

A experiência ATLAS e mais umas coisas...

Ricardo Gonçalo, Laborat3rio de Instrumenta3o e F3sica Experimental de Part3culas (LIP)
Escola de Professores no CERN em L3ngua Portuguesa - 2014
CERN, 26 de Agosto de 2014

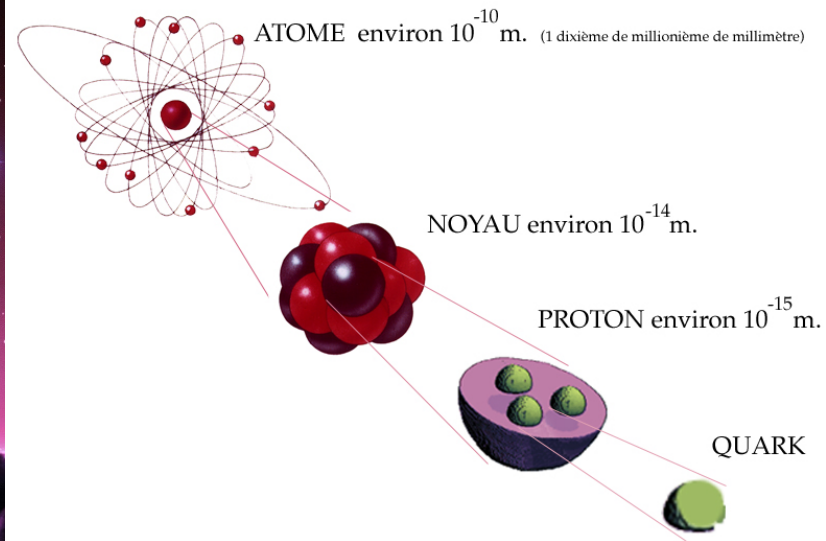


**INVESTIGADOR
FCT**



Sumário

- Os objectivos de Física
- O acelerador LHC e experiência ATLAS
 - Participação Portuguesa e Brasileira
- Alguns resultados de Física de ATLAS



Il y a environ onze milliards de milliards d'atomes de fer dans un milligramme de fer !

D.Bertola/CERN



O Modelo Padrão

Leptons

Electric Charge

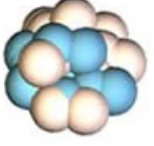
Tau		-1	0		Tau Neutrino
Muon		-1	0		Muon Neutrino
Electron		-1	0		Electron Neutrino

Strong

Gluons (8) 

Quarks 

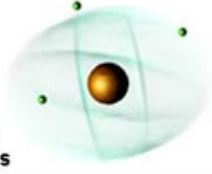
Mesons Baryons 

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 ? 

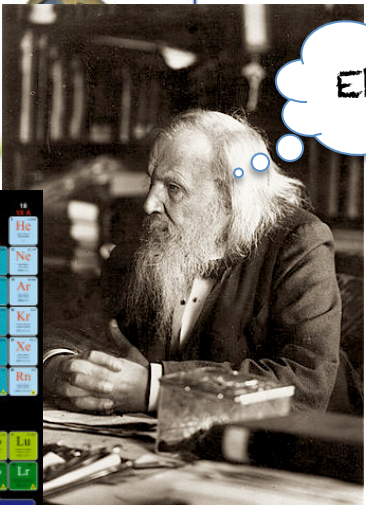


Weak

Bosons (W,Z)

THE PERIODIC TABLE OF THE ELEMENTS





EW! EW!

O Elo que Faltava: Mecanismo de Higgs

Leptons			
Electric Charge			
Tau	-1	0	Tau Neutrino
Muon	-1	0	Muon Neutrino
Electron	-1	0	Electron Neutrino

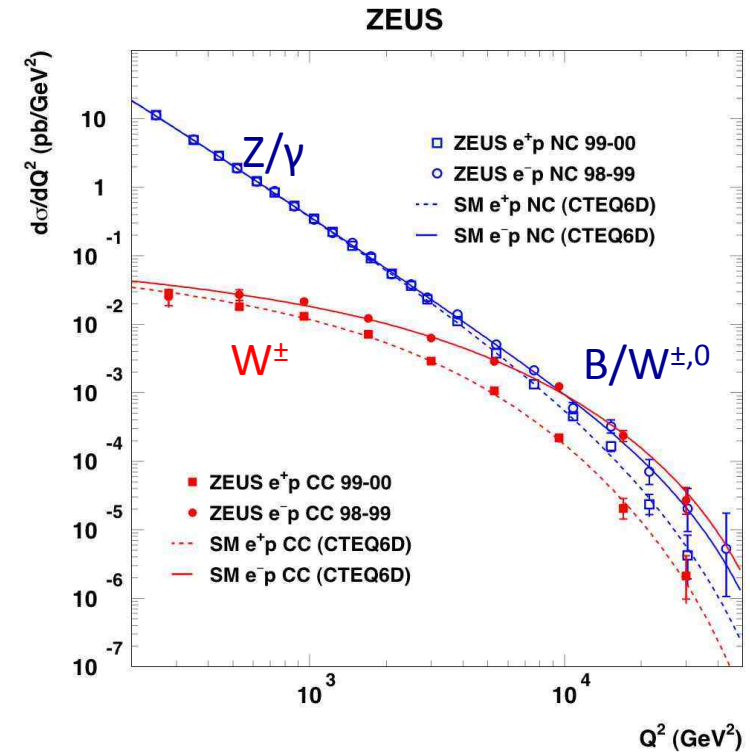
Strong	
Gluons (8)	
Quarks	Mesons Baryons
Nuclei	

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: R B G 3 colours			

Gravitational	
Graviton ?	
Solar system Galaxies Black holes	

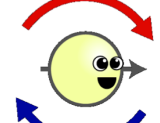
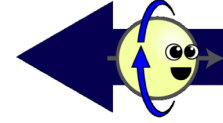
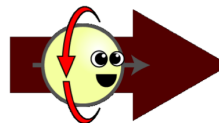
Weak	
Bosons (W,Z)	
Neutron decay Beta radioactivity Neutrino interactions Burning of the sun	



$$\varepsilon_-^\mu = \frac{1}{\sqrt{2}}(0, 1, -i, 0)$$

$$\varepsilon_+^\mu = \frac{1}{\sqrt{2}}(0, 1, i, 0)$$

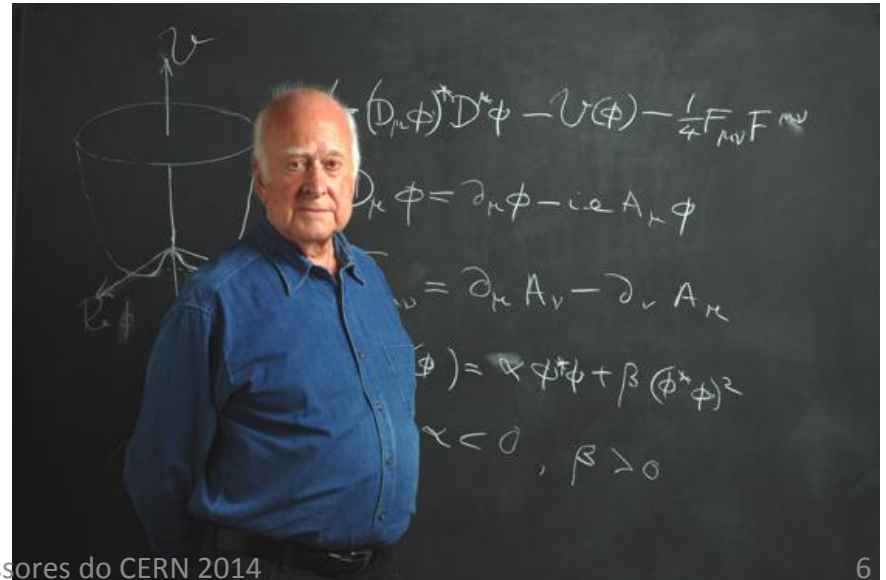
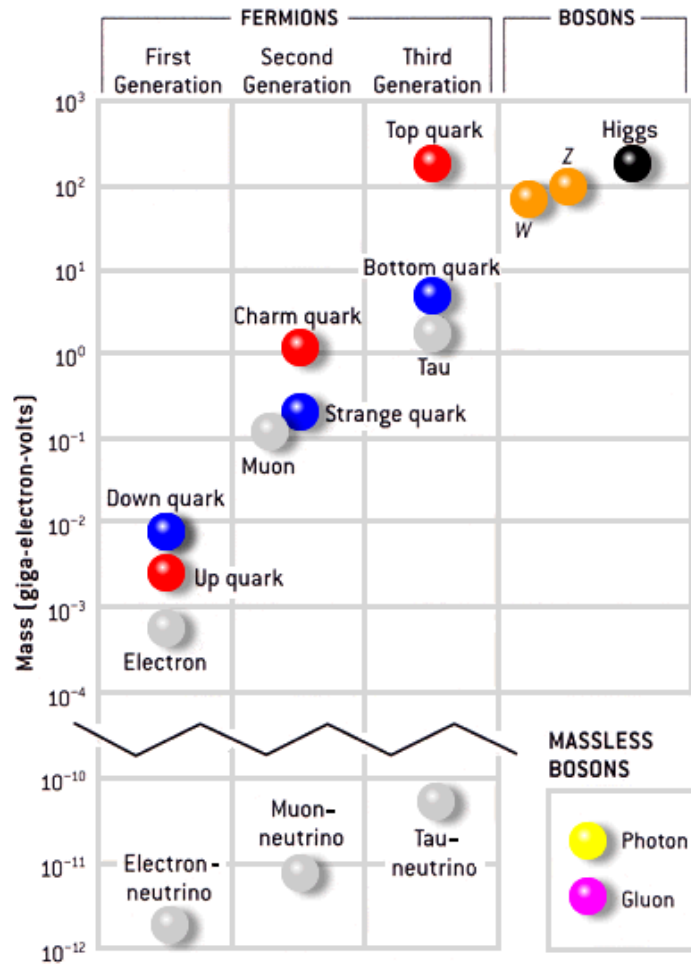
$$\varepsilon_L^\mu = \frac{1}{m}(p_z, 0, 0, E)$$



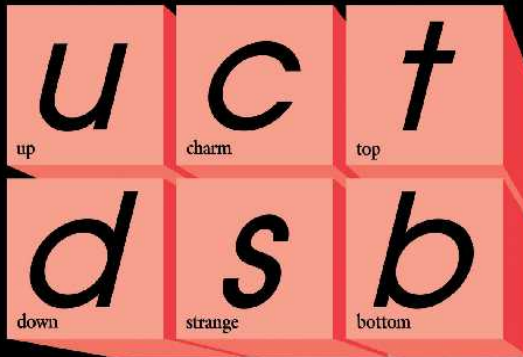
Transverse: photon-like

Longitudinal

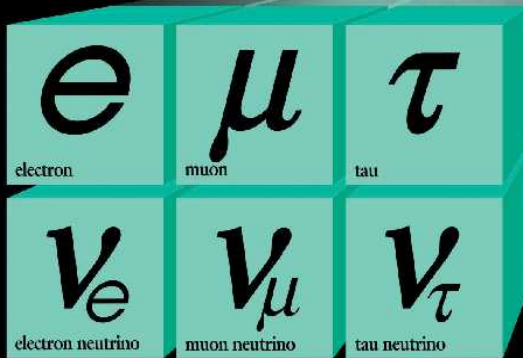
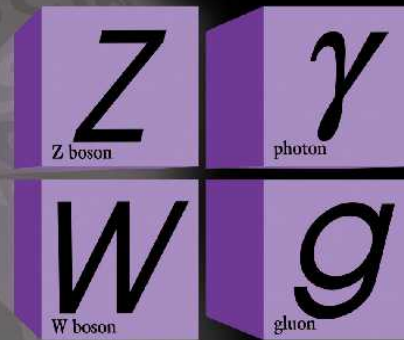
O Elo que Faltava: Mecanismo de Higgs



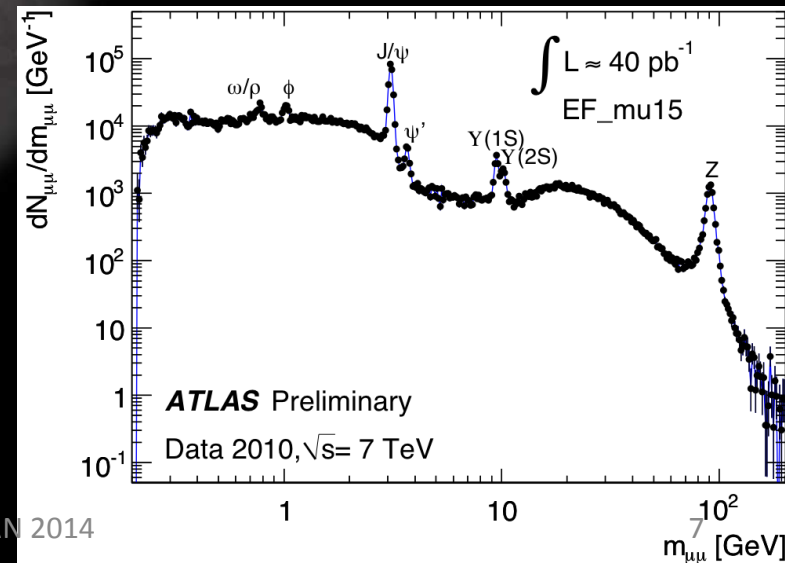
Quarks



Forces

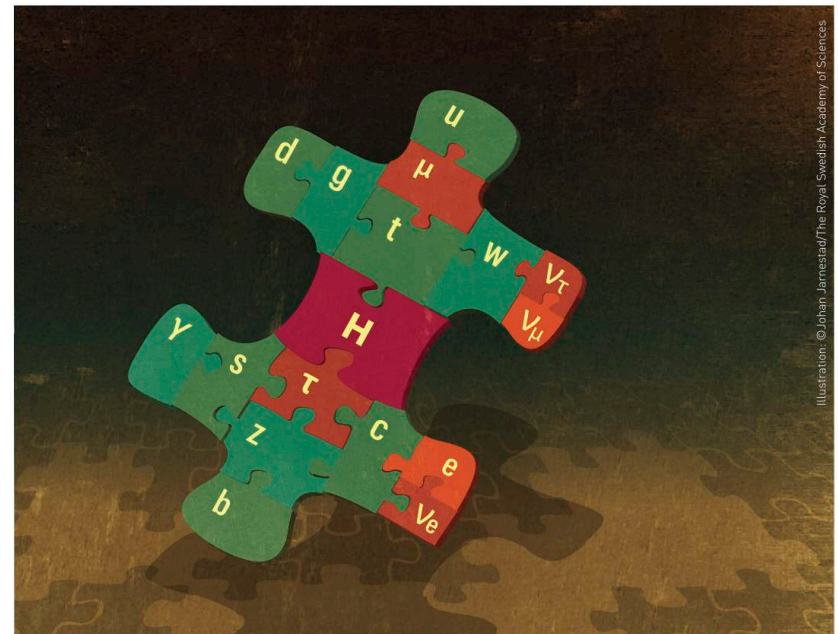
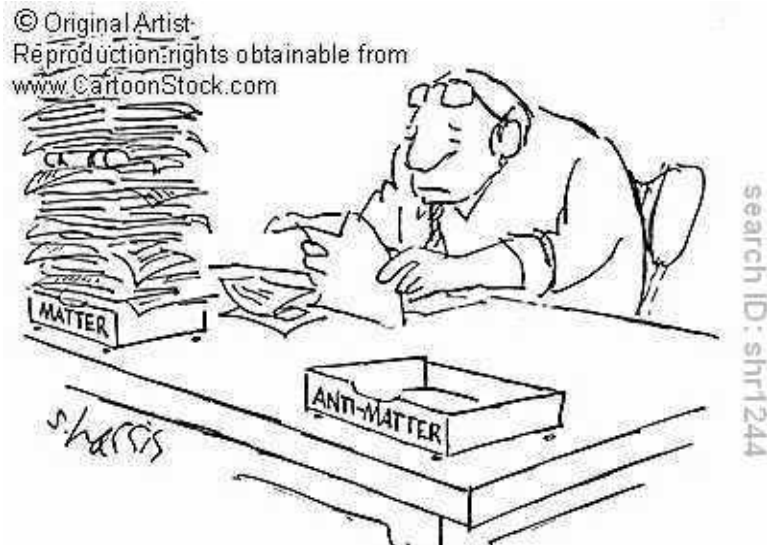


Leptons



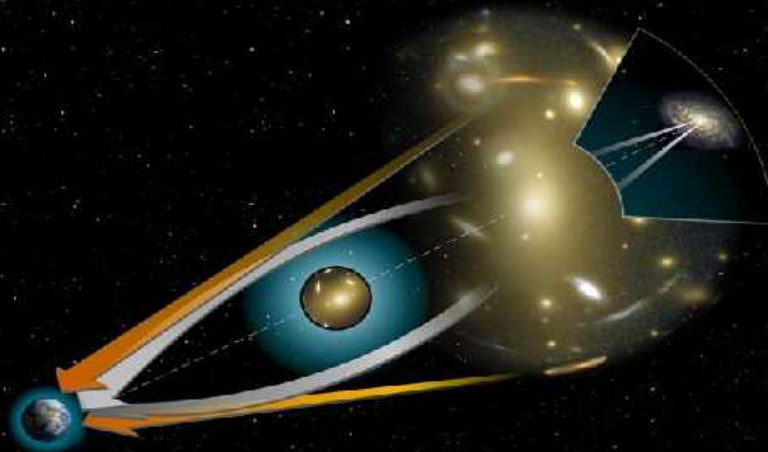
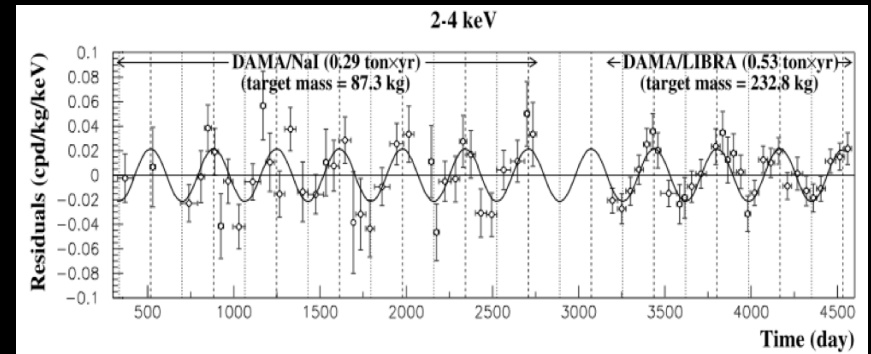
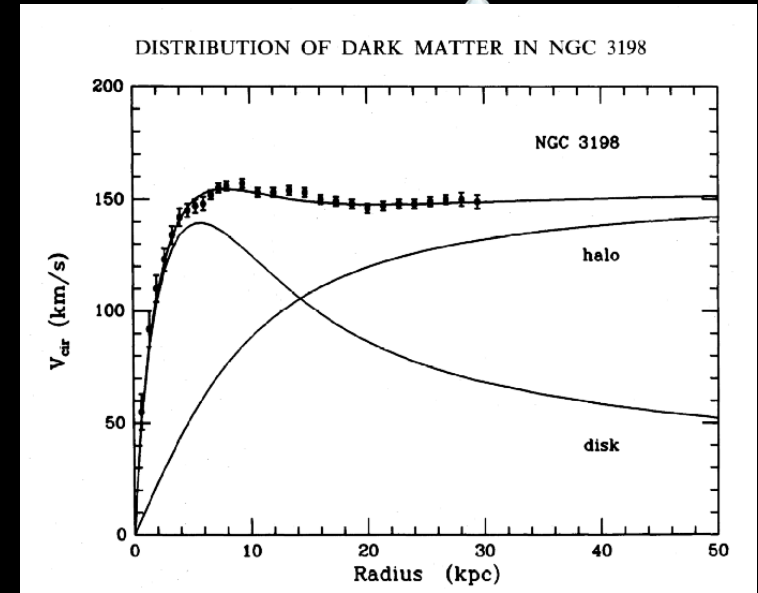
E agora?...

- 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?

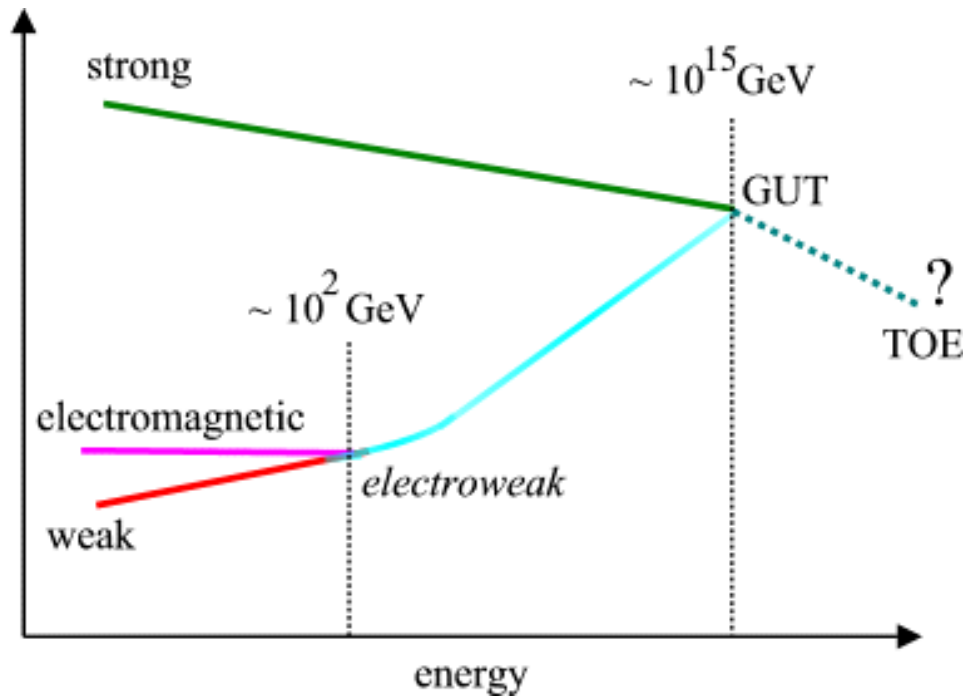
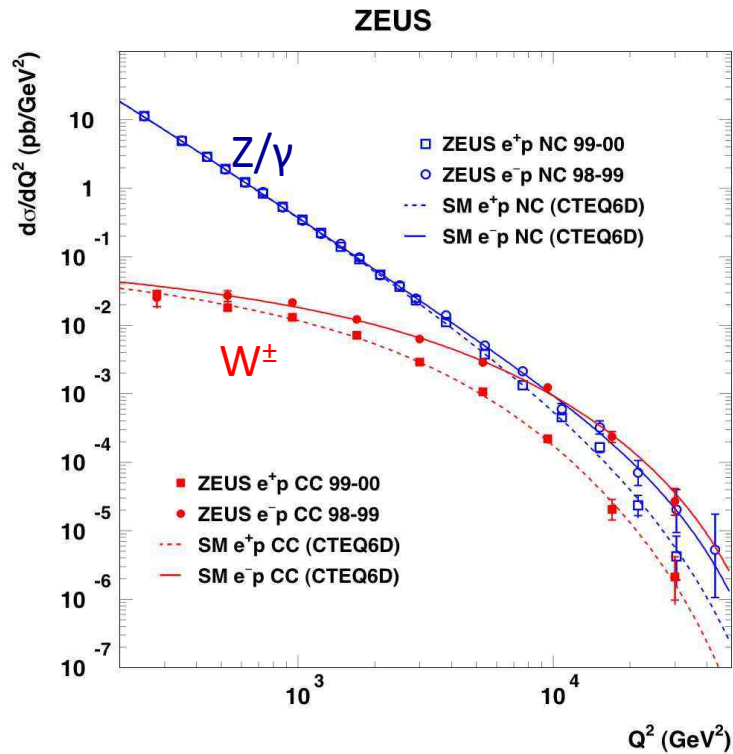


Matéria Escura

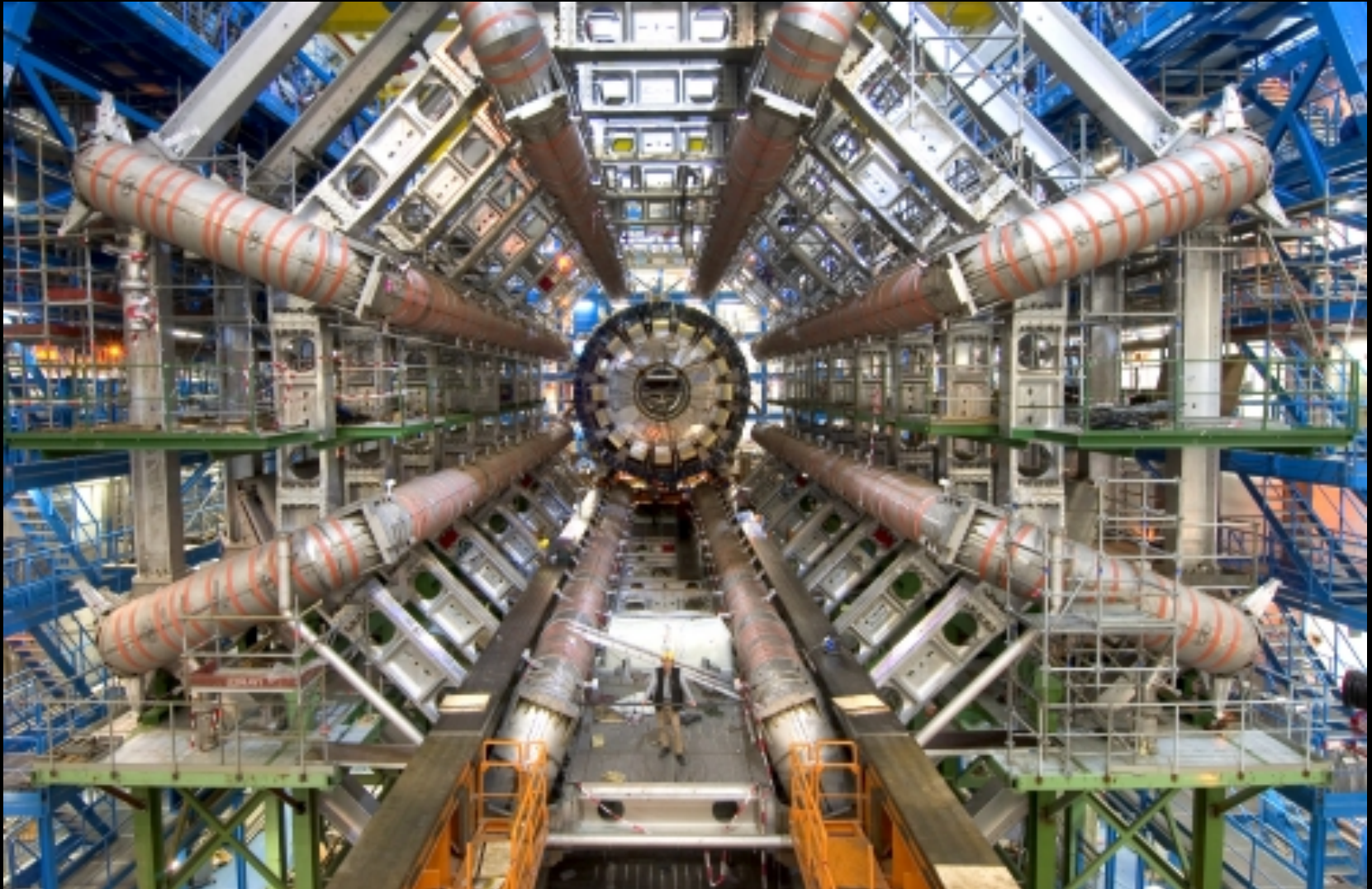
- A sua existência no Universo é clara:
 - Rotação de galáxias
 - Espectro da radiação de fundo
 - Microlensing
- Mas **não sabemos o que é!**



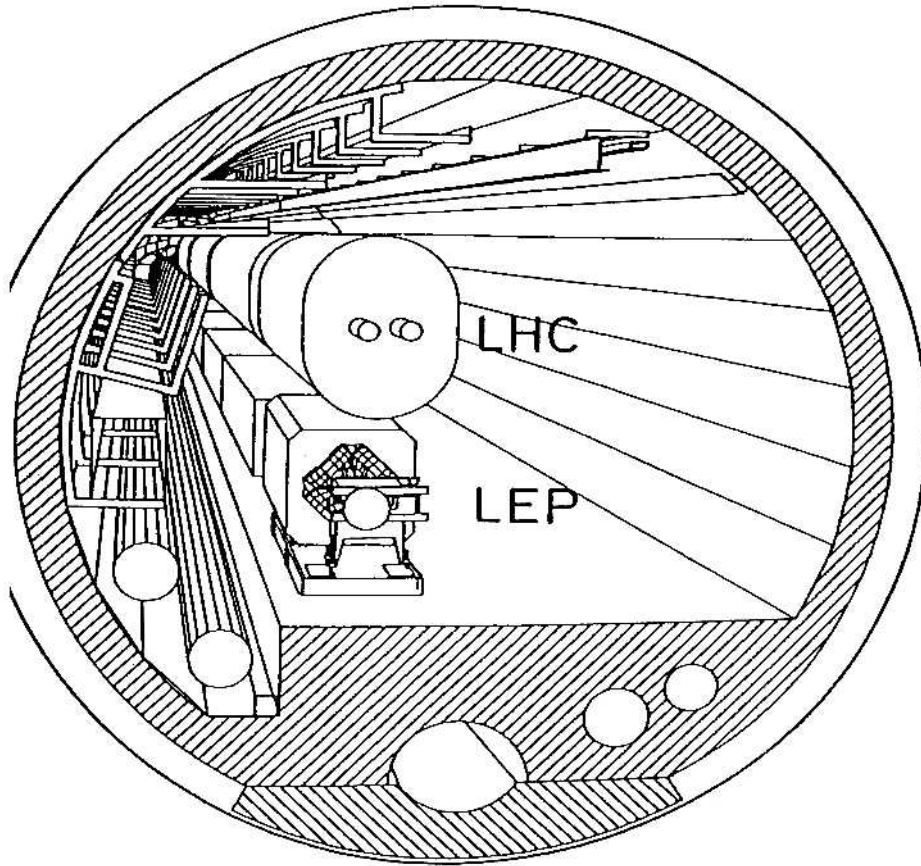
Unificação das interações?



O LHC e a Experiência ATLAS



A história começa há quase 30 anos...



LARGE HADRON COLLIDER IN THE LEP TUNNEL

Vol. I

PROCEEDINGS OF THE ECFA-CERN WORKSHOP

held at Lausanne and Geneva,
21-27 March 1984

Objectivos do LHC

what is the origin of mass?

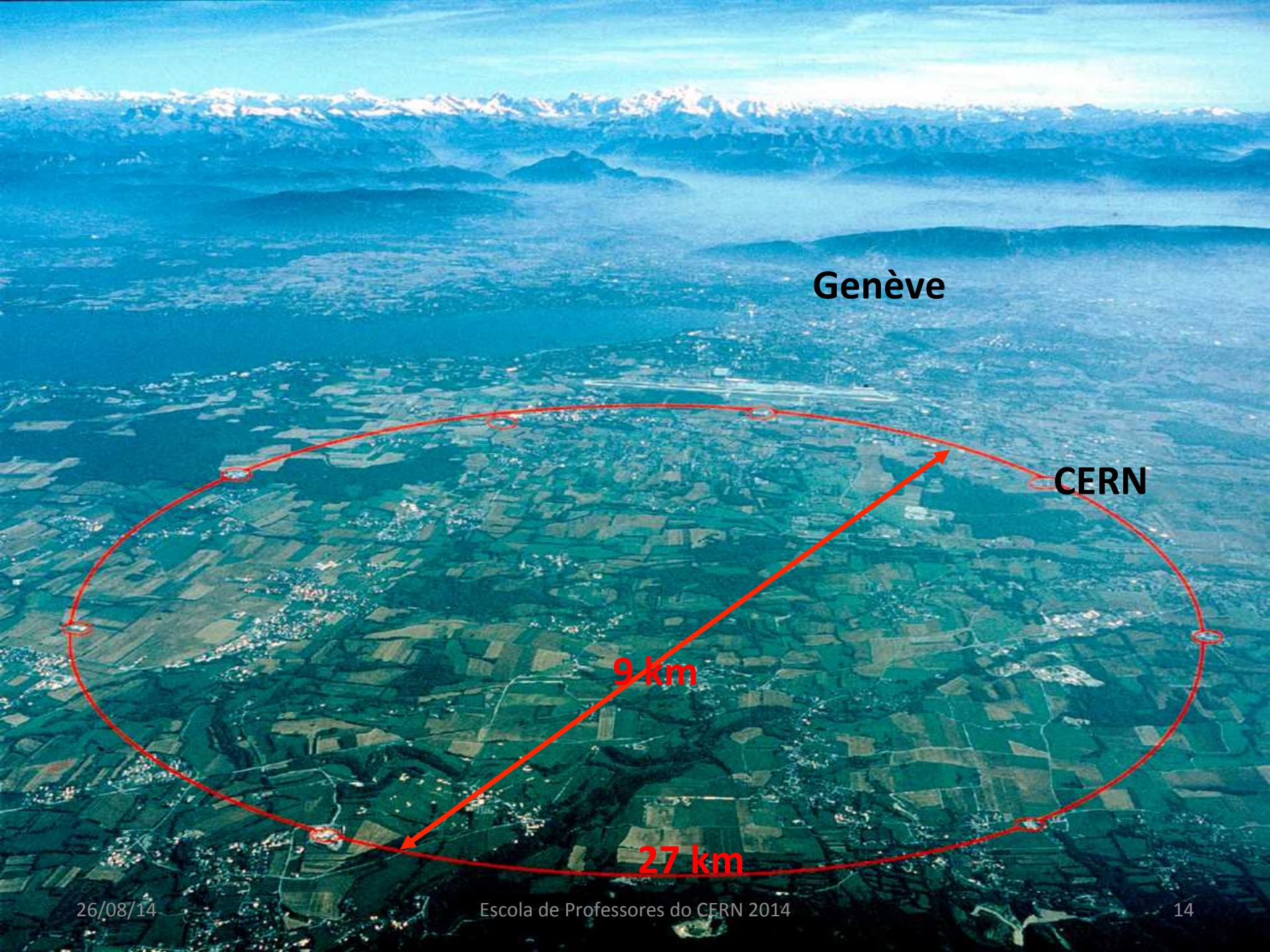
what kind of unification may exist beyond the standard model?

what is the origin of flavour?

is there a deeper reason for gauge symmetry?

We have simply too many a priori plausible hypotheses concerning the nature of symmetry breaking in the standard model. Experimentation in the TeV range at the constituent level is bound to provide most essential clues, and the present successes of the $p\bar{p}$ collider are a very strong encouragement to go to higher energies and to higher luminosities in hadron-hadron collisions.

extraído do “Summary Report” da Workshop de Lausanne, 1984



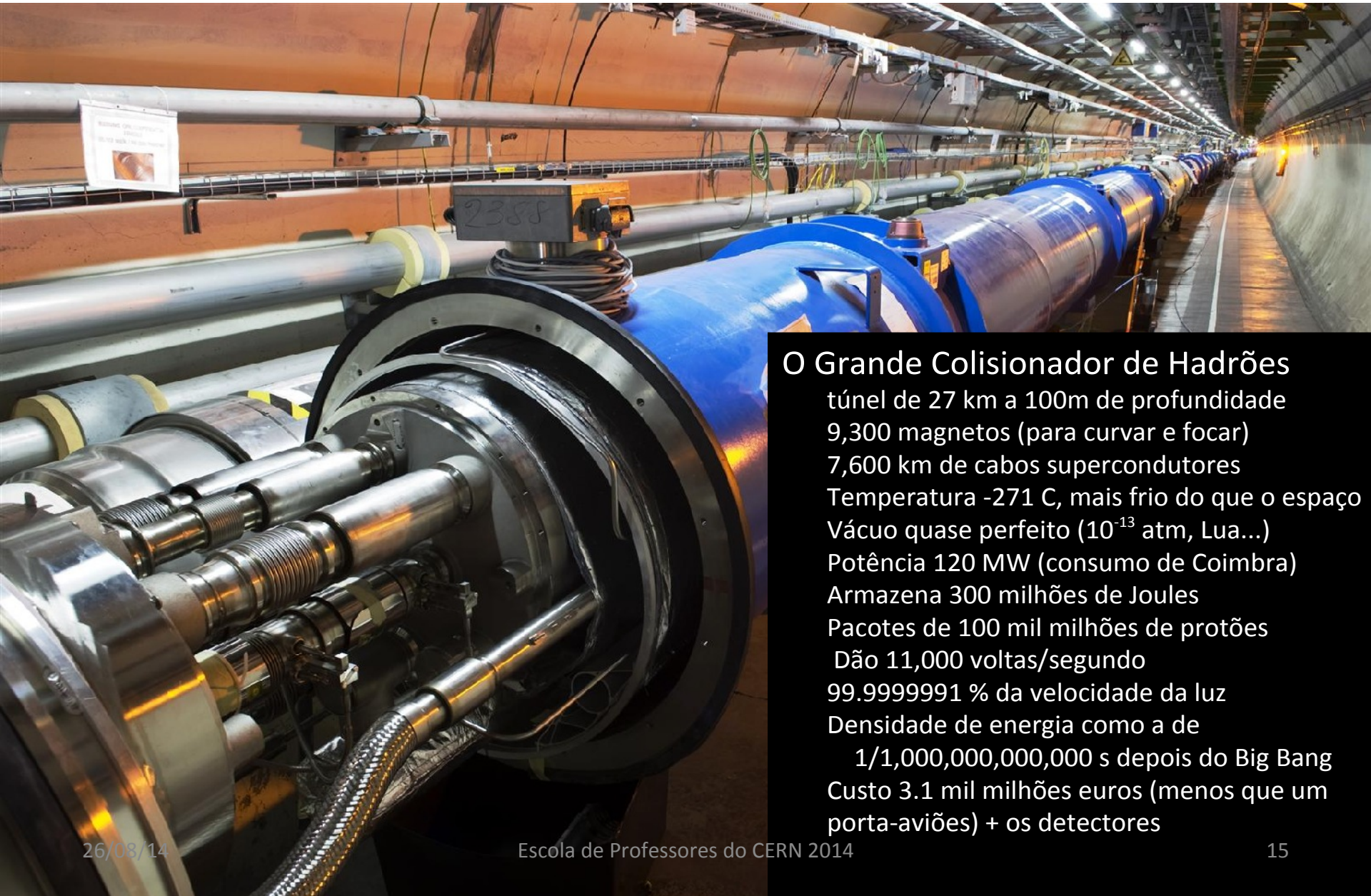
Genève

CERN

9 km

27 km

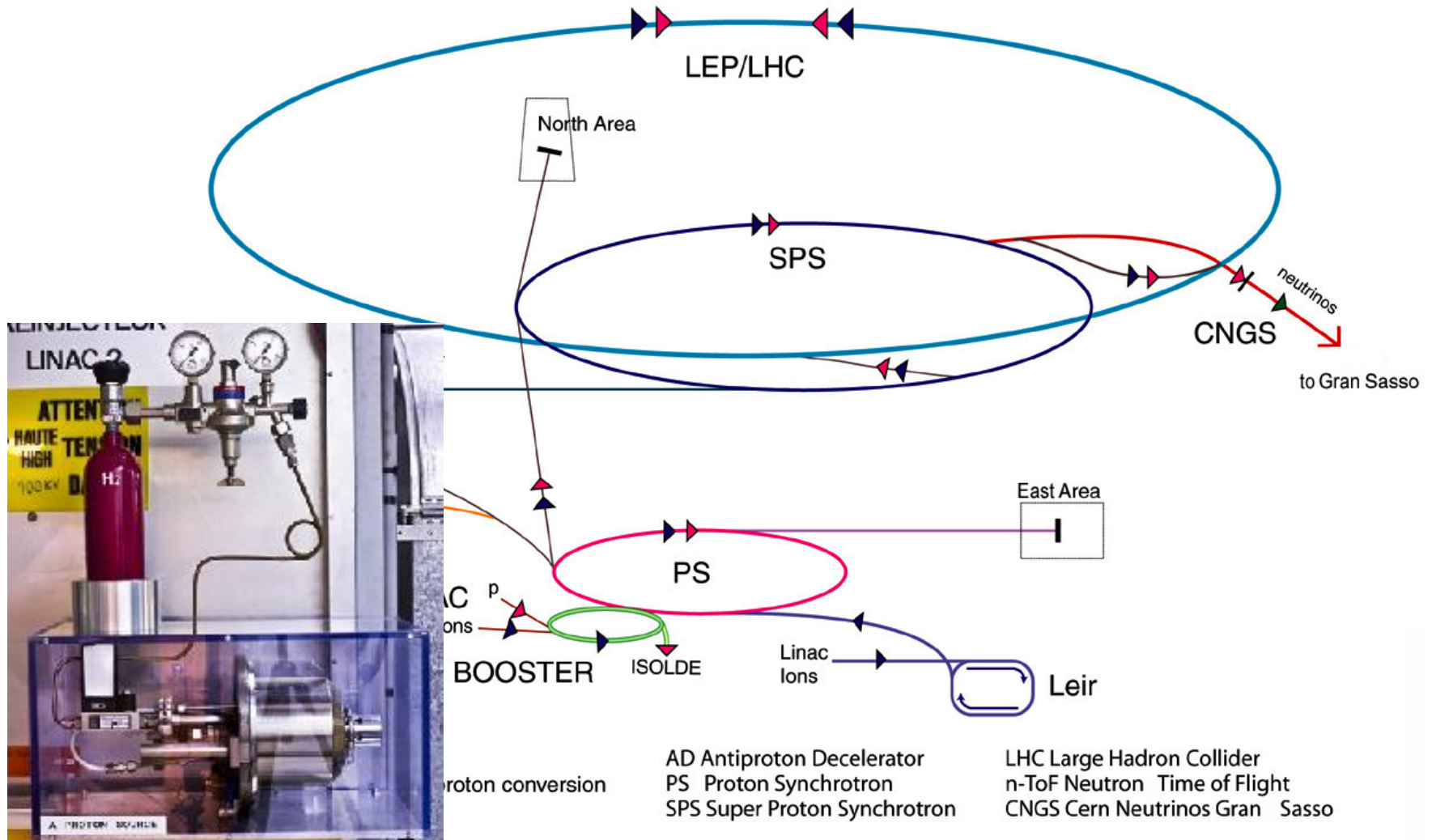
Large Hadron Collider



O Grande Colisionador de Hadrões
túnel de 27 km a 100m de profundidade
9,300 magnetos (para curvar e focar)
7,600 km de cabos supercondutores
Temperatura -271 C, mais frio do que o espaço
Vácuo quase perfeito (10^{-13} atm, Lua...)
Potência 120 MW (consumo de Coimbra)
Armazena 300 milhões de Joules
Pacotes de 100 mil milhões de prótons
Dão 11,000 voltas/segundo
99.9999991 % da velocidade da luz
Densidade de energia como a de
1/1,000,000,000,000 s depois do Big Bang
Custo 3.1 mil milhões euros (menos que um porta-aviões) + os detectores

LINAC2 → **50 MeV**
Booster → **1.4 GeV**

Proton Synchrotron (PS) → **25 GeV**
Super Proton Synchrotron (SPS) → **450 GeV**
Large Hadron Collider (LHC) → **7 TeV**

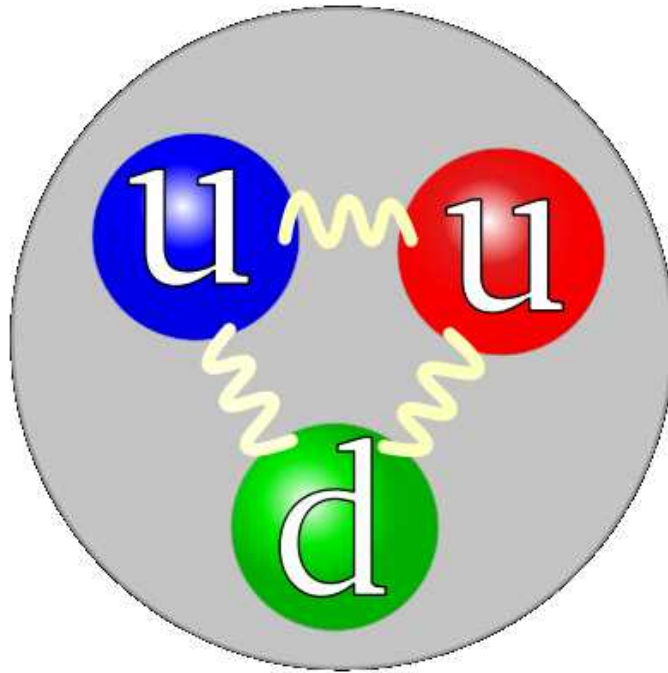


26/08/14

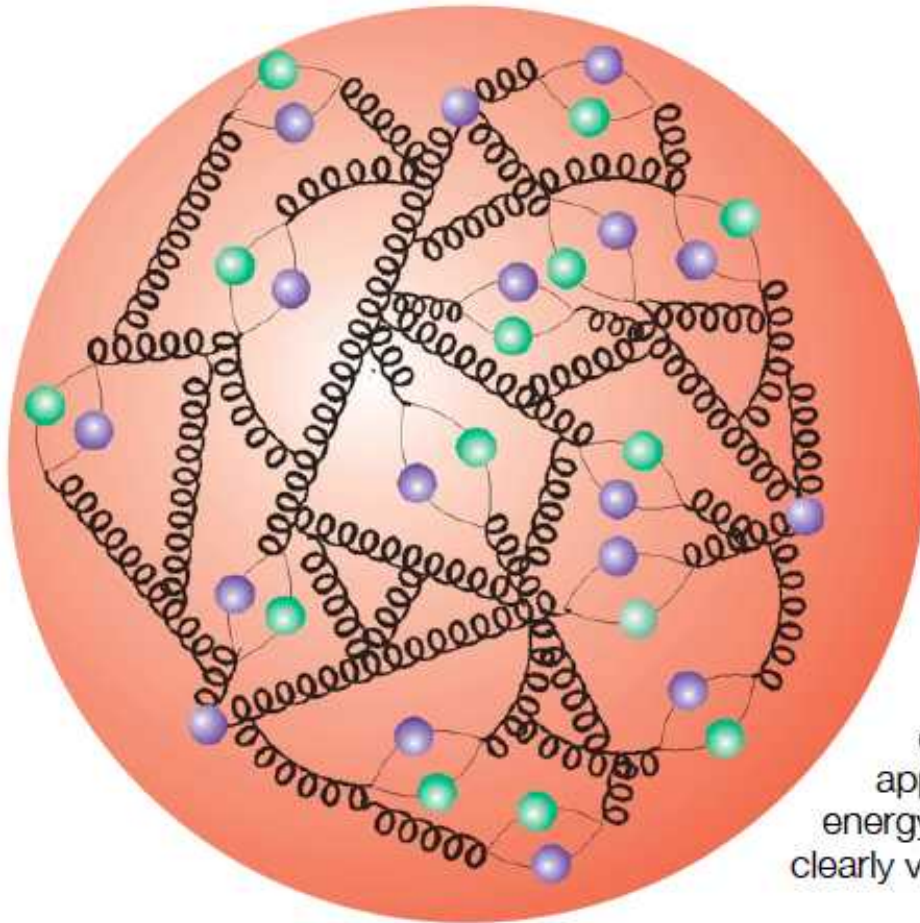
O que é um protão?



O protão no modelo dos quarks



O protão como o conhecemos hoje

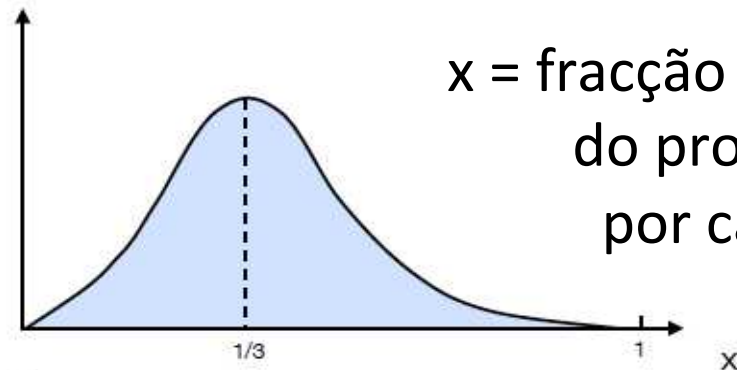
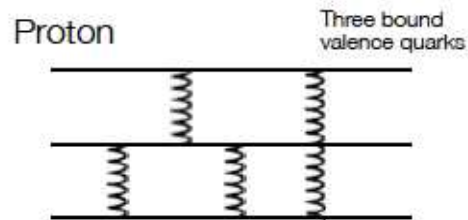
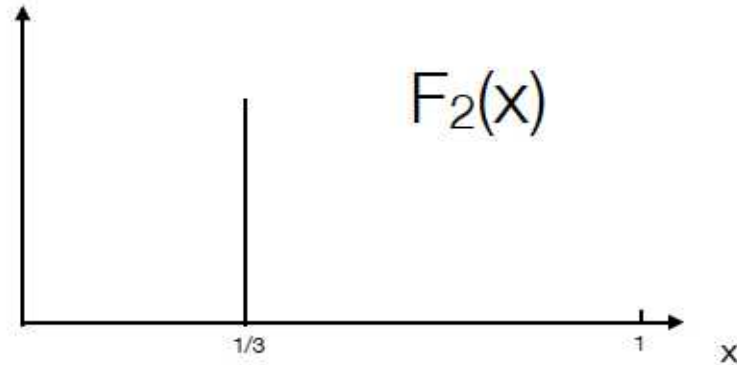
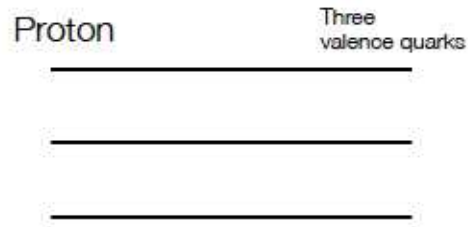


The most dramatic of these [experimental consequences], that the protons viewed at ever higher resolution would appear more and more as field energy (soft glue), was only clearly verified at HERA ...

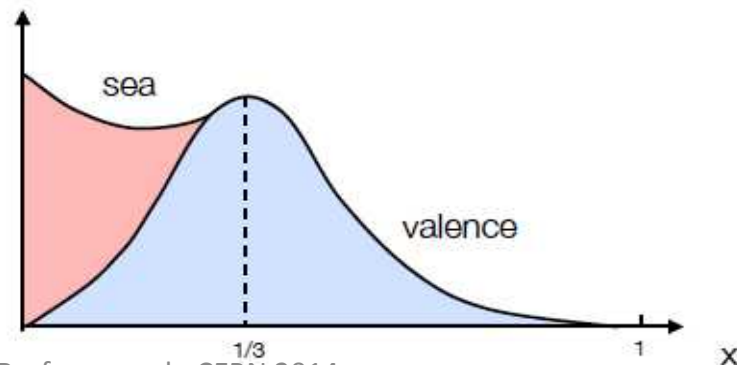
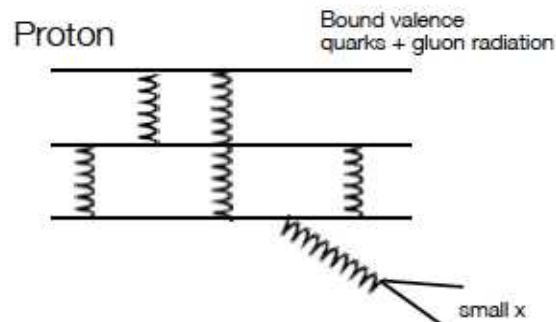
F. Wilczek
[Nobel Prize 2004]

Como se distribui a energia dentro dos prótons

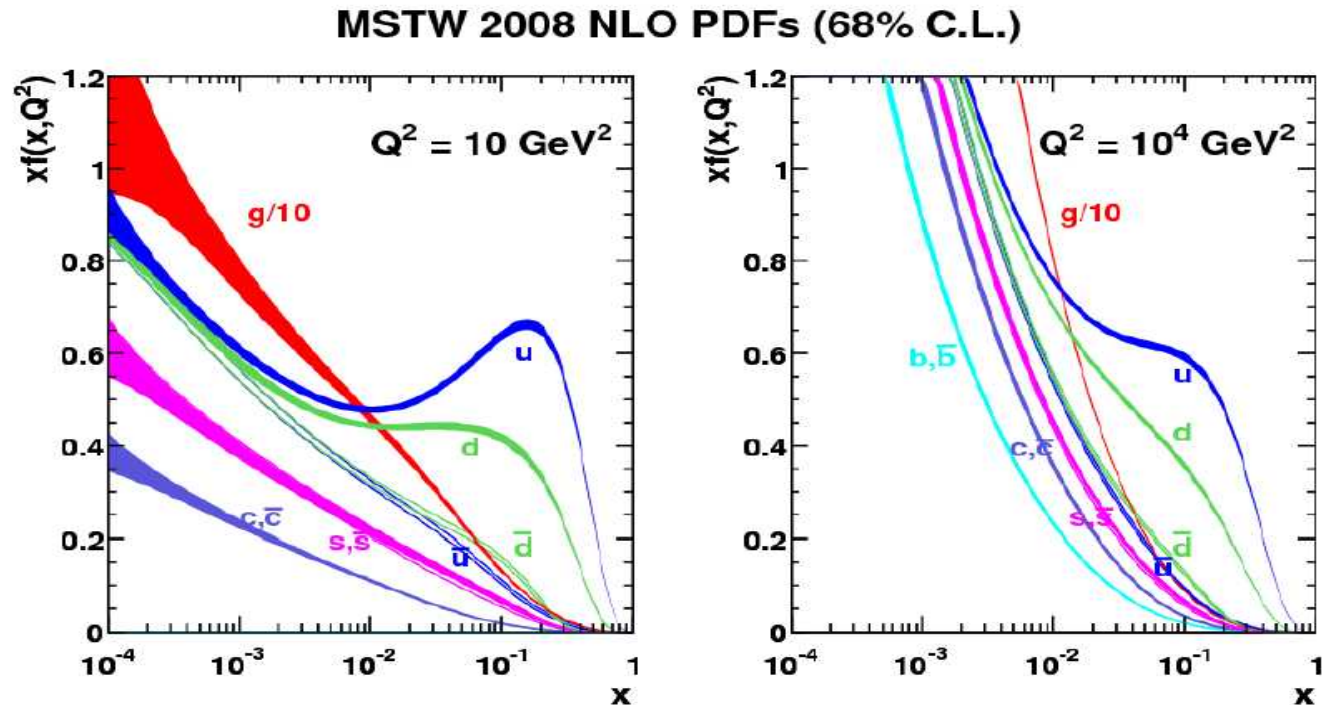
Partões: quarks e glúons constituintes dos hádrões



x = fracção da energia do próton levada por cada partão

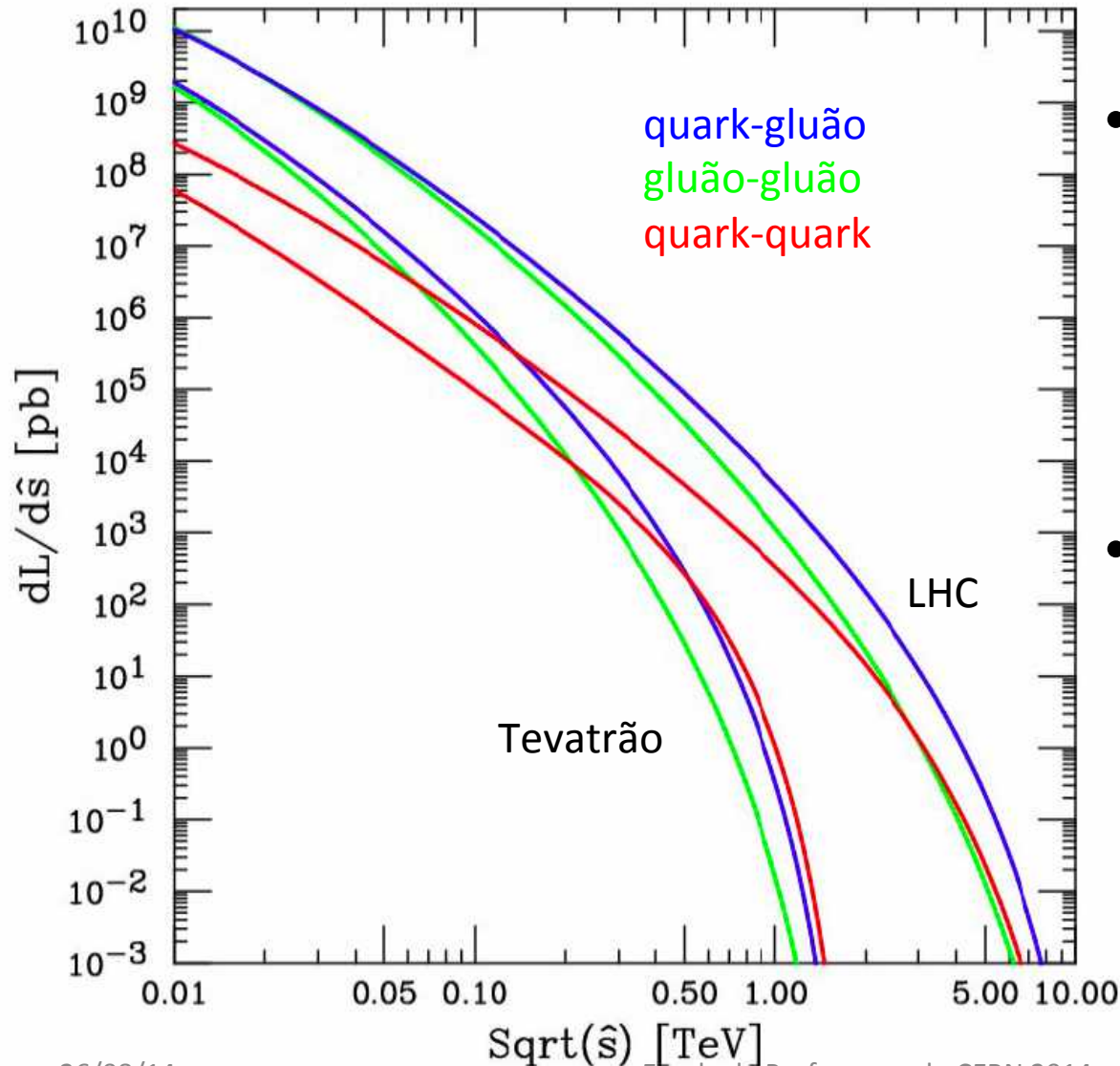


Em detalhe: funções de distribuição dos partões



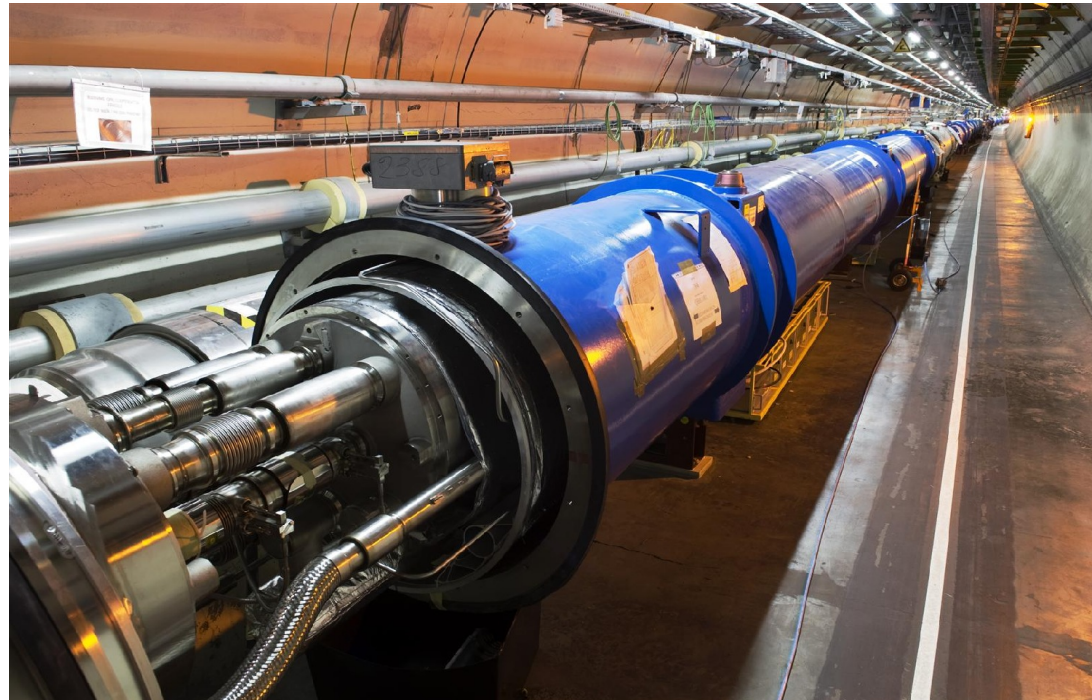
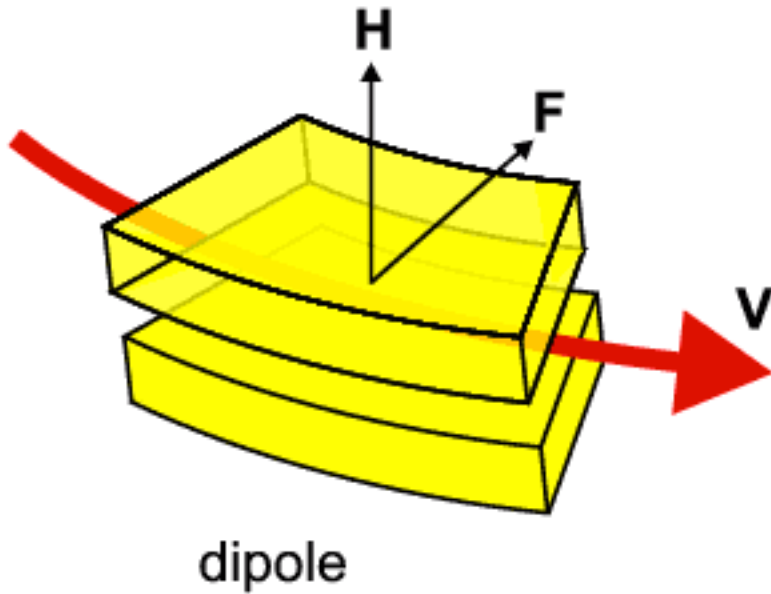
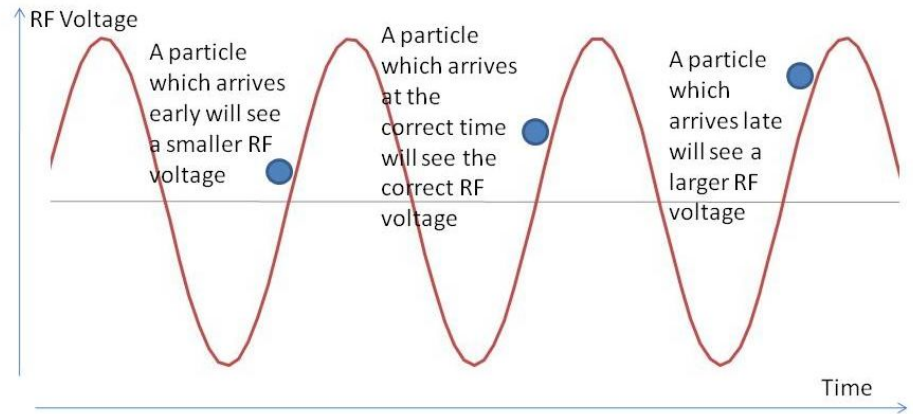
A energias maiores, como as do LHC, a contribuição dos glúons e dos quarks de “mar” aumenta – o LHC colide quarks e glúons!

Energia efetiva das colisões



- Energia de colisão no centro de massa dos prótons é 14TeV (8TeV em 2012)
- Colisões entre os constituintes elementares (quarks e glúons) são a energias mais baixas

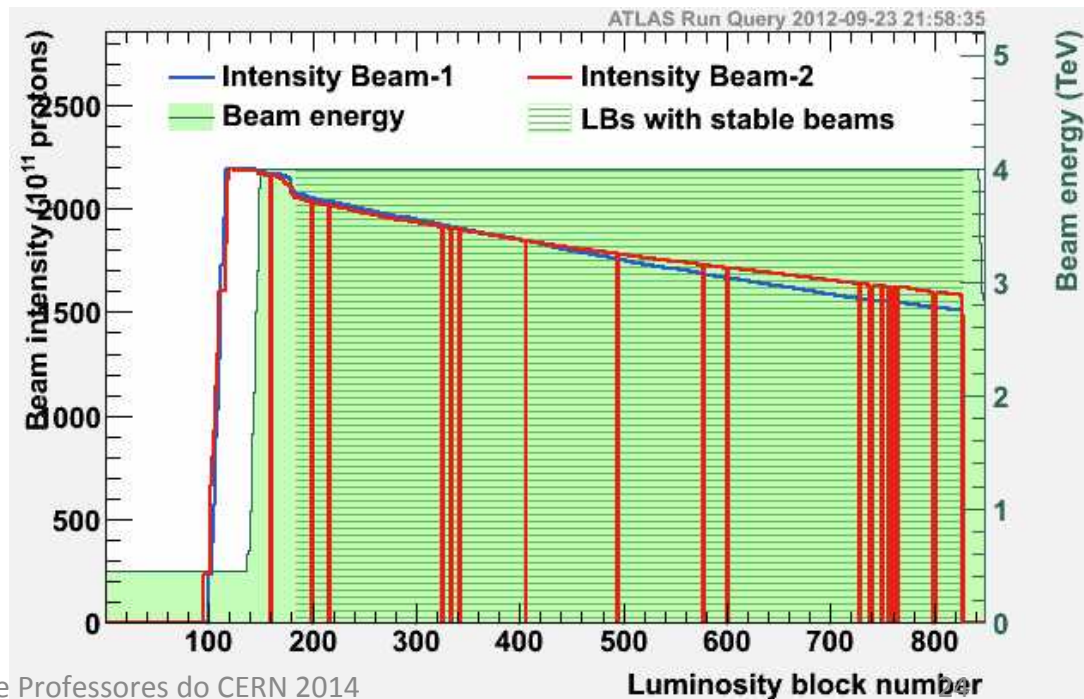
Feixes de prótons





- Energia do feixe:
- 2802 bunches de 1.15×10^{11} prótons
- $7 \text{ TeV} / \text{próton (2015)} = 7 \times 10^{12} \times 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$
- Dá 362 MJ por feixe...
- Igual à energia cinética de um porta-aviões de 20,000t a viajar a 11,7 nós (21.7 km/h)

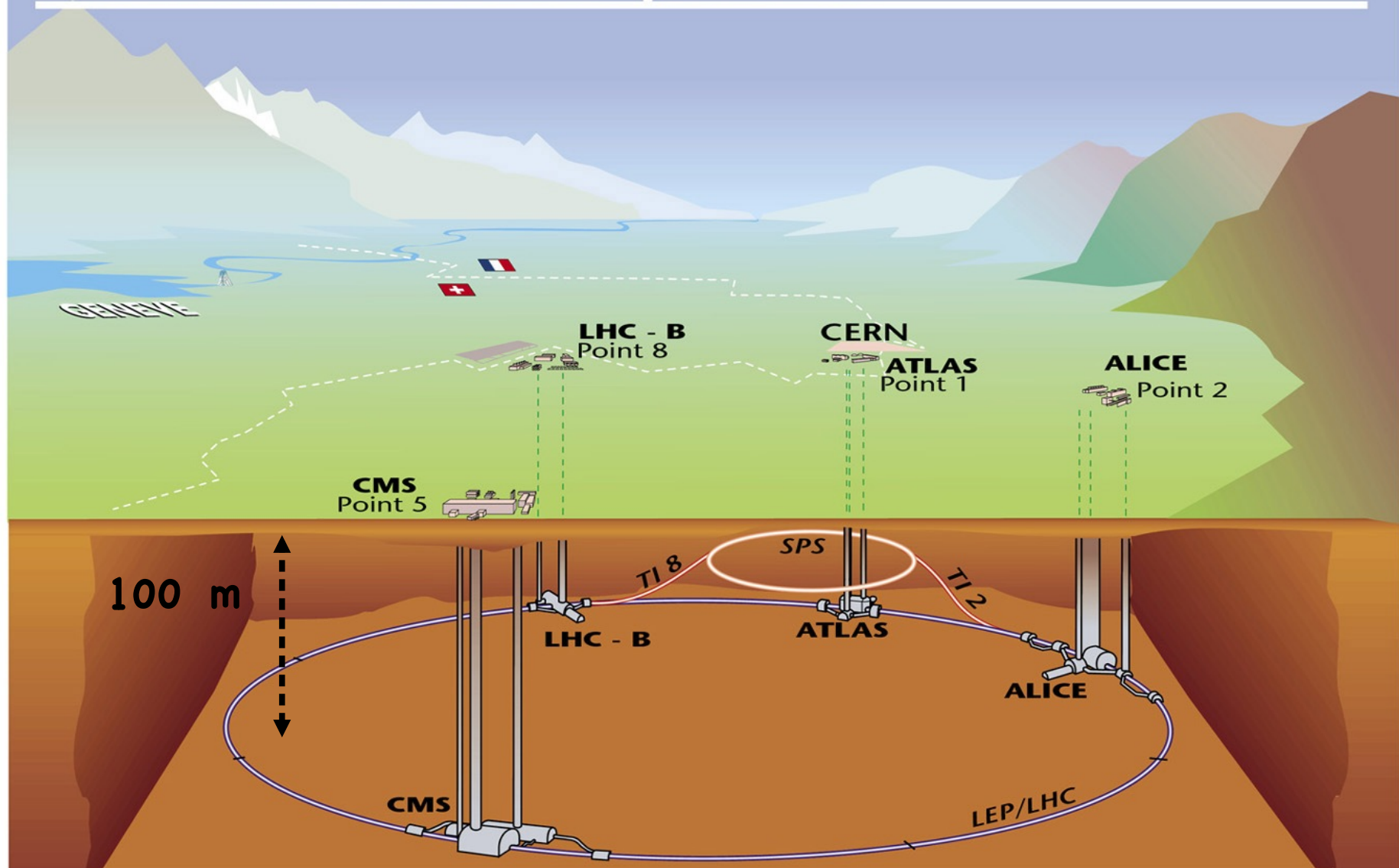
- Tudo contido num feixe de $\approx 16 \mu\text{m}$
- Runs típicos duram cerca de 8 horas
- Intensidade diminui devido a perdas
- Depois voltamos a injectar novos feixes



QUI A PEUR
DU
TROU NOIR



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:

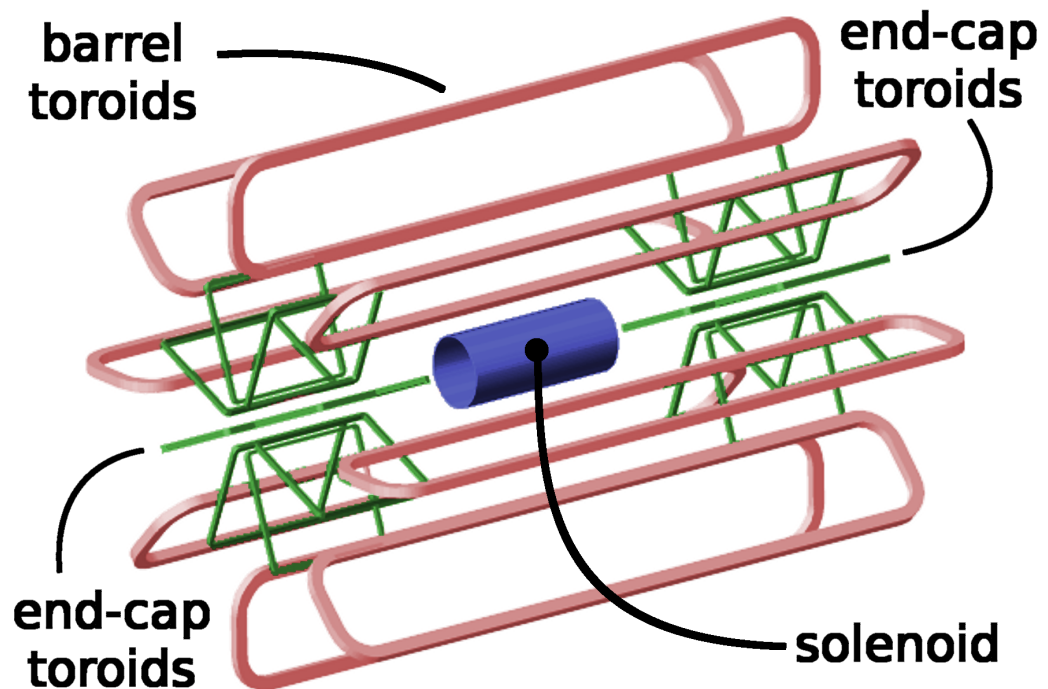
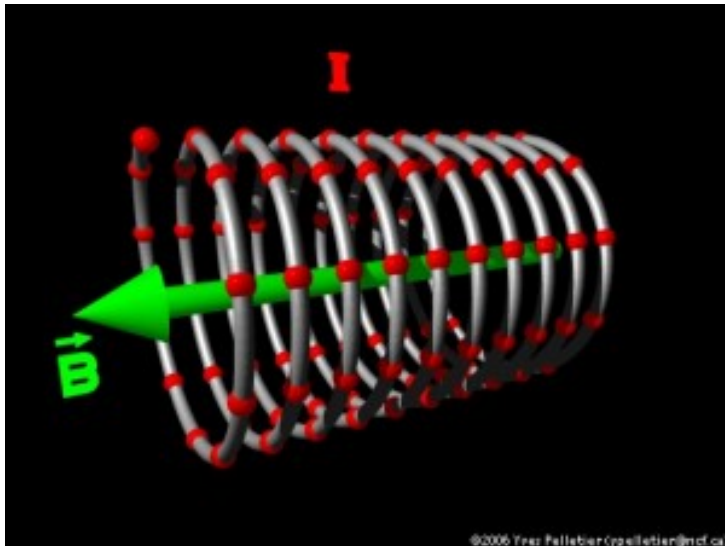
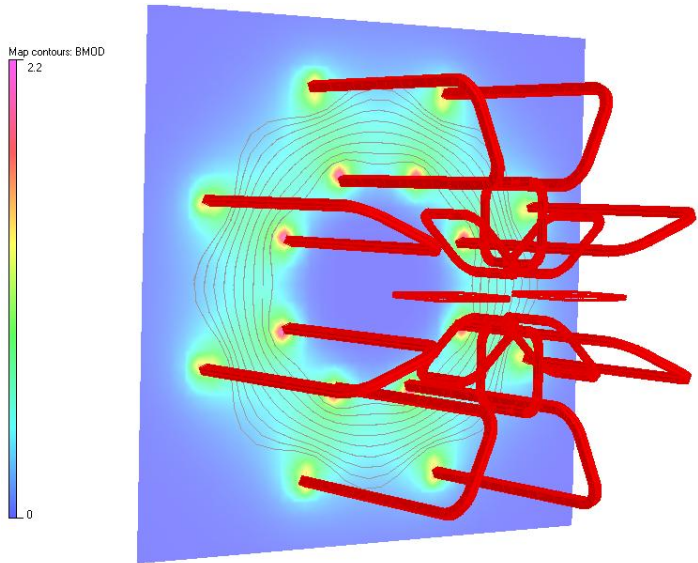
$|\eta| < 1.7$ Fe/scintillator
 $1.3 < |\eta| < 4.9$ Cu/W-Lar
 $\sigma/E_{\text{jet}} = 50\%/\sqrt{E} \oplus 3\%$

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

Sistema de ímanes de ATLAS



- Campos magnéticos muito intensos (2T, 4T max) gerados por ímanes supercondutores
- Curvam as partículas carregadas através da força de Lorentz:

$$\mathbf{F} = \mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

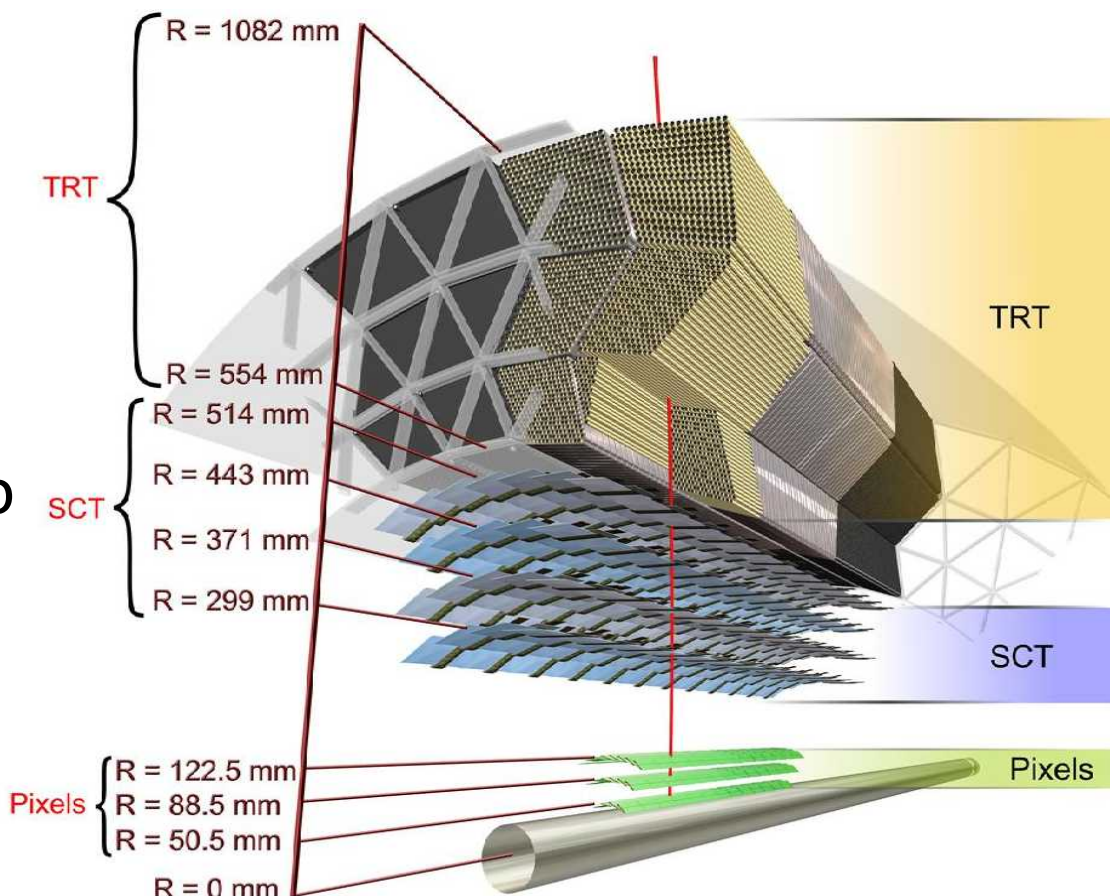
Detetores de traços

Duas tecnologias

- detetores de Silício:
 - píxeis na região central
 - faixas na região intermédia
- detetores de radiação de transição, em gás
 - na região mais externa

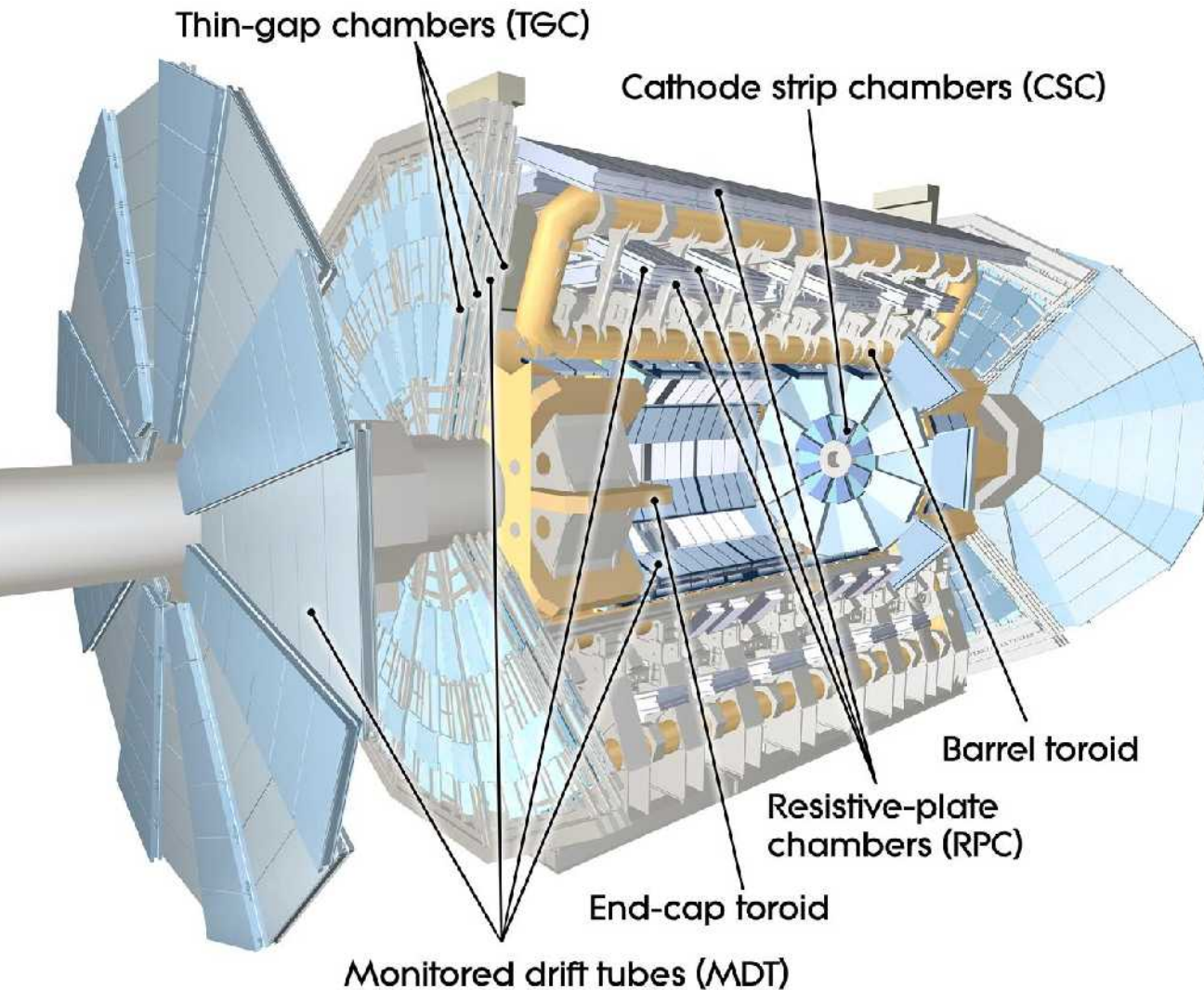
Desempenho:

- resolução no momento das partículas:



$$\sigma/pT = 0.05\% \text{ } pT \text{ (GeV)} \oplus 1\%$$

Detetores de muões



Quatro tecnologias

- Uns mais rápidos (RPC, CSC), para trigger
- Outros mais precisos (MDT, TGC) para a medição da trajetória
- Uns para a região central (MDT, RPC),
- Outros mais resistentes à radiação (CSC, TGC) para a região a ângulos mais baixos

RPC: resistive plate chamber

CSC: cathode strip chamber

MDT: monitored drift tubes

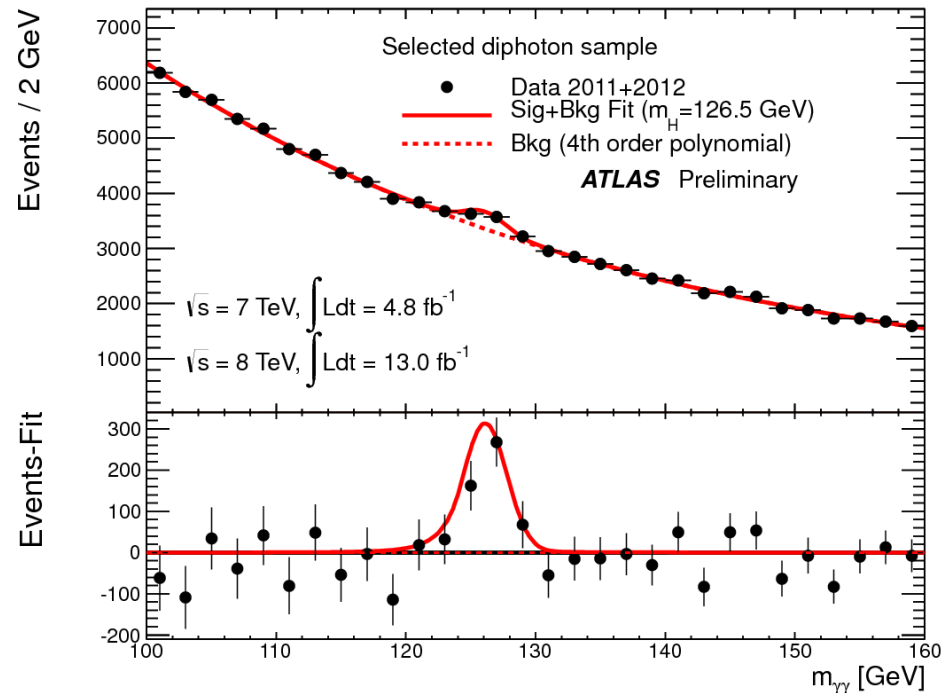
TGC: thin gap chamber

Calorímetros: requisitos de desempenho

- Medem a energia das partículas por amostragem e ionização/excitação do material
- Apenas muões e neutrinos não são parados
- Electrões e fótons desenvolvem cascatas mais pequenas: calorímetros dedicados, com granularidade mais fina

Requisitos

- Resolução em massa de 1%
 $H \rightarrow \gamma\gamma \Rightarrow$ precisão em energia dos γ 's de 0.1%
- Resolução de energia dos jactos de 10%
- Precisão na escala de energia dos jactos de 1%

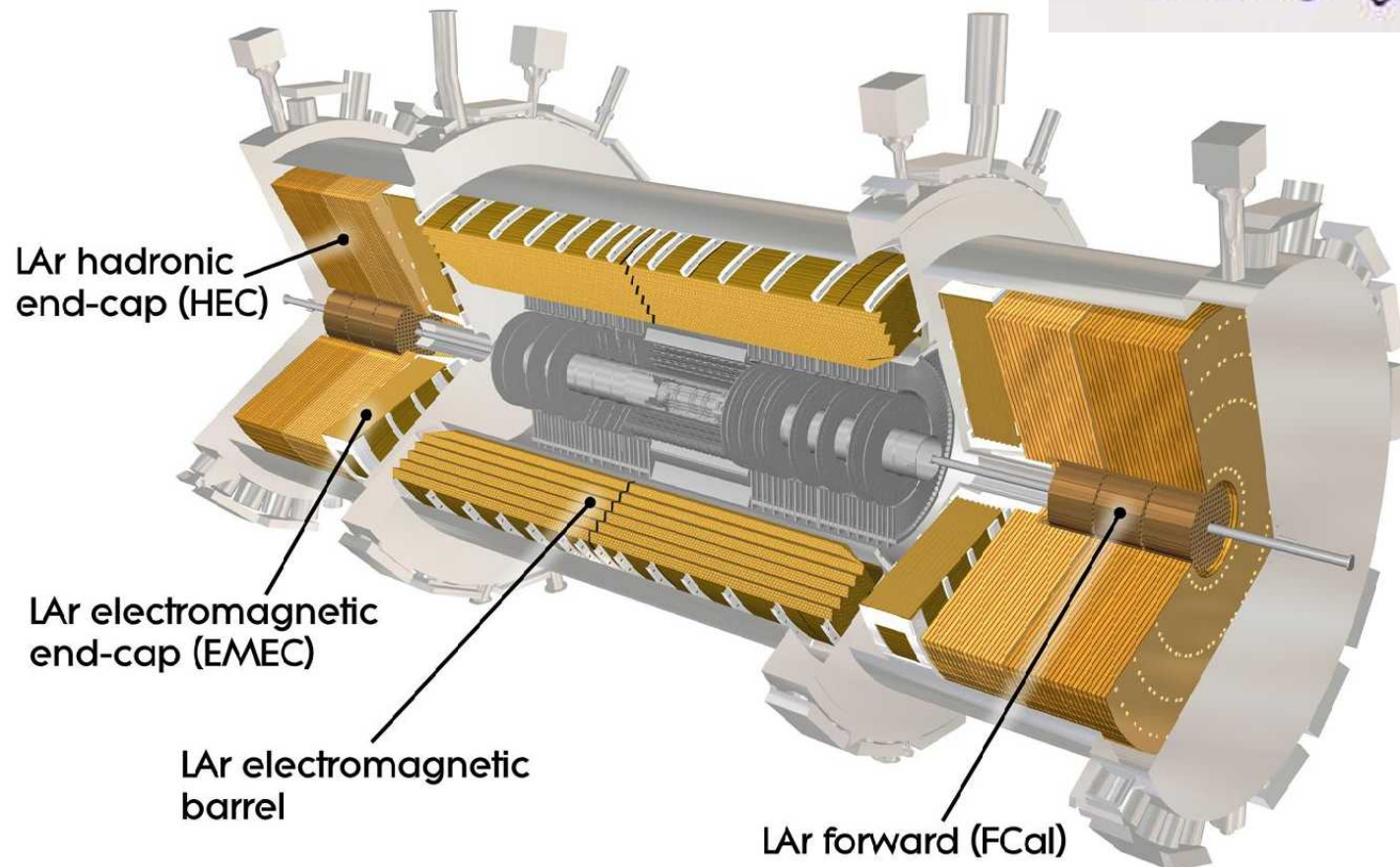
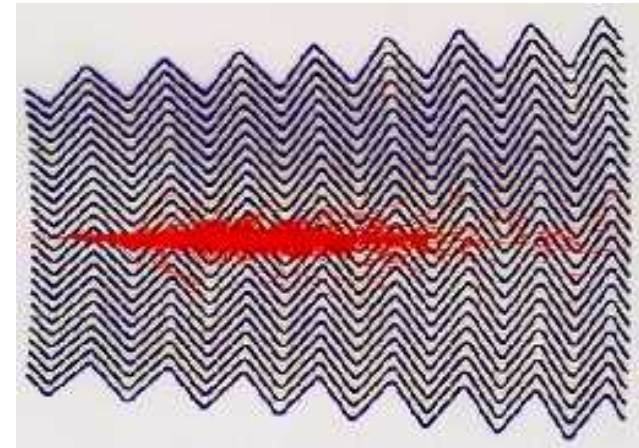


Calorímetros de Árgon Líquido

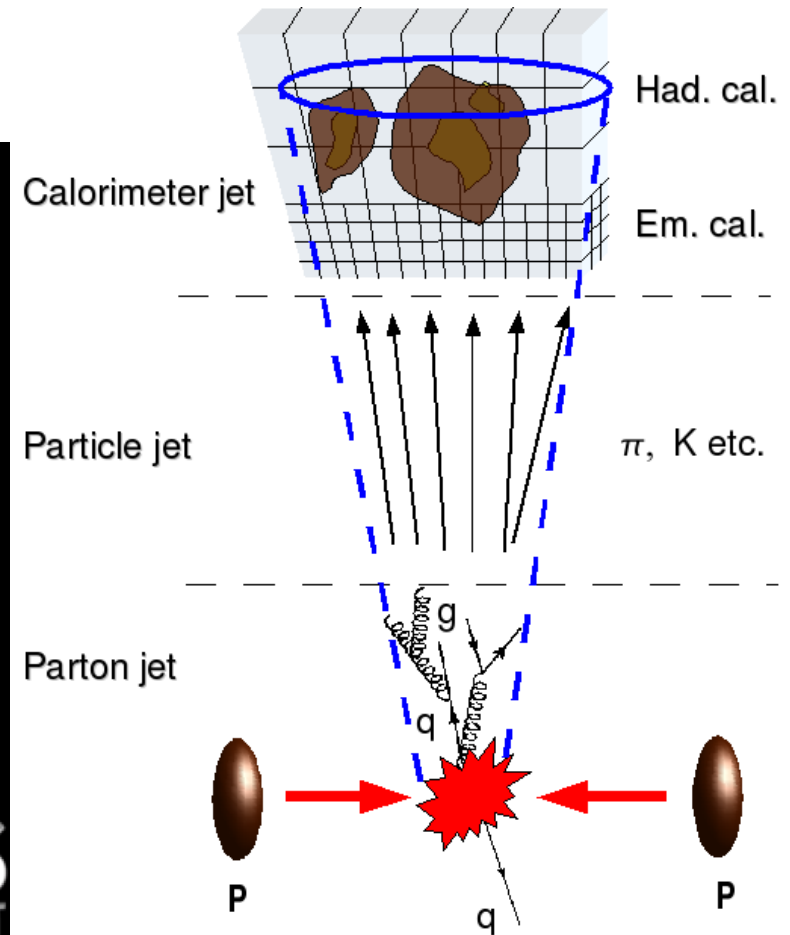
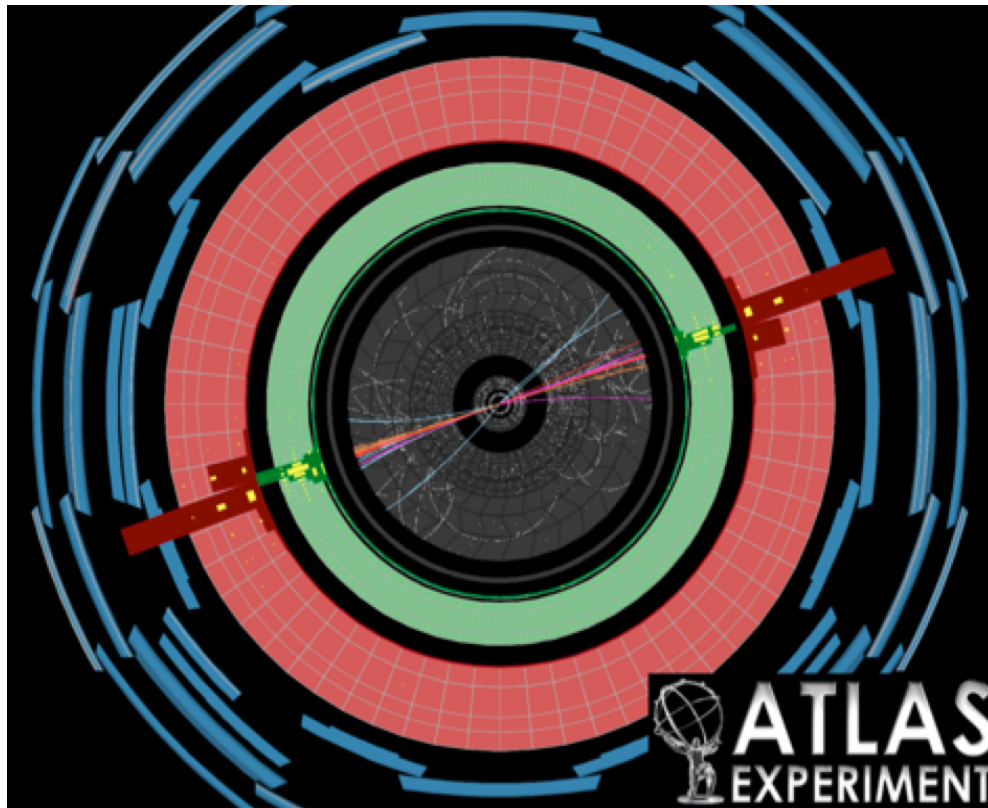
EM calorimeter: $|\eta| < 3.2$

Pb-LAr Accordion

$\sigma/E = 10\%/\sqrt{E} \oplus 0.7\%$

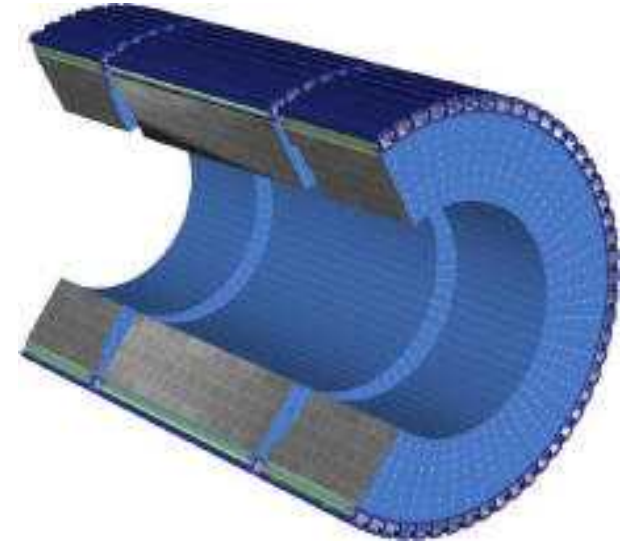
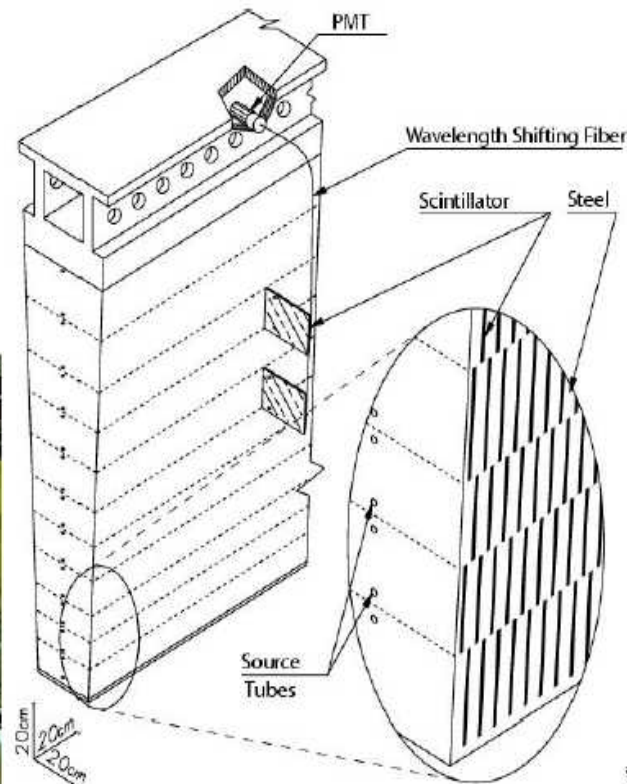


Jactos hadrónicos



- Jactos são as assinaturas experimentais dos quarks e glúões
- Feixes colimados de hádrões que depositam energia nos calorímetros (hadrónico e electromagnético)
- Importantes para muitos estudos diferentes, desde QCD até Higgs e física nova (partículas pesadas a decaír para quarks)

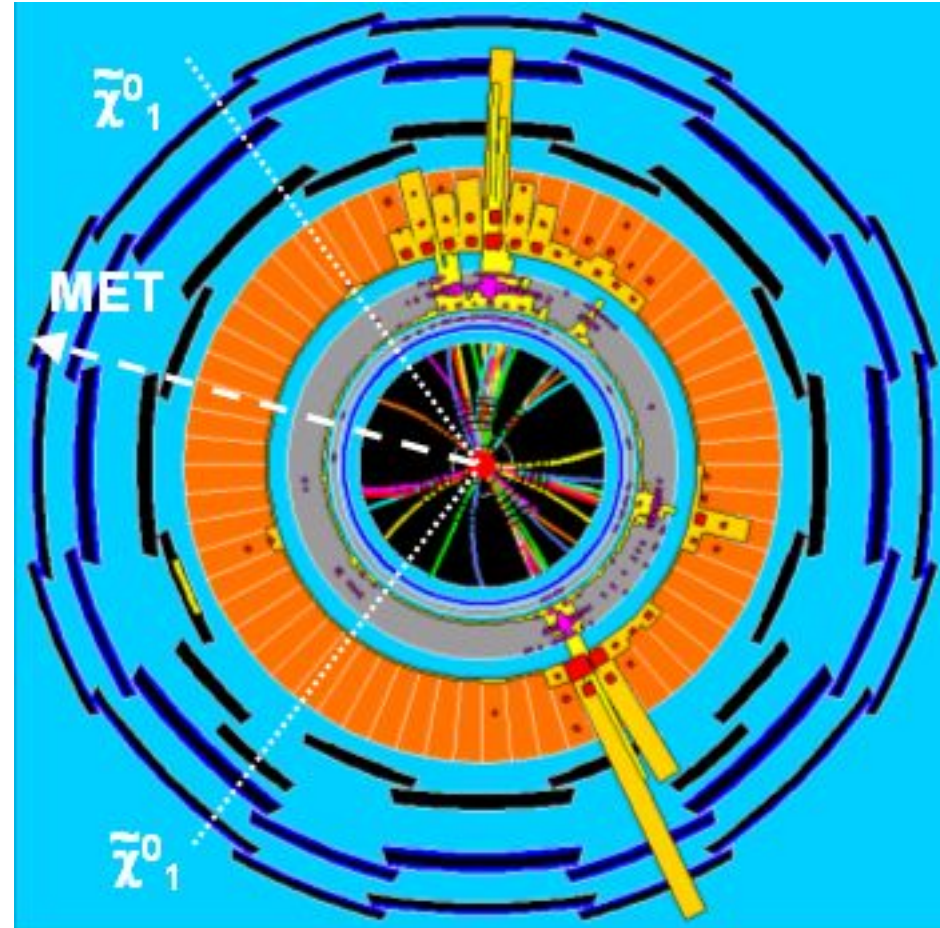
O calorímetro de telhas (TileCal)



- Calorímetro hadrónico da região central
 - matriz de aço com telhas cintilantes
 - luz transportada por fibra ópticas (deslocadoras do com
 - cada célula lida por 2 fotomultiplicadores

Para que serve o TileCal?

- Medir hadrões com boa resolução
 - espessura suficiente
 - boa amostragem, em três camadas
- Contribuir para a medição de múons
 - Estão no meio de hadrões ou isolados ?
- “Medir” neutrinos ou outras partículas com
 - interação muito fraca
 - A partir da energia “em falta”
- Hermeticidade, não deixar ângulos “mortos”



Estrutura e princípio de funcionamento do calorímetro Tilecal

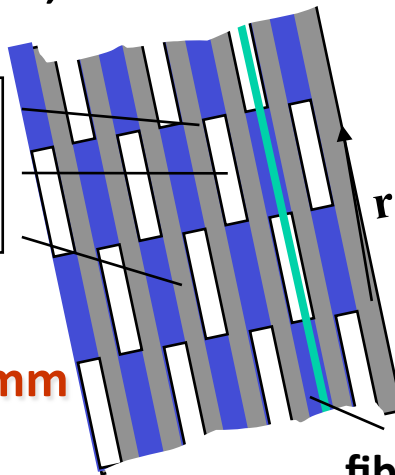
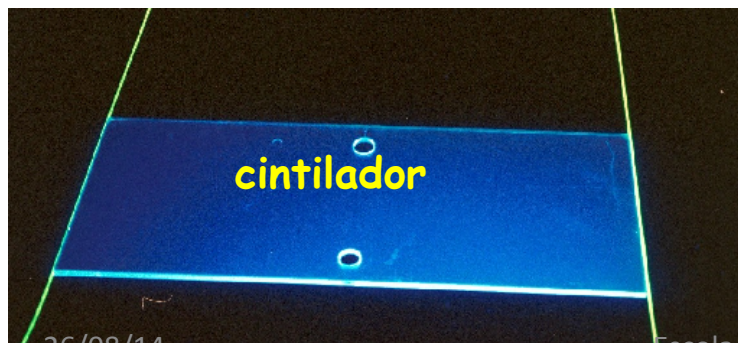
Estrutura periódica, ferro e cintiladores de plástico

placa mestra (5mm)
espaçador (4mm)
cintilador (3mm)

período básico, 18mm

Luz produzida nos cintiladores
transmitida até aos
fotomultiplicadores através de
fibras ópticas WLS

Fibras WLS



fibra



- ◇ razão Fe/cint. 4:1
- ◇ diâmetro ext 8.5 m
- ◇ comprimento 12 m
- ◇ peso total 2900 T

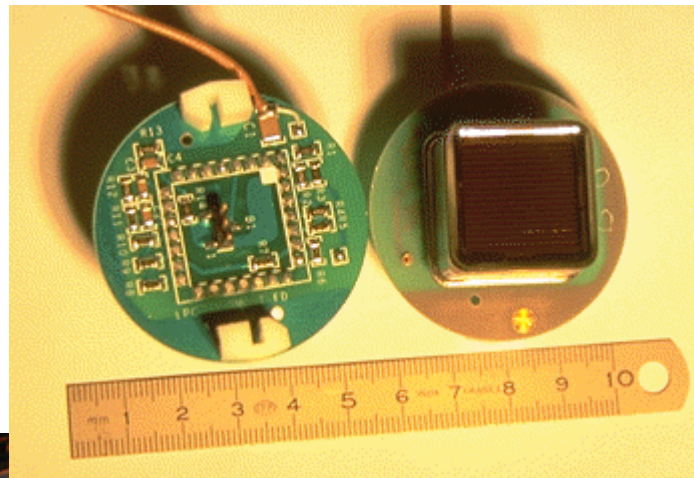
Caveta (com electrónica)

sub-módulo

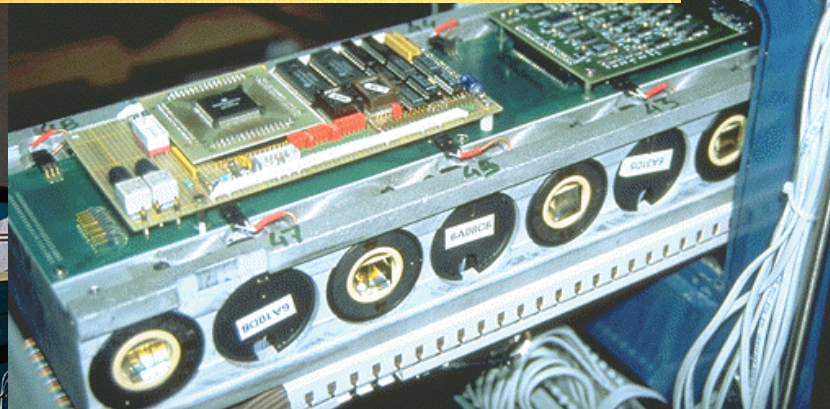
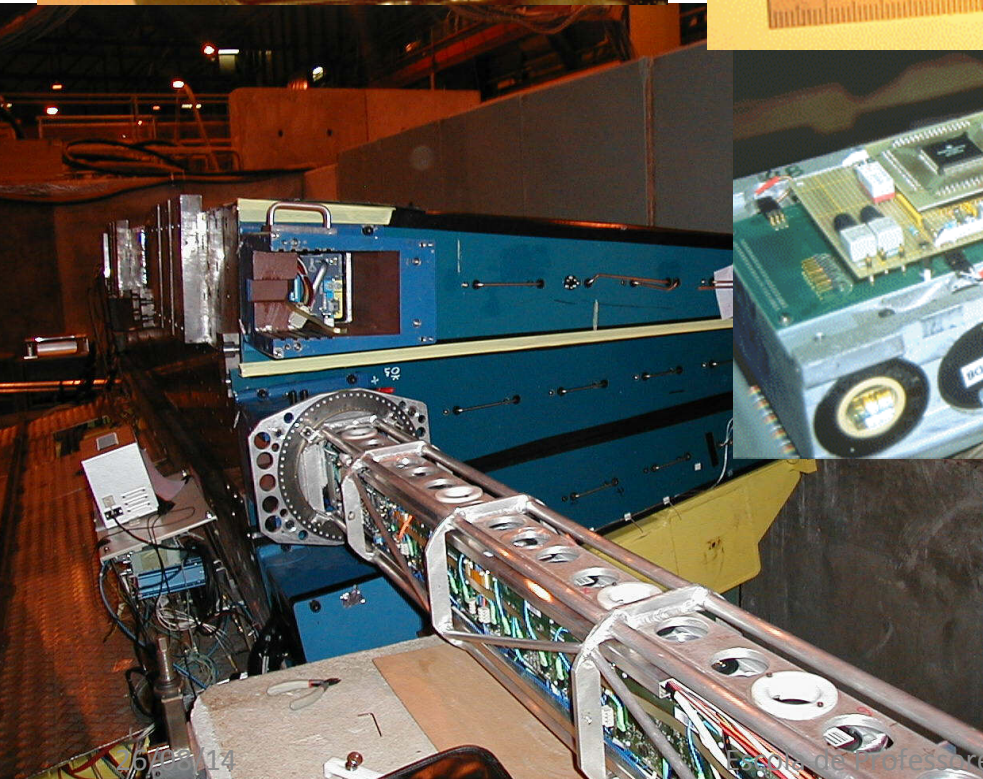
- Hermeticidade para detecção de jactos e E_t^{miss}
- Cobertura $|\eta| < 1.6$
- Resolução em energia para jactos

$$\frac{\Delta E}{E} \sim \frac{50\%}{\sqrt{E}} \oplus 3\%$$

Fotodetectores e electrónica do Tilecal



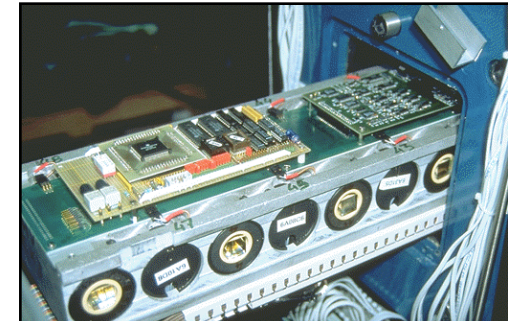
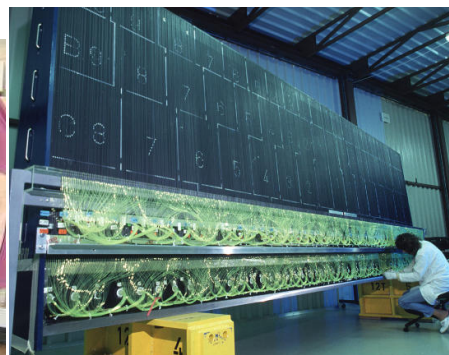
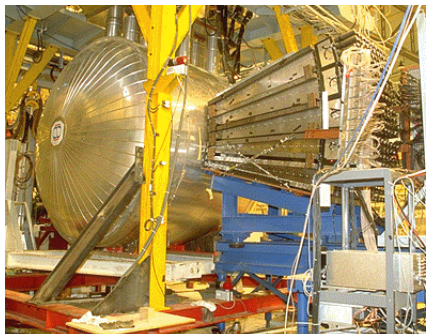
Fotomultiplicadores
colectam a luz
transmitida pelas
fibras ópticas WLS



Electrónica dentro de “gavetas” digitaliza os
sinais e envia-os para computadores.

Inclui fontes de alimentação (LV), distribuidor
de alta tensão (HV), arrefecimento a água –
controlo e monitorização pelo DCS

Etapas do projecto Tilecal (1993-2011)

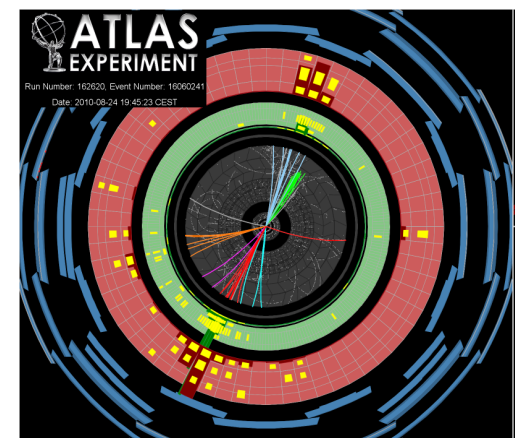
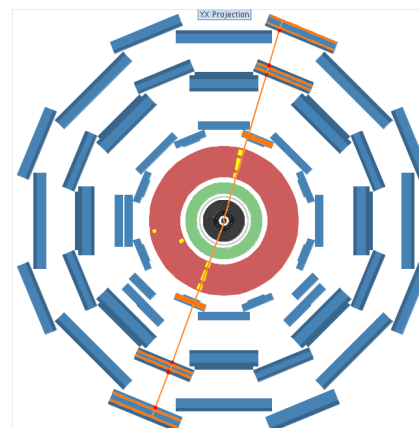
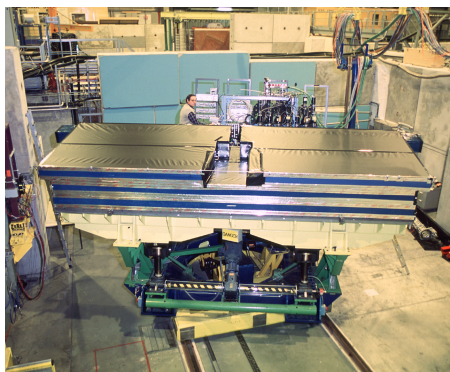


1993-1995 R&D-protótipos

1996-2002: construção

1999-2002 Instrumentação

1999-2004: Electrónica



2002-2004: calibrações

2004-2006 Instalação

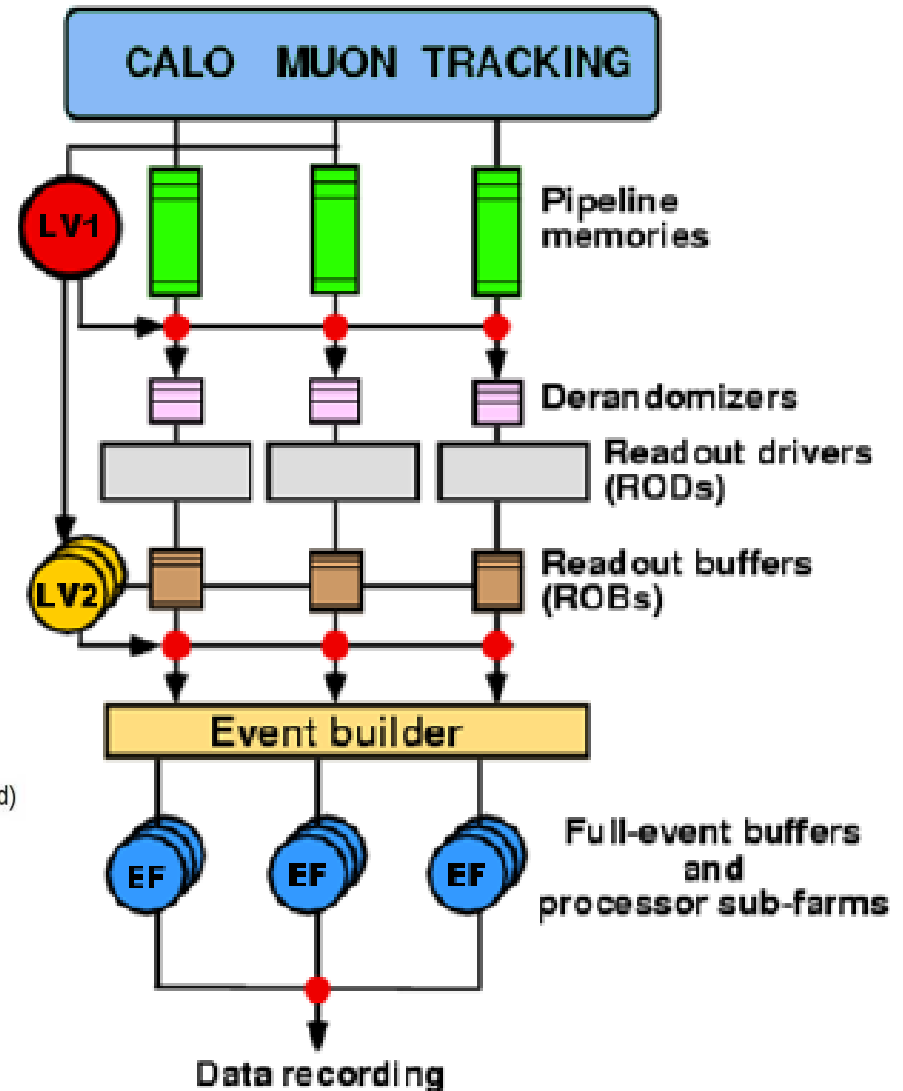
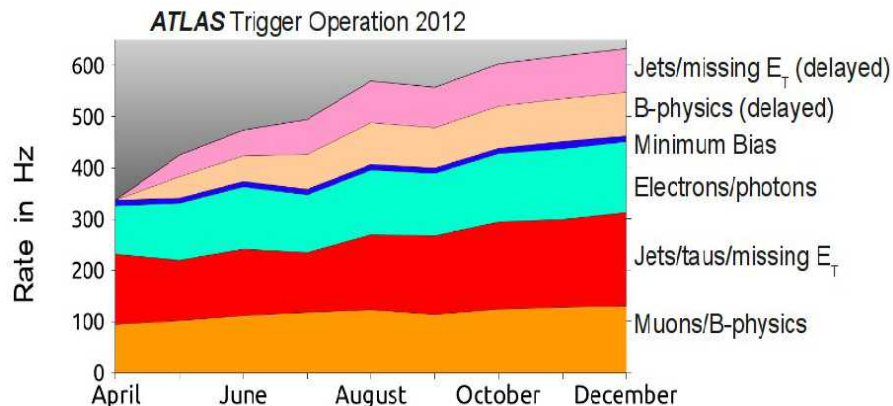
2007-2009 certificação
(raios cósmicos)

2009--→: aquisição/análise
dados LHC

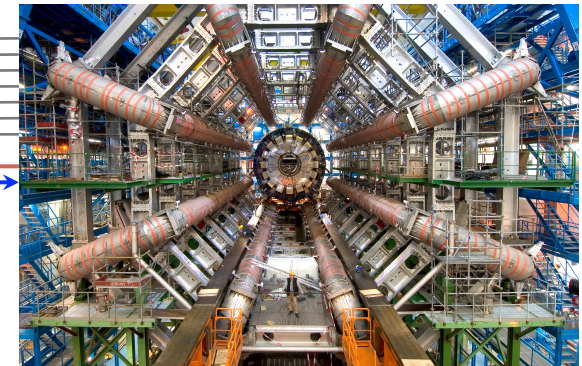
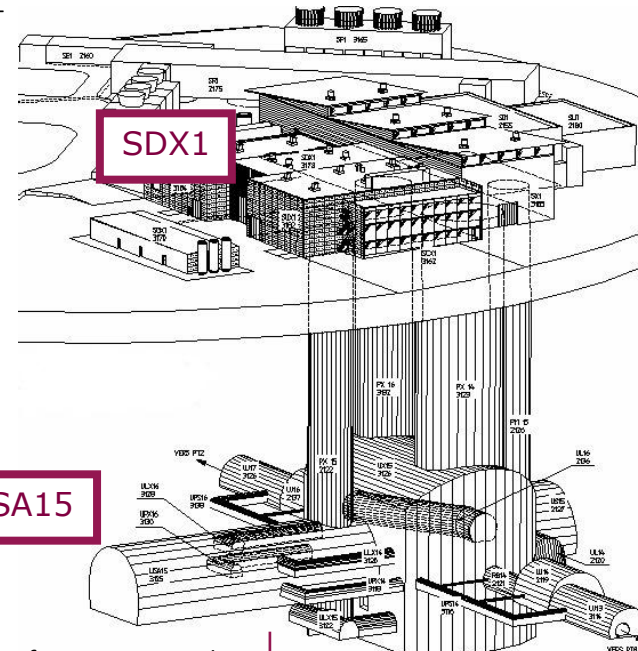
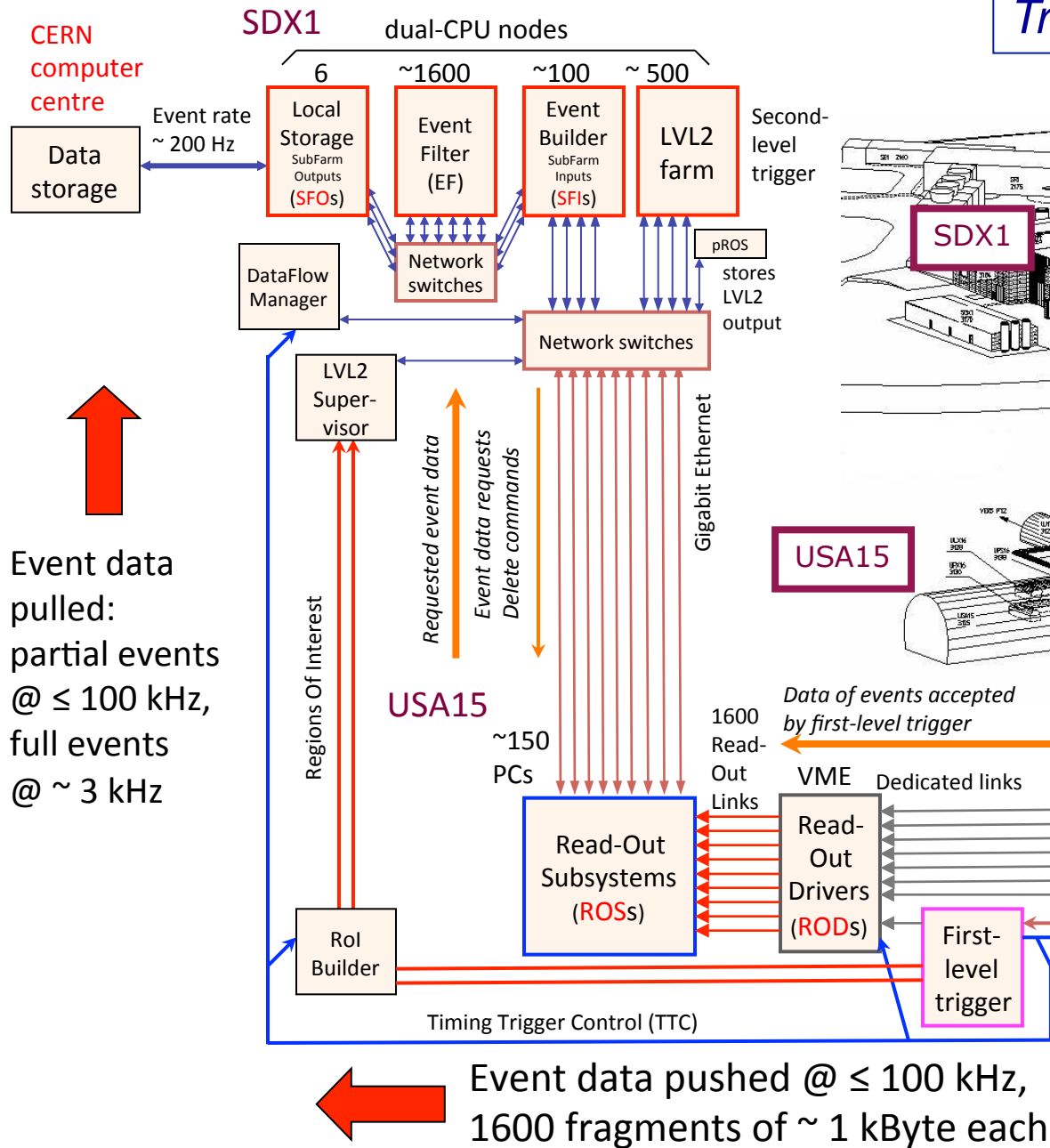
Um longo percurso para conseguir as excelentes características do Tilecal no ATLAS
Com participação portuguesa: LIP, FCUL, UMinho

Trigger: sistema de seleção em tempo real

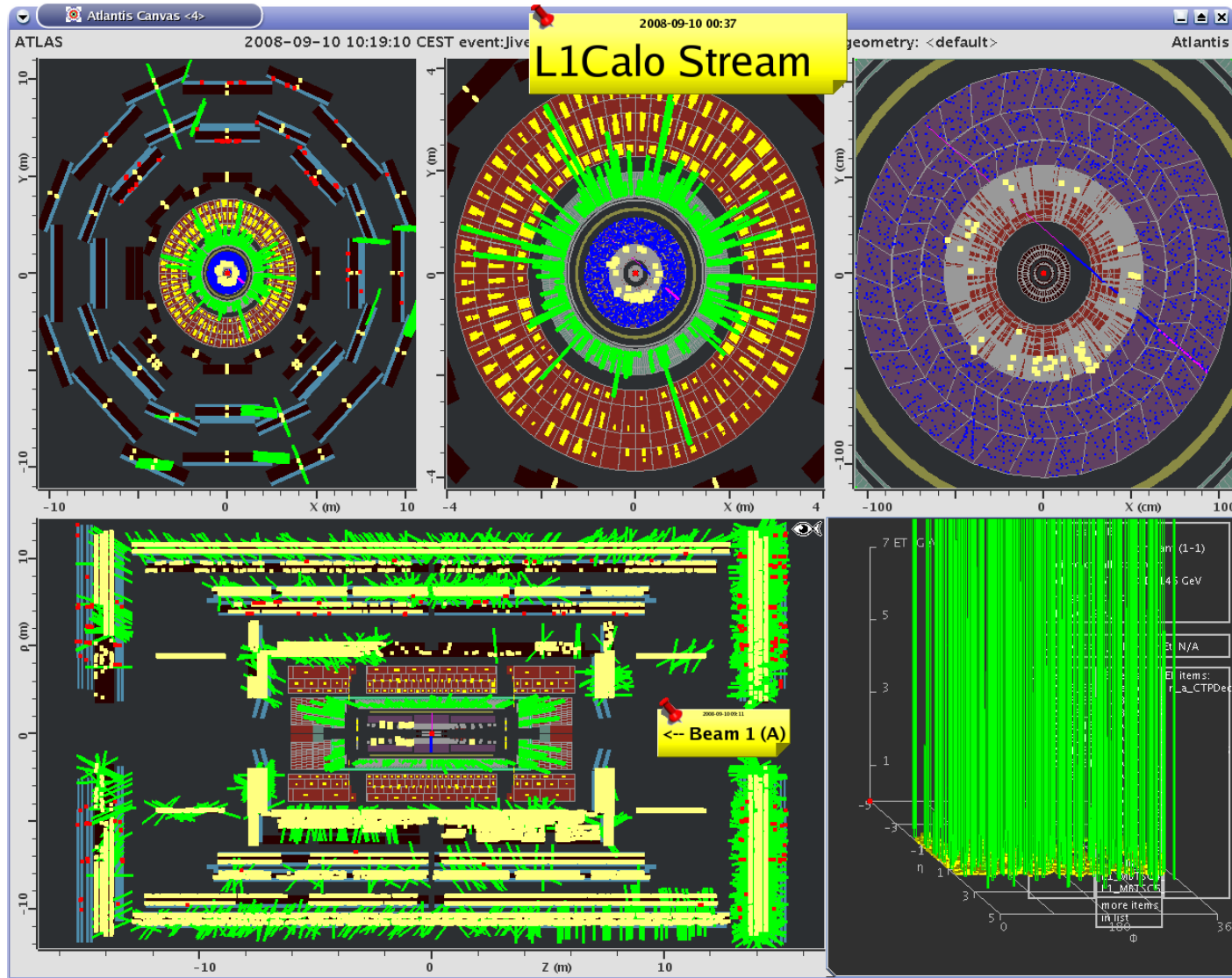
- 25 ns entre pacotes
 - (i.e. $\approx 7.5\text{m}$ à velocidade de c)
 - 40 milhões de cruzamentos de feixes por segundo
 - Cada colisão daria $\approx 1.5\text{Mb}$
 - $\Rightarrow 60\text{Tb}$ por segundo
- Impossível guardar todos os dados
 - É desnecessário!
 - A maioria das colisões é sem interesse
- O sistema de trigger guarda apenas $\approx 10\text{-}15$ colisões por cada milhão
- Mas tem que decidir em $2,5\mu\text{s}$!!



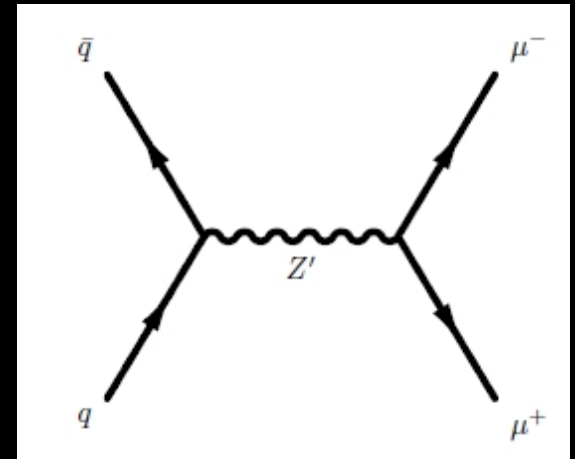
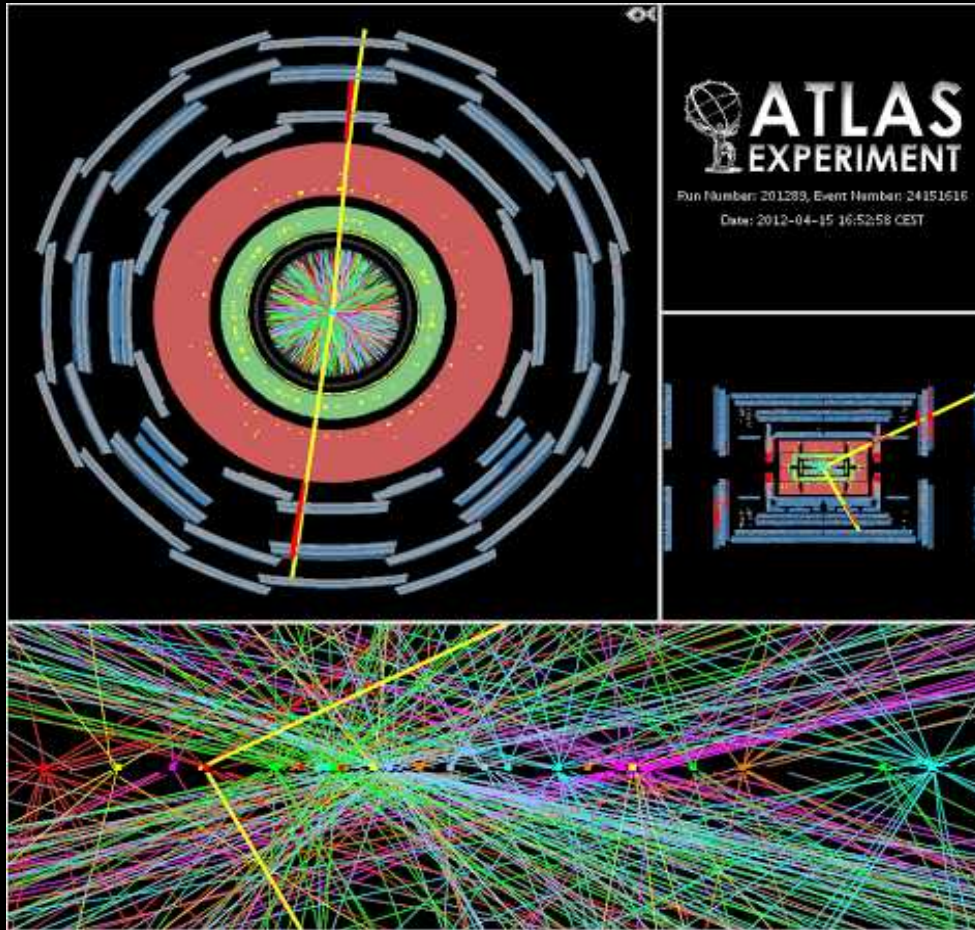
Trigger / DAQ architecture



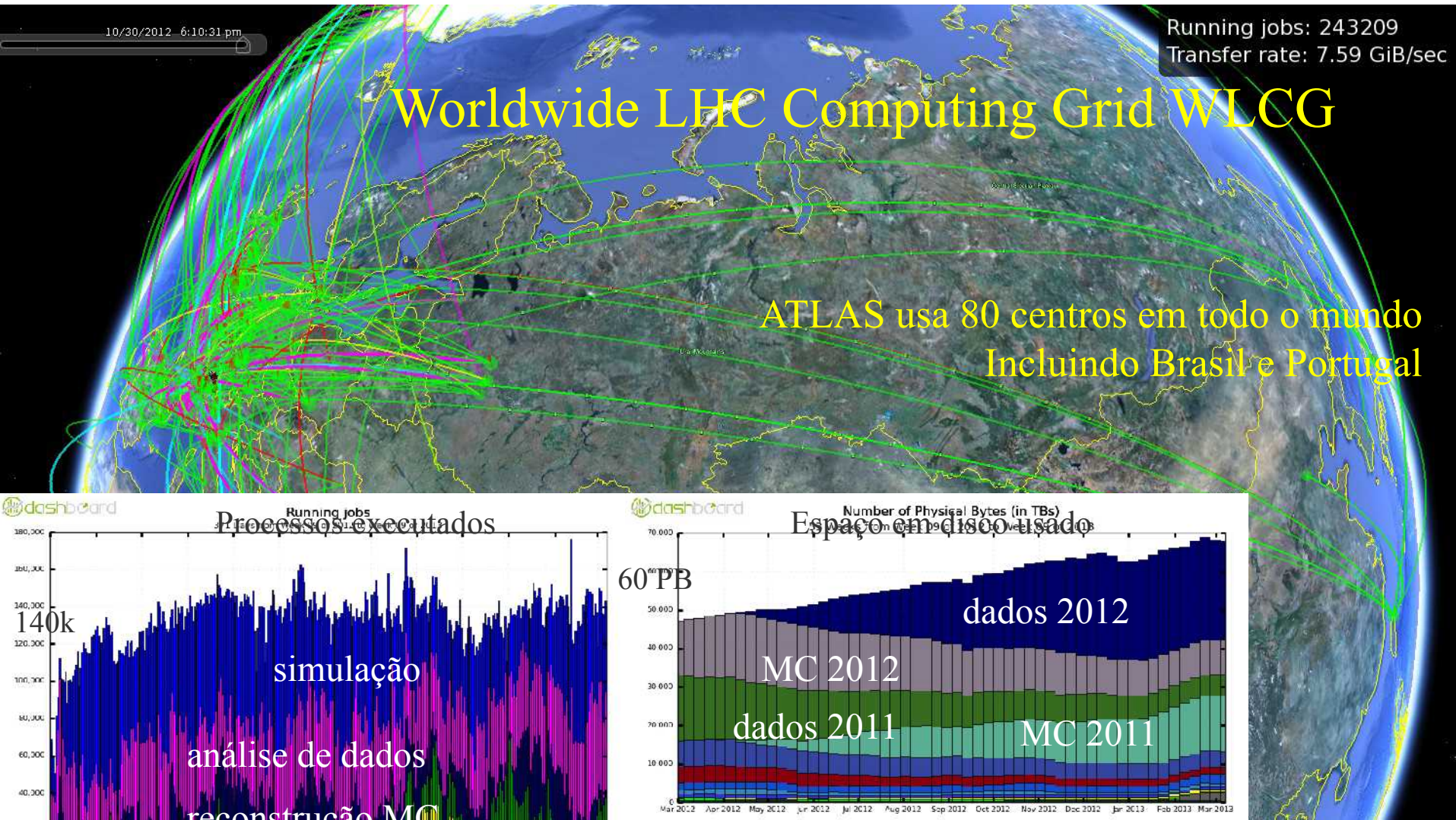
10 de Setembro 2008: primeiros feixes!



Do Detector até à Física



GRID: computação distribuída



A Colaboração ATLAS

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



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 Adl

Investigadores ~ 20

Estudantes ~ 15

Engenheiros, pessoal técnico (em Portugal) ~ 10

Engenheiros no CERN do programa ADI > 5

Brasileiros no LHC

ATLAS



Instituições : UFRJ-COPPE, UFJF, USP, UFSJ (UFBA, CEFET-RJ, UFF)

CMS



Instituições : Unesp, UERJ, CBPF (Unicamp, UFABC)



ALICE

Instituições :
Unicamp, USP



LHCb

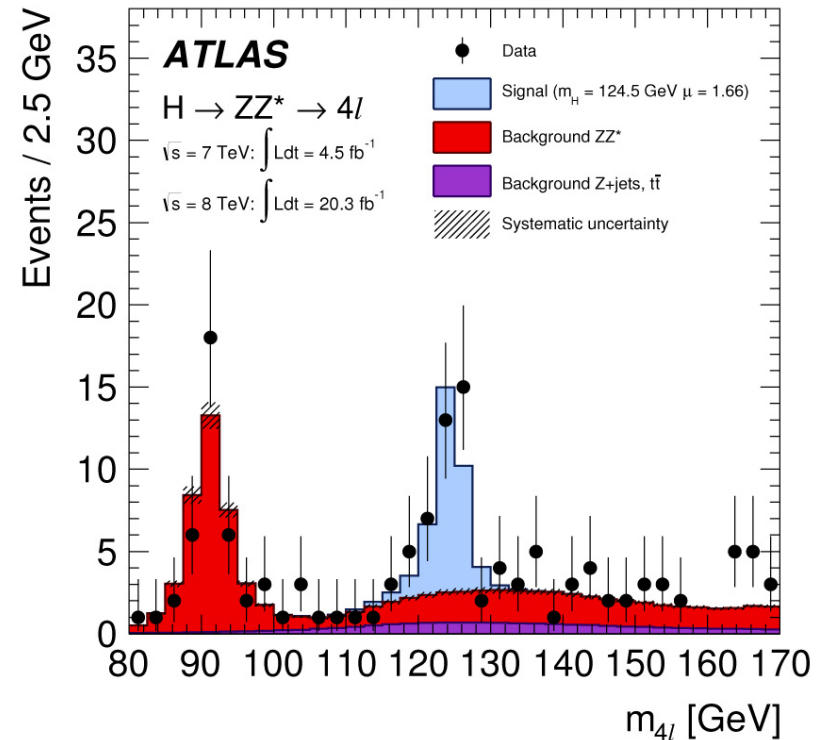
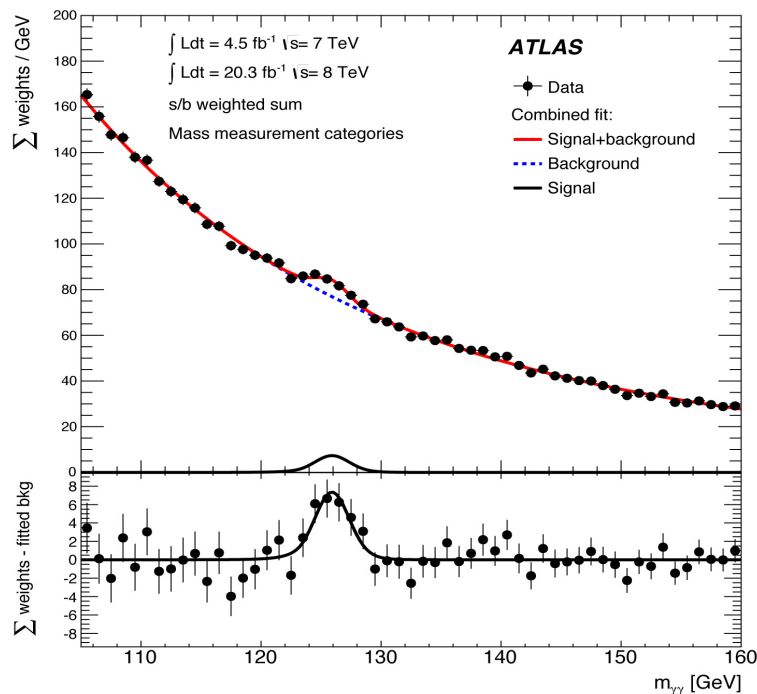


Instituições : CBPF, UFRJ, PUC-Rio

Massa do Higgs

- A massa do bóson de Higgs era até há pouco o totalmente desconhecida
- Combinando dois canais, conseguimos medi-la com $\approx 0.3\%$ de precisão
- A nossa medida é:

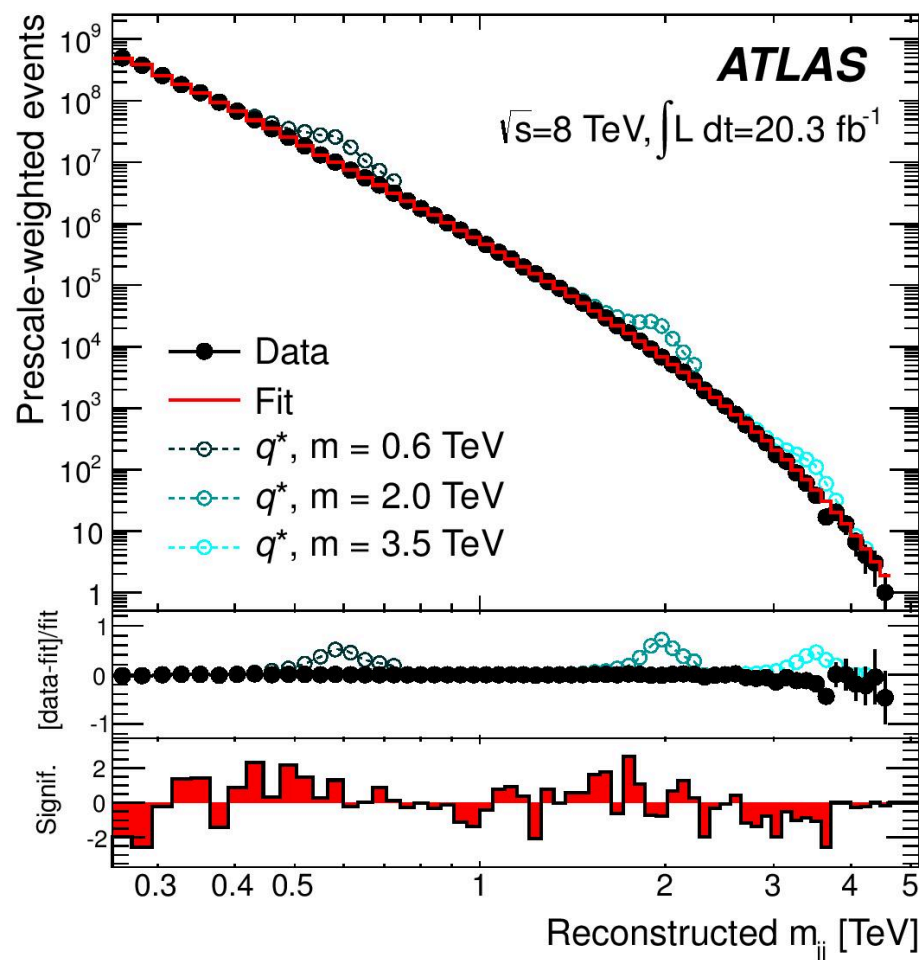
$$m_H = 125.36 \pm 0.37 \text{ (stat)} \pm 0.18 \text{ (syst)} \text{ GeV}$$



Procura da subestrutura de quarks

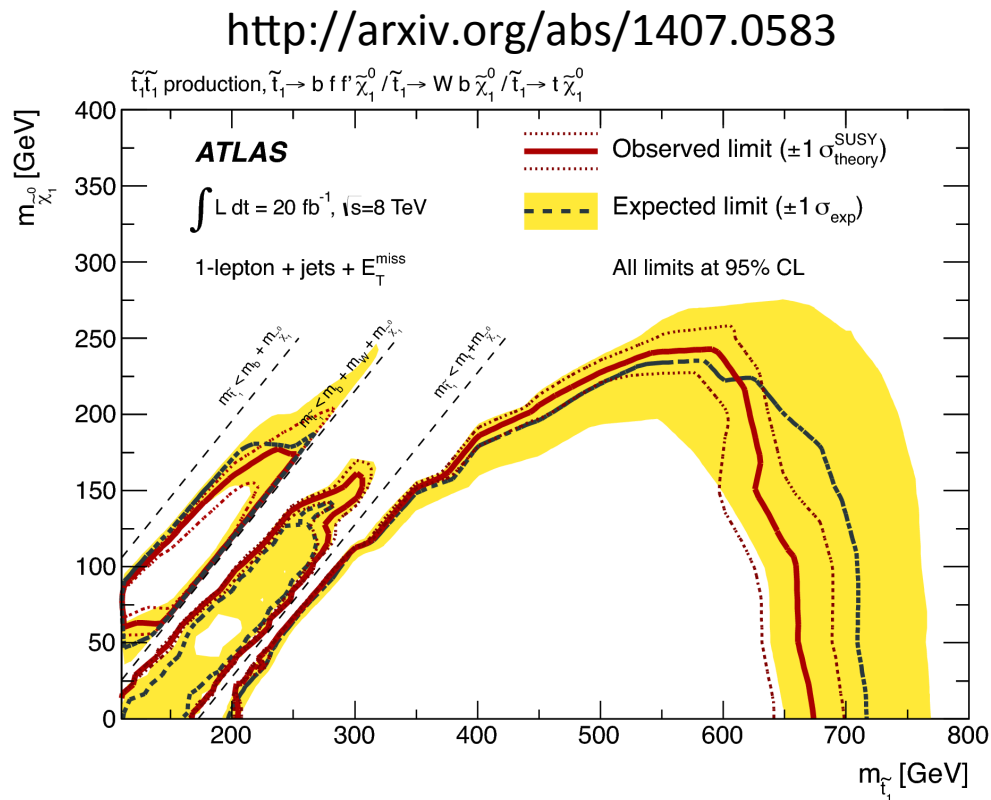
- Se os quarks não forem fundamentais, então podem ser **excitados a estados mais energéticos**
- Os seus constituintes seriam os mesmos, mas a **sua massa seria maior**
- O decaimento para quarks e glúons seria detectado como **dois jactos muito energéticos**
- Procuramos colisões com dois jactos muito energéticos e massa invariante elevada

<http://arxiv.org/abs/arXiv:1407.1376>



Procura de supersimetria

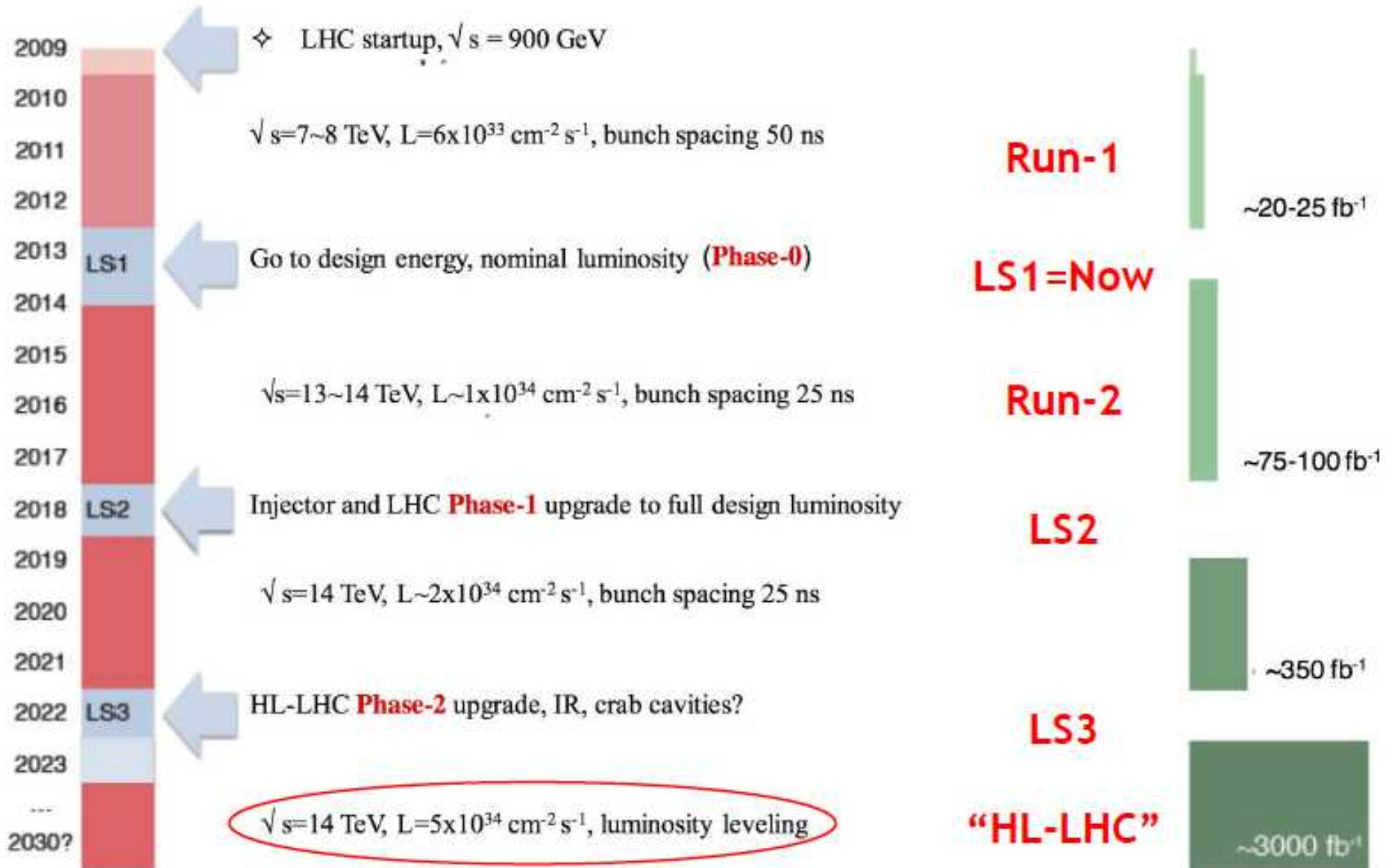
- A teoria mais popular que aumenta o Modelo Padrão (**supersimetria**) diz que as partículas que conhecemos têm parceiros mais pesados e com spin diferente em $\frac{1}{2}$
- A partícula mais leve nessa teoria (χ^0_1) é um bom candidato para explicar a **origem da matéria escura**
- Procuramos canais específicos em que as partículas supersimétricas são produzidas
- Não encontrámos sinais de partículas supersimétricas, mas podemos dizer que, se existirem, a sua massa não estará em certos intervalos



Conclusões:

- O LHC e ATLAS permitem explorar as ideias mais fundamentais sobre a constituição da matéria e das interações
 - O Modelo Padrão está a ser sujeito a inúmeros testes
- A sua construção apenas foi possível com muita persistência e colaboração internacional
 - Portugal e Brasil participantes ativos
- Descoberta do bóson de Higgs de enorme importância, peça central do Modelo Padrão
 - Apenas um ou mais ? Modelos alternativos prevêm 5 ou mais Higgs, alguns carregados
- Nova Física para além do Modelo Padrão ?
 - Matéria escura? Energia Escura ?
 - Mini-Buracos negros? Gravitação quântica?
 - Qualquer coisa de completamente inesperado?

The landscape in the next decade(s)



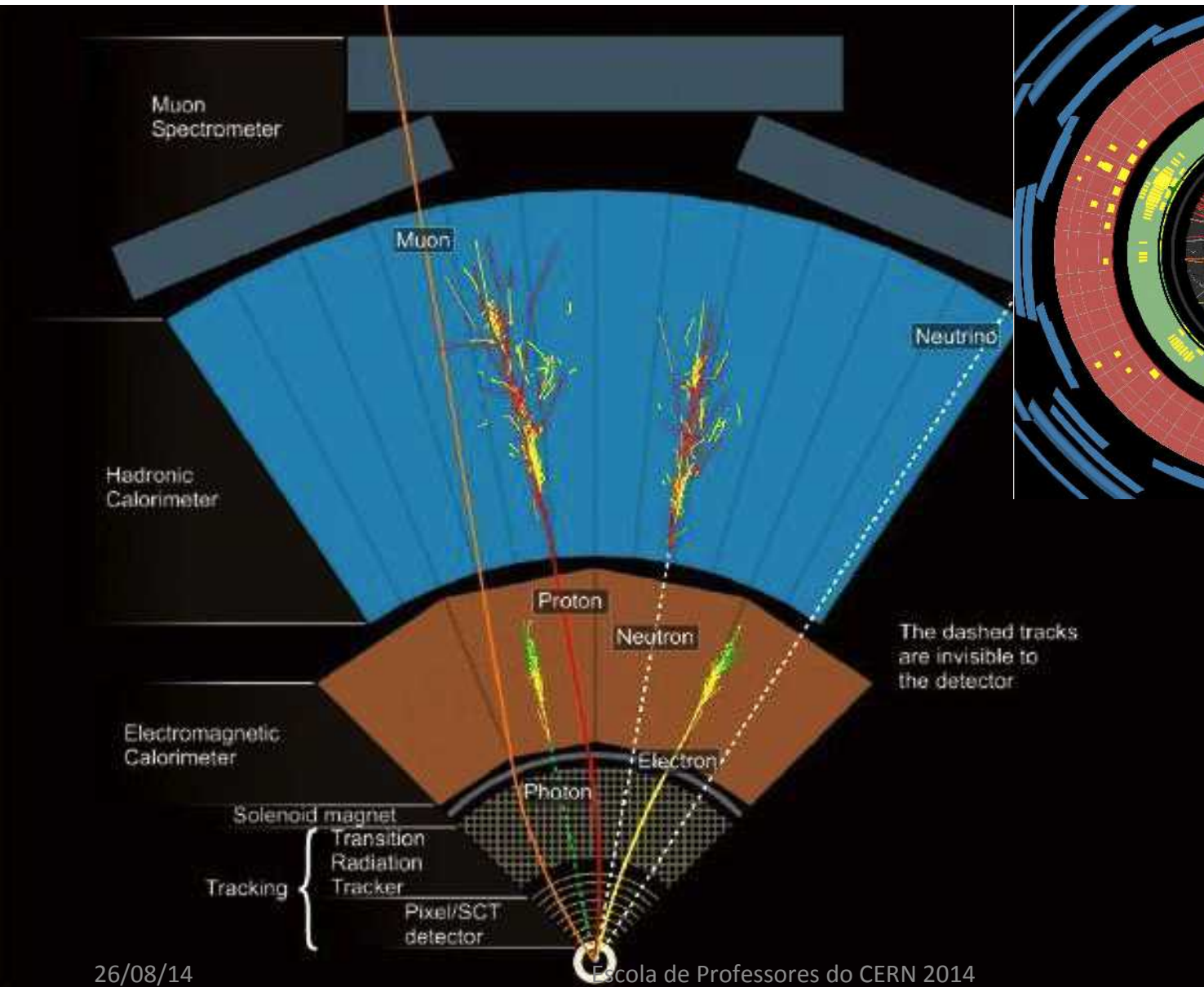
Perguntas?



Bonus slides



Como se detectam partículas



Instalação na caverna de ATLAS

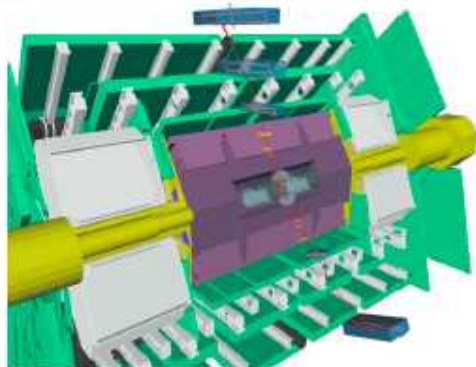
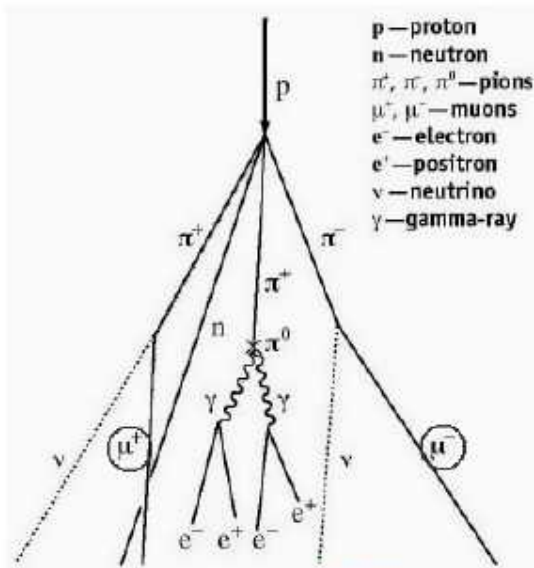


Barril Central do TileCal, 2004

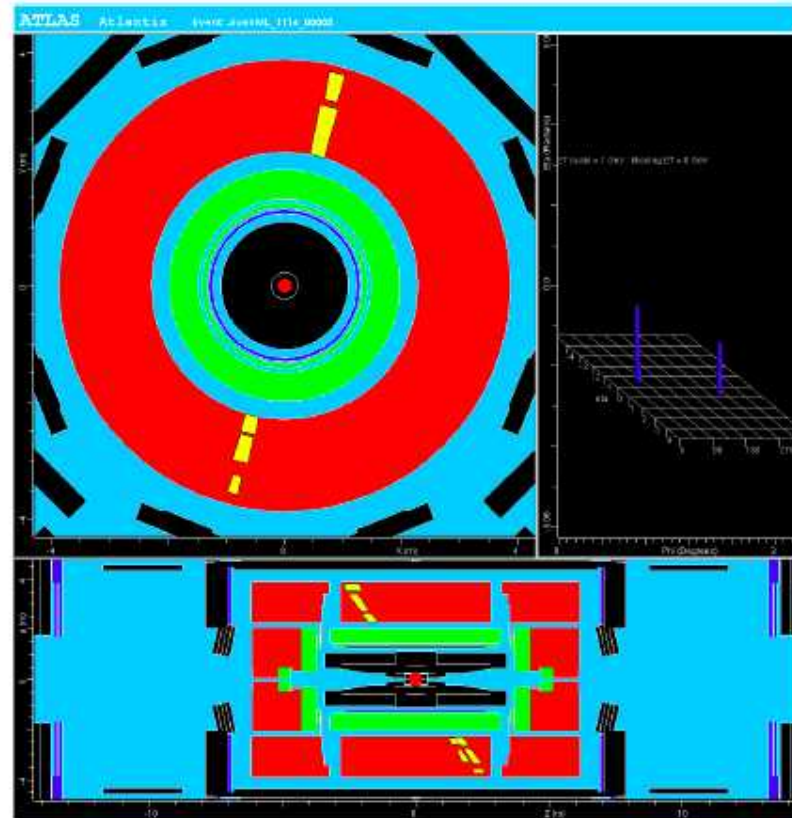


Antes do feixe estar pronto...

Certificação do Tilecal com muões cósmicos



Trajectória dos muões em ATLAS



Primeiros eventos em ATLAS

Nature, 2005



Manutenção e operações

Tilecal Sistema de monitorização com laser

Tilecal “detector control system” (DCS)

Tilecal LVPS refurbishment

TDAQ Node2 (browser de histogramas)

TDAQ Level 2 Jet Trigger

ALFA “detector control system” (DCS)

Segurança na caverna de ATLAS

Desempenho

Energia transversa em falta (Missing Et)

Jactos

Física

W & Z secção eficaz e assimetria

Produção W+jactos

Processos com di-bosões

Jactos & lões pesados (Pb)

Quark Top: modelo padrão e nova física

Higgs $\rightarrow$ bbar

Higgs $\rightarrow$ WW

Divulgação

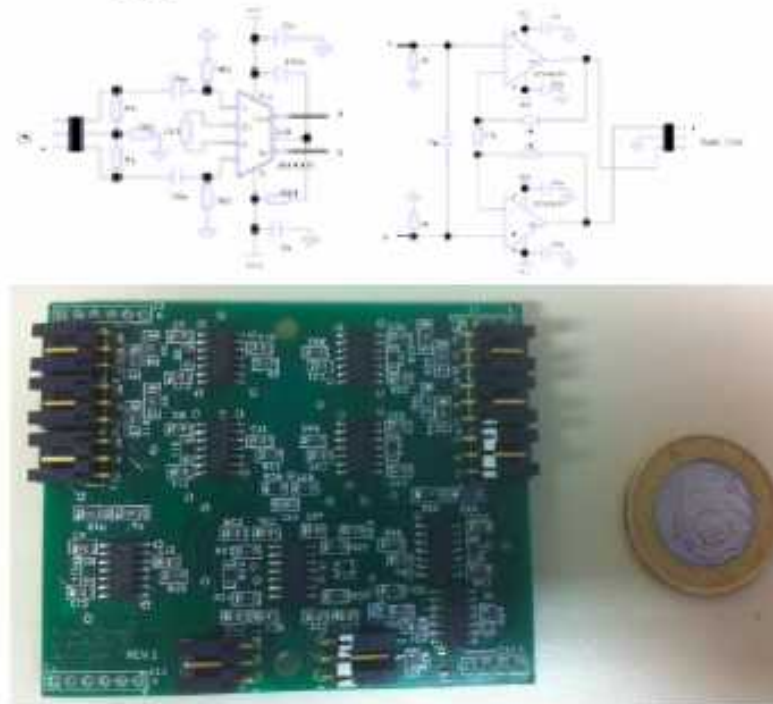
Computação

Forte participação do LIP na GRID

Participação Brasileira no ATLAS

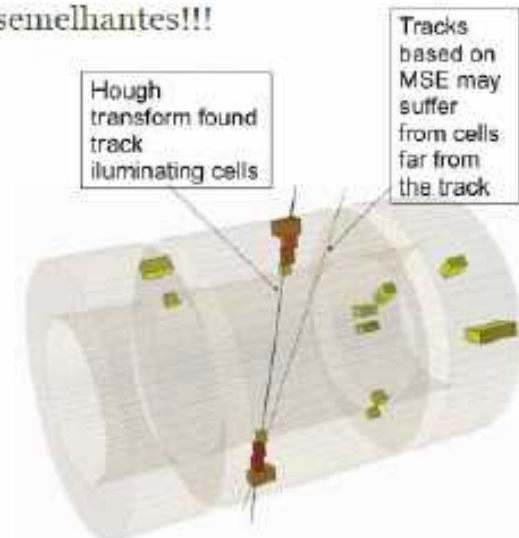
Hardware no Trigger nível 1/ TileCal

- A colaboração ATLAS/Brasil (na época somente na UFRJ) fez todo o desenho de uma placa usada dentro do calorímetro do ATLAS.
- A indústria brasileira foi usada pra construir as placas. Mais de 2000 placas de circuito foram entregues e integradas no resto da eletrônica do detector.
- Desenvolvimento, testes e integração feitos pelo, na época aluno de doutorado, Augusto Cerqueira (UFRJ) sob a orientação do professor J.M. Seixas, hoje coordenador do grupo de engenharia eletrônica da UFJF.

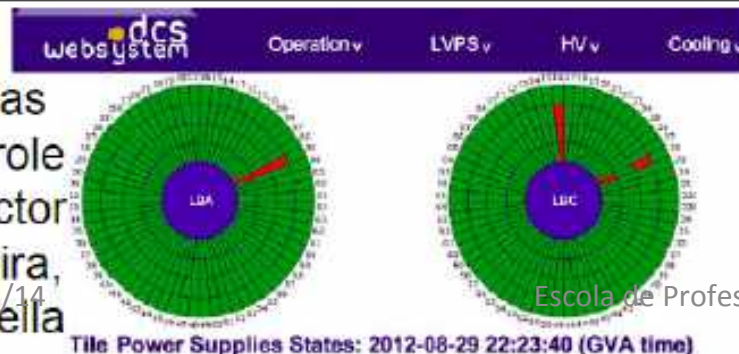


Estudos de desempenho do detector

- Como Luciano Manhaes (doutorando da UFRJ na época e professor na UFJF atualmente) fez, podemos também encontrar traços nos calorímetros usando técnicas semelhantes!!!

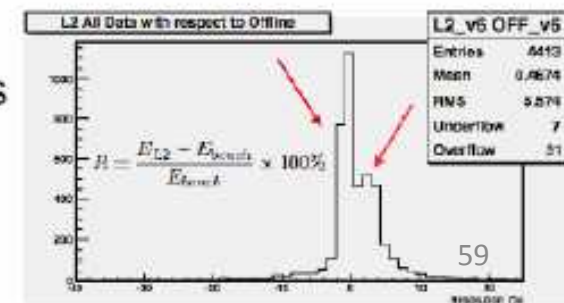


Sistemas de controle do detector
F. Ferreira,
A. Sivoilella



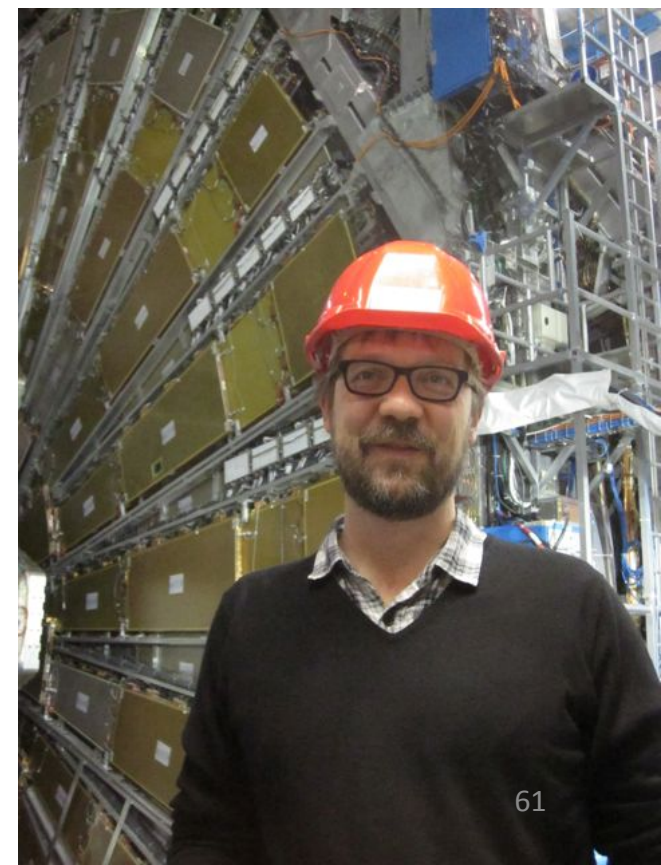
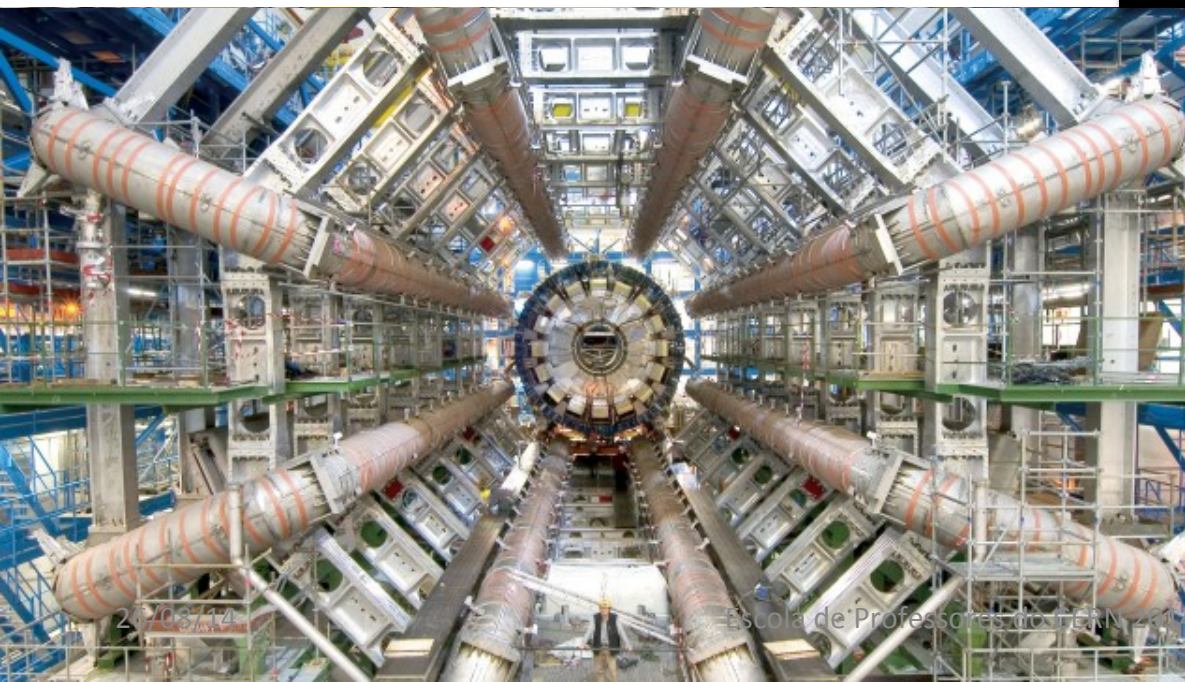
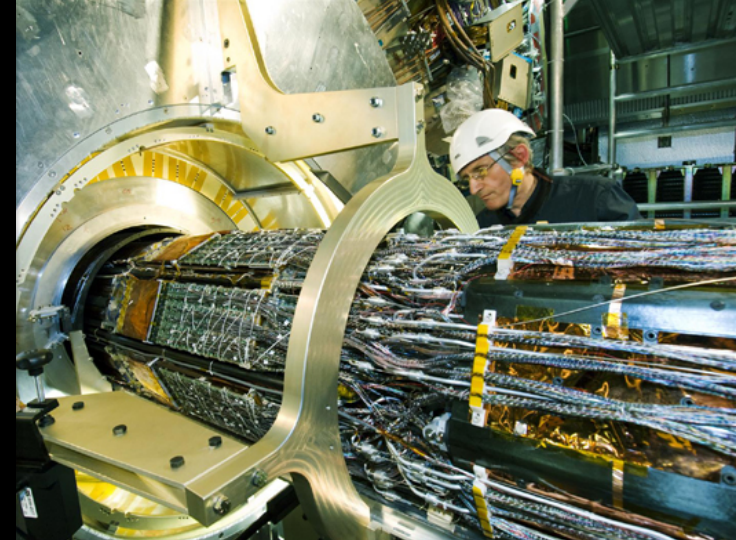
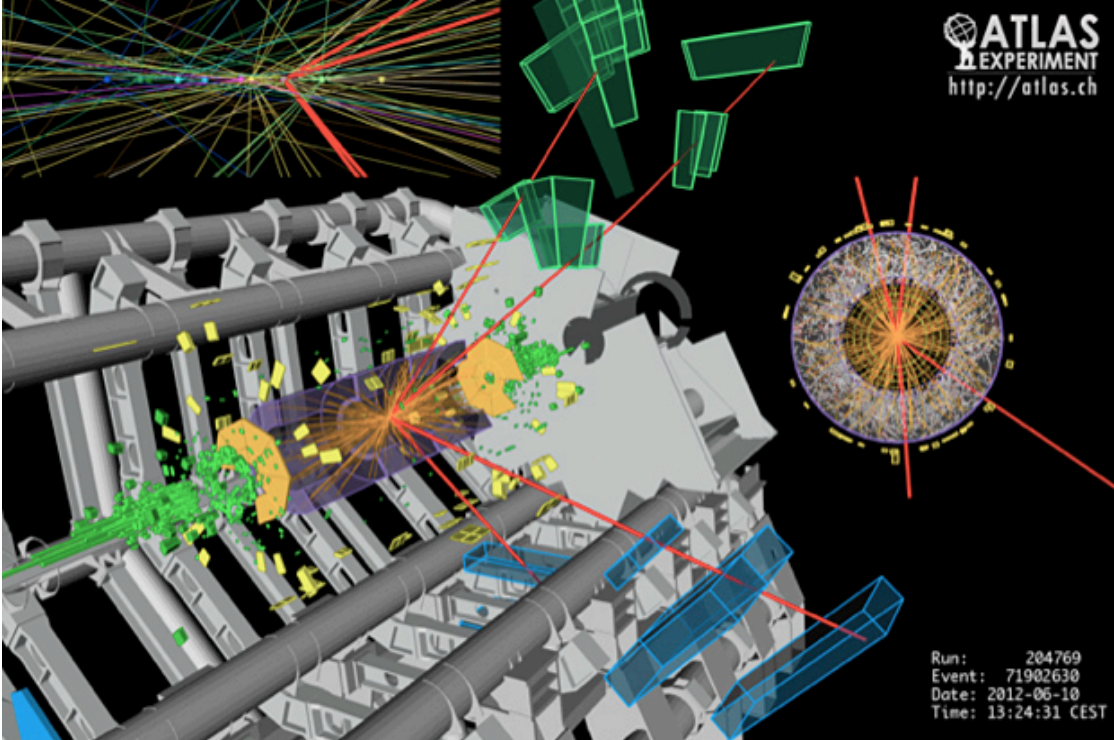
Estudos e melhoramentos no trigger de alto nível software

Escola de Professores do CERN 2012



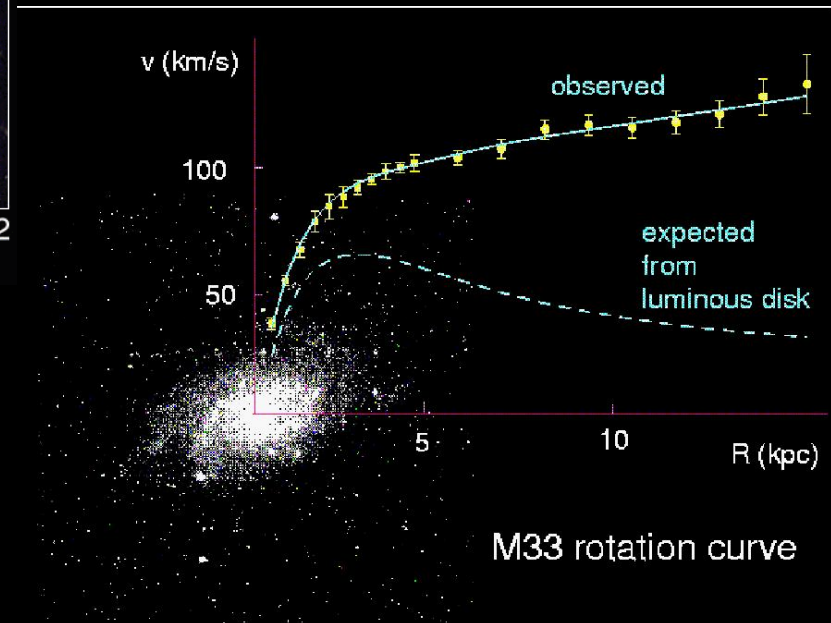
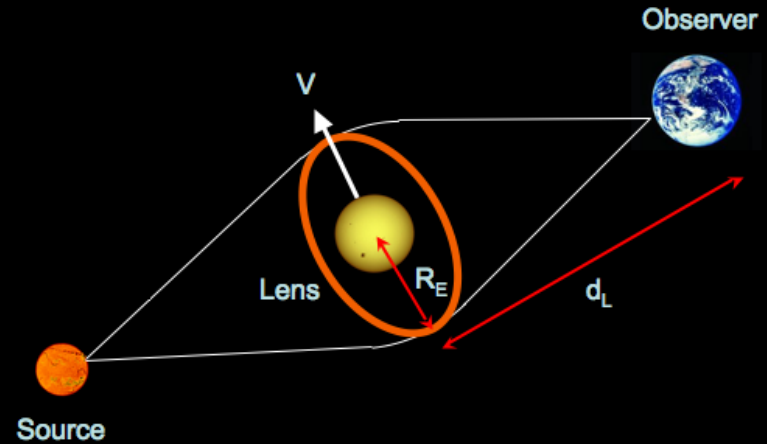
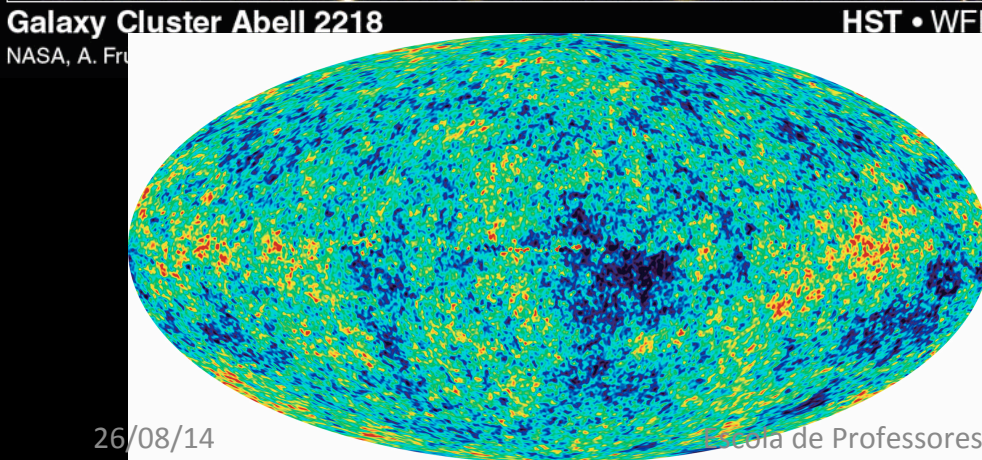
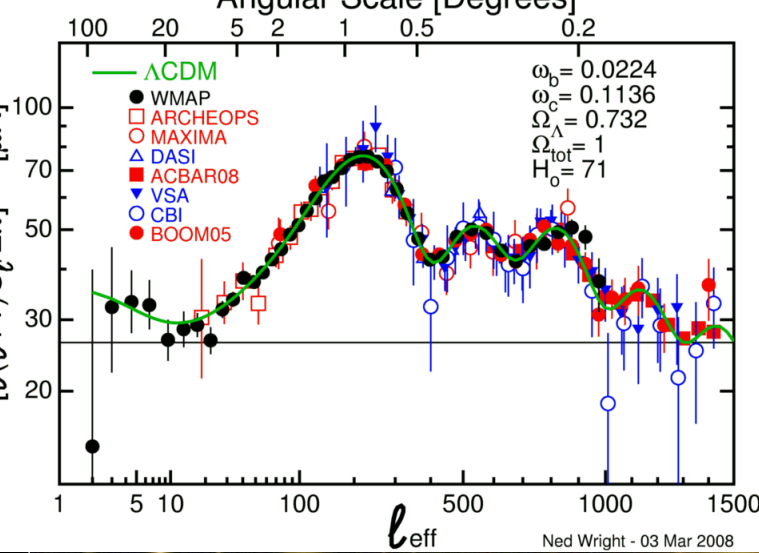
Uma aventura de mais de 20 anos !

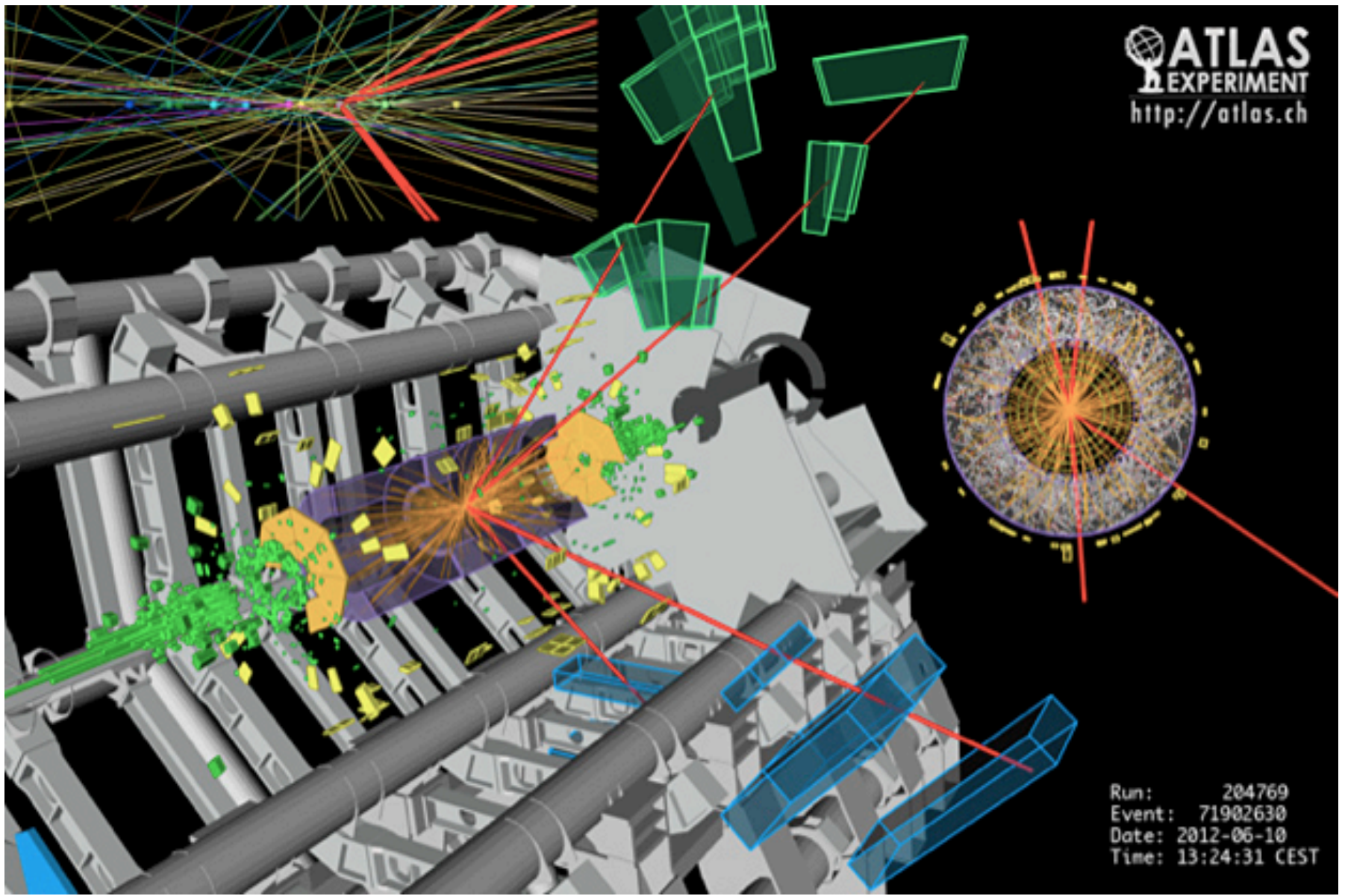






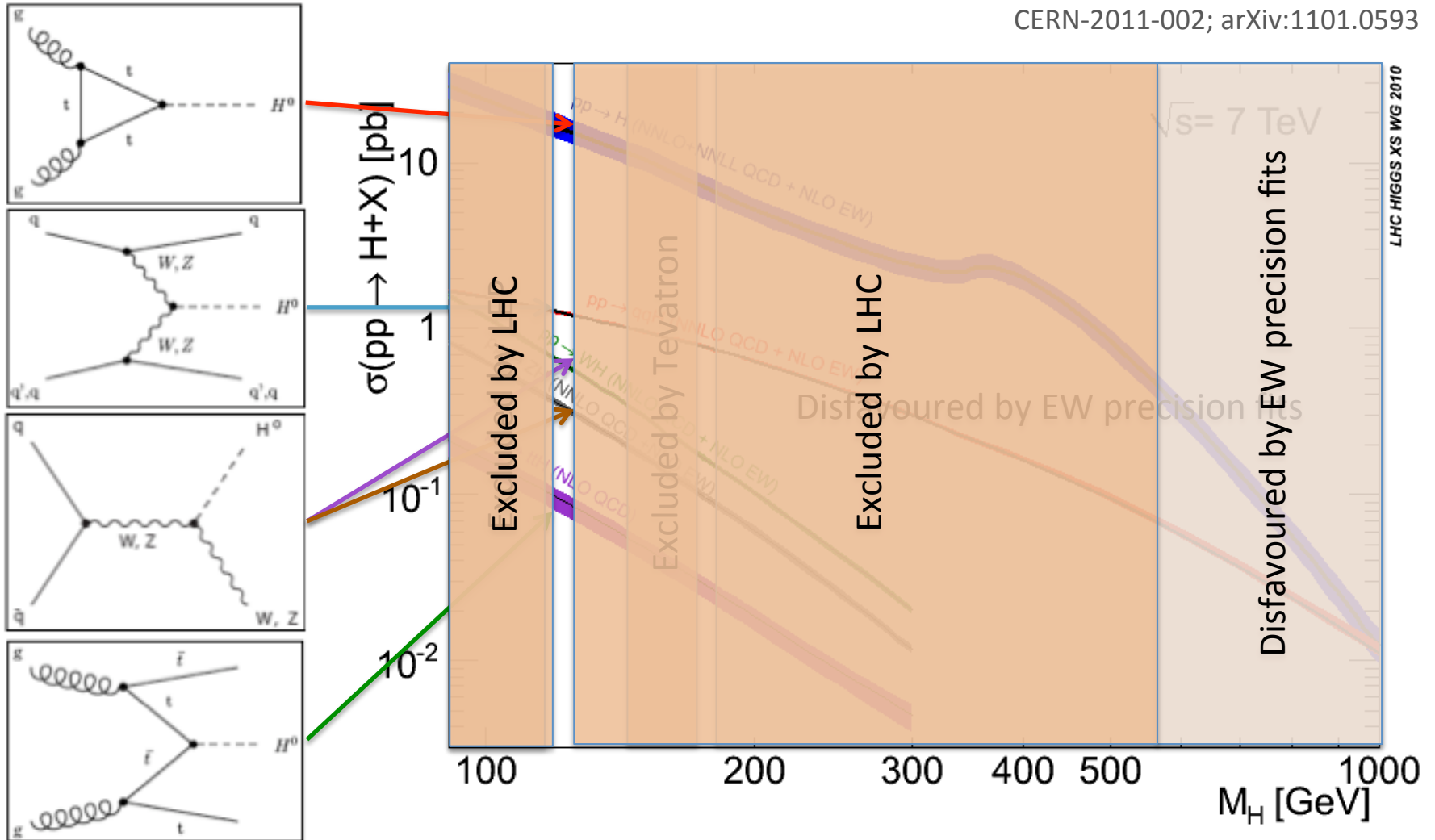
Juste le début!





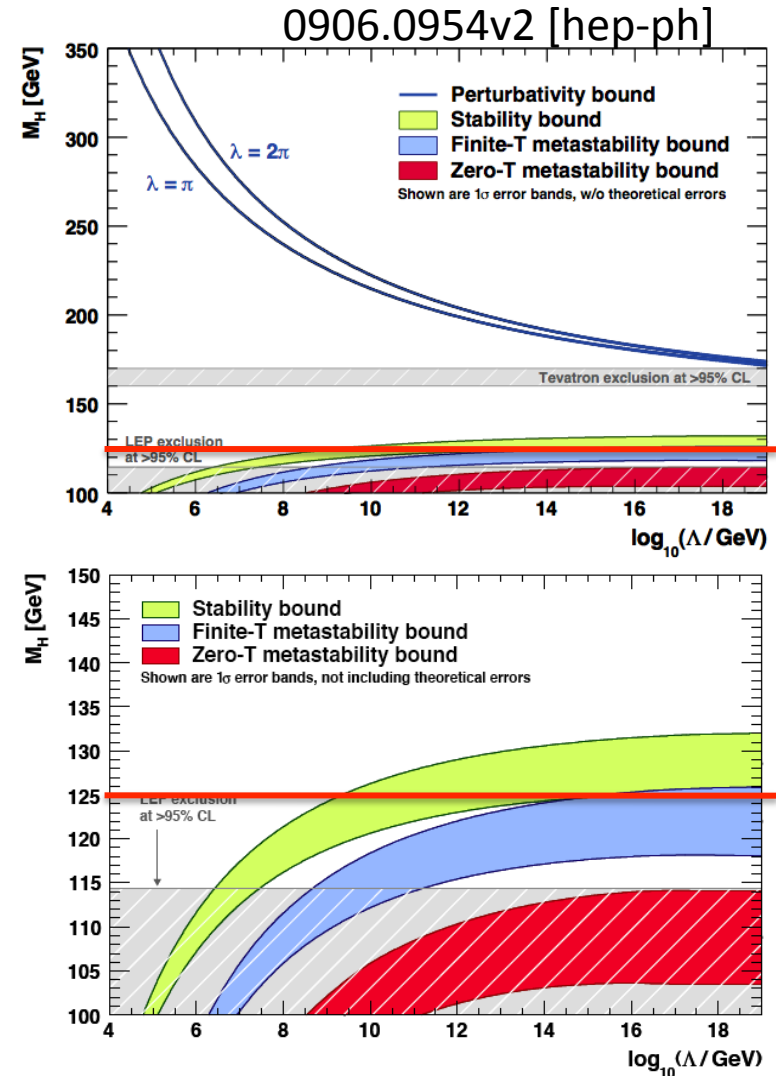
6 months ago: ICHEP 2012

CERN-2011-002; arXiv:1101.0593



But there is more...

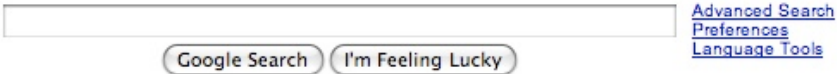
- We know the SM is incomplete
- For a low Higgs mass relative to the top quark mass, the quartic Higgs self-coupling runs at high energy towards lower values.
- At some point it would turn negative indicating that the vacuum is unstable.
- The universe could decay into a more stable lower energy vacuum state.
- Unless new physics appears at some energy scale
- The Higgs sector can give important clues to constrain new physics beyond the SM
- It is a great way to search for new physics!



Sequência de aceleradores do CERN

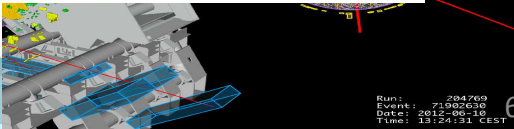
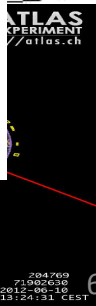
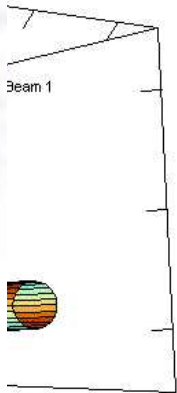
LINAC2
Booster
Proton

- Feix
- Colis
- detec
- Mui

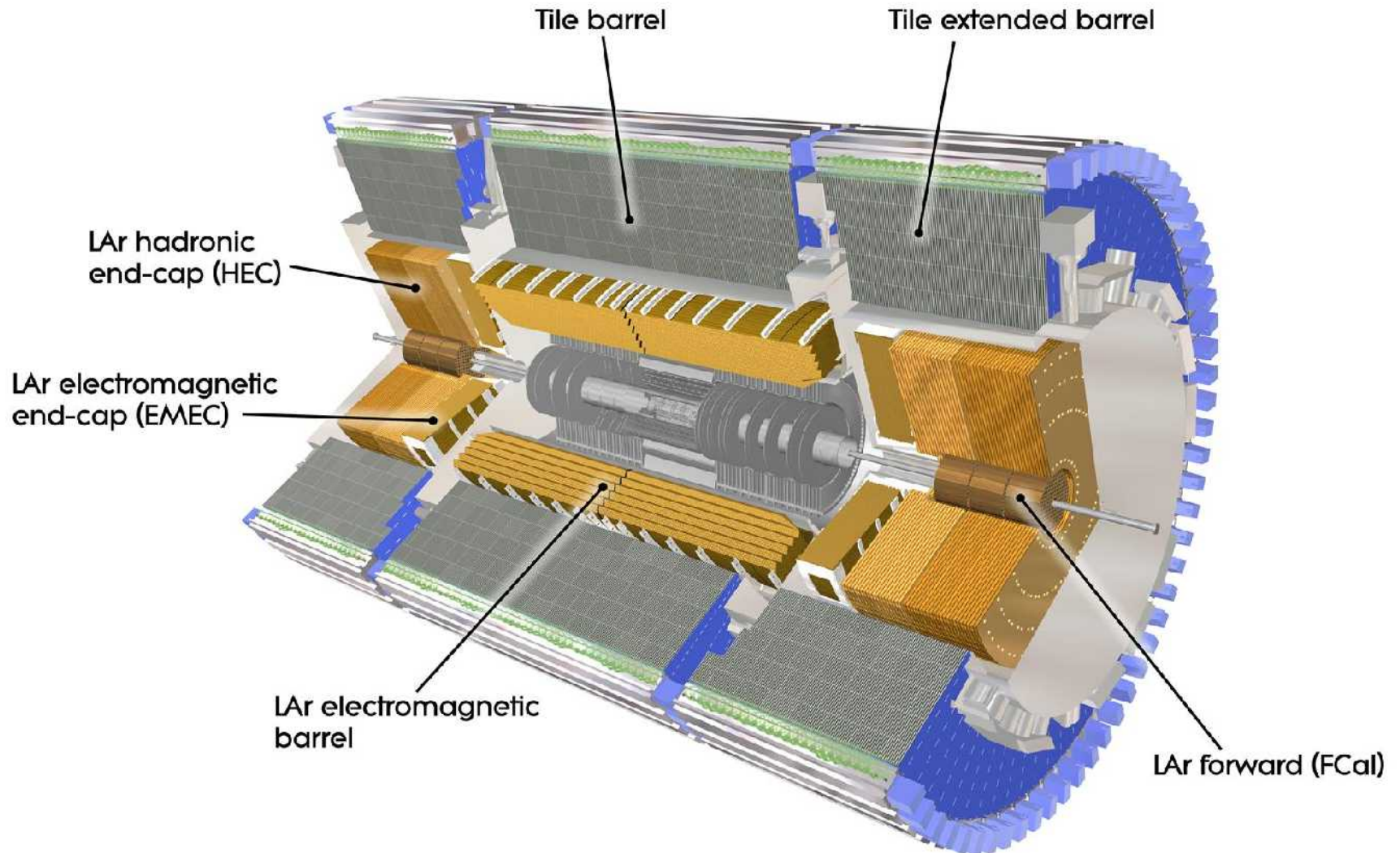


ron

ev



Os calorímetros de ATLAS



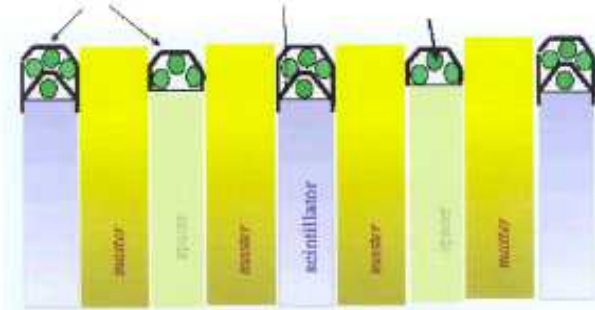
Inserção de fibras ópticas

~500 000 fibras

28 diferentes comprimentos (~2 m)

~160 000 perfis

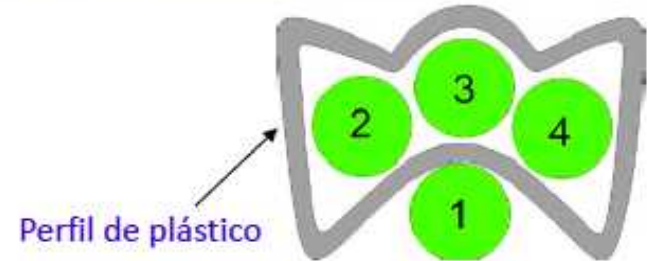
4 tipos, 2 comprimentos (~1 m each)



Robot para inserção de fibras ópticas em perfis de plástico desenvolvido e construído em Portugal

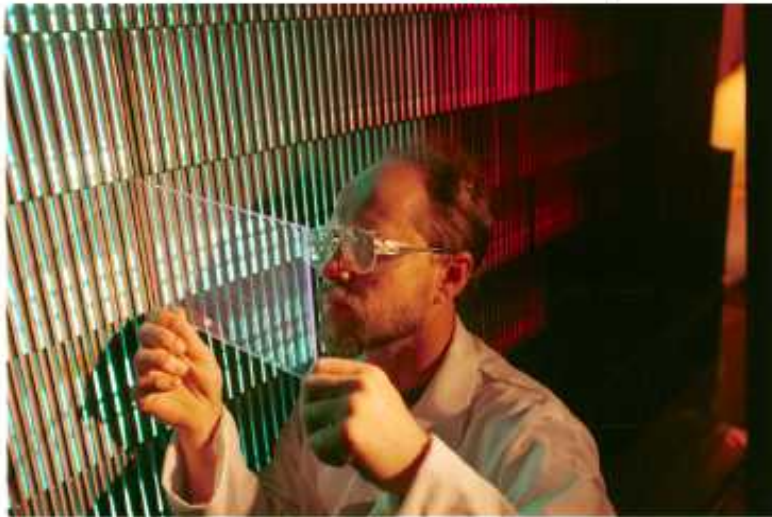
Fiável!

Vários anos de funcionamento em contínuo



Cintiladores R&D

Cintilador a ser introduzido num módulo do
TileCal em Argonne (USA)



Cintiladores produzidos por
injecção em moldes

Caras fotografadas através de
cintiladores de 10cm de espessura



COURRIER CERN
Revue internationale de la physique des hautes énergies



Cintiladores produzidos na
Uminho I&D



Instrumentação do TileCal no CERN



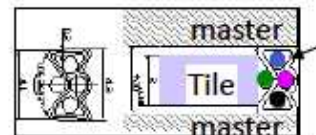
Desenho e construção do TileCal

Cintiladores de Plástico



150 000

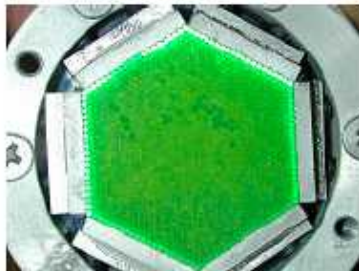
Perfis de plástico



fibras ópticas WLS

Ø 1 mm

~2 metros de comprimento



Inserção de fibras
com robot



Desenho das células
e encaminhamento
das fibras



Suportes dos PMTs



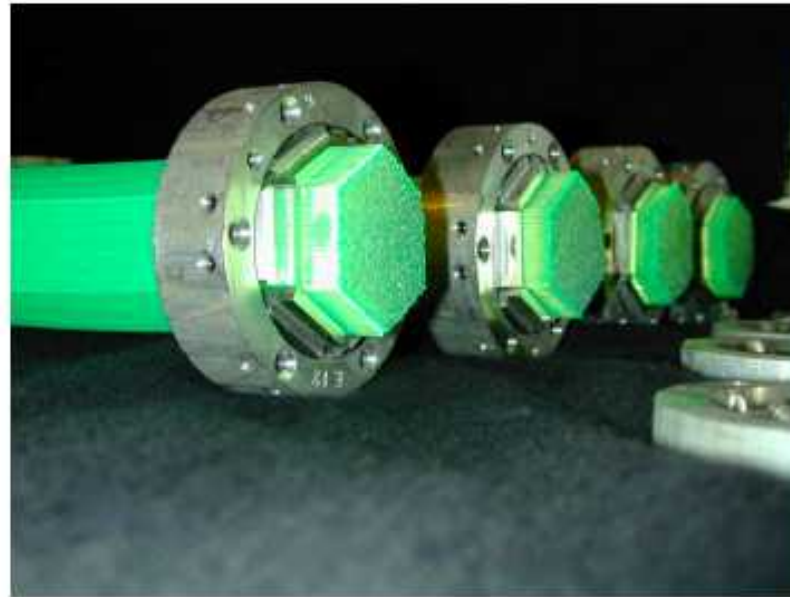
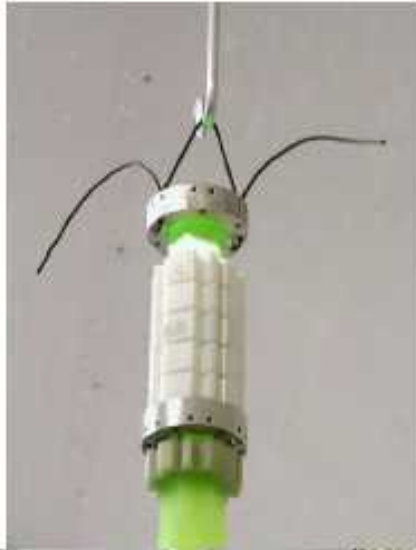
Instrumentação dos módulos



Test beam – certificação e calibração



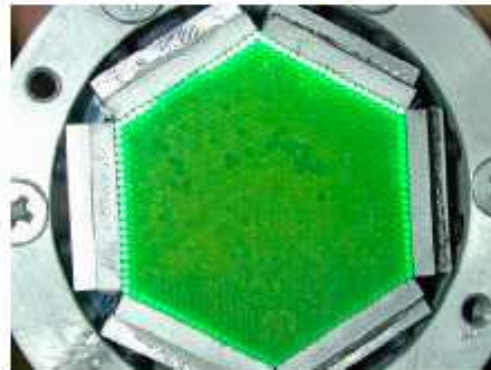
Corte, Polimento e Aluminização de fibras ópticas



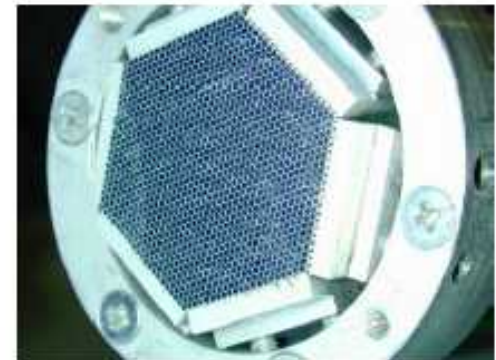
Molhos
com
1261 fibras



Polimento e corte



Aluminização

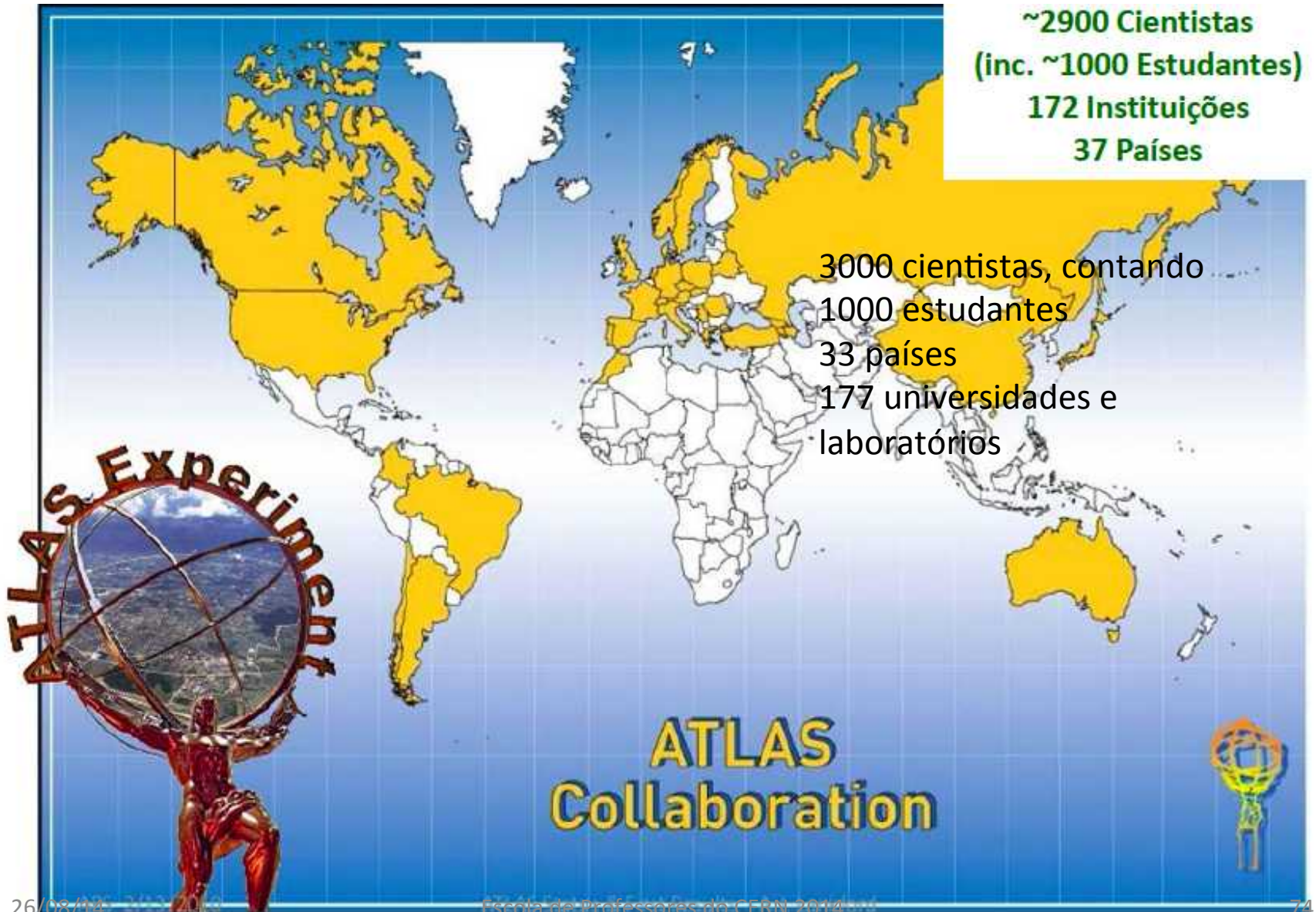


26/08/14

Escola de Professores do CERN 2014

13

Colaboração verdadeiramente global!



Tomada de dados LHC

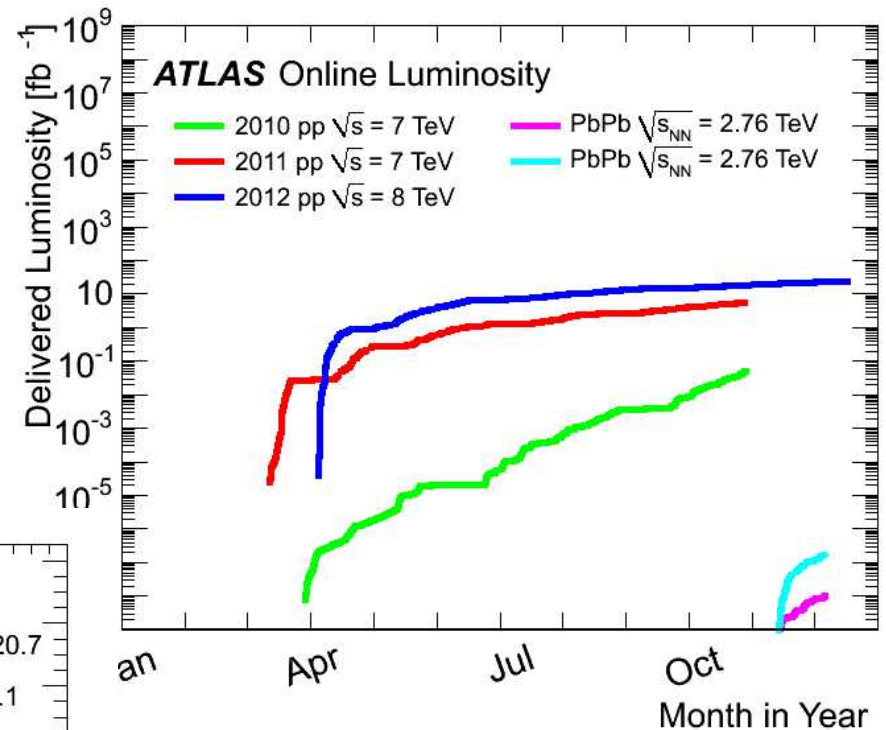
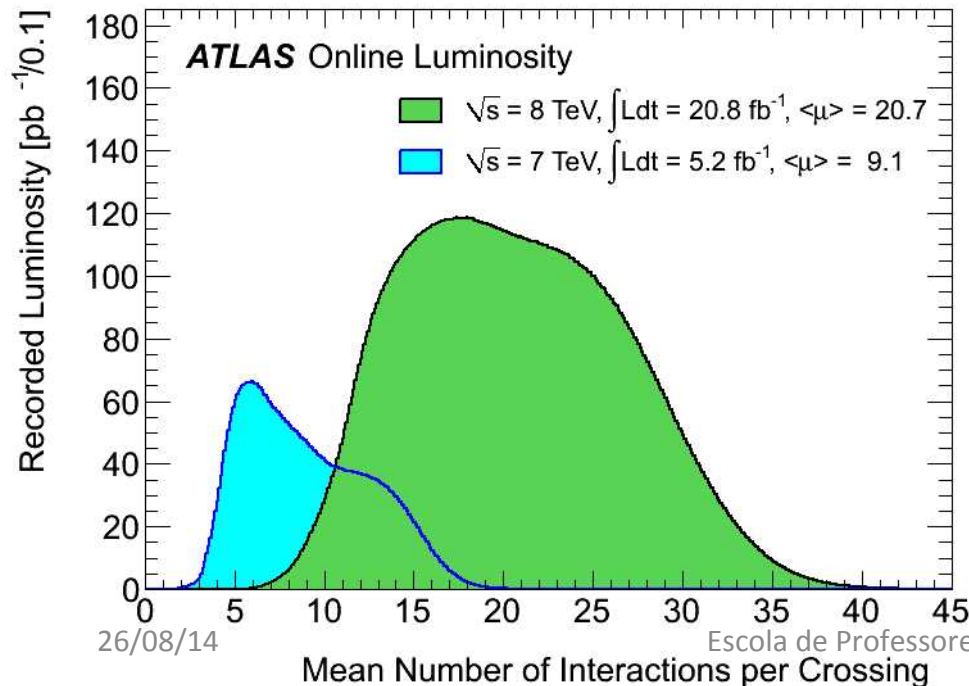
de eventos Secção eficaz
(secção de choque)

$$N = L \times \sigma$$

Luminosidade integrada
em femtobarn-1

barn = b = unidade de área

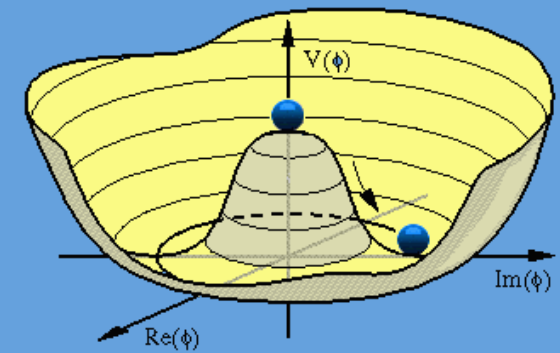
1 fb = 10^{-15} b = 10^{-39} cm²



desempenho excepcional do LHC:
a intensidade dos feixes
continua sempre a aumentar

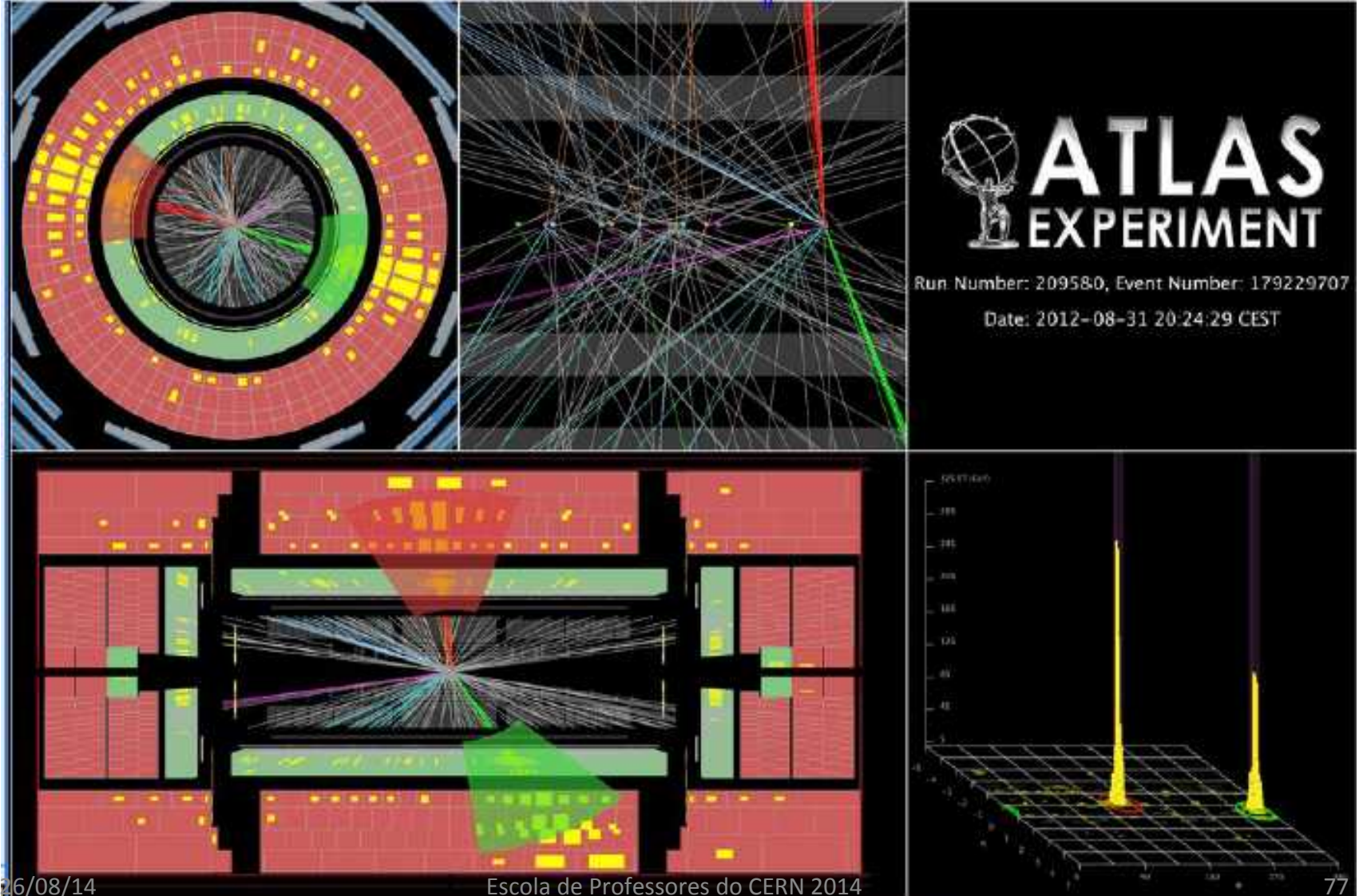
aumenta também o número médio
de colisões por cruzamento de feixes

Seleccção de alguns resultados



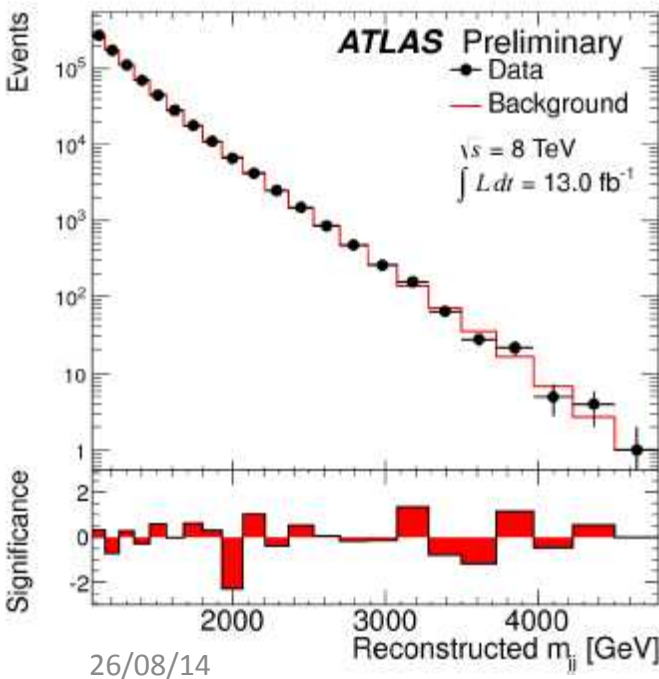
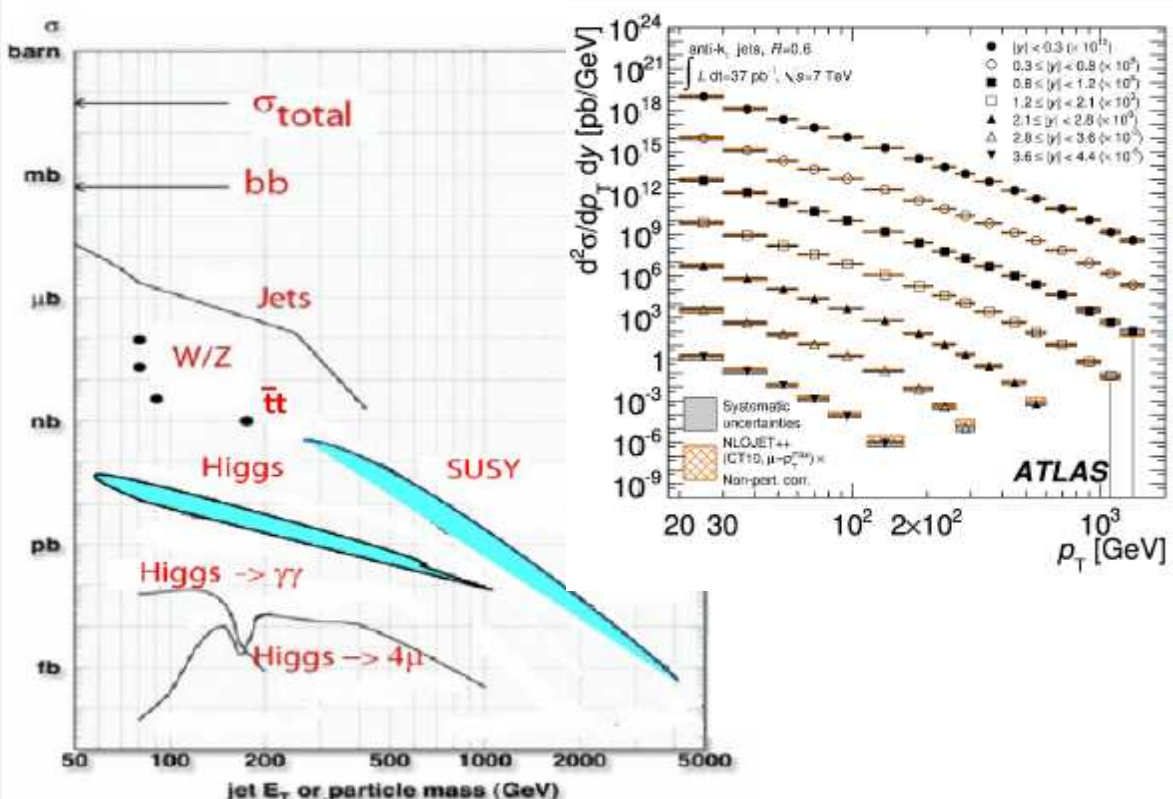
Jatos de partículas

- Evento di-iatos com mais alta massa, 4.69 TeV

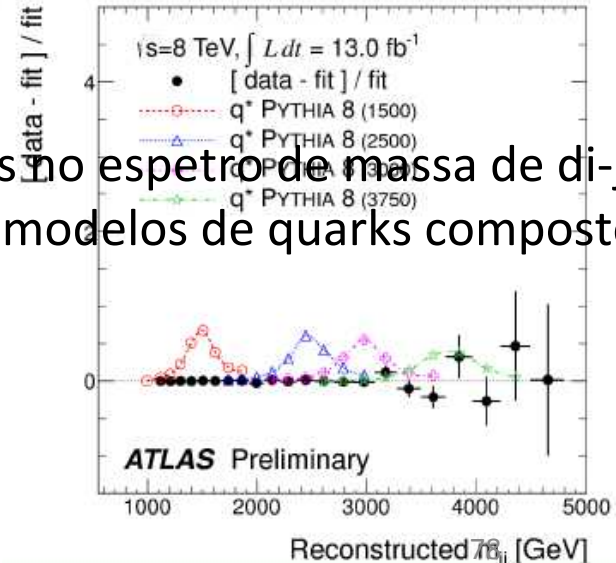


Jatos

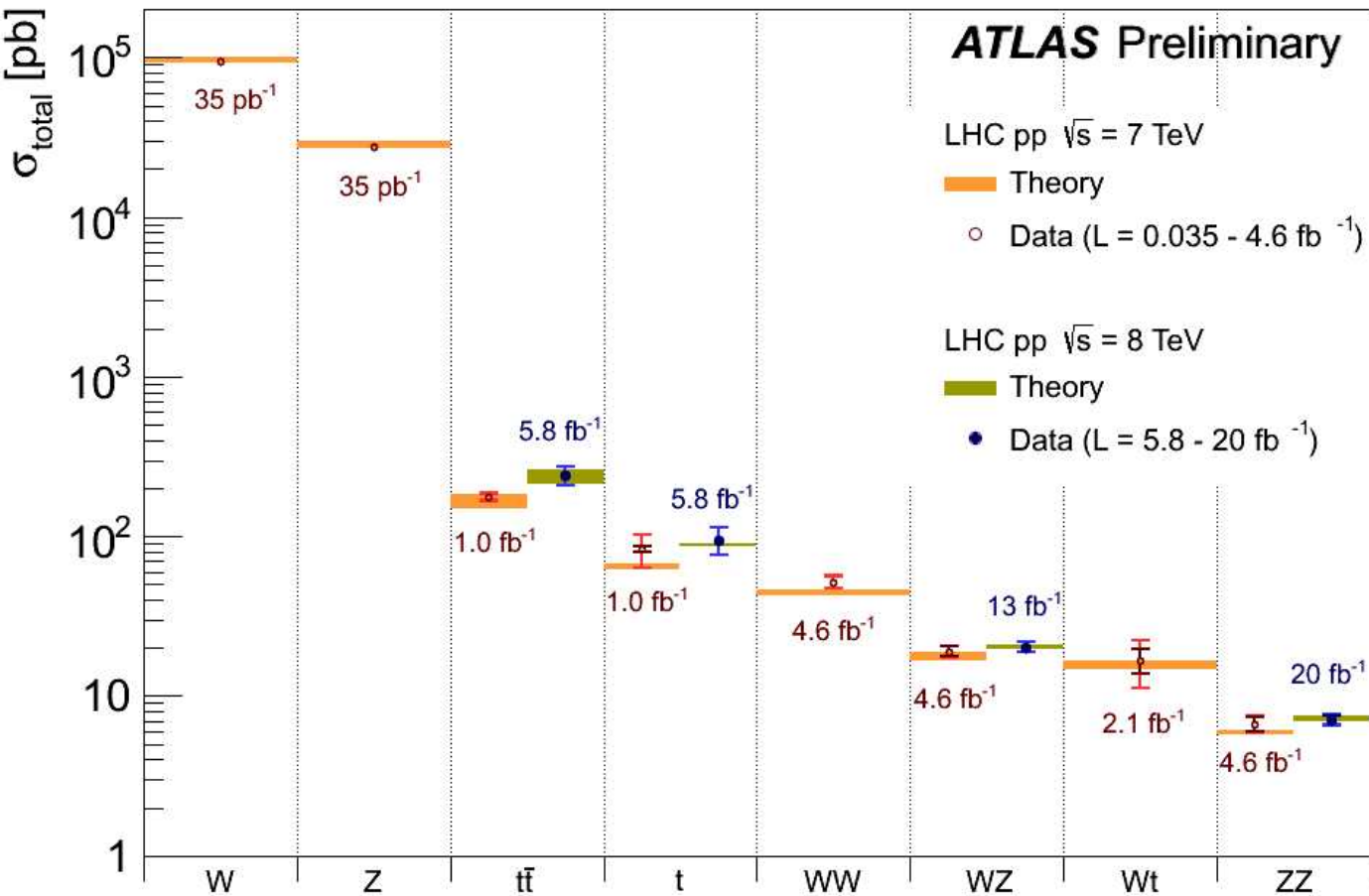
- Produção de jatos é o processo mais abundante no LHC
- Secção eficaz versus momento transversal
 - teste muito preciso da QCD



- Procura de novas partículas no espectro de massa de di-jatos
 - põe fortes limites aos modelos de quarks compostos



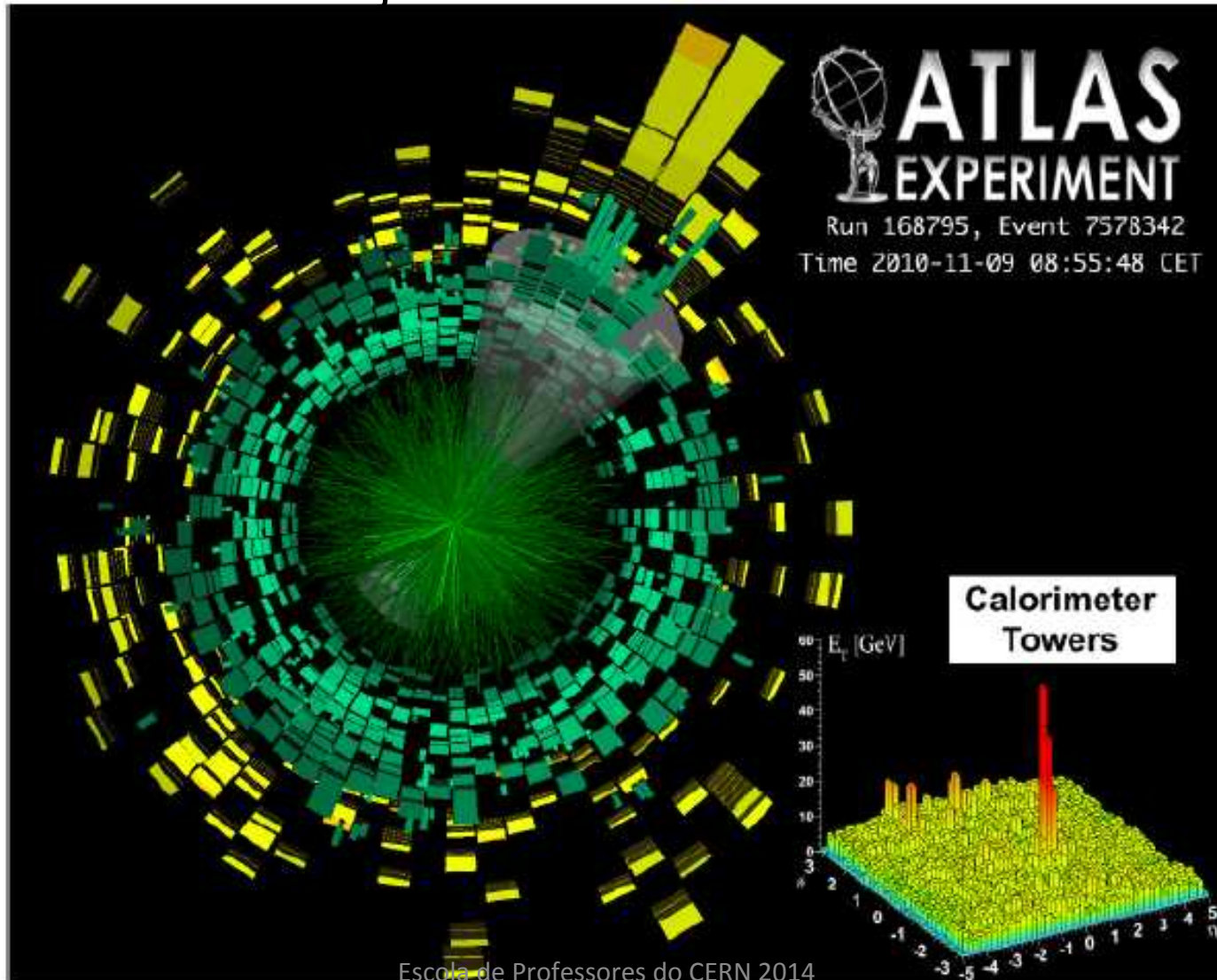
Secções eficazes inclusivas

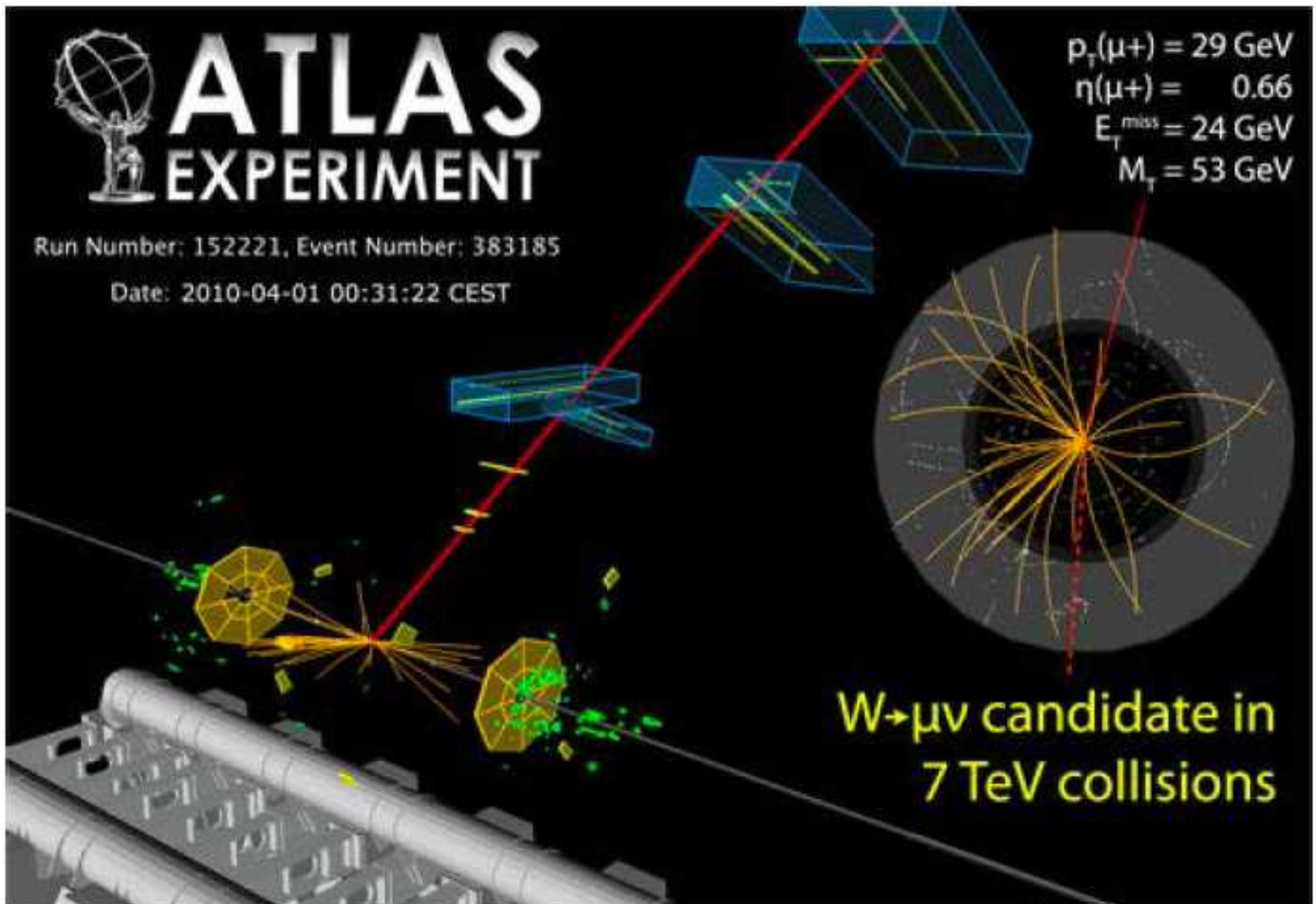


■ Estatística de eventos e

- 1015 colisões pp
- 3 mil milhões registadas
- 100 milhões $W \rightarrow l\nu$
- 10 milhões $Z \rightarrow ll$
- 400 mil $tt \rightarrow lX$
- centenas de Higgs

Assimetria nos jatos em colisões Chumbo-Chumbo

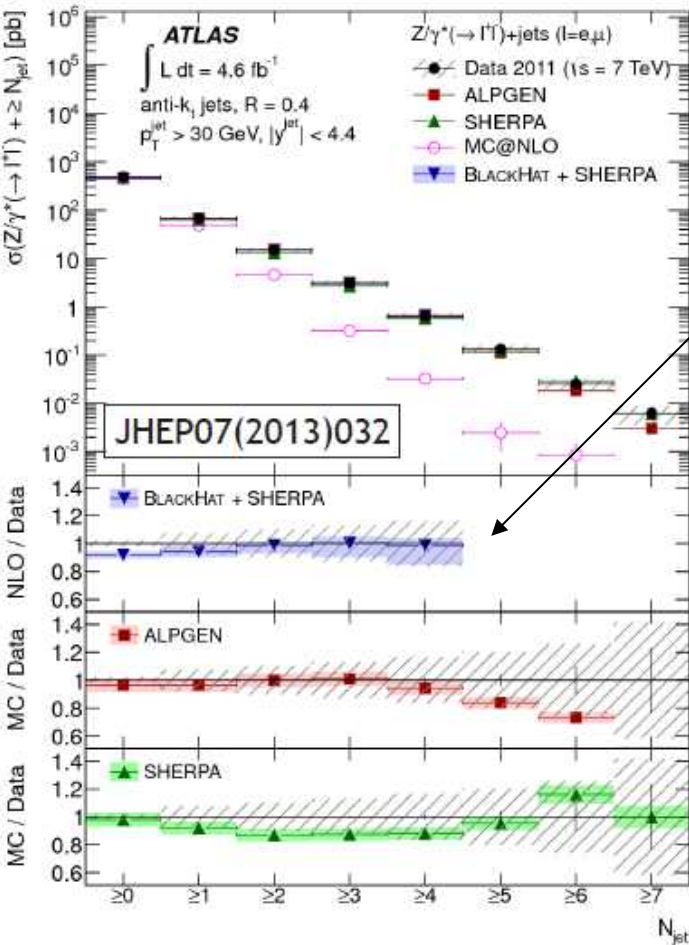




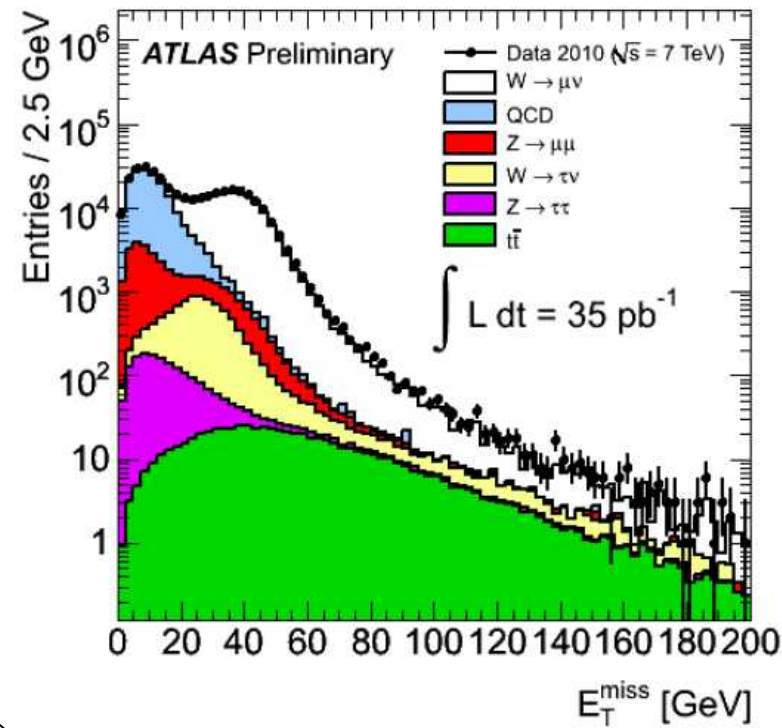
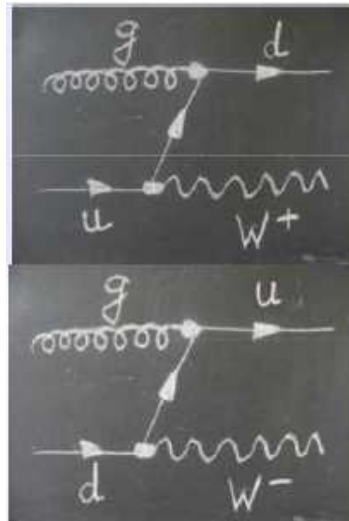
Bosões W/Z

Z + n jatos

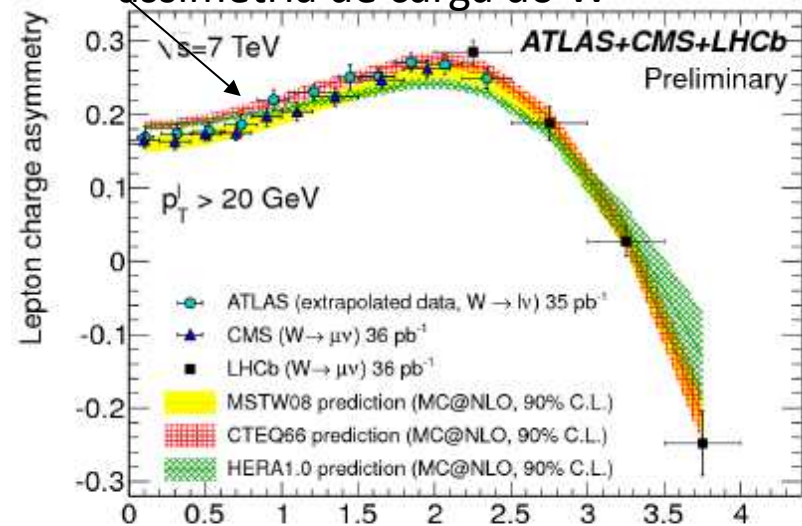
$$p_T(j) > 30 \text{ GeV}, |y(j)| < 4.4, \Delta R(\ell j) > 0.5$$



Conseguem-se discriminar os melhores modelos!



assimetria de carga do W



Quark top

- É a partícula elementar mais massiva de todas. $M(\text{top}) = 173.2 \text{ GeV}$.
 - Produzida principalmente aos pares em fusão de glúões

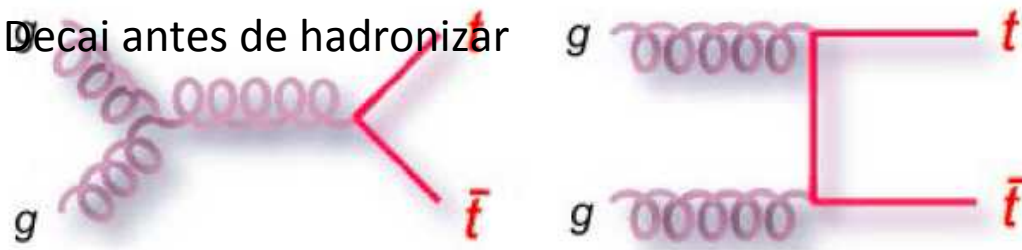
Leptons	e	μ	τ	W
	ν_e	ν_μ	ν_τ	Z
	d	s	b	g
	u	c	t	γ

Three Generations of Matter

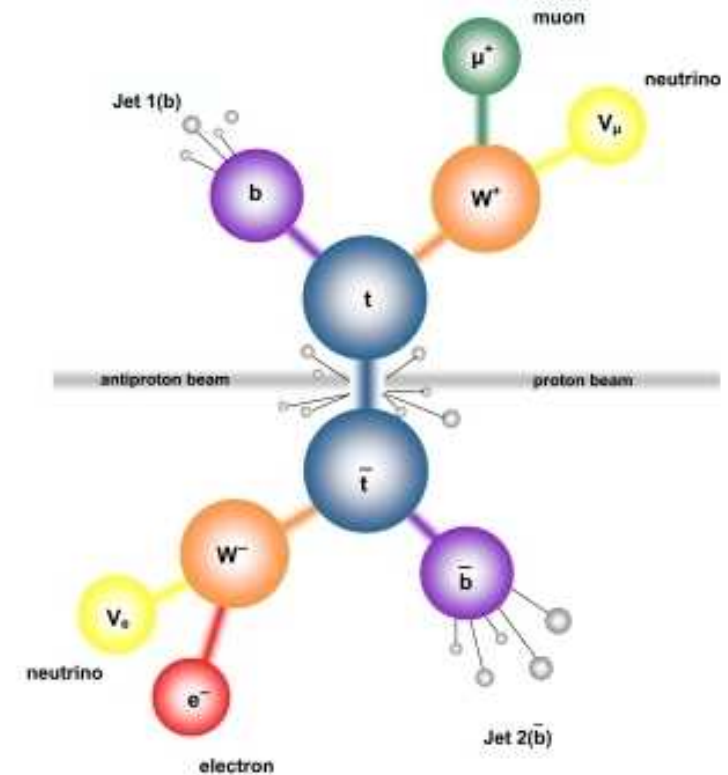
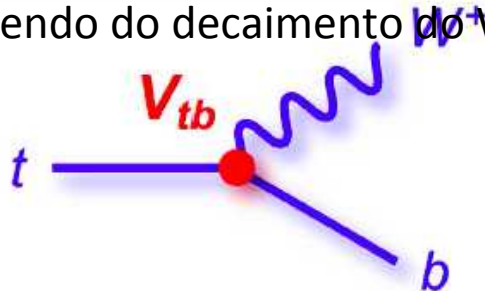
Quarks

Force Carriers

- Decai antes de hadronizar



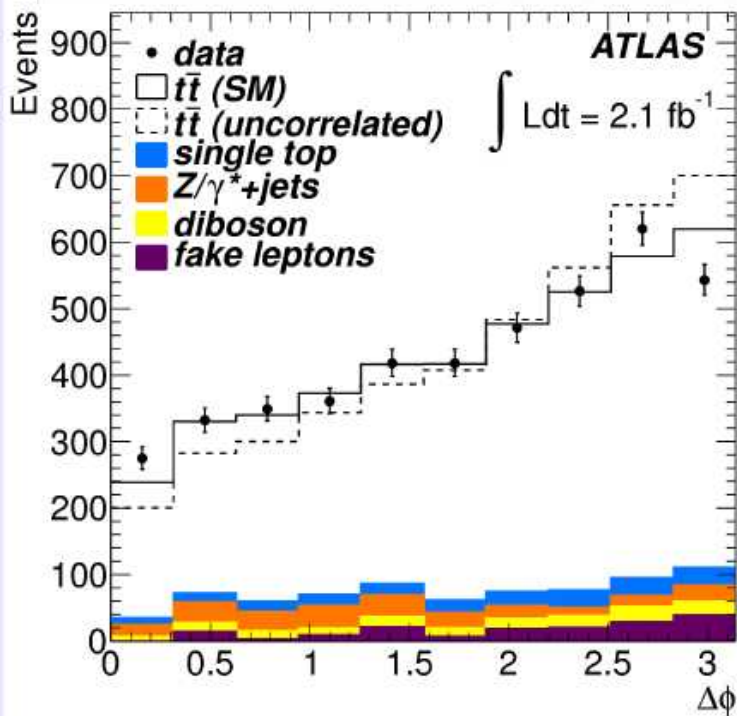
- Estado final com 0, 1 ou 2 leptões
 - dependendo do decaimento do W



Medições com o top

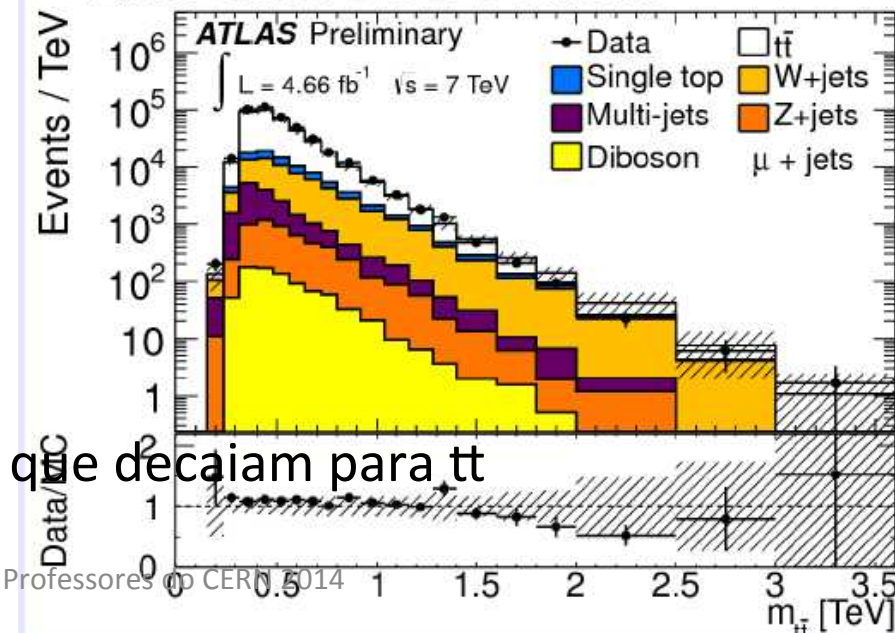
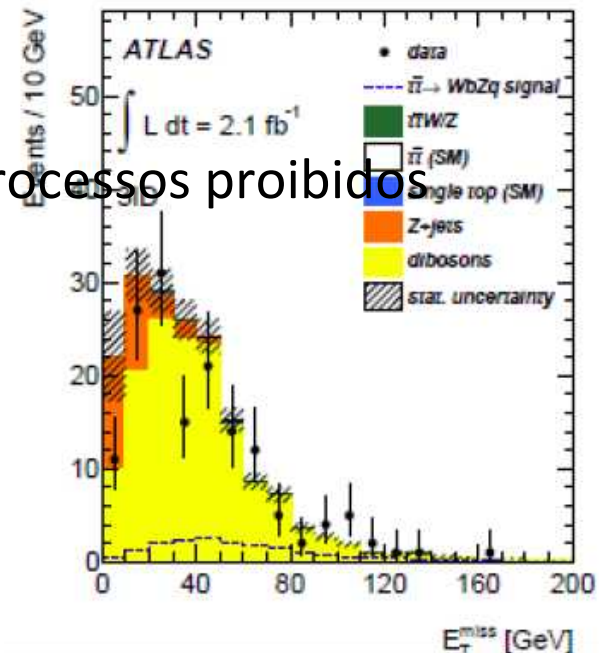
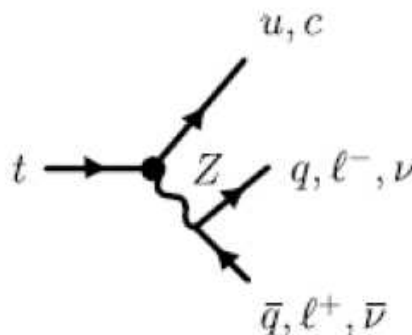
Correlação de spin entre os léptons

$$A = \frac{N(\uparrow\uparrow) + N(\downarrow\downarrow) - N(\uparrow\downarrow) - N(\downarrow\uparrow)}{N(\uparrow\uparrow) + N(\downarrow\downarrow) + N(\uparrow\downarrow) + N(\downarrow\uparrow)}$$



Procura de novas partículas

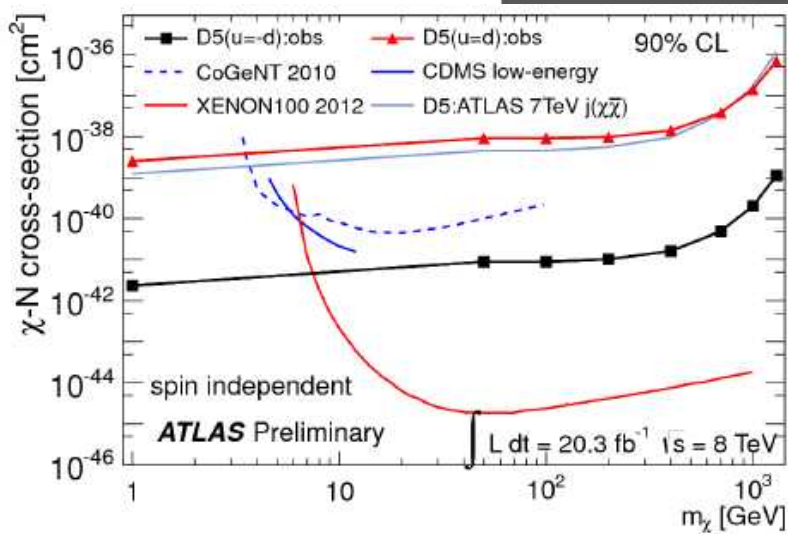
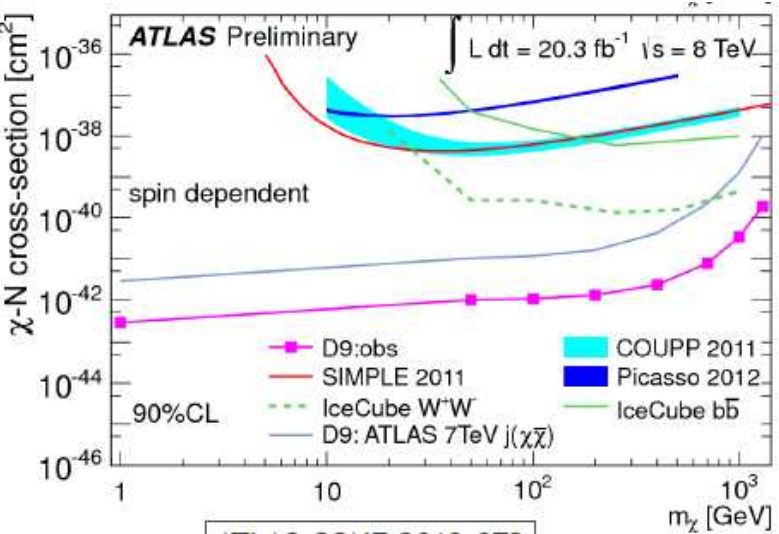
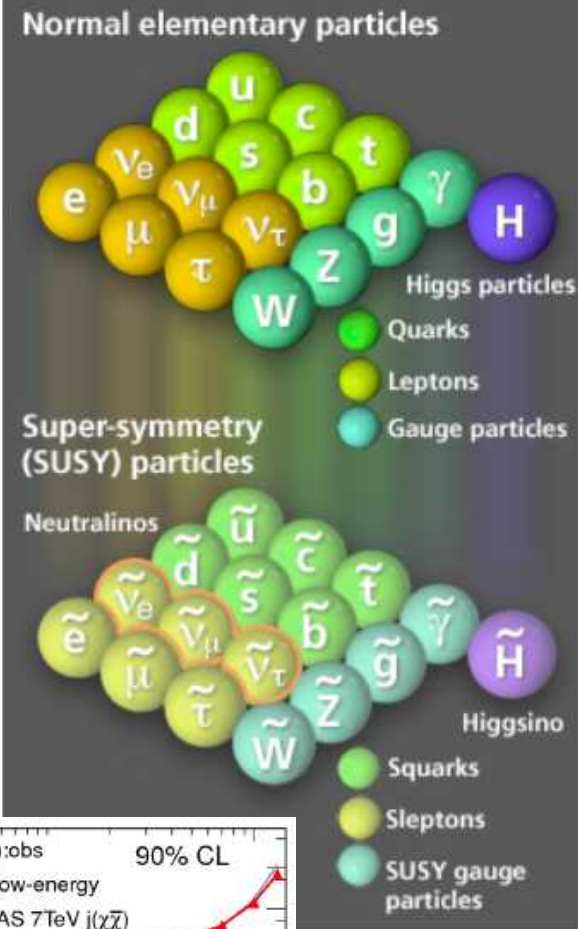
Procura de processos proibidos



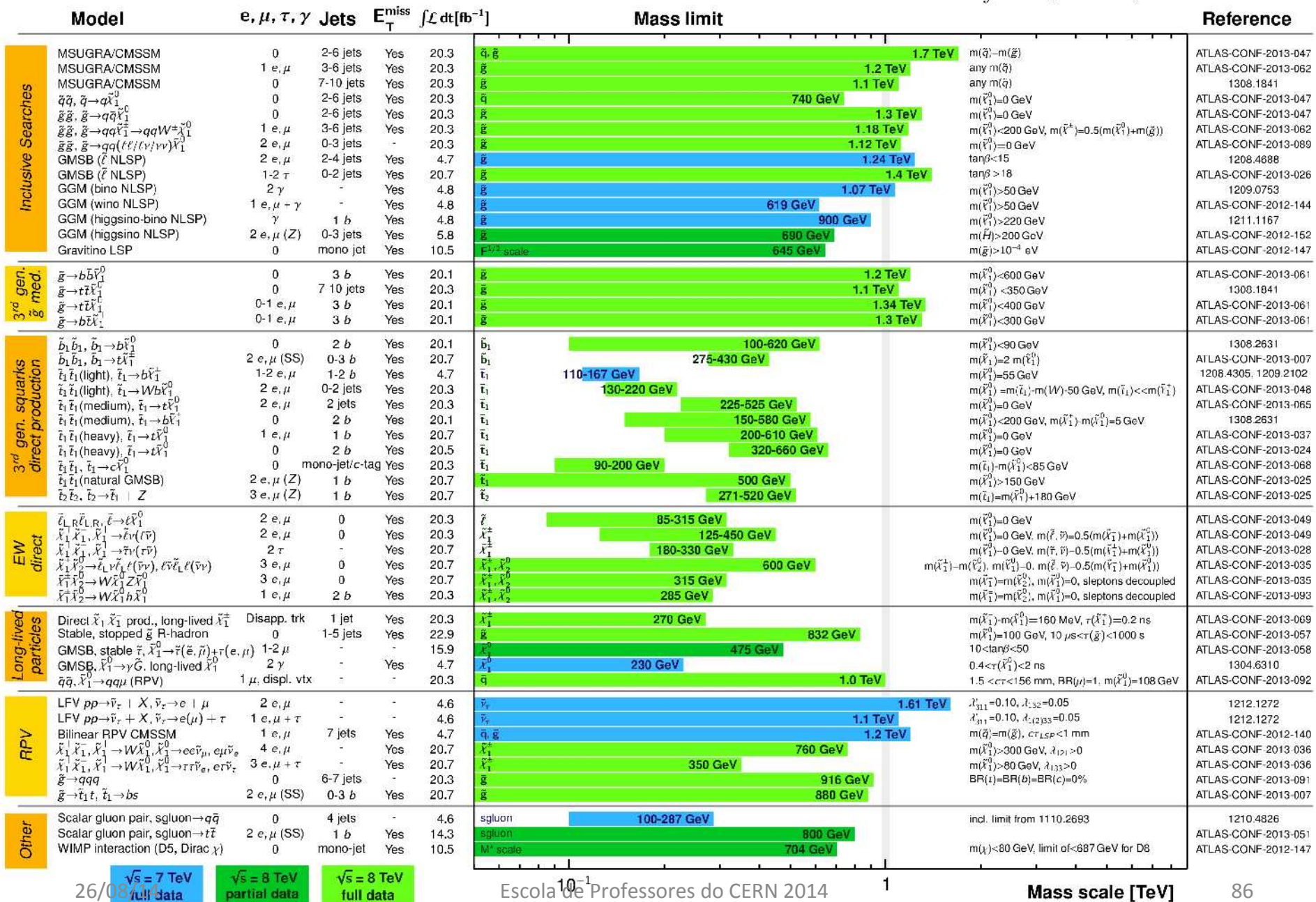
que decaíam para $t\bar{t}$

Supersimetria

- Modelo que resolve vários problemas teóricos
 - Mas traz uma simetria extra: cada fermião tem um parceiro supersimétrico
- A partícula supersimétrica mais leve seria provavelmente o candidato a matéria escura
 - deixa o detector sem interagir, produzindo energia
 - comparação com procuras diretas:



$$\int \mathcal{L} dt = (4.6 - 22.9) \text{ fb}^{-1} \quad \sqrt{s} = 7, 8 \text{ TeV}$$



26/08/14

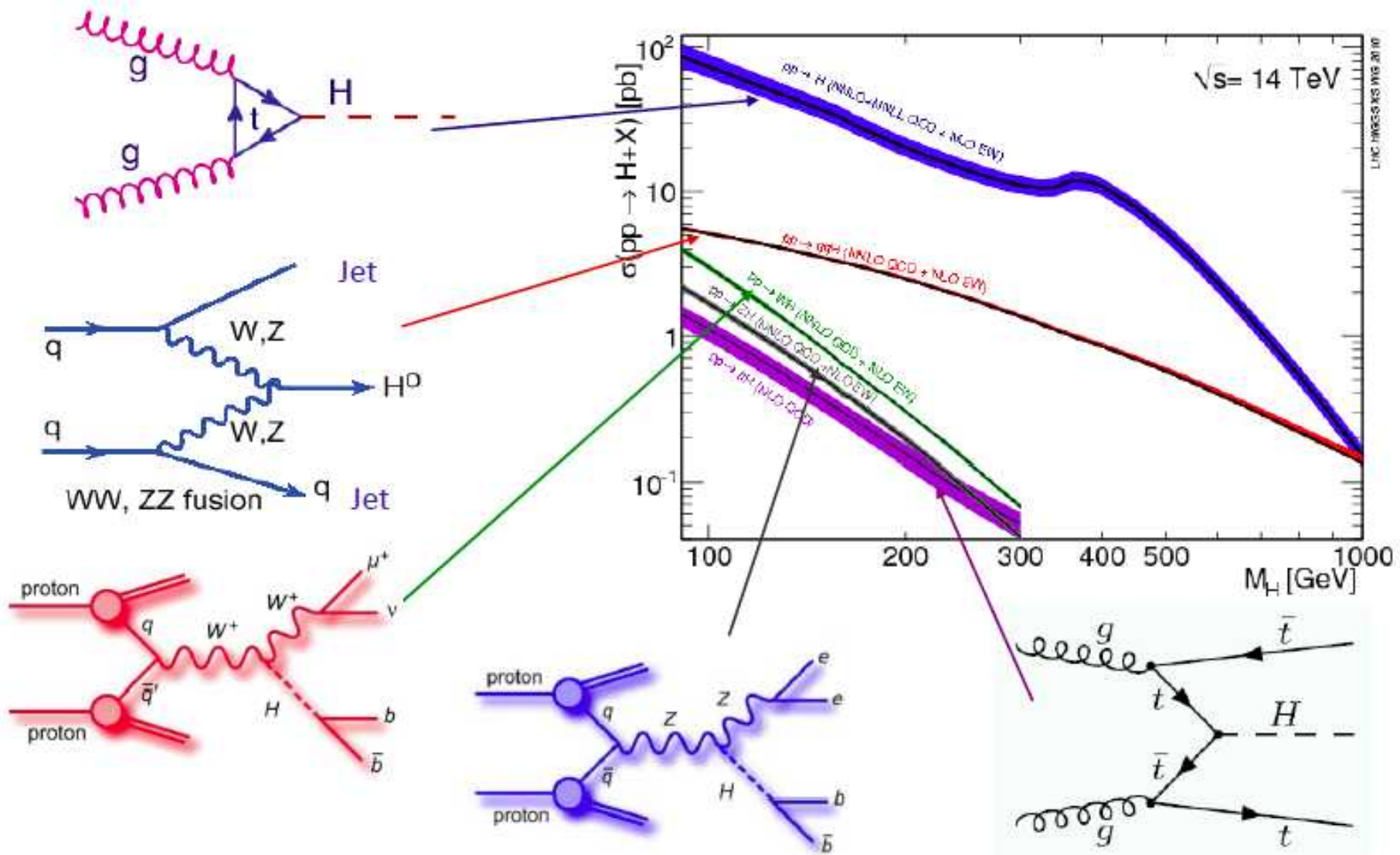
Escola de Professores do CERN 2014

Mass scale [TeV]

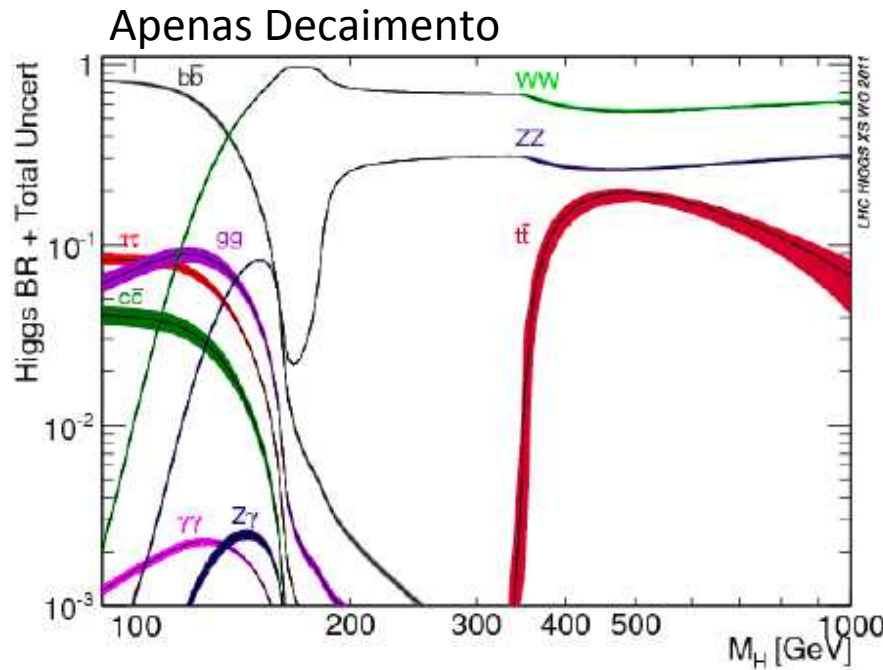
86

Higgs!

Modos de produção do bóson de Higgs

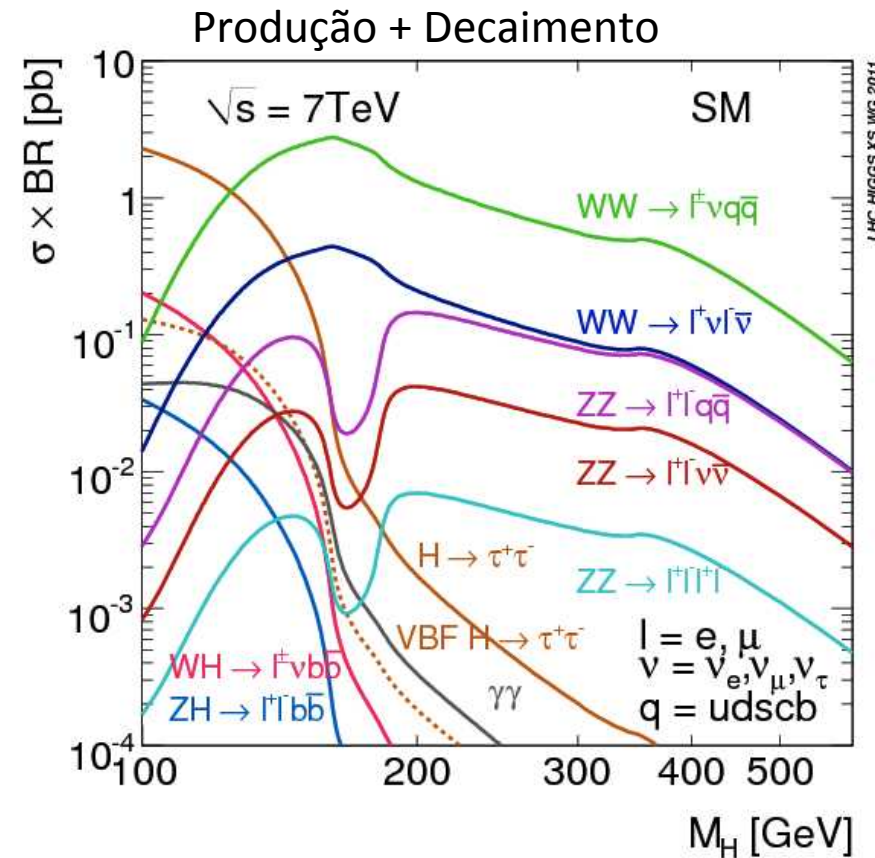


Produção e decaimento do Higgs



Modos principais

- Massa elevada: WW, ZZ
- Massa baixa: $\gamma\gamma$, bb, $\tau\tau$, WW, ZZ
- Melhor resolução: $\gamma\gamma$, ZZ



Os modos (canais) mais intensos podem não ser os mais fáceis, devido ao ruído de fundo (outros processos com o mesmo padrão).

Detectar partículas instáveis



■ Antes

- $E_{\text{tot}} = M_H c^2$
 ◦ M_H = massa do Higgs

■ Depois

- $E_{\text{tot}} = E_1 + E_2$
- $E_1 = E_2 = \frac{1}{2} M_H c^2$

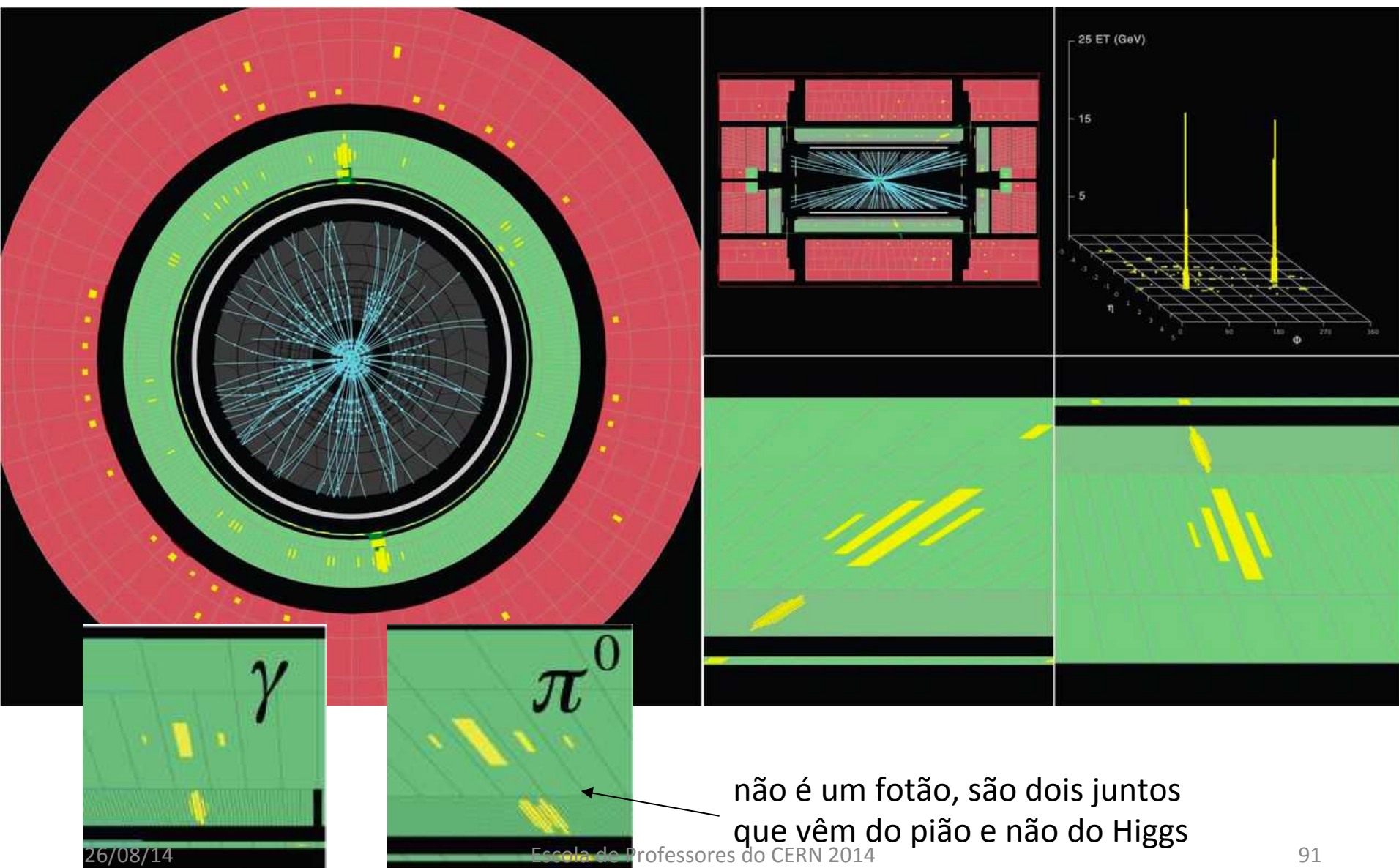


Na prática é mais complicado porque o bóson de Higgs está em movimento, mas o princípio é o mesmo

$$M^2 = (E_1 + E_2)^2 - (\vec{p}_1 + \vec{p}_2)^2$$

Massa invariante do estado final dá-nos a massa da partícula que decaiu

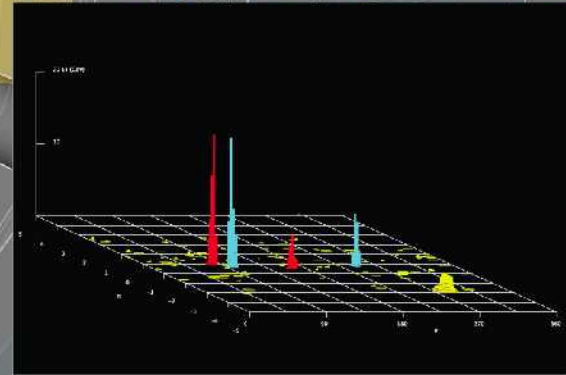
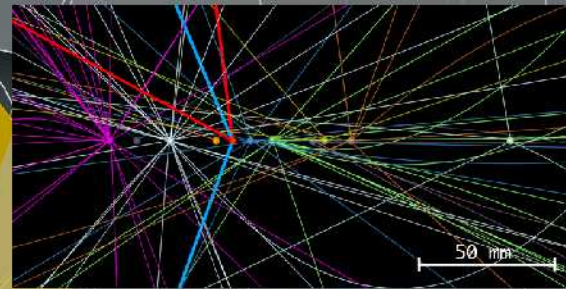
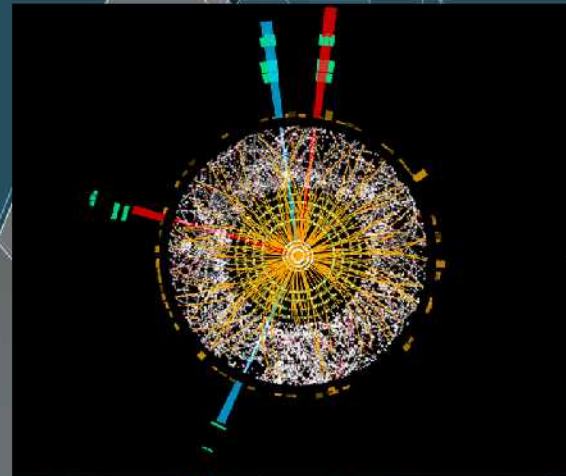
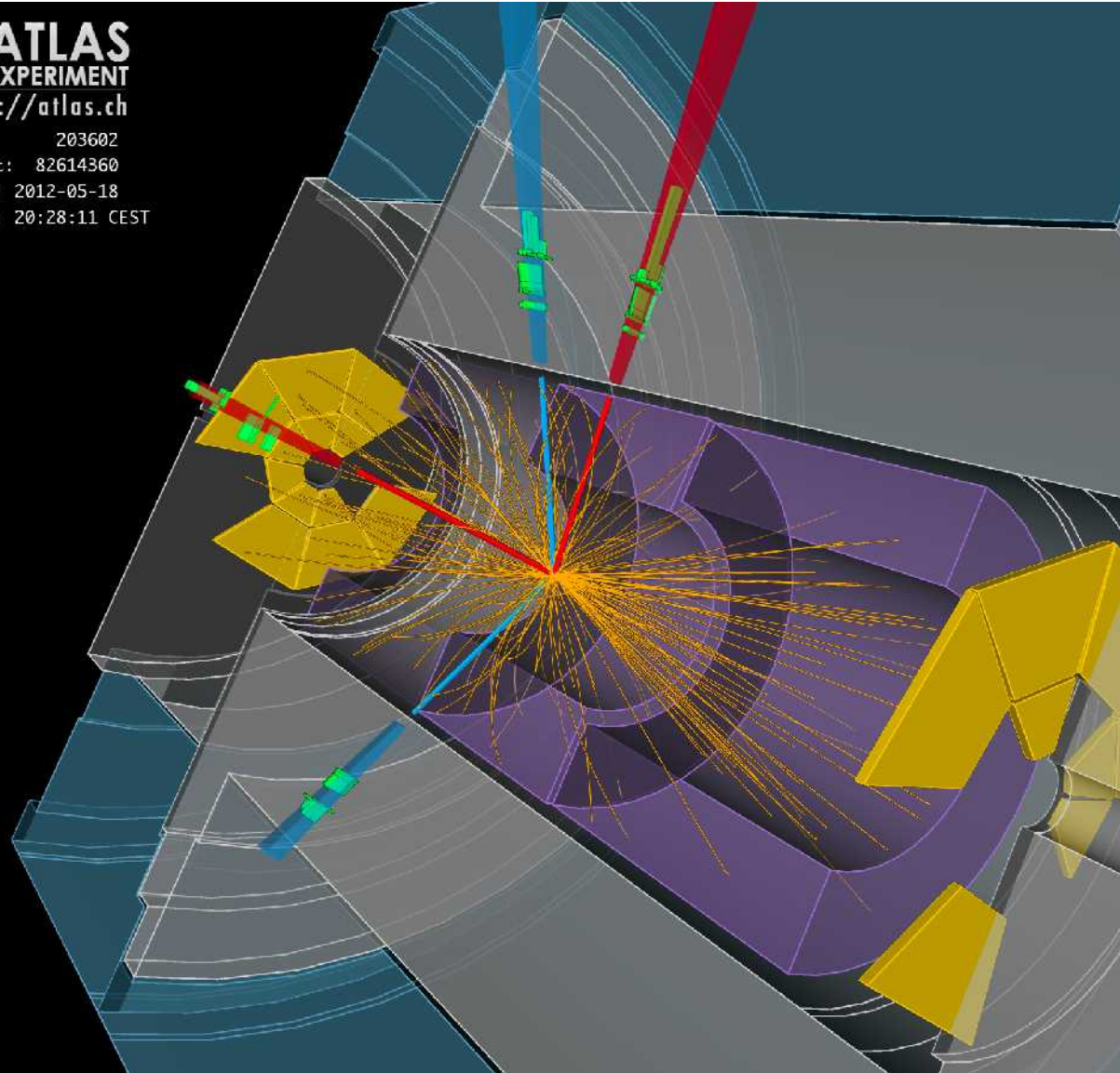
$$M^2(\gamma\gamma) = 2 E_1 E_2 (1 - \cos \alpha)$$



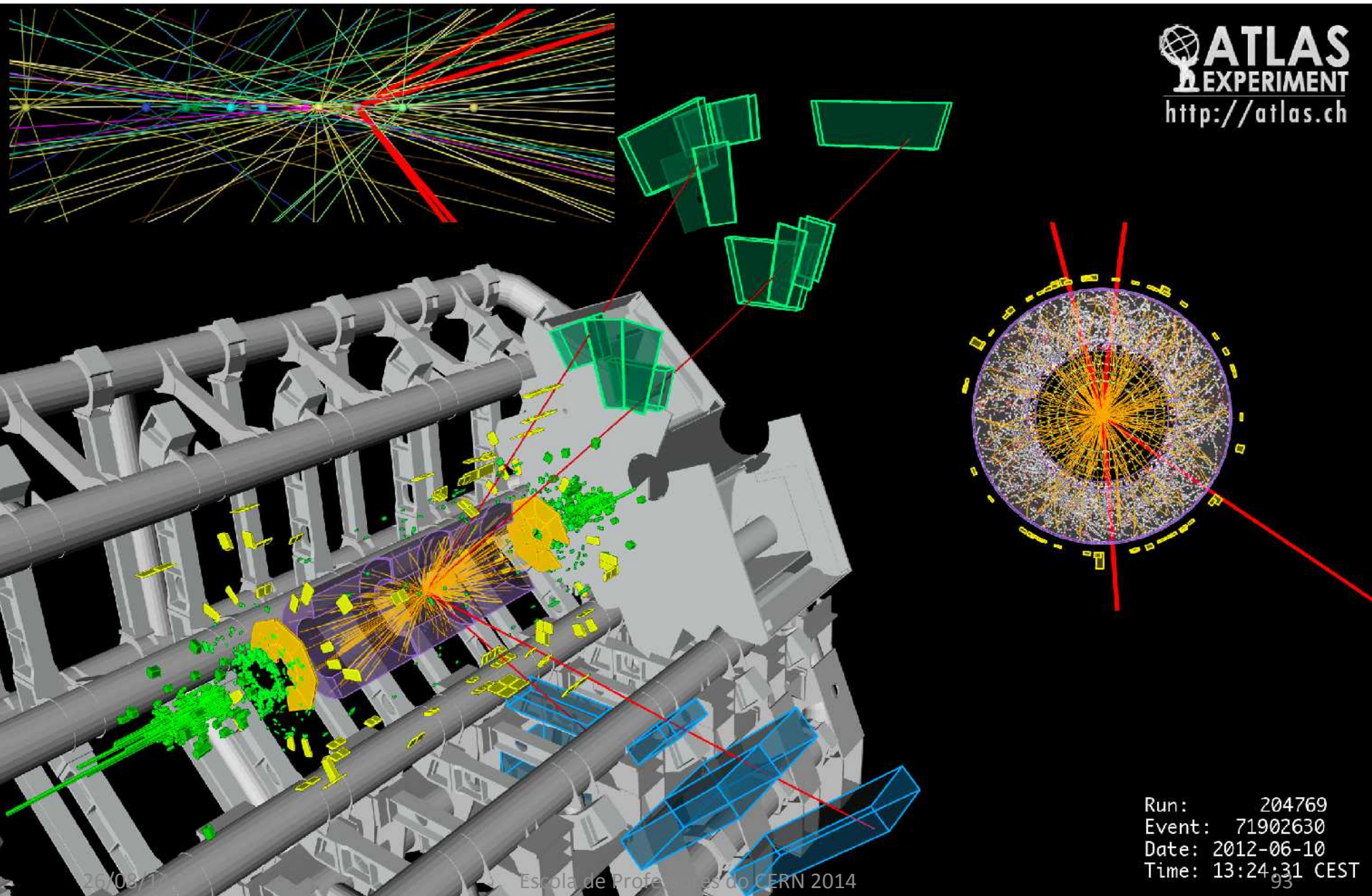
Higgs $\rightarrow$ $2Z \rightarrow 4e$

ATLAS
EXPERIMENT
<http://atlas.ch>

Run: 203602
Event: 82614360
Date: 2012-05-18
Time: 20:28:11 CEST

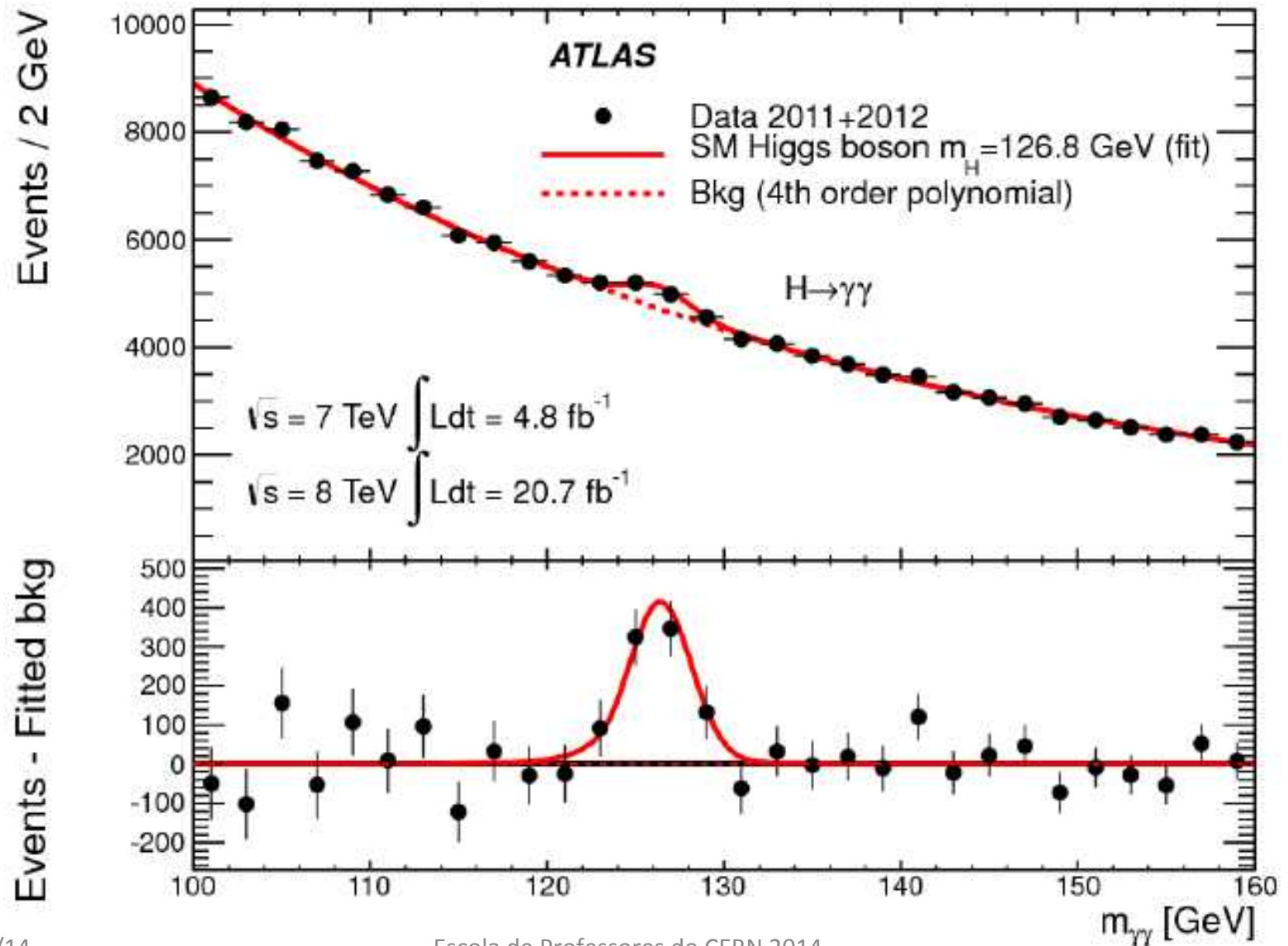


Higgs $\rightarrow$ $2Z \rightarrow 4\mu$



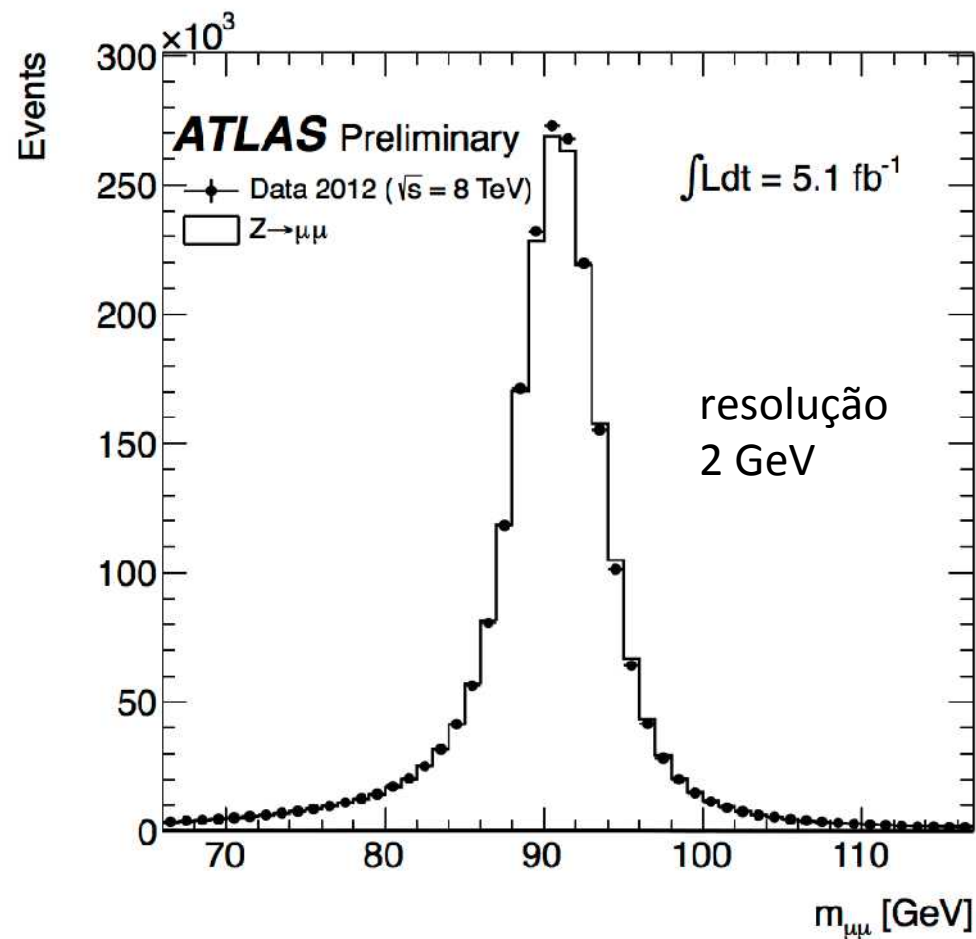


Espectro de massa dois fotões

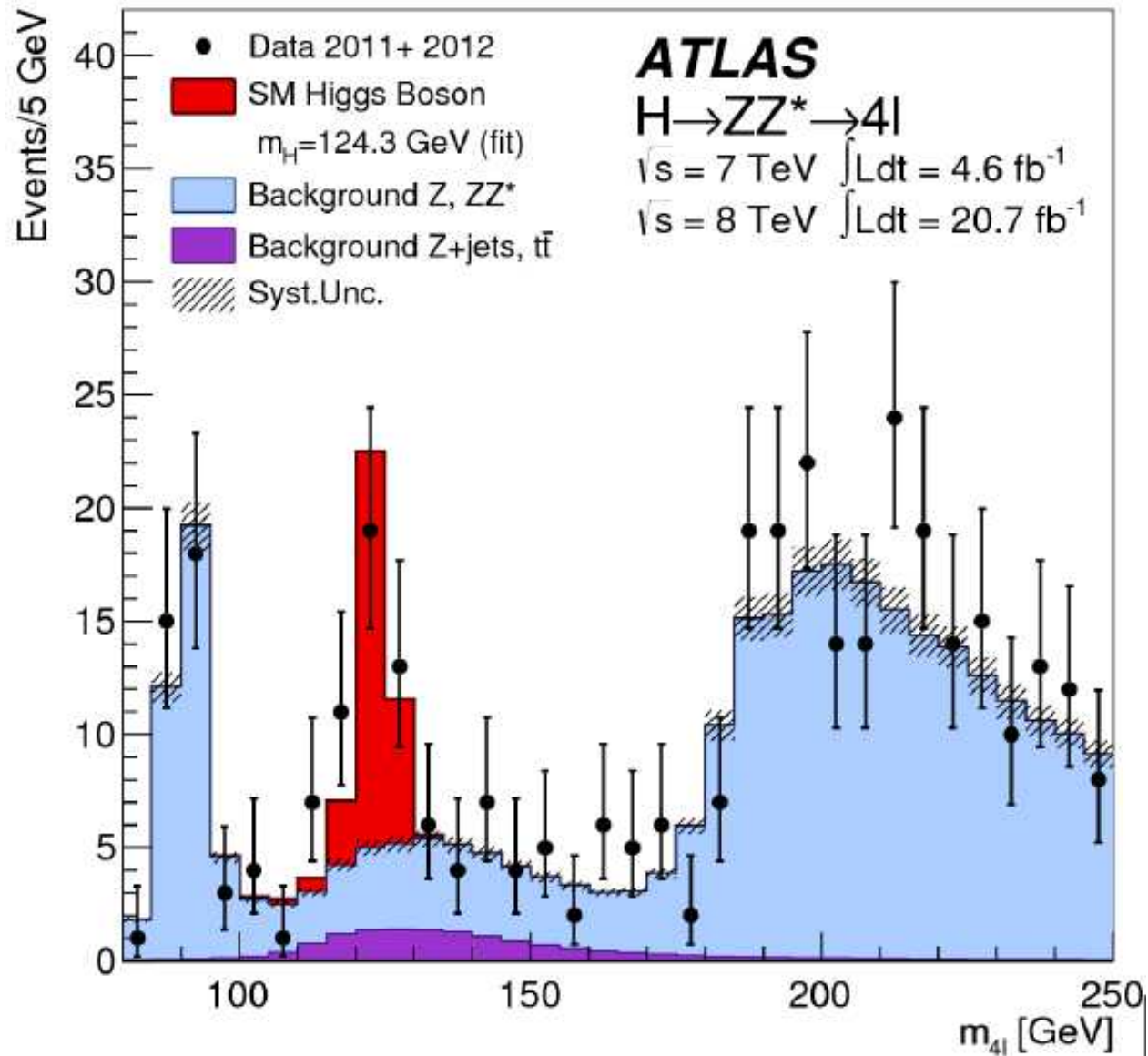


Controlo: espectro de massa 2 muões

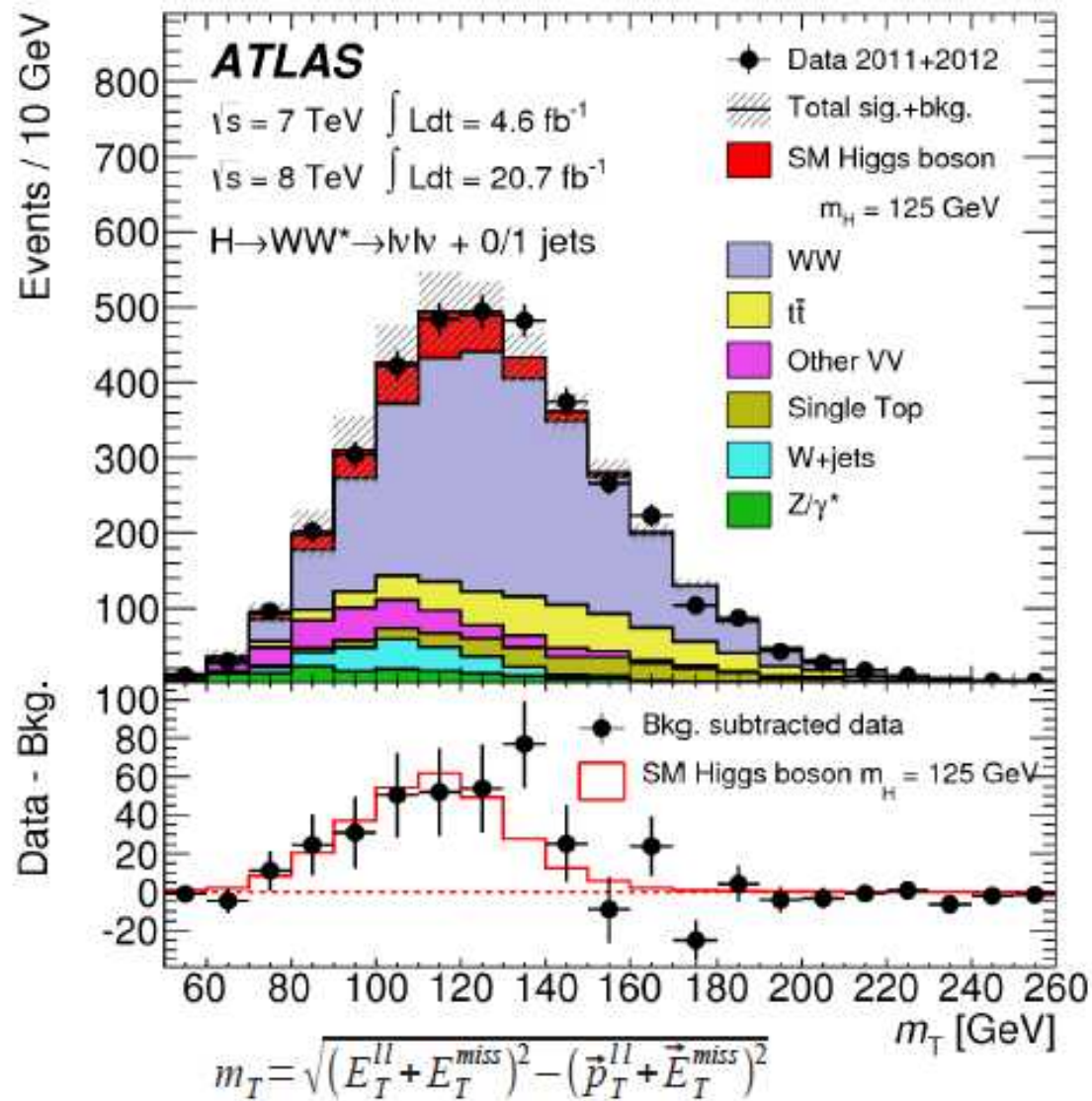
Antes de ver o Higgs, temos de ver bem o Z, já conhecido



Espectro de massa 4 léptões

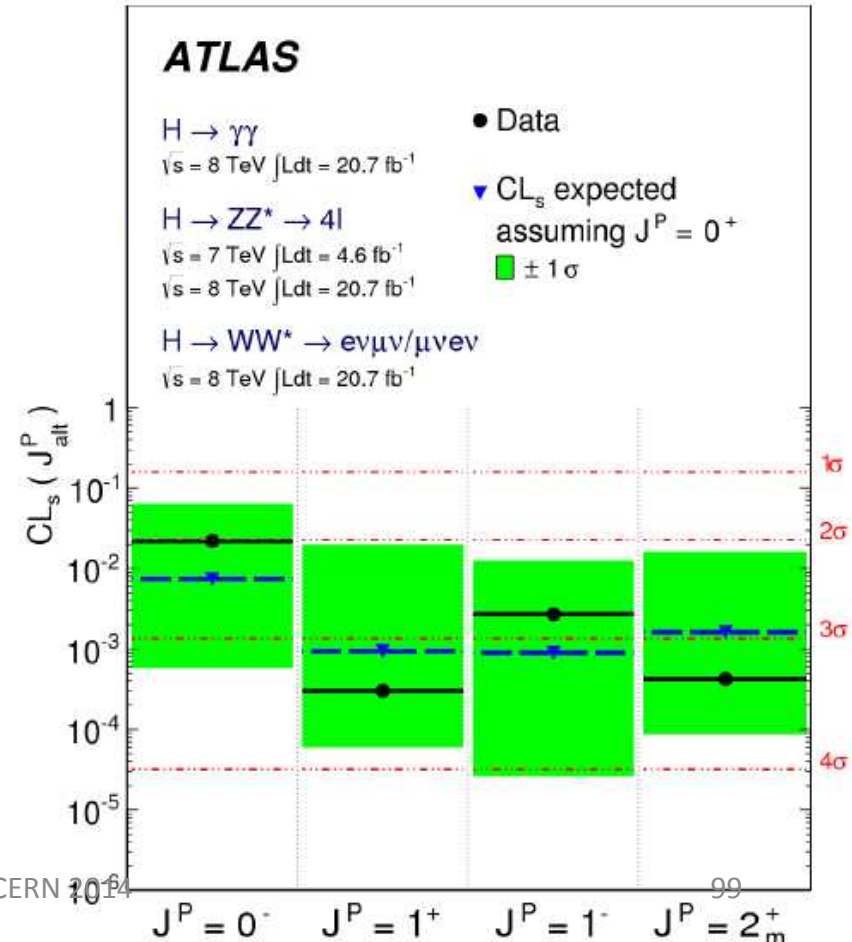
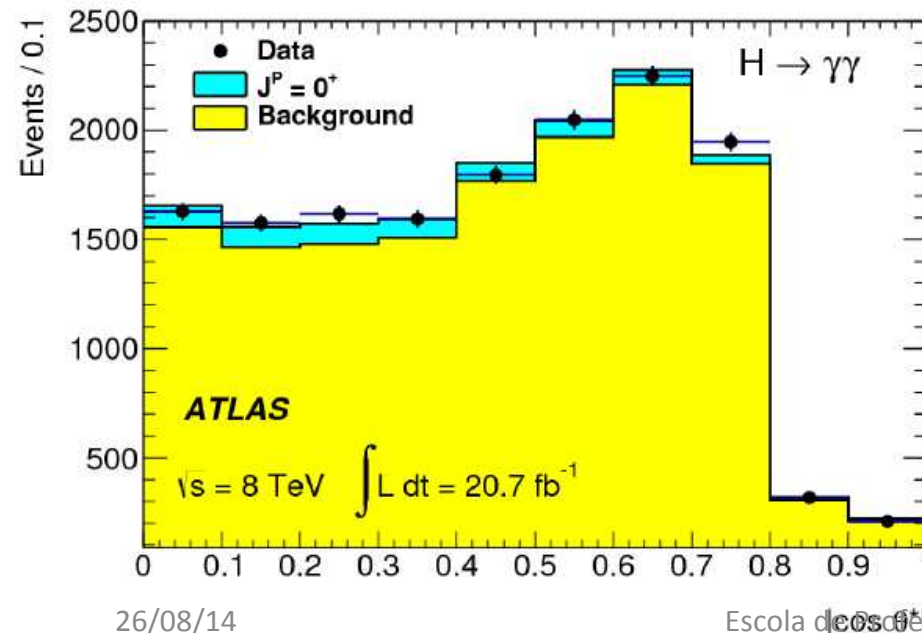
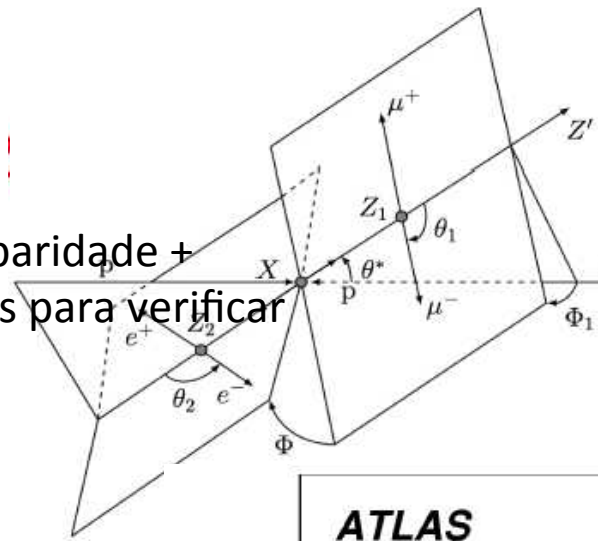


Massa transversa $H \rightarrow WW$



Spin e paridade

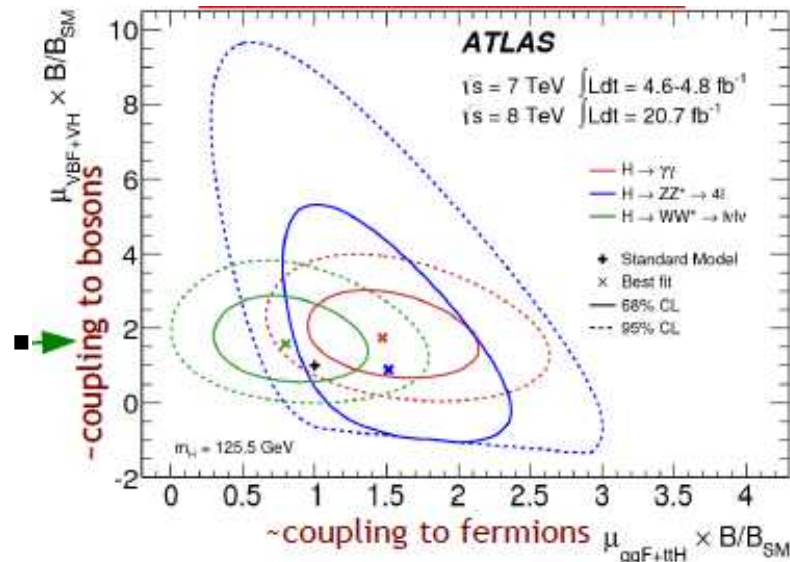
- Higgs do Modelo Padrão tem spin 0 e paridade +
- Usamos as distribuições angulares para verificar



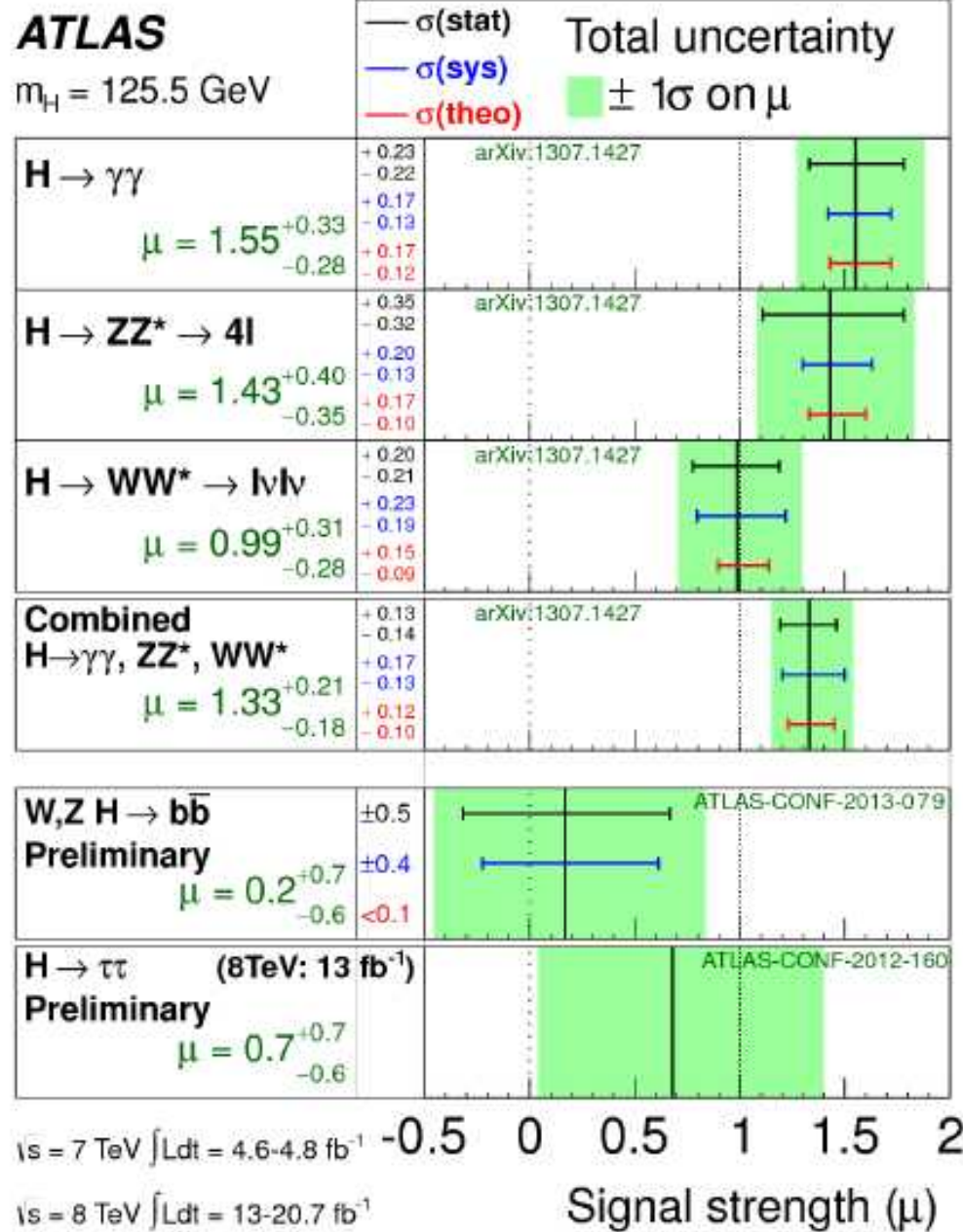
É o Higgs !

Quais as propriedades ?

- spin 0+
- massa 125.5 GeV
- acoplamentos previstos pelo Modelo l



≈ S



Razão μ = dados / teoria