

# SAVREMENE MODIFIKACIJE AJNŠTAJNOVE TEORIJE GRAVITACIJE

Branko Dragović  
<http://www.ipb.ac.rs/~dragovich>  
[dragovich@ipb.ac.rs](mailto:dragovich@ipb.ac.rs)

Institut za fiziku  
Beograd

24. 02. 2012

*SEENET-MTP predavanje*

Katedra za teorijsku fiziku – Prirodno-matematički fakultet –  
Niš

- 1 Uvod
- 2 Ajnštajnova teorija gravitacije
- 3 Ubrzano širenje svemira: opservaciona činjenica i teorijski problem
  - Tamna energija i tamna materija
  - Modifikacija OTR
- 4 Glavni pravci modifikacije OTR
  - $f(R)$  modifikacija
  - Nelokalna modifikacija
  - Neke druge modifikacije
- 5 Zaključak

# 1. Uvod

- 4 fundamentalne sile (interakcije): gravitaciona, elektromagnetna, jaka i slaba
- Gravitaciona sila igra važnu ulogu na makroskopskom nivou, a u interakciji između nebeskih tela igra dominantnu ulogu
- Vasiona kao celina upravlja se jedino gravitacijom
- Postoji Njutnova i Ajnštajnova teorija gravitacije: Njutnova teorija je sadržana u Ajnštajnovoj
- Ajnštajnova (Njutnova) teorija gravitacije proverena je na rastojanjima od 0, 1 mm do granica sunčevog sistema. Većina naučnika veruje da važi i na većim rastojanjima (kosmičkoj skali) i da važi za celu vasionu (sem na veoma malim rastojanjima).
- Iz raznih razloga radjene su modifikacije Ajnštajnovе teorije gravitacije – savremene modifikacije su motivisane uglavnom otkrićem ubrzanog širenja vasionе (1998).

# Ajnštajnova teorija gravitacije

- Krajem 1915. g. Ajnštajn je formulisao Opštu Teoriju Relativnosti (OTR), koja je njegova (relativistička) teorija gravitacije.

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = 8\pi GT_{\mu\nu}$$

- OTR sadrži Njutnovu teoriju gravitacije

$$ma = G\frac{Mm}{r^2}$$

- Postoje 3 klasična (ključna) testa koja potvrđuju OTR: pomerenje perihela Merkura, zakrivljenje zraka svetlosti u gravitacionom polju Sunca, gravitacioni crveni pomak.

# Ajnštajnova teorija gravitacije

- 1917. g. Ajnštajn je primenio OTR na konstrukciju svog prvog modela svemira – statičan sferni model sa kosmološkim članom  $\Lambda$ . Ovaj model nije bio tačan, pa se Ajnštajn kasnije odrekao kosmološke konstante  $\Lambda$ .

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = 8\pi GT_{\mu\nu} - \Lambda g_{\mu\nu}$$

- Linijski (Friedmann-Lemaître-Roberstson-Walker) elemenat rastojanja za homogen i izotropan svemir:

$$ds^2 = -dt^2 + a^2(t) \left[ \frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2(d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2) \right]$$

# Ajnštajnova teorija gravitacije

- Jednačine za skalirajući faktor  $a(t)$ :

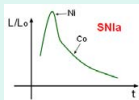
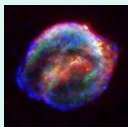
$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}(\rho + 3p) + \frac{\Lambda}{3}$$
$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 + \frac{k}{a^2} = \frac{8\pi G}{3}\rho + \frac{\Lambda}{3}$$

- 1922-24. g. Fridman pokazuje nestatičnost svemira.
- 1927. g. Lemetr predviđa širenje svemira i njegov početak u vidu velikog praska.
- 1929. g. Habl otkriva širenje svemira.
- 1965. g. otkriće kosmičkog mikrotalasnog pozadinskog zračenja (Penzias i Wilson).
- 1983. g. inflaciona kosmologija (Alan Guth).

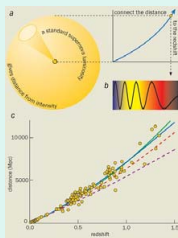
# Ubrzano širenje svemira

1998. g. otkriće ubrzanog širenja svemira pomoću supernovih SN Ia. Nobelova nagrada za fiziku 2011. g.

Супернове типа SN Ia:  
откриће убрзаног ширења Вационе(1998)



$$L = \frac{L_0}{4\pi d_L^2}$$



$$d_L(z) = c(1+z) \int_0^z \frac{dz'}{H(z')}$$

# Ubrzano širenje svemira

Šta znači ubrzano širenje svemira u Ajnštajnovoj teoriji gravitacije?

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}(\rho + 3p), \quad \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 + \frac{k}{a^2} = \frac{8\pi G}{3}\rho$$
$$\ddot{a} \implies p < -\frac{1}{3}\rho$$

*Tamna energija* - materija sa negativnim pritiskom i homogeno raspoređena u prostoru.

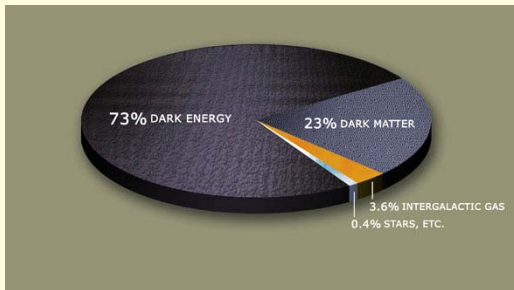
$$p = w\rho, \quad w < -\frac{1}{3}, \quad w = -1.02_{-0.16}^{+0.14}$$

- $w > -1$  – kvintesens materija
- $w = -1$  – kosmološka konstanta
- $w < -1$  – fantomska materija



# Ubrzano širenje svemira

Ako Ajnštajnova teorija gravitacije važi za celu vasionu, tada oko 96 % materije u svemiru je nepoznate prirode



## Modifikacije OTR

- OTR nije proverena na kosmičkoj skali, a posebno nije pokazana njena valjanost za vasionu kao celinu.
- Tamna energija (i tamna materija) nije dokazana eksperimentalno (u laboratorijskim uslovima). Ima je jako mnogo.
- Ne postoje teorijski razlozi koji bi ograničavali teoriju gravitacije na Ajnštajnovu opštu teoriju relativnosti, tj. teoriju sa Ajnštajn-Hilbertovim dejstvom

$$S = \int \frac{d^4x}{16\pi G} \sqrt{-g} (R - 2\Lambda) + \int d^4x \sqrt{-g} \mathcal{L}_{materije}$$

# Glavni pravci modifikacije OTR

Nije poznat neki teorijski princip, koji bi ukazao kako naći pravu modifikaciju (generalizaciju) OTR ! Zbog toga postoje mnogi teorijski pravci modifikacije.

- Modifikacije moraju da zadovoljavaju uslove:
  - dobro teorijski formulisane
  - sadrže OTR
  - opisuju ubrzano širenje vasiona, dobro opisuju sunčev sistem i ostale kosmičke sisteme
- Glavni savremeni pravci modifikacije
  - $f(R)$  modifikacija
  - nelokalna modifikacija
  - neke druge modifikacije

# Glavni pravci modifikacije OTR

- OTR

$$S = \int \frac{d^4x}{16\pi G} \sqrt{-g} (R - 2\Lambda) + \int d^4x \sqrt{-g} \mathcal{L}_{materije}$$

- $f(R)$  modifikacija, gde je  $f(R)$  obično neka analitička funkcija:

$$S = \int \frac{d^4x}{16\pi G} \sqrt{-g} f(R) + \int d^4x \sqrt{-g} \mathcal{L}_{materije}$$

- Jednačina kretanja za  $f(R)$  modifikaciju

$$f'(R)R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}f(R)g_{\mu\nu} - [\nabla_\mu \nabla_\nu - g_{\mu\nu} \square] f'(R) = \kappa T_{\mu\nu}$$
$$\square = -\partial_t^2 - 3H(t)\partial_t$$

# Glavni pravci modifikacije OTR

- Nelokalna modifikacija
- Motivisana nelokalnošću u teoriji struna (običnoj i  $p$ -adičnoj)
- Neka relativistička teorija je nelokalna ako sadrži prostorno-vremenske izvode do beskonačnog reda preko Dalamberovog operatora  $\square = \nabla^\mu \nabla_\mu$ .

$$S = \int \frac{d^4x}{16\pi G} \sqrt{-g} F(R, \square) + \int d^4x \sqrt{-g} \mathcal{L}_{materije}$$

- Obično je veoma složena jednačina kretanja za gravitaciono polje  $g_{\mu\nu}$ , koja je generalizacija Ajnštajnovе jednačine.

# Primer nelokalno modifikovane OTR

- Dejstvo

$$S = \int d^4x \sqrt{-g} \left( \frac{R}{16\pi G} + \frac{c}{2} R \mathcal{F}(\square) R \right), \quad \mathcal{F}(\square) = \sum_{n=0}^{\infty} f_n \square^n.$$

- Jednačina kretanja za  $g_{\mu\nu}$

$$(1 + 16\pi G c \mathcal{F}(\square) R) G_{\mu\nu} = 4\pi G c \sum_{n=1}^{+\infty} f_n \sum_{l=0}^{n-1} (\partial_\mu \square^l R \partial_\nu \square^{n-1-l} R \\ + \partial_\nu \square^l R \partial_\mu \square^{n-1-l} R - g_{\mu\nu} (g^{\rho\sigma} \partial_\rho \square^l R \partial_\sigma \square^{n-1-l} R + \square^l R \square^{n-l} R)) \\ - 4\pi G g_{\mu\nu} c R \mathcal{F}(\square) R + 16\pi G c (D_\mu \partial_\nu - g_{\mu\nu} \square) \mathcal{F}(\square) R.$$

- Ubrzano širenje svemira je opservaciona činjenica (1998).
- Većina naučnika (kosmologa-čestičara) smatra da postoji tamna energija –  $\Lambda$ CDM model.
- Važenje Ajnštajnovе teorije gravitacije na kosmološkoj skali nije dokazano – rade se modifikacije Opšte teorije relativnosti.
- $f(R)$  i nelokalna modifikacija gravitacije (kosmologija sa beskonačno mnogo izvoda) su interesantni i aktuelni pristupi kosmološkim problemima.
- Za sada ne postoji opšte prihvaćena modifikovana Ajnštajnova teorija gravitacije.
- Astrofizička i kosmološka posmatranja su u usponu, a relevantna eksperimentalna i teorijska istraživanja pred velikim izazovima.

Ima mnogo publikovanih radova i nekoliko preglednih članaka. Navodimo samo neke, a ostala literatura može se naći uglavnom u preglednim člancima.

- Neki nedavni pregledni članci

[1] T. Clifton, P. G. Ferreira, A. Padilla, C. Skordis, “Modified gravity and cosmology”, [arXiv:1106.2476v2 [astro-ph.CO]].

[2] T. P. Sotiriou, V. Faraoni, “ $f(R)$  theories of gravity”, Rev. Mod. Phys. **82** (2010) 451–497 [arXiv:0805.1726v4 [gr-qc]].

[3] S. Nojiri, S. D. Odintsov, “Unified cosmic history in modified gravity: from  $F(R)$  theory to Lorentz non-invariant models”, Phys. Rept. **505** (2011) 59–144 [arXiv:1011.0544v4 [gr-qc]].

- Neki originalni radovi o navedenom primeru nelokalne modifikacije



- Neki originalni radovi o navedenom primeru nelokalne modifikacije

[4] T. Biswas, T. Koivisto, A. Mazumdar, “Towards a resolution of the cosmological singularity in non-local higher derivative theories of gravity”, JCAP **1011** (2010) 008 [arXiv:1005.0590v2 [hep-th]].

[5] A. S. Koshelev and S. Yu. Vernov, “On bouncing solutions in non-local gravity”, [arXiv:1202.1289v1 [hep-th]].

[6] I. Dimitrijević, B. Dragovich, J. Grujić and Z. Rakić, “On modified gravity”, [arXiv:1202.2352v1 [hep-th]].