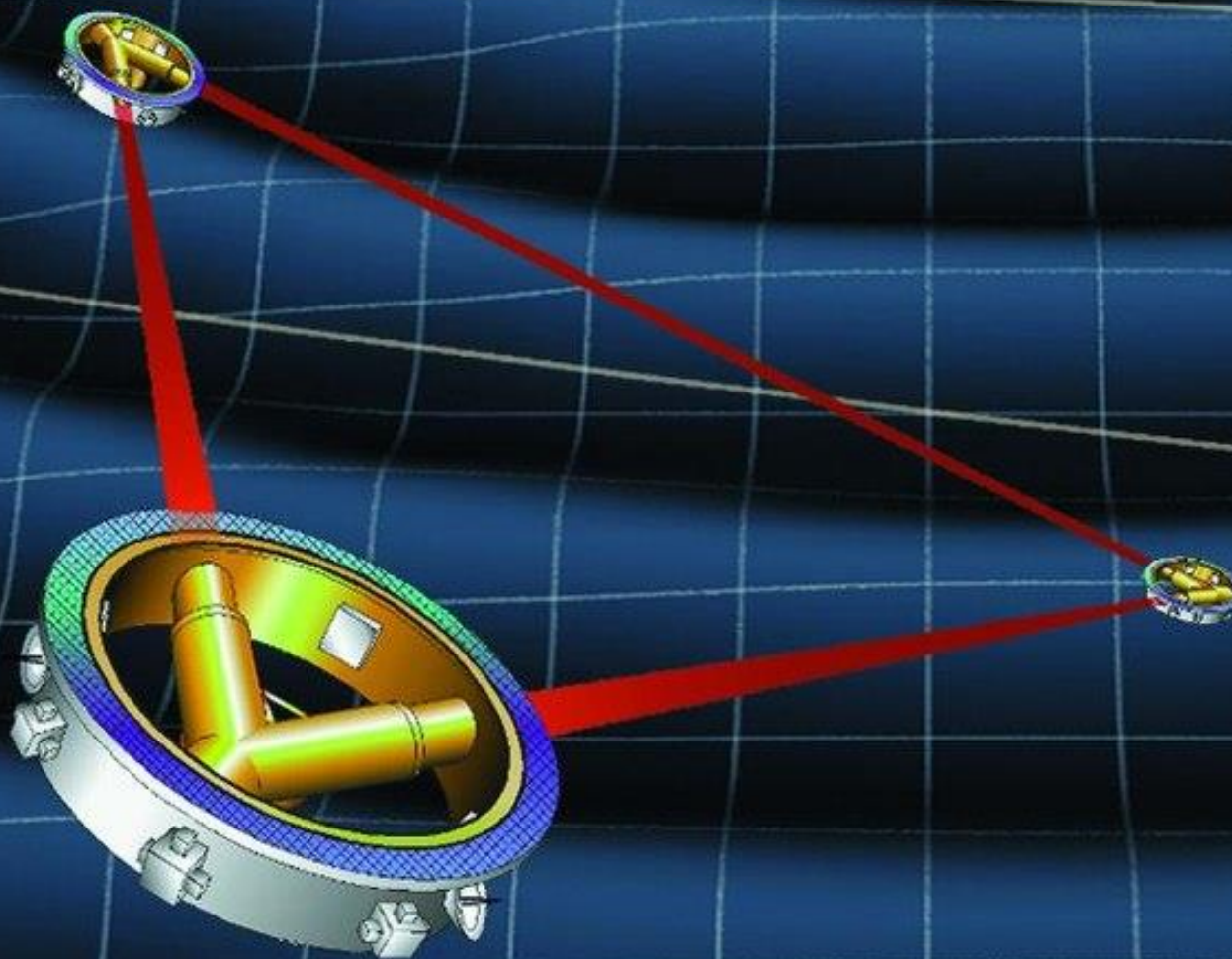






# LISA

- *Laser Interferometer Space Antenna*
- misija planirana za 2034.
- *Lisa Pathfinder* – lansiran 2015.





***HVALA!***

