

Zašto kvantna gravitacija?

Tijana Radenković

Grupa za gravitaciju, čestice i polja, Institut za fiziku u Beogradu
u saradnji sa Zadužbinom Ilije M. Kolarca

Ciklus predavanja organizovan uz podršku Fonda za nauku
Republike Srbije, broj 7745968, „Kvantna gravitacija preko viših
gejdž teorija 2021” —QGHG-2021

24.10.2023.



Фонд за науку
Републике Србије



O čemu smo do sada pričali u okviru ovog ciklusa?

1. Zašto kvantna mehanika? - Igor Salom
2. Zašto opšta relativnost? - Danijel Obrić
3. Zašto teorija polja? - Bojan Nikolić
4. Zašto polja u krivom prostoru? - Marko Vojinović
5. Zašto kvantna gravitacija? - danas

- 1 Zašto kvantna gravitacija?
- 2 Kako kvantujemo gravitaciju?
- 3 Kvantna gravitacija na petljama
- 4 Fizičke implikacije

Zašto kvantna gravitacija?

Principi na kojima se zasniva kvantna teorija polja:

- ravno prostorvreme Minkovskog,
- zakoni održanja,
- polja su kvantni operatori,
- čestice koje se sudaraju.

Glavni rezultati iz **Opšte teorije relativnosti**:

- zakrivljenost prostorvremena,
- energija nije održana,
- gravitaciono polje nije kvantno,
- čestice nisu dobro definisan pojam.

Šta se događa ako ne kvantujemo gravitaciju?

- Polja materije su kvantovana, opisana Šredingerovom jednačinom, dok je gravitaciono polje opisano Ajnštajnovim klasičnim jednačinama

$$i\frac{\partial}{\partial t}|\Psi\rangle = \hat{H}(\hat{\phi}, g_{\mu\nu})|\Psi\rangle, \quad R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = 8\pi GT_{\mu\nu}.$$

- Tenzor energije-impulsa $T_{\mu\nu}$ na desnoj strani jednačine definišemo kao

$$T_{\mu\nu} = \langle\Psi|\hat{T}_{\mu\nu}(\hat{\psi})|\Psi\rangle.$$

- Rešavanjem Ajnštajnovih jednačina po metrici

$$g_{\mu\nu} = g_{\mu\nu}(\langle\Psi|\hat{T}|\Psi\rangle),$$

a zatim zamenom ovog rešenja natrag u Šredingerovu jednačinu, dobijamo da *Šredingerova jednačina postaje **nelinearna** po Ψ* .

KONTRADIKCIJA SA PRINCIPOM SUPERPOZICIJE!

KONTRADIKCIJA SA PRINCIPOM SUPERPOZICIJE!

- Dakle, kvantna teorija ne toleriše kuplovanje sa klasičnom teorijom - *sva polja u prirodi moraju biti kvantovana!*

KONTRADIKCIJA SA PRINCIPOM SUPERPOZICIJE!

- Dakle, kvantna teorija ne toleriše kuplovanje sa klasičnom teorijom - *sva polja u prirodi moraju biti kvantovana!*

Moramo da napravimo izbor

- ▶ ili da odustanemo od principa superpozicije u prirodi,

KONTRADIKCIJA SA PRINCIPOM SUPERPOZICIJE!

- Dakle, kvantna teorija ne toleriše kuplovanje sa klasičnom teorijom - *sva polja u prirodi moraju biti kvantovana!*

Moramo da napravimo izbor

- ▶ ili da odustanemo od principa superpozicije u prirodi,

- ▶ ili da odustanemo od klasičnog opisa gravitacije, tj. da kvantujemo gravitaciono polje $g_{\mu\nu} \rightarrow \hat{g}_{\mu\nu}$.

KONTRADIKCIJA SA PRINCIPOM SUPERPOZICIJE!

- Dakle, kvantna teorija ne toleriše kuplovanje sa klasičnom teorijom - *sva polja u prirodi moraju biti kvantovana!*

Moramo da napravimo izbor

- ▶ ili da odustanemo od principa superpozicije u prirodi,
 \implies Nelinearna kvantna mehanika: teorije objektivnog kolapsa, ...
- ▶ ili da odustanemo od klasičnog opisa gravitacije, tj. da kvantujemo gravitaciono polje $g_{\mu\nu} \rightarrow \hat{g}_{\mu\nu}$.

KONTRADIKCIJA SA PRINCIPOM SUPERPOZICIJE!

- Dakle, kvantna teorija ne toleriše kuplovanje sa klasičnom teorijom - *sva polja u prirodi moraju biti kvantovana!*

Moramo da napravimo izbor

- ▶ ili da odustanemo od principa superpozicije u prirodi,
 - ⇒ Nelinearna kvantna mehanika: teorije objektivnog kolapsa, ...
- ▶ ili da odustanemo od klasičnog opisa gravitacije, tj. da kvantujemo gravitaciono polje $g_{\mu\nu} \rightarrow \hat{g}_{\mu\nu}$.
 - ⇒ Zoološki vrt kvantne gravitacije: kvantna gravitacija na petljama, teorija struna, modeli spinske pene, diskretni kauzalni skupovi, kauzalne dinamičke triangulacije, nekomutativna geometrija, asimptotska sigurnost, entropička gravitacija, dupla specijalna relativnost...



Kako kvantujemo gravitaciju?

Kako kvantujemo gravitaciju?

- Opšta teorija relativnosti je **nerenormalizabilna**.
 - ▶ Normalizacija i renormalizacija su tehnike kojima se beskonačnosti u teoriji drže pod kontrolom,

Kako kvantujemo gravitaciju?

- Opšta teorija relativnosti je **nerenormalizabilna**.
 - ▶ Normalizacija i renormalizacija su tehnike kojima se beskonačnosti u teoriji drže pod kontrolom,
 - ▶ glavni izvor beskonačnosti u KTP je propagator

$$G(x, y) = \frac{const}{|(x - y)^2|} \rightarrow \infty, \quad (x \rightarrow y).$$

Kako kvantujemo gravitaciju?

- Opšta teorija relativnosti je **nerenormalizabilna**.
 - ▶ Normalizacija i renormalizacija su tehnike kojima se beskonačnosti u teoriji drže pod kontrolom,
 - ▶ glavni izvor beskonačnosti u KTP je propagator

$$G(x, y) = \frac{const}{|(x - y)^2|} \rightarrow \infty, \quad (x \rightarrow y).$$

Opet, moramo da napravimo izbor

- ▶ ili da odustanemo od opšte relativnosti u korist neke renormalizabilne teorije,

Kako kvantujemo gravitaciju?

- Opšta teorija relativnosti je **nerenormalizabilna**.
 - ▶ Normalizacija i renormalizacija su tehnike kojima se beskonačnosti u teoriji drže pod kontrolom,
 - ▶ glavni izvor beskonačnosti u KTP je propagator

$$G(x, y) = \frac{const}{|(x - y)^2|} \rightarrow \infty, \quad (x \rightarrow y).$$

Opet, moramo da napravimo izbor

- ▶ ili da odustanemo od opšte relativnosti u korist neke renormalizabilne teorije,
- ▶ ili da odustanemo od prostorvremena kao glatke mnogostrukosti, u korist neke druge strukture.

Kako kvantujemo gravitaciju?

- Opšta teorija relativnosti je **nerenormalizabilna**.
 - ▶ Normalizacija i renormalizacija su tehnike kojima se beskonačnosti u teoriji drže pod kontrolom,
 - ▶ glavni izvor beskonačnosti u KTP je propagator

$$G(x, y) = \frac{const}{|(x - y)^2|} \rightarrow \infty, \quad (x \rightarrow y).$$

Opet, moramo da napravimo izbor

- ▶ ili da odustanemo od opšte relativnosti u korist neke renormalizabilne teorije,
 - ⇒ Promena dinamike gravitacionog polja.
- ▶ ili da odustanemo od prostorvremena kao glatke mnogostrukosti, u korist neke druge strukture

Kako kvantujemo gravitaciju?

- Opšta teorija relativnosti je **nerenormalizabilna**.
 - ▶ Normalizacija i renormalizacija su tehnike kojima se beskonačnosti u teoriji drže pod kontrolom,
 - ▶ glavni izvor beskonačnosti u KTP je propagator

$$G(x, y) = \frac{\text{const}}{|(x - y)^2|} \rightarrow \infty, \quad (x \rightarrow y).$$

Opet, moramo da napravimo izbor

- ▶ ili da odustanemo od opšte relativnosti u korist neke renormalizabilne teorije,

⇒ Promena dinamike gravitacionog polja.

- ▶ ili da odustanemo od prostorvremena kao glatke mnogostrukosti, u korist neke druge strukture

⇒ Promena kinematike gravitacije, tj. strukture prostorvremena.

U oba slučaja ima **mного** predloženih teorija.

- promena dinamike

U oba slučaja ima **mnogo** predloženih teorija.

- promena dinamike

teorija	razlika u odnosu na OTR
Supergravitacija	lokalna super-Poentareova simetrija
Asimptotska sigurnost	netrivijalna fiksna tačka
R^2 -gravitacija	renormalizabilna (Stelle, 1977)
$f(R)$ -gravitacija	nepolinomijalna po skalarnoj krivini
Dupla specijalna relativnost	deformisana lokalna simetrija
Gravitacija sa torzijom	novi stepeni slobode (tordioni)

- promena kinematike

U oba slučaja ima **mnogo** predloženih teorija.

■ promena dinamike

teorija	razlika u odnosu na OTR
Supergravitacija	lokalna super-Poentareova simetrija
Asimptotska sigurnost	netrivijalna fiksna tačka
R^2 -gravitacija	renormalizabilna (Stelle, 1977)
$f(R)$ -gravitacija	nepolinomijalna po skalarnoj krivini
Dupla specijalna relativnost	deformisana lokalna simetrija
Gravitacija sa torzijom	novi stepeni slobode (tordioni)

■ promena kinematike

teorija	glatko prostorvreme zamenjuje
Teorija struna	prostor zatvorenih petlji
Nekomutativna geometrija	nekomutativna mnogostrukost
Kvantna gravitacija na petljama	spinske mreže \times vreme
Modeli spinske pene	mногоstrukost "twisted" geometrije
Kauzalne dinamičke triangulacije	deo-po-deo ravna mnogostrukost
Teorija kauzalnih skupova	skup sa relacijom kauzalnog poretka



Kvantna gravitacija na petljama

- **Kvantna gravitacija na petljama** je pristup kvantovanju gravitacije star trideset godina, započet Aštekarovim radom 1986. godine.

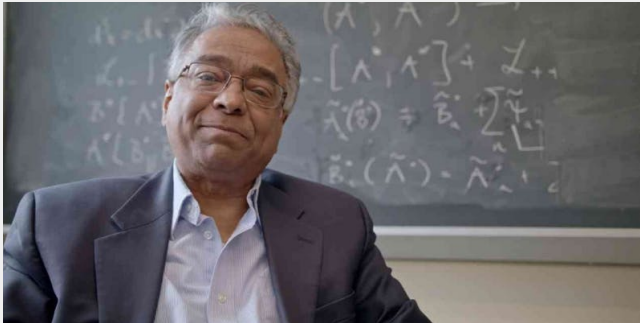


Figure: A. Aštekar (rođen 1949), indijski teorijski fizičar.

- **Kvantna gravitacija na petljama** je pristup kvantovanju gravitacije star trideset godina, započet Aštekarovim radom 1986. godine.
 - ▶ U Aštekarovoj formulaciji Ajnštajnovne teorije relativnosti rešenja u formi Vilsonovih petlji.
 - ▶ To je otvorilo put ka kvantovanju gravitacije posmatranjem algebre zasnovane na *holonomijama gravitacione koneksije*.
 - ▶ Teorija nastala kao pokušaj da se u prividnom neskladu između dva stuba moderne teorijske fizike - kvantne teorije i OTR pronađe dublji sklad.
 - ▶ Kvantna stanja su grafovi, koji se dobijaju presecanjem većeg broja Vilsonovih petlji (lanac u jednoj dimenziji).
 - ▶ Rezultujući objekti se zovu spinske mreže.
 - ▶ Prostor i vreme tada dobijaju ćelijsku strukturu (poput mehurova sapunice, eng. *spinfoam*).

Kvantna gravitacija na petljama

- Teorija je nezavisna od pozadine, stanje petlje je relevantno samo u odnosu na druge petlje i infinitezimalni pomeraj petlje ne proizvodi novo stanje.
- Prostorvreme nije neka kutija u kojoj se dešavaju fizičke pojave, već je aktivni učesnik.

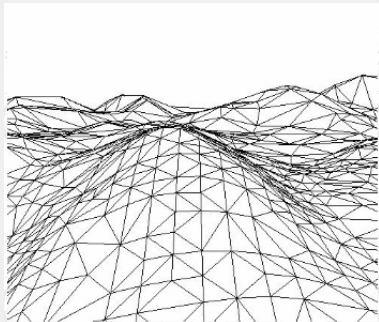
"Svet je sačinjen od polja. Fizički, ona ne žive na prostorvremenu. Ona žive, da se izrazimo tako, jedna na drugima. Nema više polja na prostorvremenu, samo polja na poljima." – K. Roveli.



Kvantna gravitacija na petljama

*U OTR pretpostavljamo da je prostorvreme **glatko**, tj. da uvek postoji još manje rastojanje, dok u Kvantnoj gravitaciji na petljama ne postoji beskonačno malo rastojanje.*

⇒ Nije samo materija kvantna, već i prostorvreme!



Postoji kvant prostorvremena!

- ▶ Kako je naše prostorvreme četvorodimenzionalno, kao osnovnu jedinicu imamo 4-simpleks.
- ▶ Važno je ne mešati ovu diskretizaciju geometrije, činjenicu su površina i zapremina kvantovani, sa diskretizacijom prostora triangulacijom.
- ▶ Prvi je analog činjenice da energija moda elektromagnetnog polja dolazi u diskretnim kvantima. *To je kvantni fenomen.*
- ▶ Drugi je analogno činjenici da je zgodno razložiti polje na diskretne modove i proučavati jedan po jedan mod.
- ▶ Geometrija nije diskretna jer smo se fokusirali na tetraedar: kvantna priroda prostorvremena manifestuje se tako što dužine, površine, zapremine ovih "atoma" prostorvremena imaju određen **diskretan spektar** vrednosti.

Kvantna diskretizacija geometrije je određena spektralnim svojstvima površine i zapremine.

Geometrija ne može biti oštra na Plankovoj skali, u istom smislu u kojem tri komponente ugaonog momenta nikada ne mogu biti sve određene.



- U svakom pravom kvantnom stanju postojaće neozastavna "kvantna zamrljanost" geometrije
 - nije moguće imati sve dihedralne uglove, sve oblasti, i sve dužine oštro određene.
- Geometrija je "fuzzy" na Plankovoj skali.

Fizičke implikacije

Veliki prasak i druge singularnosti

- Opšte prihvaćeno verovanje u fizici je da je pojava **singularnosti** u teoriji, kao što je Veliki prasak u OTR, znak da se teorija primenjuje van domena svoje validnosti.
- Jedna od najznačajnijih implikacija u kosmologiji koja se dobije kao rezultat primene kvantne gravitacije na petljama je da Veliki prasak koji se u klasičnoj teoriji gravitacije dobije za početni trenutak nije bio početak.
- Ono što dobijamo kao rešenje je da je njemu prethodilo *Veliko sažimanje*.
- Pozitivna kosmološka konstantna nam pokazuje da nemamo ciklični univerzum, koji će da se sažima i širi periodično – pošto se kosmos širi ubrzano zaključujemo da se on više neće sažimati.
- *Big Bounce* se dakle ne dešava ciklično već se desio pre ovog odskoka.

Entropija crne rupe



Figure: Slika Sgr A*, supermasivne crne rupe u centru naše galaksije (EHT Collaboration)

Entropija crne rupe

- Hoking pokazuje ono što je Bekenštajn pre njega predvideo, da crna rupa zrači kao crno telo temperature:

$$T = \frac{\hbar c^3}{k8\pi GM}.$$

- Entropija crne rupe je:

$$S_{BH} = \frac{kc^3}{4\hbar G}A.$$

- ***Ova formula dobija se i u Kvantnoj gravitaciji na petljama, prebrojavanjem kvantno-geometrijskih stanja!***
 - ▶ Entropija je konačna i proporcionalna je A, pod uslovom da je konstanta Barbero–Immirzi izabrana na određeni način.

Zaključak

- Teorija kvantne gravitacije bi trebalo da pomiri dve velike teorije - kvantnu mehaniku i Opštu teoriju relativnosti.
- Cilj je da se razreše protivrečnosti koje su postojale u dosadašnjem opisu i objasnimo pojave u režimu u kojem i Opšta relativnost i kvantna mehanika igraju ulogu – odnosno da dobijemo bolji opis prirode od onog koji smo imali.
- Mnogo kandidata za teoriju, ali na današnjem nivou razvoja tehnologije ne postoji perspektiva da ćemo u bliskoj budućnosti moći da eksperimentalno proverimo ove teorije.
- Ono što možemo je da insistiramo da teorija bude koherentna, matematički konzistentna i rigorozno definisana, kako bismo izbegli bilo kakve paradokse i protivrečnosti.

Hvala na pažnji!

Ciklus predavanja organizovan uz podršku Fonda za nauku Republike Srbije, broj 7745968, „Kvantna gravitacija preko viših gejdž teorija 2021” — QGHG-2021.

