

Gravitacijski valovi

Nobelova nagrada za fiziko za leto 2017

Aleš Mohorič

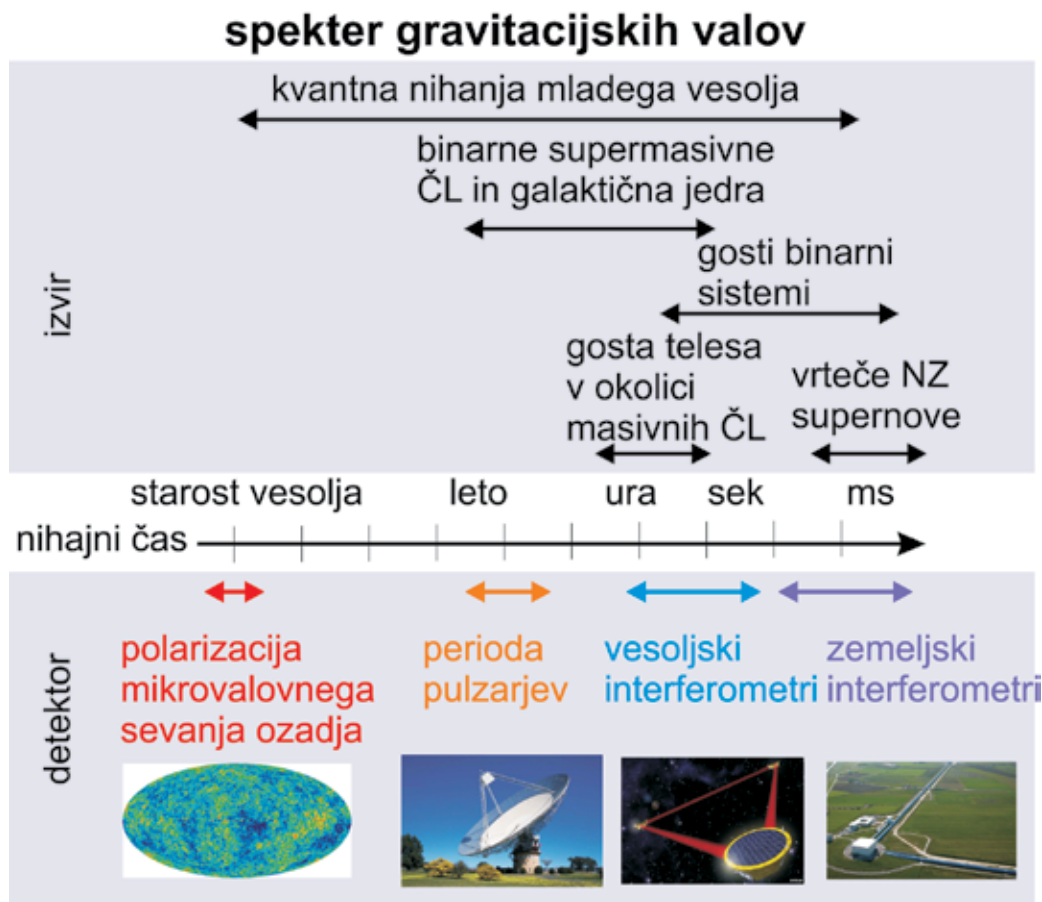
Nobelovo nagrado za fiziko za leto 2017 so prejeli Kip S. Thorne, Rainer Weiss in Barry C. Barish. Prejeli so jo za »svoje odločilne prispevke k detektorju LIGO in opazovanju gravitacijskih valov«.

Gravitacijski valovi so valovi v ukrivljenosti prostor-časa. Nastanejo zaradi gravitacijske interakcije (zaradi sprememb v porazdelitvi mase) in se od svojega vira širijo s hitrostjo svetlobe. Prvi je gravitacijske valove omenil leta 1905 Henri Poincaré. Teoretično jih je pred dobrimi stotimi leti (1916) v splošni

teoriji relativnosti opisal Albert Einstein. Čeprav spominjajo na elektromagnetne valove, pa se od njih razlikujejo, saj v naravi ni negativne mase. Ker v naravi ni masnih dipolov, so gravitacijski valovi izjemno šibki. Celo Einstein sam se je spraševal, ali jih bo možno zaznati. Valovi iz tipičnega binarnega sistema dveh zvezd odnašajo tako malo energije, da tega ne opazimo niti na sistemu, kaj šele, da bi merili valove neposredno. Valove lahko opazimo le, če jih oddaja sistem dveh črnih lukenj, in še to tik pred združitvijo. Črni luknji pred združitvijo pri-



Z leve: Kip S. Thorne, Rainer Weiss in Barry C. Barish. Kip S. Thorne je bil rojen leta 1940 v ZDA in je sodelavec Kalifornijskega tehnološkega inštituta (Caltech) v ZDA, doktoriral je na univerzi Princeton v ZDA. Rainer Weiss je bil rojen leta 1932 v Nemčiji. Je sodelavec Tehnološkega inštituta Massachusetts (MIT) v ZDA, doktoriral je na MIT. Barry C. Barish je bil rojen leta 1936 v ZDA in je sodelavec Kalifornijskega tehnološkega inštituta, doktoriral je na Kalifornijski univerzi v Berkeleyju. Vsi trije so tudi sodelavci v kolaboraciji LIGO/VIRGO. Foto: Andrew Harnik (AP), R. Hahn, javno dostopno.

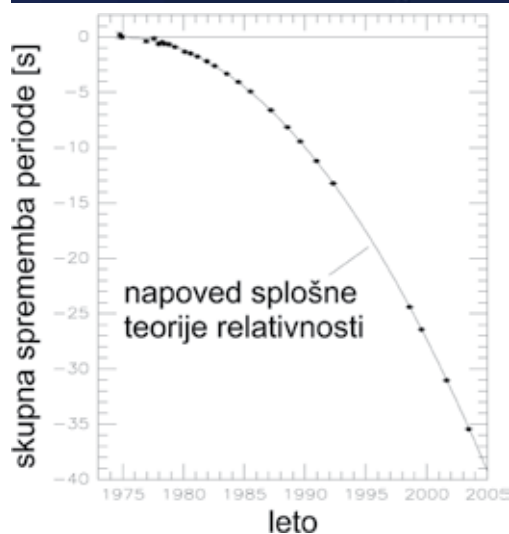


Po izvoru in obliki lahko gravitacijske valove ločimo na slučajne, periodične in sunkovite. Slučajne je težko prepoznati, saj so podobni šumu, vendar bi jih lahko prepoznali v korelaciji signalov iz različnih detektorjev. Taki valovi so lahko posledica razmer ob nastanku vesolja. Periodični valovi izvirajo iz nesimetričnih, vrtečih se, gostih tvorb ali pa para krožečih teles. Sunkoviti valovi nastanejo ob sesedanju zvezd, združenju para, eksplozijah.

ČL = črna luknja, NZ = nevtronska zvezda.

deta na majhno medsebojno razdaljo, imata veliko maso in hitro krožita druga okoli druge. Drug vir merljivih valov je binarni sistem nevtronskih zvezd, ki pa mora biti dovolj blizu, saj se jakost valov hitro manjša s povečevanjem razdalje do vira. Merljiv signal dobimo le z izjemno občutljivim detektorjem valov in ob dogodku, ki sprosti ogromno energije.

Prvi se je merjenja gravitacijskih valov lotil Joseph Weber in izmeril množico signalov, za katere pa se je kasneje pokazalo, da niso posledica gravitacijskih valov. Če bi njegove meritve držale, bi se naša Galaksija že davno razpršila. Joseph H. Taylor in Alan R. Hulse sta odkrila binarni par nevtronskih zvezd. Natančne meritve obhodnega časa zvezd so pokazale, da par izgublja energijo.

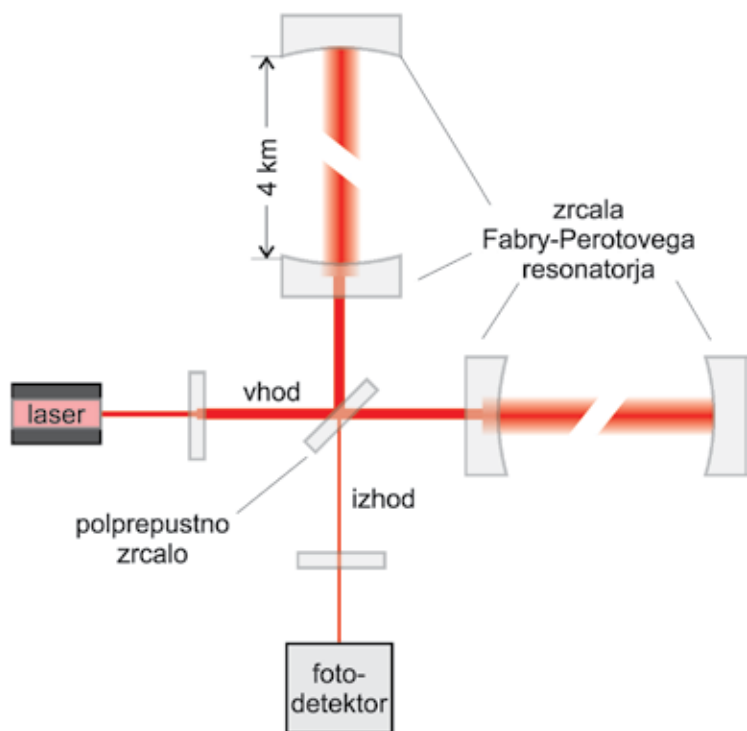


Frekvenca, s katero krožita zvezdi druga okoli druge, se zaradi oddajanja gravitacijskih valov s časom vztrajno manjša.

jo skladno s sevanjem gravitacijskih valov. Tako so bili gravitacijski valovi leta 1979 prvič posredno potrjeni. Za to odkritje sta Taylor in Hulse dobila Nobelovo nagrado leta 1993.

Potrditve obstoja gravitacijskih valov je vlila nov zagon naporom, da jih zaznajo neposredno. Metoda z Webrovimi mehanskimi resonatorji se je pokazala za premalo občutljiva. Zato so raziskovalci začeli razmišljati o novem načinu merjenja spremembe raz-

dalj – z interferometri. Prvi so idejo merjenja gravitacijskih valov z interferometrom predlagali v Sovjetski zvezi, Gertsenshtein in Pustovoid in kasneje še Vladimir B. Braginski, a ideja je zamrla. Zapiski v Webrovem laboratorijskem dnevniku kažejo, da je tudi on razmišljal o interferometru, vendar te ideje ni nikoli uresničil. To je prvi storil šele Robert L. Forward. Z idejo o interferometru se je nato začel ukvarjati Weiss, ki je na Tehnološkem inštitutu Massachusetts



Interferometer sestavlja dva kraka. Vsak krak zaključuje zrcalo. V kraka usmerimo curek enobarvne laserske svetlobe, tako da ga na začetku krakov razcepimo s polprepustnim zrcalom. Svetloba v vsakem kraku potuje do zrcala na koncu in nazaj do izhoda. Na izhodu se svetloba iz obeh krakov združi. Če sta razdalji v krakih natančno enaki, je izhodna svetloba najmočnejša, v vseh drugih primerih pa šibkejša. Če se razdalji razlikujeta za polovico valovne dolžine svetlobe, na izhodu ne opazimo svetlobe. Svetlost izhodnega curka je torej odvisna od razlike dolžin krakov. Gravitacijski val spreminja ti dolžini in tako lahko z merjenjem svetlosti na izhodu zaznamo gravitacijski val. Interferometer bi bil najbolj občutljiv, če bi imel kraka dolga 750 kilometrov. To ni praktično, zato krak interferometra učinkovito podaljšamo s Fabry-Perotovim parom zrcal.

izdelal interferometer z 1,5-metrskima krakoma. V laboratoriju v Gerchingu v Nemčiji, kjer so poskušali potrditi Webrove rezultate, so opustili meritve z Webrovo anteno in izdelali 30-metrski interferometer, kjer so raziskovali načine zmanjševanja šuma. Leta 1975 je začel raziskovati interferometrično merjenje razdalj med dvema Webrovima antenama Ronald Drever. Merjenja z interferometrom so potem zašla v slepo ulico. Manjši interferometri niso bili dovolj občut-

ljivi, prehod na večje pa je zahteval ogromne denarne vloške.

Skupina v Gerchingu je leta 1985 pripravila predlog trikilometrskega interferometra, ki pa ni bil odobren za financiranje. Podobna usoda je čakala škotski laboratorij, v katerem je nekdaj delal Drever. Šele skupni napor s skromnejšim 600-metrskim predlogom je bil uspešen leta 1994. Sistem je zdaj operativen pod imenom GEO. Tik pred sprejetjem projekta so se za podoben

Zaznani dogodki (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 sodeluje 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.

Dogodek	Razd. [MPc]	Območje [deg 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

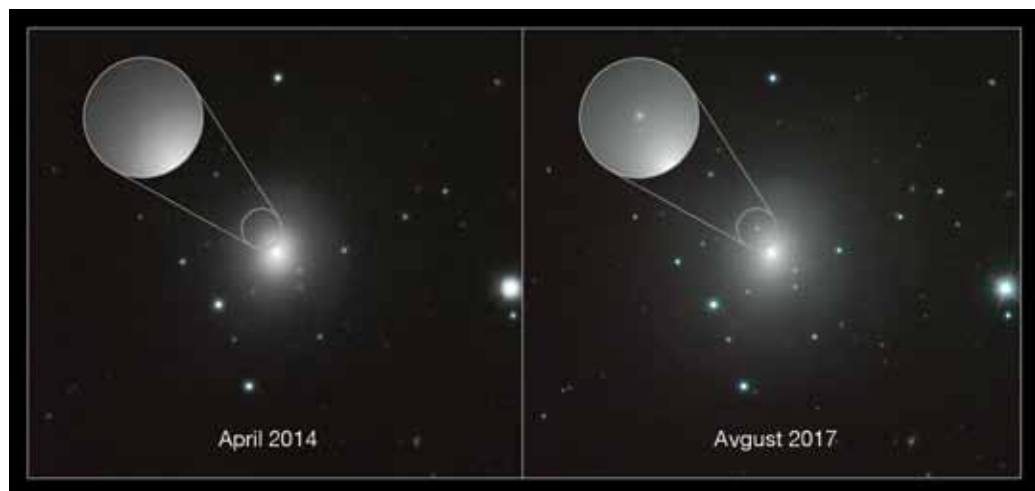


Interferometer VIRGO blizu Pise v Italiji ima kraka, dolga po tri kilometre.

projekt začeli zanimati Francozi iz Orsaya, ki so k sodelovanju privabili Italijane iz Pise in Neaplja. Skupaj so leta 2003 dokončali detektor, ki nosi ime VIRGO.

V ZDA sta skupni stomilijonski projekt

pripravila teoretik Kip Thorne in Weiss. Zaradi izkušenj je bil k projektu povabljen tudi Drever, ki je za učinkovito podaljšanje krakov interferometra uporabil Fabry-Pérotov interferometer. Po nekaterih začetnih



Dogodek GW170817 je zanimiv, ker so ga zaznali tudi po izbruhu sevanja gama, zasij pa tudi z optičnimi teleskopi. Je posledica združitve dveh nevtronskih zvezd in so ga zaznali zato, ker se je zgodil blizu.

težavah je leta 1994 na vodilno mesto prišel Barry Barish, ki je imel izkušnje z vodenjem velikih projektov na področju fizike visoko-energijskih delcev, Drever pa je projekt zapustil. Leta 1997 so dokončali laboratorija v Hanfordu v državi Washington in Livingstonu v Louisiani in tako je nastal observatorij gravitacijskih valov z laserskim interferometrom LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory).

LIGO je začel z meritvami leta 2002 in takoj po prenovi so leta 2015 zaznali prvi dogodek, o katerem smo v *Proteusu* že poročali. Združenje dveh masivnih črnih lukenj je povzročilo pravi vihar v astronomiji gravitacijskih valov. Od takrat so na sistemu zaznali že šest dogodkov in še enega verjetnega. Odkar z detektorjem LIGO sodeluje tudi VIRGO, se je močno izboljšala natančnost določanja območja na nebu, v katerem leži izvir.

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

Literatura:

- The Nobel Prize in Physics 2017*, 2017. Dostopno na: https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2017/. Pridobljeno 15. novembra 2017.
- Henri, P., 1905: *Sur la Dynamique de l'électron*. *Proceedings Academy of Sciences of the United States of America*, 140: 1504–1508
- Moborič, A., 2016: *Gravitacijski valovi*. *Proteus*, 78 (10): 438–445.