

Asymptotically Safe Quantum Gravity

Antônio D. Pereira

Universidade Federal Fluminense & Radboud University

XVIII Brazilian School of Cosmology and Gravitation - Lectures 1 & 2



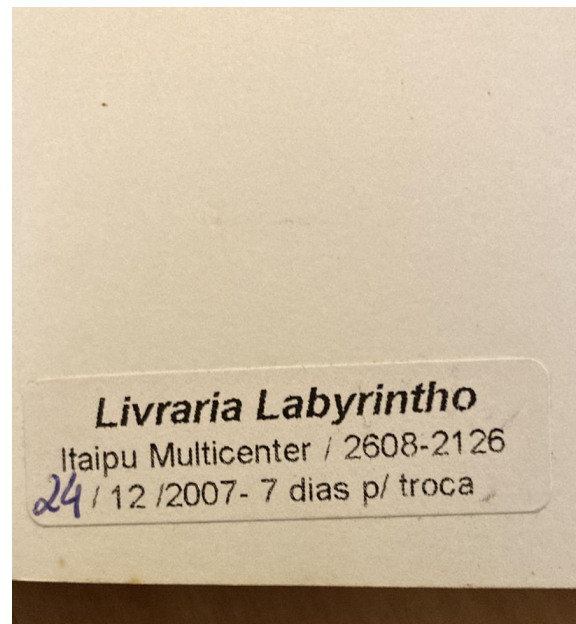
INSTITUTO DE FÍSICA
Universidade Federal Fluminense

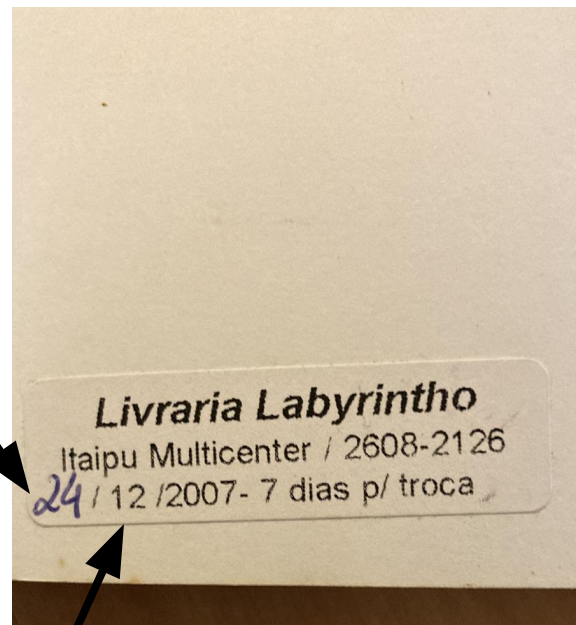


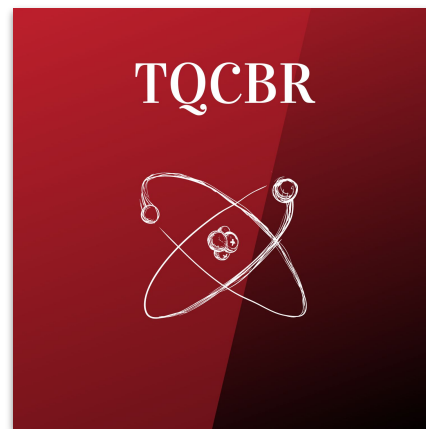


O QUE É COSMOLOGIA?
A REVOLUÇÃO DO PENSAMENTO COSMOLÓGICO
MÁRIO NOVELLO

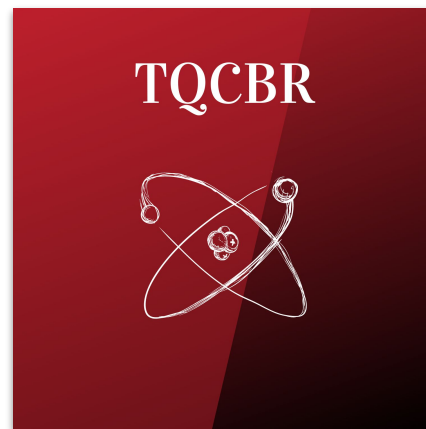
JORGE ZAHAR EDITOR







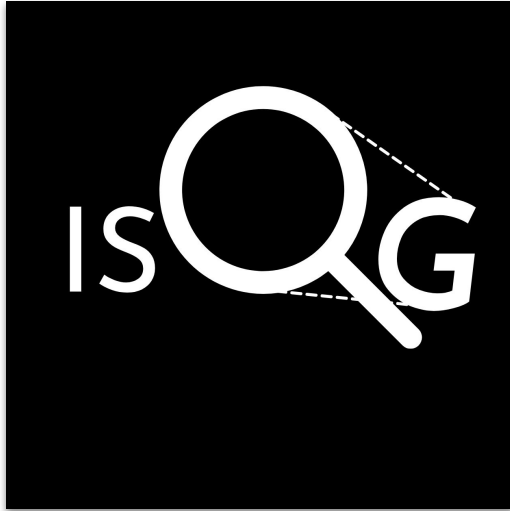
Em colaboração com Dr.
Igor Justo e Prof. Rodrigo
Sobreiro



Em colaboração com Dr.
Igor Justo e Prof. Rodrigo
Sobreiro

Caso queira participar das atividades, envie um e-mail para adpjunior@id.uff.br

International Society for Quantum Gravity



<https://isqg.org/>

Founding Committee Members:

Jan de Boer, Bianca Dittrich, [Antonio D. Pereira](#), Astrid Eichhorn, Steve Giddings, Steffen Gielen, Stefano Liberati, Etera Livine, Daniele Oriti, Kyriakos Papadodimas, Mairi Sakellariadou, Sumati Surya, Herman Verlinde

Façam perguntas! ;)

Outline

- O que sabemos sobre as interações fundamentais?
- Relatividade Geral Quântica
- Teorias fundamentais: liberdade e segurança assintótica
- Gravidade Quântica Assintoticamente Segura
- Inclusão de matéria
- Conclusões

O que sabemos sobre as interações fundamentais?

Nosso entendimento atual: 4 interações fundamentais

Gravitacional

Relatividade Geral

interação gravitacional ~
geometria do espaço-tempo

Eletromagnética
Nuclear fraca
Nuclear forte

Modelo Padrão de
Física de Partículas

teoria quântica de campos

Teorias muito bem-sucedidas!

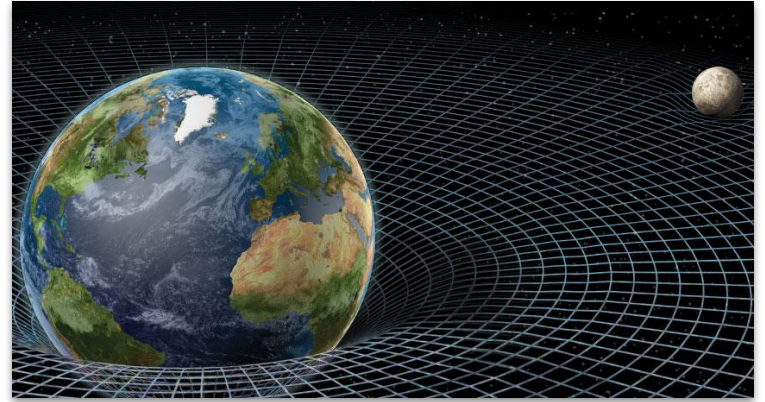
LHC,
LIGO-VIRGO,
EHT,...

Relatividade Geral

Matéria e energia deformam
o espaço-tempo

Interação gravitacional Vs
Geometria do espaço-tempo

Uma das previsões mais extraordinárias
da Relatividade Geral: buracos negros!

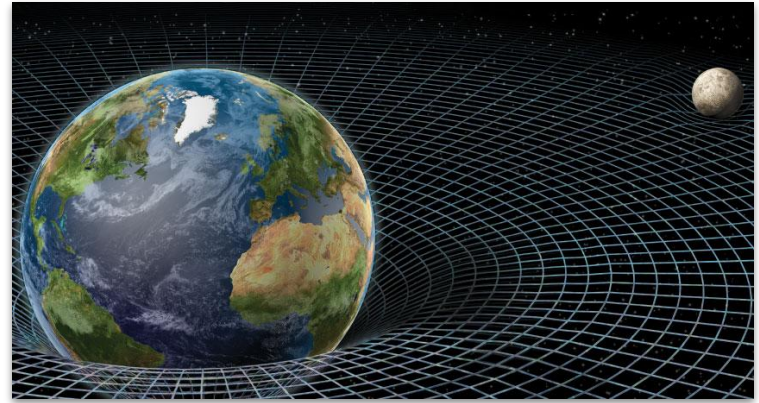


Relatividade Geral

Matéria e energia deformam
o espaço-tempo

Interação gravitacional Vs
Geometria do espaço-tempo

Uma das previsões mais extraordinárias
da Relatividade Geral: buracos negros!



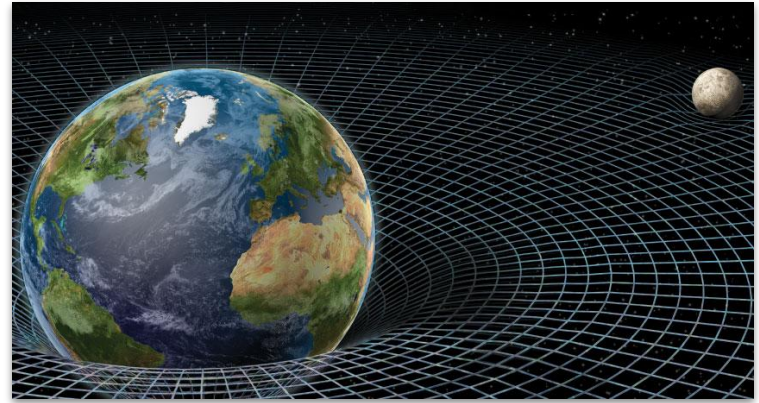
$$ds^2 = - \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r} \right) c^2 dt^2 + \frac{1}{\left(1 - \frac{2GM}{c^2 r} \right)} dr^2 + r^2 d\Omega^2$$

Relatividade Geral

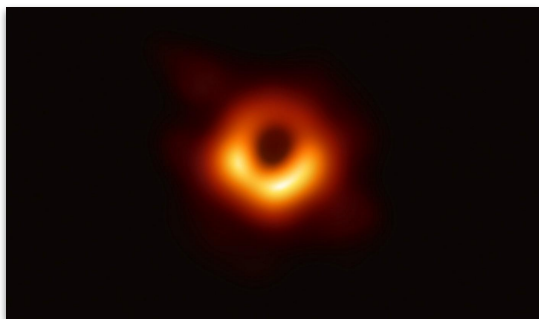
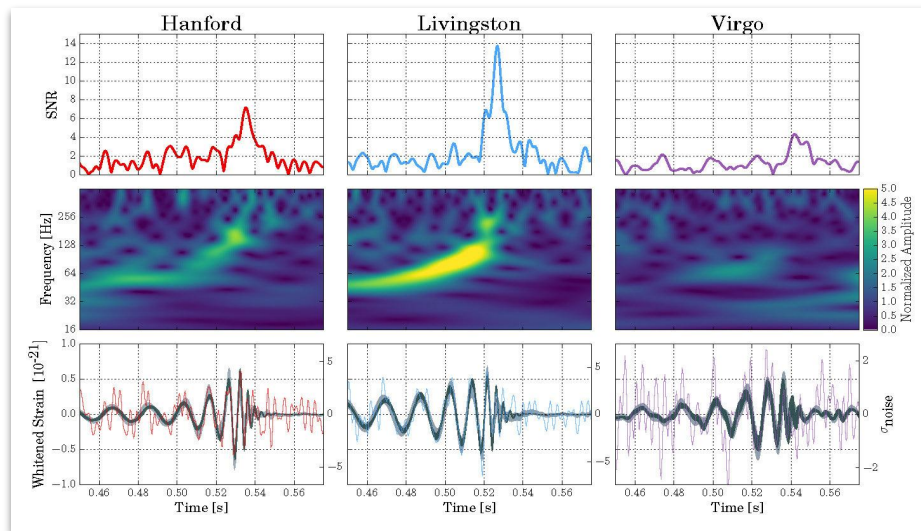
Matéria e energia deformam
o espaço-tempo

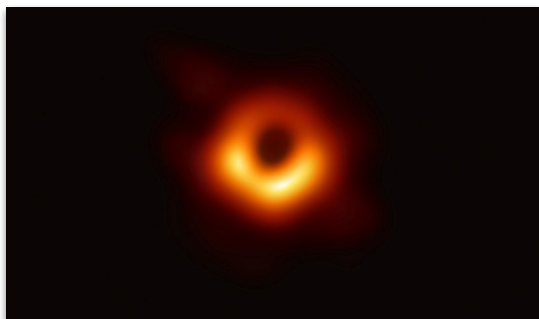
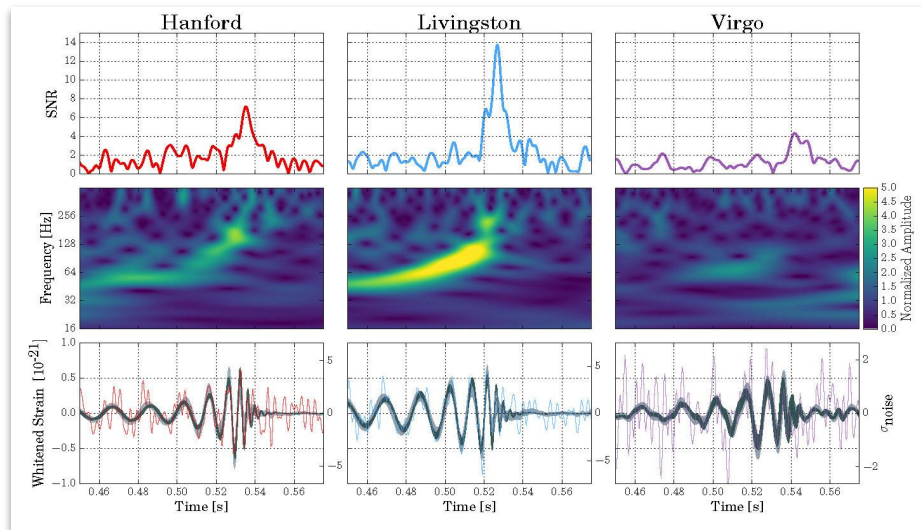
Interação gravitacional Vs
Geometria do espaço-tempo

Uma das previsões mais extraordinárias
da Relatividade Geral: buracos negros!



$$ds^2 = - \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r}\right) c^2 dt^2 - \frac{1}{\left(1 - \frac{2GM}{c^2 r}\right)} dr^2 + r^2 d\Omega^2 \quad r = 0 \quad \text{singularidade!}$$





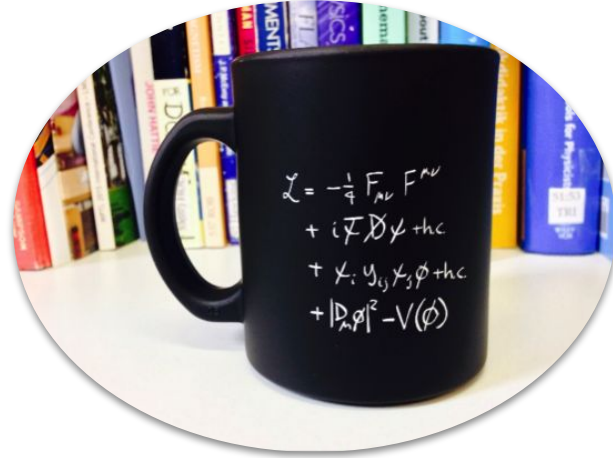
Buracos negros estão por aí!

Modelo Padrão

Teoria Quântica de Campos

Resultados típicos: INFINITO!

Renormalização perturbativa

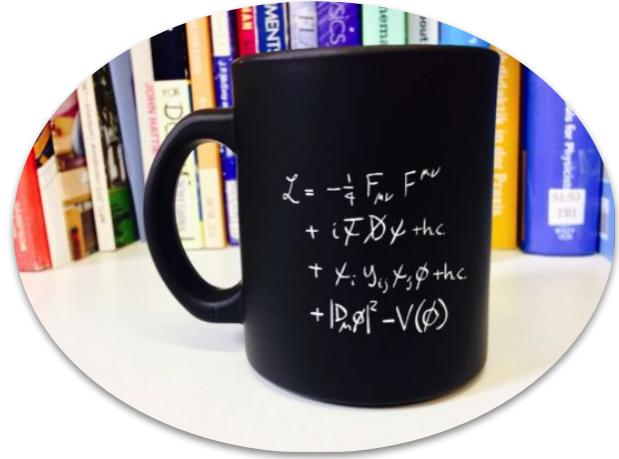


Modelo Padrão

Teoria Quântica de Campos

Resultados típicos: INFINITO!

Renormalização perturbativa



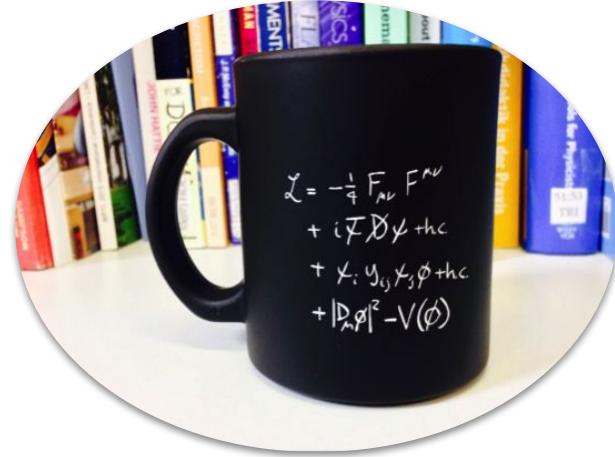
$$\int_0^\infty p dp \longrightarrow \int_0^\Lambda p dp$$

Modelo Padrão

Teoria Quântica de Campos

Resultados típicos: INFINITO!

Renormalização perturbativa



$$\int_0^\infty p dp \longrightarrow \int_0^\Lambda p dp$$

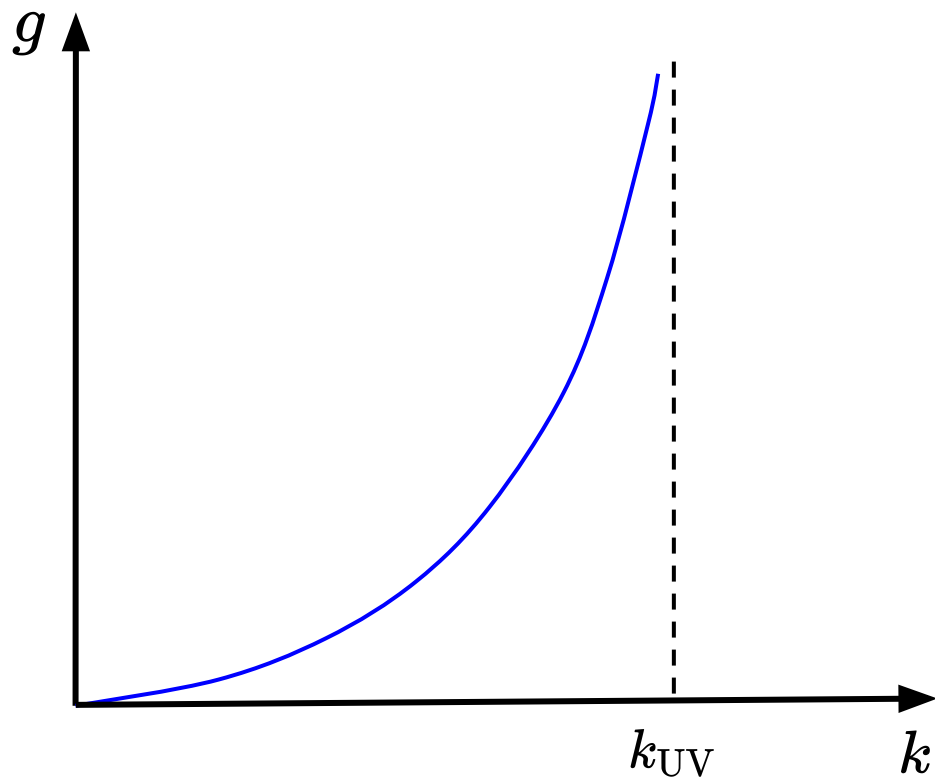
Eliminação dos infinitos
demanda a redefinição dos
parâmetros que medem a
intensidade das interações

Nem sempre possível: teoria
perturbativamente
não-renormalizável

Acoplamentos passam a
depender da escala de energia

Modelo Padrão: perturbativamente
renormalizável

Modelo Padrão: perturbativamente renormalizável



PORÉM...

Certos acoplamentos do MP divergem para valores finitos de energia

POLO DE LANDAU

Singularidades do MP

Renormalizabilidade perturbativa não é suficiente para produzir uma teoria válida em escalas arbitrariamente altas de energia

MP e RG são recortes das interações fundamentais

Campos quânticos do MP “deformam” o espaço-tempo

Partículas do MP interagem gravitacionalmente

MP e RG são recortes das interações fundamentais

Campos quânticos do MP "deformam" o espaço-tempo

Partículas do MP interagem gravitacionalmente



Combinar RG com os princípios da TQC

Construção de uma teoria de gravidade (e matéria) quântica

MP e RG são recortes das interações fundamentais

Campos quânticos do MP "deformam" o espaço-tempo

Partículas do MP interagem gravitacionalmente



Combinar RG com os princípios da TQC

Construção de uma teoria de gravidade (e matéria) quântica

Possibilidade: essa teoria quântica de gravidade e matéria resolve as singularidades da RG e do MP!

Abordagem imediata: quantizar a relatividade geral utilizando as técnicas perturbativas da teoria quântica de campos

Quantização perturbativa da Relatividade Geral

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$$

Quantização perturbativa da Relatividade Geral

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$$

Teoria não é perturbativamente renormalizável

Quantização perturbativa da Relatividade Geral

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$$

Teoria não é perturbativamente renormalizável

Em cada ordem da série perturbativa é necessário introduzir um novo parâmetro para absorver infinitos

Quantização perturbativa da Relatividade Geral

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$$

Teoria não é perturbativamente renormalizável

Em cada ordem da série perturbativa é necessário introduzir um novo parâmetro para absorver infinitos

Esses parâmetros são fixados por condições externas (experimentos)

Quantização perturbativa da Relatividade Geral

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$$

Teoria não é perturbativamente renormalizável

Em cada ordem da série perturbativa é necessário introduzir um novo parâmetro para absorver infinitos

Esses parâmetros são fixados por condições externas (experimentos)

São necessários infinitos parâmetros para “renormalizar” a teoria

Quantização perturbativa da Relatividade Geral

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$$

Teoria não é perturbativamente renormalizável

Em cada ordem da série perturbativa é necessário introduzir um novo parâmetro para absorver infinitos

Esses parâmetros são fixados por condições externas (experimentos)

São necessários infinitos parâmetros para “renormalizar” a teoria

A teoria precisa do ajuste de infinitos parâmetros - não é preditiva!

Incompatibilidade entre RG e os princípios da TQC?

Incompatibilidade entre RG e os princípios da TQC?



NÃO!

$$V(r) = -G_N \frac{m_1 m_2}{r} \left[1 - \frac{G_N (m_1 + m_2)}{2c^2 r} - \frac{122 G_N \hbar}{15 \pi c^3 r^2} \right]$$

Incompatibilidade entre RG e os princípios da TQC?



NÃO!

$$V(r) = -G_N \frac{m_1 m_2}{r} \left[1 - \frac{G_N (m_1 + m_2)}{2c^2 r} - \frac{122 G_N \hbar}{15 \pi c^3 r^2} \right]$$

Correção quântica obtida pela teoria quântica de campos *efetiva*

Não é válida para escalas de energia arbitrariamente altas (assim como o MP)

Incompatibilidade entre RG e os princípios da TQC?



NÃO!

$$V(r) = -G_N \frac{m_1 m_2}{r} \left[1 - \frac{G_N (m_1 + m_2)}{2c^2 r} - \frac{122 G_N \hbar}{15 \pi c^3 r^2} \right]$$

Correção quântica obtida pela teoria quântica de campos *efetiva*

Não é válida para escalas de energia arbitrariamente altas (assim como o MP)

MP e a “Relatividade Geral Quântica” são teorias *efetivas*!

Portanto: temos uma teoria de gravidade quântica!

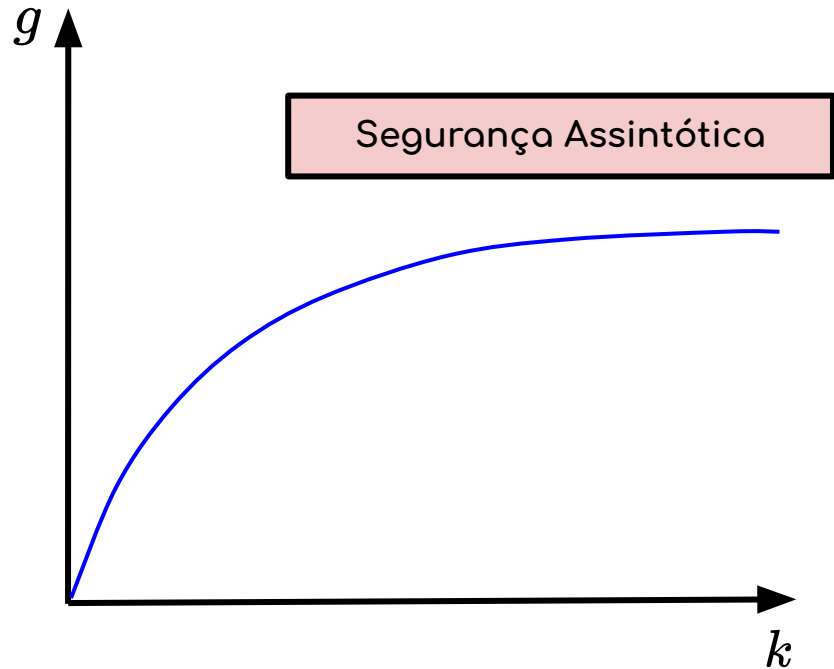
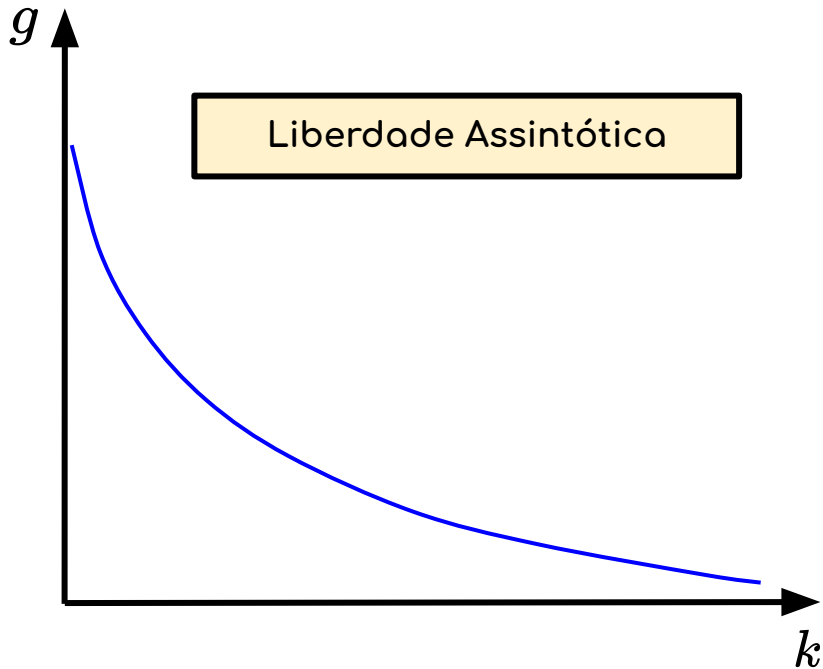
Teorias fundamentais: liberdade e segurança assintótica

Teorias fundamentais: liberdade e segurança assintótica

Para uma TQC ser válida em escalas de energia arbitrariamente altas: acoplamentos devem ser finitos

Teorias fundamentais: liberdade e segurança assintótica

Para uma TQC ser válida em escalas de energia arbitrariamente altas: acoplamentos devem ser finitos



Liberdade Assintótica

Segurança Assintótica

Liberdade Assintótica

Segurança Assintótica

Para altas energias, os acoplamentos
tendem a zero

Teoria de perturbação é uma boa
ferramenta neste caso

Cromodinâmica Quântica

Liberdade Assintótica

Para altas energias, os acoplamentos tendem a zero

Teoria de perturbação é uma boa ferramenta neste caso

Cromodinâmica Quântica

Segurança Assintótica

Para altas energias, os acoplamentos tendem a um valor finito

Teoria de perturbação pode não ser capaz de acessar este comportamento

E se a RG quântica for uma teoria assintoticamente segura?

Métodos não-perturbativos

Métodos não-perturbativos

Funções beta: medem como os acoplamentos dependem da energia

$$\beta_g = k \frac{d}{dk} g$$

Métodos não-perturbativos

Funções beta: medem como os acoplamentos dependem da energia

Funções beta se anulam simultaneamente: acoplamentos atingem ponto fixo

$$\beta_g = k \frac{d}{dk} g$$

$$\beta_g(g^*) = 0$$

Métodos não-perturbativos

Funções beta: medem como os acoplamentos dependem da energia

$$\beta_g = k \frac{d}{dk} g$$

Funções beta se anulam simultaneamente: acoplamentos atingem ponto fixo

$$\beta_g(g^*) = 0$$

Cálculo não-perturbativo das funções beta

Diferentes técnicas: Monte-Carlo, Grupo de Renormalização Funcional,...

Métodos não-perturbativos

Funções beta: medem como os acoplamentos dependem da energia

Funções beta se anulam simultaneamente: acoplamentos atingem ponto fixo

Cálculo não-perturbativo das funções beta

Diferentes técnicas: Monte-Carlo, Grupo de Renormalização Funcional,...

$$\beta_g = k \frac{d}{dk} g$$

$$\beta_g(g^*) = 0$$

Será que a teoria quântica de campos para a Relatividade Geral é assintoticamente segura?

Gravidade Quântica Assintoticamente Segura

O que é?

Abordagem para gravidade quântica baseada nos princípios usuais da teoria quântica de campos

Qual é o mecanismo físico?

Flutuações quânticas fazem com que os acoplamentos gravitacionais (constante de Newton, constante cosmológica,...) atinjam um ponto fixo no fluxo do grupo de renormalização

Como isso resolve a não renormalizabilidade?

O ponto fixo garante que, para energias arbitrariamente altas, observáveis serão finitos.

Grupo de Renormalização Funcional

A busca por pontos fixos não triviais pode ser feita por diferentes métodos. Neste colóquio: grupo de renormalização funcional

Grupo de Renormalização Funcional

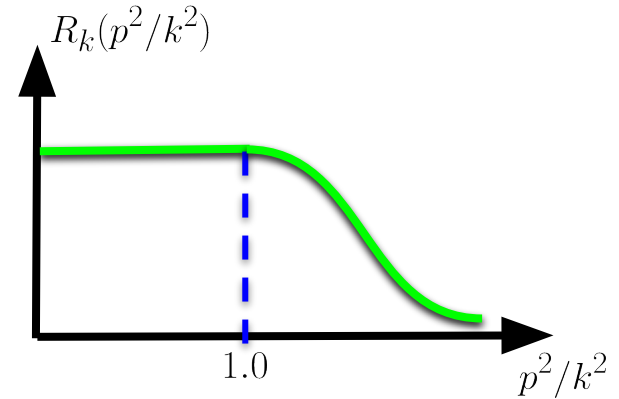
A busca por pontos fixos não triviais pode ser feita por diferentes métodos. Neste colóquio: grupo de renormalização funcional

$$\partial_t \Gamma_k = \frac{1}{2} \text{Tr} \left[(\Gamma_k^{(2)} + R_k)^{-1} \partial_t R_k \right]$$

Grupo de Renormalização Funcional

A busca por pontos fixos não triviais pode ser feita por diferentes métodos. Neste colóquio: grupo de renormalização funcional

$$\partial_t \Gamma_k = \frac{1}{2} \text{Tr} \left[(\Gamma_k^{(2)} + R_k)^{-1} \partial_t R_k \right]$$

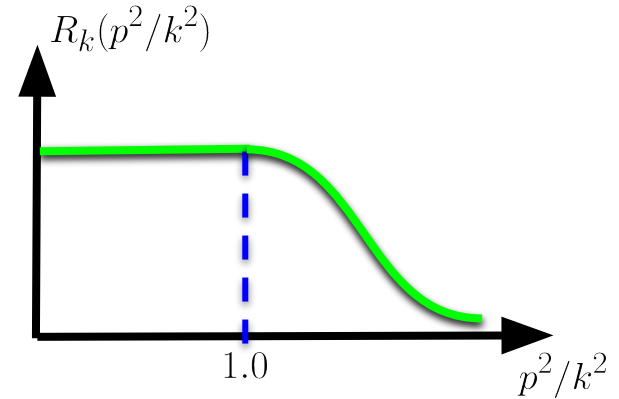


Grupo de Renormalização Funcional

A busca por pontos fixos não triviais pode ser feita por diferentes métodos. Neste colóquio: grupo de renormalização funcional

$$\partial_t \Gamma_k = \frac{1}{2} \text{Tr} \left[(\Gamma_k^{(2)} + R_k)^{-1} \partial_t R_k \right]$$

$$\Gamma_k = \sum_i g_i(k) \mathcal{O}_i(\phi)$$



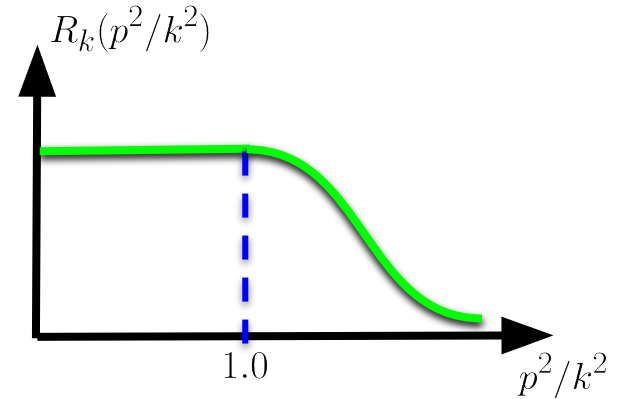
Grupo de Renormalização Funcional

A busca por pontos fixos não triviais pode ser feita por diferentes métodos. Neste colóquio: grupo de renormalização funcional

$$\partial_t \Gamma_k = \frac{1}{2} \text{Tr} \left[(\Gamma_k^{(2)} + R_k)^{-1} \partial_t R_k \right]$$

$$\Gamma_k = \sum_i g_i(k) \mathcal{O}_i(\phi)$$

$$\partial_t \Gamma_k = \sum_i (\partial_t g_i(k)) \mathcal{O}_i(\phi) \equiv \sum_i \beta_i \mathcal{O}_i(\phi)$$



Γ_k Ação efetiva que governa a dinâmica quântica na escala de energia k .

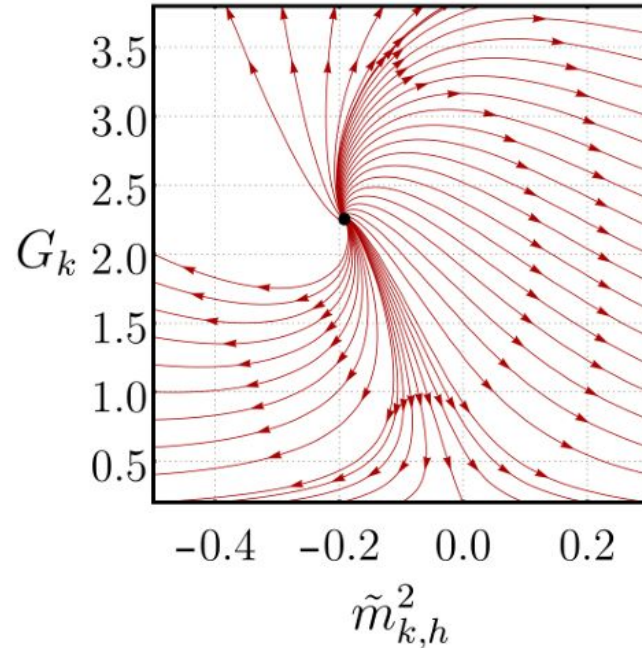
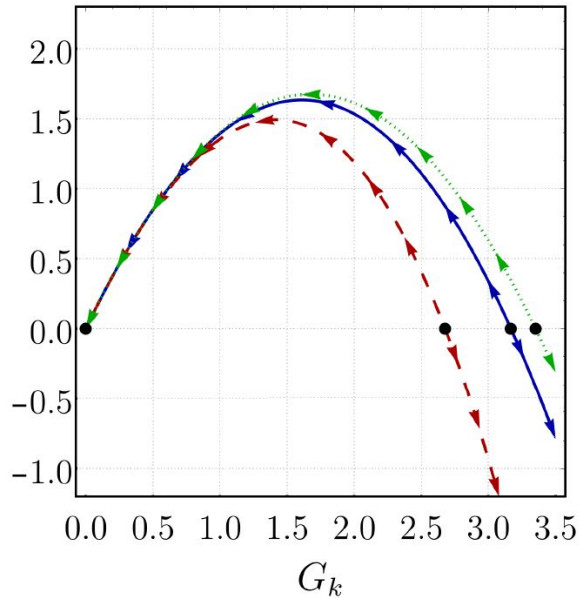
Γ_k Ação efetiva que governa a dinâmica quântica na escala de energia k .

$$\Gamma_k^{\text{EH}}[\bar{g}_{\mu\nu}, h_{\mu\nu}] = \frac{1}{16\pi G_k} \int d^d x \sqrt{g} (2\Lambda_k - R) + S_{\text{gf}} + S_{\text{gh}}$$

Γ_k

Ação efetiva que governa a dinâmica quântica na escala de energia k .

$$\Gamma_k^{\text{EH}}[\bar{g}_{\mu\nu}, h_{\mu\nu}] = \frac{1}{16\pi G_k} \int d^d x \sqrt{g} (2\Lambda_k - R) + S_{\text{gf}} + S_{\text{gh}}$$



Todos os termos compatíveis com as simetrias da teoria serão gerados pelas flutuações quânticas

Todos os termos compatíveis com as simetrias da teoria serão gerados pelas flutuações quânticas

$$\Gamma_k = \int d^d x \sqrt{g} f_k(R)$$

Todos os termos compatíveis com as simetrias da teoria serão gerados pelas flutuações quânticas

$$\Gamma_k = \int d^d x \sqrt{g} f_k(R)$$

Convergência aparente
dos pontos fixos

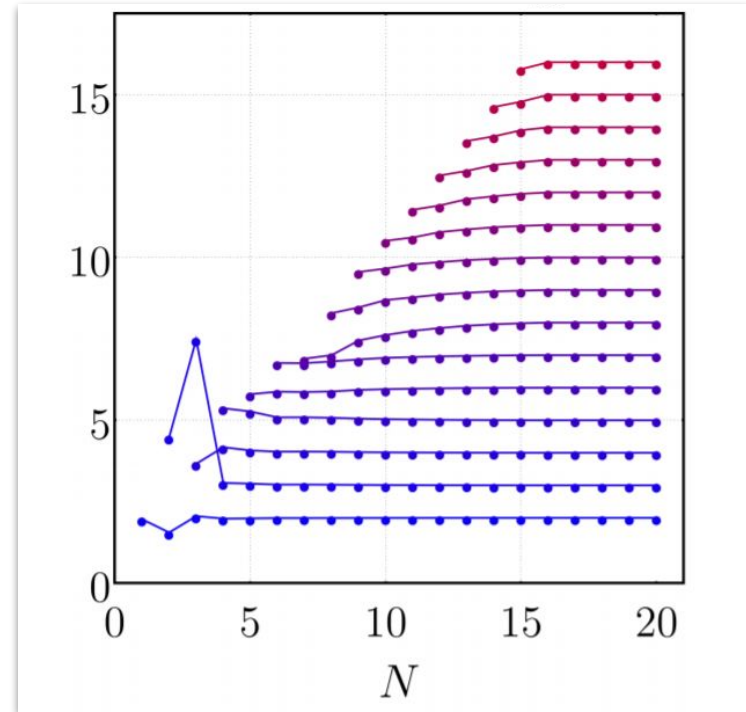
Resultados são
animadores

Todos os termos compatíveis com as simetrias da teoria serão gerados pelas flutuações quânticas

$$\Gamma_k = \int d^d x \sqrt{g} f_k(R)$$

Convergência aparente
dos pontos fixos

Resultados são
animadores



Além disso, há uma coleção de evidências que indicam a necessidade de ajustar um número finito (e pequeno) de parâmetros na teoria quântica. Alto poder de preditividade.

Sobre a dificuldade de testar os efeitos de gravidade quântica

$$c \approx 3 \times 10^8 m/s$$

$$G \approx 6,67 \times 10^{-11} m^3 kg^{-1} s^{-2}$$

$$\hbar \approx 1,054 \times 10^{-34} J.s$$

Sobre a dificuldade de testar os efeitos de gravidade quântica

$$c \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$G \approx 6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$$

$$\hbar \approx 1,054 \times 10^{-34} \text{ J.s}$$

$$\ell_p = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} \approx 1,6 \times 10^{-35} \text{ m}$$

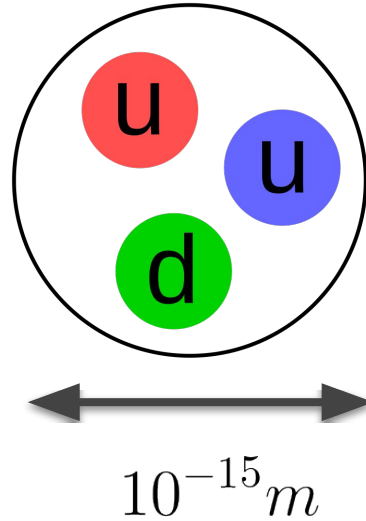
Sobre a dificuldade de testar os efeitos de gravidade quântica

$$c \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$G \approx 6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$$

$$\hbar \approx 1,054 \times 10^{-34} \text{ J.s}$$

$$\ell_p = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} \approx 1,6 \times 10^{-35} \text{ m}$$



Sobre a dificuldade de testar os efeitos de gravidade quântica

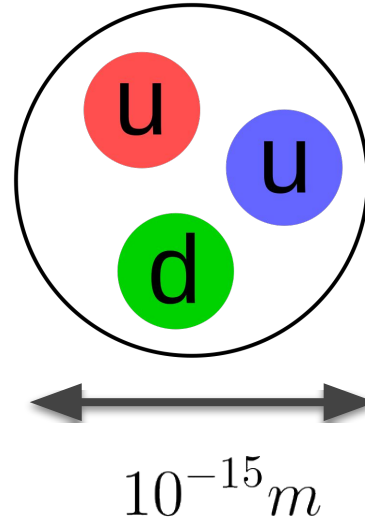
$$c \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$G \approx 6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$$

$$\hbar \approx 1,054 \times 10^{-34} \text{ J.s}$$

$$\ell_p = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} \approx 1,6 \times 10^{-35} \text{ m}$$

$$m_p = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}} \approx 10^{19} \text{ GeV}$$



Sobre a dificuldade de testar os efeitos de gravidade quântica

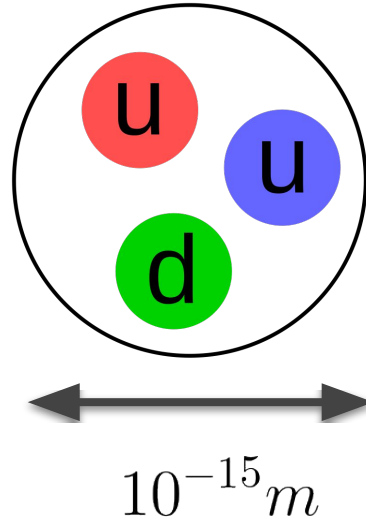
$$c \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$G \approx 6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$$

$$\hbar \approx 1,054 \times 10^{-34} \text{ J.s}$$

$$\ell_p = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} \approx 1,6 \times 10^{-35} \text{ m}$$

$$m_p = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}} \approx 10^{19} \text{ GeV}$$



Supressão dos efeitos de gravidade quântica

$$(E/m_p)^{\#}$$

Sobre a dificuldade de testar os efeitos de gravidade quântica

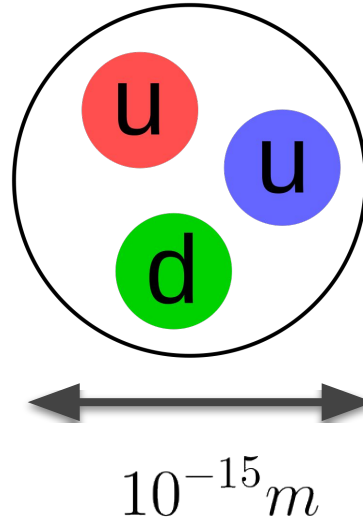
$$c \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$G \approx 6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$$

$$\hbar \approx 1,054 \times 10^{-34} \text{ J.s}$$

$$l_p = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} \approx 1,6 \times 10^{-35} \text{ m}$$

$$m_p = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}} \approx 10^{19} \text{ GeV}$$



Supressão dos efeitos de gravidade quântica

$$(E/m_p)^{\#}$$

Teste direto dos efeitos de gravidade quântica...
Não parece ser uma direção promissora

Buscar regimes extremos como, por exemplo, o universo primordial

Conseguimos acessar escalas de energia da ordem de TeV no LHC

Será que efeitos de gravidade quântica podem produzir consequências na escala acessível do LHC?

Toda matéria interage gravitacionalmente

Conseguimos acessar escalas de energia da ordem de TeV no LHC

Será que efeitos de gravidade quântica podem produzir consequências na escala acessível do LHC?

Toda matéria interage gravitacionalmente

Campos quânticos de matéria afetam o espaço-tempo quântico

Espaço-tempo quântico afeta os campos quânticos de matéria

Conseguimos acessar escalas de energia da ordem de TeV no LHC

Será que efeitos de gravidade quântica podem produzir consequências na escala acessível do LHC?

Toda matéria interage gravitacionalmente

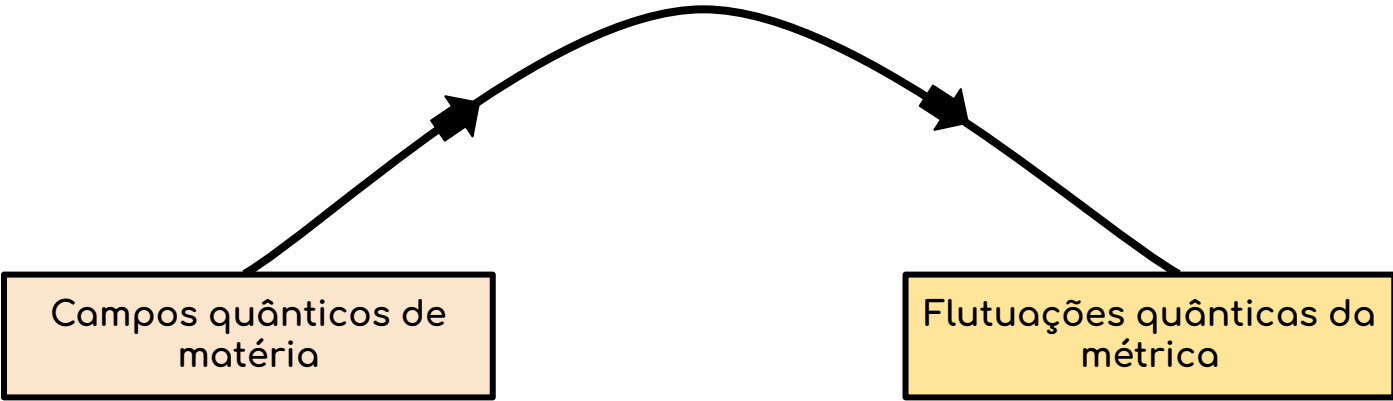
Campos quânticos de matéria afetam o espaço-tempo quântico

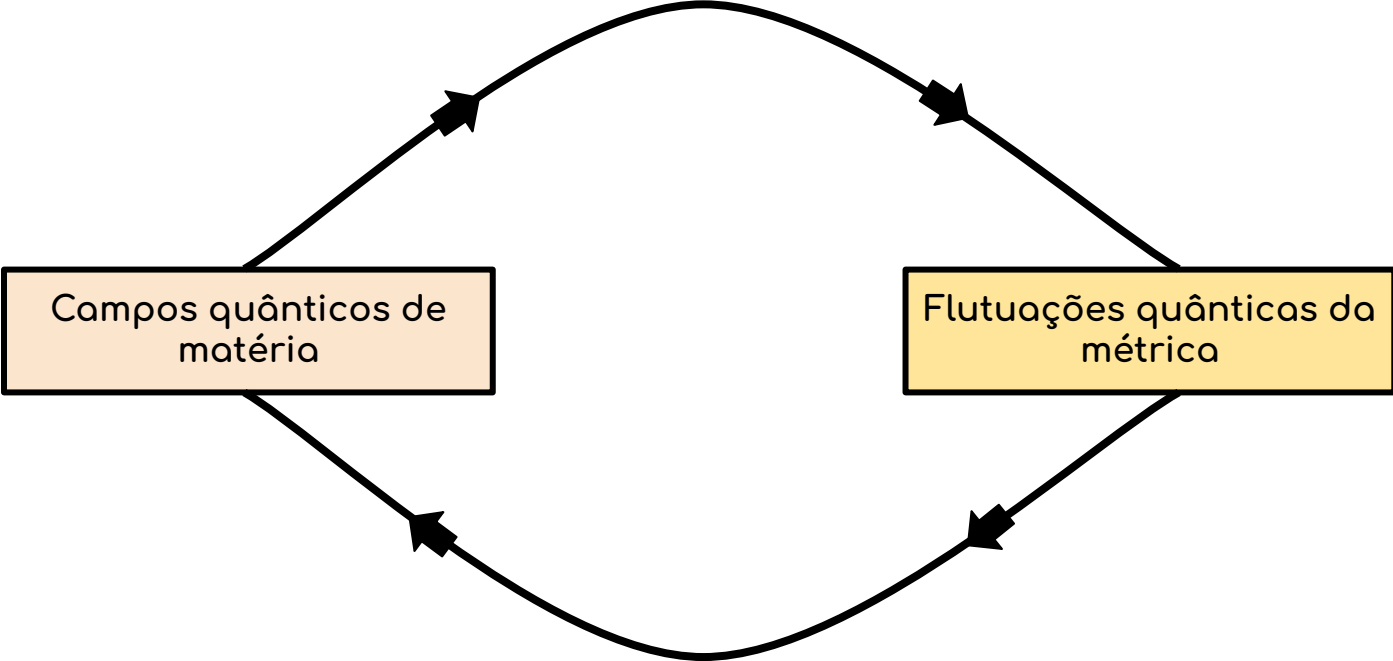
Espaço-tempo quântico afeta os campos quânticos de matéria

Física de partículas como um portal para estabelecer testes de consistência para teorias de gravidade quântica

Campos quânticos de
matéria

Flutuações quânticas da
métrica





Inclusão de matéria

A introdução de matéria
pode comprometer a
existência do ponto fixo

Inclusão de matéria

A introdução de matéria
pode comprometer a
existência do ponto fixo

Analogia: liberdade assintótica
da cromodinâmica quântica
depende do número de férmions
na teoria

Inclusão de matéria

A introdução de matéria
pode comprometer a
existência do ponto fixo

Analogia: liberdade assintótica
da cromodinâmica quântica
depende do número de férmions
na teoria

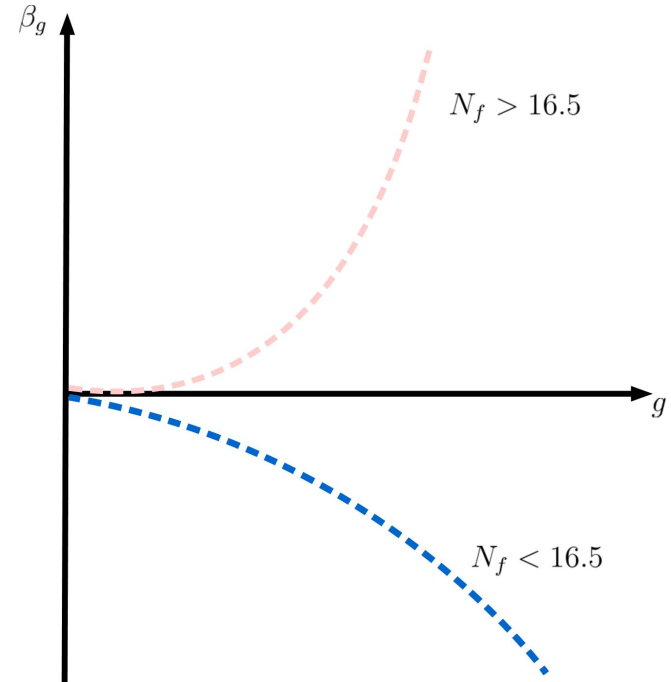
Será que os graus de liberdade
do modelo padrão são
compatíveis com o ponto fixo da
gravidade quântica
assintoticamente segura?

Inclusão de matéria

A introdução de matéria
pode comprometer a
existência do ponto fixo

Analogia: liberdade assintótica
da cromodinâmica quântica
depende do número de férmions
na teoria

Será que os graus de liberdade
do modelo padrão são
compatíveis com o ponto fixo da
gravidade quântica
assintoticamente segura?



Conteúdo de matéria do modelo padrão

$$\Gamma_k^{\text{matter}}[g, \phi, \bar{\psi}, \psi, A] = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N_\phi} \int_x \omega g^{\mu\nu} \partial_\mu \phi_i \partial_\nu \phi_i + \sum_{i=1}^{N_\psi} \int_x \omega i \bar{\psi}_i \not{D} \psi_i \\ + \frac{1}{4} \sum_{i=1}^{N_A} \int_x \omega g^{\mu\alpha} g^{\nu\beta} F_{i,\mu\nu} F_{i,\alpha\beta},$$

Conteúdo de matéria do modelo padrão

$$\Gamma_k^{\text{matter}}[g, \phi, \bar{\psi}, \psi, A] = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N_\phi} \int_x \omega g^{\mu\nu} \partial_\mu \phi_i \partial_\nu \phi_i + \sum_{i=1}^{N_\psi} \int_x \omega i \bar{\psi}_i \not{\nabla} \psi_i$$

$$+ \frac{1}{4} \sum_{i=1}^{N_A} \int_x \omega g^{\mu\alpha} g^{\nu\beta} F_{i,\mu\nu} F_{i,\alpha\beta},$$

	N_ϕ	N_A	N_ψ	$f(R)$
SM	4	12	45/2	✓(2)
SM + 3 ν_R	4	12	24	✓(2)
MSSM	49	12	61/2	✗
SU(5) GUT	124	24	24	✗

Conteúdo de matéria do modelo padrão

$$\Gamma_k^{\text{matter}}[g, \phi, \bar{\psi}, \psi, A] = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N_\phi} \int_x \omega g^{\mu\nu} \partial_\mu \phi_i \partial_\nu \phi_i + \sum_{i=1}^{N_\psi} \int_x \omega i \bar{\psi}_i \not{\nabla} \psi_i$$

$$+ \frac{1}{4} \sum_{i=1}^{N_A} \int_x \omega g^{\mu\alpha} g^{\nu\beta} F_{i,\mu\nu} F_{i,\alpha\beta},$$

	N_ϕ	N_A	N_ψ	$f(R)$
SM	4	12	45/2	✓(2)
SM + $3\nu_R$	4	12	24	✓(2)
MSSM	49	12	61/2	✗
SU(5) GUT	124	24	24	✗

Certas extensões do modelo padrão não são compatíveis com o ponto fixo gravitacional

Modelo Padrão e Modelo Padrão + right-handed neutrinos parecem compatíveis com o cenário de segurança assintótica

Efeitos de gravidade quântica no setor de matéria

$$\Gamma_k = \frac{1}{16\pi G_N} \int d^4x \omega (-R + \bar{a}R^2 + \bar{b}R_{\mu\nu}R^{\mu\nu}) + \Gamma_k^{\text{gf}}$$

$$\Gamma_k^{\text{SM-like}} = \Gamma_k^{\text{vec}} + \Gamma_k^{\text{sca}} + \Gamma_k^{\text{ferm}}$$

$$\Gamma_k^{\text{sca}} = \frac{1}{2} \int d^4x \omega (Z_{\phi,k} g^{\mu\nu} \partial_\mu \phi \partial_\nu \phi + 2V_k(\phi))$$

$$\Gamma_k^{\text{ferm}} = \int d^4x \omega (Z_{\psi,k} i\bar{\psi} \gamma^\mu D_\mu \psi + iy_k \phi \bar{\psi} \psi)$$

$$\Gamma_k^{\text{vec}} = \frac{Z_A}{4} \int d^4x \omega g^{\mu\alpha} g^{\nu\beta} F_{\mu\nu} F_{\alpha\beta} + \Gamma_k^{\text{gf}}$$

Efeitos de gravidade quântica no setor de matéria

$$\Gamma_k = \frac{1}{16\pi G_N} \int d^4x \omega (-R + \bar{a}R^2 + \bar{b}R_{\mu\nu}R^{\mu\nu}) + \Gamma_k^{\text{gf}}$$

$$\Gamma_k^{\text{SM-like}} = \Gamma_k^{\text{vec}} + \Gamma_k^{\text{sca}} + \Gamma_k^{\text{ferm}}$$

$$\Gamma_k^{\text{sca}} = \frac{1}{2} \int d^4x \omega (Z_{\phi,k} g^{\mu\nu} \partial_\mu \phi \partial_\nu \phi + 2V_k(\phi))$$

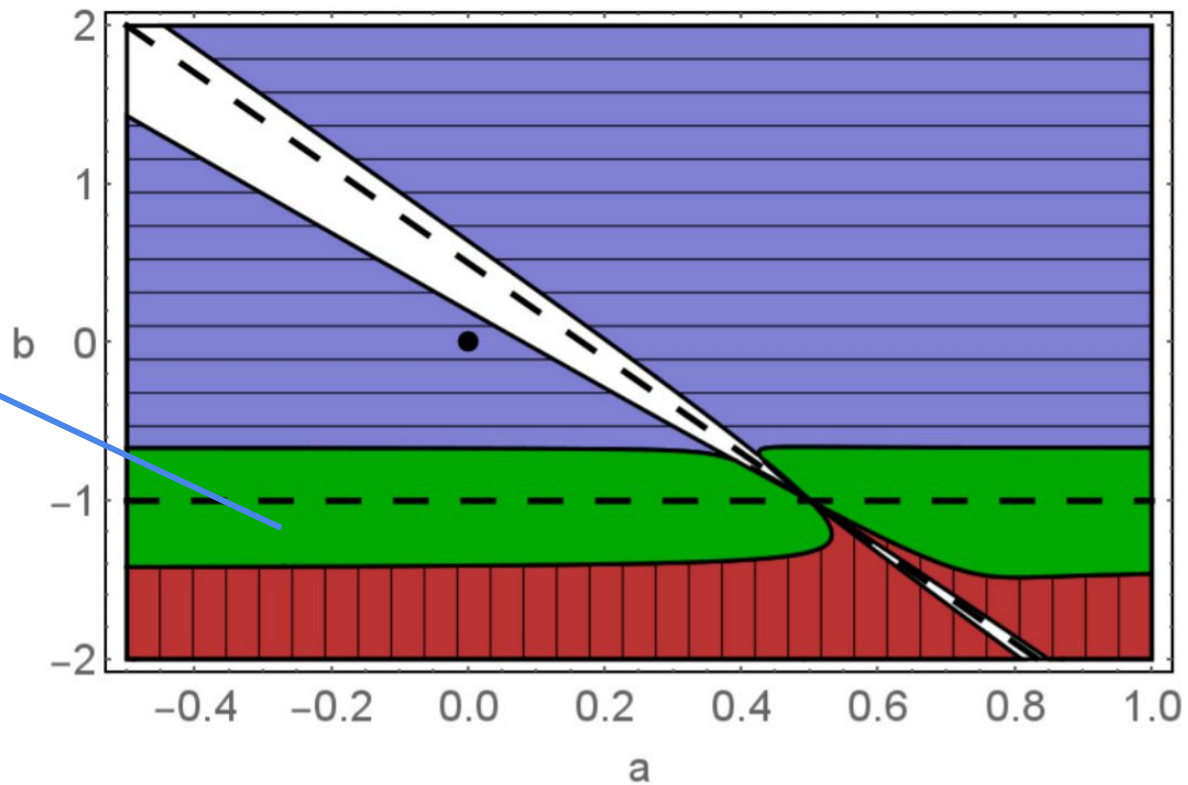
$$\Gamma_k^{\text{ferm}} = \int d^4x \omega (Z_{\psi,k} i\bar{\psi} \gamma^\mu D_\mu \psi + iy_k \phi \bar{\psi} \psi)$$

$$\Gamma_k^{\text{vec}} = \frac{Z_A}{4} \int d^4x \omega g^{\mu\alpha} g^{\nu\beta} F_{\mu\nu} F_{\alpha\beta} + \Gamma_k^{\text{gf}}$$

$$\beta g_i|_{\text{grav}} = -f g_i g_i + \dots$$

Contribuição das flutuações quânticas do campo gravitacional nas funções beta de matéria

Região na qual o polo de Landau do MP é removido por efeitos de gravidade quântica



Desenvolvimentos recentes

Teorias escalares-tensoriais

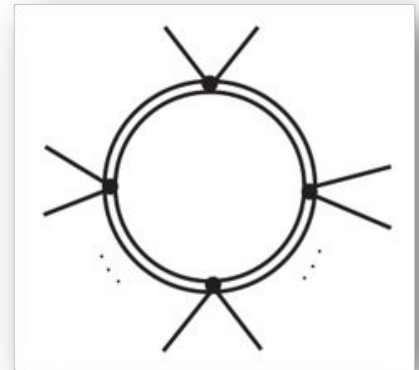
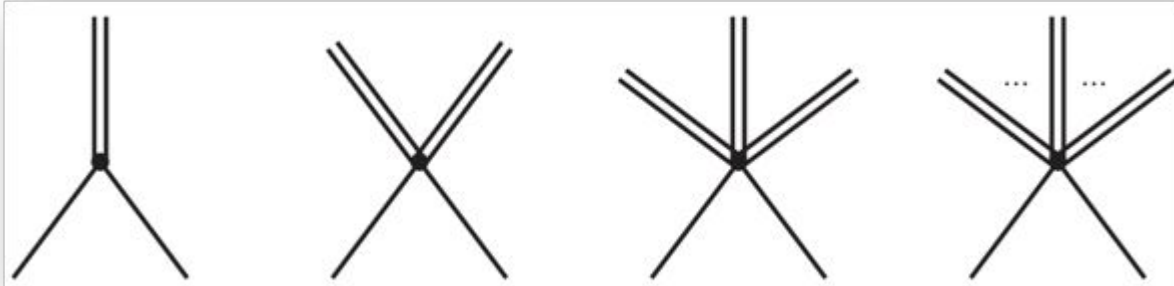
$$S[\phi] = \frac{1}{2} \int d^d x \sqrt{\bar{g}} g^{\mu\nu} \partial_\mu \phi \partial_\nu \phi$$

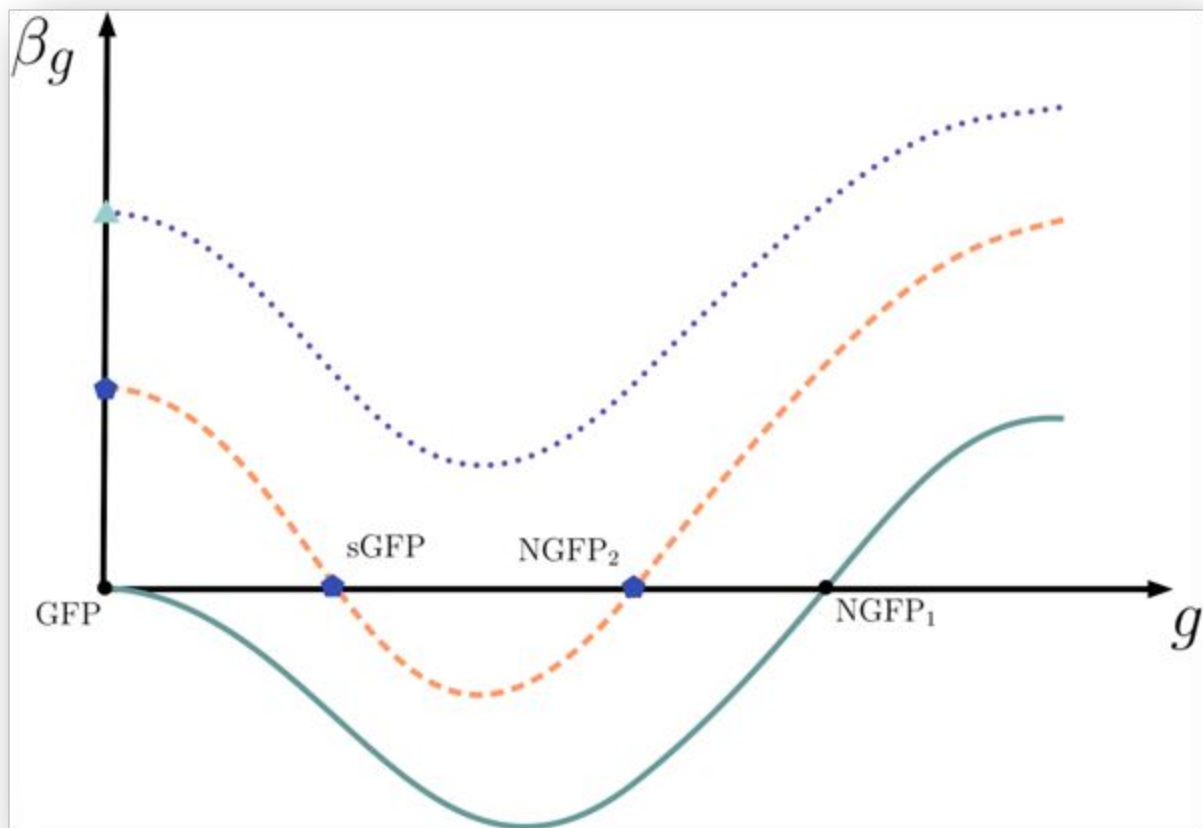
$$g_{\mu\nu} = \bar{g}_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$$

↓

$$\frac{1}{2} \int d^d x \sqrt{\bar{g}} \left(\bar{g}^{\mu\nu} + h^{(1)\mu\nu} + h^{(2)\mu\nu} + \mathcal{O}(h^3)^{\mu\nu} \right) \partial_\mu \phi \partial_\nu \phi$$

Interações induzidas

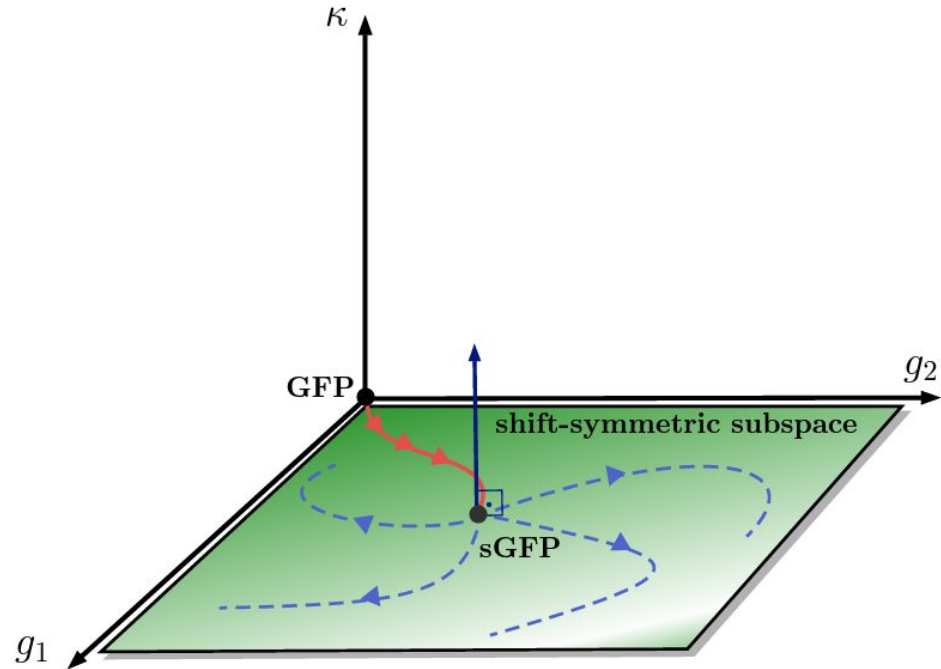




$$\Gamma_k^{\text{matter}}[\phi, g] = \int d^4x \sqrt{g} \left[\frac{Z_k}{2} (\partial\phi)^2 + Z_k^2 C_k (\partial\phi)^4 + Z_k \tilde{C}_k R^{\mu\nu} (\partial_\mu\phi) (\partial_\nu\phi) + Z_k D_k R (\partial\phi)^2 \right]$$

Encontramos um ponto fixo não-trivial para as interações induzidas!

Consequências fenomenológicas - em andamento



Torção Vs. simetria quiral

Efeitos de gravidade quântica podem quebrar a simetria quiral?

Simetria quiral quebrada na escala de Planck levaria à geração de massas muito pesadas para os férmions que conhecemos

Qualquer proposta de gravidade quântica deve ser compatível com a existência de férmions leves

Torção Vs. simetria quiral

Efeitos de gravidade quântica podem quebrar a simetria quiral?

Simetria quiral quebrada na escala de Planck levaria à geração de massas muito pesadas para os férmions que conhecemos

Qualquer proposta de gravidade quântica deve ser compatível com a existência de férmions leves

Resultados preliminares: torção parece favorecer a quebra da simetria quiral



Vínculos sobre propriedades do espaço-tempo a partir da física de partículas

Conclusões

- Relatividade Geral e o Modelo Padrão: melhor descrição que temos das interações fundamentais até o momento
- Essas teorias são incompletas/efetivas: existem singularidades
- Tratamento do Modelo Padrão (e possíveis extensões) e da Relatividade Geral pelo formalismo da teoria quântica de campos pode gerar uma teoria quântica consistente não-perturbativamente: segurança assintótica
- Física de partículas pode impor vários vínculos sobre a dinâmica do espaço-tempo quântico

Obrigado!