



Universidade Federal do Ceará  
Departamento de Física



# Das Isometrias às Dimensões Extras

Carlos Alberto S. Almeida

Homenagem aos 60 anos de vida do Prof. J. A. Helayel Neto –  
CBPF

08 de novembro, 2013

# Sumário

- ❑ *Gauging* de isometrias do modelo- $\sigma$  (2,0)
- ❑ Cosmologia Clássica e Quântica
- ❑ Porque a gravidade é fraca
- ❑ Dimensões extras - Mundos de Brana
- ❑ Correções na Lei de Gravitação
- ❑ Modelos de Randall-Sundrum
- ❑ O kink construindo uma brana
- ❑ Exemplos de geometrias
- ❑ Dimensões extras e a Violação da Simetria de Lorentz

## Ação do modelo- $\sigma$ escrita no superespaço (2,0)

$$S = -\frac{1}{2}i \int d^2x d\theta_+ d\bar{\theta}_+ [K_i(\Phi, \bar{\Phi}) \partial_{--} \Phi^i - K_{\bar{i}}(\Phi, \bar{\Phi}) \partial_{--} \bar{\Phi}^{\bar{i}}],$$

$$g_{i\bar{j}} = \frac{1}{2} (K_{i\bar{j}} + K_{\bar{j},i})$$

$$b_{i\bar{j}} = \frac{1}{2} (K_{i\bar{j}} - K_{\bar{j},i})$$

$\Phi^i$ 's ( $i=1, 2, \dots, n$ ) supercampos quirais considerados como coordenadas de um variedade hermitiana n-dimensional

$$\delta \Phi^i = \lambda^\alpha \mathcal{X}_\alpha^i(\Phi)$$

Transformação de isometria infinitesimal global

$$\mathcal{X}_\alpha^i$$

Vetores de Killing do espaço coset (escolhido como variedade alvo)

Uma vez que temos torção no modelo o vetor  $K_i$  não pode ser escrito como o gradiente de um potencial escalar

## Ação do modelo- $\sigma$ com isometria local no superespaço (2,0)

$$S_\xi = -\frac{1}{2}i \int d^2x d\theta_+ d\bar{\theta}_+ \{ [K_i(\Phi, \tilde{\Phi}) - \xi_i(\Phi)] \nabla_{--} \Phi^i - [\tilde{K}_i(\Phi, \tilde{\Phi}) - \tilde{\xi}_i(\tilde{\Phi})] \nabla_{--} \tilde{\Phi}^i \}.$$

onde  $\nabla_{--} \Phi^i \equiv \partial_{--} \Phi^i - g \Gamma_{--}^\alpha \mathcal{K}_\alpha^i(\Phi)$

$$\tilde{\Phi}_i \equiv \exp(iL_{V \cdot \bar{X}}) \Phi_i \quad \tilde{\xi}_i \equiv \exp(iL_{V \cdot \bar{X}}) \xi_i \quad L_{V \cdot \bar{X}} X \equiv [V^\alpha \mathcal{K}_\alpha^i \partial_{\bar{i}}, X]$$

$$\delta K_i = \Lambda^\alpha [F_{\alpha i}(\Phi) + i \partial_i M_\alpha(\Phi, \tilde{\Phi})] \quad \delta(\nabla_{--} \Phi^i) = \Lambda^\alpha \mathcal{K}_{\alpha i, j}(\nabla_{--} \Phi^j)$$

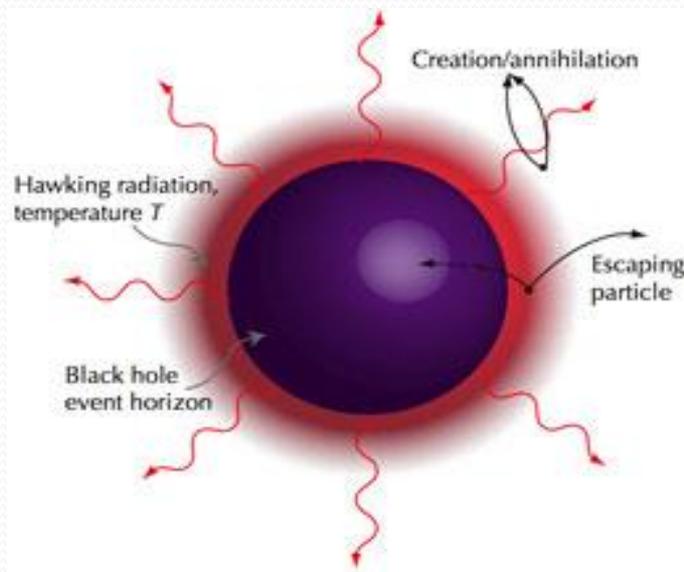
$$\mathcal{L}_X(K_i - \xi_i) = 0 \quad \text{Condição adicional sobre o supercampo auxiliar } \xi_i$$

$$\mathcal{L}_X \quad \text{Derivada de Lie na direção do vetor de Killing}$$

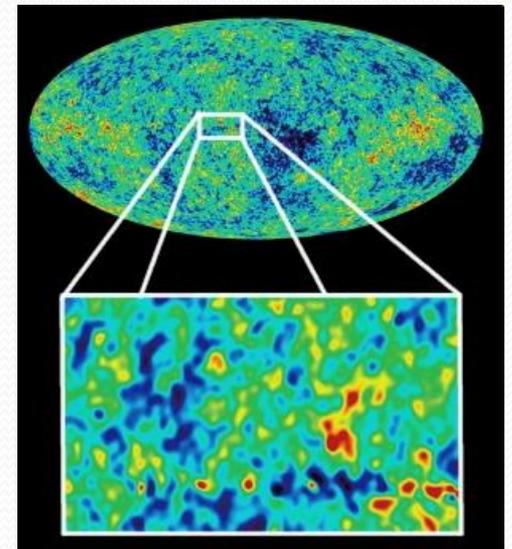
Nota: Uma vez que temos torção no modelo o vetor  $K_i$  não pode ser escrito como o gradiente de um potencial escalar ( o chamado potencial de Kähler), como ocorria no caso sem torção, o que facilitava sobremaneira o “*gauging*”.

# Cosmologia Clássica ---Até anos 80

Radiação de Hawking do buraco negro  
– anos 80

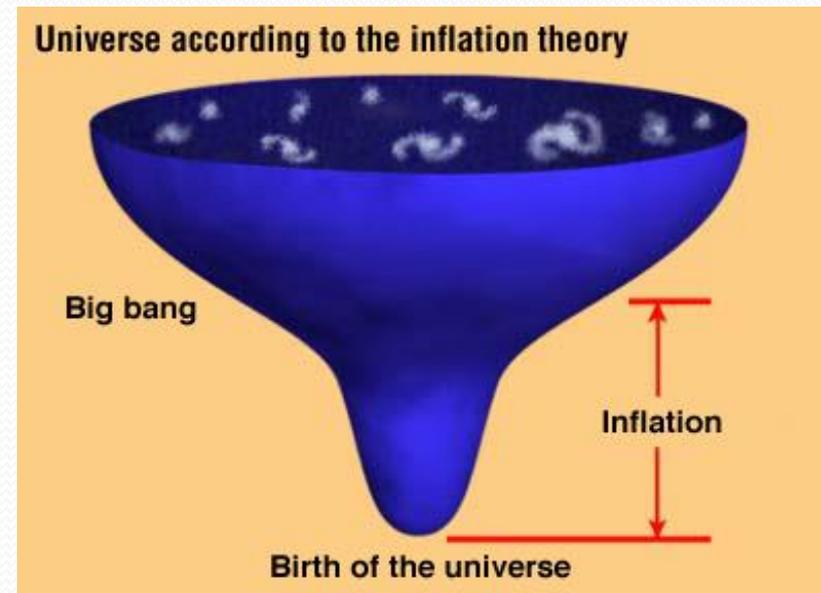


COBE - radiação cósmica de fundo – Anos 90



A Teoria da Relatividade de Einstein não pode explicar sozinha a origem do Universo (Física clássica). É necessário introduzir a **GRAVITAÇÃO QUÂNTICA** (Stephen Hawking).

- O Buraco negro não só absorve tudo que se aproxima dele, mas também emite radiação.
- O modelo Inflacionário + partículas elementares



# GRAVITAÇÃO QUÂNTICA

➤ **A Relatividade Geral e a Mecânica Quântica são incompatíveis**

- Loop Quantum Gravity
- Teoria de Cordas
- Modelos de dimensões extras + branas
- Supergravidade

# Modelo Padrão

- Força eletromagnética testada até  $10^{-8}$
- Força fraca testada até  $10^{-3}$
- Força forte testada até  $10^{-2}$

## O que está errado com o modelo Padrão?

- **O bóson de Higgs (Até 2012)**
- **Não se entende as massas das partículas**
- **Não prevê violação CP (assimetria bariônica)**
- **Não explica a matéria escura**
- **Não inclui gravidade**

# Por que a gravidade não inclui o Modelo Padrão?

Muitos e complicados motivos...

o mais fácil de entender: para unificar forças elas devem ter intensidades iguais

**Mas a gravidade é muito fraca!!!!!!**

- Considere dois prótons afastados 1cm

$$F_{EM} = \frac{q^2}{r^2} = \frac{(4,8 \times 10^{-10} esu)^2}{(1cm)^2} = 2,3 \times 10^{-19} dynes$$

$$F_{grav} = G_N \frac{m^2}{r^2} = 6,7 \times 10^{-8} \frac{cm^3}{gs^2} \times \frac{((1,7 \times 10^{24} g))^2}{(1cm)^2}$$
$$= 1,9 \times 10^{-55} dynes$$

**A força gravitacional é  $10^{36}$  mais fraca**

## A gravidade é muito fraca? Talvez não!

- Por exemplo se as cargas dos elétrons e prótons fossem  $10^{20}$  vezes menor, a força eletromagnética também pareceria fraca.
- Desse modo, a gravidade é considerada pequena porque as massas das partículas elementares são extraordinariamente pequenas.

**MAS.....PEQUENAS COMPARADAS COM O QUÊ?**

- Todas as quantidades fundamentais devem ser de ordem 1, quando expressas em termos de constantes fundamentais. Conhecemos 3 constantes fundamentais:

Relatividade Especial: velocidade da luz ( $c$ )

Gravidade: Constante de Newton ( $G$ )

Mecânica Quântica : Constante de Planck ( $h$ )

- Podemos então definir a massa, o comprimento e o tempo:

$$M_{Planck} = \sqrt{hc/G_N} \approx \frac{10^{18} GeV}{c^2}$$

- Suponha que existam duas grandes dimensões, e uma pequena de comprimento  $L$ . Qual é a força entre duas partículas separadas por distância  $r$ ?

$$r \ll L(3D)$$

$$F_{\text{grav}} \sim 1/r^2 \text{ (“3D”)}$$

$$r \gg L$$

$$F_{\text{grav}} \sim 1/r \text{ (“2D”)}$$

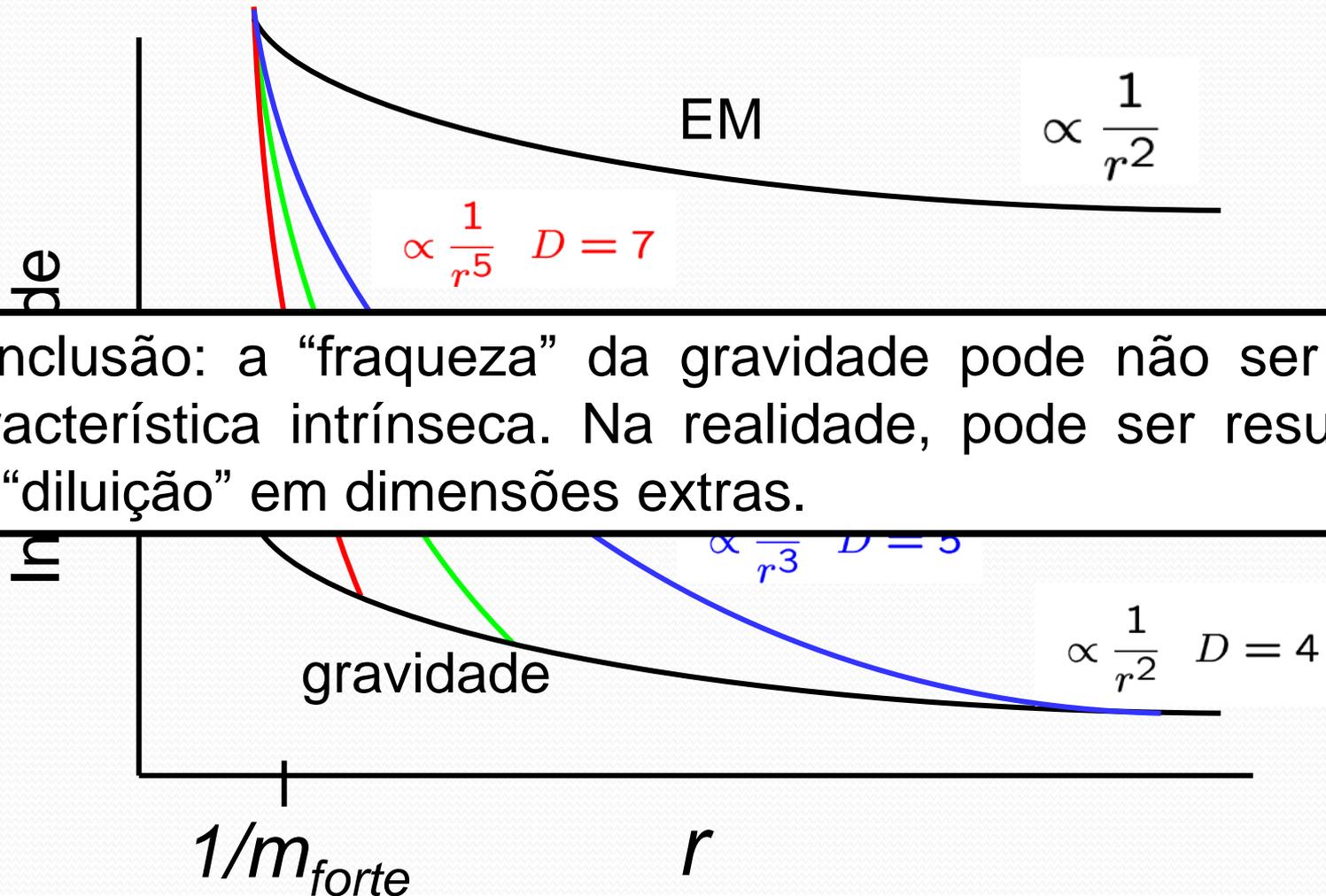
- Generalizando para  $(3+n)$  dimensões espaciais

$$F_{\text{grav}} \sim 1/r^{2+n}$$

# Dimensões Extras

- **Proposta: talvez a gravidade não seja fraca, e as partículas não sejam leves.**
- **Gravidade só parece fraca porque está diluída pela propagação de pequenas dimensões extras.**

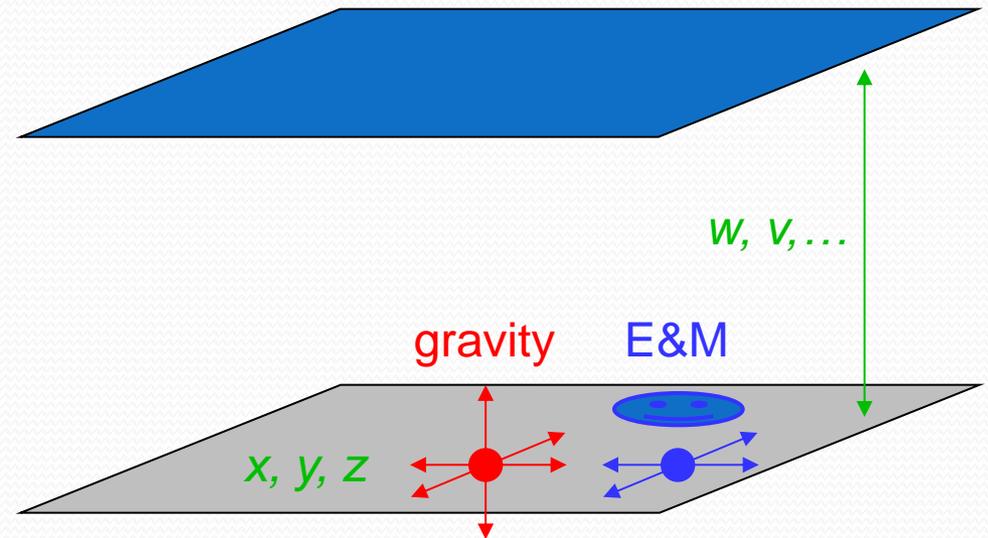
# Gravidade em Dimensões Extras



Conclusão: a “fraqueza” da gravidade pode não ser uma característica intrínseca. Na realidade, pode ser resultado da “diluição” em dimensões extras.

# Mundo de Branas – Dimensões Extras

- Nosso universo é um subespaço de um mega-universo com dimensões extras
- Todas as partículas e a maioria das forças estão confinadas no nosso mundo-brana: fótons, elétrons, prótons...



- **Mas a gravidade não é confinada. Propaga-se em todo o mega-universo .**

# Modificação na Lei de Newton da Gravitação

- Partículas e campos do Modelo Padrão são restritos à brana.
- Gravidade se propaga no bulk.
- Dimensões extras compactificadas a um raio  $R$
- 1ª implicação: Lei de Newton  $1/r^2$  modificada for  $r \sim R$
- testes com experimentos tipo Cavendish não mostram essas modificações.

# Mecânica Quântica

- Partícula submetida a um poço de potencial quadrado infinito.
- Níveis discretos de energia quantizada.

# Modos Massivos de Kaluza-Klein

- Campos do bulk são expandidos em “torres” de Kaluza-Klein.
- Em 4d aparecem como “partículas” massivas.

- **Observações experimentais dos estados KK**  
**Indica evidências da existência de dimensões extras**
- **Propriedades dos estados KK**  
**Determinadas pela geometria das dimensões extras**  
**⇒ Podem ser medidas experimentalmente !**

A física das dimensões extras é a física dos estados de Kaluza-Klein.

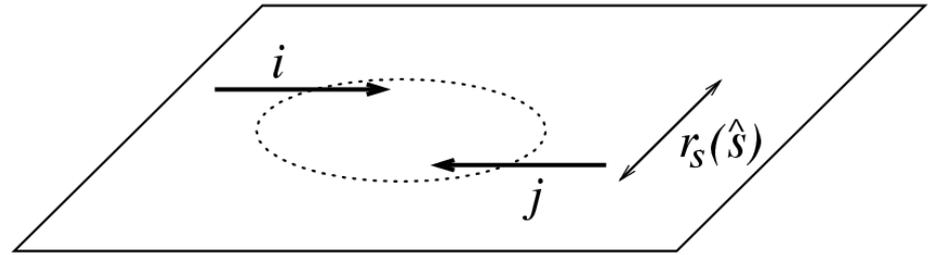
# À procura das dimensões extras

## Possíveis maneiras de encontrar dimensões extras

- ✓ **Modificações da gravidade em curtas distâncias**
- ✓ **Efeitos das partículas KK em processos astrofísicos/cosmológicos**
- ✓ **Observação das partículas KK em aceleradores de alta energia**

# Buracos Negros

- Se duas partículas passam muito perto uma da outra com energia suficiente, elas formarão um buraco negro microscópico



- Para 3 dimensões espaciais a gravidade é muito fraca para que isso aconteça, mas considerando dimensões extras a gravidade torna-se mais forte e micro buracos negros podem ser criados em colisões de partículas  $\longrightarrow$  LHC

# Evaporação do Buraco Negro

- Buracos negros “normais”:

Massa:  $M_{\text{BH}} \sim M_{\text{sun}}$

Tamanho: kilometro

Temperatura: 0.01 K

Vida média: ~ eterna



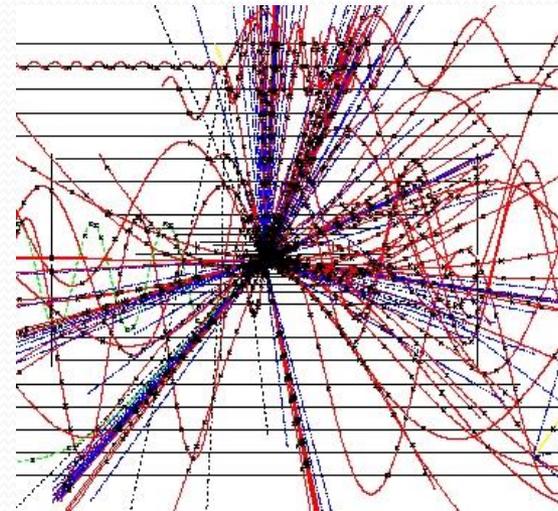
- Micro buracos negros:

Massa:  $M_{\text{BH}} \sim 1000 M_{\text{proton}}$

Tamanho:  $10^{-18}$  m

Temperatura:  $10^{16}$  K

Vida média:  $10^{-27}$  s



Eles explodem!

# Modelo de Randall-Sundrum II

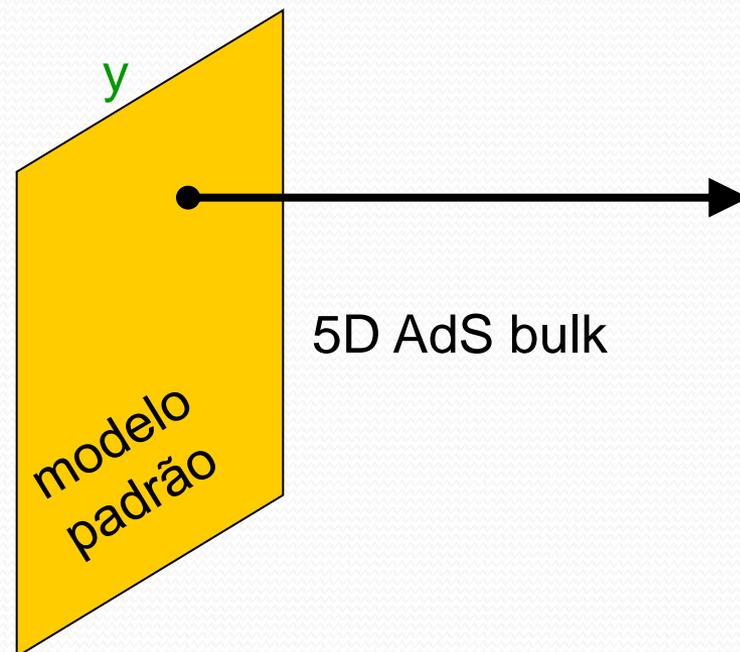
## 1 brana

- ❖ Métrica do bulk é uma fatia
- ❖ de um espaço-tempo
- ❖ **Anti de Sitter** ( $AdS_5$ ),  $L < 0$ ,

## 5D

$$ds^2 = e^{-2K(y)} h_{mn} dx^m dx^n + dy^2$$

- ❖ Solução do **problema da hierarquia**
- ❖ ( $10^{19}$  GeV Planck vs. 100 GeV eletrofraca)
- ❖ consequência: correção da força gravitacional na brana.



# Modelo de Randall-Sundrum II

- Potencial de Newton modificado para pontos massivos na brana

$$V(r) = \frac{G_N m_1 m_2}{r} \left( 1 + \frac{l^2}{r^2} + O(r^{-3}) \right)$$

onde  $l^2 = -6/(\Lambda_5 k_5^2)$

**Cálculos levam a que  $l < 1mm$**

# Modelo RS II (uma brana)

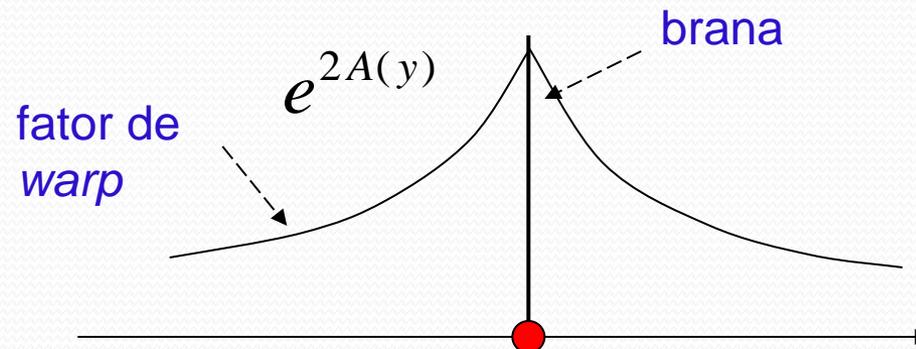


$\text{AdS}_5$

$$ds^2 = e^{2A(y)} \eta_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu + dy^2$$

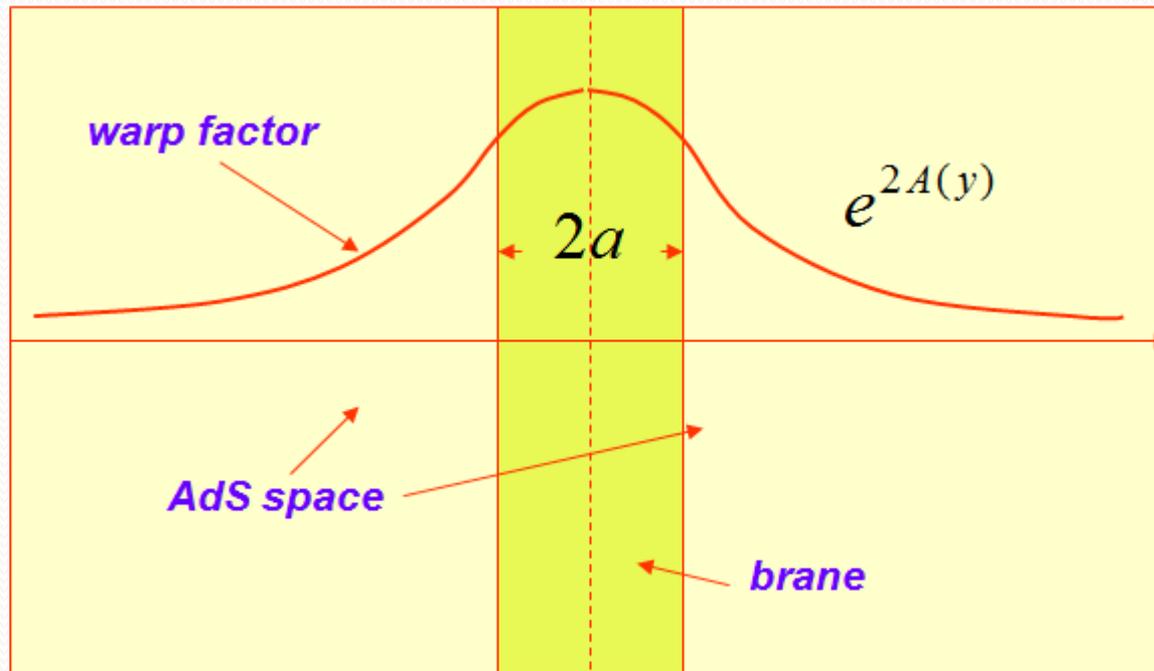
$$A(y) = -k|y|$$

Uma brana *flat* (com torsão) embebida em um bulk  $\text{AdS}_5$



# O kink como uma membrana

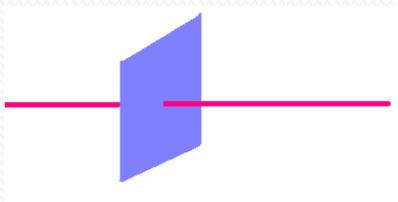
- Brana espessa



Branas tem uma espessura finita e essa espessura funciona como um regulador natural para as divergências superficiais.

# O kink como uma membrana

Defeito topológico + dimensões extras



$d=5$  Domain wall (parede de domínio)

O espaço interno de um defeito topológico vivendo em um espaço-tempo de dimensão mais alta

$$S = \int d^5x \sqrt{-G} \left[ 2M^3 R - \frac{1}{2} (\partial\phi)^2 - V(\phi) \right]$$

- $M$  é a escala de Planck em 5D
- $R$  é o tensor de curvatura
- $\phi$  não é um campo no bulk mas a coisa da qual a brana é construída
- O fator *warp* é uma função suave de  $y$

## Equação do movimento

$$R_{MN} - \frac{1}{2} G_{MN} R = \frac{1}{4M^3} \left\{ \partial_M \phi \partial_N \phi - G_{MN} \left[ \frac{1}{2} (\partial \phi)^2 + V(\phi) \right] \right\},$$
$$\frac{1}{\sqrt{-G}} \partial_M \left\{ \sqrt{-G} G^{MN} \partial_N \phi \right\} = \frac{\partial V}{\partial \phi}$$

A equação do movimento para o campo  $\phi$  suporta uma solução de kink mesmo em um *background* gravitacional

A solução de kink é dada por

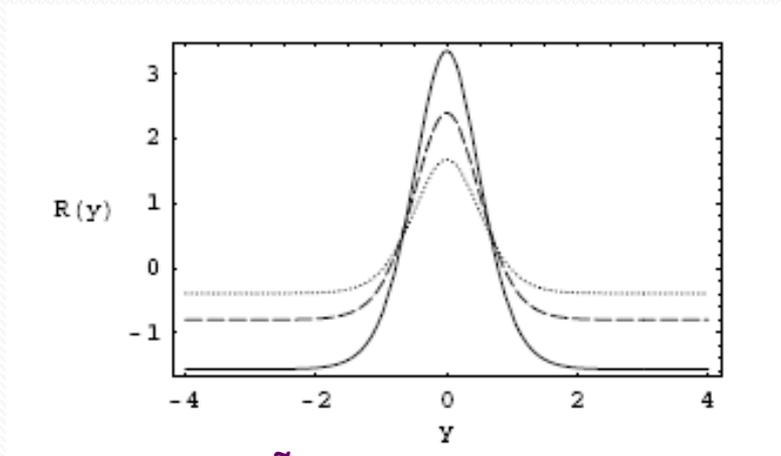
$$\phi(y) = v \tanh(ay)$$

Usando o seguinte ansatz para a métrica  $G_{MN} = \begin{pmatrix} e^{2A(y)}\eta_{\mu\nu} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & 1 \end{pmatrix}$

As equações de movimento  $\begin{cases} \frac{1}{2}(\phi')^2 - V(\phi) = 24M^3(A')^2 \\ \frac{1}{2}(\phi')^2 + V(\phi) = -12M^3A'' - 24M^3(A')^2 \end{cases}$

Com a solução de kink escolhida, a função  $A(y)$  deve ser

$$A(y) = \frac{v^2}{72M^3} [4 \ln \cosh(ay) - \tanh^2(ay)]$$



Espaço-tempo sem singularidade

Curvatura escalar finita

**OBSERVAÇÕES IMPORTANTES**

POTENCIAL/TOPOLOGIA  $\longrightarrow$  SOLUÇÃO DE KINK  $\longrightarrow$  FATOR DE WARP

# "Deformed DW Branes"

Nova abordagem



Superpotencial



Deformações de  $\lambda\phi^4$

$$W_p(\phi) = \frac{p}{2p-1} \phi^{\frac{2p-1}{p}} - \frac{p}{2p+1} \phi^{\frac{2p+1}{p}}$$

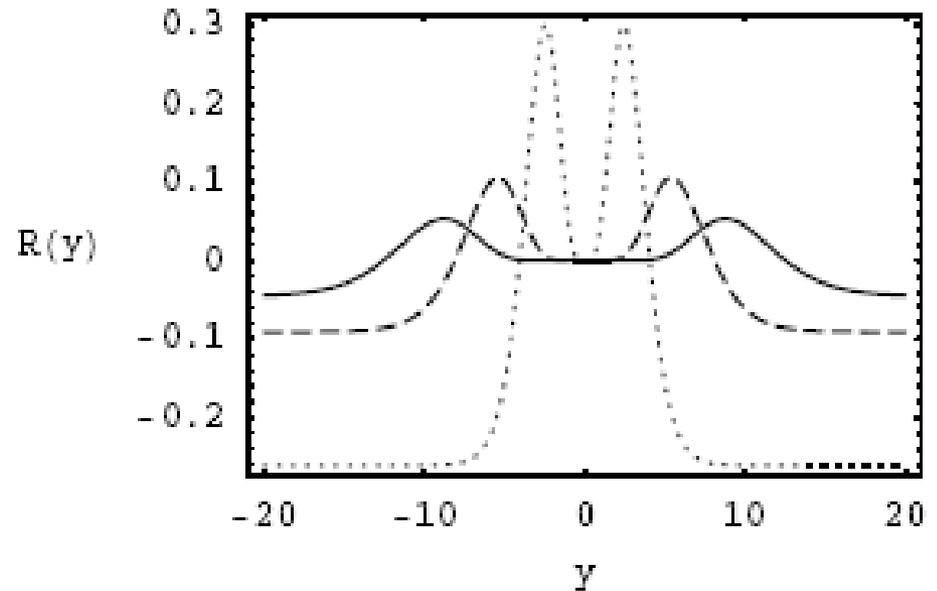
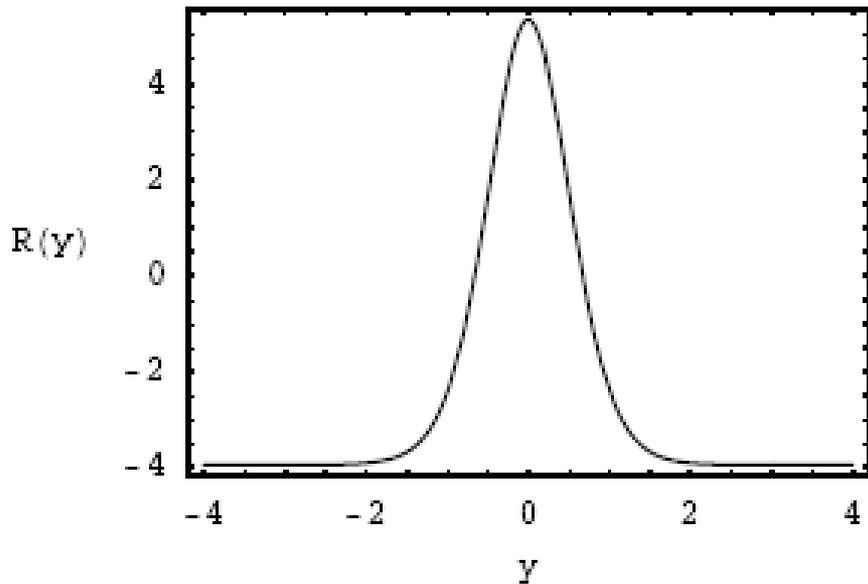
Solução de 2- kink

$$\phi_p(y) = \tanh^p\left(\frac{y}{p}\right).$$

$$A_p(y) = -\frac{1}{6} \frac{p}{2p+1} \tanh^{2p}\left(\frac{y}{p}\right) - \frac{1}{3} \left( \frac{p^2}{2p-1} - \frac{p^2}{2p+1} \right) \left\{ \ln \left[ \cosh\left(\frac{y}{p}\right) \right] - \sum_{n=1}^{p-1} \frac{1}{2n} \tanh^{2n}\left(\frac{y}{p}\right) \right\}$$

# DW Branas Deformadas

- Escalar de Ricci  $R = -[8A_p'' + 20(A_p')^2],$



Solução de curvatura invariante para  $p=1$  (left) e  $p=3$ ,  $p=5$  e  $p=7$  (right)

# DW Branas Deformadas

- Campo Escalar

Um campo escalar real acoplado à gravidade através da ação

$$\frac{1}{2} \int d^4x dy \sqrt{-G} G^{MN} \partial_M \phi \partial_N \phi$$

$$\eta^{\mu\nu} \partial_\mu \partial_\nu \Phi + e^{-2A_p(y)} \partial_y \left[ e^{4A_p(y)} \partial_y \Phi \right] = 0$$

Equação do Movimento

$$\Phi(x, y) = \chi(x) \psi(y)$$

$$4A'_p \frac{d\psi}{dy} + \frac{d^2\psi}{dy^2} = -m^2 e^{-2A_p} \psi$$

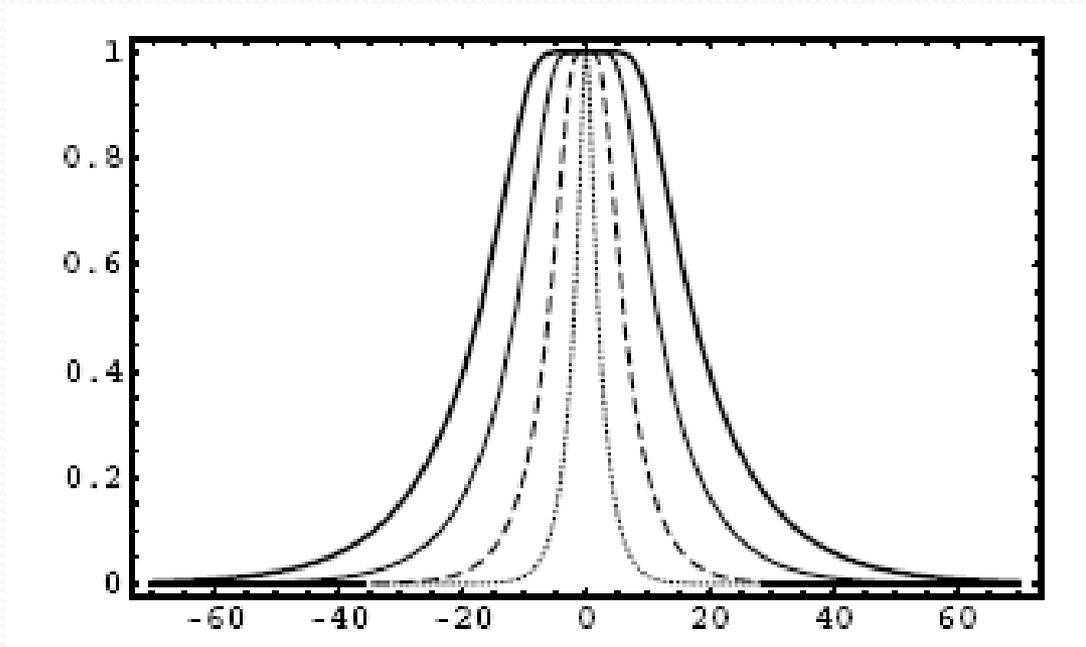
Modo Zero



$$\psi(y) = c$$

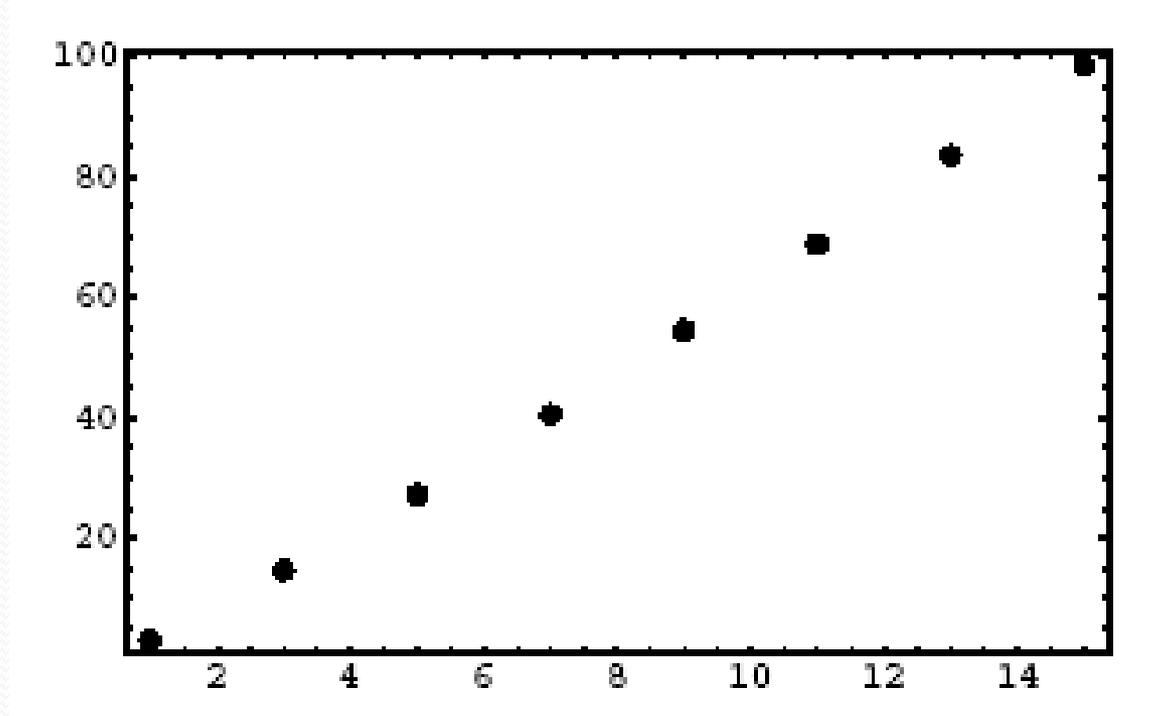
# DW Branas Deformadas

$$\frac{1}{2} \int d^4x dy \sqrt{-G} G^{MN} \partial_M \Phi \partial_N \Phi \Rightarrow \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} dy \psi^2 e^{2A_p} \int d^4x \eta^{\mu\nu} \partial_\mu \chi \partial_\nu \chi$$



Solução de  $\psi^2 e^{2A_p}$  para  $p=3$  (dashed),  $p=5$  (line) e  $p=7$  (thick)

E se a integral for finita para todos os p's?



Plots of  $\int_{-\infty}^{\infty} \psi^2 e^{2A_p} dy$  for various  $p$ .



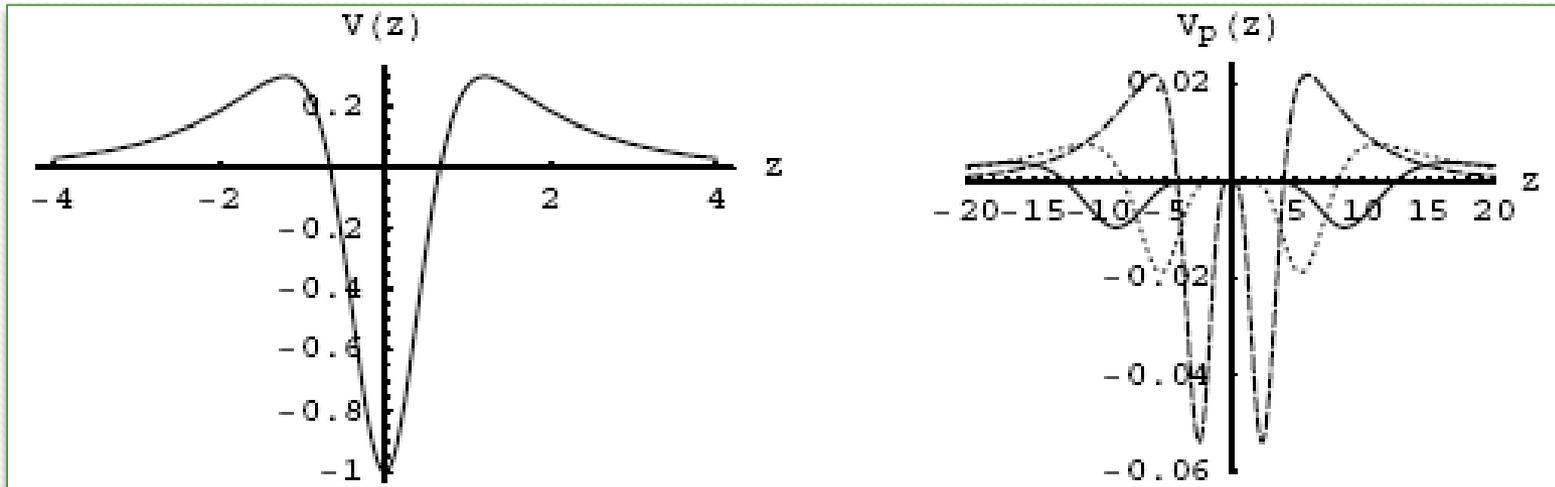
**Localização do Modo Zero**

# Modos Massivos

$$\left\{ \frac{d^2}{dy^2} + 4A' \frac{d}{dy} \right\} \psi = -m^2 e^{-2A} \psi$$

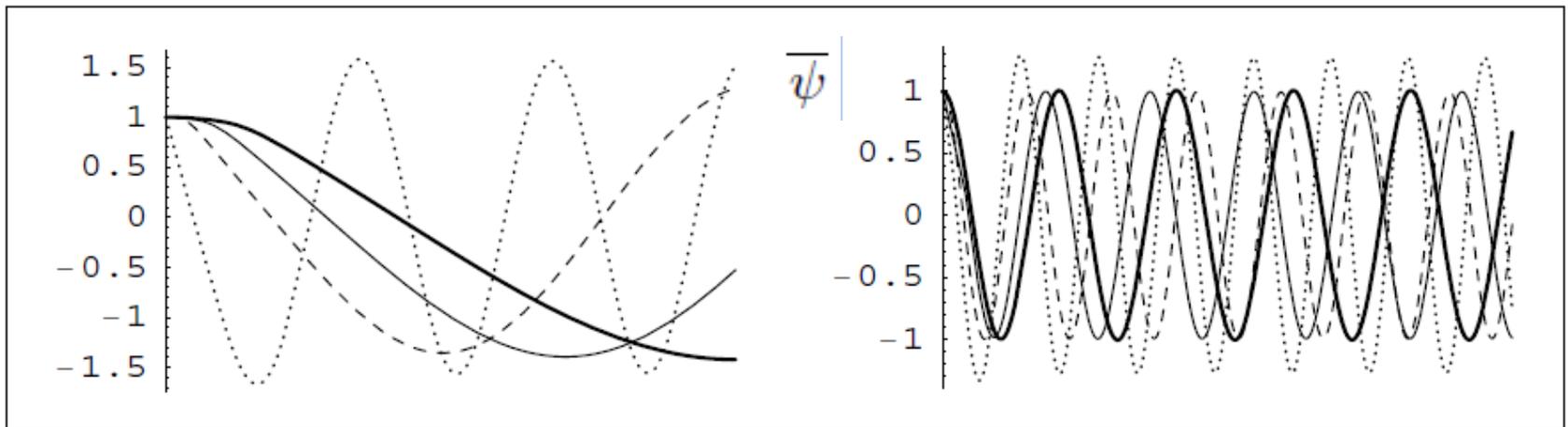


$$\left\{ -\frac{d^2}{dz^2} + \bar{V}(z) \right\} \bar{\psi} = m^2 \bar{\psi} \quad \text{where} \quad \nabla_p(z) = e^{2A_p} \left[ \frac{15}{4} (A'_p)^2 + \frac{3}{2} A''_p \right]$$



Plots of  $\nabla_p(z)$  for  $p = 1$  (left) and for  $p = 3$  (dashed line),  $p = 5$  (dotted line) and  $p = 7$

# Modos Massivos



Plots para  $p=1$ ,  $p=3$ ,  $p=5$  e  $p=7$

$m^2 \leq \bar{V}_p(z)_{max}$  (left)

$m^2 > \bar{V}_p(z)_{max}$  (right)

Sem localização de modos massivos escalares!!

# Novas geometrias

- Brana de Bloch (5D e 6D)
- *Conifold* (6D)
- Charuto (6D)
- Brana tipo Bounce (6D)
- *Standing wave* brane (6D)

# On Gravity localization under Lorentz Violation in warped scenario

Victor Santos, C. A. S. Almeida

*Physics Department, Federal University of Ceará,  
P.O. Box 6030, 60455-760,  
Fortaleza, Ceará, Brazil*

---

## Abstract

Recently Rizzo studied the Lorentz Invariance Violation (LIV) in a brane scenario with one extra dimension where he found a non-zero mass for the four-dimensional graviton. This leads to the conclusion that five-dimensional models with LIV are not phenomenologically viable. In this work we re-examine the issue of Lorentz Invariance Violation in the context of higher dimensional theories. We show that a six-dimensional geometry describing a string-like defect with a bulk-dependent cosmological constant can yield a massless 4D graviton, if we allow the cosmological constant variation along the bulk, and thus can provide a phenomenologically viable solution for the gauge hierarchy problem.

*Keywords:* Lorentz Invariance Violation, Large Extra Dimensions, Classical Theories of Gravity

---

## 1. Introduction

After a long time of experimental success showed by the data gathered

Phys. Lett. B718 (2013) 1114

**Quebra da simetria de Lorentz**

5D – Não há graviton não-massivo na presença de quebra da simetria de Lorentz

6D – Uma dimensão extra compacta e outra infinita com quebra de Lorentz: Graviton sem massa

# GRUPO DE TEORIA QUÂNTICA DE CAMPOS

## Departamento de Física-UFC

Carlos Alberto Santos de Almeida

Luciana Angelica da Silva Nunes (UFERSA)

Wilami Teixeira da Cruz (IFCE-Juazeiro do Norte)

Roberto Vinhaes Maluf Cavalcante (Pós-doc)

José Euclides Gomes da Silva (Pós-doc)

### DOUTORANDOS

Hudson Pacheco Pinheiro

Victor do Nascimento Santos

Francisco Wagner Costa

Diego Frankin de Souza Veras

Julio Cesar Brasil

Samuel Batista Bastos

Davi Monteiro Dantas

Waldo Hosternes Peixoto Brandão

8 doutores e 27 mestres formados

# Linhas de Pesquisas

➤ Física de Dimensões Extras - Modelos de Branas – Novas geometrias

➤ Modelos Topológicos em Gravitação e Cosmologia

- Paredes de domínio, cordas cósmicas

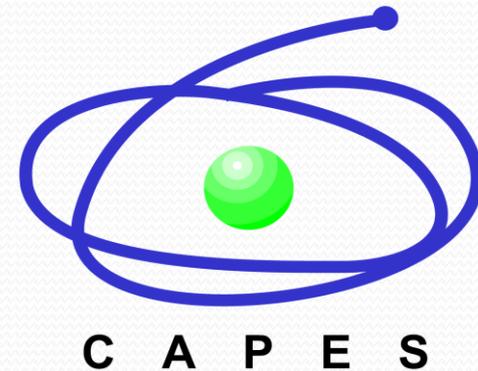
➤ Modelos Topológicos em Teoria Quântica de Campos

- Dualidade em Teoria de Campos
- Estatística fracionária
- Vórtices em Sistemas Planares

➤ Violação de Lorentz em cenários gravitacionais

➤ Teorias de Gauge Supersimétricas

# Agradecimento ao apoio financeiro



Meu maior agradecimento ao meu orientador  
**José Abdalla Helayel Neto.**

- ➡ Pela minha formação em Teoria Quântica de Campos
- ➡ Pela orientação na minha tese de doutorado
- ➡ Pelo apoio e orientação pessoal durante todos os anos após o meu doutorado
- ➡ Pelos seus ensinamentos e posturas tanto em Física como fora dela
- ➡ Parabéns pelos 60 anos profícuos!
- ➡ Parabéns por tudo!



## Results in Kalb-Ramond field localization and resonances on deformed branes

W. T. CRUZ<sup>1,3</sup>, M. O. TAHIM<sup>2</sup> and C. A. S. ALMEIDA<sup>3(a)</sup>

<sup>1</sup> *Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE), Campus Juazeiro do Norte 63040-000 Juazeiro do Norte, Ceará, Brazil*

<sup>2</sup> *Departamento de Ciências da Natureza, Faculdade de Ciências, Educação e Letras do Sertão Central (FECLESC), Universidade Estadual do Ceará - 63900-000 Quixadá, Ceará, Brazil*

<sup>3</sup> *Departamento de Física, Universidade Federal do Ceará - C.P. 6030, 60455-760 Fortaleza, Ceará, Brazil*

received 3 October 2009; accepted in final form 5 November 2009

published online 4 December 2009

PACS 11.10.Kk – Field theories in dimensions other than four

PACS 11.27.+d – Extended classical solutions; cosmic strings, domain walls, texture

PACS 04.50.-h – Higher-dimensional gravity and other theories of gravity

**Abstract** – We make an analysis about several aspects of localization of the Kalb-Ramond gauge field in a specific four-dimensional AdS membrane embedded in a five-dimensional space-time. The membrane is generated from a deformation of the  $\lambda\phi^4$  potential and belongs to a new class of defect solutions. In this context we find resonance structures in the analysis of massive modes. The study of deformed defects is important because they contain internal structures and these may have implications to the way the background space-time is constructed and the way its curvature behaves. The main objective here is to observe the contributions of the deformation procedure to the resonances and the well-known field localization methods.





Contents lists available at ScienceDirect

Physics Letters B

[www.elsevier.com/locate/physletb](http://www.elsevier.com/locate/physletb)



## Gauge field localization on a dilatonic deformed brane

W.T. Cruz<sup>a,b</sup>, M.O. Tahim<sup>c</sup>, C.A.S. Almeida<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup> Departamento de Física, Universidade Federal do Ceará, C.P. 6030, 60455-760 Fortaleza, Ceará, Brazil

<sup>b</sup> Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE), Campus Juazeiro do Norte, 63040-000 Juazeiro do Norte, Ceará, Brazil

<sup>c</sup> Departamento de Ciências da Natureza, Faculdade de Ciências, Educação e Letras do Sertão Central (FECIESC), Universidade Estadual do Ceará, 63900-000 Quixadá, Ceará, Brazil

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 29 October 2009

Accepted 19 February 2010

Available online 26 February 2010

Editor: M. Cvetič

#### Keywords:

Braneworlds

Field localization

Gauge fields

Domain walls

### ABSTRACT

Membranes with internal structures presents several important characteristics in brane world scenarios. In this context we give new results in the study of localization of gauge vector fields in a very specific kink-like solution. We analyze, in particular, the coupling produced by the dilaton field in the space–time background. We find resonance structures in the KK spectrum revealing interesting behavior of coupling between massive states and matter localized in the membrane.

© 2010 Elsevier B.V. All rights reserved.

## Graviton resonances on deformed branes

W. T. CRUZ<sup>1</sup>, A. R. GOMES<sup>2</sup> and C. A. S. ALMEIDA<sup>3(a)</sup>

<sup>1</sup> *Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE), Campus Juazeiro do Norte 63040-000 Juazeiro do Norte, Ceará, Brazil*

<sup>2</sup> *Instituto Federal do Maranhão, Campus Monte Castelo - São Luís, Maranhão, Brazil*

<sup>3</sup> *Departamento de Física, Universidade Federal do Ceará - C.P. 6030, 60455-760 Fortaleza, Ceará, Brazil*

received 1 June 2011; accepted in final form 7 September 2011

published online 18 October 2011

PACS 11.10.Kk – Field theories in dimensions other than four

PACS 11.27.+d – Extended classical solutions; cosmic strings, domain walls, texture

PACS 04.50.-h – Higher-dimensional gravity and other theories of gravity

**Abstract** – Plane-wave solutions of Schrödinger-like equations obtained from the metric perturbations in 5D braneworld scenarios can present resonant modes. The search for those structures is important because they can provide us with massive modes with not suppressed couplings with the membrane. We propose in this paper the study of graviton Kaluza-Klein spectrum in a special kind of membrane that possesses internal structure. The interest in the study of these deformed defects is due to the fact that they have a richer internal structure that has implications in the matter energy density along the extra dimensions and this produces a space-time background whose curvature has a splitting, if compared to the usual kink-like models. Such models arise from (4, 1)-branes constructed with one scalar field coupled with gravity where we find two-kink solutions from deformations of a  $\phi^4$  potential. The main objective of this work is to observe the effects of deformation process in the resonant modes as well as in the coupling between the graviton massive modes and the brane.

## Resonances in gravitational scenario given by deformed branes

W.T. Cruz<sup>1</sup>, C.A.S. Almeida<sup>2,a</sup>

<sup>1</sup>Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE), Campus Juazeiro do Norte, 63040-000 Juazeiro do Norte, Ceará, Brazil

<sup>2</sup>Departamento de Física, Universidade Federal do Ceará, C.P. 6030, 60455-760 Fortaleza, Ceará, Brazil

Received: 26 January 2010 / Revised: 28 April 2011

© Springer-Verlag / Società Italiana di Fisica 2011

**Abstract** In this work we examine a five-dimensional brane-world model with brane structure driven by a real scalar field. From the deformation of a kink-like defect we find a new class of brane solutions containing internal structures which have implications for the way the background space-time is constructed and the way its curvature behaves. Initially, for spin 0 scalar field, we find a zero mode which can be localized on the deformed brane. However, this result can change by the gravitational interaction with the brane internal structure. Analyzing the massive modes of the scalar field, using two different methods, we find resonance structures similar to those found in the study of gravity localiza-

[1, 2]. Some characteristics of such deformed defect models were considered in phase transitions in warped geometries [11]. As in the usual brane-world scenarios, the observable universe here is represented by a four-dimensional membrane embedded in a higher-dimensional space-time with nonfactorizable background geometry. To the best of our knowledge, previous works have not considered the study of massive modes for scalar field in the context of nontrivial internal structured branes.

The number of extra dimensions guides us in choosing the right type of defect in order to mimic our brane world. Moreover, the kind of membrane structure is very impor-

**Scalar field localization on 3-branes placed at a warped resolved conifold**

J. E. G. Silva and C. A. S. Almeida

*Departamento de Física—Universidade Federal do Ceará, Caixa Postal 6030, 60455-760 Fortaleza-Ceará-Brazil*  
(Received 21 June 2011; revised manuscript received 5 September 2011; published 24 October 2011)

We have studied the localization of a scalar field on a 3-brane embedded in a six-dimensional warped bulk of the form  $M_4 \times C_2$ , where  $M_4$  is a 3-brane and  $C_2$  is a 2-cycle of a six-dimensional resolved conifold  $C_6$  over a  $T^{1,1}$  space. Since the resolved conifold is singularity-free in  $r = 0$  depending on a resolution parameter  $a$ , we have analyzed the behavior of the localization of a scalar field when we vary the resolution parameter. On one hand, this enables us to study the effects that a singularity has on the field. On the other hand we can use the resolution parameter as a fine-tuning between the bulk Planck mass and 3-brane Planck mass and so it opens a new perspective to extend the hierarchy problem. Using a linear and a nonlinear warp factor, we have found that the massive and massless modes are trapped to the brane even in the singular cone ( $a \neq 0$ ). We have also compared the results obtained in this geometry and those obtained in other six-dimensional models, such as stringlike geometry and cigarlike universe geometry.

DOI: 10.1103/PhysRevD.84.085027

PACS numbers: 11.10.Kk, 04.50.-h, 11.27.+d, 12.60.-i

**I. INTRODUCTION**

Since the original Randall-Sundrum model [1,2] many works have intended to extend the localization of various fields on a 3-brane embedded in the higher dimensional bulk. Besides the localization of gravity and other fields, many models have been suggested to explain other physical problems, for instance, the small value of the cosmo-

It has a naked singularity that arises as an orbifold fixed point of the group  $Z_n$ , i.e.,  $C^m = R^n/Z_n$ . The conifold is an example of a Calabi-Yau space, a Ricci-flat manifold that is a candidate to an internal space in compactification of string theories. The conifold is a generator of all Calabi-Yau spaces through a process that generates singularities and is called conifold transitions [9]. In this process, some fields become massless and then the spectrum of the fields



ELSEVIER

Contents lists available at SciVerse ScienceDirect

## Physics Letters B

[www.elsevier.com/locate/physletb](http://www.elsevier.com/locate/physletb)

# Brane bounce-type configurations in a string-like scenario

L.J.S. Sousa<sup>a,b</sup>, C.A.S. Silva<sup>c</sup>, C.A.S. Almeida<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup> Departamento de Física, Universidade Federal do Ceará – UFC, C.P. 6030, 60455-760 Fortaleza, Ceará, Brazil

<sup>b</sup> Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE), Campus de Canindé, 62700-000 Canindé, Ceará, Brazil

<sup>c</sup> Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB), Campus Campina, Rua Tranquilino Coelho Lemos, 671, Jardim Dinamérica, Campina Grande, Paraíba, Brazil

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 7 September 2012

Accepted 25 September 2012

Available online 3 October 2012

Editor: A. Ringwald

### ABSTRACT

Brane world six-dimensional scenario with string-like metric has been proposed to alleviate the problem of field localization. However, these models have been suffering from some drawbacks, such as the need for fine-tuning of energy conditions as well as from difficulties to find analytical solutions. In this work we propose a new model where a brane is made of a scalar field with bounce-type configurations and the bulk with a string-like metric. This model produces a sound AdS scenario where none of the physical quantities is infinite. Among these quantities are the components of the energy-momentum tensor, which have their positivity ensured by a suitable choice of the bounce configuration. One of the advantages of this model is that the warp factor can be obtained analytically from the equations of motion for the scalar field, obtaining as a result a thick brane configuration, in a six-dimensional scenario. Moreover, the study of the scalar field localization in this scenario is done.