

ГРАВИТАЦИОНИТЕ БРАНОВИ КАКО ПОТВРДА НА ОПШТАТА ТЕОРИЈА НА РЕЛАТИВНОСТ

*Љупчо Петров*¹

Општата теорија на релативност е општо прифатената теорија за гравитација во модерната физика. Развиена во 1915 година од Алберт Ајнштајн, таа во себе ги вклучува Ајнштајновите равенки на поле. Извонредното во тие равенки е тоа што со одредени претпоставки, овие равенки се сведуваат на брановата равенка, односно се предвидува постоење на бранувања на простор-времето кои се простираат како бранови. Меѓутоа, и покрај големиот развој на астрофизиката од средината на XX век па наваму, поради малите амлитуди гравитационите бранови не беа детектирани сè до минатата година. Ова претставуваше уште еден доказ на Ајнштајновата теорија, но новите истражувања со гравитационите бранови може да ни дадат и огромен број информации: методи за истражувања на пулсари, црни дупки во центрите на галаксиите, Големата експлозија, како и изненадувачки појави кај мистериозните деведесет и шест проценти од материјата во универзумот.

1. ТЕОРИИ НА ГРАВИТАЦИЈА

Гравитационото заемдејство е едно од четирите фундаментални заемдејства во физиката и едно од најчудните. И покрај тоа што гравитационата сила е најстарата сила позната на човештвото, изгледа дека е најмалку разбрана ([5]). Таа не зависи од карактеристиките на честичките како полнеж и е привлечна сила со долг дomet. Уште од антиката луѓето се прашувале за природата на гравитацијата, а според Аристотел, гравитацијата претставувала склоност на телата да се движат кон нивните „природни места“. На пример, водата е полесна (односно помалку густа) од Земјата и затоа таа формира концентрична лушпа околу неа ([3]).

Најбитната теорија за гравитација со која сите сме се сретнале е Њутоновата. Но, со непредвидувањето на абнормалната орбита на планетата Меркур се предпочиле нејзините недостатоци ([2]). Покрај тоа, според Њутон, гравитационото заемдејство се пренесувало со бесконечна брзина. Овие два недостатоци биле разрешени во рамките на општата теорија на релативност.

Општата теорија на релативност е создадена од 1907 до 1915 година од Ајнштајн, а подоцна е дополнета од трудовите на други научници. Според неа, гравитацијата се заснова на идејата за простор-време претставено како четиридимензионално закривено многуобразие, односно простор со одредена метрика. Преку мерењата на растојанијата, стационарни набљудувачи доаѓаат до заклучок дека живеат на закривена површина. Овој исказ често се скратува и се вели дека гравитацијата го закривува простор-времето. Не само што е концептуално многу „убава“, туку таа опстоила на сите тестови со голем степен на прецизност.

2. АЈНШТАЈНОВИТЕ РАВЕНКИ НА ПОЛЕ

За комплетирање на теоријата се постулирани законите, односно равенките кои покажуваат како изворите на гравитационото поле ја определуваат метриката. Тие се задаваат преку равенките на поле на Ајнштајн. Така, изворот на гравитационо поле во Њутоновата теорија претставува густината (онаа густина на маса што ни е позната на сите). Во новата теорија, наместо густината на маса, се зема тензорот на напрегање-енергија со компоненти $T_{\alpha\beta}$ како извор на гравитационото поле. Ова се прави со цел да се испочитува принципот на еквиваленција – не може да си дозволиме во нашата формулација да постои префериран координатен систем.

Во компонентна нотација, Ајнштајновите равенки го добиваат обликот:

$$G_{\alpha\beta} = 8\pi T_{\alpha\beta},$$

каде што $G_{\alpha\beta} = R_{\alpha\beta} - \frac{1}{2} g_{\alpha\beta} R$ се компонентите на Ајнштајновиот тензор, кој во себе го вклучува метричкиот тензор. Со помош на метриката $g_{\alpha\beta}$ знаеме како да бараме растојанија помеѓу два ната, па затоа и таа игра клучна улога во теоријата. Римановиот тензор ни дава карактеризација на закривеноста, а Ричиевиот тензор $R_{\alpha\beta}$ и Ричиевиот скалар R претставуваат контракции на Римановиот тензор. И двата тензора – Ајнштајновиот тензор и тензорот на напрегање-енергија се симетрични, така што горниот израз задава 10 независно равенки за $g_{\alpha\beta}$ ([2]). Меѓутоа, поради тоа што има четири координати, постојат четири степени на слобода

Гравитационите бранови...

помеѓу десетте $g_{\alpha\beta}$. Ова ни дава за заклучок дека Ајнштајновите равенки се всушност шест независни диференцијални равенки за шесте функции помеѓу десетте $g_{\alpha\beta}$ кои ја карактеризираат геометријата независно од координатниот систем.

Како што и обично се постапува, равенките ги запишуваме во таканаречениот геометризиран систем на единици земајќи брзината на светлината во вакуум c и гравитационата константа G да имаат вредност единица.

3. АЈНШТАЈНОВИТЕ РАВЕНКИ НА ПОЛЕ ЗА СЛАБИ ГРАВИТАЦИОНИ ПОЛИЊА

Решавањето на Ајнштајновите равенки во нивната точна форма е многу тешка работа. Затоа, со цел да дојдеме до некои интересни физички предвидувања, ќе направиме некои поедноставувања. Бидејќи отсуството на гравитација го остава простор-времето рамно, слабо гравитационо поле ќе биде она простор-време кое е „речиси“ рамно. Ова го дефинираме како многуобразие на кое постојат координати во кои што метриката има компоненти

$$g_{\alpha\beta} = \eta_{\alpha\beta} + h_{\alpha\beta}.$$

Овде, $\eta_{\alpha\beta}$ е дијагоналната метрика на рамниот простор, наречен простор на Минковски, којашто ја има следната форма: $(-1, 1, 1, 1)$, додека $h_{\alpha\beta}$ е мала пертурбација. Со помош на овие, но и на некои други трансформации, ги добиваме Ајнштајновите равенки за слаби полиња:

$$\left[\left(-\frac{\partial^2}{\partial t^2} + \nabla^2 \right) \bar{h}_{\alpha\beta} = 0. \right]$$

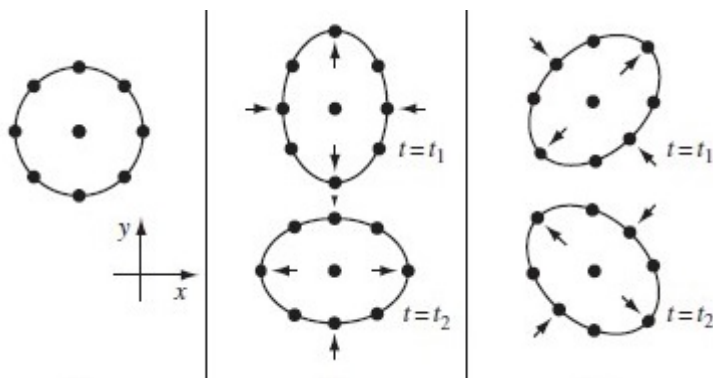
Ова се таканаречените равенки на поле на „линеаризираната теорија“ ([4]) поради тоа што се изведени задржувајќи ги членовите кои се само линеарни по $h_{\alpha\beta}$. Тензорот кој се јавува во последнава равенка се добива од тензорот на пертурбација со помош на следната трансформација

$$\bar{h}_{\alpha\beta} = h_{\alpha\beta} - \frac{1}{2} \eta_{\alpha\beta} \eta^{\mu\nu} h_{\mu\nu},$$

каде што $\eta^{\alpha\beta}$ се компонентите на инверзниот тензор на тензорот на метриката на Минковски.

4. ГРАВИТАЦИОНО ЗРАЧЕЊЕ

Сега доаѓаме до делот од трудот што е најинтересен за нас, а тоа е анализата на горните равенки. Забележуваме дека тие важат за област од простор-времето каде што гравитационото поле е слабо, но не е стационарно, и тоа, се запишани за областа надвор од изворот ($T_{\alpha\beta} = 0$). Оваа ситуација се јавува далеку од изворот кој бил причинител на некои брзи промени кои се случиле одамна во времето. Но, оваа равенка ја препознаваме дека е брановата равенка која се сретнува насекаде во физиката и чие решение е рамен бран. Впрочем се добива дека ако имаме две честички, ефектот на ваков бран би бил промена на сопственото растојание помеѓу нив со текот на времето (на Сликата 1 се прикажани две различни видови на гравитациони бранувања кои доаѓаат одоздола и дејствуваат на честички поставени во вид на прстен).

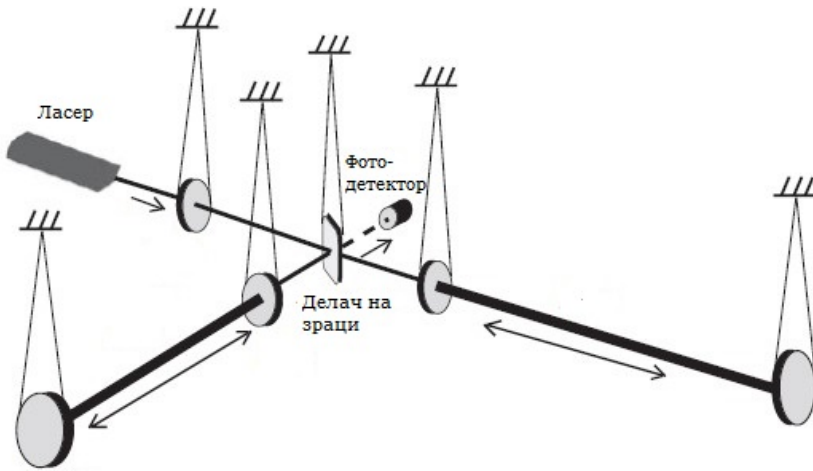


Слика 1. На честички распоредени во форма на прстен се упадни гравитациони бранови во правец на z -оската со две различни поларизации: $+$ и \times -поларизации.

Дополнително, гравитационите бранови ќе создадат поголема промена во растојанието доколку почетната оддалеченост помеѓу честичките или телата била поголема. Ова е причината поради која модерните детектори на гравитациони бранови се градат во големи размери со димензии од редот на неколку километри. Од друга страна, се заклучува дека ефектот којшто треба да се измери е релативна промена на растојанието од еден дел во отприлика 10^{-21} .

5. ОТКРИВАЊЕ НА ГРАВИТАЦИОНИ БРАНОВИ

Во праксата, еден од најважните методи за мерење на ширењето и собирањето на просторот се состои во испраќање на фотони (лазерски зраци) помеѓу слободни честички и определување на промените во времето на патување на светлината низ двата крака на инструментот. Ова е всушност и принципот на работа на лазерскиот интерферометар како детектор на гравитациони бранови (Слика 2). Светлината од лазерот се дели со помош на делачот на зраци, па двата зрака кои што продолжуваат по должината на двата крака ќе бидат во чекор еден со друг – ако едниот отпочне со максимум, тогаш и другиот отпочнува со максималната вредност. Ако за времето на патување на зраците низ соодветните краци на интерферометарот, низ него помине гравитационен бран и едниот крак се скрати, а другиот се издолжи, тогаш ќе се појави интерференција помеѓу двата лазерски зрака кога ќе се вратат, а ова ќе биде детектирано со фотодетекторот.

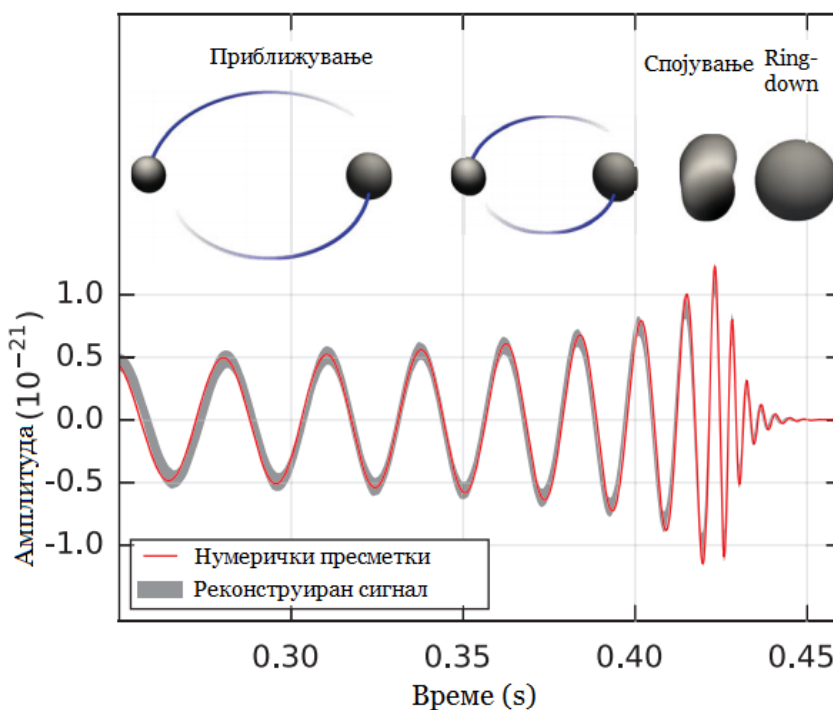


Слика 2. Шематски дијаграм на интерферометар на гравитациони бранови.

Најголемиот детектор на Земјата со кој се пронајдени гравитационите бранови за прв пат е LIGO (акроним за Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory), со должина на краците од 4 километри. Овој амбициозен проект се состои од два детектора во САД, а три слични се поставени во Германија, Јапонија и Италија. Кога гравитационен бран поминува низ Земјата, тој пристигнува до секој од детекторите со мала временска разлика. Ова им дозволува на

истражувачите да го одредат изворот на брановите, како и да ги отстранат изворите на шум ([6]). Со откритието на гравитационите бранови објавено на 11 февруари 2016 година, всушност е даден и уште еден доказ на теоријата за општа релативност и тоа еден век по предвидувањето на Ајнштајн во 1916 година.

Со LIGO бил регистриран настанот на спојување на две црни дупки во една, кој е проследен со емитурање на гравитациони бранови. На Слика 3 е прикажано како за време од 0,2 s фреквенцијата на сигналот се зголемува од 35 Hz до 150 Hz, а амплитудата достигнува максимум ([1]).



Слика 3. Измерените вредности за амплитудата во текот на спојувањето на црните дупки од бинарниот систем споредени со теориските предвидувања.

6. ПРОСТИРАЊЕ И ПРИМЕНА НА ГРАВИТАЦИОНИТЕ БРАНОВИ

Најдовме дека гравитационите бранови се шират како електромагнетните бранови со брзина на еднаква на брзината на светли-

ната. Но, покрај тоа, тие не ги делат истите карактеристики на електромагнетното зрачење. Имено, обичната материја силно влијае на светлината или електромагнетното зрачење и таа во нејзино присуство може да скршне од нејзиниот пат – можно е да се одбива, да се расејува, апсорбира, итн. Спротивно на тоа, гравитационите бранови речиси и да не се засегнати од присуството на „пречки“. На овој начин, гравитационите бранови се скапоцени извори на информации за различни настани во вселената: можеме во принцип да ги користиме за да „погледнеме“ во центрите на супернови експлозии, низ облаци од меѓусвездена прашина или, пак, по само неколку делови од секундата по Големата експлозија кога универзумот бил стар само 10^{-25} s. На пример, на електромагнетното зрачење емитирано од центарот на супернова експлозија би му било потребно доста долго време за да излезе од центарот, бидејќи по патот би се расејувало безброј пати од околниот густ материјал, а освен тоа, по излегувањето би загубило и многу од информациите поради тоа.

За крај, далеку и од она што може да го предвидиме, можеме да бидеме речиси сигурни дека спектарот на гравитациони бранови крие многу изненадувања за нас – укажувања на феномени за коишто сè уште не сме свесни. Астрофизичарите знаат дека само 4% од масата во универзумот отпаѓа на честички кои зрачат и заемодејствуваат со електромагнетно зрачење, додека останатите 96%, кои ги вклучуваат темната материја и темната енергија коишто не зрачат електромагнетно, но може да зрачат гравитациони бранови. Не е изненадувачки фактот што се вложува значителен труд кон создавањето осетливи антени за гравитациони бранови.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] B. P. Abbott (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration) et al., *Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger*, Phys. Rev. Lett. 116 (6), 2016.
- [2] C. W. Misner, K. Thorne, J. A. Wheeler, *Gravitation*, W. H. Freeman and Company, San Francisco, 1973.
- [3] Љ. Петров, *Гравитационите бранови како потврда на Ајнштајновата теорија на релативност*, Портал ПОИМ на Институтот за математика, ПМФ, Скопје, 12 јуни 2016, <http://poim-pmf.weebly.com/gravitacioni-branovi.html>

- [4] B. Schutz, *A First Course in General Relativity* (Second Edition), Cambridge University Press, 2009.
- [5] K. Sundermeyer, *Symmetries in Fundamental Physics*, Springer, 2014.
- [6] С. Т. Торнтон, Е. Рекс, *Модерна физика за научници и инженери*, превод од англиски јазик: А. Тунтев, Табернакул, 2011.

¹ Универзитет „Св. Кирил и Методиј“, Скопје
Природно-математички факултет,
Институт за физика
ул. Архимедова 3, 1000 Скопје, Р. Македонија
e-mail: ljupchopetrov@yahoo.com

Примен: 27.02.2017
Поправен: 21.04.2017
Одобрен: 26.04.2017