

Kratka istorija gravitacije

Milutin Blagojević, Institut za fiziku

100 godina Opšte Teorije Relativnosti, Beograd 2015

Sadržaj

- Koreni gravitacije
- Einstein-ova teorija gravitacije
- Lokalna simetrija
- Lokalna Poincaré-ova teorija gravitacije
- Zaključne napomene

1. Koreni gravitacije

Antičko doba – prve ideje o kretanju tela

Aristotel (384–322 pre n.e.):

- **Teža tela padaju brže nego lakša.**

Srednji vek – nove ideje o **kretanju** na osnovu **eksperimentalnih podataka**

N. Kopernik, predložio heliocentrični sistem Vasiona

T. Brahe, merio putanje planeta

J. Kepler, formulisao 3 zakona kretanja planeta

Galileo Galilei (1564–1642), osnivač moderne nauke o kretanju tela

Uveo **merenje prostora i vremena** kao naučne metode fizike

Glavna dela: **Dialogo (1632)**, **Discorsi (1638)**

Otkrio: **Zakon inercije**, **Princip relativnosti** i **Princip ekvivalencije (PE):**

- **Sva tela u gravitacionom polju trpe isto ubrzanje**

[Dialogo] Ali ja ... koji sam eksperiment izvršio, mogu te uveriti da djule težine 100 ili 200 funti, neće stići do tla **ni pedalj pre** kugle teške samo pola funte, ako se baci sa visine od 200 kubita.

Krivi toranj u Pizi?

Novi genije, **Isaac Newton**, rođen je iste godine kada je Galileo umro (1642).
Otkrio **univerzalni zakon gravitacije** (**Principia, 1687**):

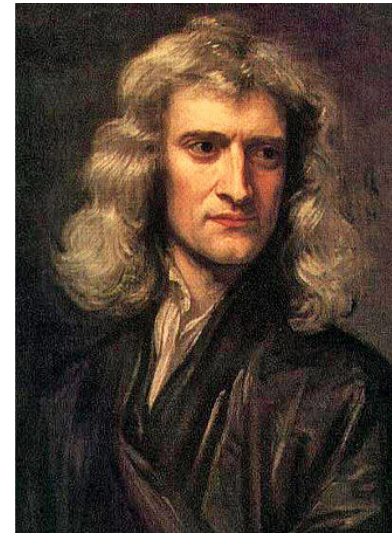
$$F = G \frac{mM}{r^2}$$

PE važi, ali nema značajnog uticaja na strukturu teorije.

Tri veka kasnije, u učenju **Alberta Einstein-a**, ovaj Princip dobija suštinski novi značaj.



Slika 1: G. Galilei (1564–1642)



Slika 2: I. Newton (1642–1726)

2. Einstein-ova teorija gravitacije

1632, Galilei-ev **PE** (reformulisan):

- **Kretanje tela** u grav. polju je **isto** kao i u ubrzanom ref. sistemu.

1907–1915, Einstein formuliše **uopšteni PE**:

- Svaki ubrzani ref. sistem proizvodi **efekte** koji su **isti** kao efekti nekog grav. polja.

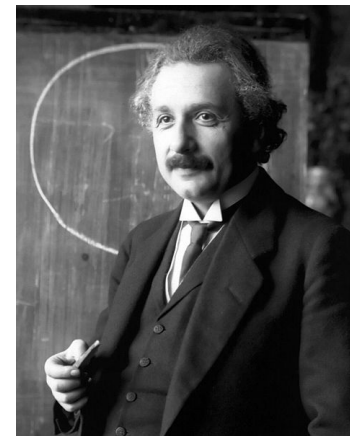
Geometrijska interpretacija: Na isti način deluje i **zakrivljeni prostor**.

Tako **geometrija** preuzima ulogu **gravitacionog polja** $\Rightarrow$ **Opšta teorija relativnosti**

Matematički opis “zakrivljene” geometrije već je bio poznat: **Riemann-ova geometrija**



Slika 3: B. Riemann (1826–1866)



Slika 4: A. Einstein (1879–1955)

Einstein-ove jednačine povezuju geometriju i materiju:

$$\underbrace{R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R}_{\text{geometrija}} = \underbrace{\kappa T_{\mu\nu}}_{\text{materija}} \quad (25 \text{ nov. } 1915, \text{ Berlin}) .$$

Interpretacija:

- materija krivi geometriju prostor-vremena
- slobodna probna tela kreću se po tzv. **geodezijskoj liniji**

Einstein–Hilbert? jun 1915; 20. nov. 1915; 25 nov. 1915

Schwarzschild (1915/16): našao prvo rešenje Einstein-ovih j-na

Klasični testovi:

- Pomeranje perihela Merkura (43" za vek)
- Skretanje svetlosti pri prolasku pored Sunca (1.75", prvo merenje 1919)
- Crveni pomak (pomak spektralnih linija ka crvenom delu spektra)
- Vremensko zakašnjenje radarskog signala zemlja-mesec-zemlja (240 μs)

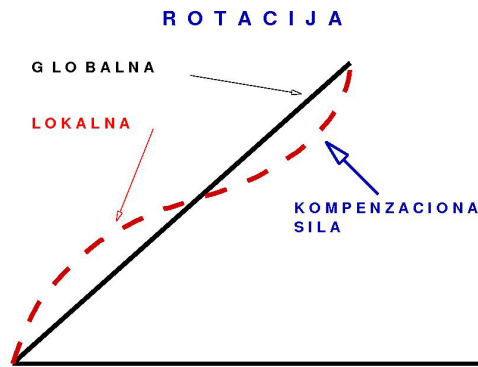
Primene: **Kosmologija, crne rupe, GPS** (opšti sistem za određivanje položaja) ...

Slabosti: pojava **singulariteta** i nemogućnost **kvantizacije**

3. Lokalna simetrija

Globalna transformacija: sve taške nekog objekta pomeraju se na **isti** način

Lokalna transformacija: svaka taška pomera se na **poseban** način



Slika 5: Lokalna rotacija



Slika 6: H. Weyl (1885–1955)

Lokalna rotacija deformiše štap, to nije transformacija simetrije

Da bi štap ipak ostao prav, mora se primeniti **kompensaciona sila**

H. Weyl: (1918, prve ideje – lokalno reskaliranje); **1929, elektrodinamika**, $U(1)$;

Yang–Mills: **1954**, lokalne izospinske rotacije, $SU(2)$;

Utiyama: **1956**, lokalna Lorenzova simetrija + neke pretpostavke $\Rightarrow$ **OTR!**

Kibble: (1961), **Sciama:** (1962), lokalna Poincaré-ova simetrija

4. Lokalna Poincaré-ova teorija gravitacije

Poincaré-ova grupa je dobro poznata simetrija fizike elementarnih čestica

lokalna simetrija:	Lorentz-ove rotacije	translacije
kompensaciona polja:	koneksija ω^{ij}	tetrada b^i
jačine polja:	krivina R^{ij}	torzija T^i

⇒ **Lokalna Poincaré-ova Teorija Gravitacije – LPT** [Kibble 1961; Sciama 1962]

Nova geometrija: Riemann–Cartan-ova;

1921/22: E. Cartan (1869–1951) uopštio **Riemann-ovu** geometriju uvođenjem **torzije**



Slika 7: T. Kibble (1932, –)



Slika 8: D. Sciama (1926–1999)

a) Einstein–Cartan-ova (EC) teorija

Jednostavan LPT model sa dejstvom $\int R$ koje je slično OTR dejstvu.

Dve vrste kompenzacionih polja $\Rightarrow$ dve jednačine kretanja

$$\text{Krivina} \sim \text{masa} : \quad R_{mk} - \frac{1}{2}\eta_{mk}R = \kappa T_{mk}$$

$$\text{Torzija} \sim \text{spin} : \quad T^m_{ij} \sim -\kappa \Sigma^m_{ij}$$

Masa i **spin** su osnovne karakteristike elementarnih čestica.

- **EC teorija** je u skladu sa mikrostrukturom materije (masa + spin)

Materija bez spina $\Rightarrow$ torzija je nula $\Rightarrow$ EC teorija se svodi na OTR

- Planete i sunce ne poseduju spin $\Rightarrow$ **EC teorija zadovoljana sve klasične testove**

	klasični testovi	mikrostruktura materije
OTR	+	−
EC teorija	+	+

b) Merenje torzije u sunčevom sistemu

L. Shiff (Stanford, 1960): Obrtna osa žiroskopa u orbiti oko Zemlje trpi precesiju.
Proverom precesije može se testirati OTR.

Satelitski eksperimenti:

Gravity Probe A: 1976, 1h:55min;

Gravity Probe B: 2004, 16 meseci (analiza podataka do 2011);

žiroskop: kvarcna kugla, $r = 1$ cm, moment impulsa $L = 4.6 \times 10^3$ gr cm²/sec.

Rezultati merenja precesije u skladu sa OTR !

Yasskin, Stoeger (1980): Jedino probno telo sa spinom može da “oseti” torziju.

Gravity Probe B: probno telo bez spina $\Rightarrow$ nemoguća detekcija torzije

Kako napraviti probno telo sa spinom (polarizacijom) ?

Da bi polarizacija bila dovoljno velika ($\sim L$), masa treba da bude oko 850 tona!

Podići takvu masu u zemljinu orbitu je iznad mogućnosti savremene tehnologije.

c) Torzija i tamna energija

U kosmologiji su veća grav. polja $\Rightarrow$ realnija mogućnost za detekciju torzije

Shie, Nester, Yo (2008):

Ubrzano širenje Svemira (1998) obično se objašnjava uz pomoć **tamne energije**

Alternativa: **LPT** sa skalarnim modom torzije ($J^P = 0^+$)

$\Rightarrow$ širenje Svemira sa oscilacijama (brže/sporije)

Širenje Svemira se u srednjem usporava, ali uz pogodan izbor parametara

$\Rightarrow$ **ubrzano širenje u sadašnjem periodu !**

Pretpostavka o fantomskoj tamnoj energiji više nije potrebna !

Zaključne napomene

U ovom kratkom pregledu istorije gravitacije, uočavaju su **dve ključne ideje**:

- **Princip ekvivalencije** [Galileo 1632, Einstein 1907] $\Rightarrow$ **OTR**
- **Princip lokalne simetrije** [Weyl 1929, Yang i Mills 1954, Utiyama 1956, Kibble, Sciama 1961/62] $\Rightarrow$ **LPT ...**

Zaključne napomene

U ovom kratkom pregledu istorije gravitacije, uočavaju su **dve ključne ideje**:

- **Princip ekvivalencije** [Galileo 1632, Einstein 1907] $\Rightarrow$ **OTR**
- **Princip lokalne simetrije** [Weyl 1929, Yang i Mills 1954, Utiyama 1956, Kibble, Sciama 1961/62] $\Rightarrow$ **LPT ...**

U oba slučaja nalazimo da postoji

- **Geometrijska interpretacija gravitacije**

Zaključne napomene

U ovom kratkom pregledu istorije gravitacije, uočavaju su **dve ključne ideje**:

- **Princip ekvivalencije** [Galileo 1632, Einstein 1907] $\Rightarrow$ **OTR**
- **Princip lokalne simetrije** [Weyl 1929, Yang i Mills 1954, Utiyama 1956, Kibble, Sciama 1961/62] $\Rightarrow$ **LPT ...**

U oba slučaja nalazimo da postoji

- **Geometrijska interpretacija gravitacije**

Priča o gravitaciji još nije završena ...

Priroda ne otkriva svoje tajne odjednom i svima

Seneca, *Naturales quaestiones*, 65 A.D.