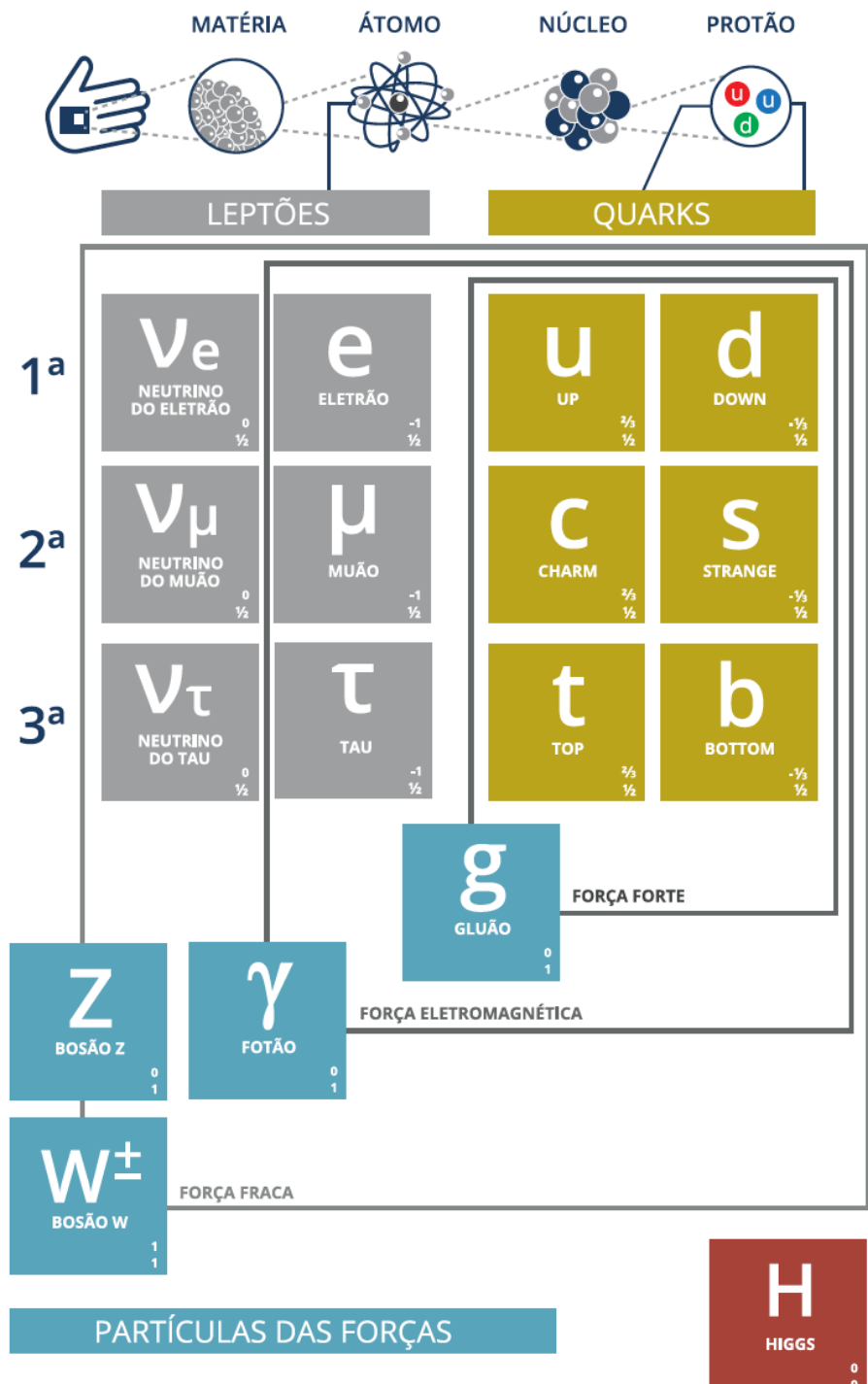


Introdução à física de partículas



- Revisão: forças e partículas
- O bóson de Higgs: o que é e para que serve
- E agora? Perguntas em aberto:
 - Ou “Há mais coisas no céu e na terra do que explica a nossa filosofia”



Cena do último episódio...

Além disso:
Por cada partícula fundamental existe uma anti-partícula (antimatéria)

Para cada uma destas partículas, existe uma antipartícula de carga oposta (antimatéria)

PARTÍCULAS DE MATÉRIA

Legenda

símbolo

NOME

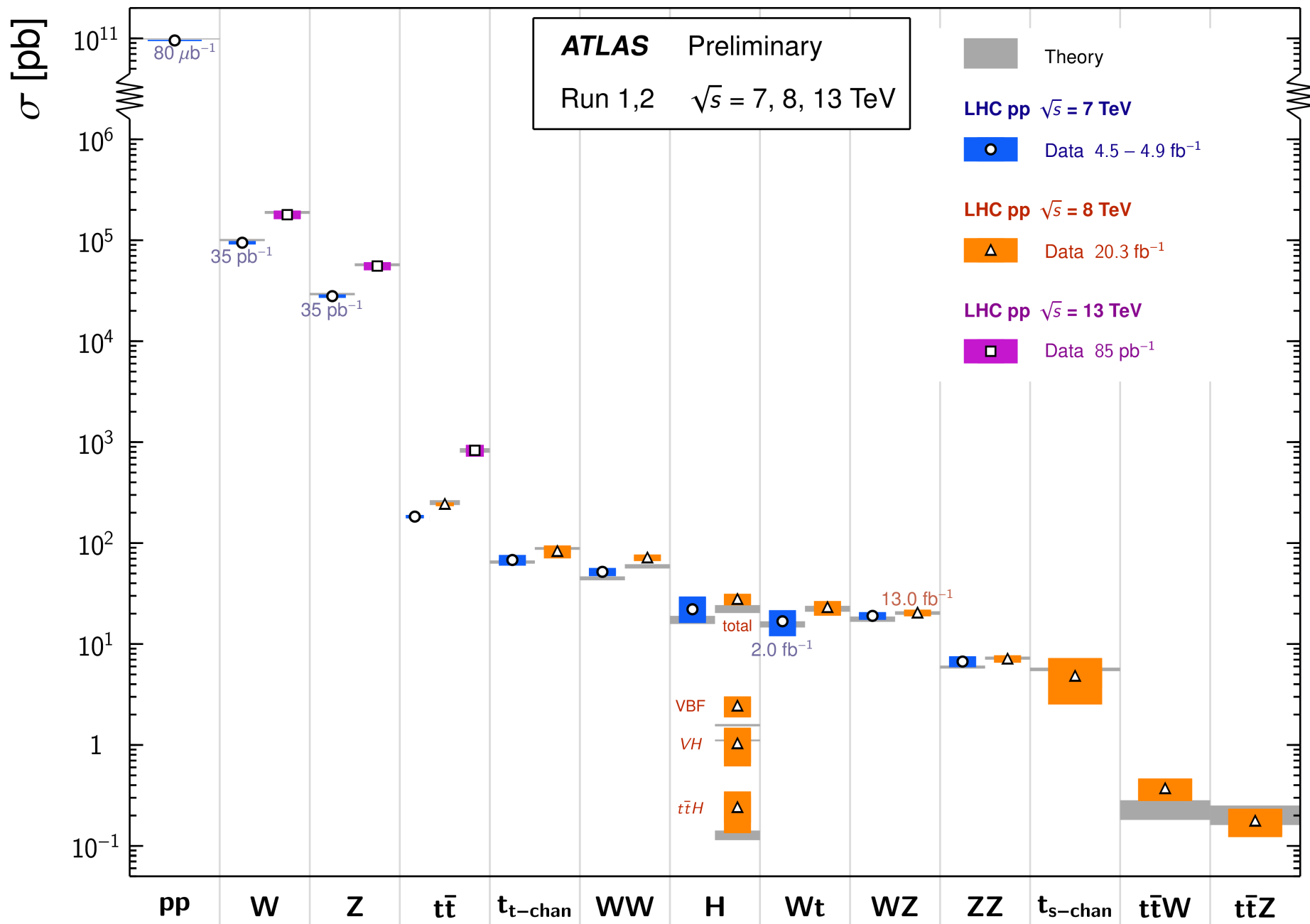
Carga Spin

QUARKS

up	u	$\bar{u}$	antiup
down	d	$\bar{d}$	antidown
charm	c	$\bar{c}$	anticharm
strange	s	$\bar{s}$	antistrange
bottom	b	$\bar{b}$	antibottom
top	t	$\bar{t}$	antitop

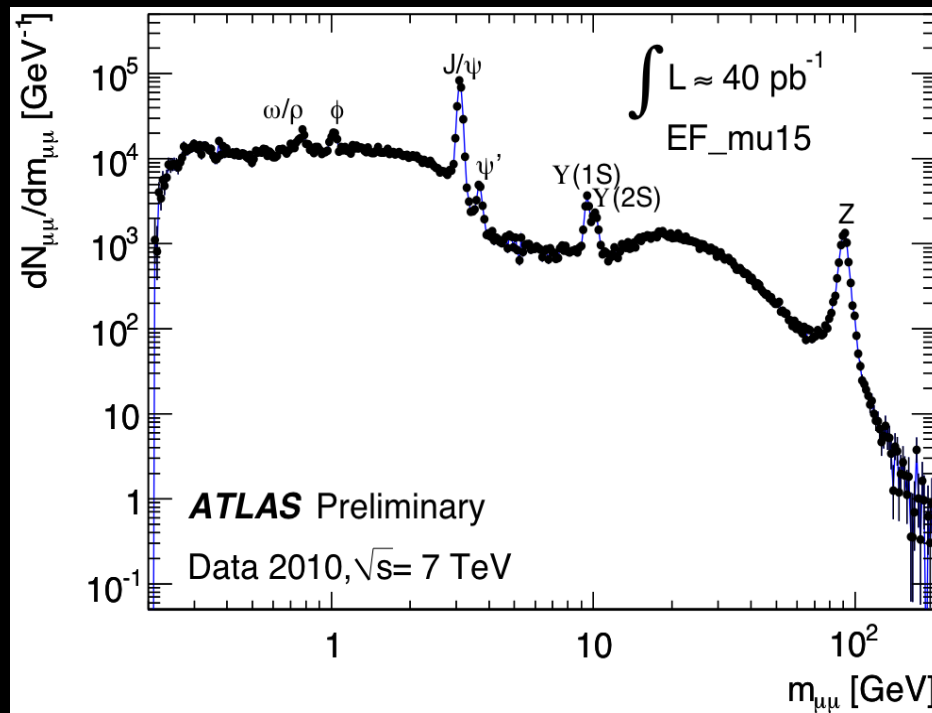
Standard Model Total Production Cross Section Measurements

Status: Nov 2015



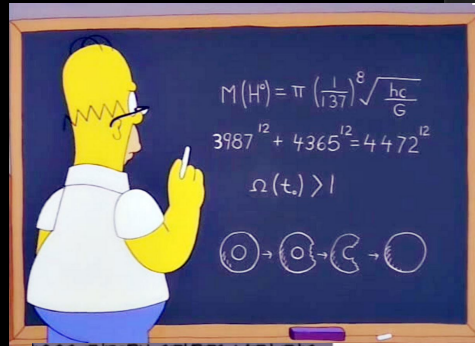
Mas há problemas...

1. A massa das partículas elementares *dos bosões W e Z*

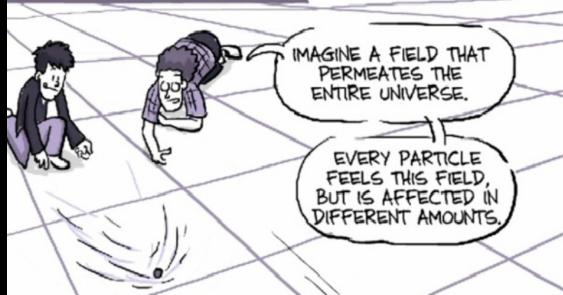


2. Alguns cálculos dão resultados absurdos... ☹️

O elo que faltava: bosão de Higgs



HIGGS THEORY STARTS WITH THIS:

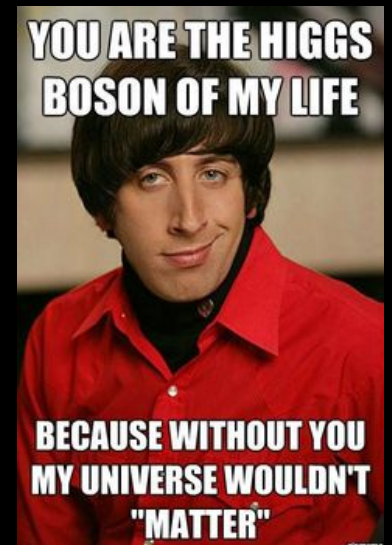
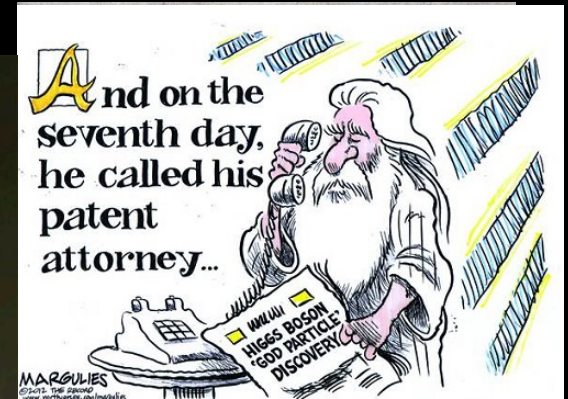


HIGGS BOSON

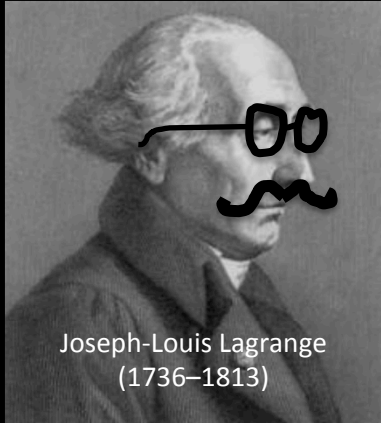
WHAT?

BOSON?

WHY?



Parêntesis técnico: Lagrangianos, teorias quânticas de campo, etc

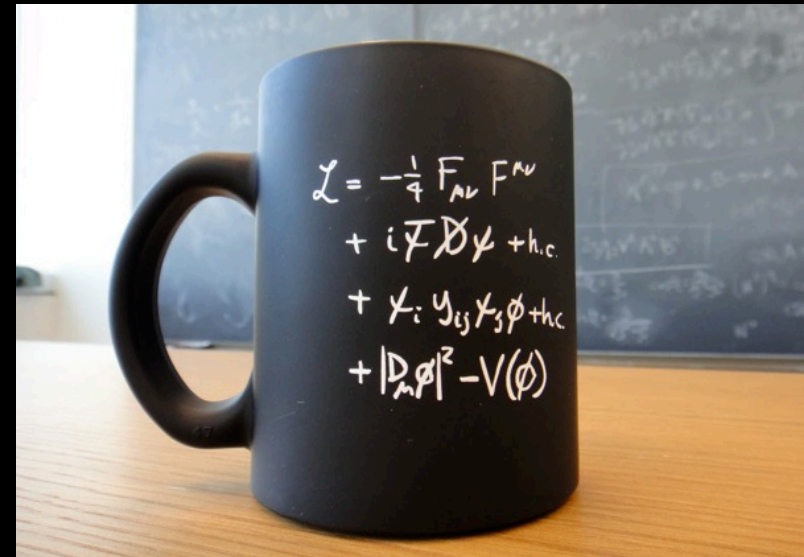


Joseph-Louis Lagrange
(1736–1813)

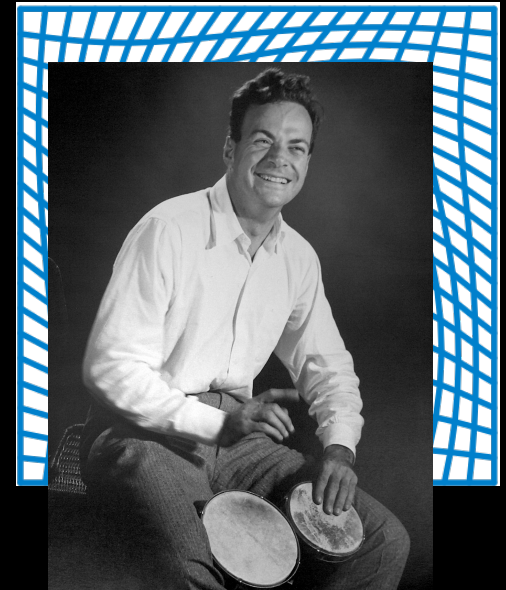
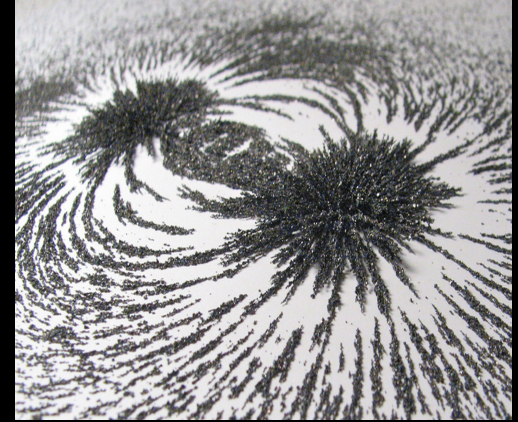
- O “Lagrangiano” de um sistema de partículas materiais é a diferença entre a energia cinética (T) e potencial (V)
- Do Lagrangiano podemos extraír todas as equações de movimento do sistema!
- Um dos pontos altos da física do século XVIII!

$$L(x, v) = T - V$$

- Por exemplo, isto permite extraír a leis fundamental da dinâmica de Newton (uma das coisas mais importantes do programa do 9º ano!)
- As teorias do modelo padrão podem ser definidas a partir do seu Lagrangiano

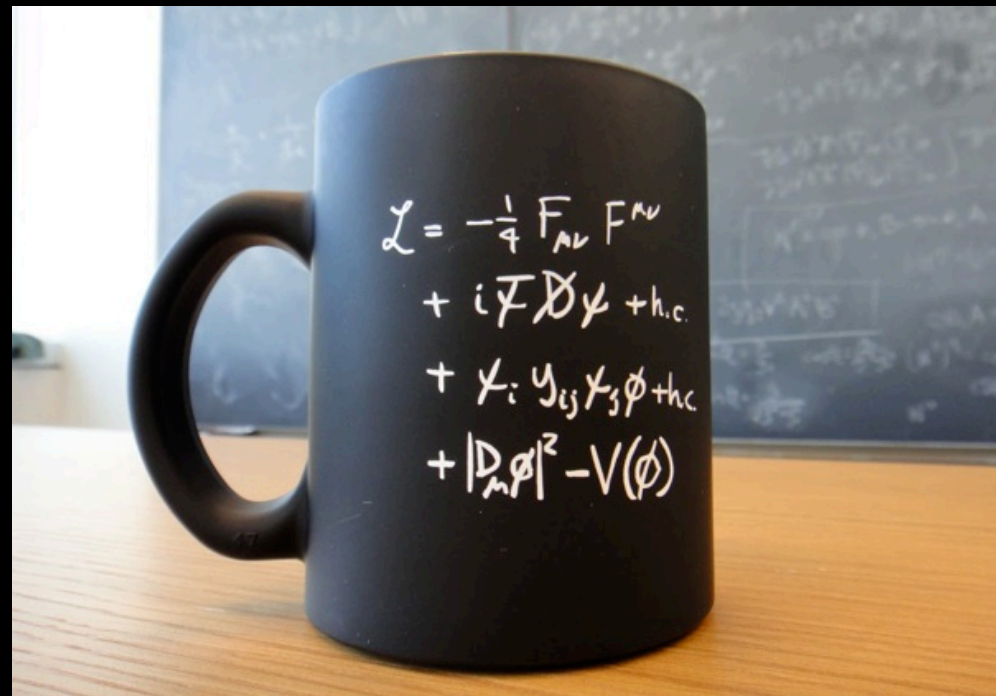


- As teorias do Modelo Padrão são teorias quânticas de campos relativísticos de um tipo especial: teorias de “gauge” ou “padrão”
- Estes campos não podem ser medidos diretamente, mas dão origem às quantidades que podem ser medidas
- As partículas – também as que transmitem forças – são excitações (oscilações) dos campos!!
- As teorias de gauge são especiais porque os campos podem ser re-definidos de ponto para ponto sem alterar as quantidades mensuráveis
- O primeiro exemplo de teoria de gauge foi o electromagnetismo (um ponto alto da física do sec. XIX!)
- Mais recentemente foi a electrodinâmica quântica – a teoria mais precisa do mundo e um triunfo do sec. XX!



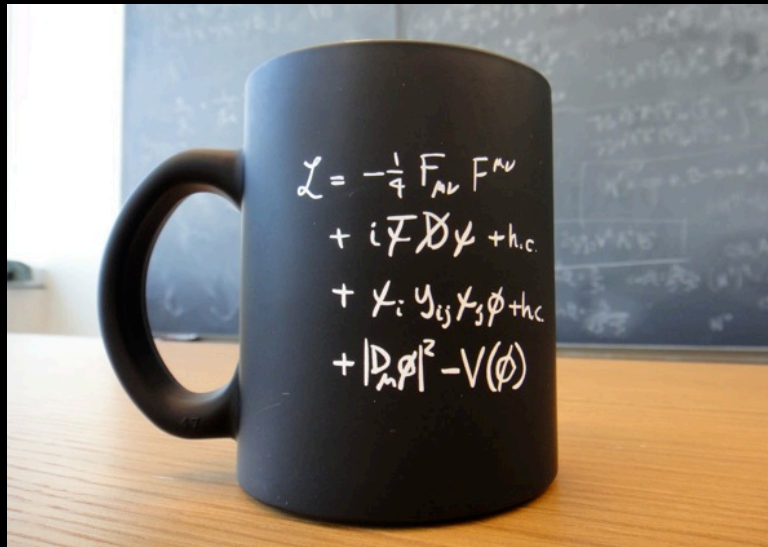
O Lagrangiano do Modelo Padrão

- O símbolo Φ é o campo de Higgs
- 1ª linha: as interações entre bósons mensageiros (W, Z, glúões)
- 2ª linha: interação entre fótons e partículas de matéria
 - Isto é: toda a química e a maior parte da física!
- 3ª linha: interação do Higgs com partículas de matéria
- 4ª linha: potencial do Higgs
- Nota: a gravidade não está na caneca!



De volta aos problemas...

1. A massa dos bósons W e Z – equivalente à de 90-102 prótons



Problema:
introduzindo a sua
massa no Lagrangiano
este deixa de
respeitar a invariância
de gauge – as teorias
deixam de funcionar!

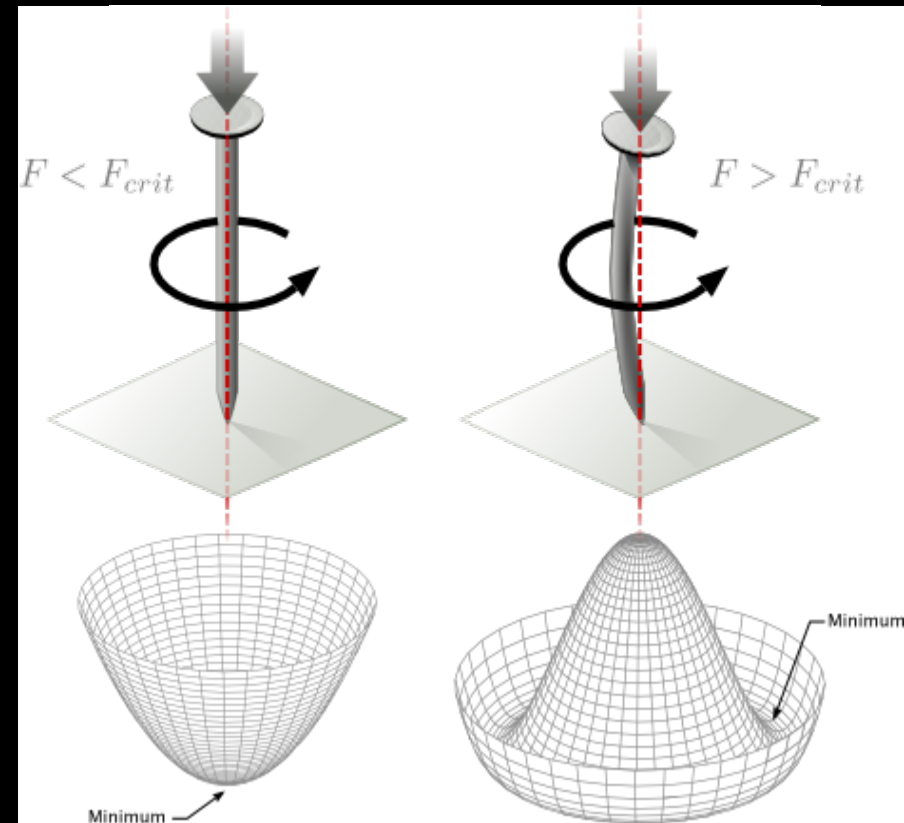
2. Alguns cálculos dão resultados absurdos... ☹️

Problema: a probabilidade da reação $W^+ + W^- \rightarrow W^+ + W^-$ cresce sempre em função da energia da colisão (é um problema?)

O Higgs e a quebra de simetria

- O potencial do campo de Higgs é a chave do mecanismo:
 - Para $\mu^2 > 0$ e $\lambda > 0$: um potencial simétrico
 - Para $\mu^2 < 0$ e $\lambda > 0$: chapéu mexicano
- Após o Big Bang, tínhamos bósons W_1 , W_2 , W_3 e B da **interação electrofraca**
- Quando o Universo arrefeceu eles misturaram-se com o campo de Higgs para dar os bósons W^+ , W^- , Z^0 e o fóton das interações **fraca** e **electromagnética**
- A este processo chama-se **quebra espontânea da simetria electrofraca**
 - As próprias forças mudaram!
 - O Bóson de Higgs é um sub-produto deste processo

$$V(\Phi) = \mu^2 |\Phi|^2 + \lambda |\Phi|^4$$



E o Lagrangiano, os fermiões, etc?

- Depois da quebra espontânea de simetria electrofraca, aparecem as massas no Lagrangiano

Antes:

$$\mathcal{L}_g = -\frac{1}{4}W_a^{\mu\nu}W_{\mu\nu}^a - \frac{1}{4}B^{\mu\nu}B_{\mu\nu}$$

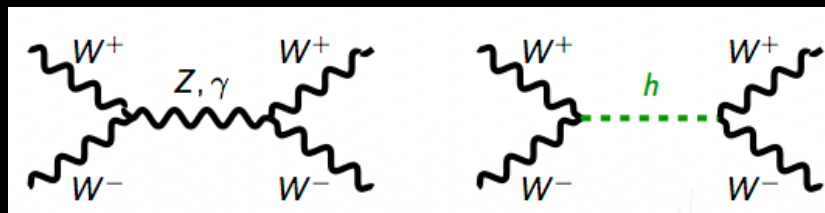
Depois:

$$\mathcal{L}_K = \sum_f \bar{f}(i\not{\partial} - m_f)f - \frac{1}{4}A_{\mu\nu}A^{\mu\nu} - \frac{1}{2}W_{\mu\nu}^+W^{-\mu\nu} + m_W^2 W_\mu^+ W^{-\mu} - \frac{1}{4}Z_{\mu\nu}Z^{\mu\nu} + \frac{1}{2}m_Z^2 Z_\mu Z^\mu + \frac{1}{2}(\partial^\mu H)(\partial_\mu H) - \frac{1}{2}m_H^2 H^2$$

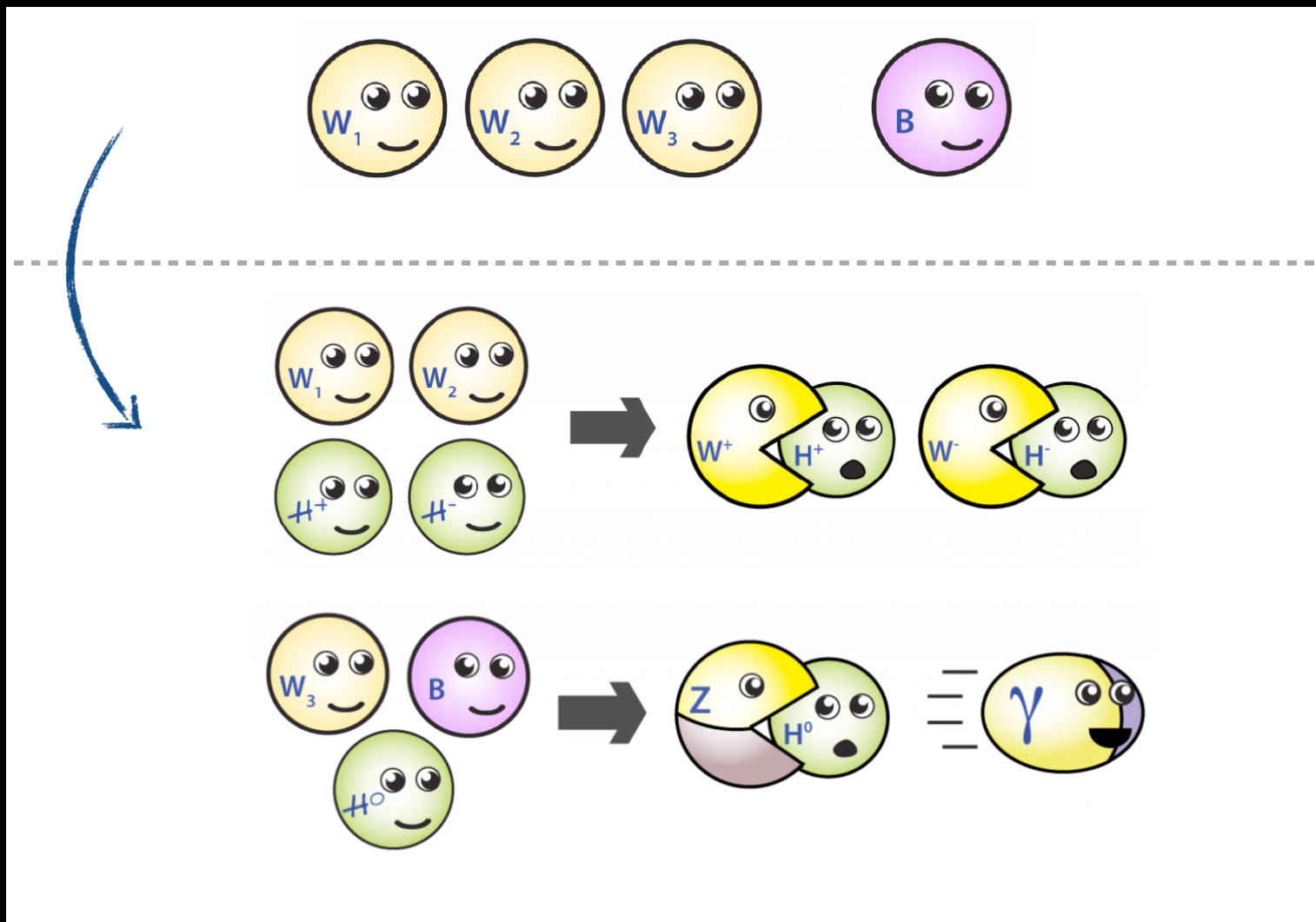
- As partículas de matéria (fermiões) também adquirem massa – ao interagir com o campo de Higgs
 - Quanto mais forte a interação, maior a massa

$$\mathcal{L}_{\text{Fermion}}(\phi, A, \psi) = \bar{\psi}\gamma^\mu D_\mu \psi + G_\psi \bar{\psi}\phi\psi$$

- E a reação $W^+W^- \rightarrow W^+W^-$? Com o Higgs os cálculos já dão resultados razoáveis!



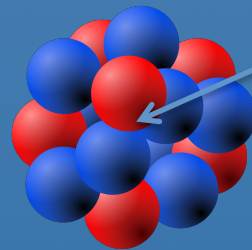
A quebra de simetria em bonecos



O átomo

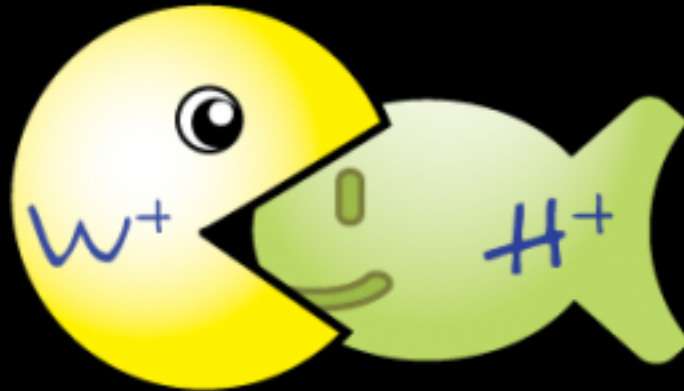
99.999 999 999 9% do
volume do átomo é
vazio....

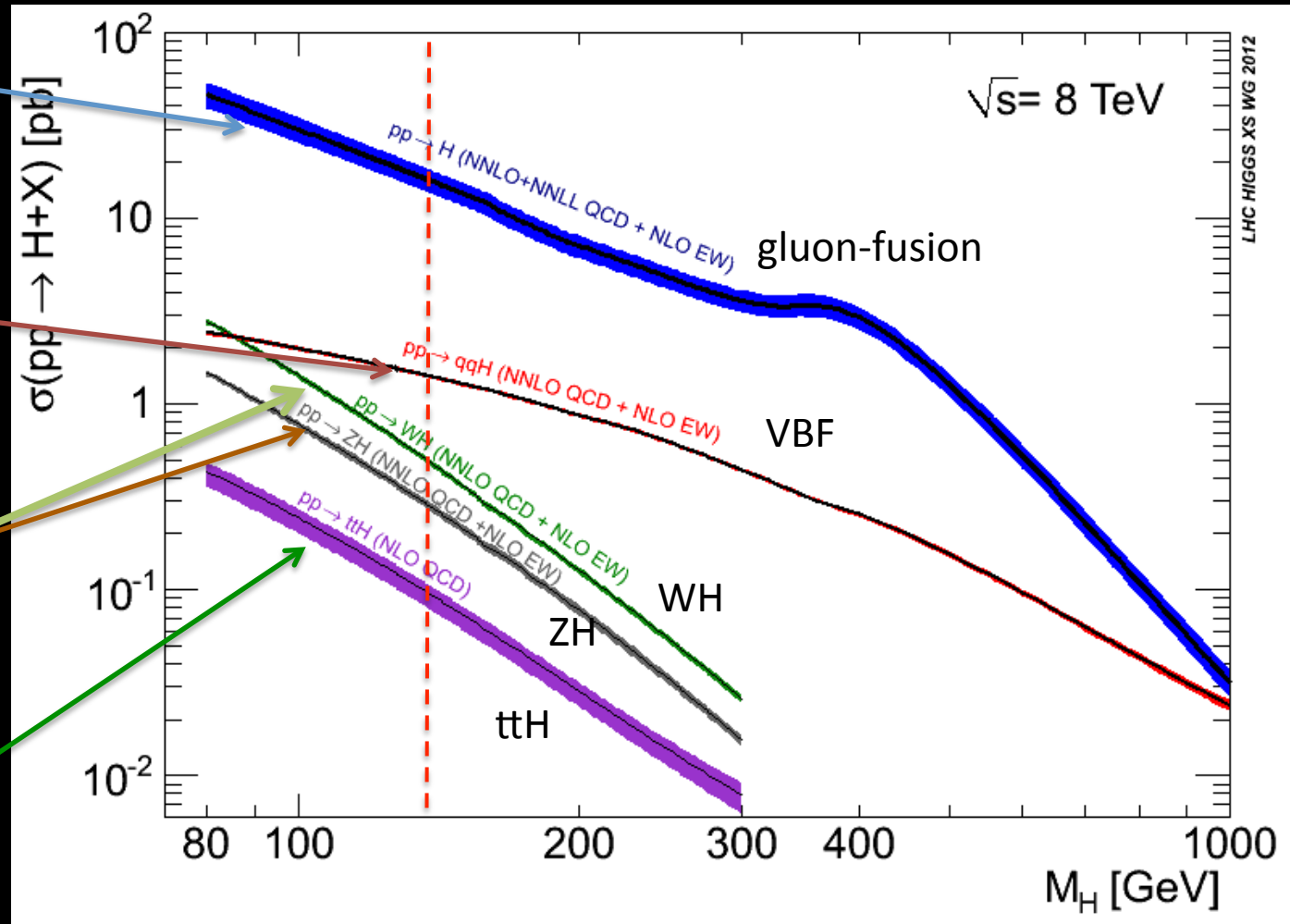
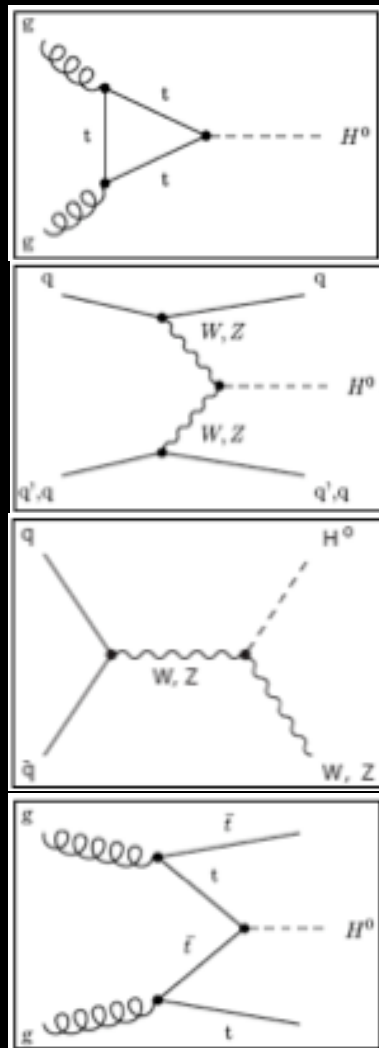
...mas o vazio,
afinal, está cheio
de bosões de
Higgs
e outras
partículas!

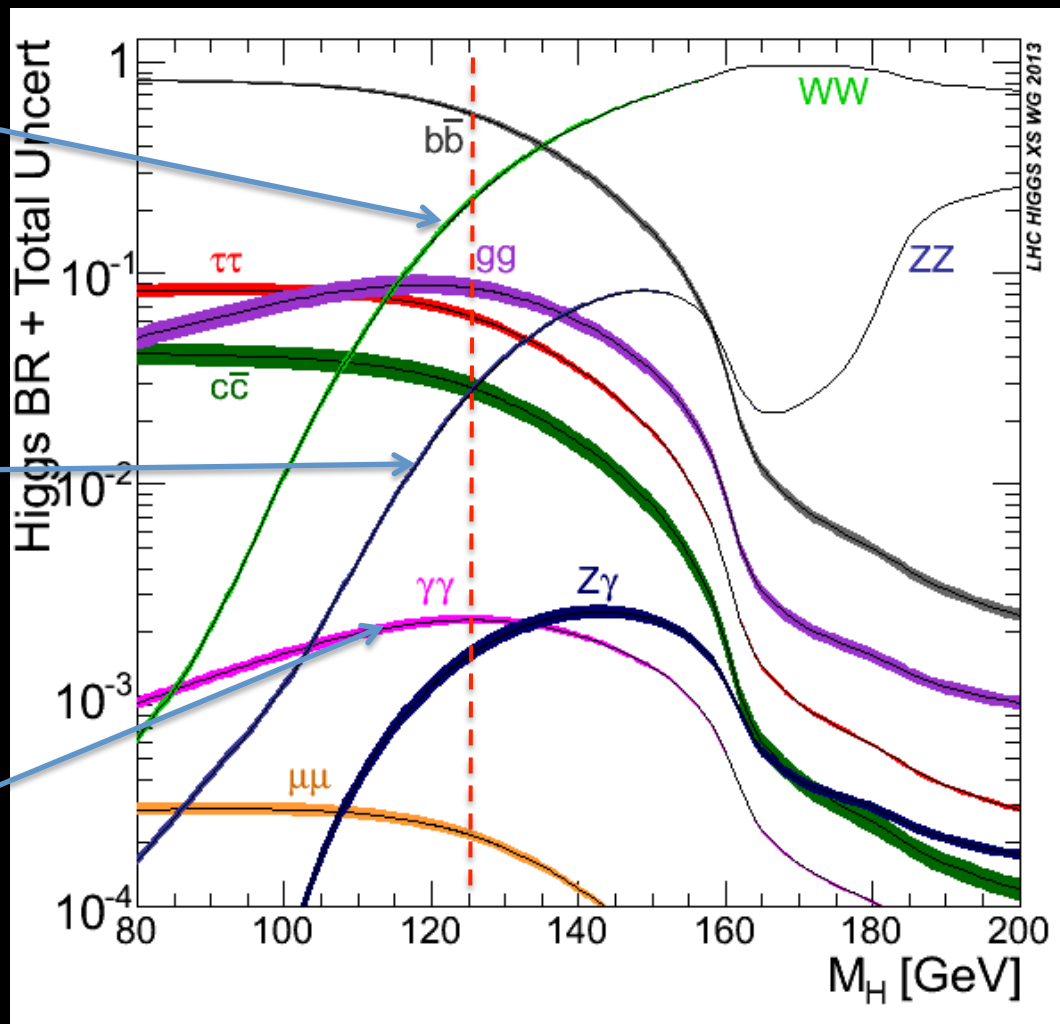
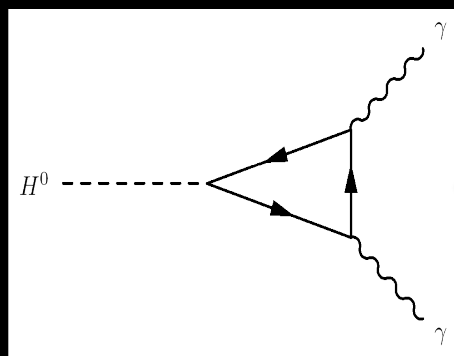
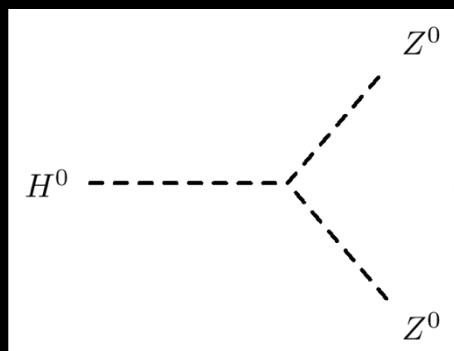
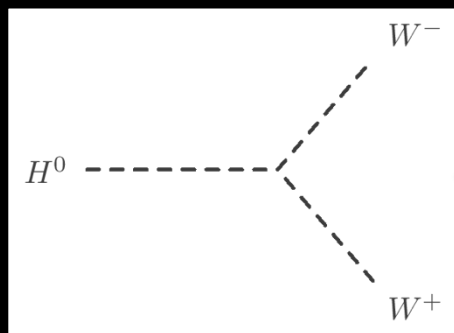


núcleo x1000

À pesca do bóson de Higgs

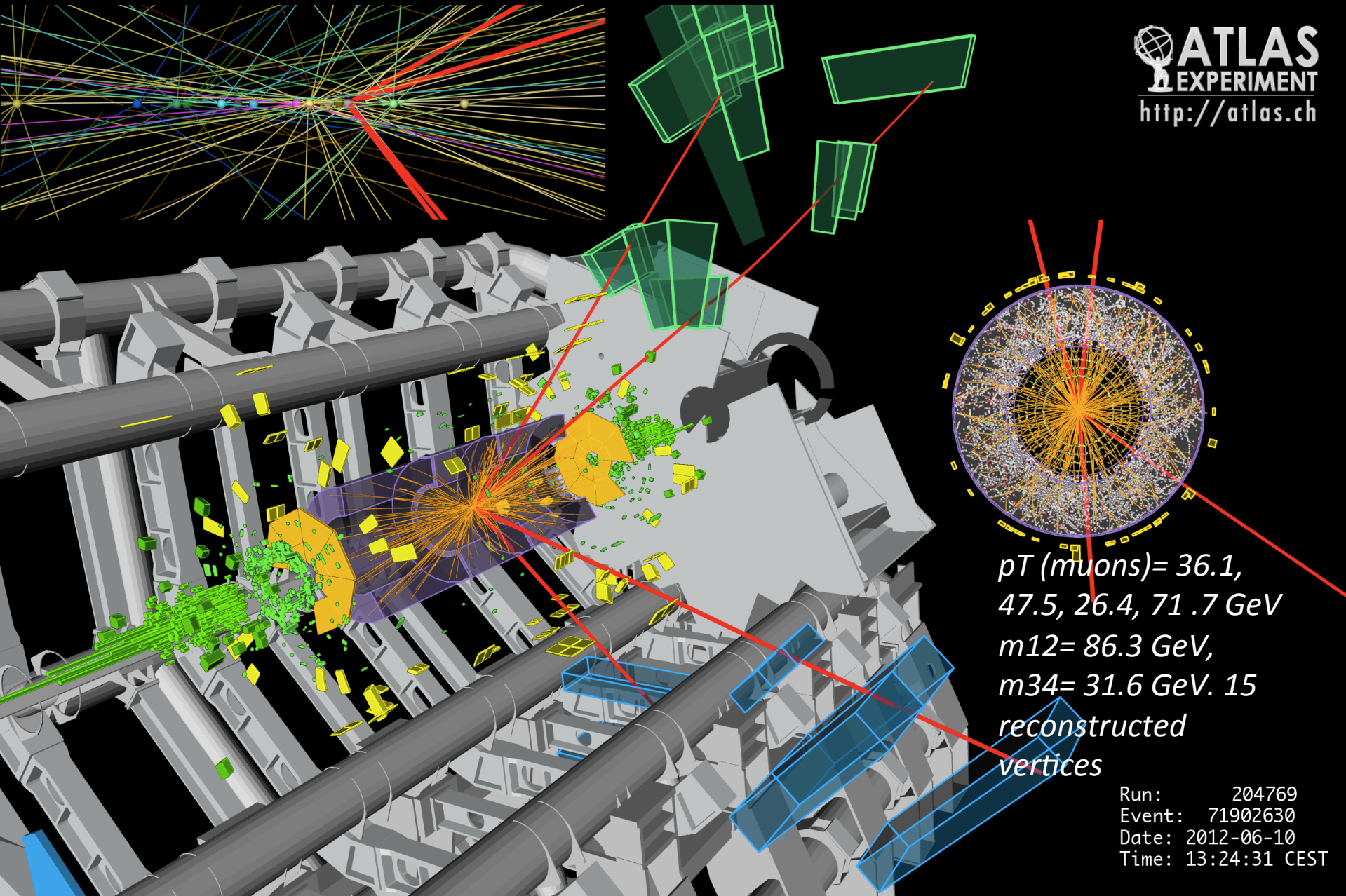






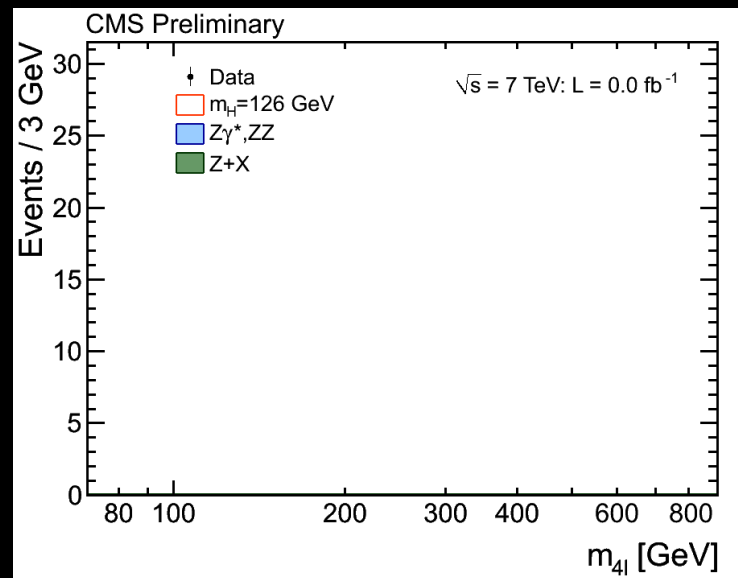
$$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\mu$$

ATLAS
EXPERIMENT
<http://atlas.ch>



Uma agulha num milhão de palheiros

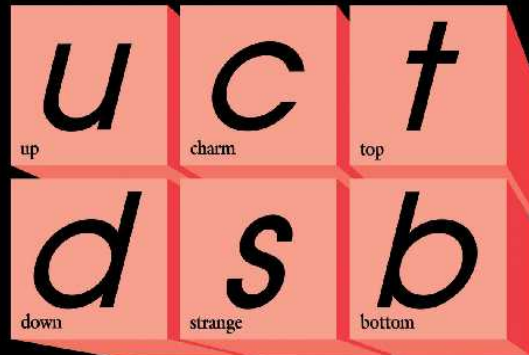
- Para encontrar o bóson de Higgs foi preciso produzir cerca de 8 000 000 000 000 colisões de prótons no LHC (8 bilhões, run de 2012)
- Havia um Higgs em cerca de 800 000 colisões
- 4 000 colisões puderam ser usadas na descoberta
- Cerca de 30 colisões deram o pico da massa do Higgs na figura abaixo



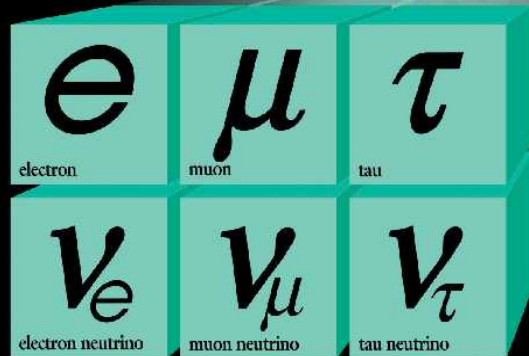
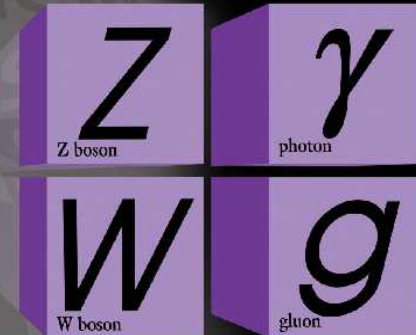
E depois da descoberta?



Quarks

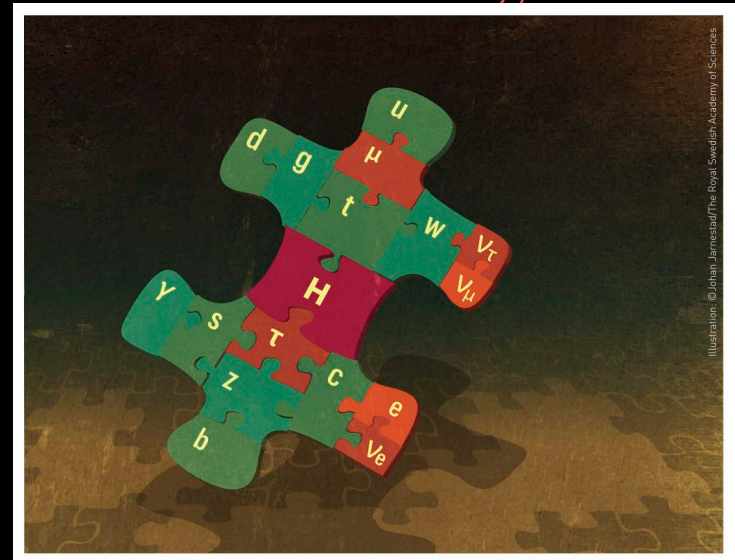
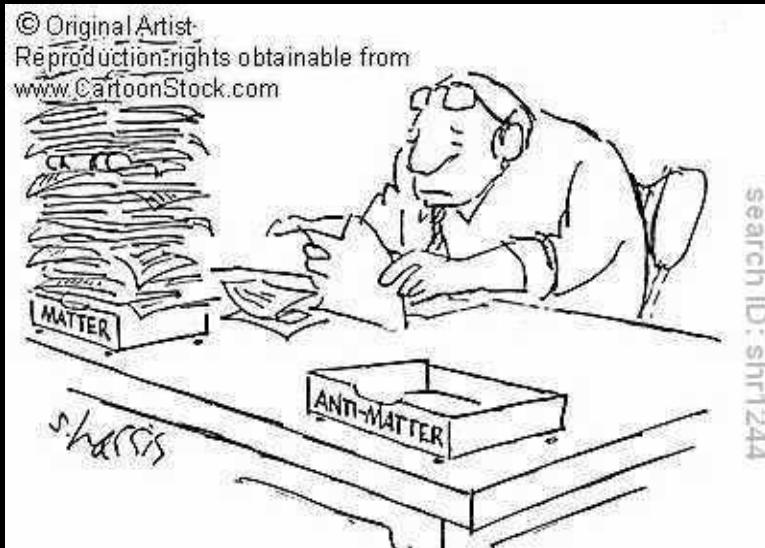


Forces



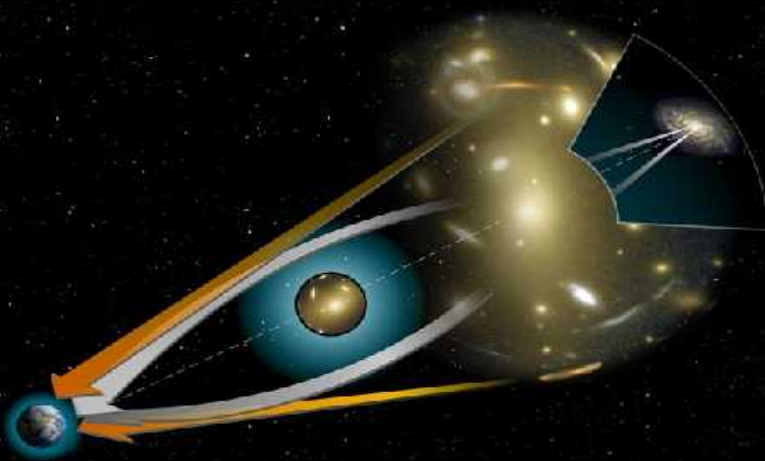
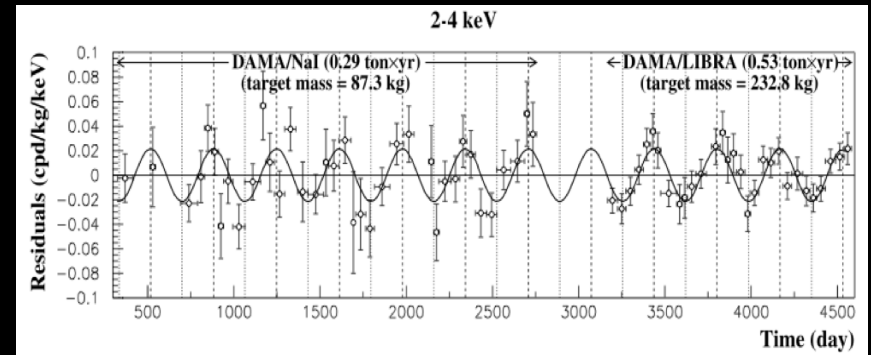
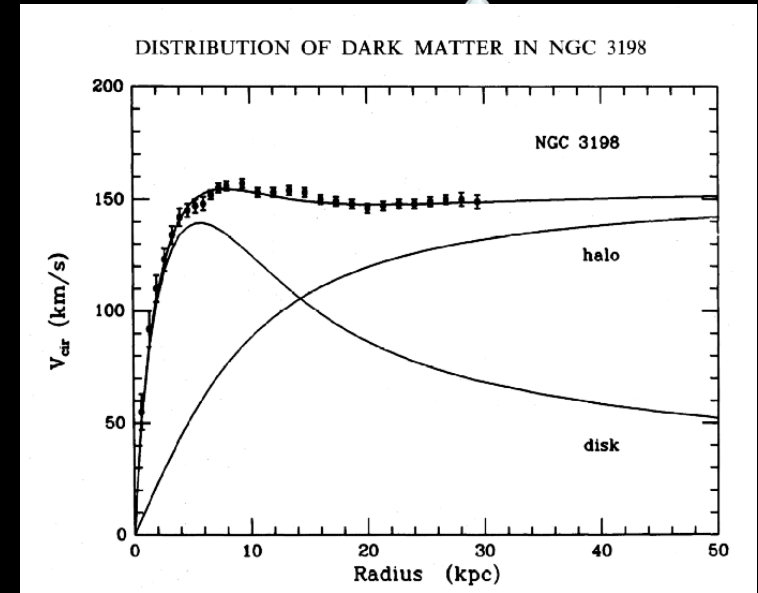
Leptons

- O Modelo Standard NÃO pode ser o puzzle completo!
- Há uma dinâmica subjacente ao mecanismo de Higgs?
- Porque é que a força das interações e as massas das partículas são tão diferentes?
- E porque é que a expansão do universo é acelerada? Energia escura!
- União das forças a alta energia?
- Para onde foi a antimatéria?
- O que é a matéria escura



Matéria Escura

- A sua existência no Universo é clara:
 - Rotação de galáxias
 - Espectro da radiação de fundo
 - Microlensing
- Mas **não sabemos o que é!**



O Modelo Padrão

Leptons

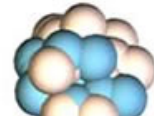
Electric Charge

Tau		-1	0		Tau Neutrino
Muon		-1	0		Muon Neutrino
Electron		-1	0		Electron Neutrino

Strong

Gluons (8) 

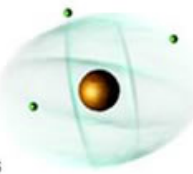
Quarks 

Mesons Baryons 

Nuclei 

Electromagnetic

Photon 

Atoms Light Chemistry Electronics 

Quarks

Electric Charge

Bottom		-1/3	2/3		Top
Strange		-1/3	2/3		Charm
Down		-1/3	2/3		Up

each quark:    3 colours

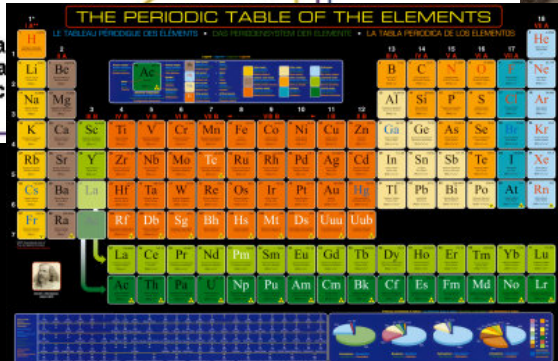
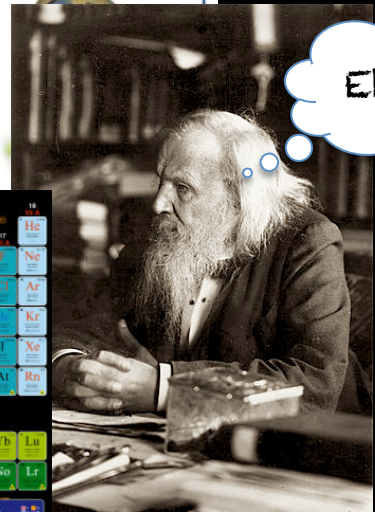
Gravitational

Graviton ? 

Solar Galaxy Black Holes 

Weak

Bosons (W,Z) 

EK! EK!

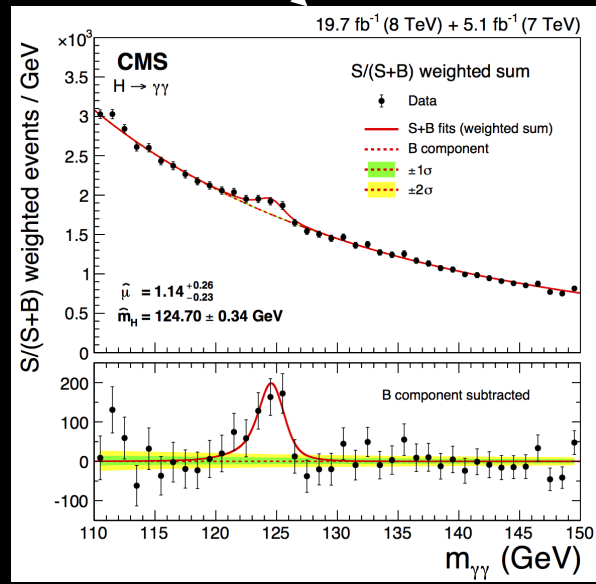
As últimas novidades: Um novo Higgs?!

Em Dezembro de 2015 as experiências ATLAS e CMS do LHC compararam os dados recolhidos durante o ano.

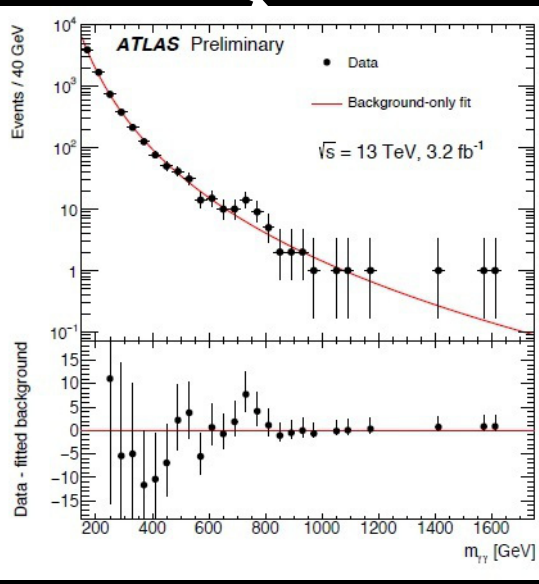
Tiveram uma pequena surpresa que se poderá revelar muito significativa...

Há um pequeno excesso de colisões onde são produzidos 2 fotões de muito alta energia. Estes podem ter resultado da desintegração de uma partícula com a massa de cerca de 750 GeV.

Onde vimos isto antes? A desintegração do Higgs (com a massa de 125 GeV) resultando em dois fotões foi um dos sinais que levou à descoberta deste bóson. Será que temos um segundo Higgs, mais pesado do que aquele que já conhecemos?



Sinal do Higgs a desintegrar-se em dois fotões



O possível sinal, ainda com pouca significância estatística, observado pelas experiências do LHC.

Fim

Perguntas??



A Colaboração ATLAS

3000 cientistas
(1000 estudantes)
33 países
177 universidades
e laboratórios



Muitas extensões do Modelo Padrão contêm partículas que podem explicar a natureza da matéria escura.

Por exemplo, nas teorias supersimétricas, existe uma nova partícula simétrica de cada uma das já conhecidas.

A mais leve dessas novas partículas, poderia ser a partícula da matéria escura.

Mas nas extensões supersimétricas do Modelo Padrão não pode haver só um bóson de Higgs.

No exemplo mais simples deverão existir 5 bósons de Higgs: chamados h , H , A , H^+ e H^- .

E, então, qual deles dá massa a cada uma das outras partículas?

E este é o mais leve? Podemos também produzir os outros no LHC?



Pessoas e Instituições



LIP (Lisboa/Coimbra/Minho)

Em colaboração com:

FCUL

FCTUC

CFNUL

CEFITEC/UNL

IDMEC/IST

INESC

U. Minho

Programa de treino de engenheiros AdI

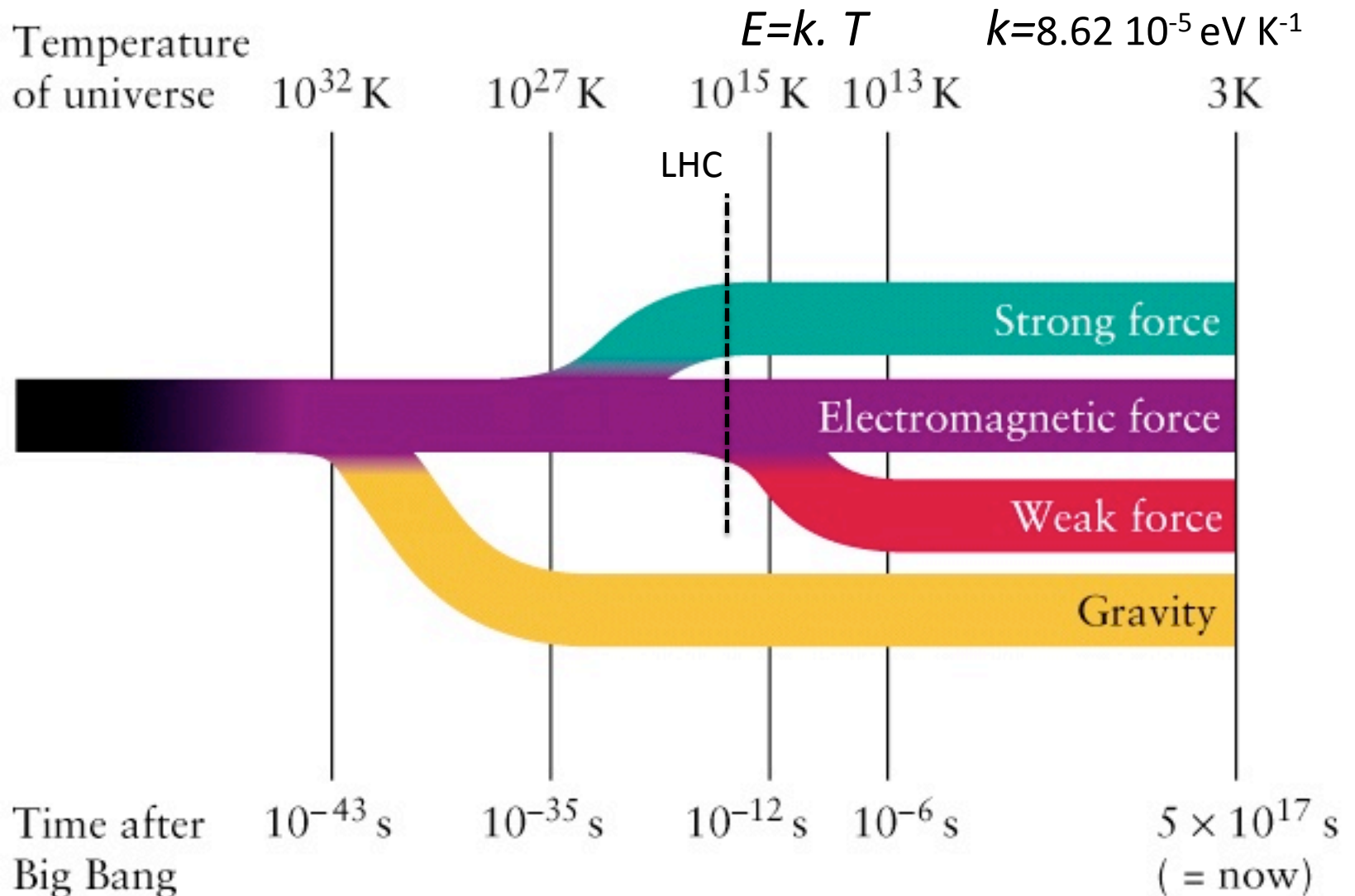
Investigadores ~ 20

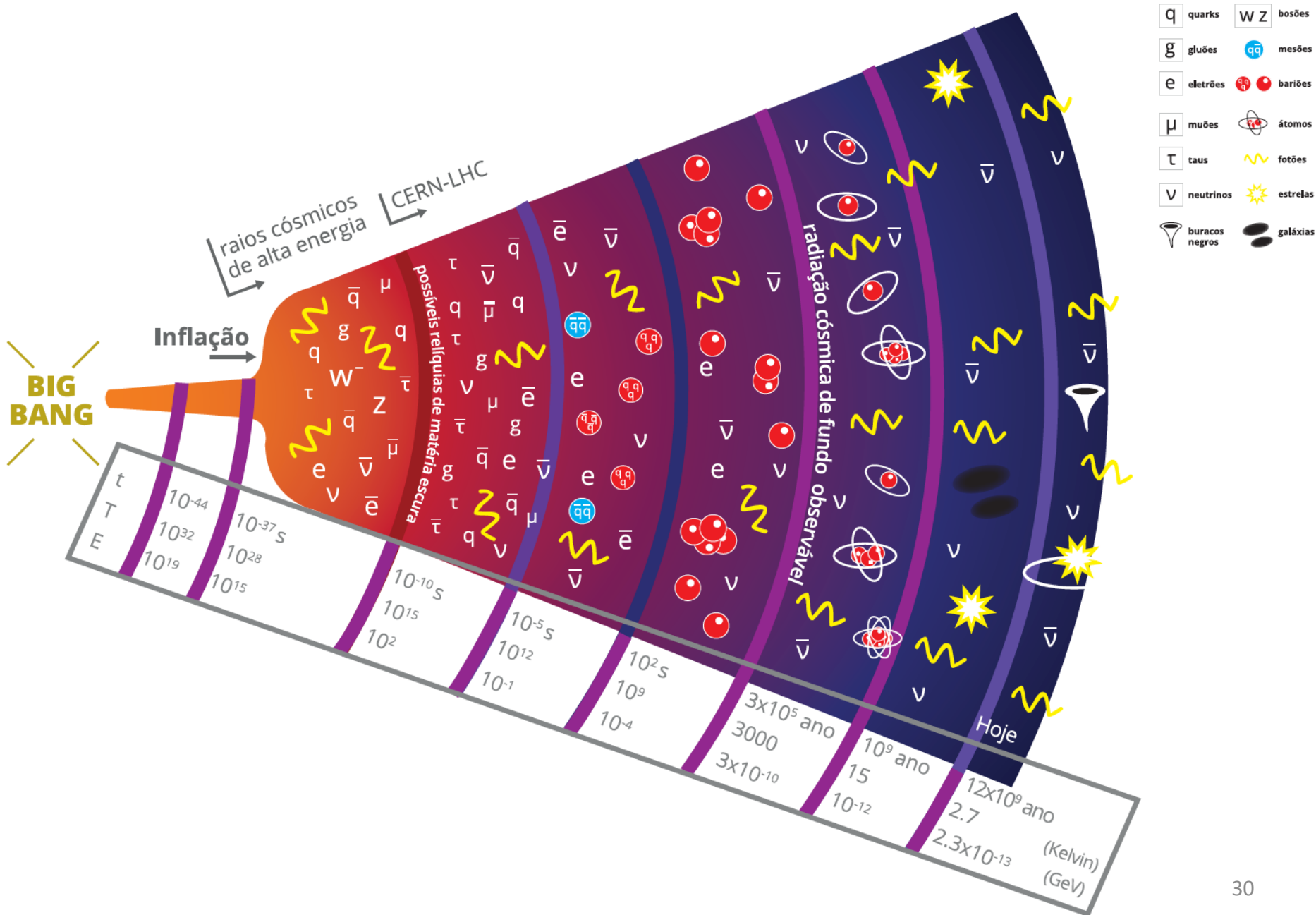
Estudantes ~ 15

Engenheiros, pessoal técnico (em Portugal) ~ 10

Engenheiros no CERN do programa ADI > 5

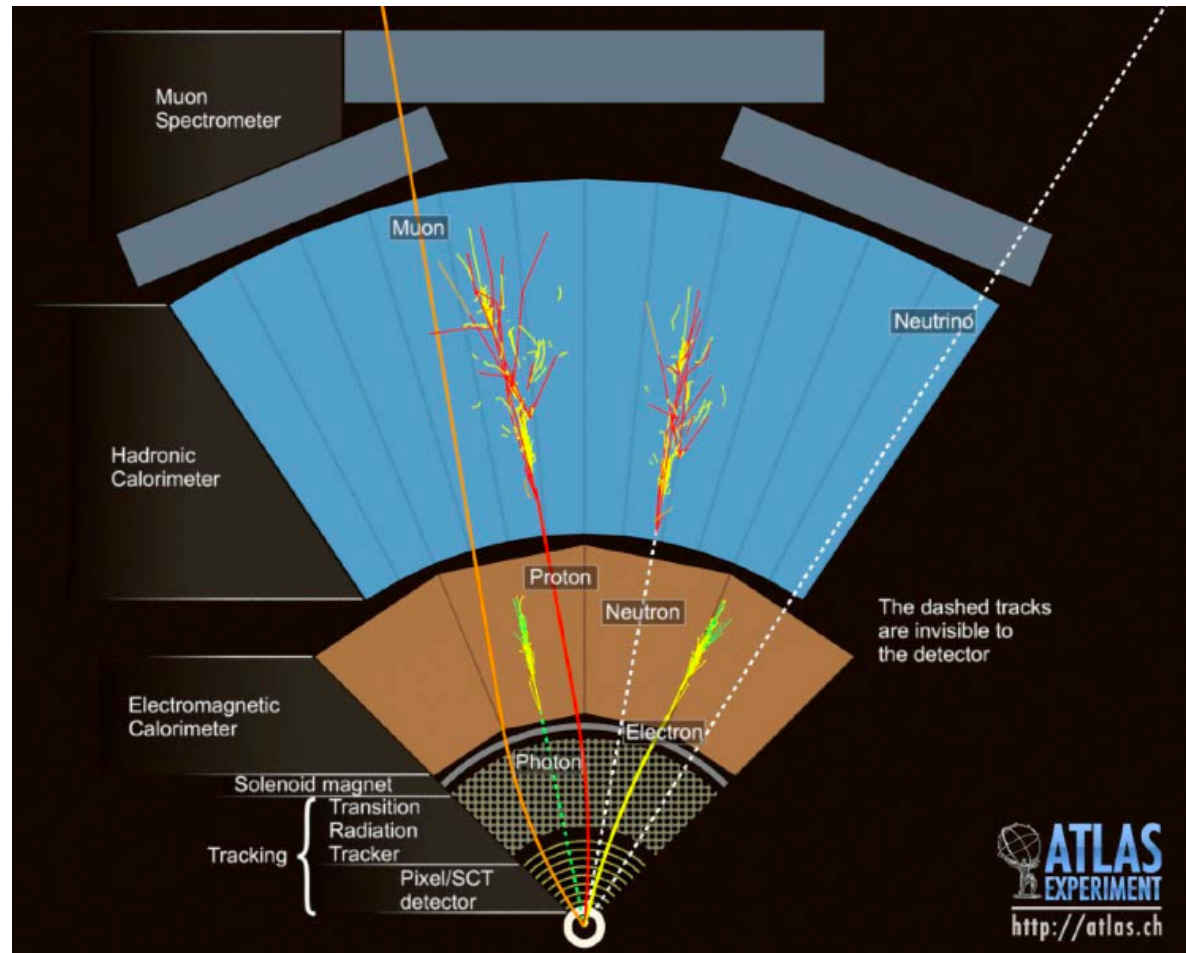
Forces and expansion of the Universe



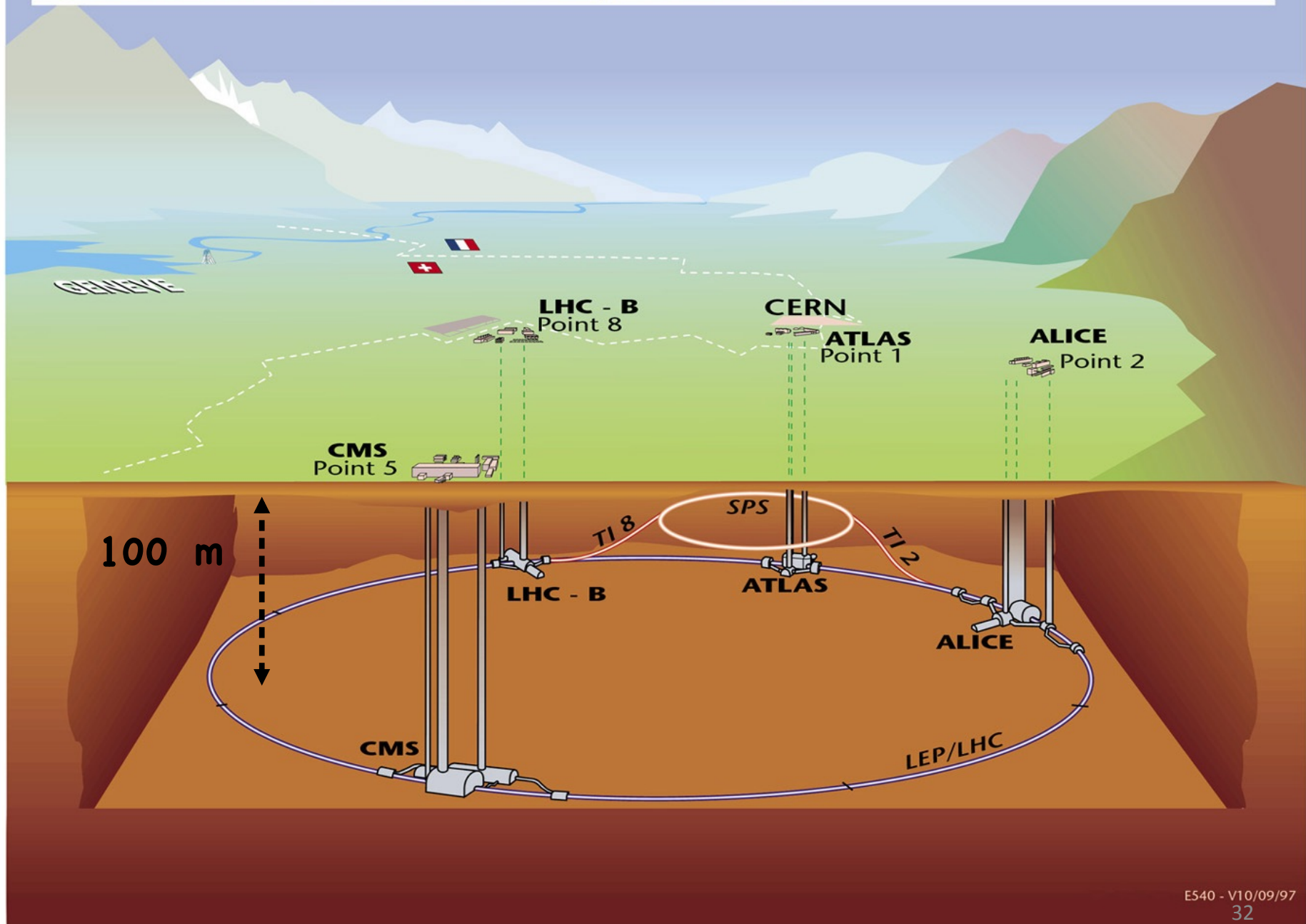


Particle Detectors

- Detectors and accelerators which push the boundaries of technology
- But that would need a much longer talk...



Overall view of the LHC experiments.



Muon Spectrometer: $|\eta| < 2.7$

Air-core toroids and gas-based muon chambers
 $\sigma/p_T = 2\% \text{ @ } 50\text{GeV to } 10\% \text{ @ } 1\text{TeV (ID+MS)}$

EM calorimeter: $|\eta| < 3.2$

Pb-LAr Accordion
 $\sigma/E = 10\%/\sqrt{E} \oplus 0.7\%$

Hadronic calorimeter:

$|\eta| < 1.7$ Fe/scintillator
 $1.3 < |\eta| < 4.9$ Cu/W-Lar
 $\sigma/E_{\text{jet}} = 50\%/\sqrt{E} \oplus 3\%$

Inner Tracker: $|\eta| < 2.5, B=2\text{T}$

Si pixels/strips and Trans. Rad. Det.
 $\sigma/p_T = 0.05\% p_T (\text{GeV}) \oplus 1\%$

- $L = 44 \text{ m}, \varnothing \approx 25 \text{ m}$
- 7000 tonnes
- $\approx 10^8$ electronic channels
- 3-level trigger reducing 40 MHz collision rate to 200 Hz of events to tape

GRID: computação distribuída

