

Opšta teorija relativnosti: uvod, pregled i perspektive

Branislav Cvetković¹

¹ Institut za fiziku, Univerzitet u Beogradu

cbranislav@ipb.ac.rs

100 godina opšte teorije relativnosti
Srpska akademija nauka i umetnosti
Beograd, 23.06.2015.

Sadržaj

Uvod

Od Aristotela do Galileja

Njutnov univerzalni zakon gravitacije

Precesija Merkurovog perihela - slom Njutnove teorije?

Opšta teorija relativnosti

Princip ekvivalencije

Ajnštajnovе jednačine

Predviđanja i eksperimentalne potvrde OTR

Perspektive

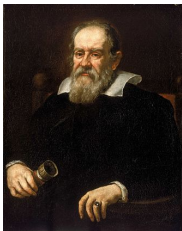
Singulariteti

Kvantizacija

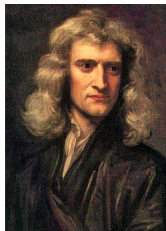
- ▶ Specijalna i opšta teorija relativnosti (STR i OTR) predstavljaju veliku revoluciju u razumevanju strukture prostora i vremena, kao i njihove uloge u formulisanju zakona fizike.
- ▶ STR opisuje uticaj fizičke realnosti na opšta svojstva i vezu izmedju prostora i vremena, a geometrija prostor-vremena u OTR je povezana sa prirodom gravitacione interakcije.
- ▶ STR i OTR su tokom prvog veka od svog pojavljivanja doživele niz kritika, koje su mahom zasnovane na pseudonaučnim argumentima, nerazumevanju apstraktnog matematičkog pristupa ili su nažalost ideološki obojene. Zbog toga ćemo se na početku zadržati na istorijskom zasnivanju dva važna principa, koja su od značaja za razumevanje OTR:
 - ▶ principu relativnosti
 - ▶ principu ekvivalencije.

- ▶ U antičkoj Grčkoj kretanje tela se posmatralo sa filozofske tačke gledišta. Aristotel u svom delu „Dinamika” (IV vek pre nove ere) tvrdi:
 - ▶ Brzina slobodnog pada zavisi od težine tela; teža tela padaju brže.
 - ▶ Zemlja je nepokretna i nalazi se u centru kosmosa.
- ▶ Prvo od pomenuta dva tvrdjenja niko nije osporavao vekovima, dok je drugo nailazilo na oprečna mišljenja još u antičko vreme (Aristarh, Ptolomej). Moderna astronomija zasnovana je tek u XVI veku radovima Kopernika, Brahea i Keplera, koji je formulisao zakone kretanja planeta.
- ▶ Potraga za odgovorom zašto se planete krećući se oko Sunca pokoravaju Keplerovim zakonima dovela je Njutna (1643-1727) do otkrića univerzalnog zakona gravitacije.

- ▶ Moderna fizika nastaje kao antiteza Aristolovog učenja.
- ▶ Fundamentalna promena pristupu fizičkim fenomenima nastupila je pre Njutna pojavom radova italijanskog naučnika Galilea Galileja. Galilej je prvi počeo sa sistematskom analizom i *eksperimentalnom proverom* zakona kretanja.



Galileo Galilej (1564-1642)



Isak Njutn (1643-1727)

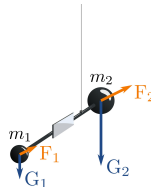
- ▶ Koji su bili Galileovi odgovori na pitanja slobodnog pada i kretanja Zemlje?
 - ▶ Proučavajući probleme slobodnog pada Galileo je otkrio da sva tela padaju istim ubrzanjem bez obzira na masu i sastav. To je suština *principa ekvivalencije* koji je iskoristio Ajnštajn (1879-1955) da razvije OTR.
 - ▶ Galileo je zaljučio da se uniformno kretanje Zemlje ne može detektovati (unutrašnjim) mehaničkim eksperimentom. Zaključak o ekvivalentnosti različitih inercijalnih referentnih sistema poznat kao *princip relativnosti* imao je veliki značaj u razvoju Njutnove mehanike i Ajnštajnovе STR.

- ▶ Njutn je, koristeći Galilejeve rezultate, na osnovu svog II zakona mogao da izvede zaključak da je intenzitet gravitacione sile koja deluju na neko telo proporcionalan masi tog tela.
- ▶ Njutn je bio svestan da ovi zaključci mogu biti samo približno tačni i da *inercijalna masa* m_i , koja se pojavljuje u II Njutnovom zakonu, ne mora biti jednaka *gravitacionoj masi* m_g , koja predstavlja naboj za gravitacionu interakciju.
- ▶ U tom slučaju II Njutnov zakon i zakon gravitacije bi glasili:

$$\vec{F} = m_i \vec{a}, \quad \vec{F} = m_g \vec{g}. \quad (1.1)$$

gde je $\vec{g}$ gravitaciono polje. Ubrzanje tela u datoj tački prostora bi bilo dato izrazom: $\vec{a} = \frac{m_g}{m_i} \vec{g}$, i bilo bi različito za tela kod kojih je odnos $\frac{m_g}{m_i}$ različit.

- ▶ Njutn je merio periode oscilovanja klatana iste dužine, ali različite mase i sastava i dobio rezultat da su periodi oscilovanja jednaki za sva klatna, što navodi na zaključak da su inercijalna i gravitaciona masa medjusobno jednake.
- ▶ Krajem XIX veka mađarski fizičar Loran Etveš izveo je veoma zanimljiv eksperiment kojim je utvrdio da je relativna razlika odnosa inercijalne i gravitacione mase za drvo i platinu manja od 10^{-9} .

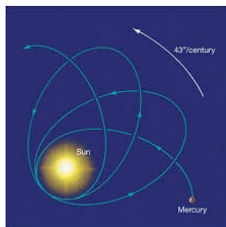


Loran Etveš (1848-1919) Šema Etvešovog oglada

- ▶ Njutn je 1665. godine upoređujući centripetalno ubrzanje Meseca i ubrzanje slobodnog pada u blizini Zemljine površine došao do zaključka da intenzitet gravitacione sile opada sa kvadratom rastojanja.
- ▶ U međuvremenu nekoliko članova Kraljevskog društva došli su do zaključka da u slučaju kada su putanje planeta kružne iz III Keplerovog zakona sledi da je intenzitet sile kojom Sunce privlači planete obrnuto proporcionalan kvadratu rastojanja između Sunca i planete.
- ▶ Uz Halejevu pomoć Njutn je uspeo da 1684. godine dokaže da za kretanje planeta koje se kreću pod uticajem sile, čiji je intenzitet obrnuto proporcionalan kvadratu rastojanja važe *sva tri* Keplerova zakona. Njutn je tako okončao proces tzv. *prve unifikacije u fizici*, ujedinio je nebesku i zemaljsku mehaniku.

- ▶ U narednim vekovima Njutnov univerzalni zakon gravitacije doveo je do briljantnih slaganja podataka astronomskih posmatranja i teorijskih predviđanja za kretanje nebeskih tela. Nepravilnosti koje su uočene u kretanju Urana dovele su sredinom XIX veka do otkriće Neptuna.
- ▶ U isto vreme francuski astronom l'Verije je uočio da je precesija perihela Merkura za 35 lučnih sekundi po stoleću brža nego što se očekuje na osnovu Njutnove teorije. Nekoliko decenija kasnije Sajmon Njukomb je korigovao Verijeov rezultat za precesiju Merkurovog perihela na 43 lučne sekunde po stoleću. Verije je pretpostavio da je dobijeno neslaganje (kao i u slučaju Neptuna) posledica postojanja još neotkrivenih planeta koje se nalaze još bliže Suncu od Merkura.

- ▶ Naučnici su bili toliko sigurni u postojanje nove planete da su joj smislili i ime – Vulkan. Ipak, Vulkan nikad nije otkriven, pa je Njukomb pred kraj XIX veka izneo hipotezu da gravitaciono polje koje potiče od Sunca ne opada egzaktno sa kvadratom rastojanja.



Precesija perihela Merkura

- ▶ Precesija perihela Merkura biće prva eksperimentalna potvrda ispravnosti Ajnštajnovе Opšte teorije relativnosti.

- ▶ Ajnštajnova STR je objedinila gotovo sva dotadašnja znanja iz fizike i predvidela mnoge rezultate koji su kasnije verifikovani sa mnogo većom tačnošću nego što je to bio slučaj kod klasičnih merenja.
- ▶ Kao i svaka teorija i STR ima svoj domen važenja. Prvi problemi javili su se sa pokušajima da se u okviru relativističke teorije reformuliše Njutnov zakon gravitacije.
- ▶ Jedan od ključnih koraka ka tom cilju Ajnštajn je učinio 1907. godine kada je formulisao *princip ekvivalencije*, koji počiva na pomenutim eksperimentalnim rezultatima o jednakosti gravitacione i inercijalne mase. Kao posledica ove činjenice statičko, homogeno gravitaciono polje se ne može detektovati u liftu koji slobodno pada, tj. inercijalne sile *poništavaju* gravitaciono polje u slobodno padajućim sistemima reference.

- ▶ Ajnštajn je iskoristio princip ekvivalencije da kvantitativno objasni pojavu gravitacionog crvenog pomaka.
- ▶ Jednačine kojima se opisuje gravitaciono polje *nisu određene* principom ekvivalencije.
- ▶ Ajnštajn je 1911. pokušao da izračuna ugao skretanja svetlosti u gravitacionom polju Sunca. Kasnije će se ispostaviti da OTR predviđa dva puta veći rezultat od onog koji je dobijen samo na osnovu principa ekvivalencije.



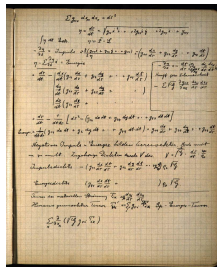
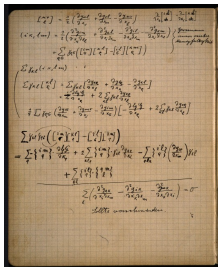
Albert Ajnštajn (1879-1955) Ajnštajnovne beleške

- ▶ Nakon niza neuspešnih pokušaja da konstruiše relativističke jednačine za skalarno gravitaciono polje, Ajnštajn je 1913. godine u saradnji sa matematičarom Marselom Grosmanom usvojio stanovište da se gravitaciono polje može identifikovati sa deset komponenti metričkog tenzora u Rimanovom prostor-vremenu.
- ▶ Ispostavlja se da je prostor-vreme STR (četvorodimenziono prostor-vreme STR nosi naziv prostor Minkovskog) arena za sve fizičke pojave izuzev gravitacije
- ▶ Neeuklidske geometrije koje su matematičari počeli sa izučavaju još u XVIII veku, našle su svoju primenu u fizici na početku XX veka.

- Gravitaciono polje opisano je *Ajnštajnovim jednačinama*:

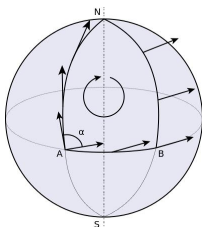
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}, \quad (2.2)$$

gde je $T_{\mu\nu}$ tenzor energije i impulsa (veličina koja zavisi od materije), G gravitaciona konstanta, a c brzina svetlosti.

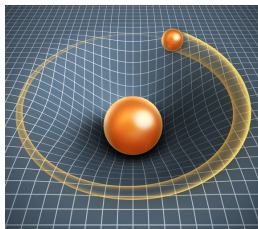


Iz Ajnštajnovih beležaka Rimanov Tenzor krivine

- ▶ U zakrivljenom prostoru rezultat paralelnog prenosa vektora zavisi od putanje po kojoj se taj paralelni prenos vrši.



Paralelni transport vektora po sferi duž zatvorene trajektorije



„Lakša” tela se kreću po geodezijskim linijama.

- ▶ Čestica se u zakrivljenom prostoru neće kretati po pravoj, već po tzv. *geodezijskoj* liniji.

- ▶ Ajnštajnovе jednačine imaju nekoliko važnih osobina. Jedna od njih je *nelinearnost*: za gravitaciona polja ne važi princip superpozicije.
- ▶ Ajnštajnovе jednačine u vakuumu (delu prostor-vremena u kome nema materije) imaju oblik $R_{\mu\nu} = 0$ (što ne znači da je prostor-vreme ravno) mogu imati netrivialna rešenja, kao što su na primer *gravitacioni talasi*.
- ▶ Ajnštajnovе jednačine u sebi sadrže i zakon održanja energije i impulsa. Jednačine koje opisuju gravitaciono polje u sebi sadrže i jednačine kretanja za materiju koja je izvor tog gravitacionog polja. Dakle, prostorni raspored i kretanje izvora ne mogu se zadati na proizvoljni način.

- ▶ Već 1916. godine Švarcšild je rešio Ajnštajnovе jednačine u jednom specijalnom slučaju. On je naime posmatrao centralno-simetrično gravitaciono polje u vakuumu i dobio rešenje sledećeg oblika:

$$ds^2 = \left(1 - \frac{r_g}{r}\right) c^2 dt^2 - \left(1 - \frac{r_g}{r}\right)^{-1} dr^2 - r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2),$$

gde je $r_g = \frac{2Gm}{c^2}$ gravitacioni radijus tela mase m .

- ▶ OTR je dala odgovor na pitanje precesije perihela Merkura. Tokom jedne revolucije planete perihel pomeri za ugao:

$$\delta\phi = \frac{6Gm}{c^2 a(1 - e^2)},$$

gde je m masa Sunca, a velika poluosa, a e ekscentricitet eliptične orbite planete. Za precesiju perihela Merkura jednačina daje vrednost od 43 lučne sekunde po stoleću.

- ▶ Drugi zanimljiv rezultat je skretanje svetlosti u gravitacionom polju. Svetlosni zrak koji prolazi na rastojanju ρ od centra izvora skrenuće za ugao:

$$\delta\phi = \frac{2r_g}{\rho} = \frac{4Gm}{c^2\rho}.$$

- ▶ Skretanje svetlosnog zraka koji tangira površinu Sunca je svega $1,75''$.
- ▶ Tokom totalnog pomračenja Sunca 29. maja 1919 dve britanske ekspedicije napravile su veliki broj fotografija sjajnih zvezda. Upoređivanjem ovih fotografija sa položajem zvezda kada se Sunce ne nalazi u njihovoj blizini nadjeno je da su zvezde pomerene za $1,6'' - 1,98''$.
- ▶ OTR je otvorila nove mogućnosti kada je u pitanju ispitivanje dinamičke strukture kosmosa kao celine.

- ▶ OTR je predvidela fizičke efekte koji su eksperimentalno potvrđeni, ali neka svojstva OTR zaslužuju kritički osvrt.
- ▶ U OTR javljaju se *singulariteti*.
- ▶ Uobičajeni kosmološki modeli predviđaju da je pre odredjenog konačnog vremena u prošlosti kosmos bio u singularnom stanju (veliki prasak). Verovalo se da je ovo predviđanje posledica uprošćavajućih pretpostavki koje se koriste u okviru modela. Međutim, kasnije su dokazane teoreme iz kojih sledi da je pojava pomenutog singulariteta opšte svojstvo kosmoloških rešenja.
- ▶ Opšte teoreme o singularitetima se takodje mogu primeniti na crne rupe, koje predstavljaju poslednju fazu evolucije teških zvezda. Nakon konačnog sopstvenog vremena sva materije zvezde susreće se u jednoj tački, gde gustina materije i krivina prostor-vremena postaju beskonačne.

- ▶ U uslovima, kada gustina materije postaje ogromna i predviđanja OTR su u suprotnosti sa osnovnim konceptima klasične fizike moraju se razmotriti kvantni efekti.
- ▶ Prvi pokušaji da se pomire OTR i kvantna teorija javili su već oko 1930, ali još uvek nije konstruisana potpuna, konzistentna teorija gravitacije. S jedne strane se ispostavlja da kvantna teorija gravitacije nije renormalizabilna, kvantizacija prostor-vremena dovodi do brojnih nerešenih problema kao što su nelokalnost, kauzalnost ili vremenska evolucija.
- ▶ Ne možemo biti sigurni da će velike i važne ideje lokalne simetrije, supergravitacije, Kaluca-Klajn teorije, ili teorije struna dovesti do jedinstvene kvantne teorije fundamentalnih interakcija.