

# De que são feitas as coisas?

**Pedro Costa**

(CFisUC / DF FCTUC)

**17.<sup>a</sup> edição das Masterclasses Internacionais em  
Física de Partículas**

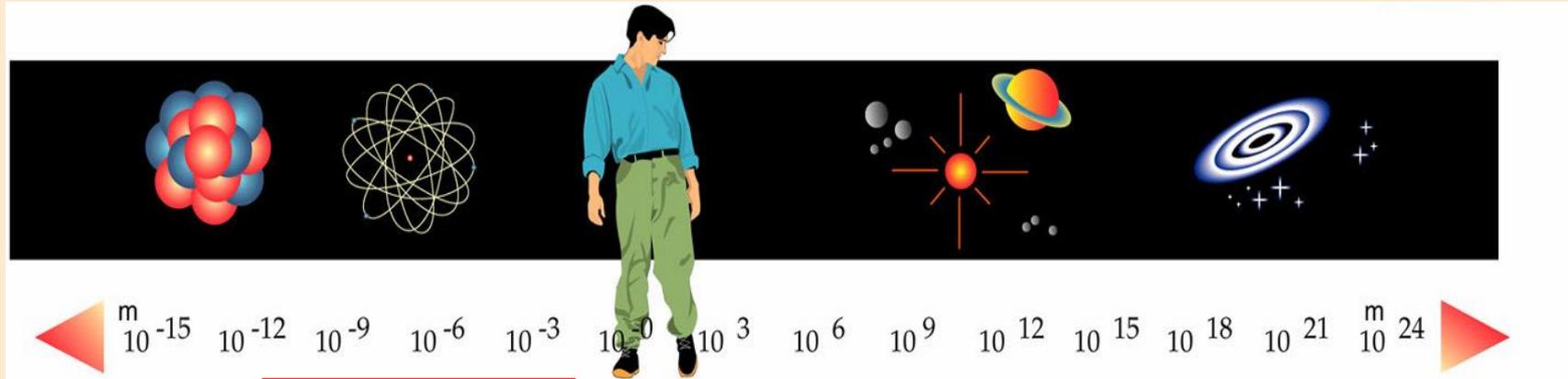
**Coimbra 20 de Março de 2021**

## física de partículas

olha para a matéria nas suas dimensões mais pequenas

## astrofísica

olha para a matéria nas suas dimensões maiores



microscópios

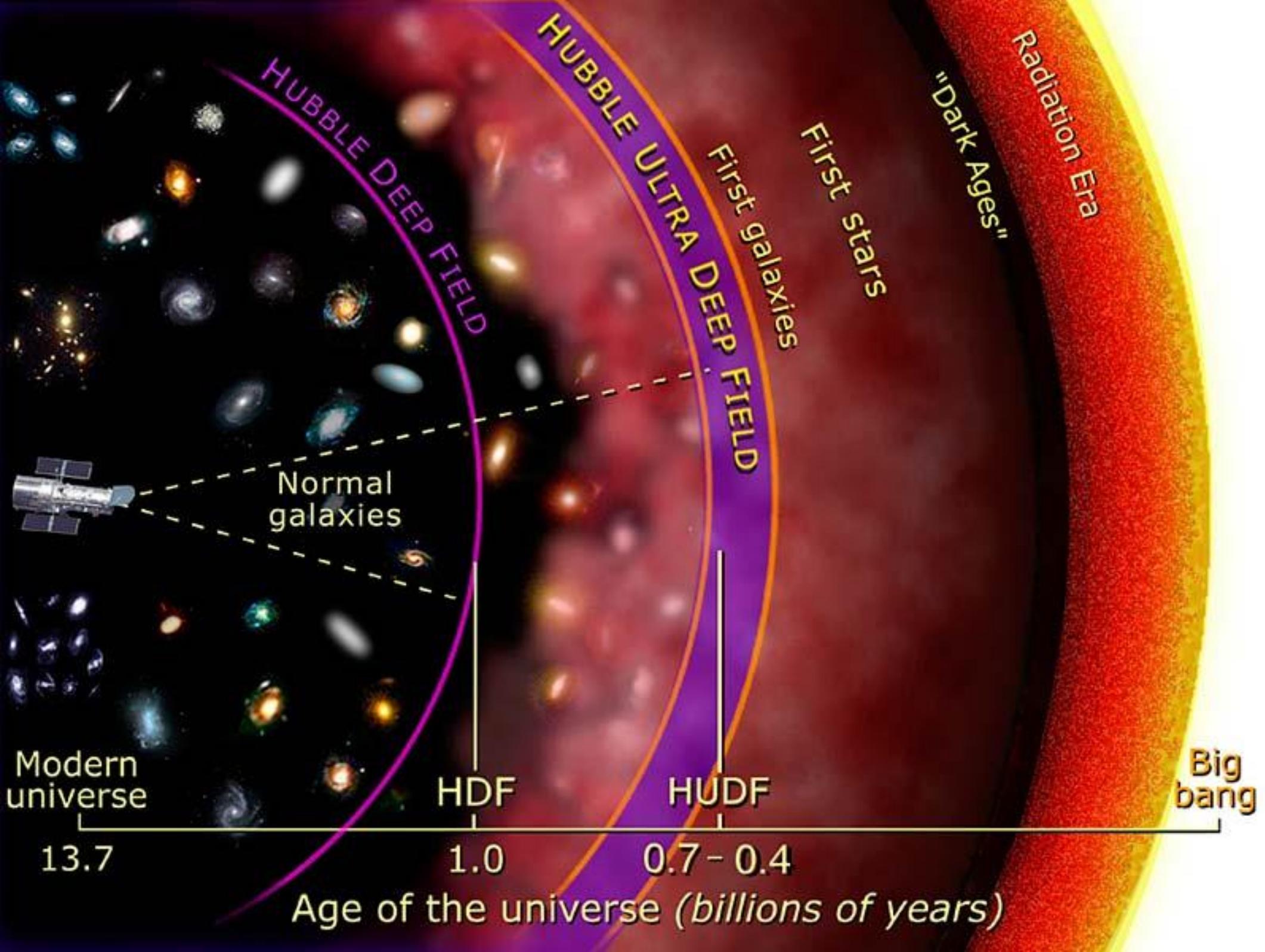
binóculos

telescópios

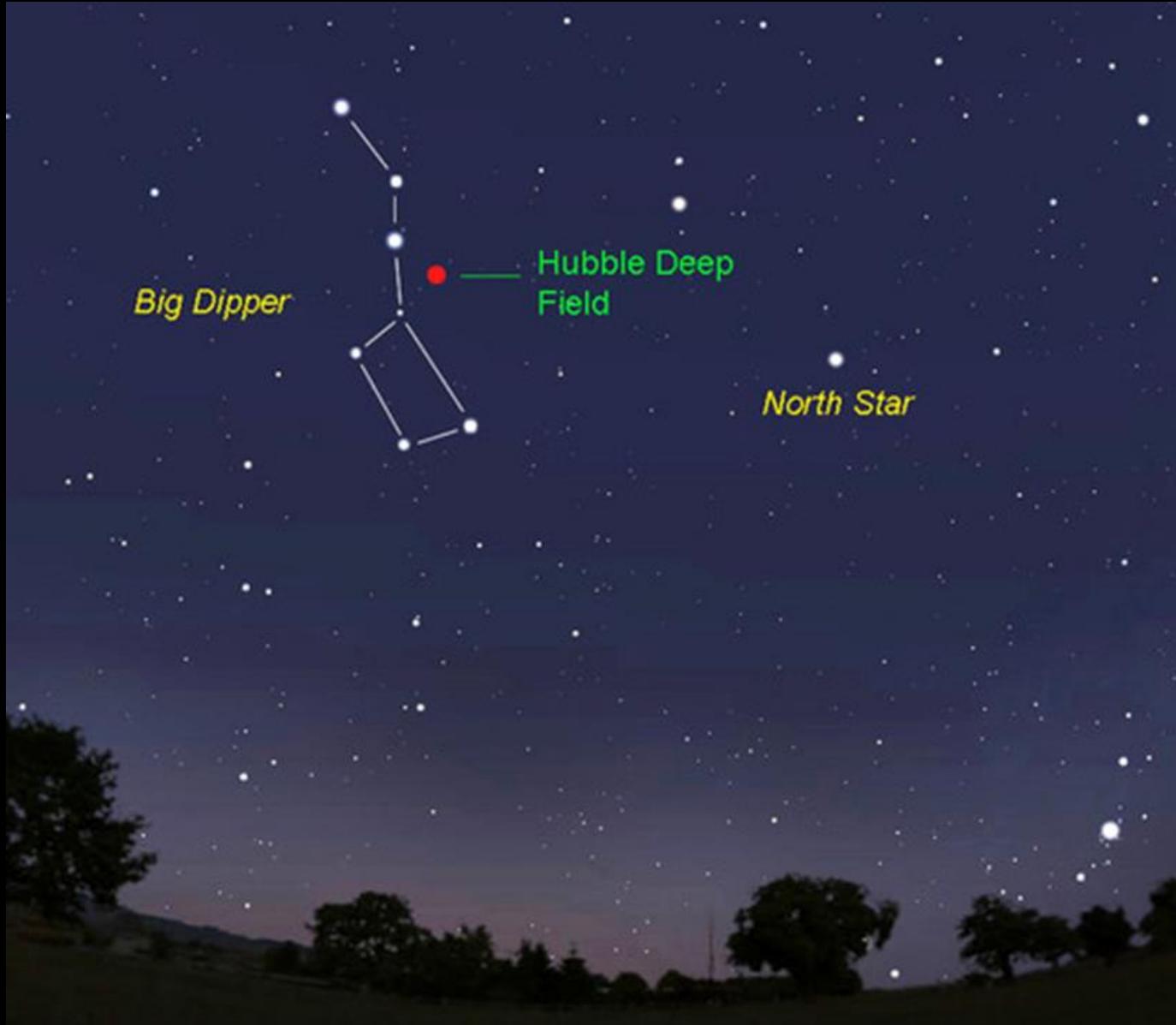
aceleradores e  
detetores

olho nu

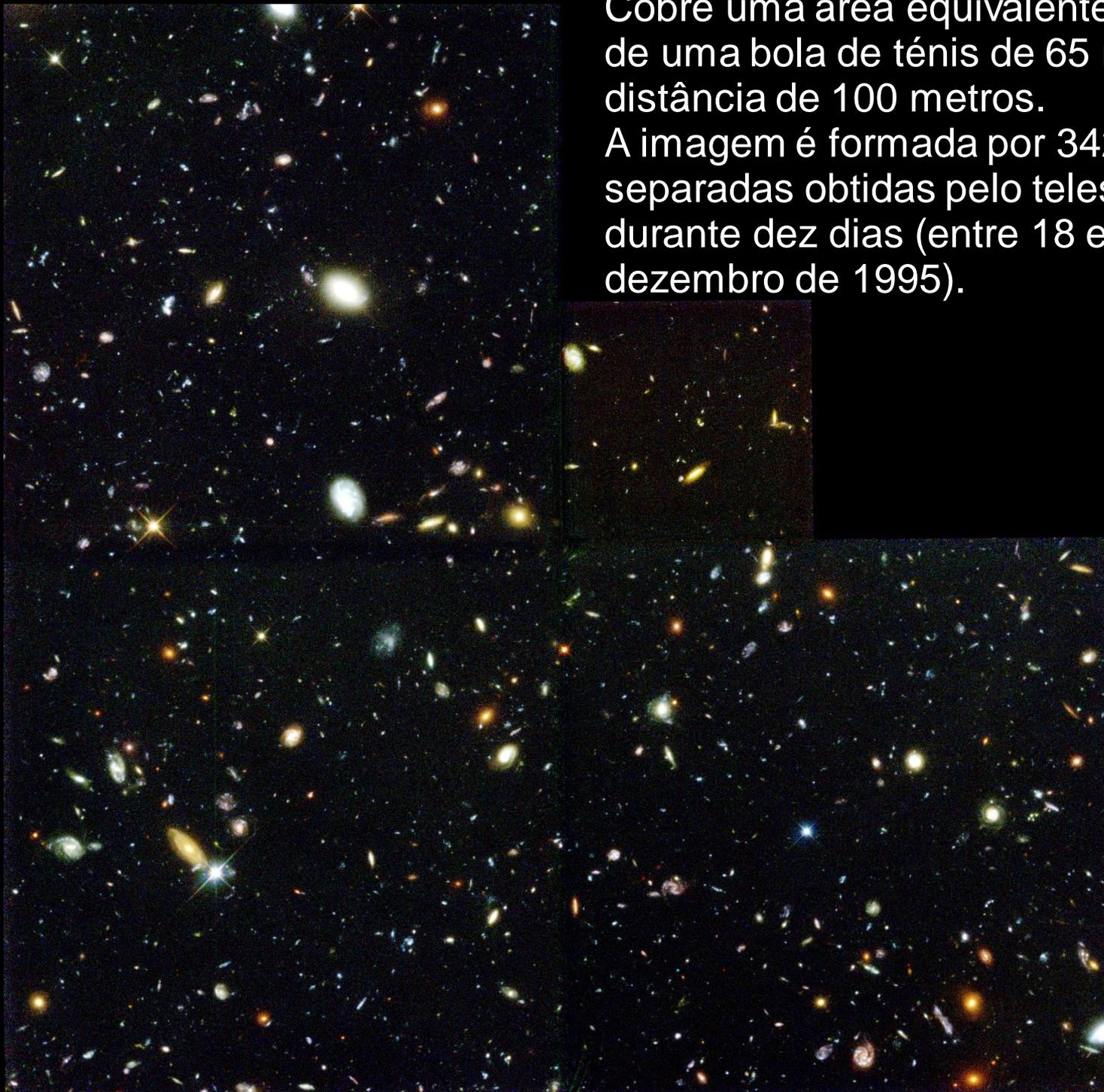
as duas fronteiras da física



# Hubble: Campo Profundo (HDF) - 1995



1996

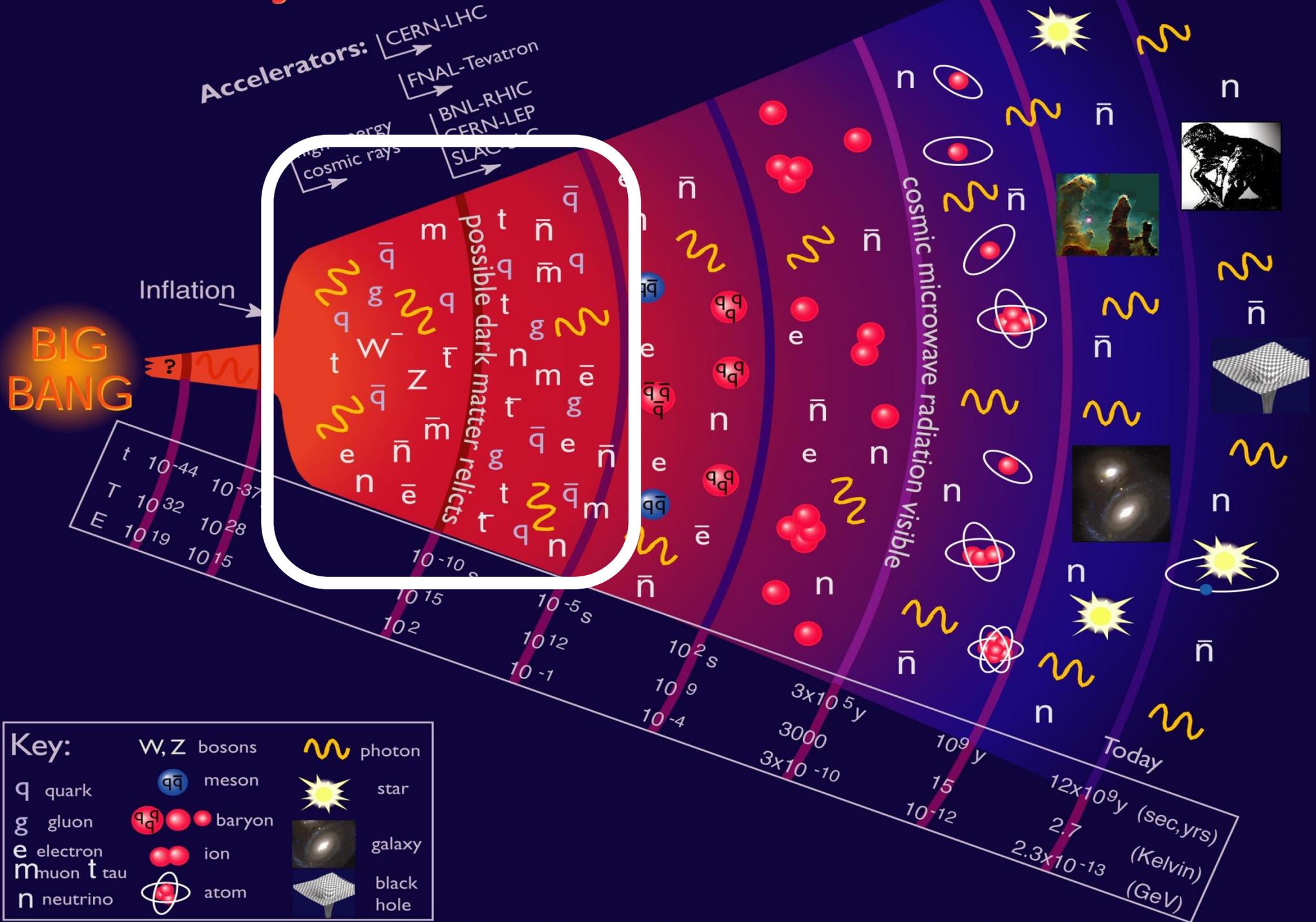


Cobre uma área equivalente ao tamanho de uma bola de ténis de 65 mm a uma distância de 100 metros. A imagem é formada por 342 exposições separadas obtidas pelo telescópio Hubble durante dez dias (entre 18 e 28 de dezembro de 1995).



É a imagem mais profunda do universo obtida com luz visível. Mostra o Universo tal como ele era há 13 mil milhões de anos (400-800 milhões de anos após o Big Bang).

# History of the Universe



# O balanço de energia do universo

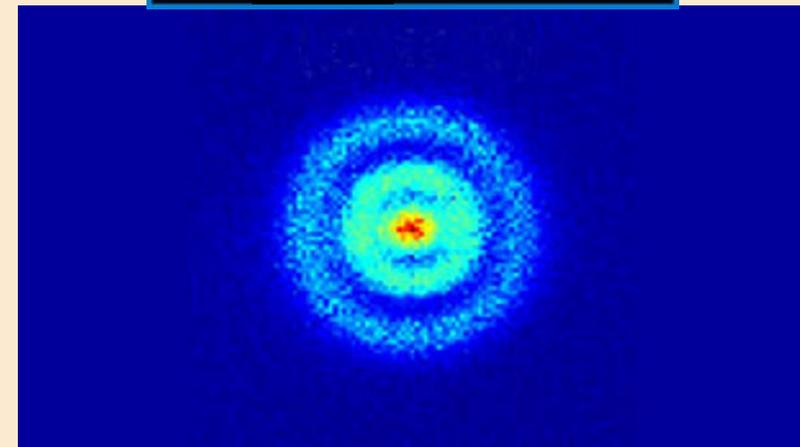
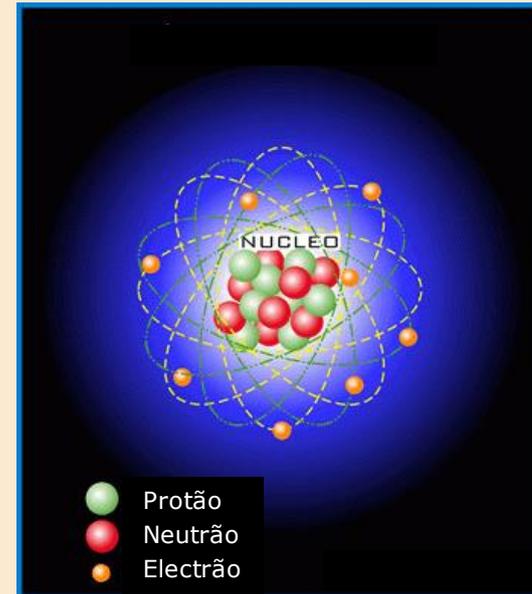


# Os Constituintes Elementares: Quarks, leptões e bosões?

Three Generations of Matter (Fermions)

	I	II	III	
mass →	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
charge →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
name →	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>γ</b> photon
	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
<b>Quarks</b>	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>g</b> gluon
	<2.2 eV	<0.17 MeV	<15.5 MeV	91.2 GeV
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	<b>ν<sub>e</sub></b> electron neutrino	<b>ν<sub>μ</sub></b> muon neutrino	<b>ν<sub>τ</sub></b> tau neutrino	<b>Z</b> weak force
	0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV	80.4 GeV
	-1	-1	-1	$\pm 1$
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
<b>Leptons</b>	<b>e</b> electron	<b>μ</b> muon	<b>τ</b> tau	<b>W<sup>±</sup></b> weak force

Matéria normal



PRL 110, 213001 (2013)

# Os Constituintes Elementares: Quarks, leptões e bosões?

Three Generations  
of Matter (Fermions)

	I	II	III	
mass→	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
charge→	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin→	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
name→	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b><math>\gamma</math></b> photon
Quarks	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>g</b> gluon
<2.2 eV	<0.17 MeV	<15.5 MeV	91.2 GeV	
0	0	0	0	
$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
<b><math>\nu_e</math></b> electron neutrino	<b><math>\nu_\mu</math></b> muon neutrino	<b><math>\nu_\tau</math></b> tau neutrino	<b>Z</b> weak force	
0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV	80.4 GeV	
-1	-1	-1	$\pm 1$	
$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
<b>e</b> electron	<b><math>\mu</math></b> muon	<b><math>\tau</math></b> tau	<b>W<sup>±</sup></b> weak force	

Bosons (Forces)



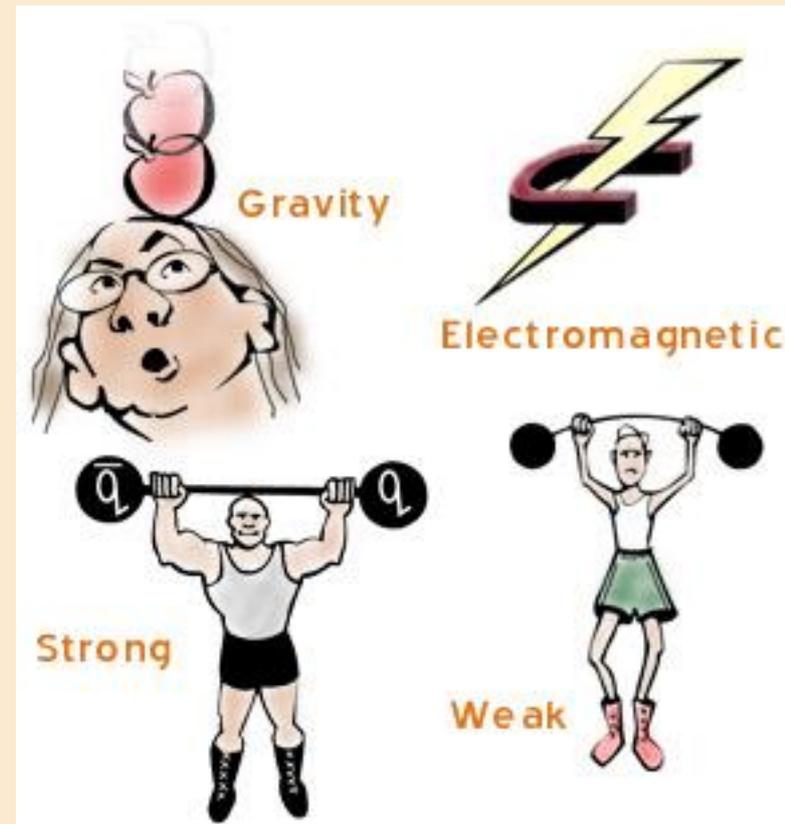
Produzidos em  
Laboratório

# Os Constituintes Elementares: Quarks, leptões e bósons?

Three Generations of Matter (Fermions)

	I	II	III	
mass →	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
charge →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
name →	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>γ</b> photon
	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
<b>Quarks</b>	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>g</b> gluon
	<2.2 eV	<0.17 MeV	<15.5 MeV	91.2 GeV
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	<b>ν<sub>e</sub></b> electron neutrino	<b>ν<sub>μ</sub></b> muon neutrino	<b>ν<sub>τ</sub></b> tau neutrino	<b>Z</b> weak force
	0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV	80.4 GeV
	-1	-1	-1	$\pm 1$
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
<b>Leptons</b>	<b>e</b> electron	<b>μ</b> muon	<b>τ</b> tau	<b>W<sup>±</sup></b> weak force

**Bosons (Forces)**



Mediadores  
das forças

# Os Constituintes Elementares: Quarks, leptões e bosões?

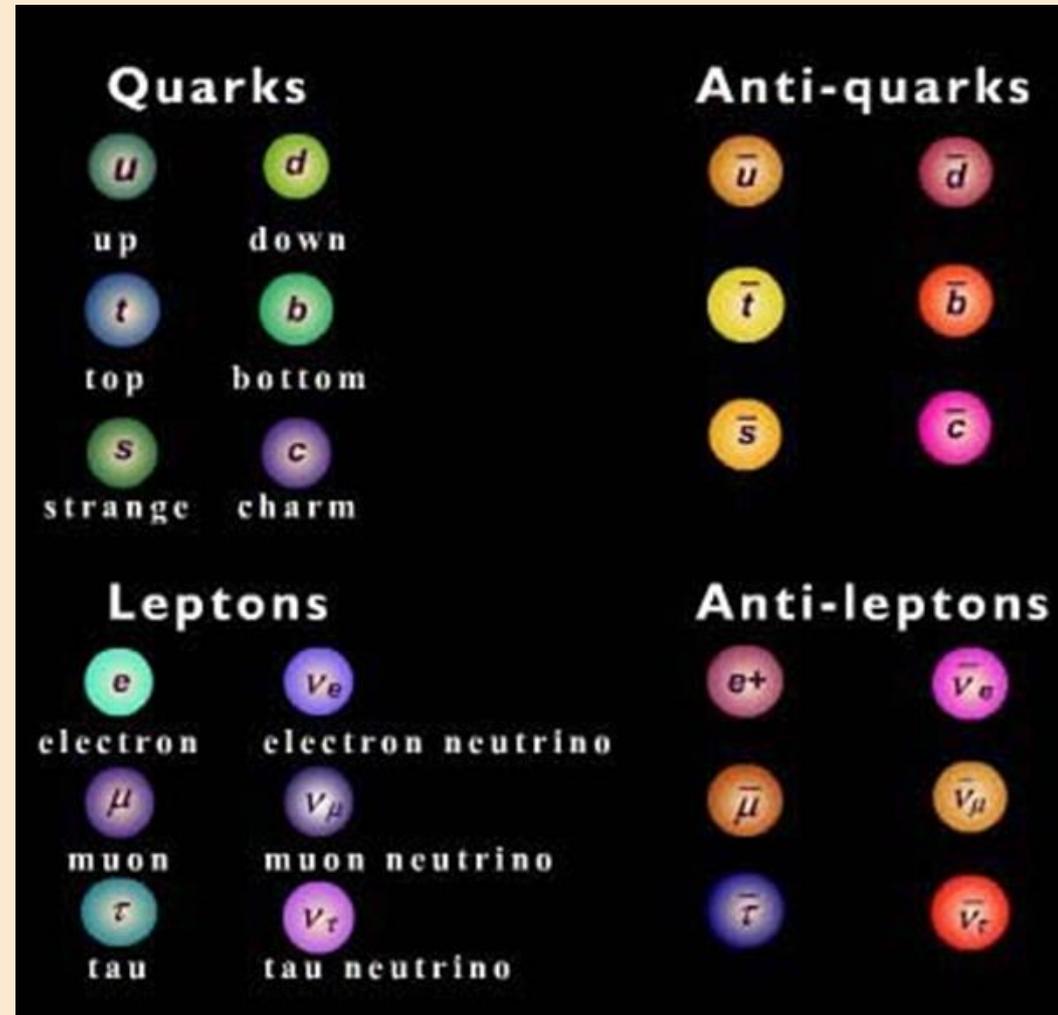
Three Generations of Matter (Fermions)

	I	II	III	
mass	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
charge	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
name	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b><math>\gamma</math></b> photon
	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>g</b> gluon
	<2.2 eV	<0.17 MeV	<15.5 MeV	91.2 GeV
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	<b><math>\nu_e</math></b> electron neutrino	<b><math>\nu_\mu</math></b> muon neutrino	<b><math>\nu_\tau</math></b> tau neutrino	<b>Z</b> weak force
	0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV	80.4 GeV
	-1	-1	-1	$\pm 1$
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	<b>e</b> electron	<b><math>\mu</math></b> muon	<b><math>\tau</math></b> tau	<b>W<sup>±</sup></b> weak force

Quarks (left side of table)

Leptons (left side of table)

Bosons (Forces) (right side of table)



Matéria normal Produzidos em Laboratório

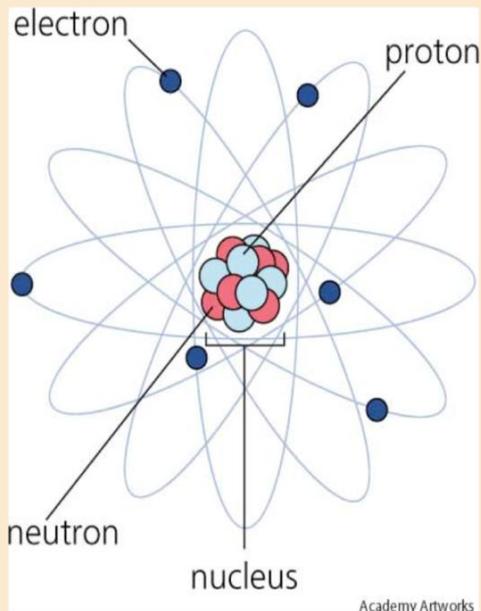
# E as interações fundamentais?



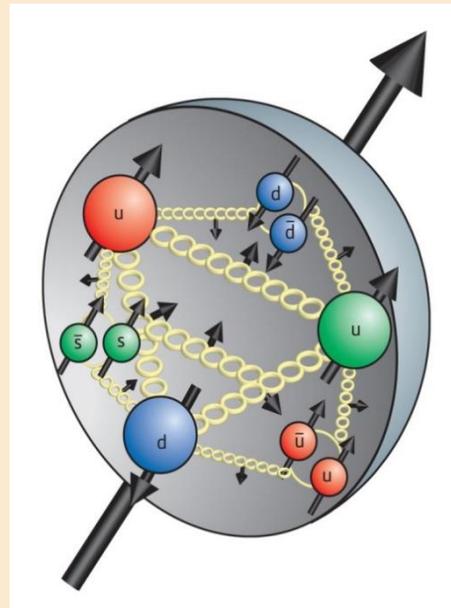
# As interações da Natureza

Existem quatro interações fundamentais na Natureza

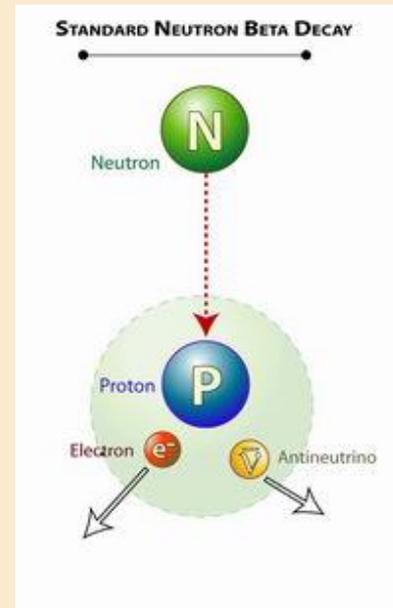
*Eletromagnética*



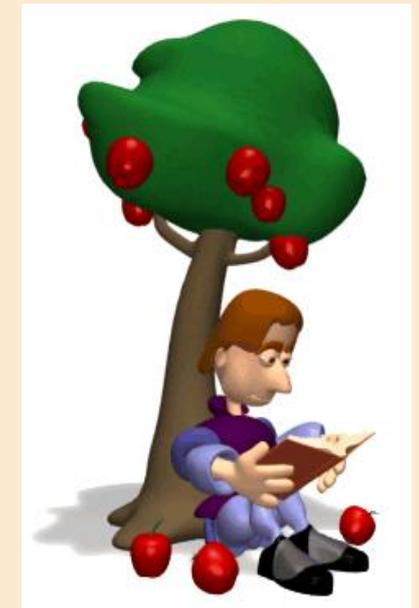
*Forte*



*Fraca*

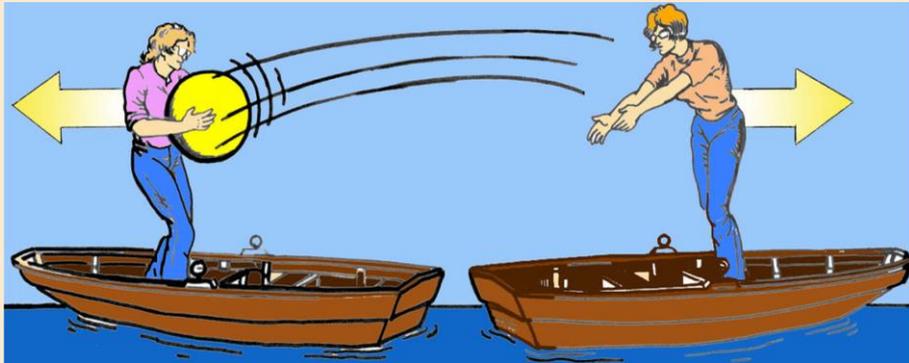


*Gravitacional*

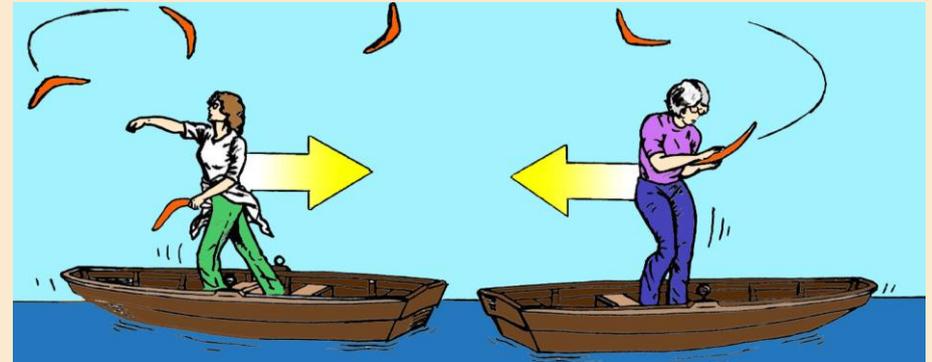


# Como se transmitem as forças?

Dois **elétrões** interagem porque permutam entre si **fotões**:



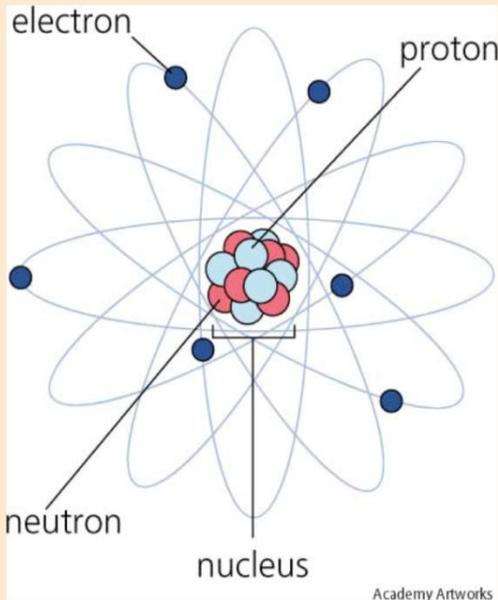
Dois **quarks** interagem porque permutam entre si **gluões**:



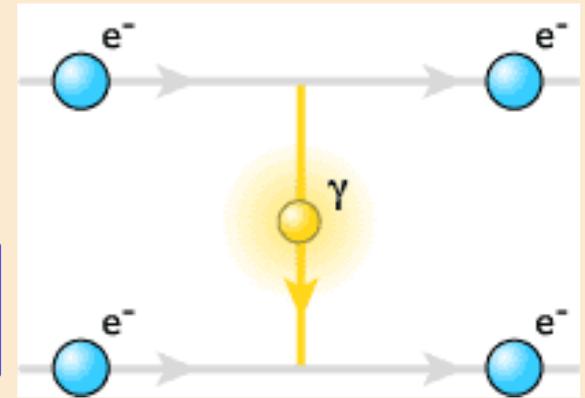
As forças transmitem-se através da troca de partículas!

# 1. interação eletromagnética

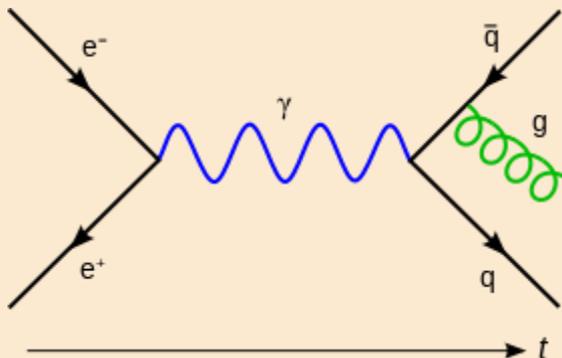
Um **fotão** é apenas **radiação eletromagnética**  
Representa muitos papéis em Física!



Actua em todas as partículas que possuem carga elétrica.



a repulsão (atração) elétrica é produzida pela troca de fótons

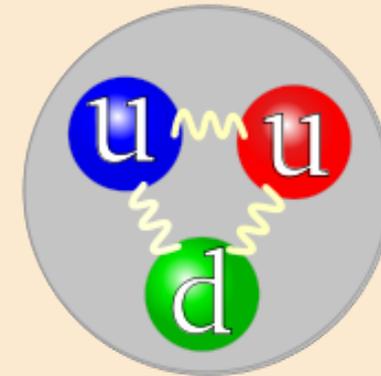


Um elétron e um pósitron aniquilam-se, produzindo um fóton, que decai num par quark-antiquark, após o qual o antiquark irradia um glúon

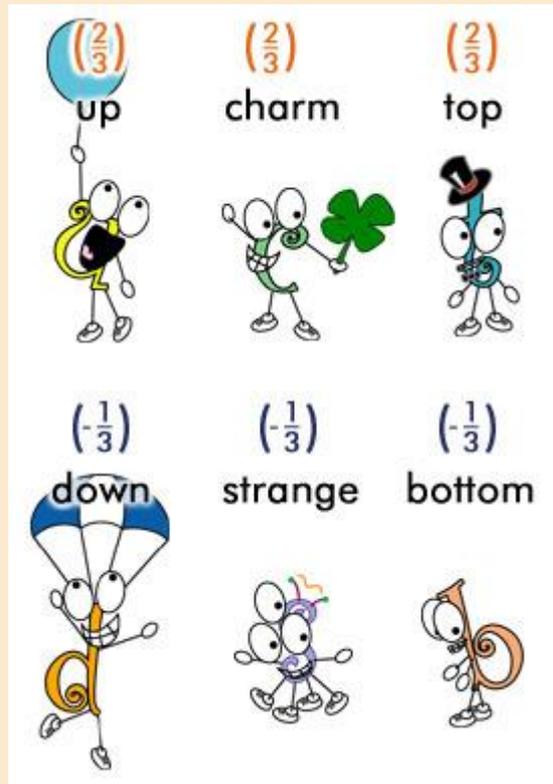
## 2. interação forte

# Quarks e gluões

Protão:



## Quarks

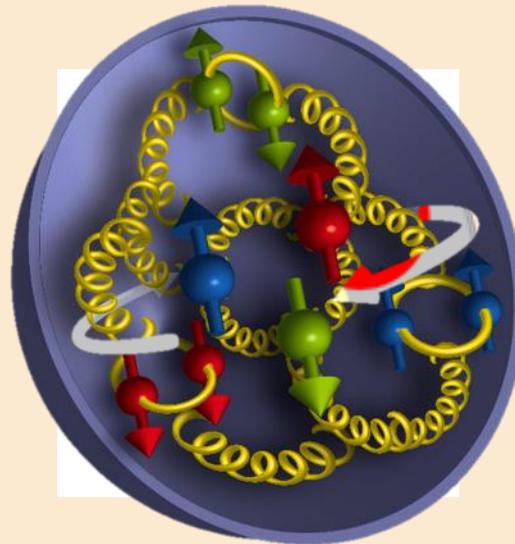


COLOR			
RED	GREEN	BLUE	QUARKS
Anti-Red	Anti-Green	Anti-Blue	ANTI-QUARKS
ANTI-COLOR			

Actua em todas as partícula que possuam carga de cor (caso dos quarks!)

## 2. interação forte

- o **núcleo** do átomo possui carga positiva
- é constituído por **protões** (p) e **neutrões** (n)
- os protões e os neutrões são constituídos por partículas ainda mais pequenas: os **quarks**

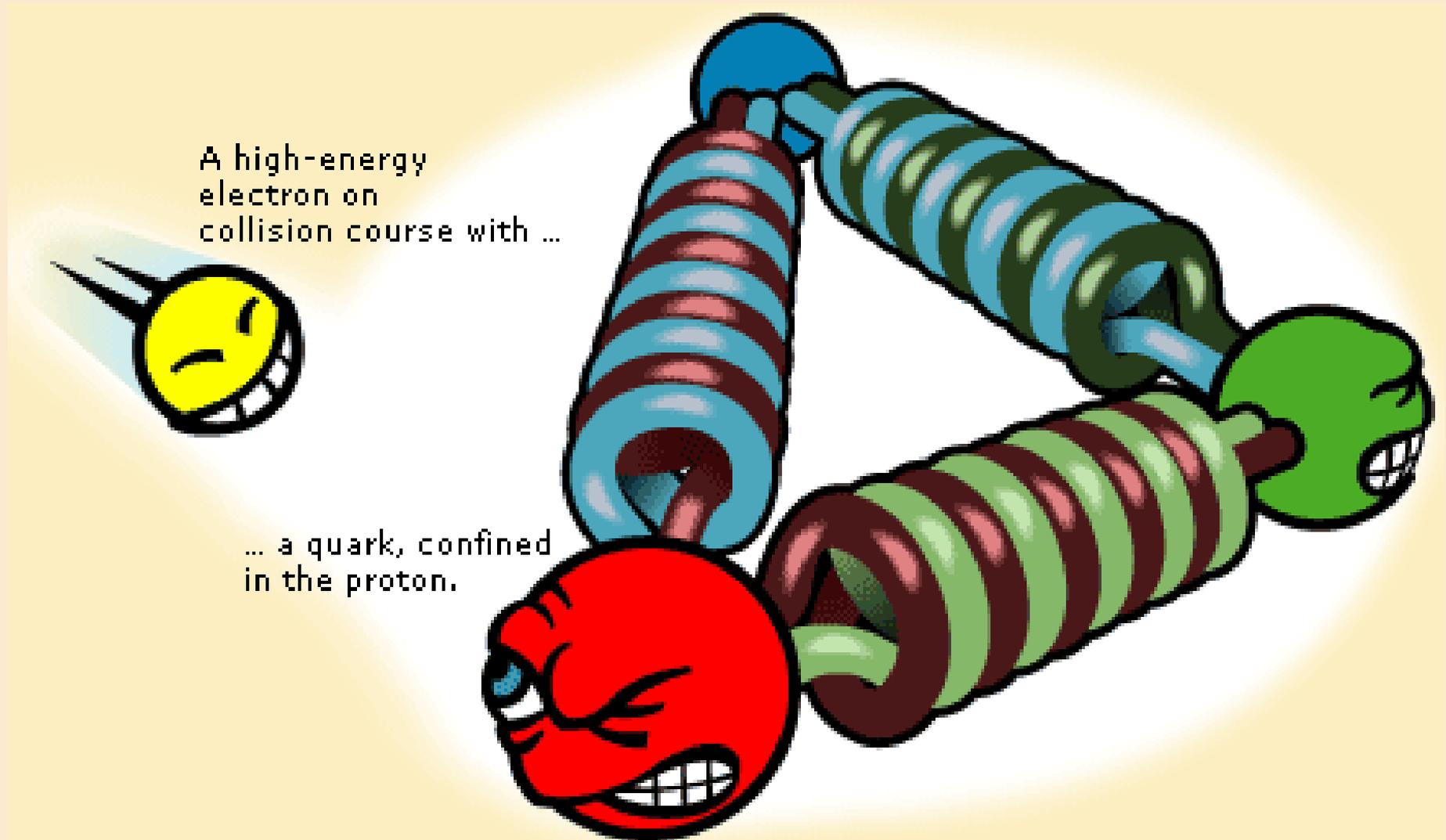


Protão

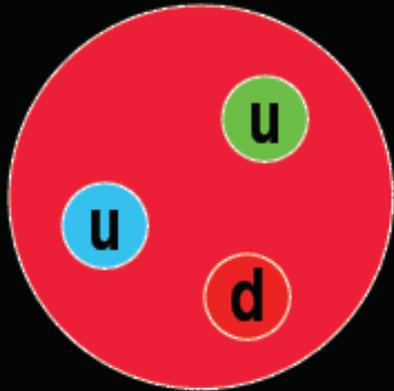
os **quarks**  
são  
mantidos  
ligados pelos  
**gluões**

## 2. interação forte

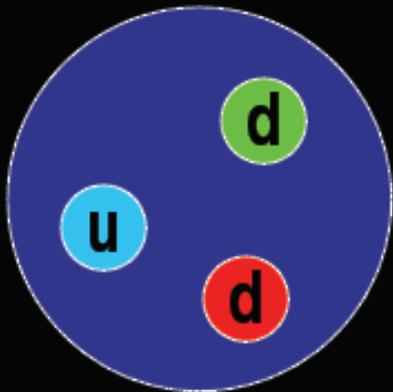
Os **gluões** mantêm os quarks confinados nos hádrons...



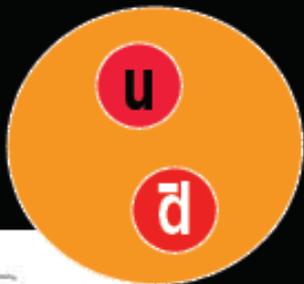
# como se combinam os quarks ?



protão:  
2 "u" + 1 "d"



neutrão:  
2 "d" + 1 "u"



outras  
partículas:  
mesões  $u + \bar{d}$

mas os quarks  
possuem cor:



só existem combinações  
"sem cor":

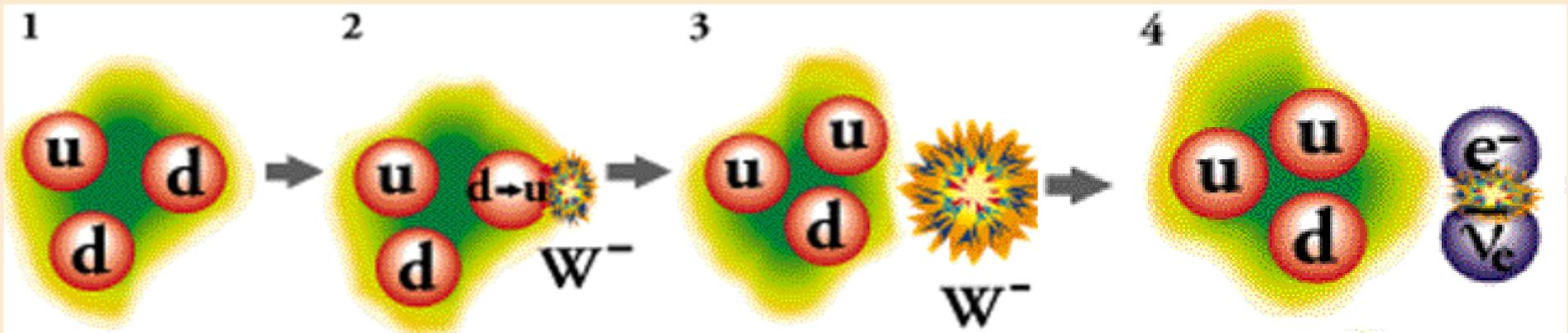
● + ● + ● = branco

ou,

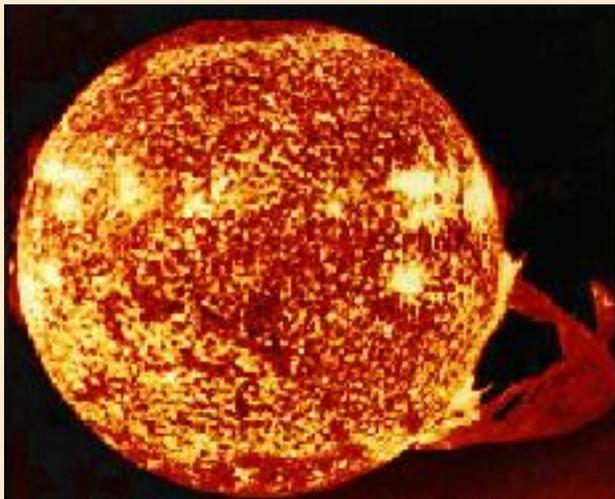
● + ●<sup>-</sup> = branco

# nada dura para sempre...

o **neutrão** (livre) é "radioativo" i.é decai (com uma vida média de 15 minutos) num **protão**, num **eletrão** e num **neutrino** (o parceiro leve sem carga do eletrão)



este decaimento é muito fraco (15 minutos é uma eternidade...) mas sem esta interação o sol não funcionava!



## 3. interação fraca

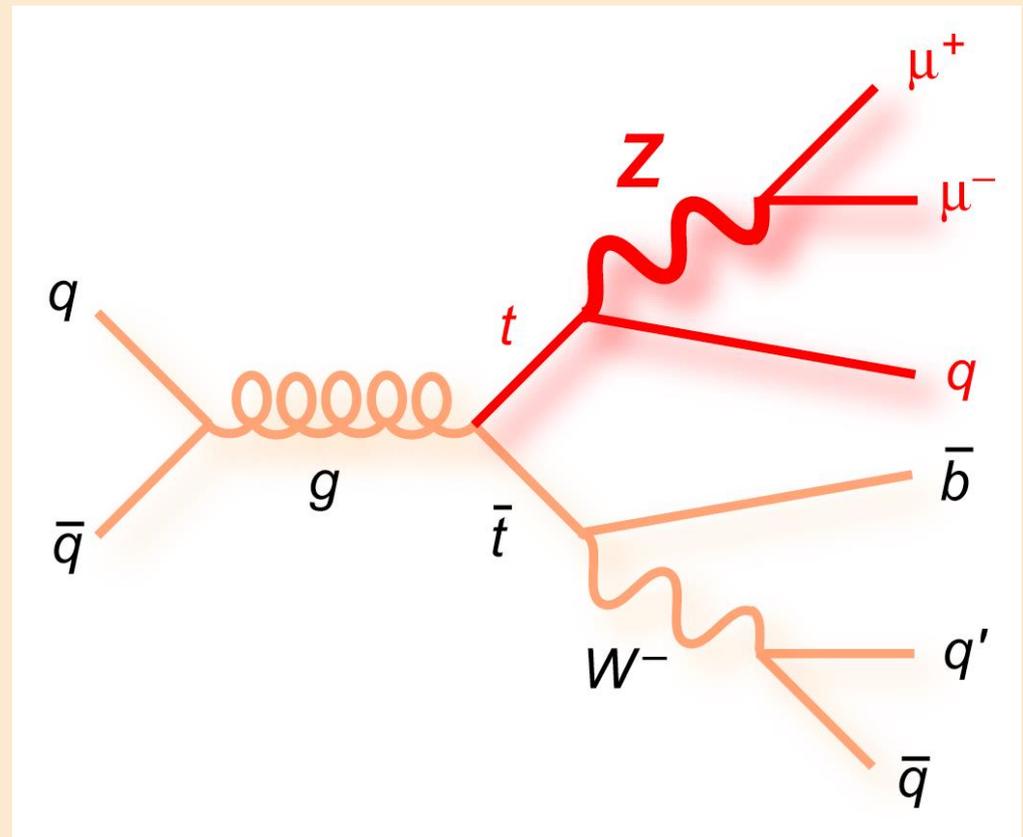
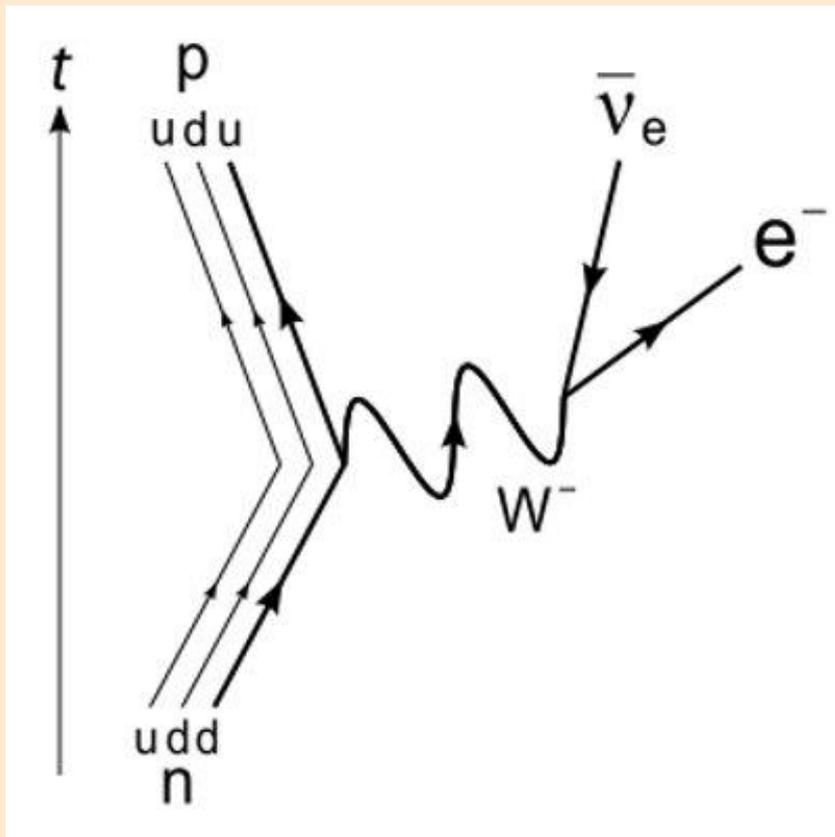
Interage com os quarks e leptões.  
Responsável pela desintegração dos quarks e leptões pesados.

### 3. interação fraca

## bosões W e Z

## intermediários da força fraca

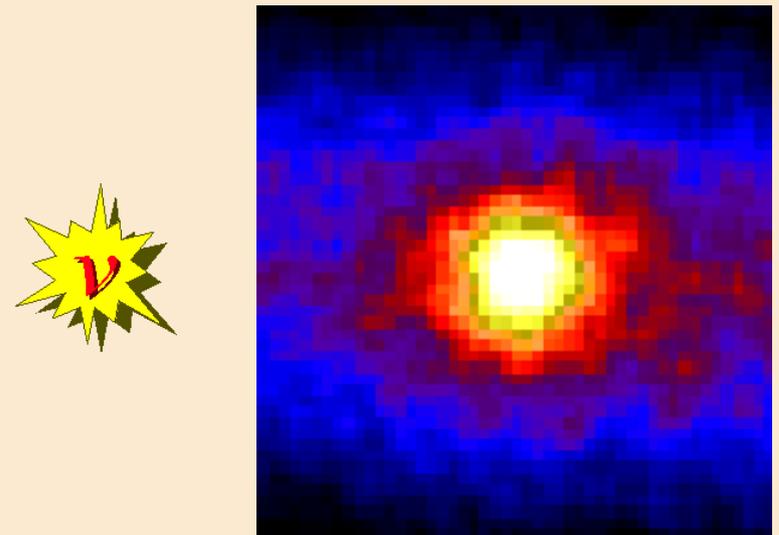
explicam o decaimento do neutrão e do quark top, por exemplo



# neutrinos (vindos do sol)

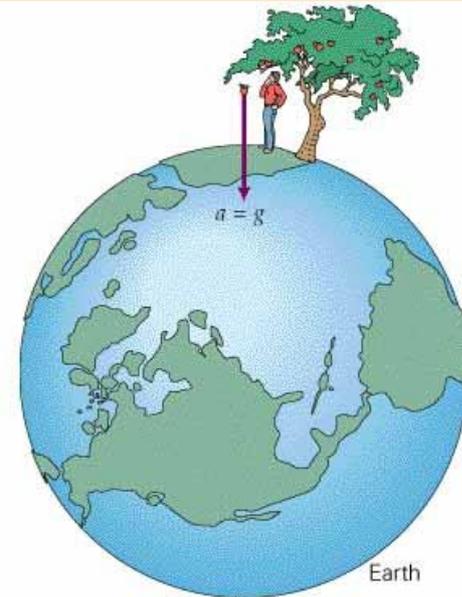
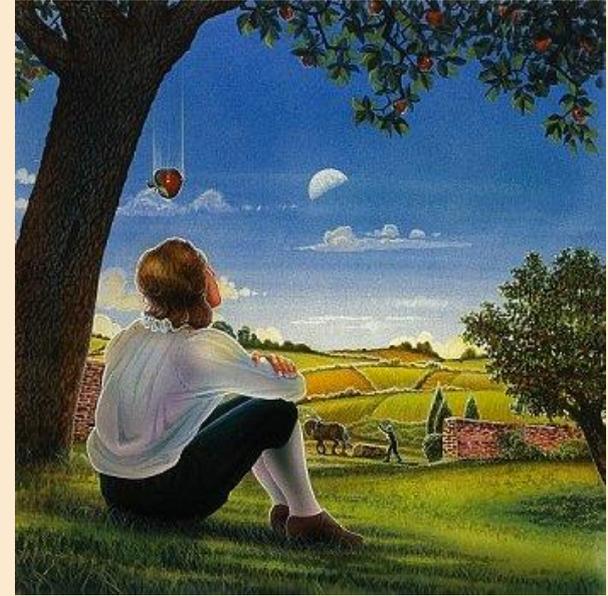
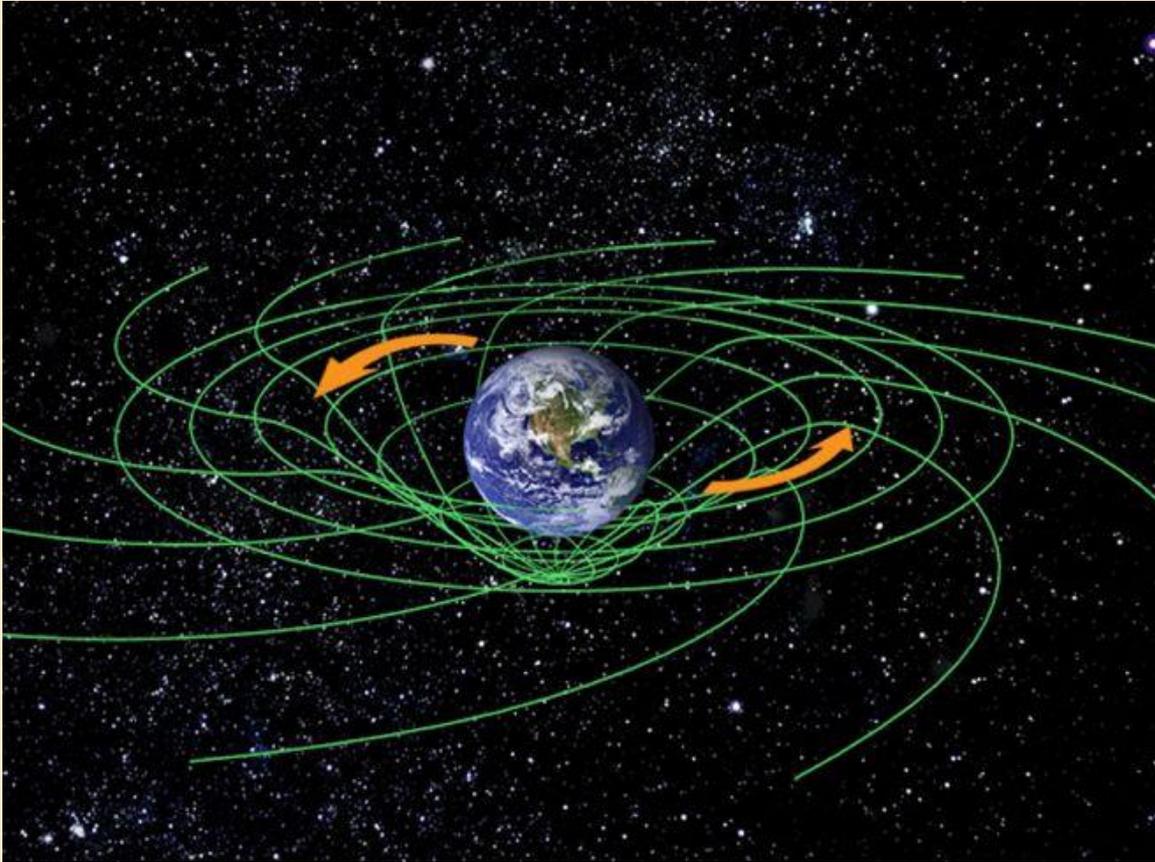
**questões:** o que são neutrinos? quantos neutrinos solares passam por uma unha num segundo?

são partículas que não possuem **carga**, quase sem **massa** e praticamente não interagem i.é, podem atravessar a Terra sem sofrer interação! passam 40 mil milhões por segundo pela área de uma unha!!!!



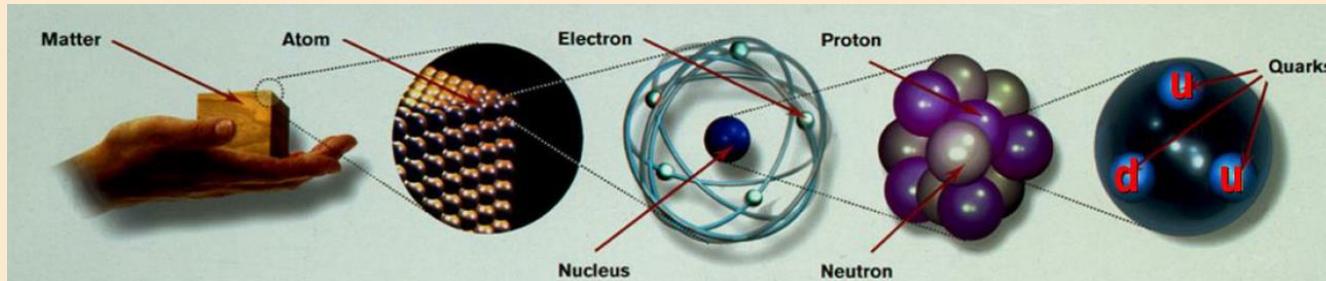
fotografia do sol  
obtida com neutrinos

## 4. interação gravítica



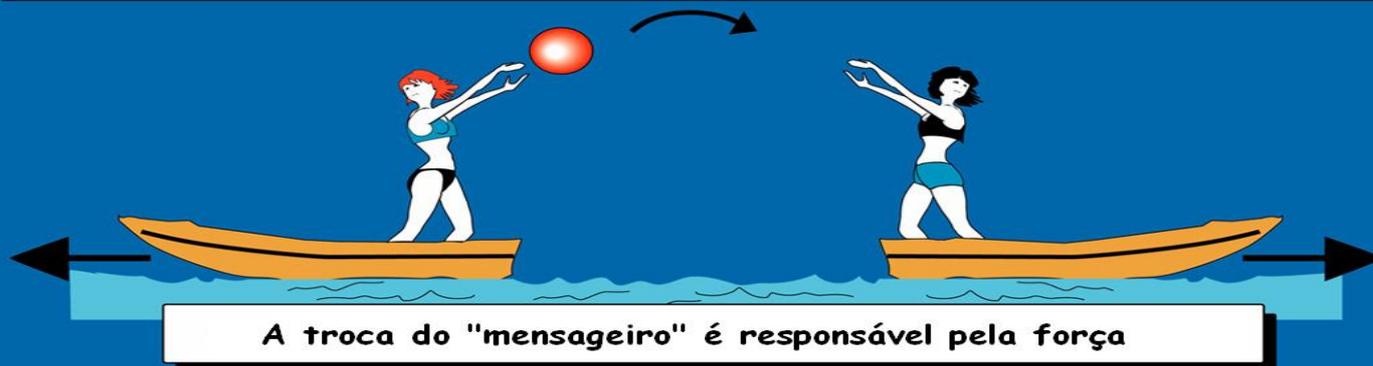
(a)

# As interacções fundamentais da natureza:



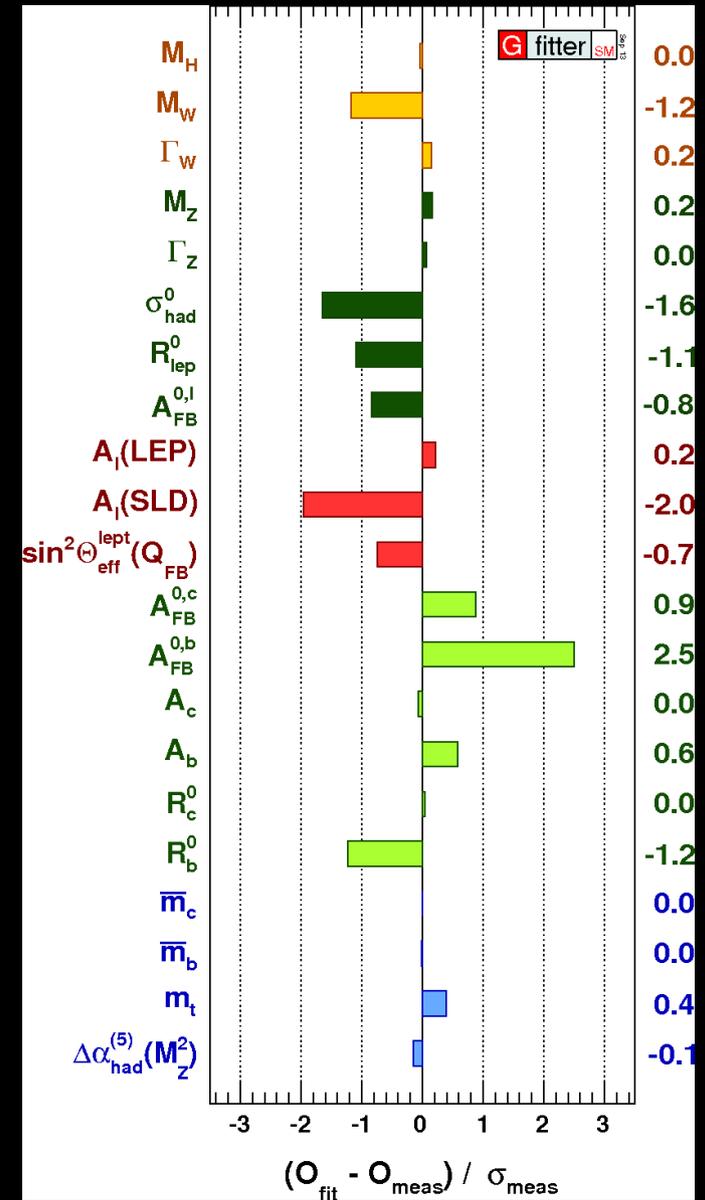
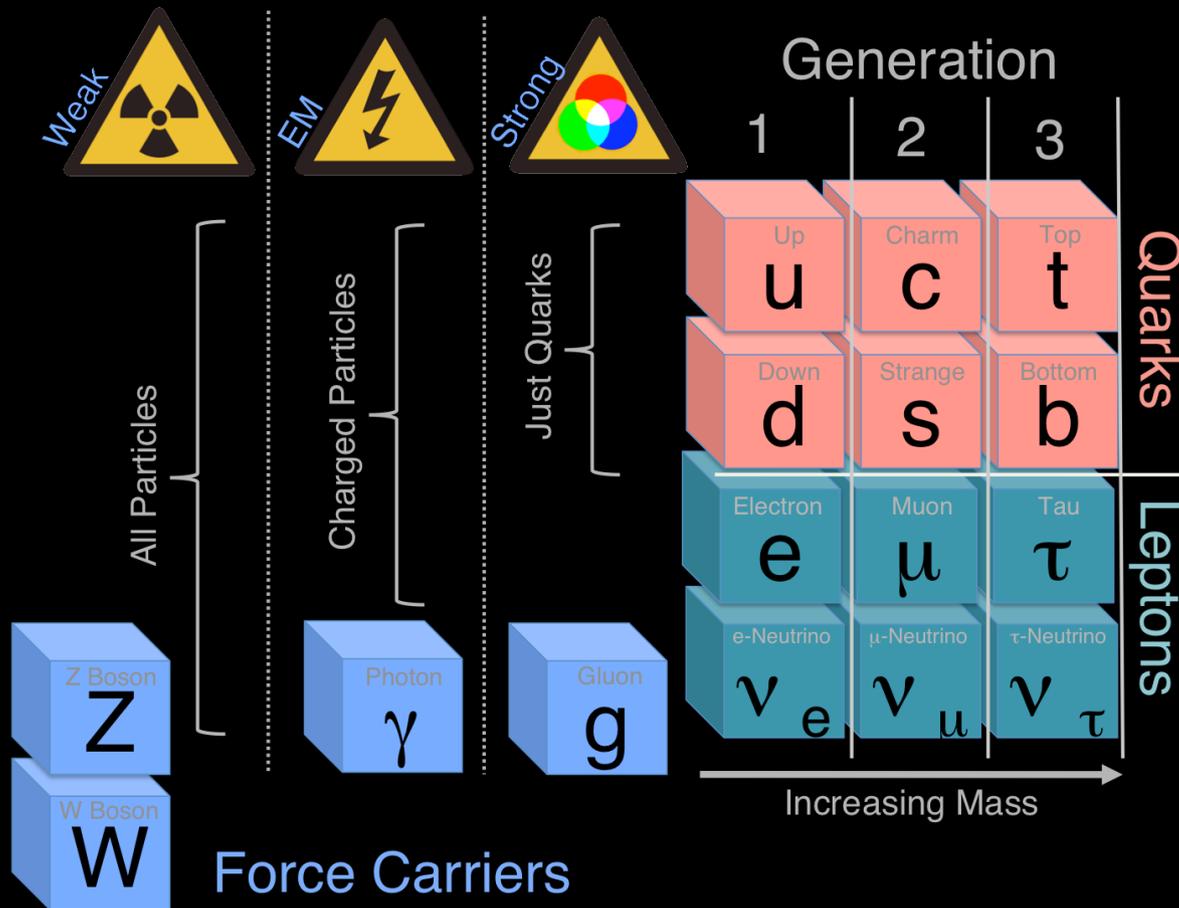
mesma  
interacção

Tipo	Intensidade	Mensageiro	Ocorre em:
Interacção Forte	$\sim 1$	Gluões	Núcleo
Interacção Electromagnética	$\sim 10^{-3}$	Fotões	Átomo
Interacção Fraca	$\sim 10^{-5}$	$Z^0, W^+, W^-$	Radioactividade
Interacção Gravítica	$\sim 10^{-38}$	Gravitões (?)	Corpos Celestes



# O Modelo Padrão da Física de Partículas

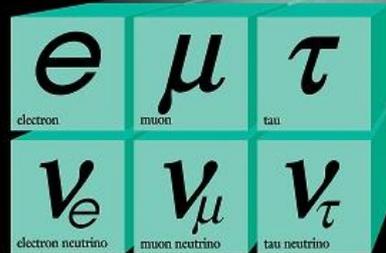
(unifica as interações eletromagnética e fraca)



# O Modelo Padrão da Física de Partículas

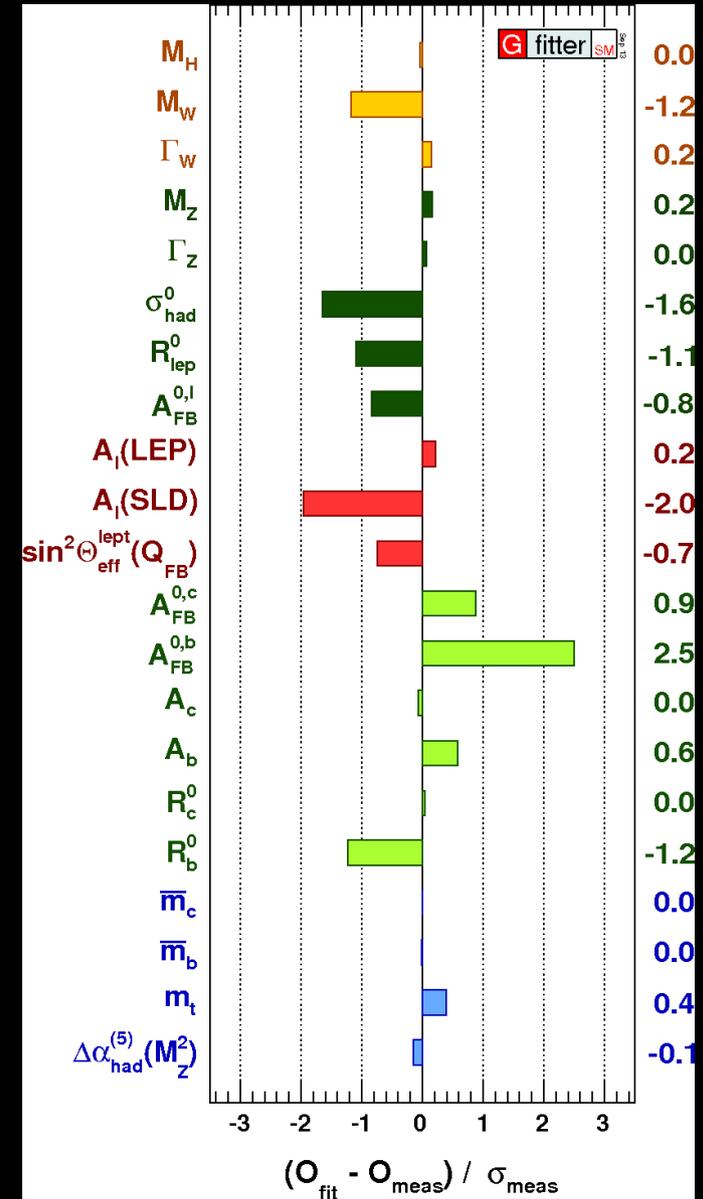
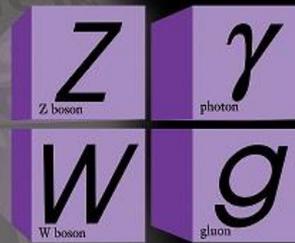
(unifica as interações eletromagnética e fraca)

## Quarks



## Leptons

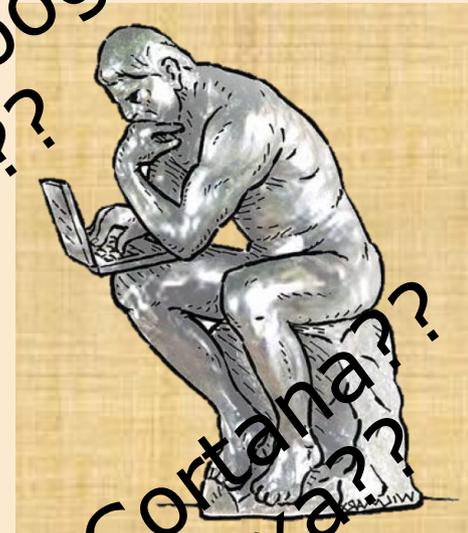
## Forces



# Questões:

- ❑ Como pode o Universo ser tão diverso?
- ❑ Qual é a origem da massa?
- ❑ O que é o bosão de Higgs?
- ❑ Mas então em que se baseiam estas teorias da Física de Partículas?

Ok google?!?!  
Siri???



Cortana???  
Alexa???

## *Simetria*

- A física fundamental é regida por **simetrias** subjacentes, mas essas **simetrias** **proíbem** as **partículas de ter massa**
- As simetrias têm de ser **quebradas** de tal maneira que **mantêm as propriedades da teoria**

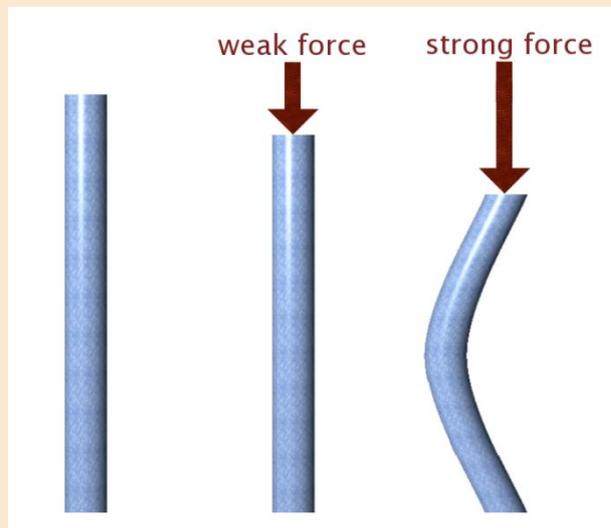
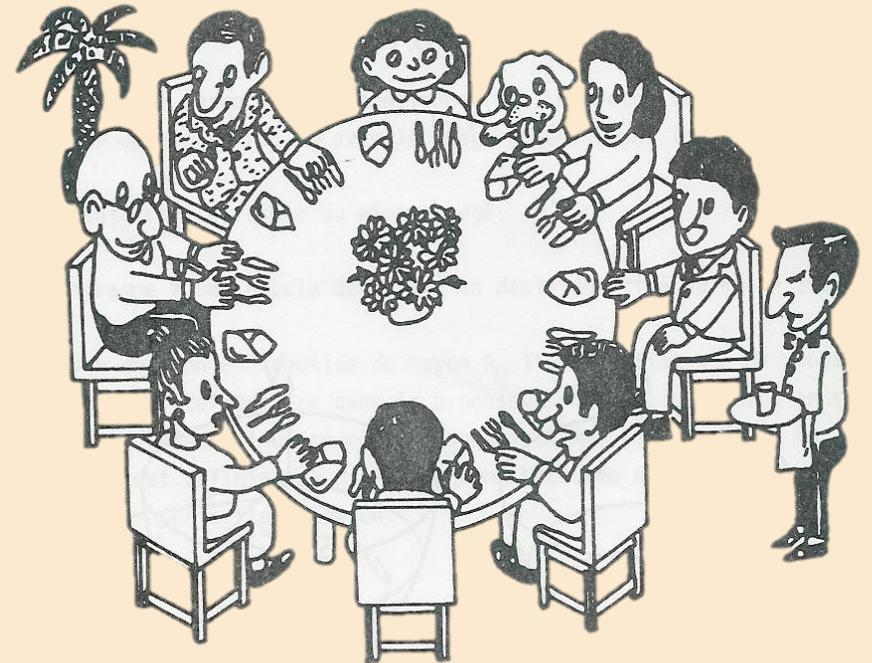
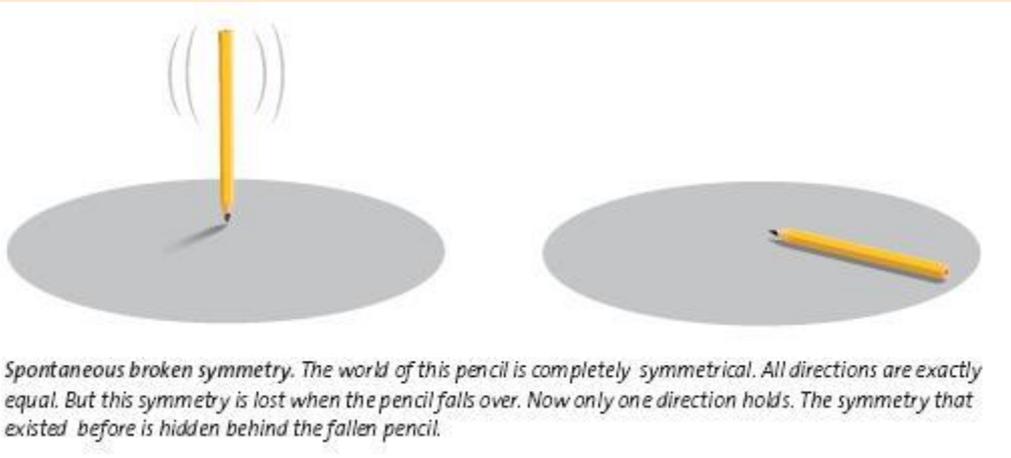
- Simetria axial (ou de reflexão) no mundo animal: um dos exemplos mais conhecidos



- Simetria rotacional



# Quebra espontânea de simetrias: fazer escolhas, criar diferenças



# As leis da Física obedecem a certas simetrias

Emmy Noether (1882-1935):

**A cada operação de simetria corresponde uma lei de conservação.**

- ❑ Simetria de translação no espaço → **conservação do momento linear**
- ❑ Simetria de rotação no espaço → **conservação do momento angular**
- ❑ Simetria de translação no tempo → **conservação da energia**



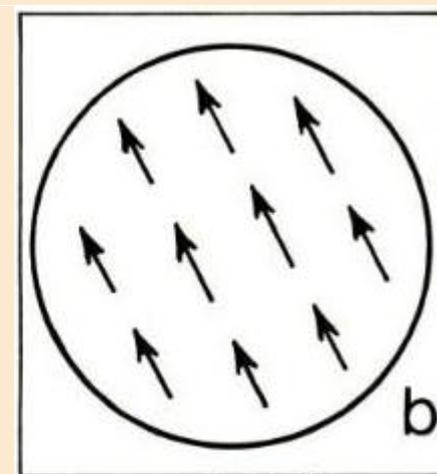
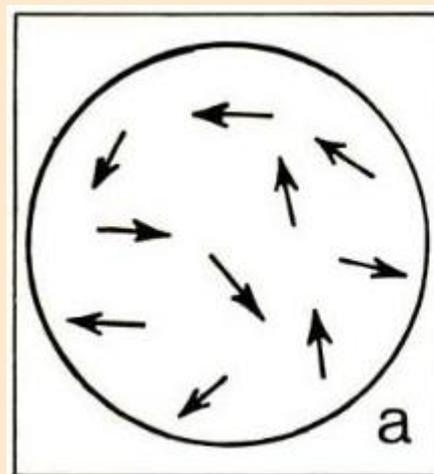
# Quebra espontânea de simetria em materiais ferromagnéticos

Magnetite:



$$T > T_c$$

O magnete perde as suas propriedades magnéticas :  
**a Simetria manifesta-se!**



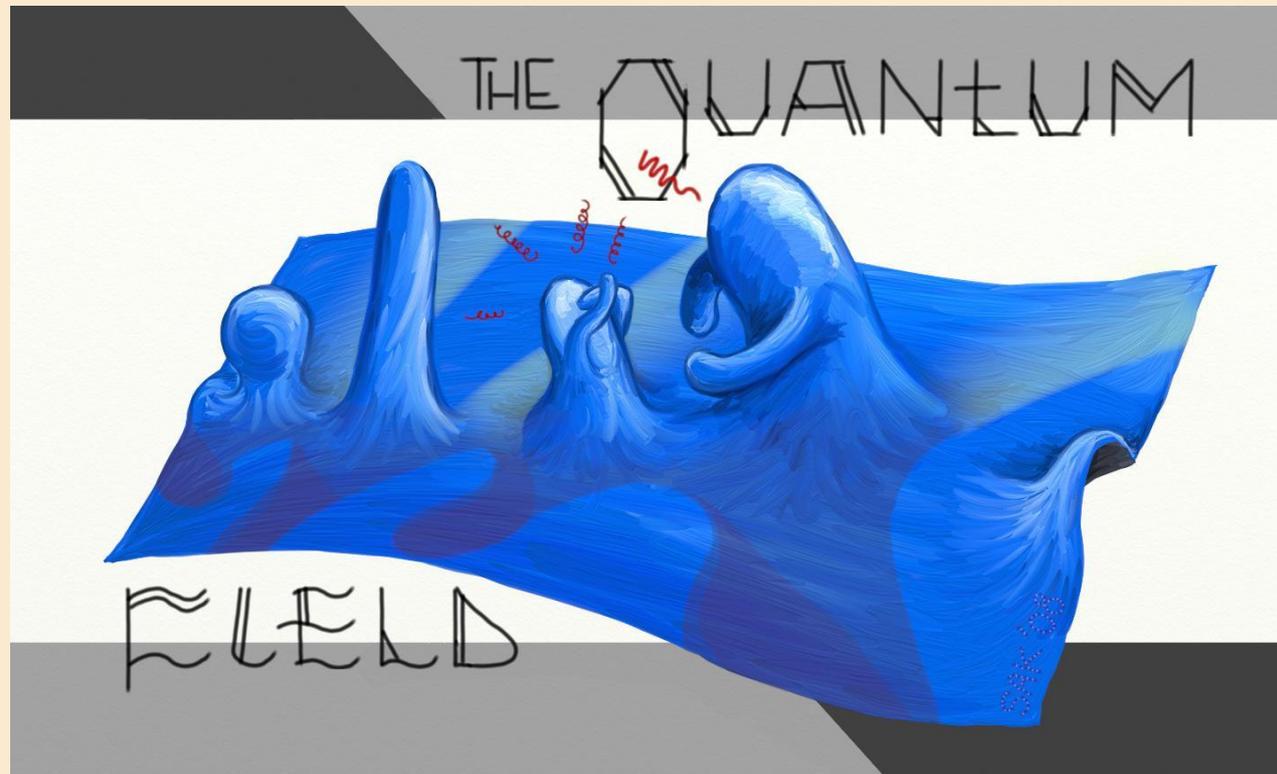
$$T < T_c$$

O magnete arrefece:  
recupera espontaneamente a magnetização  
(tem um pólo norte e um pólo sul)  
**a Simetria é quebrada espontaneamente  
ou está escondida**

# Higgs: Um nome para 4 diferentes aspectos!

## 1. Campo de Higgs:

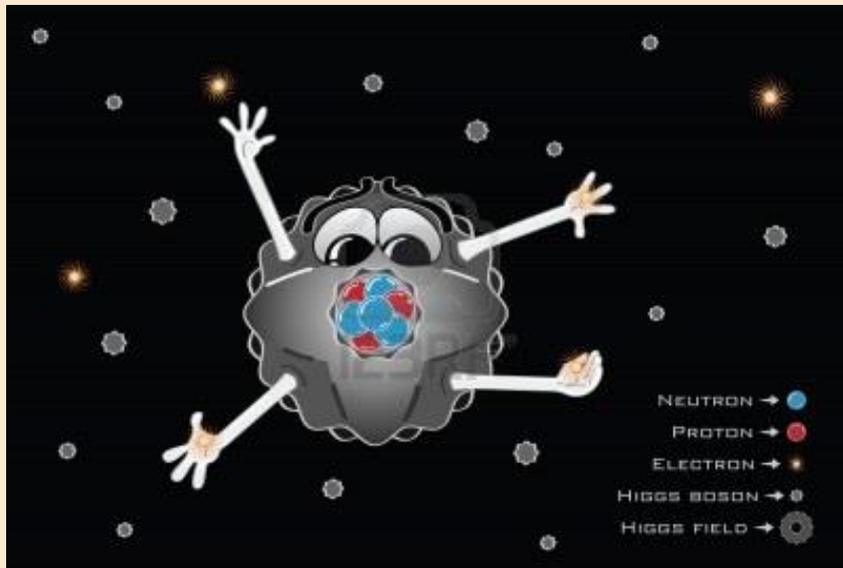
- preenche todo o Universo (intrínseco)
- dá massa às partículas: ao atravessar o campo de Higgs as partículas interagem com o campo e adquirem massa



# Higgs: Um nome para 4 diferentes aspectos!

## 2. “Mecanismo” de Higgs:

(vem da quebra espontânea da simetria eletrofraca)



- **Simetria restaurada (altas energias):**
  - ✓ unificação da força fraca e do eletromagnetismo;
  - ✓ Partículas constituintes sem massa!!!
- **Simetria quebrada (baixas energias) :**
  - ✓ interações fraca e eletromagnética são distintas;
  - ✓ Partículas constituintes têm massa!!!
- **Prevê a existência de uma partícula**

# Higgs: Um nome para 4 diferentes aspectos!

**3. Bosão de Higgs:** é a evidência da existência do **Campo de Higgs**



**4. Peter Higgs!**



# Partícula que atravessa o Campo de Higgs sem interagir:



Partícula sem massa!

Partícula que atravessa o Campo de Higgs e com ele interage:



Partícula com massa!

Partícula que atravessa o Campo de Higgs e com ele interage:



Partícula com **muita** massa!

# Bosão de Higgs no Campo de Higgs:



No momento do Big-Bang, supõe-se que o universo estava concentrado num ponto, com densidade e temperatura elevadíssimas.



<https://www.bbc.com/portuguese/geral-45170971>

- ❑ Imediatamente após o Big Bang, o universo é completamente simétrico, sem factos excepcionais!
- ❑ À medida que arrefece, as simetrias vão-se quebrando: ao quebrar as simetrias o universo fez escolhas.
- ❑ Isto levou a uma maior diversidade de estruturas.
- ❑ A massa das diferentes partículas resulta de uma quebra de simetria associada ao bóson de Higgs.

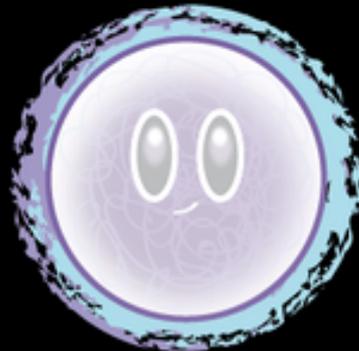
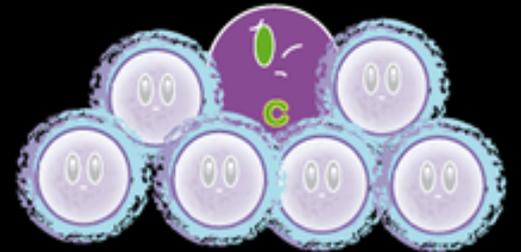
$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}$$



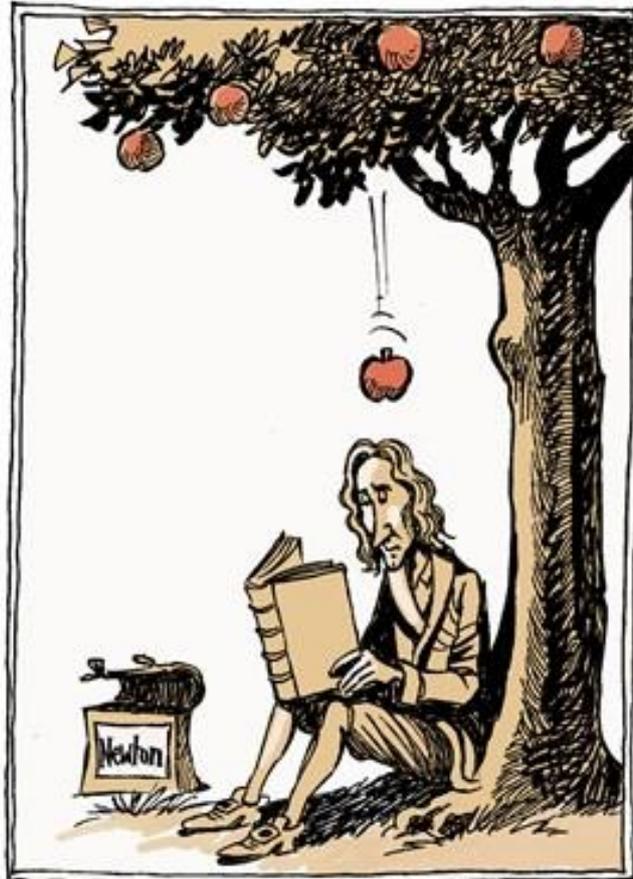
$$+ i \bar{\psi} \not{D} \psi + h.c$$

$$+ \bar{\psi}_i \gamma_{ij} \psi_j \phi + h.c$$

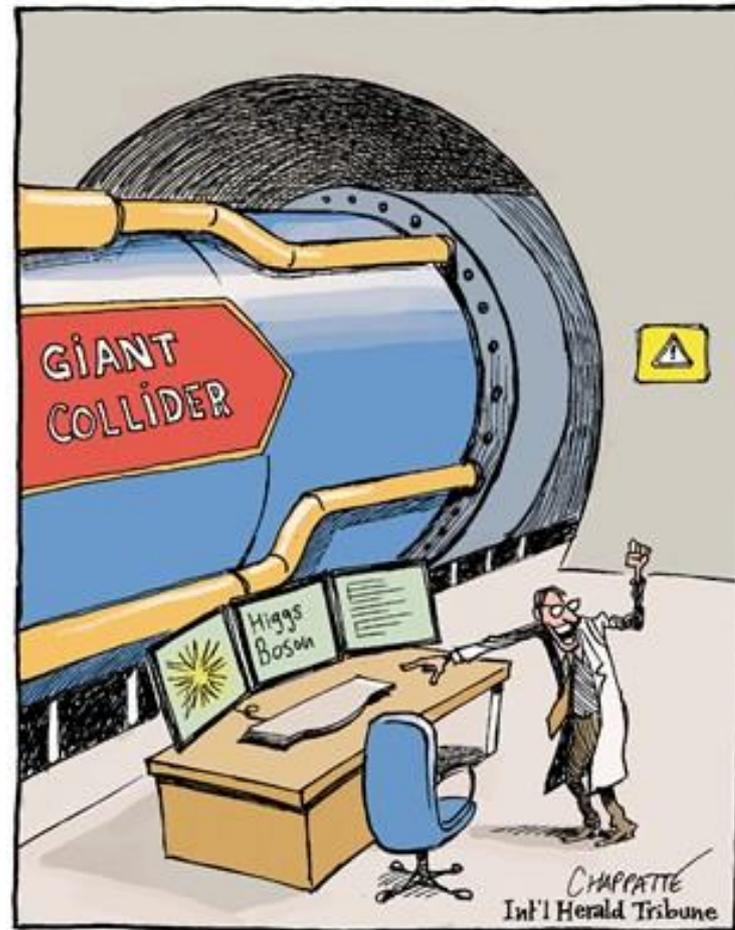
$$+ |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)$$



# Collisions That Changed The World



CagleCartoons.com



CHAPPATTE  
Int'l Herald Tribune

# Um trabalho coletivo!

ATLAS:  
3000 cientistas  
33 países  
177 institutos

CMS:  
Aproximadamente o  
mesmo!!



# quais os benefícios de tanto trabalho?

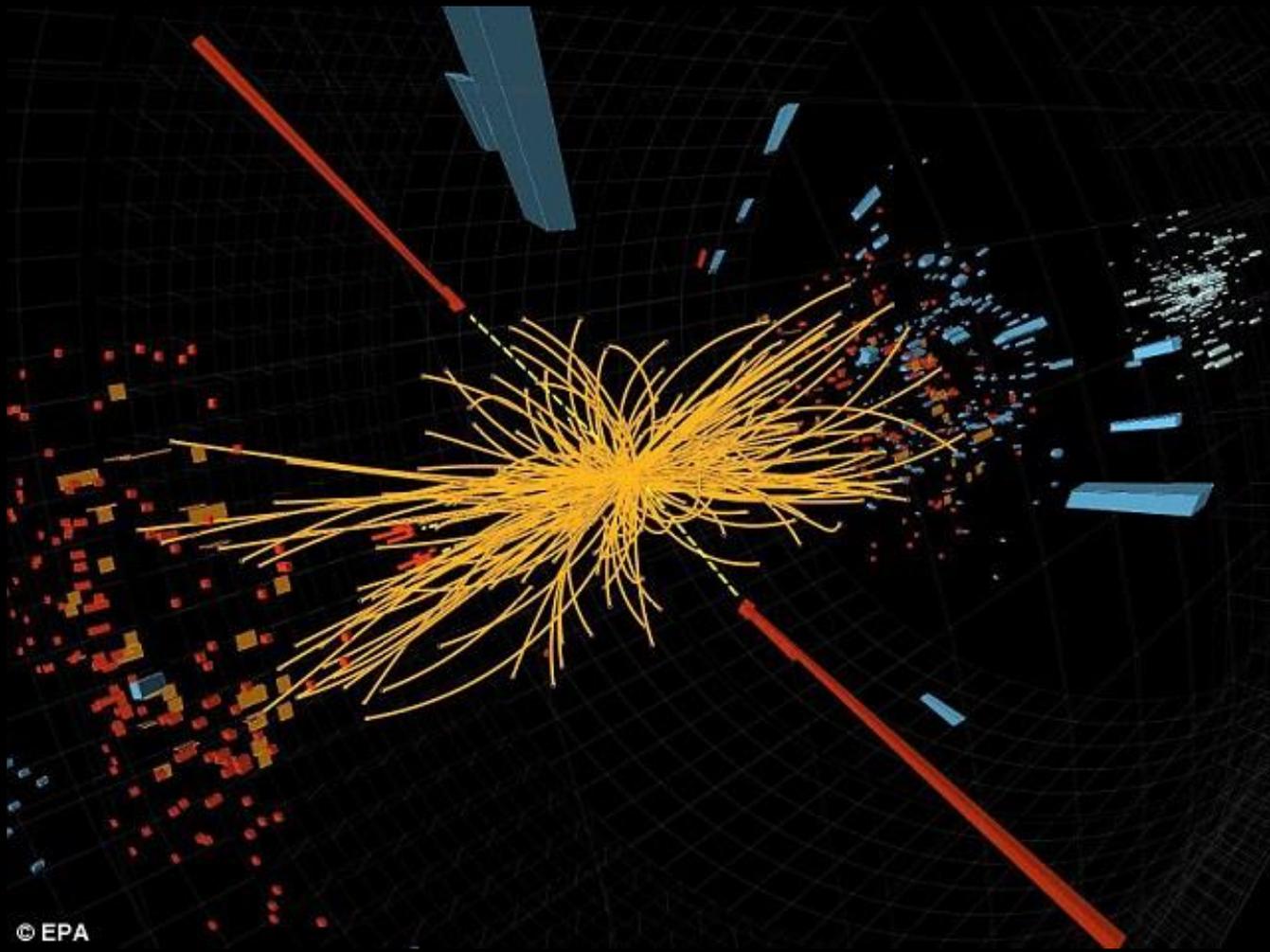
os **benefícios práticos** da física de partículas:

- a descoberta dos elétrons ligou o mundo à corrente elétrica (imaginem se não existisse...)
- a descoberta dos  $e^+$  deu-nos o PET
- a world wide web foi criada no CERN...
- de acordo com a Sociedade Europeia de Física, a indústria com base na Física representava, em 2016, cerca de 12% da economia europeia, e 12% do emprego a nível europeu

os **benefícios intelectuais** da física de partículas:

- a maior aventura de todas é a viagem da descoberta científica
- uma melhor compreensão do universo





© EPA

# FIM