

# GRAVITAÇÃO QUÂNTICA

Victor O. Rivelles

`rivelles@fma.if.usp.br`

Instituto de Física  
Universidade de São Paulo

# ROTEIRO

- Gravitação
- Teoria Quântica de Campos
- Modelo Padrão das Partículas Elementares
- Gravitação Quântica
- Supersimetria
- Teoria de Cordas
- Conclusões

# Gravitação

- Gravitação Newtoniana
- Potencial gravitacional  $V \sim \frac{1}{r}$

# Gravitação

- Gravitação Newtoniana
- Potencial gravitacional  $V \sim \frac{1}{r}$
- Propagação instantânea
- Incompatível com a **RELATIVIDADE RESTRITA**

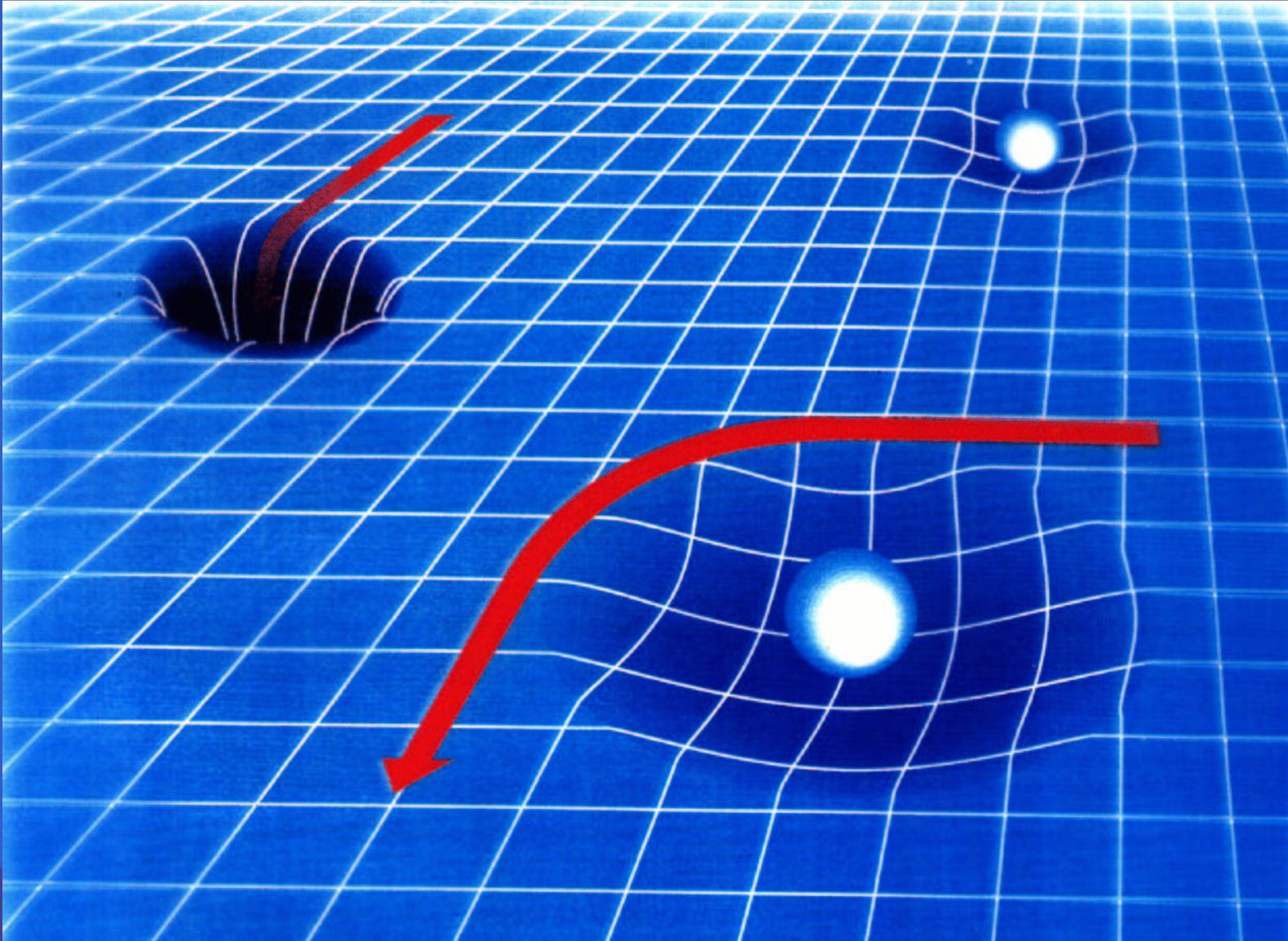
# Gravitação

- Gravitação Newtoniana
- Potencial gravitacional  $V \sim \frac{1}{r}$
- Propagação instantânea
- Incompatível com a **RELATIVIDADE RESTRITA**
- Solução: **RELATIVIDADE GERAL**
- Espaço-tempo possui **dinâmica !!!**

# Gravitação

- Gravitação Newtoniana
- Potencial gravitacional  $V \sim \frac{1}{r}$
- Propagação instantânea
- Incompatível com a **RELATIVIDADE RESTRITA**
- Solução: **RELATIVIDADE GERAL**
- Espaço-tempo possui **dinâmica !!!**
- Geometria Riemanniana (**experimental!**)
- Eqs. Einstein  $R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}$

# Espaço-tempo curvo back



# Cosmologia

- Estudo da história do **UNIVERSO**
- O Universo teve um início: **Big Bang**
- Radiação cósmica de fundo
- Expansão do Universo

# Teoria Quântica de Campos

- Mecânica quântica usual não é compatível com a **relatividade restrita**

# Teoria Quântica de Campos

- Mecânica quântica usual não é compatível com a **relatividade restrita**
- Solução: **TEORIA QUÂNTICA DE CAMPOS**
- Quantização de um sistema com número **infinito** de graus de liberdade

# Teoria Quântica de Campos

- Mecânica quântica usual não é compatível com a **relatividade restrita**
- Solução: **TEORIA QUÂNTICA DE CAMPOS**
- Quantização de um sistema com número **infinito** de graus de liberdade
- Eq. Dirac: **antipartículas**

# Teoria Quântica de Campos

- Mecânica quântica usual não é compatível com a **relatividade restrita**
- Solução: **TEORIA QUÂNTICA DE CAMPOS**
- Quantização de um sistema com número **infinito** de graus de liberdade
- Eq. Dirac: **antipartículas**
- Todas as partículas elementares **são iguais!!!**

# Quantização do eletromagnetismo

- $A_\mu(x) = \int d^4p [a_\mu(p)e^{-ipx} + a_\mu^\dagger(p)e^{ipx}]$
- $[a^\mu(p), a_\nu^\dagger(p')] = \delta_\nu^\mu \delta(p - p')$
- Fóton: 1 oscilador em cada ponto do espaço

# Quantização do eletromagnetismo

- $A_\mu(x) = \int d^4p [a_\mu(p)e^{-ipx} + a_\mu^\dagger(p)e^{ipx}]$
- $[a^\mu(p), a_\nu^\dagger(p')] = \delta_\nu^\mu \delta(p - p')$
- Fóton: 1 oscilador em cada ponto do espaço
- Energia  $E = \int d^3p [n(p) + 1/2]\omega(p)$
- Na ausência de fótons  $n(p) = 0$  temos  $E = \int d^3p \frac{1}{2}\omega(p)$  é infinita !!!

# Quantização do eletromagnetismo

- $A_\mu(x) = \int d^4p [a_\mu(p)e^{-ipx} + a_\mu^\dagger(p)e^{ipx}]$
- $[a^\mu(p), a_\nu^\dagger(p')] = \delta_\nu^\mu \delta(p - p')$
- Fóton: 1 oscilador **em cada ponto** do espaço
- Energia  $E = \int d^3p [n(p) + 1/2]\omega(p)$
- Na **ausência de fótons**  $n(p) = 0$  temos  $E = \int d^3p \frac{1}{2}\omega(p)$  é **infinita !!!**
- Entretanto, apenas diferenças de energia são medidas, logo, **definimos E** subtraindo a energia divergente  $E = \int d^3p n(p)\omega(p)$

# Teorias Renormalizáveis

- Esse procedimento de eliminar divergências é chamado **RENORMALIZAÇÃO**
- Nem toda teoria de campo é renormalizável
- Eletrodinâmica quântica é renormalizável
- Modelo padrão das partículas elementares é renormalizável

# Modêlo Padrão [back](#)

## FERMIONS

matter constituents  
spin = 1/2, 3/2, 5/2, ...

### Leptons spin = 1/2

Flavor	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge
$\nu_e$ electron neutrino	$<1 \times 10^{-8}$	0
<b>e</b> electron	0.000511	-1
$\nu_\mu$ muon neutrino	$<0.0002$	0
<b><math>\mu</math></b> muon	0.106	-1
$\nu_\tau$ tau neutrino	$<0.02$	0
<b><math>\tau</math></b> tau	1.7771	-1

### Quarks spin = 1/2

Flavor	Approx. Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge
<b>u</b> up	0.003	2/3
<b>d</b> down	0.006	-1/3
<b>c</b> charm	1.3	2/3
<b>s</b> strange	0.1	-1/3
<b>t</b> top	175	2/3
<b>b</b> bottom	4.3	-1/3

# Forças Fundamentais

- A **matéria** interage através de **forças de interação**
  - Força gravitacional
  - Força eletromagnética
  - Força fraca (ex: decaimento  $\beta$  do neutron)
  - Força forte (ex: forças nucleares)
- Forte: 1; EM:  $10^{-2}$ ; Fraca:  $10^{-5}$ ; Gravit.:  $10^{-39}$
- As **forças fundamentais** da Natureza são transportadas por partículas

# Bósons

## BOSONS

force carriers  
spin = 0, 1, 2, ...

### Unified Electroweak spin = 1

Name	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge
$\gamma$ photon	0	0
$W^-$	80.4	-1
$W^+$	80.4	+1
$Z^0$	91.187	0

### Strong (color) spin = 1

Name	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge
$g$ gluon	0	0

# Bárions

## Baryons $qqq$ and Antibaryons $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$

Baryons are fermionic hadrons.  
There are about 120 types of baryons.

Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Spin
<b>p</b>	proton	<b>uud</b>	1	0.938	1/2
<b><math>\bar{p}</math></b>	anti-proton	<b><math>\bar{u}\bar{u}\bar{d}</math></b>	-1	0.938	1/2
<b>n</b>	neutron	<b>udd</b>	0	0.940	1/2
<b><math>\Lambda</math></b>	lambda	<b>uds</b>	0	1.116	1/2
<b><math>\Omega^-</math></b>	omega	<b>sss</b>	-1	1.672	3/2

# Mésons

## Mesons $q\bar{q}$

Mesons are bosonic hadrons.  
There are about 140 types of mesons.

Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Spin
$\pi^+$	pion	$u\bar{d}$	+1	0.140	0
$K^-$	kaon	$s\bar{u}$	-1	0.494	0
$\rho^+$	rho	$u\bar{d}$	+1	0.770	1
$B^0$	B-zero	$d\bar{b}$	0	5.279	0
$\eta_c$	eta-c	$c\bar{c}$	0	2.980	0

## Modêlo Padrão

- É **extremamente** bem sucedido
- Falta encontrar o **Higgs** (necessário para dar massa às outras partículas)
- Não explica os **parâmetros e simetrias**
- Não inclui a gravitação

## Relatividade Geral

- É **extremamente** bem sucedida após o Big Bang
- Fornece um **modelo cosmológico**
- Falta detectar **ondas gravitacionais**

## Relatividade Geral

- É **extremamente** bem sucedida após o Big Bang
- Fornece um **modelo cosmológico**
- Falta detectar **ondas gravitacionais**
- Não existe uma gravitação quântica

## Relatividade Geral

- É **extremamente** bem sucedida após o Big Bang
- Fornece um **modelo cosmológico**
- Falta detectar **ondas gravitacionais**
- Não existe uma gravitação quântica

**Relatividade geral não é renormalizável!!!**

# Gravitação Quântica

- Há portanto um **conflito** entre a mecânica quântica e a relatividade geral

# Gravitação Quântica

- Há portanto um **conflito** entre a mecânica quântica e a relatividade geral
- Devemos procurar uma teoria que à baixas energias contenha **o modelo padrão e a relatividade geral**
- Que evite o **problema da não renormalizabilidade** da relatividade geral
- E que permita estudar o Big Bang e obter os parâmetros e simetrias do modelo padrão

# Supersimetria

- Associa a cada bóson um férmion e vice-versa
- Para cada partícula do modelo padrão há um companheiro supersimétrico
  - fóton  $\Leftrightarrow$  **fotino**  $s = 1/2$
  - elétron  $\Leftrightarrow$  **seletron**  $s = 0$
  - quark  $\Leftrightarrow$  **squark**  $s = 0$
  - gráviton  $\Leftrightarrow$  **gravitino**  $s = 3/2$

# Oscilador Supersimétrico

- oscilador bosônico  
 $[a, a^\dagger] = 1, [a, a] = [a^\dagger, a^\dagger] = 0$
- oscilador fermiônico  
 $\{f, f^\dagger\} = 1, \{f, f\} = \{f^\dagger, f^\dagger\} = 0$
- Vácuo  $a|0\rangle = f|0\rangle = 0$
- $a$  e  $f$  ( $a^\dagger$  e  $f^\dagger$ ) são operadores de aniquilação (criação)
- Hamiltoniana  $H = (a^\dagger a + 1/2) + (f^\dagger f - 1/2)$
- A energia de ponto zero é **CANCELADA !!!**

# Propriedades

- Mesmo número de estados bosônicos e fermiônicos

Estados de	Boson	Fermion
1 partícula	$a^\dagger 0\rangle$	$f^\dagger 0\rangle$
2 partículas	$a^\dagger a^\dagger 0\rangle$	$a^\dagger f^\dagger 0\rangle$

# Propriedades

- Mesmo número de estados bosônicos e fermiônicos

Estados de	Boson	Fermion
1 partícula	$a^\dagger 0\rangle$	$f^\dagger 0\rangle$
2 partículas	$a^\dagger a^\dagger 0\rangle$	$a^\dagger f^\dagger 0\rangle$

- Menor número de divergências

# Supergravitação

- Relatividade Geral + Supersimetria = Supergravitação
- Gráviton + gravitino
- Menor número de divergências poderia tornar a teoria renormalizável

# Supergravitação

- Relatividade Geral + Supersimetria = Supergravitação
- Gráviton + gravitino
- Menor número de divergências poderia tornar a teoria renormalizável
- Supergravidade não é renormalizável !!!

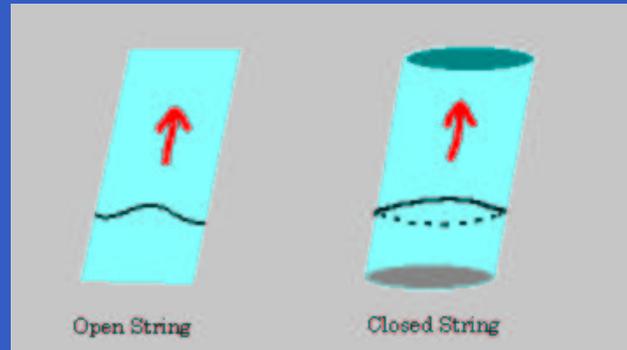
# Teoria de Supercordas

- Partículas elementares: **pontuais**
- Considere objetos estendidos: **cordas, membranas, ... relativísticas**
- O que chamamos de partículas agora são os **modos normais de vibração da corda**

# Teoria de Supercordas

- Partículas elementares: **pontuais**
- Considere objetos estendidos: **cordas, membranas, ... relativísticas**
- O que chamamos de partículas agora são os **modos normais de vibração da corda**
- Adicione supersimetria: **teoria de supercordas**
- Possui oscilações **bosônicas e fermiônicas**
- Teoria unificada

# Teoria de Cordas



- Eq. onda  $(\frac{\partial^2}{\partial \tau^2} - c^2 \frac{\partial^2}{\partial \sigma^2})X^\mu(\sigma, \tau) = 0$
- Corda aberta  $X^\mu = x^\mu + p^\mu \tau + i \sum_n \frac{1}{n} \alpha_n^\mu (c \cos \frac{n\pi c \tau}{L} - i \sin \frac{n\pi c \tau}{L}) \cos \frac{n\pi \sigma}{L}$
- Quantização  $[\alpha_n^\mu, \alpha_{\nu m}] = n \delta_\nu^\mu \delta_{m+n}$

# Sucessos

- Fornece uma teoria quântica para a gravitação

# Sucessos

- Fornece uma teoria **quântica para a gravitação**
- Contém a **relatividade geral** no setor de cordas fechadas
- Contém o **modelo padrão** no setor de cordas abertas

# Sucessos

- Fornece uma teoria **quântica para a gravitação**
- Contém a **relatividade geral** no setor de cordas fechadas
- Contém o **modelo padrão** no setor de cordas abertas
- Permite compreender várias **propriedades das teorias de campos** (dualidades)

# Problemas?

- É acessível aos experimentos em aceleradores?

# Problemas?

- É acessível aos experimentos em aceleradores?
- Escala de Plack  $m_P = \sqrt{\hbar c/G} = 10^{19} GeV$ ,  
 $l_P = 10^{-35} m$
- $m_{proton} = 1 GeV$ , energia LHC  $\sim 10^4 GeV$

# Problemas?

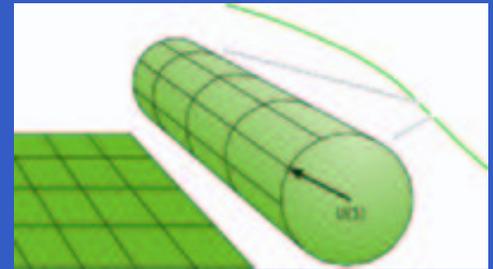
- É acessível aos experimentos em aceleradores?
- Escala de Plack  $m_P = \sqrt{\hbar c/G} = 10^{19} GeV$ ,  
 $l_P = 10^{-35} m$
- $m_{proton} = 1 GeV$ , energia LHC  $\sim 10^4 GeV$
- Avanços recentes mostram que é possível “baixar” a escala de Plack para próximo de  $10^4 GeV$  (hep-th/0210224)

- 
- 
- 
- Dimensão do espaço-tempo é  $10 = 1 + 9$





- Dimensão do espaço-tempo é  $10 = 1 + 9$
- Questão experimental !!!



- Dimensões extras compactas
- Em 1 dimensão:  $x = x + 2\pi R$
- $R$  é o raio do espaço compacto
- Funções periódicas  $\phi(x) = \sum_n \phi_n e^{ipx}$
- $p = \frac{n}{R}$ . O momento é quantizado !!!

- 
- 
- 
- Violação de  $F \sim 1/r^2$  para a gravitação

- Violação de  $F \sim 1/r^2$  para a gravitação
- Num espaço-tempo de  $d$  dimensões temos  $F \sim 1/r^{d-2}$

- Violação de  $F \sim 1/r^2$  para a gravitação
- Num espaço-tempo de  $d$  dimensões temos  $F \sim 1/r^{d-2}$
- Experimentos recentes confirmam  $F \sim 1/r^2$  para distâncias maiores que  $10^{-4}m$  (hep-ph/0307284)

# Espaços Não-Comutativos

- Mecânica quântica: **espaço de fase** não comutativo  $[p, q] = i\hbar$

# Espaços Não-Comutativos

- Mecânica quântica: **espaço de fase** não comutativo  $[p, q] = i\hbar$
- Teoria de cordas permite um **espaço não comutativo**  $[q_i, q_j] = \theta_{ij}$  (hep-th/0305122)

# Espaços Não-Comutativos

- Mecânica quântica: **espaço de fase** não comutativo  $[p, q] = i\hbar$
- Teoria de cordas permite um **espaço não comutativo**  $[q_i, q_j] = \theta_{ij}$  (hep-th/0305122)
- Teorias de campo em espaços não-comutativos: em geral mal definidas mas ok no **caso supersimétrico** (hep-th/0005272)

# Espaços Não-Comutativos

- Mecânica quântica: **espaço de fase** não comutativo  $[p, q] = i\hbar$
- Teoria de cordas permite um **espaço não comutativo**  $[q_i, q_j] = \theta_{ij}$  (hep-th/0305122)
- Teorias de campo em espaços não-comutativos: em geral mal definidas mas ok no **caso supersimétrico** (hep-th/0005272)
- Muda a **relação de dispersão** usual: quebra da simetria de Lorentz

# Espaços Não-Comutativos

- Mecânica quântica: **espaço de fase** não comutativo  $[p, q] = i\hbar$
- Teoria de cordas permite um **espaço não comutativo**  $[q_i, q_j] = \theta_{ij}$  (hep-th/0305122)
- Teorias de campo em espaços não-comutativos: em geral mal definidas mas ok no **caso supersimétrico** (hep-th/0005272)
- Muda a **relação de dispersão** usual: quebra da simetria de Lorentz
- Pode ser observado em **raios cósmicos de energia ultra alta** e **gamma-ray-bursts**

# Conclusões

- Teoria de cordas fornece uma teoria da gravitação quântica
- Contém a relatividade geral e o modelo padrão
- Preve 10 dimensões
- Preve supersimetria
- Preve violações da simetria de Lorentz
- Ainda não faz nenhuma previsão sobre os parâmetros do modelo padrão
- Ainda não permite compreender o Big Bang

# Assuntos não cobertos

- Teoria-M
- Correspondência AdS/CFT
- Princípio holográfico
- Entropia de buracos negros
- Dualidade

# Referências

- O Universo Elegante por Brian Greene (Cia. das Letras, 2001)
- P.Ball, Nature 427, 482 (2004)
- G. Amelino-Camelia, Phys. World, Nov.2003, p.43
- D. Marolf, Resource Letter NSST-1: The Nature and Status of String Theory, hep-th/0311044
- <http://www.fma.if.usp.br/rivelles/>