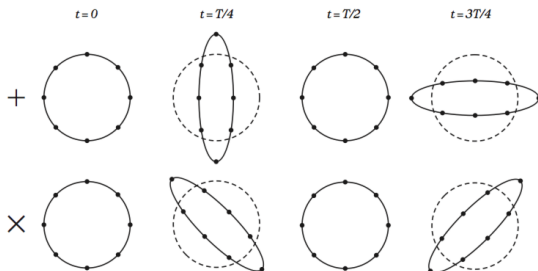
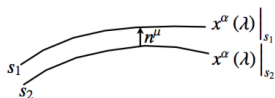


GRAVITACIONI TALASI

OD IDEJE O MERENJU DO DIREKTNE DETEKCIJE

MAJA BURIĆ, FIZIČKI FAKULTET



U februaru 2016 LIGO kolaboracija je objavila **prvu direktnu detekciju gravitacionih talasa**. LIGO interferometri detektovali su u septembru 2015 talase emitovane pri **sudaru odnosno spajanju dve crne rupe**.

PRL **116**, 061102 (2016)

 Selected for a **Viewpoint** in *Physics*
PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
12 FEBRUARY 2016



Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger

B. P. Abbott *et al.**

(LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration)

(Received 21 January 2016; published 11 February 2016)

On September 14, 2015 at 09:50:45 UTC the two detectors of the Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory simultaneously observed a transient gravitational-wave signal. The signal sweeps upwards in frequency from 35 to 250 Hz with a peak gravitational-wave strain of 1.0×10^{-21} . It matches the waveform predicted by general relativity for the inspiral and merger of a pair of black holes and the ringdown of the resulting single black hole. The signal was observed with a matched-filter signal-to-noise ratio of 24 and a false alarm rate estimated to be less than 1 event per 203 000 years, equivalent to a significance greater than 5.1σ . The source lies at a luminosity distance of 410^{+160}_{-180} Mpc corresponding to a redshift $z = 0.09^{+0.03}_{-0.04}$. In the source frame, the initial black hole masses are $36^{+5}_{-4}M_{\odot}$ and $29^{+4}_{-4}M_{\odot}$, and the final black hole mass is $62^{+4}_{-4}M_{\odot}$, with $3.0^{+0.5}_{-0.5}M_{\odot}c^2$ radiated in gravitational waves. All uncertainties define 90% credible intervals. These observations demonstrate the existence of binary stellar-mass black hole systems. This is the first direct detection of gravitational waves and the first observation of a binary black hole merger.

Još detalja

- LIGO je najveći precizni optički instrument na svetu, sa drugom najvećom vakuumskom komorom
- dužine krakova interferometara su 4 km, a u njima se laserska svetlost obija, tj. signal pojačava, 300 puta
- ogledala od kojih se laserski snop odbija su prečnika 8 cm a njihova devijacija od sfere je $5 \cdot 10^{-10}$ m
- intenzitet merenog signala, strain = $\frac{\delta L_x - \delta L_y}{L} = 10^{-21}$

Kakav je teorijski i praktični značaj ovog otkrića?

Naziv 'otkriće veka' je verovatno preteran, jer se u oblasti fundamentalnih fizičkih teorija gravitacioni talasi takmiče sa otkrićima

- Higgs-ovog bozona 2012, predviđen 1964, Nobelova nagrada 2013,
- ubrzanog širenja svemira 1998, neočekivano, Nobelova nagrada 2011

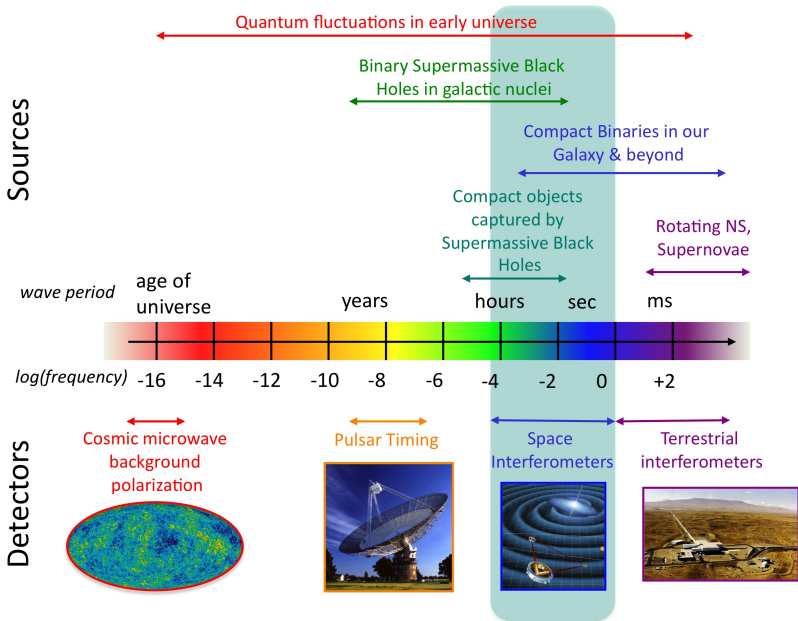
ali je i verovatna Nobelova nagrada naučnicima sa MIT-ja i Caltech-a koji su krajem šezdesetih inicirali gradnju interferometarskog detektora (Reiner Weiss, Kip Thorne, ...).

Prva detekcija gravitacionih talasa predstavlja početak GRAVITACIONE ASTRONOMIJE, koja će omogućiti različitu, komplementarnu sliku svemira od one koju dobijamo na osnovu elektromagnetnih talasa i dati nove uvide u postojeće fenomene, kao i otkriti nove.

- EM talase emituju čestice tako da oni nose informaciju o lokalizovanim delovima prostora, dok gravitacione talase emituju **sistemi velikih masa i dimenzija** (dvojne neutronske zvezde, dvojne crne rupe, supermasivne crne rupe, veliki prasak).
- EM talasi jako interaguju sa materijom pa se lako detektuju ali i rasejavaju na putu do Zemlje. Gravitacioni talasi slabo interaguju i teško se detektuju, ali zato putuju od svog izvora do Zemlje skoro **nepromenjeni**, čuvajući potpunu informaciju o izvoru.
- Pošto je 96% mase (energije) svemira nenaelektrisano tj. tamno, gravitacioni talasi će dati mogućnost direktnog posmatranja **tamne komponente svemira**.
- Detektori gravitacionih talasa primaju signal iz svih pravaca kao kod **zvuka** a različito od optičkih teleskopa i antena. Dalje, oni detektuju fazu talasa a ne samo amplitudu, što znači da je su u njima kodirani detalji informacije o međusobnom kretanju tela unutar izvora. Kao kod zvučnih talasa, treba razviti načine da se razume signal i razluči od šuma (**'matched filtering'**).

- Gravitacioni talasi će prvi direktno detektovati dinamičke efekte u teoriji relativnosti, kao i efekte jakog gravitacionog polja – delove OTR u kojima je gravitacioni potencijal veliki a brzine relativističke.
- Gravitacioni talasi će omogućiti spektroskopiju crnih rupa, tj. detaljan uvid njihovo formiranje (gravitacioni kolaps), osobine i kretanje.
- Gravitacioni talasi iz ranih faza evolucije svemira formiraju gravitacioni šum. Njegova detekcija i razumevanje daće uvid u rani svemir, tj. u veliki prasak.
- Konačno, gravitacioni talasi testiraće samu OTR kao i alternativne teorije gravitacije.

The Gravitational Wave Spectrum



U ovom predavanju reći ćemo nešto o istoriji i o teoriji gravitacionih talasa u okviru OTR. Neće međutim biti reči o nekim izuzetno važnim temama kao što su

- konstrukcija detektora
- šum i izvori šuma
- analiza podataka.

Kao i teorija gravitacionih talasa, i ove teme su zahtevale strpljenje, genijalnost i posvećenost čitave generacije eksperimentalnih fizičara.

Od desetina preglednih radova izdvajamo:

- A. Buonano, *Gravitational Waves*,
Lectures at Les Houches 2006, arXiv: 0709.4682
- B.S. Sathyaprakash, B.F. Schutz,
Physics, Astrophysics and Cosmology with Gravitational Waves,
Irr-2009-2

- Einstein je predvideo gravitacione talase u radu iz 1918 *Über die Gravitationswellen*, u kome je izveo kvadrupolnu formulu. Kvadrupolna formula daje snagu gravitacionog zračenja

$$\frac{dE}{dt} = \frac{G}{5c^5} \langle \ddot{Q}_{ij} \ddot{Q}_{ij} \rangle$$

u zavisnosti od vremenskih izvoda kvadrupolnog momenta izvora

$$Q_{ij} = M_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} M, \quad M^{ij} = \frac{1}{c^2} \int d^3x T^{00} x^i x^j.$$

- U radovima iz 1936 i 1937 sa Rosen-om (*Do gravitational waves exist?* odbijen is *Phys. Rev.*, i *On gravitational waves*, *Jour. Frank. Inst.*) Einstein diskutuje realnost fizičkih efekata gravitacionih talasa. U radu iz 1938 sa Infeld-om i Hoffmann-om postavio je osnove postnjutnovske aproksimacije i pokazao da do četvrtog reda po v/c nema prenosa energije.

- Zapravo, danas standardne, tehnike koje omogućavaju se izdvoje i razumeju efekti gravitacije formirane su tek posle Einstein-a, '50-tih (Lichnerowicz, Bondi, Pirani) i '60-tih (Hawking, Penrose) godina, dok ideje o postojanju i mogućnosti astrofizičke potvrde crnih rupa, neutronskih zvezda ili gravitacionih talasa nije ni bilo.
- Problem su, u nekom smislu, bile koordinatna invarijantnost Einstein-ovih jednačina (razdvajanje koordinatnih od fizičkih efekata), kao i njihova nelinearnost (mali broj egzaktnih rešenja, pitanje domena važenja linearizovane teorije).
- Feynman 1955: “the problem of the relation of gravitation to the rest of physics is one of the outstanding theoretical problems of our age”.
- Podela na ‘relativiste’ i ‘čestičare’ traje i do danas.

- Veliki pomak u razumevanju gravitacionih talasa napravljen je na konferenciji u Chapel Hill-u 1957 koju su organizovali B.&C. de Witt.
- Jednačina geodezijskog odstupanja

$$\frac{d^2 n^\mu}{ds^2} + R^\mu{}_{\nu\rho\sigma} n^\rho t^\nu t^\sigma = 0$$

opisuje medjusobno kretanje probnih čestica: n^μ je vektor normalnog rastojanja dva bliska geodezika, t^μ tangentni vektor.

- Ova jednačina je dala ideju o mogućnosti i načinima merenja gravitacionih talasa u predavanju i diskusijama Pirani-ja, Bondi-ja i Feynman-a na konferenciji i kasnije.
- U Riemann-ovim normalnim koordinatama iz jednačine geodezijskog odstupanja dobijamo

$$\frac{d^2 \xi^j}{d\tau^2} = -R^j{}_{0k0} \xi^k,$$

jednačinu koja sadrži osnovni princip rada detektora.



- Konferenciji u Chapel Hill-u je prisustvovao i Joseph Weber koji je napravio prvu antenu za gravitacione talase. Weber-ove antene bili su **aluminijumski cilindri** prečnika oko 1 m obloženi piezoelektričnim elementima.
- Od ideje i nacрта ovih antena 1959 do 'detekcije' gravitacionih talasa (*Evidence for discovery of gravitational radiation*, PRL 1969) trebalo je deset godina. Međutim, nekoliko eksperimentalnih grupa koje su ponovile merenja u narednim godinama pokazale su da je dobijeni rezultat bio zapravo šum a ne signal gravitacionih talasa.

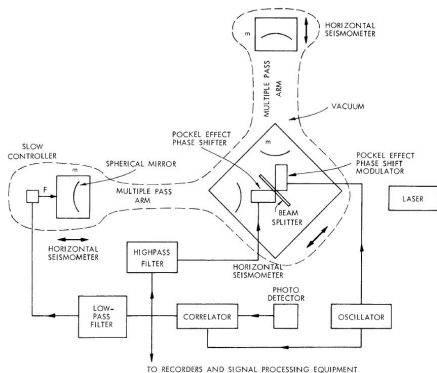


Fig. V-20. Proposed antenna.

- Na ideju da se deformacija prostora koju izaziva gravitacioni talas meri **laserskim interferometrom** došao je Reiner Weiss spremajući kurs teorije relativnosti na MIT-ju. Predlog postavke eksperimenta objavljen je u *Quarterly Progress Report of MIT 1972*; u najvećem delu ovog rada diskutovani su izvori šuma.

Izvori šuma, Weiss 1972:

- laser amplitude noise
- laser frequency instability noise
- mechanical thermal noise
- radiation pressure noise
- seismic noise
- thermal gradient noise
- cosmic ray noise
- gravitational gradient noise
- electric and magnetic fields noise

- Prva (indirektna) eksperimentalna potvrda gravitacionih talasa je binarni pulsar PSR B1913+16 (Hulse i Taylor 1975, gubitak energije usled zračenja, Taylor i Weisberg 1982).
- LASER INTERFEROMETER GRAVITATIONAL-WAVE OBSERVATORY je predložena 1967-68, gradila se 1994-2002. Prva faza skupljanja podataka (prvi 'scientific run') je 2002-2010. Detektori su unapredjeni u advanced LIGO 2010-2014, a u septembru 2015 LIGO je ponovo počeo da prikuplja podatke.
- ostali detektori gravitacionih talasa: VIRGO, GEO, TAMA, u projektu: Einstein Telescope, LISA
- Osim izuzetnih napora eksperimentalaca da se izgrade detektori gravitacionih talasa potrebne osetljivosti, detekciju je omogućio i fokusiran rad teoretičara na problemu dva tela u Einstein-ovoj teoriji gravitacije i metodama njegovog aproksimativnog rešavanja.

- Einstein-ove jednačine opisuju dinamiku prostor-vremena:

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

- Prostor je opisan **metrikom**, merom rastojanja između tačaka,

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

- Zakrivljenost prostora odnosno **tenzor krivine** daju drugi izvodi metrike,

$$R^\nu{}_{\mu\rho\sigma} = \partial_\rho \Gamma^\nu_{\mu\sigma} - \partial_\sigma \Gamma^\nu_{\mu\rho} + \Gamma^\nu_{\lambda\rho} \Gamma^\lambda_{\mu\sigma} - \Gamma^\nu_{\lambda\sigma} \Gamma^\lambda_{\mu\rho}$$

$$\Gamma_{\mu\nu\rho} = \frac{1}{2} (\partial_\rho g_{\mu\nu} + \partial_\nu g_{\mu\rho} - \partial_\mu g_{\nu\rho}),$$

$T_{\mu\nu}$ je tenzor energije-impulsa materije.

- Einstein-ove jednačine su parcijalne jednačine drugog reda, nelinearne. Cauchy-jev problem za ove jednačine rešila je 1952 Y. Choquet-Bruhat, a vrlo je značajan i rad Arnowitt-a, Deser-a i Misner-a iz 1959 o 3+1 razlaganju prostor-vremena.
- U slučaju slabih polja i približno ravnog prostora jednačine mogu da se linearizuju,

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

- Tada imamo

$$\Gamma_{\mu\nu\rho} = \frac{1}{2} (\partial_\rho h_{\mu\nu} + \partial_\nu h_{\mu\rho} - \partial_\mu h_{\nu\rho}),$$

$$R_{\mu\nu\rho\sigma} = \frac{1}{2} (\partial_\rho \partial_\nu h_{\mu\sigma} + \partial_\sigma \partial_\mu h_{\nu\rho} - \partial_\rho \partial_\mu h_{\nu\sigma} - \partial_\sigma \partial_\nu h_{\mu\rho})$$

- Izborom koordinatnog sistema

$$x^\mu \rightarrow x^\mu + \xi^\mu, \quad h_{\mu\nu} \rightarrow h_{\mu\nu} - \partial_\mu \xi_\nu - \partial_\nu \xi_\mu,$$

i fiksiranjem gejdža (de Donder-ov, Lorentz-ov ili harmonijski gejdž),

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

za perturbaciju metrike dobija se **talasna jednačina**

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

- $h_{\mu\nu}$ ima $10 - 4(\text{gejž}) - 4(\text{rezidualna sloboda}) = 2$ stepena slobode, a brzina prostiranja talasa u vakuumu je **brzina svetlosti**.
- standardnim izborom gejdž uslova

$$h^{00} = 0, \quad h^{0i} = 0, \quad \partial_i h^{ij} = 0, \quad h_{ii} = 0$$

za perturbaciju metrike dobija se **transverse-traceless h^{TT}** .

- Rešenje za propagaciju duž z-ose u vakuumu

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

- Element dužine

$$ds^2 = -dt^2 + (1 + h_+ \cos \omega(t - z)) dx^2 + (1 - h_+ \cos \omega(t - z)) dy^2 + 2h_\times \cos \omega(t - z) dx dy + dz^2$$

- Rastojanje izmedju dve tačke koje su u početnom trenutku na x-osi na (malom) rastojanju L

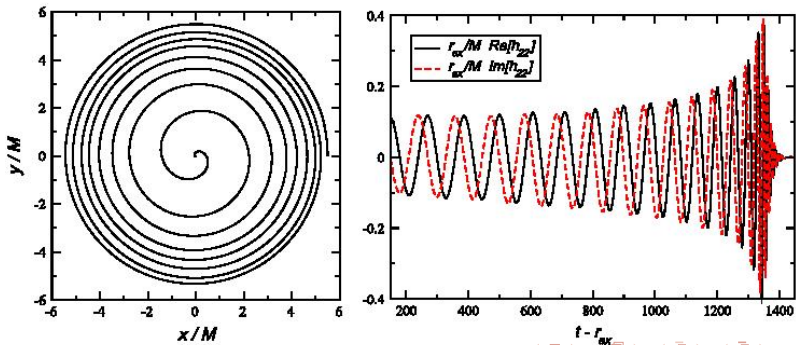
$$s \simeq L \left(1 + \frac{h_+}{2} \cos \omega t \right)$$

- Energija ravnog talasa

$$t_{00} = \frac{c^2}{32\pi G} \langle \dot{h}_{ij}^{TT} \dot{h}_{ij}^{TT} \rangle = \frac{c^2}{16\pi G} \langle \dot{h}_+^2 + \dot{h}_\times^2 \rangle$$

- Gravitacioni talasi se emituju u svim dinamičkim procesima u svemiru kao što je gravitacioni kolaps, rotacija pulsara, veliki prasak.
- Sistemi koji su najverovatniji emiteri gravitacionih talasa odnosno koji su najintenzivniji i koje možemo najlakše da detektujemo su **binarni sistemi**: neutronske zvezde, crne rupe ili supermasivne crne rupe.
- Najjednostavniji binarni sistem je sistem dve crne rupe jer one nemaju unutrašnju dinamiku (tj. ona je zaklonjena horizontom).

- U OTR **problem dva tela** nije rešiv analitički, zato što se u binarnom sistemu, za razliku od Newton-ove gravitacije, energija i moment impulsa ne održavaju – odnose ih gravitacioni talasi.
- U periodu od 1990 uloženi su veliki napor relativista-teoretičara da se ovaj problem reši, tj. da se razviju približni analitički i numerički metodi za rešavanje odgovarajućih jednačina.
- Evolucija binarnog sistema sastoji se od tri faze: **inspiral**, **merger** i **ringdown**:



[STAGES]

ONE OF THE REASONS WE DIVIDE UP THE GRAVITATIONAL WAVE SIGNAL IS BECAUSE DIFFERENT TECHNIQUES CAN BE USED TO CALCULATE THE WAVES AT DIFFERENT POINTS. THE EARLY **INSPIRAL** CAN BE CALCULATED USING POST-NEWTONIAN THEORY (THIS STARTS WITH NEWTON'S THEORY OF GRAVITY AND ADDS LITTLE EXTRA BITS TO ACCOUNT FOR HOW THINGS CHANGE IN GENERAL RELATIVITY). THE **RINGDOWN** CAN BE CALCULATED USING BLACK HOLE PERTURBATION THEORY (THIS STARTS WITH THE FINAL SHAPE OF THE BLACK HOLE, AND SEES HOW IT REACTS TO SMALL CHANGES). THE **MERGER** CAN ONLY BE CALCULATED USING NUMERICAL RELATIVITY (SIMULATIONS OF THE FULL EQUATIONS OF GENERAL RELATIVITY WHICH TAKE LOTS OF COMPUTING POWER); THIS HAS ONLY BEEN POSSIBLE IN THE LAST FEW YEARS, SO THE MERGER WAS THE LAST PART OF THE PUZZLE.

IF WE HAD A BINARY CONTAINING NEUTRON STARS INSTEAD OF BLACK HOLES, THE INSPIRAL WOULD BE MUCH THE SAME, BUT THERE WOULD NOT BE THE SAME MERGER AND RINGDOWN. THE SIGNAL WOULD BE MUCH MESSIER, POSSIBLY FEATURING NEUTRON STARS BEING RIPPED APART, BEFORE COLLIDING AND COLLAPSING TO A FINAL BLACK HOLE.



INSPIRAL



MERGER



RINGDOWN

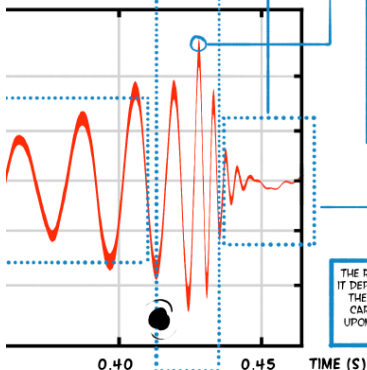
[AMPLITUDE]

THE SIZE OF THE SIGNAL, ITS AMPLITUDE, DEPENDS ON HOW FAR AWAY THE BINARY IS. IF THE DISTANCE WERE TWICE AS BIG, THE AMPLITUDE WOULD BE HALF. THE QUIETER A SIGNAL IS, THE HARDER IT IS TO DETECT, AND THE LESS WE CAN LEARN ABOUT ITS PROPERTIES.

HEAVIER SYSTEMS PRODUCE LOUDER GRAVITATIONAL WAVES AS THERE IS MORE MASS MOVING AROUND TO CREATE THE WAVES.

THE SIGNAL AMPLITUDE DEPENDS UPON THE WAY THE BINARY IS FACING (ITS INCLINATION), AND ITS POSITION IN THE SKY. THE DETECTORS ARE NOT EQUALLY SENSITIVE TO GRAVITATIONAL WAVES FROM ALL DIRECTIONS (THE SIGNAL IS LOUDEST WHEN THE SOURCE IS DIRECTLY ABOVE OR BELOW A DETECTOR).

$$h(t) = \frac{Gm\dot{v}^2}{c^4 r}$$



[RINGDOWN]

THE RINGDOWN PART OF THE SIGNAL COMES FROM THE FINAL BLACK HOLE, SO IT DEPENDS UPON ITS MASS AND SPIN. THE FINAL MASS IS ALMOST THE SAME AS THE TOTAL MASS OF THE TWO INITIAL BLACK HOLES (SOME ENERGY IS LOST, CARRIED AWAY BY THE GRAVITATIONAL WAVES). THE FINAL SPIN DEPENDS UPON THE SPIN OF THE INITIAL BLACK HOLES AND HOW THEY WERE ORBITING AROUND EACH OTHER WHEN THEY MERGED.

- Prva faza evolucije, medjusobno adijabatsko kruženje ili **INSPIRAL**, dosta liči na njutnovsko kretanje dva nebeska tela po elipsama oko zajedničkog centra mase, s tim što se putanje smanjuju i tela medjusobno približavaju. Ova faza može da traje veoma dugo, za neke binarne sisteme duže od vremena postojanja svemira.
- Da bi se medjusobno kruženje opisalo sa potrebnom tačnošću razvijena je postnjutnovska aproksimacija (Blanchet, Damour, Will, Futamase). Parametar razvoja je $\epsilon = v^2/c^2$; u nultom redu imamo Njutnovu teoriju, u 2.5 PN redu vide se prvi efekti gravitacionog zračenja. v/c u realnim sistemima može biti 0.5 ili veće.
- Prirodni adijabatski parametar evolucije je $\frac{\dot{\omega}}{\omega^2} \sim \left(\frac{v}{c}\right)^5$.
- Za opis i detekciju potreban je 3.5 PN red: on je danas dostignut za binarne sisteme istih masa, 2.5 PN red za različite mase.
- Ukupna snaga zračenja u ovoj fazi: $P = \frac{32}{5} \frac{G\mu^2 R^4 \omega^6}{c^5}$. Za sistem Sunce-Jupiter to je $5 \cdot 10^3$ W, za HT binarni sistem $7 \cdot 10^{24}$ W, dok je npr. ukupna snaga zračenja EM talasa Sunca $4 \cdot 10^{26}$ W.

- Faza spajanja ili sudara, **MERGER**, objekata u binarnom sistemu je najkomplikovanija za opis, jer PN aproksimacija ne može da se primeni.
- najuspešnija analitička aproksimacija je **EOB**, efektivni jednočestični opis (Buonano, Damour) koji se odlično slaže sa rezultatima numeričke relativnosti.

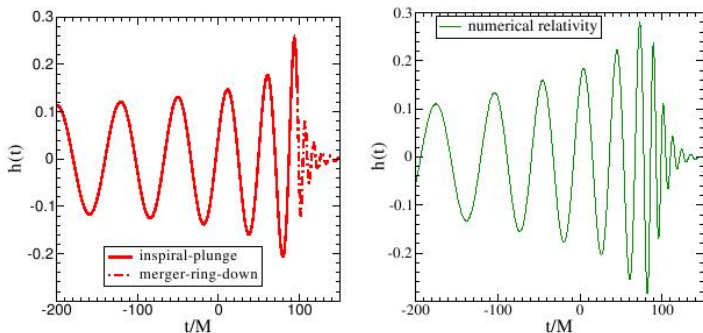
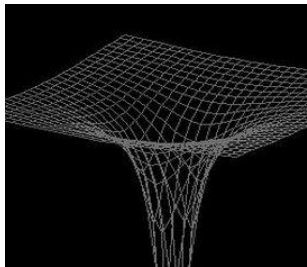


Fig. 5. On the left panel we show the GW signal from an equal-mass nonspinning BH binary as predicted at 2.5PN order by Buonanno and Damour (2000) in Ref. [16]. The merger is assumed almost instantaneous and one QNM is included. On the right panel we show the GW signal from an equal-mass BH binary with a small spin $\chi_1 = \chi_2 = 0.06$ obtained in full general relativity by Pretorius [58]

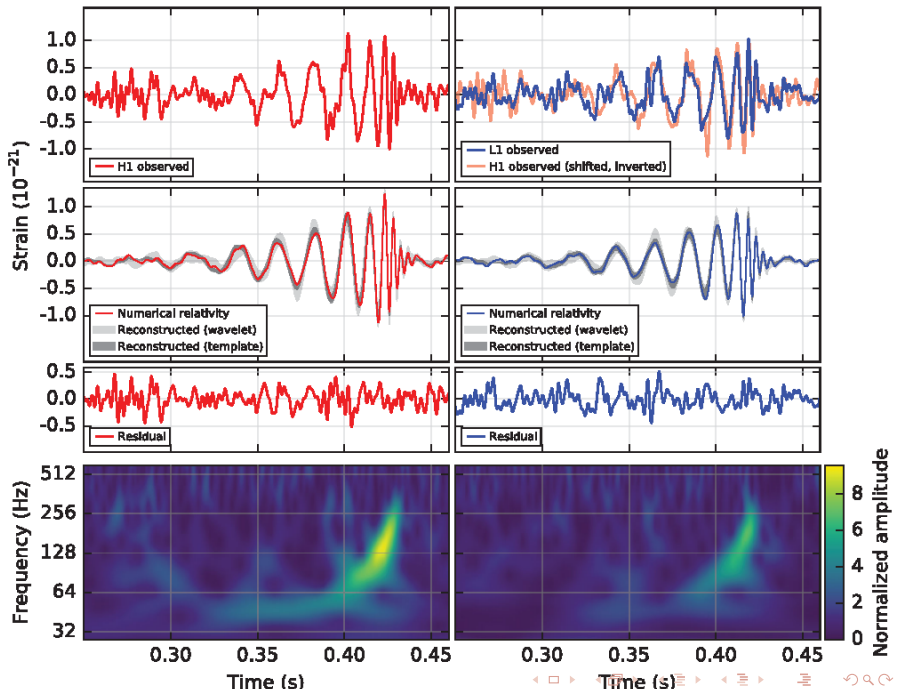
- Veliki proboj u **numeričkoj relativnosti** desio se 2005 godine, kada je Pretorius (PRL 95) napravio prvu stabilnu numeričku simulaciju. Rezultat je, uz malo izmenjeni numerički kod, ponovljen odmah i u drugim grupama (Campanelli et al, Baker et al, PRL 96, 2006).
- Problem kod numeričkog rešavanja Einstein-ovih jednačina je izbor koordinatnog sistema i mreže tačaka za numeričku integraciju (koja svakako ne može da bude fiksna, a u stvari zavisi od rešenja). Dalje, kad se analiziraju crne rupe treba da se nadje način da se izbegnu singulariteti. Konačno, izbor početnih uslova je vrlo netrivialan, kao i fiksiranje gejdža.



- Od 2005 događa se ekspanzija uspešnih numeričkih kodova za integraciju delova evolucije binarnih sistema, a napravljena je velika baza podataka 'uzoraka' gravitacionih talasa. LIGO koristi bazu od 250000 uzoraka koje upoređuje sa merenim signalom (matched filtering) i na osnovu toga određuju se parametri binarnog sistema: mase, momenti impulsa, rastojanja, brzine itd. Osim ovog moda detekcije analiziraju se, nezavisno, svi signali značajnijeg intenziteta koji se pojavljuju u oba (više) detektora.
- Baze postoje i na internetu, npr. www.black-holes.org

Hanford, Washington (H1)

Livingston, Louisiana (L1)



- Konačno, poslednja faza evolucije je **RINGDOWN** u kojoj rezultujuća crna rupa u kratkom periodu relaksacije emituje energiju.
- Ovaj deo evolucije modeluje se teorijom perturbacija crne rupe, koja opisuje evoluciju binarnog sistema (crna rupa + probno telo) ali i gravitaciono zračenje Kerr-ove crne rupe (Regge i Wheeler, Teukolski, Vishveshwara, Press, Chandrasekhar).
- Zračenje se sastoji od tzv. **kvazinormalnih moda** koje jednoznačno zavise od mase i momenta impulsa crne rupe a ne od prirode perturbacije. Zato analiza ringdown faze može da posluži za proveru 'no-hair' teoreme.
- Ringdown faza kod supermasivnih crnih rupa može da traje i nekoliko minuta, tako da će eLISA moći da prikupi mnogo eksperimentalnih podataka o ovoj fazi.

Perspektive gravitacione astronomije su ogromne. U neposrednoj budućnosti ona će moći da meri i proverava efekte OTR:

- Hubble parametar
- broj polarizacija gravitacionih talasa
- masa gravitona, Lorentz invarijantnost
- 'no hair' teorema
- osobine crnih rupa

Ali, treba imati u vidu i da su mnoga velika otkrića u astronomiji (CMB, pulsari, X-ray binarni sistemi, γ -ray bursts, ubrzano širenje svemira) došla potpuno neočekivano i nepredvidjeno...