

A física de partículas, a experiência ATLAS e mais umas coisas...

Ricardo Gonçalo, Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas (LIP)
Masterclass Internacional de Física de Partículas – IST, 19 de Março de 2016
Com vários slides roubados ao Pedro Abreu! (Obrigado! Pedro!) 

Sumário

- Prólogo: Para quê estudar física
- Introdução à Física de partículas
- O acelerador LHC e experiência ATLAS
 - Participação Portuguesa
- Alguns resultados de Física de ATLAS

preâmbulo:

Prólogo: para quê estudar Física ?!

O Problema:



A Solução ?



Não era bem isto...



Oops!... E agora ?



Bom, vamos lá a ver agora...



Parece que desta foi...

$$a P > A p$$

Moral da história: Física tem um papel crucial no dia-a-dia!



Introdução à física de partículas



Descrição do Universo: Egípcios (Nut Deusa dos Céus), ~2000 a.C.



21/03/16

SOMOS FEITOS DE QUÊ ?!

Thales de Mileto, séc.VII a.C.: tudo é água!

Empédocles, séc.V a.C.: os 4 elementos!

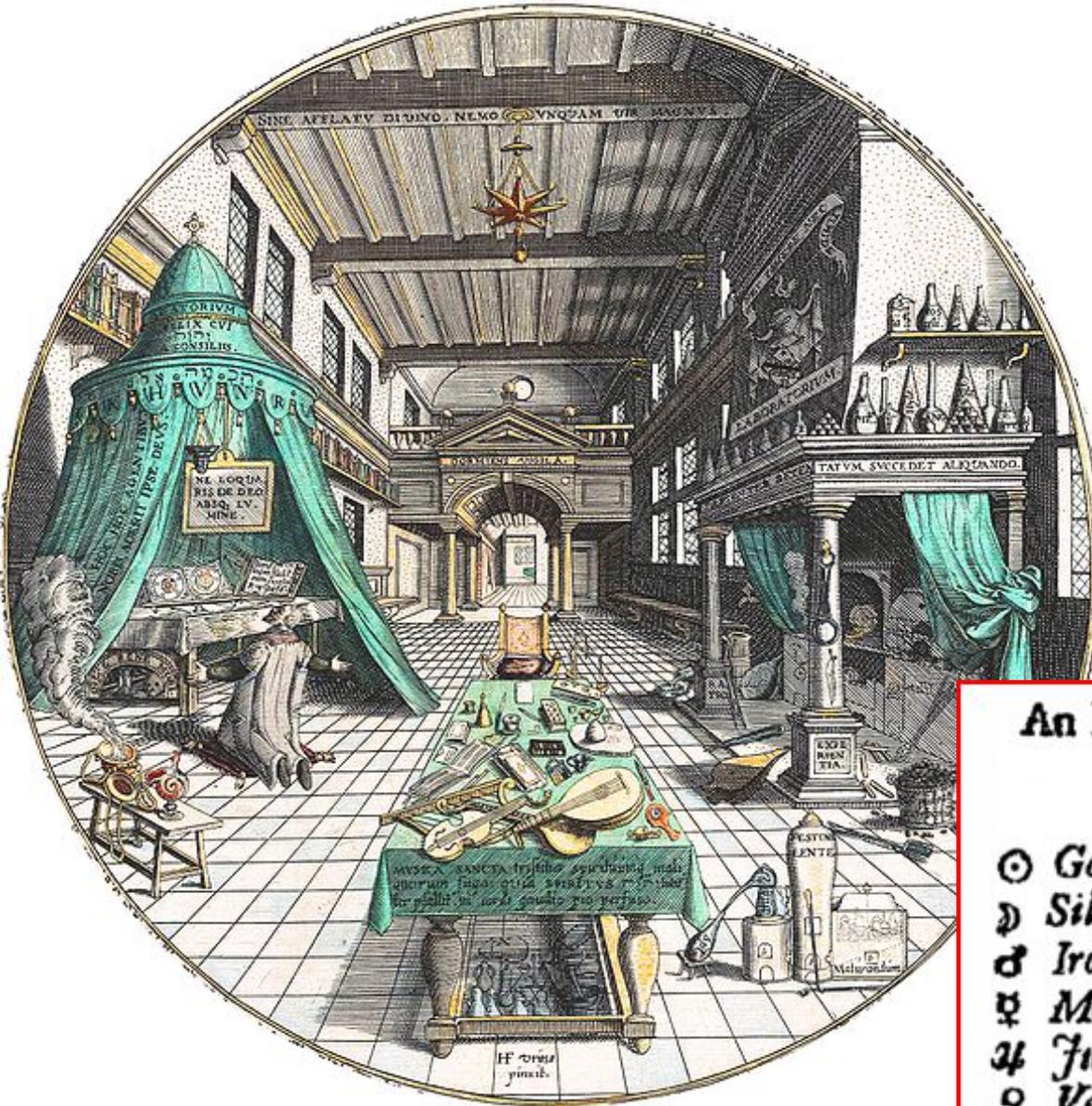


+a quintessência
(referida por Aristóteles
no séc.III a.C.)

+A-Tomos
(Leucipo e Demócrito,
séc. V a.C.)

Idade média, Europa: EXPERIMENTAÇÃO!

Laboratório de Alquimista



An Explication of the Characters which
are used in this Book.

☉ Gold.	A. F. <i>Aqua Fortis.</i>
☽ Silver.	A. R. <i>Aqua Regis.</i>
♂ Iron.	S. V. <i>Spirit of Wine.</i>
♀ Mercury.	☉ Sublimate,
♃ Jupiter.	☾ Precipitata.
♀ Venus.	☉☉☉ Amalgama.
♁ Lead.	▽ Water.
♁ Antimony.	△ Fire,
* Sal armoniac.	

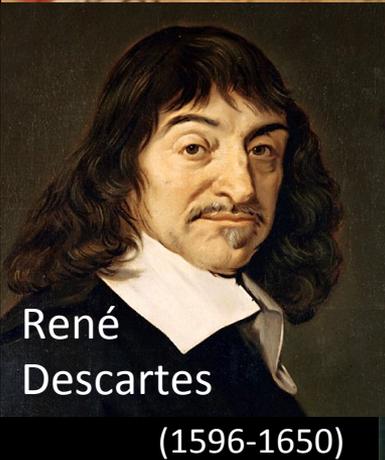
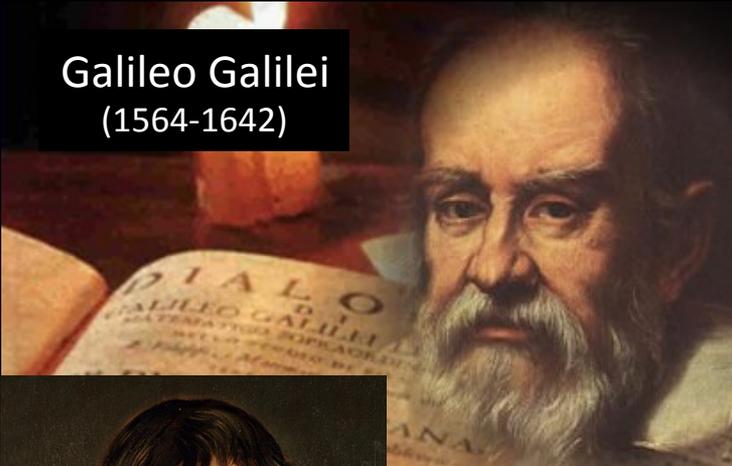
Idade moderna, Europa: EXPERIMENTAÇÃO \rightleftharpoons TEORIA!



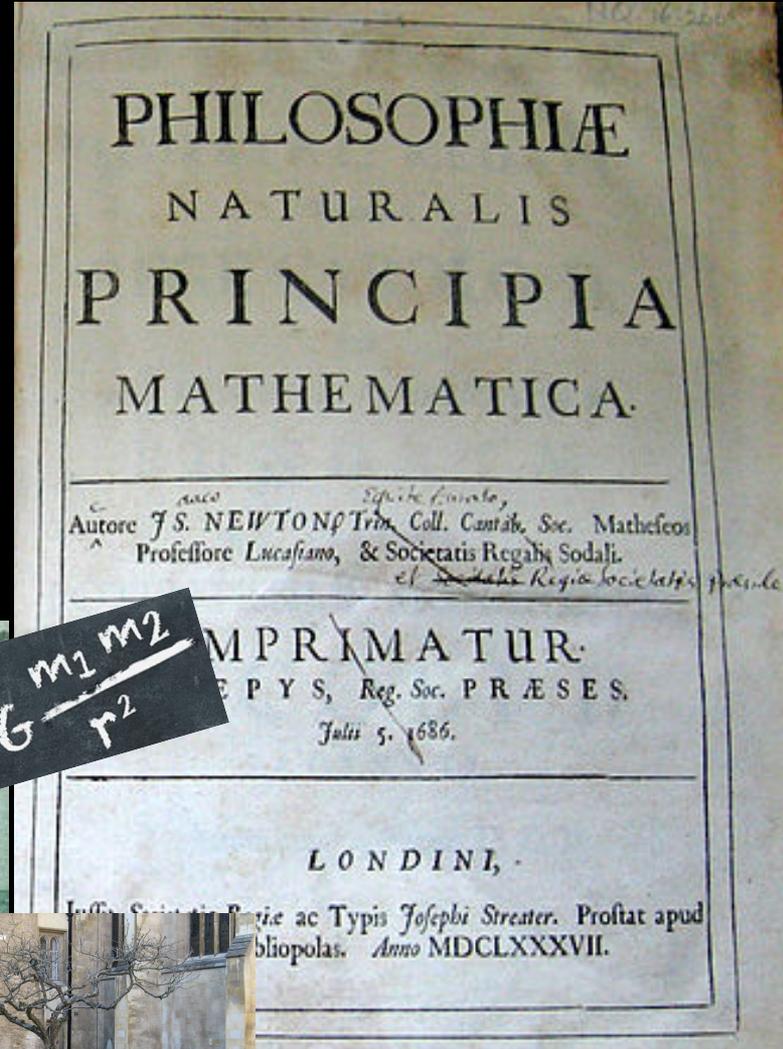
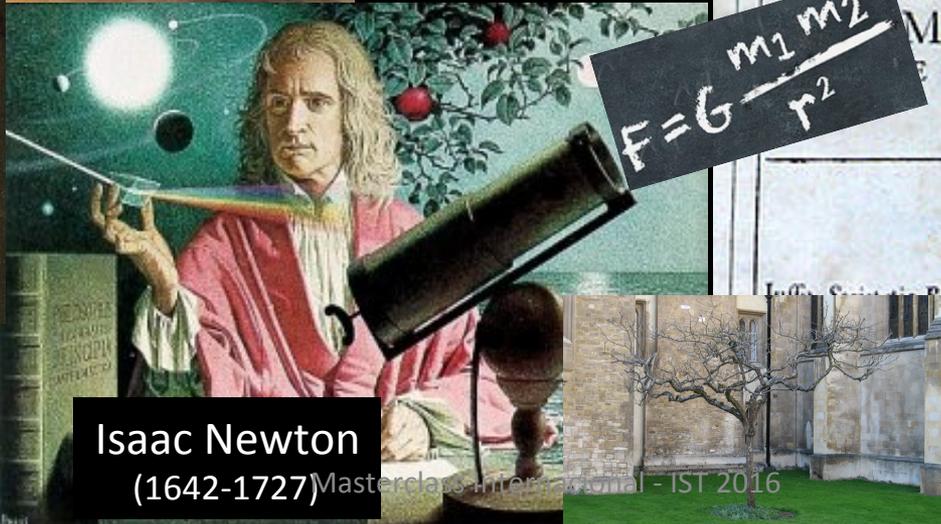
Física!:

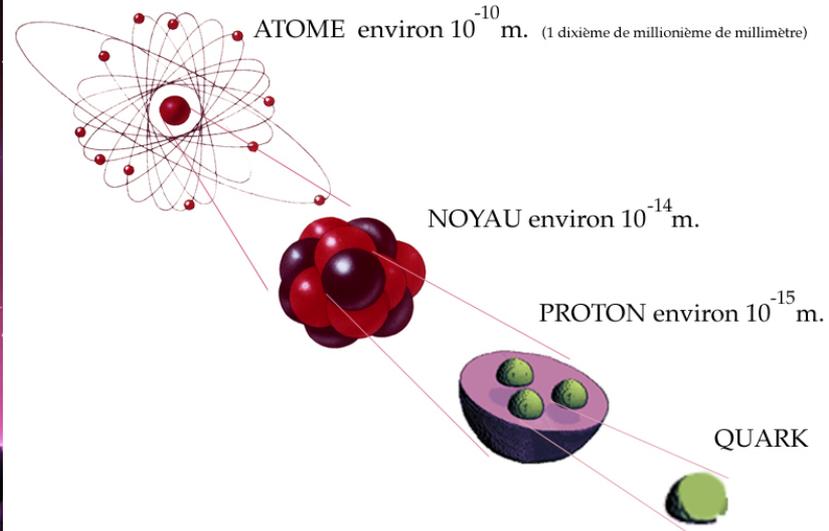
Princípios
Matemáticos
da Filosofia
da Natureza!

Galileo Galilei
(1564-1642)



cogito
ergo sum





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

D.Bertola/CERN



VAZIO

(99,999 999 999 9% do volume)

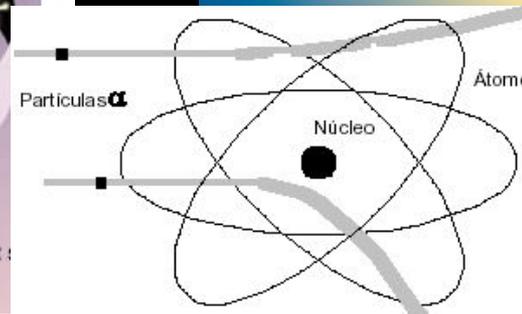
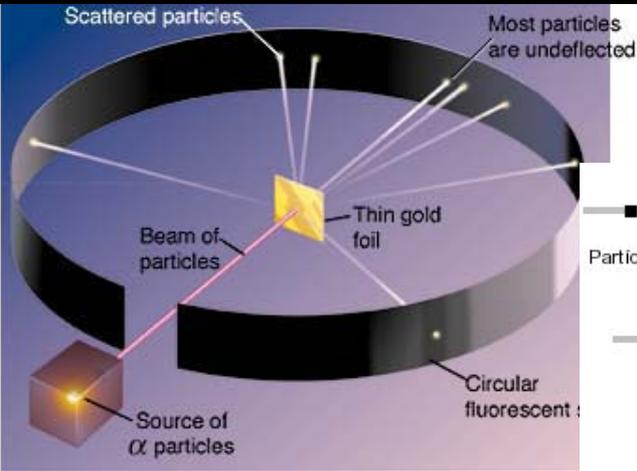
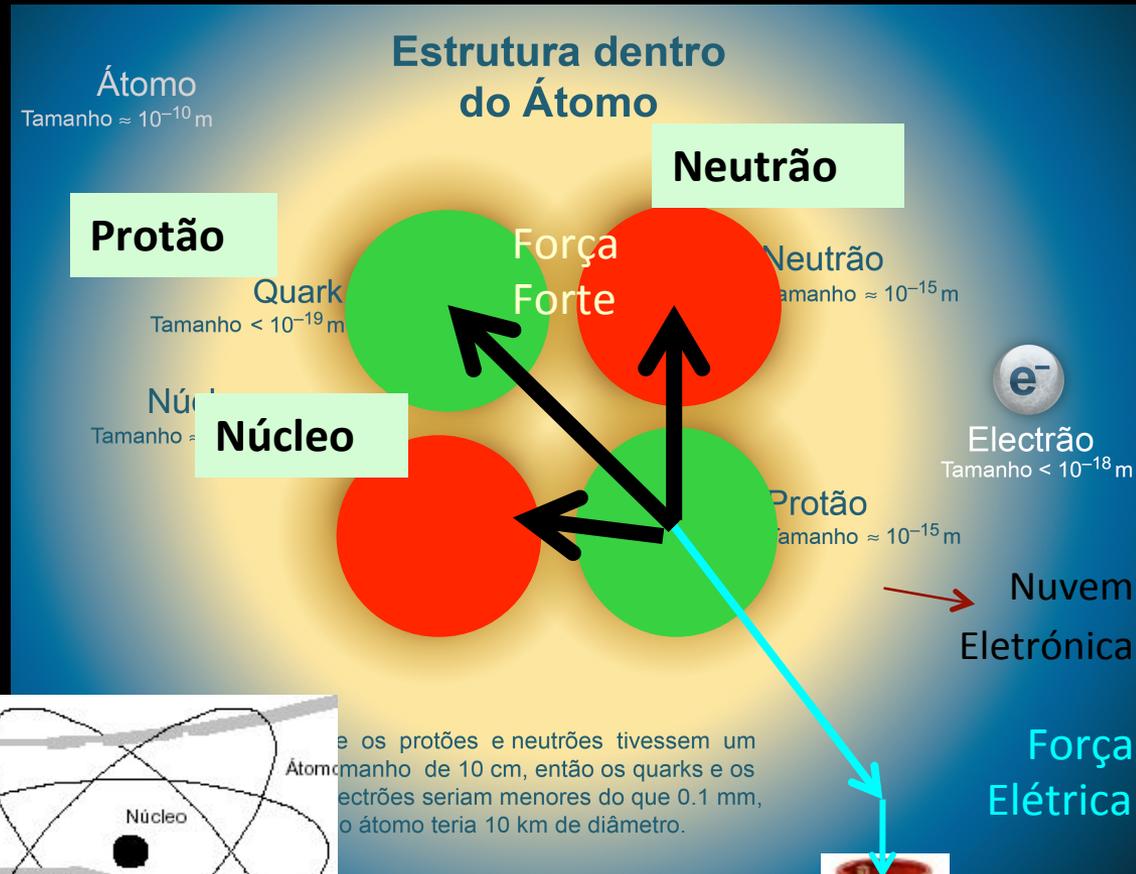
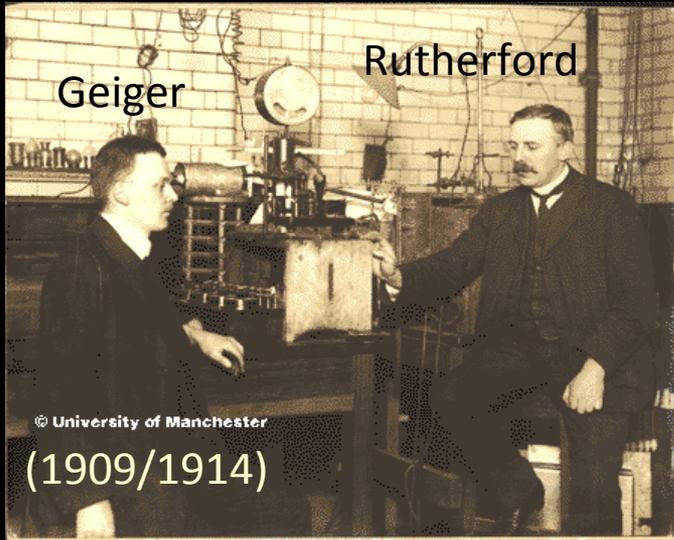
(núcleo x100)

(raio médio órbita dos electrões)

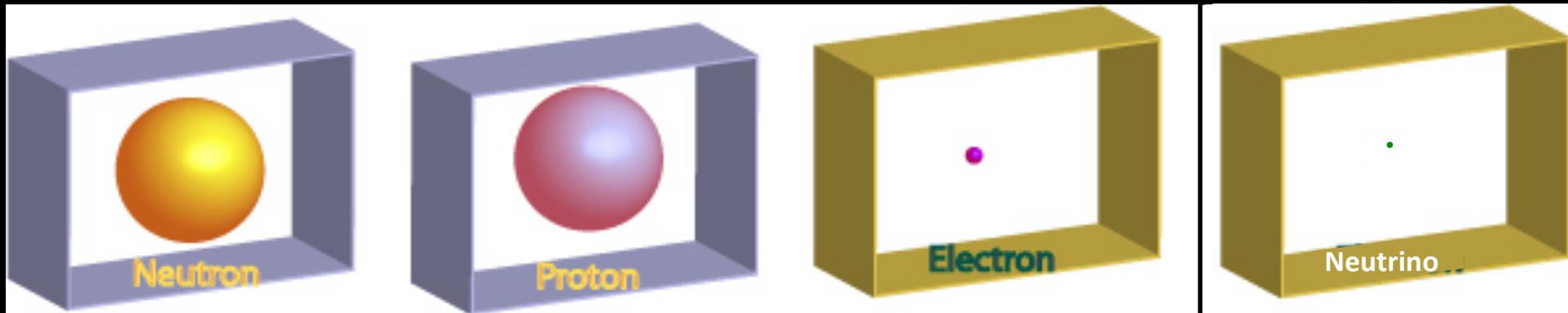


E os Núcleos ?!

Núcleos rodeados por uma nuvem eletrónica!



Espectro de Partículas Elementares (1932)



neutrão

protão

eletrão

[neutrino]

**Simple, fácil de fixar
Ainda ensinado nas Escolas**

Mas... 100 anos depois: outra vez muitas novas partículas!

Jardim Zoológico

Anos 1950's

Com novos aceleradores e detectores, o "Zoo das Partículas" tem mais de ~ 200 'partículas elementares'!

HADRÕES

π^+ π^- π^0

Pions

K^+ K^- K^0

η'

Eta-Prime

η

Eta

Kaons

ϕ

Phi

ρ^+ ρ^- ρ^0

Rho

(todas instáveis)

MESÕES

Δ^{++} , Δ^+ , Δ^0 , Δ^- p , n
Delta protão, neutrão

Delta

Λ^0

Lambda (estranho!)

Σ^+ , Σ^0 , Σ^-

Sigma (estranho!)

Ξ^0 , Ξ^-

Xi (muito estranho!)

(decaem até ao protão)

BARIÕES

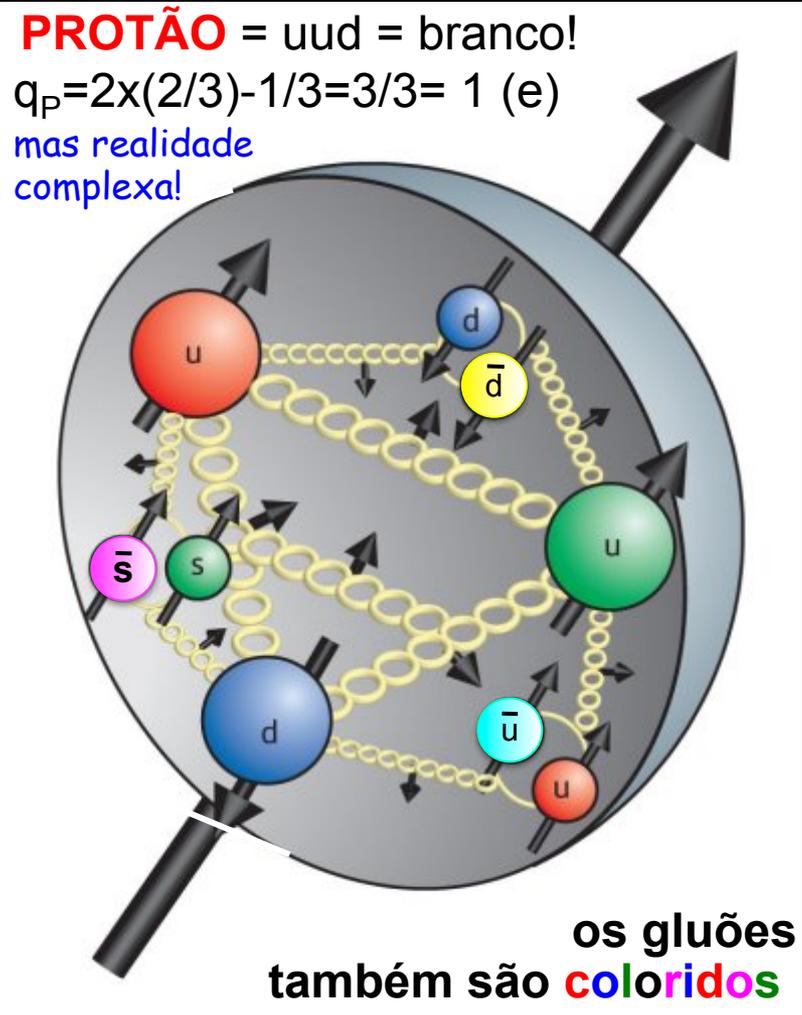
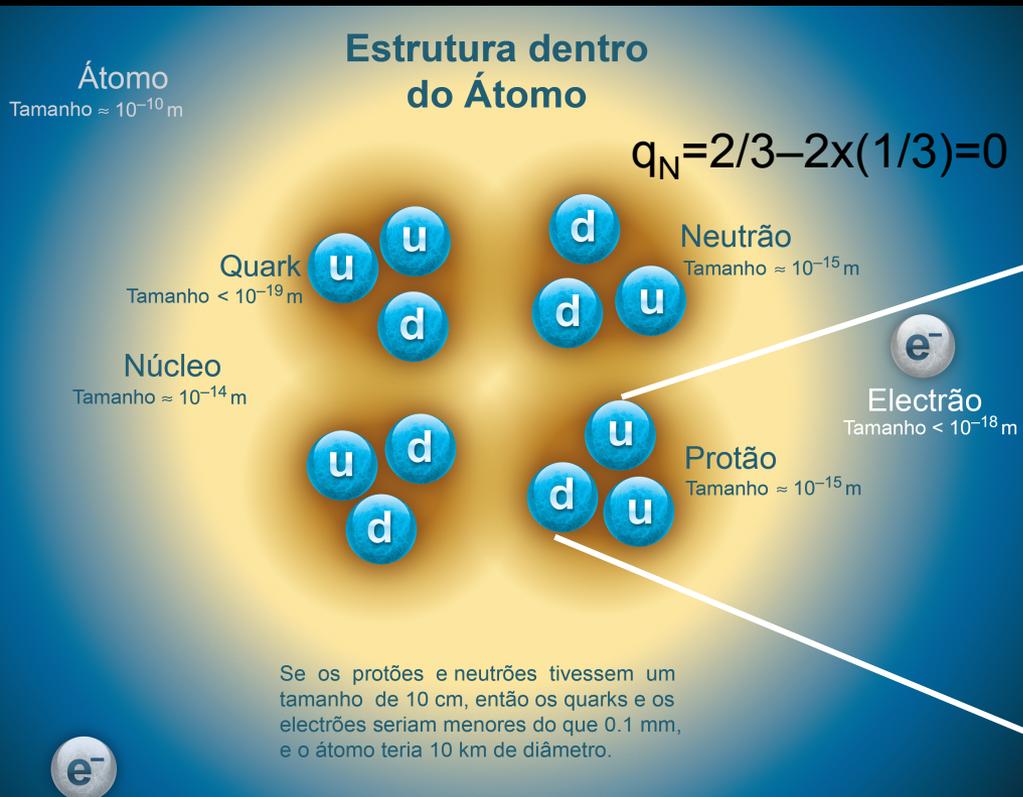
Qual a nova estrutura de base, a 'nova tabela periódica' ?

Porque é que o protão é absolutamente estável?

Quarks

Anti-Quarks Gluões

Nome Quark	Carga Eléctrica	Spin [h/(2π)]	"Cor" (r,g,b)
u (up)	+2/3 (e)	+1/2	● ● ●
d (down)	-1/3 (e)	+1/2	● ● ●



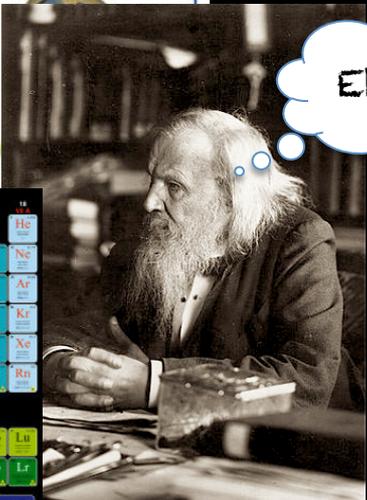
Contudo, $m_p = 0,938 \text{ GeV}/c^2 \approx 1 \text{ GeV} \gg \sum m_q$

O Modelo Padrão

<h3>Leptons</h3> <p>Electric Charge</p> <p>Tau -1 0 Tau Neutrino</p> <p>Muon -1 0 Muon Neutrino</p> <p>Electron -1 0 Electron Neutrino</p>	<h3>Strong</h3> <p>Gluons (8)</p> <p>Quarks</p> <p>Mesons Baryons</p> <p>Nuclei</p>	<h3>Electromagnetic</h3> <p>Photon</p> <p>Atoms Light Chemistry Electronics</p>
<h3>Quarks</h3> <p>Electric Charge</p> <p>Bottom $-1/3$ $2/3$ Top</p> <p>Strange $-1/3$ $2/3$ Charm</p> <p>Down $-1/3$ $2/3$ Up</p> <p>each quark: R B G 3 colours</p>	<h3>Gravitational</h3> <p>Graviton ?</p> <p>Solar Galaxy Black</p>	<h3>Weak</h3> <p>Bosons (W,Z)</p>

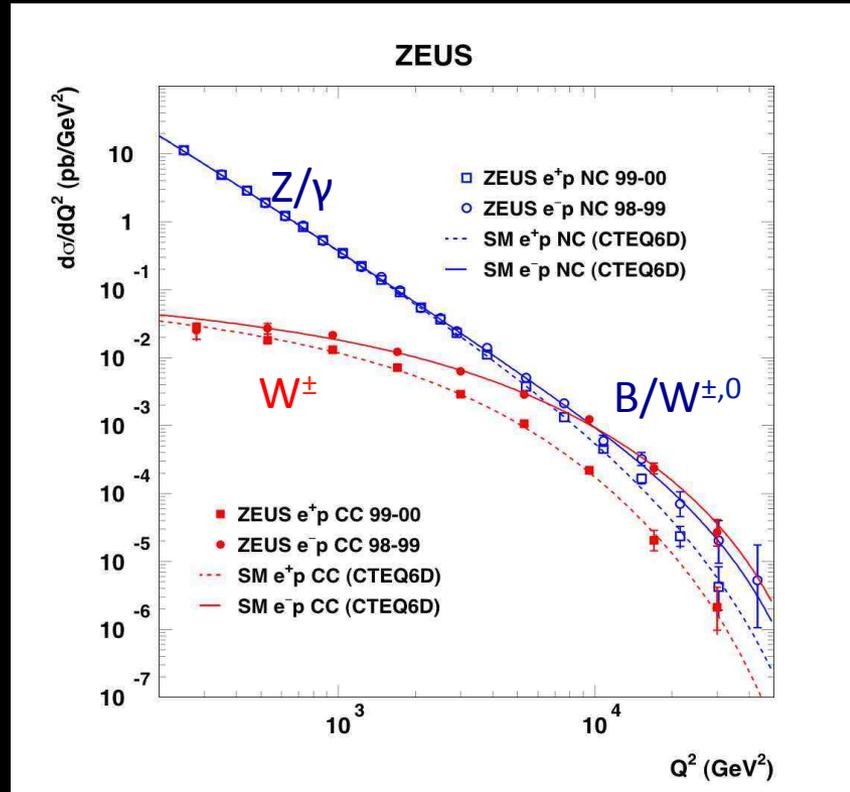
THE PERIODIC TABLE OF THE ELEMENTS

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----



O Elo que Faltava: Mecanismo de Higgs

<p>Leptons</p> <p>Electric Charge</p> <p>Tau -1 0 Tau Neutrino</p> <p>Muon -1 0 Muon Neutrino</p> <p>Electron -1 0 Electron Neutrino</p>	<p>Strong</p> <p>Gluons (8)</p> <p>Quarks</p> <p>Mesons Baryons</p> <p>Nuclei</p>	<p>Electromagnetic</p> <p>Photon</p> <p>Atoms Light Chemistry Electronics</p>
<p>Quarks</p> <p>Electric Charge</p> <p>Bottom $-1/3$ $2/3$ Top</p> <p>Strange $-1/3$ $2/3$ Charm</p> <p>Down $-1/3$ $2/3$ Up</p> <p>each quark: R, B, G 3 colours</p>	<p>Gravitational</p> <p>Graviton ?</p> <p>Solar system Galaxies Black holes</p>	<p>Weak</p> <p>Bosons (W,Z)</p> <p>Neutron decay Beta radioactivity Neutrino interactions Burning of the sun</p>



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

Transverse: photon-like

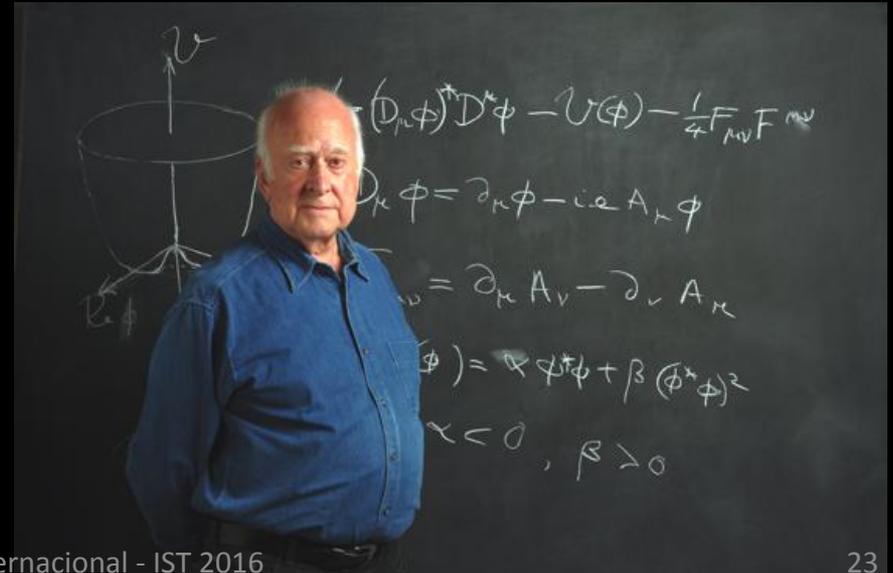
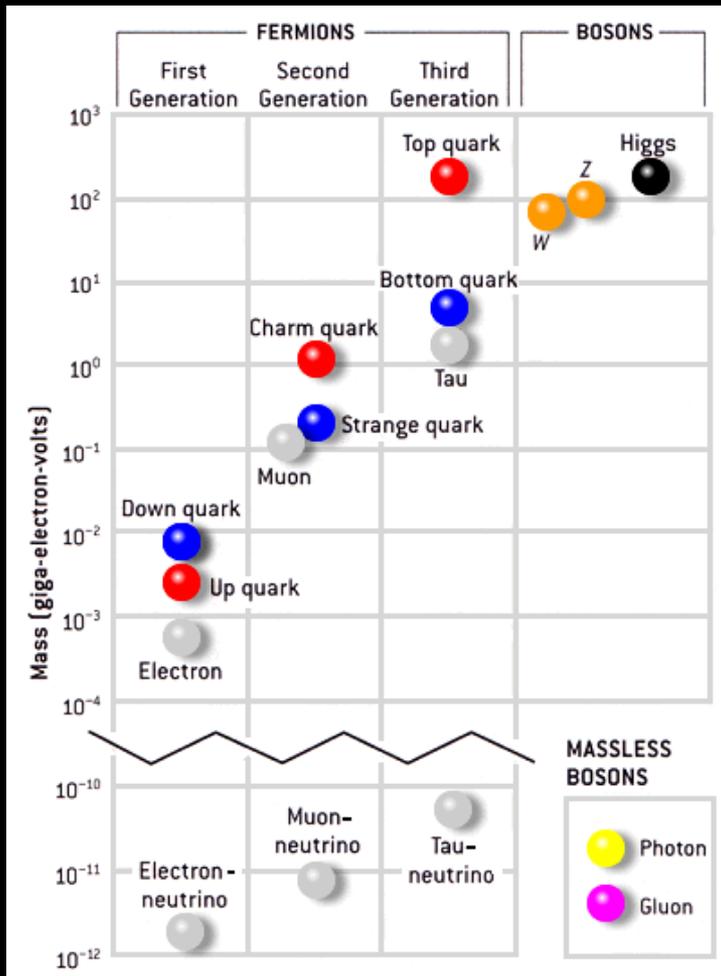
$$\epsilon_+^\mu = \frac{1}{\sqrt{2}}(0, 1, i, 0)$$

Transverse: photon-like

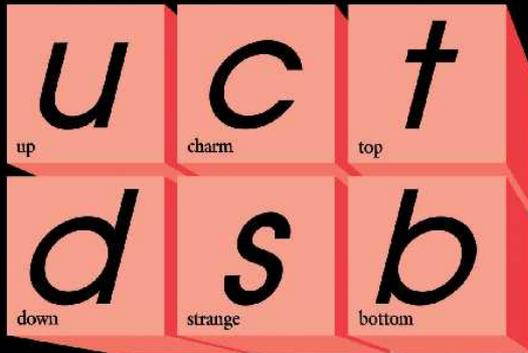
$$\epsilon_L^\mu = \frac{1}{m}(p_z, 0, 0, E)$$

Longitudinal

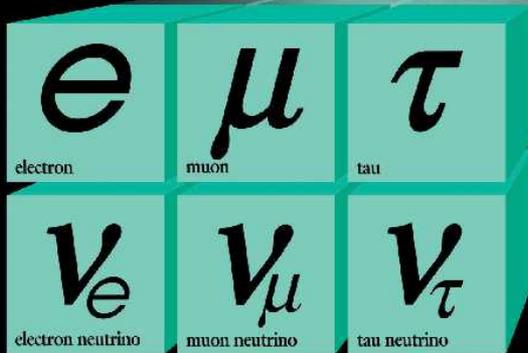
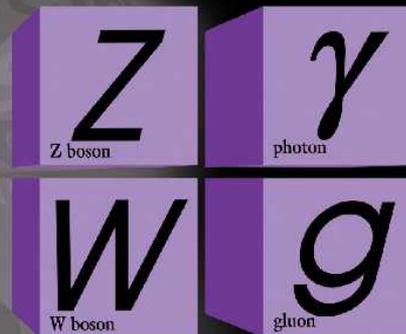
O Elo que Faltava: Mecanismo de Higgs



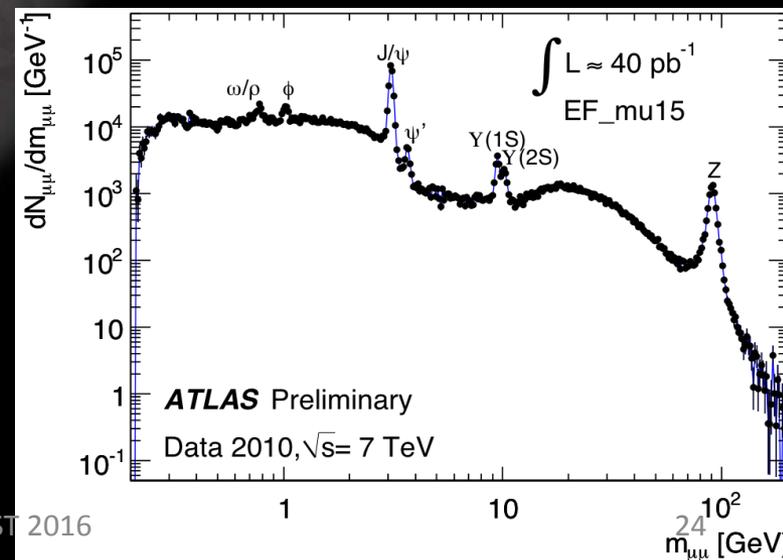
Quarks



Forces

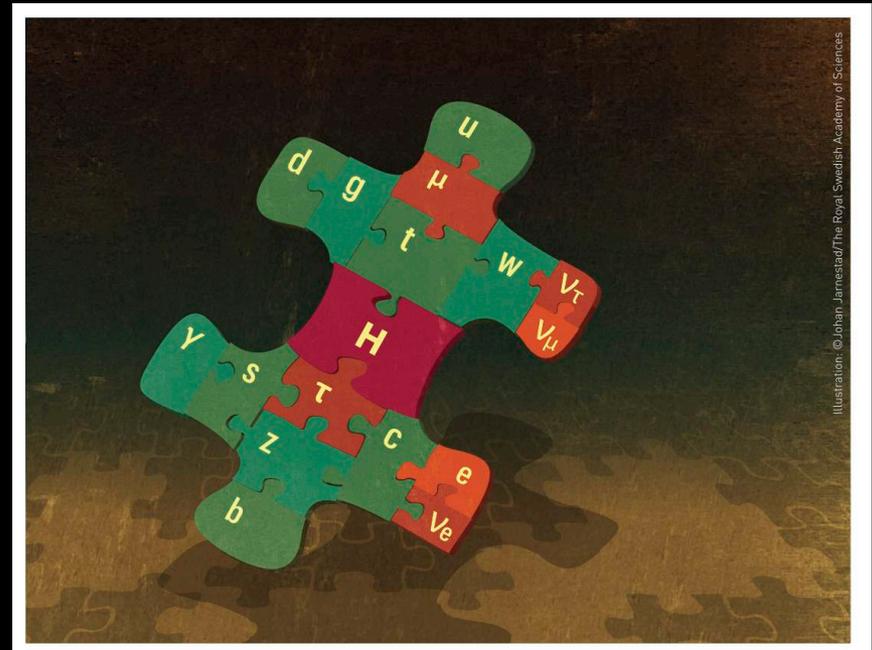
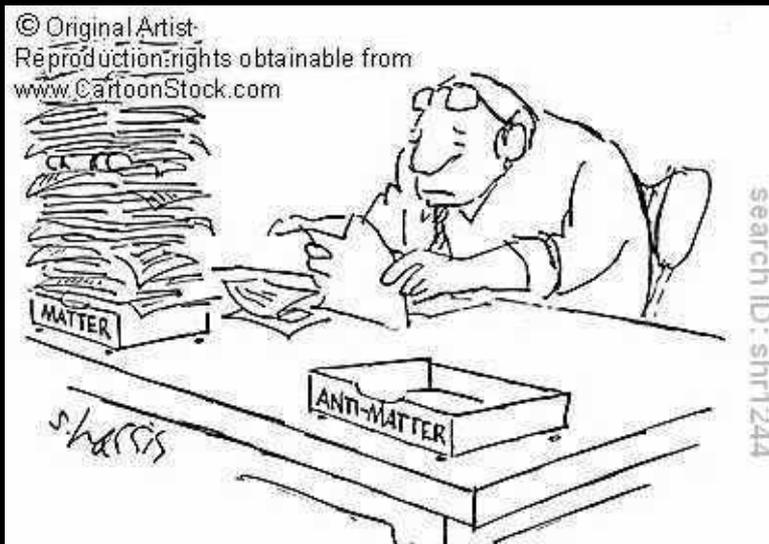


Leptons



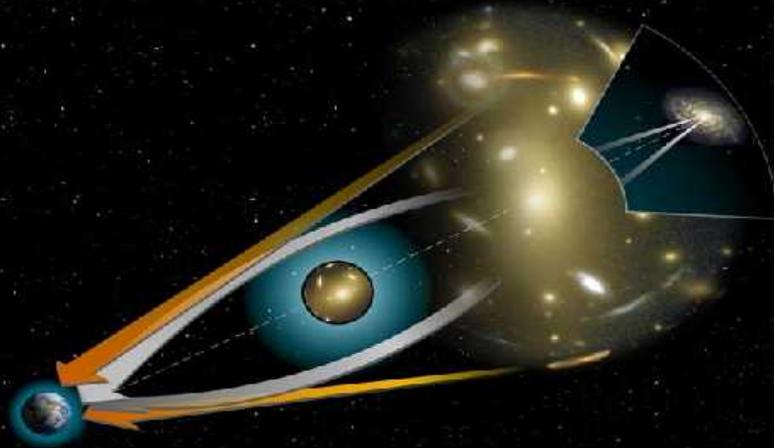
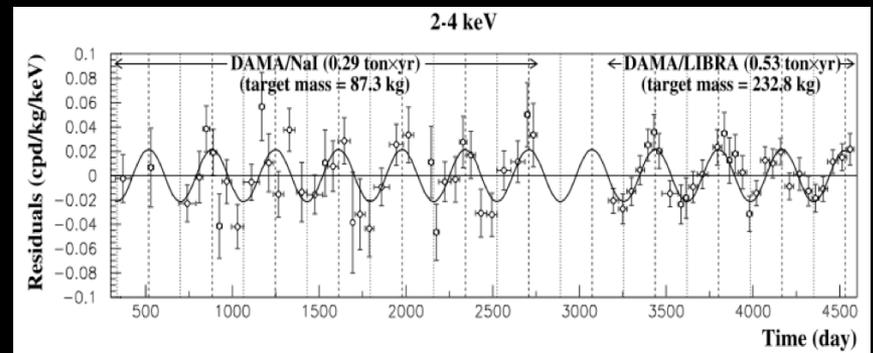
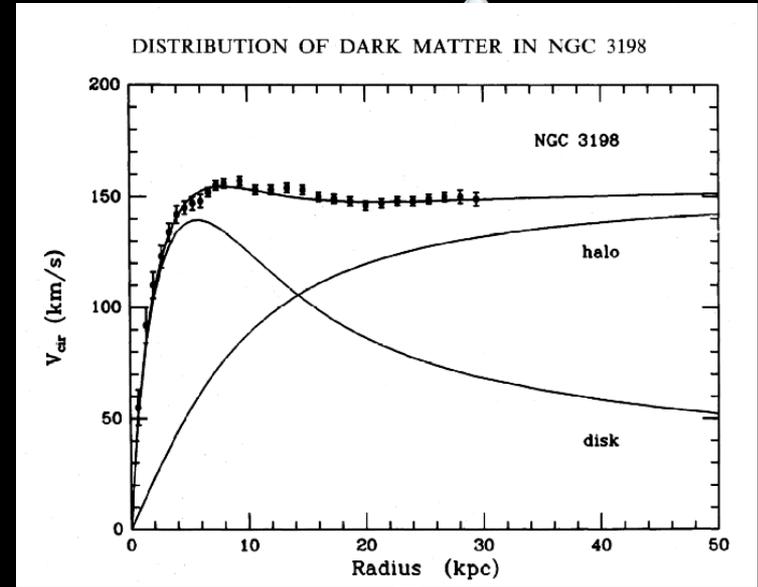
E agora?...

- O Modelo Standard NÃO pode ser o puzzle completo!
- Há uma dinâmica subjacente ao mecanismo de Higgs?
- Porque é que a força das interacções 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

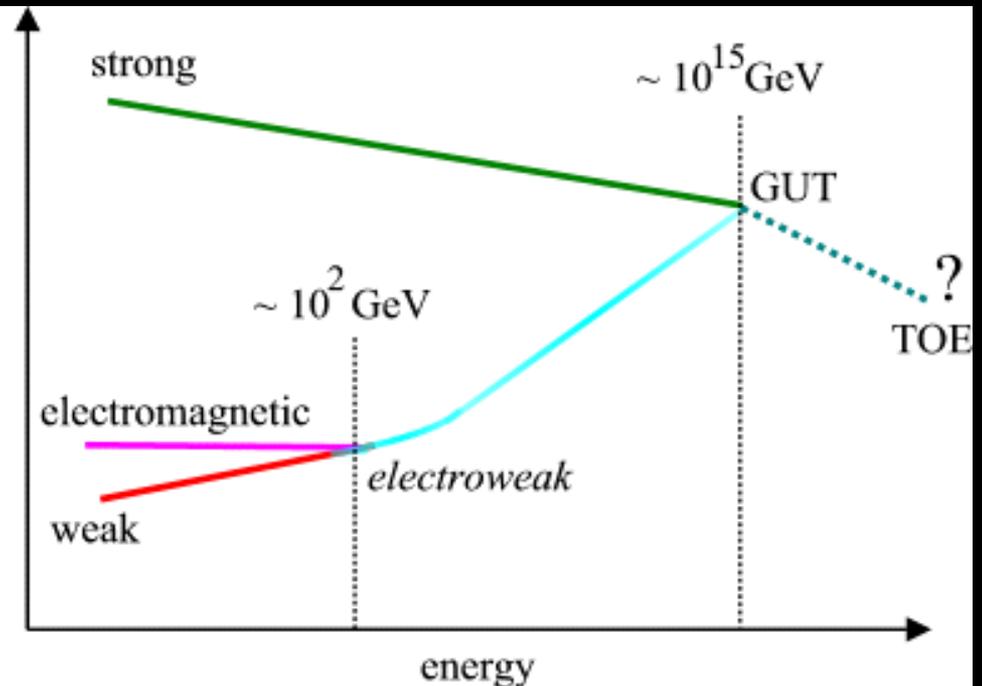
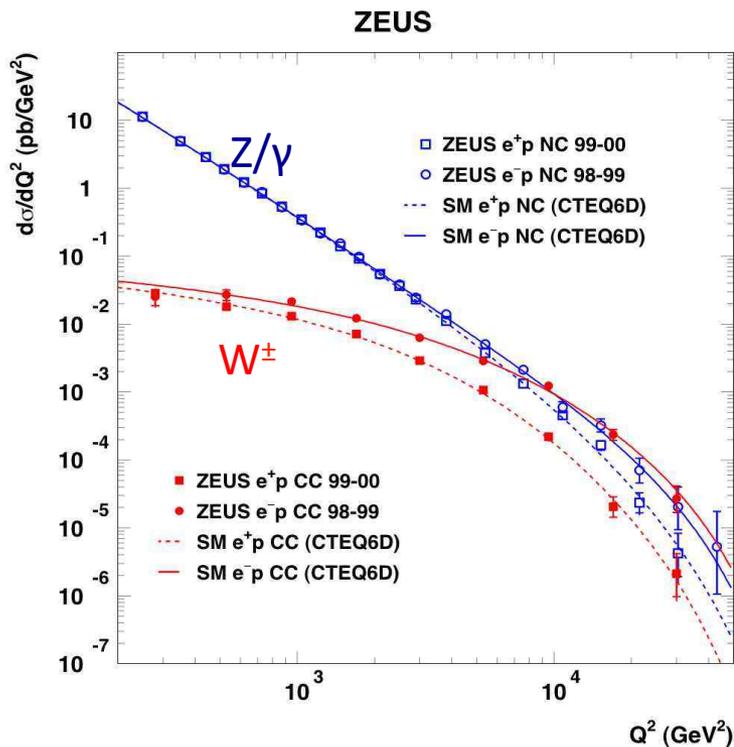


Matéria Escura

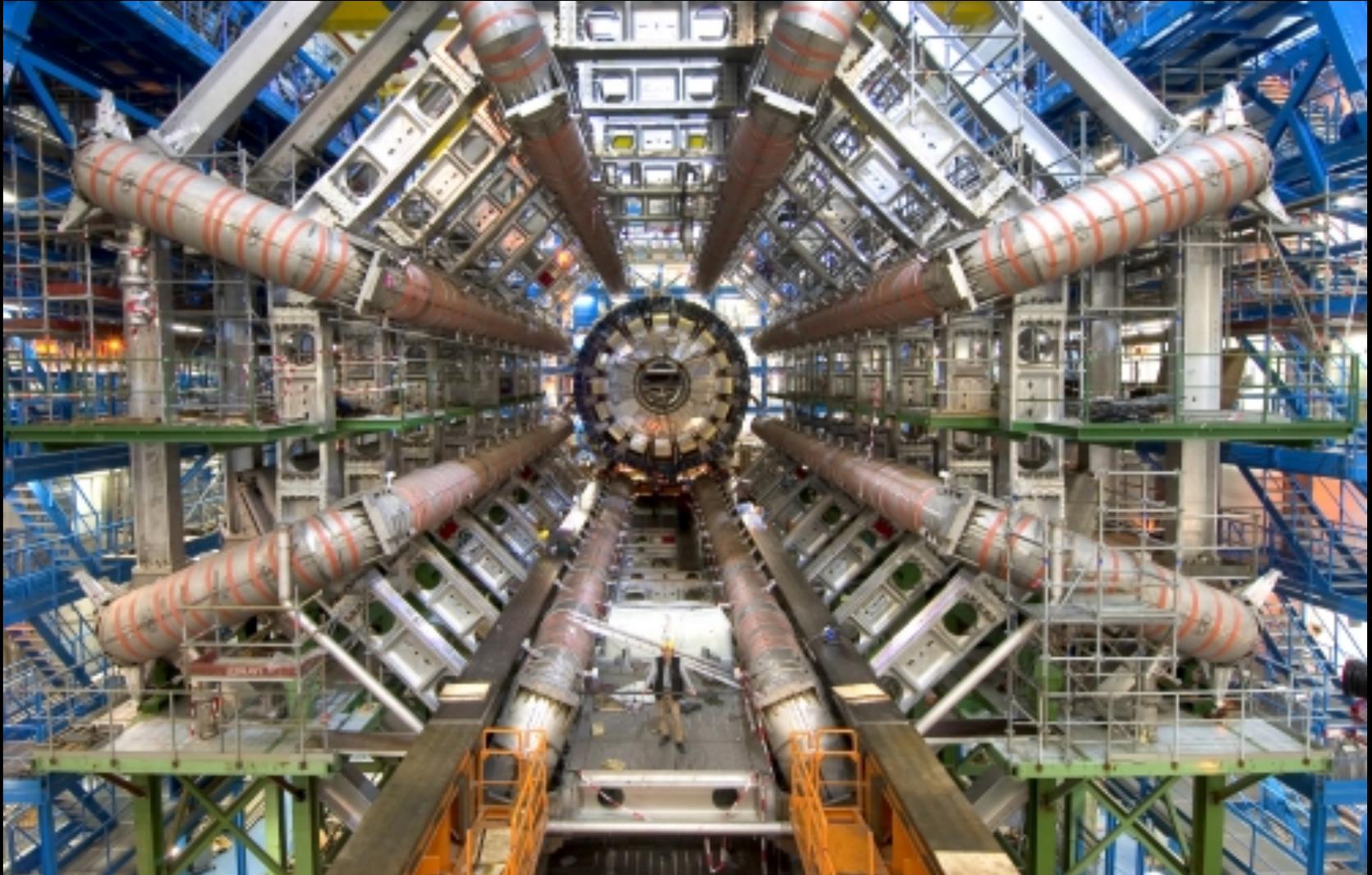
- A sua existência no Universo é clara:
 - Rotação de galáxias
 - Espectro da radiação de fundo
 - Microlensing
- Mas não sabemos o que é!



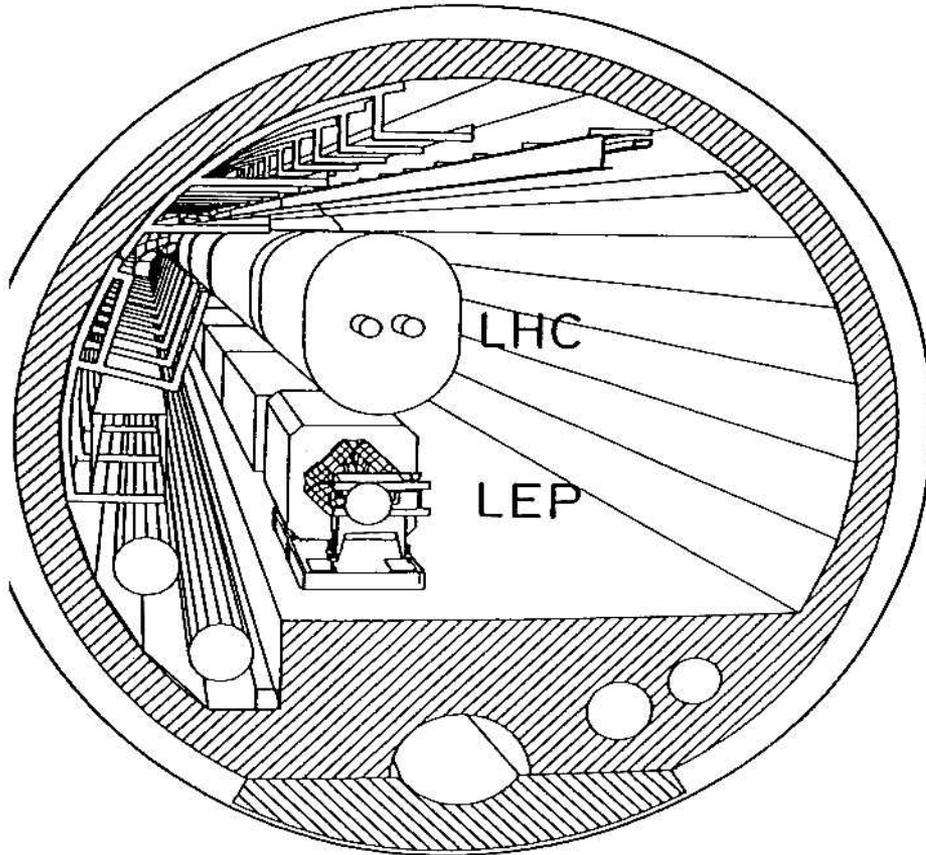
Unificação das interações?



O LHC e a Experiência ATLAS



A história começa há mais de 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

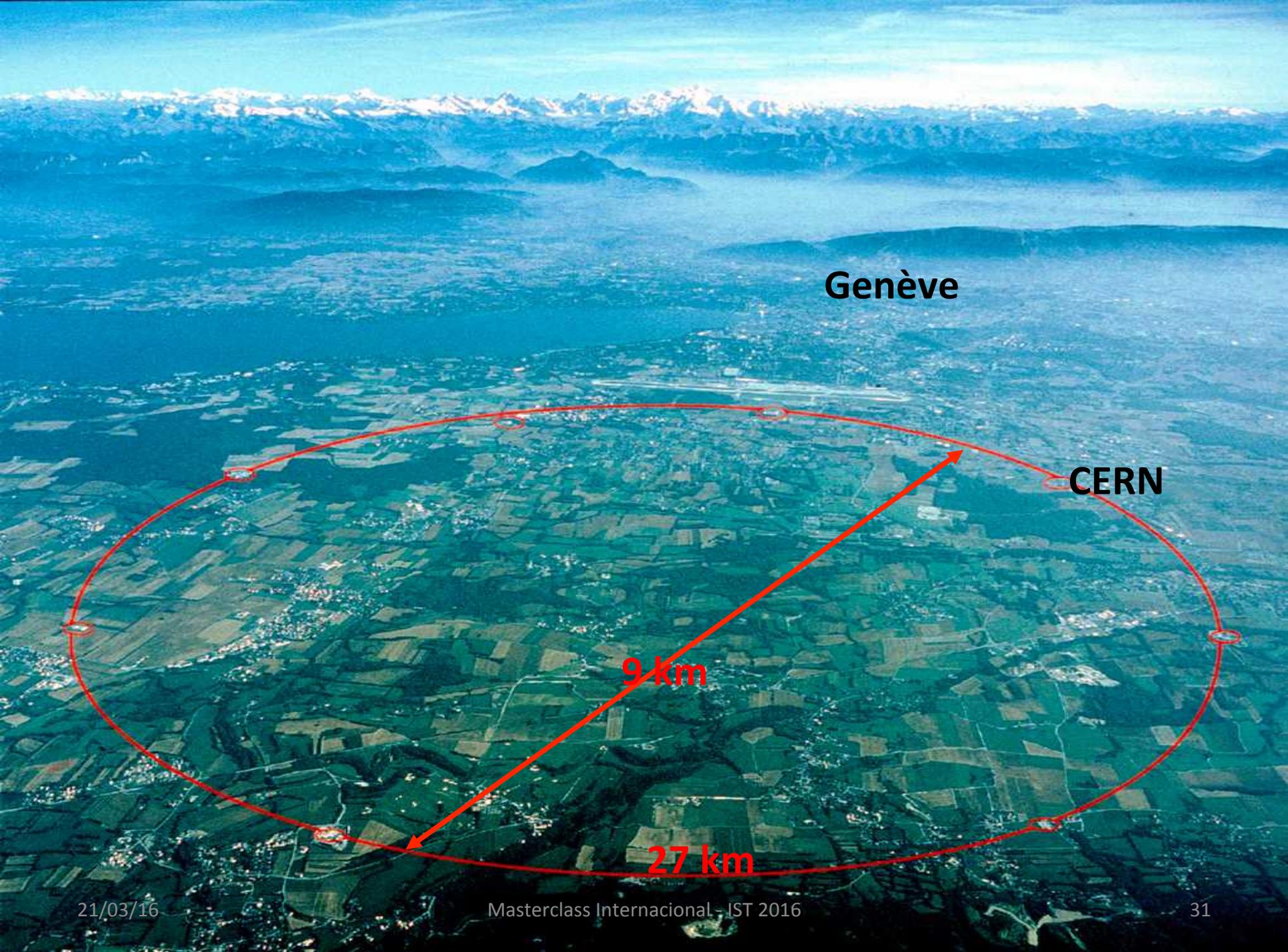
what is the origin of mass?

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.



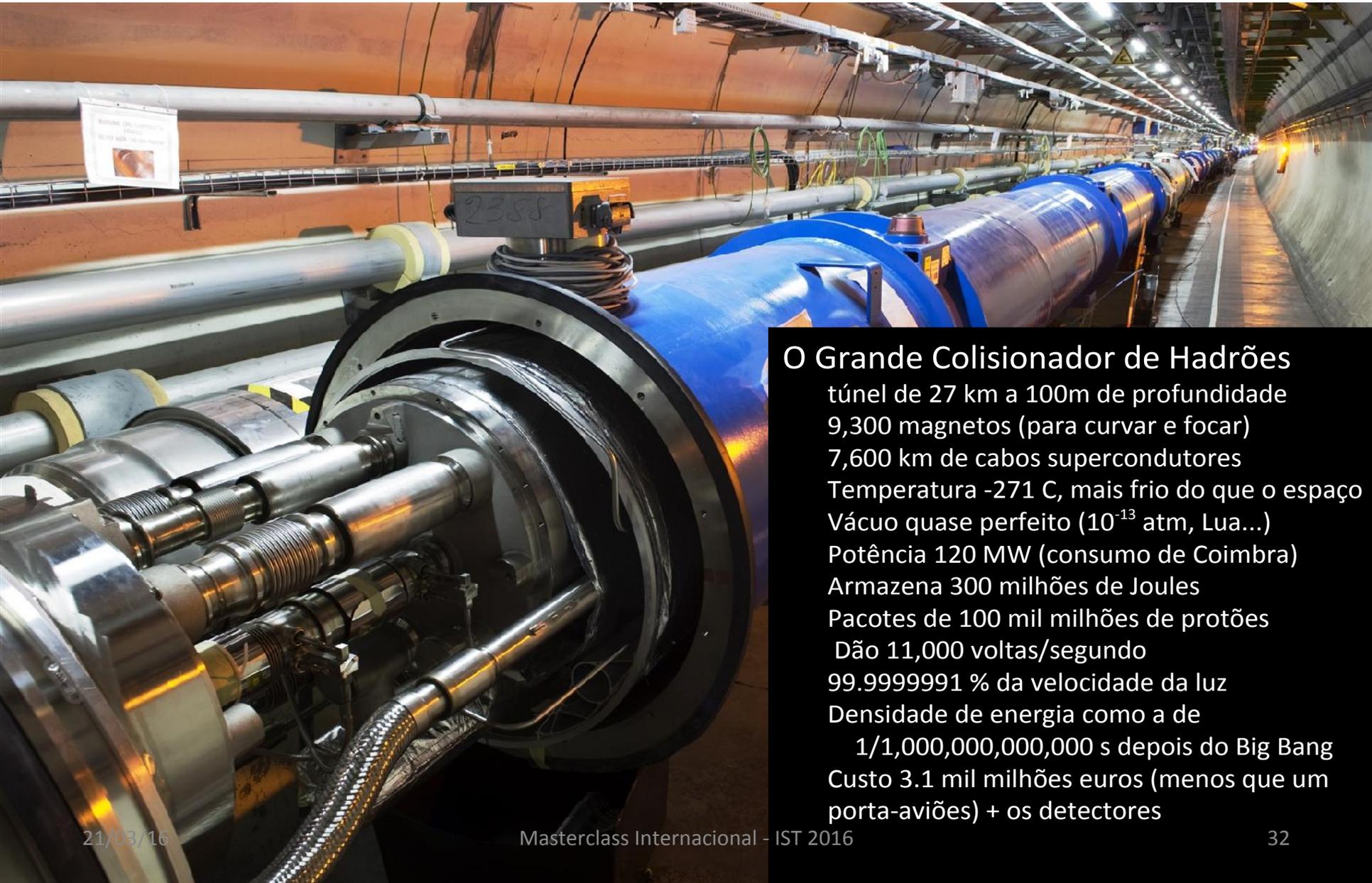
Genève

CERN

9 km

27 km

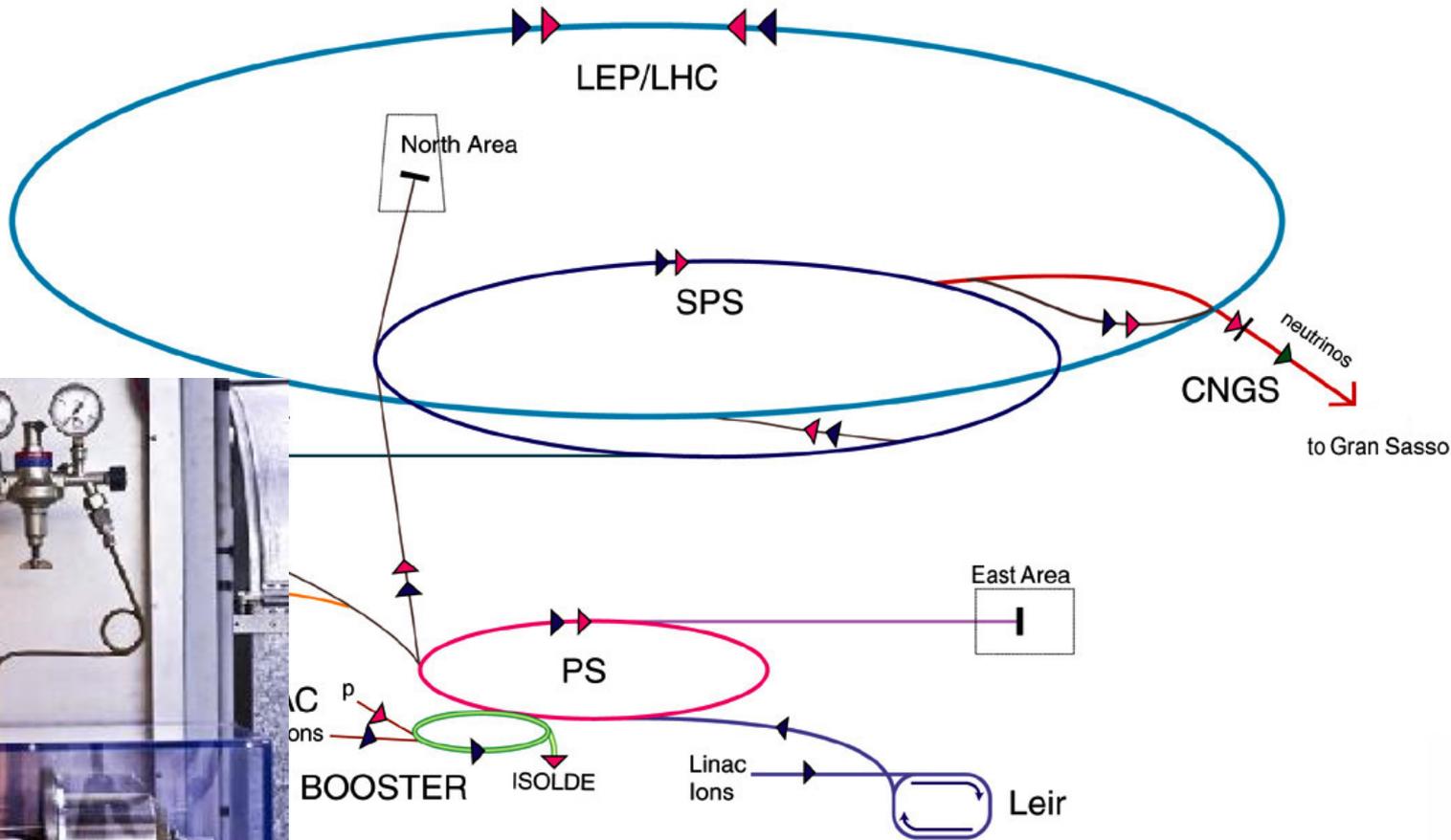
Large Hadron Collider



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**

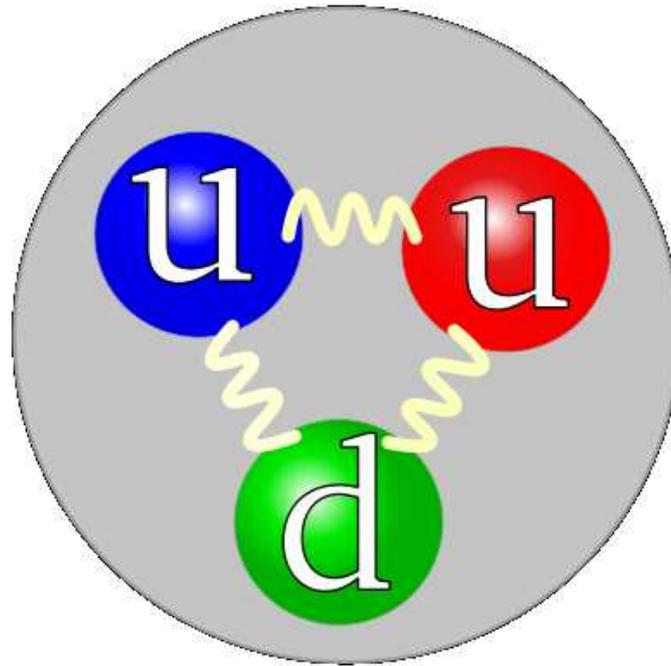


AD Antiproton Decelerator
 PS Proton Synchrotron
 SPS Super Proton Synchrotron
 LHC Large Hadron Collider
 n-ToF Neutron Time of Flight
 CNGS CERN Neutrinos Gran Sasso

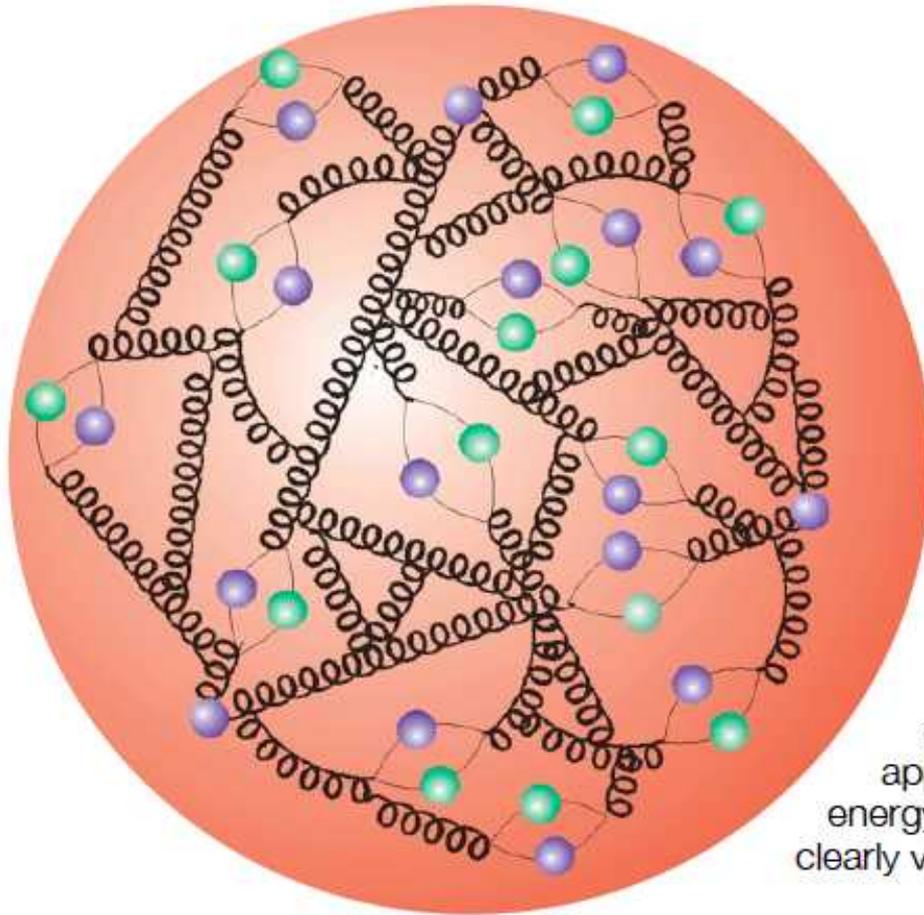
O que é um protão?



O protão no modelo dos quarks



O próton como o conhecemos hoje

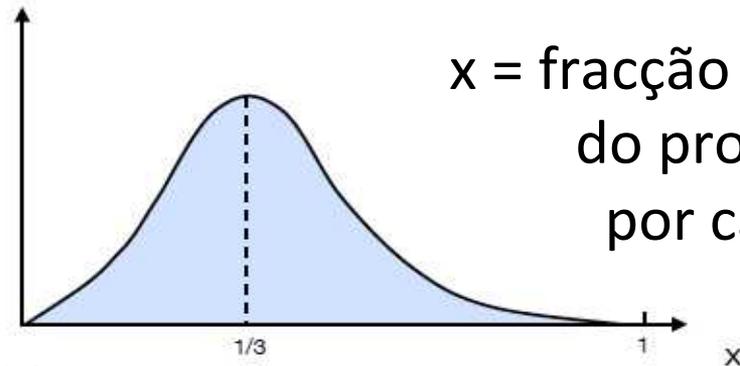
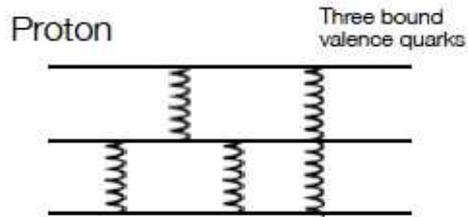
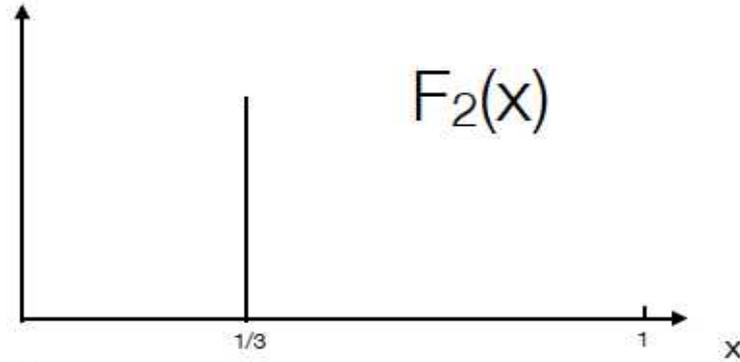
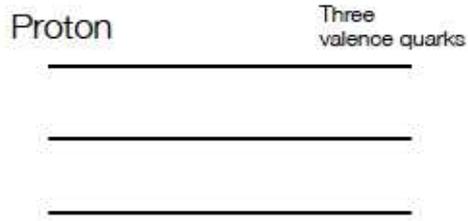


The most dramatic of these [experimental consequences], that the protons viewed at ever higher resolution would appear more and more as field energy (soft glue), was only clearly verified at HERA ...

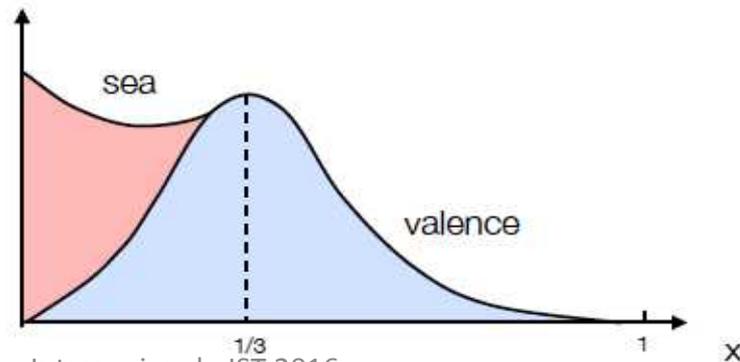
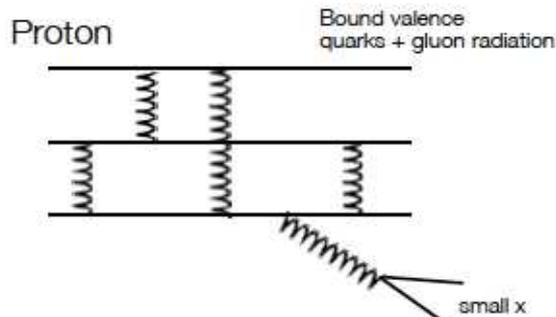
F. Wilczek
[Nobel Prize 2004]

Como se distribui a energia dentro dos prótons

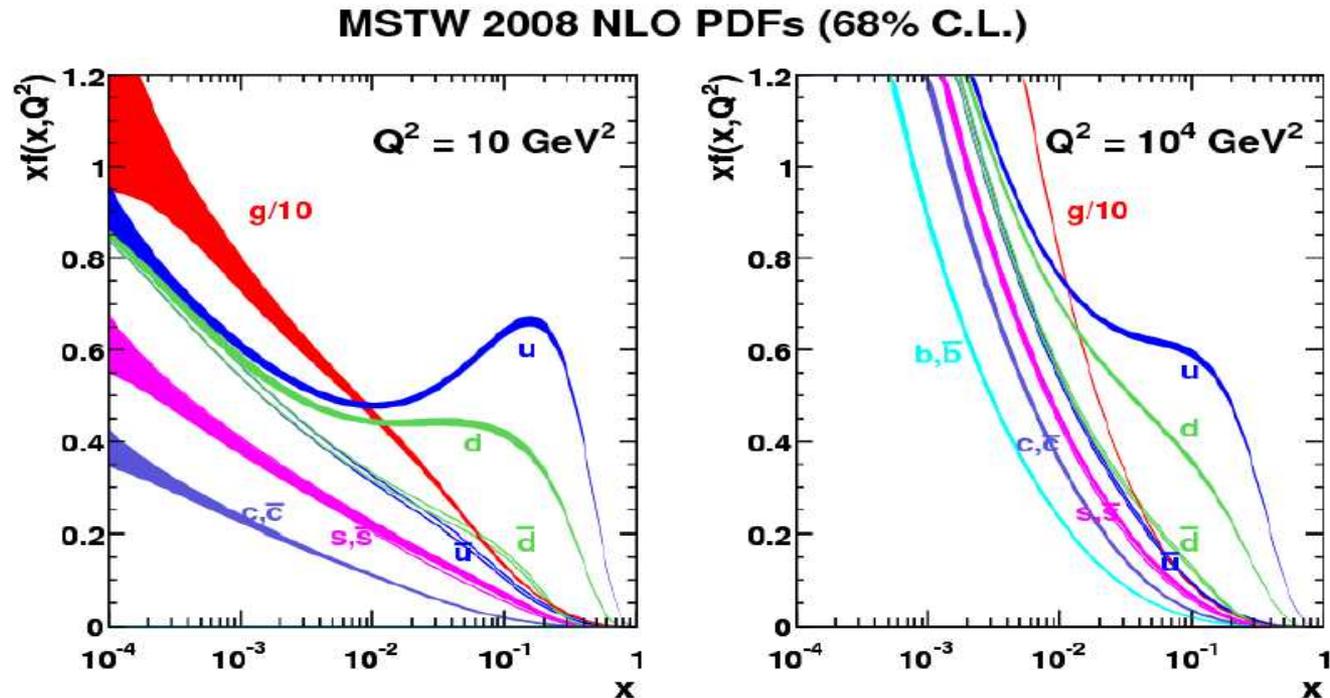
Partões: quarks e glúons constituintes dos hádrons



x = fracção da energia do próton levada por cada partão

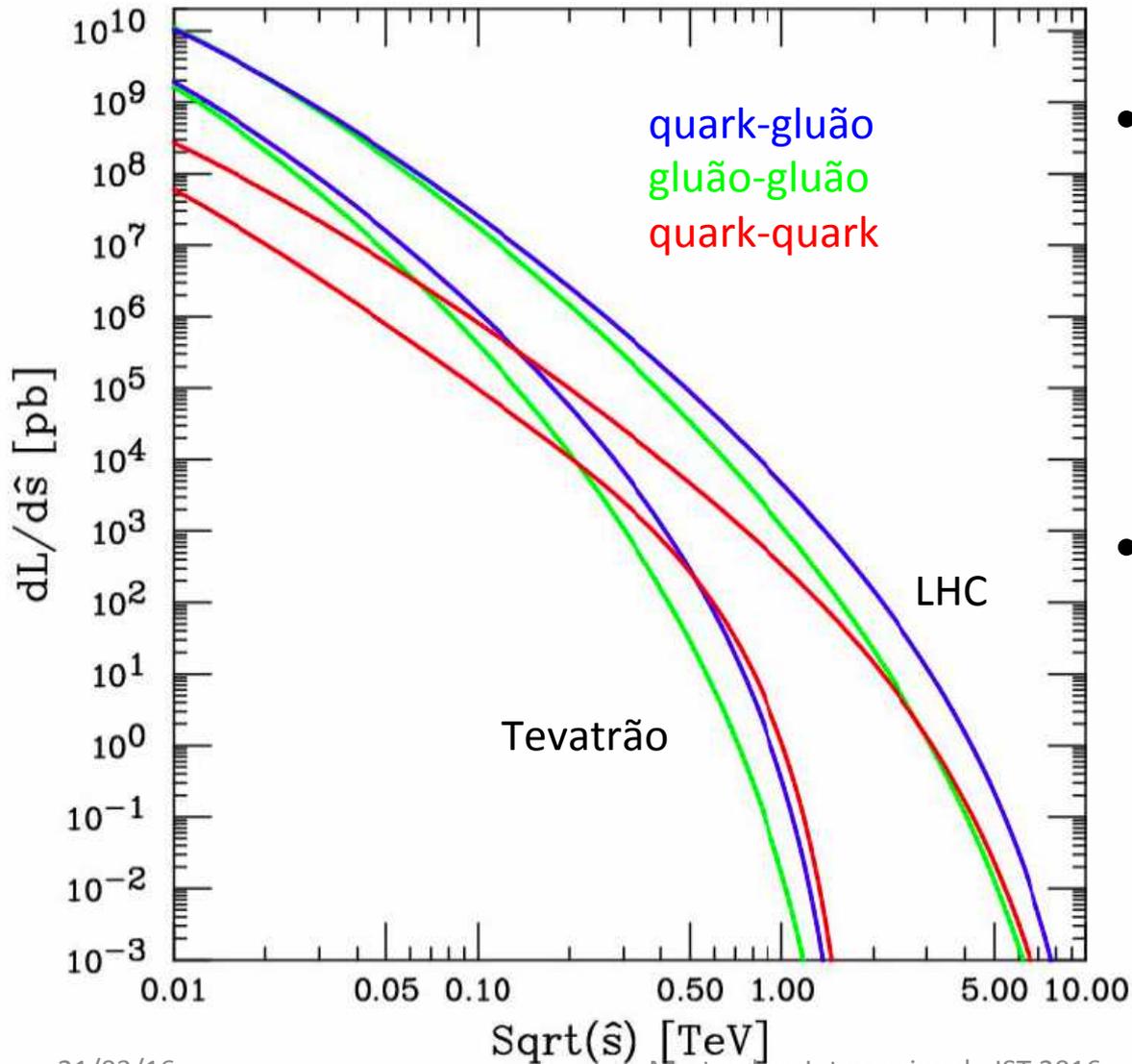


Em detalhe: funções de distribuição dos partões



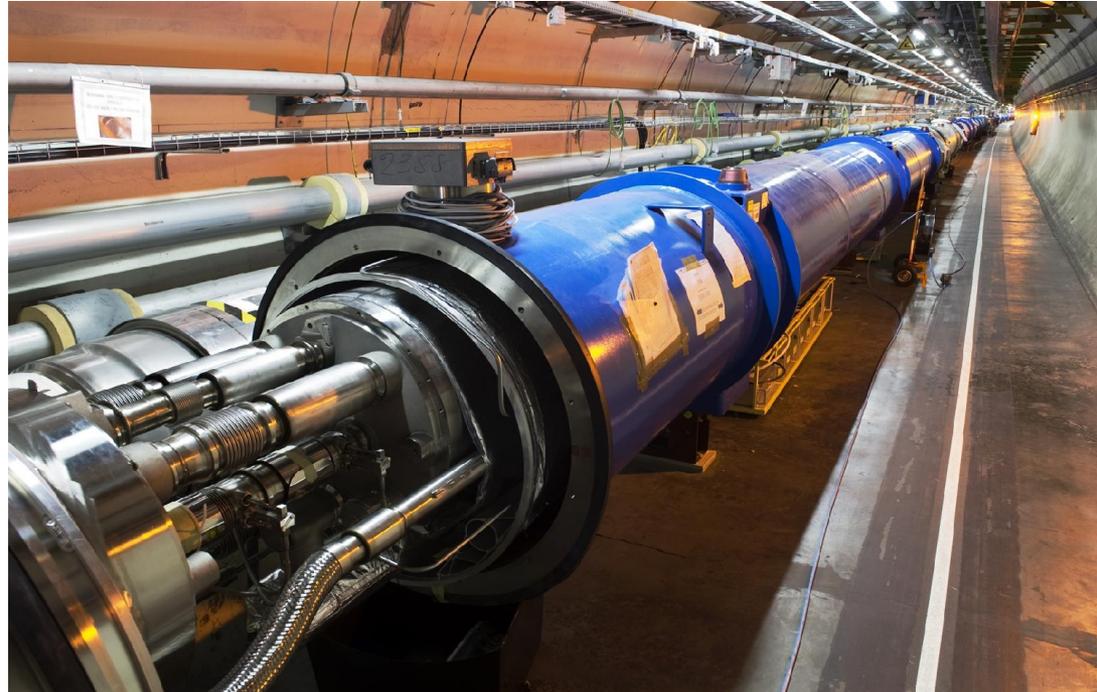
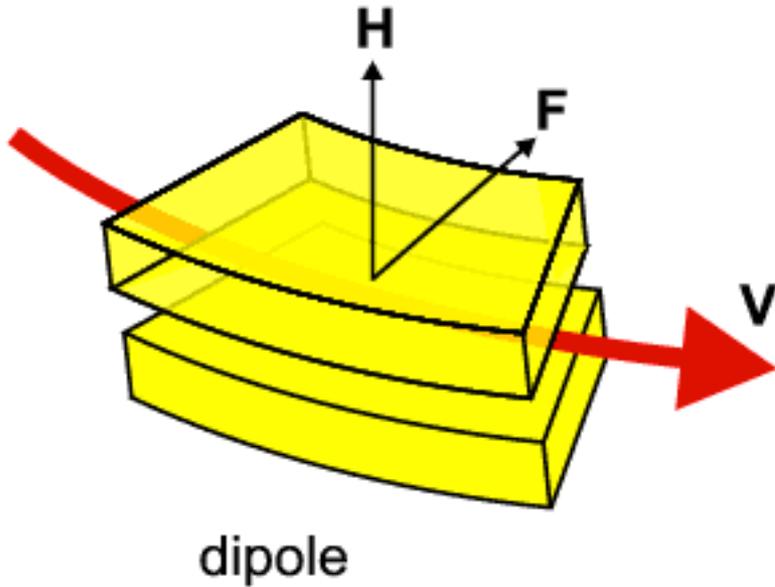
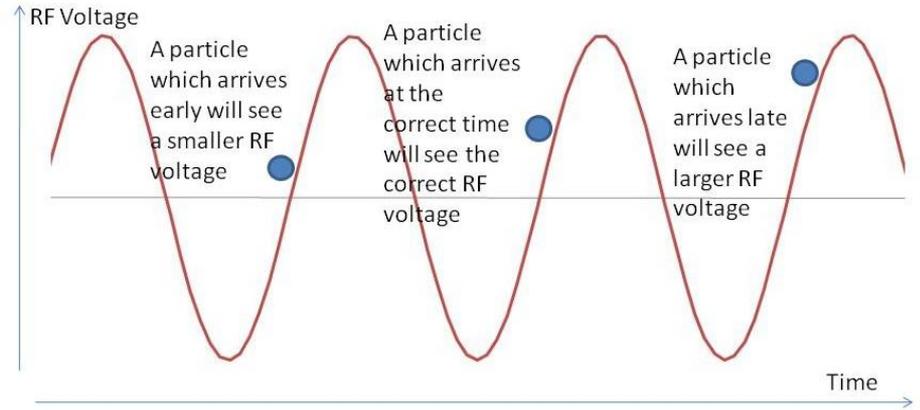
A energias maiores, como as do LHC, a contribuição dos glúons e dos quarks de “mar” aumenta – o LHC colide quarks e glúons!

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

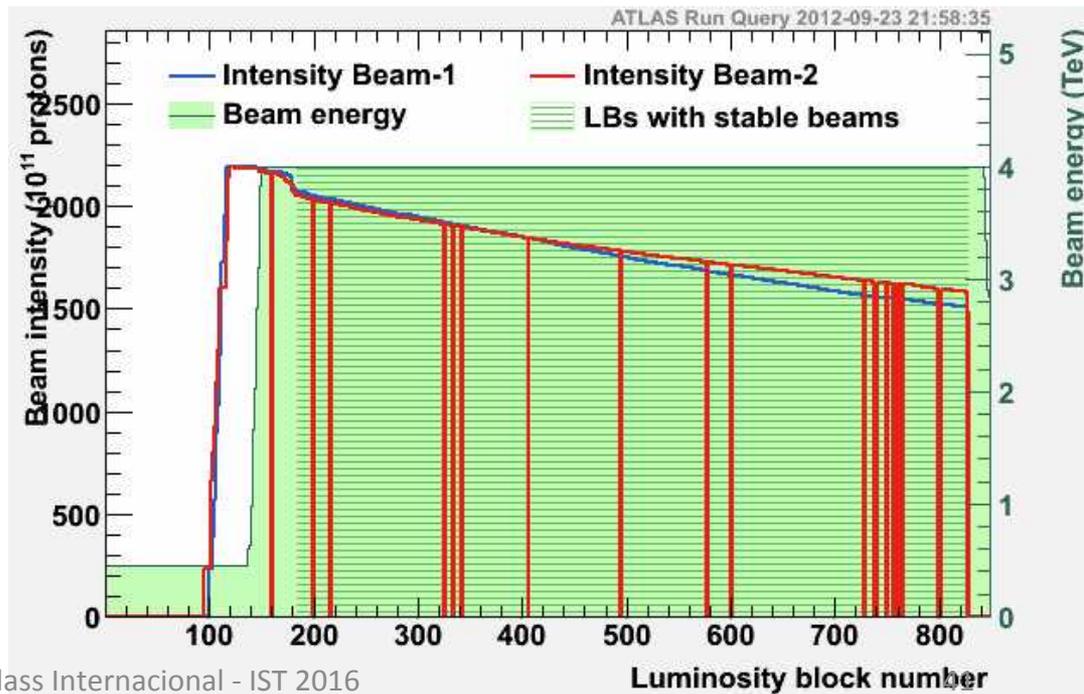
Feixes de prótons



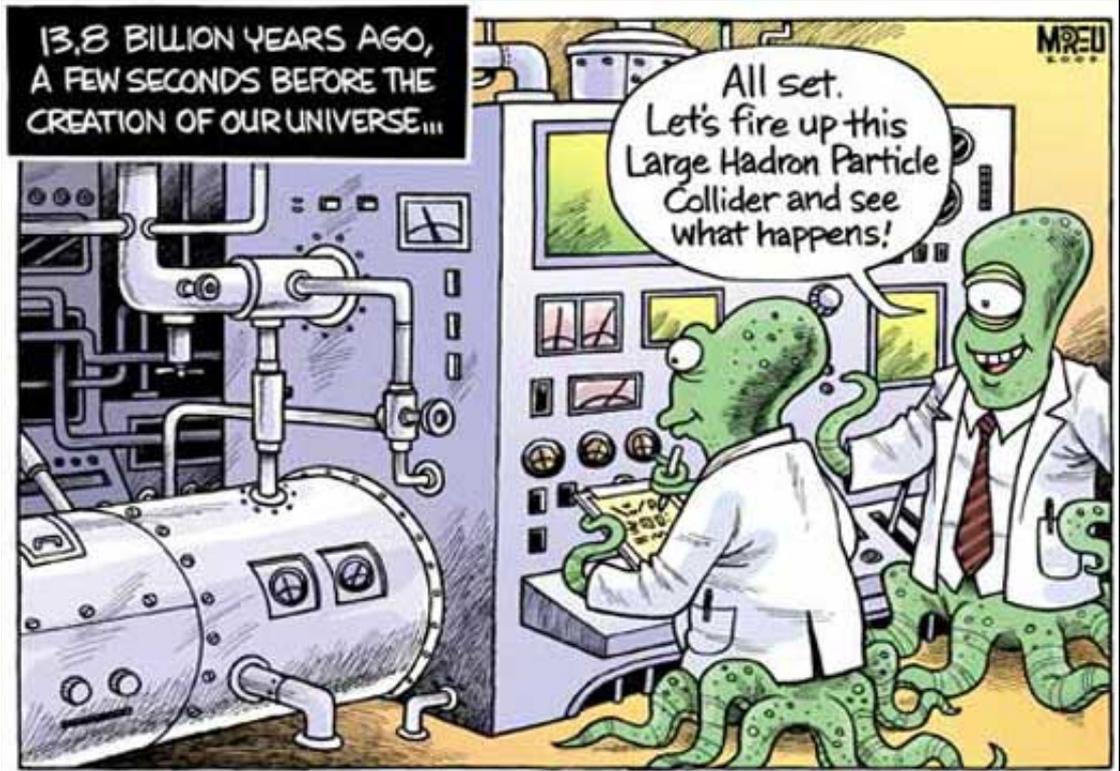


- Energia do feixe:
- 2802 bunches de 1.15×10^{11} prótons
- $7 \text{ TeV} / \text{próton (2015)} = 7 \times 10^{12} \times 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$
- Dá 362 MJ por feixe...
- Igual à energia cinética de um porta-aviões de 20,000t a viajar a 11,7 nós (21.7 km/h)

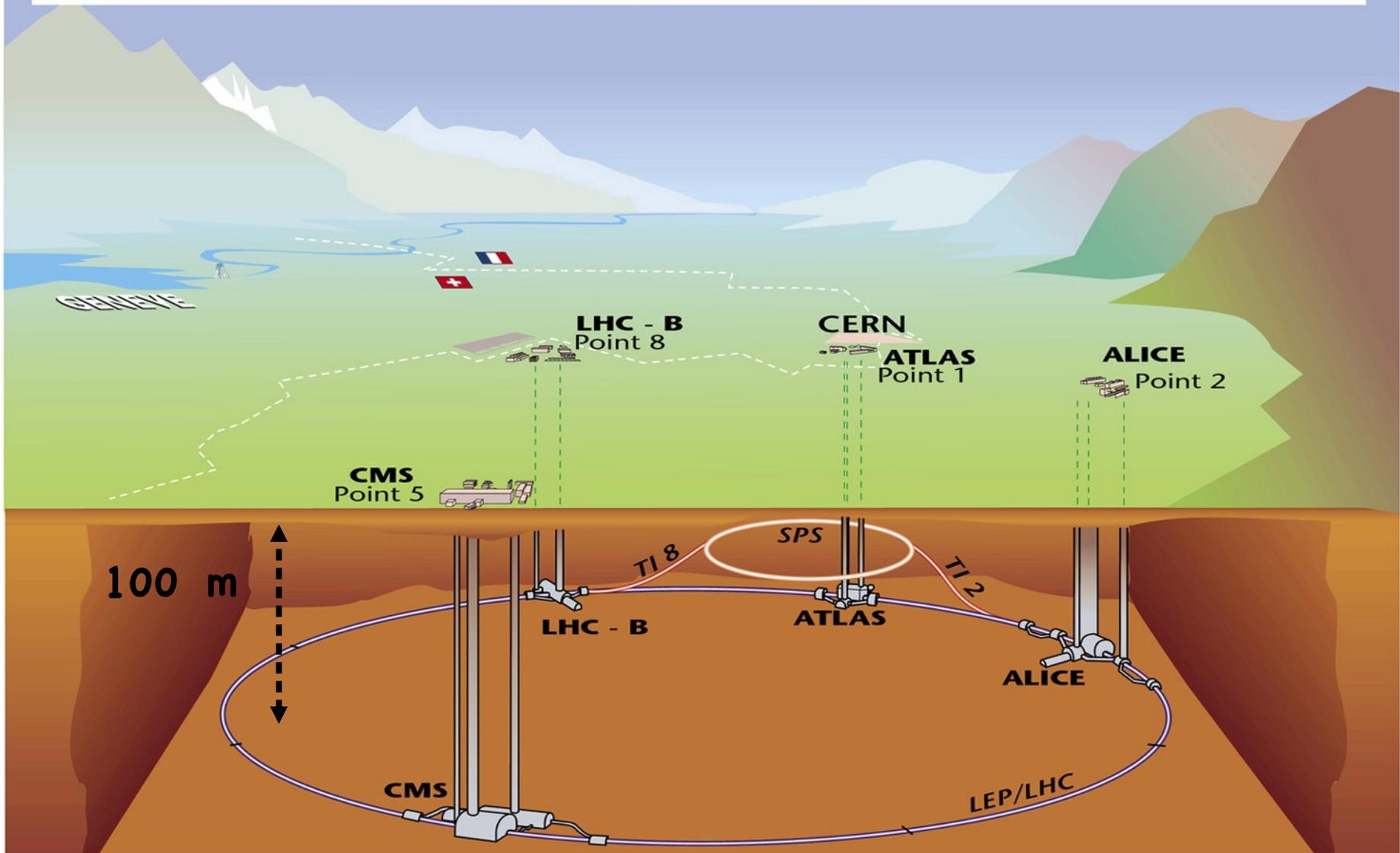
- Tudo contido num feixe de $\approx 16 \mu\text{m}$
- Runs típicos duram cerca de 8 horas
- Intensidade diminui devido a perdas
- Depois voltamos a injectar novos feixes



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
 $\sigma/p_T = 2\% @ 50\text{GeV}$ to $10\% @ 1\text{TeV}$ (ID+MS)

EM calorimeter: $|\eta| < 3.2$

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

Hadronic calorimeter:

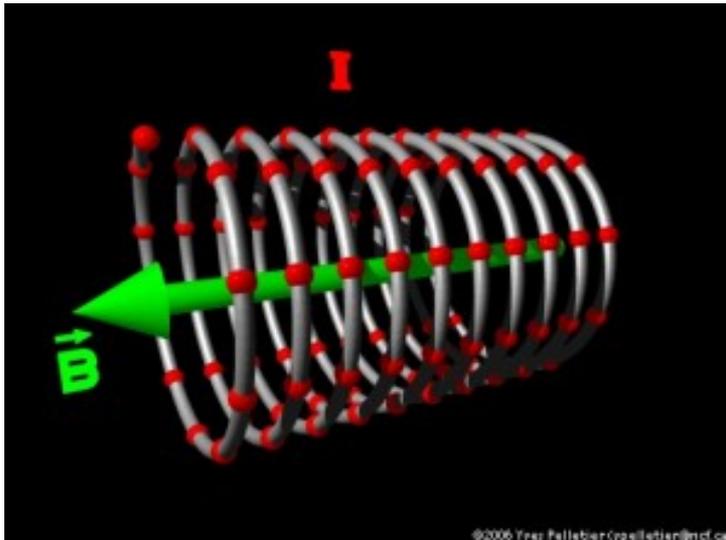
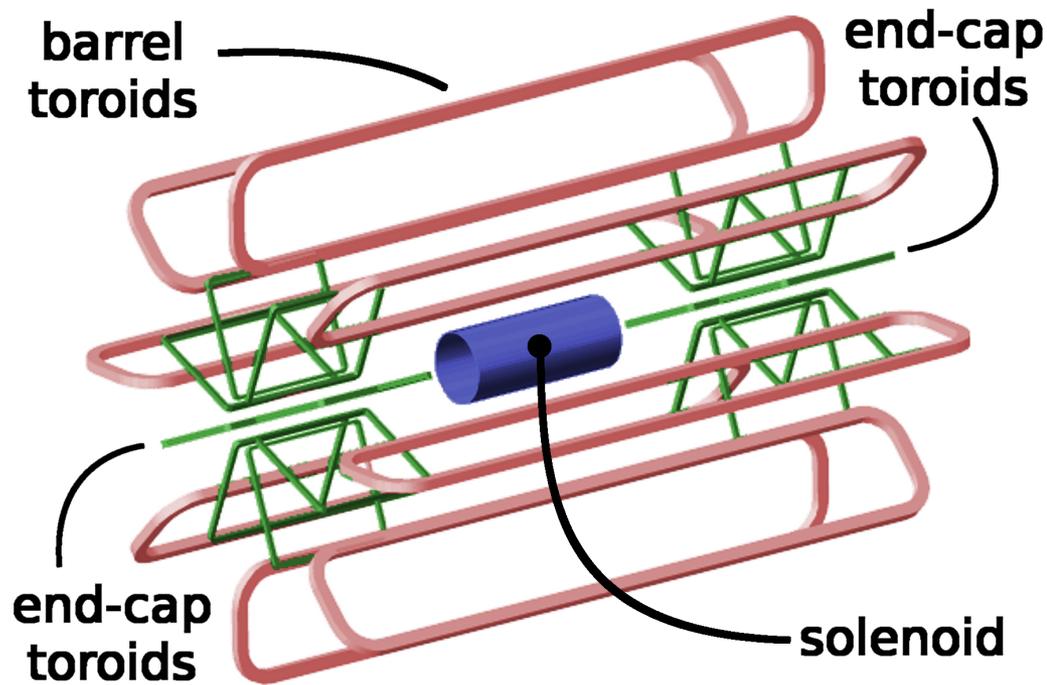
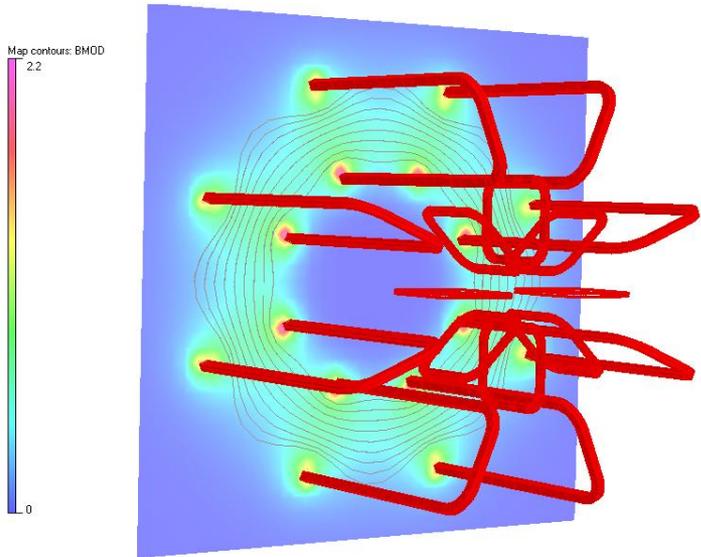
$|\eta| < 1.7$ Fe/scintillator
 $1.3 < |\eta| < 4.9$ Cu/W-Lar
 $\sigma/E_{\text{jet}} = 50\%/\sqrt{E} \oplus 3\%$

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 Lorenz:

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

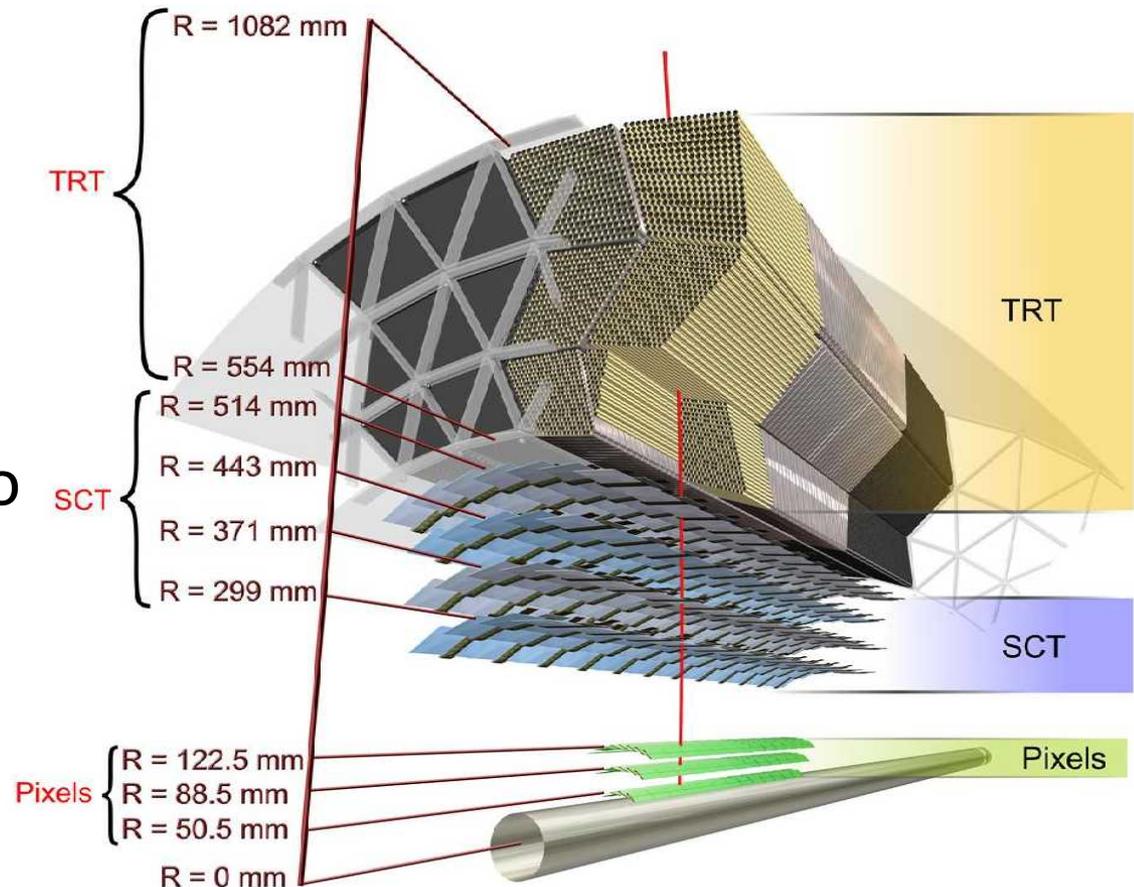
Detetores de traços

Duas tecnologias

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

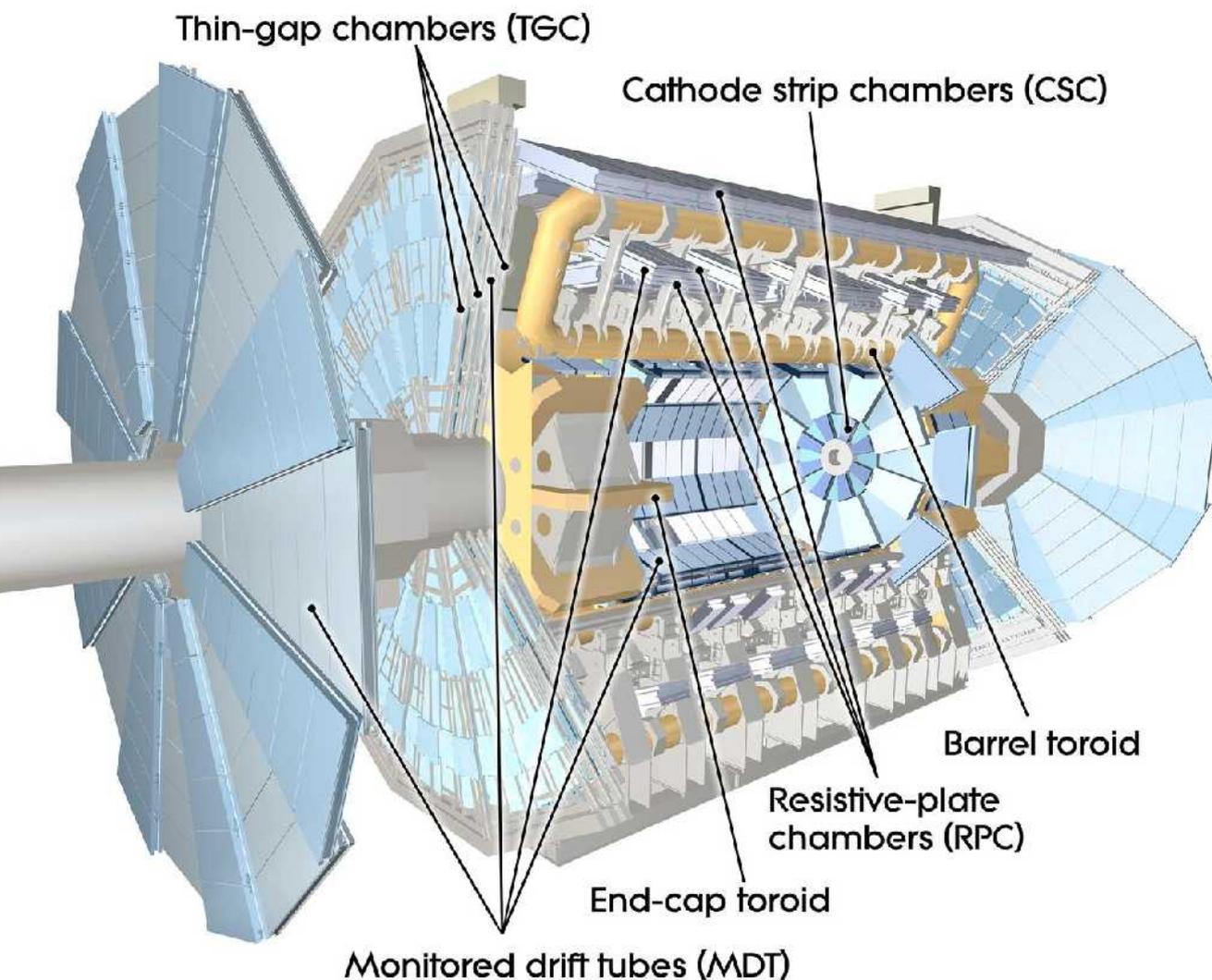
Desempenho:

- resolução no momento das partículas:



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

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

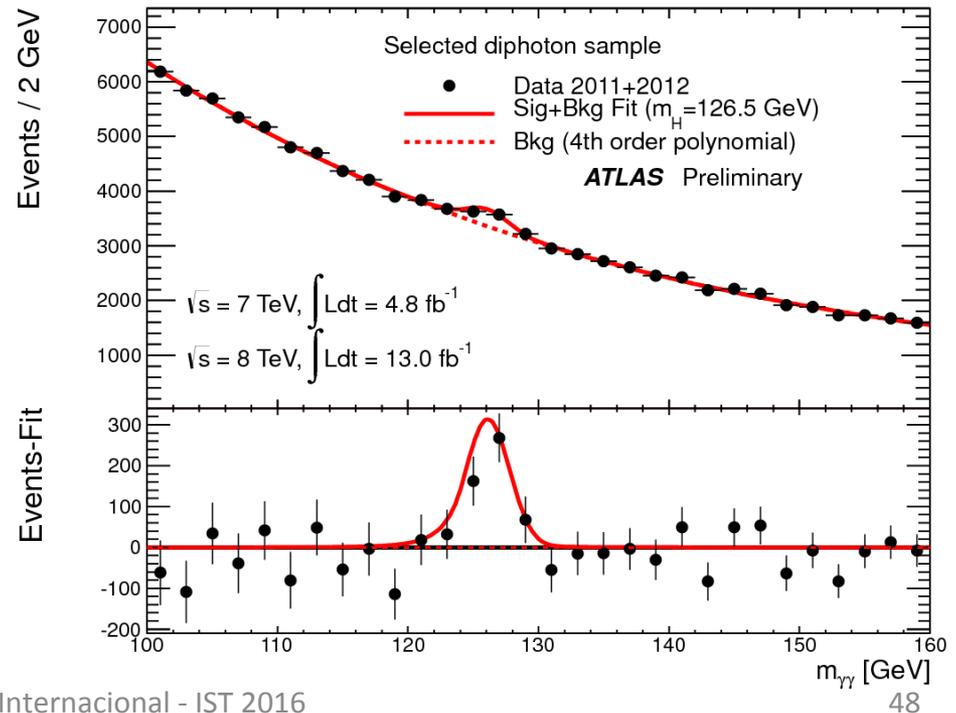
TGC: thin gap chamber

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%

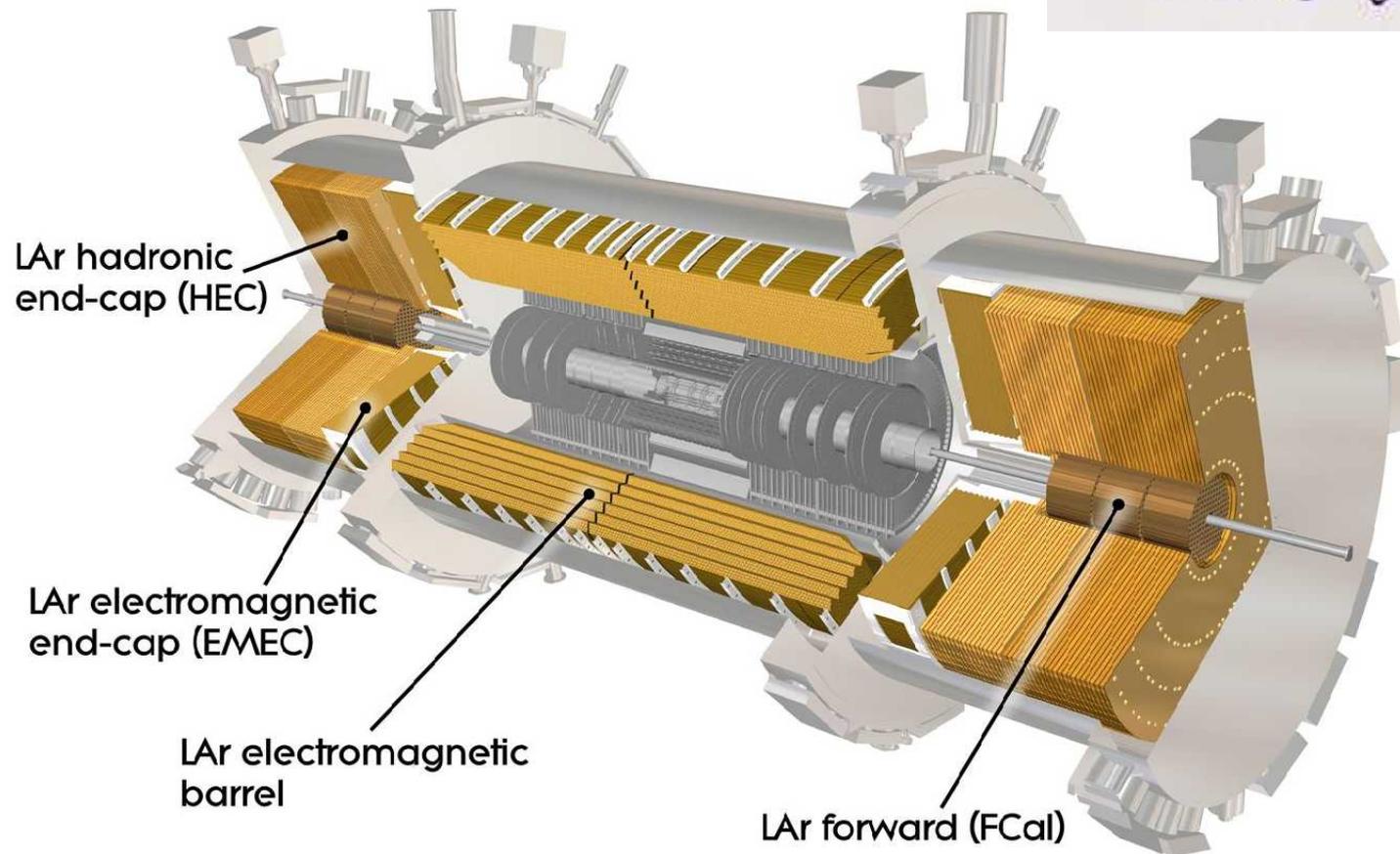
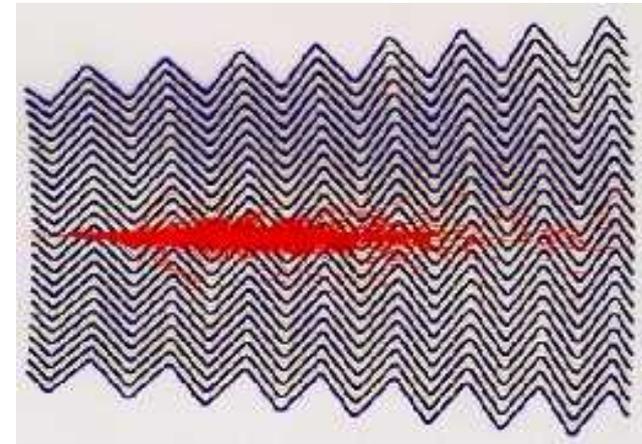


Calorímetros de Árgon Líquido

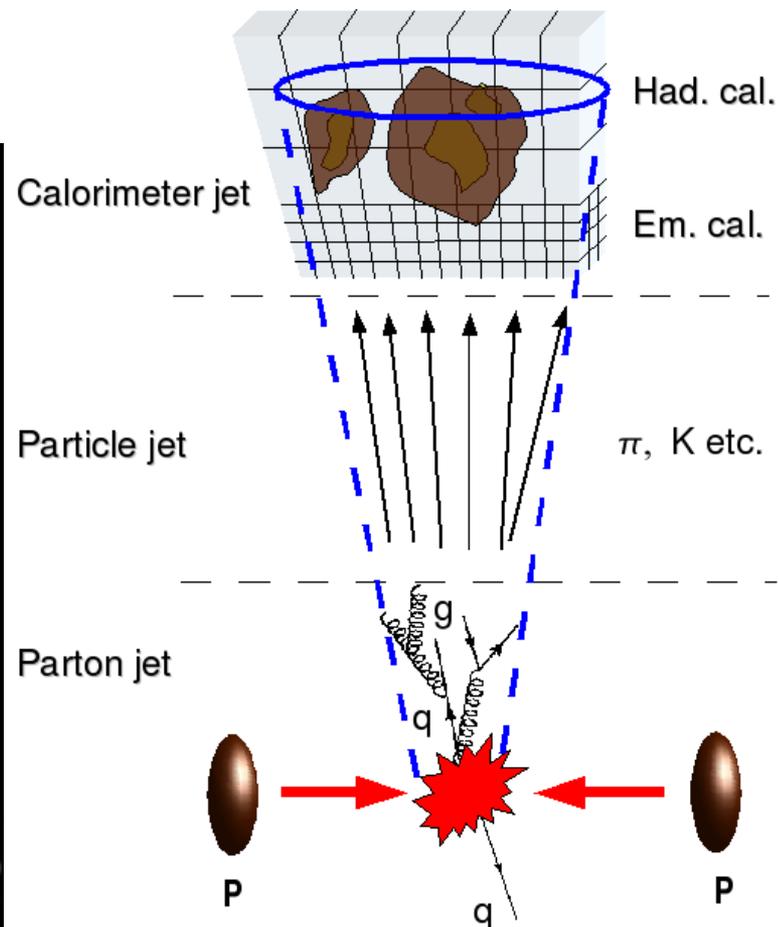
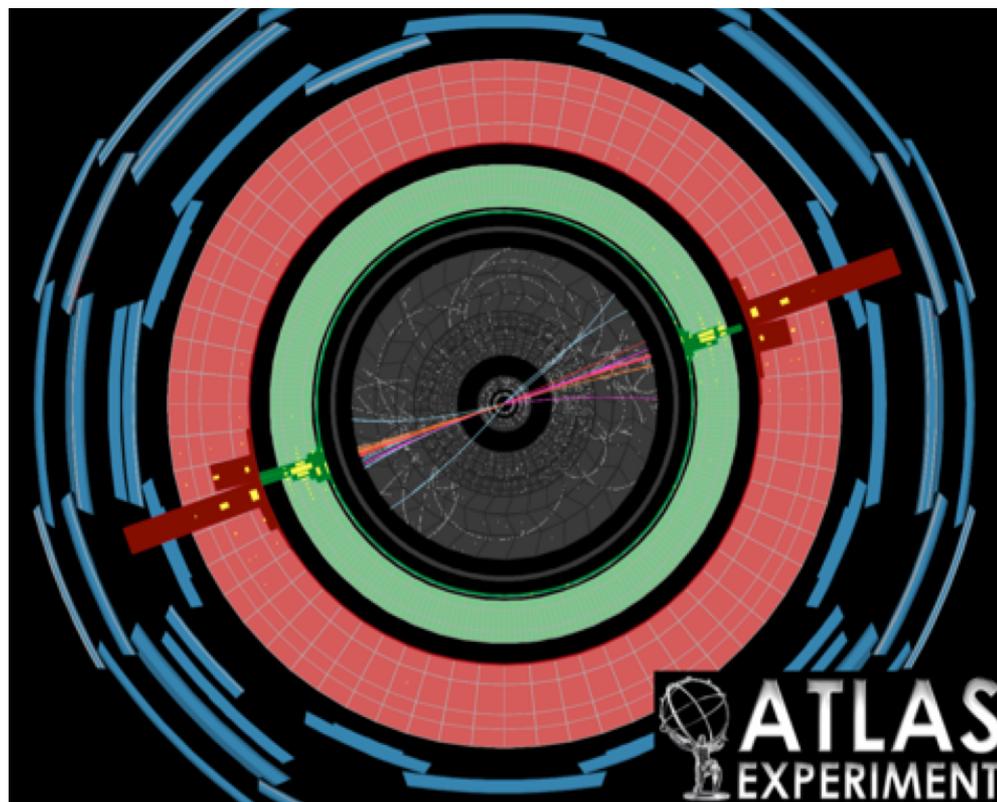
EM calorimeter: $|\eta| < 3.2$

Pb-LAr Accordion

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

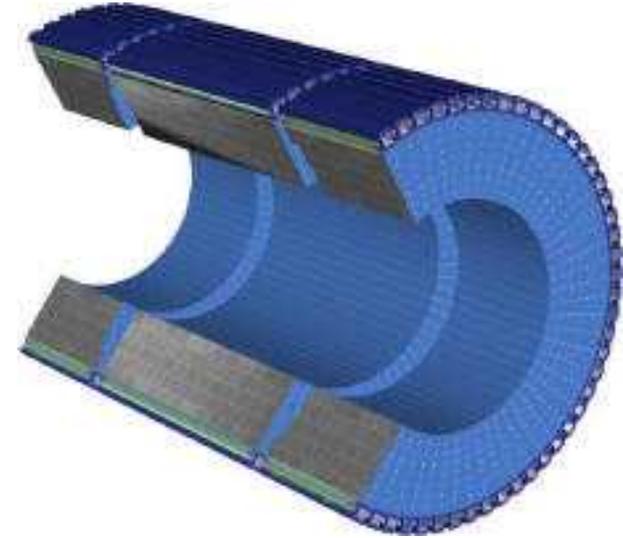
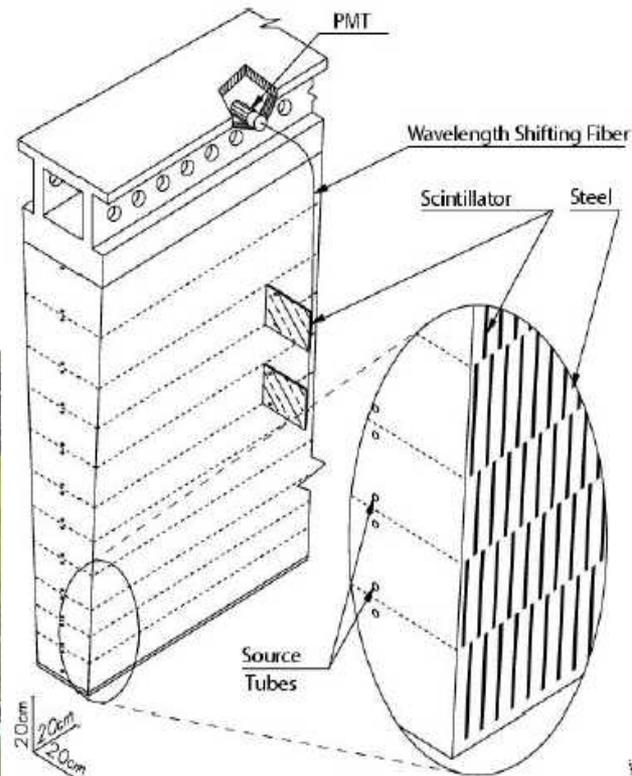


Jactos hadrónicos



- Jactos são as assinaturas experimentais dos quarks e gluões
- Feixes colimados de hadrões 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)

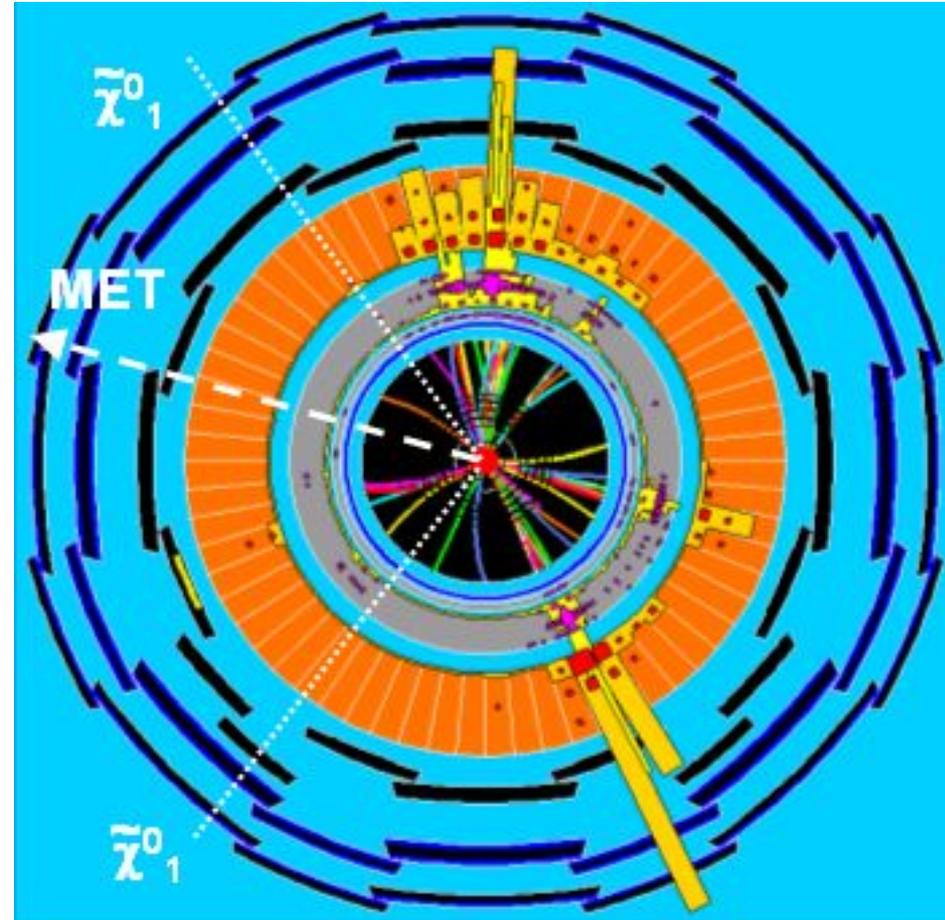
O calorímetro de telhas (TileCal)



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

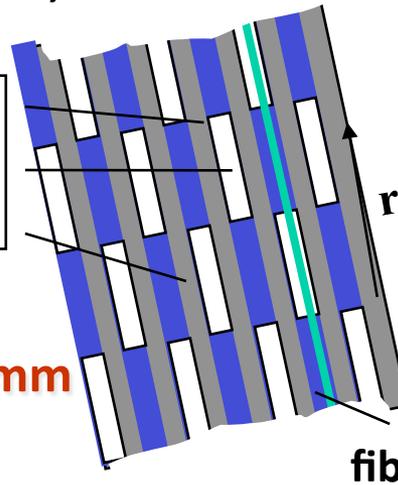


Estrutura e princípio de funcionamento do calorímetro Tilecal

Estrutura periódica, ferro e cintiladores de plástico

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

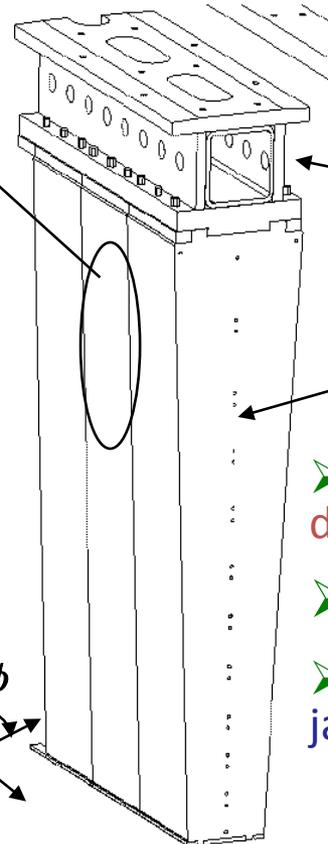
período básico, 18mm



fibra

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

Fibras WLS



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

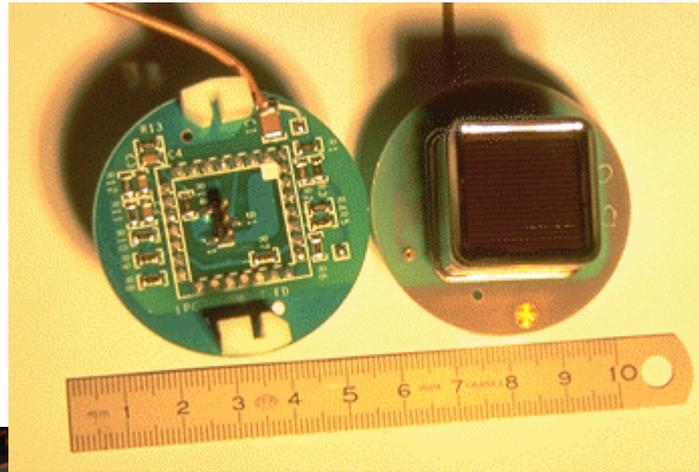
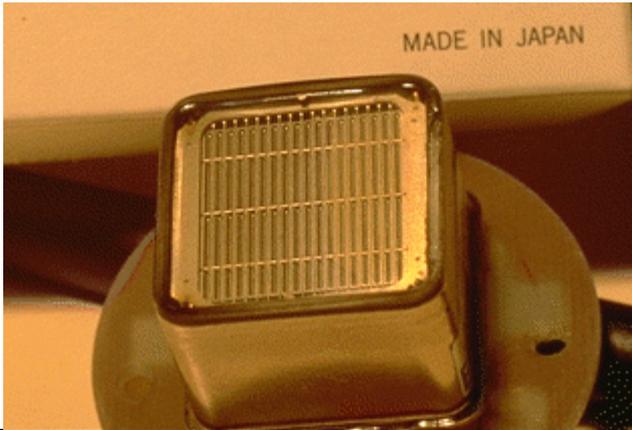
Caveta (com electrónica)

sub-módulo

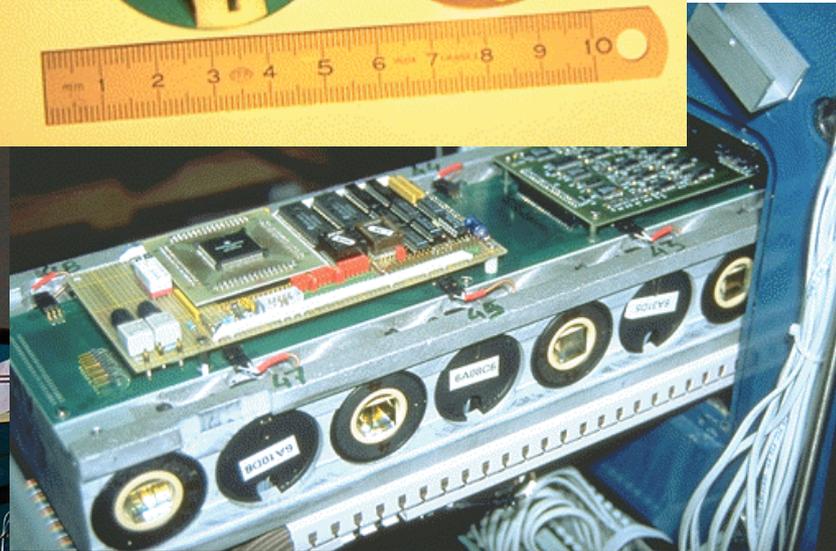
- Hermeticidade para detecção de jactos e E_t^{miss}
- Cobertura $|\eta| < 1.6$
- Resolução em energia para jactos

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

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)



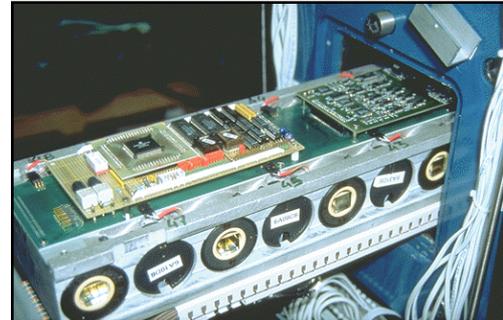
1993-1995 R&D-protótipos



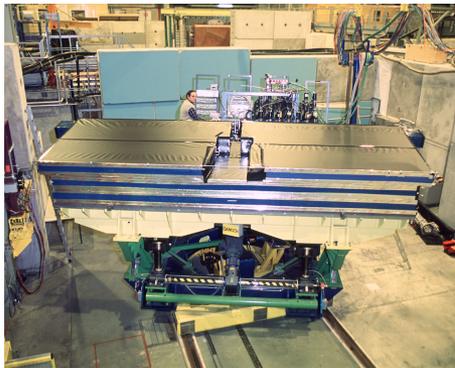
1996-2002: construção



1999-2002 Instrumentação



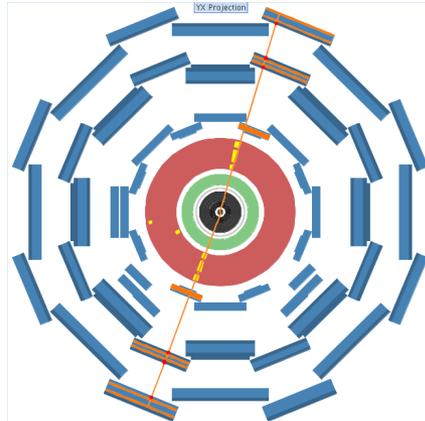
1999-2004: Electrónica



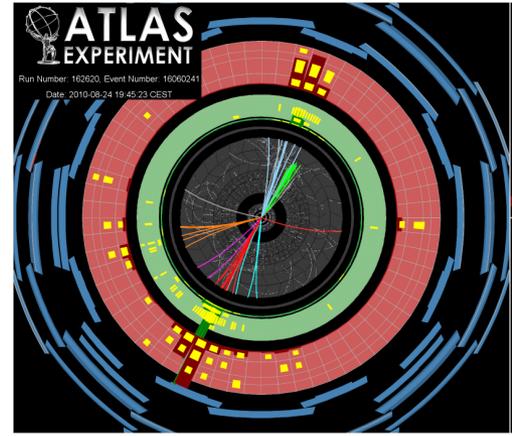
2002-2004: calibrações



2004-2006 Instalação



2007-2009 certificação
(raios cósmicos)

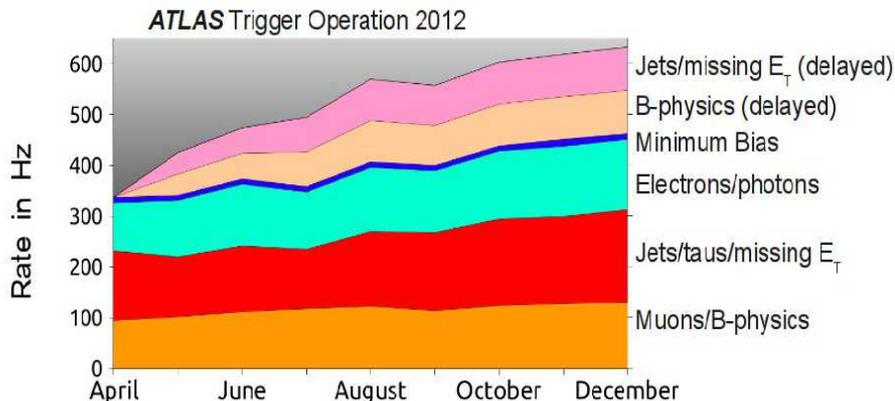
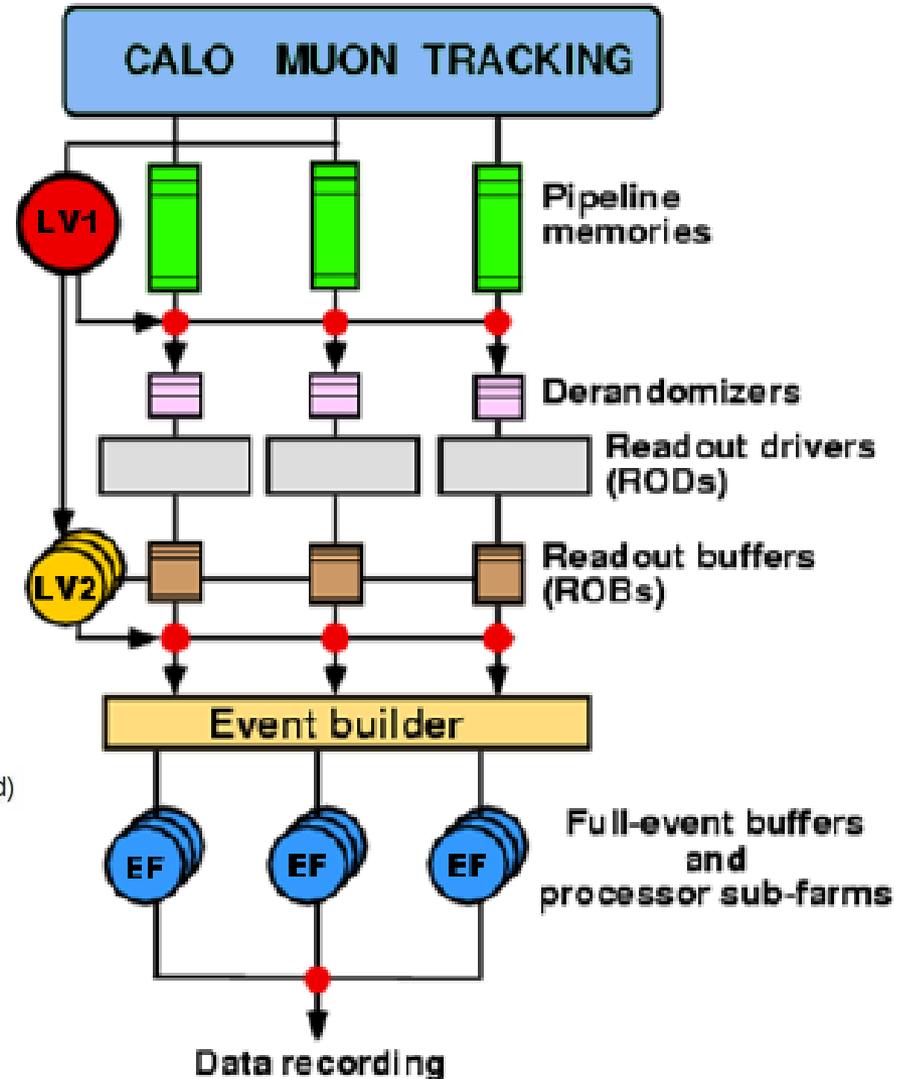


2009--> : aquisição/análise
dados LHC

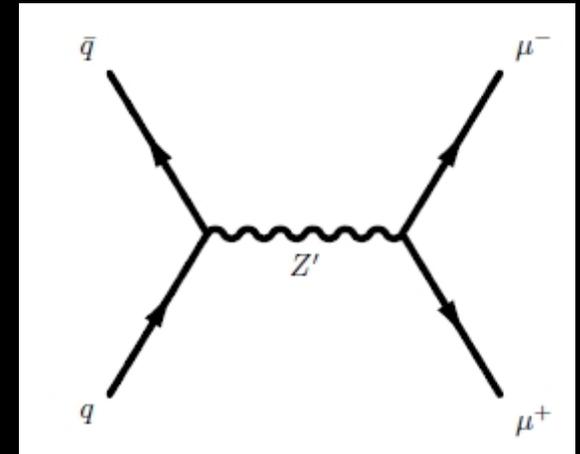
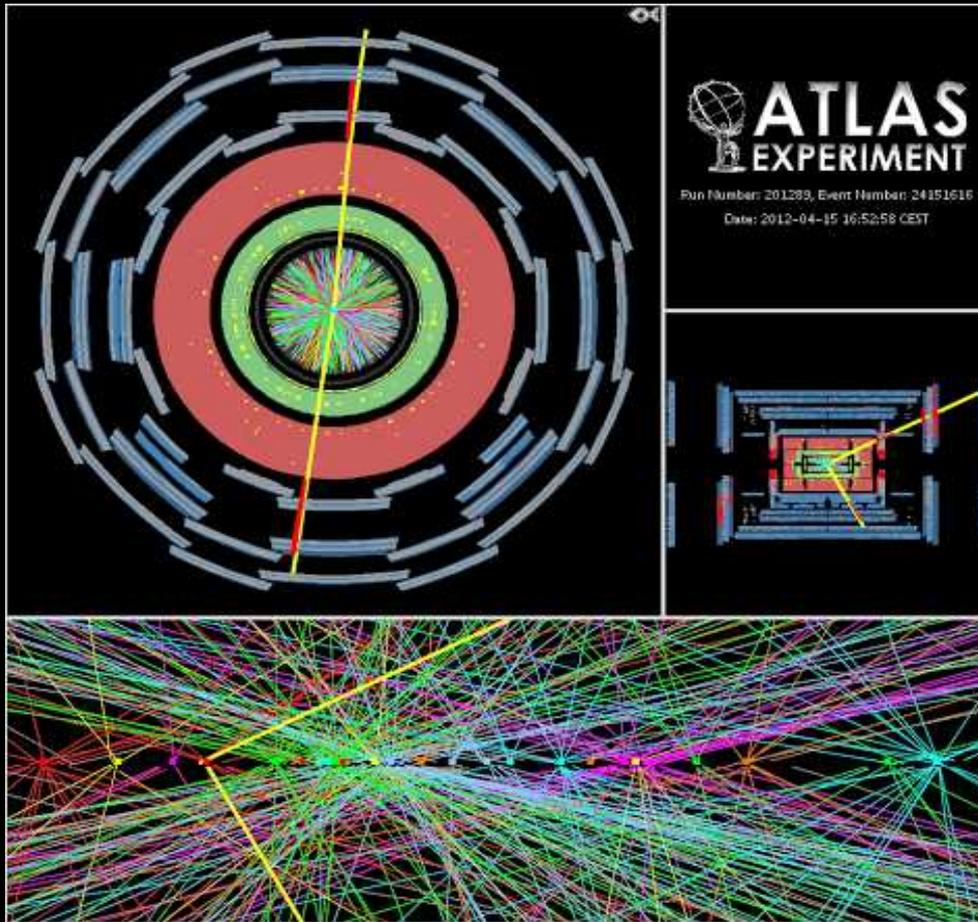
Um longo percurso para conseguir as excelentes características do Tilecal no ATLAS
Com participação portuguesa: LIP, FCUL, UMinho

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
 - E 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 $2,5\mu\text{s}$!!



Do Detector até à Física



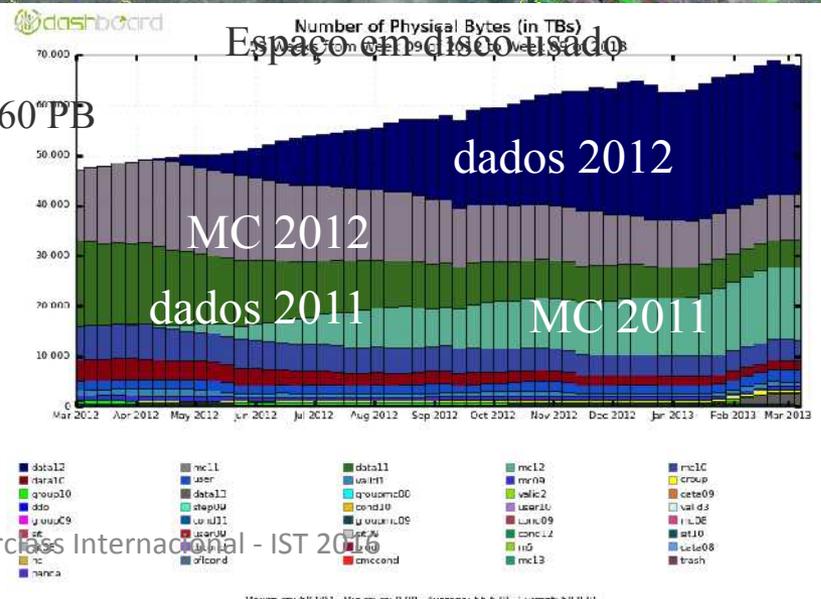
GRID: computação distribuída

10/30/2012 6:10:31 pm

Running jobs: 243209
Transfer rate: 7.59 GiB/sec

Worldwide LHC Computing Grid WLCG

ATLAS usa 80 centros em todo o mundo
Incluindo Brasil e Portugal



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 AdI

Investigadores ~ 20

Estudantes ~ 15

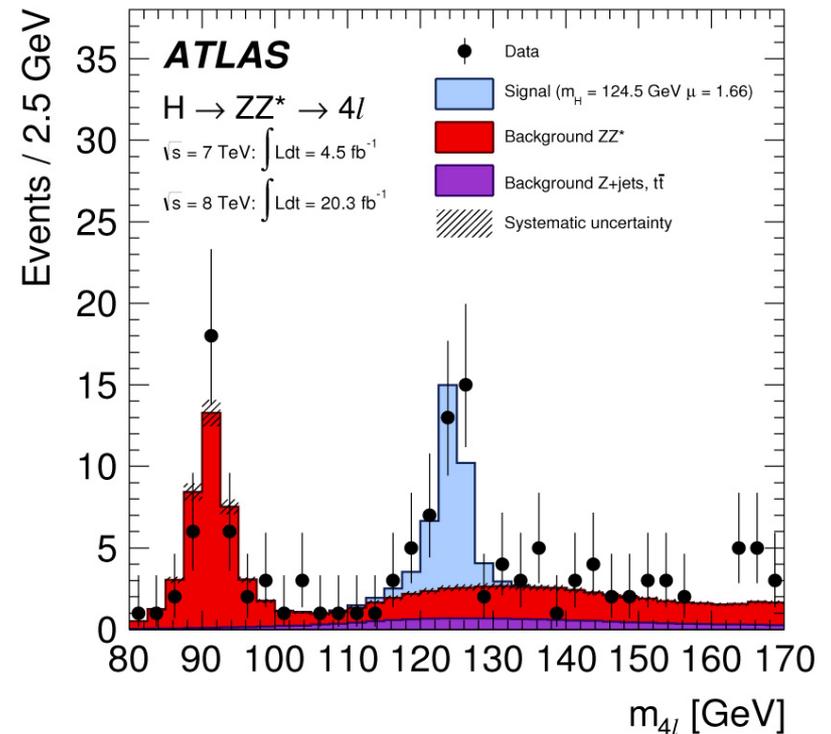
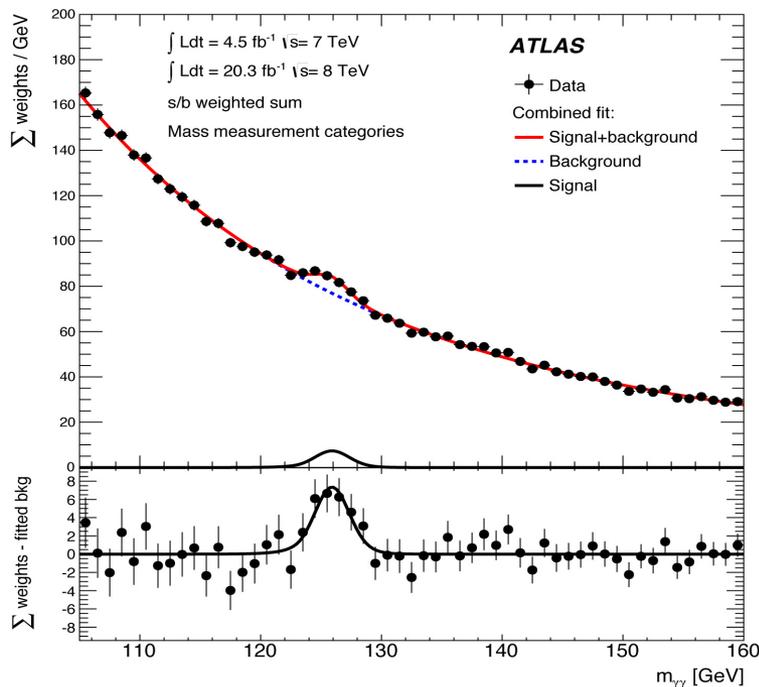
Engenheiros, pessoal técnico (em Portugal) ~ 10

Engenheiros no CERN do programa ADI > 5

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:

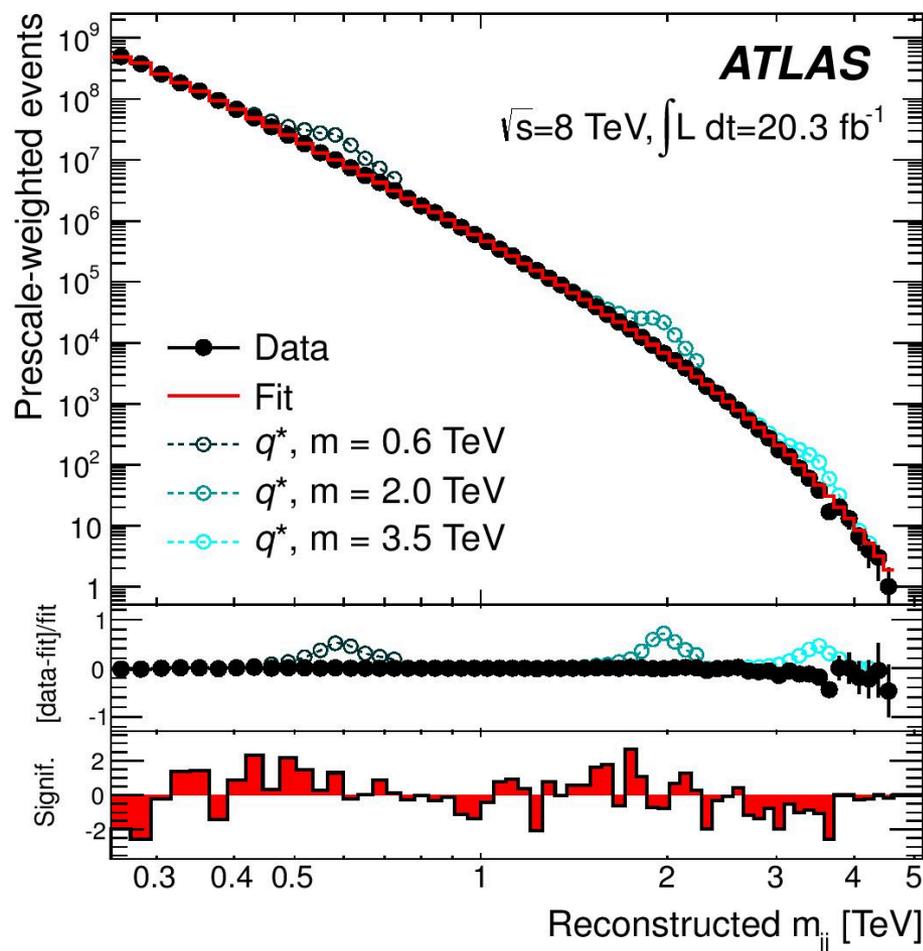
$$m_H = 125.36 \pm 0.37 \text{ (stat)} \pm 0.18 \text{ (syst)} \text{ GeV}$$



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 gluões seria detectado como **dois jactos muito energéticos**
- Procuramos colisões com dois jactos muito energéticos e massa invariante elevada

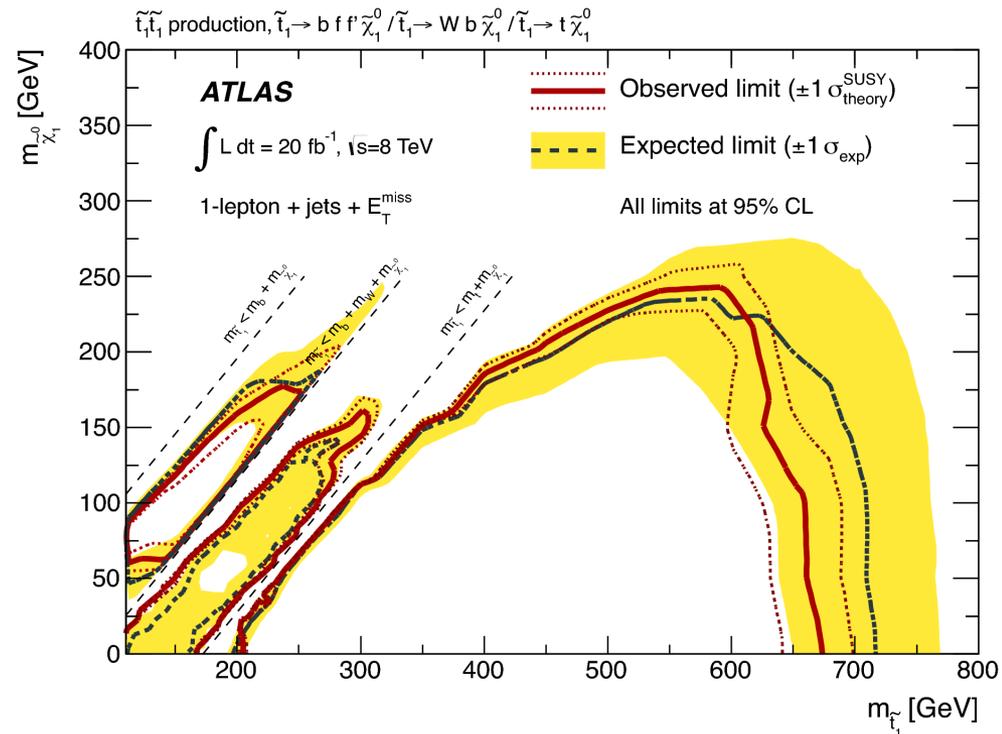
<http://arxiv.org/abs/arXiv:1407.1376>



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 encontramos sinais de partículas supersimétricas, mas podemos dizer que, se existirem, a sua massa não estará em certos intervalos

<http://arxiv.org/abs/1407.0583>



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?



As últimas novidades: Um novo Higgs?!

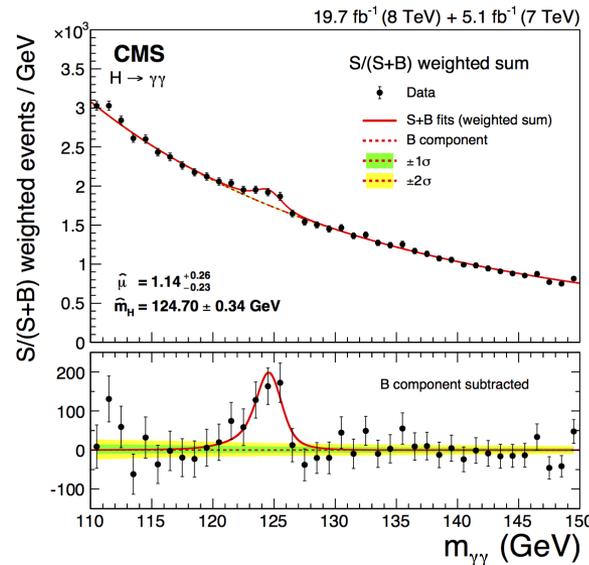


Em Dezembro de 2015 as experiências ATLAS e CMS do LHC compararam os dados recolhidos durante o ano.

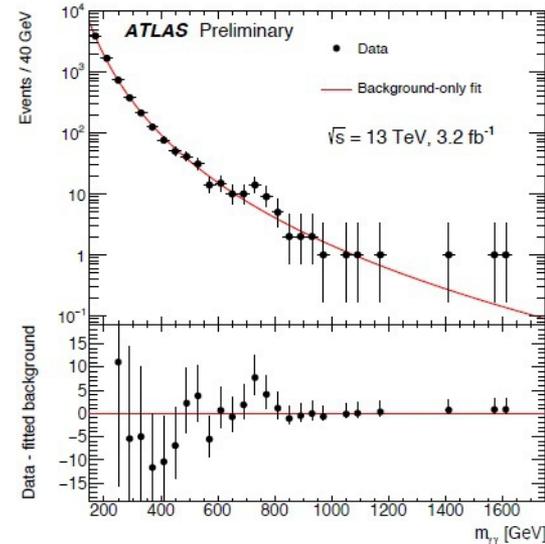
Tiveram uma pequena surpresa que se poderá revelar muito significativa...

Há um pequeno excesso de colisões onde são produzidos 2 fótons 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 fótons 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 fótons



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

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...

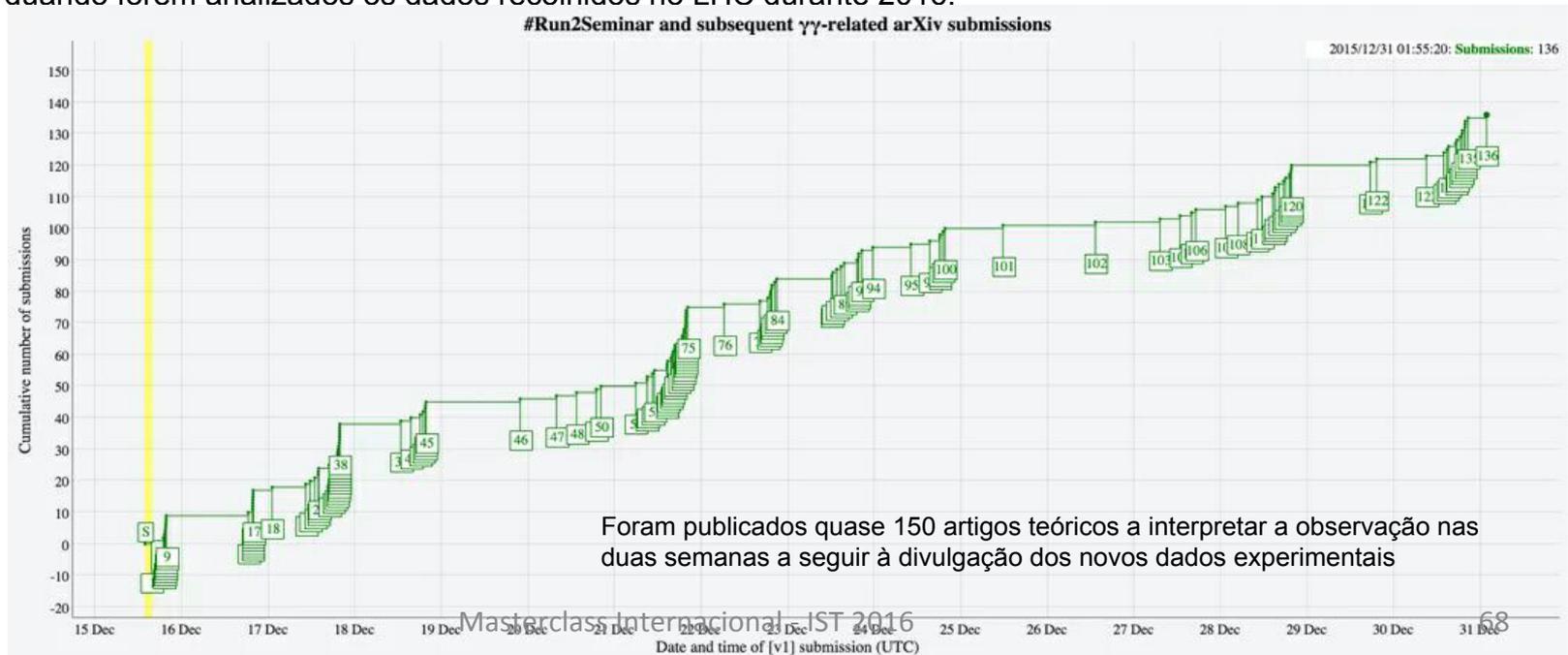
Este poderia ser o primeiro sinal da descoberta da supersimetria! Mais um dos cinco Higgs que se esperam nessa extensão do Modelo Padrão.

Ou será um gravitão, a partícula hipotética que estaria ligada à gravidade? Ou será uma outra coisa inesperada...

Há muitas hipóteses. Em apenas duas semanas depois do anúncio dos resultados, foram publicados cerca de 150 artigos teóricos, que tentam interpretar esta observação!

E pode ser apenas uma flutuação estatística!

Só o saberemos quando forem analisados os dados recolhidos no LHC durante 2016.

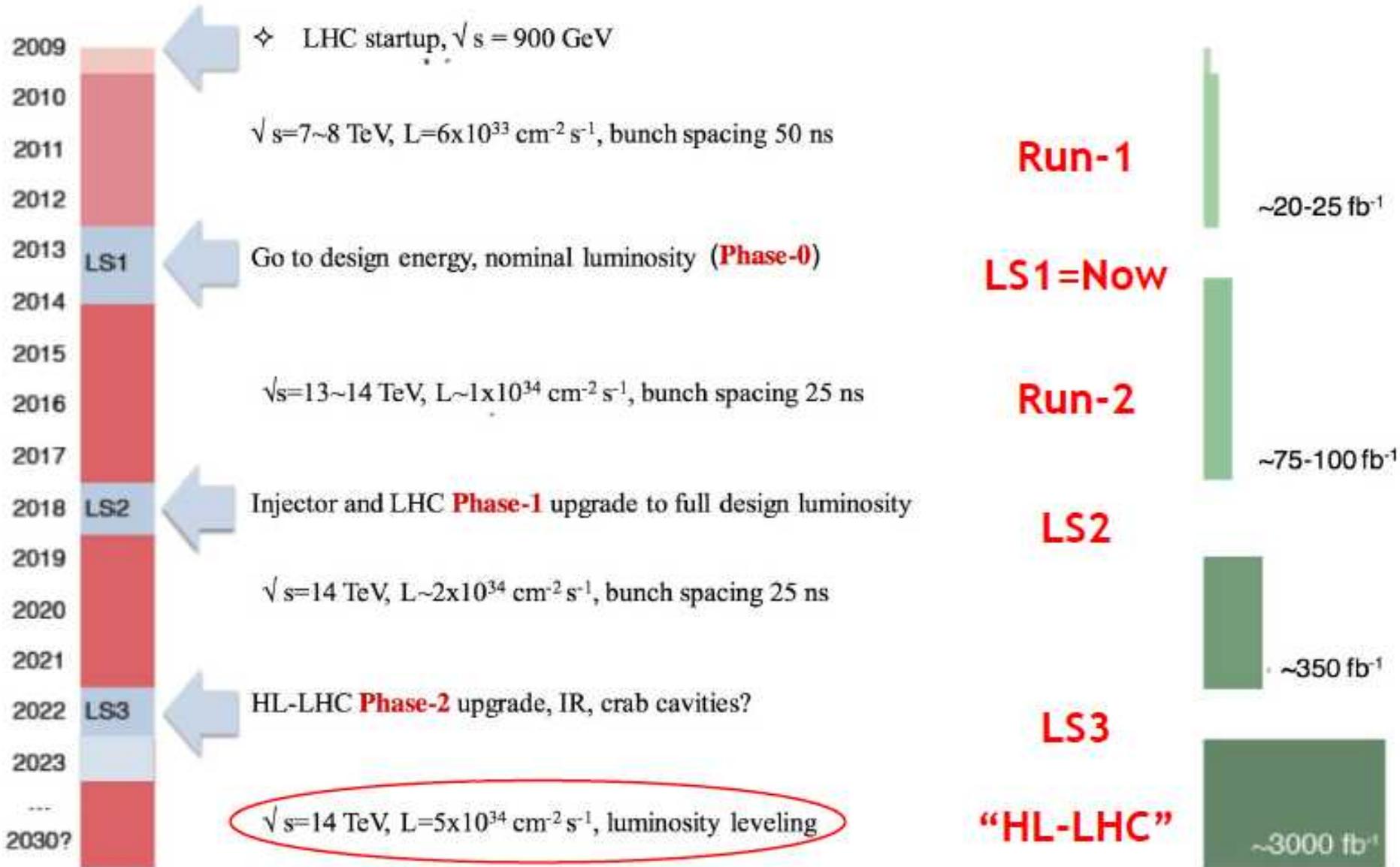


Conclusões:

- 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
 - Incluindo Portugal!!!
- 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 ?
 - Supersimetria?
 - Matéria escura? Energia Escura ?
 - Mini-Buracos negros? Gravitação quântica?
 - Qualquer coisa de completamente inesperado?

E agora ?

The landscape in the next decade(s)



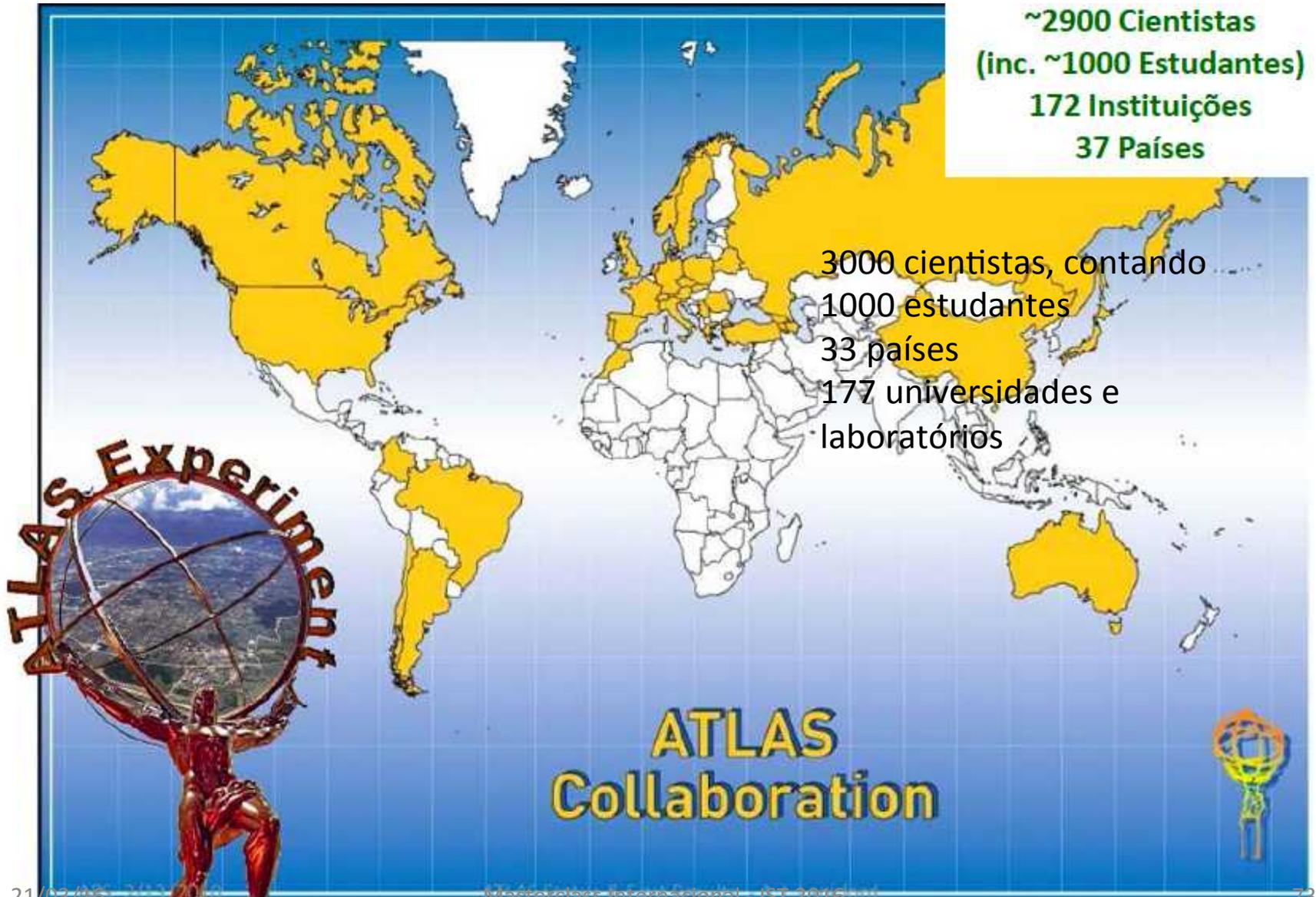
Perguntas?



Bonus slides



Colaboração verdadeiramente global!



Tomada de dados LHC

de eventos

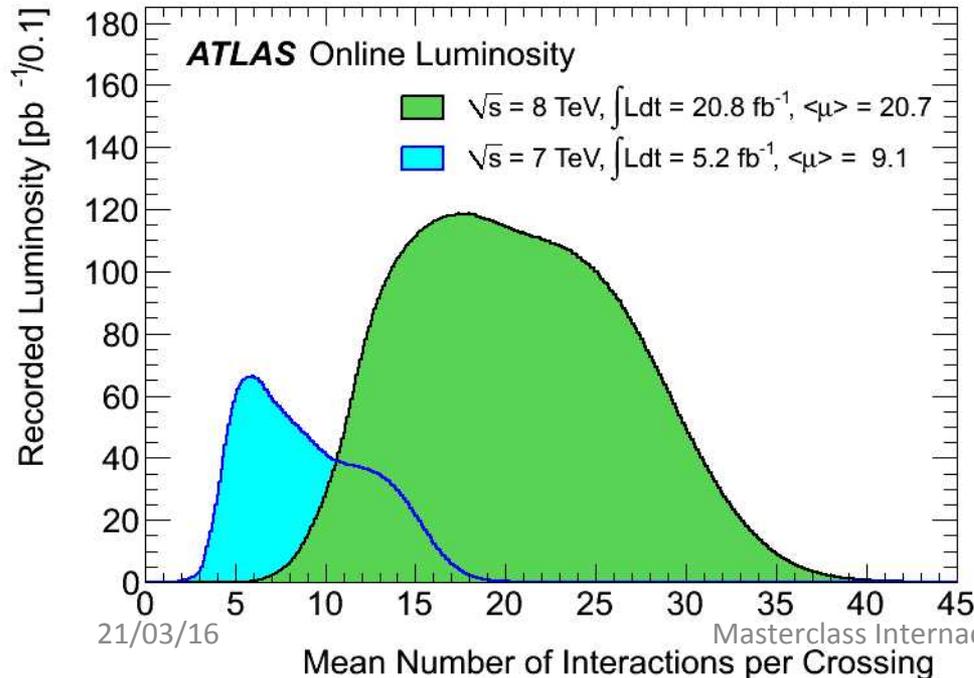
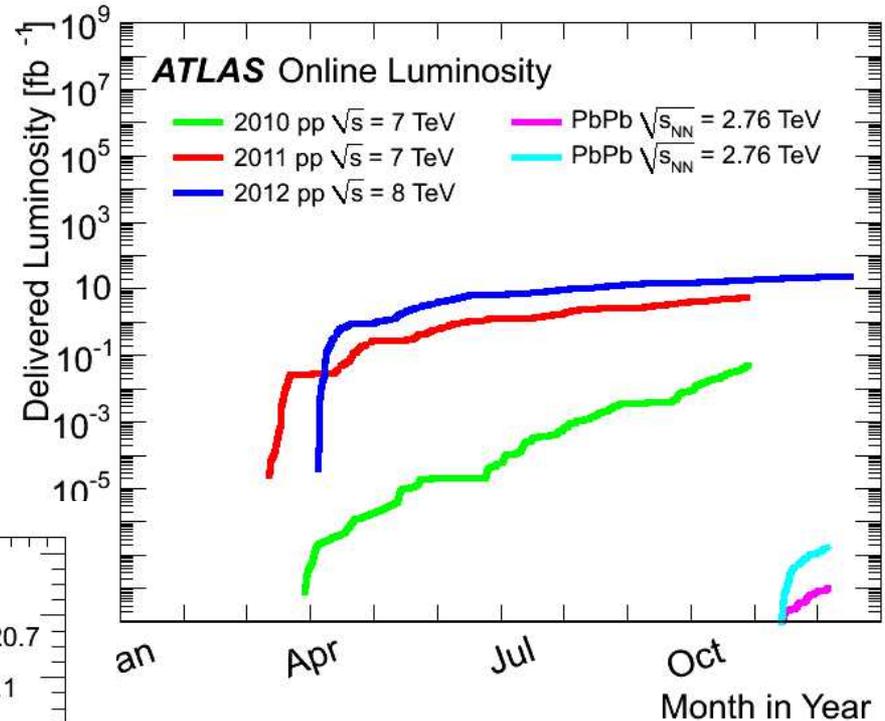
Secção eficaz
(secção de choque)

$$N = L \times \sigma$$

Luminosidade integrada
em femtobarn-1

barn = b = unidade de área

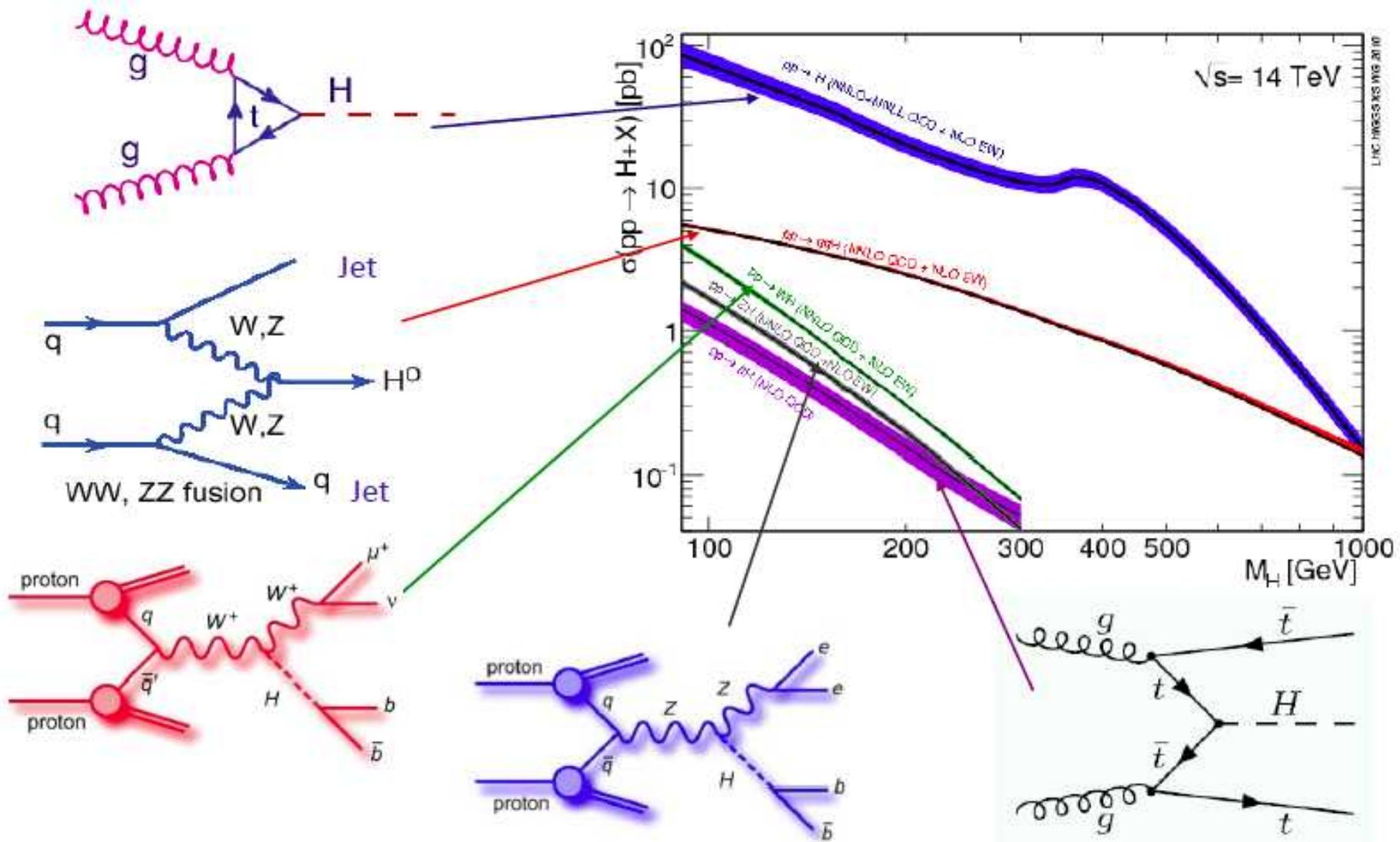
1 fb = 10⁻¹⁵ b = 10⁻³⁹ cm²



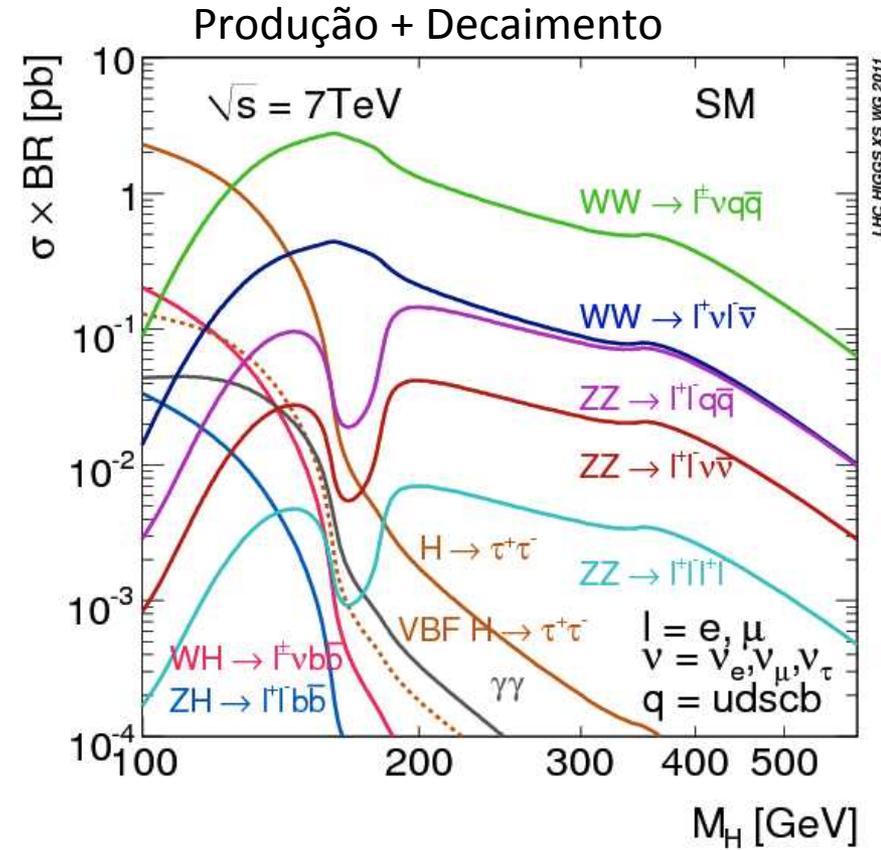
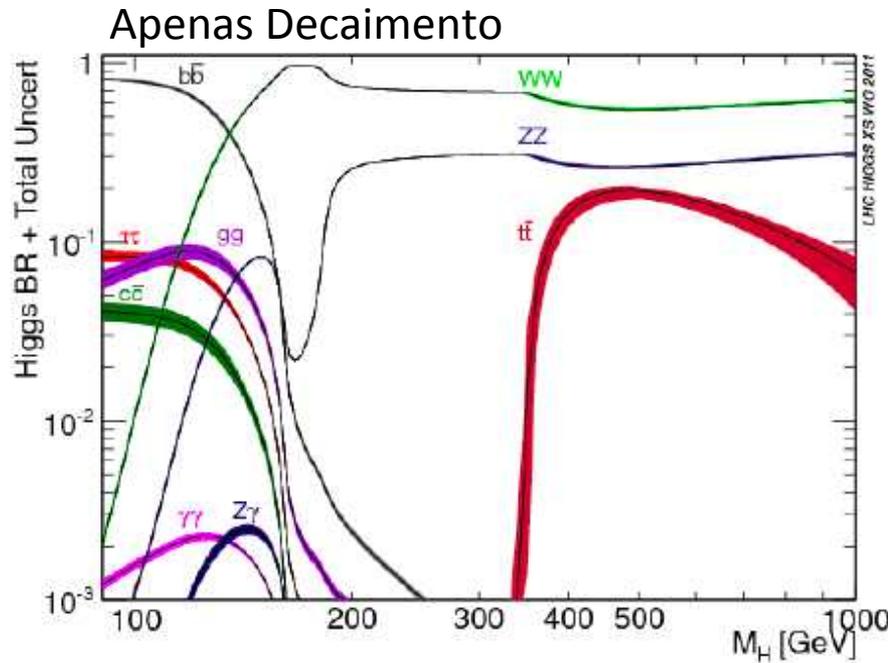
desempenho excepcional do LHC:
a intensidade dos feixes
continua sempre a aumentar

aumenta também o número médio
de colisões por cruzamento de feixes

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: $\gamma\gamma, ZZ$

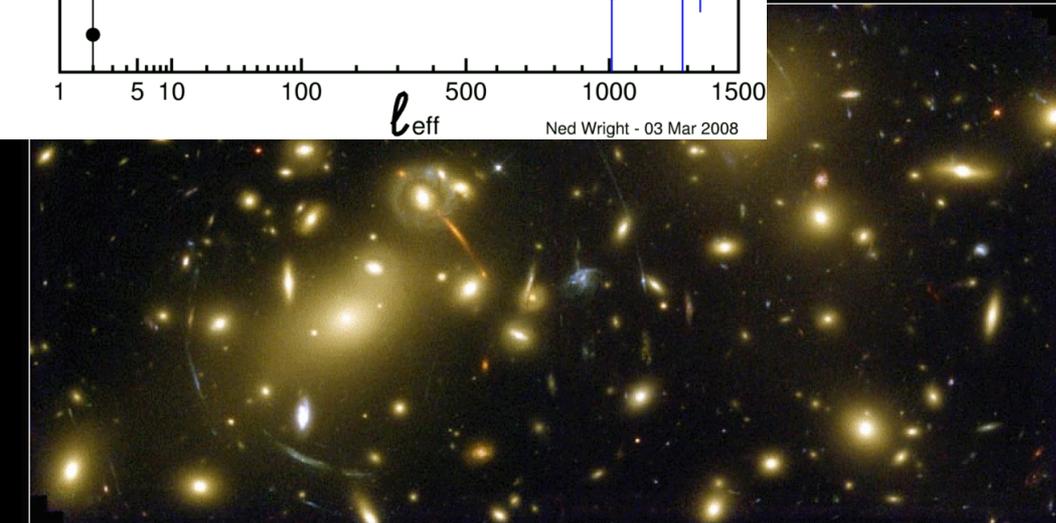
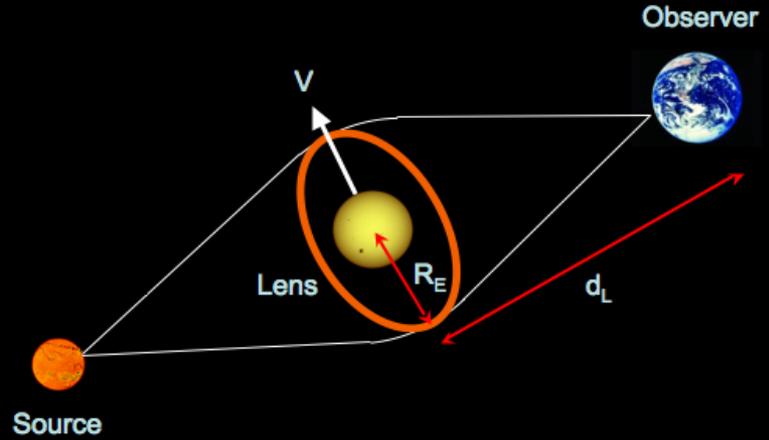
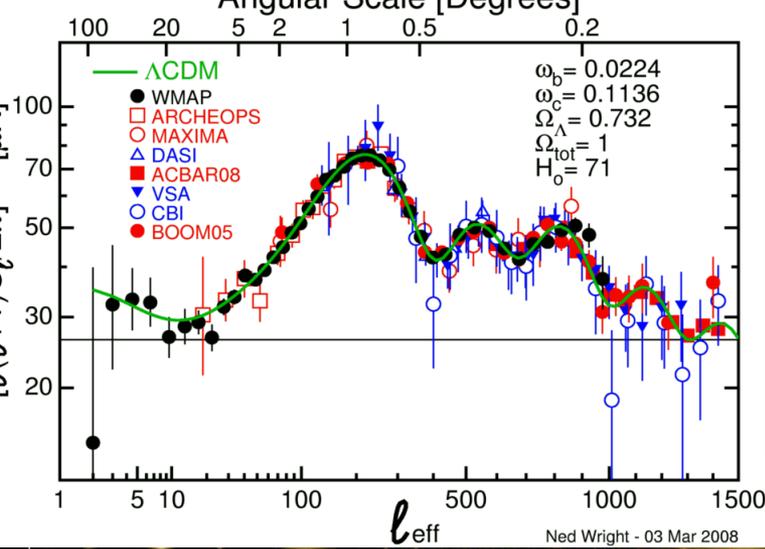
Os modos (canais) mais intensos podem não ser os mais fáceis, devido ao ruído de fundo (outros processos com o mesmo padrão).





Is this the
right boson?
Are there
more?

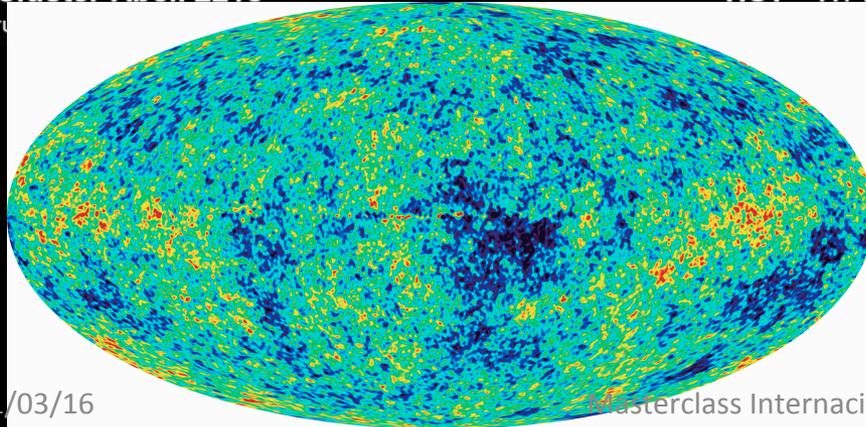
Só o começo!!



Galaxy Cluster Abell 2218

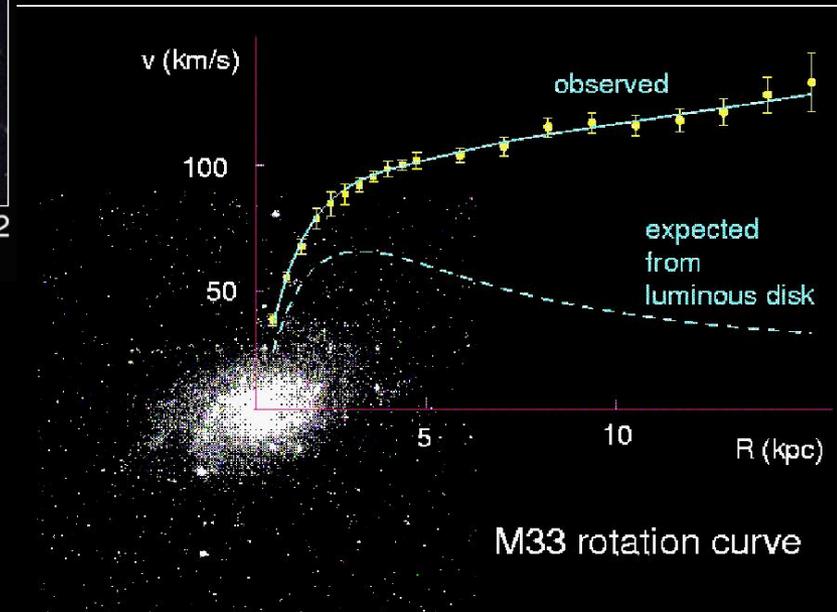
HST • WFPC2

NASA, A. Fr...

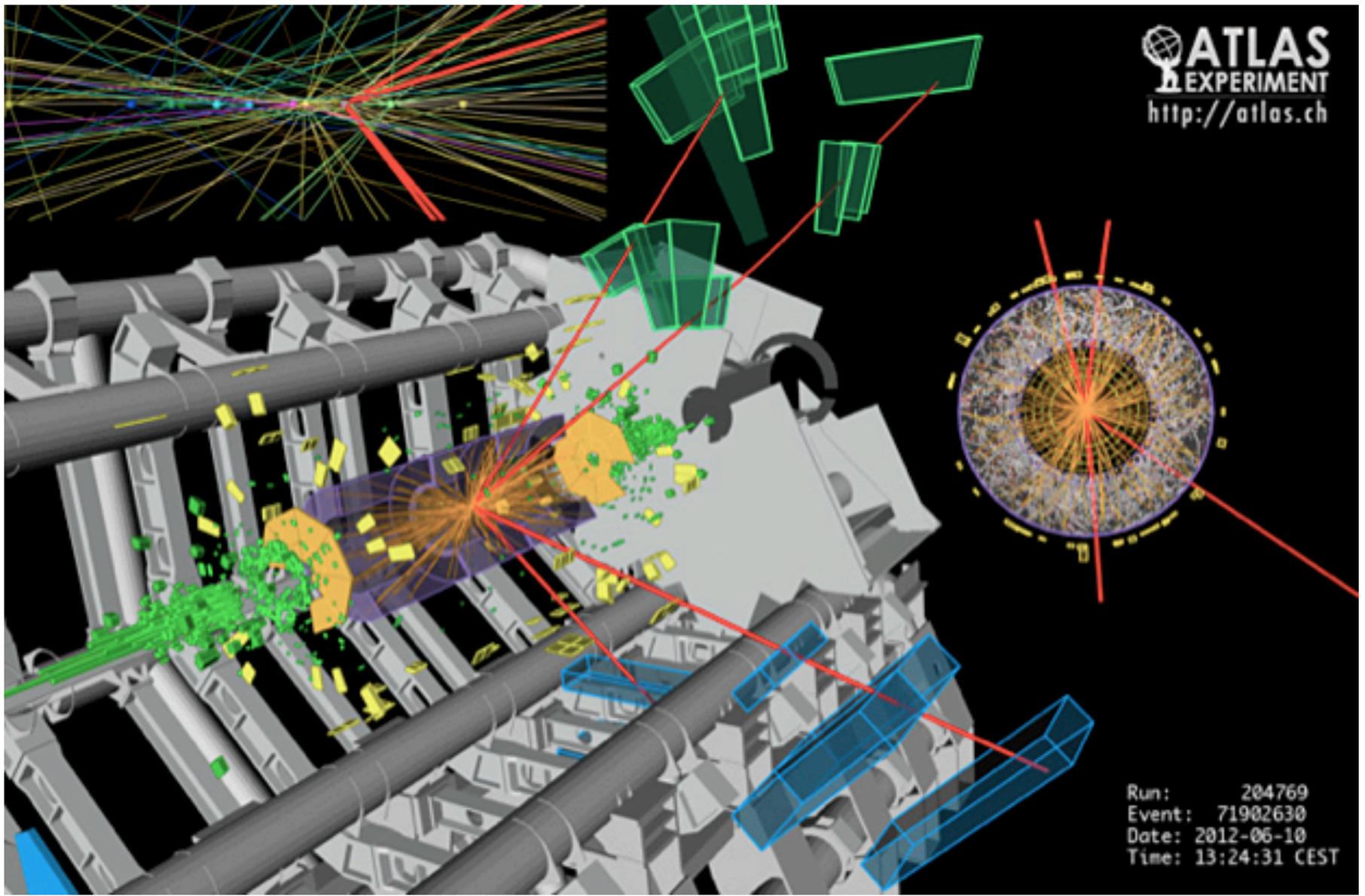


21/03/16

Masterclass Internacional - IST 2016

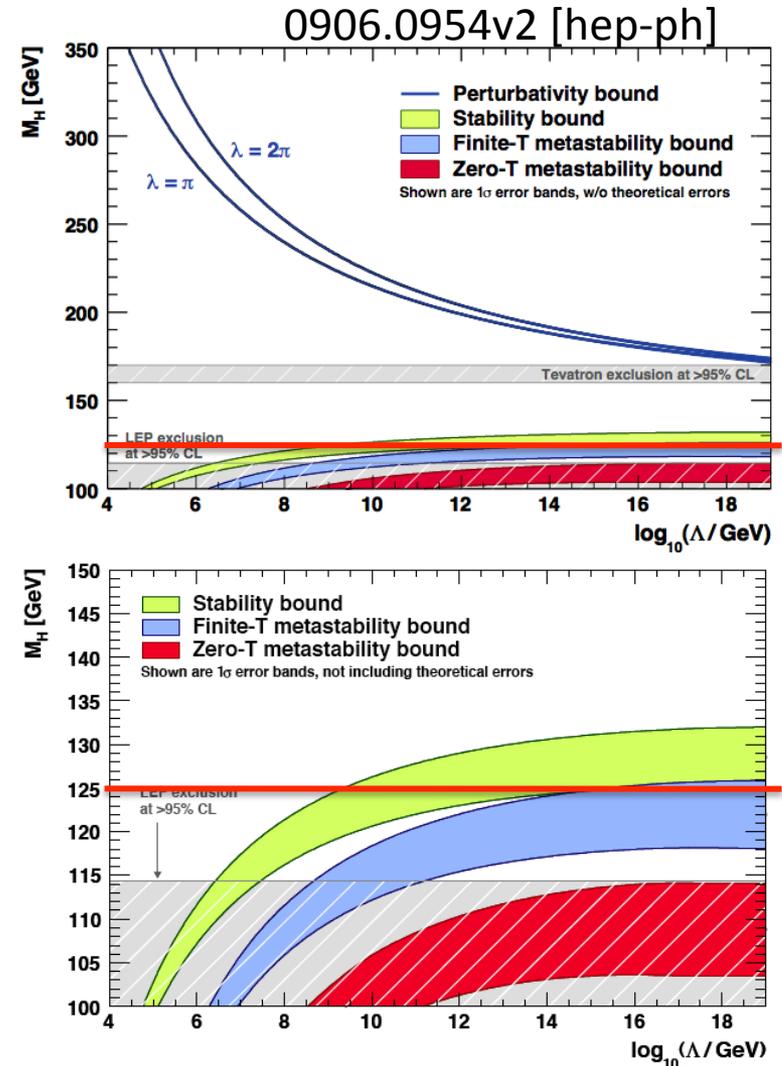


79



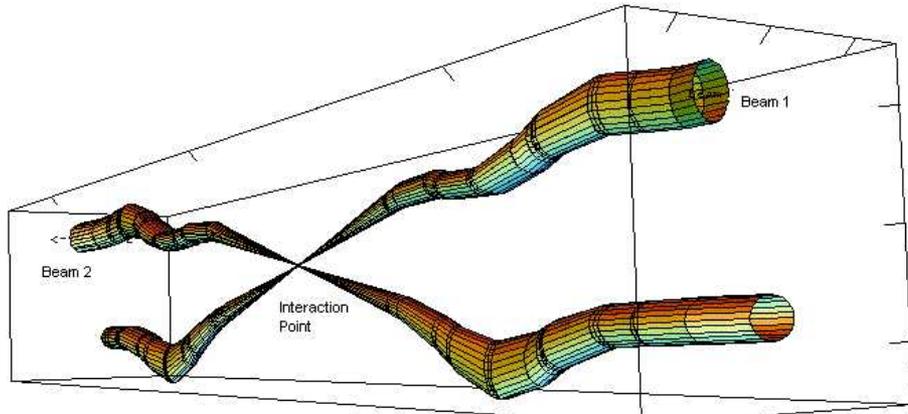
But there is more...

- 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

BLACK HOLE EXPERIMENT GOES DRAMATICALLY WRONG:



Relative beam sizes around IP1 (Atlas) in collision

WWW.PHDCOMICS.COM © 2008

COLLISIONS VISITING CERN PART 1

ON A RECENT TRIP TO GENEVA, I GOT A TOUR OF CERN (THE EUROPEAN ORGANIZATION FOR NUCLEAR RESEARCH), HOME OF THE LARGE HADRON COLLIDER (LHC), THE WORLD'S LARGEST PARTICLE ACCELERATOR.

MY TOUR GUIDE, BENJOT, A PH.D. STUDENT FROM EPFL.

UH, SHOULD I BE WEARING A RADIATION BADGE TOO? NAH.

A PILED HIGHER AND DEEPER TALKS FROM THE ROAD!

IMAGINE TWO BEAMS OF PARTICLES TRAVELING AT 0.999 THE SPEED OF LIGHT...

EACH MADE OF PROTONS BUNCHED TOGETHER CARRYING THE EQUIVALENT ENERGY OF AN AIRCRAFT CARRIER AT 60 km/h AND SQUEEZED INTO AN AREA THE SIZE OF YOUR PINKY FINGER.

THE TWO BEAMS CIRCLE EACH OTHER AROUND A 27 km UNDERGROUND TUNNEL NEAR THE SWISS ALPS UNTIL...

...AN OPERATOR HITS A SWITCH AND THEY COLLIDE!

WHAT HAPPENS NEXT??

UH, WHO KNOWS?

BENJOT WORKS ON THE ENGINEERING SIDE OF THE LARGE PHYSICS EXPERIMENT.

WE MAKE SURE IT ALL WORKS, THEN IT'S UP TO THE SCIENTISTS.

IT'S A COMPLEX AND HIGH-STAKES TASK:

PROTONS ARE CREATED AND THEN ACCELERATED BY SEVERAL STAGES OF SYNCHROTRONS...

...WHICH GROUP THE PROTONS IN BUNCHES OF 10¹¹ PARTICLES...

BEFORE INJECTING THEM INTO THE 27 km-LONG LHC RING, WHERE THEY ARE PUSHED THE FINAL STRETCH FROM 0.98 c TO 0.999 c

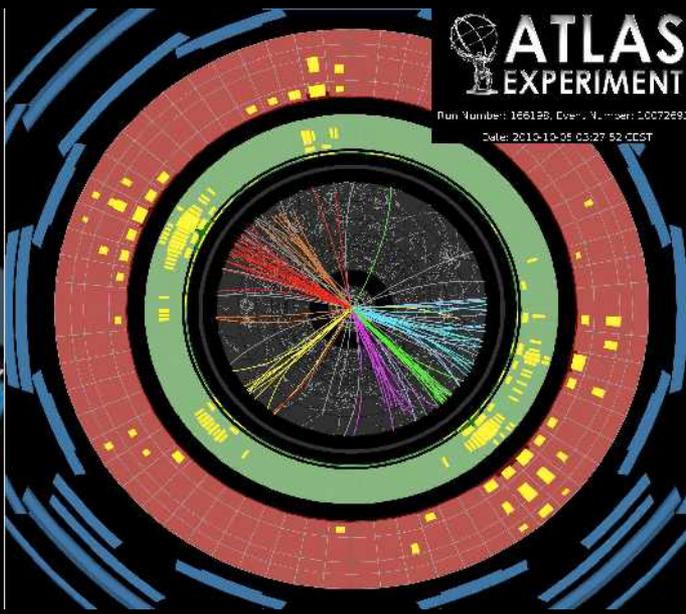
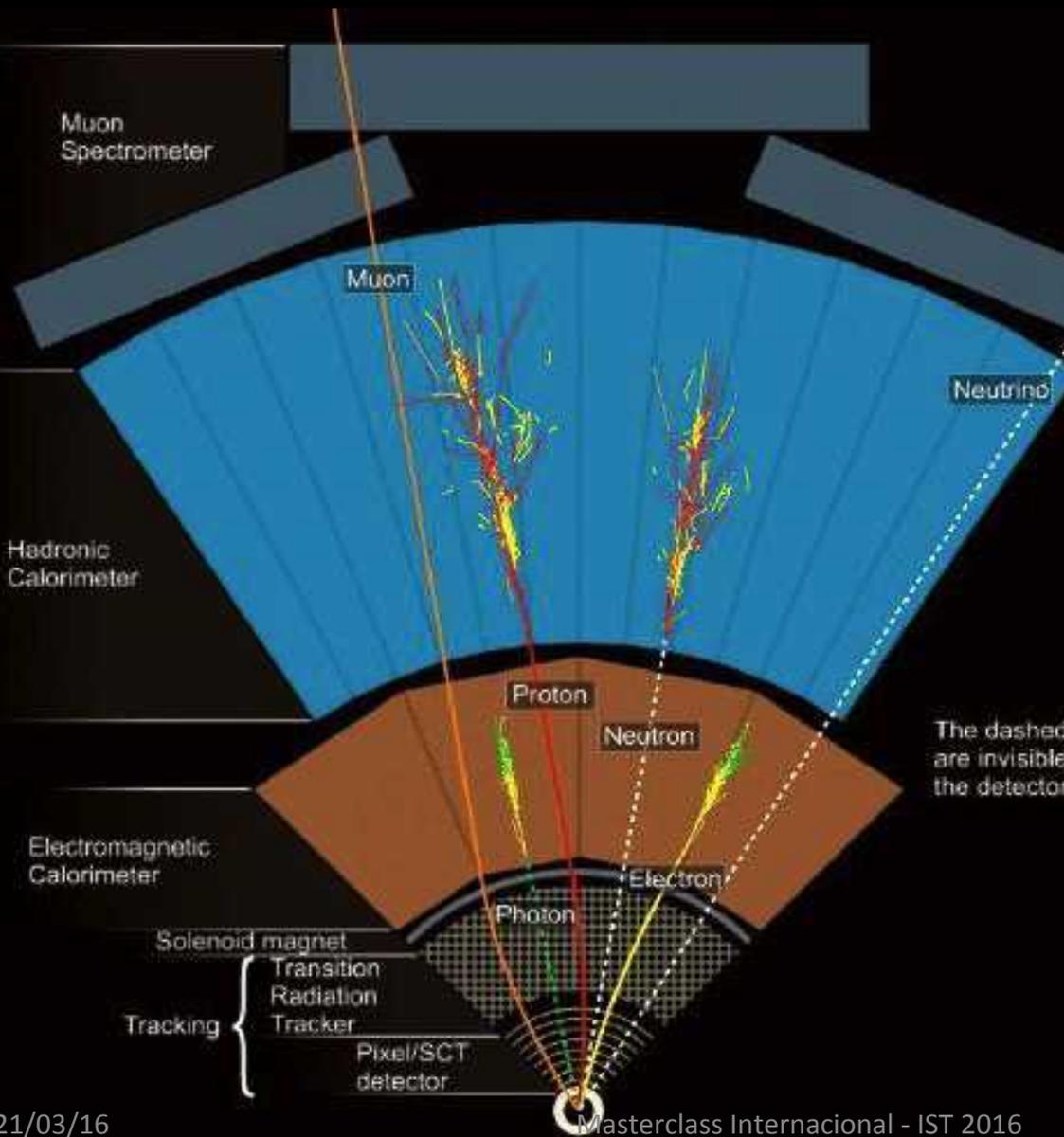
SUPER-CONDUCTING MAGNETS, COOLED BY LIQUID HELIUM, BEND THE BEAMS' PATH AND AND FOCUS THE SPEEDING PARTICLES.

EACH STEP IS CAREFULLY MONITORED AND CONTROLLED. THERE'S A REASON THE TUNNEL IS UNDERGROUND:

A MISGUIDED BEAM HAS ENOUGH ENERGY TO PUNCH A HOLE THROUGH TONS OF CONCRETE.

OOPS.



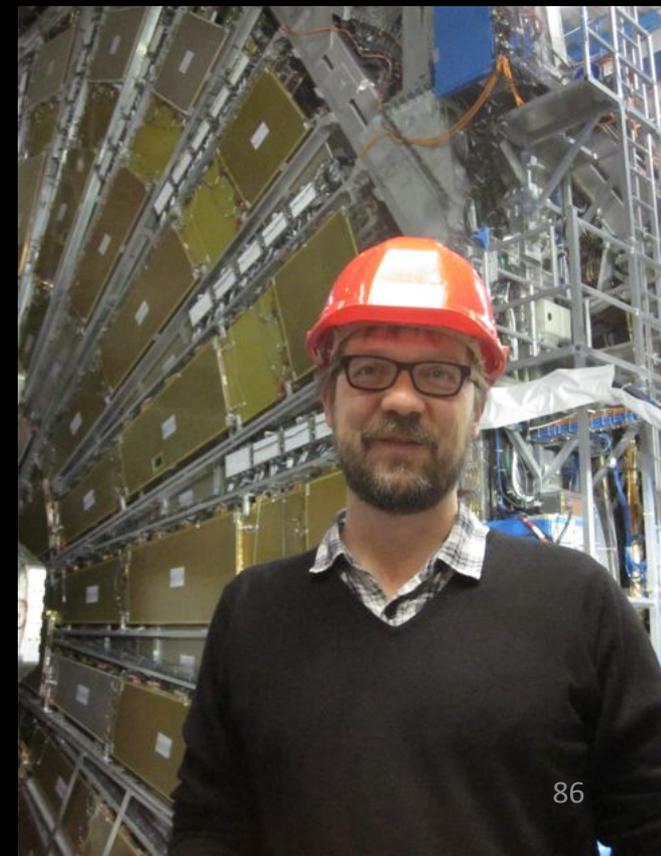
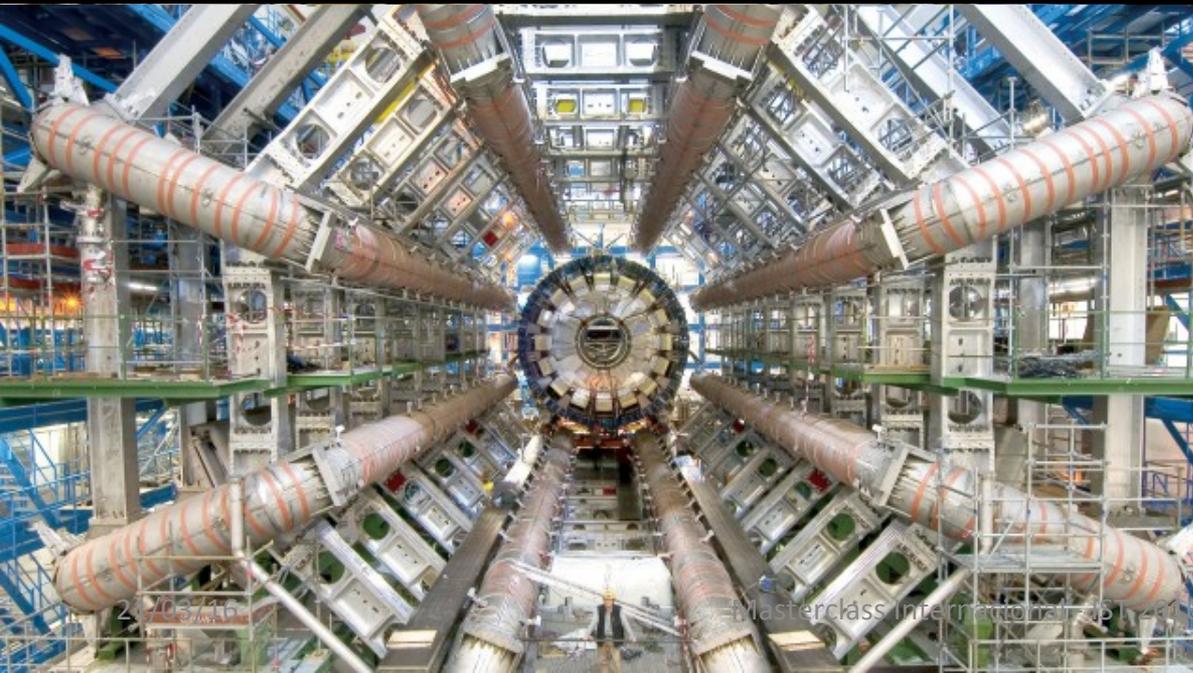
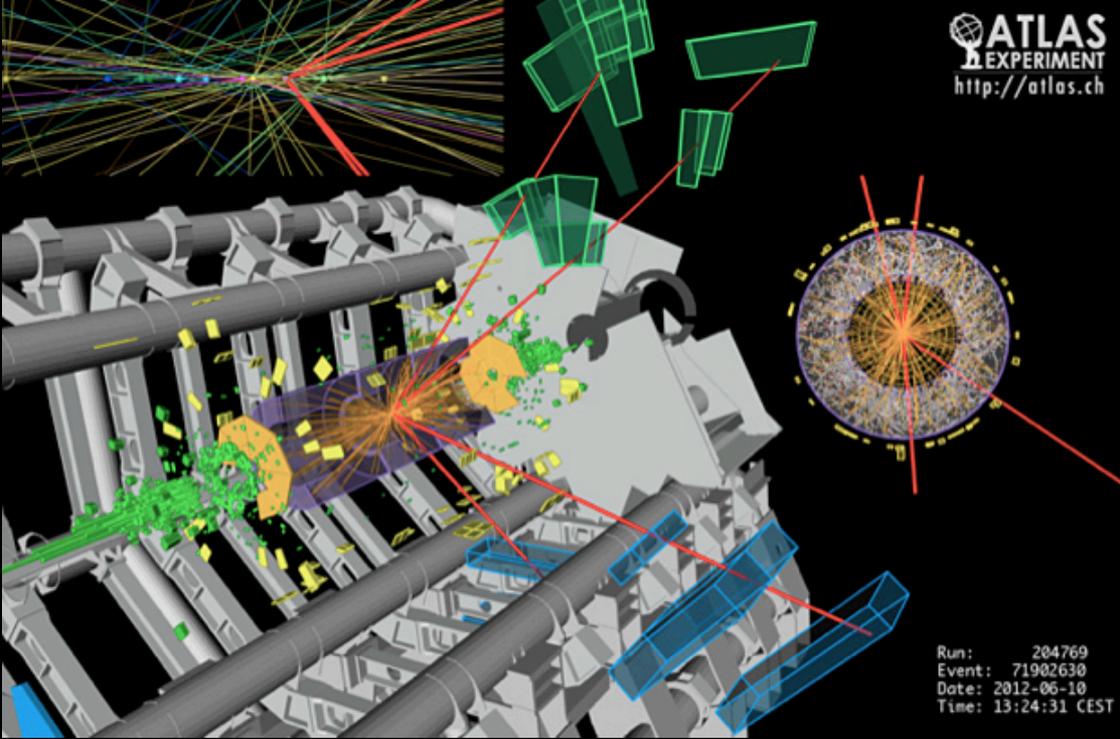


The dashed tracks are invisible to the detector

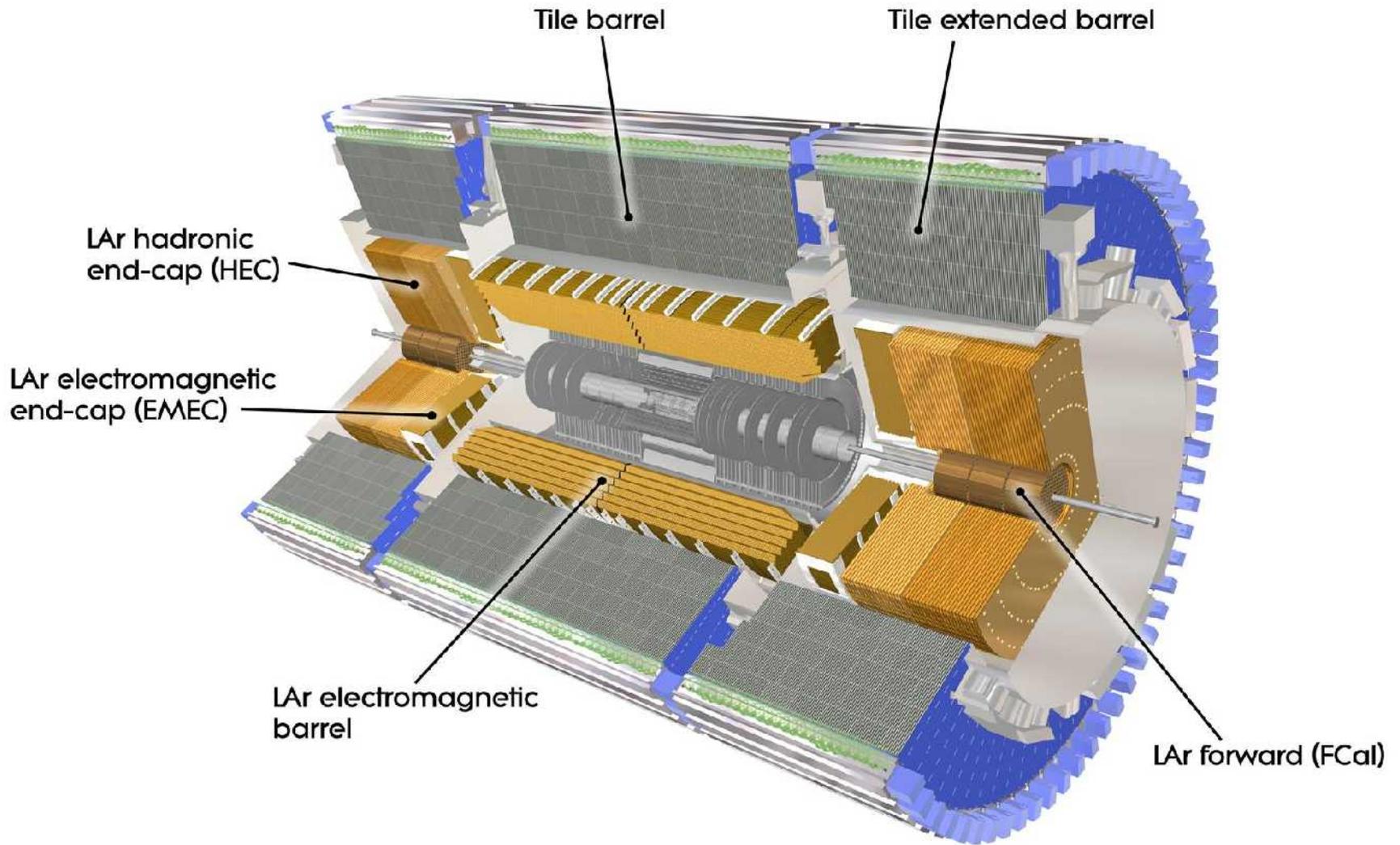


Barril Central do TileCal, 2004



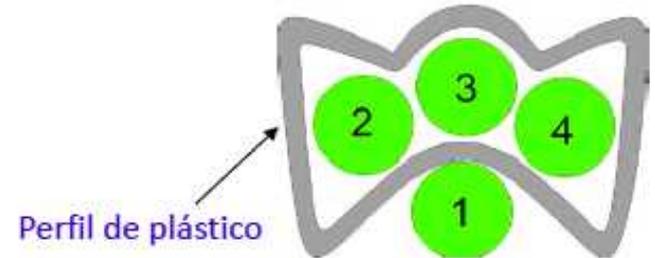


Os calorímetros de ATLAS



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

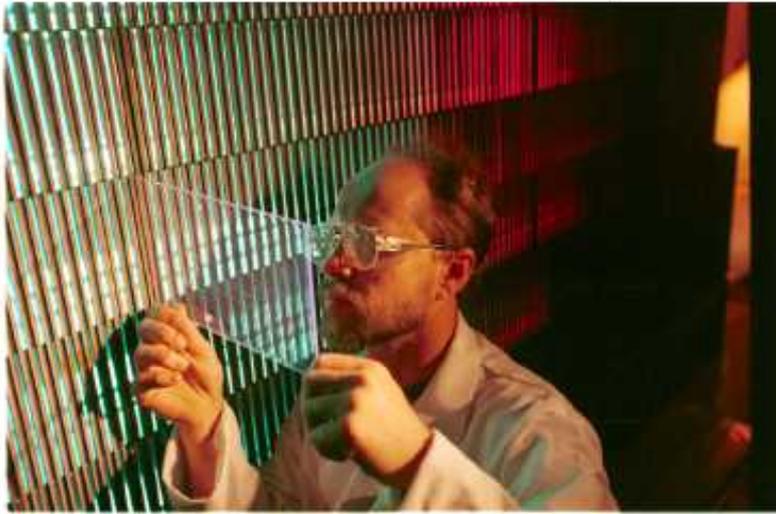
Fiável!

Vários anos de funcionamento em contínuo

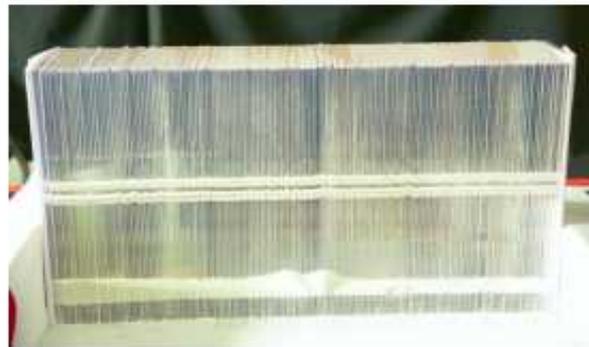


Cintiladores R&D

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



Cintiladores produzidos por injeção em moldes
Caras fotografadas através de cintiladores de 10cm de espessura



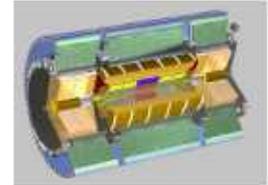
Cintiladores produzidos na Uminho I&D



Instrumentação do TileCal no CERN



Desenho e construção do TileCal

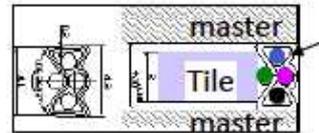


Cintiladores de Plástico



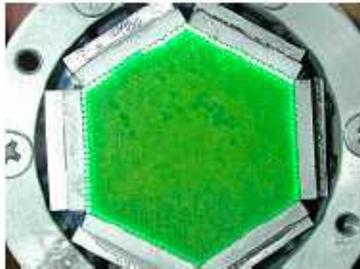
150 000

Perfis de plástico



fibras ópticas WLS
Ø 1 mm

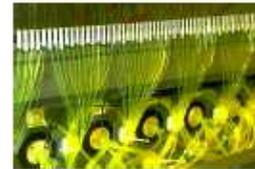
~2 metros de comprimento



Inserção de fibras
com robot



Desenho das células
e encaminhamento
das fibras



Suportes dos PMTs



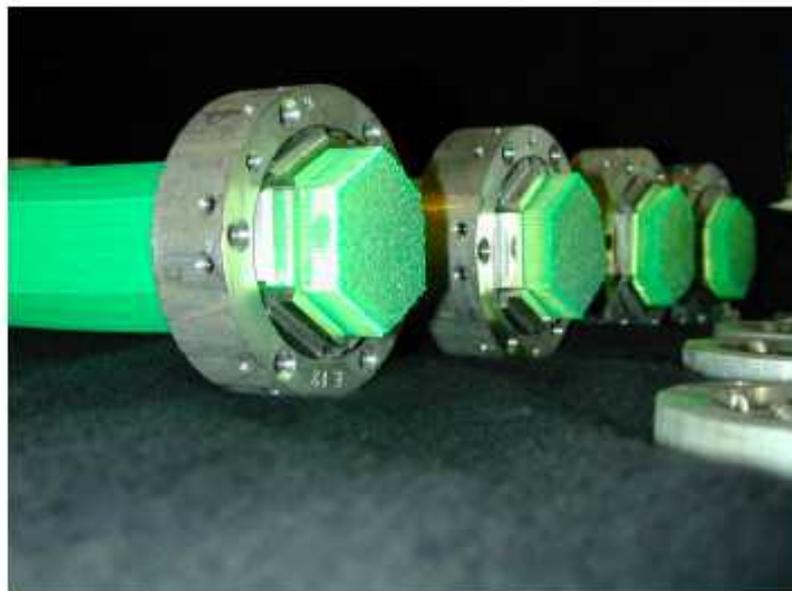
Instrumentação dos módulos



Test beam – certificação e calibração

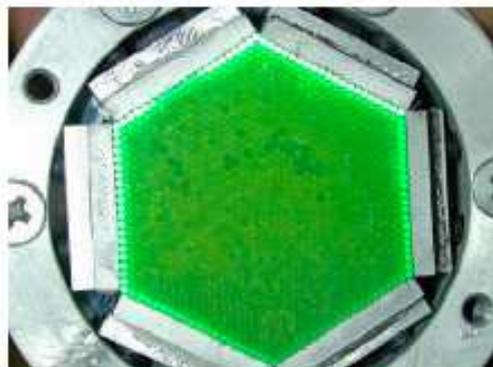


Corte, Polimento e Aluminização de fibras ópticas

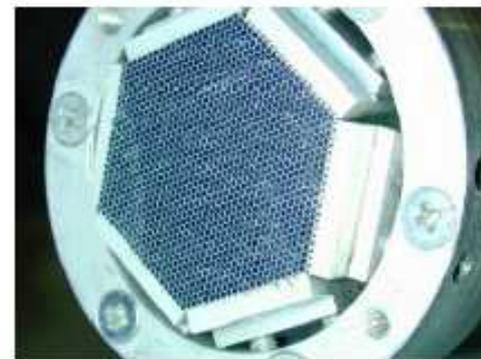


Molhos
com
1261 fibras

Polimento e corte

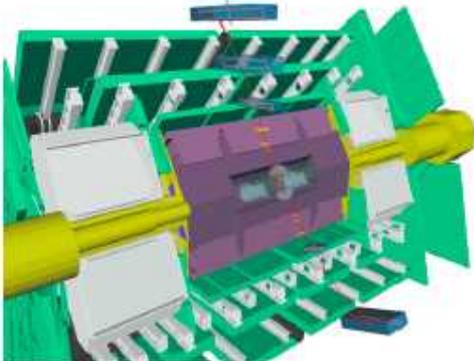
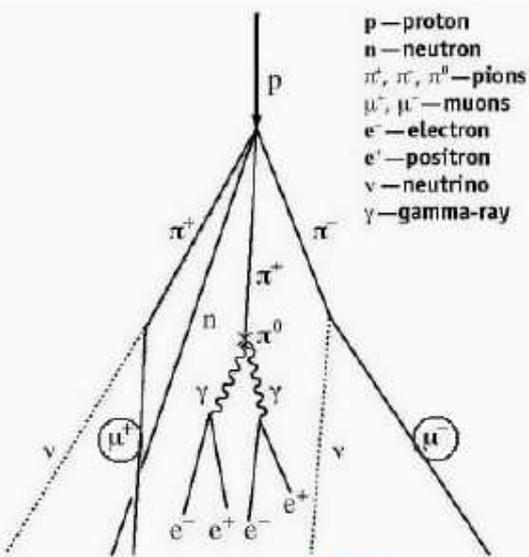


Aluminização

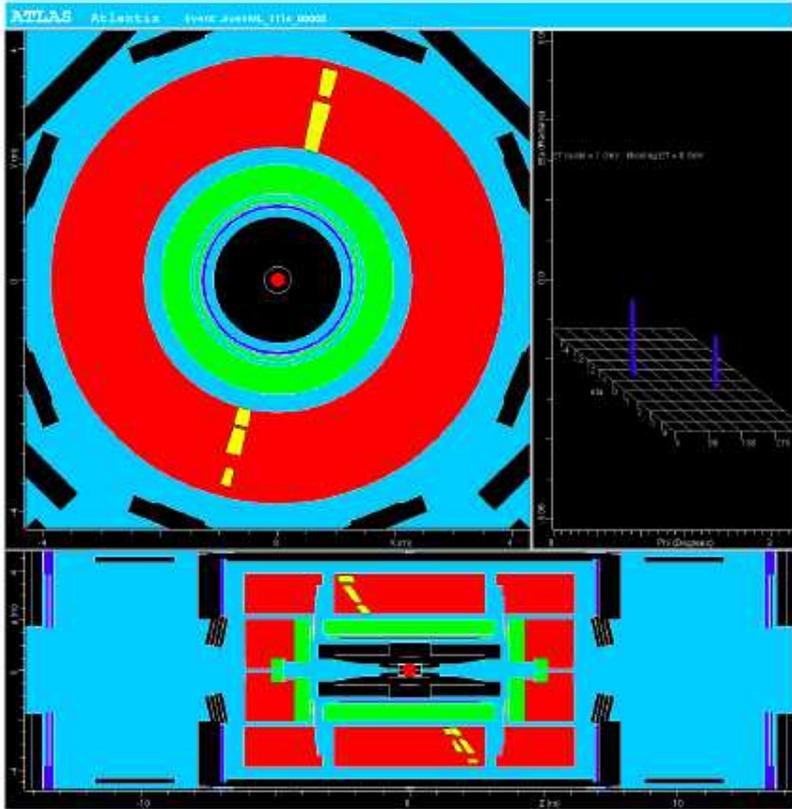


Antes do feixe estar pronto...

Certificação do Tilecal com muões cósmicos



Trajectória dos muões em ATLAS



Primeiros eventos em ATLAS

Nature, 2005



Uma aventura de mais de 20 anos !

