

# GRAVITACIJSKI VALOVI, NOBELOVA NAGRADA ZA FIZIKO 2017

ALEŠ MOHORIČ

Fakulteta za matematiko in fiziko  
Univerza v Ljubljani

PACS: 95.55.Ym, 04.80.Nn

Besedilo podaja kratko zgodovino odkrivanja gravitacijskih valov. Opisane so osnovne lastnosti valov in način detekcije. Uspešne detekcije valov kažejo na velik raziskovalni potencial gravitacijske astronomije.

## GRAVITATIONAL WAVES, THE NOBEL PRIZE IN PHYSICS 2017

The article outlines a short history of gravitational wave detection. Fundamental properties of waves and its detection are described. Recent successful detections show a great potential of gravitational astronomy.

Nobelovo nagrado za fiziko za leto 2017 so prejeli Kip S. Thorne, Rainer Weiss in Barry C. Barish za »svoje odločilne prispevke k detektorju LIGO in opazovanju gravitacijskih valov« [1].



**Slika 1.** Nobelovci za fiziko za leto 2017: Kip S. Thorne, Rainer Weiss in Barry C. Barish. vir: Nobel media [1].

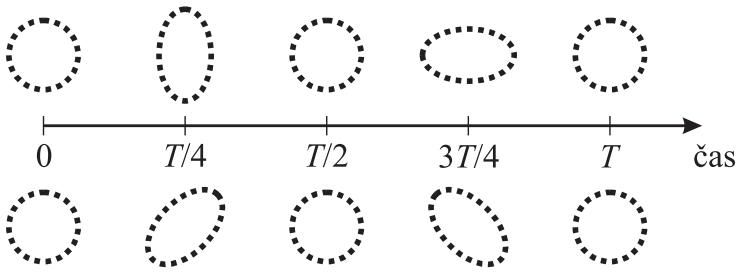
Kip S. Thorne je bil rojen leta 1940 v ZDA in je profesor na Kalifornijskem tehnološkem inštitutu (Caltech), ZDA, doktoriral je na Univerzi Princeton, ZDA. Rainer Weiss je bil rojen leta 1932 v Nemčiji. Je profesor na Tehnološkem inštitutu Massachusetts (MIT), ZDA, doktoriral je na

MIT. Barry C. Barish je bil rojen leta 1936 v ZDA in je profesor na Caltechu, doktoriral je na Univerzi Kalifornije, Berkeley. Thorne in Weiss sta ustanovila projekt LIGO, ki se mu je pridružil še pred nedavnim preminuli Ronald Drever, Barish pa je najprej deloval na področju fizike visokih energij, nato pa je postal direktor kolaboracije LIGO, vključil v sodelovanje še evropski projekt VIRGO in je uspešno vodil tehnološki razvoj detektorjev LIGO.

Prvi je gravitacijske valove omenil Henri Poincare leta 1905 [2]. Teoretično je pred dobrimi sto leti (1916) možnost njihovega obstoja napovedal Albert Einstein, v članku, ki ga je predložil Pruski akademiji znanosti januarja 1918, pa je opisal njihovo razširjanje in emisijo v šibkem polju.

Gravitacijski valovi v marsičem spominjajo na elektromagnetne valove [3]. Ker v naravi ni negativnih mas, gravitacijski valovi ne morejo biti izsevani v obliki dipolnega sevanja, ki je običajno pri elektromagnetnih valovih, ampak se pri gravitacijskih valovih pojavlja kot izvor najprej kvadrupol. Zato in predvsem zaradi šibkosti gravitacijske interakcije so gravitacijski valovi izjemno šibki. »Moč« elektromagnetne interakcije pogosto izražamo s konstanto fine strukture  $\alpha_f = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 m_e c^2} \frac{m_e c}{\hbar} = \frac{1}{137}$ , »moč« gravitacijske interakcije pa lahko po analogiji izrazimo v obliki  $\alpha_g = \frac{G m_p}{c^2} \frac{m_p c}{\hbar} = 9,4 \cdot 10^{-40}$ ! Einstein se je spraševal, ali bo gravitacijske valove sploh možno zaznati. Izpostavil je, da odnašajo valovi iz sistema dveh zvezd tako malo energije, da izgube ni mogoče opaziti v doglednem času, kaj šele, da bi merili valove neposredno.

Da bi lahko opazili valove, ki izvirajo iz sistema dveh črnih lukenj, pravzaprav od začetka ni bilo pričakovano. Črne luknje so bile obravnavane kot najbolj eksotični objekti, ki bi utegnili biti izvori gravitacijskih valov pri akustičnih frekvencah, vendar nihče ni pričakoval, da bi lahko obstajalo v vesolju dovolj črnih lukenj z ravno pravnjimi masami, ki bi lahko trkale med seboj. Hulse-Taylorjev pulzar in pozneje odkriti drugi dvojni pulzarji so se pojavili kot prvi obeti za izvore gravitacijskih valov, ki bi utegnili za kratek čas izbruhniti pri akustičnih frekvencah. Črni luknji sevata dovolj močno zato, ker imata zelo veliko maso in sta dovolj majhni, da lahko pred zlitjem krožita druga okoli druge z visoko frekvenco. Njuno sevanje zaznamo le tik pred združitvijo, ko je frekvenca kroženja največja in s tem tudi moč sevanja. Razločen signal se torej pojavi le ob dogodku, ob katerem se sprosti ogromno energije. Kljub temu potrebujemo izjemno občutljiv detektor [4]. Kako malo je Einstein verjel v gravitacijske valove, priča članek, ki sta ga skupaj z Nathanom Rosenom poslala v revijo Physical Review. V članku razpravljata o obstoju gravitacijskih valov, in čeprav prvotno besedilo ni

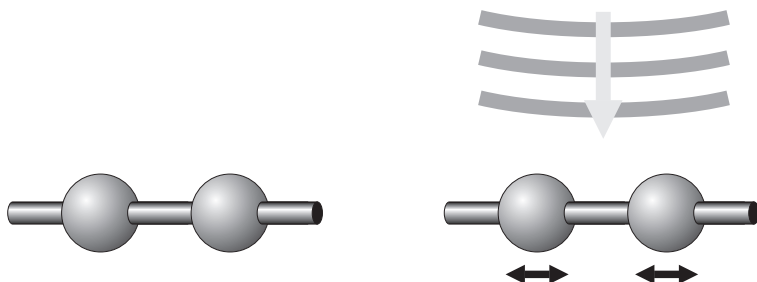


**Slika 2.** Gravitacijski val, ki vpade v smeri pravokotni na list, deformira obroč, na katerem so nanizane točkaste mase. Valovanje je transverzavno in ima dve možni polarizaciji, ki ju navadno označimo s + in  $\times$  (zgornja vrstica prikazuje polarizacijo +, spodnja pa  $\times$ ). Vrstici kažeta časovni potek oblike obroča za obe polarizaciji.

ohranjeno, iz Einsteinove korespondence s Karlom Schwarzschildom lahko sklepamo, da je bil zaključek negativen. Urednik revije je posredoval članek v pregled Einsteinovemu kolegu, ki je v razmišljanju odkril pomanjkljivosti, teh pa Einstein užaljeno ni hotel komentirati in je članek umaknil iz objave. Ščasoma je svojo napako spoznal in besedilo objavil drugje, z zaključkom, da gravitacijski valovi vsekakor obstajajo.

V 1960. letih je Peter Bergmann opisal vpliv gravitacijskih valov na delce, razporejene po obodu obroča. Val, ki vpade vzporedno z geometrijsko osjo obroča, povzroči, da se delci na nasprotnih straneh obroča približajo, delci v smeri pravokotno pa oddaljijo. V naslednji fazi se delci razmaknejo, tako kot kaže slika 2.

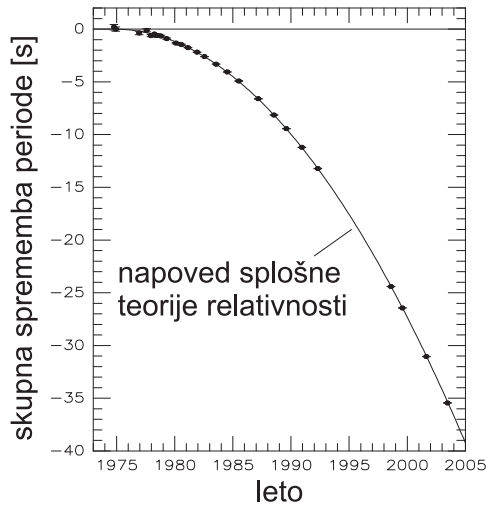
Pojav predstavlja osnovno idejo, kako meriti gravitacijske valove preko deformacije obroča. Seveda ne gre tako enostavno, da bi premer obroča merili kar z ravnilom, saj tudi nanj vpliva gravitacijski val. Vendar pa se ravnilo zaradi togosti razteza in krči drugače, kar vendarle omogoča vsaj posredno zaznavo spremembe razdalje. Šele pozneje se je rodila ideja, da bi razdalje merili s časom potovanja svetlobe. Še pred tem je v 1950. letih potekala živahna debata, ali gravitacijski valovi sploh lahko nosijo energijo. Pojem energije je namreč tesno povezan z idejo o nespremenljivosti prostora kot simetriji, ki jo gravitacijski valovi zlomijo, če jih razumemo kot geometrijsko motnjo, ki se širi skozi prostor. Dilemo je razrešil Richard Feynman na prvem kongresu v Chapel Hillu leta 1957. Feynman je opisal idejo drsečih korald, ki je večino prepričala, da gravitacijski valovi zares prenašajo energijo. Ideja je preprosta: na palici tičita ločeni dve koraldi in trenje med palico in koraldami ni zanemarljivo. Ko gravitacijski val zaniha palico s koraldama, koraldi drsita po palici in jo segrejeta. Na ta način se energija prenese iz valov v notranjo energijo palice in korald.



**Slika 3.** Z miselnim poskusom drsečih korald pojasnimo način prenosa energije iz gravitacijskih valov v notranjo energijo palice in korald. Gravitacijski val premakne koralde na palici in notranja energija palice se poveča zaradi trenja.

Serijsa srečanj v Chapel Hillu ima nenavadno ozadje. Na teh srečanjih so se srečevali tisti, ki so se zanimali za gravitacijo. Srečanja je denarno podpiral bogataš Roger W. Babson, ki je svoje bogastvo pripisoval Newtonovemu gravitacijskemu zakonu. Delnice je kupoval, ko so se vzpenjale, in jih prodajal, ko so začele padati. Vsaki akciji sledi reakcija, je rad pridigal tretji Newtonov zakon. Ekscentrični milijonar je postal obseden z gravitacijo, saj mu je že v otroštvu utonila sestra. Nesrečo je pripisoval gravitaciji, ki se ji dekle ni moglo upreti. Ustanovil je sklad za raziskovanje gravitacije (GRF – Gravity research fundation), katerega namen je bil odkriti način izolacije, zmanjšanja ali odboja gravitacije. Vsako leto so razpisali nagrado za najboljši esej na to temo in med njimi je bilo dokaj ekscentričnih prispevkov. Na razpis se je leta 1953 prijavil mladi raziskovalec Bryce DeWitt, ki je želel z nagrado odplačati hipoteko. Zakaj pa ne? Čez noč je napisal esej, ki se je tako rekoč posmehoval sami ideji razpisa. Trdil je, da gravitacije nikoli in nikakor ne moremo manipulirati. Proti pričakovanjem je nagrado dobil, kar je pozneje opisal kot »najhitreje zasluženih 1000\$ v mojem življenju«. Kakorkoli, esej je Babsona prepričal, da svojo filantropijo usmeri v znanstvene raziskave gravitacije. Seveda okvir GRF ni ustrezal, saj je bil sklad v znanstvenih krogih deležen le posmeha. S prijateljem, milijonarjem Agnewom Bahnsonom, sta kontaktirala Johna Archibalda Wheelerja, znanega strokovnjaka za gravitacijo s Princetona, in skupaj so se strinjali, da je DeWitt primeren vodja novega Inštituta za fiziko polja, ki so ga ustanovili v Chapel Hillu. Inštitut je začel svoje delovanje leta 1957 s konferenco o »vlogi gravitacije v fiziki«.

Med udeleženci konference je bil tudi Joseph Weber. Tega so razprave tako navdušile, da se je lotil izdelave detektorja valov. Zamislil si ga je kot velik, nekajtonski valj, uporabil je aluminij, z zelo natančnimi piezoelek-



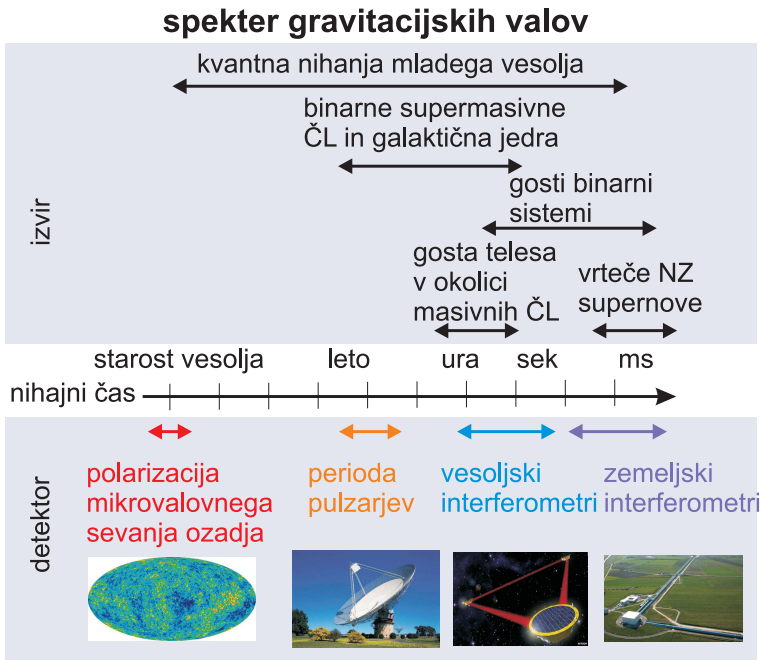
**Slika 4.** Natančne meritve orbitalnega časa para nevtronskih zvezd so pokazale, da se kroženje ustavlja skladno z napovedjo splošne teorije relativnosti. Teorija upošteva, da gravitacijski valovi iz sistema odnašajo energijo. Diagram povzet po [6].

tričnimi merilniki raztezka. Proti koncu 1960. let je že poročal o množici signalov, ki naj bi v večini izvirali iz središča Galaksije. Vendar so se te meritve izkazale za napačne. Po njih naj bi Galaksija vsako leto s sevanjem gravitacijskih valov izgubila maso, ki ustreza tisočem Sončevih mas. Galaksija bi se že davno razpršila, če bi bili rezultati meritev pravilni. Poskusi, podobni Webrovim, so sčasoma vodili do spoznanja, da njegova metoda ni uspešna in je signal, ki ga je meril, nekaj drugega in ne detekcija gravitacijskih valov. Sredi 1970. let sta Joseph Hooten Taylor in Alan Russell Hulse odkrila dvojni sistem nevtronskih zvezd, od katerih je ena pulzar [5]. Natančne meritve obhodnega časa zvezd so pokazale, da par izgublja energijo skladno s sevanjem gravitacijskih valov. Tako so bili gravitacijski valovi prvič posredno potrjeni leta 1979. Za ta dosežek sta Taylor in Hulse leta 1993 prejela Nobelovo nagrado.

Potrditve obstoja gravitacijskih valov je vlila nov zagon naporom, da jih zaznajo neposredno. Metoda z Webrovimi mehanskimi resonatorji se je izkazala za premalo občutljivo. Zato so raziskovalci začeli razmišljati o novem načinu merjenja spremembe razdalj – z interferometri. Za razvoj novih načinov gledanja na detekcijo gravitacijskih valov je pomemben članek [7], v katerem je obravnavana meritev šibkih signalov kot proces zaznavanja spremembe kvantnega stanja in s tem predstavljeno merilo za sposobnost zaznavanja tako šibkih signalov, kot jih vzbujajo gravitacijski valovi.

Po izvoru in časovnem poteku gravitacijske valove ločimo na naključne, periodične in sunkovite. Naključne je težko prepoznati, saj so podobni šumu, vendar bi jih lahko prepoznali s korelacijo signalov iz različnih detektorjev. Taki valovi so lahko posledica razmer ob nastanku vesolja. Periodični valovi izvirajo iz nesimetričnih, vrtečih se, gostih tvorb, ali pa para krožečih teles. Sunkoviti valovi nastanejo npr. ob sesedenju zvezde, združenju para, eksploziji. Za vsakega od naštetih pojavov je značilen časovni potek in detektorji so lahko dovolj občutljivi le na omejenem območju. Ko so začeli razmišljati o zaznavanju gravitacijskih valov, je bilo govora o izvori in seveda je bilo v ospredju vprašanje, kateri izvor bi utegnil proizvesti tako močan signal, da bi ga bilo mogoče zaznati. Od vsega začetka je bilo jasno, da je za zaznavo potrebna razmeroma velika gostota energijskega toka v gravitacijskem valu. To se lahko zgodi, če je izvor valovanja dovolj blizu ali pa, če je izvor tako močan, da sprosti mirovalno energijo zvezde v nekaj nihajih. Bližnji izvori so lahko znane dvojne zvezde, vendar so njihove orbitalne periode vsaj nekaj ur, dni, mesecev. Gravitacijskega signala s takega sistema na Zemlji ne moremo zaznati, ker razdalje na Zemlji niso dovolj stabilne na tako dolgih časovnih skalah. Za detekcijo gravitacijskih valov s takih izvorov je predviden interferometer LISA, sestavljen iz treh satelitov v ogliščih enakokraničnega trikotnika s stranico skoraj 2 milijona kilometrov. Skoraj istočasno se je utrnila ideja, da bi zaznavali učinek gravitacijskih valov tudi z interferometrom na Zemlji. Za to idejo dolgo ni bilo posebnega navdušenja, ker nismo poznali pojava, ki bi lahko generiral dovolj močne gravitacijske valove pri frekvencah večjih od nekaj 10 Hz, pri katerih bi bili interferometri na Zemlji teoretično sposobni zaznavati. Šele odkritje dvojnega sistema nevtronskih zvezd je ponudilo možnost scenarija, po katerem bi sistem po dovolj dolgem času postal tako tesen, da bi v labodjem spevu, ki traja le nekaj sekund, oddal dobršen del svoje mase z gravitacijskimi valovi, katerih frekvenca bi z nekakšnim žvižgom hitro naraščala od nekaj 10 Hz do nekaj kHz. Detektorji LIGO, VIRGO in KAMA so bili načrtovani s ciljem, da bi mogli zaznati takšne kataklizmične pojave vse do razdalj milijarde svetlobnih let.

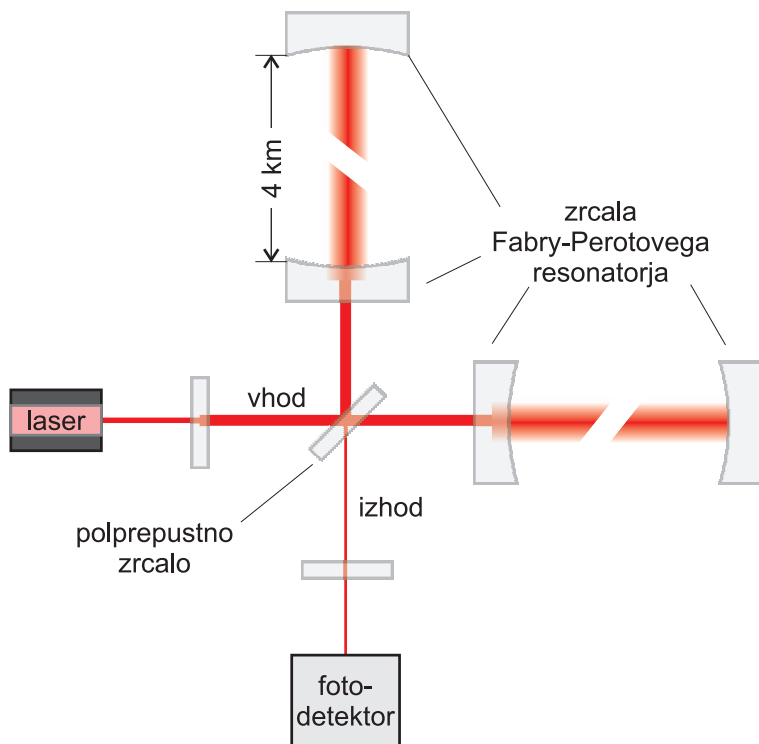
Iznajditelja interferometra za detekcijo gravitacijskih valov pravzaprav težko določimo, saj se je ideja zanj rodila pri več posameznikih. Osnovo merilnika predstavlja Michelsonov interferometer, ki ga sestavljata dva med seboj pravokotna kraka, zaključena z zrcaloma. V kraka usmerimo curka monokromatične laserske svetlobe, nastala z razcepom vhodnega curka na polprepustnem zrcalu – delilniku žarka. Svetloba potuje v vsakem kraku do končnega zrcala in nazaj, kjer se na izhodu združi. Če je pot svetlobe od delilnika žarka do detektorja natančno enaka v obeh krakih, svetloba



**Slika 5.** Gravitacijski valovi nastanejo pri različnih pojavih in imajo za pojav značilno frekvenco. Vrsta detektorja je prilagojena frekvenci.

na detektorju interferira konstruktivno in je najmočnejša. Če se razdalji razlikujeta za polovico valovne dolžine svetlobe, pride na izhodu do destruktivne interference. Svetlost izhodnega curka je torej odvisna od razlike medsebojnih razdalj. Gravitacijski val spremeni ti razdalji in tako ga lahko zaznamo z merjenjem jakosti izhodne svetlobe. Interferometer je najbolj učinkovit, če je dolžina njegovih krakov enaka četrtini valovne dolžine gravitacijskega vala. Če želimo meriti valove od trkov nevtronskih zvezd pri frekvenci 100 Hz, kar ustreza frekvenci na sredini žvižga, bi to ustrezalo dolžini kraka 750 km, kar pa je nepraktično.

Prvi so idejo merjenja gravitacijskih valov z interferometrom predlagali v Sovjetski zvezi, najprej 1962 Gertsenshtein in Pustovoit, in pozneje, 1966, še Vladimir B. Braginski. Ta ideja je zamrla, deloma tudi zato, ker so bili avtorji za železno zaveso. Zapiski v Webrovem laboratorijskem dnevniku kažejo, da je tudi on razmišljal o interferometru, vendar te ideje ni nikoli uresničil. To je prvi storil šele njegov študent Robert L. Forward leta 1978. Z idejo o interferometru se je nato začel ukvarjati Rainer Weiss, ki je na MIT izdelal interferometer z 1,5-metrskima krakoma. Ko je iskal sredstva



Slika 6. Interferometer za merjenje gravitacijskih valov.

za nadaljnje raziskave, so njegovo vlogo pregledali v Nemčiji, kjer so do tedaj neuspešno poskušali potrditi Webrove rezultate. Zato so razmišljali o nadgradnji antene, vendar so se po seznanitvi z Weissovimi idejami ogreli za interferometer. Tako je prišlo do sodelovanja z njim. V nemškem Garchingu so izdelali 30-metrski interferometer, kjer so raziskovali načine zmanjšanja šuma, ki so jih pozneje uporabili pri ameriškem sistemu. Med drugim so raziskovali tudi zakasnilno linijo, s katero učinkovito podaljšamo dolžino kraka tako, da svetlobo vodimo v krak pod majhnim kotom in se svetloba večkrat odbije od zrcal, preden zapusti interferometer.

Leta 1975 je interferometrična merjenja razdalj med dvema Webrovima antenama začel raziskovati Ronald Drever, ki je pozneje odšel v Caltech. Ronald Drever je pokazal, da je možno dolžino kraka učinkovito podaljšati s tem, da sta roki interferometra Fabry-Perotova resonatorja z ustrezno fino. Nemška skupina v Garchingu je 1985 pripravila prvi predlog zares velikega, 3-kilometrskega interferometra, vendar ta ni bil odobren za financiranje. Podobna usoda je čakala škotski laboratorij, v katerem je nekdanj





**Slika 7.** Interferometer VIRGO blizu Pise v Italiji ima kraka dolga po 3 km.

delal Drever. Šele skupna vloga s skromnejšim 600-metrskim predlogom je bila uspešna leta 1994. Sistem je zdaj operativen pod imenom GEO.

Tik pred sprejetjem projekta škotskih in nemških raziskovalcev so se za podoben projekt začeli zanimati francoski raziskovalci iz Orsaya, ki so k sodelovanju privabili italijanske raziskovalce iz Pise in Neaplja. Od leta 1994, ko je bilo potrjeno financiranje projekta VIRGO, sta potem pretekli še dve leti, da so odkupili zemljišča in začeli gradnjo. VIRGO so dokončali 2003 in 2007 se je povezal z ameriškim sistemom LIGO.

V ZDA sta se z idejo merjenja gravitacijskih valov ukvarjala Kip Thorne in Weiss. Thorne, priznani teoretik, je potreboval eksperimentatorja, da bi uresničil idejo interferometričnega merjenja gravitacijskih valov. Razmišljal je o Braginskem, ki pa ga je bilo težko spraviti izza železne zavese. Weiss mu je predlagal Dreverja, ki je nato prišel na Caltech leta 1979. Neenako tekmovanje se je začelo med Weissovo skupino z 1,5-metrskim interferometrom ter skupino na Caltechu, kjer je Drever sestavil 40-metrski interferometer. Weiss je poskusil izboljšati občutljivost z zakasnilno linijo, Drever pa je v kraka vstavil Fabry-Perotova interferometra, kar se je izkazalo za bolj učinkovito. Weiss je leta 1983 pripravil predlog stot milijonskega projekta za večkilometrski interferometer, ki pa ga ameriška znanstvena fundacija (NSF) ni hotela financirati brez partnerjev. Izkazalo se je, da Drever ni bil preveč navdušen nad sodelovanjem z Weissom, vendar so ju, s posredovanjem Thornona in pritiskom od zunaj, vendarle uspeli združiti na projektu. Zaradi stalnega Weissovega nasprotovanja Dreverjevim tehnološkim rešitvam je projekt zastajal in NSF je razpustila trojno vodstvo Thornona, Weissa in Dreverja ter jih nadomestila z Rochusom Vogtom. Leta 1988 se je začelo financiranje

projekta, vendar ne brez težav. Drever je leta 1992 zapustil skupino, Vogta pa je 1994 na vodilnem mestu zamenjal Barry Barish, eksperimentator z izkušnjami vodenja velikih projektov v fiziki visokoenergijskih delcev. Delo se je nadaljevalo z novim zagonom in svežimi sredstvi. Leta 1994 so začeli graditi in 1997 so dokončali laboratorija v Hanfordu, Washington State, in Livingstonu, Louisiana. Tako je začel delovati sistem LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory). Tehnologijo, ki se uporablja v LIGU, razvijajo v posebnih laboratorijih, prav tako pa s pridom uporabljajo tehnologijo, razvito drugje.

LIGO je začel z meritvami leta 2002 in gravitacijskih valov niso zaznali do leta 2010. Takrat so sistem ustavili in začeli z nadgradnjo. Izboljšali so občutljivosti in zmanjšali seizmični šum s sistemom, ki so ga razvili v VIRGU. Prenova je stala 200 milijonov dolarjev in je trajala dlje kot načrtovano. Leta 2015 so pognali prenovljeni (advanced-)LIGO. Najprej so sistem preverjali v testnem načinu. In kmalu, še v testnem delovanju, so zaznali prvi dogodek. Združenje dveh masivnih črnih lukenj je povzročilo pravi vihar v astronomiji gravitacijskih valov. Še večer pred meritvijo so testirali odziv na zaviranje tovornjaka v bližini, potem pa je ponoči ob 4:50 prišlo do dogodka, ki je pretresel podoktorskega raziskovalca v Nemčiji, ki je bil zadolžen za preverjanje podatkov iz sistema. Ta je najprej pomislil, da gre za simuliran dogodek, ki ga v sistemu lahko sprožijo, da preverjajo pravilnost njegovega odziva. Izkazalo pa se je, da gre v resnici za signal, ki ga je povzročil val, ki je potoval več kot milijardo let in je zatresel sistem le nekaj dni, preden bi ga uradno prevzeli v uporabo. Od takrat so uspešno zaznali še pet drugih dogodkov in enega, ki je zelo verjeten (tabela 1). Odkar z LIGOM sodeluje tudi VIRGO, se je močno izboljšala natančnost določanja območja lege izvira na nebu.

Danes smo priča začetkom gravitacijske astronomije. LIGU in VIRGU se bo kmalu pridružil še detektor, ki ga gradijo na Japonskem, načrtujejo pa še enega v Indiji. Raziskave potekajo, da bi petega, z imenom LISA, sestavili v vesolju. Prvi vesoljski testi opreme za LISA so obetavni.

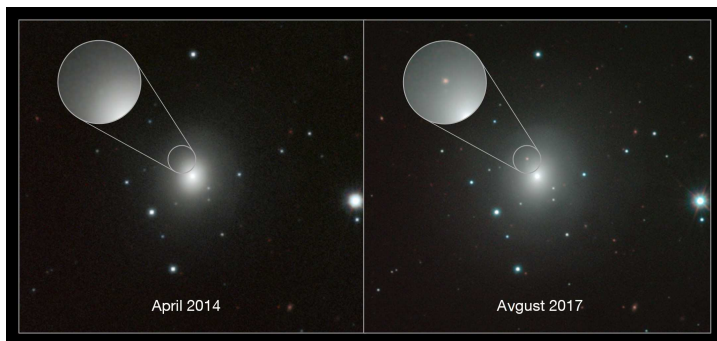
Malo daljša zgodba o množici ljudi, ki je sodelovala pri razvoju drage in izjemno občutljive mreže detektorjev, naj podčrta, kako velik napor je bil potreben, da smo končno zaznali gravitacijske valove in odprli novo okno proti vesolju. Nagrada ni le priznanje trem, temveč celi množici prizadevnih raziskovalcev. Morda še najbolj manjka priznanje Ronaldu Dreverju, ki je umrl leta 2017 in je z eksperimentalnega vidika najbolj zaslužen za uspeh detektorja. Je pa dosežek močno zaznamovan tudi z delom cenjenega slovenskega kolega, zaslužnega profesorja ljubljanske univerze Andreja Čadeža. Na Inštitutu za fiziko polja v Chapel Hillu je zagovarjal doktorsko disertacijo

Dogodek	Razd. [ $MPc$ ]	Območje [ $st^2$ ]	Izsev [ $m_S c^2$ ]	$m_1$ [ $m_S$ ]	$m_2$ [ $m_S$ ]	Tip
GW150914	440	600	3	35	30	ČL
LVT151012	1000	1600	1,5	23	13	ČL
GW151226	440	850	1	14	8	ČL
GW170104	880	1200	2	31	20	ČL
GW170608	340	520	0,9	12	7	ČL
GW170814	540	60	3	31	25	ČL
GW170817	40	28	$> 0,03$	1,5	1,3	NZ

**Tabela 1.** Do danes znane detekcije gravitacijskih valov (datum se skriva v imenu dogodka). Razdalja (razd.) do vira je podana v milijonih parsekov. Natančnost določanja območja, iz katerega izvirajo valovi, se je močno izboljšala, odkar v meritvah LIGO sodeluje tudi VIRGO. Izsev je izražen z energijo ekvivalentno masi Sonca in pomeni energijo, ki se izseva z valovi.  $m_1$  in  $m_2$  sta masi teles, ki sta se združili,  $m_S$  je masa Sonca, ČL pomeni črna luknja, NZ pa nevtronska zvezda.

»Colliding Black Holes«. Njegov mentor je bil prav DeWitt in disertacija je bila prva s to tematiko ter je nastala po Webrovi objavi meritev na vzpodbudo DeWitta in Wheelerja. Njegovo raziskovanje zlitja črnih lukenj [8, 9, 10] je dalo teoretično osnovo pojavom, ki jih opazujejo z detektorji. Pomembno je prispeval tudi k eksperimentalni opremi. V delih [11, 12] je opisan način stabilizacije Michelsonovega interferometra z elektrostatičnim generatorjem sile, kar zmanjša šum merilnika in hkrati služi kontroli lege zrcal. K stabilnosti sistema in šumu prispeva tudi sipanje svetlobe v kraku interferometra. Čadež je pojav natančno opisal [13] in konstrukcija zaslonk v cevi resonatorjev, ki preprečujejo vračanje sipane svetlobe v resonator, sloni na tem znanju.

Gravitacijski valovi so tudi eno redkih oken, skozi katera lahko zremo globoko v preteklost vesolja. Opazovanja gravitacijskih valov bodo vsekakor poglobila naše znanje o vesolju. Nova spoznanja si obetamo o lastnostih zelo goste snovi, pojavih pri velikih tlakih ter mehanizmih trkov nevtronskih zvezd in z njimi povezanimi izbruhi sevanja gama. Opazovanja gravitacijskih valov nam bodo razkrivala očem nevidne črne luknje in pomagala ugotoviti, koliko se jih pravzaprav skriva v vesolju. Med koristni tovrstnih eksperimentov pa ne smemo pozabiti tudi na tehnološke izboljšave, ki segajo na področja vakuumske, optične, kriogenske in laserske tehnologije, vede o materialih, geodeziji, geologiji kot tudi metodah hitre obdelave velike količine podatkov.



**Slika 8.** Dogodek GW170817 je posebej zanimiv, ker so ga zaznali tudi ločeno, po izbruhu sevanja gama, zasij pa še z optičnimi teleskopi [14]. Je posledica združitve dveh nevtronskih zvezd in so ga zaznali zato, ker se je zgodil blizu nas. Vir: ESO, N. R. Tanvir, A. J. Levan in kolaboracija VIN-ROUGE

## LITERATURA

- [1] The Nobel Prize in Physics 2017, 2017, dostopno na: [www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/2017/](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2017/), ogled 15. 11. 2017.
- [2] P. Henri, *Sur la Dynamique de l'électron*, Proc. Acad. Sci. 1905, 140, 1504–1508.
- [3] A. Mohorič in A. Čadež, *Gravitacijski valovi*, Obzornik mat. fiz. **63** (2016) 2, 53–63.
- [4] A. Mohorič in A. Čadež, *Detekcija gravitacijskih valov*, Obzornik mat. fiz. **64** (2017) 3, 91–103.
- [5] R. A. Hulse in J. H. Taylor, *Discovery of a pulsar in a binary system*, Astrophysical Journal **195** (1975) 51–53.
- [6] J. H. Taylor in J. M. Weisberg, *A new test of general relativity – Gravitational radiation and the binary pulsar PSR 1913+16*, Astrophysical Journal **253** (1982) 908–920.
- [7] C. M. Caves, K. S. Thorne, R. W. P. Drever, V. D. Sandberg in M. Zimmermann, *On the measurement of a weak classical force coupled to a quantum-mechanical oscillator*, I. Issues of principle, Rev. Mod. Phys. **52** (1980) 341–392.
- [8] L. Smarr, A. Čadež, B. DeWitt in K. Eppley, *Collision of two black holes: Theoretical framework*, Phys. Rev. D **14** (1976) 2443–2452.
- [9] A. Čadež, *Apparent horizons in two-black-hole problem*, Annals of physics **83** (1974) 449–457.
- [10] A. Čadež, *Some remarks on the two-body problem in geometrodynamics*, Annals of physics **91** (1975) 58–74.
- [11] A. Čadež in J. Harman, *Electrostatic forces in gravity-wave interferometers*, International symposium on Experimental gravitational physics, ur. Peter F. Michelson, Hu En-ke in Guido Pizzella, World Scientific Publishing, Singapur (1987) 342–46.
- [12] A. Čadež, A. Abramovici, *Measuring high mechanical quality factors of bodies made of bare insulating materials*, J. Phys. E: Sci. Instrum. **21** (1988) 453–456.
- [13] A. Čadež, *Internal scattering in Fabry-Perot cavities*, Phys. Rev. A, **41**, **11** (1990) 6129–6144.
- [14] S. Covino, A. Gomboc, D. Kopač in dr., *The unpolarized macronova associated with the gravitational wave event GW 170817*, Nature Astronomy **1** (2017) 791–794.