

КВАНТНА ГРАВИТАЦИЈА: ШТА, КАКО и ЗАШТО

Марко Војиновић
Институт за физику, Универзитет у Београду

ТЕМЕ

- Зашто квантујемо гравитацију?
- Како да квантујемо гравитацију?
- Шта је “spacetime emergence”?
- Пример модела квантне гравитације

ЗАШТО КВАНТУЈЕМО ГРАВИТАЦИЈУ?

Шта се догађа ако не квантујемо гравитацију:

- Поља материје су квантована, описана неком једначином попут Шредингерове, док је гравитација описана класичним Ајнштајновим једначинама:

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

ЗАШТО КВАНТУЈЕМО ГРАВИТАЦИЈУ?

Шта се догађа ако не квантујемо гравитацију:

- Поља материје су квантована, описана неком једначином попут Шредингерове, док је гравитација описана класичним Ајнштајновим једначинама:

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

- Да бисмо разумели шта је $T_{\mu\nu}$ на десној страни једначине, дефинишемо

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

затим “решимо” Ајнштајнове једначине по метрици

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

коју онда заменимо натраг у Шредингерову једначину. Као последица, Шредингерова једначина постаје **нелинеарна по $|\Psi\rangle$** !

ЗАШТО КВАНТУЈЕМО ГРАВИТАЦИЈУ?

Шта се догађа ако не квантујемо гравитацију:

- Поља материје су квантована, описана неком једначином попут Шредингерове, док је гравитација описана класичним Ајнштајновим једначинама:

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

- Да бисмо разумели шта је $T_{\mu\nu}$ на десној страни једначине, дефинишемо

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

затим “решимо” Ајнштајнове једначине по метрици

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

коју онда заменимо натраг у Шредингерову једначину. Као последица, Шредингерово једначина постаје **нелинеарна по $|\Psi\rangle$!**

КОНТРАДИКЦИЈА СА ПРИНЦИПОМ СУПЕРПОЗИЦИЈЕ !!!

ЗАШТО КВАНТУЈЕМО ГРАВИТАЦИЈУ?

Дакле, квантна теорија не толерише купловање са класичном теоријом — сва поља у природи морају бити квантована!

Морамо да направимо избор:

- или да одустанемо од принципа суперпозиције у квантној теорији,
- или да одустанемо од класичног описа гравитације, тј. да је квантујемо:
 $g_{\mu\nu} \rightarrow \hat{g}_{\mu\nu}$.

ЗАШТО КВАНТУЈЕМО ГРАВИТАЦИЈУ?

Дакле, квантна теорија не толерише купловање са класичном теоријом — сва поља у природи морају бити квантована!

Морамо да направимо избор:

- или да одустанемо од принципа суперпозиције у квантној теорији,
⇒ **нелинеарна КМ**: теорије објективног колапса, и слични приступи...
(Ghirardi-Rimini-Weber, David Albert, Roger Penrose, ...)
- или да одустанемо од класичног описа гравитације, тј. да је квантујемо:
 $g_{\mu\nu} \rightarrow \hat{g}_{\mu\nu}$.

ЗАШТО КВАНТУЈЕМО ГРАВИТАЦИЈУ?

Дакле, квантна теорија не толерише купловање са класичном теоријом — сва поља у природи морају бити квантована!

Морамо да направимо избор:

- или да одустанемо од принципа суперпозиције у квантној теорији,
⇒ **нелинеарна КМ**: теорије објективног колапса, и слични приступи...
(Ghirardi-Rimini-Weber, David Albert, Roger Penrose, ...)
- или да одустанемо од класичног описа гравитације, тј. да је квантујемо:
 $g_{\mu\nu} \rightarrow \hat{g}_{\mu\nu}$.
⇒ **зоолошки врт КГ**: теорија суперструна, квантна гравитација на петљама, модели спинске пене, дискретни каузални скупови, каузалне динамичке триангулације, некомутативна геометрија, асимптотска сигурност, ентропичка гравитација, Нођава-Lifshitz модел, дупла специјална релативност, ...
(већина истраживача из области гравитације...)

КАКО КВАНТУЈЕМО ГРАВИТАЦИЈУ?

Општа теорија релативности је неренормализабилна.

- нормализација и ренормализација су технике да се бесконачности “држе под контролом” ,
- а главни преовлађујући извор бесконачности у КТП је пропагатор:

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

КАКО КВАНТУЈЕМО ГРАВИТАЦИЈУ?

Општа теорија релативности је неренормализабилна.

- нормализација и ренормализација су технике да се бесконачности “држе под контролом”,
- а главни преовлађујући извор бесконачности у КТП је пропагатор:

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

Поново, треба да направимо избор:

- или да одустанемо од опште релативности у корист неке ренормализабилне теорије,
⇒ промена динамике гравитационог поља,

КАКО КВАНТУЈЕМО ГРАВИТАЦИЈУ?

Општа теорија релативности је неренормализабилна.

- нормализација и ренормализација су технике да се бесконачности “држе под контролом”,
- а главни преовлађујући извор бесконачности у КТП је пропагатор:

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

Поново, треба да направимо избор:

- или да одустанемо од опште релативности у корист неке ренормализабилне теорије,
⇒ промена динамике гравитационог поља,
- или да одустанемо од просторвремена као глатке многострукости, у корист неке друге структуре која може да “припитоми” лимес $y \rightarrow x$,
⇒ промена кинематике тј. структуре просторвремена.

КАКО КВАНТУЈЕМО ГРАВИТАЦИЈУ?

У оба случаја, имамо прегршт могућих избора:

- промена динамике —

теорија:	разлика у односу на ОТР:
Супергравитација	локална супер-Поенкареова симетрија
Асимптотска сигурност	нетривијална фиксна тачка
R^2 -гравитација	ренормализабилна (Stelle, 1977)
$f(R)$ гравитација	неполиномијална по скаларној кривини
Дупла специјална релативност	деформисана локална Поенкареова симетрија
Гравитација са торзијом	додатни степени слободе (тордиони)

КАКО КВАНТУЈЕМО ГРАВИТАЦИЈУ?

У оба случаја, имамо прегршт могућих избора:

- промена динамике —

теорија:	разлика у односу на ОТР:
Супергравитација	локална супер-Поенкареова симетрија
Асимптотска сигурност	нетривијална фиксна тачка
R^2 -гравитација	ренормализабилна (Stelle, 1977)
$f(R)$ гравитација	неполиномијална по скаларној кривини
Дупла специјална релативност	деформисана локална Поенкареова симетрија
Гравитација са торзијом	додатни степени слободе (тордиони)

- промена кинематике —

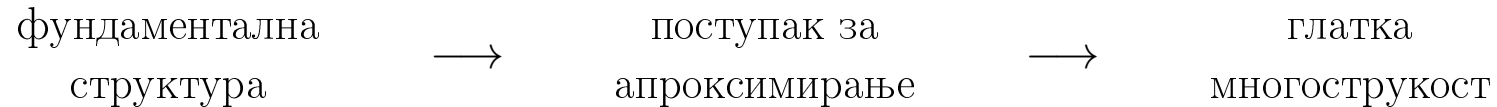
теорија:	глатко просторвреме замењује:
Теорија струна	простор затворених петљи
Некомутативна геометрија	некомутативна многострукост
Квантна гравитација на петљама	спинске мреже \times време
Модели спинске пене	многострукост “twisted” геометрије
Каузалне динамичке триангулације	део-по-део равна многострукост
Теорија каузалних скупова	коначан скуп са релацијом каузалног поретка

ШТА ЈЕ “SPACETIME EMERGENCE”?

Рецепт за апроксимирање фундаменталне структуре просторвре-
мена до глатке многострукости:

- постоји у свим моделима КГ који мењају кинематику,
- намеће се због захтева семикласичног лимеса модела КГ.

Класично просторвреме “извире” према следећој шеми:

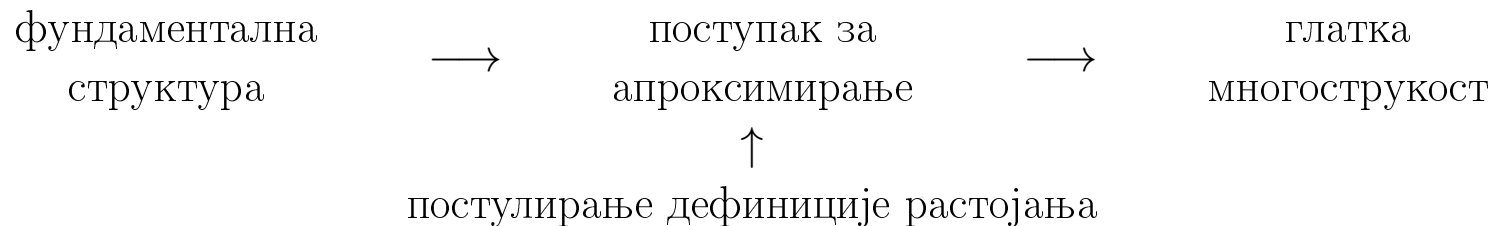


ШТА ЈЕ “SPACETIME EMERGENCE”?

Рецепт за апроксимирање фундаменталне структуре просторвре-
мена до глатке многострукости:

- постоји у свим моделима КГ који мењају кинематику,
- намеће се због захтева семикласичног лимеса модела КГ.

Класично просторвреме “извире” према следећој шеми:

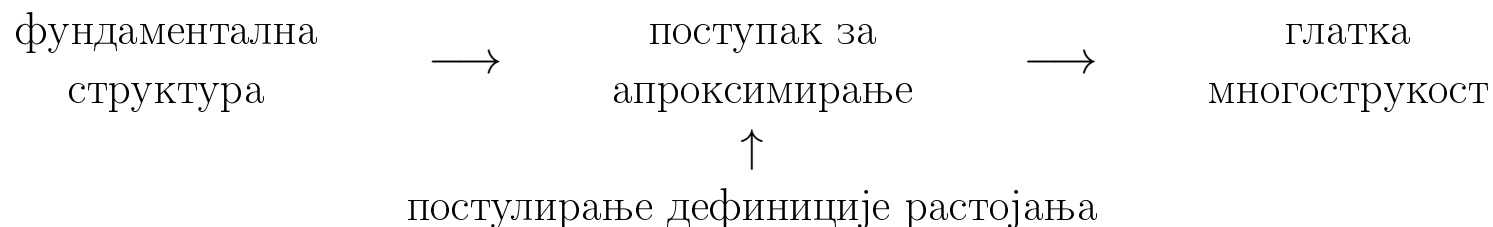


ШТА ЈЕ “SPACETIME EMERGENCE”?

Рецепт за апроксимирање фундаменталне структуре просторвремена до глатке многострукости:

- постоји у свим моделима КГ који мењају кинематику,
- намеће се због захтева семикласичног лимеса модела КГ.

Класично просторвреме “извире” према следећој шеми:



Нема ничега аутоматског, чудесног или мистичног око тог “извирања”:

ПРОСТОРВРЕМЕ ИЗВИРЕ ПО КОНСТРУКЦИЈИ !!!

ПРИМЕР МОДЕЛА КГ

Један приступ конструкцији модела КГ има следеће кораке:

- задамо математичку структуру \mathcal{M} која игра улогу просторвремена,

ПРИМЕР МОДЕЛА КГ

Један приступ конструкцији модела КГ има следеће кораке:

- задамо математичку структуру \mathcal{M} која игра улогу **просторвремена**,
- на тој структури задамо **поља** $g : \mathcal{M} \rightarrow \mathbb{R}^n$ и $\phi : \mathcal{M} \rightarrow \mathbb{R}^m$ придружена степенима слободе гравитације односно материје,

ПРИМЕР МОДЕЛА КГ

Један приступ конструкцији модела КГ има следеће кораке:

- задамо математичку структуру \mathcal{M} која игра улогу **просторвремена**,
- на тој структури задамо **поља** $g : \mathcal{M} \rightarrow \mathbb{R}^n$ и $\phi : \mathcal{M} \rightarrow \mathbb{R}^m$ придружена степенима слободе гравитације односно материје,
- за та поља задамо **дејство** $S[g, \phi]$ које описује њихову динамику,

ПРИМЕР МОДЕЛА КГ

Један приступ конструкцији модела КГ има следеће кораке:

- задамо математичку структуру \mathcal{M} која игра улогу **просторвремена**,
- на тој структури задамо **поља** $g : \mathcal{M} \rightarrow \mathbb{R}^n$ и $\phi : \mathcal{M} \rightarrow \mathbb{R}^m$ придружена степенима слободе гравитације односно материје,
- за та поља задамо **дејство** $S[g, \phi]$ које описује њихову динамику,
- помоћу тог дејства дефинишемо интеграл по путањама и очекиване вредности опсервабли,

$$Z = \int \mathcal{D}g \int \mathcal{D}\phi e^{iS[g, \phi]}, \quad \langle \hat{A} \rangle = \int_{|\Psi\rangle} \mathcal{D}g \int_{|\Psi\rangle} \mathcal{D}\phi A(g, \phi) e^{iS[g, \phi]}.$$

ПРИМЕР МОДЕЛА КГ

Један приступ конструкцији модела КГ има следеће кораке:

- задамо математичку структуру \mathcal{M} која игра улогу **просторвремена**,
- на тој структури задамо **поља** $g : \mathcal{M} \rightarrow \mathbb{R}^n$ и $\phi : \mathcal{M} \rightarrow \mathbb{R}^m$ придружена степенима слободе гравитације односно материје,
- за та поља задамо **дејство** $S[g, \phi]$ које описује њихову динамику,
- помоћу тог дејства дефинишемо интеграл по путањама и очекиване вредности опсервабли,

$$Z = \int \mathcal{D}g \int \mathcal{D}\phi e^{iS[g, \phi]}, \quad \langle \hat{A} \rangle = \int_{|\Psi\rangle} \mathcal{D}g \int_{|\Psi\rangle} \mathcal{D}\phi A(g, \phi) e^{iS[g, \phi]}.$$

На ту структуру намећемо два захтева:

- очекиване вредности свих опсервабли морају бити **коначне**,
- у семикласичном лимесу теорија мора да се сведе на **општу релативност**.

ПРИМЕР МОДЕЛА КГ

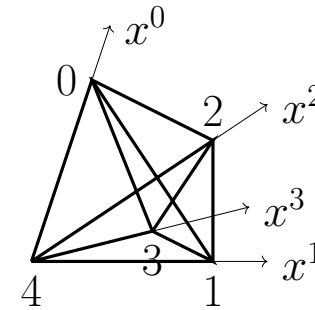
На пример, у spincube моделу КГ:

- просторвреме \mathcal{M} задајемо као **део-по-део равну многострукост**,
- гравитационо поље описујемо дужинама ивица $l_\epsilon \in \mathbb{R}^+$ у \mathcal{M} , а скаларно поље његовом вредношћу $\phi_v \in \mathbb{R}$ у теменима од \mathcal{M} ,
- дејство $S[l, \phi]$ задајемо дискретизацијом Ајнштајн-Хилбертовог дејства (тзв. Реџе дејство) куплованог са дискретизованим дејством скаларног поља,

$$S[l, \phi] = -\frac{1}{8\pi l_p^2} \sum_{\Delta \in \mathcal{M}} A_\Delta(l) \delta_\Delta(l) + \frac{1}{2} \sum_{\sigma \in \mathcal{M}} {}^{(4)}V_\sigma(l) g_{(\sigma)}^{\mu\nu}(l) \partial\varphi_\mu \partial\varphi_\nu + \frac{1}{2} \sum_{v \in \mathcal{M}} {}^{(4)}V_v^*(l) [m^2 \varphi_v^2 + U(\varphi_v)] ,$$

где су

$$g_{\mu\nu}^{(\sigma)}(l) \equiv \frac{l_{\mu 4}^2 + l_{\nu 4}^2 - l_{\mu\nu}^2}{2l_{\mu 4}l_{\nu 4}} , \quad \partial\varphi_\mu \equiv \frac{\varphi_\mu - \varphi_4}{l_{\mu 4}} .$$



ПРИМЕР МОДЕЛА КГ

- триангулација омогућава да интеграл по путањама дефинишемо преко коначно много обичних интеграла,

$$Z = \int \prod_{\epsilon \in \mathcal{M}} dl_\epsilon \mu(l) \int \prod_{v \in \mathcal{M}} d\varphi_v e^{iS[l, \varphi]},$$

где је мера гравитационог интеграла по путањама задата као

$$\mu(l) \equiv \exp \left(-\frac{1}{L_\mu^4} \sum_{\sigma \in \mathcal{M}} {}^{(4)}V_\sigma(l) \right),$$

- и коначно, може се показати да спинкуб модел задовољава услове коначности и семикласичног лимеса, решавањем непертурбативне једначине за ефективно дејство:

$$\exp(i\Gamma[\phi]) = \int \mathcal{D}\varphi \exp \left(iS[\phi + \varphi] - i \int d^4x \Gamma'[\phi] \cdot \varphi \right).$$

ЗАКЉУЧЦИ

- **Зашто квантовати гравитацију?**

Зато што иначе имамо проблема са принципом суперпозиције.

- **Како квантовати гравитацију?**

Пошто је општа релативност неренормализабилна теорија, морамо да променимо или динамику теорије, или структуру просторвремена, или оба.

- **Шта је “извирање просторвремена” (spacetime emergence)?**

То је особина теорије да се фундаментална структура просторвремена у семикласичном лимесу може апроксимирати глатком многострукошћу.

- **Да ли постоје примери конкретних модела квантне гравитације?**

Постоји их много, и сви су врло компликовани!

ХВАЛА!