

Gravitacijski valovi

Aleš Mohorič

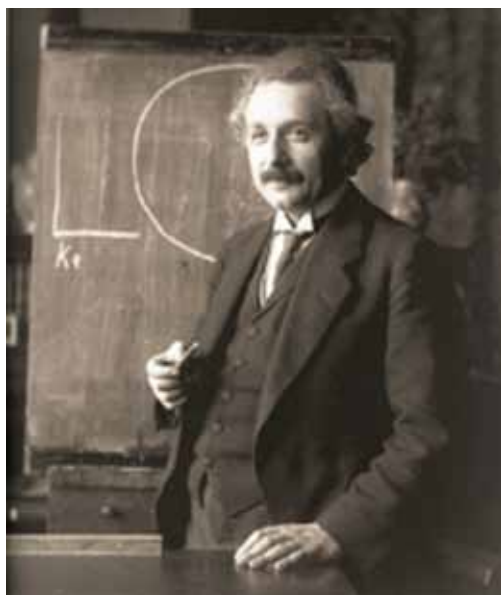
Lansko jesen je svet fizike pretresel tako tih šepet, da so ga slišala in povzela tudi javna občila. To se v znanosti redko zgodi. In kaj tako pomembnega se je zgodilo? Eden največjih raziskovalnih detektorjev je zaznal enega najšibkejših signalov, kar jih znamo meriti, gravitacijske valove. Dogodek je pomemben, saj je potrditev obstoja gravitacijskih valov eksperimentalni test splošne teorije relativnosti. Dosežek pa je nekaj veličastnega tudi z vidika umetnosti merjenja. Pa pojdimo po vrsti.

Splošna teorija relativnosti

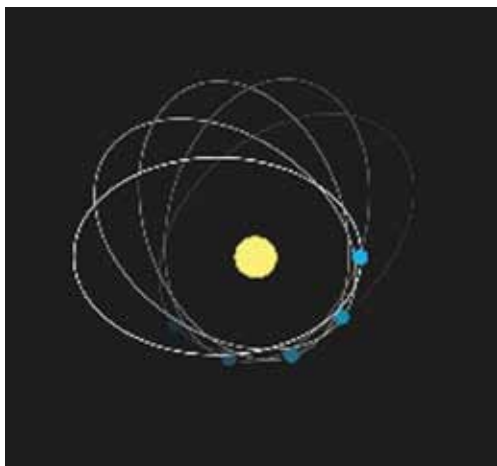
Pred dobrim stoletjem, leta 1915, je Albert Einstein, štejemo ga med najbolj prepoznane fizike, objavil za takratne čase revolucionarno splošno teorijo relativnosti, s katero je za vedno spremenil razumevanje časa, prostora in gravitacije. V tej teoriji čas ni več parameter, kot v Newtonovi mehani-

ki, ki teče enako za vse, od začetka vesolja do njegovega konca. V njej čas postane le še ena od dimenzij štirirazsežnega prostor-časa, torej v nekem smislu ena od dodatnih dimenzij prostora. Sicer je ta dimenzija še vedno nekaj posebnega, kar se kaže v metriki – načinu, kako merimo razdalje med točkama v tem prostoru. Še nekaj nenavadnega se dogaja v prostor-času. Če vanj postavimo maso ali energijo, se bo ta prostor ukrivil. Če je masa porazdeljena neenakomerno, bo v tem prostoru žarek svetlobe spremenil smer. Kvanti svetlobe, fotoni, se začnejo obnašati, kot da bi imeli maso, in čutijo vpliv gravitacije. Na podlagi nove teorije je Einstein leta 1916 napovedal gravitacijske valove. Na tem mestu se porodi vprašanje, zakaj je šele Einstein opisal te pojave in niso tega storili že pred njim. Zato, ker se pojavi, katerih opis se v splošni teoriji relativnosti razlikuje od Newtonovega, dogajajo v okolici teles z veliko maso in pri velikih hitrostih, ki so primerljive s hitrostjo svet-

Albert Einstein med predavanjem na Dunaju leta 1921.



Ponazoritev precesije Merkurjeve tirnice je pretirana, v resnici se os elipse zavrti le za 574 sekund v stotih letih.



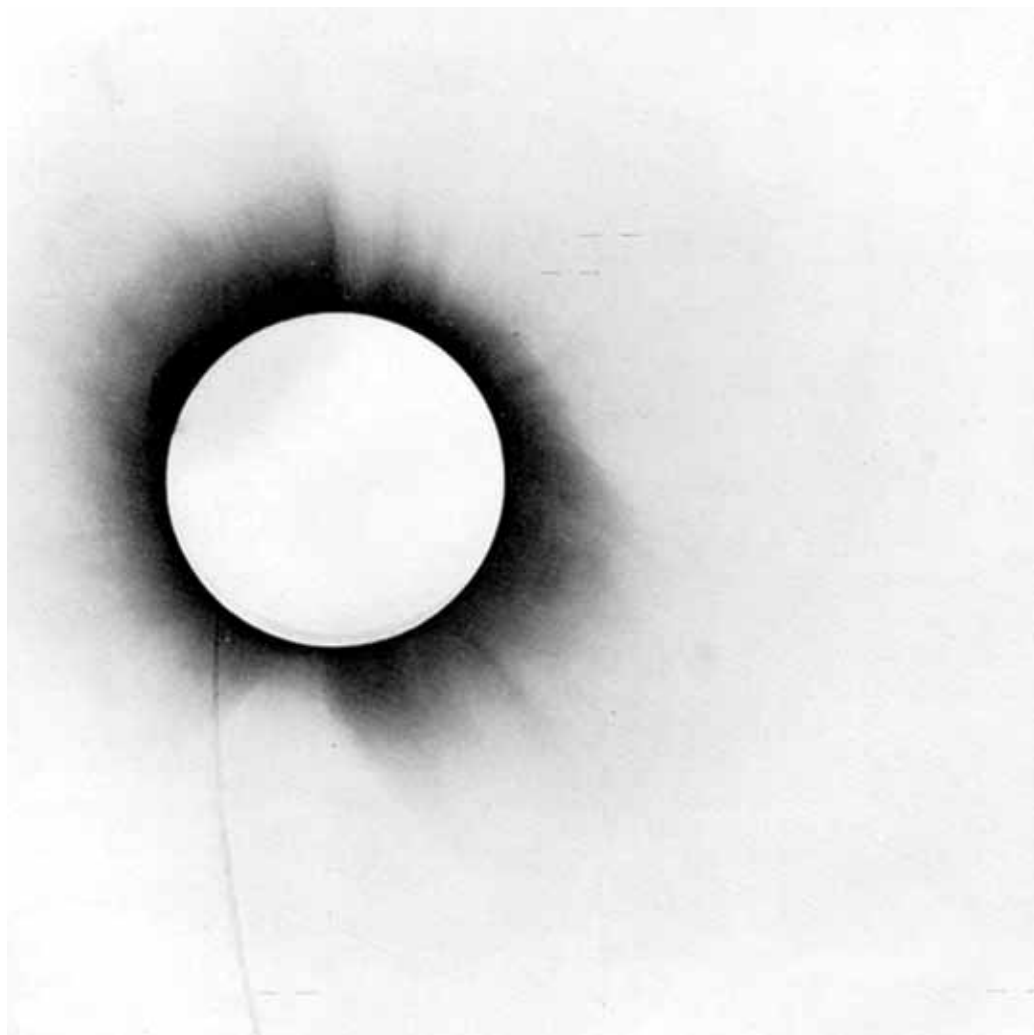
lobe. V normalnih razmerah je ta vpliv majhen in ga lahko zaznamo šele z natančnimi merjenji. V vsakdanjem življenju ga nikjer prav nič ne občutimo, morda pri navigaciji s sateliti, pa še tam nam je skrit. Zanj vedo natančne ure in elektronika. Te upoštevajo spreminjanje Zemljinega gravitacijskega polja z višino, zaradi katerega čas za satelite

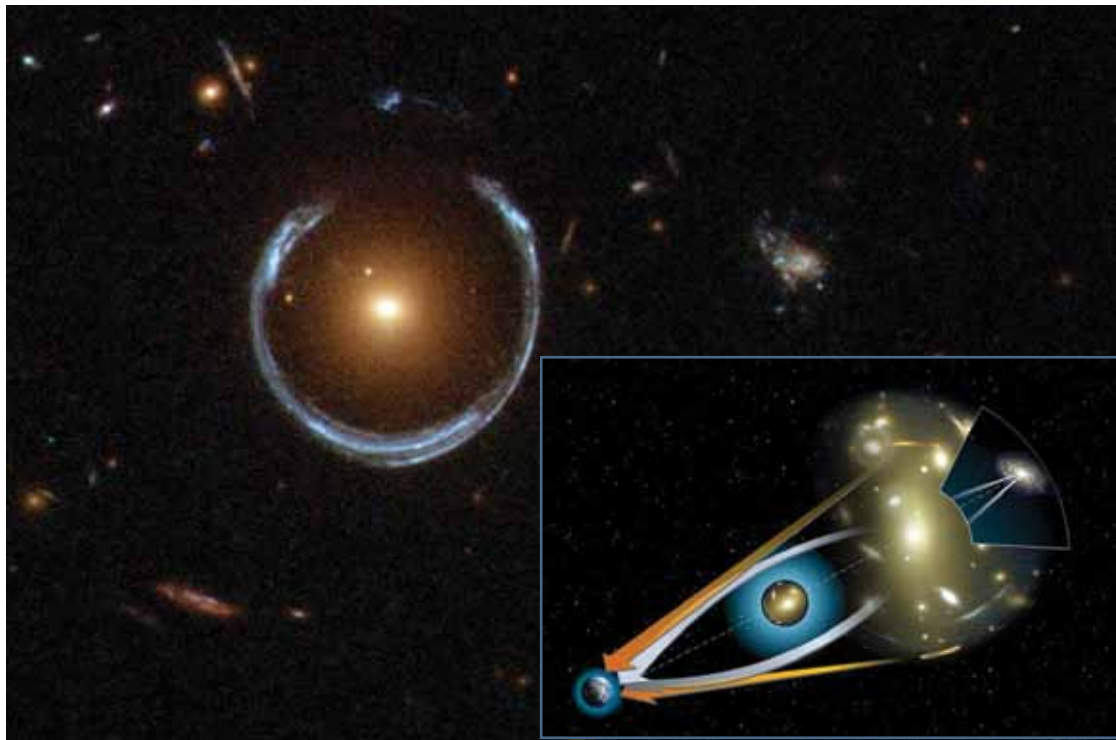
Negativ Sončevega mrka, ki ga je leta 1919 naredil sir Arthur Eddington. S primerjavo lege zvezd na tem posnetku in lege, kadar pogleda ne zakriva Sonce, lahko ugotovimo, kako se ukrivlja svetloba, ko potuje blizu Sonca.

teče drugače kot za nas. Pa si oglejmo še nekaj pojavov, ki jih opiše splošna teorija relativnosti, Newtonova klasična mehanika pa jih ne pojasni zadovoljivo.

Eksperimentalne potrditve teorije

Že Einstein je predlagal tri teste svoje teorije, ki jih je s časom in z natančnimi meritvami uspešno prestala. Eden od testov je opis precesije Merkurjeve orbite. Klasična mehanika napove za Merkurjevo tirnico eliptično orbito s Soncem v enem od gorišč. Rezultati meritev so že ob času vpeljave





Svetla rdeča galaksija LRG 3-757 v sredini slike kot gravitacijska leča preslika modro galaksijo, ki se nahaja za njo, v modrikasto podkev. Oblika modre galaksije je v resnici bolj podobna modri meglici na desnem delu slike. Izsek slike kaže shematično predstavitev gravitacijskega lečenja: potek žarkov od modre galaksije do nas (belo) in njeno navidezno lego na nebu (rumeni žarki).

teorije kazali, da se os elipse s časom vrti, precesira. Opis v okviru klasične mehanike, ki upošteva vpliv ostalih teles v Osončju in nesferičnost Sonca, le delno pojasni rezultate. S splošno teorijo relativnosti pojasnimo tudi preostalo odstopanje od meritev. Vpliv ukrivljenosti prostor-časa na tirnice preiskujejo danes tudi s sateliti in z opazovanjem dvojnih pulzarjev.

Drugi test teorije je merjenje ukrivljenja žarkov pri potovanju svetlobe blizu masivnih teles. Pojav so prvič opazovali leta 1919 med Sončevim mrkom, ko so opazili odklon svetlobe zvezd, ki so bile v bližini zveznice s Soncem. Običajno ta opazovanja niso možna, saj je svetloba s Sonca premočna. Danes vpliv gravitacije na smer potovanja

svetlobe prepoznamo pri mnogih oddaljenih astronomskih objektih, ki se nahajajo za drugim masivnim telesom ali galaksijo. Ta pojav imenujemo tudi gravitacijsko lečenje. Tretji klasični test splošne teorije relativnosti je premik frekvence svetlobe proti rdečemu delu spektra, ko svetilo premaknemo v močnejše gravitacijsko polje. Poskus, ki je potrdil napovedi teorije, sta leta 1959 izvedla Robert Pound in Glen A. Rebka. Relativna sprememba valovne dolžine svetlobe je bila pri omenjenem poskusu le nekaj bilijardink in zato sta morala uporabiti izredno občutljivo metodo merjenja spremembe frekvence svetlobe, ki vključuje Mössbauerjev pojav. Ta test je ekvivalenten testu primerjave hitrosti ur na različnih višinah. Navigacijski sateliti morajo razliko v hitrosti ur upoštevati, saj znese 38 mikrosekund na dan.

Sodobnejši testi teorije so meritve podaljšanja časa odboja radarskega valovanja od drugega planeta, ko planet zaide za Sonce, ter testiranje ekvivalenčnega načela. Po ek-



Gravitacijski valovi nastanejo s pospešenim gibanjem telesa, ki ima maso. Zaporedje slik kaže spiralno približevanje dveh nevtronskih zvezd, ki med kroženjem sevata gravitacijske valove.

vivalenčnem načelu so tirnice lahkih teles, ki padajo v gravitacijskem polju, neodvisne od njihove mase in sestave. Načelo testirajo z natančnimi Eötvösovimi torzijskimi tehnicami.

Pojav, ki ga tudi napoveduje teorija in se je do zdaj izmikal neposredni eksperimentalni potrditvi, so gravitacijski valovi. Vpliv teh valov je tako šibek, da niti Einstein ni verjel, da jih bo možno izmeriti. Prvi posredni dokaz za obstoj gravitacijskih valov so leta 1974 nudila opazovanja frekvence, s katero kroži pulzar v sistemu dveh nevtronskih zvezd PSR B1913+16. Russell Hulse in Joseph Taylor sta pokazala, da se obhodni čas pulzarja manjša skladno z napovedmi teorije. Obhodna frekvenca se večja, ker sevanje gravitacijskih valov zmanjšuje energijo sistema zvezd. Za to delo sta leta 1993 prejela Nobelovo nagrado za fiziko. Vendar je bil ta poskus le posreden dokaz gravitacijskega valovanja. Neposredna meritev je bila še dobra štiri desetletja v prihodnosti. Pa si oglejmo, kaj so gravitacijski valovi in kako jih lahko neposredno zaznamo.

Gravitacijski valovi

Gravitacijsko valovanje lahko ponazorimo z analogijo z elektromagnetnim, ki ga vsi dobro poznamo, čeprav se tega mogoče niti ne zavedamo. Oči lahko zaznajo elektromagnetno valovanje z valovnimi dolžinami od 400

do 700 nanometrov. Tako valovanje imenujemo tudi vidna svetloba. Nizkofrekvenčno elektromagnetno valovanje poznamo kot radijske valove in ti nastanejo, ko v anteni teče izmenični električni tok. Elektromagnetni valovi so posledica pospešenega gibanja električnega naboja. Električni naboj ustvarja električno polje in kadar se naboj pospešeno giblje, v okolici ustvari elektromagnetno valovanje.

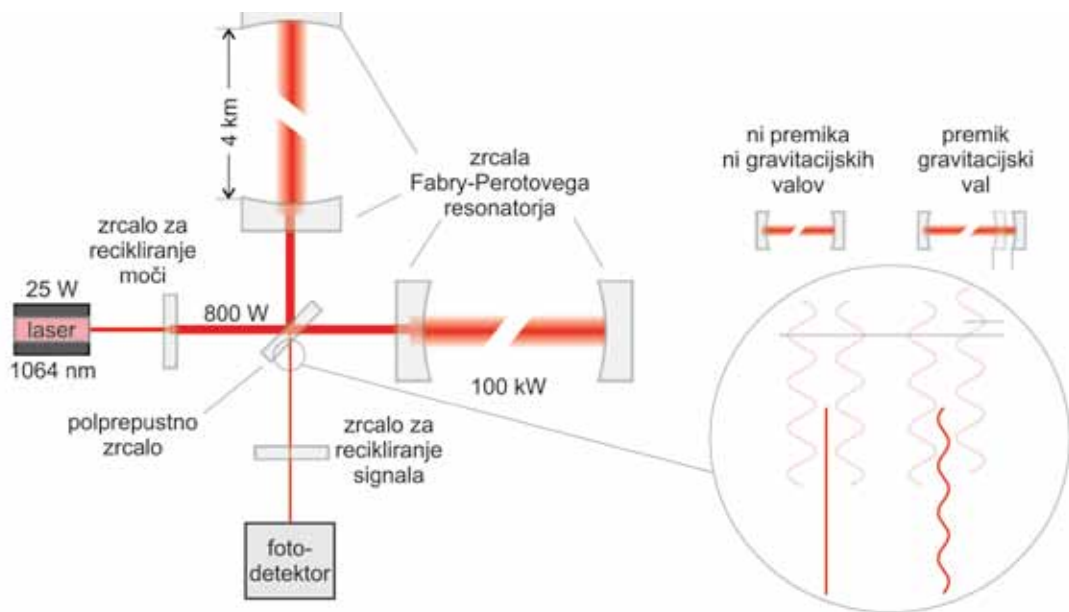
Gravitacijski valovi so, podobno kot elektromagnetni, spremembe gravitacijskega polja, ki se po prostoru širijo s hitrostjo svetlobe. Telesa, ki imajo maso, ustvarijo v svoji okolici gravitacijsko polje. Med pospešenim gibanjem telesa v njegovi okolici nastane gravitacijsko valovanje. Gravitacijske valove ustvarjamo tudi ljudje, avtomobili, mravlje, vendar so ti valovi mnogo prešibki, da bi jih lahko zaznali. Običajno telo bi razpadlo pri pospeških, pri katerih je valovanje dovolj močno za zaznavo. Gravitacijski valovi, ki pa jih lahko izmerimo, izvirajo iz močno pospešenih zelo masivnih in gostih objektov, kot so črne luknje, nevtronske zvezde, pulzarji ali masivne zvezde ob koncu svojega življenja. Vendar so ta telesa zelo oddaljena od nas in so spremembe gravitacijskega polja zaradi valovanja, ki izvira od njih, zelo majhne v primerjavi s statičnim gravitacijskim poljem, ki ga povzročajo telesa v naši okolici, na primer Zemlja. Gravitacijske valove je zato zelo težko zaznati. Gravitacija, ki so jo izmerili v dogodku, ki bo opisan kasneje, je bila pet kvintilijonink (5×10^{-30}) Zemljine.

Merjenje gravitacijskih valov

Kako izmerimo gravitacijsko valovanje? Vpliv gravitacije nam je najbolj poznan po teži, ki jo imajo telesa z maso. S tem pojavom se srečujemo vsak dan. Vendar pa na ta način gravitacijskih valov ne bi mogli izmeriti. Amplituda valov je brezupno majhna in majhnih sprememb teže ne bi mogli meriti v primerjavi s težo zaradi Zemljinega privlaka. Za meritve izkoristimo drug vpliv gravitacije. Gravitacija vpliva na hitrost, s kate-

Shema interferometra LIGO: laser oddaja infrardečo svetlobo z valovno dolžino 1064 nanometrov, ki jo s posebnimi zrcali ojačimo. Nato se curek na polprepustnem zrcalu razdeli na dva delna curka, ki potujeta vsak po svojem 4 kilometre dolgem kraku. Kraka sta med seboj pravokotna. Par zrcal Fabry-Perotovega resonatorja podaljša efektivno dolžino krakov za 280-krat. Curka se po odboju na koncu kraka združita na polprepustnem zrcalu in usmerita v fotodetektor. Izsek (desno) kaže osnovno načelo interferenčnega merjenja – ko sta delni valovanji v nasprotni fazi (ko ni gravitacijskega vala), se med seboj ošibita in signala ni. Ko gravitacijski val premakne katerega od zrcal, se spremeni faza med delnima valovanjema, valovanji se med seboj ne ošibita popolnoma in detektor zazna signal.

ro teče čas. Povečanje gravitacije na nekem mestu tam podaljša čas. Skozi tak prostor potuje svetloba dlje časa. Videti je, kot da bi se zmanjšala hitrost svetlobe, v resnici pa se prostor razširi oziroma se prostor-čas ukrivi. Podaljšanje razdalje pa je zelo majhno. Pravzaprav ne merimo razdalje neposredno, ampak primerjamo razdalji dveh med seboj pravokotnih poti, ki imata približno enaki dolžini, ko ni gravitacijskega valovanja. Ko valovanje zajame območje, na katerem merimo dolžine, se ena od poti nekoliko podaljša in druga nekoliko skrajša. In tudi pri taki meritvi so spremembe komaj zaznavne. Da bomo razumeli, kako natančno moramo meriti dolžino, si predstavljajte, da s šiviljskim trakom izmerite dolžino revije, ki jo berete. Relativna natančnost merjenja dolžine je v tem primeru približno 0,01. Če namesto šiviljskega traku uporabimo kljunasto merilo, najbolj natančno prosto dostopno merilo, natančnost izboljšamo za stokrat, na 0,0001. Uspešno merjenje gravitacijskih valov pa potrebuje še bilijardokrat (10^{15}) boljšo natančnost od kljunastega merila.





Zračni posnetek interferometra v Hanfordu (levo) in zrcalo, obešeno tako, da ga okolica čim manj trese (desno).

Fotografiji: LIGO/MIT/Caltech in astronomia.com.

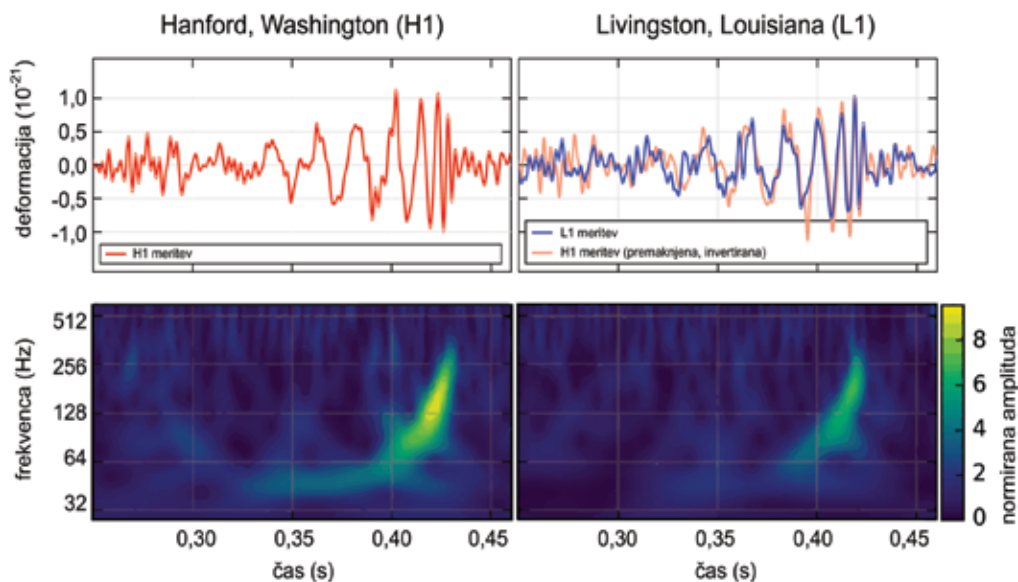
Najbolj natančne meritve dolžine izvajamo z interferometri. To so naprave, v katerih svetlobni curek koherentne svetlobe razdelimo s polprepustnim zrcalom v dva delna curka, ki ju nato usmerimo vsakega v svoj krak interferometra. Na koncu kraka se curka odbijeta od zrcal in se nato zopet združita v izhodišču, kjer interferirata med seboj. Dolžini krakov merimo oziroma primerjamo med seboj z valovno dolžino svetlobe. Če se dolžini krakov razlikujeta za pol valovne dolžine, potem je interferenca destruktivna. Takrat namesto svetlobe, sestavljene iz dveh delnih curkov, ostane tema. Z zelo natančnim merjenjem jakosti te svetlobe lahko zaznamo spremembe v dolžini, ki so mnogo manjše od valovne dolžine svetlobe.

Navaden interferometer z ločljivostjo majhnega dela valovne dolžine - 0,1 mikrometra - ni dovolj občutljiv za merjenje gravitacijskih valov. Potrebujemo mnogo bolj izpopolnjen interferometer. Pravzaprav je tak interferometer med največjimi merilniki, kar jih poznamo. Tak interferometer deluje v okviru observatorija LIGO. LIGO je akronim za Laser Interferometer Gravitational-



Wave Observatory (Observatorij gravitacijskih valov z laserskim interferometrom). Interferometer ima dva med seboj pravokotna kraka, od katerih je vsak dolg 4 kilometre. Ta kraka sta 360-krat daljša od enajstmetrskih krakov interferometra, ki sta ga Albert A. Michelson in Edward W. Morley uporabila pri poskusu leta 1887. Želela sta izmeriti hitrost Zemlje v etru, hipotetični snovi, v kateri potuje svetloba. Poskus je pokazal, da je hitrost svetlobe enaka v vseh opazovalnih sistemih, ni odvisna od smeri in da svetloba lahko potuje po praznem prostoru. Rezultat je bil temelj za posebno teorijo relativnosti. Vendar tudi izjemna dolžina krakov interferometra LIGO ne bi nudila zadostne občutljivosti. Zato se v vsakem kraku nahaja še par izredno čistih in gladkih zrcal, ki tvorita Fabry-Perotov resonator. Med zrcaloma se svetlobni curek odbije še 280-krat, kar pomeni, da je efektivna dolžina posameznega kraka 1.120 kilometrov. Z interferometrom zaznajo spremembe v dolžini kraka velikostnega reda 10^{-19} metra, kar je desetstisočkrat manjše od protona. Relativna sprememba dolžine je tolikšna, kot je debelina lasu v primerjavi z razdaljo do najbližje zvezde zunaj Osončja.

Kontrast interferenčnega vzorca, ki ga tvori curka svetlobe iz različnih krakov, je



Signal gravitacijskih valov, ki so jih zaznali v LIGU. Levo zgoraj je signal, izmerjen v Hanfordu. Zgornji, desni diagram kaže signal, izmerjen v Livingstonu. Nanj je za primerjavo vrisan tudi za sedem milisekund zamaknjen in invertiran signal iz Hanforda. Jasno se vidi ujemanje obeh signalov. Signal je izmeničen, njegova amplituda narašča in nihajni čas se krajša. Ko sta črni luknji trčili, je signal izzvenel. Spodnji par slik kaže časovni razvoj spektra obeh signalov.

odvisen tudi od moči laserske svetlobe. Za dovolj veliko občutljivost mora biti moč čim večja in v LIGU znaša osupljivih 750 kilovatov. Tako moč dosežejo z 200-vatnim laserjem in ojačenjem curka s posebnim sistemom zrcal, postavljenim med laser in polprepustno zrcalo. Laserska svetloba je infrardeča, z valovno dolžino svetlobe 1.064 nanometrov. Valovna dolžina je načrtno izbrana, tako da je toplotna stabilnost interferometra čim boljša. Če bi se preveč laserske svetlobe absorbiralo na zrcalih, bi se ta pregrevala in lastnosti interferometra bi se spreminjale. Interferometer je zgrajen

za zaznavanje gravitacijskih valov z valovno dolžino od 43 kilometrov do 10.000 kilometrov, kar ustreza frekvencam od 30 hercev (Hz) do 7000 hercev (Hz).

Interferometer je izjemno občutljiv za najmanjše spremembe razdalje med zrcaloma kraka. Do teh sprememb prihaja že zaradi tresljajev iz okolice, ki povzročajo nihanje nihala. Zato je posebna skrb namenjena dušenju nihanja zrcal. Učinkovito dušenje dosežejo s posebnim, štirikratnim obešenjem zrcal. Vendar se niti tako ne morejo popolnoma izogniti nihanju, ki ga povzroči tresenje tal med potresnimi sunki. Zato v LIGU uporabljajo dva enaka interferometra, enega v Hanfordu v državi Washington v Združenih državah Amerike, in drugega v 3.000 kilometrov oddaljenem Livingstonu v državi Louisiana. Tako dosežejo, da isti potres ne strese in ne vpliva na oba interferometra hkrati. Signali, ki imajo enak časovni potek in jih interferometra zaznata z določenim časovnim zamikom (tako imenovani korelirani signali), zato lahko izvirajo samo

iz gravitacijskih valov. Z določanjem časovnega zamika med enakimi signali iz dveh interferometrov lahko določijo tudi smer, iz katere je prišlo gravitacijsko valovanje.

Rezultati meritve

14. septembra leta 2015, skoraj sto let po teoretični napovedi, so ob četrti uri zjutraj zaznali signal, ki se je s sedemmilisekundnim zamikom pojavil tudi v drugem interferometru. Signal je imel zelo posebno, značilno obliko. Frekvenca in amplituda signala sta naraščali s časom, potem pa je signal izginil. Take vrste signal imenujemo čirp (chirp). Nastane, ko dve masivni telesi krožita drugo okrog drugega. Sistem teles oddaja energijo z gravitacijskimi valovi in zato telesi padata drugo proti drugemu. Bolj ko sta telesi blizu, hitreje krožita, večji je izsev valov in hitreje se telesi približujeta. Kroženje se pospešuje podobno kot pri umetnostnih drsalcih med pirueto. Kroženje teles se odvija vedno hitreje, dokler telesi na koncu ne trčita in se zlijeata v eno. Iz frekvence valov lahko izračunajo maso krožečih teles, iz amplitude valovanja pa določijo njuno oddaljenost. Časovni zamik med obema interferometroma – pomnimo, gravitacijsko valovanje potuje s svetlobno hitrostjo – pa nudi podatek o smeri, iz katere valovanje prihaja. Izmerjeni signal je ustrežal trku dveh črnih lukenj, vsaka z nepričakovano veliko maso približno 30 Sončevih mas. Oddaljenost črnih lukenj je ocenjena na 1,3 milijarde svetlobnih let, kar pomeni, da se je trk zgodil davnega leta 1.300.000.000 pred našim štetjem. Na koncu, tik pred trkom, sta črni luknji krožili druga okoli druge 250-krat v sekundi in s polovico svetlobne hitrosti. V petini sekunde se je ta kataklizmični dogodek končal. V energijo gravitacijskih valov se je pretvoril ekvivalent treh Sončevih mas. To je izjemna količina energije, več kot je izsev vseh zvezd v vesolju. Raziskovalci so imeli srečo, da se je ta dogodek zgodil ravno v času opazovanja, saj je ta signal zelo značilen, se dobro prilega modelu in ga je enostavno razbrati. Decembra leta 2015 so v LIGU zaznali že

nov čirp, ki je ustrežal združenju dveh črnih lukenj z masama 14,2 in 7,5 Sončeve mase in se je zgodil na razdalji 1,4 milijarde svetlobnih let.

Kako naprej?

Občutljivost interferometrov bodo izboljšali tako, da bodo povečali število interferometrov po svetu. Med drugim bo eden jeseni začel delovati v Italiji. Na ta način bo korelacija signala določena bolj zanesljivo in lažje bo določiti smer izvora valovanja. V tisto smer lahko nato usmerijo teleskope in opazujejo, ali ta kataklizmični dogodek spremlja tudi aktivnost v elektromagnetnem valovanju – infrardeči svetlobi, vidni svetlobi, rentgenskem sevanju in sevanju gama. Hkrati lahko merijo tudi tok nevtrinov in ugotavljajo, kaj se je dogajalo pri trku. Gravitacijski valovi so tudi eno redkih oken, skozi katera lahko zremo globoko v preteklost vesolja. Vidna svetloba se namreč v zelo mladem vesolju ni širila, dokler ni postalo prozorno, ko so se elektroni povezali z nukleoni v atome. Neprozornost vesolja ni ovira za potovanje gravitacijskih valov. Opazovanja gravitacijskih valov bodo vsekakor poglobila naše znanje o vesolju in pomagala odgovoriti na vprašanje, ali splošna teorija relativnosti pravilno opiše gravitacijo. Nova spoznanja si ometamo tudi 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 koristimi tovrstnih eksperimentov pa ne smemo pozabiti tudi na tehnološke izboljšave, ki segajo na področja vakuumske, optične, kriogenske in laserske tehnologije, vede o materialih, geodezije, geologije kot tudi metod hitre obdelave velike količine podatkov.