



Dulcideo Braz Jr

dulcideo@fisicamoderna.com.br

Um passeio virtual

pelo maior experimento científico de todos os tempos



www.cern.ch

LHC





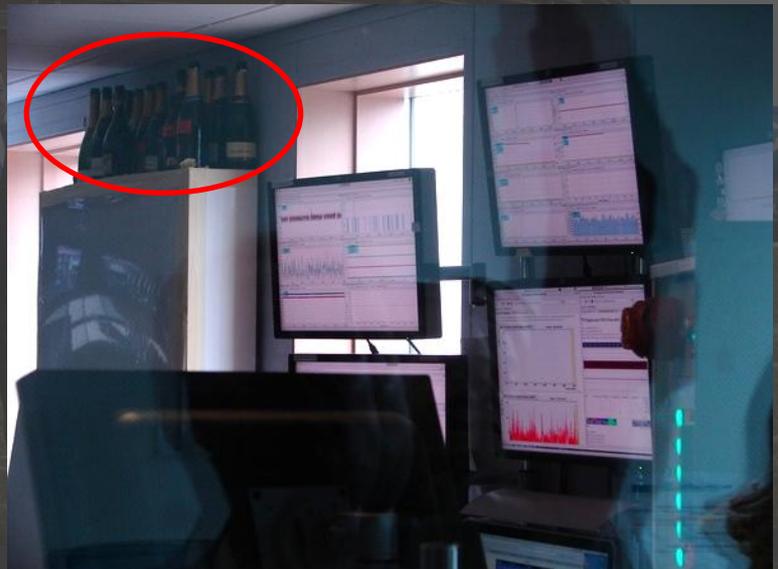
LHC

[A] Lugar mais frio da galáxia (- 271 °C) | [B] Um dos lugares mais quentes no Universo ($10 \cdot 10^6 \cdot 10^9$ °C) | [C] Mais vazio que o espaço exterior | [D] O maior número de eletroímãs “high tech” já construídos | [E] O maior e mais complexo instrumento eletrônico do planeta

ATLAS



CMS



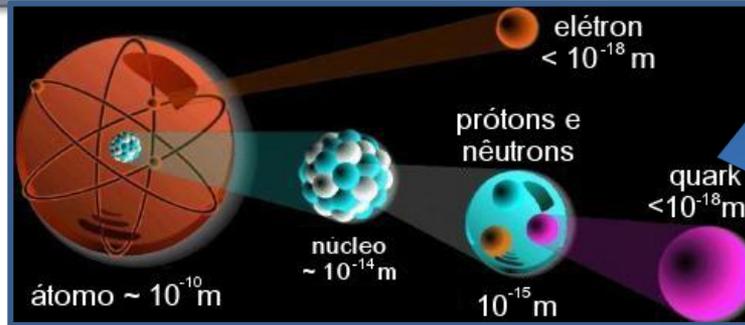
CERN CONTROL CENTRE





Aceleradores de Partículas

Para que servem?



Como podemos ver/estudar objetos em escalas de tamanho tão diferentes?



Ano	Energia	Escala "observada"
1930	~ 100 keV	10^{-11} m
1950	~ 100 MeV	10^{-14} m
1970	~ 100 GeV	10^{-17} m
1990	1 TeV	10^{-18} m
2010	~ 10 TeV	10^{-19} m
2030	?	?





Força de Lorentz

$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B}$$

A blue arrow points to the left-hand side of the equation. A red arrow labeled F_{el} points to the $q\vec{E}$ term. A blue arrow labeled v points to the $q\vec{v} \times \vec{B}$ term. Two large blue arrows point downwards from the equation to the descriptions of the electric and magnetic forces.

O campo elétrico não é estático. Cavidades de RF fazem as partículas carregadas “surfarem” na crista de uma onda.

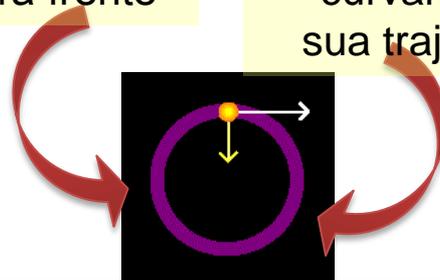


Força elétrica

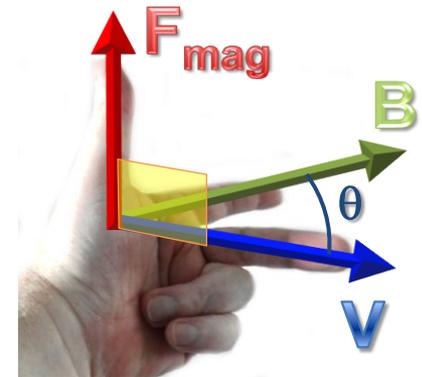
Empurra a partícula “para frente”

Força magnética

Puxa a partícula “de lado”, curvando a sua trajetória



REGRA DA MÃO ESQUERDA



$$qvB = m \frac{v^2}{r}$$

$$r = \frac{mv}{qB}$$



Como se chama...

... um octógono dentro do qual dois indivíduos trocam pancadas?

UFC

www.mma-brasil.com



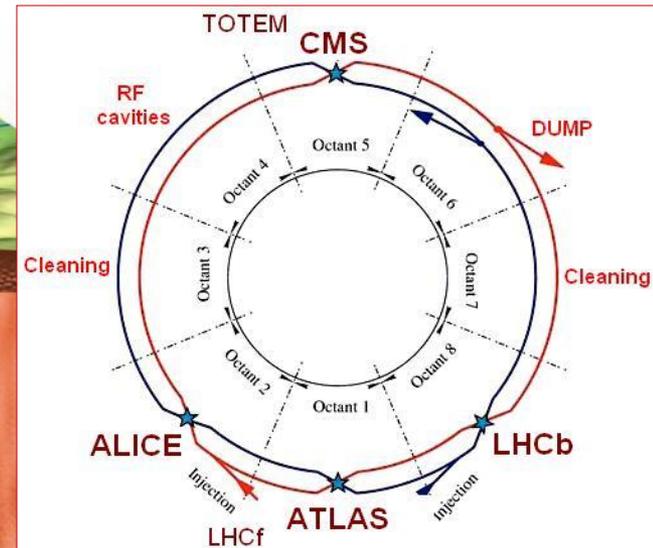
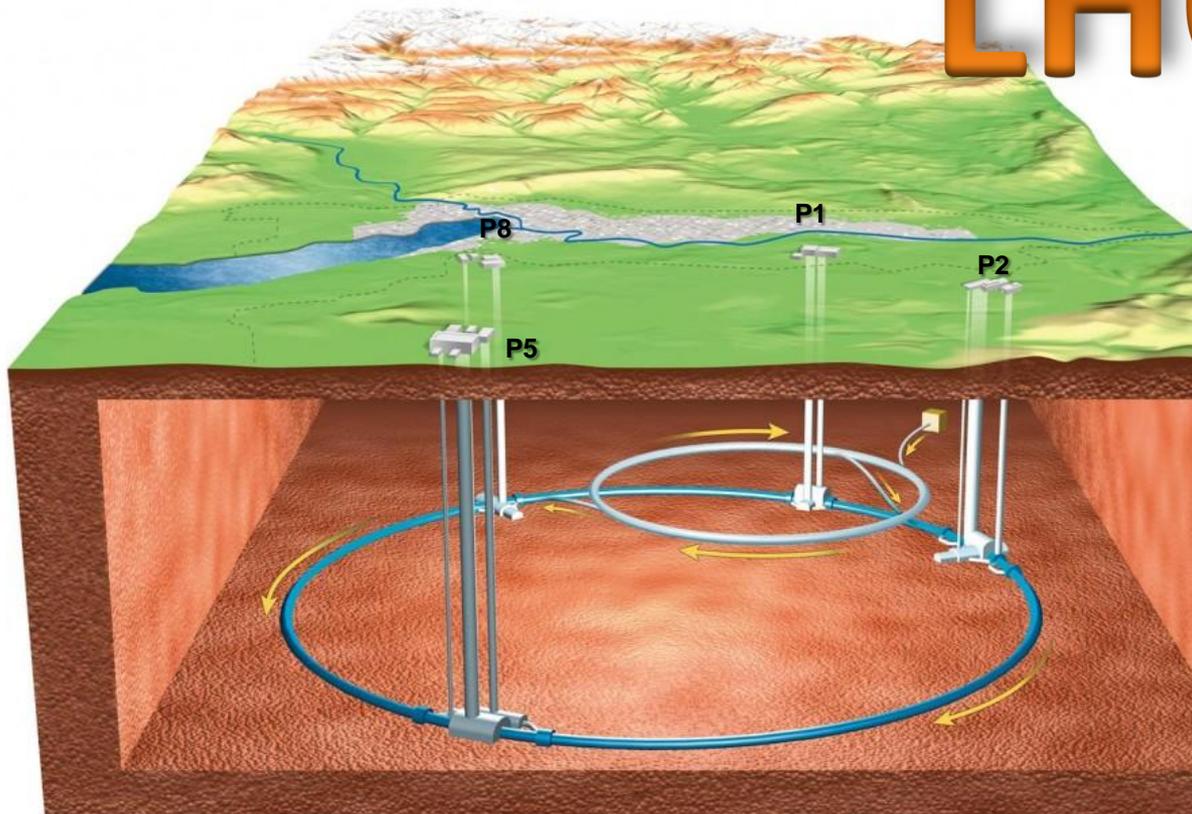


Como se chama...

... um octógono dentro do qual dois indivíduos trocam pancadas?

- “Anel” de 27 km (a rigor, 26659 m), a 100 m de profundidade.
- O mesmo túnel do LEP (Large Electron-Positron Collider) que operou entre 1988 e 2000, só que com energias aproximadamente 70 vezes menores .

LHC



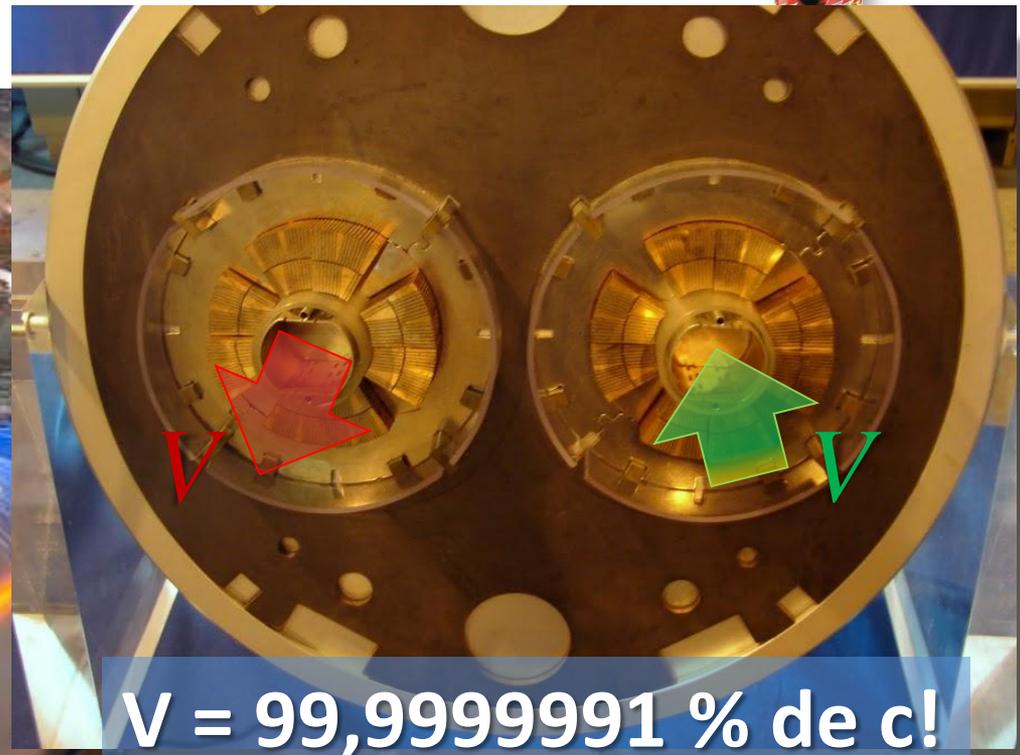
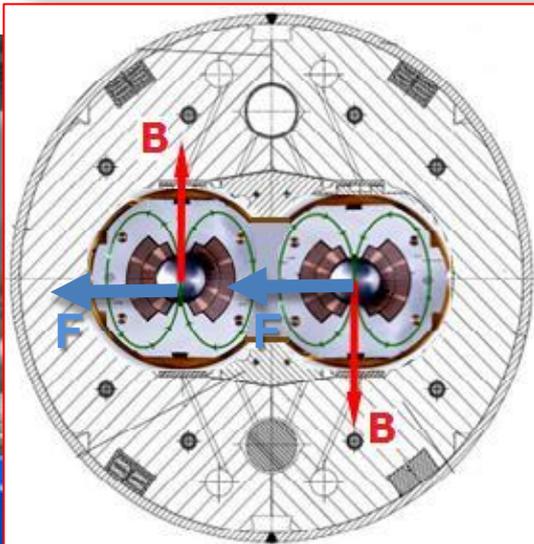


Rápido mesmo!

Quantos prótons? A que velocidade? Quantas voltas/s no anel?

• Cada um dos dois feixes terá 2808 “pacotes” com cerca de $1,15 \cdot 10^{11}$ prótons/pacote, ou seja, $\sim 3,2 \cdot 10^{14}$ prótons/feixe. Os feixes viajam em sentidos opostos dentro do anel com velocidade $V = 0,999999991c$.

$$\Delta S = V \cdot \Delta t \Rightarrow N \cdot 27km \cong 0,999999991 \cdot 300000 \frac{km}{s} \cdot 1s \Rightarrow N \cong 11000 \text{ voltas / s}$$



$V = 99,9999991 \% \text{ de } c!$



3 (dos 5) dados incríveis sobre o LHC

[A] Lugar mais frio da galáxia (- 271 °C)

[B] Um dos lugares mais quentes no Universo ($10 \cdot 10^6 \cdot 10^9$ °C)

[C] Mais vazio que o espaço exterior

[D] O maior número de eletroímãs “high tech” já construídos

[E] O maior e mais complexo instrumento eletrônico do planeta



- Cerca de **9600 eletroímãs** produzem campos magnéticos que guiam e focalizam os prótons no anel, funcionando como “lentes magnéticas”. [D]
- Estes campos magnéticos podem chegar a **8,3 T**, da ordem de 10^5 vezes o campo magnético natural da Terra ($0,25 \cdot 10^{-4} \text{ T} = 0,25 \text{ G}$)
- Cabos feitos com fios de **espessura 0,007 mm**, mais finos que um fio de cabelo, e com comprimento total suficiente para **5 viagens** de ida e volta da Terra ao Sol com uma “sobra” para mais algumas viagens menores de ida e volta à Lua.
- Material **supercondutor**, liga de titânio e nióbio (**NbTi**) com $T_c = 10 \text{ K}$ para suportar correntes elétricas de quase **12000 A** sem Efeito Joule. Refrigeração em dois estágios: nitrogênio líquido ($77\text{K} = -196^\circ\text{C}$) e hélio líquido ($1,9 \text{ K} = -271^\circ\text{C}$). [A]



Aceleradores de Partículas

Tubos de circulação dos prótons

3 (dos 5) dados incríveis sobre o LHC

[A] Lugar mais frio da galáxia (- 271 °C)

[B] Um dos lugares mais quentes no Universo ($10 \cdot 10^6 \cdot 10^9$ °C)

[C] Mais vazio que o espaço exterior

[D] O maior número de eletroímãs “high tech” já construídos

[E] O maior e mais complexo instrumento eletrônico do planeta



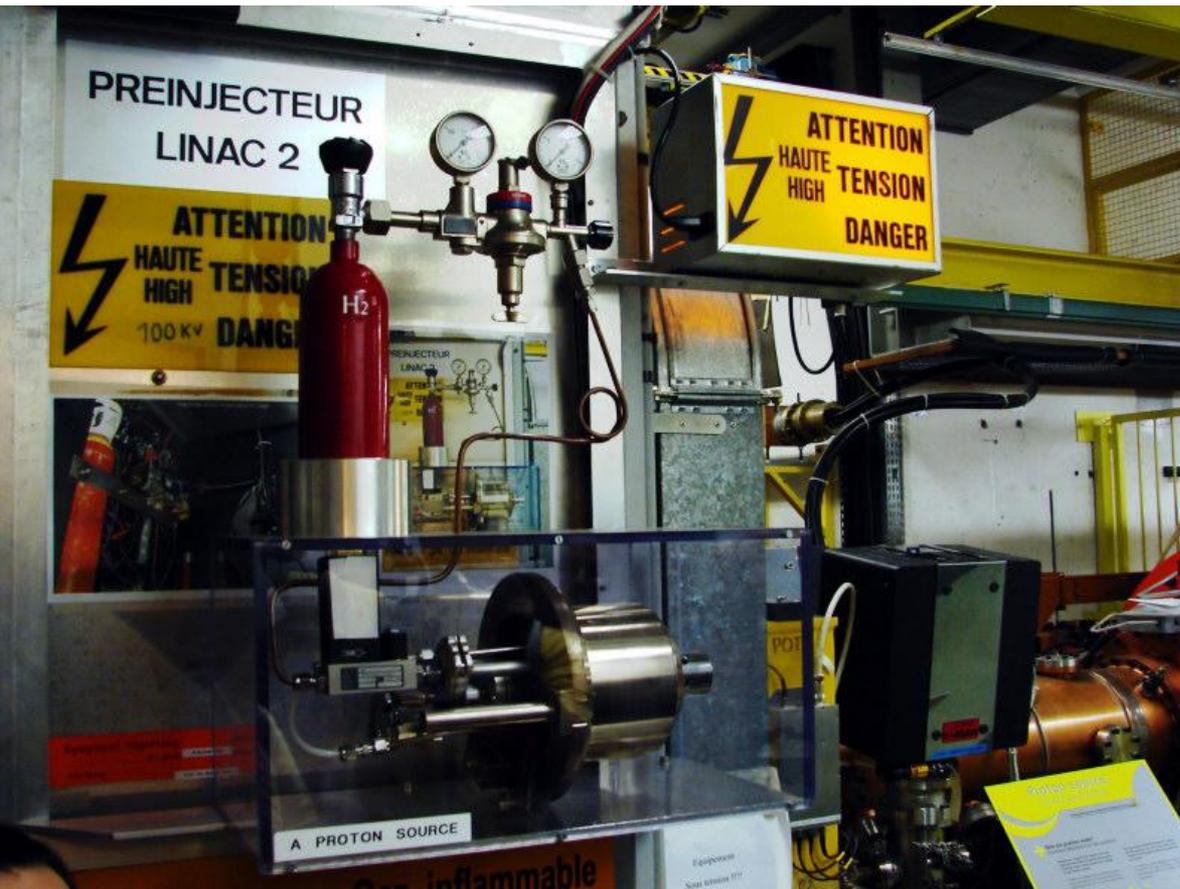
• Como já comentamos, os prótons no anel viajam com velocidade enorme ($V = 0,999999991c$). Nenhum obstáculo, por menor que seja, pode estar no caminho destas partículas que não podem perder a energia que ganharam! Portanto, na tubulação por onde correm é feito **vácuo**.

• A pressão interna nestes tubos de circulação de prótons é $p = 10^{-13}$ atm (10 vezes menor do que a pressão na superfície da Lua). Estes tubos são mais vazios que o espaço exterior. [C]



Onde os cientistas conseguem prótons para acelerar?

Tem prótons livres dando sopa por aí?

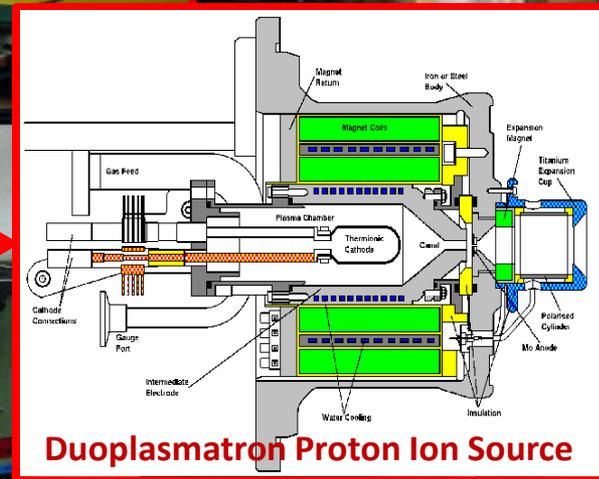
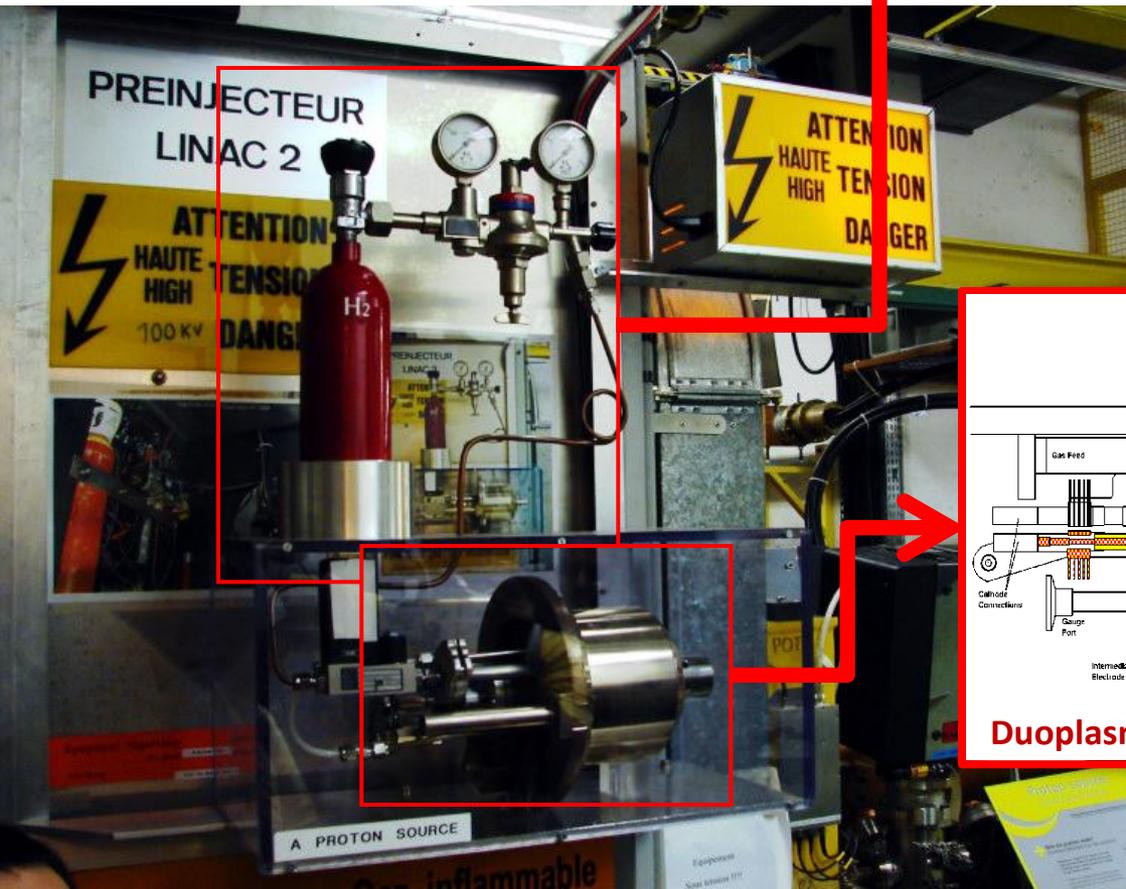




Onde os cientistas conseguem

Tem prótons

- Os prótons saem de uma garrafa contendo hidrogênio que é ionizado por uma descarga elétrica. “Simples”!



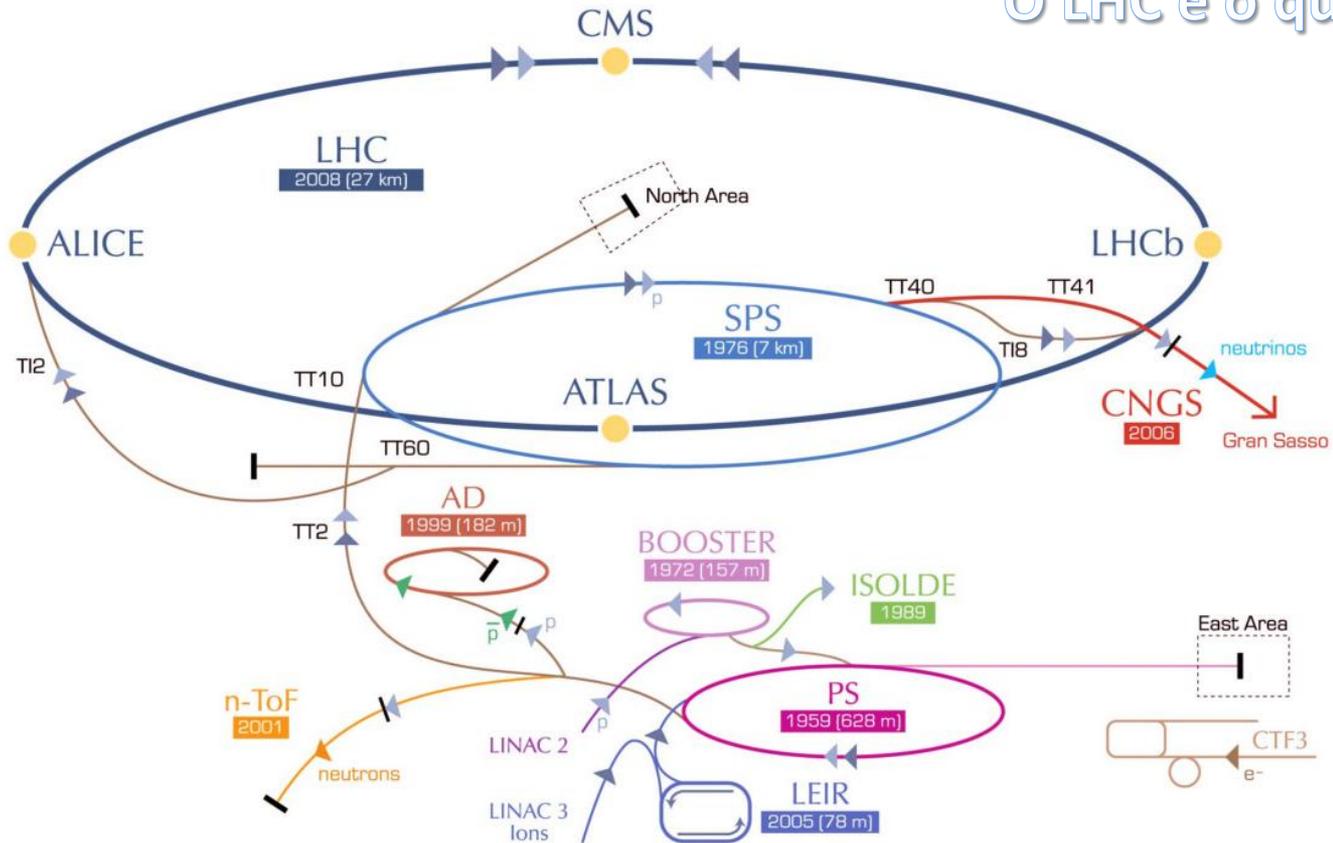


LINAC 2



O complexo de aceleradores do CERN

O LHC é o quinto estágio



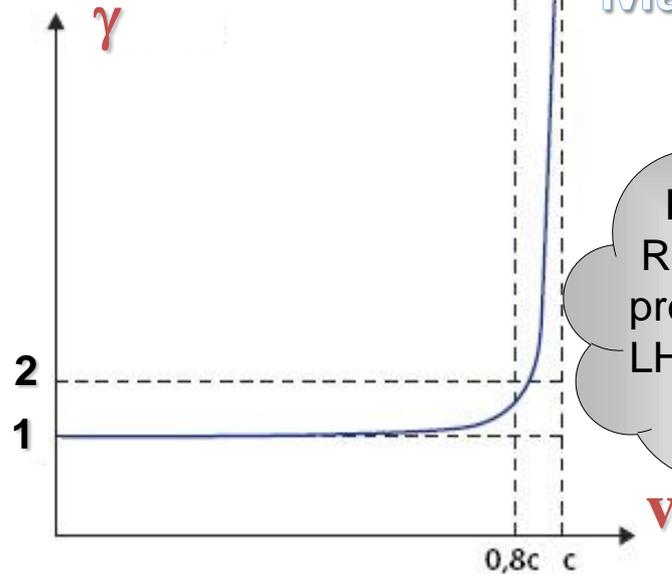
▶ p (proton) ▶ ion ▶ neutrons ▶ \bar{p} (antiproton) ↔ proton/antiproton conversion ▶ neutrinos ▶ electron
 LHC Large Hadron Collider SPS Super Proton Synchrotron PS Proton Synchrotron
 AD Antiproton Decelerator CTF3 Clic Test Facility CNGS Cern Neutrinos to Gran Sasso ISOLDE Isotope Separator OnLine DEvice
 LEIR Low Energy Ion Ring LINAC LINear ACcelerator n-ToF Neutrons Time Of Flight



O complexo de aceleradores do CERN

Massa relativística

v	$\beta = \frac{v}{c}$	β^2	$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$
0,000 c	0,000	0,000	1,000
0,200 c	0,200	0,040	1,021
0,400 c	0,400	0,160	1,091
0,600 c	0,600	0,360	1,250
0,800 c	0,800	0,640	1,667
0,900 c	0,900	0,810	2,294
0,990 c	0,990	0,980	7,089
0,999 c	0,999	0,998	22,366
1,000 c	1,000	1,000	∞



Estamos num mundo Relativístico? E os prótons acelerados do LHC com velocidade **0,999999991c** ?!

$$m = \gamma \cdot m_0 \Rightarrow m = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \cdot m_0$$

Mesmo com uma força resultante R contínua, como a massa m aumenta com a velocidade v , fica cada vez mais difícil acelerar o corpo. Para $v \rightarrow c$ temos $m \rightarrow \infty$. A partir daí o corpo não pode mais ser acelerado!

\therefore "c" é a velocidade limite!





O complexo de aceleradores do CERN

Unidades de medida

De energia

SI

$$[E] = [m] \cdot [c]^2 = \text{kg} \cdot \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 = \text{kg} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} = \text{kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \text{m} = \text{N} \cdot \text{m} = \text{J}$$

usual

$$[E] = eV$$

$$E = q \cdot V = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 1V = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 1 \frac{\text{J}}{\text{C}} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 1eV$$

Múltiplos

$$1keV = 1 \cdot 10^3 eV$$

$$1MeV = 1 \cdot 10^6 eV$$

$$1GeV = 1 \cdot 10^9 eV$$

$$1TeV = 1 \cdot 10^{12} eV$$

De massa

usual

$$[m] = \frac{[E]}{[c]^2}$$

$$[m] = \frac{eV}{c^2}$$

$$[m] = \frac{keV}{c^2}$$

$$[m] = \frac{MeV}{c^2}$$

$$[m] = \frac{GeV}{c^2}$$

$$[m] = \frac{TeV}{c^2}$$

Múltiplos

Equivalência

$$1 \frac{GeV}{c^2} = \frac{1 \cdot 10^9 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}}{(3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2} = \frac{1 \cdot 10^9 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}}{9 \cdot 10^{16} \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}} = \frac{1,6 \cdot 10^{-10} \text{ kg} \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}}{9 \cdot 10^{16} \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}} \cong 1,78 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

Massa de repouso
do próton

$$m_0 = 1,673 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 0,938 \frac{GeV}{c^2}$$

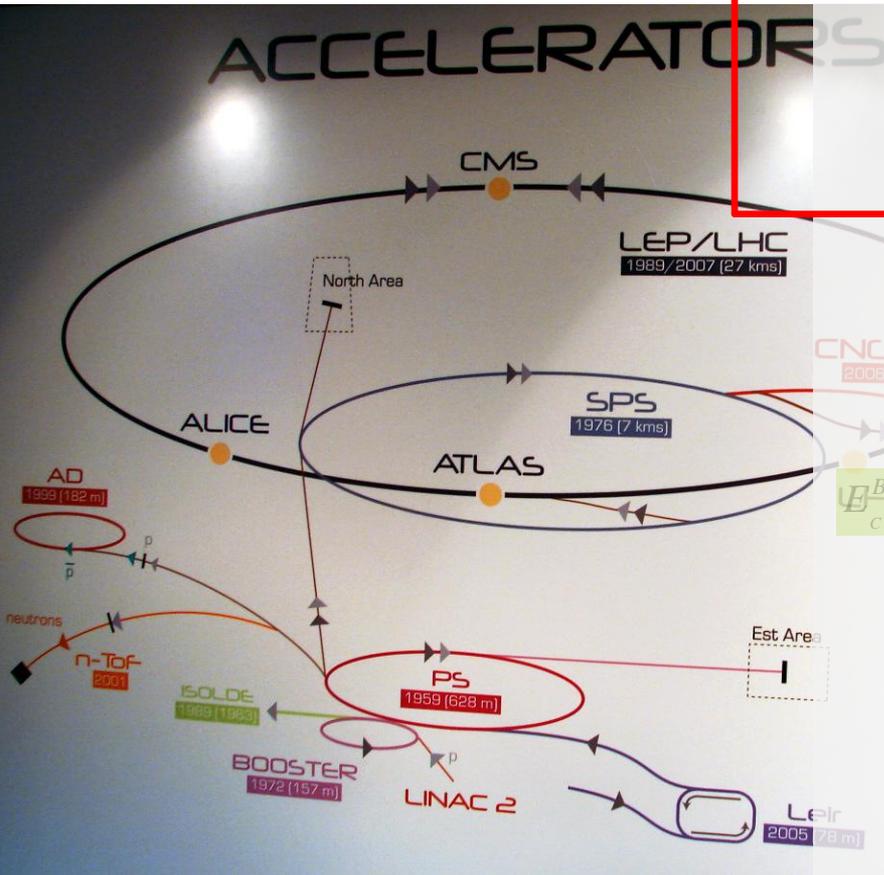


Energia cinética (relativística) em cada estágio

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

$$E_c = (\gamma - 1)m_0c^2 \quad m_0 = 0,938 \frac{\text{GeV}}{c^2}$$

Acelerador	Velocidade (% de c)	γ	Energia
Linac 2	31,4	1,05	50 MeV
PS Booster	91,6	2,49	1,4 GeV
PS	99,93	26,73	25 GeV
SPS	99,9998	500,00	450 GeV
LHC	99,9999991	7692,31	7 TeV



$$E_c = (\gamma - 1) \cdot 0,938 \cdot 10^9 \frac{\text{eV}}{c^2} \cdot c^2 = (\gamma - 1) \cdot 938 \cdot 10^6 \text{ eV}$$

$$E_c^{\text{Linac 2}} = (1,05 - 1) \cdot 938 \cdot 10^6 = 46900000 \cong 50 \cdot 10^6 \text{ eV} = 50 \text{ MeV}$$

$$E_c^{\text{Booster}} = (2,49 - 1) \cdot 938 \cdot 10^6 = 1397620000 \cong 1,4 \cdot 10^9 \text{ eV} = 1,4 \text{ GeV}$$

$$E_c^{\text{PS}} = (26,73 - 1) \cdot 938 \cdot 10^6 \cong 25 \cdot 10^9 \text{ eV} = 25 \text{ GeV}$$

$$E_c^{\text{SPS}} = (500 - 1) \cdot 938 \cdot 10^6 \cong 450 \cdot 10^9 \text{ eV} = 450 \text{ GeV}$$

$$E_c^{\text{LHC}} = (7692,31 - 1) \cdot 938 \cdot 10^6 \cong 7 \cdot 10^{12} \text{ eV} = 7 \text{ TeV}$$

Atualmente o LHC opera a 3,5 TeV por feixe (50% da sua capacidade).





Para que acelerar os prótons?



Acelerar

Efeito The Flash

11000 voltas/s a $0,999999991c$

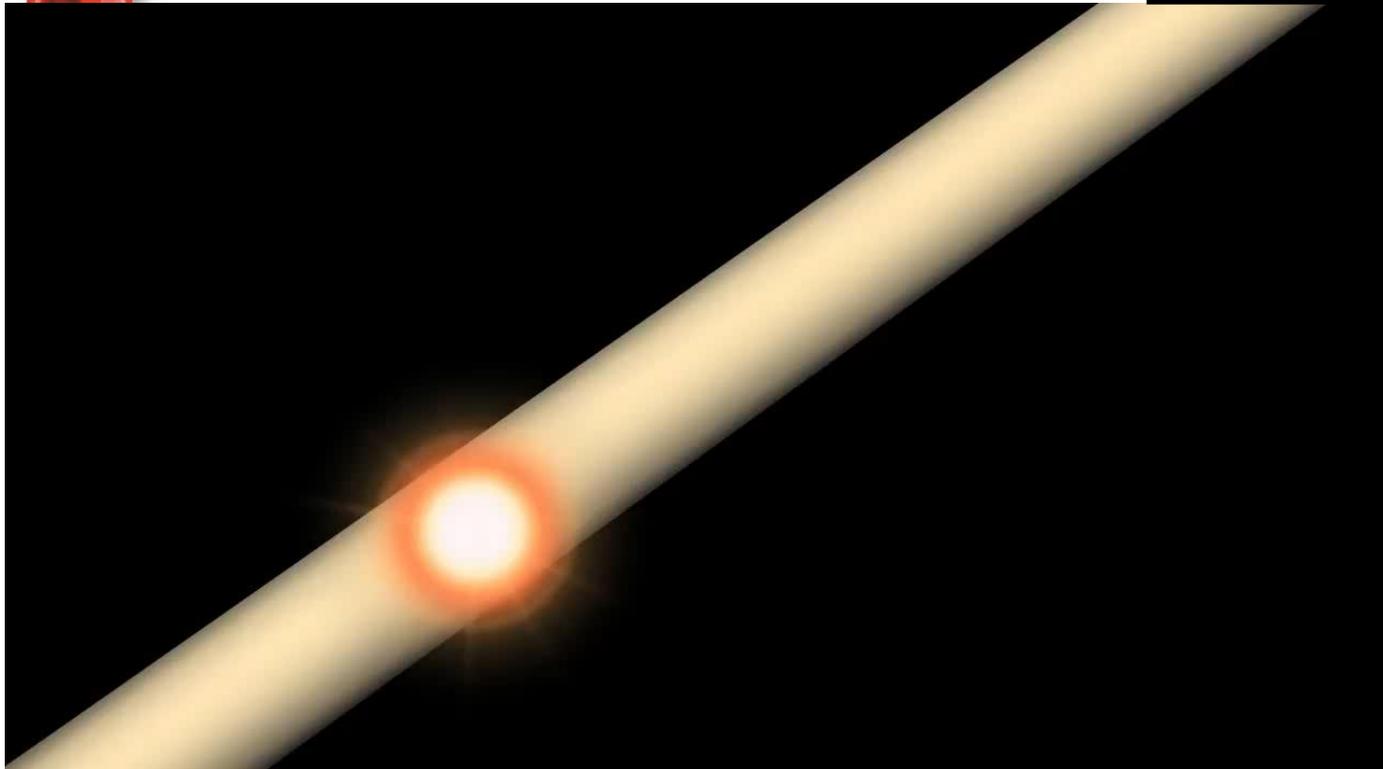
Colidir

Efeito Chuck Norris

$7 + 7 = 14 \text{ TeV}$



LHC



LHC = Large Hadron Collider

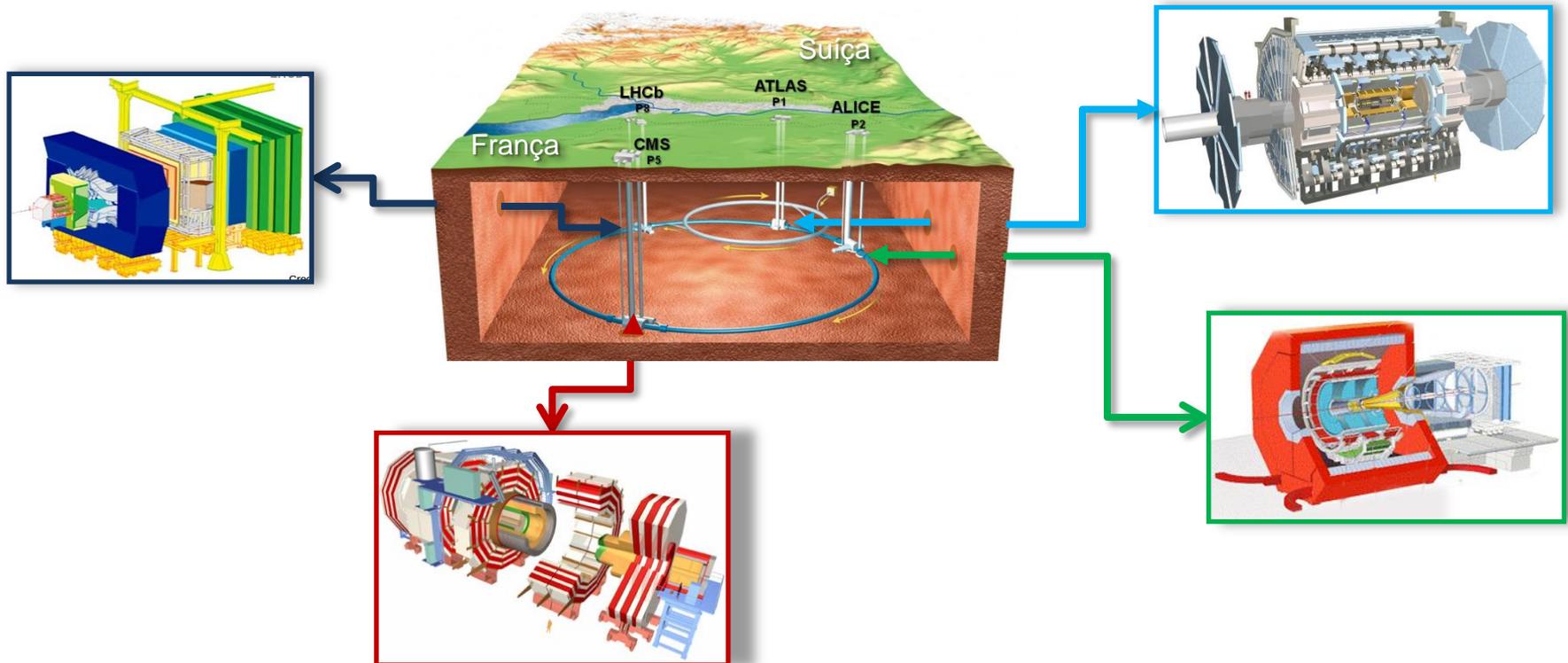


O que dá para “ver” após as colisões?

O **LHC** está preparado para “ver” as partículas subatômicas resultantes das colisões em **quatro experimentos** posicionados em quatro sítios (cavernas) ao longo do anel.

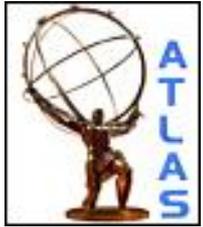
Cada experimento tem um arranjo tridimensional de **detectores especialmente desenhado** com uma finalidade bem específica.

Portanto, são quatro “diferentes olhares” para as possíveis colisões e seus produtos.



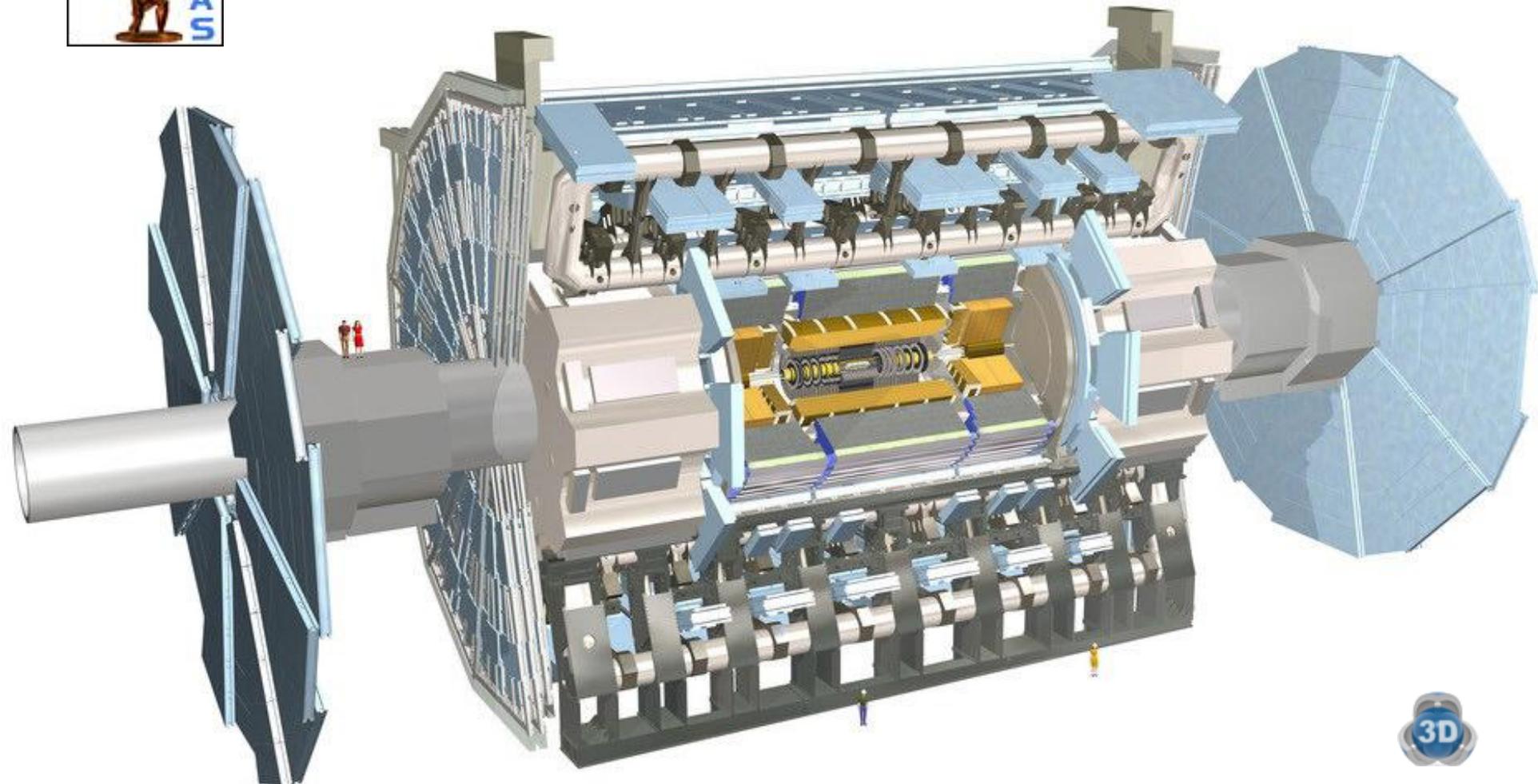


Os quatro “olhos” da máquina



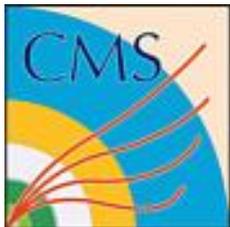
ATLAS (A Toroidal LHC Apparatus)

Comprimento: 44m
Diâmetro: 22 m
Massa: 7 000 000 kg

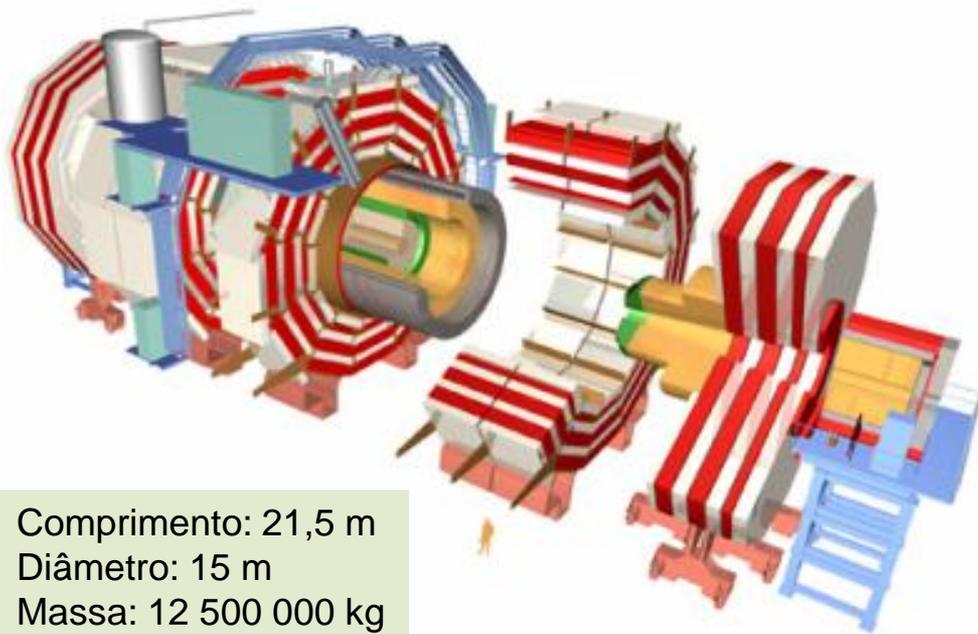




Os quatro "olhos" da máquina



CMS (Compact Muon Solenoid)



Comprimento: 21,5 m
Diâmetro: 15 m
Massa: 12 500 000 kg

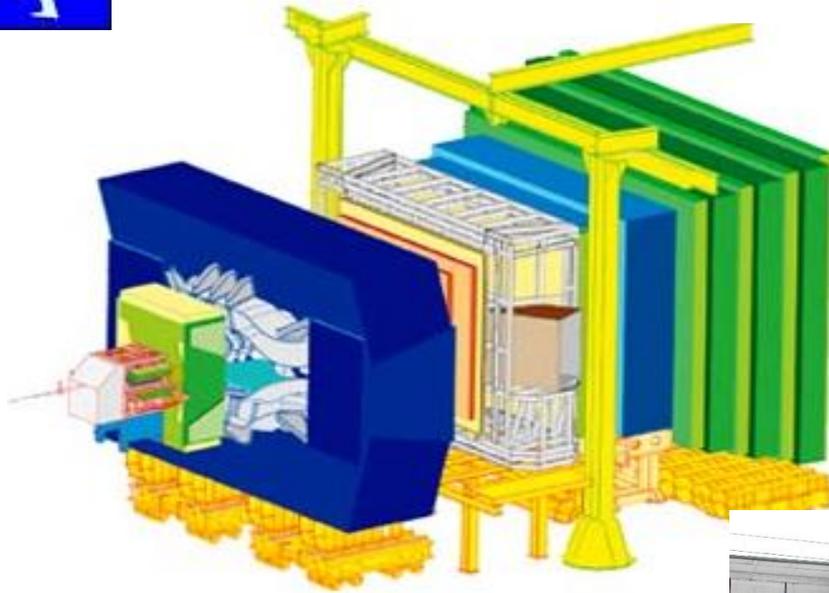




Os quatro “olhos” da máquina



LHCb (Large Hadron Collider beauty)



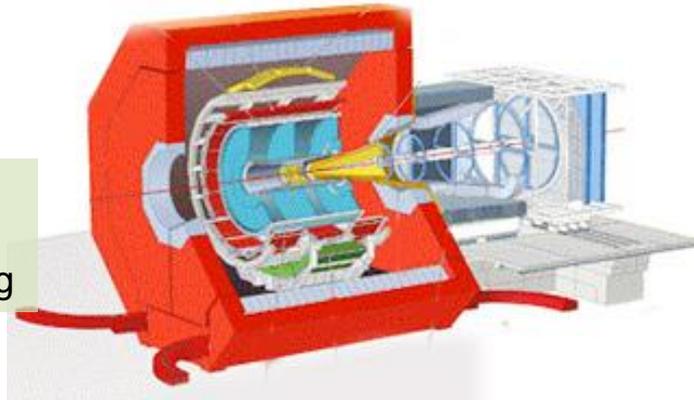
Comprimento: 21 m
Altura: 10 m
Largura: 13 m





ALICE (A Large Ion Collider Experiment)

Comprimento: 26 m
Altura: 16 m
Massa: 10 000 000 kg



Mais 2 (dos 5) dados incríveis sobre o LHC

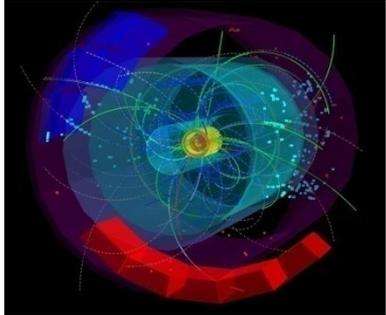
- [A] Lugar mais frio da galáxia (- 271 °C)
- [B] Um dos lugares mais quentes no Universo ($10 \cdot 10^6 \cdot 10^9$ °C)
- [C] Mais vazio que o espaço exterior
- [D] O maior número de eletroímãs “high tech” já construídos
- [E] O maior e mais complexo instrumento eletrônico do planeta





Os quatro “olhos

Aquisição e tratam



•Taxa de colisões p-p: **600 milhões/s** ($\sim 6.10^8$ **colisões/s**). Cada colisão é um evento onde são produzidas centenas de partículas de massas variadas, o que equivale a cerca de **1 MB** de informação. Logo, temos $6.10^8 \times 1.10^6$ B, ou seja, **6.10^{14} B/s**.

•1 DVD tem capacidade de 4,7 GB = $4,7.10^9$ B. A taxa de produção de informações equivale a cerca de **130000 DVD/s**! Como lidar com isso?

•Um sistema de *trigger* (baseado em *hardware* e *software*) monitora os eventos em tempo real e grava **apenas os relevantes**.

•Mesmo assim, em todos os experimentos juntos: $\sim 15.10^{15}$ **B/ano**

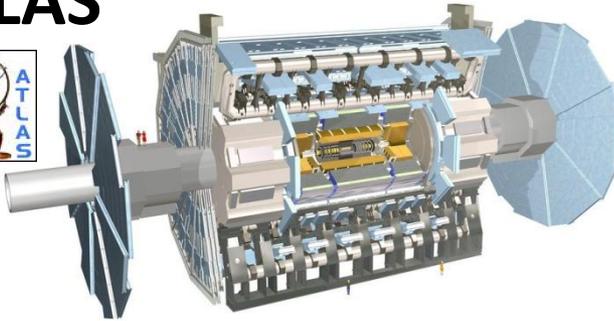
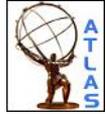
•Worldwide LHC Computing Grid (WLCG) agrega cerca de 140 centros computacionais em 33 diferentes países para dar conta de tanta informação. O CERN é o **nascido** do protocolo **WWW**.





Os quatro “olhos” da máquina

ATLAS

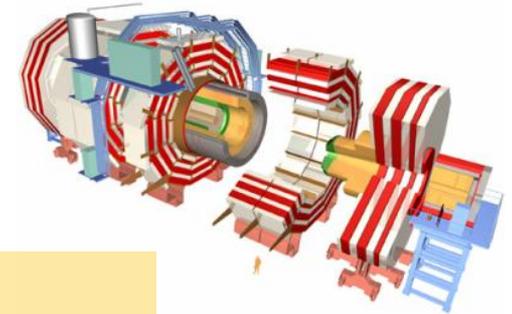


1800 físicos
34 países diferentes



UFRJ

CMS

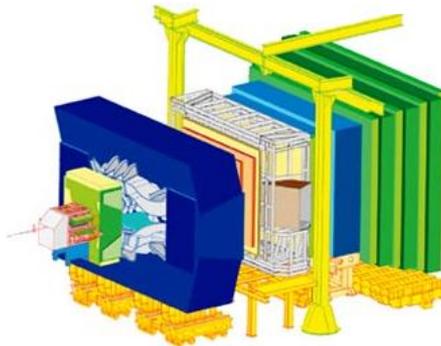


2700 físicos
37 países diferentes



CBPF, UERJ e UNESP

LHCb

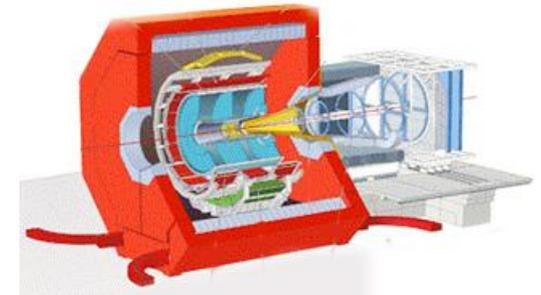


600 físicos
13 países diferentes



CBPF e UFRJ

ALICE



1000 físicos
30 países diferentes

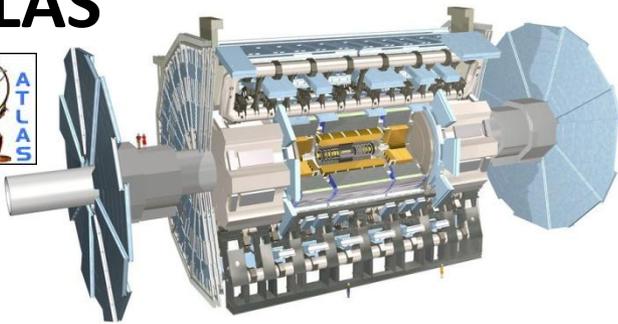
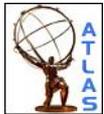


USP e UNICAMP

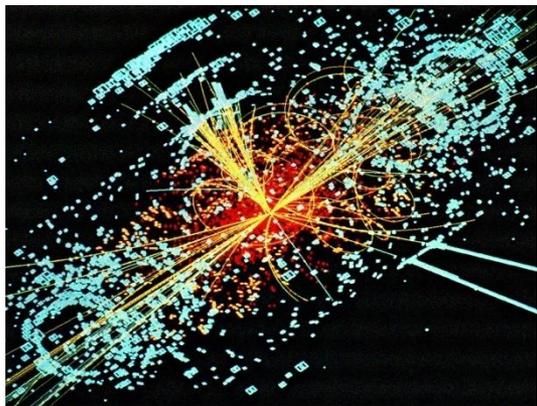
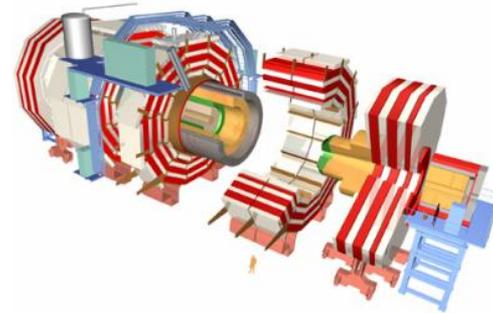


O que os cientistas procuram?

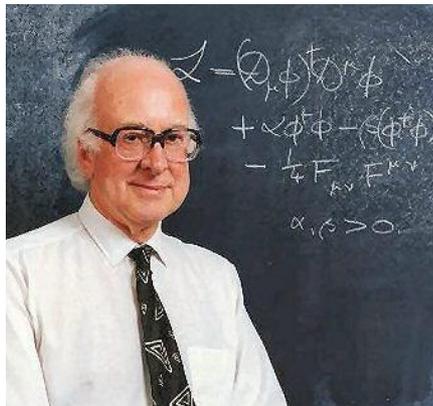
ATLAS



CMS

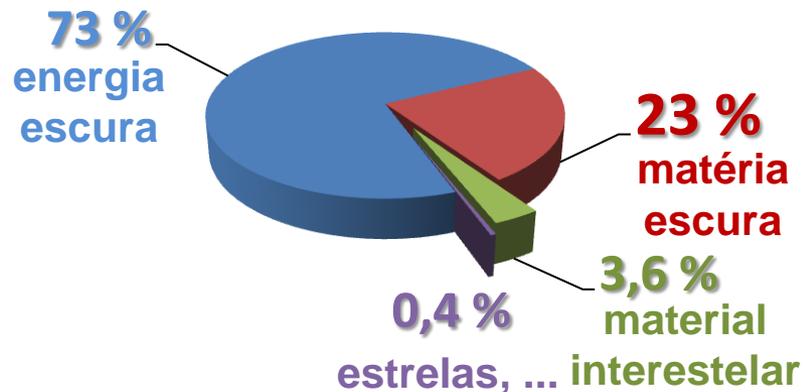


Bóson de Higgs num evento simulado



Peter Higgs

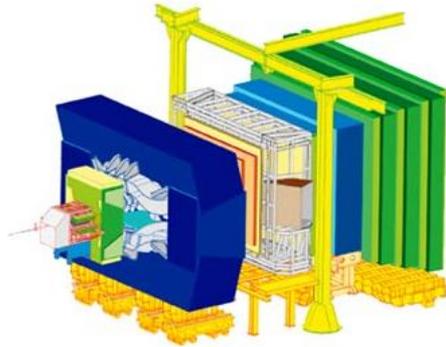
ATLAS e CMS são experimentos de caráter mais geral. Embora com técnicas diferentes, procuram o **Bóson de Higgs**, evidências da Supersimetria, dimensões extras e candidatos à matéria escura.





O que os cientistas procuram?

LHCb



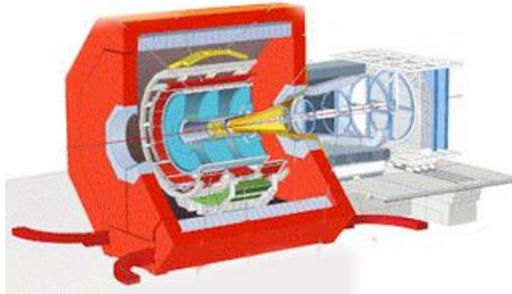
Estudando eventos com quarks do tipo “b” vai tentar entender de onde vem a assimetria entre a matéria e a anti-matéria.



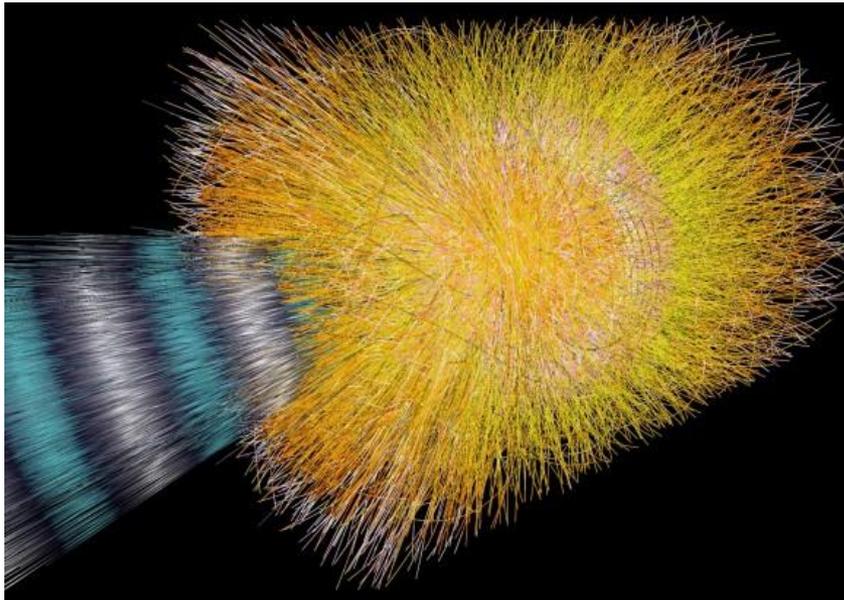


O que os cientistas procuram?

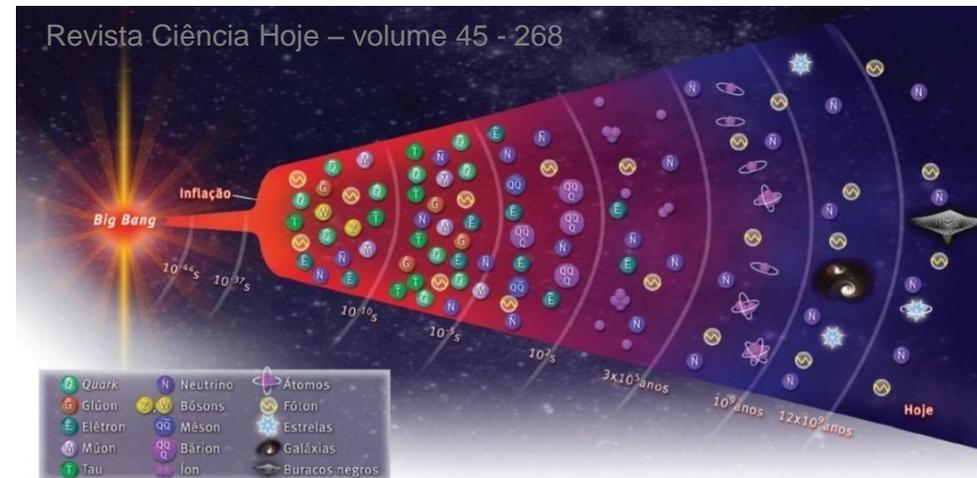
ALICE



Colidindo núcleos de chumbo vai tentar “dissolver” prótons e nêutrons desconfinando os quarks num estado conhecido como plasma de quarks e gluons, algo que suspeita-se existia logo após o t_0 do Universo (Big Bang).



Simulação de colisão de núcleos de chumbo





O que os cientistas procuram?

Mas não sabemos se o LHC encontrará também algo que não procura!



Isso pode ser ainda mais interessante!

IMPORTANTE

- Estes são alguns dos slides da palestra “Um Passeio Virtual Pelo LHC” apresentada na Campus Party 2012 (São Paulo, Brasil).
- Eles podem ser usados para fim de divulgação científica, estudos, e qualquer outra atividade didática desde que sem fins comerciais e mantidas as informações de autoria.
- As imagens neles contidas são do meu arquivo pessoal ou dos sites do CERN, LHC e experimentos (ATLAS, CMS, ALICE e LHCb). Portanto, não podem ser reproduzidas sem prévia autorização do(s) autor(es).