



# GRAVITAÇÃO E TEORIAS DE GAUGE

Victor O. Rivelles

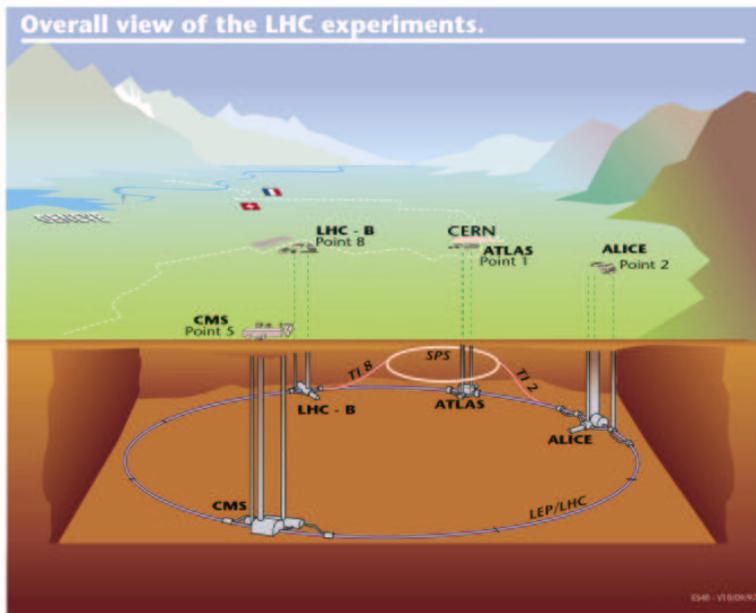
`rivelles@fma.if.usp.br`

Instituto de Física

Universidade de São Paulo

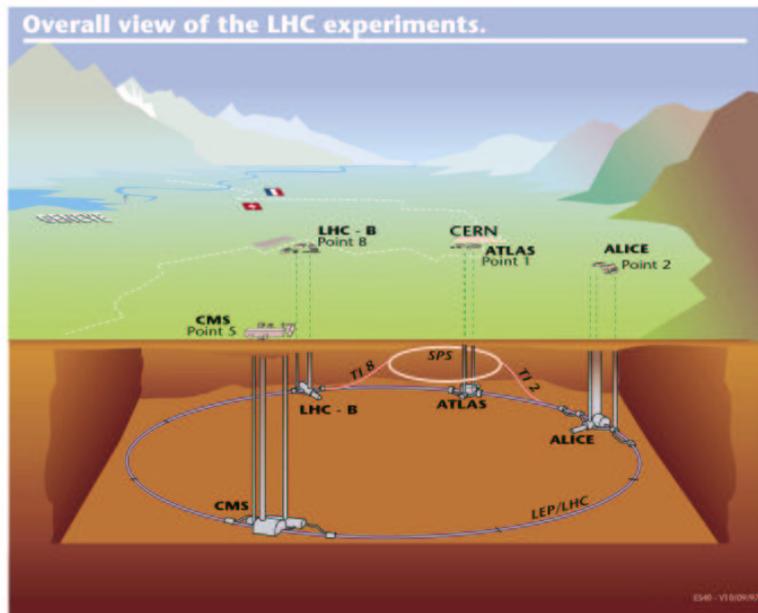


# O LHC



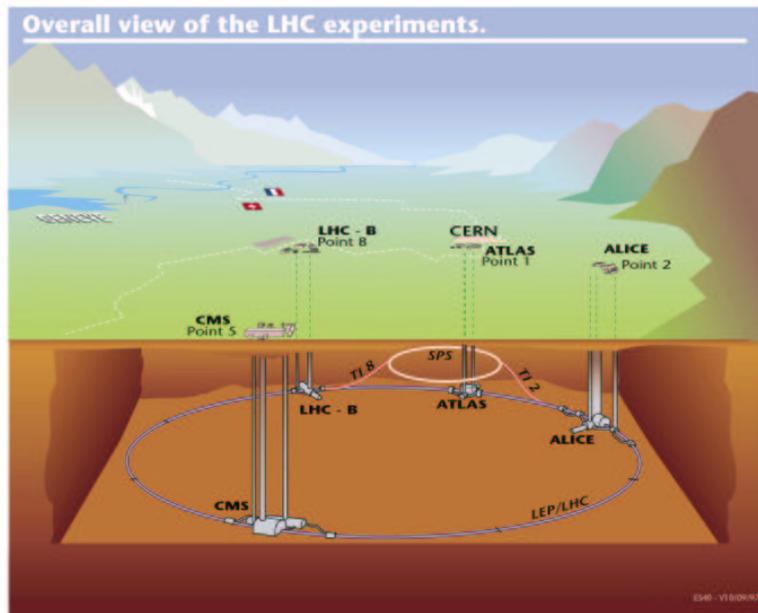
- O LHC é um acelerador de partículas **dedicado**.
- Projetado para detectar o Higgs e estudar a física na escala de TeV.

# O LHC



- O LHC é um acelerador de partículas **dedicado**.
- Projetado para detectar o Higgs e estudar a física na escala de TeV.
- Isso é possível porque existe o modelo padrão das partículas elementares (teoria de gauge com grupo  $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$  mais a quebra espontânea de simetria) que é utilizado para fazer previsões do que vai ser encontrado.

# O LHC



- O LHC é um acelerador de partículas **dedicado**.
- Projetado para detectar o Higgs e estudar a física na escala de TeV.
- Isso é possível porque existe o modelo padrão das partículas elementares (teoria de gauge com grupo  $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$  mais a quebra espontânea de simetria) que é utilizado para fazer previsões do que vai ser encontrado.

**Porém, espera-se encontrar muito mais que isso: física nova na escala de TeV.**

# O LHC

---

- Situação semelhante a da década de 50 e 60 quando os aceleradores produziam uma enorme quantidade de partículas elementares e não havia uma teoria apropriada para descreve-las.

# O LHC



- Situação semelhante a da década de 50 e 60 quando os aceleradores produziam uma enorme quantidade de partículas elementares e não havia uma teoria apropriada para descrevê-las.
- Essa situação mudou em meados da década de 60 com o advento do modelo à **quarks** e na década de 70 com a **teoria de campos** como a ferramenta correta para descrever os quarks, léptons e bósons de gauge.



# O LHC

- Situação semelhante a da década de 50 e 60 quando os aceleradores produziam uma enorme quantidade de partículas elementares e não havia uma teoria apropriada para descreve-las.
- Essa situação mudou em meados da década de 60 com o advento do modelo à [quarks](#) e na década de 70 com a [teoria de campos](#) como a ferramenta correta para descrever os quarks, léptons e bósons de gauge.
- Assim como na década de 50 e 60, não há, atualmente, uma teoria que antecipe o que vai ser encontrado. Existem várias propostas: [supersimetria](#), [technicolor](#), [little Higgs](#), etc.

# O LHC

- Situação semelhante a da década de 50 e 60 quando os aceleradores produziam uma enorme quantidade de partículas elementares e não havia uma teoria apropriada para descreve-las.
- Essa situação mudou em meados da década de 60 com o advento do modelo à **quarks** e na década de 70 com a **teoria de campos** como a ferramenta correta para descrever os quarks, léptons e bósons de gauge.
- Assim como na década de 50 e 60, não há, atualmente, uma teoria que antecipe o que vai ser encontrado. Existem várias propostas: **supersimetria, technicolor, little Higgs, etc.**
- **Há inclusive a possibilidade de que o Higgs não seja encontrado!**

# O LHC

- Situação semelhante a da década de 50 e 60 quando os aceleradores produziam uma enorme quantidade de partículas elementares e não havia uma teoria apropriada para descreve-las.
- Essa situação mudou em meados da década de 60 com o advento do modelo à **quarks** e na década de 70 com a **teoria de campos** como a ferramenta correta para descrever os quarks, léptons e bósons de gauge.
- Assim como na década de 50 e 60, não há, atualmente, uma teoria que antecipe o que vai ser encontrado. Existem várias propostas: **supersimetria, technicolor, little Higgs, etc.**
- **Há inclusive a possibilidade de que o Higgs não seja encontrado!**
- **Como descobrir a nova física com os dados do LHC?** Totalmente não trivial!!! O modelo supersimétrico mínimo, por exemplo, tem cerca de 100 parâmetros.

# O LHC

- Situação semelhante a da década de 50 e 60 quando os aceleradores produziam uma enorme quantidade de partículas elementares e não havia uma teoria apropriada para descrevê-las.
- Essa situação mudou em meados da década de 60 com o advento do modelo à **quarks** e na década de 70 com a **teoria de campos** como a ferramenta correta para descrever os quarks, léptons e bósons de gauge.
- Assim como na década de 50 e 60, não há, atualmente, uma teoria que antecipe o que vai ser encontrado. Existem várias propostas: **supersimetria, technicolor, little Higgs, etc.**
- **Há inclusive a possibilidade de que o Higgs não seja encontrado!**
- **Como descobrir a nova física com os dados do LHC?** Totalmente não trivial!!! O modelo supersimétrico mínimo, por exemplo, tem cerca de 100 parâmetros.
- **Olimpíada do CERN** (julho 2005).

# O LHC

- Situação semelhante a da década de 50 e 60 quando os aceleradores produziam uma enorme quantidade de partículas elementares e não havia uma teoria apropriada para descreve-las.
- Essa situação mudou em meados da década de 60 com o advento do modelo à **quarks** e na década de 70 com a **teoria de campos** como a ferramenta correta para descrever os quarks, léptons e bósons de gauge.
- Assim como na década de 50 e 60, não há, atualmente, uma teoria que antecipe o que vai ser encontrado. Existem várias propostas: **supersimetria, technicolor, little Higgs, etc.**
- **Há inclusive a possibilidade de que o Higgs não seja encontrado!**
- **Como descobrir a nova física com os dados do LHC?** Totalmente não trivial!!! O modelo supersimétrico mínimo, por exemplo, tem cerca de 100 parâmetros.
- **Olimpíada do CERN** (julho 2005).
- **E NÓS? ESTAMOS PREPARADOS?**

# Indo além do modelo padrão

- Essa é a forma tradicional de “fazer física”: **de baixo para cima**. Os dados experimentais fornecem o input para a elaboração de modelos.

# Indo além do modelo padrão

- Essa é a forma tradicional de “fazer física”: **de baixo para cima**. Os dados experimentais fornecem o input para a elaboração de modelos.
- Como os aceleradores demoram muito tempo para serem construídos os físicos teóricos começaram a “fazer física” **de cima para baixo**. Uma “teoria” é construída e depois usada para fazer previsões.

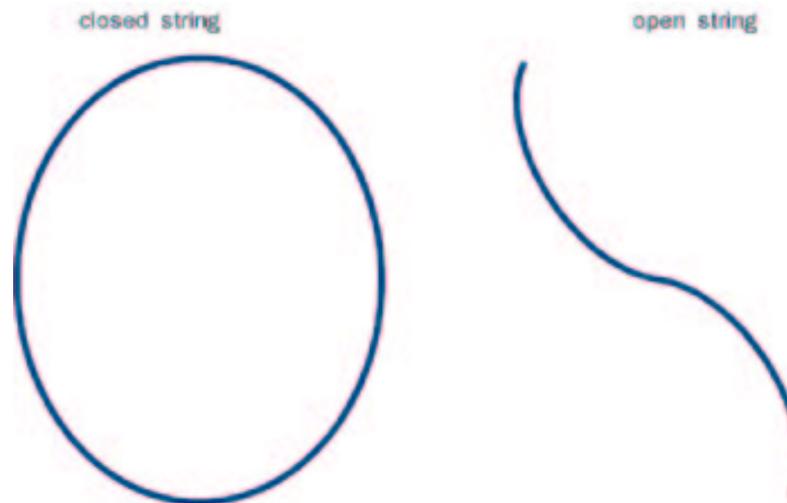
# Indo além do modelo padrão

- Essa é a forma tradicional de “fazer física”: **de baixo para cima**. Os dados experimentais fornecem o input para a elaboração de modelos.
- Como os aceleradores demoram muito tempo para serem construídos os físicos teóricos começaram a “fazer física” **de cima para baixo**. Uma “teoria” é construída e depois usada para fazer previsões.
- A motivação dessa “teoria” deve incluir critérios de consistência interna e deve exigir que ela contenha as teorias conhecidas em limites apropriados.

# Indo além do modelo padrão

- Essa é a forma tradicional de “fazer física”: **de baixo para cima**. Os dados experimentais fornecem o input para a elaboração de modelos.
- Como os aceleradores demoram muito tempo para serem construídos os físicos teóricos começaram a “fazer física” **de cima para baixo**. Uma “teoria” é construída e depois usada para fazer previsões.
- A motivação dessa “teoria” deve incluir critérios de consistência interna e deve exigir que ela contenha as teorias conhecidas em limites apropriados.
- A única “teoria” construída de cima para baixo e que engloba a gravitação é a **TEORIA DE CORDAS**.

# Teoria de cordas



Inicialmente a teoria considerava as partículas elementares como modos de vibração quantizados de uma corda relativística.

Cordas abertas dão origem aos **bósons de gauge**.

Cordas fechadas dão origem ao **gráviton**.

# Teoria de cordas

Hoje em dia os objetos fundamentais incluem **cordas e membranas** de diversas dimensões: **p-branas**.



# Teoria de cordas

- **Grande sucesso:** contém a relatividade geral e fornece uma teoria quântica da gravitação que é consistente no regime perturbativo.

# Teoria de cordas

- **Grande sucesso:** contém a relatividade geral e fornece uma teoria quântica da gravitação que é consistente no regime perturbativo.
- **Grande falha:** não é capaz (ainda) de fazer uma previsão específica que seja exclusiva da teoria de cordas. Faz apenas previsões genéricas como supersimetria, dimensões extras, etc.

# Teoria de cordas

- **Grande sucesso:** contém a relatividade geral e fornece uma teoria quântica da gravitação que é consistente no regime perturbativo.
- **Grande falha:** não é capaz (ainda) de fazer uma previsão específica que seja exclusiva da teoria de cordas. Faz apenas previsões genéricas como supersimetria, dimensões extras, etc.
- Consistência requer **SUPERSIMETRIA:** LHC pode testar susy.

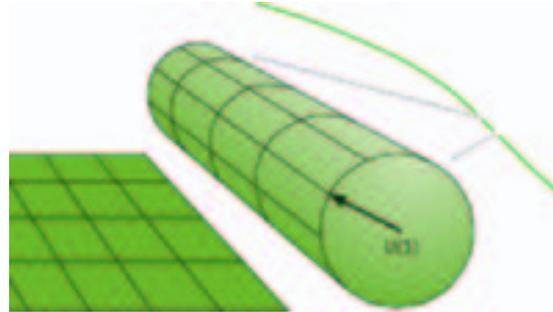
# Teoria de cordas

- **Grande sucesso:** contém a relatividade geral e fornece uma teoria quântica da gravitação que é consistente no regime perturbativo.
- **Grande falha:** não é capaz (ainda) de fazer uma previsão específica que seja exclusiva da teoria de cordas. Faz apenas previsões genéricas como supersimetria, dimensões extras, etc.
- Consistência requer **SUPERSIMETRIA:** LHC pode testar susy.
- Consistência requer **10 dimensões.**

# Teoria de cordas

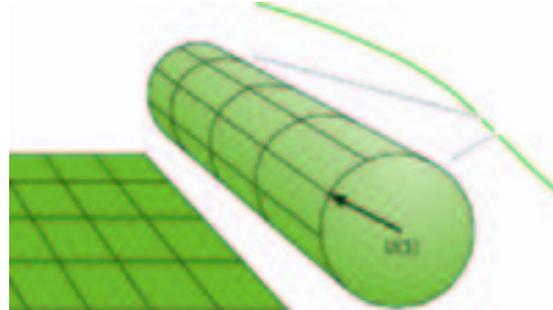
- **Grande sucesso:** contém a relatividade geral e fornece uma teoria quântica da gravitação que é consistente no regime perturbativo.
- **Grande falha:** não é capaz (ainda) de fazer uma previsão específica que seja exclusiva da teoria de cordas. Faz apenas previsões genéricas como supersimetria, dimensões extras, etc.
- Consistência requer **SUPERSIMETRIA:** LHC pode testar susy.
- Consistência requer **10 dimensões.**
- A dimensionalidade do espaço-tempo passou a ser algo que deve ser determinado experimentalmente!!! LHC pode testar dimensões extras.

# Compactificação



- Compactificação para 4 dimensões: gera um número enorme de teorias de gauge em 4 dimensões que seriam candidatas ao modelo padrão.

# Compactificação



- Compactificação para 4 dimensões: gera um número enorme de teorias de gauge em 4 dimensões que seriam candidatas ao modelo padrão.
- A estabilidade das soluções não é suficiente para reduzir esse número. Procura-se um **princípio de seleção** do vácuo que forneça um número menor de teorias em 4 dimensões.

# Unificação

- **Unificação** é natural. Aparecem teorias de gauge quirais com grupos de gauge suficientemente grandes para incluir o modelo padrão e estruturas de sabor (flavor) bastante complicadas (que dependem da geometria das dimensões extras).

# Unificação

- **Unificação** é natural. Aparecem teorias de gauge quirais com grupos de gauge suficientemente grandes para incluir o modelo padrão e estruturas de sabor (flavor) bastante complicadas (que dependem da geometria das dimensões extras).
- O modelo padrão **não** aparece naturalmente. Em geral obtém-se modelos com muitas supersimetrias ou com muitos  $U(1)$  e muita matéria exótica.

# Unificação

- **Unificação** é natural. Aparecem teorias de gauge quirais com grupos de gauge suficientemente grandes para incluir o modelo padrão e estruturas de sabor (flavor) bastante complicadas (que dependem da geometria das dimensões extras).
- O modelo padrão **não** aparece naturalmente. Em geral obtém-se modelos com muitas supersimetrias ou com muitos  $U(1)$  e muita matéria exótica.
- A teoria de cordas é **única**. So há um parâmetro dimensional. Todas as escalas devem ser determinadas dinamicamente.

# Unificação

- **Unificação** é natural. Aparecem teorias de gauge quirais com grupos de gauge suficientemente grandes para incluir o modelo padrão e estruturas de sabor (flavor) bastante complicadas (que dependem da geometria das dimensões extras).
- O modelo padrão **não** aparece naturalmente. Em geral obtém-se modelos com muitas supersimetrias ou com muitos  $U(1)$  e muita matéria exótica.
- A teoria de cordas é **única**. So há um parâmetro dimensional. Todas as escalas devem ser determinadas dinamicamente.
- Porém, há centenas de campos escalares. Há pouco controle sobre tais campos exceto quando susy está presente.

# Supersimetria



- Susy é necessária para a estabilidade de configurações de cordas e branas.



# Supersimetria



- Susy é necessária para a estabilidade de configurações de cordas e branas.
- A teoria de cordas não fornece apenas uma extensão natural do modelo padrão.



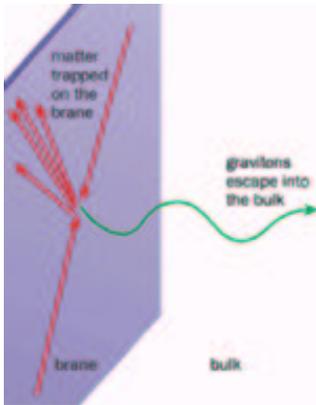
# Supersimetria

- Susy é necessária para a estabilidade de configurações de cordas e branas.
- A teoria de cordas não fornece apenas uma extensão natural do modelo padrão.
- Também não fornece um mecanismo natural de quebra de susy.

# Supersimetria

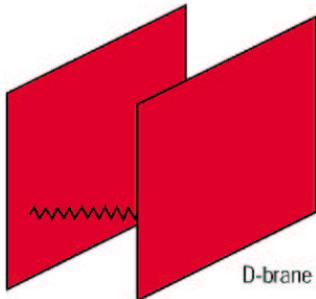
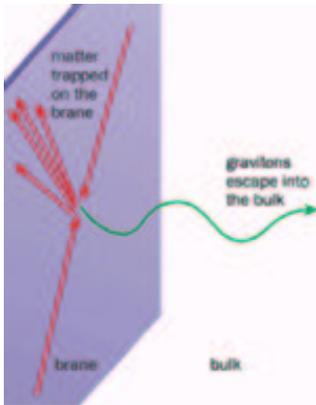
- Susy é necessária para a estabilidade de configurações de cordas e branas.
- A teoria de cordas não fornece apenas uma extensão natural do modelo padrão.
- Também não fornece um mecanismo natural de quebra de susy.
- Portanto, não há uma previsão específica mas a descoberta da susy no LHC será importante para a teoria de cordas.

# Branas



- Nosso universo pode ser uma **brana imersa em 10 dimensões.**
- Dimensões extras grandes: gravitação propaga-se em todas as dimensões.

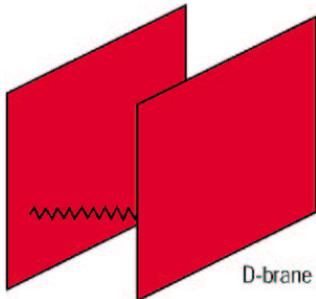
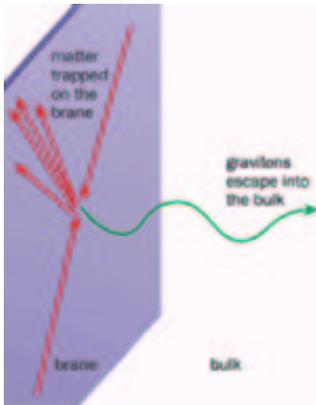
# Branas



- Nosso universo pode ser uma **brana imersa em 10 dimensões.**
- Dimensões extras grandes: gravitação propaga-se em todas as dimensões.
- Duas branas, numa a gravitação é forte e noutra é fraca.
- **Grávitons poderiam ser produzidos no LHC.**



# Branas



- Nosso universo pode ser uma **brana imersa em 10 dimensões**.
- Dimensões extras grandes: gravitação propaga-se em todas as dimensões.
- Duas branas, numa a gravitação é forte e noutra é fraca.
- **Grávitons poderiam ser produzidos no LHC.**

Se a escala de Planck estiver na região de TeV, o LHC poderia produzir **buracos negros**, o que permitiria estudar a **gravitação quântica**.

# LHC

---

Portanto, o LHC pode dar indícios significativos sobre a existência (ou não) da teoria de cordas.

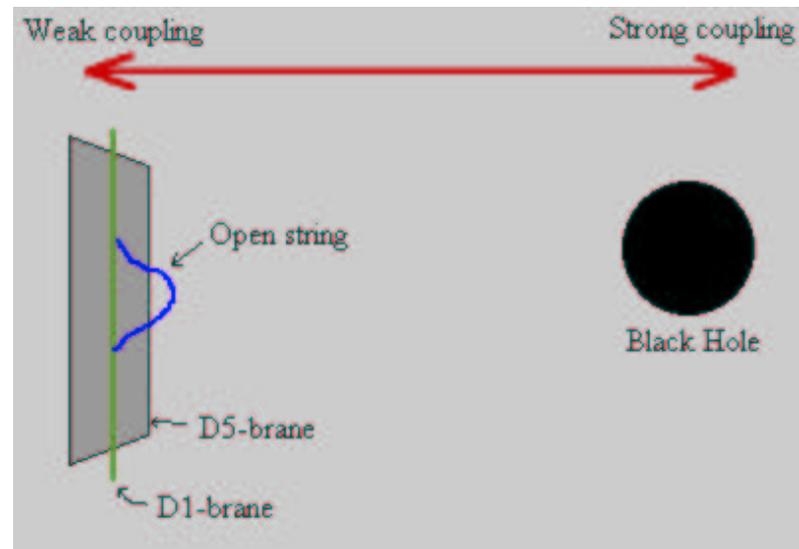
# Avanços teóricos



Do ponto de vista estritamente teórico a teoria de cordas também produziu resultados surpreendentes.

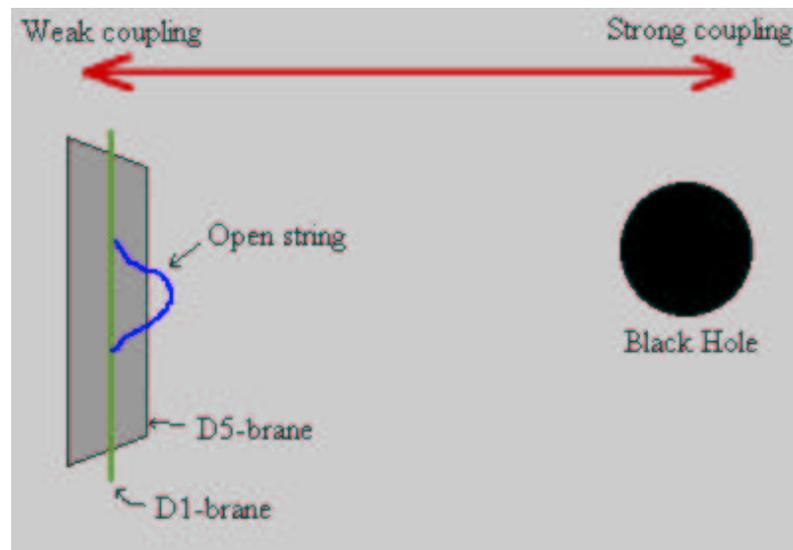


# Buracos negros



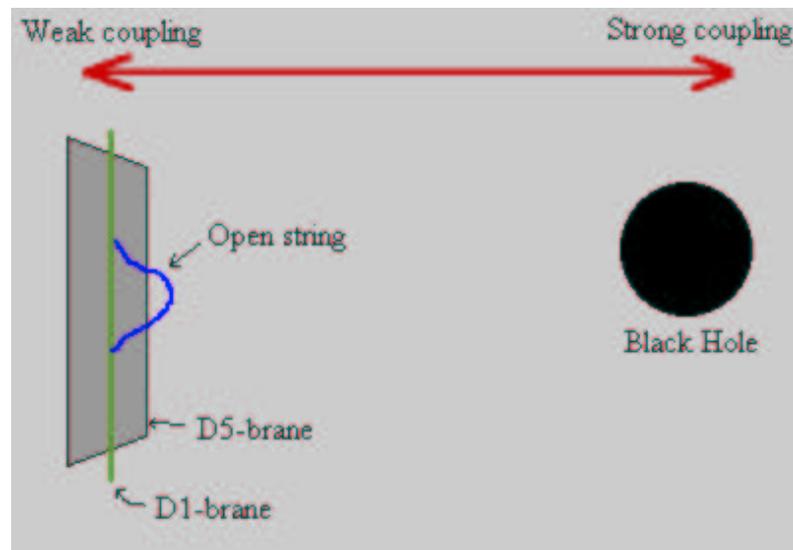
- Alguns **buracos negros** podem ser descritos como uma configuração de cordas e branas fracamente acoplados.

# Buracos negros



- Alguns **buracos negros** podem ser descritos como uma configuração de cordas e branas fracamente acoplados.
- A **entropia** assim calculada fornece o mesmo valor que a entropia de Bekenstein-Hawking.

# Buracos negros



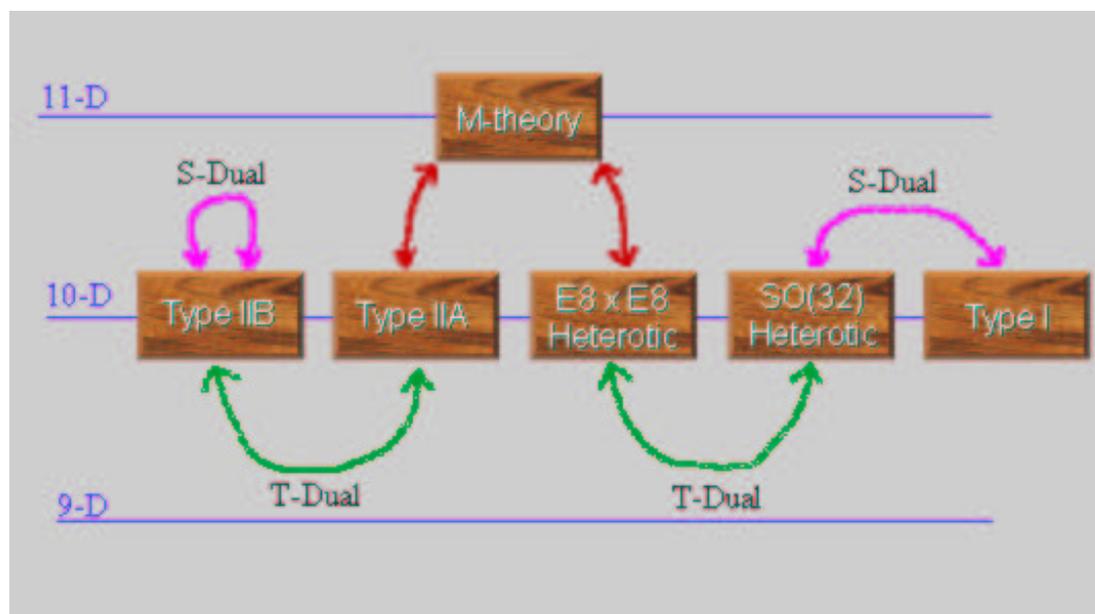
- Alguns **buracos negros** podem ser descritos como uma configuração de cordas e branas fracamente acoplados.
- A **entropia** assim calculada fornece o mesmo valor que a entropia de Bekenstein-Hawking.
- Mas não existe uma descrição análoga para o **big-bang!**

# Dualidade

---



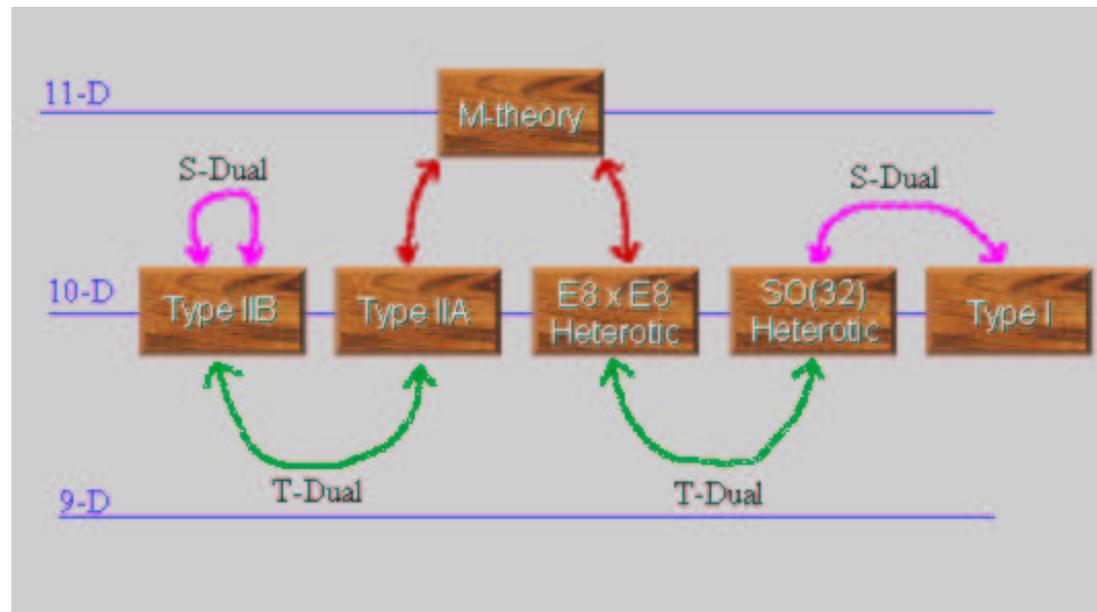
# Dualidade



● Dualidade na constante de acoplamento: **dualidade S**

● Dualidade na distância: **dualidade T**

# Dualidade



- Dualidade na constante de acoplamento: **dualidade S**
- Dualidade na distância: **dualidade T**
- Isso significa que ainda não se conhece os graus de liberdade fundamentais da teoria!!!

# Correspondência AdS/CFT

- A dualidade mais bem conhecida!
  - AdS: espaço de anti de Sitter
  - CFT: conformal field theory

# Correspondência AdS/CFT

- A dualidade mais bem conhecida!
  - AdS: espaço de anti de Sitter
  - CFT: conformal field theory
- A teoria de cordas num background de AdS em 5 dimensões é equivalente a uma teoria de gauge conforme no espaço de Minkowski em 4 dimensões.

# Correspondência AdS/CFT

- A dualidade mais bem conhecida!
  - AdS: espaço de anti de Sitter
  - CFT: conformal field theory
- A teoria de cordas num background de AdS em 5 dimensões é equivalente a uma teoria de gauge conforme no espaço de Minkowski em 4 dimensões.
- É uma dualidade que envolve a constante de acoplamento da teoria de gauge com a constante gravitacional.

# Correspondência AdS/CFT

- A dualidade mais bem conhecida!
  - AdS: espaço de anti de Sitter
  - CFT: conformal field theory
- A teoria de cordas num background de AdS em 5 dimensões é equivalente a uma teoria de gauge conforme no espaço de Minkowski em 4 dimensões.
- É uma dualidade que envolve a constante de acoplamento da teoria de gauge com a constante gravitacional.
- Fornece uma realização da antiga proposta de t'Hooft que uma teoria de gauge SU(N) com N muito grande seria descrita por uma teoria de cordas.

# Correspondência AdS/CFT

- A dualidade mais bem conhecida!
  - AdS: espaço de anti de Sitter
  - CFT: conformal field theory
- A teoria de cordas num background de AdS em 5 dimensões é equivalente a uma teoria de gauge conforme no espaço de Minkowski em 4 dimensões.
- É uma dualidade que envolve a constante de acoplamento da teoria de gauge com a constante gravitacional.
- Fornece uma realização da antiga proposta de t'Hooft que uma teoria de gauge SU(N) com N muito grande seria descrita por uma teoria de cordas.
- Isso é verdade se a teoria de cordas vive num espaço em 5 dimensões!

# Gravitação/teoria de gauge

- Generalização da correspondência AdS/CFT
- É possível construir uma teoria de gravitação (isto é, um background para a teoria de cordas) que seja dual a uma teoria de campos dada.

# Gravitação/teoria de gauge

- Generalização da correspondência AdS/CFT
- É possível construir uma teoria de gravitação (isto é, um background para a teoria de cordas) que seja dual a uma teoria de campos dada.
- Fenômenos **não perturbativos** da teoria de gauge podem ser descritos através de um sistema gravitacional **fracamente acoplado**.

# Gravitação/teoria de gauge

- Generalização da correspondência AdS/CFT
- É possível construir uma teoria de gravitação (isto é, um background para a teoria de cordas) que seja dual a uma teoria de campos dada.
- Fenômenos **não perturbativos** da teoria de gauge podem ser descritos através de um sistema gravitacional **fracamente acoplado**.
- Usualmente, **supersimetria** é necessária.

# Gravitação/teoria de gauge

- Generalização da correspondência AdS/CFT
- É possível construir uma teoria de gravitação (isto é, um background para a teoria de cordas) que seja dual a uma teoria de campos dada.
- Fenômenos **não perturbativos** da teoria de gauge podem ser descritos através de um sistema gravitacional **fracamente acoplado**.
- Usualmente, **supersimetria** é necessária.
- Confinamento, quebra de simetria quiral, glueballs, plasma de quarks e glúons, screening de monopolos, condensado de gauginos, função beta, efeitos de temperatura finita, etc.

# Gravitação/teoria de gauge

- Generalização da correspondência AdS/CFT
- É possível construir uma teoria de gravitação (isto é, um background para a teoria de cordas) que seja dual a uma teoria de campos dada.
- Fenômenos **não perturbativos** da teoria de gauge podem ser descritos através de um sistema gravitacional **fracamente acoplado**.
- Usualmente, **supersimetria** é necessária.
- Confinamento, quebra de simetria quiral, glueballs, plasma de quarks e glúons, screening de monopolos, condensado de gauginos, função beta, efeitos de temperatura finita, etc.
- Grande problema para extrair resultados na **QCD** é a presença da supersimetria.