

# Експерименталне провере опште теорије релативности

Душко Латас

Универзитет у Београду  
Физички факултет  
мејл: LATAS@FF.BG.AC.RS

100 година опште теорије релативности 2015.  
00:1–4

## Кључни појмови

принцип еквиваленције, гравитациони експерименти у Сунчевом систему, пулсари, космологија

## Резиме

У првих сто година постојања, општа теорија релативности је била ризница теоретичарима и ноћна мора експериментаторима. Ни једна теорија у историји физике није била тако лепа, а с друге стране толико тешко проверљива. Изузев неколико појава које су потврдиле исправност ове теорије одмах кад је настала, дуго се нису појавили нови експерименти који би је даље тестирали. Ипак, од седамдесетих година двадесетог века ствари се полако мењају. Развој технологије омогућава нам да видимо удаљеније објекте у свемиру, отпутујемо даље, да у лабораторији измеримо тачније. Тиме се стварају могућности нових експеримената у којима се експериментално проверива општа теорија релативности. У овом раду биће дат приказ главних експерименталних резултата у којима је тестирана тачност опште теорије релативности, као и мотивација за будуће експеримете који ће тестирати ову теорију.

---

**ОТР:** Општа теорија релативности

**ПЕ:** Принцип еквиваленције

---

Ајнштајн је формулисао општу теорију релативности (ОТР) водећи се унутрашњом доследношћу и логичком елегантницом. Полазећи од принципа еквиваленције (ПЕ) схватио је да се гравитациона интеракција манифестује као закривљеност простор-времена. Користећи Риманову теорију закривљених простора успео је да напише једначине које описују како присуство материје криви простор-време и како се тела крећу у закривљеном простор-времену. Добио је једначине које имају велики број занимљивих решења. Њихова примена на кретање планета даје резултате који се незнатно разликују од предвиђања Њутнове теорије гравитације, али и та мала разлика је довољна да објасни загонетку која је више од пола века збуњивала физичаре – ротацију перихела Меркура. Примењујући Ајнштајнове једначине на кретање светлости добија се скретање у близини великих маса. Експериментална потврда овог предвиђања 1919. године била је велики подстицај прихватању ОТР.

## 1. ПРВЕ ПОТВРДЕ

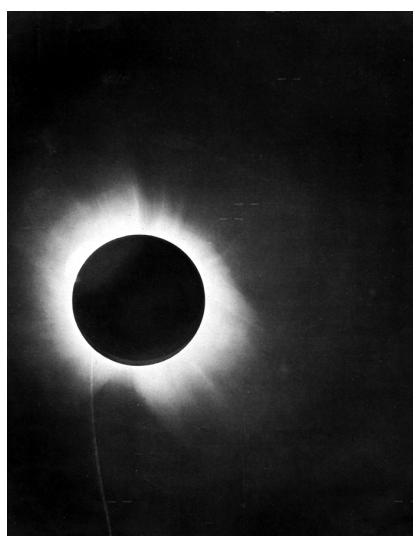
Први емпиријски успех ОТР десио се одмах по њеном објављивању 1915. године, Ајнштајновим објашњењем аномалије Меркурове орбите. Прецизна мерења средином деветнаестог века показала су да орбита Меркура није сасвим елиптична, како предвиђа Њутнов закон гравитације, већ да велика полуоса елипсе ротира и у једном веку се помери за угао од 43 лучне секунде. Француски астроном Ирбен Леверије, познат по открићу Нептуна, покушао је да објасни ову аномалију користећи Њутнов закон гравитације. Претпоставио је да на кретање Меркура, поред Сунца, утиче и мала планета, још ближа Сунцу, коју је назвао Вулкан. Због близине Сунца ова планета се не види, али би могла постати видљива за време тоталног помрачења Сунца. Да би се испитала ова хипотеза, у последњој декади деветнаестог века прављене су експедиције у којима је за време помрачења трагано за овом малом планетом. Ипак, Вулкан није виђен. Енигма кретања Меркура је била изазов за физичаре и астрономе све док Ајнштајн није објавио једначине ОТР. Он је најпре размотрио како ове једначине описују кретање планете око Сунца. Добијено решење указало је да се планета креће по елипси која полако ротира. Брзина те ротације у случају Меркура износи измерених  $43''/\text{vek}$ ! Овај резултат је наговестио нову еру у опису гравитационе интеракције и сматра се првом експерименталном потврдом ОТР.

Друга потврда је уследила 1919. године. Уочивши еквивалентност између гравитације и локално убрзаних система, Ајнштајн је закључио да гравитација утиче на кретање светлости. Користећи Њутнову теорију гравитације још 1911. године је израчунао да би светлост која се креће у близини Сунца требало да скрене за угао  $0''.875$ . Предложио је да се помрачење Сунца искористи за мерење овог феномена. Идеја експеримента је врло једноставна: у тренутку помрачења Месец заклони Сунце и тиме открије звезде чија светлост пролази близу Сунца. Помоћу телескопа и фотографских плоча направе се фотографије које се онда пореде са фотографијама неба у начињеним саа истог места, у истом правцу, али кад су Сунце и Месец на неком другом месту. Поредиши положаје истих звезда на различитим сикама, може се установити како Сунце утиче на кретање светлости са тих звезда. Први покушај мерења планиран је 21. августа 1914. на Криму, али бурна историјска дешавања тог времена онемогућила су успех експедиције. Потом је 1915. Ајнштајн поновио прорачун и показао да ОТР даје двоструко већи ефекат од Њутнове теорије тако да је очекивано скретање заправо  $1''.75$ . По завршетку првог светског рата, Артур Едингтон је организовао две експедиције које су посматрале помрачење Сунца 29. маја 1919. са циљем да провере Ајнштајнова предвиђања: на острво Принципе и град Собрал у Бразилу. Анализом фотографија са острва Принципе



Слика 1

Артур Едингтон, енглески астроном, физичар и математичар



Слика 2

Једна од Едингтонових фотографија тоталног помрачења из 1919. године

установљено је да скретање износи  $1''.60 \pm 0''.31$ , док су фотографије из Бразила указивале на нешто већи резултат  $1''.98 \pm 0''.12$ . Резултати су објављени 6. новембра 1919. године у Краљевском друштву за унапређење природних знања.<sup>1</sup> Ајнштајнов прорачун се слаже са оба резултат заједно, али не у потпуности са другим од њих. То је изазвало одређену сумњу. Ипак, резултати су недвосмислено показали да постоји скретање светлости у гравитационом пољу Сунца и да је концепт закривљеног простор-времена исправан. ОТП је преко ноћи постала сензација, а лондонски "Тајмс" је 7. новембра на насловној страни објавио велики наслов:

РЕВОЛУЦИЈА У НАУЦИ  
НОВА ТЕОРИЈА КОСМОСА  
ОПОВРГНУТЕ ЊУТНОВЕ ИДЕЈЕ

Овај наслов је симболички најавио ново раздобље у коме су идеје апсолутног простора и апсолутног времена заувек одбачене. Британски историчар Пол Џонсон овај наслов сматра прекретницом у историји и рачуна да од њега почиње ново доба.

Мада су ови експериментални резултати били пресудни за прихватање ОТП, Ајнштајну они нису били примарни. Поводом прославе 15 година открића ОТП рекао је: *"Не сматрам да је главни значај опште теорије релативности предвиђање малих, мерљивих ефекта, већ једноставност њеног заснивања и њена доследности."*

У наредним деценијама помрачења Сунца су коришћена за понављање Едингтоновог експеримента. Занимљиво је да су сви добили резултате који се слажу са Ајнштајновим прорачунима, али тачност није била значајно подигнута. Овај метод је технолошки најпрецизније

<sup>1</sup>Нешто пре, у јулу исте године, док је Едингтон обрађивао податке, на истом месту су презентовани резултати Кембела и Куртиса, који су користећи фотографије помрачења из 1900. и 1918. закључили да не постоји скретање светлости у гравитационом пољу Сунца.

изведен 1973. године када је група са Универзитета Тексас и Принстон употребила модерне емулзије, телескопе који су били у температурно контролисаним условима, покретани и контролисани моторима. Анализа фотографија је урађена помоћу тада најмодернијег софтвера и добијен је резултат  $1''.66 \pm 0''.19$ .

Поред ротације перихела и скретања светлости у гравитационом пољу, Ајнштајн је предложио још један начин да се тестира ОТР: мерење гравитационог црвеног помака (ГЦП). Једначине ОТР предвиђају овај ефекат и он може да се објасни помоћу ПЕ и релативистичког Долеровог ефекта. Када извор који се налази на висини  $h$  изнад посматрача емитује светлост фреквенције  $\nu_0$  у хомогеном гравитационом пољу чије је убрзање  $g$ , посматрач мери фреквенцију светлости

$$\nu = \nu_0 \left( 1 + \frac{gh}{c^2} \right),$$

где је  $c$  брзина светлости.

### ДОДАТНА ЛИТЕРАТУРА

1. С. М. Will, "The 1919 measurement of the deflection of light," arXiv:1409.7812 [physics.hist-ph].