

---

# A Teoria de Cordas e a Unificação das Forças da Natureza

Victor O. Rivelles

Instituto de Física

Universidade de São Paulo

rivelles@fma.if.usp.br

**40 Anos da Sociedade Brasileira de Física, 02-03/10/2006**

# Revista Brasileira de Física No. 1



## Electromagnetism and Gravitation

MARIO SCHÖNBERG\*

An introduction to the electromagnetic theory on a differentiable manifold devoid of any metric and affine structure is discussed. It is shown that the Maxwell equations in such a manifold involve a tensor describing the properties of the dielectricity and magnetic permeability of space because of the existence of such a general tensor. It is also shown that this tensor is essentially equivalent to the metric of the manifold in the manifold. Thus the necessity of having equations for the determination of the tensor in order to determine the electromagnetic field shows that the Maxwell equations are not a complete set of differential electromagnetic equations. The Einstein gravitational equation appears as complementing the Maxwell set of equations showing the determination of the dielectricity tensor. Thus a natural fusion of the electromagnetic and gravitational theories is obtained with an electromagnetic foundation for the geometry of the multi-manifold.

Discute-se uma formulação da teoria eletromagnética numa variedade diferenciável desprovida de conexão métrica e estrutura afim. Mostra-se que as equações de Maxwell em tal variedade envolvem um tensor que descreve as propriedades da dielectricidade e da permeabilidade magnética do espaço devido à existência de tal tensor geral. Mostra-se também que este tensor é essencialmente equivalente à métrica das linhas da variedade. Assim a necessidade de se ter equações para a determinação deste tensor, e isto de se determinar o campo eletromagnético, mostra que as equações de Maxwell não são um conjunto completo de equações diferenciais eletromagnéticas. A equação gravitacional de Einstein aparece complementando o conjunto das equações de Maxwell permitindo então a determinação de todos os tensores. Mostra-se assim uma fusão natural das teorias eletromagnética e gravitacional dando-se um fundamento eletromagnético à geometria da variedade em questão.

### 1. Introduction

In this paper we present the main results of one week on the formulation of the electromagnetic theory in a world taken only with a structure of differentiable manifold, without the *a priori* assumption of a Riemannian geometry or even of an affine connection. The first results were communicated at the Kyoto Conference<sup>1</sup> in 1965. Later developments were given in unpublished lectures at the 1966 München meeting of the Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência, at the Institut Henri Poincaré in Paris (1967) and at the 1969 and 1970 *Symposia de Física Teórica* of the Pontificia Universidade Católica of Rio de Janeiro.<sup>2</sup>

\*Present address: Rua 7, Povoação de São Paulo, 011, São Paulo, SP.

# Introdução

---

- A [teoria de cordas](#) é uma área de pesquisa em [física fundamental](#) .

# Introdução

---

- A **teoria de cordas** é uma área de pesquisa em **física fundamental** .
- Estamos procurando testar as teorias da física nos seus **limites mais extremos**, que são encontrados nos aceleradores de partículas elementares, nos buracos negros e no big bang.

# Introdução

---

- A **teoria de cordas** é uma área de pesquisa em **física fundamental** .
- Estamos procurando testar as teorias da física nos seus **limites mais extremos**, que são encontrados nos aceleradores de partículas elementares, nos buracos negros e no big bang.
- Procuramos descobrir os **constituintes** mais básicos da natureza, os átomos no sentido de Demócrito, e quais as **leis** que regem seu comportamento.

# Introdução

---

- A **teoria de cordas** é uma área de pesquisa em **física fundamental** .
- Estamos procurando testar as teorias da física nos seus **limites mais extremos**, que são encontrados nos aceleradores de partículas elementares, nos buracos negros e no big bang.
- Procuramos descobrir os **constituintes** mais básicos da natureza, os átomos no sentido de Demócrito, e quais as **leis** que regem seu comportamento.
- Hoje em dia reconhece-se que a **unificação** é um ingrediente essencial nessa busca.

# Introdução

---

- A **teoria de cordas** é uma área de pesquisa em **física fundamental** .
- Estamos procurando testar as teorias da física nos seus **limites mais extremos**, que são encontrados nos aceleradores de partículas elementares, nos buracos negros e no big bang.
- Procuramos descobrir os **constituintes** mais básicos da natureza, os átomos no sentido de Demócrito, e quais as **leis** que regem seu comportamento.
- Hoje em dia reconhece-se que a **unificação** é um ingrediente essencial nessa busca.
- No século XVII **Newton** unificou a mecânica terrestre com a mecânica celeste nas suas **leis do movimento**.

# Introdução

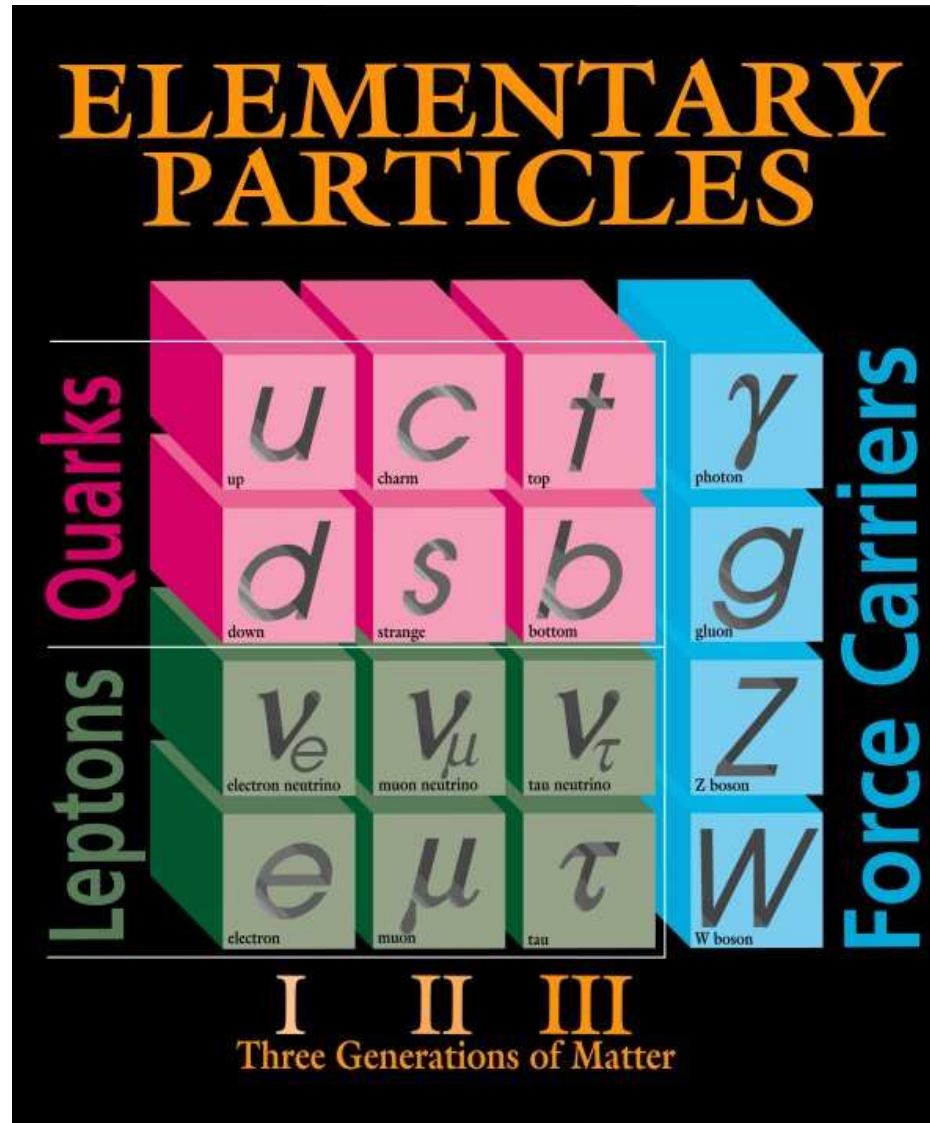
---

- A **teoria de cordas** é uma área de pesquisa em **física fundamental** .
- Estamos procurando testar as teorias da física nos seus **limites mais extremos**, que são encontrados nos aceleradores de partículas elementares, nos buracos negros e no big bang.
- Procuramos descobrir os **constituintes** mais básicos da natureza, os átomos no sentido de Demócrito, e quais as **leis** que regem seu comportamento.
- Hoje em dia reconhece-se que a **unificação** é um ingrediente essencial nessa busca.
- No século XVII **Newton** unificou a mecânica terrestre com a mecânica celeste nas suas **leis do movimento**.
- No século XIX **Maxwell** unificou a eletricidade, o magnetismo e a óptica no **eletromagnetismo**.



# Situação Atual

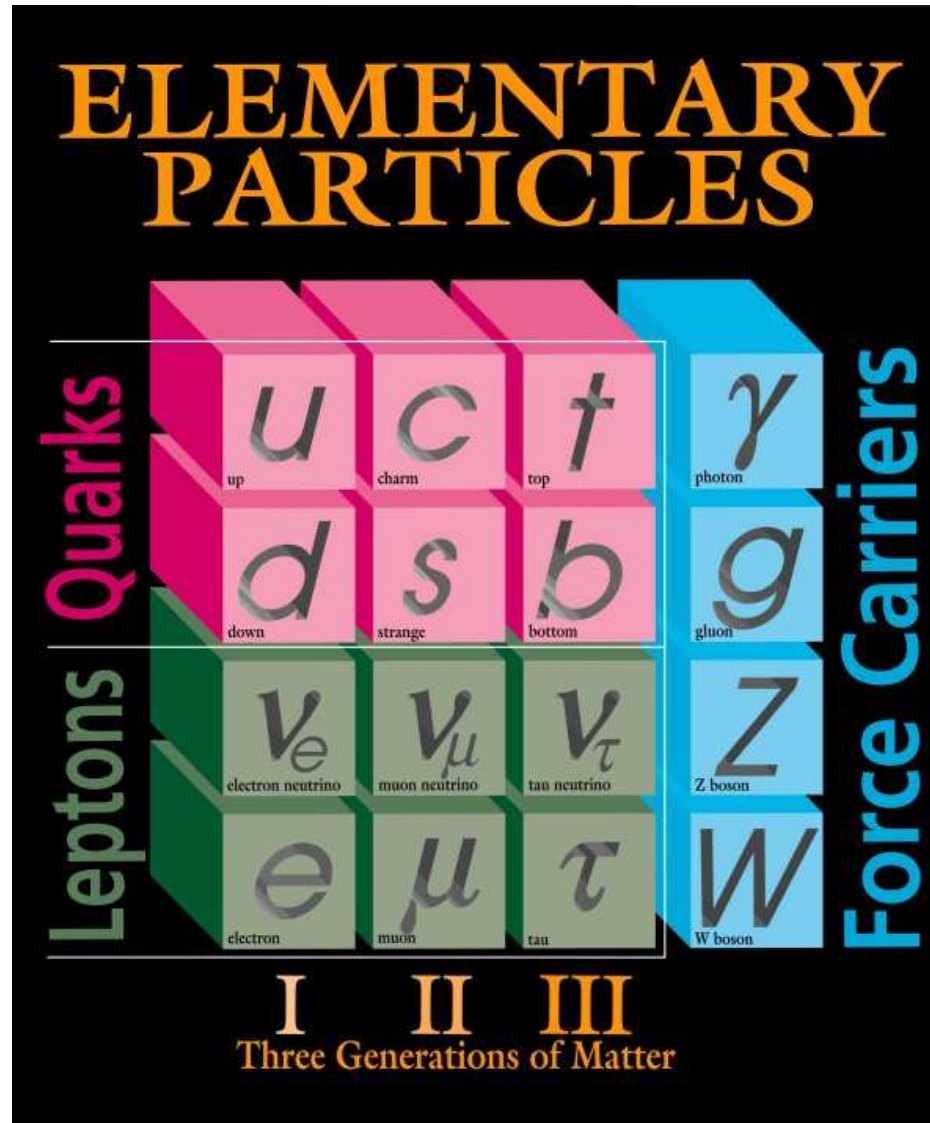
- As **partículas elementares** conhecidas.
- Teoria unificada das forças **eletromagnéticas e fracas**.
- Teoria para as forças **fortes**
- Juntas formam o **modelo padrão** das partículas elementares.



Fermilab 95-759

# Situação Atual

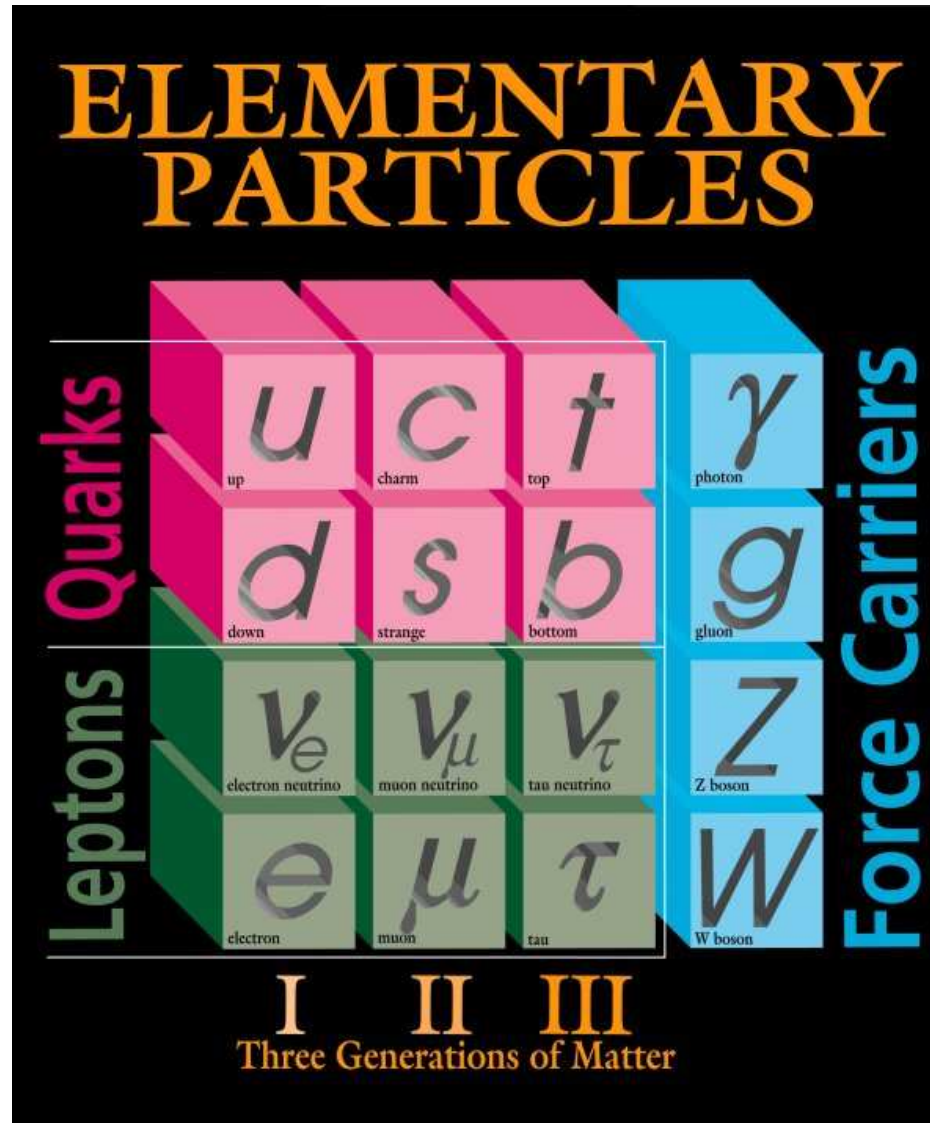
- As **partículas elementares** conhecidas.
- Teoria unificada das forças **eletromagnéticas e fracas**.
- Teoria para as forças **fortes**
- Juntas formam o **modelo padrão** das partículas elementares.
- Semelhança com a **tabela periódica dos elementos!!!**



Fermilab 95-759

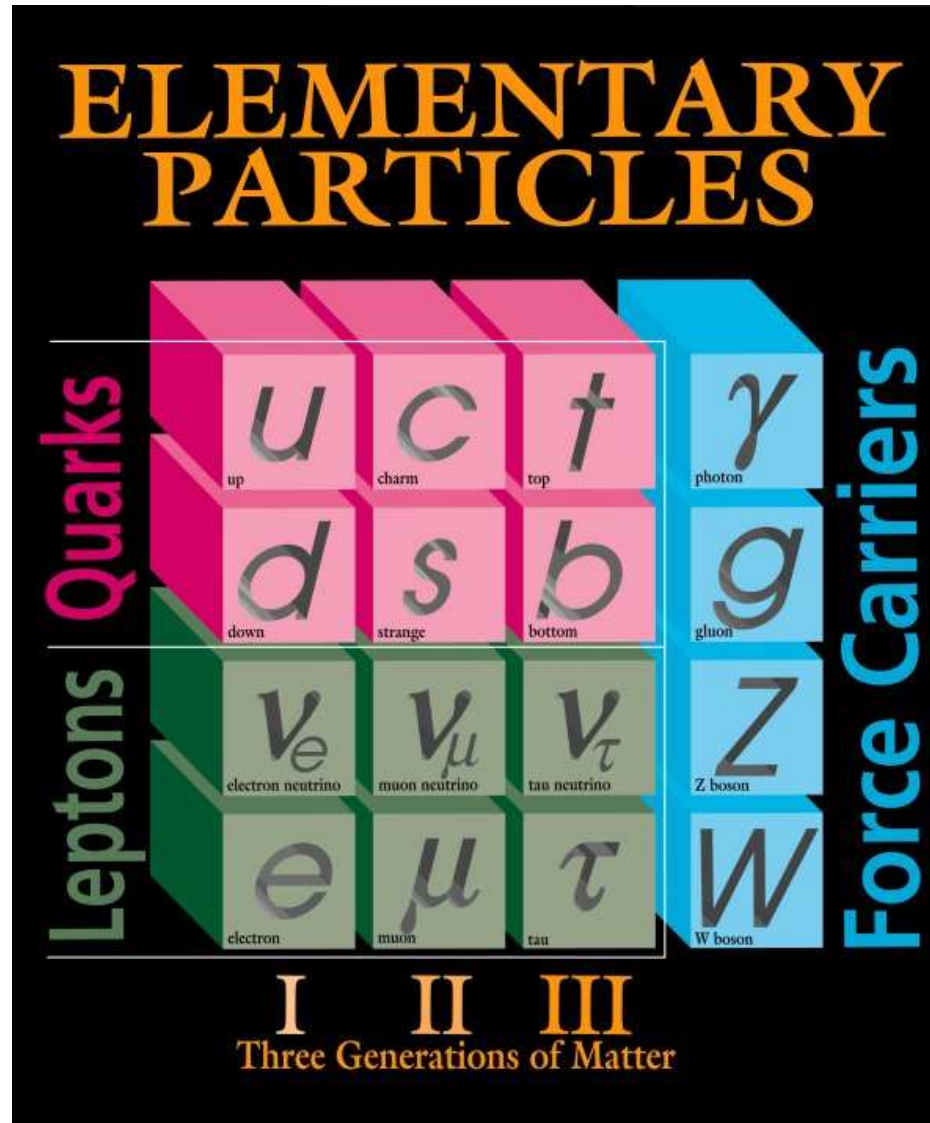
# Situação Atual

- As **partículas elementares** conhecidas.
- Teoria unificada das forças **eletromagnéticas e fracas**.
- Teoria para as forças **fortes**
- Juntas formam o **modelo padrão das partículas elementares**.
- Semelhança com a **tabela periódica dos elementos!!!**
- Unificação das 3 forças: teorias de grande unificação.
- Previsão: o próton é instável.



# Situação Atual

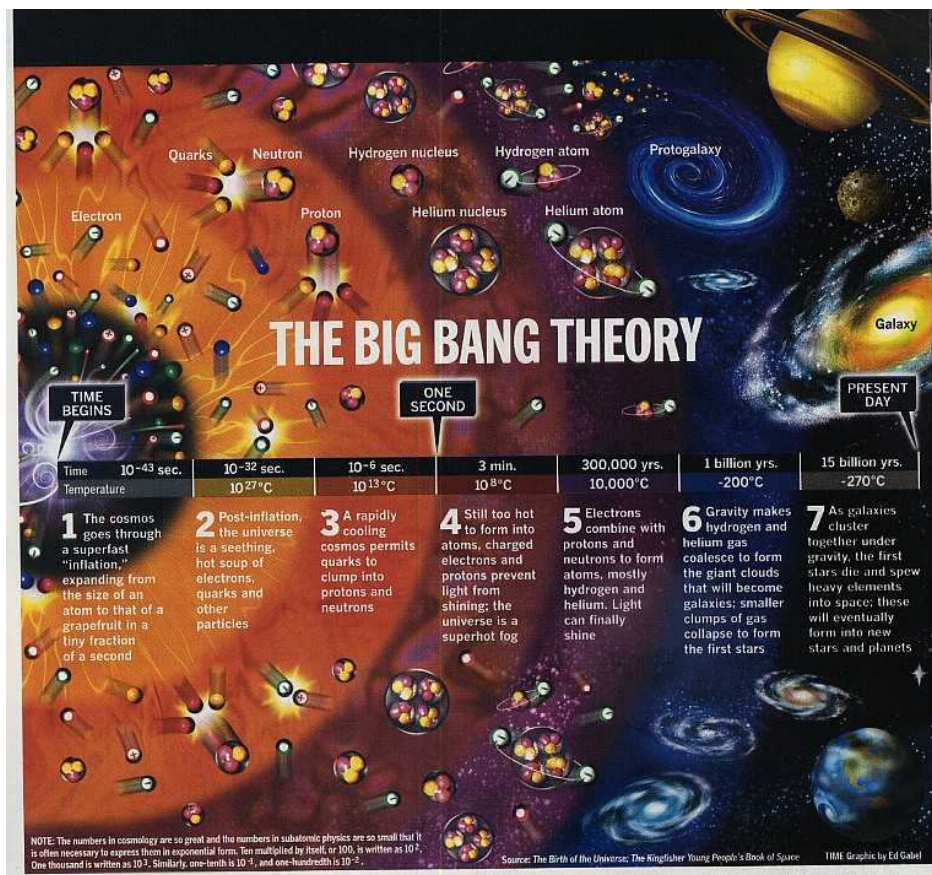
- As **partículas elementares** conhecidas.
- Teoria unificada das forças **eletromagnéticas e fracas**.
- Teoria para as forças **fortes**
- Juntas formam o **modelo padrão das partículas elementares**.
- Semelhança com a **tabela periódica dos elementos!!!**
- Unificação das 3 forças: teorias de grande unificação.
- Previsão: o próton é instável.
- Isto corresponde à **4% do conteúdo do universo!!!**



Fermilab 95-759

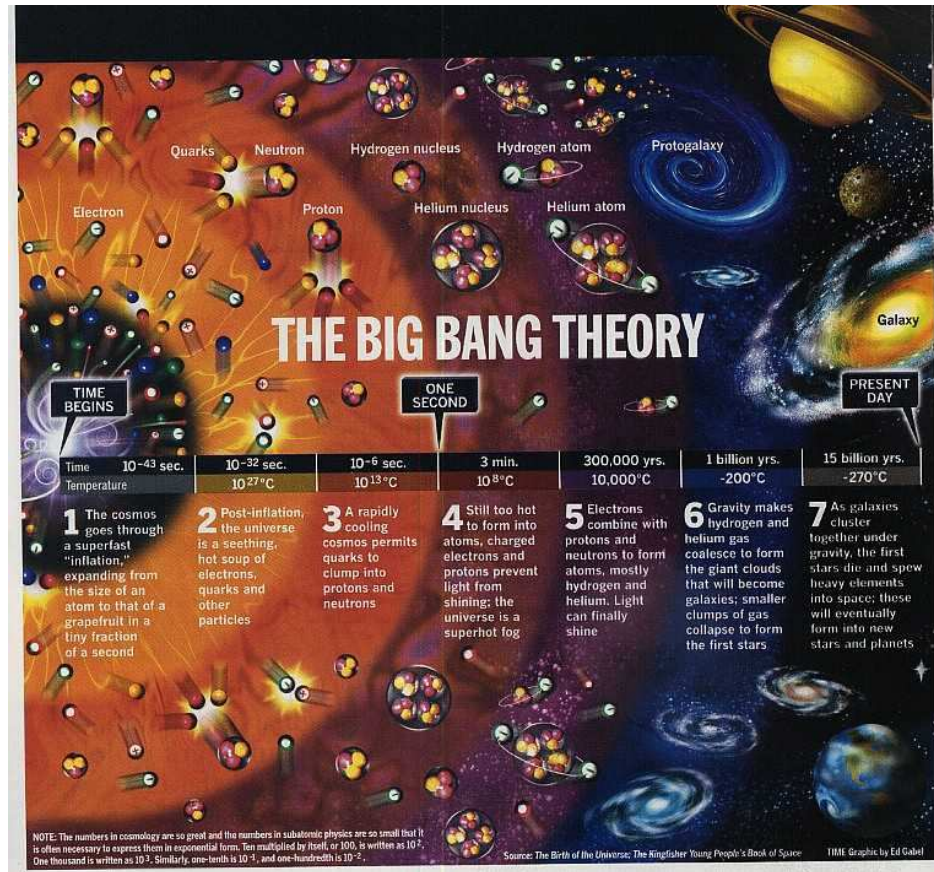
# Cosmologia

- O universo foi gerado num big bang.



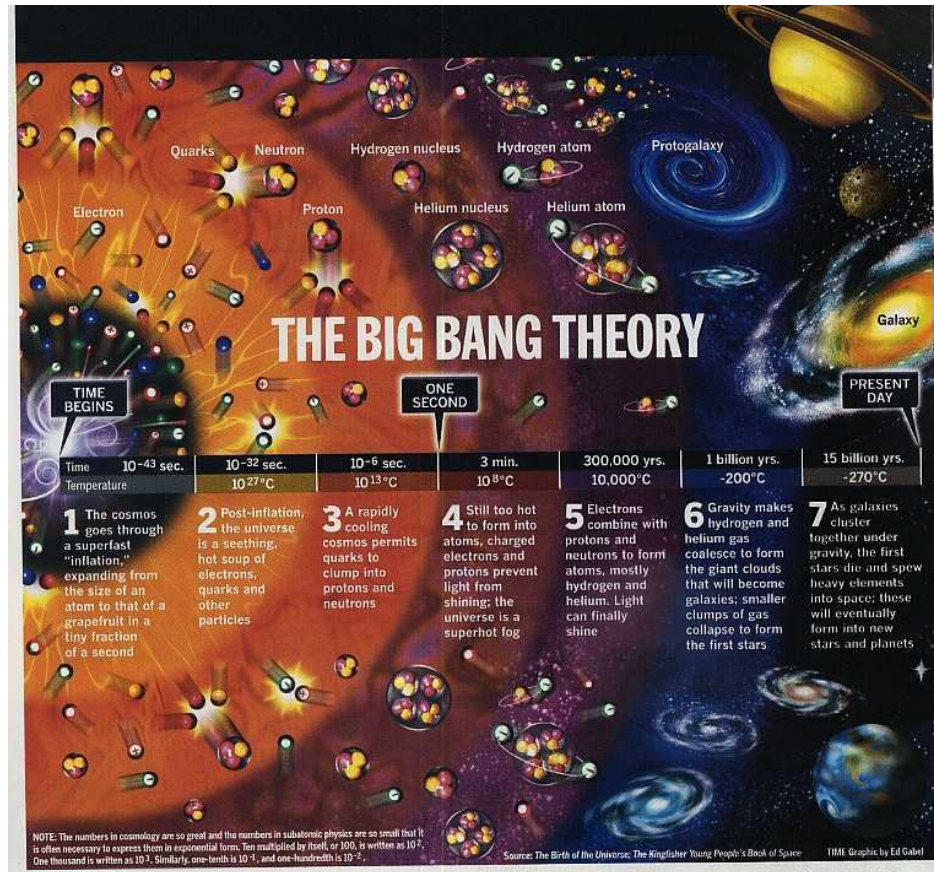
# Cosmologia

- O universo foi gerado num **big bang**.
- Não compreendemos o que aconteceu **NO** big bang, nem se houve algo **antes** do big bang.



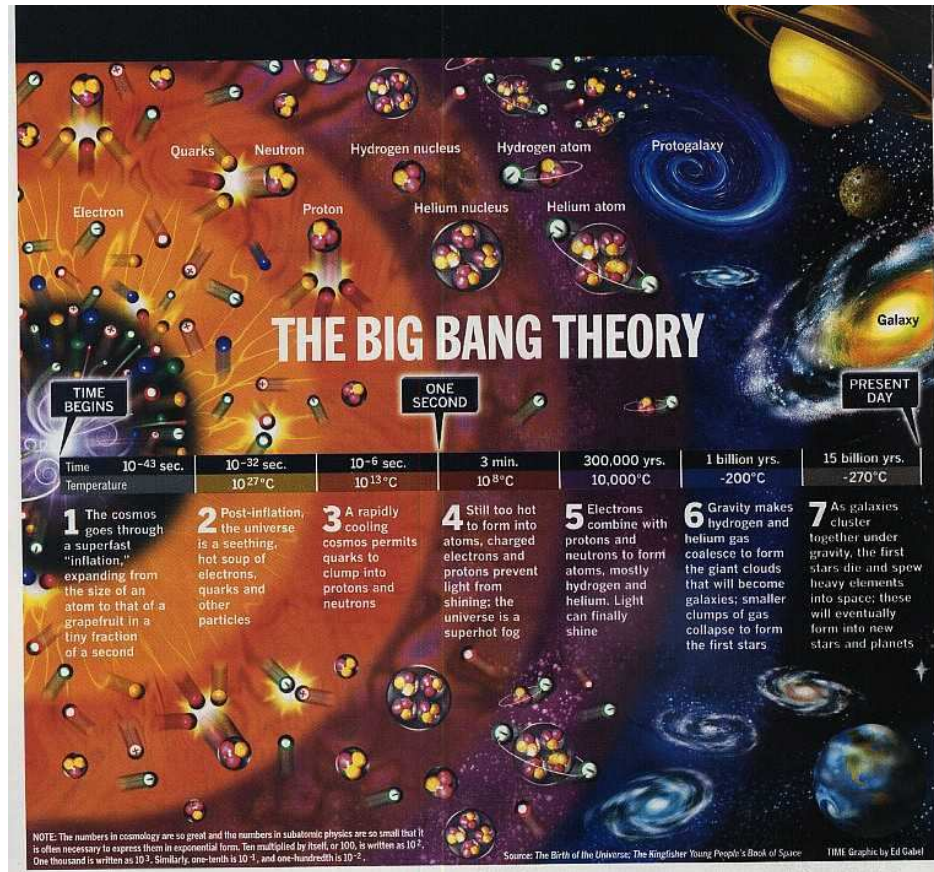
# Cosmologia

- O universo foi gerado num **big bang**.
- Não compreendemos o que aconteceu **NO** big bang, nem se houve algo **antes** do big bang.
- Não existe uma **teoria quântica para a gravitação**.
- Não é possível controlar as **flutuações quânticas** da relatividade geral. É uma teoria **não renormalizável**.



# Cosmologia

- O universo foi gerado num **big bang**.
- Não compreendemos o que aconteceu **NO** big bang, nem se houve algo **antes** do big bang.
- Não existe uma **teoria quântica para a gravitação**.
- Não é possível controlar as **flutuações quânticas** da relatividade geral. É uma teoria **não renormalizável**.
- A gravitação (relatividade geral) **NÃO** está incluída no modelo padrão das partículas elementares!!!

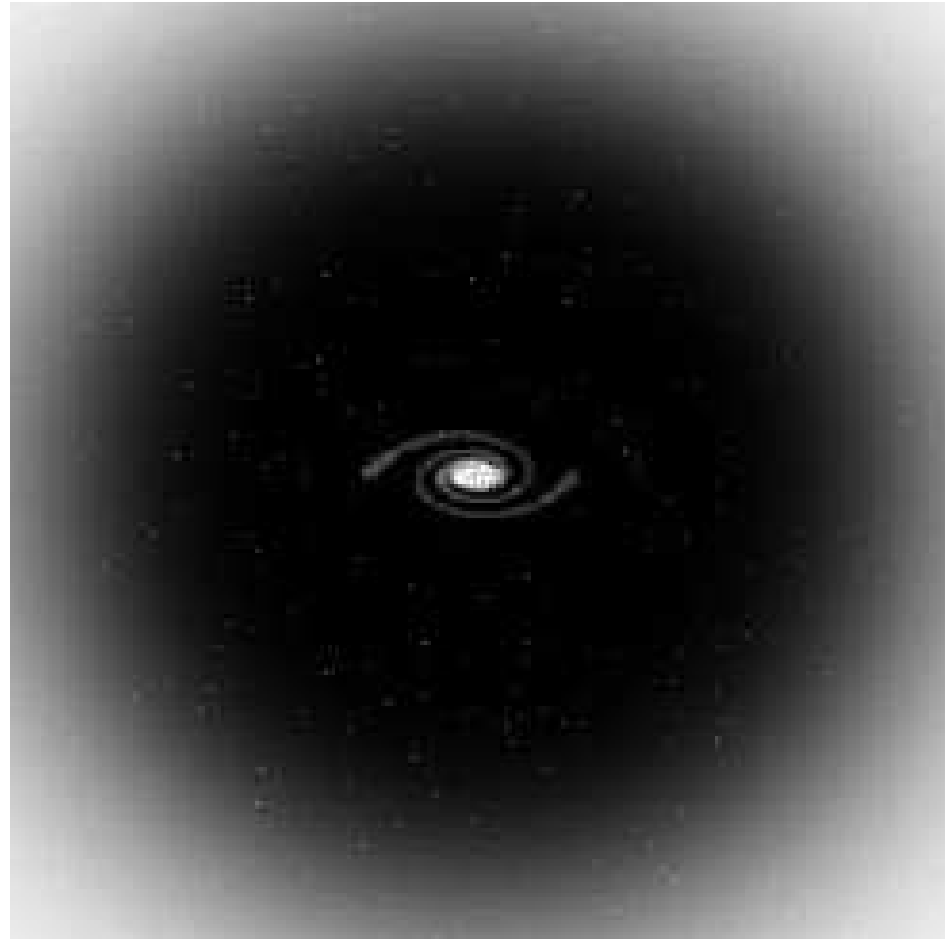




# Matéria Escura

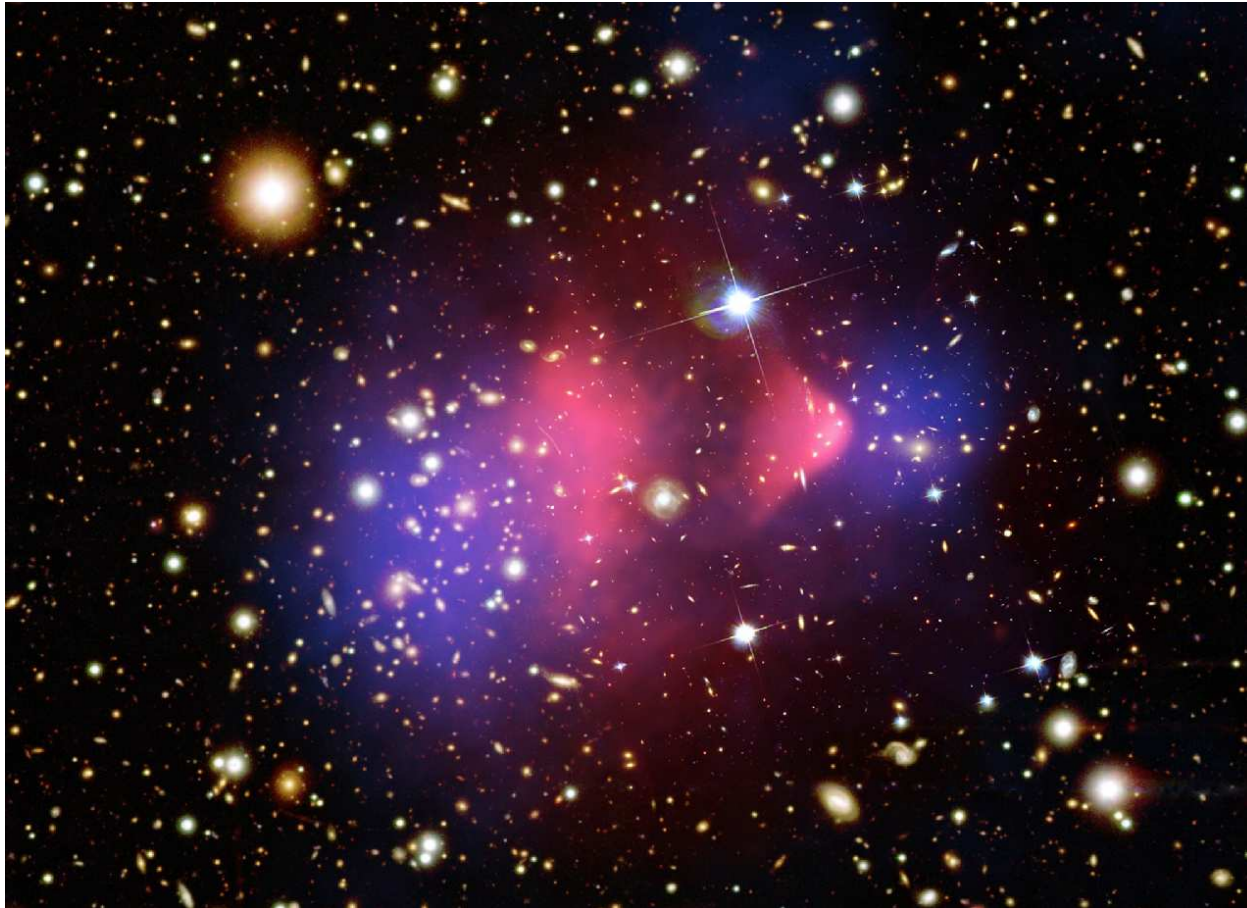
---

- **Matéria escura** não emite e nem reflete a luz.
- É detectada só através de **efeitos gravitacionais**.
- As galáxias parecem ter muito mais massa do que aquela que emite luz.
- A matéria escura constituiu **22%** do conteúdo do universo!!!



# Bullet Cluster

---



# Energia Escura

---

- **Matéria comum:** 4 %
- **Matéria escura:** 22 %
- **Energia escura:** 74 %

# Energia Escura

---

- **Matéria comum:** 4 %
- **Matéria escura:** 22 %
- **Energia escura:** 74 %
- Forma de energia com pressão negativa que faz o universo **expandir aceleradamente**.

# Energia Escura

---

- **Matéria comum:** 4 %
- **Matéria escura:** 22 %
- **Energia escura:** 74 %
- Forma de energia com pressão negativa que faz o universo **expandir aceleradamente**.
- Detectado na expansão de **super-novas distantes**.

# Energia Escura

---

- **Matéria comum:** 4 %
- **Matéria escura:** 22 %
- **Energia escura:** 74 %
- Forma de energia com pressão negativa que faz o universo **expandir aceleradamente**.
- Detectado na expansão de **super-novas distantes**.
- Pode ser causado por uma **constante cosmológica** na relatividade geral. Valor experimental  $10^{-120} m_P^4$ ,  $m_P$  é a massa de Planck.

# Energia Escura

---

- **Matéria comum:** 4 %
- **Matéria escura:** 22 %
- **Energia escura:** 74 %
- Forma de energia com pressão negativa que faz o universo **expandir aceleradamente**.
- Detectado na expansão de **super-novas distantes**.
- Pode ser causado por uma **constante cosmológica** na relatividade geral. Valor experimental  $10^{-120} m_P^4$ ,  $m_P$  é a massa de Planck.
- Por outro lado, na teoria quântica de campos, o valor esperado para a constante cosmológica, é de  $1 m_P^4$ . Discrepância por um fator de  $10^{120}$  !!! **Problema da constante cosmológica**.

# Teoria de cordas

---

- Proposta mais conservadora: **teoria de cordas**.



# Teoria de cordas

---

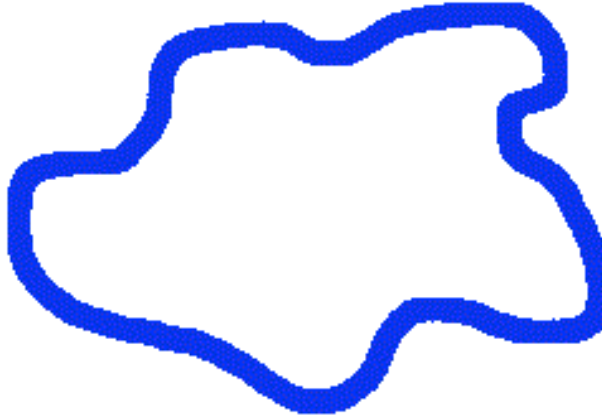
- Proposta mais conservadora: **teoria de cordas**.
- Assume que a **mecânica quântica** e **relatividade restrita** são válidos.

# Teoria de cordas

---

- Proposta mais conservadora: **teoria de cordas**.
- Assume que a **mecânica quântica** e **relatividade restrita** são válidos.

Assume que os **objetos fundamentais** são **estendidos** ao invés de pontuais: cordas

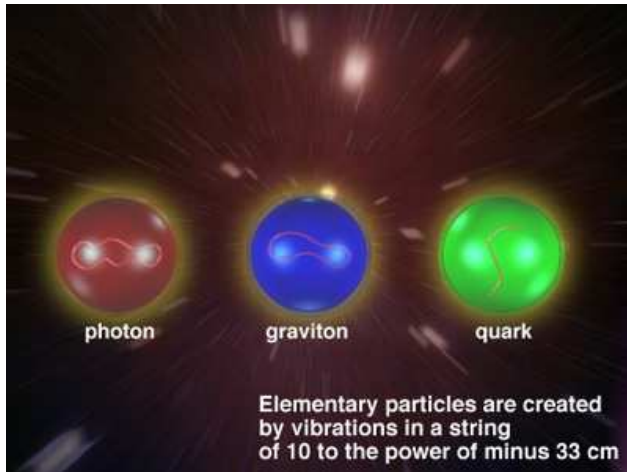
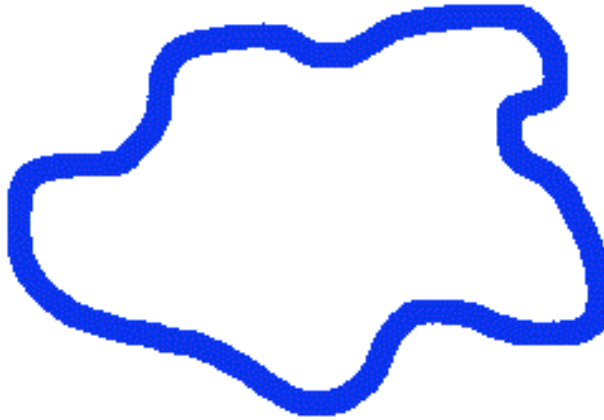


# Teoria de cordas

---

- Proposta mais conservadora: **teoria de cordas**.
- Assume que a **mecânica quântica** e **relatividade restrita** são válidos.

Assume que os **objetos fundamentais** são **estendidos** ao invés de pontuais: cordas

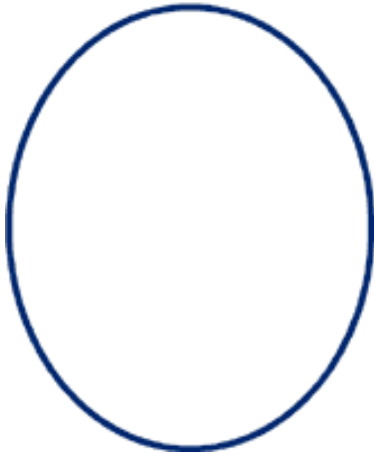


As **partículas elementares** correspondem aos modos de vibração quantizados de uma corda relativística.

# Teoria de cordas

---

closed string



open string

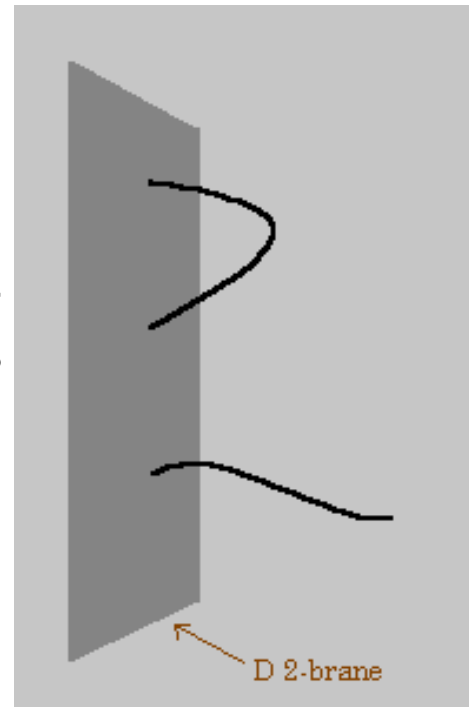


- Cordas **abertas** dão origem aos **bósons de gauge**.
- Cordas **fechadas** dão origem a **gravitação**.

# Teoria de cordas

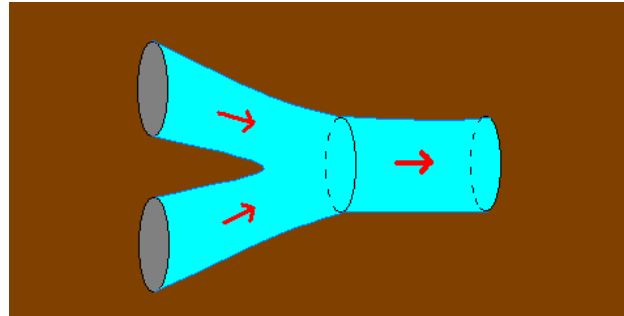
---

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

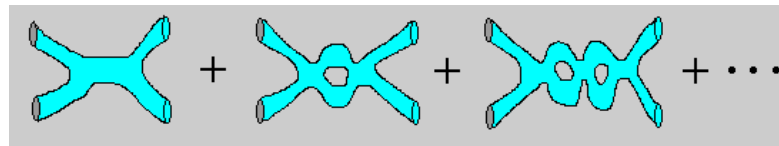


# Teoria de Cordas

---



As cordas podem interagir entre si.



Pode-se fazer uma expansão perturbativa

# Consequências

---

- Obtém-se uma teoria da gravitação quântica!

# Consequências

---

- Obtém-se uma teoria da gravitação quântica!
- Explica a entropia de certas classes de buracos negros.



# Consequências

---

- Obtém-se uma teoria da gravitação quântica!
- Explica a entropia de certas classes de buracos negros.
- Obtém-se uma teoria que estende o modelo padrão das partículas elementares !

# Consequências

---

- Obtém-se uma teoria da gravitação quântica!
- Explica a entropia de certas classes de buracos negros.
- Obtém-se uma teoria que estende o modelo padrão das partículas elementares !
- Consistência requer a existência de novas simetrias: **supersimetria**. Pode ser detectada no LHC em 2008

# Consequências

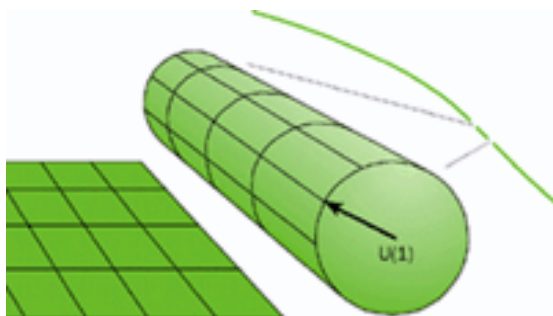
---

- Obtém-se uma teoria da gravitação quântica!
- Explica a entropia de certas classes de buracos negros.
- Obtém-se uma teoria que **estende o modelo padrão das partículas elementares !**
- Consistência requer a existência de **novas simetrias: supersimetria**. Pode ser detectada no LHC em 2008
- Consistência requer a existência de **dimensões extras**.

# Consequências

---

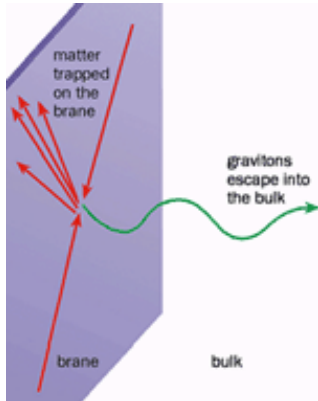
- Obtém-se uma teoria da gravitação quântica!
- Explica a entropia de certas classes de buracos negros.
- Obtém-se uma teoria que **estende o modelo padrão das partículas elementares !**
- Consistência requer a existência de **novas simetrias: supersimetria**. Pode ser detectada no LHC em 2008
- Consistência requer a existência de **dimensões extras**.



- A **dimensionalidade do espaço-tempo** passou a ser algo que deve ser **determinado experimentalmente!**
- Experiências com balança de torção.
- LHC poderia detectar em 2008.

# Branas

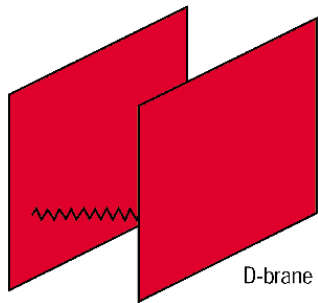
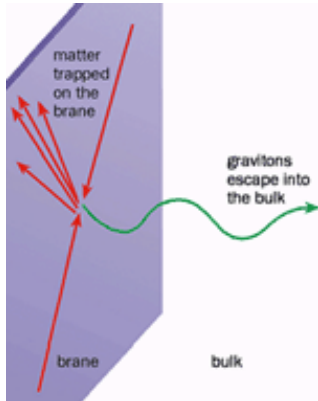
---



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

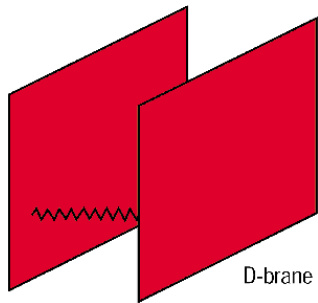
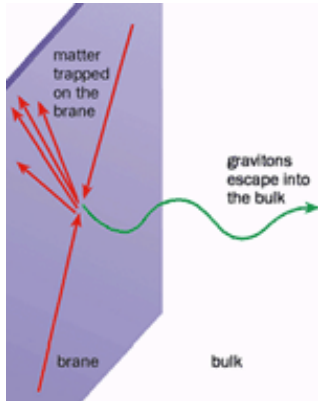
# Branas

---



- 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

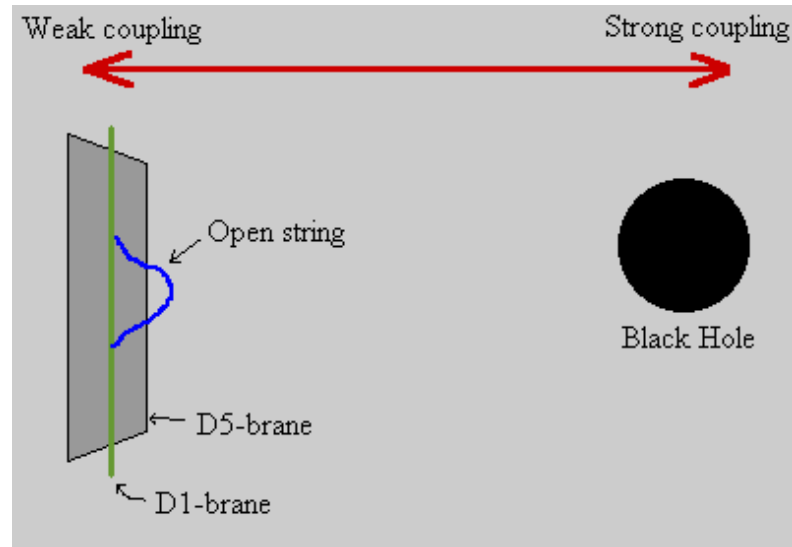


- Nosso universo pode ser uma **brana imersa em 10 dimensões**.
- Dimensões extras grandes: gravitação propaga-se em todas as dimensões.
- Duas branas, numa a gravitação é forte e noutra é fraca.
- **Grávitons poderiam ser produzidos no LHC.**

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

# Buracos negros

---

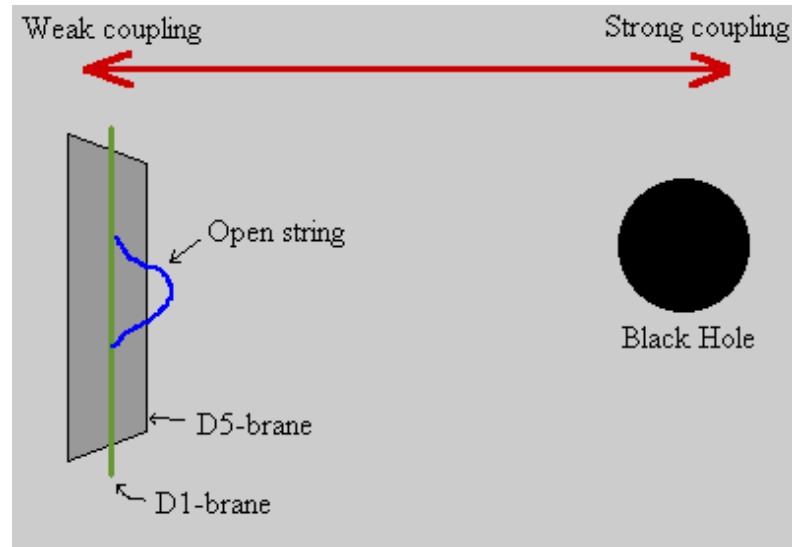


- Alguns buracos negros podem ser descritos como uma configuração de cordas e branas fracamente acoplados.



# Buracos negros

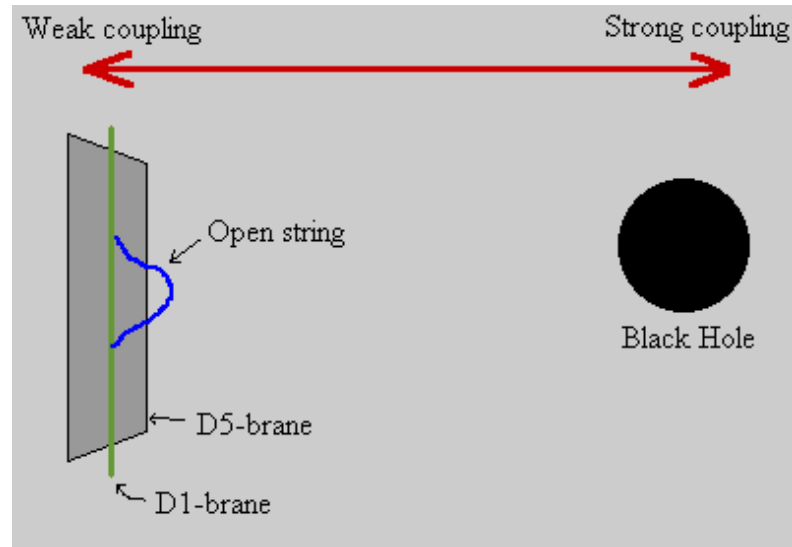
---



- 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

---

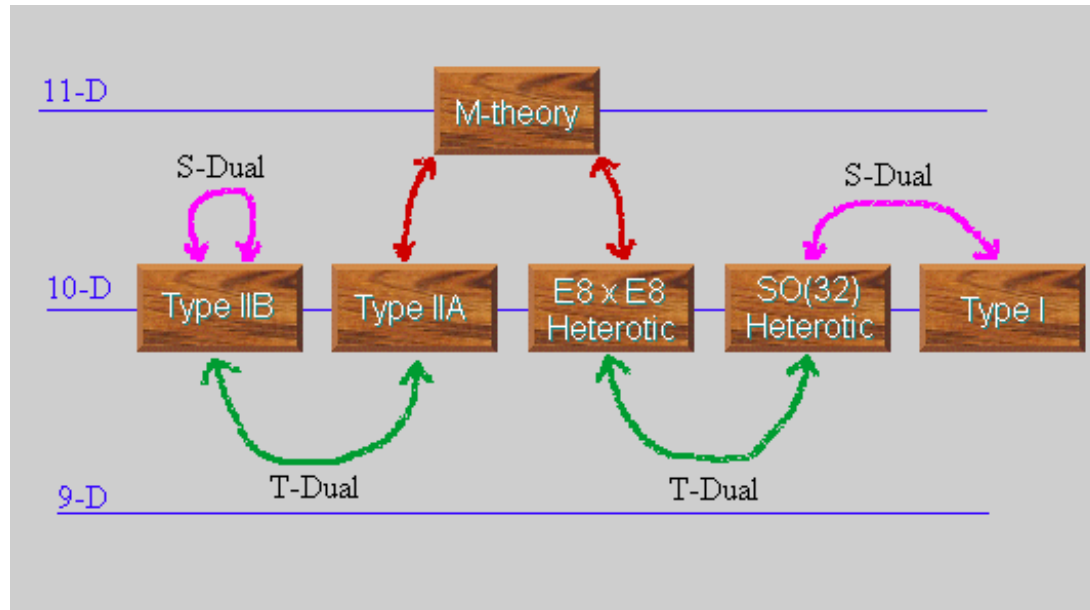


- Alguns **buracos negros** podem ser descritos como uma configuração de cordas e branas fracamente acoplados.
- A **entropia** assim calculada fornece o mesmo valor que a entropia de Bekenstein-Hawking.
- Mas não existe uma descrição análoga para o **big-bang!**

# Dualidade

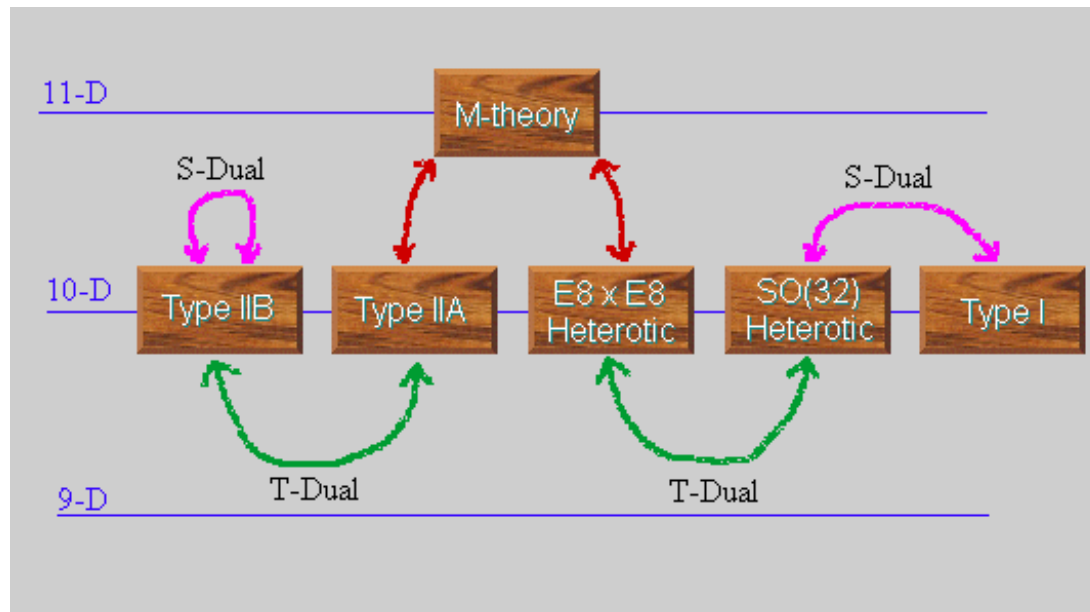
---

# 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.