Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências

Introdução à Correspondência AdS/CFT

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Curso apresentado na
XI Escola do CBPF
Rio, 17 a 28 de julho de 2017
Parte 1

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências

1 Introdução

2 Cordas

3 Supercordas

4 Teoria M e Dualidades

5 Teorias de Calibre

6 Buracos Negros

7 Branas

8 Cordas × Experiência

9 AdS/CFT

10 Referências

Plano do curso

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências

- **1a. semana: Introdução à Correspondência AdS/CFT**
  - 1a. aula: Introdução
  - 2a. aula: Cordas, Supercorda e Supergravidade
  - 3a. aula: Teoria M, dualidades, Teorias de calibre, Buracos negros e Branas
  - 4a. aula: Cordas × experiência, AdS/CFT
- **2a. semana: Aplicações**
  - Loops de Wilson e Confinamento
  - Modelos Top-Down
  - Modelos AdS/QCD
  - Modelo da parede rígida
  - Modelo da parede macia

O que é a Correspondência AdS/CFT?

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências

- É a equivalência entre a teoria de cordas (ou a teoria M) com teorias de calibre não-Abelianas.
- Em particular, uma teoria de cordas em 10 dimensões é equivalente a uma teoria de calibre não-Abeliana em 4 dimensões.
- Outras versões da correspondência AdS/CFT relacionam a teoria M em 11 dimensões com teorias de calibre não-Abelianas em 3 ou 7 dimensões.
- Essa correspondência se verifica quando a teoria de cordas ou a teoria M estão imersas num espaço de curvatura constante e negativa (o espaço de anti-de Sitter) implicando numa teoria de calibre não-Abeliana conforme em sua fronteira. (AdS/CFT)

Holografia

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências

Como a correspondência entre a teoria de cordas ou a teoria M e as teorias de calibre não-Abelianas ocorre entre teorias definidas em espaços com dimensões diferentes, dizemos que se trata de uma descrição holográfica, numa alusão ao fenômeno ótico, onde imagens tridimensionais são codificadas em filmes bidimensionais.

Qual o interesse em estudar a correspondência AdS/CFT?

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências

A ideia principal é usar a correspondência para estudar as propriedades de uma dessas teorias que não sejam bem conhecidas a partir da teoria equivalente desde que esse problema seja tratável e vice-versa.

Um dos motivos para o sucesso dessa abordagem é que se $\boldsymbol{g}$ é a constante de acoplamento de uma dessas teorias, a teoria correspondente terá um acoplamento $\boldsymbol{1/g}$.

Assim, o regime não-perturbativo ($\boldsymbol{g > 1}$) de uma dessas teorias está relacionado com o regime perturbativo da outra ($\boldsymbol{1/g < 1}$).

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências

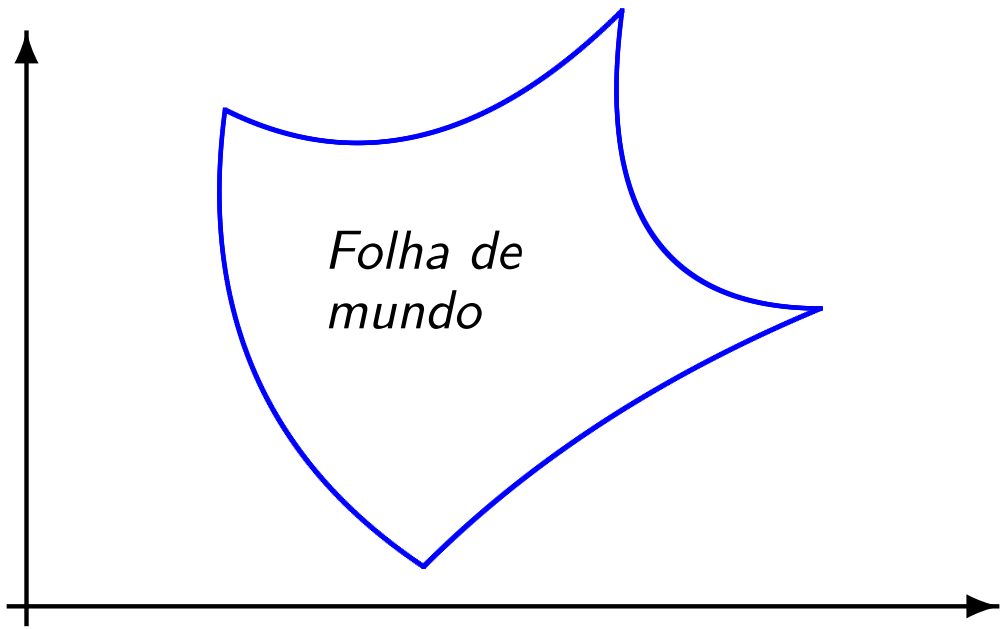
Para compreender melhor a correspondência AdS/CFT e a holografia vamos estudar um pouco de seus ingredientes.

Cordas

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências

As cordas são objetos relativísticos unidimensionais que se deslocam no espaço-tempo.
A superfície espaço-temporal descrita por uma corda ao se deslocar é chamada de folha de mundo (worldsheet):



Cordas (2)

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências

Originalmente pensou-se que as cordas existiriam num espaço-tempo (relativístico) de 4 dimensões (3 espaciais e 1 temporal).
Porém, ao quantizar a corda percebe-se que não seria possível presevar a invariância relativística a menos que o espaço-tempo tenha uma certa dimensão crítica D.

- Para uma corda que só descreve partículas bosônicas (isto é, com spin inteiro, $s = 0, 1, 2, ...$), $D = 26$.
- Para uma corda que descreve tanto bósons quanto férmions (spin semi-inteiro, $s = 1/2, 3/2, ...$), $D = 10$. Essa é a chamada supercorda, devido à simetria que é imposta entre férmions e bósons (supersimetria).

Como escrever uma ação para a corda?

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências

Vamos começar pelo caso de uma partícula livre não-relativística.

Como $L = T - V$, e nesse caso $V = 0$, temos que

$$S_{\text{part. não-rel.}} = \int \frac{1}{2} m v^2(t) dt \; ; \quad v^2 = \vec{v} \cdot \vec{v} \; ; \quad \vec{v} = \frac{d\vec{x}}{dt} \, .$$

A dimensão de ação é igual à ***Energia*** × ***Tempo***, e portanto igual à dimensão de ***momento angular***, ou seja, ***massa*** × ***velocidade*** × **distância**.

Como escrever uma ação para a partícula relativística?

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências

Queremos uma ação que seja invariante relativística, ou seja, invariante por transformações de Lorentz.

Os ingredientes de que dispomos para isso são sua massa $\boldsymbol{m}$, a velocidade da luz $\boldsymbol{c}$ e o comprimento invariante $\boldsymbol{ds}$, definido por

$$\boldsymbol{ds^2 = c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2} \, .$$

Assim, levando em conta que uma ação deve ter dimensão igual à dimensão de momento angular, escrevemos então:

$$\boldsymbol{S}_{\text{part. rel.}} = -\boldsymbol{m\, c} \int \boldsymbol{ds} \, .$$

A ação para uma partícula relativística

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências

Reescrevendo $ds^2 = c^2 dt^2 - (d\vec{x})^2$ e lembrando que $\vec{v} = \frac{d\vec{x}}{dt}$, temos

$$\frac{ds}{cdt} = \sqrt{1 - \left(\frac{d\vec{x}}{cdt}\right)^2} = \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2},$$

Logo

$$S_{\text{part. rel.}} = -m\,c^2 \int dt \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}.$$

A ação para uma partícula relativística (2)

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências

Podemos também escrever a ação em termos de um parâmetro temporal τ. Para tal vamos reescrever ds em termos de $d\tau$:

$$ds^2 = -\eta_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu = -\eta_{\mu\nu} \frac{dx^\mu}{d\tau} \frac{dx^\nu}{d\tau} d\tau^2$$

Logo, a ação da partícula livre relativística $S = -mc \int ds$ fica

$$S_{\text{part. rel.}} = -mc \int \sqrt{-\eta_{\mu\nu} \frac{dx^\mu}{d\tau} \frac{dx^\nu}{d\tau}} d\tau$$

Dessa forma vemos que qualquer redefinição do parâmetro τ não modifica a ação S. Portanto, essa ação é invariante por reparametrização (do parâmetro τ).

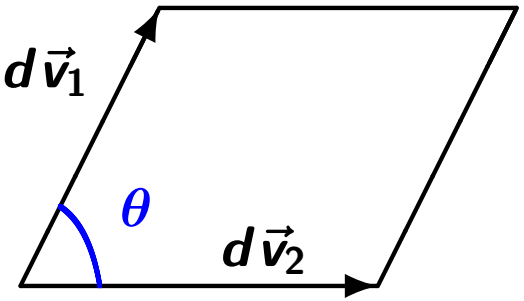
Como é a ação para a corda?

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências

Por analogia com a partícula relativística, cuja ação é proporcional ao comprimento próprio $\int ds$, **postulamos que a ação da corda é proporcional à área da folha de mundo.**

A superfície da folha de mundo pode ser escrita como a integral sobre elementos infinitesimais na forma de paralelogramos de lados $d\vec{v}_1$ e $d\vec{v}_2$: *($d\vec{v}_1$ e $d\vec{v}_2$ são dois vetores e não duas velocidades)*



$$
\begin{aligned}
dA &= |d\vec{v}_1||d\vec{v}_2||\mathrm{sen}\theta| \\
&= |d\vec{v}_1||d\vec{v}_2|\sqrt{1-\cos^2\theta} \\
&= \sqrt{|d\vec{v}_1|^2|d\vec{v}_2|^2 - |d\vec{v}_1|^2|d\vec{v}_2|^2\cos^2\theta} \\
&= \sqrt{(d\vec{v}_1\cdot d\vec{v}_1)(d\vec{v}_2\cdot d\vec{v}_2) - (d\vec{v}_1\cdot d\vec{v}_2)^2}
\end{aligned}
$$

Como é a ação para a corda? (2)

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências

Introduzindo os parâmetros (infinitesimais) $d\xi^1$ e $d\xi^2$, podemos reescrever os lados do paralelogramo como

$$d\vec{v}_1 = \frac{\partial \vec{x}}{\partial \xi^1} d\xi^1 \qquad d\vec{v}_2 = \frac{\partial \vec{x}}{\partial \xi^2} d\xi^2$$

de modo que a área do paralelogramo pode ser escrita como

$$dA = d\xi^1 d\xi^2 \sqrt{\left(\frac{\partial \vec{x}}{\partial \xi^1} \cdot \frac{\partial \vec{x}}{\partial \xi^1}\right)\left(\frac{\partial \vec{x}}{\partial \xi^2} \cdot \frac{\partial \vec{x}}{\partial \xi^2}\right) - \left(\frac{\partial \vec{x}}{\partial \xi^1} \cdot \frac{\partial \vec{x}}{\partial \xi^2}\right)^2}$$

Esta expressão é, naturalmente, invariante por reparametrizações de $d\xi^1$ e $d\xi^2$.

Como é a ação para a corda? (3)

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências

Vamos, agora, passar à notação padrão das cordas. As coordenadas $\vec{x}$ chamaremos de X^μ incluindo a coordenada temporal X^0, isto é, $X^\mu = (X^0, X^1, X^2, ..., X^{D-1})$.

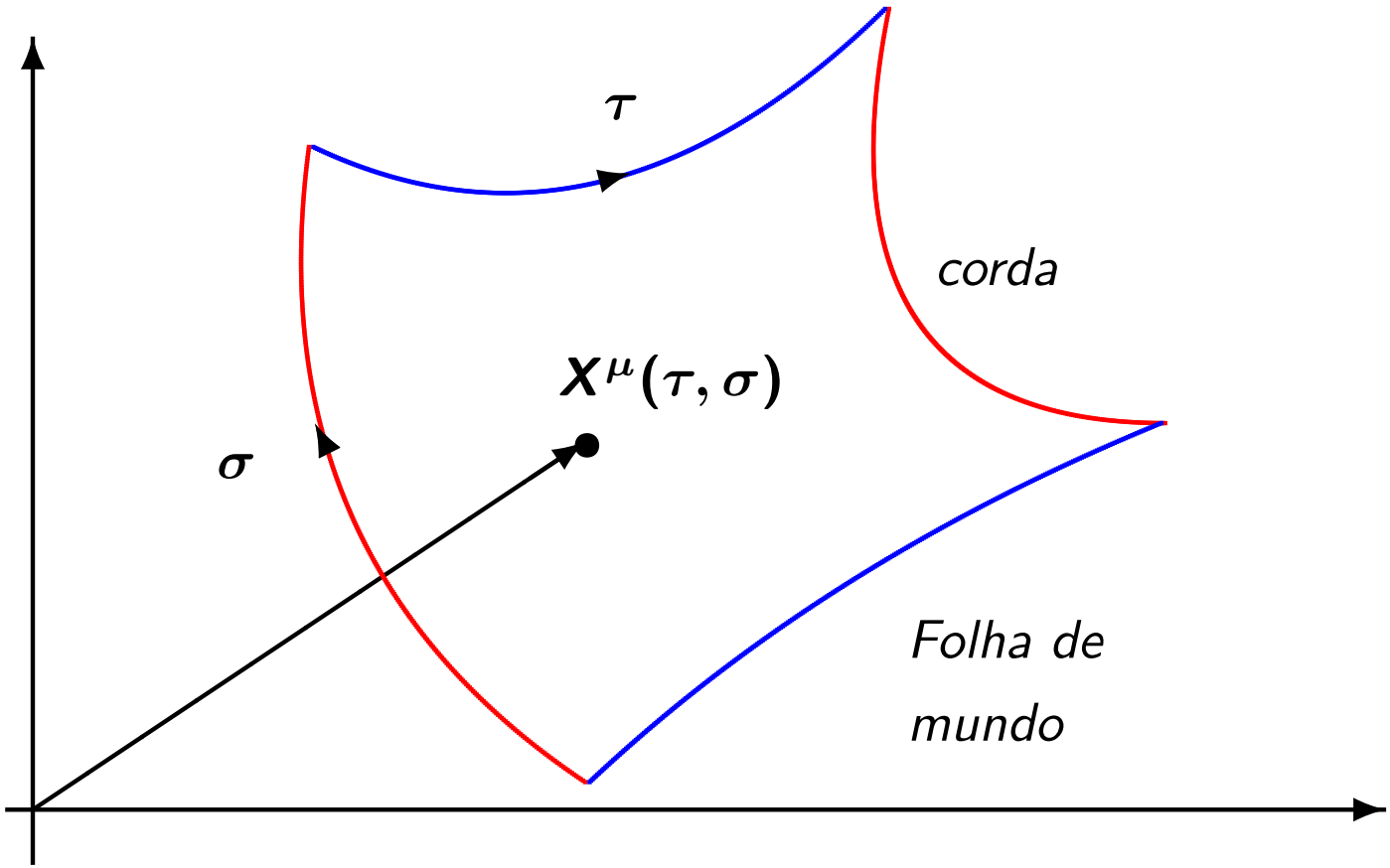
Além disso, vamos batizar os parâmetros ξ^1 e ξ^2 de τ e σ.

Usualmente, mas não obrigatoriamente, τ é associado a uma coordenada temporal e σ a uma espacial, uma distância medida ao longo do comprimento da corda, por exemplo.

Como é a ação para a corda? (4)

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências



Como é a ação para a corda? (5)

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências

Assim, a área varrida pela corda pode ser escrita como

$$dA = d\tau d\sigma \sqrt{\left(\frac{\partial X}{\partial \tau}\cdot\frac{\partial X}{\partial \sigma}\right)^2 - \left(\frac{\partial X}{\partial \tau}\cdot\frac{\partial X}{\partial \tau}\right)\left(\frac{\partial X}{\partial \sigma}\cdot\frac{\partial X}{\partial \sigma}\right)}$$

onde

$$\frac{\partial X}{\partial \tau}\cdot\frac{\partial X}{\partial \tau} = \frac{\partial X^\mu}{\partial \tau}\frac{\partial X_\mu}{\partial \tau}$$

e assim por diante, já que na notação relativística $X \cdot X = X^\mu X_\mu$.

Além disso, nessa notação a ordem dos termos na raiz quadrada é trocada em relação à anterior. Isto se deve a uma diferença de sinal entre as duas notações e para garantir que o radicando é sempre positivo.

A ação da corda

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências

É usual, ainda, introduzir a notação compacta:

$$\dot{X}^\mu \equiv \frac{\partial X^\mu}{\partial \tau} \; ; \qquad X^{\mu\prime} \equiv \frac{\partial X_\mu}{\partial \sigma}$$

de modo que a ação da corda relativística fica:

$$S = const. \int d\tau d\sigma \sqrt{(\dot{X}\cdot X')^2 - (\dot{X}\cdot\dot{X})(X'\cdot X')}$$

$$= const. \int d\tau d\sigma \sqrt{(\dot{X}\cdot X')^2 - (\dot{X})^2(X')^2}$$

onde a constante à frente da integral foi introduzida para garantir a dimensão correta da ação. Essa constante pode ser expressa, por exemplo, definindo a tensão da corda T e usando a velocidade da luz c.

A ação da corda (2)

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências

Para obter a dimensão Energia × tempo, é facil ver que $\boldsymbol{const.} = \boldsymbol{T}/\boldsymbol{c}$, já que a integral acima tem dimensão de área. Assim, chegamos à ação da corda relativística

$$\boldsymbol{S} = -\frac{\boldsymbol{T}}{\boldsymbol{c}} \int_{\tau_i}^{\tau_f} \boldsymbol{d\tau} \int_{0}^{\sigma_1} \boldsymbol{d\sigma} \sqrt{(\dot{\boldsymbol{X}} \cdot \boldsymbol{X}')^2 - (\dot{\boldsymbol{X}})^2 (\boldsymbol{X}')^2}$$

conhecida com ação de Nambu*-Goto**.

(*) Yoichiro Nambu
Prêmio Nobel de Física 2008

(**) Tetsuo Goto, Nihon Univ. (JPN)
(http://ptp.ipap.jp/link?PTP/46/1560/)

Mais Ações para a corda

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências

Podemos também definir a métrica induzida em 2 d

$$g_{ab} = \eta_{\mu\nu} \frac{\partial X^\mu}{\partial \xi^a} \frac{\partial X^\nu}{\partial \xi^b} \; ; \qquad a, b = \tau, \sigma$$

Logo

$$g_{ab} = \begin{pmatrix} \dot{X}^2 & \dot{X} \cdot X' \\ X' \cdot \dot{X} & X'^2 \end{pmatrix}$$

Então

$$\det(g) = \dot{X}^2 X'^2 - (\dot{X} \cdot X')^2$$

Assim a Ação de Nambu-Goto pode ser escrita como

$$S = -\frac{T}{c} \int d\xi^2 \sqrt{-g}$$

Comentários sobre a ação da corda

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências

Naturalmente, por construção, a ação de Nambu-Goto é invariante por reparametrizações em τ e σ, ou $d\xi^1$ e $d\xi^2$.
É comum também escrever a tensão da corda como

$$T = \frac{c}{2\pi\alpha'}$$

A constante α' aparece na Física Hadrônica, nas chamadas trajetórias de Regge, que são relações entre a massa quadrática (M^2) e spin J de excitações hadrônicas:

$$J \sim \alpha' M^2$$

Historicamente...

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências

Historicamente, as cordas foram propostas para explicar o espalhamento desses hádrons (partículas que interagem via força nuclear forte).

Essa descrição, porém, apresentou algumas dificuldades:

- A Amplitude de Veneziano, que descreve o espalhamento de duas cordas resultando em outras duas, explica corretamente o espalhamento de hádrons no regime de Regge, mas não no de ângulos fixos.
- A experiência de espalhamento profundamente inelástico feita no SLAC em 1969, provou a existência de objetos puntiformes (quarks) no interiror dos hádrons.

Pouco depois, surgiria a Cromodinâmica Quântica (QCD), uma teoria quântica de campos que descreve corretamente as interações fortes.

Outra ação para a corda relativística

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências

Uma outra ação para a corda relativística é

$$S = -\frac{1}{4\pi\alpha'}\int d\tau d\sigma \sqrt{-g}\, g^{ab}\partial_a X^\mu \partial_b X_\mu$$

onde $a, b = 1, 2$, $\mu = 0, 1, 2, ..., D-1$, g^{ab} é a métrica bidimensional (induzida) na folha de mundo e $g = \det(g^{ab})$.

Esta ação é conhecida como a ação de Polyakov (*).

(*) Alexander M. Polyakov,
Dirac Medal (ICTP), 1986.

Mais sobre ações para a corda

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências

A ação de Polyakov é classicamente equivalente à de Nambu-Goto, ou seja, as duas geram as mesmas equações de movimento.

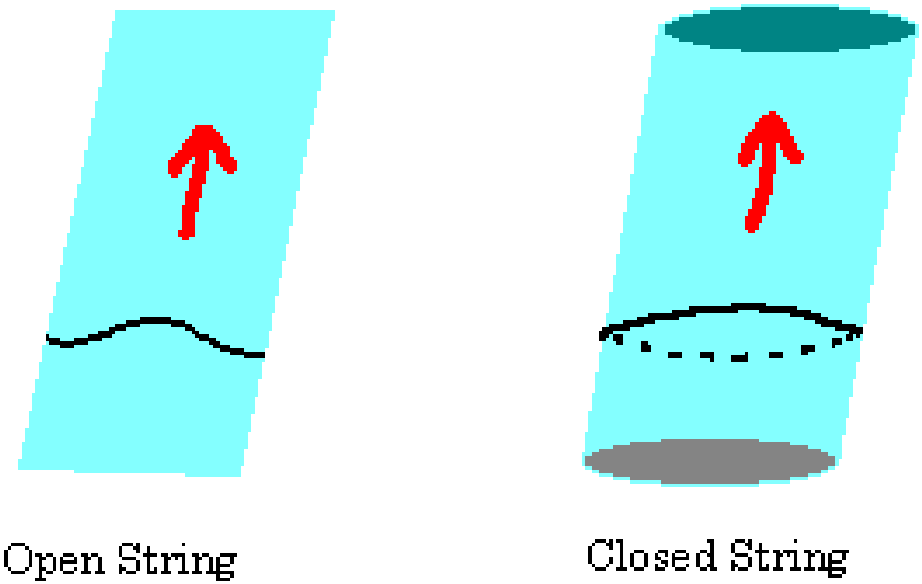
Essa ação é interessante porque ela pode ser estendida facilmente ao caso da supercorda.

Cordas Abertas e Fechadas

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências

As cordas podem ser abertas ou fechadas:



Quantização das cordas

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências

A partir da ação das cordas, ou de suas equações de movimento, podemos quantizá-las.

A quantização dessas cordas leva aos seguintes resultados:

Quantização das cordas (2)

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências

Propriedades	Corda aberta	Corda fechada	
Spin 0 M^2	táquion $-1/2\pi\alpha'$	táquion $-4/\pi\alpha'$	dílaton 0
Spin 1 M^2	"fóton" 0	– –	
Spin 2 M^2	– –	gráviton 0	
Spin=0,1,2,... M^2	vários $\propto 1/2\pi\alpha'$	vários $\propto 1/2\pi\alpha'$	

Quantização das cordas (3)

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências

A quantização dessas cordas também implica na determinação da dimensão crítrica, neste caso $\boldsymbol{D = 26}$, para não violar a simetria de Lorentz (relatividade especial).

Como todas as excitações desta corda tem spin inteiro, concluímos que se trata da corda Bosônica.

Do ponto de vista fenomenológico, os modos correspondentes ao dílaton, ao fóton, e ao gráviton são os mais interessantes.

Os Táquions representam instabilidade para as cordas.

Supercorda

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências

A partir dos resultados acima ficou claro que essa corda não poderia descrever férmions, que existem na Natureza.

Para permitir que as cordas tivessem modos fermiônicos sua ação foi modificada introduzindo coordenadas que anticomutam entre si, análogas ao campo de Dirac (no calibre conforme):

$$S = -\frac{1}{4\pi\alpha'}\int d^2\xi\left(\partial_a X^\mu \partial^a X_\mu - i\bar{\Psi}^\mu \gamma^a \partial_a \Psi_\mu\right)$$

onde $a = 1, 2$ e $\mu = 0, 1, 2, \ldots, D-1$ e γ^a são matrizes de Dirac 2x2.

Além disso, por consistência é necessário impor uma simetria que transfoma bósons em férmions e vice-versa, chamada **supersimetria**.

Para a supercorda, a dimensão crítica é D=10.

Obs.: O fator $\sqrt{-g}$ neste caso foi fixado como igual à unidade.

Quantização da Supercorda

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências

- As supercordas foram quantizadas originalmente em 1971, com o formalismo chamado Ramond-Neveu-Schwarz (RNS), onde a supersimetria é implementada na folha de mundo (bidimensional) da corda.
- Para relacionar essa formulação com a supersimetria no espaço-tempo é necessário utilizar a chamada projeção de Gliozzi-Scherk-Olive (GSO, 1976), que permite também eliminar os táquions.
- Em 1981, Green e Schwarz (GS) implementaram a supersimetria da corda no espaço-tempo, e a quantizaram usando o chamado calibre do cone-de-luz.
- A quantização covariante da supercorda de Green-Schwarz foi obtida por Berkovits, em 2002.

Supercordas

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências

Existem 5 tipos diferentes de supercordas, dependendo das condições de contorno que satisfazem e das suas simetrias:

Tipos I, II A e B, e heteróticas SO(32) e $E(8) \times E(8)$.

Os tipos de Supercordas

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências

- Tipo I: A corda é supersimétrica (usual, $\mathcal{N} = 1$);
- Tipo II: A corda tem supersimetria extendida ($\mathcal{N} = 2$, dois férmions p/ cada bóson);
  - ◇ IIA: espinores com quiralidade oposta, teoria não-quiral
  - ◇ IIB: espinores com mesma quiralidade, teoria quiral
- Heteróticas: são compostas de dois setores, um supersimétrico $D = 10$ e outro não com $D = 26$. A teoria resultante vive em $D = 10$.
  - ◇ As denominações SO(32) e E(8)×E(8) correspondem aos grupos de simetria dessas cordas.

Supergravidade

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências

É a teoria quântica de campos que contém o campo gravitacional (gráviton) além de outros campos bosônicos (escalares e vetoriais) e fermiônicos.

Os campos bosônicos e fermiônicos da supergravidade são relacionados pela **supersimetria**, daí o nome **supergravidade**.

Relatividade Geral

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências

A ação de Einstein-Hilbert para a Relatividade Geral pode ser escrita como

$$S_{EH} = \int d^4x \sqrt{-g}\, \mathcal{R}$$

onde $g = \det g_{\mu\nu}$ corresponde à métrica 4-dimensional e $\mathcal{R}$ é o chamado escalar de curvatura definido como $\mathcal{R} = g^{\sigma\nu}\mathcal{R}_{\sigma\nu}$, sendo $\mathcal{R}_{\sigma\nu}$ o tensor de Ricci:

$$\mathcal{R}_{\sigma\nu} = \mathcal{R}^{\rho}{}_{\sigma\rho\nu} = \partial_\rho \Gamma^\rho_{\nu\sigma} - \partial_\nu \Gamma^\rho_{\rho\sigma} + \Gamma^\rho_{\rho\lambda}\Gamma^\lambda_{\nu\sigma} - \Gamma^\rho_{\nu\lambda}\Gamma^\lambda_{\rho\sigma}$$

onde os símbolos de Christoffel são

$$\Gamma^\rho_{\nu\lambda} = \tfrac{1}{2} g^{\rho\mu}\left(\partial_\lambda g_{\mu\nu} + \partial_\nu g_{\mu\lambda} - \partial_\mu g_{\nu\lambda}\right)$$

Essa ação implica nas equações de Einstein:

$$\mathcal{R}_{\mu\nu} - \frac{\mathcal{R}}{2} g_{\mu\nu} = 0$$

na ausência de matéria.

Relatividade Geral (2)

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências

Para gerar matéria nas equações de Einstein devemos incluir termos na ação correspondentes aos campos escalar, vetorial, espinorial, etc

$$S = \int d^4x\sqrt{-g}\left(\mathcal{R} + \frac{1}{2}\partial_\mu\phi\partial^\mu\phi - \frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + \ldots\right)$$

Neste caso, as equações de Einstein passam a

$$\mathcal{R}_{\mu\nu} - \frac{\mathcal{R}}{2}g_{\mu\nu} = 8\pi\frac{G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

onde $T_{\mu\nu}$ ó tensor energia-momento, dado por

$$T_{\mu\nu} = \frac{1}{4\pi G}\left(\partial_\mu\phi\partial_\nu\phi - \frac{1}{2}\eta_{\mu\nu}\partial_\lambda\phi\partial^\lambda\phi + \ldots\right)$$

Ação da Supergravidade

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências

A ação da supergravidade, definida em D dimensões do espaço-tempo pode ser escrita como

$$S = -\frac{1}{\kappa_D^2}\int d^D x\sqrt{-g}\left(\mathcal{R} - \frac{1}{2}\partial_\mu\phi\partial^\mu\phi - \frac{1}{2}\sum_n \frac{1}{n!}e^{-\frac{1}{2}(n-5)\phi}F_n^2 + i\,\bar{\psi}\gamma_\mu\partial^\mu\psi + \ldots\right)$$

onde $\mu = 0, 1, 2, \cdots, D-1$ e para cada campo bosônico existe um campo fermiônico e vice-versa (supersimetria usual, $\mathcal{N}$=1).

No caso de supersimetria extendida ($\mathcal{N}$=2, 4, ...), cada campo bosônico corresponde a $\mathcal{N}$ campos fermiônicos.

Teoria de Cordas × Supergravidade

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências

A teoria de cordas e a supergravidade são ambas teorias supersimétricas que descrevem a gravitação.

O que diferencia essas teorias?

A teoria de cordas é bem comportada no UV, enquanto a supergravidade diverge para grandes momenta.

A teoria de cordas (perturbativa) é finita em todas as ordens, enquanto a supergravidade não é renormalizável.

Por esses argumentos poderíamos achar que a supergravidade deveria ser desconsiderada.

Porém, a teoria de cordas pode ser descrita pela supergravidade, que é uma teoria de campos, desde que em baixas energias, isto é, para $E << 1/\sqrt{2\pi\alpha'} \quad \Rightarrow \quad$ modos não massivos da supercorda.

É claro que baixas energias para a teoria de cordas ainda podem ser altas energias, mesmo para o LHC, $15\text{Tev} << E << 1/\sqrt{2\pi\alpha'}$

Teoria M

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências

Existe uma Teoria M (Membrana, Matriz, Mãe, Mistério, ...) em $D = 11$ de onde viriam todas as supercordas.

A Teoria M, não é conhecida por completo, apenas algumas de suas propriedades.

Por exemplo, não se conhece uma ação (completa) para essa Teoria.

Porém, em baixas energias a ação da Teoria M coincide com a da supergravidade em 11 dimensões

$$\begin{aligned} S &= -\frac{1}{\kappa_{11}^2}\int d^{11}x\sqrt{-g}\left(\mathcal{R} - \frac{1}{2}\partial_\mu\phi\partial^\mu\phi\right. \\ &\quad \left. -\frac{1}{2}\sum_n \frac{1}{n!}e^{-\frac{1}{2}(n-5)\phi}F_n^2 + i\,\bar{\psi}\gamma_\mu\partial^\mu\psi + \ldots\right) \end{aligned}$$

Dualidades

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências

Dualidades são transformações que levam uma teoria em outra, ou relacionam partes diferentes de uma mesma teoria.

- O exemplo clássico é do campo eletromagnético:

As equações de Maxwell, no vácuo (em unidades apropriadas)

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0 \qquad \vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \qquad \vec{\nabla} \times \vec{B} = \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

são invariantes pelas substituições $\vec{E} \to \vec{B}$ e $\vec{B} \to -\vec{E}$.

Dualidades em cordas

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências

As 5 teorias de supercordas e a Teoria M estão relacionadas por dualidades.

São as dualidades $\boldsymbol{S}$ e $\boldsymbol{T}$.

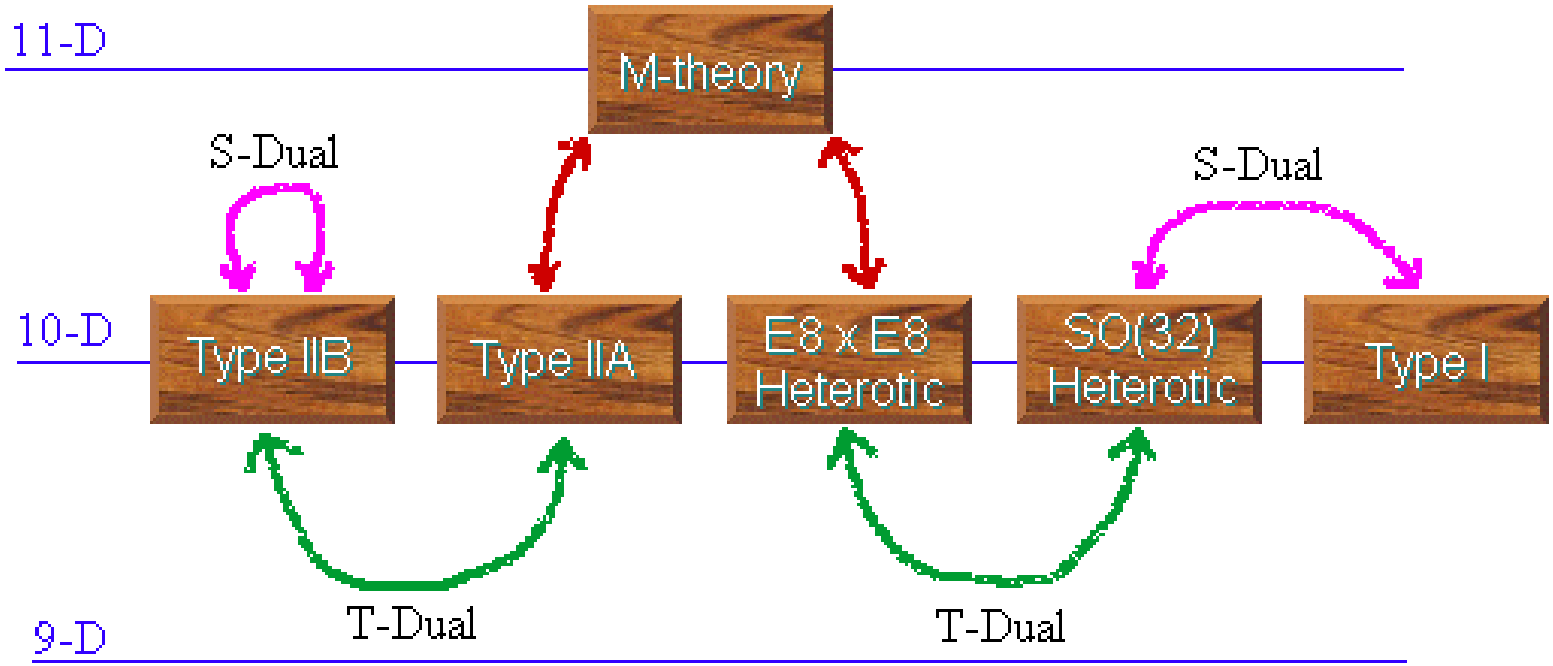
A dualidade $\boldsymbol{S}$ leva uma corda com acoplamento $\boldsymbol{g_1}$ numa outra com acoplamento $\boldsymbol{g_2 = 1/g_1}$, onde $\boldsymbol{g_1}$ e $\boldsymbol{g_2}$ são adimensionais.

A dualidade $\boldsymbol{T}$ leva uma corda enrolada sobre um cilindro de raio $\boldsymbol{R_1}$ numa outra com raio $\boldsymbol{R_2 = \ell^2/R_1}$, onde ℓ é um mesmo comprimento fixo para as duas cordas.

Dualidades entre as Teorias M e de Supercordas

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

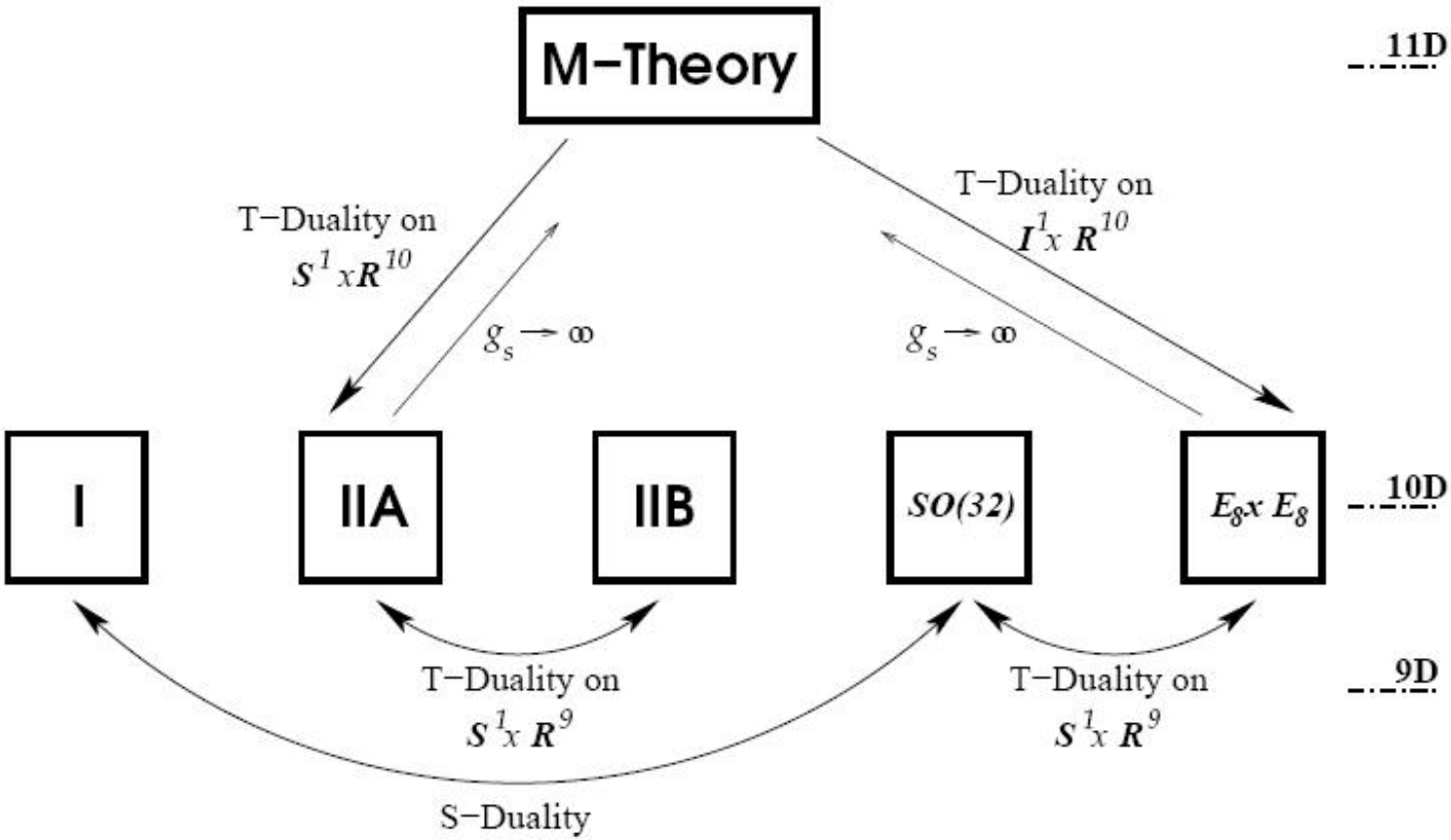
Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências



Dualidades entre as Teorias M e de Supercordas

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

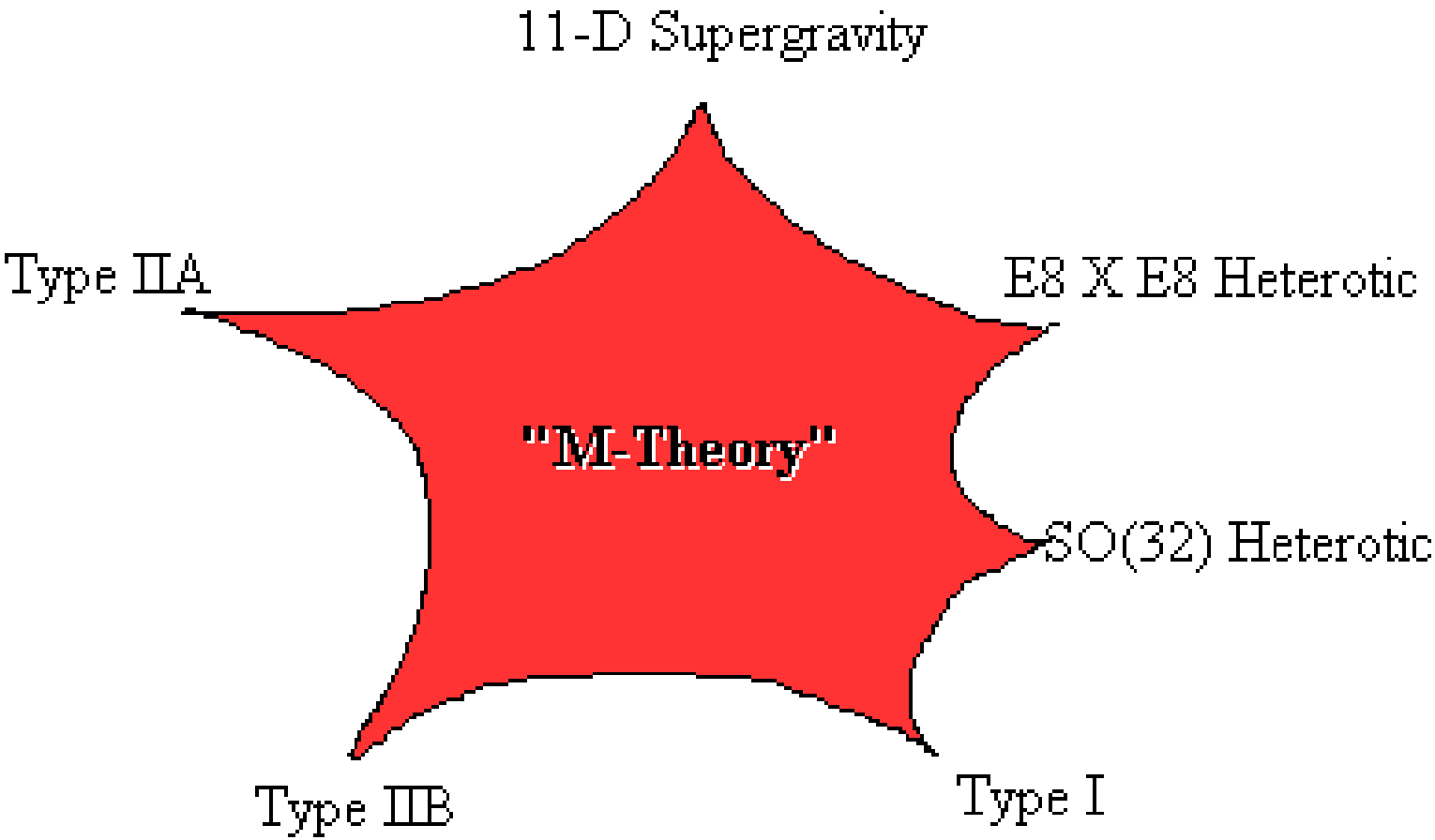
Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências



Mais uma vez...

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências



Simetrias de Calibre

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências

O eletromagnetismo é uma teoria invariante de calibre.
Para ver isto, vamos lembrar que os campos elétrico $\vec{E}$ e magnético $\vec{B}$ podem ser **univocamente** determinados pelos potenciais escalar V e vetorial $\vec{A}$:

$$\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A} \qquad \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t}\vec{A} - \vec{\nabla} V$$

Note, porém, que podemos modificar os potenciais escalar V e vetorial $\vec{A}$

$$\vec{A}' = \vec{A} + \vec{\nabla}\lambda \qquad V' = V - \frac{\partial}{\partial t}\lambda$$

onde $\lambda = \lambda(x, y, z, t)$ é uma função escalar, sem alterar os campos $\vec{E}$ e $\vec{B}$.

Esta propriedade é chamada simetria de calibre.

Simetrias de calibre (2)

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências

Em notação relativística, $\vec{A}$ e V são as componentes espacial e temporal do quadrivetor A^μ

$$A^\mu = (V, \vec{A})$$

e a invariância de calibre é expressa como

$$A^{\mu\prime} = A^\mu + \frac{\partial}{\partial x_\mu}\lambda$$

ou em notação compacta

$$A^{\mu\prime} = A^\mu + \partial^\mu \lambda$$

Teorias de calibre

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências

Em 1954, C.N. Yang e R. Mills propuseram uma generalização do campo eletromagnético para um campo com simetria de calibre estendida

$$A_a{}^{\mu\prime} = A_a{}^{\mu} + \epsilon_{abc}\lambda_b A_c{}^{\mu} + \partial^{\mu}\lambda_a$$

onde $a, b, c = 1, 2, 3$ e portanto temos um conjunto com 3 campos A_a^{μ}.

Note que o termo $\epsilon_{abc}\lambda_b A_c{}^{\mu}$ é análogo a uma rotação em três dimensões, e portanto com simetria SO(3).

Usando notação complexa, essa simetria é equivalente a SU(2), análoga à de momentum angular na mecânica quântica.

Mais Teorias de calibre

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências

Esses campos são relevantes na descrição das interações fracas, associados às partículas W^+, W^-, e Z^0, descobertas no CERN em 1983.

Essa simetria de calibre pode ser estendida para rotações em espaços complexos de N dimensões, ou seja, para o grupo SU(N).

As interações fortes são entendidas hoje como as interações entre quarks e glúons, com simetria de calibre SU(3).

Teorias de grande unificação usam grupos como o SU(5), ou maiores, porém, sem confirmação experimental.

Em resumo, as Teorias de Calibre SU(N) são muito importantes para descrever as interações fundamentais.

Como surgem as Teorias de Calibre SU(N) na Teoria de Cordas?

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências

Já vimos que a quantização das cordas abertas implica na existência de modos não massivos, entre eles, o fóton, que é descrito pela Eletrodinâmica Quântica (Teoria Quântica para o eletromagnetismo).

Como surgem os campos de Yang-Mills na Teoria de Cordas?

Esse problema foi resolvido logo no início da Teoria de cordas, supondo que as **pontas das cordas** carregam certas **cargas**, chamados de **fatores de Chan-Paton**, associados ao grupo SU(N).

Dessa forma, temos várias cordas correspondentes aos vários campos do grupo SU(N).

Assim, naturalmente, as Teorias de Calibre SU(N) surgem na Teoria de Cordas.

Teorias de Calibre e Cordas

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

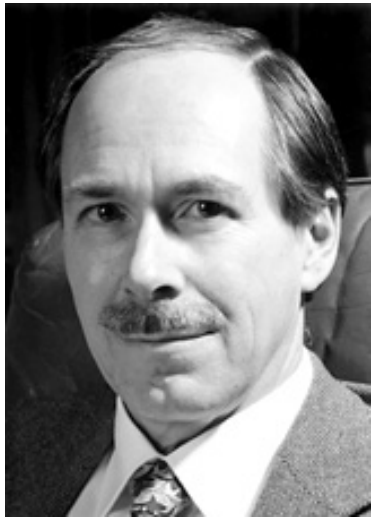
Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências

Além do fato de cordas gerarem campos de calibre SU(N), existe uma relação mais profunda entre essas duas teorias.

Em 1974, Gerardus 't Hooft (*) descobriu que **amplitudes de espalhamento de cordas são equivalentes a amplitudes de espalhamento de teorias de Yang-Mills SU(N) no limite $N \to \infty$.**

Como veremos adiante, este resultado terá consequências muito importantes para ambas as teorias.

(*) Prêmio Nobel de Física, 1999.

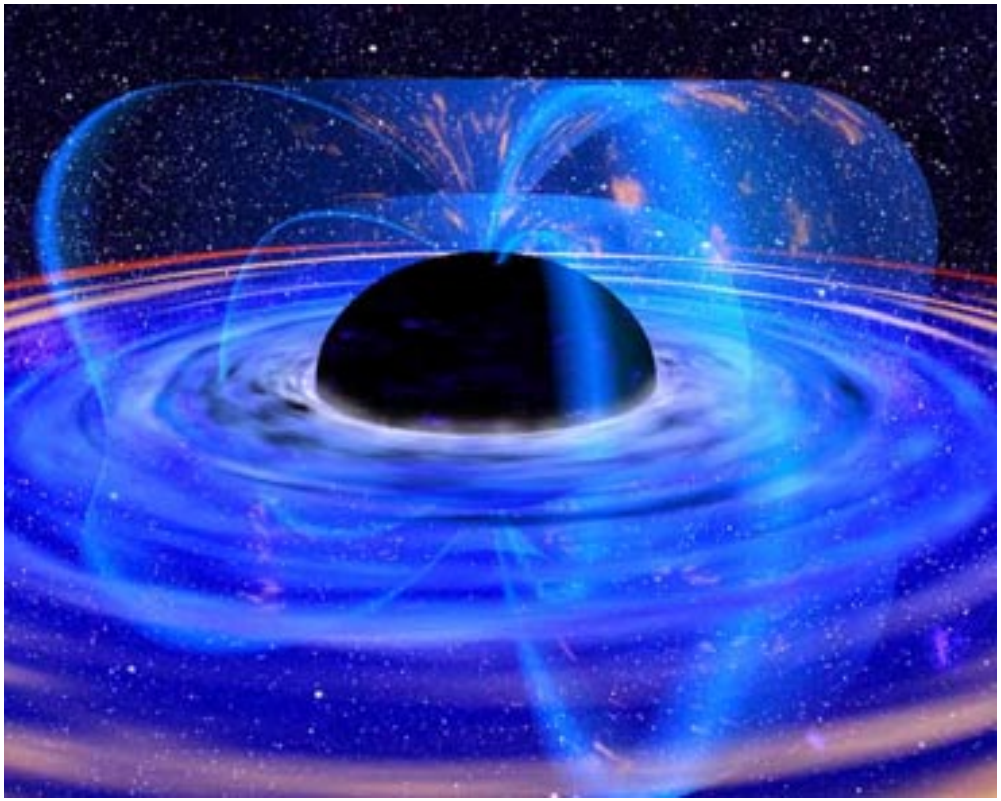


Buracos Negros

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências

São soluções das equações de Einstein, da Relatividade Geral, que contém singularidades essenciais (centro do BN) e removíveis (Horizonte de eventos).



Mais Buracos Negros

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências

Os Buracos Negros usuais são definidos em 3+1 dimensões .
A solução de Schwarzschild pode ser escrita como

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

onde M é sua massa, $G = G_{Newton}$ e $d\Omega^2 = d\theta^2 + \text{sen}\theta^2 d\phi^2$.

Essa solução é estática e esfericamente simétrica.

$r \to 0$ é uma singularidade essencial, enquanto $r = 2MG$ é uma singularidade de coordenadas (removível) e representa o horizonte de eventos, além do qual nenhuma informação pode ser obtida (classicamente) por um observador externo.

Buracos Negros Carregados

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências

Existem, também, soluções de BN com carga e/ou momentum angular.

Por exemplo, a solução de Reissner-Nordstrom é

$$ds^2 = f(r)dt^2 - [f(r)]^{-1} dr^2 - r^2 d\Omega^2$$

onde

$$f(r) = 1 - \frac{2MG}{r} + \frac{Q^2 G}{r^2}$$

e Q é a carga elétrica. Essa solução tem dois horizontes

$$r_{\pm} = MG \left[1 \pm \sqrt{1 - \frac{Q^2}{M^2 G}} \right]$$

Buracos Negros Extremos

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências

São os **buracos negros carregados** para os quais $M^2 = Q^2/G$.

Neste caso os horizontes coincidem

$$r_\pm = MG\left[1 \pm \sqrt{1 - \frac{Q^2}{M^2 G}}\right] \Longrightarrow MG$$

e a função horizonte se reduz à

$$f(r) = 1 - \frac{2MG}{r} + \frac{Q^2 G}{r^2} \Longrightarrow \left(1 - \frac{MG}{r}\right)^2$$

Assim, a solução de Reissner-Nordstrom **extrema** é

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

Buracos Negros na Supergravidade

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências

As teorias de supergravidade também admitem soluções tipo Buracos Negros.

Por exemplo, nas Teorias de Supergravidade IIA e IIB, surgem diversas soluções deste tipo, isto é, com singularidades e horizontes, em várias dimensões.

Alguns com simetria planar, que são as chamadas **Branas Negras**.

Membranas e objetos com mais dimensões

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências

Na Teoria de Cordas, surgem naturalmente objetos bidimensionais como uma Membrana, ou com ***p*** dimensões espaciais, que chamamos de ***p***-branas.

Esses objetos tem um papel fundamental na teoria de cordas.

As pontas das cordas abertas vivem nas ***p***-branas.

p-Branas

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências

As extremidades de uma supercorda, que se desloca em $\boldsymbol{D = 10}$, descrevem hipersuperfícies em $\boldsymbol{p}$=9, 8, 7, 6, 5, 4, 3, ou ainda $\boldsymbol{p}$= 2, 1 e 0 dimensões.

Essas hipersuperfícies (ou hipervolumes) são as $\boldsymbol{p}$-branas.

Para $\boldsymbol{p = 0}$, 0-brana = ponto
Para $\boldsymbol{p = 1}$, 1-brana = linha ou corda
Para $\boldsymbol{p = 2}$, 2-brana = superfície ou membrana
Para $\boldsymbol{p = 3}$, 3-brana = volume (mundo onde vivemos!)
Para $\boldsymbol{p > 3}$, p-brana = hipervolume

O que acontece com as extremidades de uma corda aberta?

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências

Como a supercorda vive em 9+1 dimensões, ela pode satisfazer as condições de Neumann para algumas coordenadas e de Dirichlet para outras.

Uma D$\boldsymbol{p}$-brana é uma $\boldsymbol{p}$-brana que impõe à corda condições de Neumann para as coordenadas dentro da brana, ou seja,

$\boldsymbol{\mu} = 0, 1, 2, ..., \boldsymbol{p}$, (Neumann)

enquanto as demais coordenadas

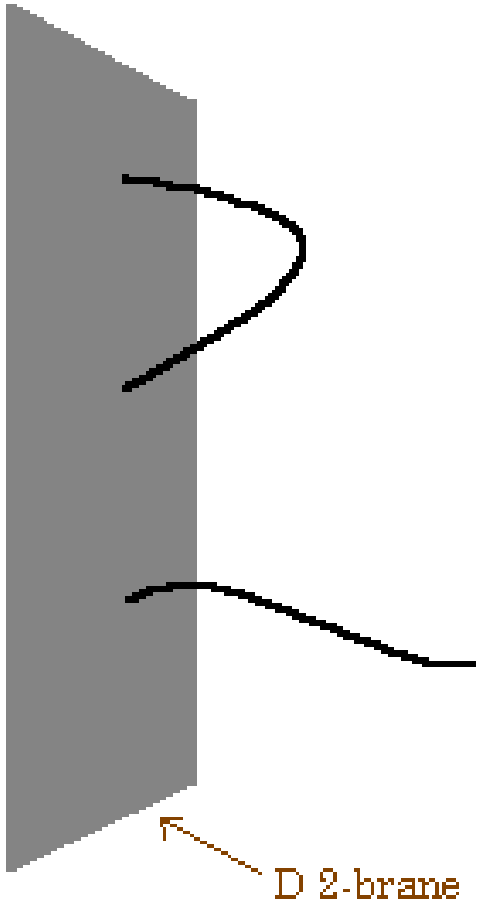
$\boldsymbol{\mu = p+1, p+2}$, ..., 9, obedecem condições de Dirichlet.

Dp-Branas e cordas abertas

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências

Cordas abertas podem ter extremidades livres
ou presas à D-branas

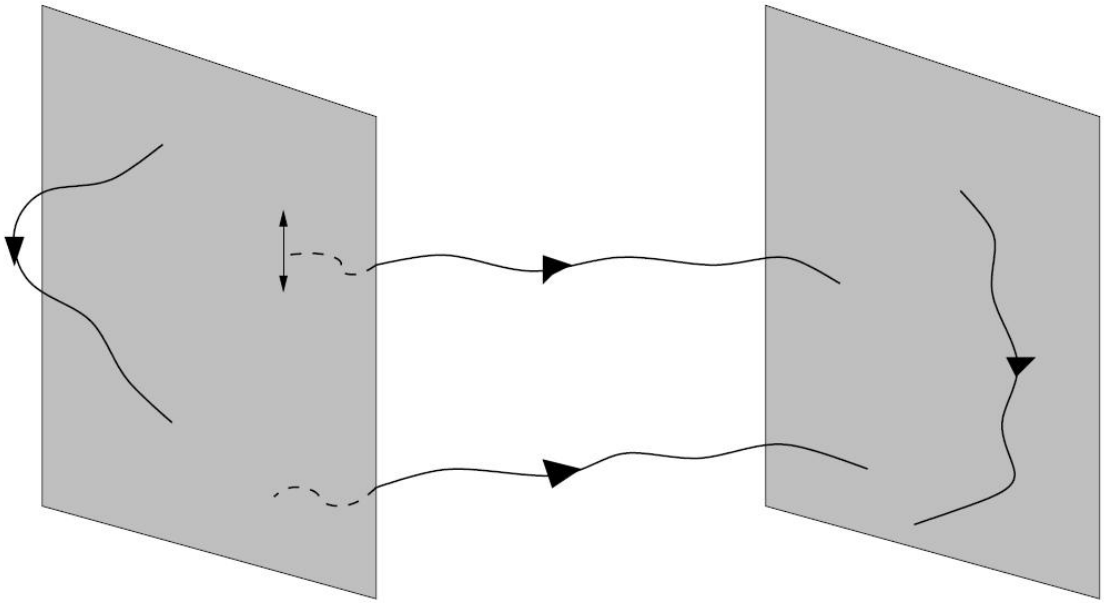


Mais Dp-branas e cordas abertas

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências

É possível ter várias branas e várias cordas



Branas e Teorias de Calibre SU(N)

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências

Já vimos que as cordas abertas tem como uma de suas excitações o fóton, e que para obter campos de calibre com simetria SU(N) devemos impor que as pontas das cordas carregem os fatores de Chan-Paton.

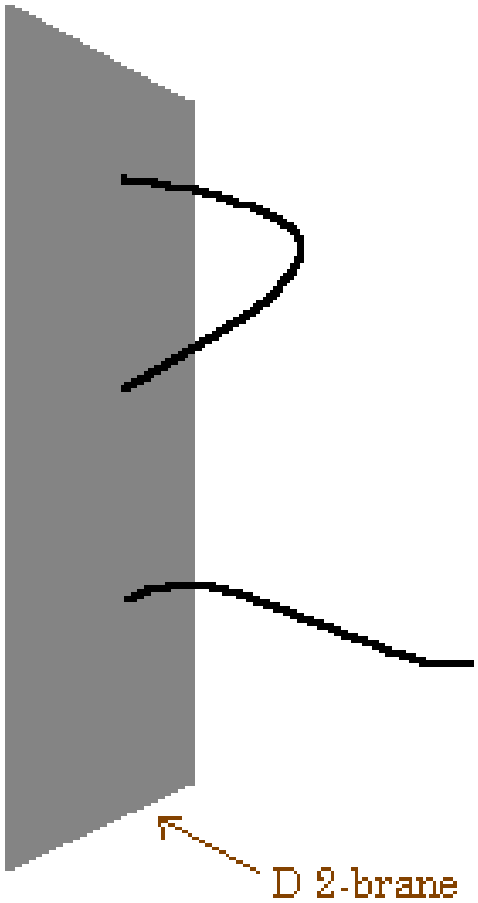
Por outro lado, as pontas das cordas andam sobre p-branas.

Assim podemos associar os índices de Chan-Paton do grupo SU(N) com p-branas.

Mais Branas e Teorias de Calibre SU(N)

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências



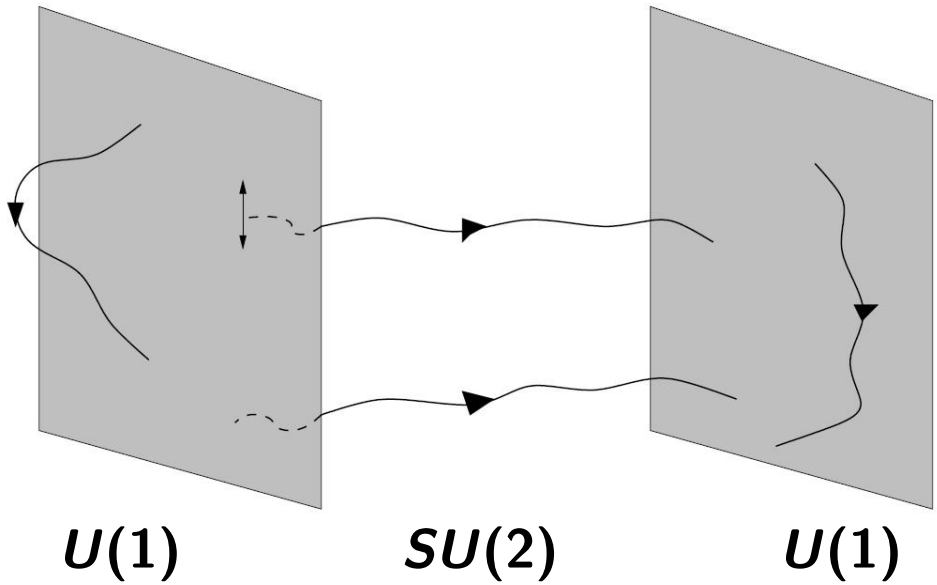
Uma corda aberta que começa e termina na mesma brana carrega o grupo U(1) (eletromagnetismo).

Ainda sobre Branas e Teorias de Calibre SU(N)

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências

Se uma corda aberta conecta duas branas com diferentes índices de Chan-Paton, então ela carrega o grupo SU(2).

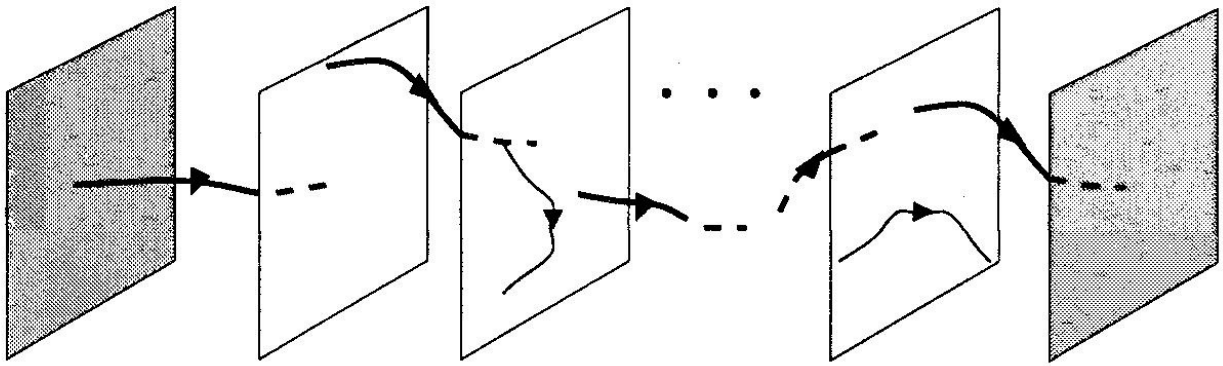


Branas e SU(N)

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências

Cordas abertas começando e terminando em N branas



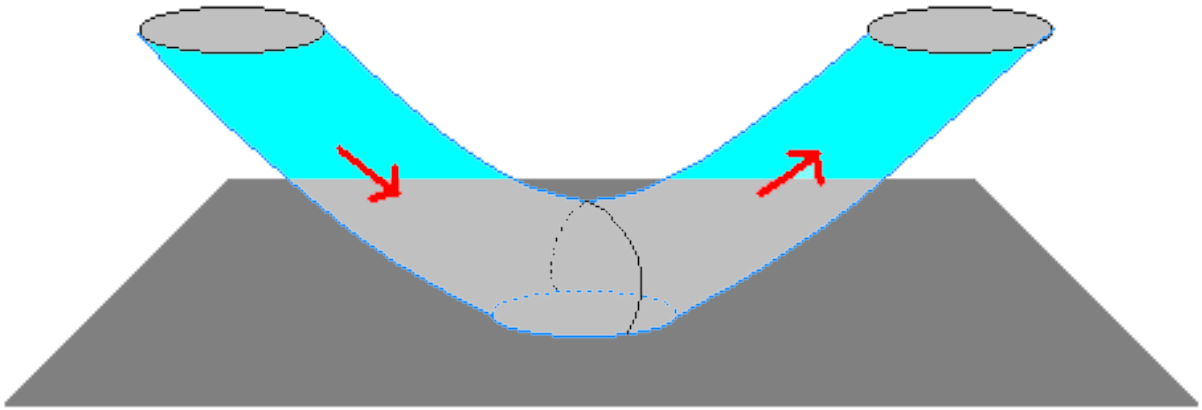
Excitações das cordas $\Rightarrow$ Campos de calibre com simetria SU(N)

Dp-branas e cordas fechadas

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências

Cordas fechadas também interagem com D-branas



Como surgem as D-branas?

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências

Poderíamos simplesmente postular sua existência.

Porém, o mais interessante é que as D-branas surgem como soluções clássicas das ações das cordas.

De fato as ações das cordas são aproximadas em baixas energias por ações de supergravidade, e essas ações têm as D-branas como soluções.

Essas D-branas guardam certas relações com as teorias de cordas (supergravidade) das quais são soluções.

D-branas e cordas

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências

As soluções encontradas são:

Supercordas	Dp-branas
I	$p = 1, 5,$ e 9
IIA	$p = 0, 2, 4, 6,$ e 8
IIB	$p = 1, 3, 5,$ e 7
Heteróticas	várias

Para as cordas bosônicas (em 26 dim.) existem Dp-branas para p= 0, 1, 2, ..., 25.

Como usar a Teoria de Cordas para descrever a Física que observamos?

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências

A corda bosônica vive em $\boldsymbol{D}$=26 e contém táquions.

As supercordas contém excitações bosônicas e fermiônicas e vivem em $\boldsymbol{D}$=10.

Para conectar as cordas com o mundo que observamos com $\boldsymbol{D}$=3+1, em geral propõe-se que as dimensões extras, além das 4 usuais, sejam curvas ou enroladas, com tamanhos muito pequenos.

Esse procedimento é chamado de **compactificação** das (super)cordas.

Compactificação

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências

A compactificação mais simples para uma supercorda é aquela que supõe que as 10 dimensões do espaço-tempo são decompostas em um espaço de Minkowski com 4 dim. $\times$ hiperesfera com 6 dimensões.

Nessa compactificação, o raio da hiperesfera seria muito menor que um próton ou nêutron e por isso ainda não teria sido observada em experimentos.

Essa compactificação, assim como outras, prevê ainda a existência de uma torre infinita de partículas, numa situação análoga a um poço quântico infinito (Torre de Kaluza-Klein).

Mais compactificação

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências

Existem compactificações menos simétricas e mais elaboradas que a hiperesrefera.

Os espaços compactos gerais são as chamadas variedades de Calabi-Yau e constituem uma área ativa de pesquisa da Física e da Matemática.

Uma idéia também explorada é considerar cordas em espaços curvos. Esse problema em geral é bastante complexo. Porém, para alguns espaços curvos simples (simétricos) é possível encontrar alguns resultados interessantes.

Os espaços de *de Sitter*

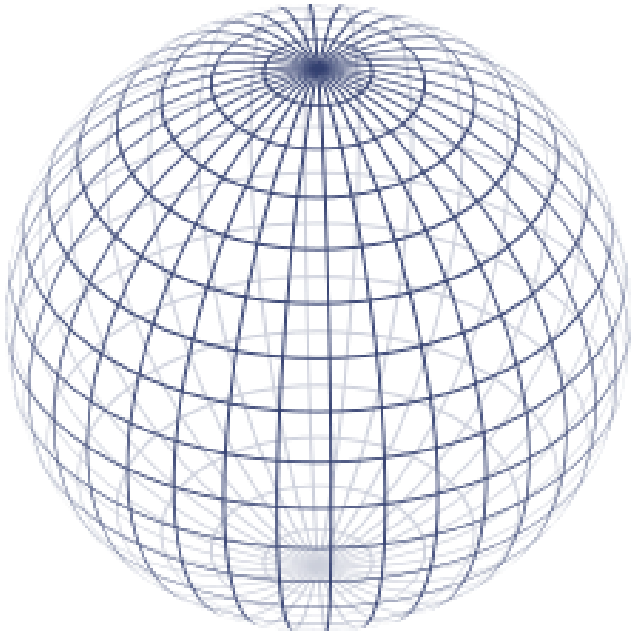
Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências

Os espaços de *de Sitter* são, juntamente com o espaço de Minkowski, os espaços mais simétricos, entre as soluções das equações de Einstein, da Relatividade Geral.

O espaço de *de Sitter* (dS) usual corresponde à superfície de uma esfera. A geometria desse espaço é $\boldsymbol{R^1 \times S^3}$, onde $\boldsymbol{R^1}$ é um eixo real representando o tempo, e $\boldsymbol{S^3}$ é uma hiperesfera tridimensional.

OBS.: $\boldsymbol{S^2}$ é a esfera usual. $\Longrightarrow$

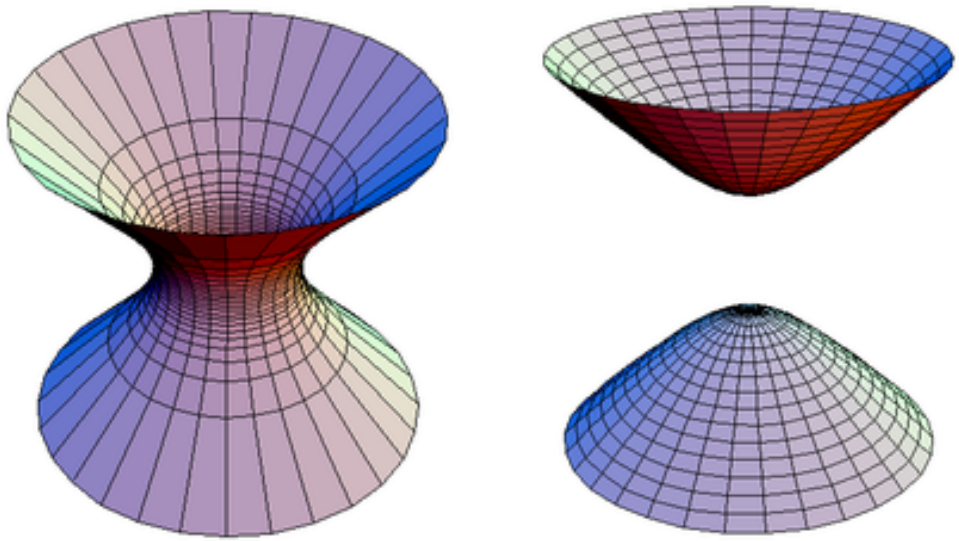


O espaço de anti-de Sitter

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências

O espaço chamado de *anti-de Sitter* (AdS) corresponde à superfície de um hiperbolóide



$$\frac{x_1^2}{a^2}+\frac{x_2^2}{b^2}-\frac{x_3^2}{c^2}=1 \quad \text{ou} \quad -\frac{x_1^2}{a^2}-\frac{x_2^2}{b^2}+\frac{x_3^2}{c^2}=1$$

Qual a importância do espaço AdS para as Cordas?

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências

Já vimos que as branas são soluções da supergravidade que descrevem as cordas no regime de baixas energias.
As branas têm massa e carga e portanto deformam o espaço onde vivem as cordas encurvando-o.
Portanto seria importante considerar as cordas nesse espaço curvo produzido pelas branas.
Maldacena, em 1997, considerou uma pilha de N D3-branas extremas justapostas, descritas pela seguinte métrica

$$ds^2_{N\,D3} = [f(r,R)]^{-\frac{1}{2}}(-dt^2 + d\vec{x}^2) + [f(r,R)]^{\frac{1}{2}}(dr^2 + r^2 d\Omega_5^2)$$

onde $f(r,R) = 1 + \frac{R^4}{r^4}$ e R é uma constante definida como $R^4 = N/(2\pi^2 T_3)$, sendo T_3 a tensão de cada D3-brana. Nesta solução, o horizonte está em $r = 0$.

Branas e AdS

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências

$$ds^2_{N\,D3} = [f(r,R)]^{-1/2}(-dt^2 + d\vec{x}^2) + [f(r,R)]^{1/2}(dr^2 + r^2 d\Omega_5^2)$$

Na região longe do horizonte, $r >> R$, a função horizonte reduz-se à $f(r,R) = 1 + \frac{R^4}{r^4} \approx 1$ e portanto a métrica das N D3-branas fica

$$ds^2 = -dt^2 + d\vec{x}^2 + dr^2 + r^2 d\Omega_5^2$$

que é o espaço chato de Minkowski em 10 dimensões.

Na região próxima do horizonte, $r << R$, a função horizonte reduz-se à $f(r,R) \approx \frac{R^4}{r^4}$ e a métrica fica

$$ds^2_{(AdS_5 \times S^5)} = \frac{r^2}{R^2}(-dt^2 + d\vec{x}^2) + \frac{R^2}{r^2}(dr^2 + r^2 d\Omega_5^2)$$

que corresponde ao espaço de anti-de Sitter em 5 dimensões vezes uma hiperesfera também de 5 dimensões ($AdS_5 \times S^5$)

Branas e AdS (2)

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências

$$ds^2_{(AdS_5 \times S^5)} = \frac{r^2}{R^2}(-dt^2 + d\vec{x}^2) + \frac{R^2}{r^2}(dr^2 + r^2 d\Omega_5^2)$$

É conveniente introduzir a variável $z \equiv R^2/r$, de modo que

$$\frac{r^2}{R^2} = \frac{R^2}{z^2} \qquad \text{e} \qquad \frac{R^2}{r^2} = \frac{z^2}{R^2}$$

$$dz^2 = \frac{R^2}{r^4} dr^2 \qquad \text{ou seja} \qquad dr^2 = \frac{R^2}{z^4} dz^2$$

e portanto este espaço pode ser reescrito, nas chamadas coordenadas de Poincaré, como:

$$ds^2_{(AdS_5 \times S^5)} = \frac{R^2}{z^2}(-dt^2 + d\vec{x}^2 + dz^2) + R^2 d\Omega_5^2$$

AdS Poincaré

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências

$$ds^2_{(AdS)} = \frac{R^2}{z^2}(-dt^2 + d\vec{x}^2 + dz^2)$$

Dessa forma, as branas produzidas pelas cordas encurvam o espaço, que bem próximo a elas, se aproxima do espaço de anti-de Sitter vezes uma hiperesfera.

A fronteira desse espaço corresponde à região $z = 0$, além do "ponto" $z \to \infty$.

É importante observar que **a fronteira do AdS_5**, nessas coordenadas, é o **espaço de Minkowski com 4 dimensões**.

Fronteira do $AdS_5 \times S^5$

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências

Como é a fronteira do $AdS_5 \times S^5$?

$$ds^2_{(AdS_5 \times S^5)} = \frac{R^2}{z^2}(-dt^2 + d\vec{x}^2 + dz^2) + R^2 d\Omega_5^2$$

Como no caso do AdS Poincaré, a fronteira é definida como o ponto $z = 0$ mais o "ponto" no infinito $z \to \infty$.

Note que a métrica do AdS "explode"em $z \to 0$, enquanto o raio R do S^5 permanece constante.

Dessa forma, o raio da hiperesfera vai a zero quando comparado ao tamanho do AdS.

Assim, a fronteira do $AdS_5 \times S^5$ é um espaço de Minkowski de 4 dimensões vezes uma hiperesfera cujo raio vai a zero.

Cordas no $AdS_5 \times S^5$ e Campos em 4d

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências

Este resultado levou Maldacena a deduzir que **existe uma relação entre a teoria de supercordas IIB (que gera as D3-branas) num espaço $AdS_5 \times S^5$ de 10 dimensões e teorias de campo num espaço de Minkowski de 4 dimensões.**

Qual seria a teoria de campos que vive na fronteira do AdS?

A fronteira do AdS_5 é quadridimensional, exatamente como as D3-branas, onde vivem as pontas das cordas abertas. Nessas D3-branas vivem os campos de calibre SU(N), com $N \to \infty$.

Comparando essas duas teorias, Maldacena concluiu que elas são equivalentes.

Uma correspondência semelhante vale também para a teoria M em 11d e campos em dimensões menores.

A correspondência AdS/CFT

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências

Teorias de supercorda em 10d e a teoria M em 11d, definidas em espaços $AdS_{d+1} \times S^n$, são equivalentes a teorias de campo $SU(N)$ supersimétricas, com $N \to \infty$, no espaço de Minkowski em d dimensões.

De fato, essas teorias de campo $SU(N)$ supersimétricas têm supersimetria estendida (vários férmions para cada bóson) e são conformes (CFT), isto é, não possuem nenhuma escala (energia, comprimento, massa, etc) com a qual possamos fazer comparações.

Teorias Conformes

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências

Teorias conformes não têm qualquer escala.

Ainda assim, têm aplicação em várias áreas da Física, por exemplo:

- Teoria das transições de fase (matéria condensada);
- Cromodinâmica quântica em altas energias, isto é, em energias $E >> M_{Proton}c^2$.

AdS/CFT e a Física de Partículas

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências

A correspondência AdS/CFT abre a possibilidade de interpretar a teoria de cordas em 10d ($AdS_5 \times S^5$) como uma teoria de campos SU(N) supersimétrica estendida ($\mathcal{N} = 4$) em 4d, e vice-versa.

Como já vimos, os campos que descrevem as 3 interações fundamentais, exceto a gravidade, são descritos por teorias de calibre com grupos de simetria U(1), SU(2) e SU(3).

De fato, o grupo SU(N), com $N >> 1$ contém os grupos citados acima como casos particulares.

Ou seja, teorias de calibre SU(N), potencialmente, podem descrever a Física do modelo padrão $U(1) \times SU(2) \times SU(3)$.

Mais AdS/CFT

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências

Na proposta original de Maldacena, a teoria M em 11d no $AdS_{d+1} \times S^n$ também é equivalente a teorias de calibre $SU(N)$ supersimétricas em d dimensões chatas.

Em particular, ele mostrou que a teoria M no espaço $AdS_7 \times S^4$ é dual a uma teoria de Yang-Mills em 6 dimensões .

Outro exemplo é o da teoria M no $AdS_4 \times S^7$ que é dual a teoria de calibre $SU(N)$ com supersimetria extendida $\mathcal{N} = 8$ em 3 dimensões chatas.

Este exemplo, em particular, tem sido usado em várias aplicações na Física da matéria condensada onde o sistema de interesse tem simetria planar, isto é, pode ser descrito convenientemente em $2 + 1$ dimensões, como o efeito Hall quântico (inteiro e fracionário) e a supercondutividade.

Cordas e a Caverna de Platão

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências

No mito da caverna de Platão, algumas pessoas vivem presas à parede de uma caverna, sem nunca ter saído dela.

Só o que veem são sombras de objetos e pessoas que vivem fora da caverna projetadas sobre uma de suas paredes.

Só ouvem as vozes e os sons produzidos fora da caverna.

Assim, só percebem o mundo como uma projeção bidimensional do que ocorre fora da caverna.

A partir da correspondência AdS/CFT, podemos imaginar que nosso mundo de 3+1 dimensões é uma projeção do mundo das cordas em 10d.

O Princípio Holográfico

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências

Bekenstein e Hawking mostraram que buracos negros têm entropia diferente de zero e que ela é proporcional à área de seu horizonte, e não ao seu volume.

Inspirado neste resultado, 't Hooft, enunciou em 1993 o princípio holográfico:

Toda teoria quântica incluindo a gravitação num espaço de $\boldsymbol{D}$ dimensões é descrita por uma teoria quântica (sem gravitação) em $\boldsymbol{D-1}$ dimensões.

A correspondência AdS/CFT pode ser interpretada como uma realização do princípio holográfico.

Mais AdS/CFT e partículas

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências

É claro que na proposta de Maldacena, a teoria SU(N) em 4d tem $\boldsymbol{N >> 1}$, é supersimétrica ($\boldsymbol{\mathcal{N} = 4}$) e conforme.

Portanto, para obter uma teoria mais próxima da Física do modelo padrão das partículas é preciso quebrar a supersimetria e a simetria conforme, além de reduzir $\boldsymbol{N}$.

Algum progresso já foi conseguido nessa direção, sem entretanto, chegar ao modelo padrão.

Vamos, agora, descrever alguns modelos com essas propriedades e algumas de suas aplicações.

Energia × quinta dimensão

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências

O que significam as dimensões extras, além das 4 usuais?

A correspondência AdS/CFT também oferece uma resposta para isso. Lembrando que os momenta p^μ na teoria quântica são dados por $-i\partial/\partial x_\mu$, a métrica

$ds^2_{(AdS_5 \times S^5)} = \frac{r^2}{R^2}(-dt^2 + d\vec{x}^2) + \frac{R^2}{r^2}(dr^2 + r^2 d\Omega_5^2)$

implica que os momenta vistos por um observador em 10 dimensões $\tilde{p}^\mu$ são relacionados com os vistos por um observador em 4d (p^μ) por

$$\tilde{p}^\mu = \frac{R}{r}\, p^\mu$$

Além disso, se definirmos a escala de energia em 10d como $\sim R^{-1}$, então a eneriga E percebida em 4d será

$$E \sim \frac{r}{R^2}$$

ou seja, a energia E de um processo em 4d é localizada na 5a. dimensão r. Assim, quanto maior E maior r.

Energia $\times$ quinta dimensão (2)

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas $\times$ Experiência
AdS/CFT
Referências

$$E \sim \frac{r}{R^2}$$

Em termos da coordenada $z = R^2/r$ de Poincaré,

$$E \sim \frac{1}{z}$$

e portanto quanto maior for E menor será z.

As demais 5 dimensões extras da hiperesfera S^5 codificam a supersimetria estendida ($\mathcal{N} = 4$) na teoria em 4d.

Referências

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências

Artigos de revisão sobre AdS/CFT usados como referência:

- Horatiu Nastase, Introduction to AdS-CFT, Dec 2007, 133 pp., e-Print: arXiv:0712.0689 [hep-th].
- J. L. Petersen, " Introduction to the Maldacena conjecture on AdS/CFT, " Int. J. Mod. Phys. A14: 3597 - 3672, 1999 [arXiv:hep-th/9902131].
- O. Aharony, S. S. Gubser, J. M. Maldacena, H. Ooguri and Y. Oz, "Large N field theories, string theory and gravity," Phys. Rept. **323**, 183 (2000) [arXiv:hep-th/9905111]. *(MAGOO)*

Referências

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências

Livros sobre AdS/CFT usados como referência:

- Introduction to the ADS/CFT Correspondence, Horatiu Nastase, Cambridge University Press (2015).
- Holographic Duality in Condensed Matter Physics, Jan Zaanen, Yan Liu, Ya-Wen Sun, Koenraad Schalm, Cambridge University Press (2015).
- AdS/CFT Duality User Guide, Makoto Natsuume, Springer Lect.Notes Phys. 903 (2015), e-Print: arXiv:1409.3575 [hep-th].

Referências

Henrique Boschi Filho
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
boschi@if.ufrj.br

Introdução
Cordas
Supercordas
Teoria M e Dualidades
Teorias de Calibre
Buracos Negros
Branas
Cordas × Experiência
AdS/CFT
Referências

Livros de Cordas e AdS/CFT usados como referência:

- Barton Zwiebach,“ A First Course in String Theory,” 2nd ed., Cambridge, 2008.
- K. Becker, M. Becker and J. H. Schwarz, “String Theory and M-Theory: A Modern Introduction,” Cambridge, 2007.
- E. Kiritsis, “String theory in a nutshell,” Princeton University Press, 2007.