

Gravitacija¹

Prva saznanja o prirodi gravitacije potekla su iz pokušaja da se shvati kretanje tela. Tako je, naprimer, antički filozof Aristotel imao (pogrešan) stav da teža tela padaju brže nego lakša (IV vek p.n.e.). Do značajnih promena antičkih ideja o kretanju došlo je tek u poznom srednjem veku, zahvaljujući posebno učenjima N. Kopernika, T. Brahea i J. Keplera. Italijanski naučnik G. Galilej (1564-1642) izgradio je potpuno novi pristup u istraživanju fizičkih pojava. Ne verujući mnogo u Aristotelove “dokaze”, on je započeo sistematsku analizu i eksperimentalnu proveru zakona kretanja. Tako je pronašao princip ekvivalencije, zakon koji je imao odlučujući uticaj na nastanak Ajnštajnovе opšte teorije relativnosti. Nastavljajući tamo gde su Galilej i Kepler stali, I. Njutn (1642-1726) je došao do precizne formulacije zakona gravitacije, po kome je privlačna sila između dva tačkasta tela proporcionalna inverznom kvadratu njihovog međusobnog rastojanja. Njutnovi zakoni mehanike i gravitacije imaju veoma široku oblast važenja, a njihova ograničenja postala su jasna tek nastankom teorije relativnosti.

U periodu 1907–1915, A. Ajnštajn (1879–1955) je otkrio Opštu teoriju relativnosti (OTR). To je bio događaj koji nas je uveo u epohu moderne teorije gravitacije i kosmologije. U prvom koraku ovog procesa, Ajnštajn je prepoznao suštinski značaj (uopštenog) principa ekvivalencije za zasnivanje nove teorije gravitacije. Koristeći ovaj princip, on je uspeo da objasni neke zanimljive fizičke efekte u gravitacionom polju. Zatim, u drugom koraku, on je identifikovao gravitaciono polje sa Rimanovom geometrijom prostor-vremena. Najzad, posle dosta lutanja, Ajnštajn je našao konačan oblik nove jednačine gravitacionog polja u Berlinu, krajem 1915:

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

Na levoj strani jednačine figurišu geometrijske veličine, metrika i krivina prostor-vremena, na desnoj se nalazi tenzor energije-impulsa materije. Često se kaže da materija krivi geometriju a geometrija određuje kretanje materije.

Ajnštajnova OTR je uspesno testirana na rastojanjima od mikrona do veličine sunčevog sistema. U graničnom slučaju slabog polja ona se svodi na Njutnovu teoriju. U njene klasične testove spadaju precesija Merkurove orbite, skretanje svetlosti pri prolasku pored sunca, gravitacioni crveni pomak i

¹Prilog za Srpsku Enciklopediju, avgust 2015, autor: M. Blagojević.

vremensko kašnjenje radarskog signala. S druge strane, OTR ima i određene slabosti; na jako malim rastojanjima oni se ogledaju u postojanju singulariteta i problema kvantizacije, a na jako velikim (kosmologija) u potrebi za uvodjenjem tamne materije i tamne energije.

Ovakva situacija prirodno motiviše potragu za alternativnim teorijama gravitacije. Od pre oko četiri decenije, u tom procesu uspešno učestvuju i istraživači iz Srbije, čije aktivnosti pokrivaju izvestan broj veoma aktuelnih tema. U izlaganju koje sledi dat je kratak pregled ovih aktivnosti.

A. Lokalna Poenkareova teorija gravitacije. Moderne teorije elektroslabih i jakih interakcija zasnivaju se na principu lokalne simetrije. Primena tog istog principa na teoriju gravitacije, u ranim 1960-tim, dovela je do nastanka prve realistične teorije ovog tipa, lokalne Poenkareove teorije gravitacije (PG). Ovo su neki od rezultata istraživanja PG u Srbiji [1]:

(a1) Blagojević i Nikolić su 1983. formulisali opšta pravila kanonske analize PG. Uveli su formalizam ako-veza koji omogućava kompaktnu klasifikaciju svih veza, i određuje njihov uticaj na fizičke osobine gravitacionih modova.

(a2) Kanonskom analizom PG, Blagojević i Vasilić su 1988. našli njenu asimptotsku strukturu i odredili odgovarajuće izraze za održane gravitacione naboje, energiju-impuls i moment impulsa.

(a3) U okviru trodimenzione PG, Blagojević i Cvetković su 2006. dobili formulu za entropiju crne rupe. Uz poznate izraze za energiju-impuls i moment impulsa, dokazano je važenje prvog zakona termodinamike.

B. Lokalna afina teorija gravitacije. PG teorija je dobijena lokalizacijom Poenkareove grupe, koja se sastoji od Lorencovih transformacija i translacija. Uopštenje PG koje nastaje zamenom Lorencovih transformacija opštim linearnim transformacijama $GL(4, \mathbb{R})$, naziva se lokalna afina teorija gravitacije (AG). Istraživanje ove teorije dovelo je do sledećih rezultata [2]:

(b1) Šijački i Ne'eman su 1979. uveli tenzorska i spinorska polja materije koristeći beskonačno-dimenzione unitarne reprezentacije grupe $GL(4, \mathbb{R})$, a pojedinačna stanja u odnosu na Lorencovu grupu su interpretirali kao ekscitacije bozona i fermiona na Redže trajektorijama.

(b2) Isti autori su 1988. uveli mehanizam spontanog narušenja specijalne linearne simetrije $SL(4, \mathbb{R})$ na Lorencovu simetriju. Na velikim rastojanjima ova teorija se svodi na Ajnštajn-Kartanovu verziju PG, a na malim dominira renormalizabilna interakcija kvadratična po krivini i torziji.

(b3) Sijački i Salom su 2013. analizirali uloge grupe $SL(4, \mathbb{R})$ u fizici čestica i gravitaciji.

C. Kretanje ekstenriranih objekata. Iz zakona održanja tenzora energije-impulsa u OTR sledi da se materijalna čestica kreće po geodezijskoj liniji. Korišćenjem multipolnog formalizma, analiza se može uopštiti na ekstenrirane (netačkaste) objekte, kao što su strune i membrane, i na Riman-Kartanovu geometriju PG teorije. Ovo su rezultati istraživanja [3]:

(c1) Ako se zadebljana membrana (skraćeno: brana) posmatra u Riman-Kartanovoj geometriji, zakoni održanja energije-impulsa i spina određuju njeno kretanja. Vasilić i Vojinović su 2008. pokazali da brane bez spina ne osećaju torziju prostor-vremena.

(c2) Posmatrajmo membranu namotanu na ekstra kompaktnu dimenziju Riman-Kartanovog prostora. Vasilić je 2012. našao da se u limesu uske membrane dobija efektivna struna koja ima električni i dilatonski naboj. Krajevi strune leže na površi konstantnog dilatonskog polja, kao u slučaju D-brane.

D. Teorija struna. Osnovna ideja teorije struna je da se fizička realnost sastoji ne od tačaka već od jednodimenzionih objekata, struna. U određenoj aproksimaciji, iz teorije struna se dobijaju Ajnštajnovе jednačine. Struktura ove teorije otvara mogućnost za izgradnju konzistentne kvantne gravitacije. Pored metrike, u njoj se pojavljuju dva nova polja, Kalb-Ramonovo B i dilatonsko polje Φ . Rezultati istraživanja su sledeći [4]:

(d1) Analizom kretanja probne bozonske strune kroz prostor-vreme, Popović i Sazdović su 2007. dobili geometrijski smisao polja B i Φ : prvo je izvor torzije, a drugo izvor nemetričnosti. Ove veličine karakterišu AG teoriju.

(d2) Poznato je da medju pet konzistentnih teorija struna postoje veze, izražene relacijama S- i T-dualnosti. Davidović i Sazdović su 2014. započeli, a Sazdović je 2015. kompletirao novu i jednostavnu interpretaciju T-dualnosti, koja pokazuje da ona pretstavlja samo skup nefizičkih transformacija. Time se otvara perspektiva za formulaciju jedinstvene M-teorije (Magične, Misteriozne ili Majke svih teorija).

E. Nekomutativna teorija gravitacije. Da bi se eliminisale slabosti OTR na malim rastojanjima, nastala je ideja da se nova teorija gravitacije definiše na nekomutativnom (NK) prostor-vremenu, u kome koordinate ne komutiraju medjusobno: $[x^\mu, x^\nu] = i\hbar J^{\mu\nu}$, a $J^{\mu\nu}$ je neka matrica. Istraživanja ove teme dovela su do sledećih rezultata [5]:

(e1) NK prostori su deformacije običnih prostora. U slučaju θ -deformisanog prostora, Dimitrijević je 2005. uvela odgovarajuću simetriju i konstruisala teoriju gravitacije. Kad parametar deformacije θ teži nuli, ova teorija se svodi na OTR.

(e2) Dimitrijević i Radovanović su 2014. uopštili MekDauel-Mansuri teoriju gravitacije prelazom na NK prostor-vreme. Zatim su našli efektivne popravke početne teorije i dali analizu karakterističnih graničnih slučajeva.

(e3) Definisanje geometrijskih struktura na NK prostoru vodi do određenih uslova na ovaj prostor. Burić i Madore su 2014. pokazali da neke od ovako definisanih NK geometrija imaju “realističnu” strukturu, koja se ogleda u postojanju sferne simetrije, i u postojanju limesa koji daje poznate gravitacione konfiguracije.

Radovi koji se odnose na ova istraživanja navedeni su u spisku literature.

Literatura

- [1] M. Blagojević and I. Nikolić, Hamiltonian dynamics of Poincaré gauge theory: General structure in the time gauge, *Phys. Rev. D* **28** (1983) 2455; M. Blagojević and M. Vasilic, Asymptotic symmetry and conserved quantities in the Poincaré gauge theory of gravity, *Class. Quant. Grav.* **5** (1988) 1241; M. Blagojević and B. Cvetković, Black hole entropy in 3D gravity with torsion, *Class. Quant. Grav.* **23** (2006) 4781.
- [2] Y. Ne’eman and Dj. Šijački, Unified affine gauge theory of gravity and strong interactions with finite and infinite $GL(4, \mathbb{R})$ spinor fields, *Ann. Phys.* **120** (1979) 292; Y. Ne’eman and Dj. Šijački, Gravity from symmetry breakdown of a gauge affine theory, *Phys. Lett B* **200** (1988) 489; I. Salom and Dj. Šijački, $SL(n, \mathbb{R})$ in particle physics and gravity – decontraction formula and unitary irreducible representations, *Rev. Math. Phys.* **25** (2013) 1343006.
- [3] M. Vasilic and M. Vojinović, Spinning branes in Riemann-Cartan spacetime, *Phys. Rev. D* **78** (2008) 104002; M. Vasilic, D-branes from classical macroscopic strings, *Gen. Rel. Grav.* **44** (2012) 1693.
- [4] D. Popović and B. Sazdović, The geometrical form for the string space-time action, *Eur. Phys. J. C* **50** (2007) 683; Lj. Davidović and B. Sazdović, *Eur. Phys. J. C* **74** (2014) 2683; B. Sazdović, T-duality as coordinates permutation in double space for weakly curved background, *JHEP* **08** (2015) 055.
- [5] M. Dimitrijević, κ -deformed gauge theory and θ -deformed gravity, doktorska teza (2005), <http://edoc.ub.uni-muenchen.de/4670/>; M. Dimitrijević and V. Radovanović, Noncommutative $SO(2,3)$ gauge theory and noncommutative gravity, *Phys. Rev. D* **89** (2014) 125021; M. Burić and J. Madore, On noncommutative spherically symmetric spaces, *Eur. Phys. J. C* **74** (2014) 2820.