

# **Partículas, Campos e Cordas**

**Henrique Boschi Filho  
Instituto de Física  
UFRJ**

# A estrutura da matéria

- Demócrito (420 A.C.): Átomos - parte indivisível da matéria
- Os 2000 anos seguintes: Descoberta dos elementos químicos
- Mendeleieff (1869): Tabela Periódica dos elementos químicos
- J. J. Thomson (1897): Descoberta do elétron ( $e^-$ ) num tubo de raios catódicos

# A estrutura da matéria II

- Planck (1900): explica a radiação térmica do corpo negro com a quantização das energias de seus modos:

$$E = hf$$

onde  $h = 6,6 \times 10^{-34}$  Joules x segundo,

$f$  = frequência dos osciladores do corpo negro

# A estrutura da matéria III

- Einstein (1905):
- Propõe a Teoria da Relatividade (Restrita) postulando que a velocidade da luz ( $c$ ) é a mesma em todos os referenciais inerciais.

$$E = mc^2$$

- Explica o efeito fotoelétrico propondo que luz seja constituída de partículas (fótons,  $\gamma$ ) de energia:

$$E = hf$$

# A estrutura da matéria IV

- Rutherford (1910): Descoberta do Núcleo atômico
- O modelo atômico de Rutherford é instável: elétrons decairiam para o núcleo, pois de acordo com o eletromagnetismo, partículas carregadas aceleradas emitem radiação e portanto perdem energia.

# A estrutura da matéria V

- Modelo de Bohr (1914): Quantização do momento angular (e portanto energia) dos níveis atômicos:

$$L = nh / 2\pi \quad (n = 1,2,3,\dots)$$

Átomos estáveis, porém não explicados pela física clássica (eletromagnetismo + mecânica)

# A estrutura da matéria VI

- De Broglie (1919):  
Dualidade onda-partícula.
- momento linear  $\Leftrightarrow$  comprimento de onda:

$$p = \frac{h}{\lambda}$$

Toda partícula (elétron, fóton, ...) se comporta como uma onda e toda onda se comporta como uma partícula

# A estrutura da matéria VII

- Mecânica Quântica (ondulatória) (1925): Schrödinger, Heisenberg, Pauli, ...
- Interpretação probabilística da natureza
- O estado de um sistema ou partícula é descrito por uma função de onda complexa  $\Psi(x,y,z,t)$  e a probabilidade é

$$P = |\Psi(x, y, z, t)|^2$$



# A estrutura da matéria VIII

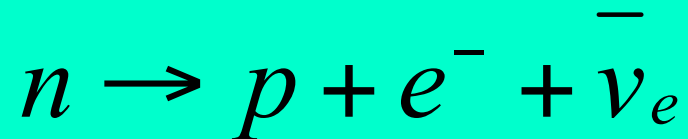
- P.A.M. Dirac (1928): Mecânica quântica relativística -> previsão das antipartículas
- C. Anderson (1932): Descoberta do pósitron ( $e^+$ =antielectron) em raios cósmicos
- J. Chadwick (1932): Descoberta do nêutron no bombardeio de Berílio por raios gama

# Spin

- Na mecânica quântica não-relativística o spin não surge naturalmente e foi proposto num modelo por Pauli
- Na mecânica quântica relativística proposta por Dirac o spin do elétron ( $1/2$ ) aparece naturalmente
- Outra equação quântica relativística descreve partículas de spin zero.

# Partículas

- Teoria de Fermi (1934): Decaimento  $\beta$  (força nuclear fraca) e descoberta do (anti) neutrino do elétron ( $\bar{\nu}_e$ )



# Partículas II

- Teoria de Yukawa (1935) para a força nuclear forte: Proposta a existência dos mésons  $\pi$
- Powell, Occhialini e Lattes (1947) descobrem os mésons  $\pi$  e que estes decaem como:

$$\pi^{-} \rightarrow \mu^{-} + \bar{\nu}_{\mu}$$

e portanto descobriram também os múons e seus neutrinos

# Partículas III

- Anos 1950-60: várias partículas (“ressonâncias”) que interagem fortemente (hádrons) são descobertas (estranheza)
- Gell-Mann e Ne’eman (1961) propõe o modelo de quarks para os hádrons

# Força x Campo

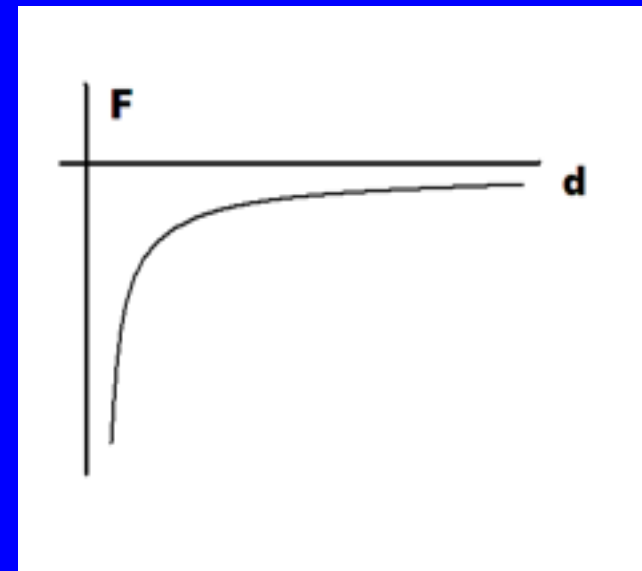
- Força eletrostática (Coulomb):

$$F = k \frac{qQ}{d^2}$$

- Campo elétrico:

$$E = k \frac{Q}{d^2}$$

$$F = qE$$



# Força x Campo II

- Porém, o conceito de Força (ação à distância) entre duas partículas supõe uma velocidade infinita de propagação da informação, proibida pela Teoria da Relatividade.
- Já o conceito de Campo é compatível com a propagação de sinais com velocidade finita, igual à da luz

# Força x Campo III

- Portanto o conceito de Campo é naturalmente compatível com teorias relativísticas
- No contexto relativístico, força (ação à distância) é uma boa aproximação apenas no limite estático



# Campos

- Na mecânica quântica tudo o que se pode prever são probabilidades
- Na mecânica quântica relativística poderiam surgir probabilidades negativas, porém isto não acontece na sua formulação em termos de campos (Teoria Quântica dos Campos)

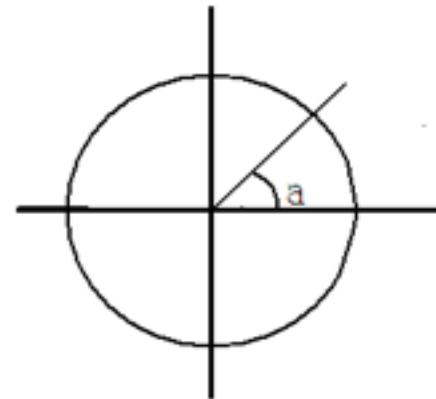
# Teoria Quântica dos Campos

- Eletrodinâmica Quântica (QED): Feynman, Schwinger e Tomonaga (1949)
- Descreve a interação de partículas eletricamente carregadas (spin  $1/2$ ) com os fótons (spin 1)

# A simetria da QED

- Simetria de calibre com um parâmetro livre, equivalente a uma rotação num plano complexo:

$$U(1)$$



# Teoria Quântica dos Campos II

- Yang e Mills (1954) generalizaram a QED para uma teoria com vários parâmetros arbitrários (calibre)
- Simetria de calibre com  $N^2-1$  parâmetros livres, equivalente a rotações num espaço complexo de  $N$  dimensões:

$$SU(N)$$

# Teoria Quântica dos Campos III

- Glashow, Salam e Weinberg (1960-68) propõem a teoria eletro-fracas  $U(1) \times SU(2)$  que unifica a QED com as interações fracas (decaimento  $\beta$ )
- Essa teoria prevê a existência de três partículas de spin 1:  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$ , encontradas no CERN em 1979.

# Teoria Quântica dos Campos IV

- 't Hooft e Veltman (1971) mostram que as teorias de Yang-Mills são consistentes (renormalizáveis)
- Gross, Politzer e Wilczek (1973) mostram que as interações fortes devem ser descritas pela teoria de Yang-Mills  $SU(3)$  chamada Cromodinâmica Quântica (QCD)

# Teoria Quântica dos Campos V

- Os quarks (spin  $1/2$ ) possuem cargas chamadas de COR
- A interação forte entre os quarks se dá através dos glúons (spin 1).
- Quarks ou glúons *livres* e suas cores *NÃO* são observados na natureza (confinamento)

# O Modelo Padrão das Partículas

- Teoria eletrofraca  $U(1) \times SU(2)$

×

- Cromodinâmica Quântica  $SU(3)$

=

- Modelo Padrão  $U(1) \times SU(2) \times SU(3)$



# Partículas no Modelo Padrão

(Partículas Fundamentais ou Elementares)

- **FÉRMIONS**  
(Spin 1/2)
- Campos de Matéria
  - quarks  
(u, d, s, c, t, b)
  - léptons  
(e,  $\nu_e$ ,  $\mu$ ,  $\nu_\mu$ ,  $\tau$ ,  $\nu_\tau$ )

- **BÓSONS**  
(Spin 1)
- Campos de Interação
  - fótons
  - $W^+$ ,  $W^-$ , Z
  - glúons
- Higgs (Spin 0)  
(Prêmio Nobel 2013)

+ Excitações e Estados Ligados

# *Glúons*

# X

# *Fótons*

- Massa Nula
- Responsáveis pela Interação Forte
- São Portadores de Carga (de Cor)
- A Carga de Cor é confinada (não observada livremente na natureza)

- Massa Nula
- Resp. pela Interação Eletromagnética
- Não portam Carga Elétrica
- A Carga Elétrica não é confinada (observada livremente na natureza).

# *Glúons*

# X

# *Fótons* (II)

- Existem 3 tipos de Carga (e anticarga) de Cor - Simetria de calibre SU(3)
- Existem 8 tipos diferentes de Glúons
- Interagem diretamente entre si
- **Formam estados ligados**

- Só existe um tipo de Carga (e anticarga) Elétrica - Simetria de calibre U(1)
- Só existe um tipo de Fóton
- Não Interagem diretamente entre si
- **Não formam estados ligados**

# Glueballs

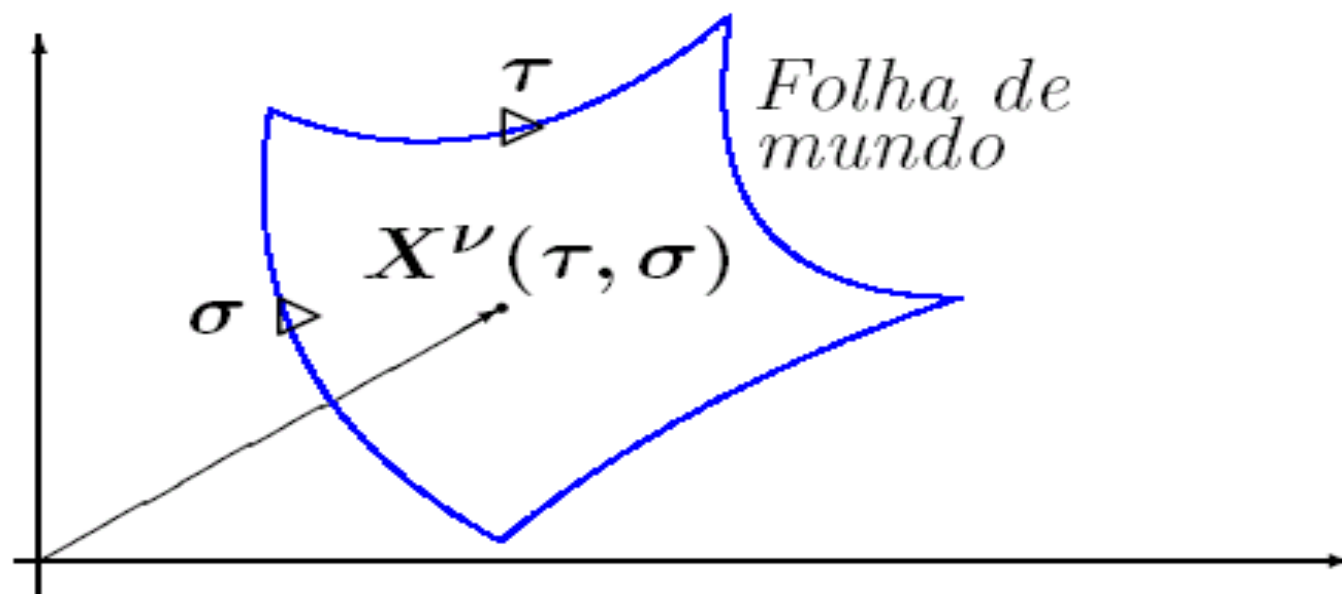
- São estados ligados de *glúons*.
- **Glueballs** são previstos teoricamente em diversas formas com diversos estados quânticos (spin, paridade e conjugação de carga:  $J^{PC}$  ).
- Ainda não foram observados mas há candidatos para os estados  $0^{++}$ ,  $0^{-+}$ , ...

# Limitações do Modelo Padrão das Partículas

- Não incluem a Gravitação
- Não explicam o Confinamento de quarks e glúons
- Não explicam as massas das muitas partículas que existem.
- Não explicam os diferentes acoplamentos
- ...

# Cordas

- São objetos extensos fundamentais da natureza (ao invés das partículas) e vivem em **10 dimensões**.
- Nessa Teoria, as Partículas são excitações (modos de vibração) das Cordas.
- Os campos e as correspondentes partículas são diferentes excitações da **mesma** corda.

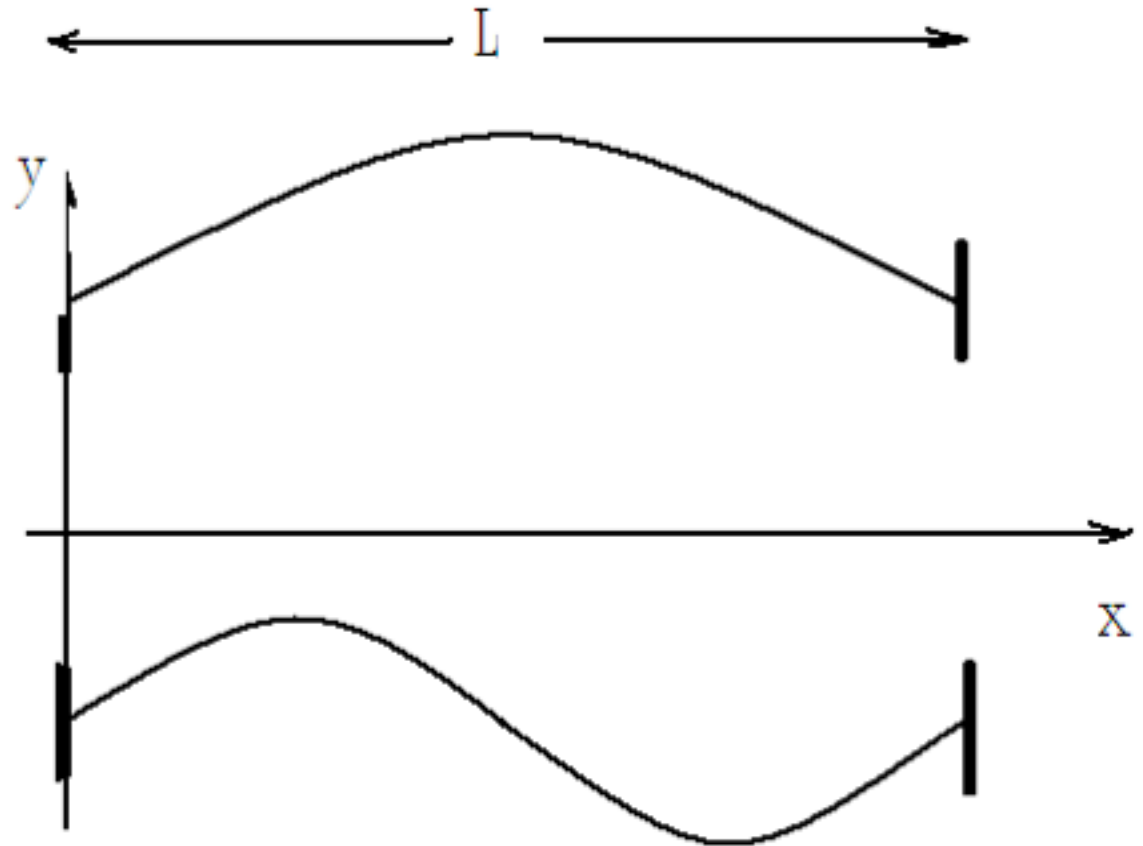


# Exemplo

...

$$y_0 \operatorname{sen}\left(\frac{\pi x}{L}\right)$$

$$y_0 \operatorname{sen}\left(\frac{\pi x}{2L}\right)$$





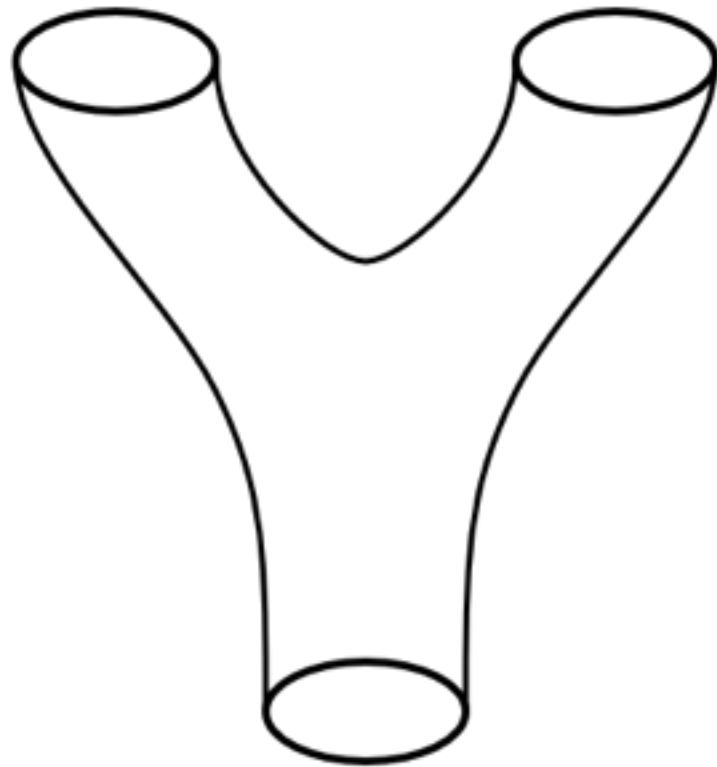
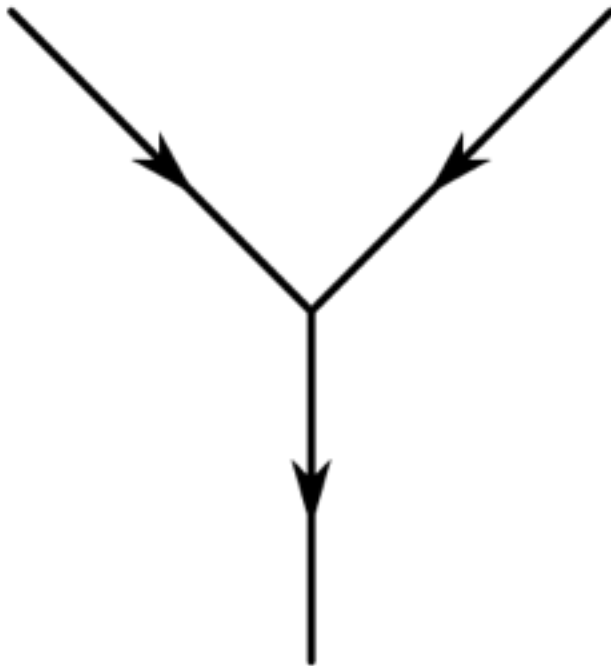
# Por que Teoria das Cordas?

- Uma vez quantizadas as Cordas temos, em princípio, uma Teoria onde TODAS as Partículas (Campos) do Modelo Padrão + Gravitação, já estão incluídas.
- Desse ponto de vista a Teoria das Cordas é, em princípio, uma Teoria Quântica para a Gravitação.

# Como surgiu a Teoria das Cordas?

- A partir de resultados Experimentais do Espalhamento de Hádrons (partículas que interagem através da Força Nuclear Forte)

# Interação de partículas e cordas



# Como entender a Física de 4 dimensões a partir das Cordas?

- Solução usual:
- Supor que existem 6 dimensões extras muito pequenas, muito menores que o núcleo atômico (Compactificação)
- Dependendo de como são essas dimensões extras a Física de 4 dimensões é diferente (Problema em aberto)

Nova Solução... Holografia!

# Conjectura de Maldacena (1997)

- **Teorias de Cordas** no espaço **anti-de Sitter** (espaço-tempo com curvatura cte. e negativa) são equivalentes a Teorias de Calibre (conforme)  $SU(N)$ , com  $N$  grande, na fronteira desse espaço.



**Correspondência AdS/CFT**

(anti-de Sitter/Teoria Campos Conformes)



# Conjectura de Maldacena II

- Nessa proposta o espaço das cordas de 10 dimensões corresponde a um espaço curvo de 5 dimensões (anti de Sitter) x hiperesfera também de 5 dimensões.
- A fronteira desse espaço tem 4 dimensões e corresponde ao espaço-tempo onde vivemos.



# Conjectura de Maldacena III

- Teorias conformes não possuem nenhuma escala e portanto não se pode realizar nenhuma medida nelas.
- Para descrever uma situação física realística é preciso modificar o espaço AdS de alguma forma, tornando a teoria não conforme.



# Modelo de Witten (1998)

- Considerar um buraco negro dentro do espaço de anti de Sitter
- Como o buraco negro tem um tamanho (seu raio) a teoria passa a ter uma escala natural de comprimento
- Buraco Negro no AdS  $\approx$  QCD !!!



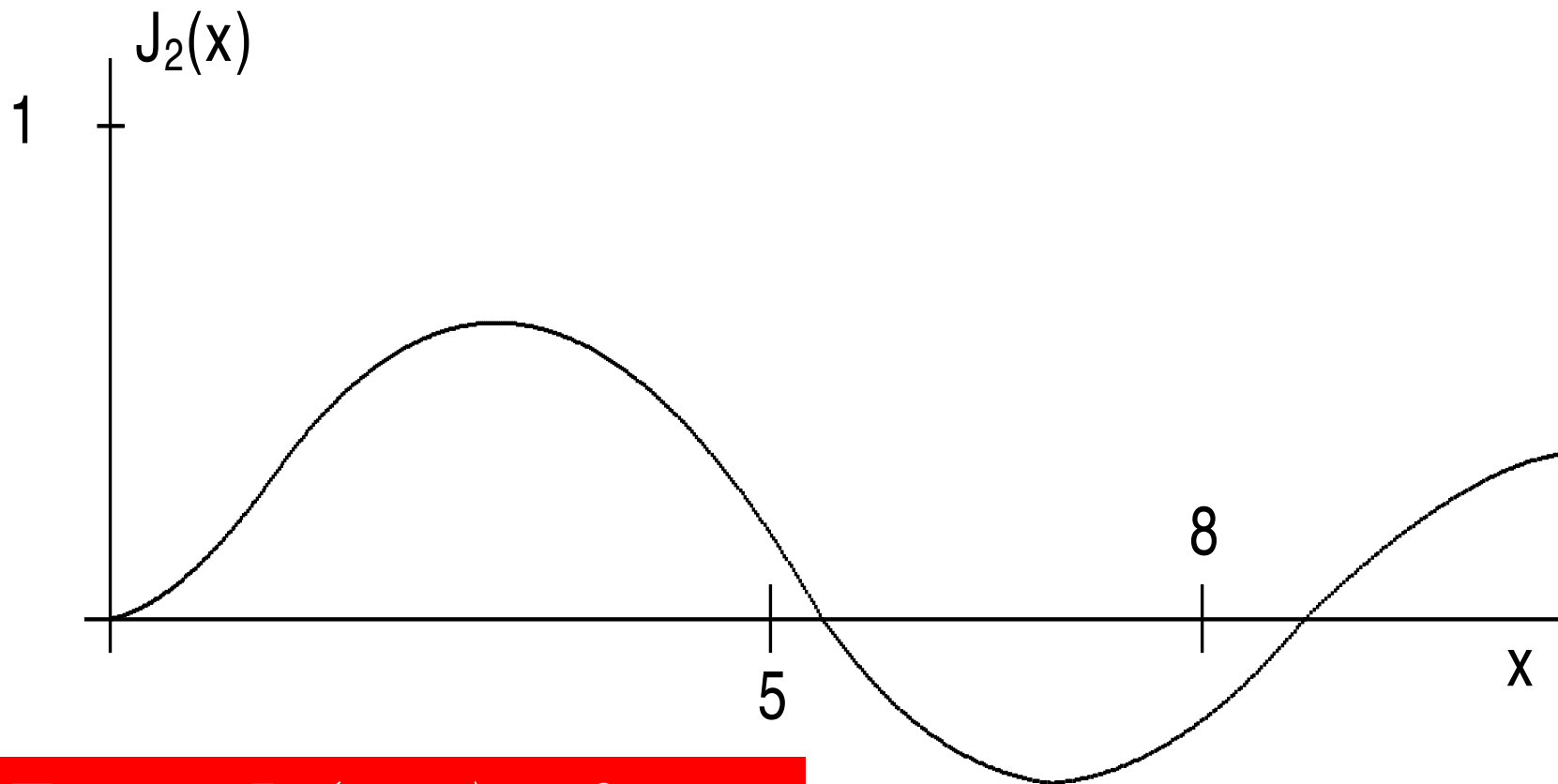
# Modelo de Witten II

- Witten sugere que se pode calcular as massas dos Glueballs a partir do modelo do Buraco Negro no AdS
- Csaki, Ooguri, Oz e Terning (1999) seguem a proposta de Witten e calculam numericamente massas de vários Glueballs

# Fatia do AdS

- Polchinski e Strassler (2002) usam uma fatia do AdS (cortando apenas a 5a. dimensão) e descrevem o espalhamento de Glueballs, em acordo com a QCD.
- No AdS ou na fatia cordas podem ser descritas por funções analíticas conhecidas na física matemática (funções de Bessel)

# Função de Bessel $J_2(x)$



Zeros:  $J_2(\chi_{2,n}) = 0$

$$u_n Z_{\max} = \chi_{2,n}$$

# Fatia do AdS II

- H. Boschi e N. Braga (2003) usam a fatia do AdS para calcular massas para Glueballs a partir dos zeros das funções de Bessel
- As massas dos Glueballs, dependentes do corte

$$z_{\max} \leftrightarrow \mu$$

# Massas dos Glueballs na Fatia

- A razão das massas é independente do corte

$$\frac{\mu_n}{\mu_1} = \frac{\chi_{2,n}}{\chi_{2,1}}$$

$\chi_{2,n}$  são os zeros da Função de Bessel  $J_2(u_n z)$

# Massas dos Glueballs Escalares

$JPC=0^{++}$ , na  $CDQ_4$ , em GeV

$(n)$	$SU(3)$ <i>na rede</i> <sup>(1)</sup>	<i>Buraco negro</i> <i>no AdS</i> <sup>(2)</sup>	<i>Fatia</i> <i>do AdS</i> <sup>(3)</sup>
<b>0</b>	1,61 $\pm$ 0,15	1,61 (dado)	1,61 (dado)
<b>1</b>	2,8	2,38	2,64
<b>2</b>	-	3,11	3,64
<b>3</b>	-	3,82	4,64
<b>4</b>	-	4,52	5,63
<b>5</b>	-	5,21	6,62

(1) Morningstar e Peardon, PRD 97; Teper, hep-lat 97

(2) Csaki, Ooguri, Oz e Terning, JHEP 99

(3) Boschi e Braga, JHEP 03

# Massas dos Glueballs $JPC=0^{++}$ , na $CDQ_3$ em termos da tensão da corda

$(n)$	$SU(3)$ na rede <sup>(1)</sup>	$SU(N),$ $N \rightarrow \infty$ na rede <sup>(1)</sup>	<i>Buraco</i> <i>Negro</i> no <i>AdS</i> <sup>(2)</sup>	<i>Fatia</i> do <i>AdS</i> <sup>(3)</sup>
<b>0</b>	4,239 $\pm 0,041$	4,065 $\pm 0,055$	4,07 (dado)	4,07 (dado)
<b>1</b>	$6,52 \pm 0,09$	$6,18 \pm 0,13$	7,02	7,00
<b>2</b>	$8,23 \pm 0,17$	$7,99 \pm 0,22$	9,92	9,88
<b>3</b>	-	-	12,80	12,74
<b>4</b>	-	-	15,67	15,60
<b>5</b>	-	-	18,54	18,45

<sup>(1)</sup> Morningstar e Peardon, PRD 97; Teper, hep-lat 97

<sup>(2)</sup> Csaki, Ooguri, Oz e Terning, JHEP 99

<sup>(3)</sup> Boschi e Braga, JHEP 03

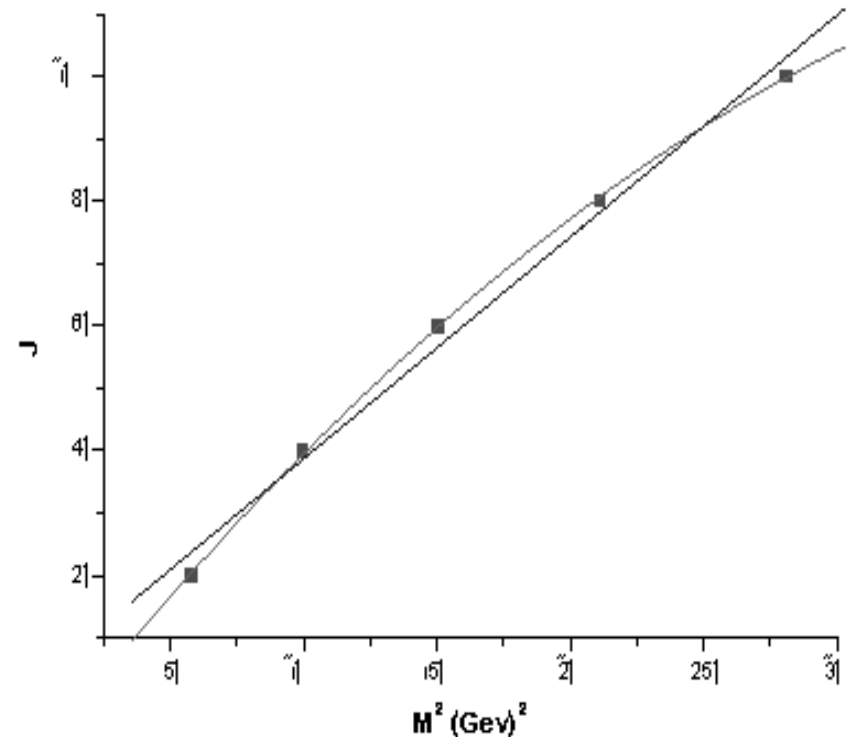
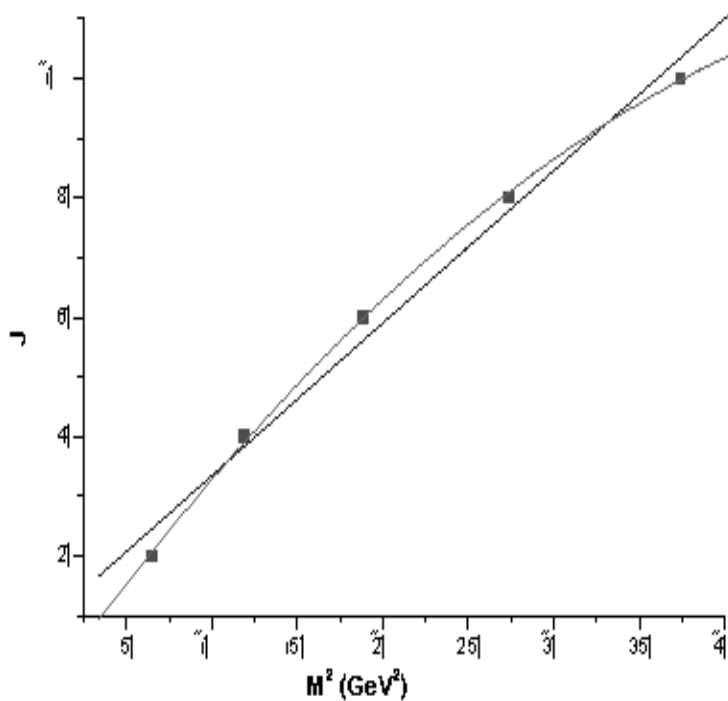
# Outros resultados

- Teramond e Brodsky (2005) usam a fatia do AdS e os zeros das funções de Bessel para calcular massas para mésons (spin 1) e bárions (spin 1/2).
- Boschi, Braga e Carrion (2006) calculam massas para Glueballs com spin  $\neq 0$ , em acordo com a trajetória do Pomeron



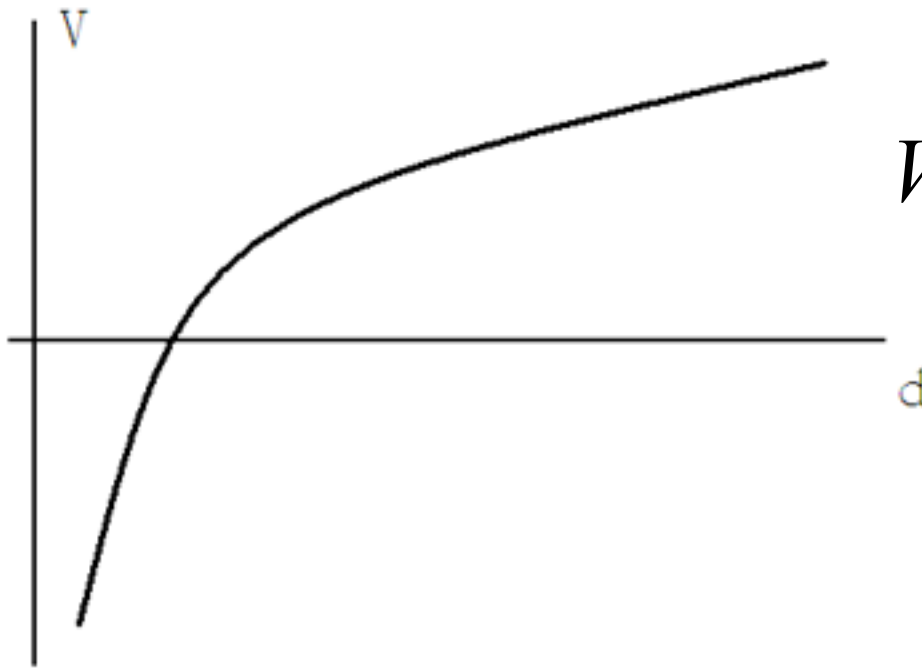
# Trajetórias de Regge e o Pomeron

$$J = (0.80 \pm 0.40) + (0.26 \pm 0.02)M^2$$



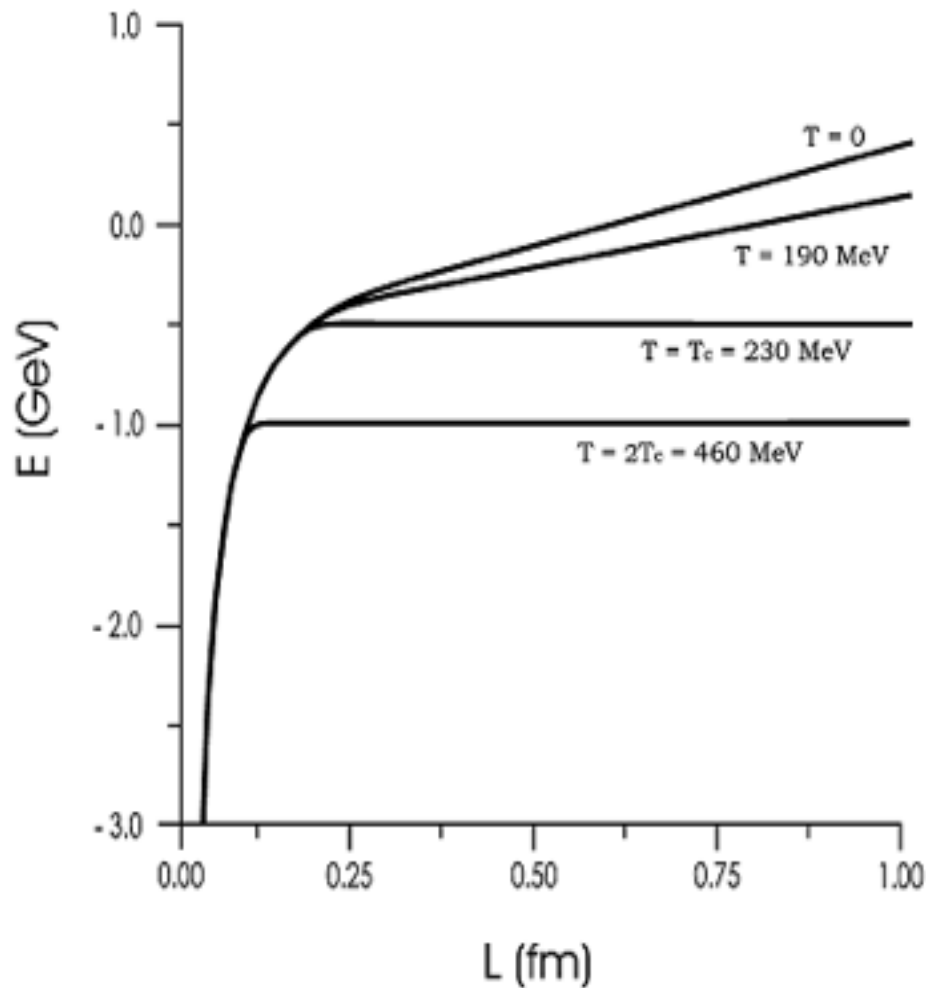
# Outros Resultados II

- Potencial confinante a partir da teoria de cordas (Boschi, Braga, e Ferreira 2006)



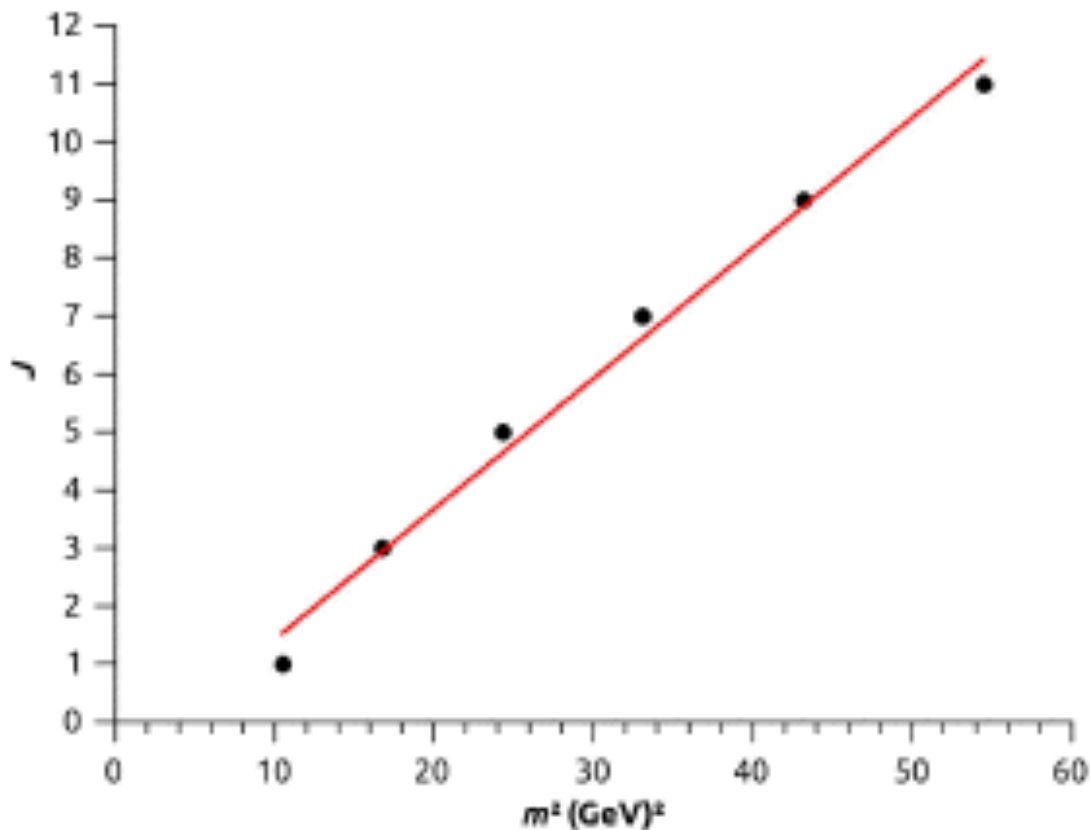
$$V(d) = -\frac{a}{d} + \sigma d$$

# Outros resultados III



Confinamento x  
Desconfinamento na  
teoria de cordas  
(Boschi, Braga, e  
Ferreira 2006B)

# Outros resultados IV



· Trajetórias de Regge para Odderons (Capossoli e Boschi, 2013)

## Sugestões de leitura (divulgação)

- The little book of String Theory, Steven Gubser, 2010
- Warped passages, Lisa Randall, 2005
- Knocking on Heaven's door, Lisa Randall, 2011
- O Universo elegante, Brian Greene, 2001
- O tecido do Cosmos, Brian Greene, 2005
- A realidade oculta, Brian Greene, 2012
- A Física do futuro, Michio Kaku, 2011
- Hiperespaço, Michio Kaku, 2000
- Mundos Paralelos, Michio Kaku, 2009
- O Universo numa casca de noz, Stephen Hawking, 2001
- Uma breve história do tempo, S. Hawking, 1988
- ...

»

Obrigado!!!

## Referências técnicas

- A estrutura quântica da matéria, José Leite Lopes, 1993
- Matemática para Físicos, vols. I e II, João Barcelos Neto, 2011
- Teoria de Grupos, J.M.F. Bassalo e M.S.D. Cattani, 2008