
*Gravitacijski
valovi
ne prenose
gravitacijsku
energiju*

Vesselin Petkov

Gravitacijski valovi ne prenose gravitacijsku energiju

==== Vesselin Petkov ====

Institut za temeljne studije Herman Minkowski,
Montreal, Quebec, Kanada
vpetkov@minkowskiinstitute.org

U sažetku rada u kojem je objavljena prva detekcija gravitacijskih valova [1], može se uočiti pojavljivanje konceptualnih problema povezanih s pojmovima crnih rupa i gravitacijskih valova kojima ćemo se baviti u ovome tekstu. To je primjerice jasno vidljivo u sljedećem odlomku¹:

14. rujna 2015 u 9:50:45 UTC dva su detektora Lasersko-interferometarskog opservatorija gravitacijskih valova (LIGO) istodobno opazila prolazni signal gravitacijskog vala...On se podudara s valnim profilom predviđenim od strane opće teorije relativnosti za spiralno urušavanje i sudar para crnih rupa, te profilom ringdown faze jedinstvene crne rupe koja je nastala sudarom...Ta opažanja pokazuju postojanje dvojnih sustava crnih rupa zvijezdanih masa. To je prva direktna detekcija gravitacijskih valova i prvo opažanje sudara dvojnih crnih rupa.

Prvo pitanje koje se postavlja je sljedeće: kako se može sa sigurnošću znati da detektirani signal potječe upravo od sudara crnih rupa? Odnosno, na temelju čega se ta detekcija može shvatiti kao siguran dokaz postojanja crnih rupa? U ovome radu se nećemo baviti diskusijom o tom pitanju, no možemo naznačiti kako ono zapravo nigdje nije zadovoljavajuće raspravljeno u spomenutom izvješću LIGO kolaboracije². Sljedeći problem sadržan u gore citiranom dijelu sažetka sastoji se u

¹ Prijevod s engleskog prema [1]

² Ono što je u vezi s tim pitanjem spomenuto u navedenom izvješću nikako se ne može shvatiti kao neki strogi eksperimentalni dokaz: "Par neutronskih zvijezda, iako kompaktni, ne bi imao dovoljnu masu, dok bi par koji bi činili neutronsku zvijezda i crna rupa...imao veoma veliku ukupnu masu, te bi se stoga sudario na mnogo nižim frekvencijama. To ostavlja crne rupe kao jedine poznate objekte koji su dovoljno kompaktni da dosegnu orbitalnu frekvenciju od 75 Hz bez kontakata. [1]" Možemo naravno primijetiti kako "jedinu poznati objekti" nipošto ne znači i jedini mogući objekti. Štoviše, o tome da su crne rupe poznati objekti može se govoriti jedino u smislu njihovog teorijskog statusa. Tu vidimo jasan primjer toga kako eksperimentalna opažanja često već nekritički pretpostavljaju neku određenu teorijsku paradigmu (u ovom slučaju

pogrešnom shvaćanju prema kojemu spiralno urušavajući članovi dvojnog sustava (ako su opisani kao točkaste mase) emitiraju gravitacijske valove. To nerazumijevanje najbolje je vidljivo u samome članku [1]:

Otkriće sistema binarnog pulsara PSR B 1913+16 od strane Hulsea i Taylora, te naknadno opažanje gubitka njegove energije od strane Taylora i Weisberga, dokazuje postojanje gravitacijskih valova.

U navedenom citatu pojavljuju se dva problema u pogledu razumijevanja gravitacijskih valova:

- pretpostavka da dvojni sustav, čiji se članovi shvaćaju kao točkaste mase, emitira gravitacijske valove čak i prije nego što se njegovi članovi sudare
- pretpostavka da gravitacijski valovi prenose gravitacijsku energiju

Tvrdnja da opažanje "Taylora i Weisberga dokazuje postojanje gravitacijskih valova" ne odražava pravo stanje stvari. Prvo, izračuni korišteni u interpretaciji tih opažanja nisu bili u potpunosti utemeljeni na općoj teoriji relativnosti. Zapravo, moguće je predvidjeti "Gravitacijske valove iz orbitalnih dvojnih sustava bez opće teorije relativnosti" [3]. Drugo, dvojni sustav ne posjeduje gravitacijsku energiju, budući da se pulsari u takvom dvojnog sustavu (shvaćeni kao točkaste mase i stoga predstavljeni geodetskim svjetskim linijama³) gibaju po inerciji⁴; sustav čiji se dijelovi gibaju po inerciji (tj. koji je slobodan od interakcija) ne posjeduje gravitacijsku (niti bilo koju drugu) potencijalnu energiju. Štoviše, nikakva gravitacijska energija nije prisutna u ispravnoj interpretaciji opće teorije relativnosti. Također, eksperimentalna činjenica nepostojanja gravitacijske sile u Prirodi – padajuća tijela se ne odupiru svome padu⁵ – pokazuje ne samo da gravitacijska energija ne postoji u općoj teoriji relativnosti, već niti u Prirodi.

Dva su navedena problema razumijevanja gravitacijskih valova postala čestim nesporazumom nakon otkrića sustava dvojnih pulsara PSR B 1913+16 od strane

postojanje crnih rupa), umjesto da je nezavisno ispituju. Čak niti pozivanje na teorijske rezultate opće teorije relativnosti ne oslobađa automatski to pitanje od svih kontroverzi. Štoviše, opća teorija relativnosti zapravo predviđa da **kolaps masivne zvijezde nikada nije završen za udaljene promatrače, dok se kolaps u crnu rupu doseže u konačnom vremenu samo za promatrača smještenog u sustav materije u kolapsu**. Kako smo mi na Zemlji, u odnosu na masivne zvijezde koje prolaze kroz beskrajni gravitacijski kolaps, upravo ti udaljeni promatrači, postavlja se pitanje kako onda uopće imamo pravo govoriti o crnim rupama kao o objektu koji je za naš sustav fizikalno dosegnut? Za detalje vidi poglavlje 7. u [2]

³ Kao što je diskutirano dolje, kada se članovi dvojnog sustava shvate kao tijela koja zauzimaju volumen, gravitacijski valovi se stvaraju na temelju plimnih učinaka u samim pulsarima.

⁴ U skladu s temeljnom pretpostavkom opće teorije relativnosti po kojoj gravitacija nije sila, već rezultat slobodnog gibanja tijela po zakrivljenom prostor-vremenu.

⁵ Kako tijela u slobodnom padu, prema svim izvedenim eksperimentima, ne osjećaju upravo nikakvu silu, odatle proizlazi da sam uzrok slobodnog pada – gravitacija, nikako nije sila, već rezultat slobodnog gibanja (po zakrivljenom prostor-vremenu)

Hulsea i Taylora, 1974. godine [4]. U navedenom radu je rečeno kako je smanjenje orbitalnog perioda takvih dvojnih sustava uzrokovano gubitkom energije zbog njihove emisije gravitacijskih valova. Nakon toga, to je postalo široko prihvaćenom interpretacijom. Ona međutim sadrži dvostruku pogrešku.⁶

Budući da su zvijezde u dvojnog sustava pulsara PSR 193+16 bile "dinamički modelirane kao par orbitirajućih točkastih masa" [5], one su shvaćene kao geodetske svjetske linije⁷, što, međutim, podrazumijeva tri stvari koje proturječe ovim dvjema glavnim tvrdnjama – da spiralno urušavajuće (točkaste) zvijezde emitiraju gravitacijske valove prije nego što se sudare, te da gravitacijski valovi prenose gravitacijsku energiju. Te tri posljedice su sljedeće:

- *Tijela čije su svjetske linije geodezici ne emitiraju gravitacijske valove*; takvi su valovi stvoreni samo od strane tijela koja apsolutno akceleriraju, odnosno od strane tijela čije svjetske linije nisu geodezici. Drugim riječima, gravitacijske valove stvaraju tijela čije su svjetske linije *deformirane* (budući da je izvor gravitacijskih valova deformirana svjetska linija). Originalno predviđanje emisije gravitacijskih valova od strane Einsteina [6], ispravno je uključivalo uzrok takvih valova – apsolutnu akceleraciju. Ili, koristeći potpun jezik prostor-vremena, to se može izreći i u obliku tvrdnje da su gravitacijski valovi emitirani samo od strane tijela čije svjetske linije *nisu* geodezici. Einstein je razmotrio rotirajući štapić, kao što je mogao razmotriti i bilo koji drugi rotirajući materijal vezan kohezivnim silama. Nijedna od čestica takvog rotirajućeg materijala (osim središta rotacije) ne predstavlja geodetsku svjetsku liniju u prostor-vremenu, što znači da te čestice osjećaju apsolutnu akceleraciju i stoga emitiraju gravitacijske valove. No to očito nije tako u slučaju dvojnih zvijezda koje su modelirane kao točkaste mase.
- *Tijela čije su svjetske linije geodezici gibaju se po inerciji bez gubitka energije.*, budući da je upravo bit inercijskog gibanja – gibanje bez gubitka energije.
- *Objašnjenje smanjenja orbitalnog perioda dvojnog sustava pulsara koje je dano od strane Hulsea i Taylora je u principu pred-relativističko.* U skladu

⁶ Ovakva je interpretacija pružena čak i prilikom objave za medije 13. listopada 1993., kada je Nobelova nagrada za fiziku dana Hulseu i Tayloru (objavljeno na [nobelprize.org](https://www.nobelprize.org)): "sustav emitira energiju u vidu gravitacijskih valova, u skladu s onime što je Einstein predvidio 1916. da bi se dogodilo s masama koje se gibaju relativno jedna prema drugoj.". (<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1993/press-release/>). Dolje ćemo vidjeti kako je 1916. Einstein predvidio da se gravitacijski valovi emitiraju od strane tijela na koje djeluje apsolutna akceleracija, odnosno od strane tijela čije svjetske linije nisu geodezici, što svakako nije slučaj sa spiralno urušavajućim članovima dvojnog sustava. Zanimljivo je da je službeni razlog za dodjelu ove Nobelove nagrade pažljivo i ispravno sročeno: "Za otkriće novog tipa pulsara, otkriće koje je otvorilo nove mogućnosti za istraživanje gravitacije."

⁷ Svjetska linija predstavlja putanju tijela u četvero-dimenzionalnom prostor-vremenu. Geodezik je tip svjetske linije po kojoj se tijelo giba samo po sebi, odnosno bez ikakvih vanjskih utjecaja. Alternativno, geodezik je najkraća linija između dviju točaka u prostor-vremenu.

s općom teorijom relativnosti, orbitalni period dvojnog sustava se smanjuje zato što njihove geodetske svjetske linije⁸ konvergiraju – odnosno, spiralno urušavajuće zvijezde se približavaju jedna drugoj dok se gibaju po inerciji, što dovodi do smanjenja orbitalnog perioda.

U skladu s time, eksperimentalna činjenica smanjivanja orbitalnog perioda sustava PSR 193+16 prije sudara zvijezda se ne može shvatiti kao dokaz bilo za emisiju gravitacijskih valova⁹, bilo za postojanje gravitacijske energije. I zaista, ispravna formulacija službene medijske objave LIGO GW170104 pod nazivom *”LIGO detektira gravitacijske valove po treći puta”*,¹⁰ pokazuje da je to nerazumijevanje – prema kojemu (točkasti) članovi dvojnog sustava emitiraju gravitacijske valove prije svog sudara – ipak nadiđeno. Navedeno je vidljivo iz sljedećeg:

Kao što je bio slučaj i kod prvih dviju detekcija¹¹, valovi su proizvedeni kada su se dvije crne rupe sudarile i formirale veću crnu rupu.

Kada se pulsari realistično prikažu kao objekti koji ispunjavaju prostor, oni će emitirati slabe gravitacijske valove zbog plimnih efekata¹². Odnosno, zbog zakrivljenosti prostor-vremena, svjetske linije njihovih dijelova nisu kongruentne (”paralelne”), pa će sile koje ih drže skupa deformirati svjetske linije (odnosno, njihovi dijelovi će biti izloženi apsolutnoj akceleraciji), zbog čega će se emitirati gravitacijski valovi. No ti su gravitacijski valovi znatno slabiji¹³ od onih gravitacijskih valova koji se emitiraju kada se pulsari sudare.

Nesporazum oko toga *kada* se gravitacijski valovi emitiraju zapravo je započeo otkrićem dvojnog sustava pulsara PSR 1913+16, no pogrešna ideja o tome da gravitacijski valovi prenose gravitacijsku energiju čini se da je postala široko prihvaćena nakon Chapel Hill konferencije iz 1957. U tom pogledu, ta konferencija se pokazala kao ključna za fiziku gravitacijskih valova¹⁴. Budući da se čini kako je

⁸ Budući da su prije sudara zvijezde *”modelirane kao par orbitirajućih točkastih masa”* i stoga se gibaju po inerciji bez gubitka energije

⁹ Kao što pokazuje posljednji pregledni članak iz 2021.[7], u suprotnosti s ranijim tvrdnjama koje su utemeljene na pogrešnom modelu – prema kojemu dvojni sustav točkastih masa emitira gravitacijske valove prije sudara, nove studije dvojnih sustava koriste realistične modele, koji uzimaju u obzir plimne efekte koji dovode do emisije gravitacijskih valova.

¹⁰ <https://www.ligo.caltech.edu/page/press-release-gw170104>

¹¹ Razlog zbog kojega koristim izraz *”ispravna formulacija”* je taj što je prvo priopćenje (vidi citat na početku ovog rada) i dalje spominjalo emisiju gravitacijskih valova prije sudara.

¹² Plimni efekti su svi učinci koji proizlaze iz razlike gravitacijskog privlačenja na različitim dijelovima prostora.

¹³ Oni doduše postaju jači neposredno prije sudara, budući da plimni efekti naglo rastu, a kao rezultat toga svjetske linije dijelova zvijezda postaju sve više deformirane – što znači da njihova apsolutna akceleracija raste.

¹⁴ Prije Chapel Hill konferencije čak su postojale i sumnje u postojanje gravitacijskih valova. Čini se da je to proizlazilo iz očitog problema u skladu s kojim matematički formalizam opće teorije relativnosti ne sadrži odgovarajući tenzorski izraz za gravitacijsku energiju i impuls (što je vodilo u pitanje kako bi gravitacijski valovi mogli postojati ako ne prenose energiju), nadalje, iz zostanka globalnog

na toj konferenciji Feynmann bio glavni i odlučujući zagovornik stava da gravitacijski valovi prenose gravitacijsku energiju, razmotrit ćemo njegove argumente i komentare, kako bismo vidjeli da je pretjerana samouvjerenost ovog inače važnog fizičara doprinijela toj široko raširenoj pogrešnoj ideji.

U predgovoru Feynmanovim *Lectures on Gravitation*, John Preskill i Kip S. Thorne citiraju Feynmanovo pismo Victoru Weisskopf u kojem se on prisjeća konferencije iz 1957. te komentira [9]:

Bio sam iznenađen kada sam vidio kako je čitav dan na konferenciji posvećen ovome pitanju, te da su "stručnjaci" zbunjeni. To je ono što proizlazi iz promatranja sačuvanih tenzora energije itd., umjesto da se pita: "mogu li valovi obavljati rad?"

Upravo taj komentar, pogotovo njegova druga rečenica, otkriva bit Feynmanove pretjerane samouvjerenosti; takav pristup teško može biti nazvan bavljenjem fizikom na najbolji način. Postoje dva problema u vezi tog pristupa. Prvo, u pogledu toga "što proizlazi iz promatranja sačuvanih tenzora energije itd.", čini se da Feynman potcjenjuje potrebu za ozbiljnom analizom matematičkog formalizma opće teorije relativnosti (kao i – čini se – bilo koje teorije). Budući da je ovo veoma važno za provjeru i ispravno razumijevanje fizikalne teorije, ali istovremeno predstavlja i veoma kompleksno pitanje po sebi, za potrebe ovoga rada samo ćemo spomenuti kako je Minkowski otkrio svjetsku strukturu prostor-vremena čineći upravo ono za što se doima kao da to Feynman potcjenjuje – strogo analizirajući matematički formalizam Newtonove mehanike. Drugo, u pogledu navedenog "umjesto da se pita: mogu li valovi obavljati rad?" Feynmanov posljednji odlomak u njegovoj knjizi *Feynmann Lectures on Gravitation* čini se da pokazuje ne samo pretjerano samopouzdanje, već i iritaciju zbog toga što se "brojni ljudi... nepotrebno brinu oko tog pitanja" (da li gravitacijski valovi prenose energiju), dok je, kao što on pretpostavlja, odgovor na njega sasvim očit [10]:

Kakva je snaga emitirana od strane takvog vala? Mnogo je ljudi koji se nepotrebno brinu oko tog pitanja, zbog stalne predrasude da je gravitacija nekako misteriozna i drugačija - oni smatraju kako je moguće da gravitacijski valovi uopće ne prenose energiju. Budući da očigledno možemo pokazati da gravitacijski valovi zaista mogu zagrijati zid, uopće nema prijepora o njihovom energijskom sadržaju. Situacija je sasvim analogna onoj u elektrodinamici, kao što i u kvantnoj interpretaciji svaki izračeni graviton prenosi količinu energije $h\omega$.

očuvanja energije u općoj teoriji relativnosti, a možda i zbog toga što su amplitude predviđene od strane Einsteina bile izuzetno male [8].

Prije nego što razmotrimo Feynmanov dokaz za to da gravitacijski valovi prenose gravitacijsku energiju, razmotrimo četiri glavne točke u navedenom citatu:

- Glede dijela *"oni smatraju kako je moguće da gravitacijski valovi uopće ne prenose energiju"*, u nastavku ćemo pokazati da gravitacijski valovi ne prenose nikakvu gravitacijsku energiju, a da je pitanje kakvu energiju oni prenose složenije; situacija nije nalik onoj kod elektromagnetske energije, za razliku od onoga što je Feynman tvrdio u gornjem citatu.
- Glede dijela *"Budući da očigledno možemo pokazati da gravitacijski valovi mogu zaista zagrijati zid, uopće nema pitanja o njihovom energijskom sadržaju"*, u nastavku ćemo pokazati da kada gravitacijski valovi pogode zid, ono što zagrijava zid je upravo ono što ga zagrijava i kada ga udari lopta – inercijska energija (rad obavljen od strane inercijskih sila kojima se lopta opire usporavanju.)
- Glede dijela *"Situacija je sasvim analogna onoj u elektrodinamici"*, treba nažalost reći kako je to u potpunosti neistinito. U elektrodinamici postoji elektrodinamička energija – koja predstavlja energiju fizikalnog polja i rada izvršenog od strane elektromagnetskih sila – dok u općoj teoriji relativnosti ne postoji fizikalno polje (zakrivljenost prostor-vremena nije fizikalno polje), kao što ne postoji ni rad izvršen od strane gravitacijskih sila (budući da ne postoji nešto takvo kao što je gravitacijska sila, ni u općoj teoriji relativnosti, a ni u Prirodi)
- Glede dijela *"u kvantnoj interpretaciji svaki izračeni graviton prenosi količinu energije $h\omega$ "*, rečeno ne predstavlja argument za postojanje gravitacijske energije – budući da je graviton bio, jest i prilično će sigurno i ostati teorijski entitet koji ne predstavlja ništa što postoji u fizikalnom svijetu (budući da izgleda kako gravitacija nije fizikalna interakcija koja može biti kvantizirana).

Feynmanov dokaz¹⁵ da gravitacijski valovi prenose gravitacijsku energiju predstavljen je na Chapel Hill konferenciji, te sadržan u pismu Weisskopf u koje je datirano u veljaču 1961. Ovdje donosimo relevantan dio iz Predgovora knjizi *Feynman Lectures on Physics*, napisan od strane Preskilla i Thornea [9]:

U Chapel Hillu Feynman je pristupio tom pitanju na pragmatičan način, opisujući kako bi u principu mogla biti dizajnirana antena gravitacijskih valova, a koja bi apsorbirala energiju "prenošenu" od strane valova. Nakon toga, njegov tekst opisuje Feynmanov gravitacijski detektor. Radi se naprosto o dvije kuglice koje slobodno klize duž čvrstog štapa (uz malenu količinu trenja). Dok

¹⁵ Čini se kako se ovdje ipak radi o kolektivnom dokazu, vidi [9]

val prolazi preko štapa, atomske sile drže dužinu štapa nepromjenjivom, no svojstvena udaljenost između dviju kuglica oscilira. Na taj način, kuglice se taru uz štap, oslobađajući toplinu.

Oprezno ispitivanje tog argumenta pokazuje kako je inercijska, a ne gravitacijska, energija pretvorena u toplinu. Kada *gravitacijski val mijenja oblik geodetskih svjetskih linija kuglica* (kao i štapa), kuglice, koje se i dalje gibaju po geodezicima, slijede svoje nove promijenjene geodetske linije, no štap ih u tome onemogućava – odnosno, štap onemogućava kuglicama da se gibaju po inerciji. Kao posljedica navedenoga, kuglice se odupiru te djeluju inercijskim silama na štap; *upravo je rad izvršen od strane ovih sila inercije, tj. inercijska energija kuglica, pretvoren u toplinu*. Situacija opisana od strane Feynmana je upravo nalik na situaciju u kojoj je čestica, koja je udaljena od gravitirajućih masa, spriječena u gibanju od strane inercije. Ona tada djeluje silom inercije na prepreku i upravo je rad izvršen od strane sila inercije – tj. inercijska energija čestice¹⁶ – ono što je pretvoreno u toplinu koja se oslobađa na prepreci¹⁷. U skladu s time, energija koja je pretvorena u toplinu kada se kuglice *"taru uz štap"* je inercijska energija *pohranjena u kuglicama*, a koja se manifestira kroz rad izvršen od strane inercijskih sila kojima kuglice djeluju na štap koji ih onemogućava da se gibaju po inerciji. Jednostavno je doći u iskušenje da se kaže kako gravitacijski valovi prenose *gravitacijsku* energiju zbog promjene geometrije prostor-vremena. No takvom iskušenju se treba oduprijeti, ne samo zato što pojam gravitacijske energije zapravo nema smisla – budući da u općoj teoriji relativnosti gravitacija nije sila, pa u skladu s time niti ne može biti definiran rad koji bi ta nepostojeća sila vršila – već je gravitacija naprosto učinak slobodnog gibanja tijela u izostanku svake sile po prostor-vremenu koje je zakrivljeno – već i stoga, ne manje bitno, što bi najprije trebalo postaviti pitanje: "koji bi bio izvor gravitacijske energije prenošene od strane gravitacijskih valova?".

Kako bismo odgovorili na to pitanje, pogledajmo još jednom ispravnu formulaciju službenog priopćenja za medije LIGO GW170104:

Kao što je bio slučaj i kod prvih dviju detekcija, valovi su proizvedeni kada su se dvije crne rupe sudarile i formirale veću crnu rupu.

Mislim da je i više nego jasno da nikakva gravitacijska energija nije prisutna

¹⁶ Ta energija se tradicionalno nazivala i kinetičkom energijom, no držim da ju je, zbog njezine prirode, bolje nazivati inercijskom energijom. Mislim da to očito nije samo pitanje semantike, budući da taj naziv pokazuje pravu fizikalnu prirodu kinetičke energije – to je rad izvršen od strane inercijskih sila.

¹⁷ U slučaju gore citirane Feynmanove izjave da *"gravitacijski val zaista može zagrijati zid"*, radi se o tome da su oblici svjetskih linija čestica koje čine zid promijenjene od strane gravitacijskog vala, no pritom sile – koje ih drže zajedno kao zid – deformiraju geodetske svjetske linije. Tako nastale inercijske sile opiru se toj deformaciji – i njihov rad je ono što se oslobađa kao toplina u zidu.

u sudaru dvaju kompaktnih tijela. Energija oslobođena u sudaru je *inercijska energija*: spiralno urušavajuća tijela se gibaju po inerciji (njihove su linije geodezici), a kada se sudare, međusobno se onemogućavaju u tome da se gibaju po inerciji. Svako tijelo se odupire *svojoj apsolutnoj akceleraciji* (odnosno opire se deformaciji svoje svjetske linije) putem inercijske sile koja se pojavljuje te kojom djeluje na drugo tijelo. Rad koji je izvršen od strane dviju inercijskih sila predstavlja inercijsku energiju uključenu u taj sudar.

Budući da je jedino inercijska energija uključena u sudar kompaktnih tijela dvojnog sustava, koji je spomenut u objavi za medije LIGO kolaboracije, upravo je ta energija odgovorna za stvaranje i propagaciju zakrivljenosti prostor-vremena koje imaju oblik vala (gravitacijskih valova), a koje mijenjaju oblik svih geodetskih svjetskih linija u regiji prostor-vremena u kojoj dolazi do propagacije.

Nadam se da je jasno kako sva priča o stvaranju i propagaciji prostorno-vremenske zakrivljenosti – ako se pretpostavlja da je val stvarno stvoren i da putuje po nekom svijetu van sebe – proizlazi iz zastarjelog trodimenzionalnog razmišljanja. Ne postoji nešto takvo kao što je propagirajući val u prostor-vremenu, odnosno nema propagiranja zakrivljenosti u prostor-vremenu. Zakrivljenost prostor-vremena i dodatna zakrivljenost u formi vala dane su nerazdvojno u jedinstvenom prostor-vremenu, u kojemu se ništa ne propagira i ništa ne zbiva. Geometrija prostor-vremena u formi vala se interpretira u trodimenzionalnom jeziku kao val koji se širi u prostoru (upravo kao što se i vremenolika svjetska linija interpretira u trodimenzionalnom jeziku kao čestica koja se giba u prostoru). Također, imajmo na umu da ne postoji nešto takvo kao što bi bio prostor u vanjskom svijetu, budući da se jedinstveno prostor-vrijeme ne može naprosto razdvojiti na prostor i vrijeme.

Na temelju rečenoga možemo konačno postaviti zaključak ovoga rada. Nadvladavajući dvije pogreške koje su uključene u koncept gravitacijskih valova, možemo ustvrditi da:

- Gravitacijski valovi nisu emitirani od strane dvojnog sustava čiji su članovi modelirani kao točkaste mase, sve dok članovi kruže jedan oko drugoga prije sudara – budući da su njihove svjetske linije geodezici, što znači da se gibaju po inerciji bez ikakvog gubitka energije. Gravitacijski valovi su emitirani samo od strane tijela koja apsolutno akceleriraju. Drugim riječima, izvor gravitacijskih valova je deformacija svjetske linije apsolutno akcelerirajućeg tijela. U skladu s time, gravitacijski valovi su emitirani kada se članovi dvojnog sustava sudare, budući da su tokom sudara svjetske linije dijelova kompaktnih tijela *deformirane*. Spiralno urušavajući kompaktni objekti

(shvaćeni kao tijela koja ispunjavaju prostor) zrače slabe gravitacijske valove prije sudara, a koji su uzrokovani plimnim efektima u samim tijelima. Zbog zakrivljenosti prostor-vremena, svjetske linije kompaktnih objekata nisu "paralelne" (tj. nisu kongruentne), dok, nasuprot tome, sile koje drže dijelove tijela zajedno teže održati svjetske linije "paralelnima". Kao rezultat navedenoga, svjetske linije se deformiraju, što dovodi do gravitacijskih valova.

- Gravitacijski valovi ne prenose gravitacijsku energiju budući da:
 - takav tip energije ne postoji u općoj teoriji relativnosti (ne postoji pravi tenzorski izraz za nju, ne postoji fizikalno gravitacijsko polje koje posjeduje gravitacijsku energiju, kao što ne postoje ni gravitacijske sile koje bi stvarale rad)
 - energija koja je pretvorena u toplinu, koja se stvara kada su kuglice Feynmanovog gravitacijskog detektora zapriječene u gibanju putem inercije, predstavlja inercijsku energiju (energiju koja je ostvarena putem inercijskih sila koje kuglice prenose na štap)
 - sudar dvaju kompaktnih članova dvojnog sustava, koji je bio uzrokom gravitacijskih valova koje je detektirao LIGO, podrazumijeva samo inercijsku energiju. Dakle, upravo je ta energija odgovorna za stvaranje i propagaciju prostorno-vremenskih zakrivljenosti koje imaju oblik vala (gravitacijskih valova), a koje mijenjaju oblik svih geodetskih svjetskih linija (pritom ih i dalje ostavljajući geodezicima) u regiji prostor-vremena gdje se pojavljuje prostorno-vremenska zakrivljenost u obliku vala.

Literatura

- [1] B. P. Abbott, LIGO Scientific Collaboration i Virgo Collaboration. „Observation of gravitational waves from a binary black hole merger”. *Phys. Rev. Lett.* 116 (2016.), str. 061102.
- [2] V. Petkov. *Seven Fundamental Concepts in Spacetime Physics*. Springer, 2021.
- [3] R.C. Hilborn. „Gravitational waves from orbiting binaries without general relativity”. *Am. J. Phys.* 86 (2018.), str. 186.
- [4] R.A. Hulse i J.H. Taylor. „Discovery of a pulsar in a binary system”. *Astrophys. J.* 195 (1975.), str. L51–L53.

- [5] J.H. Taylor i J.M. Weisberg. „Further experimental tests of relativistic gravity using the binary pulsar PSR 1913+16”. *Astrophys. J.* 345 (1989.), str. 434–450.
- [6] Einstein. „Näherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation”. *Sitzungsber. K.Preuss. Akad. Wiss.* 1 (1916.), str. 688.
- [7] T. Dietrich, T. Hinderer i A. Samajdar. „Interpreting binary neutron star mergers: describing the binary neutron star dynamics, modelling gravitational waveforms, and analyzing detections”. *Gen. Relativ. Gravit.* 53 (2021.), str. 27.
- [8] R. Saulson. „Josh Goldberg and the physical reality of gravitational waves”. *Gen. Relativ. Gravit.* 43 (2011.), str. 3289.
- [9] J. Preskill i K.S. Thorne. „Foreword to Feynman Lectures on Gravitation”. *Feynman Lectures on Gravitation*. CRC Press, Boca Raton, 2018., str. xxvi.
- [10] R. Feynman. *Feynman Lectures on Gravitation*. CRC Press, Boca Raton, 2018.