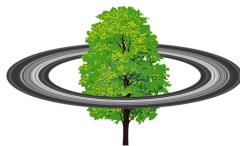


Teoria de Cordas: uma teoria de tudo?

Thaís Carneiro da Cunha Guio

*Parque Botânico da Vale
Vitória – 5 de Maio, 2019*



Universo no Parque



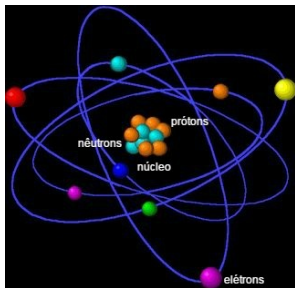
Os pilares da Física Contemporânea

- **Mecânica Quântica (desde 1900)**
 - Escala microscópica da matéria: átomos e partículas subatômicas.

Os pilares da Física Contemporânea

- **Mecânica Quântica (desde 1900)**

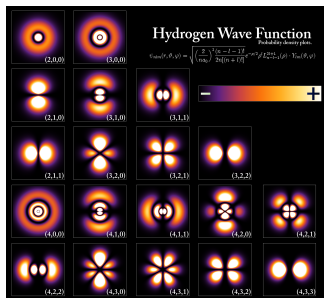
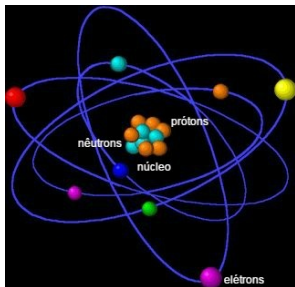
- Escala microscópica da matéria: átomos e partículas subatômicas.



Os pilares da Física Contemporânea

- **Mecânica Quântica (desde 1900)**

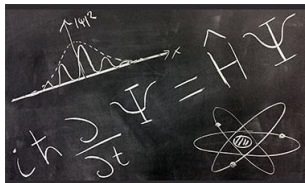
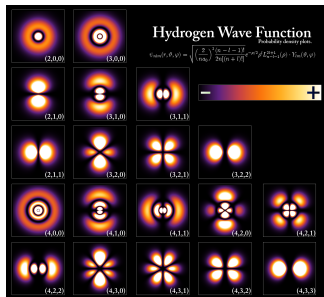
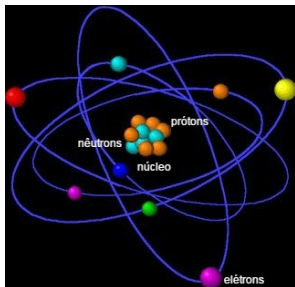
- Escala microscópica da matéria: átomos e partículas subatômicas.



Os pilares da Física Contemporânea

- **Mecânica Quântica (desde 1900)**

- Escala microscópica da matéria: átomos e partículas subatômicas.



- **Aplicações:** Ressonância Magnética, LED, fibra ótica, diversos componentes eletrônicos, *etc.*

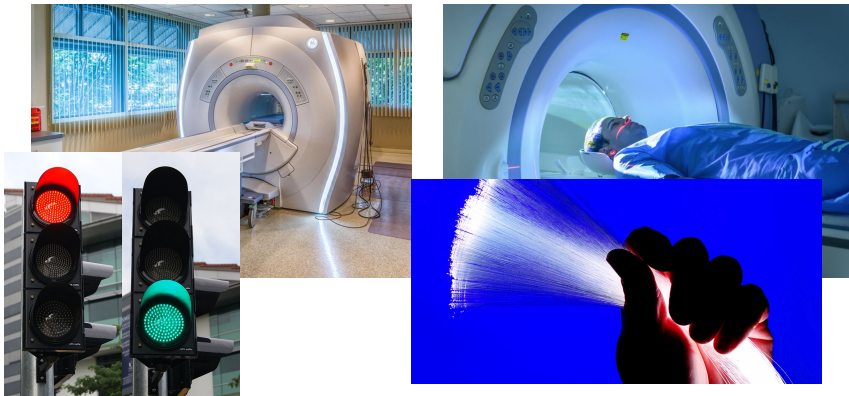
- **Aplicações:** Ressonância Magnética, LED, fibra ótica, diversos componentes eletrônicos, *etc.*



- **Aplicações:** Ressonância Magnética, LED, fibra ótica, diversos componentes eletrônicos, *etc.*



- **Aplicações:** Ressonância Magnética, LED, fibra ótica, diversos componentes eletrônicos, *etc.*



- **Aplicações:** Ressonância Magnética, LED, fibra ótica, diversos componentes eletrônicos, *etc.*

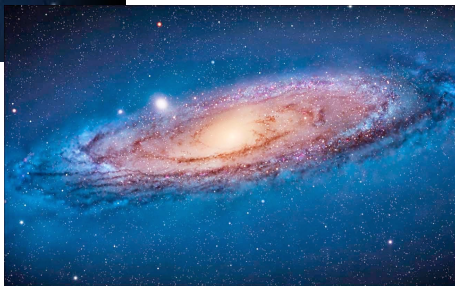


- Relatividade Geral de Einstein (desde 1915)

- Escala macroscópica da matéria: planetas, galáxias, *etc.*

● Relatividade Geral de Einstein (desde 1915)

- Escala macroscópica da matéria: planetas, galáxias, *etc.*



- Toda matéria está sujeita à interação gravitacional.

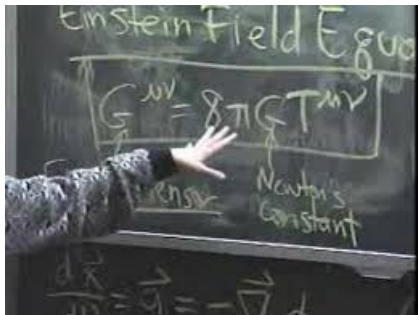
- Toda matéria está sujeita à interação gravitacional.
- A interação gravitacional é relacionada à geometria do espaço-tempo.

- Toda matéria está sujeita à interação gravitacional.
- A interação gravitacional é relacionada à geometria do espaço-tempo.

*A matéria curva o espaço-tempo e
o espaço-tempo diz à matéria como se mover.*

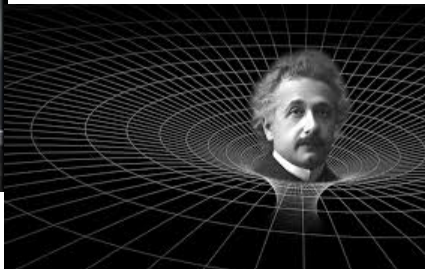
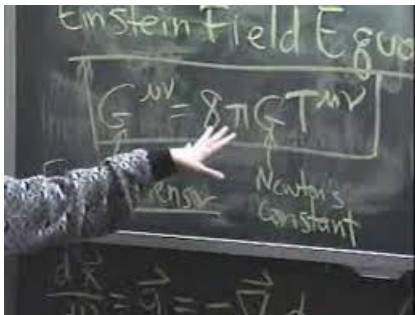
- Toda matéria está sujeita à interação gravitacional.
- A interação gravitacional é relacionada à geometria do espaço-tempo.

*A matéria curva o espaço-tempo e
o espaço-tempo diz à matéria como se mover.*



- Toda matéria está sujeita à interação gravitacional.
- A interação gravitacional é relacionada à geometria do espaço-tempo.

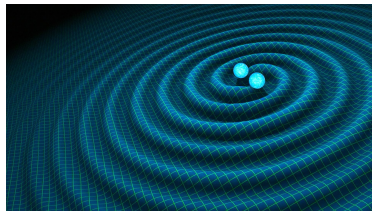
*A matéria curva o espaço-tempo e
o espaço-tempo diz à matéria como se mover.*







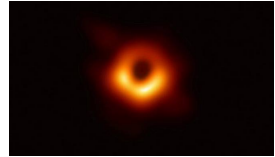
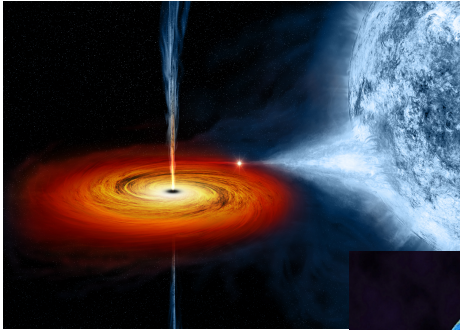
2015: Ondas gravitacionais!



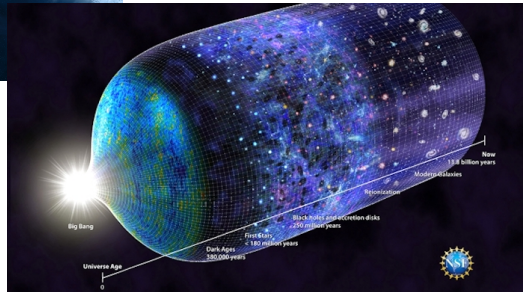
- Aplicações: GPS, telecomunicações, *etc.*



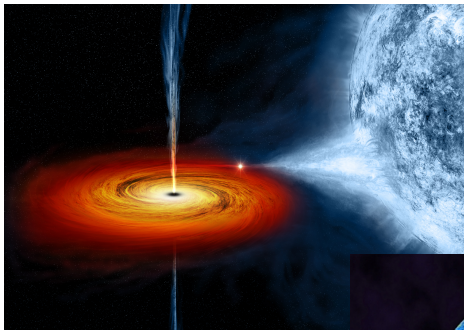
- **Limitações:** interior de buracos negros, Universo primordial, *etc.*



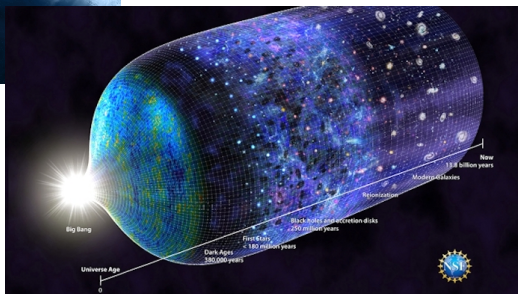
2019: Primeira imagem!



- **Limitações:** interior de buracos negros, Universo primordial, *etc.*



2019: Primeira imagem!



- Gravitação em escala subatômica: **Gravitação Quântica?**

O Modelo Padrão da Física de Partículas

- Descrição quântica bem sucedida das interações

eletromagnética, fraca e forte

O Modelo Padrão da Física de Partículas

- Descrição quântica bem sucedida das interações

eletromagnética, fraca e forte

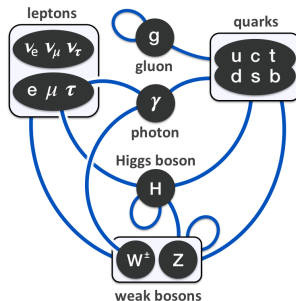
massa →	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 126 \text{ GeV}/c^2$
carga →	$2/3$	$2/3$	$2/3$	0	0
spin →	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	0
	u up	c charm	t top	g glúon	H bóson de Higgs
	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
	$-1/3$	$-1/3$	$-1/3$	0	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
QUARKS	d down	s strange	b bottom	γ fóton	
	$0.511 \text{ MeV}/c^2$	$105.7 \text{ MeV}/c^2$	$1.777 \text{ GeV}/c^2$	$91.2 \text{ GeV}/c^2$	
	-1	-1	-1	0	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
	e elétron	μ múon	τ tau	Z bóson Z	
LÉPTONS	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$	$80.4 \text{ GeV}/c^2$	
	0	0	0	± 1	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
	ν_e neutrino do elétron	ν_μ neutrino do múon	ν_τ neutrino do tau	W bóson W	
					BÓSONS DE CALIBRE

O Modelo Padrão da Física de Partículas

- Descrição quântica bem sucedida das interações

eletromagnética, fraca e forte

massa →	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 126 \text{ GeV}/c^2$
carga →	2/3	2/3	2/3	0	0
spin →	1/2	1/2	1/2	1	0
	u up	c charm	t top	g glúon	H bóson de Higgs
	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
	-1/3	-1/3	-1/3	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
QUARKS	d down	s strange	b bottom	γ fóton	
	0.511 MeV/c ²	105.7 MeV/c ²	1.777 GeV/c ²	91.2 GeV/c ²	
	-1	-1	-1	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	e elétron	μ múon	τ tau	Z bóson Z	
LÉPTONS	$<2.2 \text{ eV}/c^2$	$<0.17 \text{ MeV}/c^2$	$<15.5 \text{ MeV}/c^2$	80.4 GeV/c ²	
	0	0	0	±1	
	1/2	1/2	1/2	1	
	ν_e neutrino do elétron	ν_μ neutrino do múon	ν_τ neutrino do tau	W bóson W	
					BÓSONS DE CALIBRE



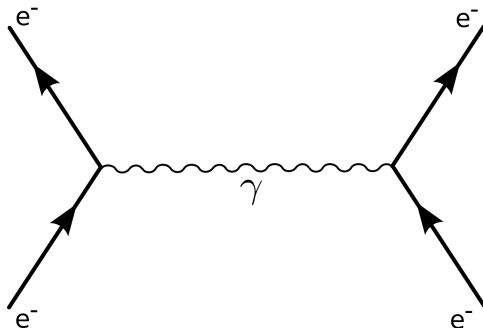
- **Interação eletromagnética**

Ação entre partículas carregadas eletricamente.

- **Interação eletromagnética**

Ação entre partículas carregadas eletricamente.

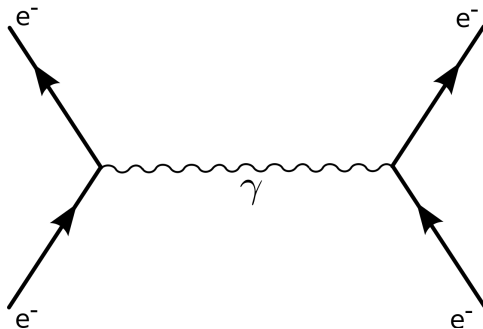
Exemplo:



• Interação eletromagnética

Ação entre partículas carregadas eletricamente.

Exemplo:



Mediador da interação: fóton.

- Interação eletromagnética

- Interação eletromagnética

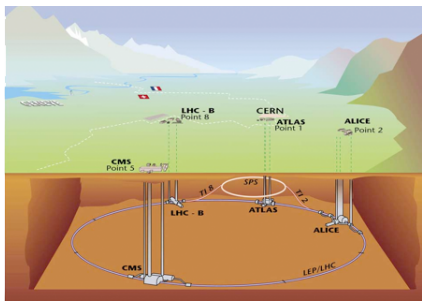


- Interação eletromagnética

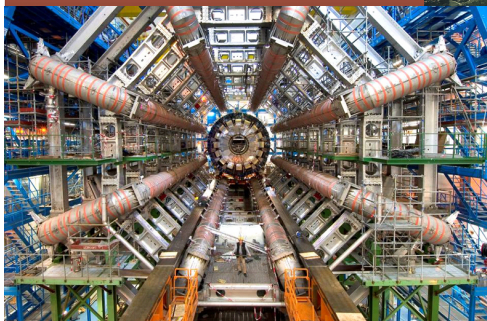
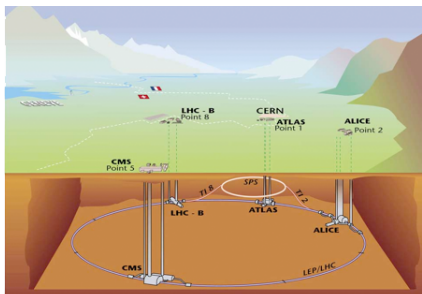


- **2012:** Descoberta do bóson de Higgs no Grande Colisor de Hádrons.

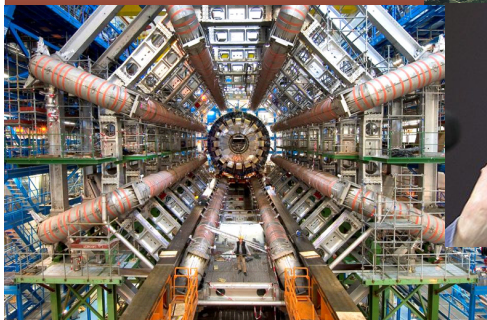
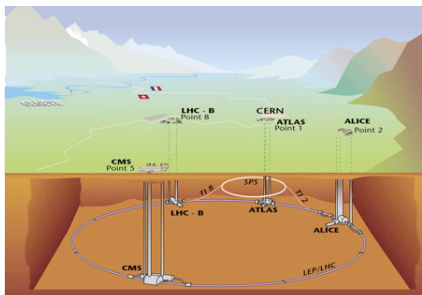
- **2012:** Descoberta do bóson de Higgs no Grande Colisor de Hádrons.



- **2012:** Descoberta do bóson de Higgs no Grande Colisor de Hádrons.



- **2012:** Descoberta do bóson de Higgs no Grande Colisor de Hádrons.



Problemas em aberto:

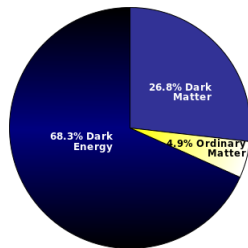
número de famílias,

massa →	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 126 \text{ GeV}/c^2$
carga →	$2/3$	$2/3$	$2/3$	0	0
spin →	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	0
	u up	c charm	t top	g glúon	H bóson de Higgs
QUARKS	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
	$-1/3$	$-1/3$	$-1/3$	0	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
	d down	s strange	b bottom	γ fóton	
	$0.511 \text{ MeV}/c^2$	$105.7 \text{ MeV}/c^2$	$1.777 \text{ GeV}/c^2$	$91.2 \text{ GeV}/c^2$	
	-1	-1	-1	0	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
	e elétron	μ múon	τ tau	Z bóson Z	
LÉPTONS	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$	$80.4 \text{ GeV}/c^2$	
	0	0	0	± 1	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
	ν_e neutrino do elétron	ν_μ neutrino do múon	ν_τ neutrino do tau	W bóson W	
					BÓSONS DE CALIBRE

Problemas em aberto:

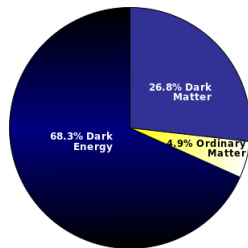
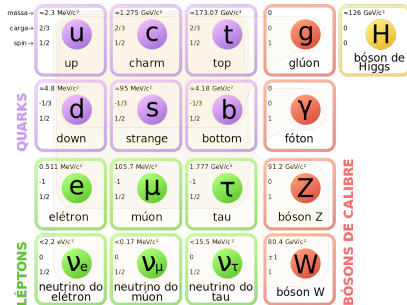
número de famílias,
matéria escura,
energia escura,

massa →	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 126 \text{ GeV}/c^2$
carga →	$2/3$	$2/3$	$2/3$	0	0
spin →	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	0
	u up	c charm	t top	g glúon	H bóson de Higgs
QUARKS	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
	$-1/3$	$-1/3$	$-1/3$	0	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
	d down	s strange	b bottom	γ fóton	
	$0.511 \text{ MeV}/c^2$	$105.7 \text{ MeV}/c^2$	$1.777 \text{ GeV}/c^2$	$91.2 \text{ GeV}/c^2$	
	-1	-1	-1	0	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
	e elétron	μ múon	τ tau	Z bóson Z	
LÉPTONS	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$	$80.4 \text{ GeV}/c^2$	
	0	0	0	± 1	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
	ν_e neutrino do elétron	ν_μ neutrino do múon	ν_τ neutrino do tau	W bóson W	
					BÓSONS DE CALIBRE



Problemas em aberto:

número de famílias,
matéria escura,
energia escura,
não inclui a interação gravitacional em descrição quântica (gráviton),
...



Teoria de Cordas

- **Sabemos que:** precisamos de uma teoria da gravitação quântica!

Teoria de Cordas

- **Sabemos que:** precisamos de uma teoria da gravitação quântica!
- **Até agora:** partículas são pontuais.

Teoria de Cordas

- **Sabemos que:** precisamos de uma teoria da gravitação quântica!
- **Até agora:** partículas são pontuais.

Ideia da Teoria de Cordas

Partículas são vibrações quânticas de pequenas **cordas**.









- Modos de vibração da corda $\Rightarrow$ notas em um violão



- Modos de vibração da corda $\Rightarrow$ notas em um violão
~
massa, carga e outras
propriedades das partículas.

Mais detalhes...

- Uma corda tem comprimento $= 1 \times 10^{-35}$ metros =

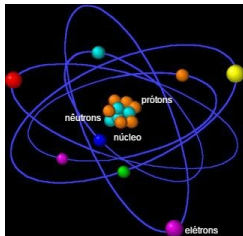
Mais detalhes...

- Uma corda tem comprimento = 1×10^{-35} metros =

[illegible]

Mais detalhes...

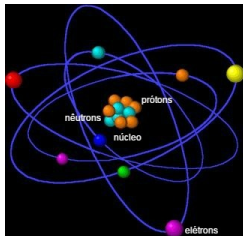
- [illegible]





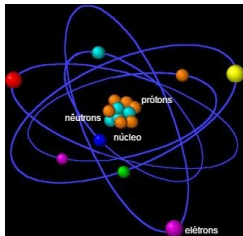
Mais detalhes...

- [illegible]



Mais detalhes...

- [illegible]



Uma limitação: como observar?

$$E \propto \frac{1}{\lambda}$$

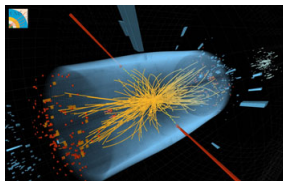
Quanto menor o comprimento λ , maior a energia E .

Uma limitação: como observar?

$$E \propto \frac{1}{\lambda}$$

Quanto menor o comprimento λ , maior a energia E .

- Ilustrando:



=



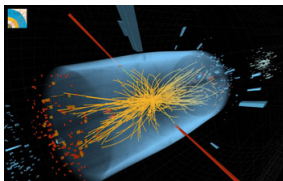
(1 dia)

Uma limitação: como observar?

$$E \propto \frac{1}{\lambda}$$

Quanto menor o comprimento λ , maior a energia E .

- Ilustrando:



=



(1 dia)



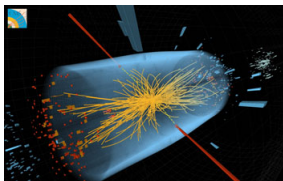
=

Uma limitação: como observar?

$$E \propto \frac{1}{\lambda}$$

Quanto menor o comprimento λ , maior a energia E .

- Ilustrando:



=



(1 dia)



=



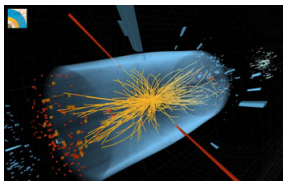
(17 anos!)

Uma limitação: como observar?

$$E \propto \frac{1}{\lambda}$$

Quanto menor o comprimento λ , maior a energia E .

- Ilustrando:



=



(1 dia)



=



(17 anos!)

- $10^{15} = 1000000000000000$ (quatrilhão) vezes mais energia do que a atual.

Grandes sucessos da Teoria de Cordas

- Uma das vibrações dá origem ao gráviton $\Rightarrow$ **Gravitação Quântica** ✓

	massa = $\sim 2.3 \text{ MeV}/c^2$ carga = $2/3$ spin = $1/2$ u up	massa = $\sim 1.275 \text{ GeV}/c^2$ carga = $2/3$ spin = $1/2$ c charm	massa = $\sim 173.83 \text{ GeV}/c^2$ carga = $2/3$ spin = $1/2$ t top	massa = $\sim 120 \text{ GeV}/c^2$ carga = 0 spin = 0 g glúon	massa = $\sim 120 \text{ GeV}/c^2$ carga = 0 spin = 0 H bóson de Higgs
QUARKS	massa = $\sim 4.8 \text{ MeV}/c^2$ carga = $-1/3$ spin = $1/2$ d down	massa = $\sim 95 \text{ MeV}/c^2$ carga = $-1/3$ spin = $1/2$ s strange	massa = $\sim 4.18 \text{ GeV}/c^2$ carga = $-1/3$ spin = $1/2$ b bottom	massa = $\sim 120 \text{ GeV}/c^2$ carga = 0 spin = 1 γ fóton	
	massa = $0.511 \text{ MeV}/c^2$ carga = -1 spin = $1/2$ e elétron	massa = $105.7 \text{ MeV}/c^2$ carga = -1 spin = $1/2$ μ múon	massa = $1.777 \text{ GeV}/c^2$ carga = -1 spin = $1/2$ τ tau	massa = $\sim 91.2 \text{ GeV}/c^2$ carga = 0 spin = 1 Z bóson Z	
LÉPTONS	massa = $< 2.3 \text{ eV}/c^2$ carga = 0 spin = $1/2$ ν_e neutrino do elétron	massa = $< 0.17 \text{ MeV}/c^2$ carga = 0 spin = $1/2$ ν_μ neutrino do múon	massa = $< 1.5 \text{ MeV}/c^2$ carga = 0 spin = $1/2$ ν_τ neutrino do tau	massa = $\sim 80.4 \text{ GeV}/c^2$ carga = ± 1 spin = 1 W bóson W	BÓSONS DE CALIBRE

Grandes sucessos da Teoria de Cordas

- Uma das vibrações dá origem ao gráviton $\Rightarrow$ **Gravitação Quântica** ✓

	massa = $\sim 2.3 \text{ MeV}/c^2$ carga = $2/3$ spin = $1/2$ u up	massa = $\sim 1.275 \text{ GeV}/c^2$ carga = $2/3$ spin = $1/2$ c charm	massa = $\sim 173.83 \text{ GeV}/c^2$ carga = $2/3$ spin = $1/2$ t top	massa = 0 carga = 0 spin = 1 g glúon	massa = $\sim 126 \text{ GeV}/c^2$ carga = 0 spin = 0 H bóson de Higgs
QUARKS	massa = $\sim 4.8 \text{ MeV}/c^2$ carga = $-1/3$ spin = $1/2$ d down	massa = $\sim 95 \text{ MeV}/c^2$ carga = $-1/3$ spin = $1/2$ s strange	massa = $\sim 4.18 \text{ GeV}/c^2$ carga = $-1/3$ spin = $1/2$ b bottom	massa = 0 carga = 0 spin = 1 γ fóton	
	massa = $0.511 \text{ MeV}/c^2$ carga = -1 spin = $1/2$ e elétron	massa = $105.7 \text{ MeV}/c^2$ carga = -1 spin = $1/2$ μ muon	massa = $1.777 \text{ GeV}/c^2$ carga = -1 spin = $1/2$ τ tau	massa = $91.2 \text{ GeV}/c^2$ carga = 0 spin = 1 Z bóson Z	
LÉPTONS	massa = $< 2.3 \text{ eV}/c^2$ carga = 0 spin = $1/2$ ν_e neutrino do elétron	massa = $< 0.17 \text{ MeV}/c^2$ carga = 0 spin = $1/2$ ν_μ neutrino do muon	massa = $< 1.5 \text{ MeV}/c^2$ carga = 0 spin = $1/2$ ν_τ neutrino do tau	massa = $80.4 \text{ GeV}/c^2$ carga = ± 1 spin = 1 W bóson W	BÓSONS DE CALIBRE

- Todas as partículas são geradas por um único objeto: a corda.
 $\Rightarrow$ **Unificação das interações** ✓

Grandes sucessos da Teoria de Cordas

- Uma das vibrações dá origem ao gráviton $\Rightarrow$ **Gravitação Quântica** ✓

	massa = $\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$ carga = $2/3$ spin = $1/2$ u up	massa = $\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$ carga = $2/3$ spin = $1/2$ c charm	massa = $\approx 173.83 \text{ GeV}/c^2$ carga = $2/3$ spin = $1/2$ t top	massa = 0 carga = 0 spin = 1 g glúon	massa = $\approx 126 \text{ GeV}/c^2$ carga = 0 spin = 0 H bóson de Higgs
QUARKS	massa = $\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$ carga = $-1/3$ spin = $1/2$ d down	massa = $\approx 95 \text{ MeV}/c^2$ carga = $-1/3$ spin = $1/2$ s strange	massa = $\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ carga = $-1/3$ spin = $1/2$ b bottom	massa = 0 carga = 0 spin = 1 γ fóton	
	massa = $0.511 \text{ MeV}/c^2$ carga = -1 spin = $1/2$ e elétron	massa = $105.7 \text{ MeV}/c^2$ carga = -1 spin = $1/2$ μ muon	massa = $1.777 \text{ GeV}/c^2$ carga = -1 spin = $1/2$ τ tau	massa = $\approx 91.2 \text{ GeV}/c^2$ carga = 0 spin = 1 Z bóson Z	
LÉPTONS	massa = $\approx 2.2 \text{ eV}/c^2$ carga = 0 spin = $1/2$ ν_e neutrino do elétron	massa = $\approx 0.17 \text{ MeV}/c^2$ carga = 0 spin = $1/2$ ν_μ neutrino do muon	massa = $\approx 1.5 \text{ MeV}/c^2$ carga = 0 spin = $1/2$ ν_τ neutrino do tau	massa = $\approx 80.4 \text{ GeV}/c^2$ carga = ± 1 spin = 1 W bóson W	BÓSONS DE CALIBRE

- Todas as partículas são geradas por um único objeto: a corda.
 $\Rightarrow$ **Unificação das interações** ✓

*Estariamos mais perto da Teoria de Tudo,
como Einstein sonhava um dia poder encontrar?*

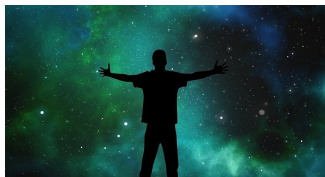
Grandes sucessos da Teoria de Cordas

- Uma das vibrações dá origem ao gráviton $\Rightarrow$ **Gravitação Quântica** ✓

	massa = $\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$ carga = $2/3$ spin = $1/2$ u up	massa = $\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$ carga = $2/3$ spin = $1/2$ c charm	massa = $\approx 173.83 \text{ GeV}/c^2$ carga = $2/3$ spin = $1/2$ t top	massa = 0 carga = 0 spin = 1 g glúon	massa = $\approx 126 \text{ GeV}/c^2$ carga = 0 spin = 0 H bóson de Higgs
QUARKS	massa = $\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$ carga = $-1/3$ spin = $1/2$ d down	massa = $\approx 95 \text{ MeV}/c^2$ carga = $-1/3$ spin = $1/2$ s strange	massa = $\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ carga = $-1/3$ spin = $1/2$ b bottom	massa = 0 carga = 0 spin = 1 γ fóton	
	massa = $0.511 \text{ MeV}/c^2$ carga = -1 spin = $1/2$ e elétron	massa = $105.7 \text{ MeV}/c^2$ carga = -1 spin = $1/2$ μ muon	massa = $1.777 \text{ GeV}/c^2$ carga = -1 spin = $1/2$ τ tau	massa = $91.2 \text{ GeV}/c^2$ carga = 0 spin = 1 Z bóson Z	
LÉPTONS	massa = $\approx 2.3 \text{ eV}/c^2$ carga = 0 spin = $1/2$ ν_e neutrino do elétron	massa = $\approx 0.17 \text{ MeV}/c^2$ carga = 0 spin = $1/2$ ν_μ neutrino do muon	massa = $\approx 1.5 \text{ MeV}/c^2$ carga = 0 spin = $1/2$ ν_τ neutrino do tau	massa = $80.4 \text{ GeV}/c^2$ carga = ± 1 spin = 1 W bóson W	BÓSONS DE CALIBRE

- Todas as partículas são geradas por um único objeto: a corda.
 $\Rightarrow$ **Unificação das interações** ✓

*Estaríamos mais perto da Teoria de Tudo,
como Einstein sonhava um dia poder encontrar?*



Grandes sucessos da Teoria de Cordas

- Uma das vibrações dá origem ao gráviton $\Rightarrow$ **Gravitação Quântica** ✓

	massa = $\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$ carga = $2/3$ spin = $1/2$ u up	massa = $\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$ carga = $2/3$ spin = $1/2$ c charm	massa = $\approx 173.83 \text{ GeV}/c^2$ carga = $2/3$ spin = $1/2$ t top	massa = 0 carga = 0 spin = 1 g glúon	massa = $\approx 126 \text{ GeV}/c^2$ carga = 0 spin = 0 H bóson de Higgs
QUARKS	massa = $\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$ carga = $-1/3$ spin = $1/2$ d down	massa = $\approx 95 \text{ MeV}/c^2$ carga = $-1/3$ spin = $1/2$ s strange	massa = $\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ carga = $-1/3$ spin = $1/2$ b bottom	massa = 0 carga = 0 spin = 1 γ fóton	
	massa = $0.511 \text{ MeV}/c^2$ carga = -1 spin = $1/2$ e elétron	massa = $105.7 \text{ MeV}/c^2$ carga = -1 spin = $1/2$ μ muon	massa = $1.777 \text{ GeV}/c^2$ carga = -1 spin = $1/2$ τ tau	massa = $91.2 \text{ GeV}/c^2$ carga = 0 spin = 1 Z bóson Z	
LEPTONS	massa = $\approx 2.3 \text{ eV}/c^2$ carga = 0 spin = $1/2$ ν_e neutrino do elétron	massa = $\approx 0.17 \text{ MeV}/c^2$ carga = 0 spin = $1/2$ ν_μ neutrino do muon	massa = $\approx 1.5 \text{ MeV}/c^2$ carga = 0 spin = $1/2$ ν_τ neutrino do tau	massa = $80.4 \text{ GeV}/c^2$ carga = ± 1 spin = 1 W bóson W	BÓSONS DE CALIBRE

- Todas as partículas são geradas por um único objeto: a corda.
 $\Rightarrow$ **Unificação das interações** ✓

*Estaríamos mais perto da Teoria de Tudo,
como Einstein sonhava um dia poder encontrar?*



- Curiosidade:** na época de Einstein só se conhecia a gravitação e o eletromagnetismo.

Dimensões extras

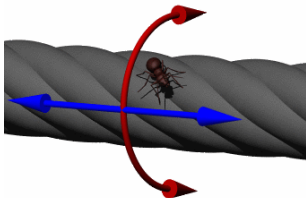
- Apesar desses sucessos, a teoria exige **11 dimensões** espaço-temporais.

Dimensões extras

- Apesar desses sucessos, a teoria exige **11 dimensões** espaço-temporais.
- **Nosso mundo:** 3 dimensões de espaço (altura, largura, profundidade)
+
1 dimensão de tempo
=
4 dimensões.

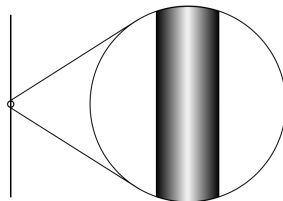
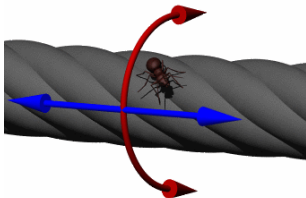
Dimensões extras

- Apesar desses sucessos, a teoria exige **11 dimensões** espaço-temporais.
- **Nosso mundo:** 3 dimensões de espaço (altura, largura, profundidade)
+
1 dimensão de tempo
=
4 dimensões.
- **Ideia:** Formiga andando ao longo de um cabo.



Dimensões extras

- Apesar desses sucessos, a teoria exige **11 dimensões** espaço-temporais.
- **Nosso mundo:** 3 dimensões de espaço (altura, largura, profundidade)
+
1 dimensão de tempo
=
4 dimensões.
- **Ideia:** Formiga andando ao longo de um cabo.



Onde estão essas dimensões extras?

- 1^a. ideia:

Onde estão essas dimensões extras?

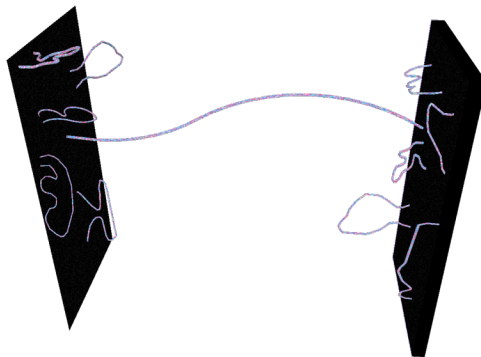
- 1^a ideia:

Em um espaço inacessível para o nosso plano de 4 dimensões (a **brana** onde nós estamos presos).

Onde estão essas dimensões extras?

- 1ª ideia:

Em um espaço inacessível para o nosso plano de 4 dimensões (a **brana** onde nós estamos presos).



Onde estão essas dimensões extras?

- 2^a ideia:

Onde estão essas dimensões extras?

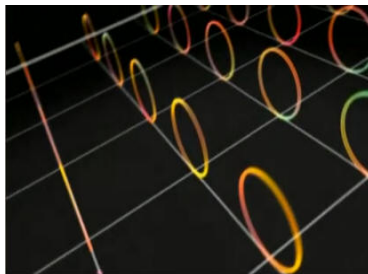
- 2^a. ideia:

Compactificadas em espaços muito pequenos.

Onde estão essas dimensões extras?

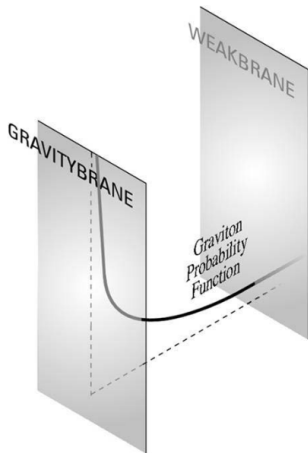
- 2^a ideia:

Compactificadas em espaços muito pequenos.



- Explicação para:

→ o porquê da gravidade ser mais fraca do que as outras forças;
Exemplo: 10^{-36} vezes mais fraca do que o eletromagnetismo.



Outra limitação: como obter o nosso mundo?

- As partículas e suas propriedades em 4 dimensões emergem:

Outra limitação: como obter o nosso mundo?

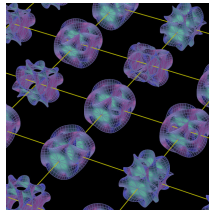
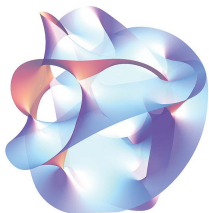
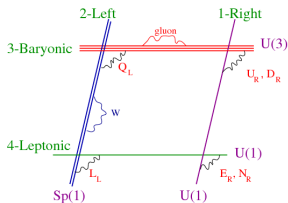
- As partículas e suas propriedades em 4 dimensões emergem:
 - no 1º caso $\rightarrow$ da interseção dos vários planos;

Outra limitação: como obter o nosso mundo?

- As partículas e suas propriedades em 4 dimensões emergem:
 - no 1º caso $\rightarrow$ da interseção dos vários planos;
 - no 2º caso $\rightarrow$ do tamanho/forma dos espaços formados pelas dimensões extras.

Outra limitação: como obter o nosso mundo?

- Matemática é complexa e há várias possibilidades...



- Problema do *landscape* ou da paisagem.

Multiverso

- Problema do *landscape* ou da paisagem?

Multiverso

- Problema do *landscape* ou da paisagem?
⇒ Multiverso = diversos Universos possíveis
(com diferentes partículas e propriedades).

Multiverso

- Problema do *landscape* ou da paisagem?
⇒ Multiverso = diversos Universos possíveis
(com diferentes partículas e propriedades).



Multiverso

- Problema do *landscape* ou da paisagem?
⇒ Multiverso = diversos Universos possíveis
(com diferentes partículas e propriedades).



Multiverso

- Problema do *landscape* ou da paisagem?
⇒ Multiverso = diversos Universos possíveis
(com diferentes partículas e propriedades).



Princípio Antrópico:

*“Vemos o universo da maneira como ele é porque,
se fosse diferente, não estaríamos aqui para vê-lo.”*

(Stephen Hawking)

Conclusões & Perspectivas

- Em Teoria de Cordas, as partículas são vibrações de cordas.

Conclusões & Perspectivas

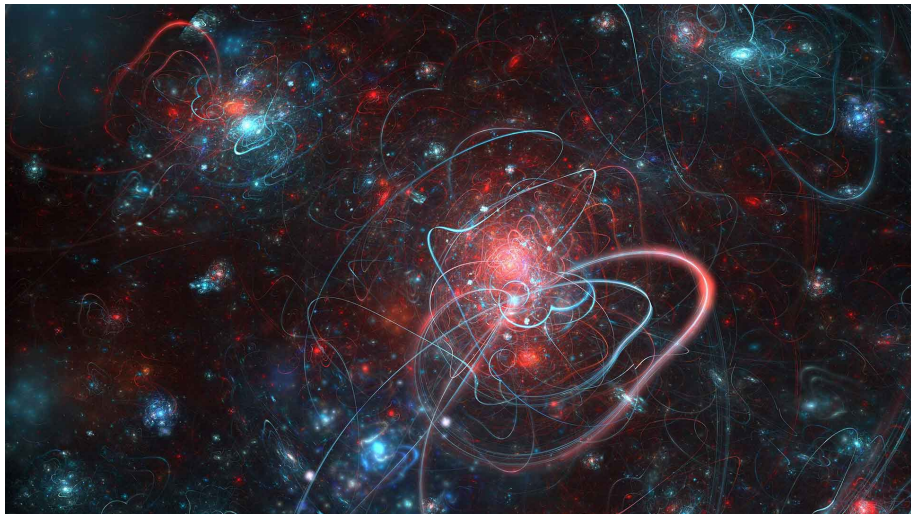
- Em Teoria de Cordas, as partículas são vibrações de cordas.
 - ⇒ Gravitação Quântica;
 - ⇒ Unificação das interações da Natureza.

Conclusões & Perspectivas

- Em Teoria de Cordas, as partículas são vibrações de cordas.
 - ⇒ Gravitação Quântica;
 - ⇒ Unificação das interações da Natureza.
- Dimensões extras: localizadas em branas inacessíveis e/ou compactificadas.

Conclusões & Perspectivas

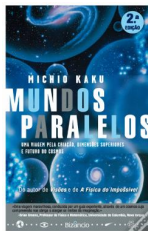
- Em Teoria de Cordas, as partículas são vibrações de cordas.
 - ⇒ Gravitação Quântica;
 - ⇒ Unificação das interações da Natureza.
- Dimensões extras: localizadas em branas inacessíveis e/ou compactificadas.
- Possíveis explicações para:
 - gravidade mais fraca do que outras forças;
 - singularidade de buracos negros e início do Universo;
 - número de famílias do Modelo Padrão da Física de Partículas;
 - matéria escura;
 - *etc.*



Alguns livros



Alguns livros



Obrigada pela atenção!