

O que é a Teoria das Supercordas?

Nathan Berkovits

ICTP South American Institute for Fundamental Research
Instituto de Física Teórica-UNESP

Tópicos

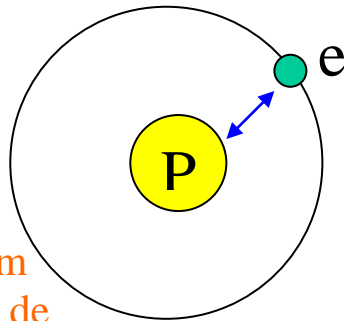
- I. Física Quântica versus Relatividade Geral
- II. Resolução: Supercordas
- III. Supersimetria
- IV. Dimensões Extras
- V. Dualidades
- VI. Spinors Puros
- VII. Sucessos e Desafios

I. Física Quântica versus Relatividade Geral

Na física quântica, as forças são sentidas por causa de troca de partículas.

Interação Eletromagnética

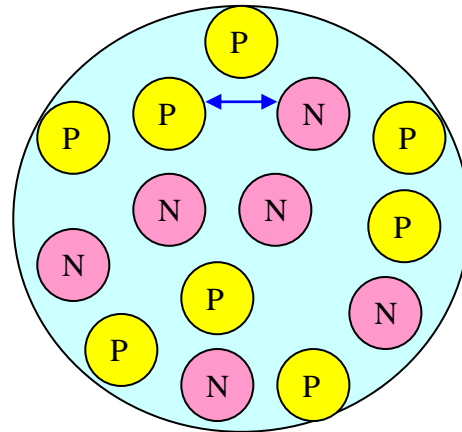
Uma onda de luz é composta de partículas indivisíveis chamadas “fótons”. Objetos com carga sentem a força eletromagnética via a troca de “fótons”.



Átomo de hidrogênio (tamanho 10^{-8} cm)

Interação Fraca

Na teoria Eletrofraca, as partículas com **isospin** sentem a força fraca via a troca de “bósons vetoriais”

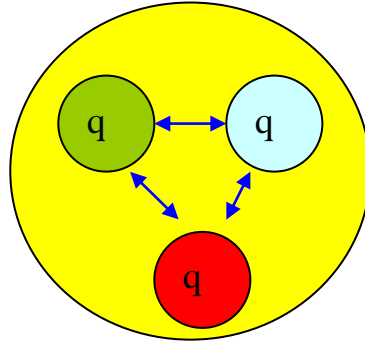


Núcleo de urânio (tamanho 10^{-12} cm)

Interação Forte

Cromodinâmica Quântica

é a teoria das interações fortes. Nesta teoria, as partículas com cor sentem a força forte via a troca de “gluons”.

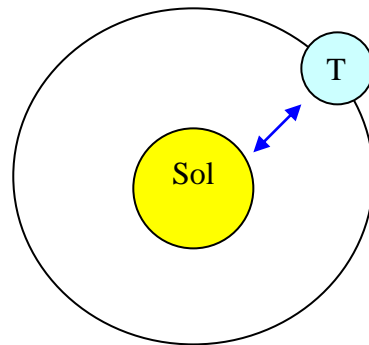


Próton (tamanho 10^{-13} cm)

Interação Gravitacional

Relatividade Geral é a teoria de Einstein para gravitação.

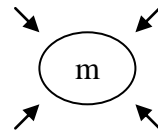
Na linguagem de física quântica, os objetos com massa sentem a força gravitacional via a troca de ondas gravitacionais compostas de partículas chamadas “grávitons”.



Sistema solar (tamanho 10^{+13} cm)

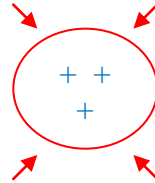
*Embora a **Relatividade Geral** é precisa quando as distâncias são grandes, ela sofre contradições quando as distâncias são pequenas e os efeitos de física quântica ficam importantes.*

Ex: A força gravitacional aumenta sem limites quando aproxima-se de uma partícula pontual.



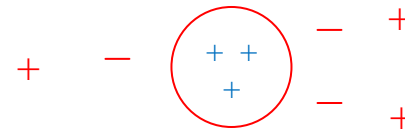
$$F = G m_1 m_2 / d^2$$

Por quê isso não acontece também para a força eletromagnética?



$$F = e q_1 q_2 / d^2$$

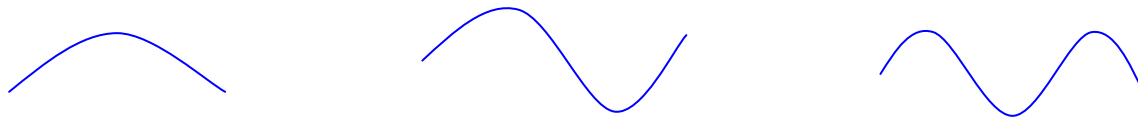
Renormalização: o vácuo “polariza” produzindo partículas com cargas negativas e positivas que cancelam a força.



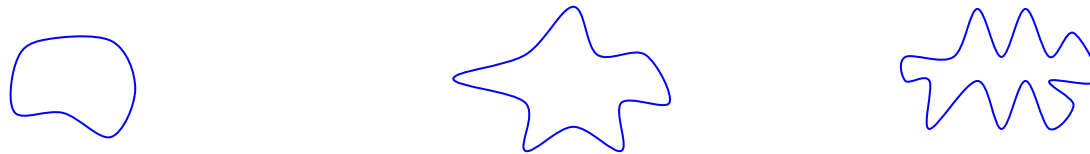
Não tem partículas com **massa** negativa, então isso não é possível para a força gravitacional.

II. Resolução: Supercordas

As partículas fundamentais são ressonâncias distintas
de **cordas abertas**



ou de **cordas fechadas**.



A massa e spin da partícula depende da frequência e momentum angular da ressonância.

Vibrações diferentes da corda descrevem partículas diferentes.

Espectro de partículas inclui o gráviton e gluons, e um número infinito de partículas massivas.

*As **supercordas** resolvem os problemas de Relatividade Geral porque as partículas não são pontuais e as interações de supercordas são mais suaves do que as interações de partículas pontuais.*

Trajetória de uma partícula pontual

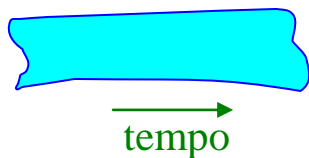


Interação de duas partículas pontuais

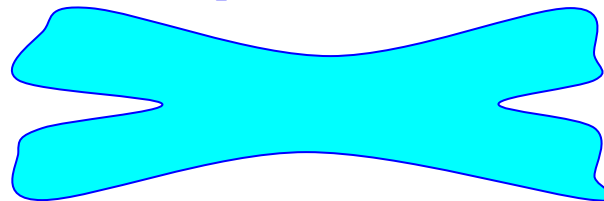


Pontos singulares onde as partículas juntam e separam

Trajetória de uma supercorda



Interação de duas supercordas



Não tem pontos singulares onde as cordas juntam e separam

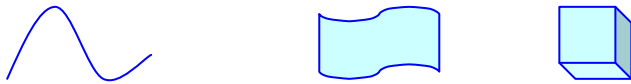
A teoria das supercordas é a **única** teoria até agora que consegue calcular amplitudes de espalhamento de grávitons sem sofrer das inconsistências quânticas da Relatividade Geral.

Perguntas frequentes sobre supercordas:

1) De que é feita uma supercorda?

A supercorda é feita de supercorda!

2) Por quê cordas e não membranas, cubos, etc?



Ressonâncias de membranas e cubos têm graus de liberdade demais para descrever partículas fundamentais. No entanto, membranas podem ser interpretadas como estados ligados de supercordas, por exemplo na teoria M.

3) Qual o tamanho de uma supercorda?

O tamanho depende de como ela está vibrando.



Mas o tamanho típico de uma supercorda é 10^{-33} cm. Então é impossível medir com supercordas as distâncias menores que 10^{-33} cm. Os problemas quânticos da relatividade geral aparecem nestas distâncias, e por isso, não afetam as supercordas.

4) Como podemos testar a teoria das supercordas?

Para testar a teoria diretamente, precisaria de energias de 10^{22} MeV para detectar o comprimento da supercorda de 10^{-33} cm. Estas energias foram presentes no universo jovem na época de inflação. Podemos também testar a teoria indiretamente via suas previsões de supersimetria e dimensões extras.

III. Supersimetria

As partículas fundamentais são divididas em **Bósons** e **Férmions**.

Bósons: fóton, bóson vetorial, gluon, gráviton, bóson de Higgs. As forças são transmitidas por troca de bósons. Bósons satisfazem a regra de multiplicação usual

$$B_1 \times B_2 = B_2 \times B_1.$$

Férmions: elétron, pósitron, neutrino, anti-neutrino, quark, anti-quark. A matéria e anti-matéria é composta de férmions. Férmions satisfazem a regra de multiplicação

$$F_1 \times F_2 = - F_2 \times F_1.$$

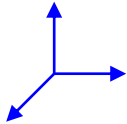
Por causa do sinal menos, dois férmions iguais não podem ocupar o mesmo ponto de espaço.

As supercordas contêm uma simetria que relaciona **bósons** e **férmions** que se chama **supersimetria**. Para cada ressonância de uma supercorda que descreve um **bóson**, existe uma ressonância que descreve um **férmion** com massa e carga iguais. As massas dos **bósons** e **férmions** conhecidas são diferentes, então **supersimetria** é quebrada no nosso mundo.

IV. Dimensões Extras

Nosso mundo parece ter **três** dimensões de espaço e uma dimensão de tempo.

espaço



tempo



As supercordas podem existir somente num mundo com **nove** dimensões de espaço e uma dimensão de tempo.

Existe a possibilidade que **seis** destas dimensões sejam tão pequenas que não as observamos – compactificação.

Ex:



De uma distância grande, um lápis parece ter somente uma dimensão de espaço porque não se percebe a dimensão de circunferência dele.

As massas e os tipos das partículas descritas pelas ressonâncias das supercordas dependem crucialmente da maneira que as dimensões são compactificadas.

Fazendo experiências com energias altas ou com suficiente precisão, podemos descobrir se nosso mundo contém dimensões extras e como estas dimensões são compactificadas.

Uma maneira de detectar as dimensões extras seria medir variações da força gravitacional. Em vez da relação usual com o inverso quadrado da distância,

$$F = G m_1 m_2 / d^2 ,$$

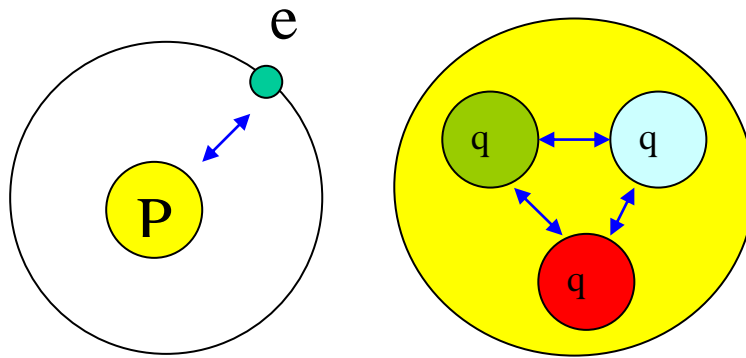
a existência de dimensões extras implicaria a relação

$$F = G m_1 m_2 / d^{2+\varepsilon}$$

onde ε é pequeno.

V. Dualidades

Uma teoria com interações pode ter estados **ligados** que são compostos de partículas fundamentais.



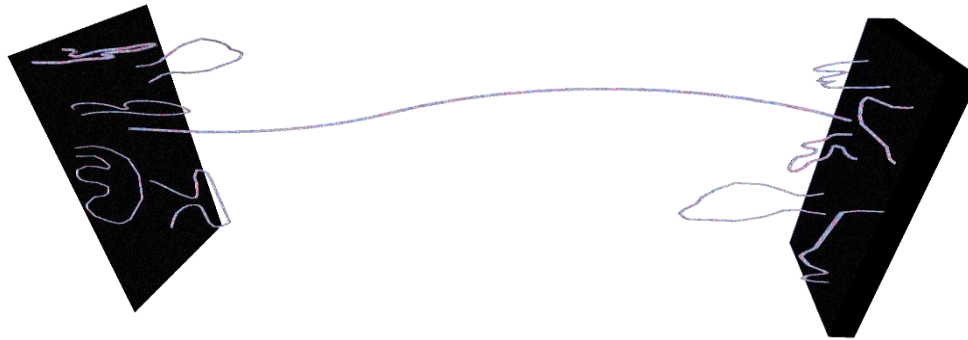
Átomo de hidrogênio

Próton

Quando a interação é forte, os estados ligados são tão importantes como as partículas “fundamentais”.

Pode existir outra maneira para descrever a mesma teoria onde os estados ligados são interpretados como partículas fundamentais e as partículas fundamentais são interpretadas como estados ligados - “**dualidade**”.

Na teoria de supercordas, os estados ligados são chamados **D-branas** e podem ser pontuais, unidimensionais (cordas), bidimensionais (membranas), etc.

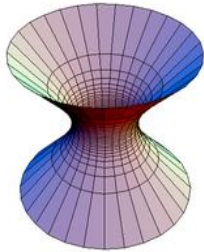


D-branas foram usadas na teoria de supercordas para estudar a física quântica de buracos negros e o “**princípio holográfico**” onde toda a informação da teoria está contida na fronteira.

Tratando D-branas como objetos fundamentais, foi descoberta uma descrição “**dual**” da teoria de supercordas chamada **Teoria-M**.

Na teoria-M, as partículas fundamentais andam em **onze** dimensões de espaço-tempo onde o tamanho da dimensão adicional é pequeno quando as cordas são fracamente acopladas.

Para a supercorda andando num background gravitacional chamado **anti-de-Sitter (AdS)**, existe uma dualidade entre **supercordas** interagindo gravitacionalmente em um espaço-tempo AdS de **cinco** dimensões e **partículas** interagindo via a força de cromodinâmica quântica em um espaço-tempo plano com **quatro** dimensões.



Espaço AdS de duas dimensões

Quando a força gravitacional é pequena, a correspondente força de cromodinâmica quântica é grande. Então pode usar **supercordas fracamente** acopladas num background AdS para estudar **partículas fortemente** acoplados.

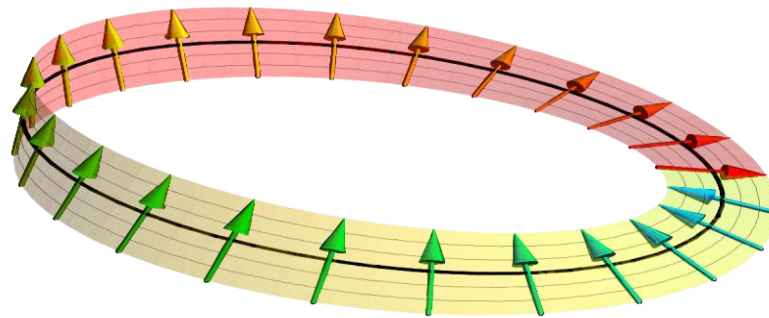
Esta dualidade se chama “**correspondência AdS-CFT**” e foi utilizado para estudar estados ligados de íons pesados em cromodinâmica quântica e estados ligados de supercondutividade em eletromagnetismo.

VI. Spinors Puros

Um fóton carrega uma polarização “**vetorial**” que aponta numa direção de espaço-tempo.

Um elétron carrega uma polarização “**spinorial**” que indica se tem spin para cima ou para baixo.

Vetores e **spinors** são objetos matemáticos que transformam diferentemente sob rotações e distinguem os **bósons** e os **férmions**. Um **spinor** troca de sinal quando faz uma rotação completa.



Para descrever estas partículas como ressonâncias da supercorda, a supercorda precisa carregar uma variável **vetorial** ou **spinorial** que determina esta polarização.

Na descrição original da supercorda (P. Ramond, A. Neveu, J. Schwarz, 1973), a variável usada foi um objeto **vetorial** chamado ψ^m . Este objeto vetorial ψ^m é fácil de quantizar, mas tem problemas para descrever a polarização spinorial dos férmions como o elétron.

Numa segunda descrição (M. Green, J. Schwarz, 1984), a variável usada foi um objeto **spinorial** chamado θ^α . O produto de dois spinores transforma como um vetor, então a variável spinorial θ^α conseguiu descrever ambos os bósons e férmions. Mas esta descrição tinha problemas de quantização.

Desenvolvi uma terceira descrição (N. Berkovits, 2000) incluindo a variável spinorial θ^α junto com outra variável spinorial chamada λ^α que satisfaz o vínculo de ser um “**spinor puro**”

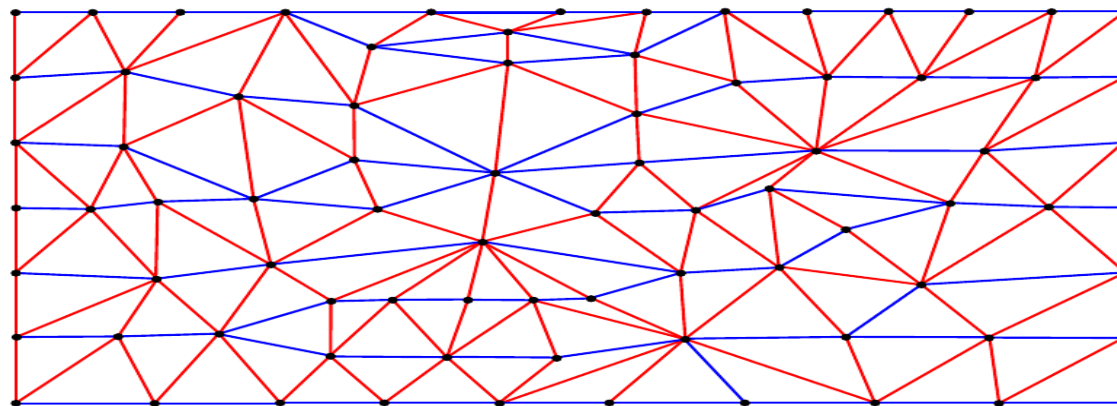
$$\lambda^\alpha (\Gamma^m)_{\alpha\beta} \lambda^\beta = 0$$

Esta terceira descrição com spinores puros é fácil de quantizar e é o mais conveniente para cálculos de espalhamento de bósons e férmions.

VII. Sucessos e Desafios

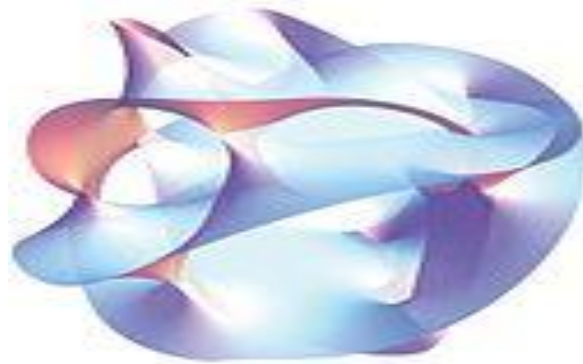
A teoria de supercordas resolve o conflito entre física quântica e relatividade geral quando as distâncias são pequenas. Até agora, é a **única** teoria que consegue calcular amplitudes de espalhamento de grávitons incluindo efeitos quânticos.

Existem modelos mais radicais para tentar resolver este conflito (por exemplo, “gravidade quântica de laços” e “triangulação dinâmica causal”) que **discretizam o espaço-tempo**, mas estes modelos ainda não conseguiram mostrar que reproduzem a gravitação de Einstein quando as distâncias são grandes.



Existe a possibilidade de que as ressonâncias e as interações de uma supercorda descrevem todas as partículas e as forças da natureza – **uma teoria de tudo?**

Para testar esta possibilidade, precisamos saber melhor como as seis dimensões extras da supercorda são **compactificadas**. As massas e interações das partículas descritas pela supercorda dependem crucialmente da forma da compactificação, e é um desafio construir uma compactificação que reproduz as partículas e forças conhecidas.



O **Modelo Padrão** de partículas já sobreviveu 50 anos e a **Relatividade Geral** 100 anos, mas qualquer teoria de física tem suas limitações e eventualmente vai ser substituída por uma teoria melhor.

A resolução do conflito entre gravitação e física quântica indica que supercordas é um candidato promissor para esta teoria, mas podem surgir candidatos melhores dependendo de como os mistérios atuais de **matéria escura** e **energia escura** são desvendados.

As energias necessárias para testar diretamente a teoria de supercordas foram disponíveis somente no começo do universo. Talvez no futuro, **observações cosmológicas** da época da inflação vão poder distinguir a teoria de supercordas de outras teorias de gravitação.

Embora as previsões de **supersimetria** e **dimensões extras** ainda não foram verificadas, experimentos em andamento para testar estas previsões incluem colisões de partículas de altas energias em aceleradores e medidas da força gravitacional em distâncias sub-milímetros.

.

Do lado teórico, as dualidades na teoria de supercordas como a “**correspondência AdS-CFT**” já foram aplicadas em várias áreas de matemática e física como geometria algébrica, espalhamento de íons pesados, supercondutividade, e as propriedades quânticas de buracos negros.

Embora sabemos como calcular amplitudes de espalhamento na teoria de supercordas quando a interação é **fraca**, a construção de uma prova destas dualidades está faltando e exige um entendimento da teoria quando a interação é **forte**.

Grupos no ICTP-SAIFR/IFT-UNESP estão ativamente trabalhando neste entendimento usando as ferramentas de integrabilidade e spinors puros.

A teoria de supercordas foi desenvolvida 50 anos atrás para tentar entender as interações fortes, e foi descoberta inesperadamente que ela também descreve gravitação quântica. Ainda não sabemos se descreve todas as forças e partículas do nosso universo, mas estamos aprendendo muito com esta teoria que com certeza vai gerar mais surpresas no futuro.

Referências

Artigos de divulgação:

“Supercordas: a física do futuro?” em *O Universo sem Mistério*, Eds. Natale e Vieira, 2003

“Descobrimo a teoria das cordas” em *Scientific American Brasil*, capa de janeiro 2004

Livro de divulgação:

“O Universo Elegante”, Brian Greene, W. W. Norton & Co, 1999

Artigos técnicos:

<https://arxiv.org/list/hep-th/new>

Livros técnicos:

“Superstring Theory, vol. 1 e 2”, M.B. Green, J.H. Schwarz, E.Witten, Cambridge Univ. Press, 1987

“String Theory, vol. 1 e 2”, Joseph Polchinski, Cambridge Univ. Press, 1998