

O bóson de Higgs e a massa das coisas



F.S. Navarra

Instituto de Física

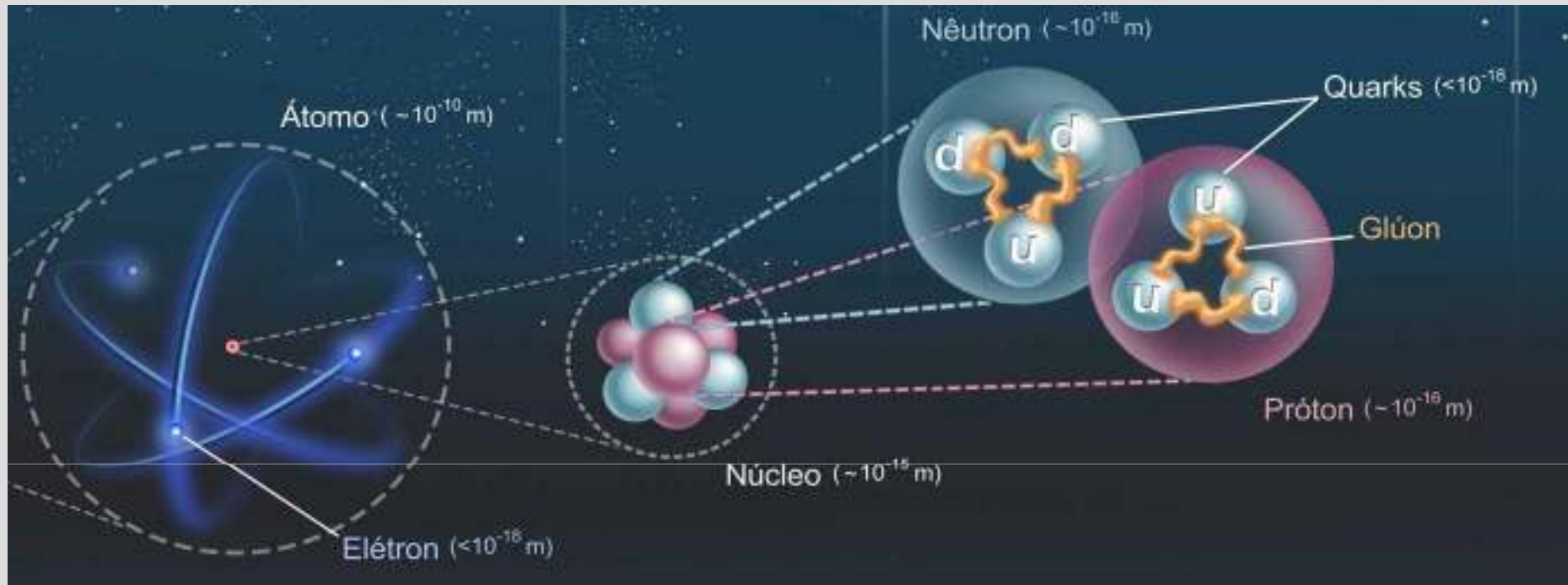
Universidade de São Paulo

navarra@if.usp.br

Parte I

O lado qualitativo

O Modelo Padrão



Portadores de força

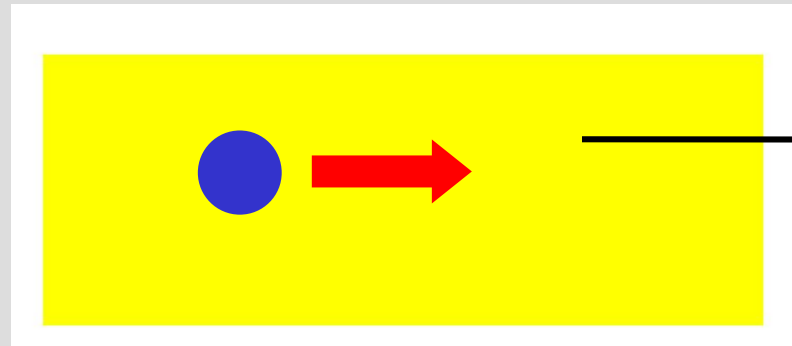
Higgs

PARTÍCULAS MEDIADORAS	Interação Eletromagnética	FÓTON			QUARKS	<i>u</i>	<i>c</i>	<i>t</i>
	Interação Fraca	W^+	Z^0	W^-		<i>d</i>	<i>s</i>	<i>b</i>
	Interação Forte	GLÚON				<i>u</i>	<i>c</i>	<i>t</i>
	Interação Gravitacional	GRÁVITON				<i>d</i>	<i>s</i>	<i>b</i>
						<i>u</i>	<i>c</i>	<i>t</i>
LÉPTONS		ν_e	ν_μ	ν_τ		<i>u</i>	<i>c</i>	<i>t</i>
		<i>e</i>	μ	τ	<i>d</i>	<i>s</i>	<i>b</i>	
		elétron	muon	tau	<i>u</i>	<i>c</i>	<i>t</i>	

Matéria:
quarks e leptons

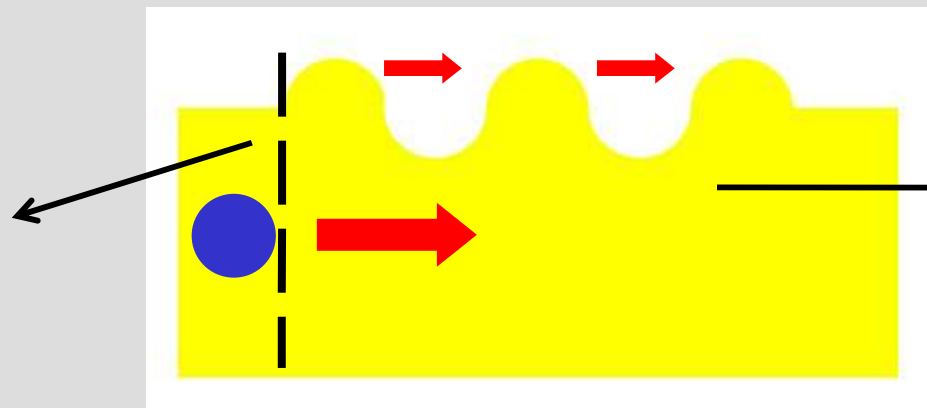
Higgs: o campo e a partícula

meio contínuo,
"líquido" :
campo de Higgs

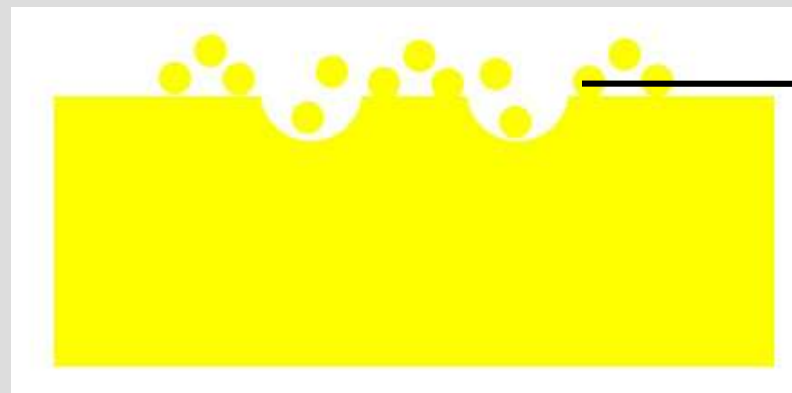


meio atrapalha
o movimento da
partícula: **inércia**

para balançar
o meio:
Muita energia!



partícula pode
"balançar" o
meio : onda



onda é
quantizada:
partícula de
Higgs

LHC : colisões a altíssimas energias

FOLHA DE S. PAULO

DIRETOR DE REDAÇÃO: OTAVIO FRIAS FILHO

QUARTA-FEIRA, 10 DE SETEMBRO DE 2008

ANO 88 ★ Nº 29.015

EDIÇÃO SÃO PAULO/DF. CONCLUÍDA ÀS 23H36 ★ R\$ 2,50

ciência

Maior máquina construída pelo homem entra hoje em operação

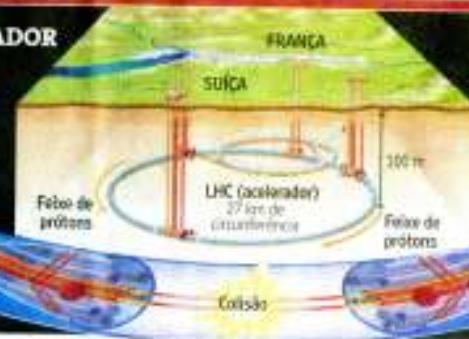
Começa a operar hoje o acelerador de partículas LHC (Grande Colisor de Hádrons), maior máquina já feita pela humanidade.

Com o LHC, os cientistas poderão ter a chance de estudar partículas desconhecidas, apenas previstas teoricamente.

Pág. A17

COMO É O ACELERADOR

1 O LHC vai acelerar prótons a altíssimas velocidades e fazê-los colidir entre si para investigar o que compõe a matéria e a energia



2 Dois feixes de prótons percorrerão um túnel circular de 27 km. A energia total de cada um é comparável à de um trem de 600 toneladas viajando a 150 km/h

Os experimentos vão gerar a cada ano mais de 10 milhões de gigabytes de dados. Para gravar tudo isso seria preciso uma pilha de CDs com 20 km de altura

Cada próton chegará a $99,9999991 \frac{0}{10}$ da velocidade da luz

9 bilhões de dólares: vale a pena ?

"A ciência pura é como um recém-nascido"

1916 - Relatividade Geral \longrightarrow 1994 - GPS

Precisão:

com RG: 10 m

sem RG: 10 km

Colisões próton-próton

Revolução da física sairá do subterrâneo

LHC, monumental acelerador de partículas enterrado na Europa, pode resolver problemas que atormentam os físicos

NÃO SERÁ O FIM DO MUNDO, mas a maior máquina já construída na história, enterrada sob a fronteira da Suíça com a França, poderá formar até pequenos buracos negros, devido à sua energia. As colisões de núcleos de átomos no túnel de 27 km do LHC (Grande Colisor de Hádrons) vão gerar uma montanha de dados. Veja como o acelerador funciona.

POR DENTRO DA SUPERMÁQUINA

Conheça o LHC, o maior acelerador de partículas já construído

▶ O QUE É

▶▶ O LHC (Grande Colisor de Hádrons) vai **acelerar prótons** (partículas contidas no núcleo de átomos) a **altíssimas velocidades e fazê-los colidir entre si**. Essas colisões produzem diversos outros tipos de partículas, permitindo aos físicos investigar o que compõe a matéria e a energia no nível mais elementar

▶ COMO É

▶▶ Dois feixes de prótons percorrerão um túnel circular de 27 km. Um seguirá no sentido horário, outro no anti-horário. Os dois raios têm espessura de um sétimo de um fio de cabelo, mas a energia total de cada um é **comparável à de um trem de 400 toneladas viajando a 150 km/h**

Onde fica

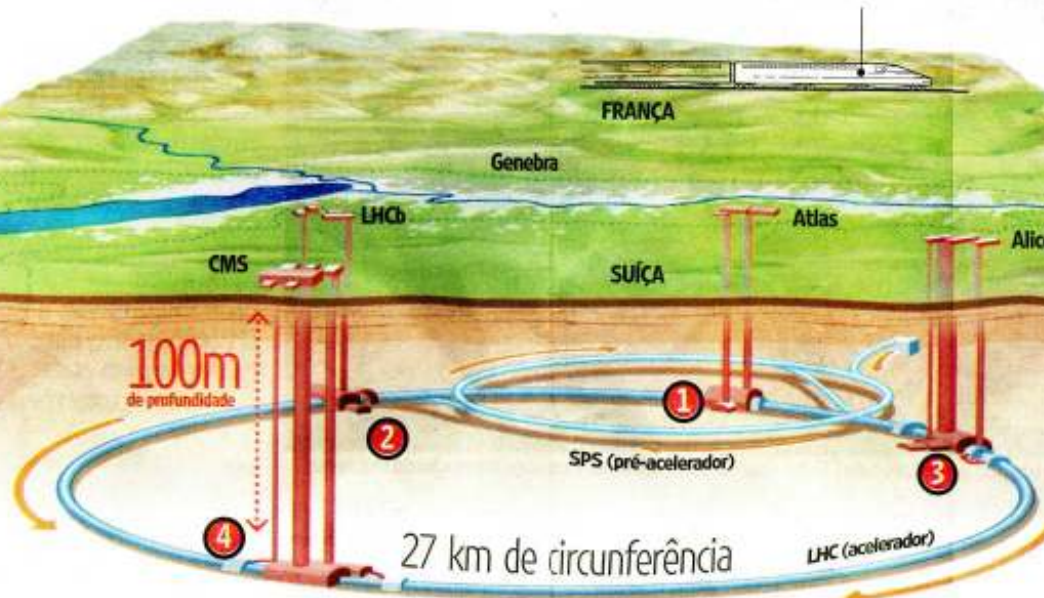


FRANÇA



GELADEIRA GIGANTE

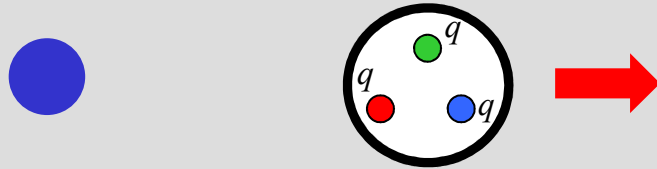
▶▶ Os ímãs que darão impulso aos prótons no túnel do LHC funcionam resfriados por hélio líquido a **-271,3°C** — mais frio do que no espaço sideral



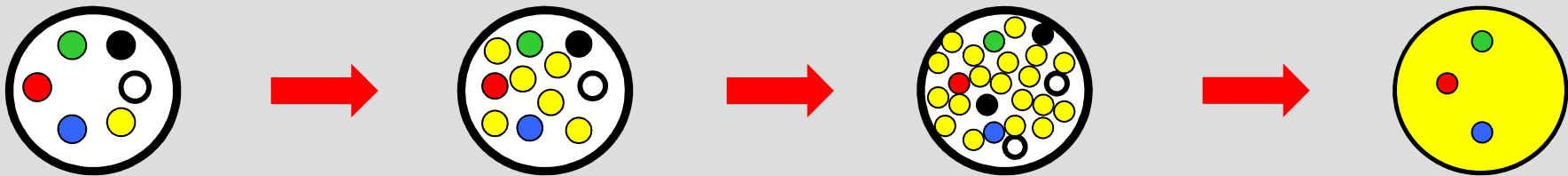
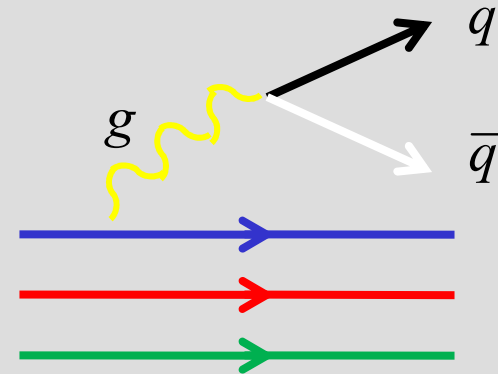
VELOCIDADE MÁXIMA

▶▶ Cada próton no LHC dará 11.245 voltas no detector a cada segundo, viajando a 99,9999991% da velocidade da luz. Um feixe de prótons pode viajar durante dez horas no detector, cobrindo mais do que a distância de ida e volta a Netuno

Próton observado a altas energias



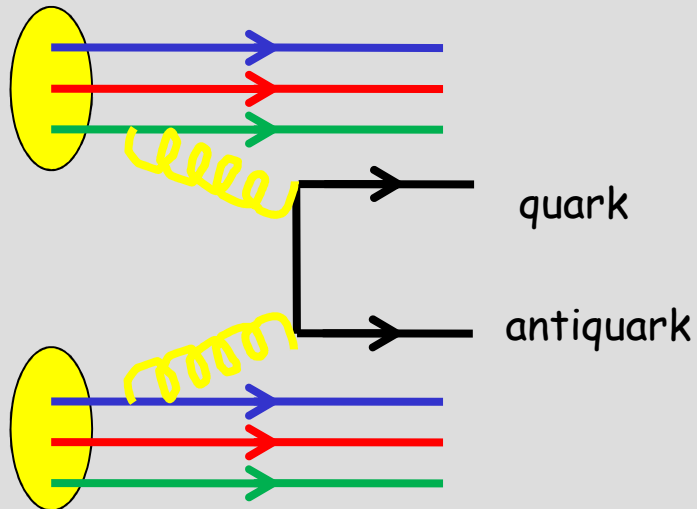
Aumentando a energia vemos flutuações:



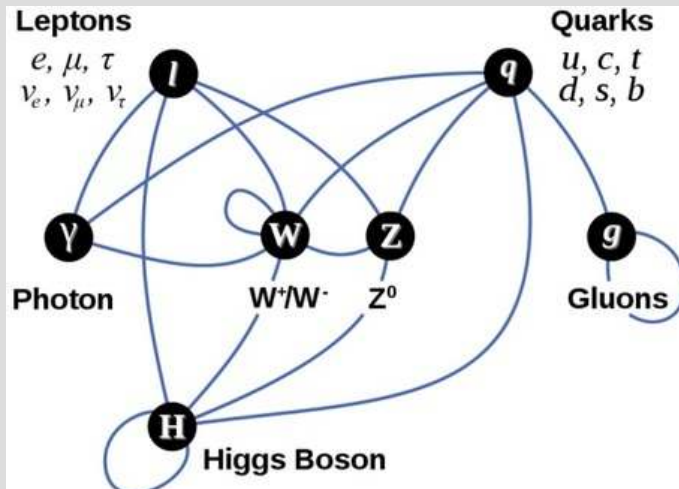
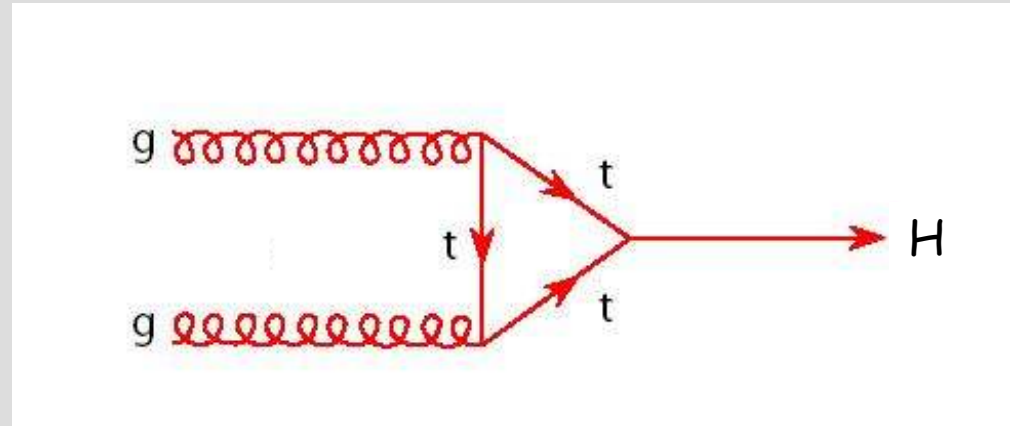
"vidro de cor"

Esperamos observar o vidro de cor no LHC

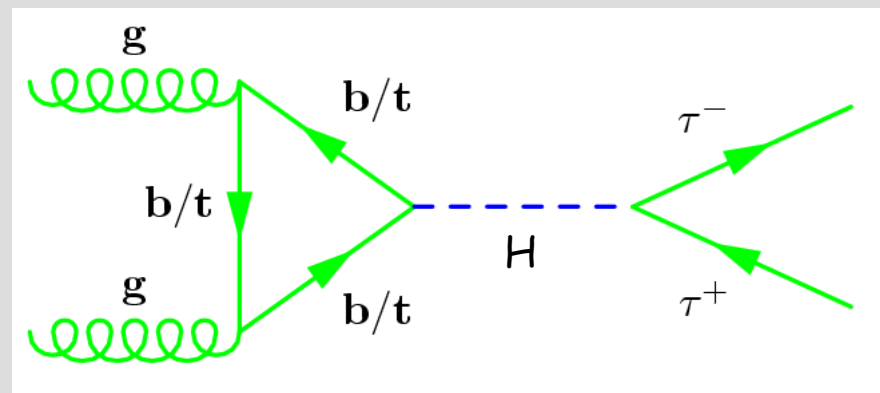
Colisão próton-próton



Produção



Decaimento



Observação do bóson de Higgs

Depende da massa do Higgs

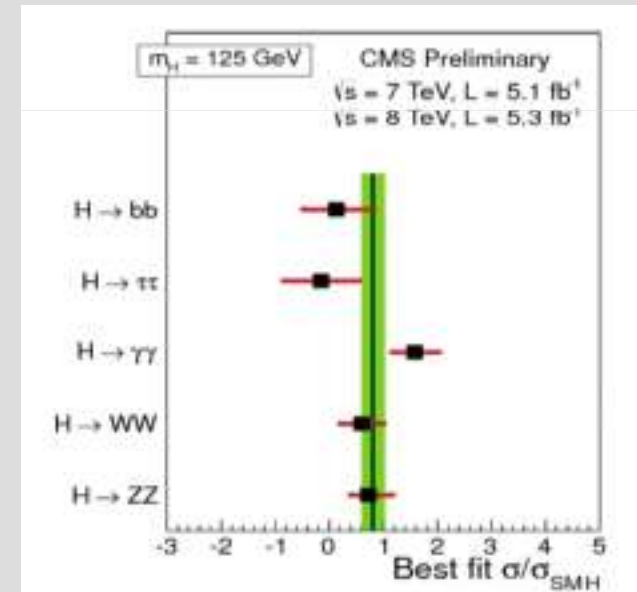
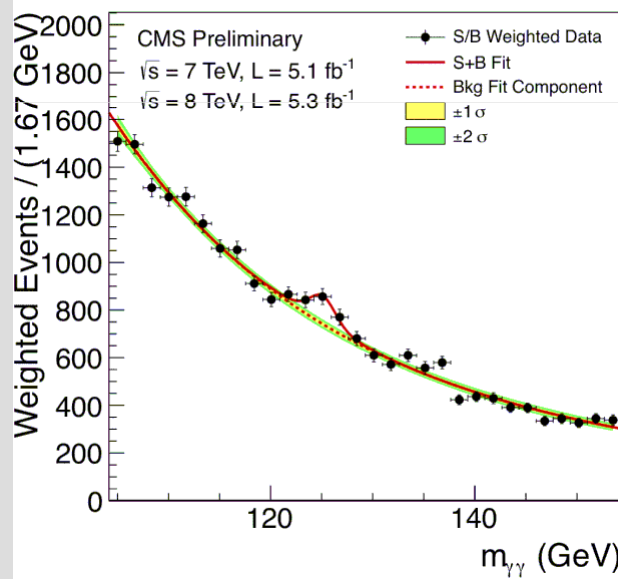
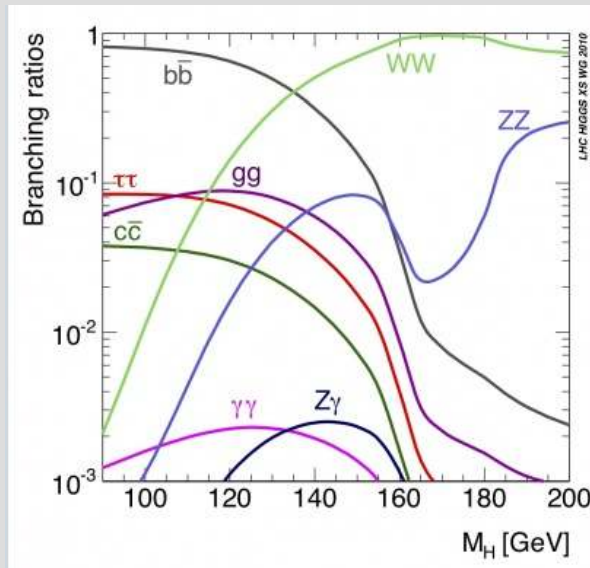
$$m_H = 125 m_p$$

$$m_p = 1 \text{ GeV} / c^2$$

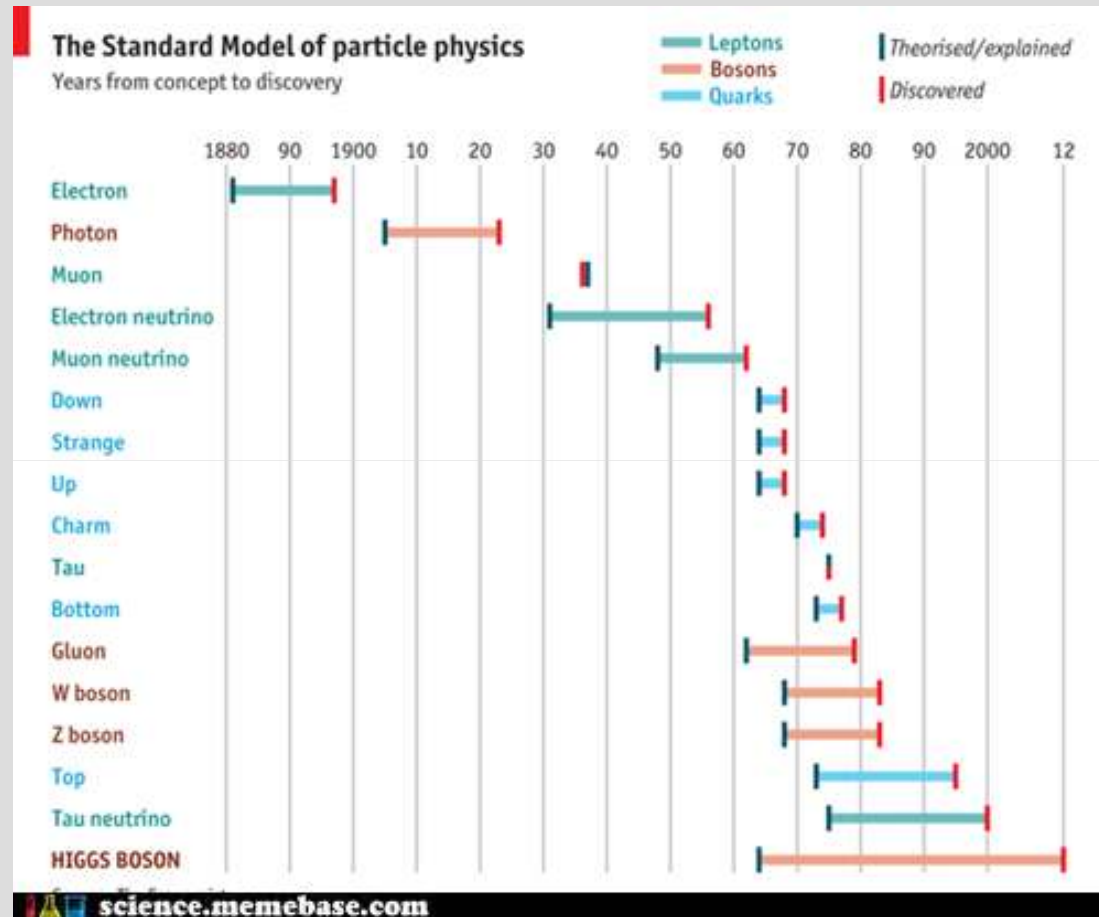
"canais" de decaimento

$H \rightarrow$ dois fótons

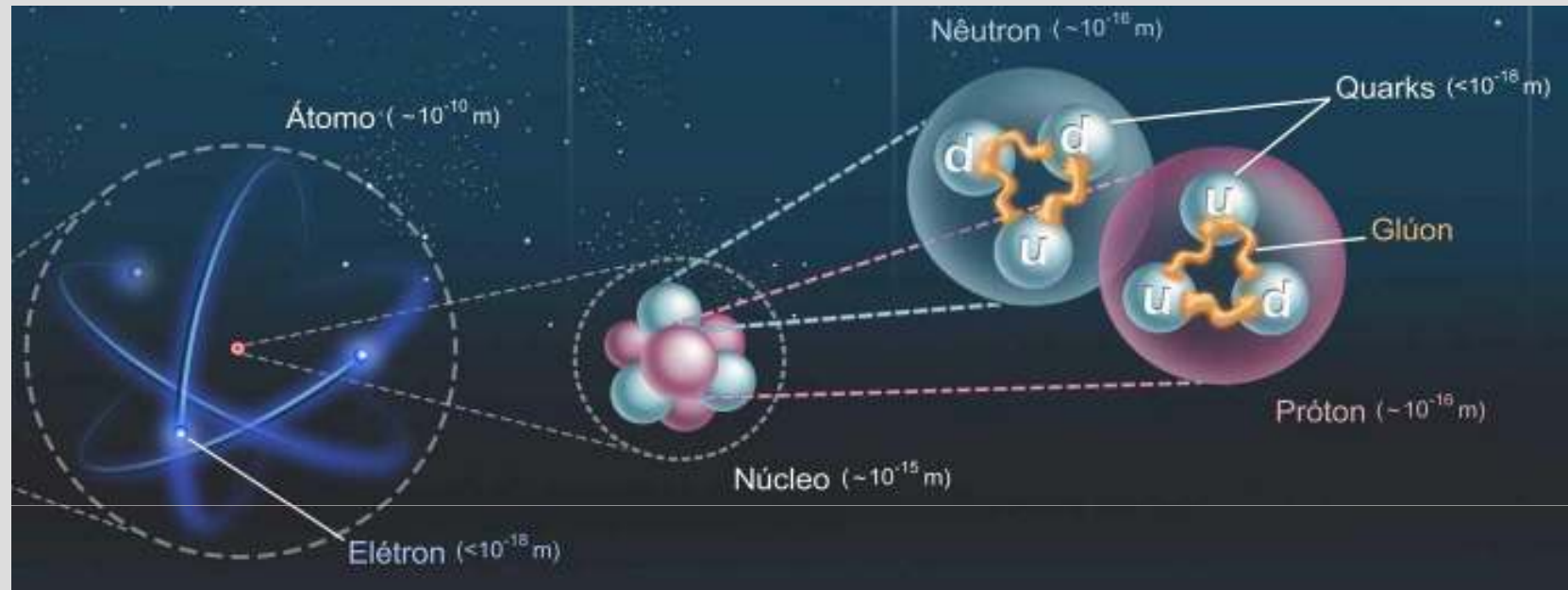
teoria versus dados



O fim da mais longa espera !



O Higgs e as massas das coisas



Todas as coisas são feitas de protons, neutrons e eletrons

Massa do próton = massa do nêutron = 2000 massa do elétron

Massa das coisas = massa do protons + massa do neutrons

A massa do próton vem do Higgs ?

A massa do próton

Higgs {
 massa do elétron : m_e
 massa do quark u : $20 m_e$
 massa do quark d : $20 m_e$

$$m_u + m_u + m_d = 60 m_e$$

$$m_p = 2000 m_e$$

Higgs gera apenas 3 % da massa do próton e das coisas !

De onde vem 97 % da massa do próton ?

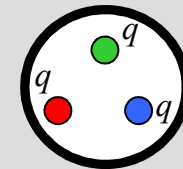
O que é o próton ?

Até 1960 : uma bolinha com carga elétrica

1962: uma bola feita de pions (modelo de Skyrme)

1964 - 1969: três quarks (Gell-Mann, Bjorken, ...)

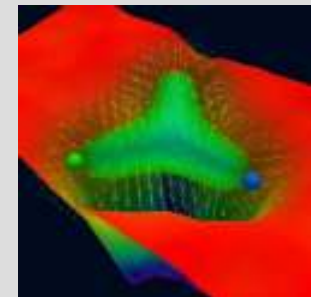
1974: três quarks **confinados** numa "sacola" (MIT bag)



•
•
•

2003: quarks ligados por "cordas" feitas de gluons

•
•
•



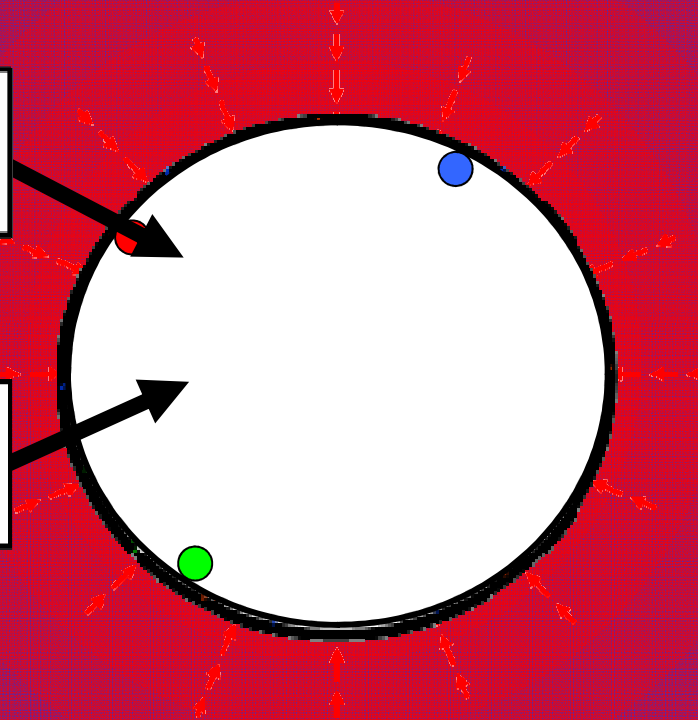
Massa do próton = energia que contém : $E = m c^2$

ENERGIA

AGLOMERADA
CONFINADA ...

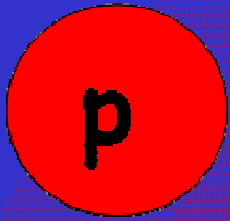
potencial

cinética



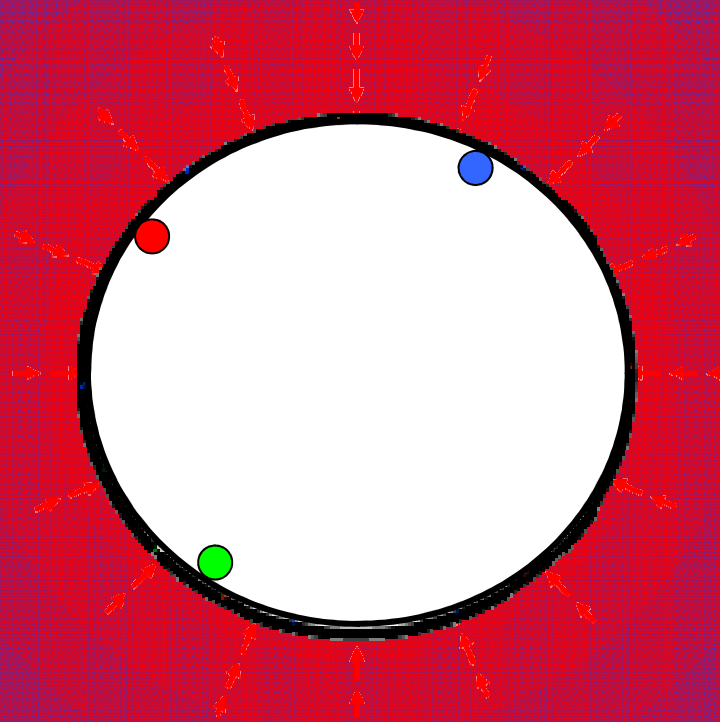
OBJETO

MIT Bag Model

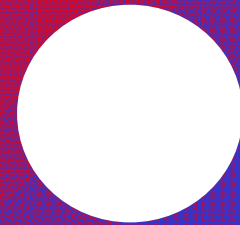


= 100

massas

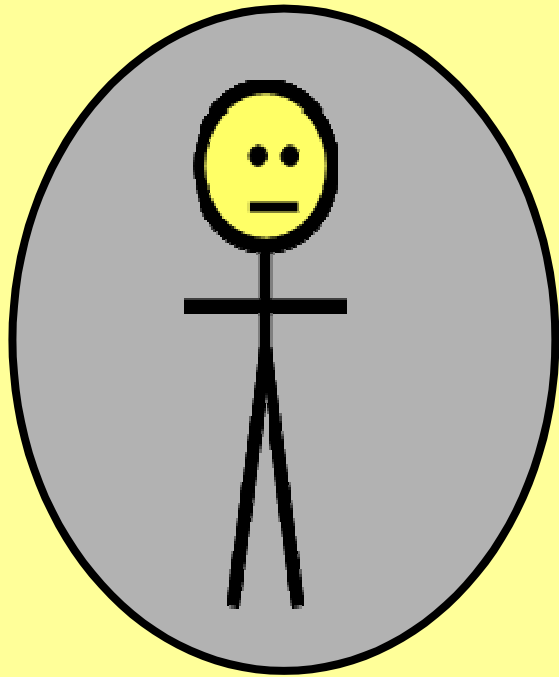


= 3



= 7

A massa de uma pessoa:



$$50 \text{ kg} = 0,025 \text{ kg} \quad \text{elétrons} \\ + 49,975 \text{ kg} \quad \text{núcleos}$$

núcleos = prótons + nêutrons

1,5 kg quarks

3,5 kg vazio

44,975 kg

energia cinética
+ potencial

Conclusão

A descoberta do Higgs é um dos maiores feitos da história da ciência

Mais uma vitória do modelo padrão

Ainda há muito o que fazer...

Parte II

Um pouco de matemática

(evolução da letra "m")

A massa na física

Mecânica Clássica



Isaac Newton

$$F = m_i a$$

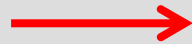
massa inercial

$$F_g = -\frac{GMm_g}{r^2}$$

massa gravitacional
"peso"

$$m_g = m_i = m$$

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = F$$



$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -\frac{dV}{dx}$$

Mecânica Lagrangiana

Lagrangiana

$$L = T - V(x) = \frac{1}{2} m \dot{x}^2 - V(x)$$

Euler-Lagrange

$$\frac{d}{dt} \frac{dL}{d\dot{x}} = \frac{dL}{dx}$$



$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = - \frac{dV}{dx}$$

equação de movimento

Partícula livre

$$E = \frac{1}{2} m v^2$$

Mecânica Relativística



Einstein

Partícula livre

$$E = m c^2 \gamma = \frac{m c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \cong m c^2 + \frac{1}{2} m v^2$$

$$E = m c^2$$

massa = energia de repouso

Não é conservada...

$$p = m v \gamma = \frac{m v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$



$$E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$$

$$E^2 - p^2 c^2 = m^2 c^4$$

m é independente de v , "invariante", "escalar"

Mecânica Quântica Relativística

$$E^2 - p^2 c^2 = m^2 c^4$$

$$x(t) \rightarrow \phi(x, t)$$

$$p \rightarrow -i \hbar \frac{\partial}{\partial x}$$

$$E \rightarrow i \hbar \frac{\partial}{\partial t}$$

$$\left(-\frac{\hbar^2}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \hbar^2 \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) \phi = m^2 c^2 \phi$$

$$x^\mu = (ct, x, y, z)$$

$$x_\mu = (ct, -x, -y, -z)$$

$$\mu = 0, 1, 2, 3$$

$$\hbar = c = 1$$

$$-\frac{\partial}{\partial x^\mu} \frac{\partial}{\partial x_\mu} \phi = m^2 \phi$$

$$-\partial_\mu \partial^\mu \phi = m^2 \phi$$

equação de movimento

Teoria de Campos

$$L \rightarrow \frac{L}{V} = \mathcal{L} \quad \text{Densidade de Lagrangiana}$$

$$L = \frac{1}{2} \partial_\mu \phi \partial^\mu \phi - \frac{1}{2} m^2 \phi^2 \quad \rightarrow \quad \frac{\partial L}{\partial \phi} = \frac{\partial}{\partial x_\mu} \left(\frac{\partial L}{\partial (\partial^\mu \phi)} \right) \quad \rightarrow \quad -\partial_\mu \partial^\mu \phi = m^2 \phi$$

massa = número que multiplica ϕ^2 na densidade de Lagrangiana !

Teoria com interação (energia potencial) :

$$L = \frac{1}{2} \partial_\mu \phi \partial^\mu \phi - V(\phi)$$

$$V = +\frac{1}{2} \mu^2 \phi^2 + \frac{1}{4} \lambda \phi^4$$

$\mu^2 > 0 \rightarrow$ massa !

$\mu^2 < 0 \rightarrow$ sem massa !

Vácuo "cheio" e geração de massa

Vácuo = estado de menor energia

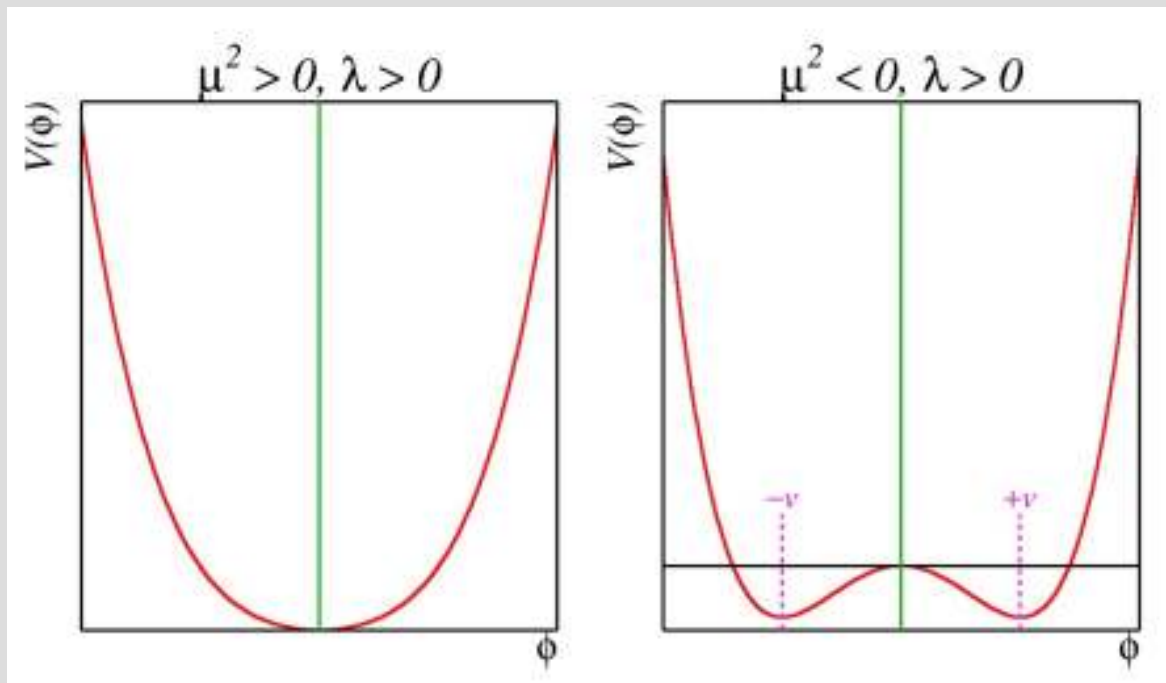
$$p \rightarrow 0 \quad \frac{\partial \phi}{\partial x} \rightarrow 0 \quad E \rightarrow 0 \quad \frac{\partial \phi}{\partial t} \rightarrow 0 \quad \rightarrow \quad \partial_\mu \phi \partial^\mu \phi = 0$$

O mínimo do potencial :

$$\frac{\partial V}{\partial \phi} = \phi (\mu^2 + \lambda \phi^2) = 0$$

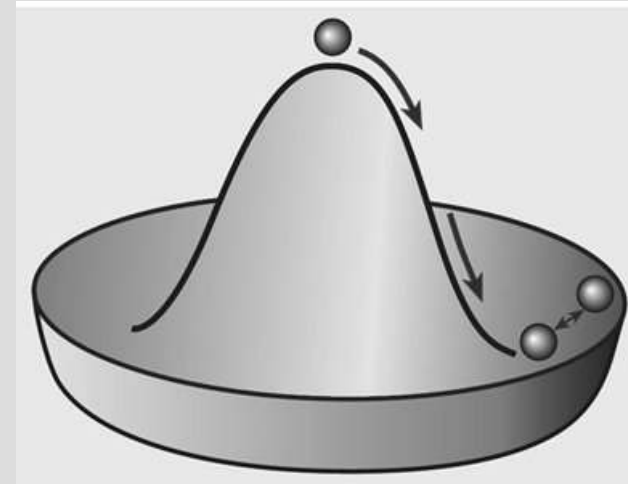
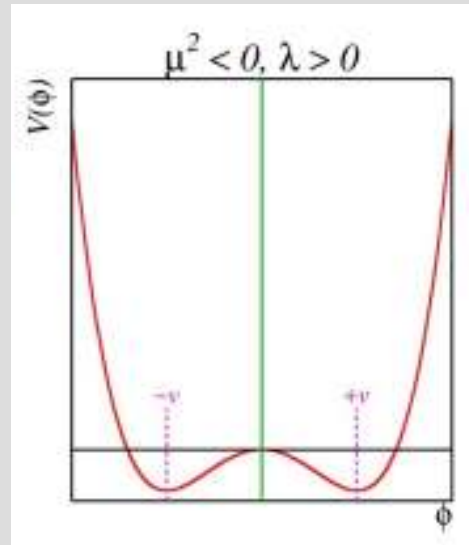
$$\left\{ \begin{array}{l} \mu^2 > 0 \rightarrow \phi = 0 \\ \mu^2 < 0 \rightarrow \phi = \pm v \end{array} \right.$$

$$v = \sqrt{\frac{-\mu^2}{\lambda}}$$

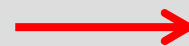


Escolhemos:

$$\mu^2 < 0$$



$$L = \frac{1}{2} \partial_\mu \phi \partial^\mu \phi - \frac{1}{2} \mu^2 \phi^2 - \frac{1}{4} \lambda \phi^4$$



$$\phi(x) = v + \eta(x)$$

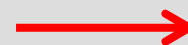


quebra da simetria $\eta(x) \rightarrow -\eta(x)$

$$L = \frac{1}{2} \partial_\mu \eta \partial^\mu \eta - \lambda v^2 \eta^2 - \lambda v \eta^3 - \frac{1}{4} \lambda \eta^4 + \text{const}$$



número positivo: é massa!



$$m_\eta = \sqrt{2 \lambda v^2}$$

Conclusão

A massa "m" **mudou** bastante nos últimos 300 anos

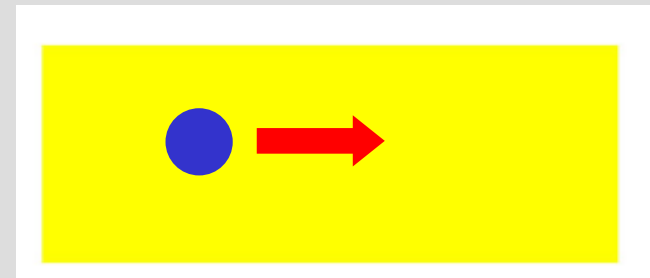
Ainda aparece nas equações de movimento e representa **inércia**

É uma **forma de energia** e pode se transformar em outra

No modelo padrão ela vem da interação das partículas com o **vácuo**

O vácuo é preenchido por v , o valor do **campo de Higgs**

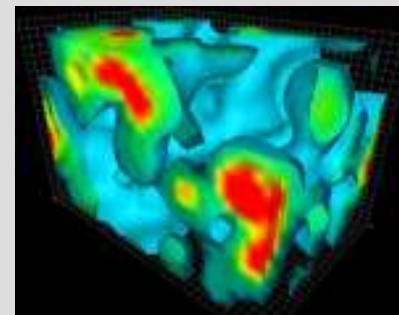
" v " gera massa e quebra simetrias



Mas...

O vácuo é ainda muito mais complicado :

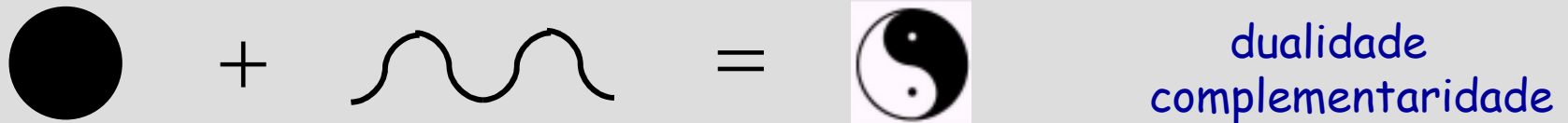
Ainda vem muito mais por aí...



Muito obrigado !!!

Física Quântica

Elétron = Partícula e Onda Puntiforme e Extenso



Não existe trajetória bem definida

(princípio da incerteza)

Menos poder de previsão

(probabilidades)

Não dá prá entender...

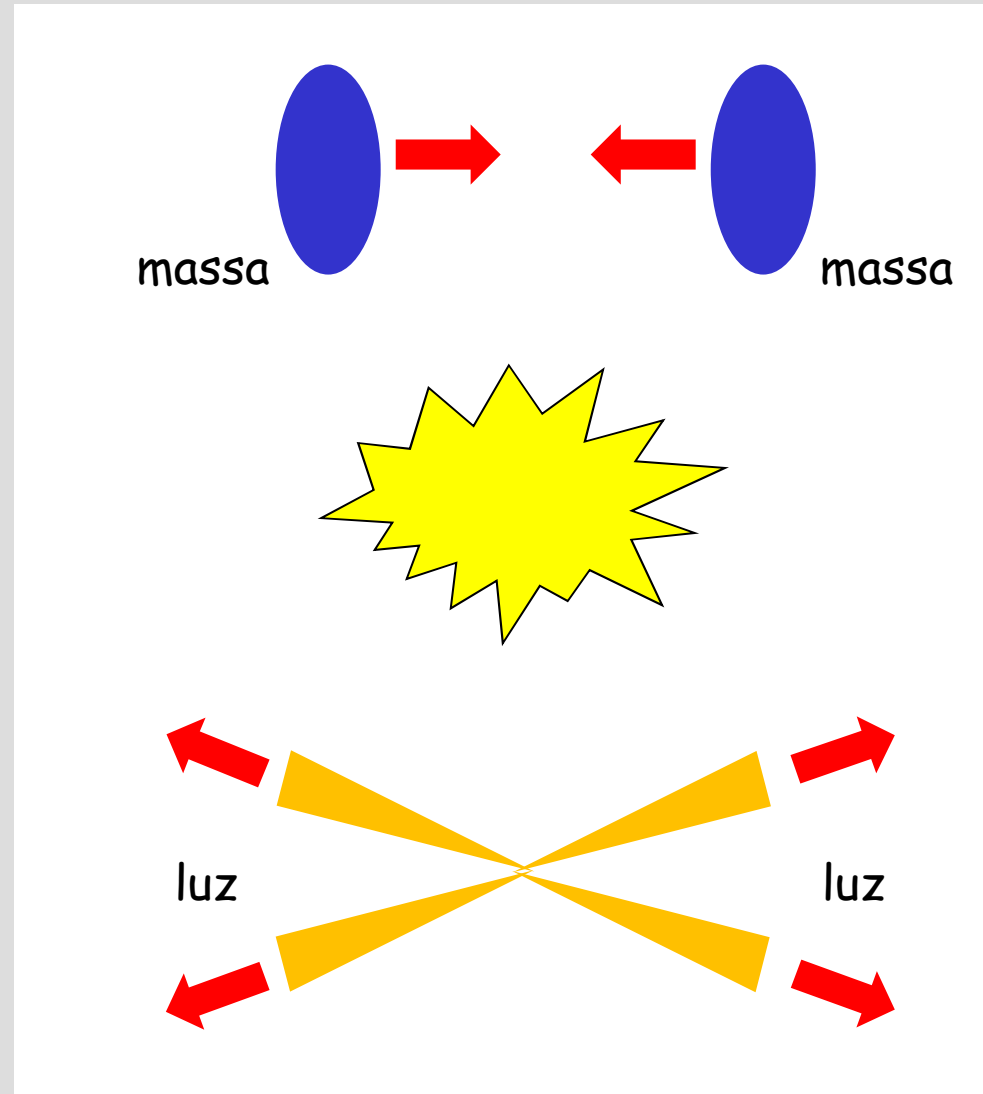


Relatividade

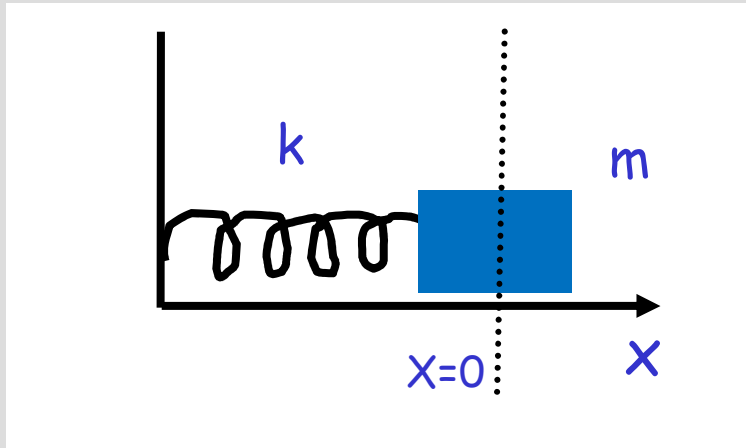
Contração do espaço

Equivalência entre
massa e energia

$$E = mc^2$$



Um caso simples



A mola nunca está em repouso na origem !

"energia de ponto zero"

$$\Delta p \Delta x > \hbar$$

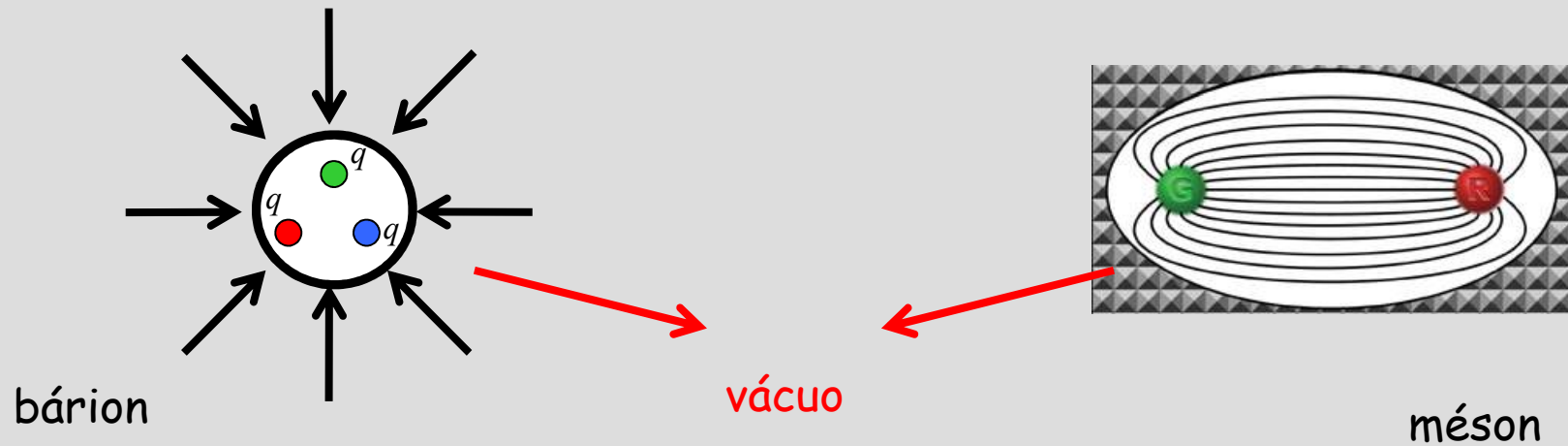


Heisenberg

$$p = m v$$

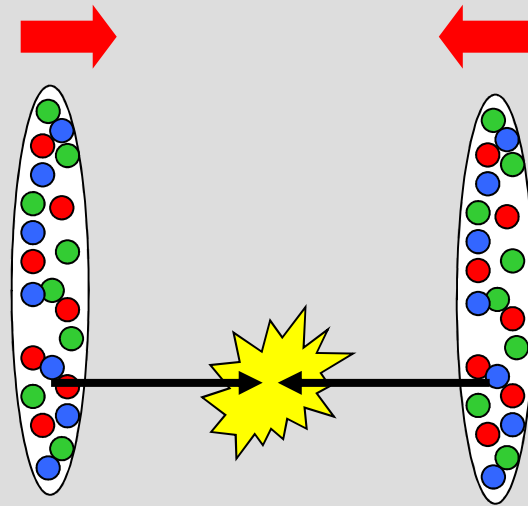
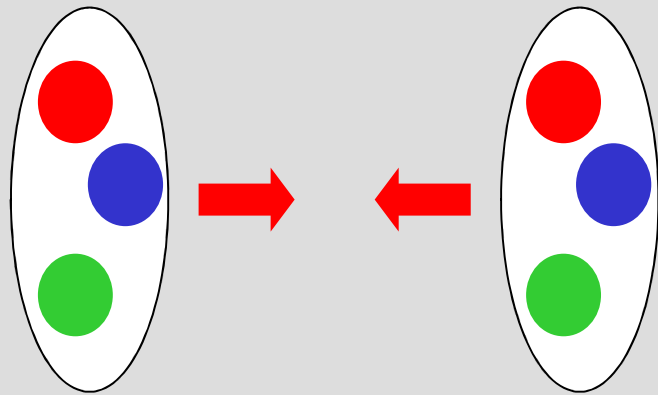
Vácuo da QCD

Confina os quarks em "sacolas"

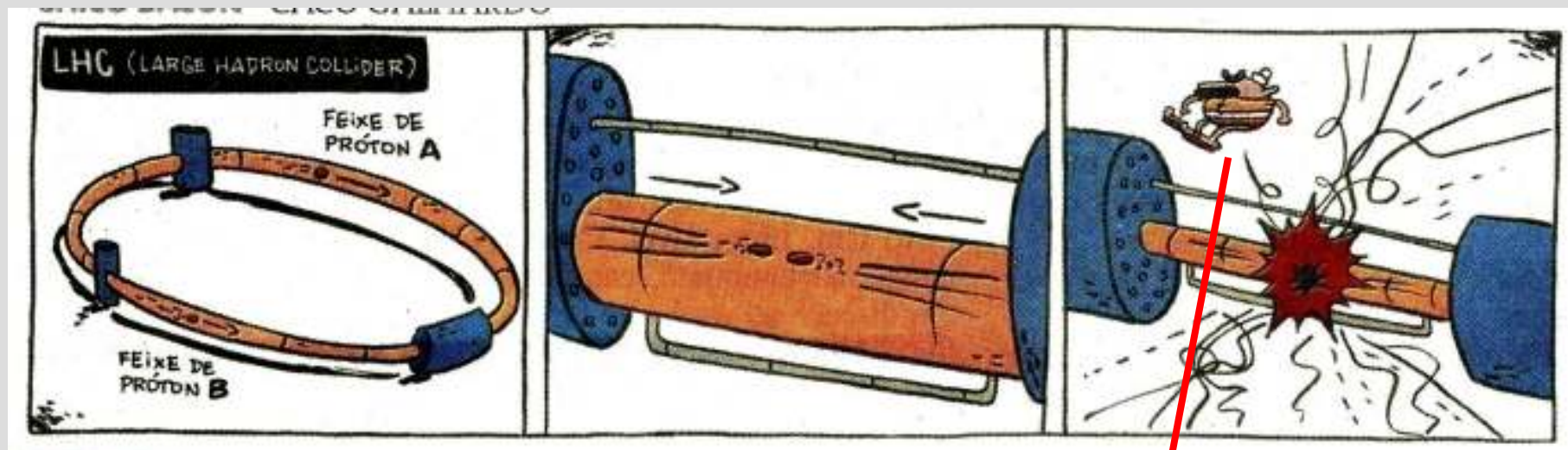


Podemos cavar buracos neste meio! Podemos derretê-lo!

Colisão próton-próton



Encontrar o inesperado !



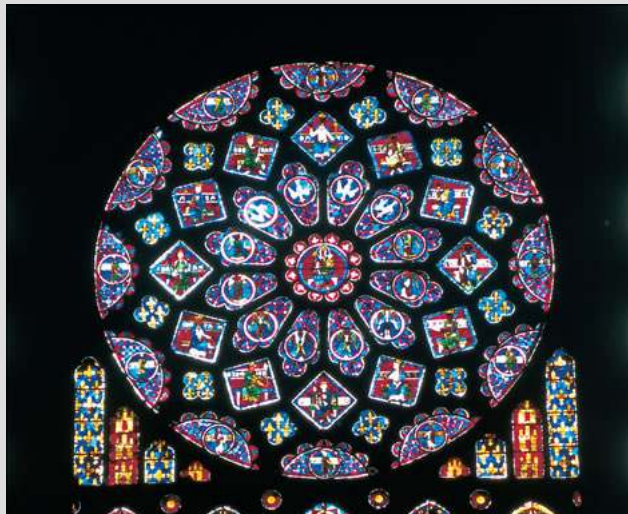
Chico Bacon !

MUITO OBRIGADO !

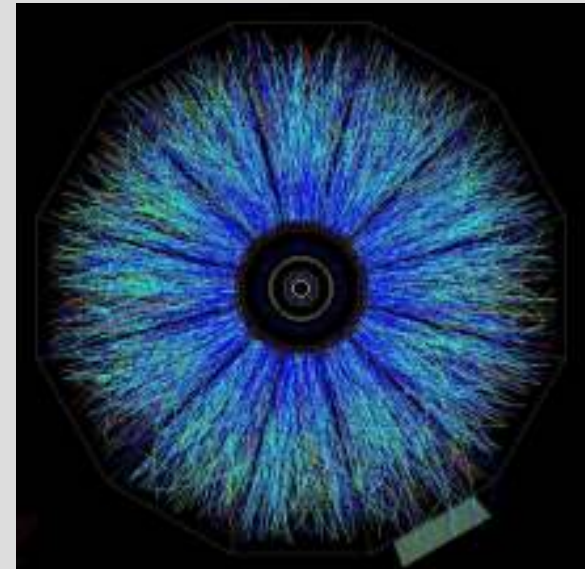
Além do mundo ordinário...



o meio...

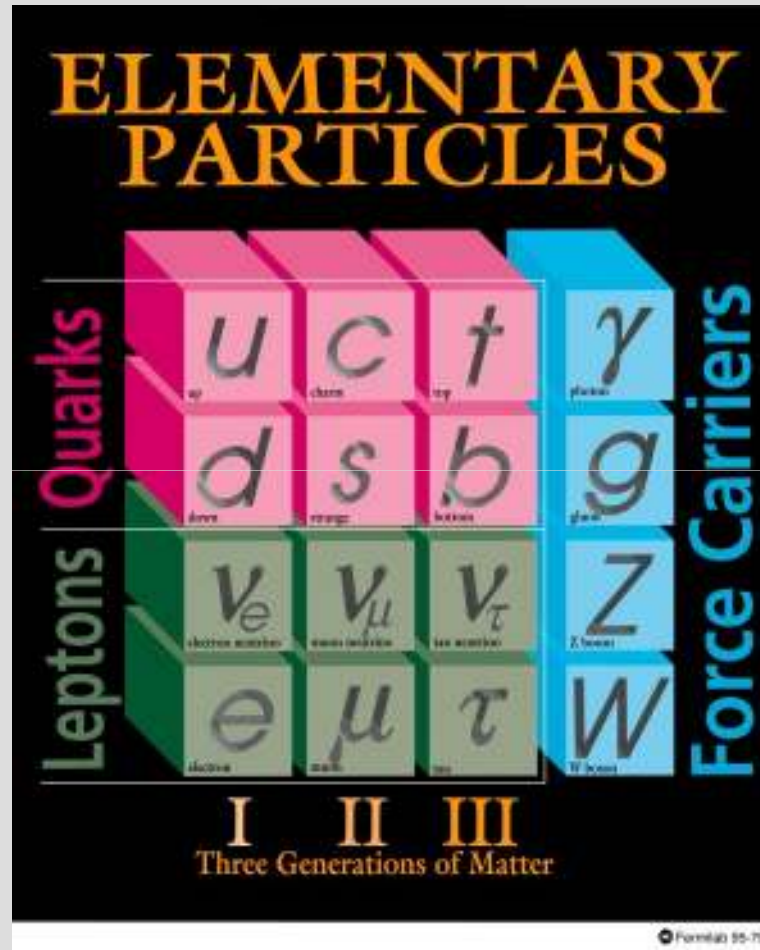


a observação...



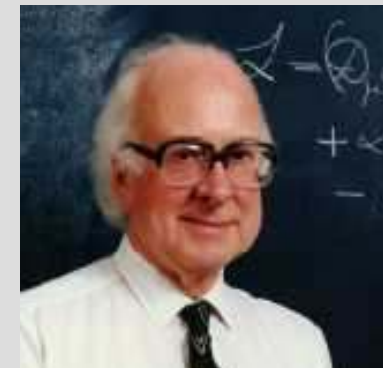
O Modelo Padrão

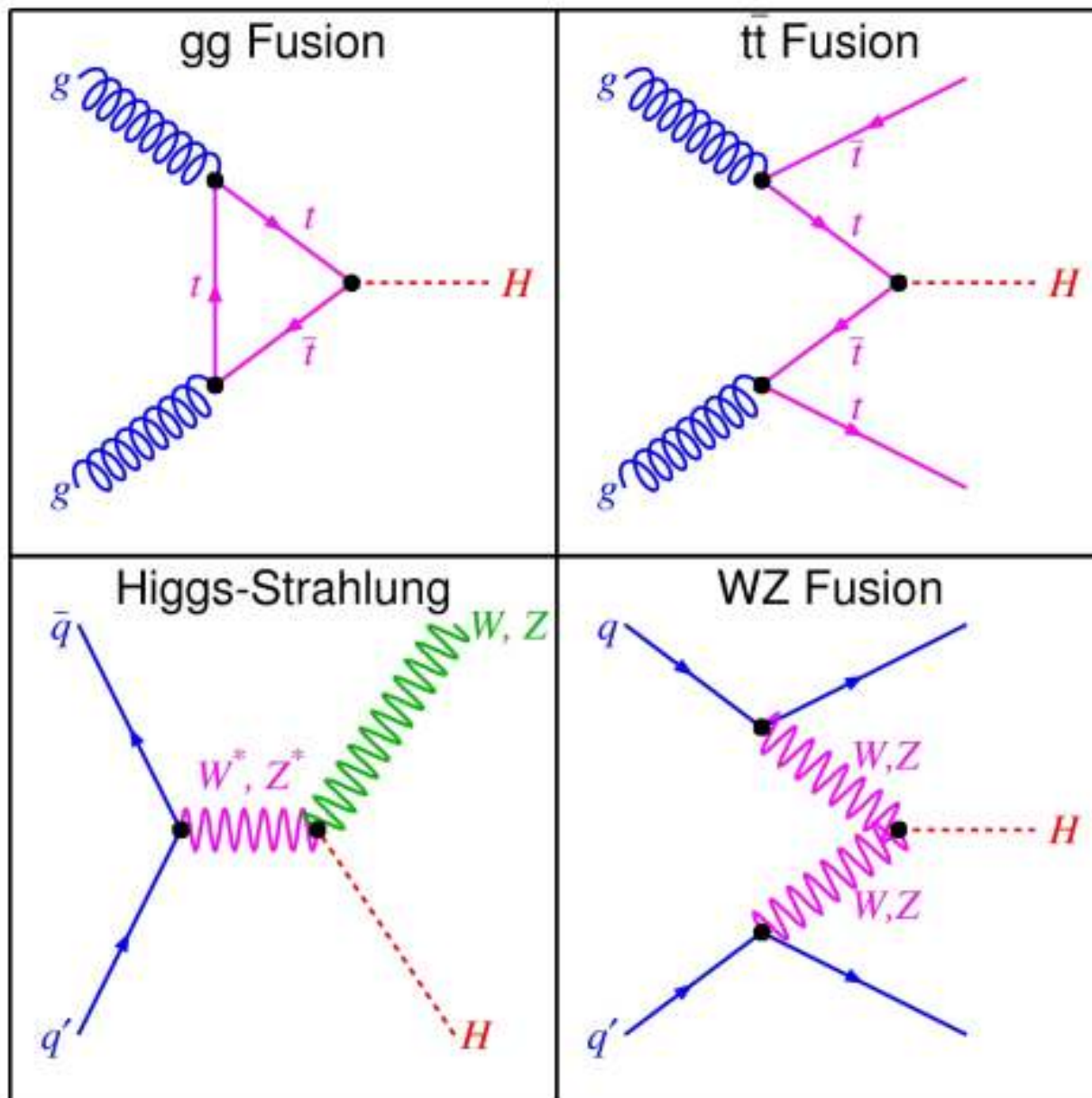
Matéria:
quarks e leptons
"estável"



Portadores de força
luz , radiação , campo
efêmero

ainda não observado: boson de Higgs





$$f_g(x_2, Q^2)$$

$$\sigma_{dip}(x, r) = 2 \int d^2b N(x, r, b)$$

+ Marcelo Gleiser

O mundo não acabou!

Na madrugada de quarta-feira passada, o LHC, o gigantesco acelerador de partículas nos arredores de Genebra, na Suíça, passou por seu primeiro teste. Um feixe de prótons viajou em torno do anel de 27 km de circunferência a uma velocidade próxima à da luz, completando cerca de 11 mil voltas em um segundo.

Em alguns meses, quando o LHC estiver funcionando para valer, dois feixes de prótons correrão em sentidos opostos e colidirão de cabeça dentro de enormes detectores. Essas colisões terão energias jamais atingidas na Terra: apenas durante os primeiros instantes após o Big Bang, o venerável evento que deu origem ao cosmo, as partículas colidiam constantemente com tal energia. Por isso, o LHC é chamado de "máquina do Big Bang".

Toda nova tecnologia gera um misto de expectativa e medo, especialmente quando quebra novas barreiras do conhecimento, como é o caso do LHC. No século passado, o mesmo

ocorreu antes do teste da primeira bomba atômica, no deserto de Alamo Gordo: cálculos indicavam que existia uma probabilidade mínima de a explosão rasgar a atmosfera, possivelmente acelerando a extinção da vida no nosso planeta. O teste veio, a explosão ocorreu, o mundo não acabou.

No caso do LHC, bem mais inofensivo, o medo vem da possibilidade de miniburacos negros serem gerados durante as colisões. Dada a reputação nefasta desses objetos astrofísicos, especulações pipocaram em blogs do mundo inteiro: será que esses buracos negros irão crescer e tragar a Terra inteira? Será que esses físicos finalmente conseguirão acabar conosco?

Vários processos foram abertos, tentando bloquear a operação do

A verdadeira missão do LHC é manter vivo um campo de pesquisa

LHC. Felizmente, foram rejeitados por juízes que, se não conhecem a física, ao menos obtiveram boa consultoria a respeito. Como garante a equipe de segurança do próprio Cern, o laboratório onde fica o LHC, não há qualquer perigo de que algo assim ocorra (public.web.cern.ch/Public/en/LHC/Safety-en.html). Os miniburacos negros que podem ser produzidos no LHC evaporam em frações de segundo, sendo incapazes de qualquer

efeito macroscópico. Na natureza, raios cósmicos também atingem energias altíssimas e podem, a princípio, produzi-los. Apesar de sermos constantemente bombardeados por raios cósmicos, ainda estamos aqui.

Mais interessante do que as supostas ameaças é a sociologia do experimento. Dezenas de países e milhares de cientistas do mundo inteiro contribuíram para a construção do LHC. A física de partículas experimental é hoje uma atividade internacional.

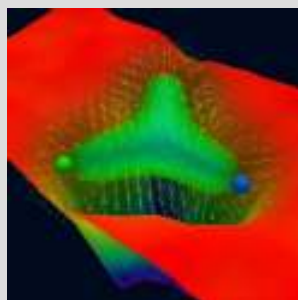
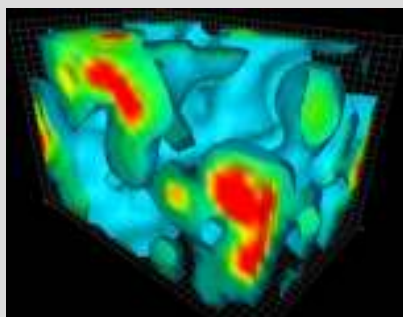
Os Estados Unidos, que dominarão a pesquisa nesse campo enquanto o LHC não estiver operando plenamente, entraram com mais de US\$ 500 milhões no projeto. No total, o LHC custou em torno de US\$ 8 bilhões.

Seria trágico se nada muito extraor-

dinário fosse encontrado. Existem várias previsões teóricas do que pode ser encontrado, algumas realistas e outras bem especulativas (como os miniburacos negros). Se apenas o mais "mundano" for visto, como o bóson de Higgs, a partícula que presumivelmente determina a massa de todas as outras partículas de matéria, o LHC terá servido para confirmar o que já era esperado. Mesmo que essa confirmação seja um feito espetacular, será como beber champanhe choco. A verdadeira missão do LHC é manter vivo um campo de pesquisa que, devido aos seus enormes custos, fica cada vez mais difícil de justificar ao público.

De minha parte, torço para que não só o Higgs seja descoberto como para que algo inesperado ocorra. Nada como uma boa surpresa para atizar a curiosidade humana. E a natureza, sem dívida, é cheia delas.

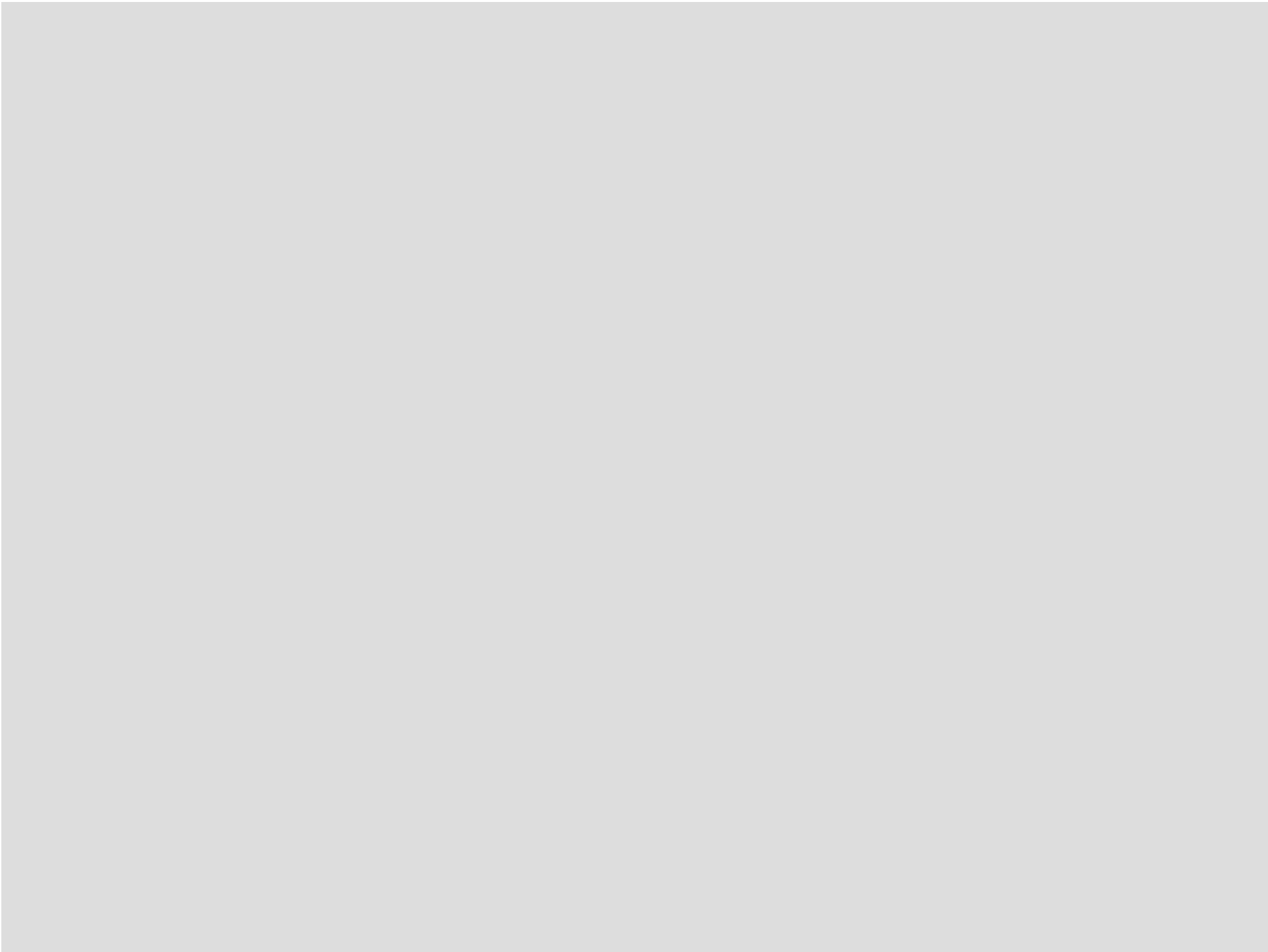
MARCELO GLEISER é professor de física teórica no Dartmouth College, em Hanover (EUA), e autor do livro "A Harmonia do Mundo".



LHC e colisões

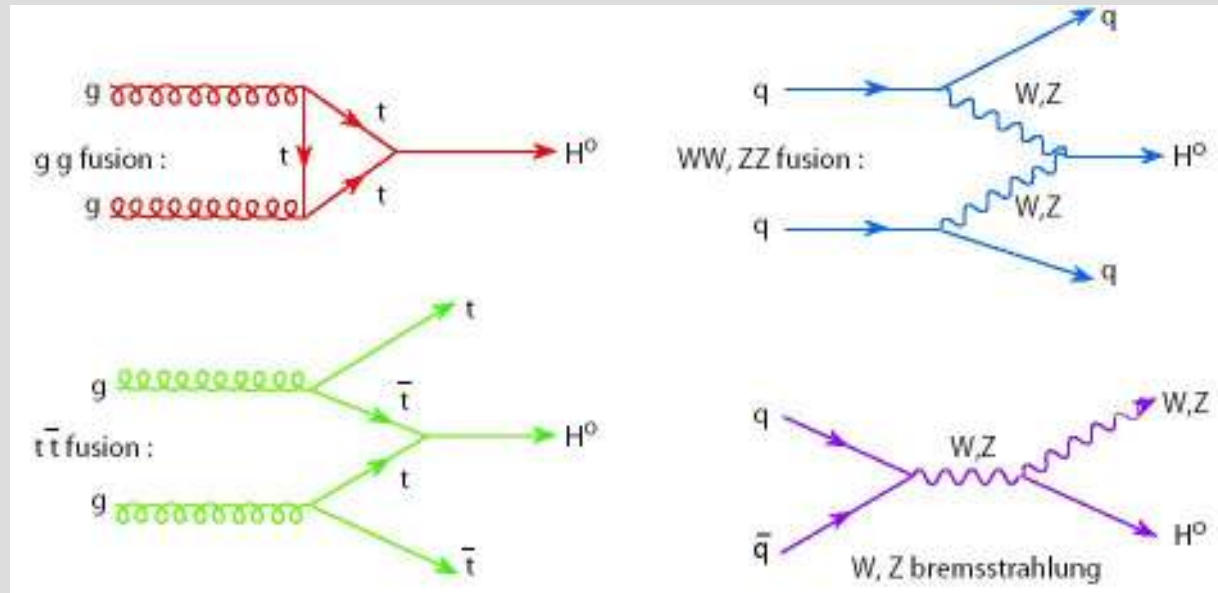
Massa das coisas

Definições de massa

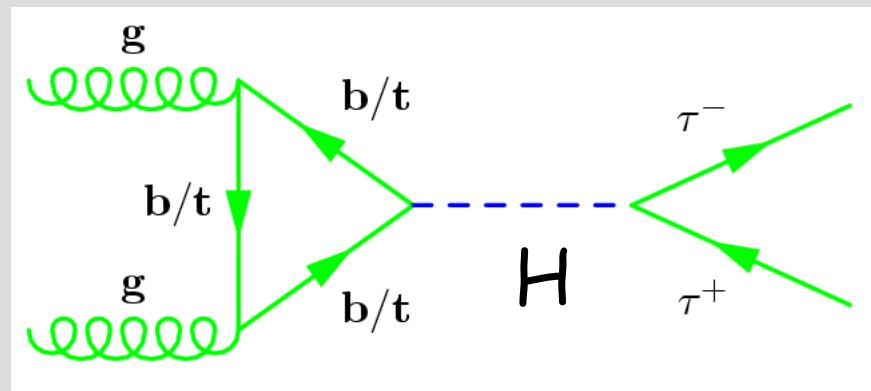


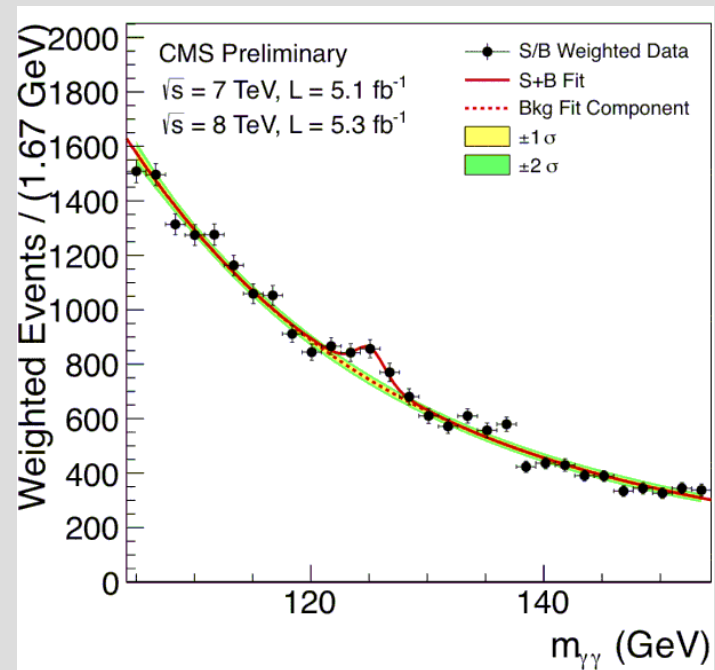
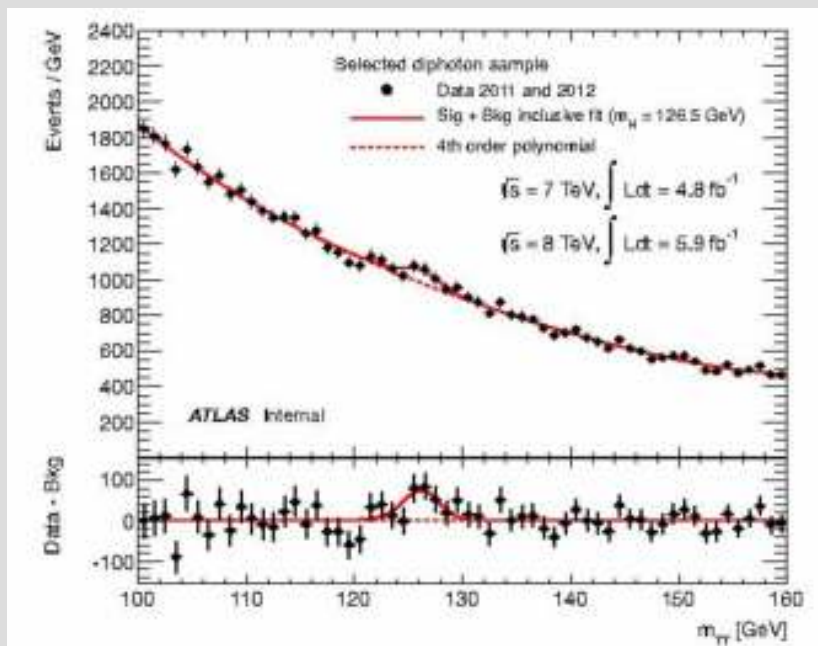
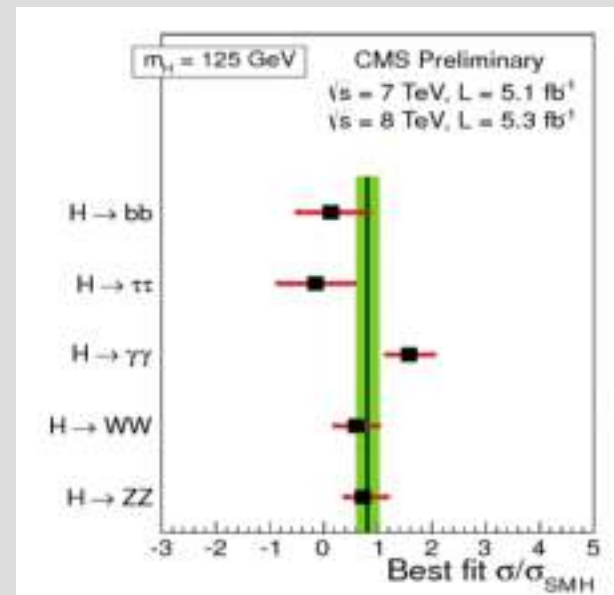
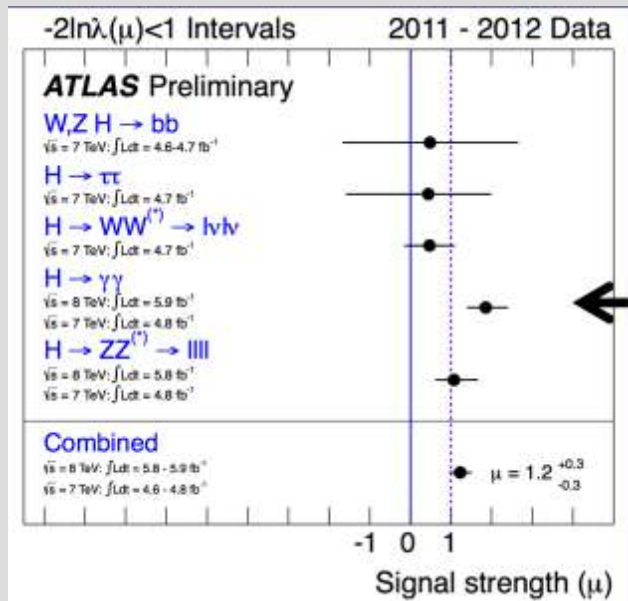
O bóson de Higgs

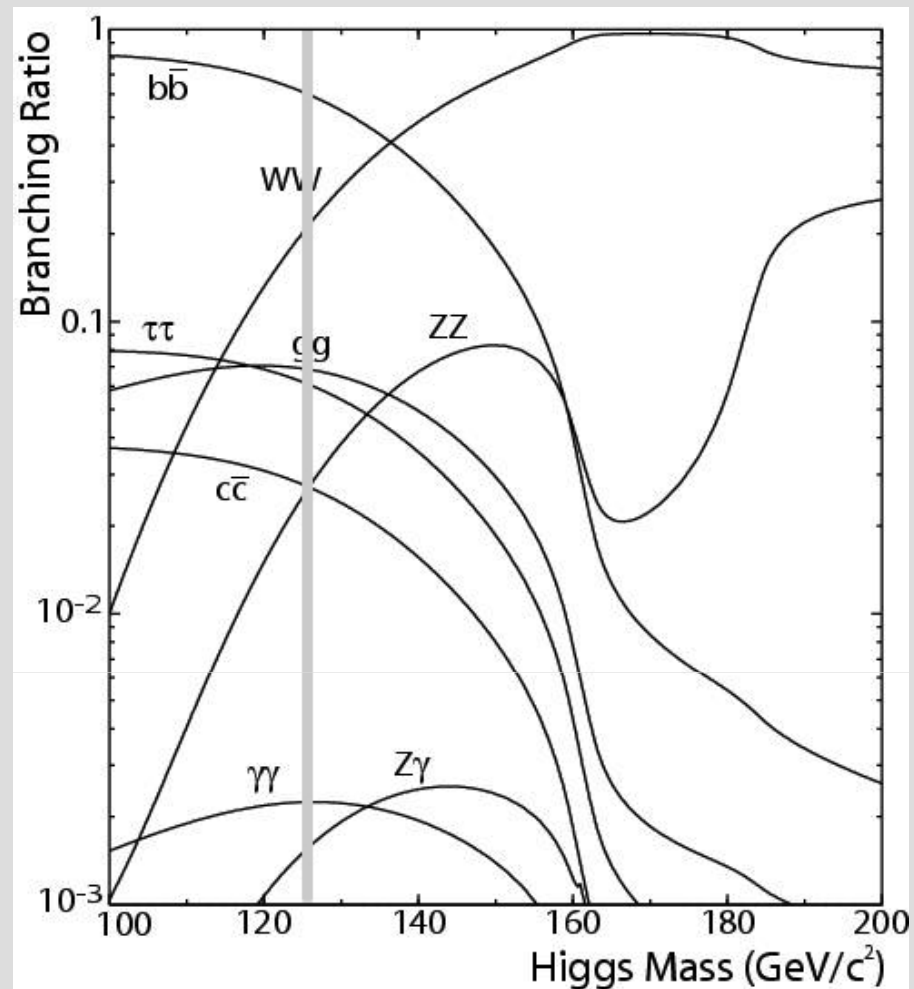
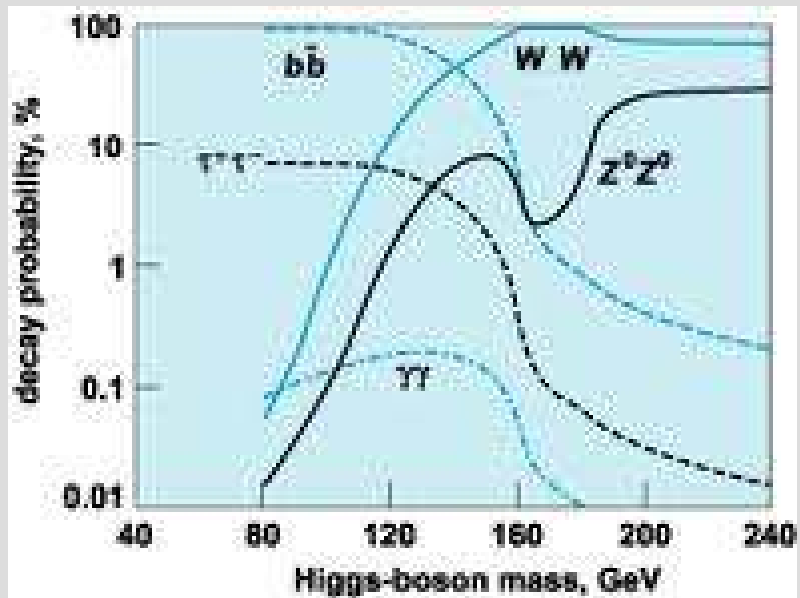
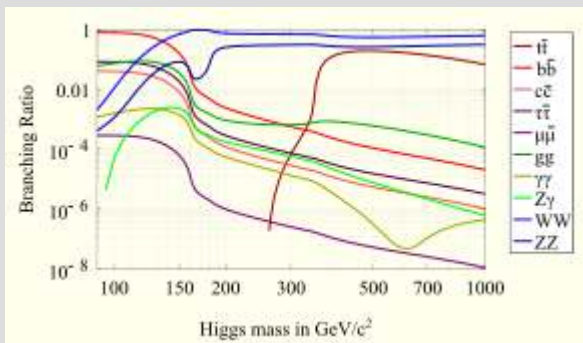
Produção

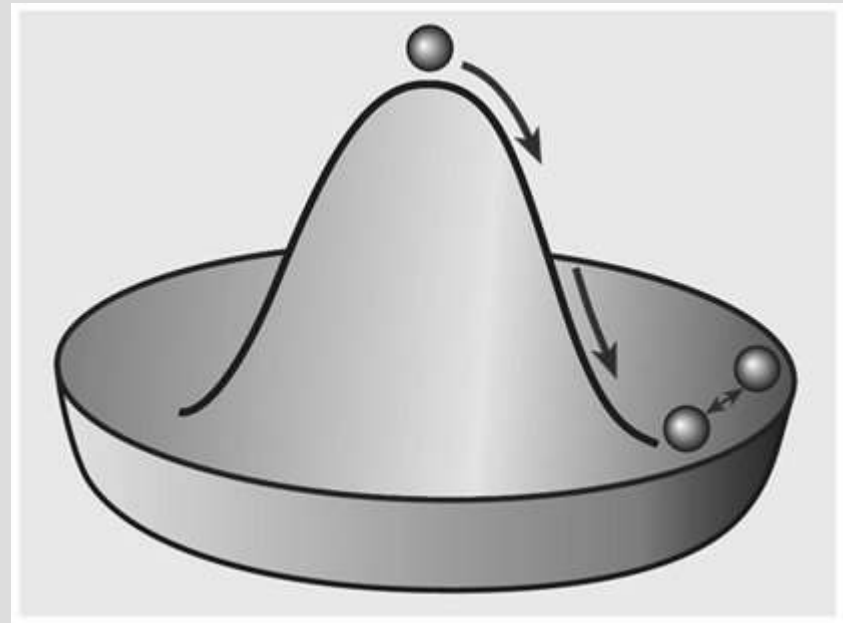
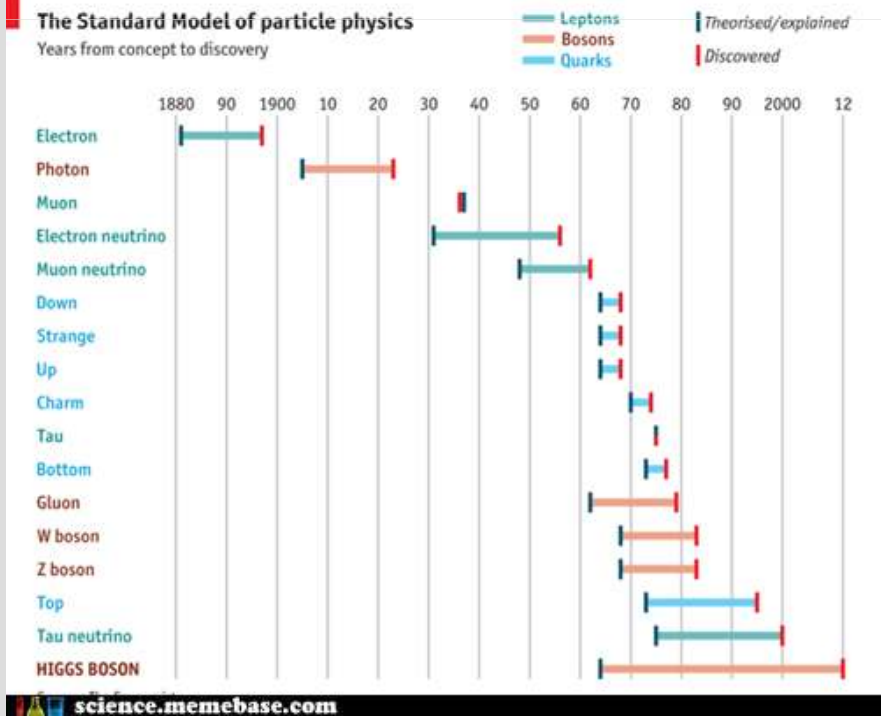
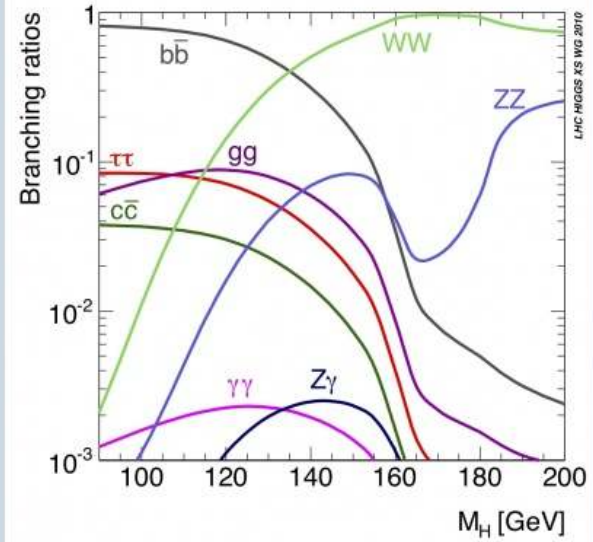
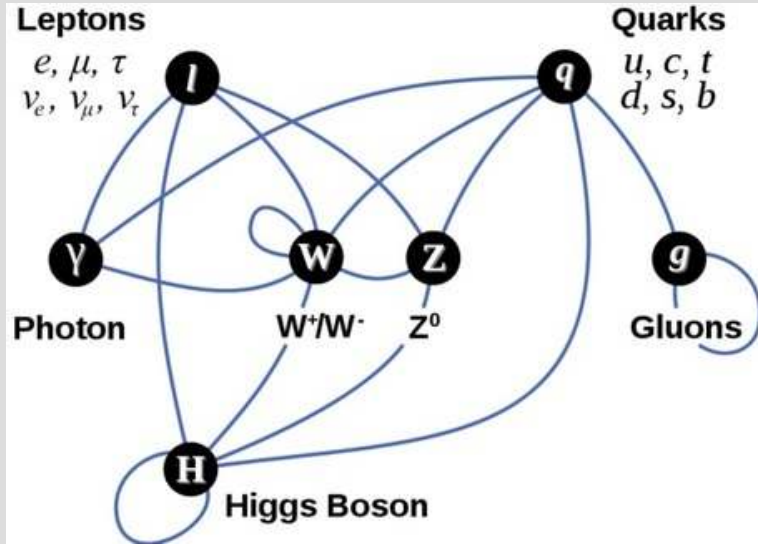


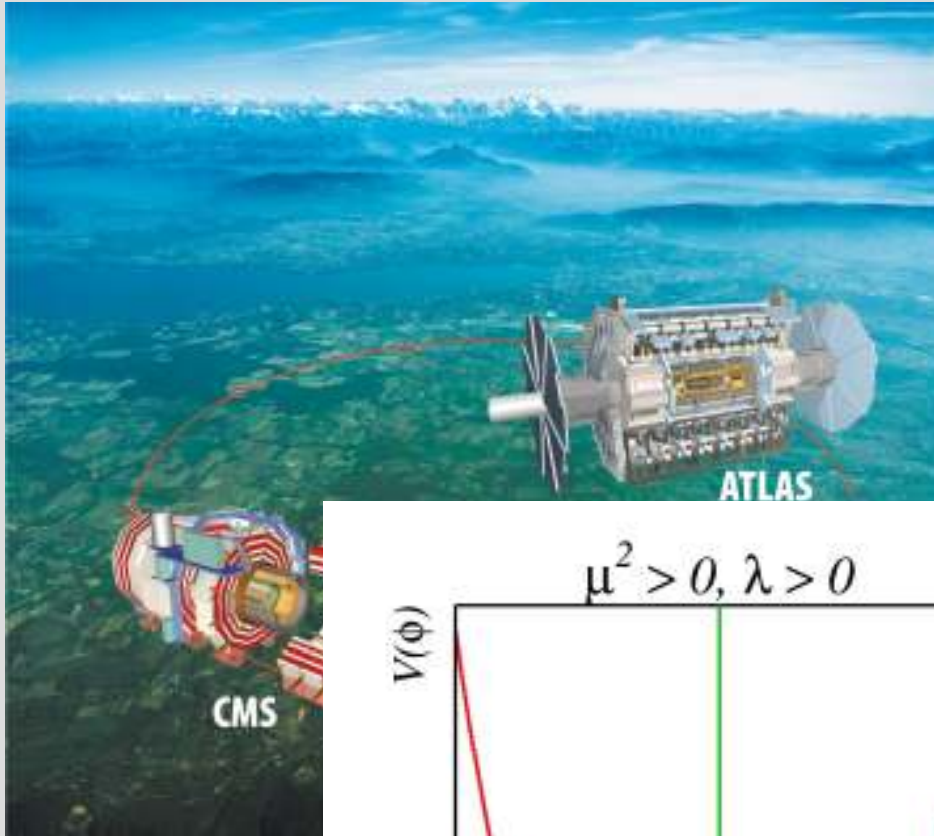
Decaimento





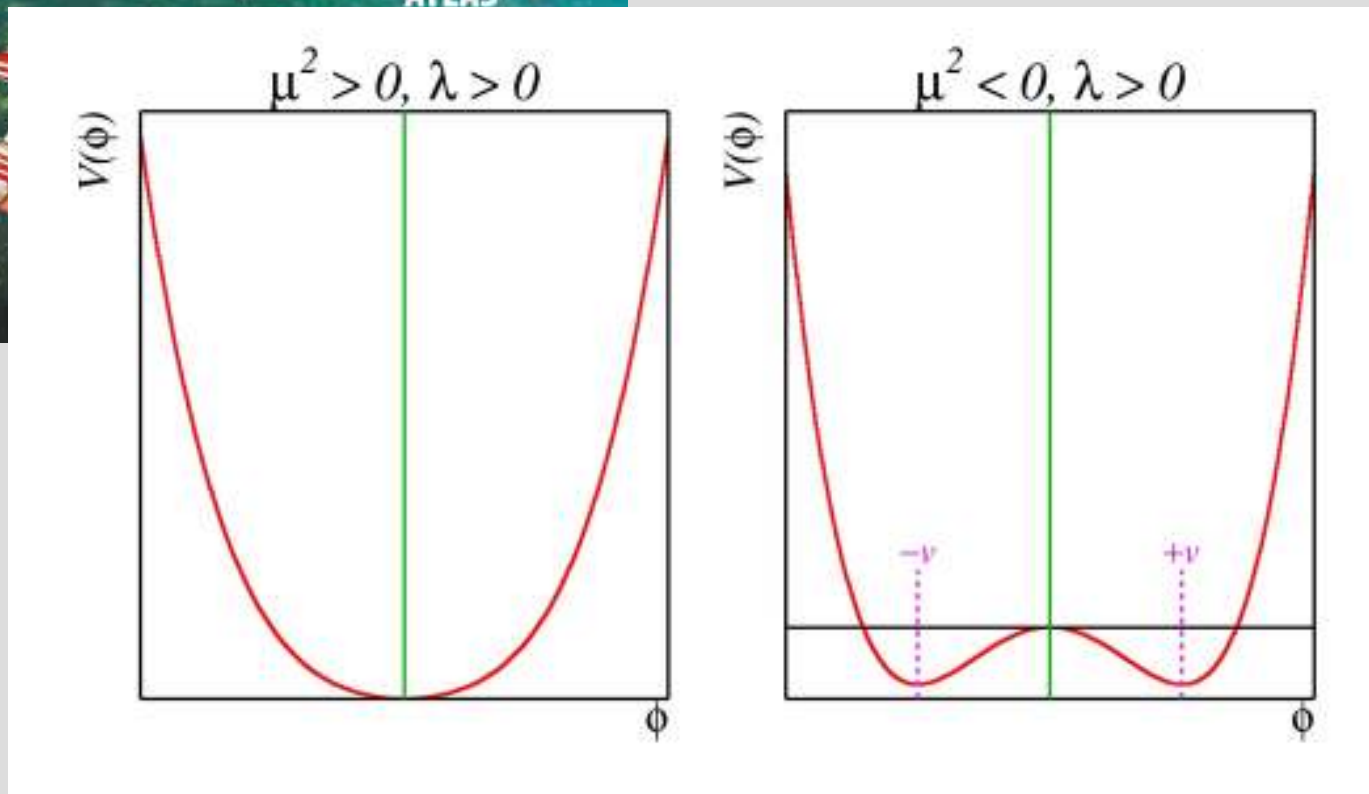






	Fermions			Bosons	Force carriers
Quarks	u up	c charm	t top	γ photon	
	d down	s strange	b bottom	Z Z boson	
Leptons	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson	
	e electron	μ muon	τ tau	g gluon	
				Higgs boson	

Source: AAAS



GELADEIRA GIGANTE

Os ímãs que darão impulso aos prótons no túnel do LHC funcionam resfriados por hélio líquido a $-271,3^{\circ}\text{C}$ — mais frio do que no espaço sideral

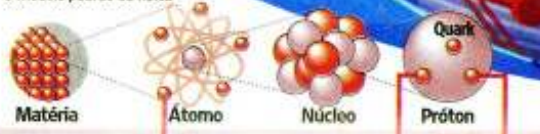


VELOCIDADE MÁXIMA

Cada próton no LHC dará 11.245 voltas no detector a cada segundo, viajando a 99,9999991% da velocidade da luz. Um feixe de prótons pode viajar durante dez horas no detector, cobrindo mais do que a distância de ida e volta a Netuno

ZOOLÓGICO DE PARTÍCULAS

O modelo padrão da física



BÓSONS Transmissores de forças	LÉPTONS				QUARKS			
	Elétron	neutrino do elétron	down	up	múon	neutrino do múon	estranho	charme
	tau	neutrino do tau	bottom	top				
	fóton	glúon	W+, W- e Z	Higgs (bóson a ser confirmado)				

>> O Modelo Padrão, a teoria que trata do mundo microscópico, é o que está em jogo. Ele divide as partículas elementares em "férmions" (constituintes da matéria) e "bósons" (partículas das forças de interação). Os férmions, por sua vez, se dividem em "quarks" (partículas pesadas como as que ficam no núcleo dos átomos) e léptons (partículas mais leves, como o elétron). O bóson mais conhecido é o fóton (a partícula da luz e do eletromagnetismo), que não tem peso. Não existe teoria comprovada para explicar por que as massas são diferentes. Uma partícula hipotética, o bóson de Higgs, pode ser a solução

Os feixes de prótons vão colidir no interior dos detectores, como o Atlas

O LHC gasta 120 megawatts de energia por dia, o mesmo consumo de todas as residências de Genebra, para manter o sistema de ímãs frio. A conta de energia para 2009 é estimada em 19 milhões de euros

OS DETECTORES

- 1 ATLAS**
O maior detector do LHC não caberia na catedral de Notre Dame. Seu objetivo principal é detectar o bóson de Higgs, mas ele pode ser usado com outros objetivos, como tentar detectar a chamada "supersimetria" — a existência de uma outra família de partículas no Modelo Padrão, mas com "spin" (rotação) diferente
- 2 LHCb**
Esse detector investiga a diferença entre matéria e antimatéria — a matéria com carga invertida (elétrons positivos, prótons negativos etc.). Por alguma razão, a quantidade de matéria superou a de antimatéria no Universo, e os cientistas vão produzir antimatéria de maneira controlada no LHCb para tentar descobrir por quê
- 3 ALICE**
O Alice vai promover colisões entre íons de chumbo para criar um inferno energético semelhante ao estado da matéria logo após o Big Bang — explosão que originou o Universo. Entendendo melhor como partículas elementares chamadas quarks interagem entre si, cientistas ajudarão a cosmologia a entender melhor a evolução do Universo
- 4 CMS**
É o segundo maior detector do LHC. Assim como o Atlas, é um detector versátil e de propósitos múltiplos. Também terá capacidade de encontrar o bóson de Higgs e de fazer experimentos alternativos — como procurar dimensões extra do espaço