

# Гравитациони таласи – од теорије до директне детекције

Бојан Николић

*Институт за физику, Универзитет у Београду, Прегревица 118, 11080 Земун*

**Апстракт.** Пре једног века Алберт Ајнштајн формулисао је Општу теорију релативности (ОТР). Једна од последица Опште теорије релативности је постојање гравитационих таласа. У овом раду ћемо дати кратак теоријски преглед о (гравитационим) таласима, а значајну пажњу ћемо посветити свим сада могућим видовима детекције гравитационих таласа са акцентом на недавни успех – директну детекцију гравитационих таласа.

**Кључне речи:** гравитациони таласи, ОТР, директна детекција.

## УВОД

Камен бачен у воду изазива појаву таласа на њеној површини, треперење гласних жица омогућава да чујемо саговорника, земљотреси изазивају појаву цунами таласа итд. Све наведено су примери *механичких* таласа. За простирање механичких таласа је потребна материјална средина. Поремећај настао на једном месту преноси се таласом кроз материјалну средину. Самим тим механички таласи се не простиру кроз вакуум. Положај честице средине у датом тренутку  $t$  у тачки  $\vec{r}$  (колоквијално "поремећај")  $u(\vec{r}, t)$  задовољава хомогену таласну једначину

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2}\right) u(\vec{r}, t) = 0. \quad (1)$$

Величина  $v$  представља брзину таласа у датој материјалној средини (није једнака брзини честице материјалне средине). Поремећај може бити ортогоналан на правац простирања таласа (трансверзални талас) или колинеаран са правцем простирања таласа (лонгитудиналан талас).

У другој половини 19. века енглески физичар Џејмс Кларк Мексвел је, обједињавајући дотадашња експериментална сазнања, написао једначине електромагнетног поља познате у литератури као Мексвелове једначине. Једноставна анализа тих једначина показује да у простору где нема наелектрисања и струја јачина електричног поља и јачина магнетног поља задовољавају хомогене таласне једначине. Простије речено, око простора у коме су задате расподеле наелектрисања и струја постоји електромагнетно (ЕМ) поље. Енергија ЕМ поља се преноси дуж правца који је ортогоналан на векторе јачине електричног и магнетног поља - ЕМ талас је трансверзалан. За разлику од механичких таласа, ЕМ таласи се простиру и кроз вакуум и то највећом брзином у природи  $c = 3 \cdot 10^8$  m/s. Херцовим експериментом (1888) потврђено је постојање ЕМ таласа. Питање које су поставили научници тога времена тичало се средине кроз коју се ЕМ талас простира. По

аналогiji са механичким таласима морала је постојати нека средина која преноси таласе. Тада је уведен појам **етера**. Међутим, Мајкелсон-Морлијев експеримент као и многа унапређења овог експеримента потврдили су да је брзина светлости иста у свим правцима и да не зависи од избора референтног система - једноставније речено, етера, у облику како су га тада научници замишљали, нема. И тада (1905) се родила специјална теорија релативности (СТР).

СТР почива на два постулата. Први се тиче инваријантности облика физичких закона у односу на избор инерцијалног система референце (то је већ био саставни део Галилејевог принципа релативности), док се другим постулатом потврђује експериментална чињеница да је брзина светлости независна од избора инерцијалног система референце (Ајнштајн не спомиње експлицитно у својим радовима нити Мајкелсон-Морлијев експеримент нити друге сличне експерименте, али други постулат „признаје“ резултат тих експеримената).

У СТР се спомињу само инерцијални системи референце. Сам Ајнштајн није био задовољан и сматрао је да физички закони морају имати исти облик независно од избора референтног система, инерцијалног или неинерцијалног, тј. увидео је да у "причу" мора да укључи и гравитацију. Математичким језиком речено, какву год трансформацију координата да направимо закони физике морају очувати свој облик (строго математички речено инваријантност на дифеоморфизме [1,2]). И тако је дошао до Опште теорије релативности (ОТР).

Шта је уопште гравитација? По Њутновој теорији гравитација је **сила**. У Њутновој теорији гравитације **маса је извор гравитационог поља**. Свако друго тело одређене масе које се нађе у датом гравитационом пољу је изложено деловању привлачне силе. Њутн је дао аналитички облик за гравитациону интеракцију свом делу Математички принципи природне филозофије (*Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*) које је први пут објављено 5. јула 1687. године.

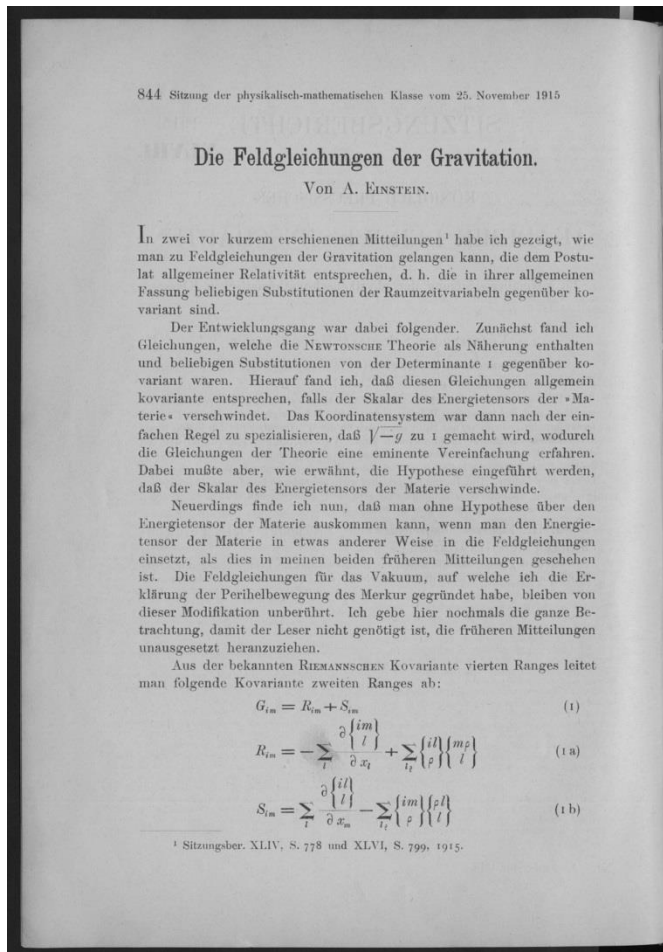
И по том питању није било никаквих квалитативних помака до почетка 20. века. А онда се појавио Алберт Ајнштајн, који је кроз СТР увео у физику обједињеност простора и времена у један просторно-временски континуум тј. време више није параметар већ координата, а са ОТР направио праву револуцију у разумевању гравитације као фундаменталне интеракције у природи.

Овде нећемо улазити у суптилне детаље извођења Ајнштајнових једначина за гравитационо поље. Ајнштајн је једначине извео користећи се законом одржања тензора енергије-импулса као и особинама неких геометријских величина. У савременој литератури извођење иде из одговарајућег дејства применом методе минимума дејства. Било како било, једначине за гравитационо поље су облика

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

где је, најгрубље речено, на левој страни ГЕОМЕТРИЈА, а на десној страни МАТЕРИЈА. Ова једначина успоставља везу између геометрије простор-времена и материје која својим присуством "закривљује" тај простор-време. У Ајнштајновој слици гравитација није сила већ **геометрија простор-времена**.

Наравно, добра физичка теорија има особину да објашњава познате феномене и предвиђа неке нове. У оквиру Ајнштајнове теорије успешно је објашњена појава скретања светлосних зрака који пролазе близу Сунца, затим прецесија Меркуровог перихела. Теорија предвиђа постојање сингуларитета (основ за теорију Великог праска) као и црних рупа, за чије постојање постоје индиректни докази. Такође једна од последица ОТР је и постојање *гравитационих таласа*.



СЛИКА 1. Ајнштајнов рад објављен 25.11.1915. године у којем је заснована ОТР и изведена чувена једначина.

## ГРАВИТАЦИОНИ ТАЛАСИ

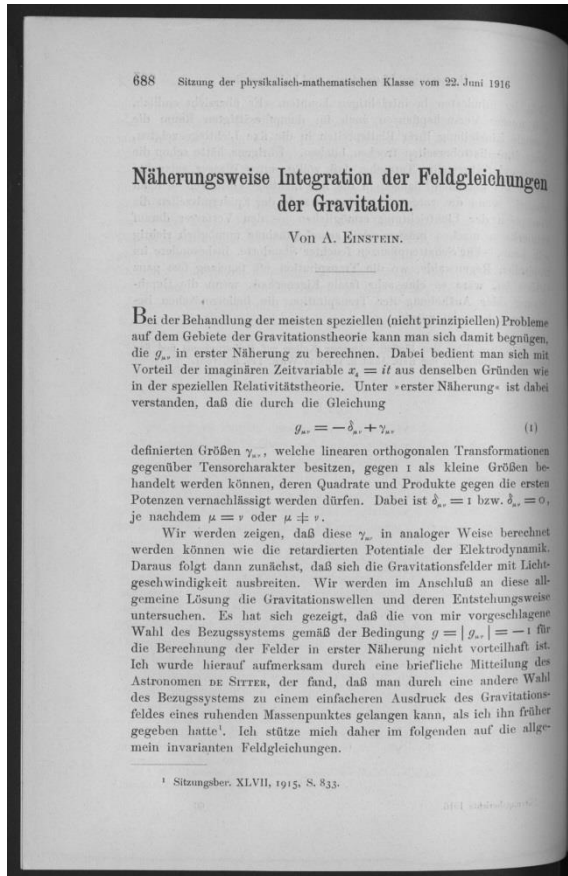
### ОТР дозвољава гравитационе таласе

Математички доказ постојања гравитационих таласа у ОТР је врло једноставан. Уколико посматрамо Ајнштајнове једначине у празном простору далеко од маса, онда се испоставља да метрика простора задовољава таласну једначину. Добија се да су гравитациони таласи трансверзални таласи који се простиру брзином светлости у вакуму. У случају механичких таласа материјална средина се таласа, док у случају ЕМ таласа долази до таласања електричног и магнетног поља. Логично питање које се намеће код гравитационих таласа је шта се то таласа?

Формалан одговор је врло прост – таласа се метрика просторно-временског континуума. С обзиром да је по ОТР гравитација у ствари геометрија простор-времена онда је мало „физичкији“ одговор – таласа се сам просторно-временски континуум. А како се манифестује таласање простор-времена? Посматрајмо растојање између две инфинитезимално блиске тачке

$$ds^2 = \sum_{\mu, \nu=0}^3 g_{\mu\nu}(x) dx^\mu dx^\nu. \quad (3)$$

Уколико интегралимо квадратни корен десне стране једначине добићемо растојање између две тачке у закривљеном простору. Очигледно је да ако се метрика таласа онда се и растојање између тачака таласа. Видећемо касније да су све методе директне детекције гравитационих таласа засноване на таласању растојања тј. дужине.



СЛИКА 2. Приближно решавање једначина гравитационог поља – математички доказ постојања гравитационих таласа (Ајнштајн, 22.06.1916. година).

## ДЕТЕКЦИЈА ГРАВИТАЦИОНИХ ТАЛАСА

Пре него што пређемо на разматрање свих видова директне детекције као и анализе недавног директног мерења гравитационих таласа, потребно је рећи да је постојање гравитационих таласа индиректно потврђено 1993. године.

Године 1974. Расел Алан Халс и руководилац његове докторске тезе Џозеф Хутон Тејлор Јуниор су открили један бинарни пулсар који се састоји од пулсара (неутронске звезде) и пратеће звезде. Овај бинарни пулсар губи енергију на начин како и предвиђа ОТР па самим тим ово откриће је истовремено индиректни доказ постојања гравитационих таласа. За ово откриће Расел и Халс су добили Нобелову награду за физику 1993. године.

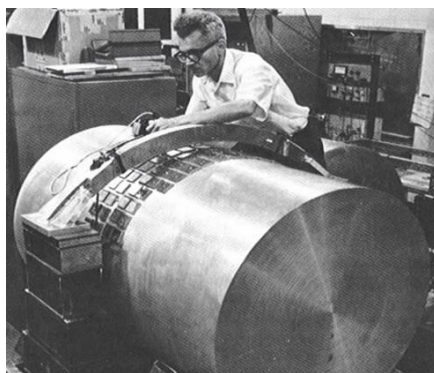
Детектори који се користе за директну детекцију гравитационих таласа деле се у три групе: механички, интерферометарски и високофреквентни детектори.

### Механички детектори

#### Веберове шипке

Једноставан уређај за детекцију очекиваног таласног кретања је тзв. Веберова шипка - велика, чврста метална шипка изолована од спољашњих вибрација. Овај тип детектора је био први који је коришћен од стране конструктора Џозефа Вебера са Универзитета Мериленд. Он је чак тврдио да је детектовао гравитационе таласе, али су његови резултати доведени у сумњу због начина обраде података. Испоставило се на крају да је Веберова детекција гравитационих таласа фингирана због потреба финансирања пројекта.

Принцип рада овог детектора је једноставан. Упадни гравитациони талас побуђује резонантно осциловање шипке, а шипка онда својим осциловањем појачава тај ефекат на детектабилни ниво. Савремене варијанте оваквих детектора су охлађене до екстремно ниских температура и опремљене квантним интерференционим уређајима за детекцију вибрација (на пример, ALLEGRO). Проблем са овим детекторима што се они могу користити само за врло јаке гравитационе таласе.



СЛИКА 3. Џозеф Вебер у својој лабораторији 1965. године

### MiniGRAIL

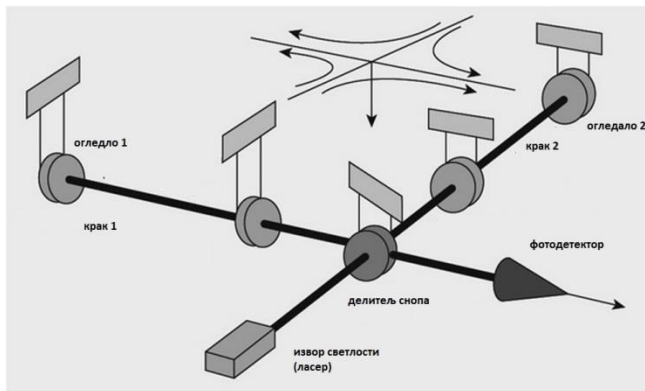
MiniGRAIL је антена за детекцију гравитационих таласа сферног облика. Ова антена се налази на Универзитету у Лајдену (Холандија), а састоји се од сфере масе 1150 килограма охлађене на температуру 20 мК. Облик сфере омогућава детекцију из свих праваца. Фреквенције које овај детектор најбоље "хвата" су интервалу 2-4 kHz, па је погодан за детекцију гравитационих таласа који настају у бинарним пулсарима и спајањем мањих црних рупа. Сличног типа је ултрахладни детектор AURIGA који се налази на INFN-у у Италији. Он се састоји од алуминијумског цилиндра дужине 3 метра који је охлађен на температуру реда величине мК.



СЛИКА 4. Детектор MiniGRAIL

### Интерферометарски детектори

Ова група детектора користи ласерску интерферометрију за детекцију гравитационих таласа. Светлост крећући се кроз простор прати закривљење просторно-временског континуума. Принцип рада ових детектора је да се измери ефекат интерференције ласерских зрака при чему је путна разлика настала "скраћивањем" или "издуживањем" простора због таласања.



СЛИКА 5. Принцип рада интерферометарског детектора

Данас постоје само интерферометри на Земљи. Тренутно најосетљивији интерферометарски детектор је LIGO (Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory). LIGO има три детектора: један је у Ливингстону (држава Луизијана) а друга два су у Хенфорду (држава Вашингтон). Сви они се састоје од по два велика крака дужине 2-4 километра који су под правим углом. Ласерски зраци путују унутар кракова у цевима дијаметра 1 метар. Промене у дужини које ласерски зрак прелази услед проласка гравитационог таласа би у принципу требало да региструје детектор у виду неке (ласерске) интерференционе слике.

Интерферометарски детектори имају и своја ограничења. Прва од њих је шум који настаје као последица тога што ласерски извор производи фотоне у произвољним тренуцима. Ако уз то користимо и мало јачи ласер онда сами фотони својим импулсом могу да уздрмају детекторска огледала. Други проблем је проблем Брауновог кретања, а ни сеизмички шум се не може занемарити.

Због проблема које имају земаљски детектори, планира се и градња детектора у орбити око Земље (eLISA, пројекат започет децембра 2015. године). Три сателита би формирала троугао при чему би свака страница била око 5 милиона километара. Тиме се добија добар вакуум, али и даље остаје проблем фотонског шума као и проблем са космичким зрачењем.

### Високофреквентни детектори

Тренутно постоје два оперативна детектора који раде на горњој граници спектра ( $10^{-7}$ - $10^5$  Hz). Један је на Универзитету у Бирмингему (Енглеска) а други је на INFN-у у Ђенови (Италија). Трећи се гради на Универзитету у Чонкингу (Кина). Детектор у Бирмингему мери промене у стању поларизације микроталасног зрака који кружи по кругу пречника око 1 метра. Детектор у Ђенови је резонантна антена која се састоји од два спрегнута сферна суперпроводна хармонијска осцилатора пречника неколико центиметара. Осцилатори када нису спрегнути имају резонантне фреквенције које су скоро једнаке. Кинески детектор би требало да буде у стању да детектује таласе фреквенције реда 10 GHz.

### ДИРЕКТНА ДЕТЕКЦИЈА ГРВИТАЦИОНИХ ТАЛАСА

Група научника из две велике колаборације, LIGO и VIRGO, је објавила 11. фебруара 2016. године [3] да је обављена успешна директна детекција гравитационих таласа. Физички све се одиграло на америчком делу велике колаборације (LIGO).

Дана 14. септембра 2015. године детектори ове колаборације у Хенфорду (Вашингтон) и Ливингстону (Лујзијана) детектовали су гравитациони талас који је настао спајањем две црне рупе, једна масе 36 соларних маса а друга 29 соларних маса. Настала је црна рупа масе 62 соларне масе а 3 соларне масе су израчене у виду гравитационих таласа. Овакав резултат као и профили детектованих сигнала су (у границама грешке) у складу са предвиђањима ОТО. Овај експеримент је потврдио *постојање бинарних система црних рупа, омогућио директну детекцију гравитационих таласа и први детектовао спајање црних рупа.*



### 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  $1.0 \times 10^{-21}$ . 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  $5.1\sigma$ . The source lies at a luminosity distance of  $410^{+100}_{-100}$  Mpc corresponding to a redshift  $z = 0.09^{+0.03}_{-0.04}$ . In the source frame, the initial black hole masses are  $36^{+4}_{-4} M_{\odot}$  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.

DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.061102

**СЛИКА 6.** Апстракт рада [3] у коме је објављена директна детекција гравитационих таласа

Апаратура на којој је извршена детекција је унапређена верзија почетног LIGO детектора (AdvancedLIGO). Побољшања која су урађена првенствено се тичу повећања осетљивости сензора као и умањењу постојећих шумава.

Очекује се да детектори Advanced VIRGO, KAGRA као и могући трећи LIGO детектор у Индији дају додатну потврду овом открићу као и да подигну ниво прецизности и тачности мерења.

## ЗАКЉУЧАК

ОТР је у времену када је настала (Први светски рат у пуном јеку!) успела да објасни неке феномене који су били познати научницима попут скретања светлосних зрака у близини великих звезда и прецесију Меркуровог перихела. Свака "права" физичка теорија не објашњава само постојеће и познате феномене већ предвиђа и неке нове. Гравитациони таласи су један од тих феномена. Постојање гравитационих таласа теоријски је поткрепљено Општом теоријом релативности јер следи из Ајнштајнових једначина гравитационог поља. Откриће бинарних пулсара (систем две неутронске звезде), који губе енергију потпуно у складу са предвиђањима ОТР, дало је експериментални основ постојању гравитационих таласа. Са изградњом интерферометарских детектора кренуло се у коначну потрагу за гравитационим таласима. Принципијелно није било препрека и све је било питање прецизности апаратуре. Коначно су у јесен 2015. године научници успели да детектују гравитационе таласе који су настали у једном врло интензивном догађају – судару црних рупа. Ово откриће даје наду да се могу детектовати гравитациони таласи настали после Великог праска што би у „неку руку“ био доказ да се тај Прасак стварно и десио.

## ЛИТЕРАТУРА

1. С. М. Misner, К. S. Thorne, J. A. Wheeler, *Gravitation*, W. H. Freeman and Co., San Francisco, 1973.
2. L. D. Landau, E. M. Lifshitz, *The Classical Theory of Fields*, Pergamon Press, 1971.



3. B. P. Abbott et al., *Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger*, Phys. Rev. Lett. **116** 061102 (2016).

## Gravitational waves – from theory to direct detection

Bojan Nikolic

*Institute of Physics, University of Belgrade, Pregrevica 118, Zemun*

**Abstract.** A century ago Albert Einstein formulated General Theory of Relativity (GR). The existence of gravitational waves is one of the consequences of the GR. In this article we will give a short theoretical review about (gravitational) waves, and later we will dedicate the great attention to all known types of detection of the gravitational waves with accent on recent success – direct detection of gravitational waves.

**Key words:** gravitational waves, GR, direct detection.