



# Introdução à análise de dados em FAE e tecnologias associadas

# Física de Altas Energias - Introdução

PROFESSORES:

Dilson de Jesus Damião - Eliza Costa - Mauricio Thiel

# A Física de Altas Energias

A Física de Altas Energias, também chamada de Física de Partículas Elementares, é um ramo da Física que estuda os constituintes elementares da matéria e da radiação, e a interação entre eles e suas aplicações.



Muitas partículas elementares só podem ser criadas a energias elevadas e algumas das propostas nunca foram detectadas (como o gráviton).

A Física de partículas, estudada pela Mecânica Quântica (parte da Física Moderna), busca o fundamental, o nível mais básico da matéria e da Natureza. Todo o nosso mundo visível se fundamenta nesse nível invisível das partículas elementares.

# A Física de Altas Energias

- Há muito tempo nos perguntamos:
  - Quais são os constituintes elementares da matéria?
  - O que os mantêm juntos?





# A Física de Altas Energias

“Todo o nosso mundo visível se fundamenta nesse nível invisível das partículas elementares.”

Durante essa semana não conseguiremos explorar todo o nosso mundo. Afinal, estamos falando de mais de um século de descobertas, experimentos e teorias em Física de Altas Energias.

Mas podemos começar nossa viagem, um pouco antes, na Grécia antiga com o **ÁTOMO GREGO (a=não, tomo=divisão).**

# A Física de Altas Energias

## ÁTOMO - sem parte - indivisível

Tales de Mileto foi pioneiro no que diz respeito à procura da origem das substâncias e suas transformações sem recorrer a entidades divinas (mitologia).

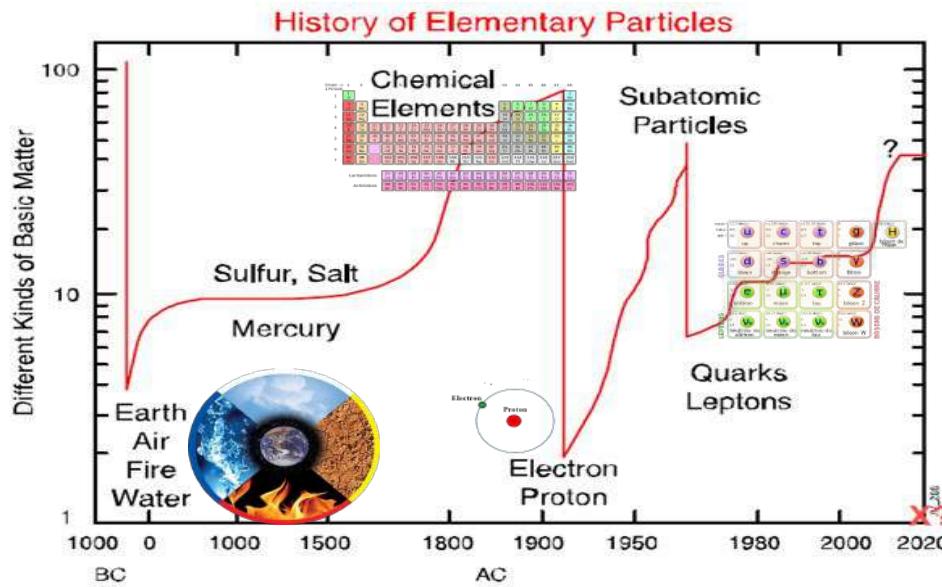
O universo é composto por dois elementos: os **átomos**, que diferem-se entre si na sua forma e tamanho, e pelo **espaço vazio**, onde eles existem e movem-se.



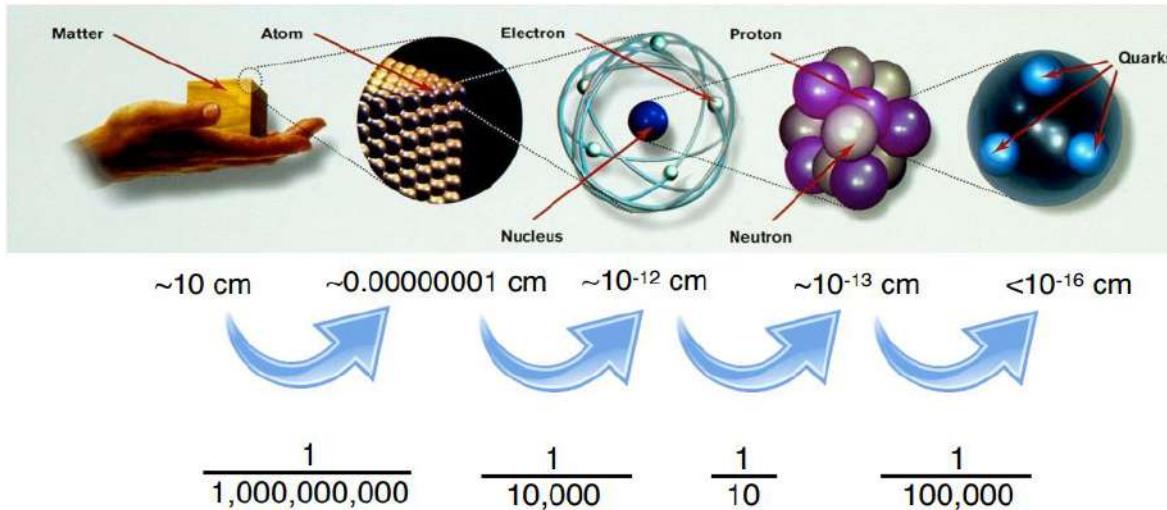
Tales de Mileto (624-547 A.C), Leucipo e Demócrito (500-400 A.C.)

# Os constituintes da matéria

Os séculos e o atomismo baseado no raciocínio abstrato e filosófico passaram. Mas... a ideia de que a matéria é constituída por unidades discretas está na base da Física Moderna.



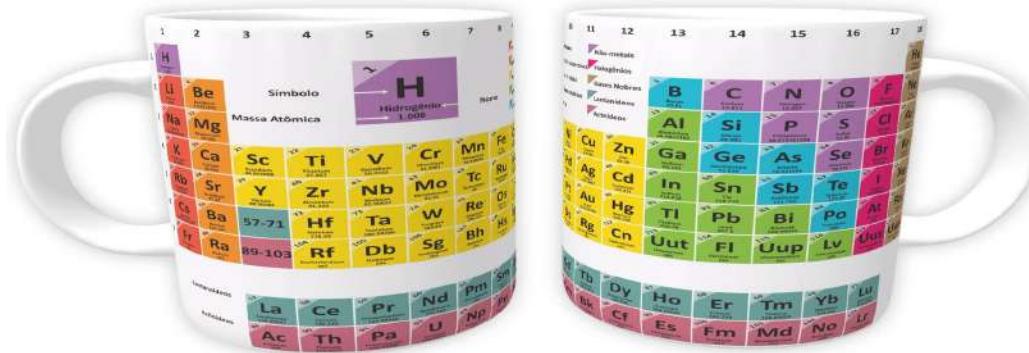
# Os constituintes da matéria



# Física de Partículas: estudo dos componentes fundamentais da matéria

# Constituintes da matéria

A matéria que está ao nosso redor é constituída de átomos. Os diferentes tipos de átomos foram originalmente organizados em uma “tabela periódica” proposta em 1869 por Mendeleev.



Originalmente eram 80 elementos químico organizados de acordo com a massa atômica.

# Constituintes da matéria

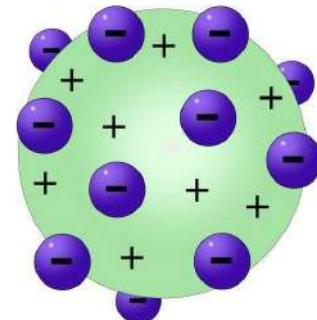
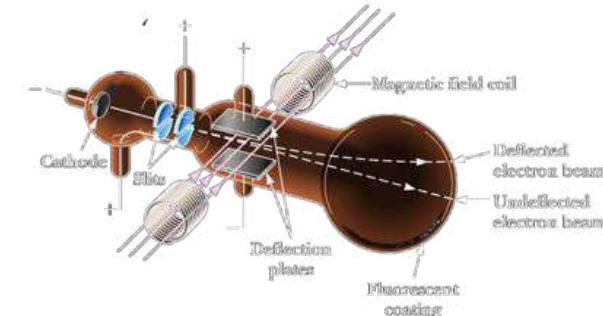
Alguns cientistas que acrescentaram tijolos na construção do conhecimento no que podemos chamar de constituição da matéria: Galileo, Newton, Young, Faraday, Maxwell, Michelson-Morley, Wien, Rayleigh-Jeans, Lord Kelvin...



# Constituintes da matéria

A Física de Partículas procura entender as partículas elementares e as forças responsáveis pela interação entre elas

- em 1897 J.J. Thomson descobriu o elétron 
- fez experimentos com tubo de raios catódicos e inferiu a existência de uma partícula dotada de carga elétrica



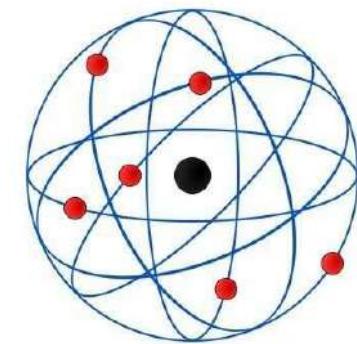
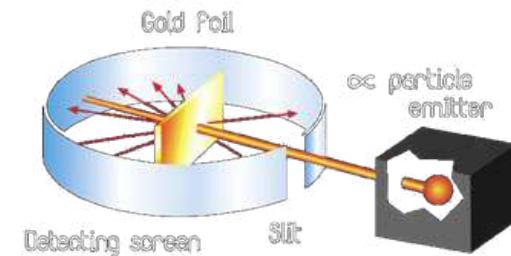
Fonte:<https://www.educamaisbrasil.com.br/energia/quimica/modelo-atomico-de-thomson>

# Constituintes da matéria

A Física de Partículas procura entender as partículas elementares e as forças responsáveis pela interação entre elas



- em 1911 E. Rutherford verificou que parte significativa do átomo era vazio - descobriu o núcleo atômico
- descobriu e denominou as partículas de carga positiva como prótons



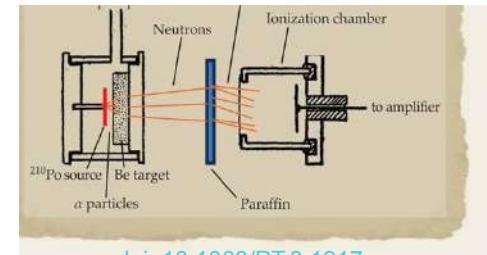
Fonte:<https://www.educamaisbrasil.com.br/enem/quimica/modelo-atomico-de-rutherford>

# Constituintes da matéria

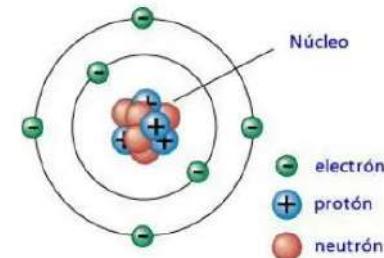
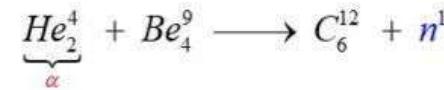
A Física de Partículas procura entender as partículas elementares e as forças responsáveis pela interação entre elas



- em 1932, J. Chadwick colidiu partículas alfa contra o núcleo do elemento Berílio e, utilizando cálculos de conservação, descobriu o nêutron

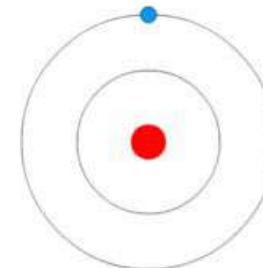
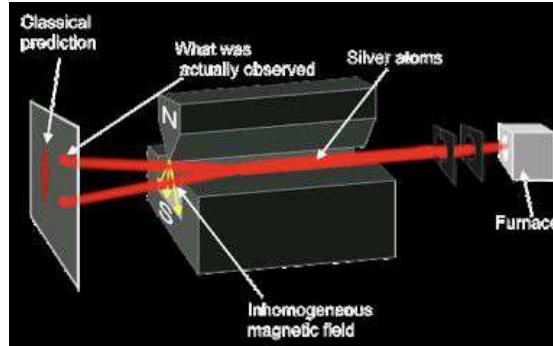


[doi: 10.1063/PT.3.1917](https://doi.org/10.1063/PT.3.1917)



# Constituintes da matéria

- Alguns cientistas que acrescentaram tijolos na construção do conhecimento na tabela periódica da Física de Partícula:
  - Bohr, Rutherford - modelos atômicos
  - Stern-Gerlach - quantização do spin

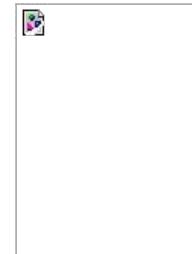
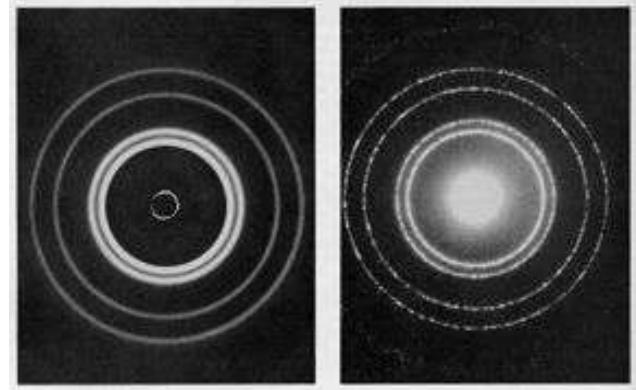


# Constituintes da matéria

- Alguns cientistas que acrescentaram tijolos na construção do conhecimento na tabela periódica da Física de Partícula:



L. de Broglie - dualidade onda partícula,  $\lambda = h / p$

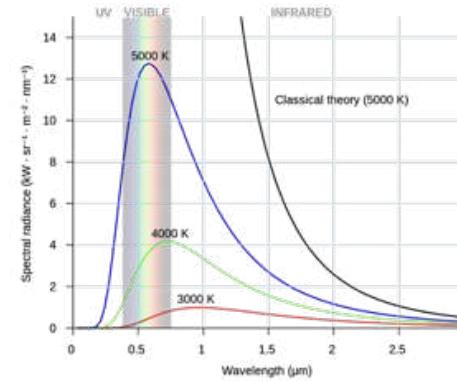


# Constituintes da matéria

- Alguns cientistas que acrescentaram tijolos na construção do conhecimento na tabela periódica da Física de Partícula:



- Rayleigh-Jeans - energia EM só pode ocorrer em múltiplos de uma energia fundamental, discreta
- M. Planck - radiação do corpo negro, início da "teoria quântica"



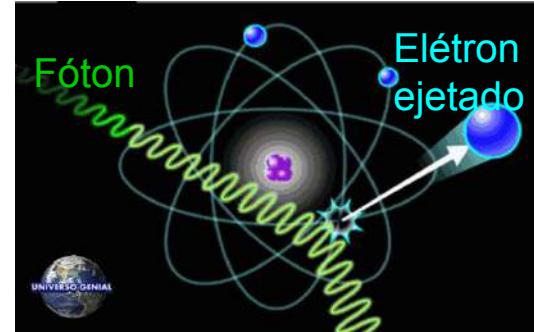
$$h = 6,55 \cdot 10^{-27} \text{ erg} \cdot \text{sec}$$

# Constituintes da matéria

- Alguns cientistas que acrescentaram tijolos na construção do conhecimento na tabela periódica da Física de Partícula:



- A. Einstein - Annus mirabilis, Relatividade Restrita,  $E = mc^2$ , Efeito Fotoelétrico
  - sugere que ondas eletromagnéticas podem existir como pacotes discretos - quantum de luz ou fóton



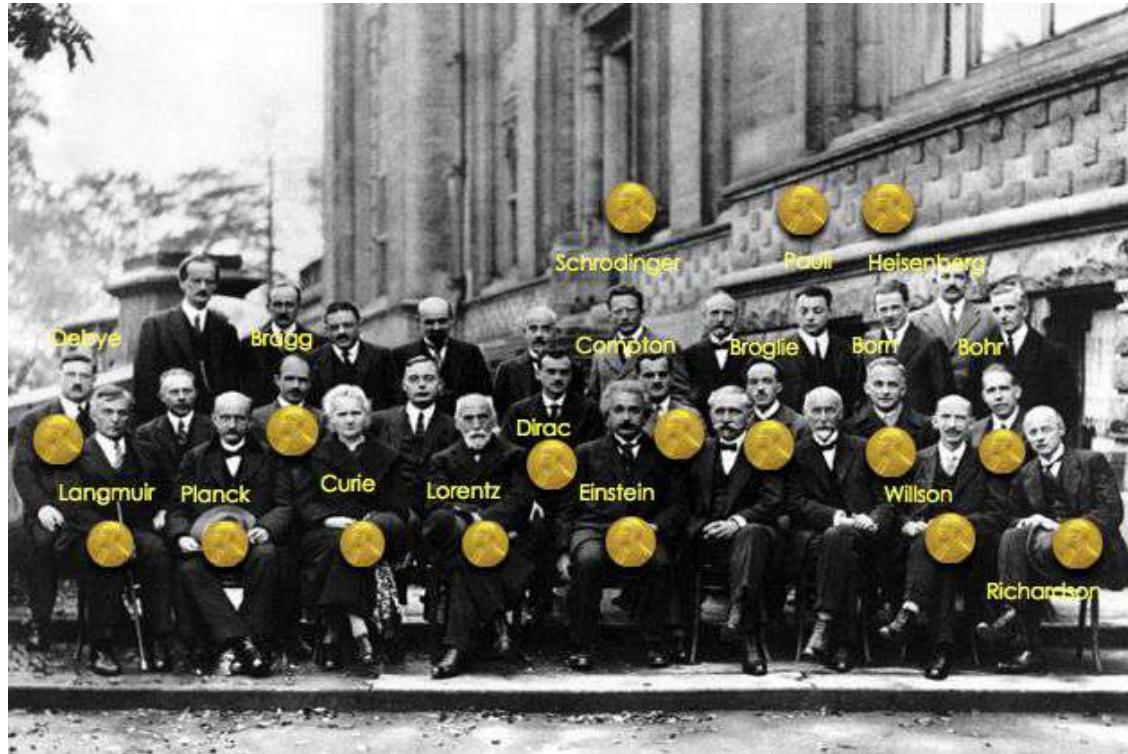
# Constituintes da matéria

- Alguns cientistas que acrescentaram tijolos na construção do conhecimento na tabela periódica da Física de Partícula:
  - Schrödinger, 1926 - abandono do determinismo da Física Clássica - a função de onda
  - M. Born, 1926 - interpretação probabilística



# Constituintes da matéria

## A Mecânica Quântica Relativística



Fifth conference participants, 1927. Institut International de Physique Solvay in Leopold Park.

# Constituintes da matéria

## A Mecânica Quântica Relativística

$$\Delta p \Delta x \geq \frac{\hbar}{2}$$

$$\dot{\phi} = -i\hbar \vec{v}$$

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

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

MQ + RR

$$E_0 = mc^2$$

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi + V\psi$$

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



O primeiro a obter uma equação quântica relativística que estava de acordo com a experiência foi Dirac, em 1927. Sua solução permitia a presença do spin de forma natural e soluções de energia negativa!!!



$$E = \pm \sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4}$$

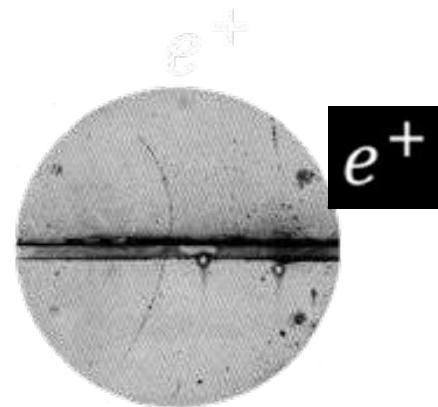
# Constituintes da matéria

Outras partículas que não fazem parte do átomo aparecem

- a partir da combinação em MQ e RR, Dirac previu a existência de uma partícula com as características do elétron, mas com carga positiva
- em 1932, houve a detecção do pósitron



$$+\sqrt{p^2c^2 + m^2c^4}$$



$$-\sqrt{p^2c^2 + m^2c^4}$$

O que são todas essas partículas?

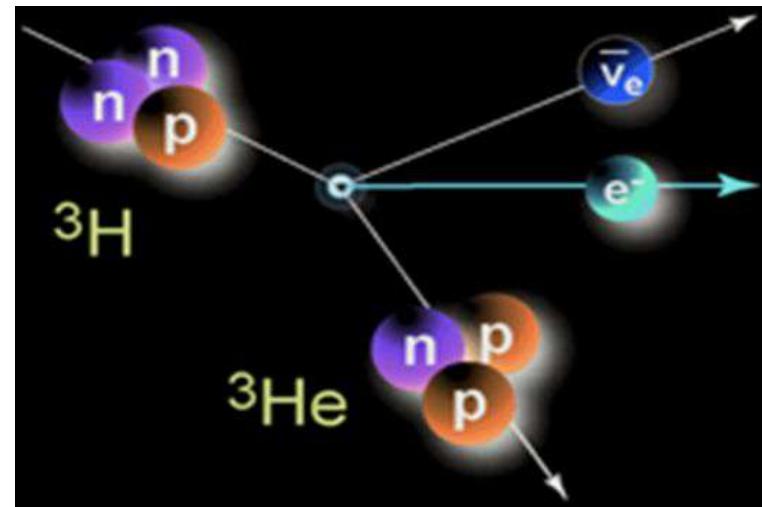
# Constituintes da matéria

Outras partículas que não fazem parte do átomo aparecem



- em 1934, E. Fermi sugere a existência de partículas neutras, chamadas de neutrinos, para solucionar o problema da conservação de energia do decaimento beta.

Descoberto em 1956



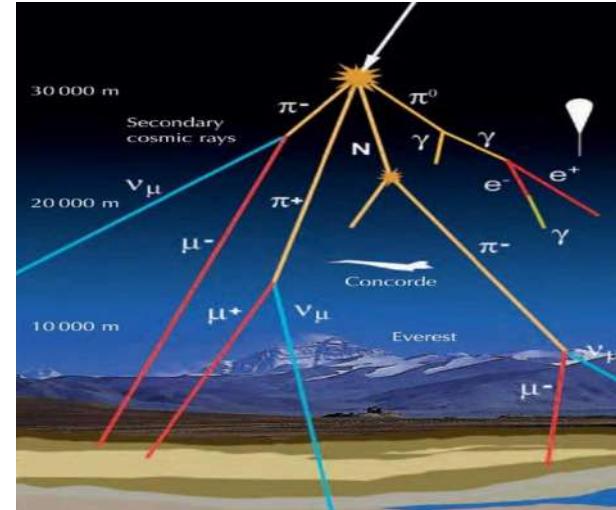
O que são todas essas partículas?

# Constituintes da matéria

Outras partículas que não fazem parte do átomo aparecem



- em 1936, Anderson observa múons em Raios Cósmicos. Seriam os Méson de Yukawa, repulsão electrostática que mantêm o núcleo coeso.



O que são todas essas partículas??

# Constituintes da matéria

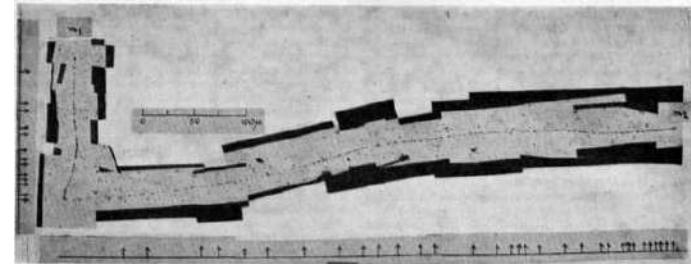
Outras partículas que não fazem parte do átomo aparecem

- em 1947 os píons, outro tipo de mésons, também são descobertos Lattes,

Occhialini e Powell



- em 1950 o píon neutro é descoberto



$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

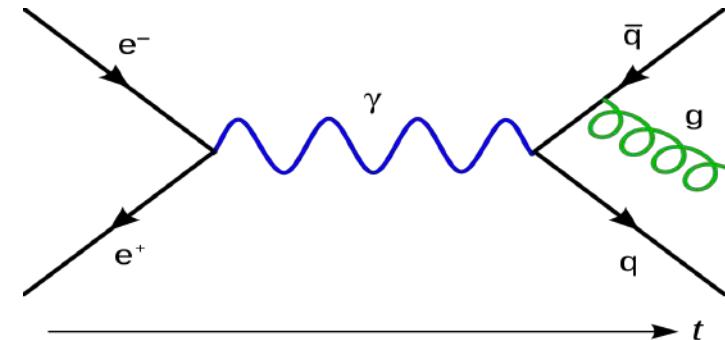
$$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$$

O que são todas essas partículas??

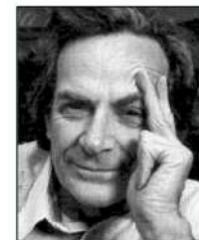
# Constituintes da matéria

Outras partículas que não fazem parte do átomo aparecem

- em 1950, a interação eletromagnética entre partículas carregadas é descrita a partir da troca de um fóton ( $\gamma$ ), eletrodinâmica quântica



[Diagramas de Feynman](#)



Richard  
Feynman



Julian  
Schwinger

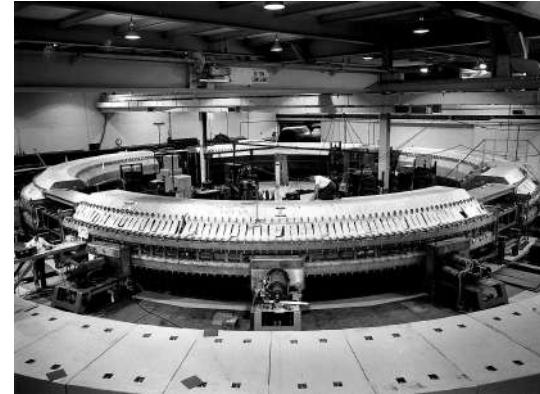


Sin-itiro  
Tomonaga

O que são todas essas partículas??

# Constituintes da matéria

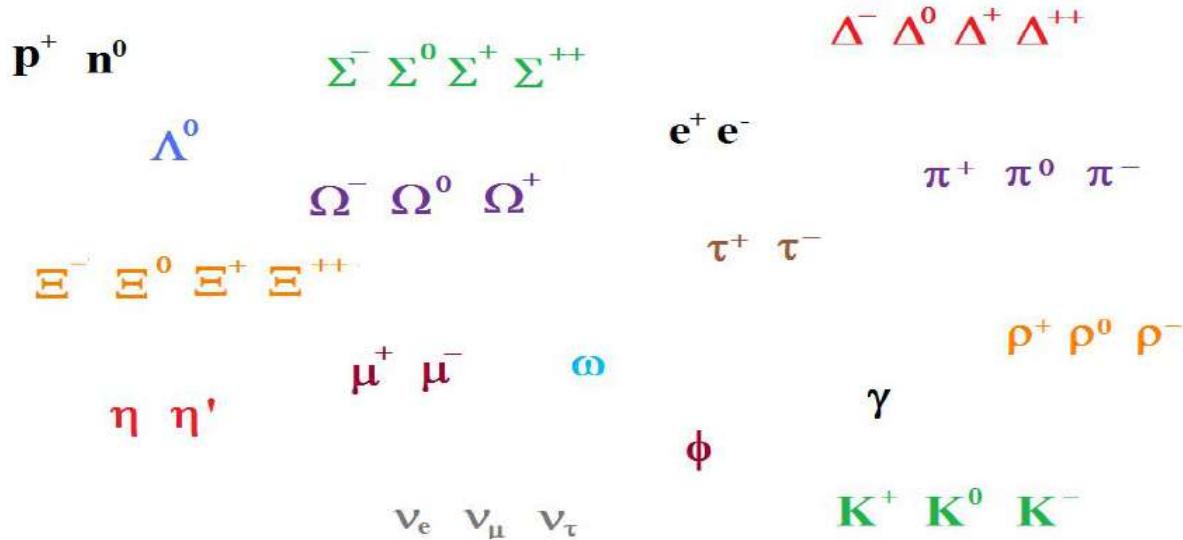
Outras partículas que não fazem parte do átomo aparecem a partir do uso de aceleradores de partículas como o Cosmostron de Brookhaven e detectores como as Câmaras de Bolhas do Fermilab.



Como todas essas partículas surgem???

# Constituintes da matéria

- Centenas de partículas elementares são conhecidas na metade do século XX... um verdadeiro caos

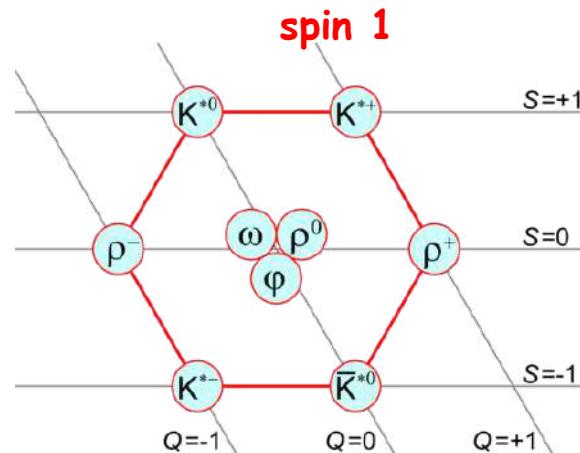
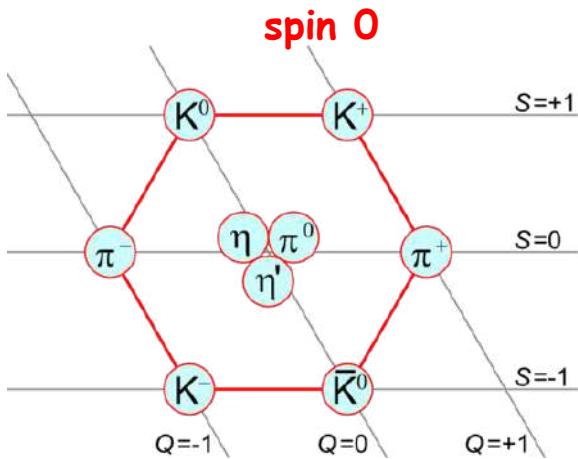


Como todas essas partículas surgem???

# Constituintes da matéria

Caminho óctuplo proposto por Murray Gell-Mann e Yuval Ne'eman em 1961

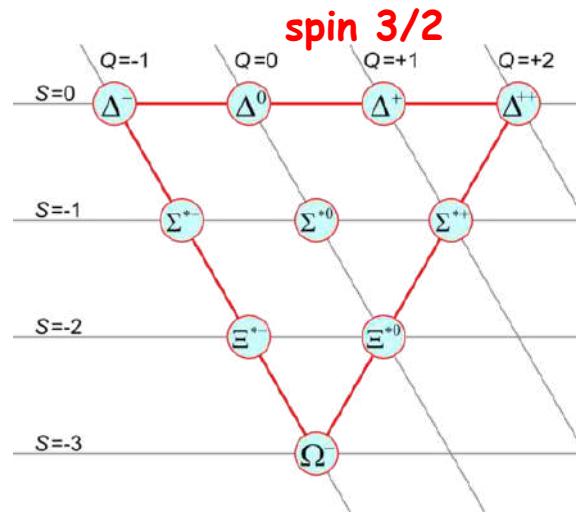
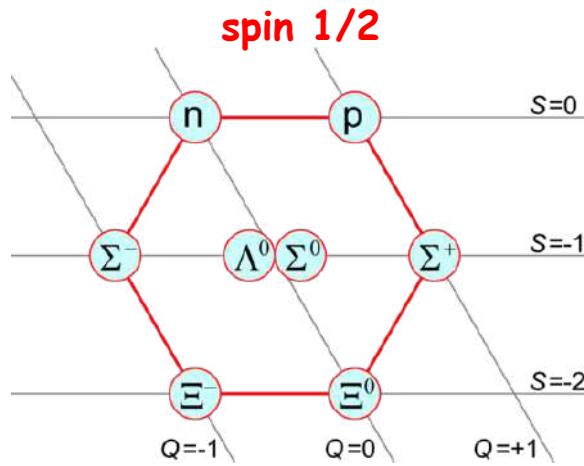
- Agrupa as partículas em multipletos de spin, carga e estranheza



# Constituintes da matéria

Caminho óctuplo proposto por Murray Gell-Mann e Yuval Ne'eman em 1961

- Agrupa as partículas em multipletos de spin, carga e estranheza



# Constituintes da matéria

- De forma independente, Murray Gell-Mann e George Zweig propuseram uma teoria que ficou conhecida como **modelo de quarks**
- Permitiu organizar e explicar as propriedades dos **hádrons** a partir de 3 combinações de tipos diferentes de **quarks** e suas antipartículas correspondentes, os **antiquarks** (possuem números quânticos B e Q com carga oposta)

quark	spin ( $\hbar$ )	# bariônico (B)	carga (Q)
u	1/2	1/3	+2/3
d	1/2	1/3	-1/3
s	1/2	1/3	-1/3

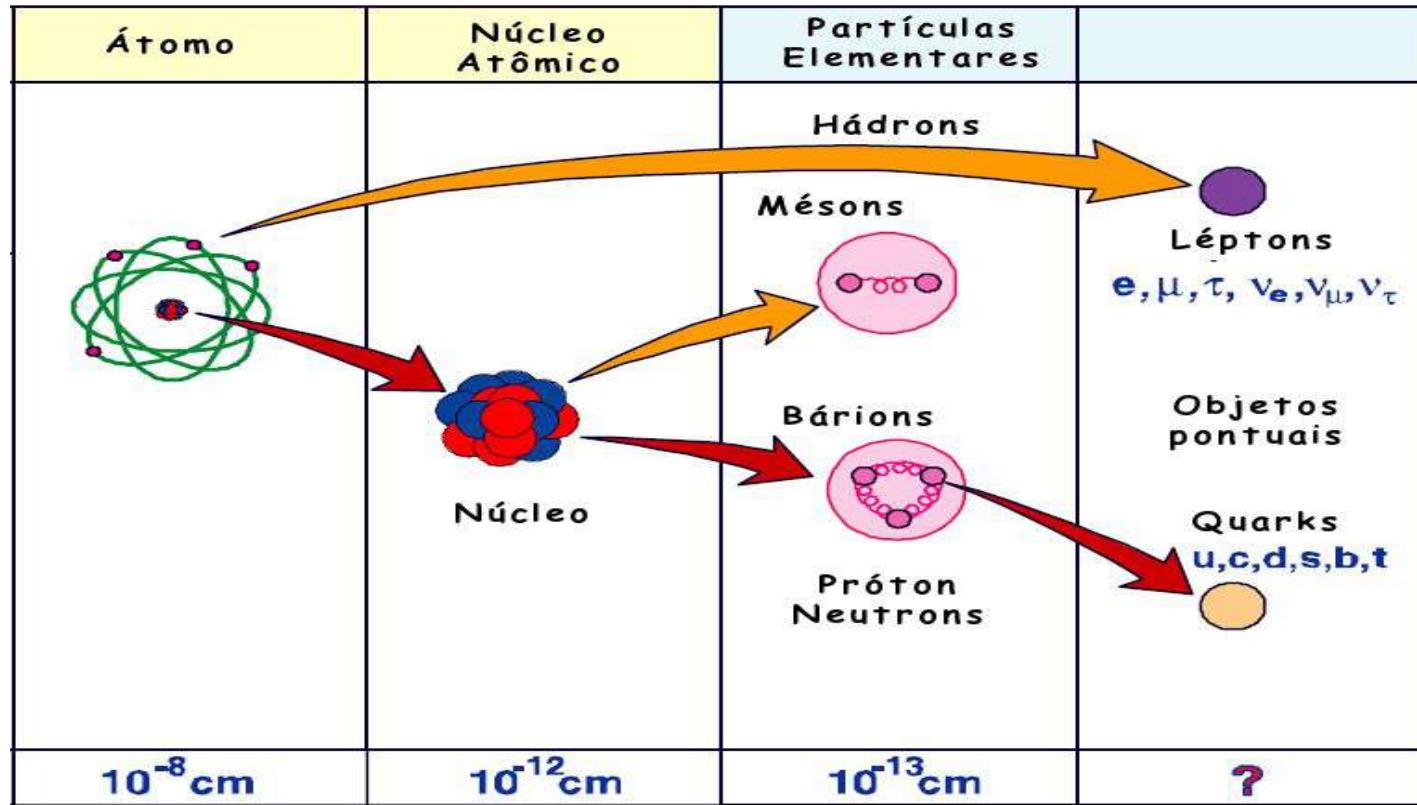
# Constituintes da matéria

- Modelo de quarks - hadrons
  - Bósons - estados ligados de 3 quarks
    - Ex.:  $p(uud)$                            $n(udd)$
  - Mésons - estados ligados de 1 quark + 1 antiquark
    - Ex.:  $\pi^+(u\bar{d})$                            $K^-(\bar{u}s)$
- Modelo simples, mas ainda falta alguma coisa
  - $\Delta^{++} = u \uparrow u \uparrow u \uparrow$                           Estado ligado proibido - três quarks com o mesmo spin (Princípio de Pauli)
  - Novo grau de liberdade - carga cor

$$\Delta^{++} = \textcolor{red}{u} \uparrow \textcolor{green}{u} \uparrow \textcolor{blue}{u} \uparrow$$

Apenas estados ligados neutros existem na natureza

# Constituintes da matéria



# O Modelo Padrão

**Standard Model of FUNDAMENTAL PARTICLES AND INTERACTIONS**

The Standard Model is a quantum theory that summarizes our current knowledge of the physics of fundamental particles and fundamental interactions. Interactions are manifested by forces and by decay rates of unstable particles.

FERMIONS matter constituents		
spin = 1/2, 3/2, 5/2, ...		
<b>Leptons</b> spin = 1/2		
Flavor	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge
$\nu_1$ neutrino*	$(0.03-0.13) \times 10^{-9}$	0
e electron	0.000511	-1
$\nu_2$ middle neutrino*	$(0.009-0.13) \times 10^{-9}$	0
$\mu$ muon	0.106	-1
$\nu_3$ highest neutrino*	$(0.04-0.14) \times 10^{-9}$	0
t tau	1.777	-1

Quarks		
Flavor	Approx. Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge
u up	0.002	2/3
d down	0.005	-1/3
c charm	1.3	2/3
s strange	0.1	-1/3
t top	173	2/3
b bottom	4.2	-1/3

\*See the neutrino paragraph below.

Spin is the intrinsic angular momentum of particles. Spin is given in units of  $\hbar$ , which is the quantum unit of angular momentum where  $\hbar = h/e = 6.58 \times 10^{-25}$  GeV =  $1.05 \times 10^{-34}$  J.s.

Electric charges are given in units of the proton's charge. In SI units the electric charge of the proton is  $1.60 \times 10^{-19}$  coulombs.

The energy unit of particle physics is the electronvolt (eV), the energy gained by one electron in crossing a potential difference of one volt. Masses are given in GeV/c<sup>2</sup>. Remember  $E = mc^2$ , where  $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV} = 1.60 \times 10^{-19}$  joule. The mass of the proton is  $0.938 \text{ GeV}/c^2 = 1.67 \times 10^{-27}$  kg.

**Neutrinos**

Neutrinos are produced in the sun, supernovae, reactors, accelerator collisions, and many other processes. Any produced neutrino can be described as one of three neutrino flavor states  $\nu_1$ ,  $\nu_2$ , or  $\nu_3$ , labeled by the type of charged lepton associated with its production. Each is a defined particle with its own mass and spin. The masses of the neutrinos are for which currently allowed mass ranges are shown in the table. Further exploration of the properties of neutrinos may yield powerful clues to puzzles about matter and antimatter and the evolution of stars and galaxy structures.

**Matter and Antimatter**

For every particle type there is a corresponding antiparticle type, denoted by adding the letter "anti" (antiproton, antineutron, etc.) as shown. Particle and antiparticle have identical mass and spin but opposite charge. All electrically neutral bosons (e.g.,  $Z^0$ ,  $\gamma$ , and  $\pi^0$ ) are their own antiparticles.

**Structure within the Atom**

Quark Size  $< 10^{-19}$  m  
Nucleus Size  $= 10^{-14}$  m  
Atom Size  $= 10^{-10}$  m  
Electron Size  $< 10^{-16}$  m  
Neutron and Proton Size  $= 10^{-15}$  m

If the proton and neutrons in this picture were 10 cm across, then the quarks and electrons would be less than 1 mm in size and the entire atom would be about 10 km across.

**Properties of the Interactions**

The strengths of the interactions (forces) are shown relative to the strength of the electromagnetic force for two u quarks separated by the specified distance.

Property	Gravitational Interaction	Weak Interaction (Electroweak)	Electromagnetic Interaction	Strong Interaction
Acts on:	Mass - Energy	Flavor	Electric Charge	Color Charge
Particles experiencing:	All	Quarks, Leptons	Electrically Charged	Quarks, Gluons
Particles mediating:	Gravitation (not yet observed)	$W^+$ , $W^-$ , $Z^0$	$\gamma$	Gluons
Strength at:	$\begin{cases} 10^{-19} \text{ m} \\ 10^{-41} \text{ m} \end{cases}$	$\begin{cases} 0.8 \\ 10^{-41} \text{ m} \end{cases}$	$\begin{cases} 1 \\ 10^{-4} \text{ m} \end{cases}$	$\begin{cases} 25 \\ 1 \text{ m} \end{cases}$
Strength at:	$\begin{cases} 10^{-19} \text{ m} \\ 3 \times 10^{-17} \text{ m} \end{cases}$	$\begin{cases} 10^{-4} \\ 10^{-41} \text{ m} \end{cases}$	$\begin{cases} 60 \\ 1 \text{ m} \end{cases}$	

**Unsolved Mysteries**

Driven by new puzzles in our understanding of the physical world, particle physicists are following paths to new wonders and startling discoveries. Experiments may even find extra dimensions of space, mini-black holes, and/or evidence of string theory.

**Particle Processes**

These diagrams are an artist's conception. Blue-green shaded areas represent the cloud of gluons.

$n + p \rightarrow e^- \bar{\nu}_e$

An electron (e-) and an antineutrino via a virtual (mediating) W boson. This is neutron (n) beta decay to a proton (p) plus an electron and an antineutrino via a virtual (mediating) W boson. This is neutron (n) beta decay.

$e^+ e^- \rightarrow B^0 \bar{B}^0$

An electron and positron (e+) annihilation at high energy can annihilate to produce  $B^0$  and  $\bar{B}^0$  mesons via a virtual Z boson or a virtual photon.

**Universe Accelerating?**

The expansion of the universe appears to be accelerating! Is this due to Einstein's Cosmological Constant? If not, will experiments reveal a new force of nature or even extra (hidden) dimensions of space?

**Why No Antimatter?**

Matter and antimatter were created in the Big Bang. Why do we now see only matter except for the tiny amounts of antimatter that we make in the lab and observe in cosmic rays?

**Dark Matter?**

Invisible forms of matter make up much of the mass observed in galaxies and clusters of galaxies. Does this dark matter consist of new types of particles that interact very weakly with ordinary matter?

**Origin of Mass?**

In the Standard Model, for fundamental particles to masses, there must exist a particle called the Higgs boson. Will it be discovered soon? Is supersymmetry theory correct in predicting more than one type of Higgs?

<http://www.cpepphysics.org/>

A nossa tabela periódica - proposta na década de 60 do século XX

# O Modelo Padrão

As partículas elementares, no que diz respeito às suas propriedades estatísticas, se dividem em dois tipos:

FERMIONS			matter constituents spin = 1/2, 3/2, 5/2, ...		
Leptons spin = 1/2			Quarks spin = 1/2		
Flavor	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge	Flavor	Approx. Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge
$\nu_e$ electron neutrino	<1×10 <sup>-8</sup>	0	u up	0.003	2/3
e electron	0.000511	-1	d down	0.006	-1/3
$\nu_\mu$ muon neutrino	<0.0002	0	c charm	1.3	2/3
$\mu$ muon	0.106	-1	s strange	0.1	-1/3
$\nu_\tau$ tau neutrino	<0.02	0	t top	175	2/3
$\tau$ tau	1.7771	-1	b bottom	4.3	-1/3

BOSONS			force carriers spin = 0, 1, 2, ...		
Unified Electroweak spin = 1			Strong (color) spin = 1		
Name	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge	Name	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge
$\gamma$ photon	0	0	g gluon	0	0
$W^-$	80.39	-1	Higgs Boson spin = 0		
$W^+$	80.39	+1	H Higgs	126	0
Z boson	91.188	0			

© 2016 Contemporary Physics Education Project  
CPEPphysics.org

Férmions (spin semi-inteiro), bárions por exemplo

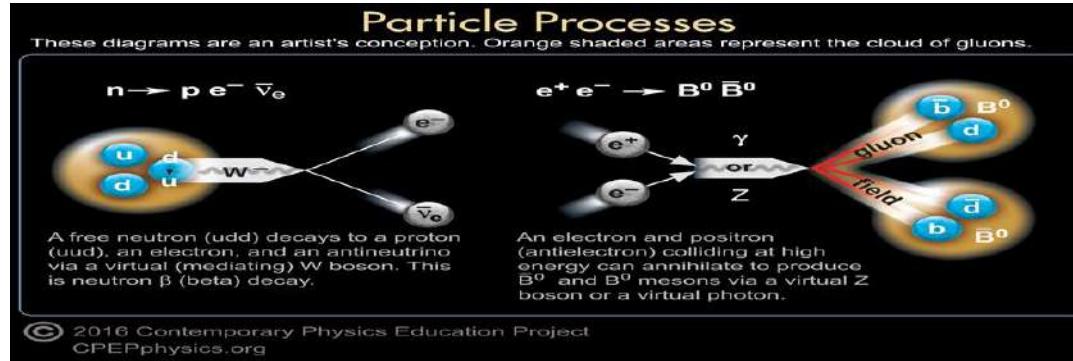
Bósons (spin inteiro), mésons por exemplo

# O Modelo Padrão

As partículas elementares interagem entre si e obedecem regras aplicadas nos processos entre elas

Properties of the Interactions				
Property	Gravitational Interaction	Weak Interaction (Electroweak)	Electromagnetic Interaction	Strong Interaction
Acts on:	Mass – Energy	Flavor	Electric Charge	Color Charge
Particles experiencing:	All	Quarks, Leptons	Electrically Charged	Quarks, Gluons
Particles mediating:	Graviton (not yet observed)	$W^+$ $W^-$ $Z^0$	$\gamma$	Gluons
Strength at {	$10^{-18}$ m $3 \times 10^{-17}$ m	$10^{-41}$ $10^{-41}$	0.8 $10^{-4}$	1 1
				25 60

© 2016 Contemporary Physics Education Project  
CPEPphysics.org



# Quais são as regras do jogo?

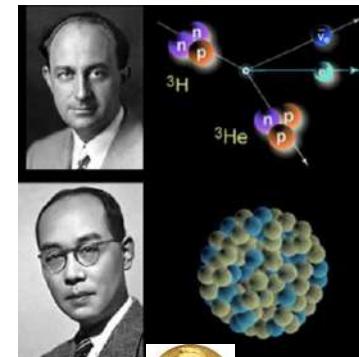
Eletrodinâmica Quântica - QED



TQC dos fótons, elétrons, pósitrons e suas interações



Força Fraca - Teoria do decaimento radioativo descrita pela interação de E. Fermi.

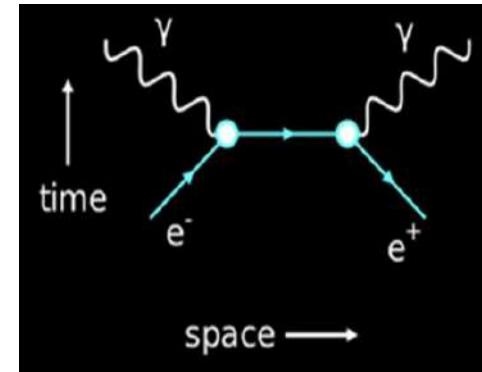


Força Forte - Força responsável pela coesão do núcleo, descrita pelo potencial de H. Yukawa



# Quais são as regras do jogo?

R. Feynmann desenvolve em 1948 um método gráfico que permite calcular as probabilidades de ocorrência de processos que envolvem interações entre partículas elementares.



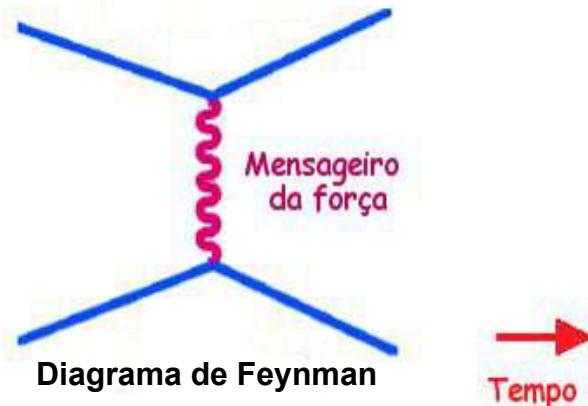
$$\mathcal{M} = \varepsilon_\mu^*(p_1, \lambda_1) \varepsilon_\nu^*(p_2, \lambda_2) \bar{v}(e^+) (ie\gamma^\nu) \frac{i}{q - m} (ie\gamma^\mu) u(e^-)$$



# Como os objetos compostos são mantidos juntos?

Forças são transmitidas pela troca de um “mensageiro” (partícula) entre partículas

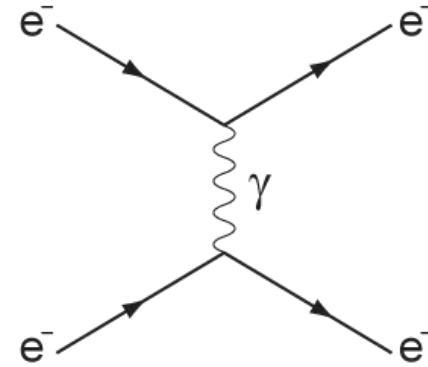
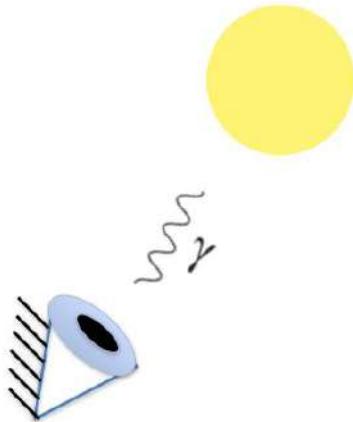
Alcance da força é proporcional ao inverso da massa do mensageiro



No eletromagnetismo, por exemplo, temos o fóton como mensageiro.  
Elétrons e prótons são carregados → interações dos fenômenos do dia-a-dia

# Quais são as regras do jogo?

Como as forças atuam nas partículas?

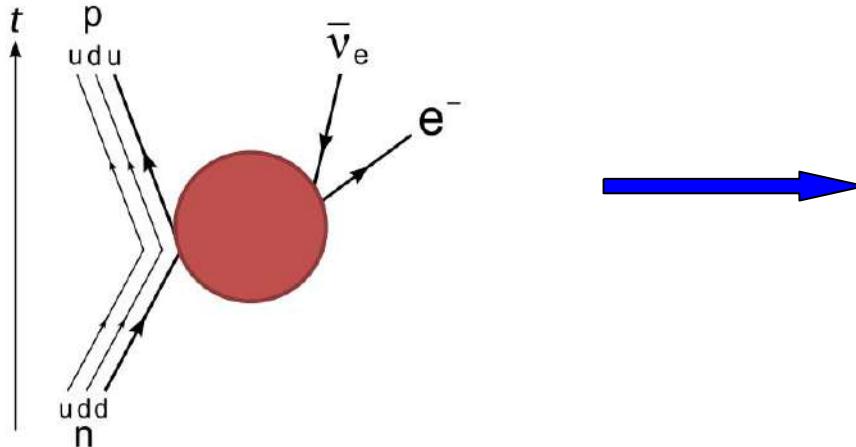


Todas as forças precisam de partículas que agem como mediadoras: glúons, fótons,  $W^\pm$  e  $Z$ .

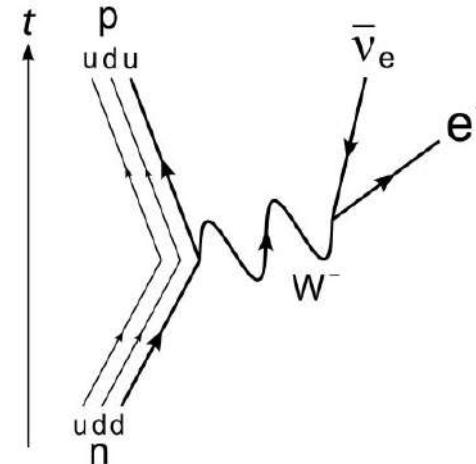
# Quais são as regras do jogo?

Como as forças atuam nas partículas?

Teoria de Fermi (1934)



Teoria eletrofraca (1960s)

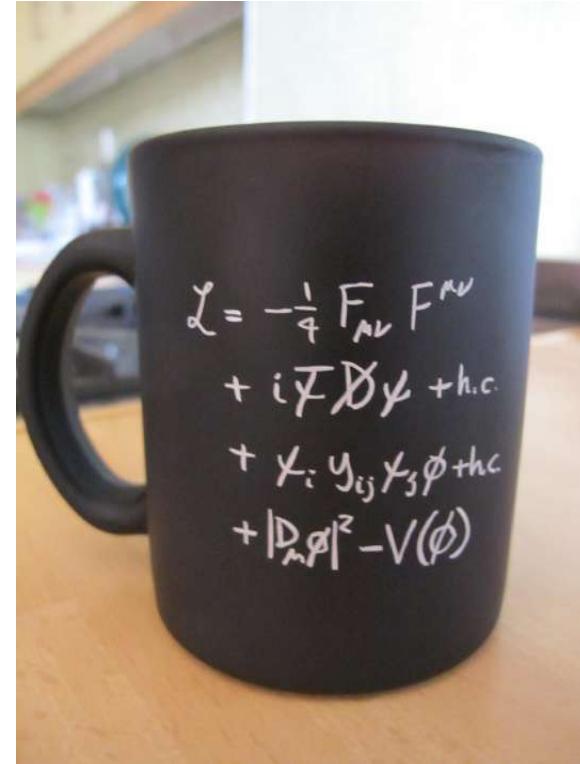


- Inicialmente o  $W$  não havia sido descoberto
- Tem massa! O Modelo Padrão não prevê

# Quais são as regras do jogo?

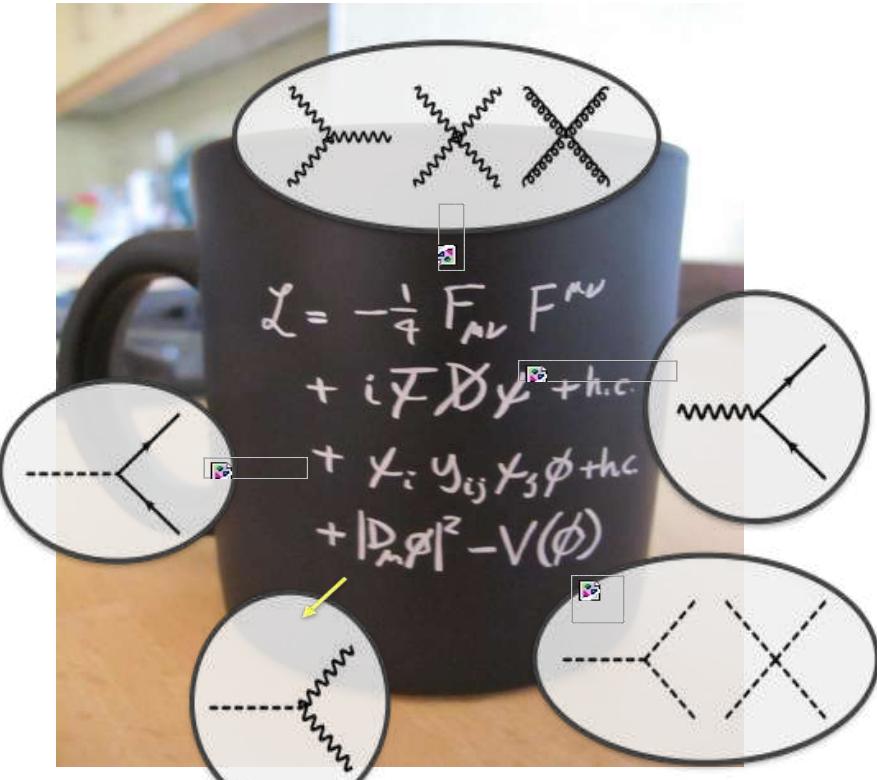
## MODELO PADRÃO (STANDARD MODEL)

Essa equação é a nossa melhor representação do que entendemos sobre partículas fundamentais e forças da natureza.



# Quais são as regras do jogo?

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{SM} = & -\frac{1}{2}\partial_\nu g_\mu^a \partial_\nu g_\mu^a - g_s f^{abc} \partial_\mu g_\mu^a g_\mu^b g_\mu^c - \frac{1}{4}g_\mu^2 f^{abc} f^{ade} g_\mu^b g_\mu^c g_\mu^d g_\mu^e - \partial_\nu W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- \\ & - M^2 W_\mu^+ W_\mu^- - \frac{1}{2}\partial_\mu Z_\mu^0 \partial_\mu Z_\mu^0 - \frac{1}{2c_w^2} M^2 Z_\mu^0 Z_\mu^0 - \frac{1}{2}\partial_\mu A_\nu \partial_\mu A_\nu - ig c_w (\partial_\mu Z_\mu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - \\ & W_\nu^- W_\mu^-) - Z_\mu^0 (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+) + Z_\mu^0 (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+)) - \\ & ig s_w (\partial_\nu A_\mu (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - A_\nu (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+) + A_\mu (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\ & W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+)) - \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\mu^- W_\nu^- + \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\nu^- W_\nu^+ + g^2 \frac{s_w^2}{c_w^2} (Z_\mu^0 W_\mu^+ Z_\mu^0 W_\nu^- - \\ & Z_\mu^0 Z_\mu^0 W_\nu^- W_\nu^-) + g^2 s_w^2 (A_\mu W_\mu^+ A_\nu W_\nu^- - A_\mu A_\nu W_\mu^+ W_\nu^-) + g^2 s_w c_w (A_\mu Z_\nu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - \\ & W_\nu^+ W_\mu^-) - 2 A_\mu Z_\mu^0 W_\nu^-) - \frac{1}{2}\partial_\mu H \partial_\mu H - 2M^2 \partial_\mu H^2 - \partial_\mu \phi^+ \partial_\mu \phi^- - \frac{1}{2}\partial_\mu \phi^0 \partial_\mu \phi^0 - \\ & \beta_h \left( \frac{2M^2}{g^2} + \frac{2M^2}{g} H + \frac{1}{2}(H^2 + H \phi^0 \phi^0 + 2\phi^+ \phi^-) \right) + \frac{2M^4}{g^2} \alpha_h - \\ & g \alpha_h M (H^3 + H \phi^0 \phi^0 + 2H \phi^+ \phi^-) - \\ & \frac{1}{8}g^2 \alpha_h (H^4 + (\phi^0)^4 + 4(\phi^+ \phi^-)^2 + 4(\phi^0)^2 \phi^+ \phi^- + 4H^2 \phi^+ \phi^- + 2(\phi^0)^2 H^2) - \\ & g M W_\mu^+ W_\mu^- H - \frac{1}{2}g \frac{m_e}{c_w} Z_\mu^0 Z_\mu^0 H - \\ & \frac{1}{2}ig (W_\mu^+ (\phi^0 \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^0) - W_\mu^- (\phi^0 \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu \phi^0)) + \\ & \frac{1}{2}g (W_\mu^+ (H \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu H) + W_\mu^- (H \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu H)) + \frac{1}{2}g \frac{1}{c_w} (Z_\mu^0 (H \partial_\mu \phi^0 - \phi^0 \partial_\mu H) + \\ & M (\frac{1}{c_w} Z_\mu^0 \partial_\mu \phi^0 + W_\mu^+ \partial_\mu \phi^- + W_\mu^- \partial_\mu \phi^+) + ig \frac{2c_w}{c_w} M Z_\mu^0 (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + ig s_w M A_\mu (W_\mu^+ \phi^- - \\ & W_\mu^- \phi^+) - ig \frac{1-2c_w}{2c_w} Z_\mu^0 (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) + ig s_w A_\mu (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) - \\ & \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\mu^- (H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+ \phi^-) - \frac{1}{8}g^2 \frac{1}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\mu^0 (H^2 + (\phi^0)^2 + 2(c_w^2 - 1)^2 \phi^+ \phi^-) - \\ & \frac{1}{2}g^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + W_\mu^- \phi^+) - \frac{1}{2}g^2 \frac{s_w}{c_w} Z_\mu^0 H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}g^2 s_w A_\mu \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + \\ & W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}ig^2 s_w A_\mu H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - g^2 \frac{s_w}{c_w} (2c_w^2 - 1) Z_\mu^0 A_\mu \phi^+ \phi^- + \\ & g^2 s_w^2 A_\mu \phi^+ \phi^- + \frac{1}{2}g s_w \lambda_{ij}^0 (\bar{q}_j^0 \gamma^\mu q_i^0) g_\mu^\lambda - \bar{e}^\lambda (\gamma \partial + m_\nu^\lambda) e^\lambda - \bar{e}^\lambda (\gamma \partial + m_\nu^\lambda) e^\lambda - \bar{u}_j^\lambda (\gamma \partial + \\ & m_\nu^\lambda) u_j^\lambda - \bar{d}_j^\lambda (\gamma \partial + m_\nu^\lambda) d_j^\lambda + ig s_w A_\mu (-(\bar{e}^\lambda \gamma^\mu e^\lambda) + \frac{2}{3}(\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu u_j^\lambda) - \frac{1}{3}(\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu d_j^\lambda)) + \\ & \frac{ig}{4c_w} Z_\mu^0 \{(\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (4s_w^2 - 1 - \gamma^5) e^\lambda) + (\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu (\frac{2}{3}s_w^2 - 1 - \gamma^5) d_j^\lambda) + \\ & (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (1 - \frac{2}{3}s_w^2 + \gamma^5) u_j^\lambda)\} + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^+ ((\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) U^{lep}{}_{\lambda\kappa} e^\kappa) + (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) C_{\lambda\kappa} e^\kappa) + \\ & (\bar{e}^\lambda U^{lep}{}_{\lambda\kappa} \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} \gamma^\mu (1 + \gamma^5) u_j^\lambda)) + \\ & \frac{ig}{2\sqrt{2}} \phi^+ (-m_e^\nu (\bar{\nu}^\lambda U^{lep}{}_{\lambda\kappa} (1 - \gamma^5) e^\kappa) + m_\nu^\lambda (\bar{\nu}^\lambda U^{lep}{}_{\lambda\kappa} (1 - \gamma^5) \nu^\lambda) - \\ & \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- (m_e^\lambda (\bar{e}^\lambda U^{lep}{}_{\lambda\kappa} (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) - m_\nu^\kappa (\bar{e}^\lambda U^{lep}{}_{\lambda\kappa} (1 - \gamma^5) \nu^\lambda) - \frac{g}{2} \frac{m_\lambda^\lambda}{M} H (\bar{\nu}^\lambda \nu^\lambda) - \\ & \frac{g}{2} \frac{m_\lambda^\lambda}{M} H (\bar{e}^\lambda e^\lambda) + \frac{ig}{2} \frac{m_\lambda^\lambda}{M} \phi^0 (\bar{d}^\lambda \gamma^\lambda \nu^\lambda) - \frac{ig}{2} \frac{m_\lambda^\lambda}{M} \phi^0 (\bar{e}^\lambda \gamma^\lambda e^\lambda) - \frac{1}{2} \bar{\nu}_\lambda M_{\lambda\kappa}^R (1 - \gamma_5) \bar{\nu}_\kappa - \\ & \frac{1}{4} \bar{\nu}_\lambda M_{\lambda\kappa}^R (1 - \gamma_5) \bar{\nu}_\kappa + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ (-m_d^\nu (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 - \gamma^5) d_j^\nu) + m_u^\nu (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 + \gamma^5) d_j^\nu) + \\ & \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- (m_d^\lambda (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 + \gamma^5) u_j^\lambda) - m_u^\nu (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 - \gamma^5) u_j^\nu) - \frac{g}{2} \frac{m_\lambda^\lambda}{M} H (\bar{u}_j^\lambda u_j^\nu) - \\ & \frac{g}{2} \frac{m_\lambda^\lambda}{M} H (\bar{d}_j^\lambda d_j^\nu) + \frac{ig}{2} \frac{m_\lambda^\lambda}{M} \phi^0 (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\lambda u_j^\lambda) - \frac{ig}{2} \frac{m_\lambda^\lambda}{M} \phi^0 (\bar{d}_j^\lambda \gamma^\lambda d_j^\lambda) + \bar{G}^\alpha \partial^\nu G^\alpha + g_s f^{abc} \partial_\mu G^a G^b g_\mu^c + \\ & \bar{X}^+(\partial^2 - M^2) X^- + \bar{X}^-(\partial^2 - M^2) X^+ + \bar{X}^0 (\partial^2 - \frac{M^2}{c_w^2}) X^0 + \bar{Y} \partial^2 Y + ig s_w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{X}^0 X^- - \\ & \partial_\mu \bar{X}^+ X^0) + ig s_w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{Y} X^- - \partial_\mu \bar{X}^+ Y) + ig c_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- X^0 - \\ & \partial_\mu \bar{X}^0 X^-) + ig s_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- Y - \partial_\mu \bar{Y} X^+) + ig c_w Z_\mu^0 (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \\ & \partial_\mu \bar{X}^- X^-) - \frac{1}{2}g M \left( \bar{X}^+ X^- H + \bar{X}^- X^+ H + \frac{1}{c_w^2} \bar{X}^0 X^0 H \right) + \frac{1-2c_w^2}{2c_w} ig M (\bar{X}^+ X^0 \phi^- - \bar{X}^- X^0 \phi^-) + \\ & \frac{1}{2c_w} ig M (\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-) + ig M s_w (\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-) + \\ & \frac{1}{2}ig M (\bar{X}^+ X^+ \phi^0 - \bar{X}^- X^- \phi^0) . \end{aligned}$$



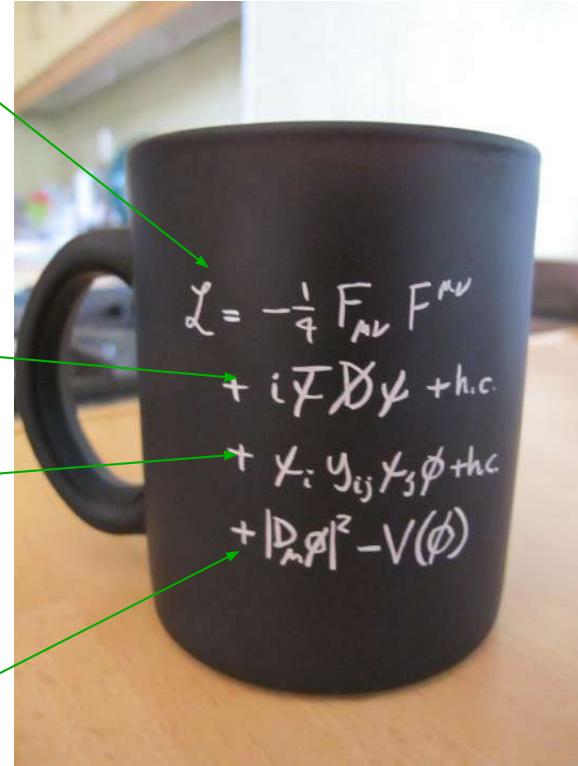
# Quais são as regras do jogo?

A 1º linha descreve as **forças**:  
eletromagnética, forte e fraca.

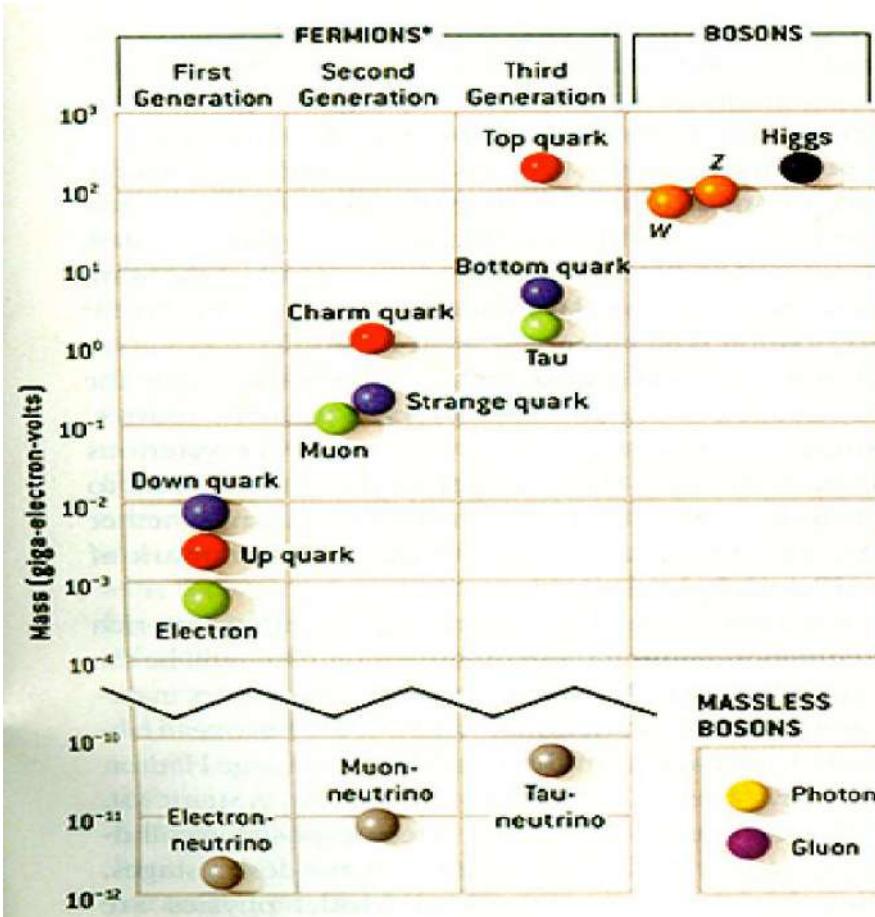
A 2º linha descreve com essas  
forças agem na **partículas**  
**fundamentais da matéria**:  
**quarks e léptons**.

A 3º linha descreve como essas  
partículas adquirem suas  
massas a partir do **bóson de**  
**Higgs**

A 4º linha permite que o **bóson**  
**de Higgs** faça o trabalho dele ;)



# Modelo Padrão



Qual a origem da massa das partículas?  
 Poderão as forças forte e eletrofraca serem unificadas?  
 Por que existem três gerações de matéria?

Esperamos responder esta e outras perguntas!

# Modelo Padrão

- O Modelo Padrão ganhou “seu” Nobel em 1979, sendo laureados Glashow, Weinberg e Salam por suas contribuições teóricas para a unificação das interações Fraca e Eletromagnética da partículas elementares, incluindo a predição da Corrente Neutra Fraca. Fizeram uma teoria que descreve a interação dos quarks, léptons e bósons de gauge



O Modelo Padrão é uma das teorias mais bem sucedidas ao prever a existência de várias partículas:

- os Bósons W's e Z foram descoberto no CERN em 1983 - C. Rubbia e Van De Meer
- o quark top foi descoberto no FERMILAB em 1995



mas...

todas as partículas no Modelo Padrão tinham massa nula!?

# Como dar massa as partículas

Na década de 60, vários teóricos procuravam introduzir na teoria do Modelo Padrão, algo que permitisse que as partículas elementares adquirissem massa naturalmente. O que ficou mais conhecido foi o Mecanismo de Higgs, ou seria de ABEGHHK'tH?. Durante muitas décadas foi procurada a partícula que recebeu o nome de Bóson de Higgs e poderia comprovar a efetividade desse mecanismo. Como???

Anderson, Brout, Englert, Guralnik, Hagen, Higgs, Kibble and 't Hooft



Kibble

Hagen

Brout

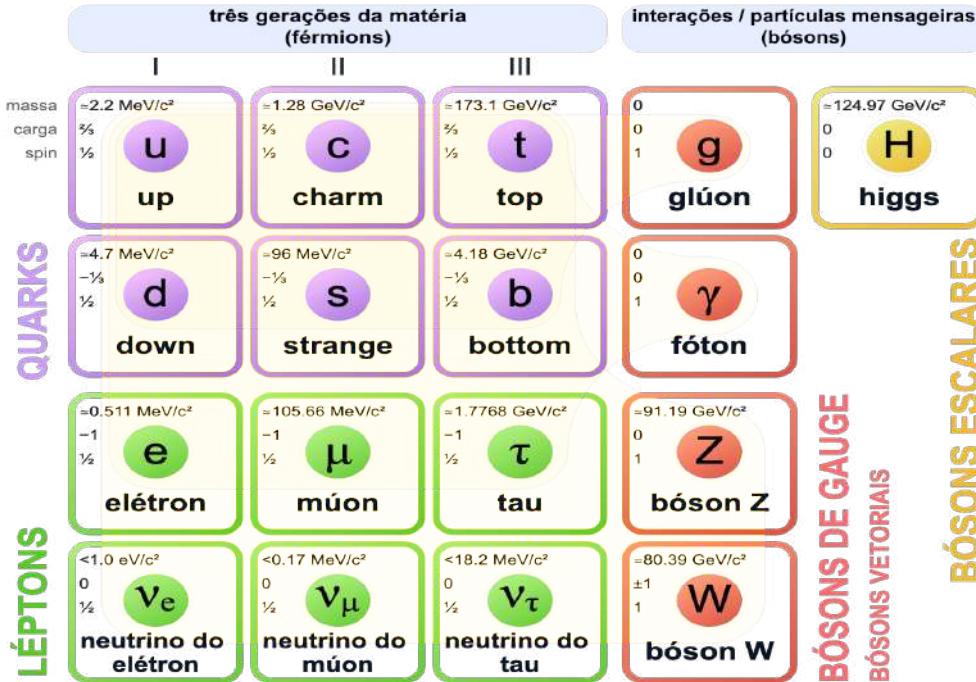
Guralnik

Englert



Higgs

# Modelo Padrão das Partículas Elementares



Força eletromagnética ( $\gamma$ ):

- carga elétrica +  $\gamma$

Força fraca ( $W$  e  $Z$ ):

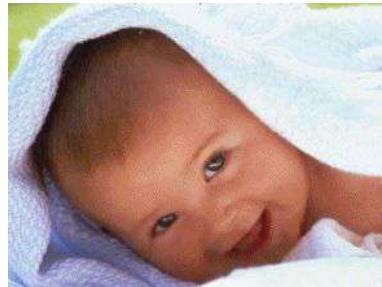
- todas as partículas, menos glúons

Força forte (glúons):

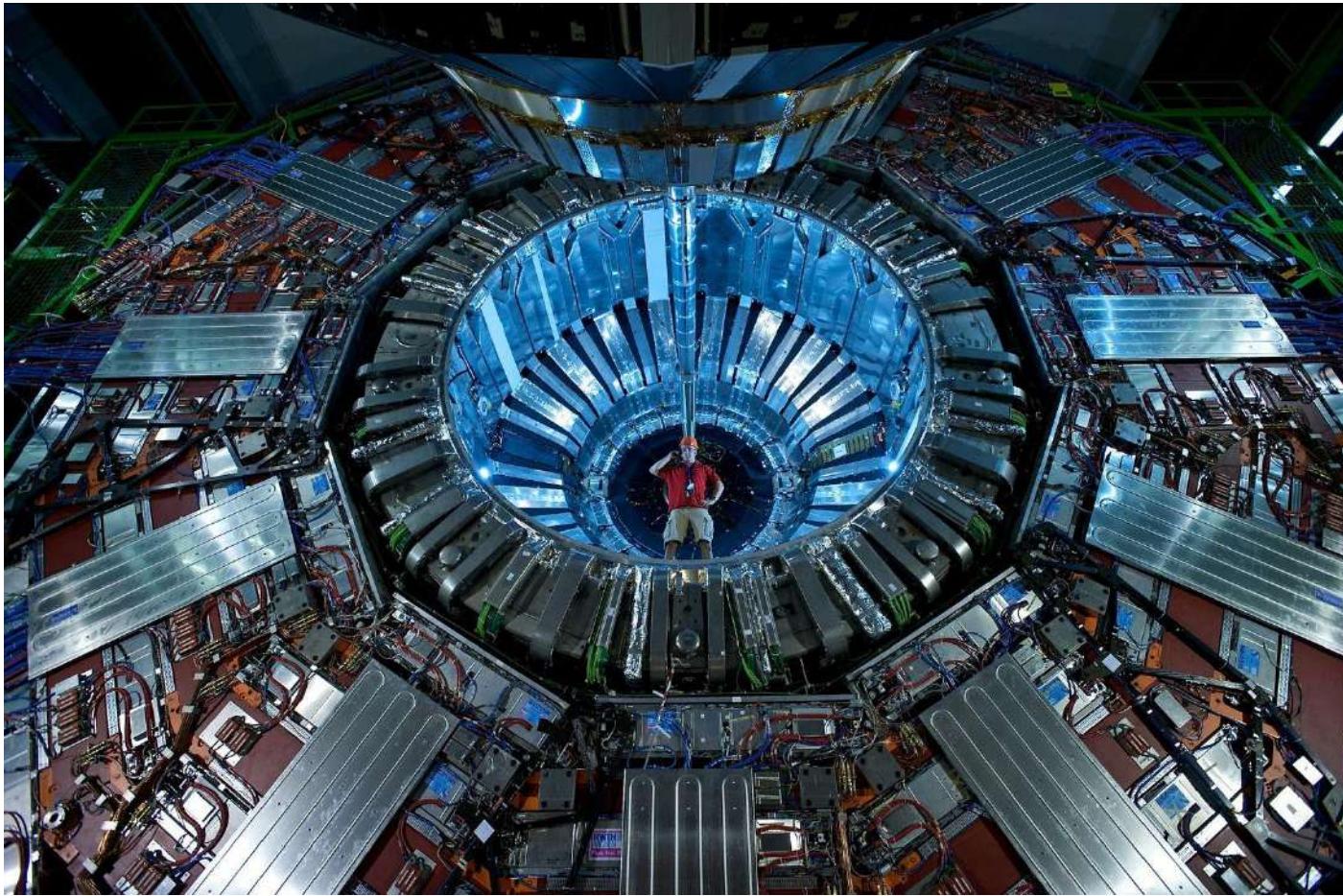
- quarks e glúons)

Essas interações são as bases de como vemos as partículas nos detectores de partículas.

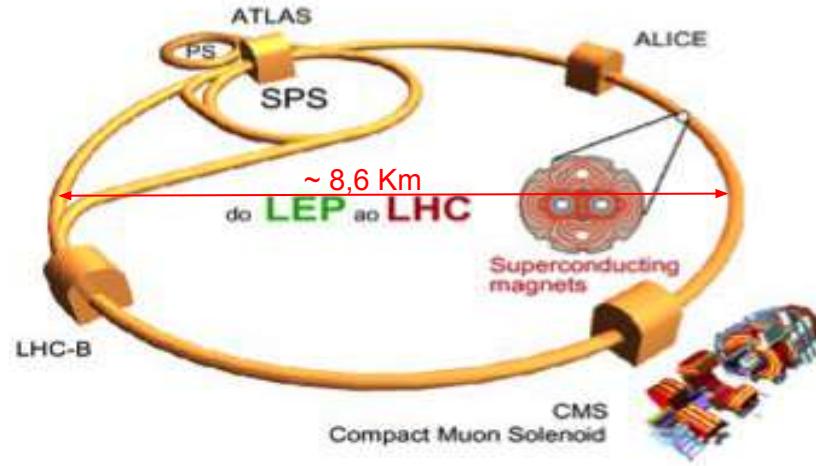
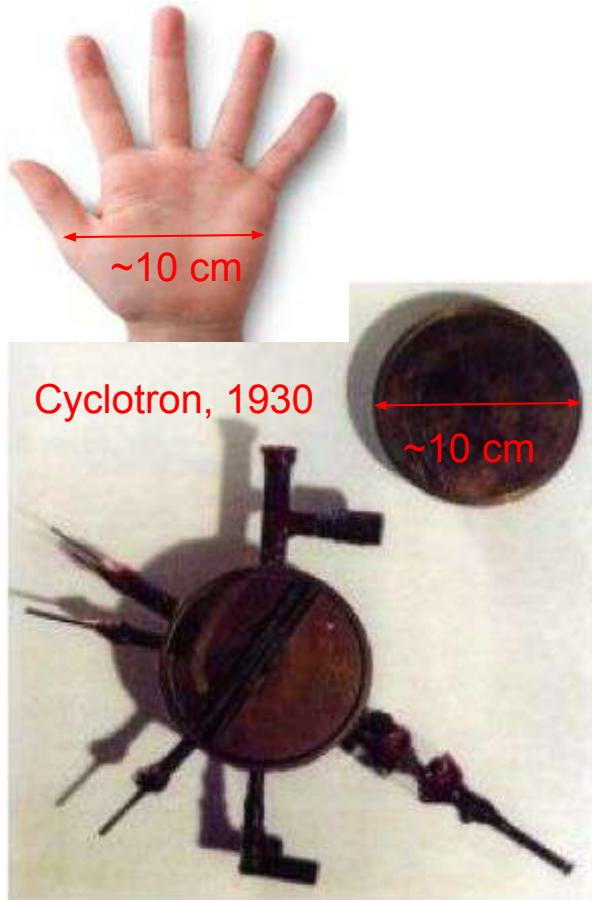
Todo o mundo visível/detectável se fundamenta no nível invisível das **partículas elementares**.



# Detectáveis com os olhos da Física de Partículas



# Como produzir novas partículas?



	Feixes	Energias		Luminosidade
LEP	e+ e-	200	GeV	$10^{32} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
LHC	p p	14	TeV	$10^{34}$
	Pb Pb	1312	TeV	$10^{27}$

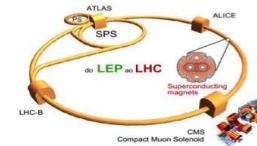
# Como produzir novas partículas?

Colocando  $E = mc^2$  em prática, convertendo energia em matéria

Tera elétron volt (TeV)



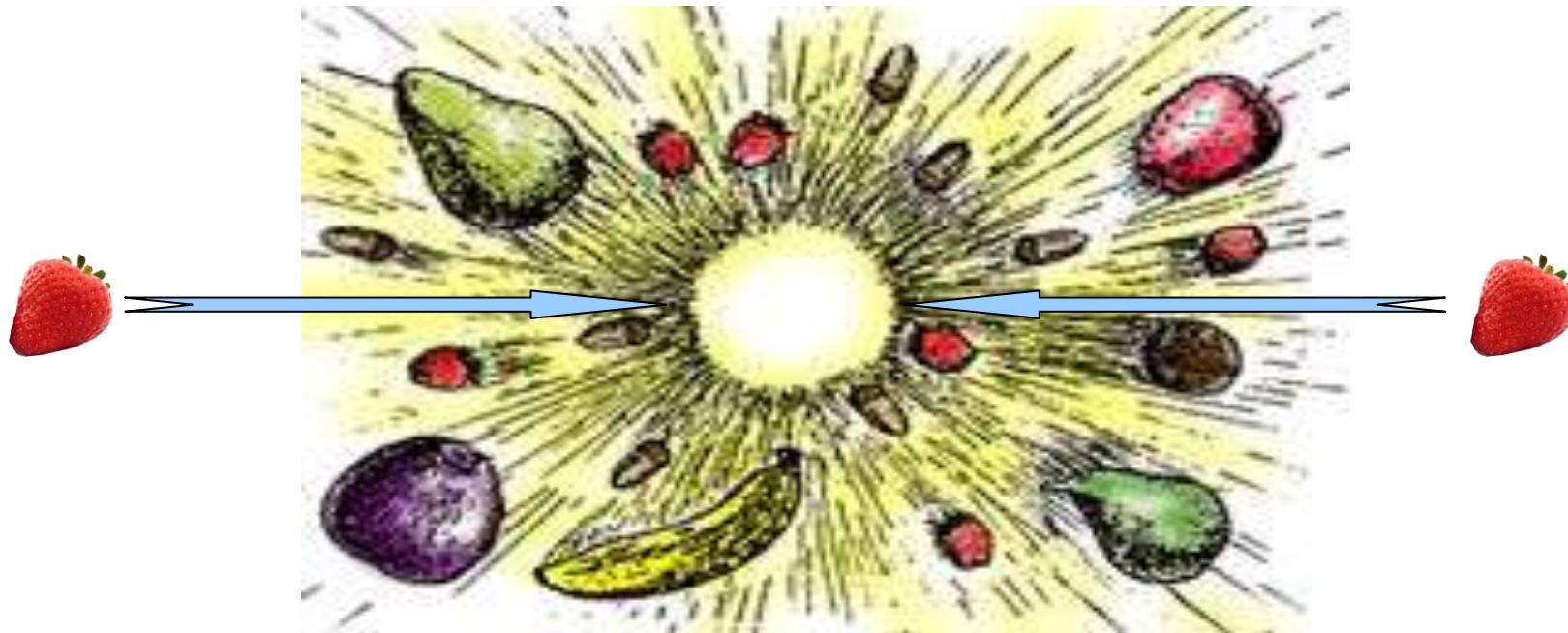
1 morango: ~ 4 kcal  
1 caloria: ~ 26000000 TeV



Colisões de dois prótons no LHC chegam a energia de 13,6 TeV

# Como produzir novas partículas?

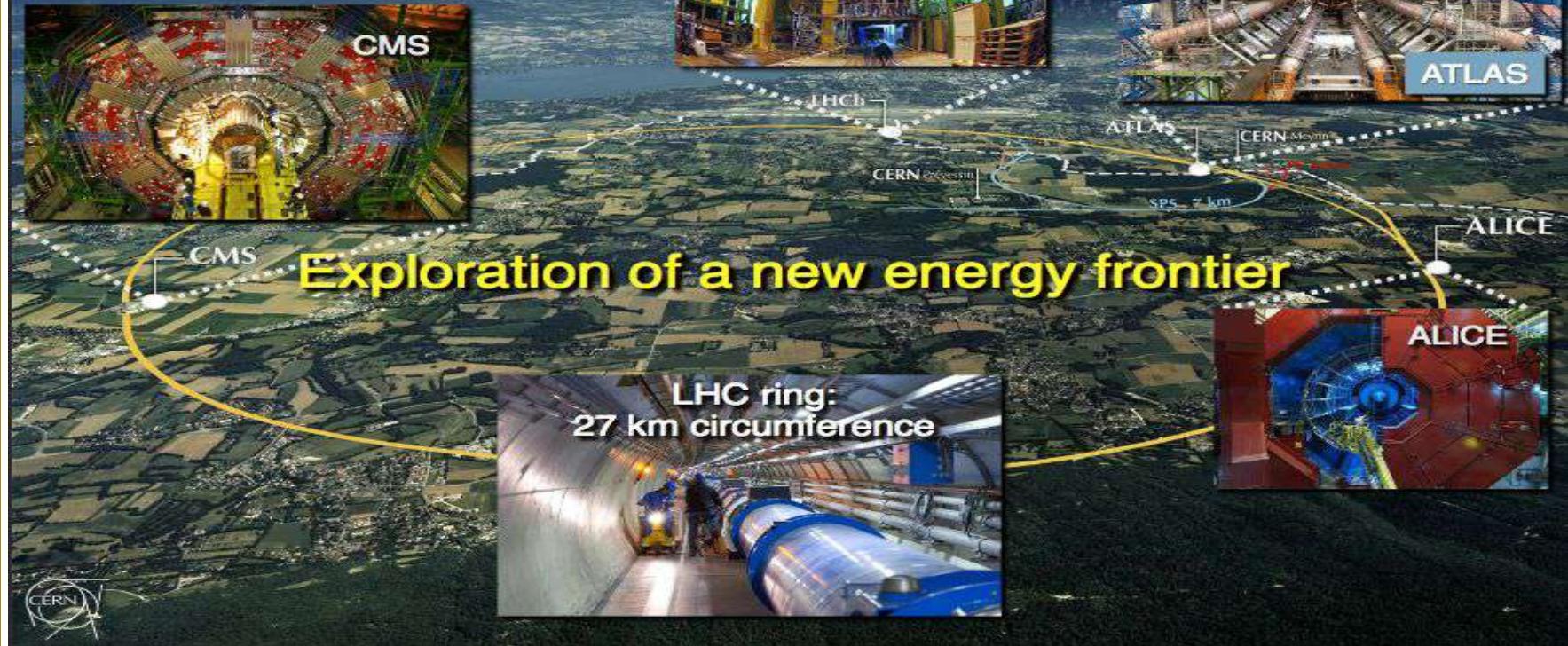
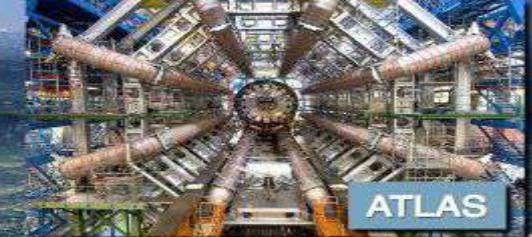
Colocando  $E = mc^2$  em prática, convertendo energia em matéria



# Por que produzir novas partículas?

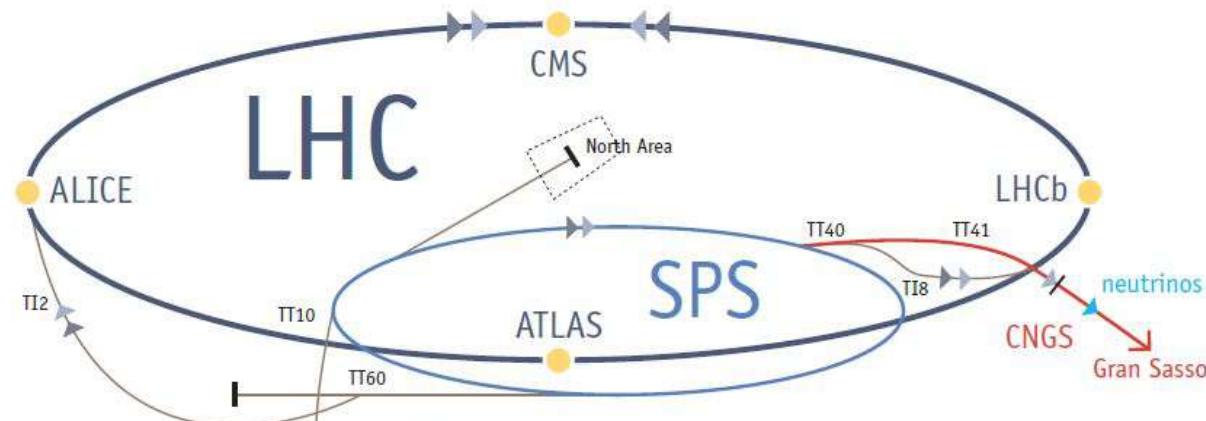
- Explora-se novas forças e novos blocos de matéria
- Abre-se um novo território na física a ser explorado, tanto em altas energias quanto em fenômenos **extremamente raros**
- E... fazer a conexão com os raios cósmicos

O maior laboratório de Física  
de Partículas do mundo

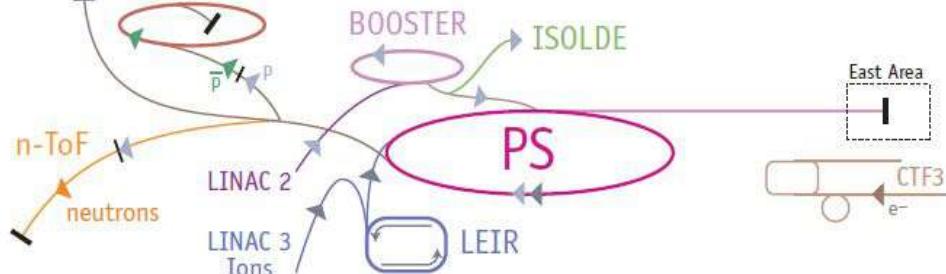


# O LHC

## acelerador com maior energia do mundo



Início da construção **2001**  
Início de operação **2008**  
Exploração ~ **30 anos**



Ocorrem **40 milhões** de colisões próton-próton por seg.  
Tem ~ **9000** magnetos cuja temperatura é de **1,9 Kelvin = -271 °C**

# O túnel do LHC



Dipolo eletromagnético descendo ao túnel do LHC e depois de instalado ~100 m abaixo da superfície

É necessário 96 ton de hélio líquido para manter o sistema a 1,9 K



Trilhões de prótons viajam a 99,9999991 % da velocidade da luz no anel de ~ 27 km de perímetro 11000 vezes por segundo



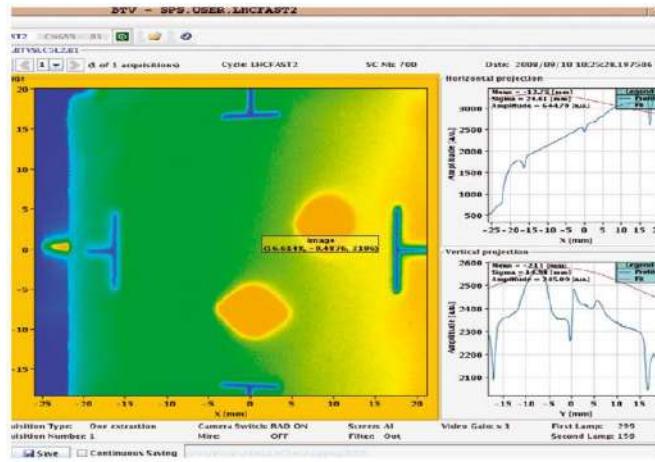
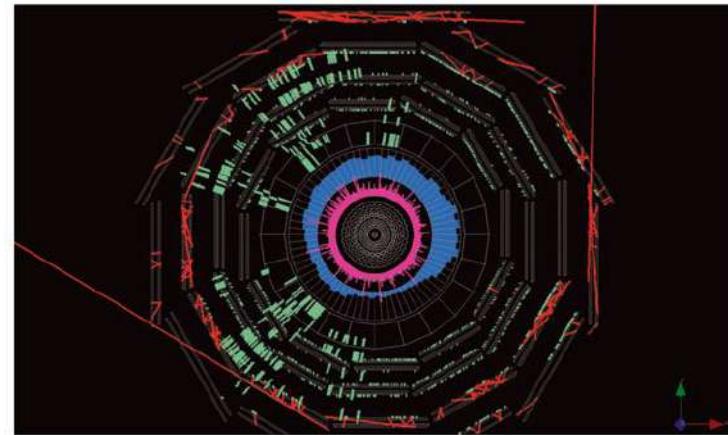
# O LHC

O lugar mais vazio no sistema solar...  
Para acelerar prótons até à velocidade da luz é preciso um  
vácuo semelhante ao do espaço interplanetário.

Um dos lugares mais frios do Universo...  
Com temperatura de  $-271^{\circ}\text{C}$ , ou 1,9 graus acima do zero  
absoluto, o LHC é mais frio que os espaço interestelar

Um dos lugares mais quentes na Galáxia...  
Na colisão de dois prótons é gerado uma temperatura de mais  
de um bilhão de vezes superior à do interior do Sol

# LHC @ 10/09/2008

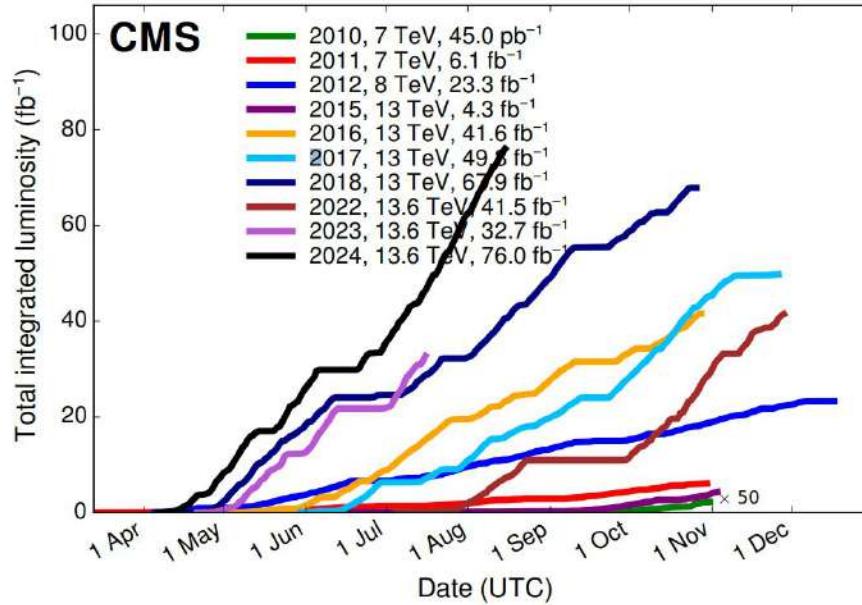


# O LHC tem um vasto programa de Física:

- Bóson de Higgs - origem das massas??
- Natureza da matéria escura - 4% do universo é visível
- O plasma primordial - colisões Pb x Pb - ALICE
- Matéria x Antimatéria - violação de CP - LHCb
- Supersimetria - squarks, gluinos, gravitinos ...
- Leptonquarks - existe um "átomo" quarkônico???
- Conexão com os raios cósmicos, César Lattes
- Física Frontal / baixo ângulo - responsável por 40%  $\sigma$
- Dimensões extras
- Multijatos
- Espalhamento  $\gamma\gamma$
- Física nova ...

# Mas do que precisamos? DADOSSSS

Luminosidade integrada entregue pelo CMS, pp



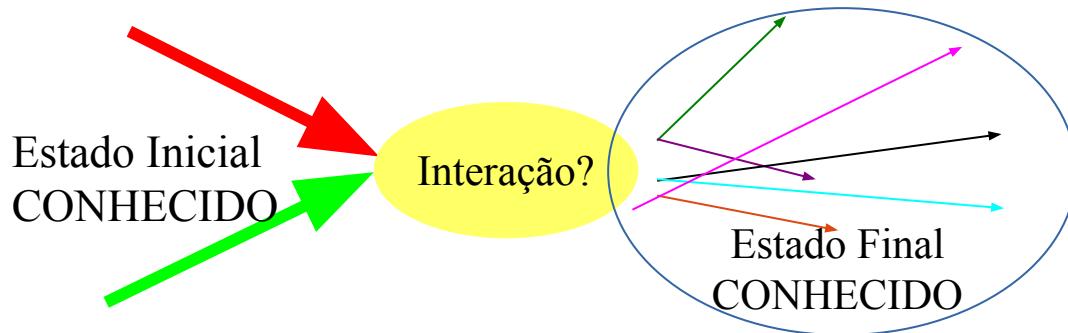
Maior energia → possibilita descobrir partículas mais energéticas ( $E = mc^2$ )  
Luminosidade → quantidade de dados coletados (proporcional ao número de colisões)  
Mais dados → maior chance de vermos processos raros

# Rastreando partículas



# Rastreando partículas

- Um astrônomo usa um telescópio
- Um biólogo usa um microscópio
- Muitos de nós usa o celular para fazer uma foto da realidade
- Os Físicos de partículas inventam, constroem e operam seus detectores para registrar o produto da interação de partículas



**DETECTOR**  
Registra o estado final de um evento para os físicos estudarem a natureza das interações fundamentais

# Rastreando partículas

Detectores de partículas podem ser classificados de acordo com o que medem em:

- trajetografia, aqueles que registram o traço deixado pela partícula
  - detectores a gás, semicondutores, etc.
- calorímetros, aqueles que absorvem e medem a energia da partícula
  - eletromagnéticos e hadrônicos
- cintiladores, utiliza luminescência
- contagem
- emulsão fotográfica

# Rastreando partículas

1906: Contadores Geiger - H. Geiger e E. Rutherford

1910: Câmaras de nuvem - C.T.R. Wilson

1928: Contador Geiger-Müller, W. Müller

1929: Método de coincidência, W. Bothe

1930: Emulsão, M. Blau

1940-1950: Cintiladores e fotomultiplicadora

1952: Câmara de Bolhas, D. Glaser

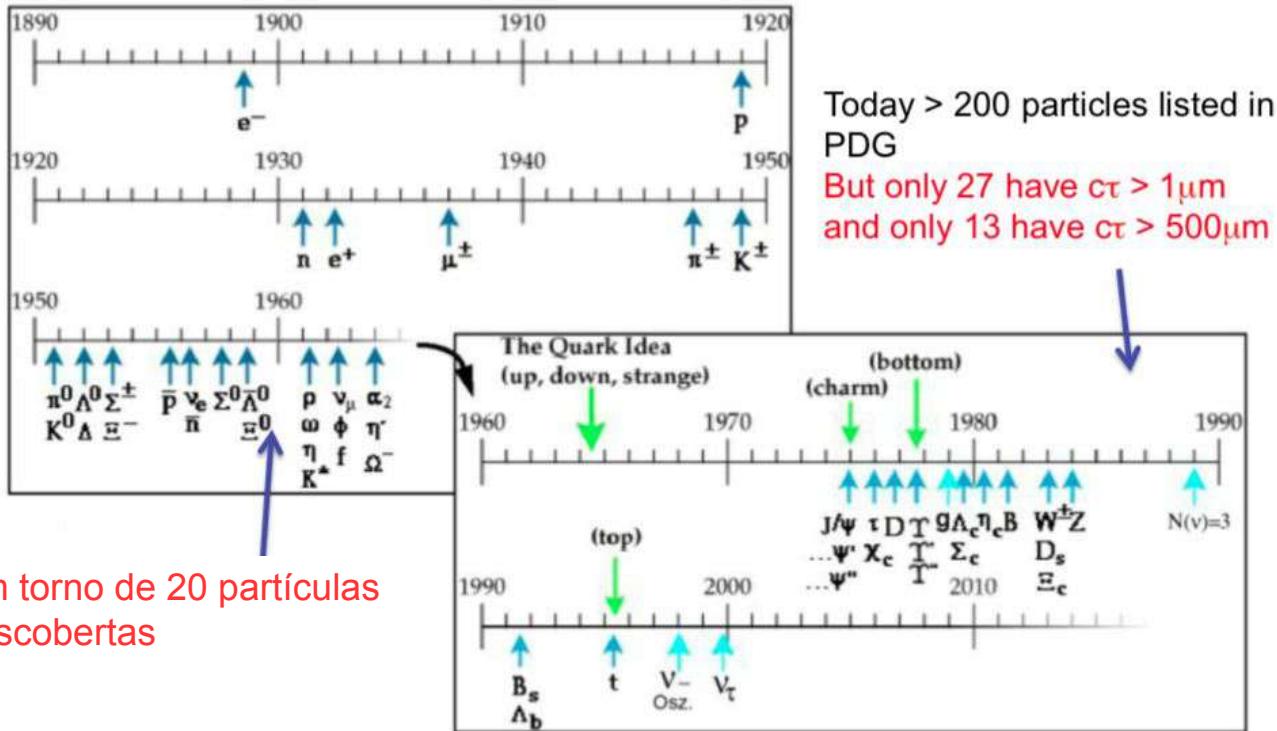
1962: Câmara de Faísca

1968: Câmara proporcional de multifios, C. Charpak

1970es: Silicon era

Etc. etc. etc.

# Rastreando partículas



# Rastreando partículas

Os detectores apenas vêem partículas "estáveis"  
( $c\tau > 500 \mu\text{m}$ )

- as que são produzidas mais frequentemente  
são:  
 $e^\pm, \mu^\pm, \gamma, \pi^\pm, K^\pm, K^0, p^\pm, n$
- elas são detectadas através de interações e de  
depósito de energia

# Rastreando partículas

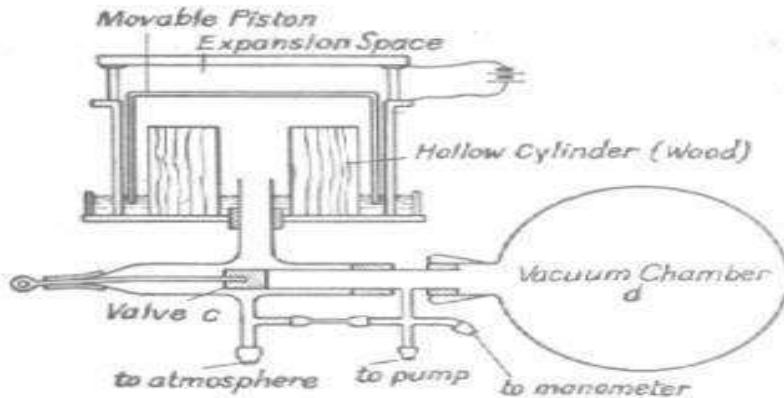
Fundamentalmente, os detectores de partículas registram sinais de partículas carregadas

- pela perda de energia, observada através de sinais elétricos ou luminosos
- a perda de energia ocorre principalmente pela interação eletromagnética com os elétrons dos átomos do meio
- quanto mais denso são os materiais, mais interações ocorrem

Partículas neutras (fótons, nêutrons) são detectadas indiretamente ao criar ou transferir sua energia para partículas carregadas

# Detectores de imagem

- Câmara de Wilson (1895)  
A partir do interesse de um meteorologista na formação de nuvens por eletricidade



- Tubos a vácuo (1895)  
Observação de feixes de raio-X  
Primeiro prêmio Nobel em Física (1901)



# Detectores de imagem - Câmara de nuvens

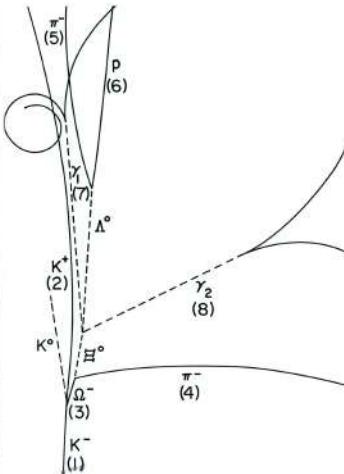
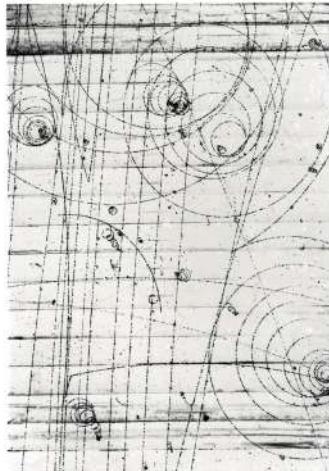


Câmara de nuvens de Wilson, 1911

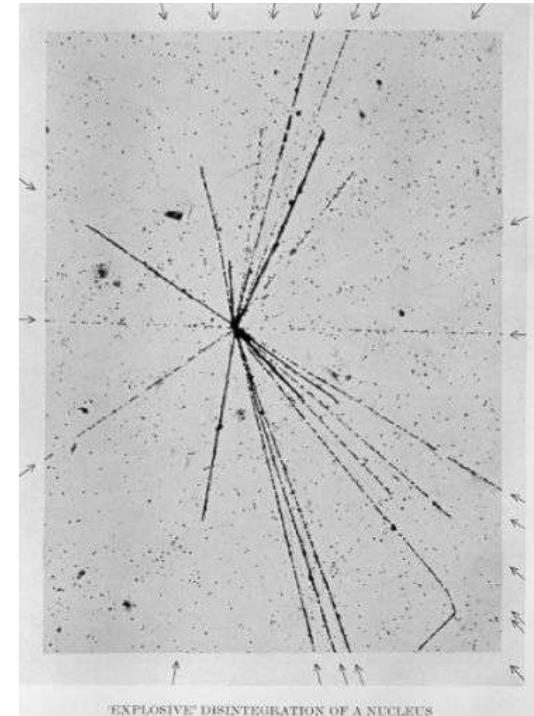
# Detectores de imagem

Muitas descobertas em Física de Partículas foram feitas utilizando-se de detectores de imagem

- Câmara de nuvens
- Emulsões fotográficas
- Câmara de bolhas



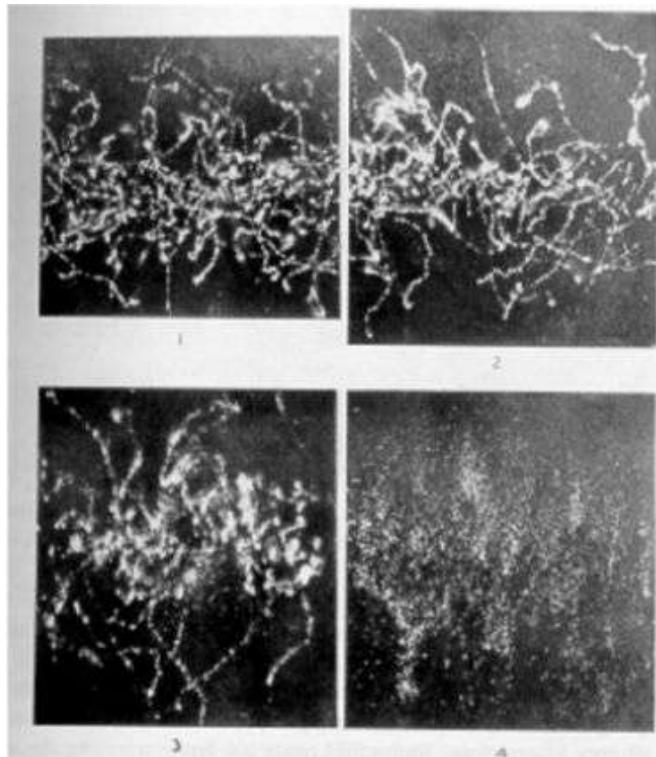
Descoberta em 1964



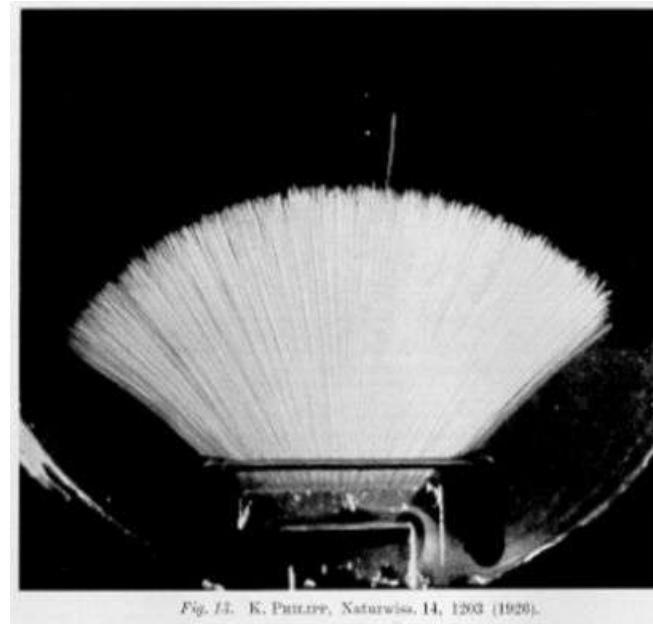
Desintegração nuclear em 1937

# Detectores de imagem - Câmara de nuvens

Utilizou-se da invenção da fotografia rápida, para registrar traços de partículas → descobertas por imagem



Raios-X, Wilson 1912

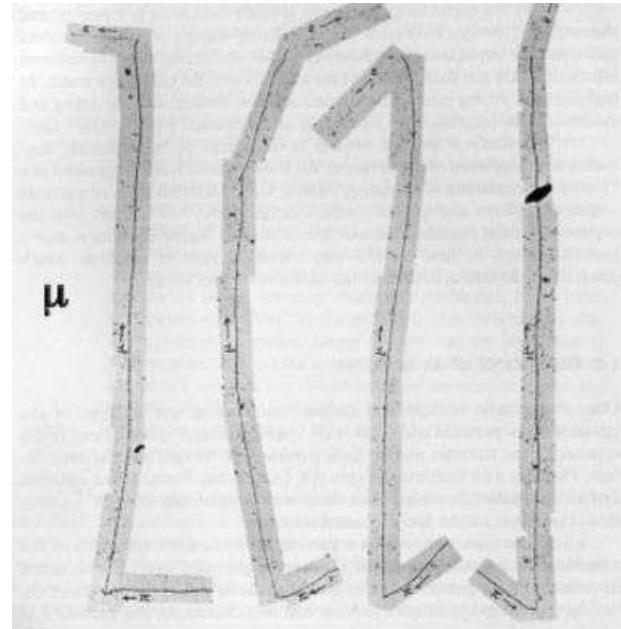


Partículas alfa, Philipp 1926

# Detectores de imagem - Emulsões

Em 1947, usando técnicas de emulsões nucleares o píon foi descoberto ao expor câmaras no monte Chacaltaya na Bolívia, à raios cósmicos

O píon foi descoberto ao registrar nas câmaras o seu decaimento em um múon e uma outra partícula invisível.

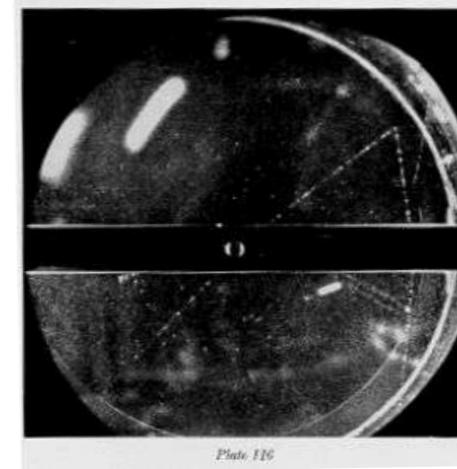
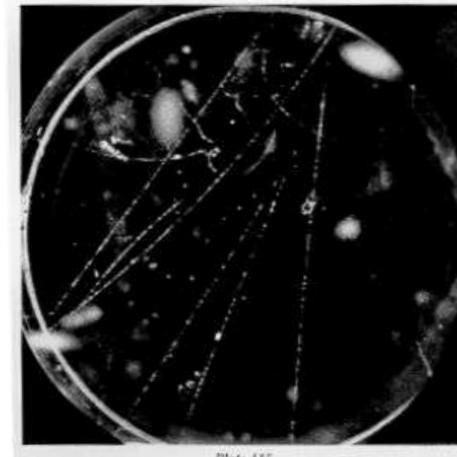


$$\pi \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu$$
$$\mu^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu$$

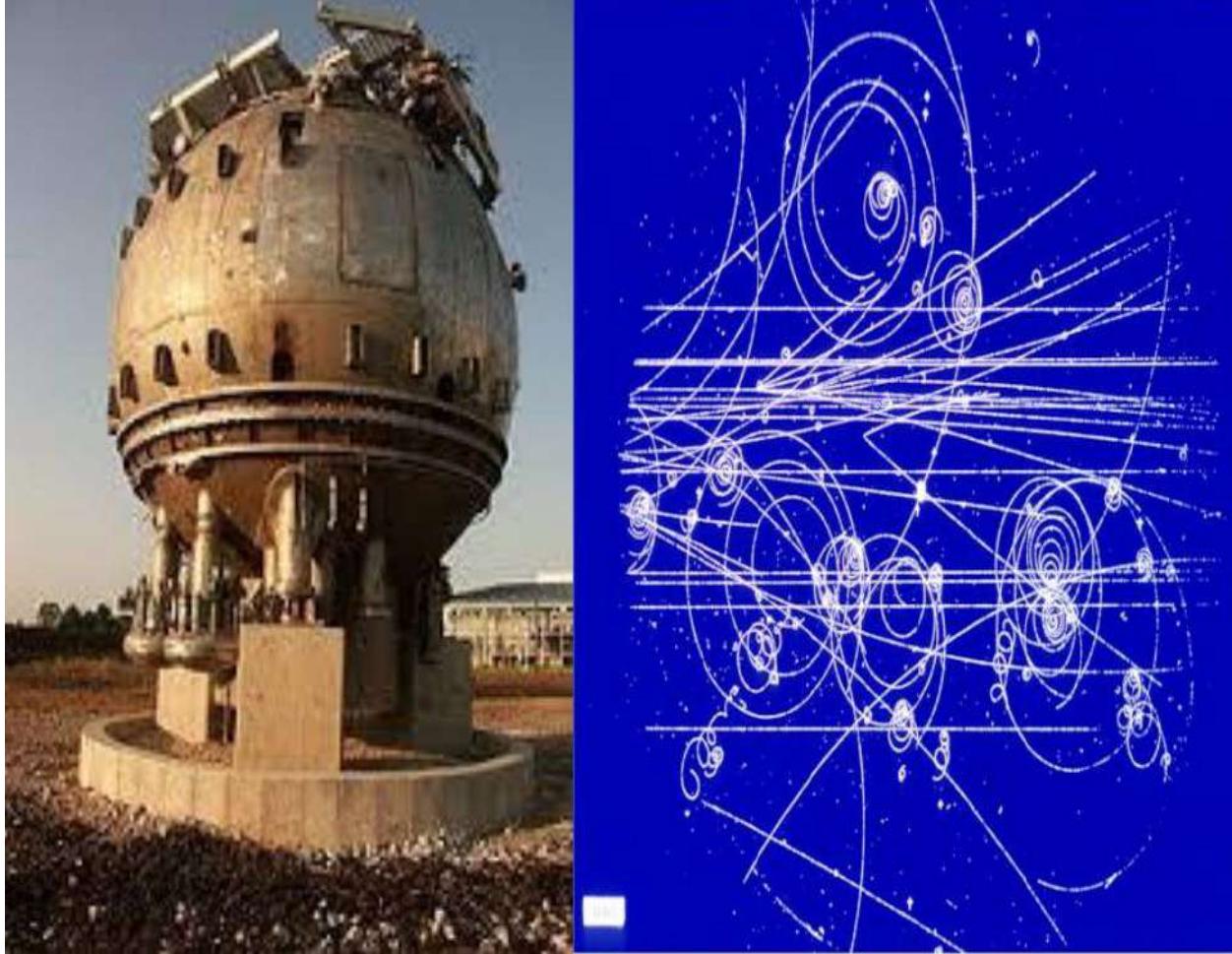
# Detectores de imagem - Campo magnético

O uso de campo magnético nos detectores permitiu medir o momentum das partículas, pelo quando elas curvavam.

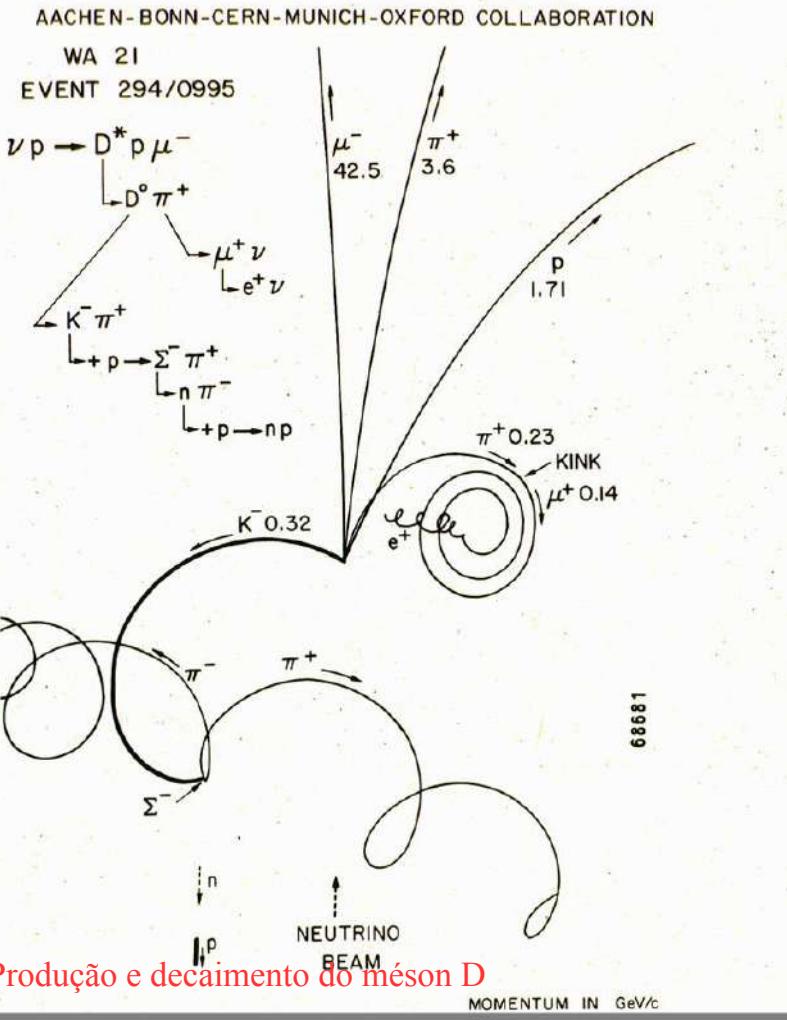
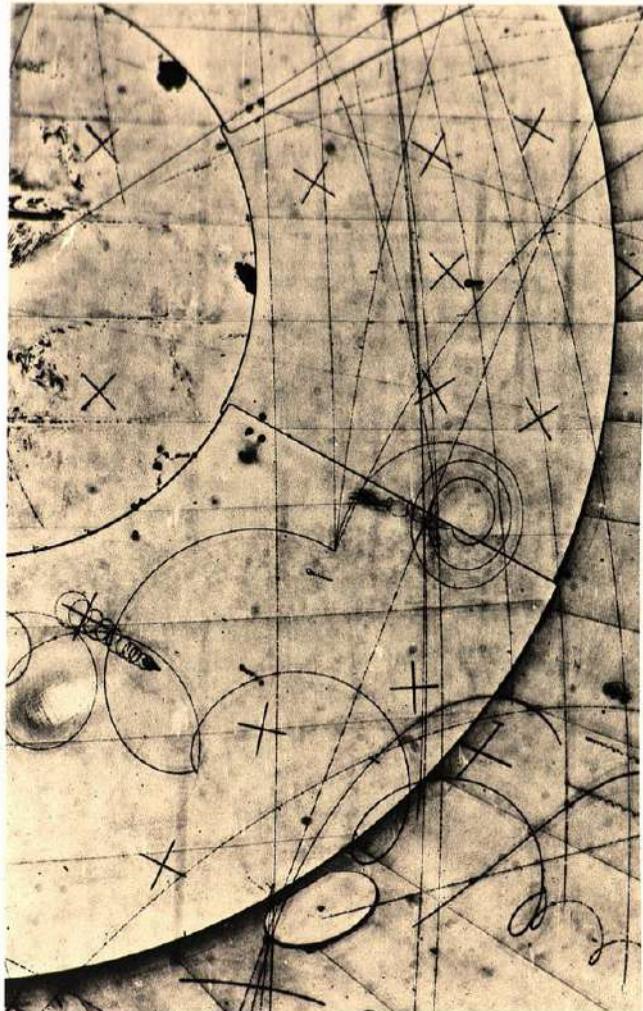
Uma partícula V0 produzida por uma interação nuclear fora da câmara decai depois de atravessá-la.



# Detectores de imagem



# Detectores de imagem - Campo magnético



# Detectores de imagem - Campo magnético

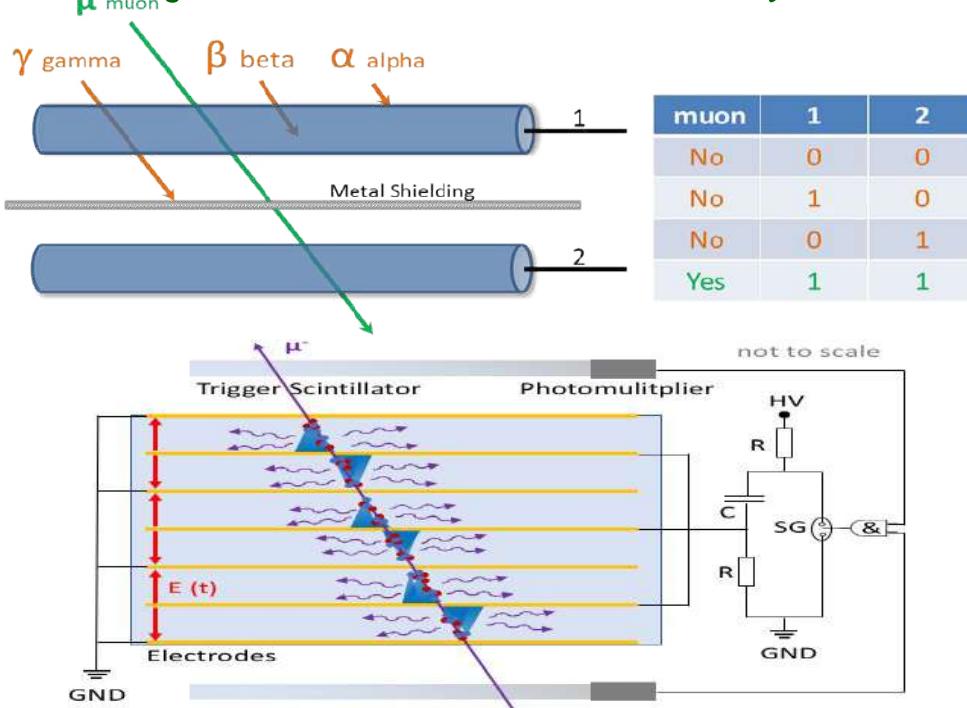
Os detectores visuais foram de extrema importância para a construção do conhecimento da Física de Partículas Elementares

Entretanto, a baixa capacidade de registrar algumas dezenas de interações/segundo, no LHC são aproximadamente  $10^9$  colisões/s, e o fato de não de selecionar as imagens, bons eventos, que devem ser gravadas para serem analisadas, fez surgir nos anos 60/70 os detectores lógicos (eletrônicos)

# Detectores lógicos (eletrônicos)

As partículas não são vistas, mas a sua natureza e existência podem ser deduzidas por experimentos lógicos (coincidência, triggers, detecção de decaimentos, ...)

Conhecer as partículas e como elas interagem permite inferir por técnicas diversas, tal como coincidência, qual partícula está passando pelo detector.



# Detectores lógicos (eletrônicos) + imagens

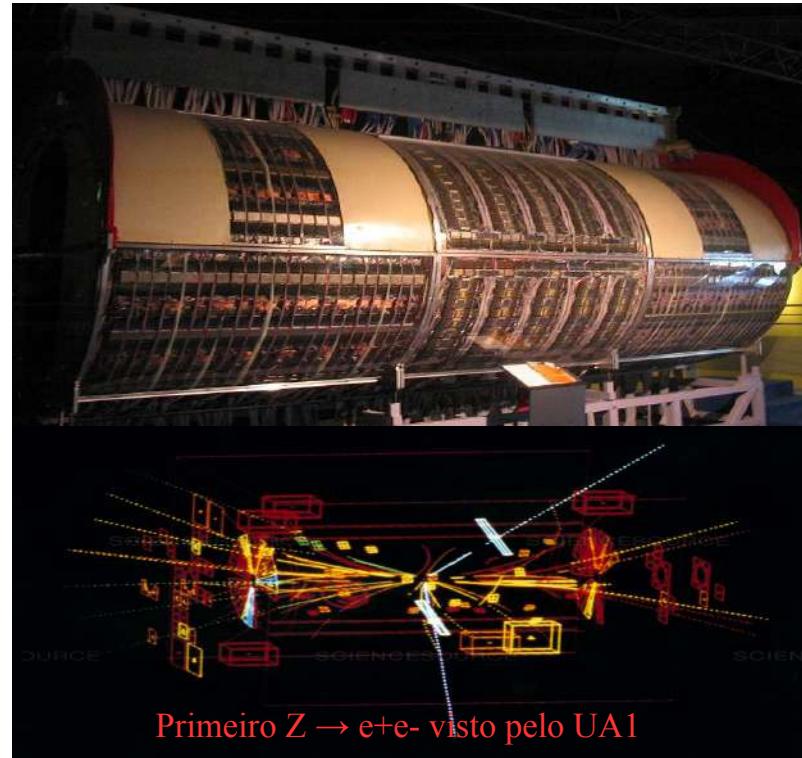
## Câmaras de faísca



A descoberta do neutrino do mûon foi feita por Schwartz, Steinberger e Lederman  
Píons produzidos em Brookhaven decaem em mûons e neutrinos.

# Detectores - grandes experimentos

UA1 detector - uma câmara de arrasto de propósito geral  
Registrava o traço, media o momentum, o sinal da carga elétrica e a taxa de energia perdida pela partícula



Nobel para C. Rubia e Simon Van der Meer , 1984

# Detectores modernos - de propósito geral

Os detectores modernos são instrumentos feitos para medirem uma ou mais propriedades de uma partícula

Propriedades das partículas → Tipo de detecção

- posição e direção → posição e trajetografia
- momentum → trajetografia e campo magnético
- energia → calorimetria
- massa → espectroscopia e ID de partículas
- velocidade → tempo de vôo e radiação Cherenkov

...

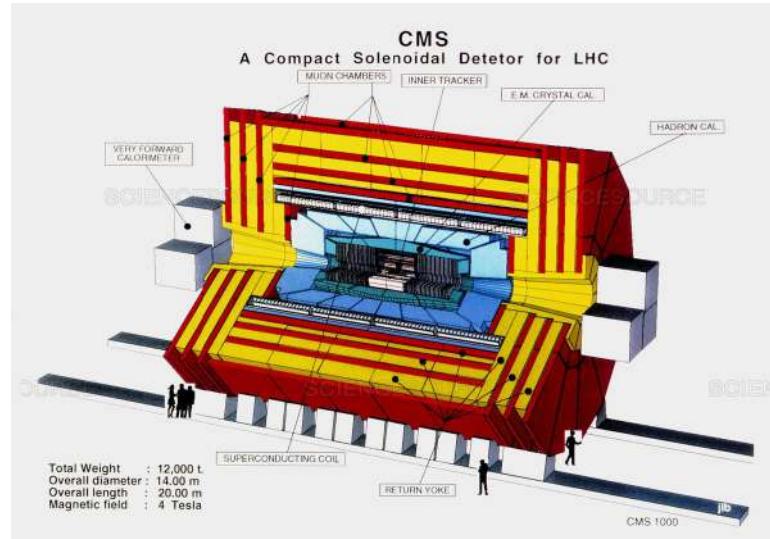
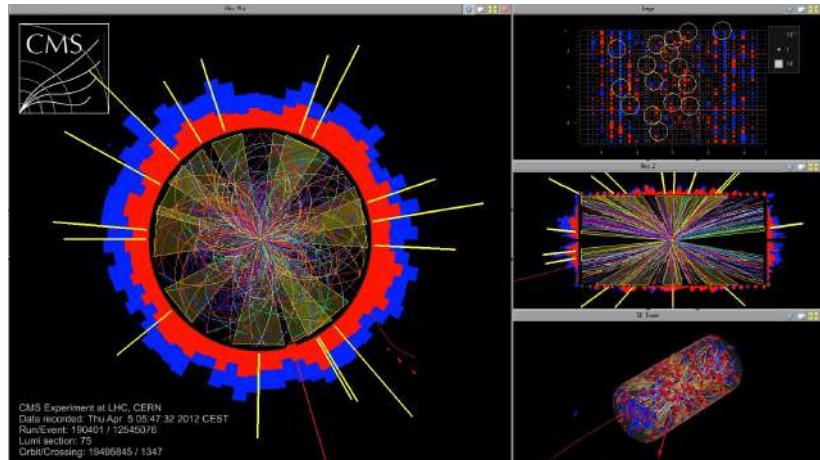
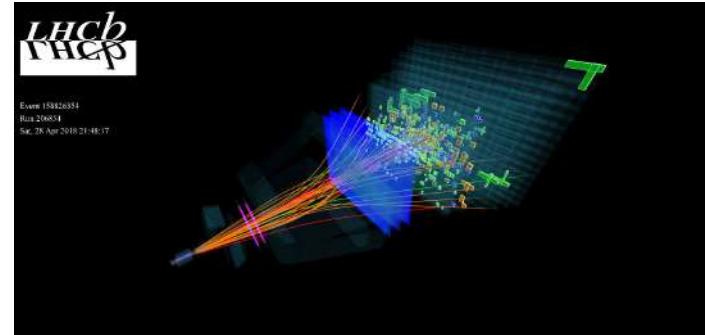
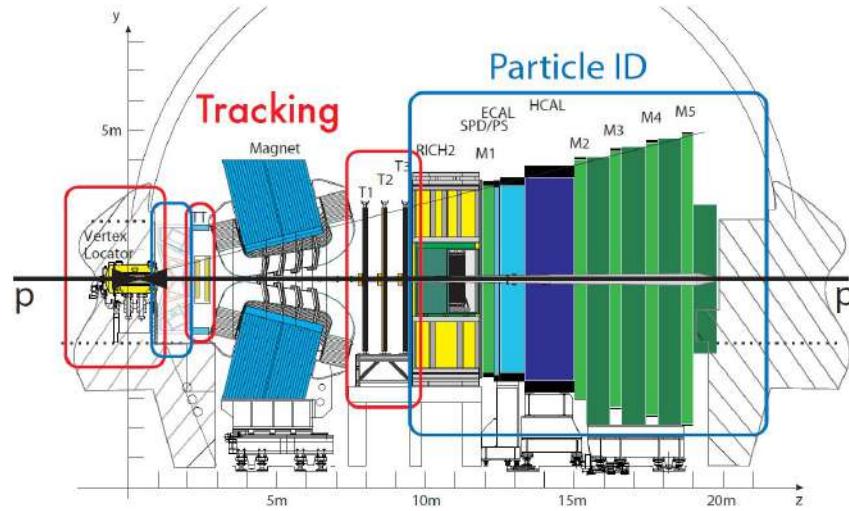
# Detectores modernos - a escolha

Para se escolher qual detector usar, é necessário fazer algumas perguntas

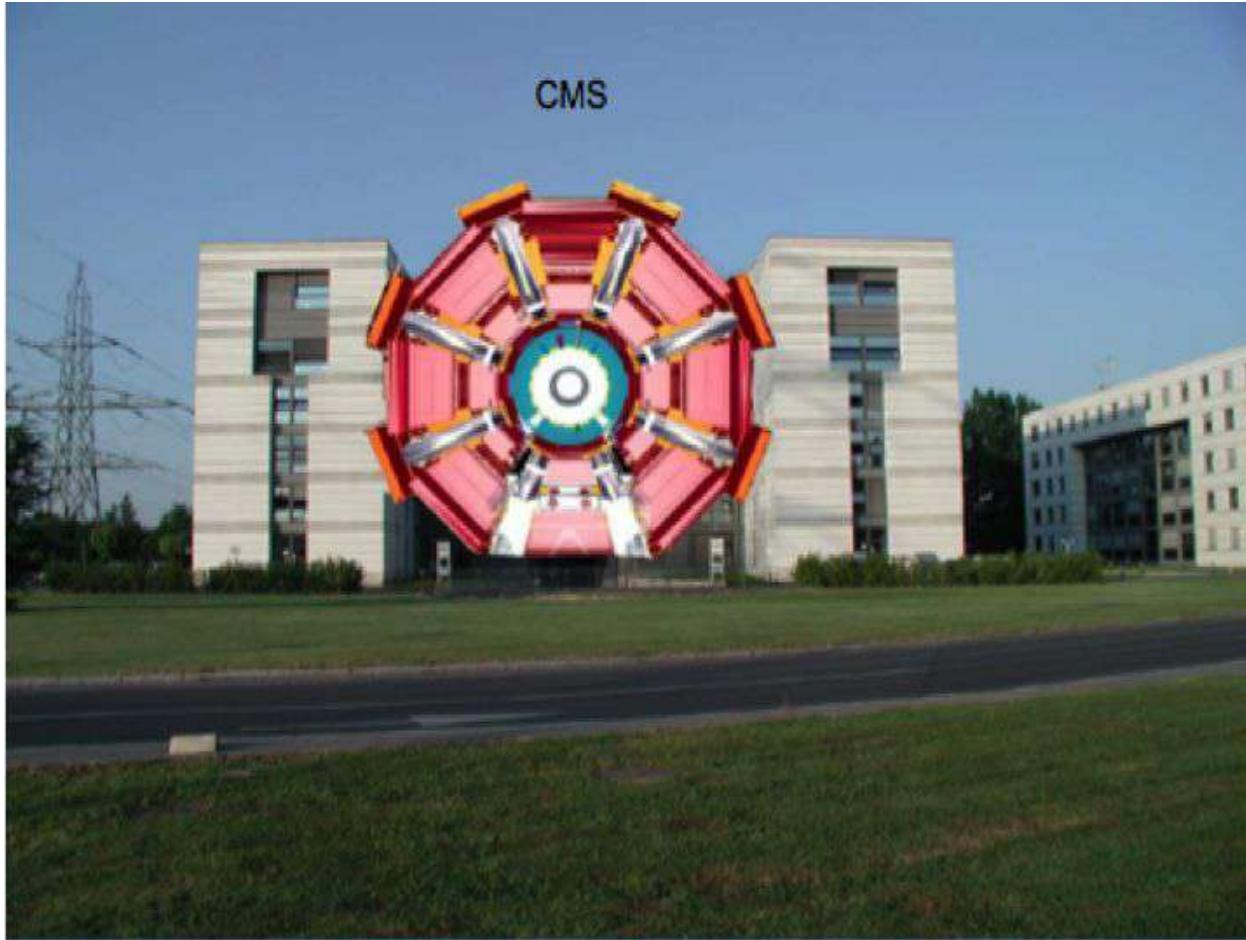
- Qual o tipo de partícula que se quer detectar?
- Qual a dimensão desejada do detector?
- Quais propriedades das partículas precisamos conhecer?
  - Posição
  - Tempo
  - Número
  - Energia
  - Polaridade
- Qual é a taxa máxima de contagem?
- Qual é a distribuição temporal de cada evento?

Com qual resolução?

# Detectores modernos - alvo fixo vs colisões



# O detector CMS



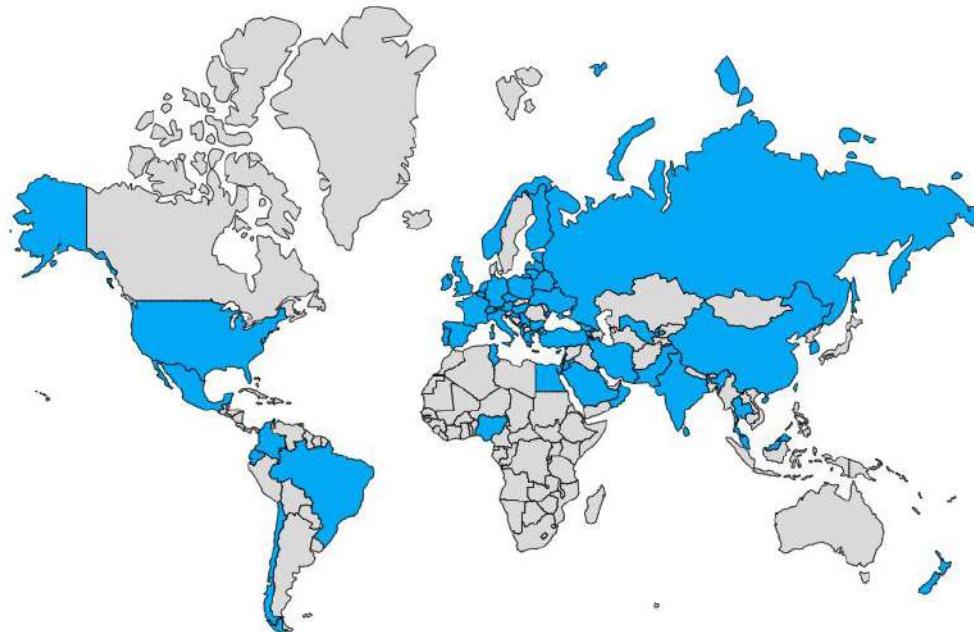
# A colaboração CMS



# A colaboração CMS

## CMS Overview in 2024

The CMS experiment has **5970** active members from **254** institutes coming from **58** countries.



**2070**

Phd Physicists  
(400 women 1670 men)

**1194**

Physics Doctoral Students  
(327 women 867 men)

**1353**

Non Doctoral Students  
(371 women 982 men)

**986**

Engineers  
(149 women 837 men)

**251**

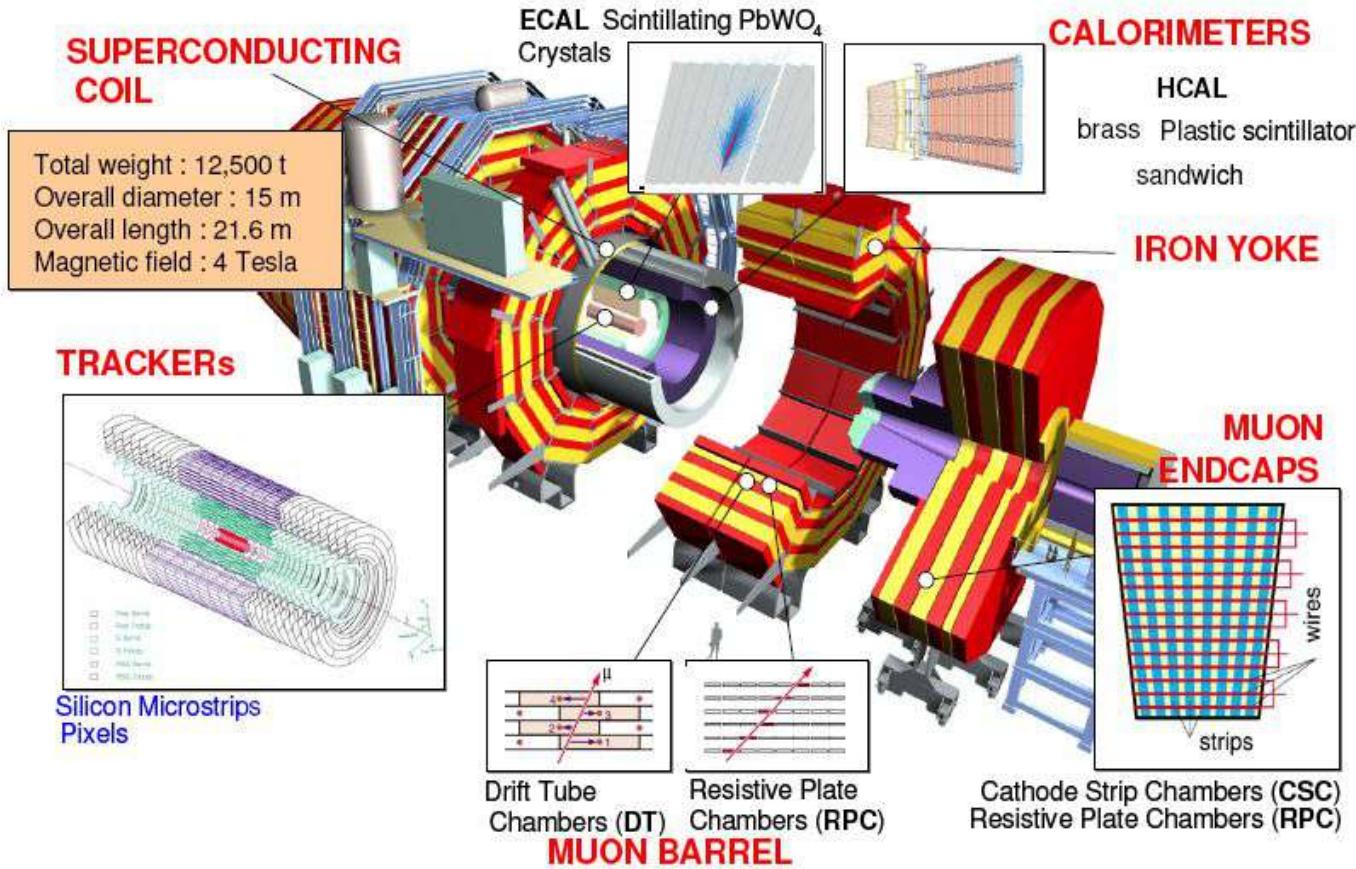
Technicians  
(22 women 229 men)

**111**

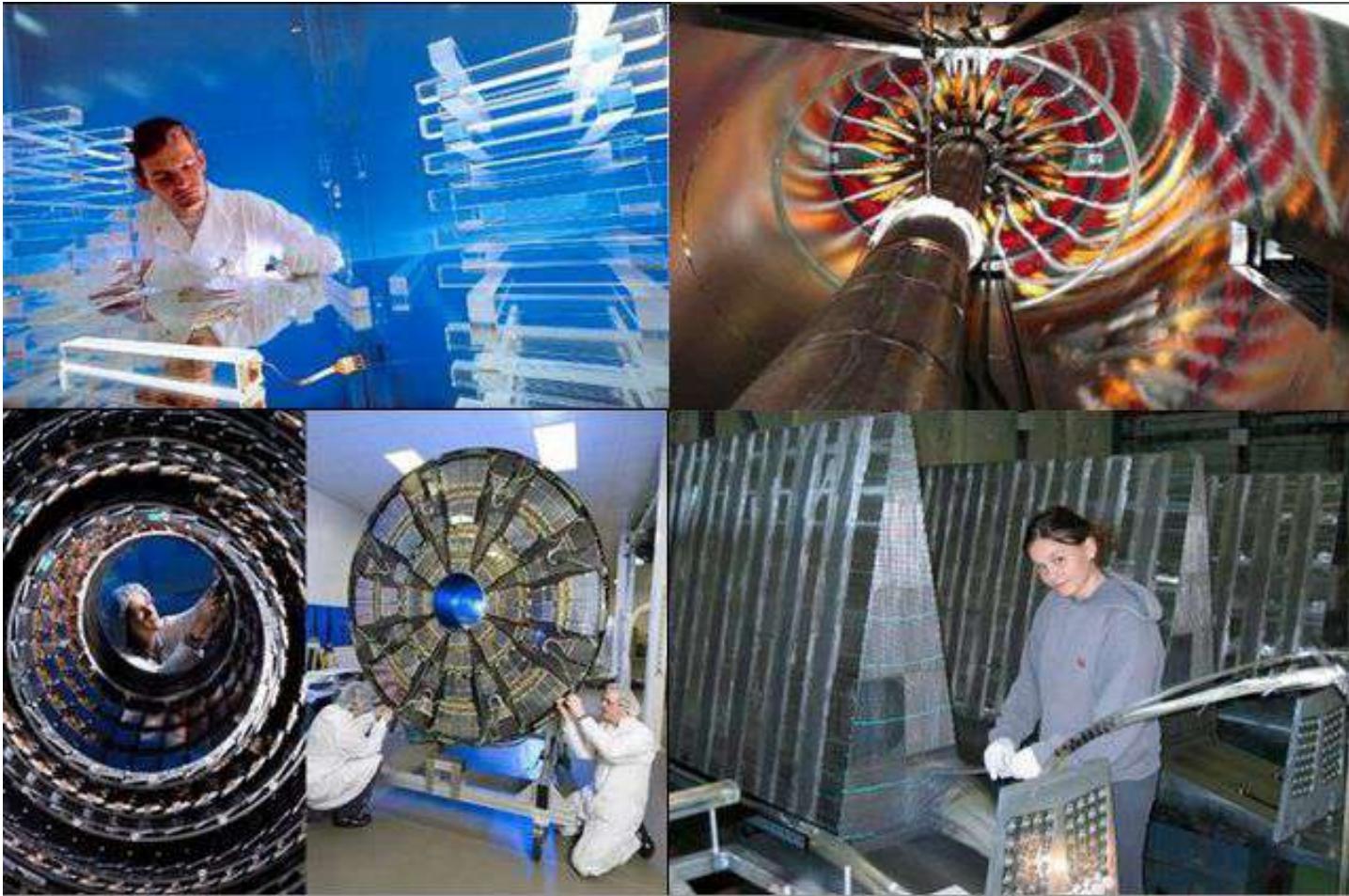
Administratives  
(71 women 40 men)

<https://cms.cern/collaboration/people-statistics>

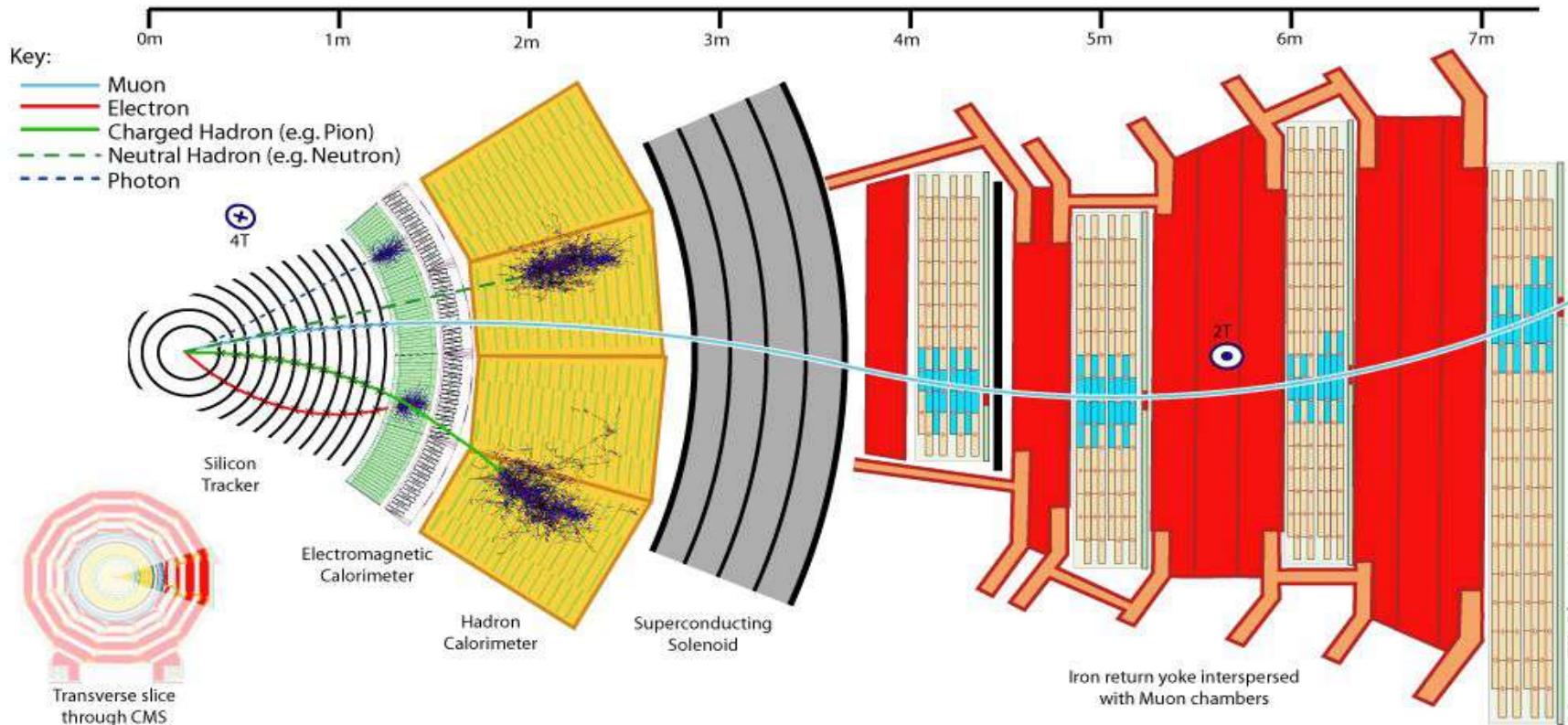
# O detector CMS



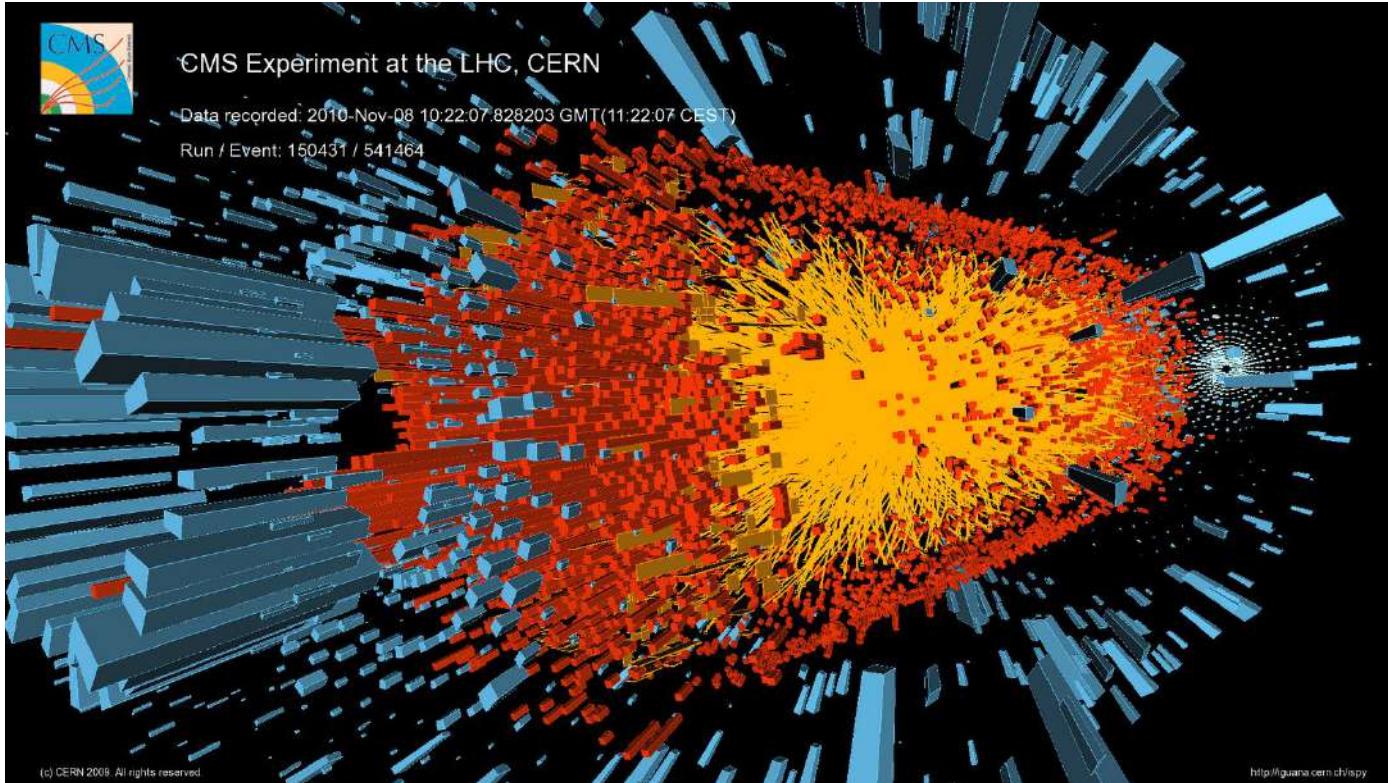
# Os sub-detectores do CMS



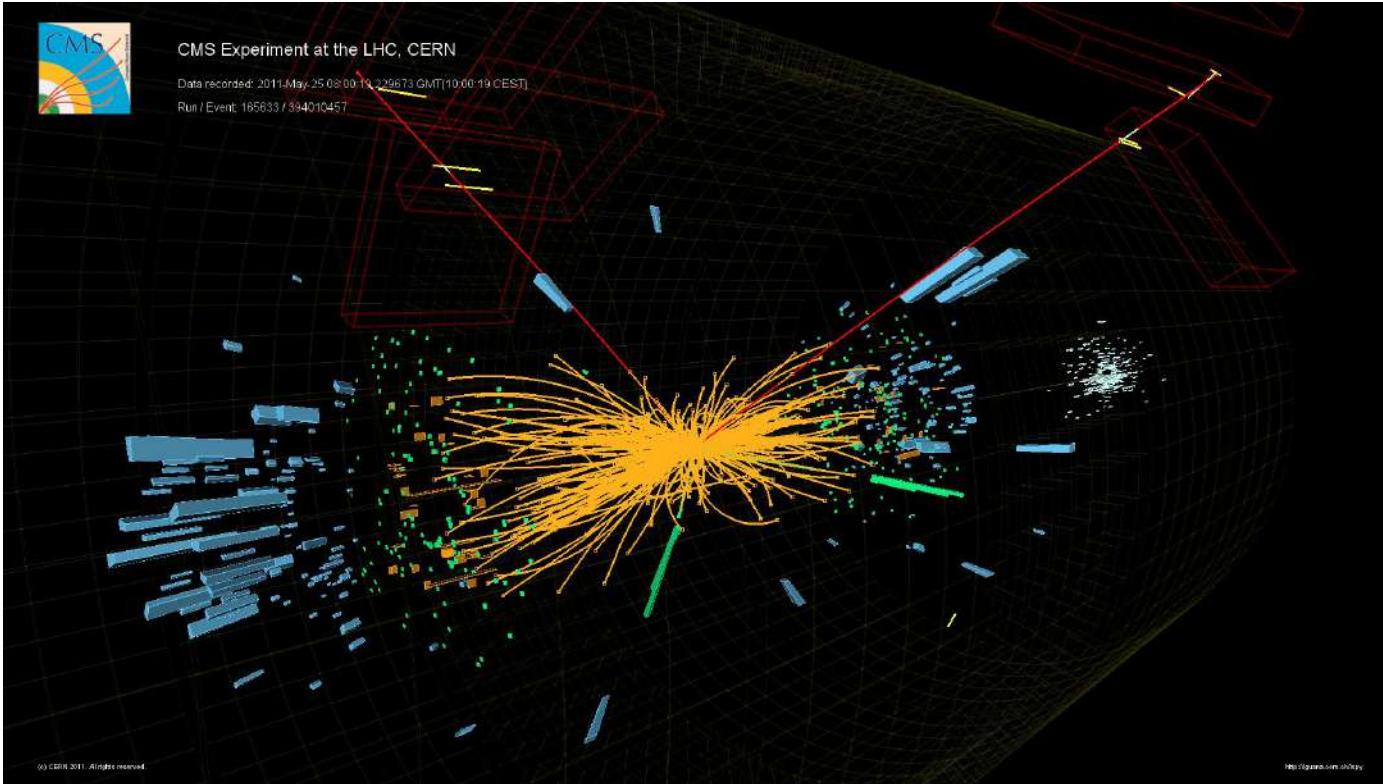
# Cinco tipos de partículas podem ser identificadas pelo CMS



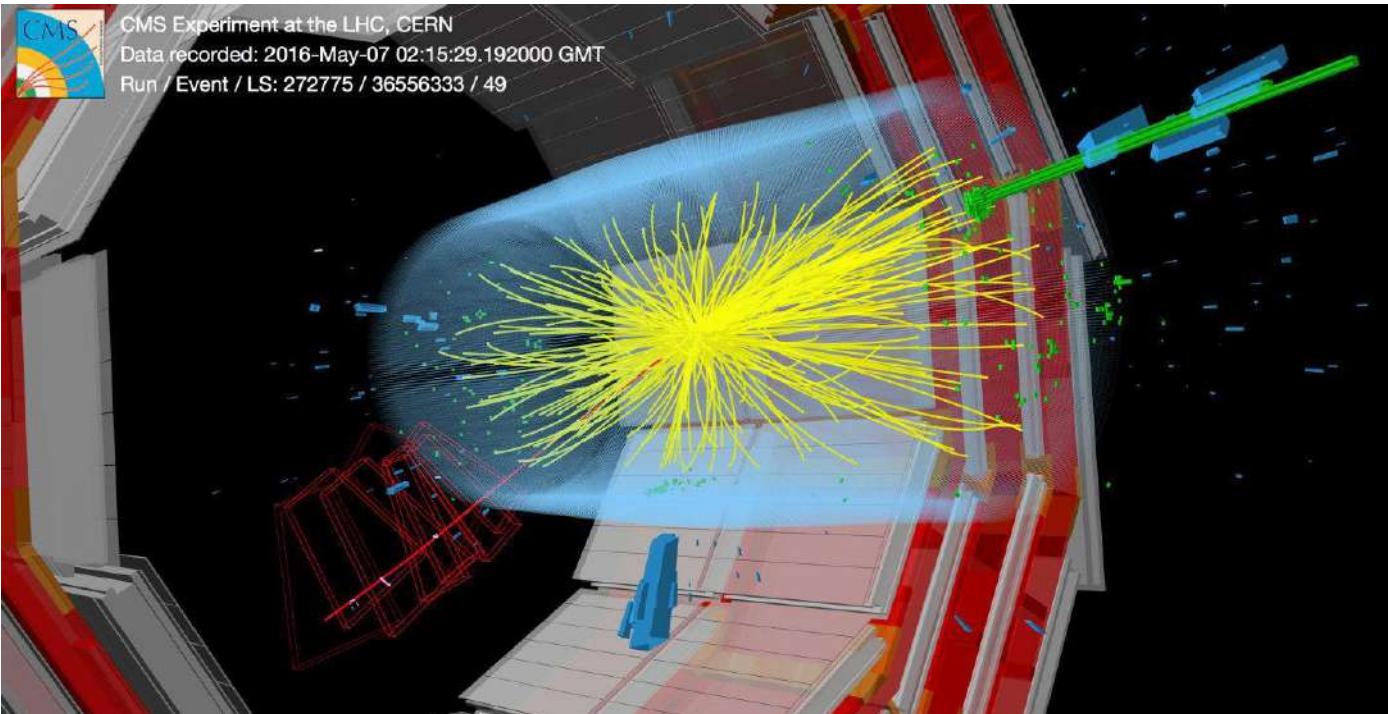
# Detectores de partículas - identificação



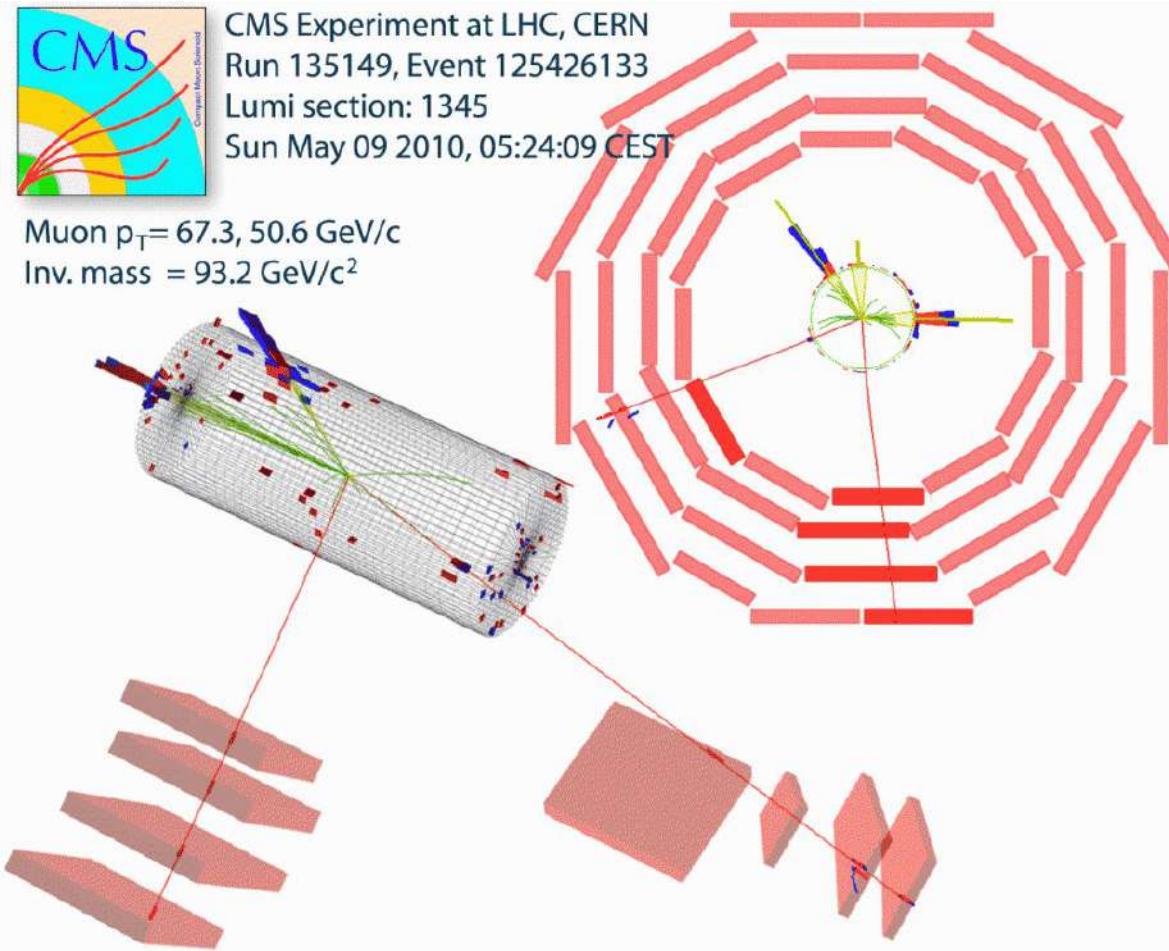
# Detectores de partículas - identificação



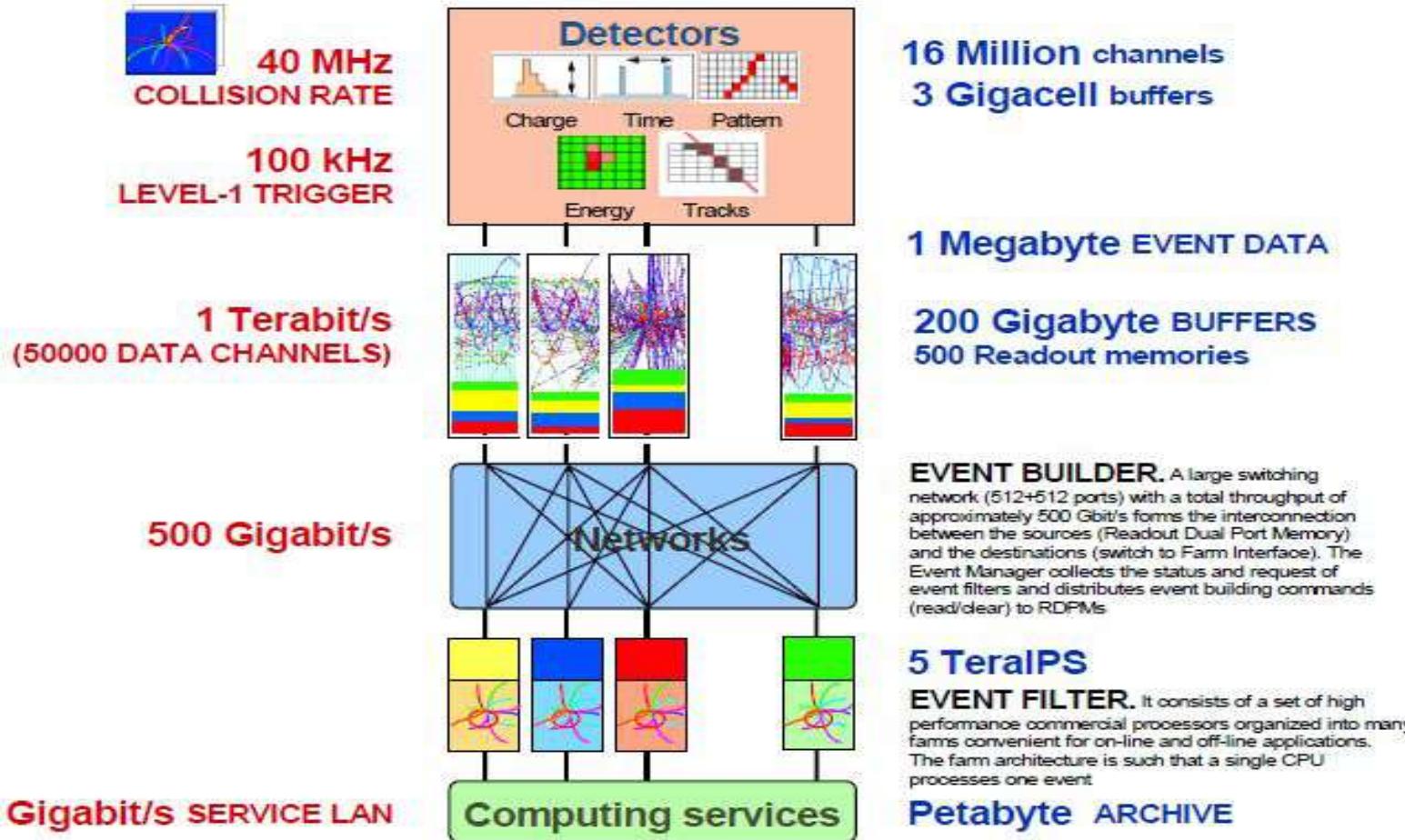
# Detectores de partículas - identificação



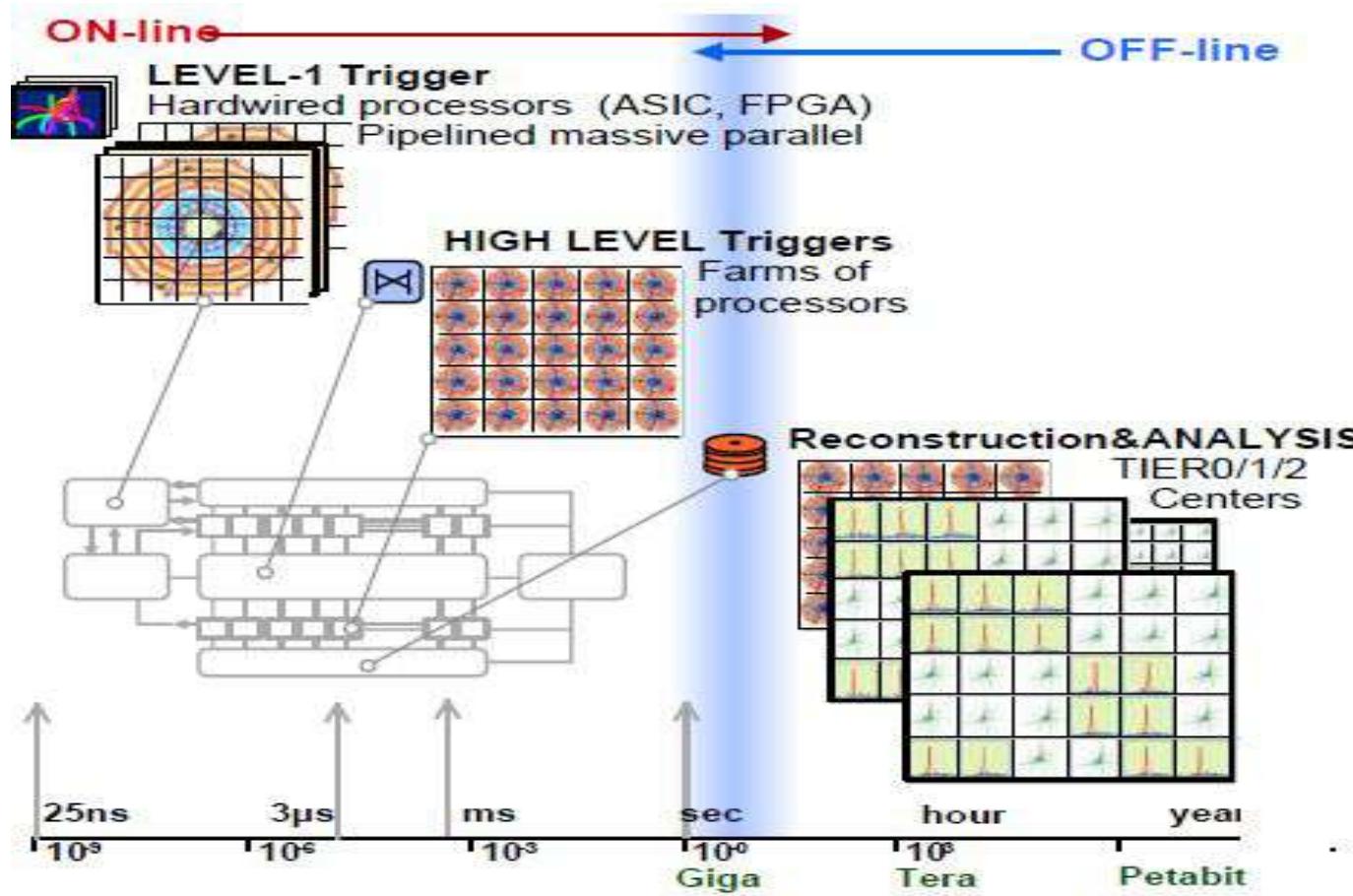
# Detectores de partículas - identificação



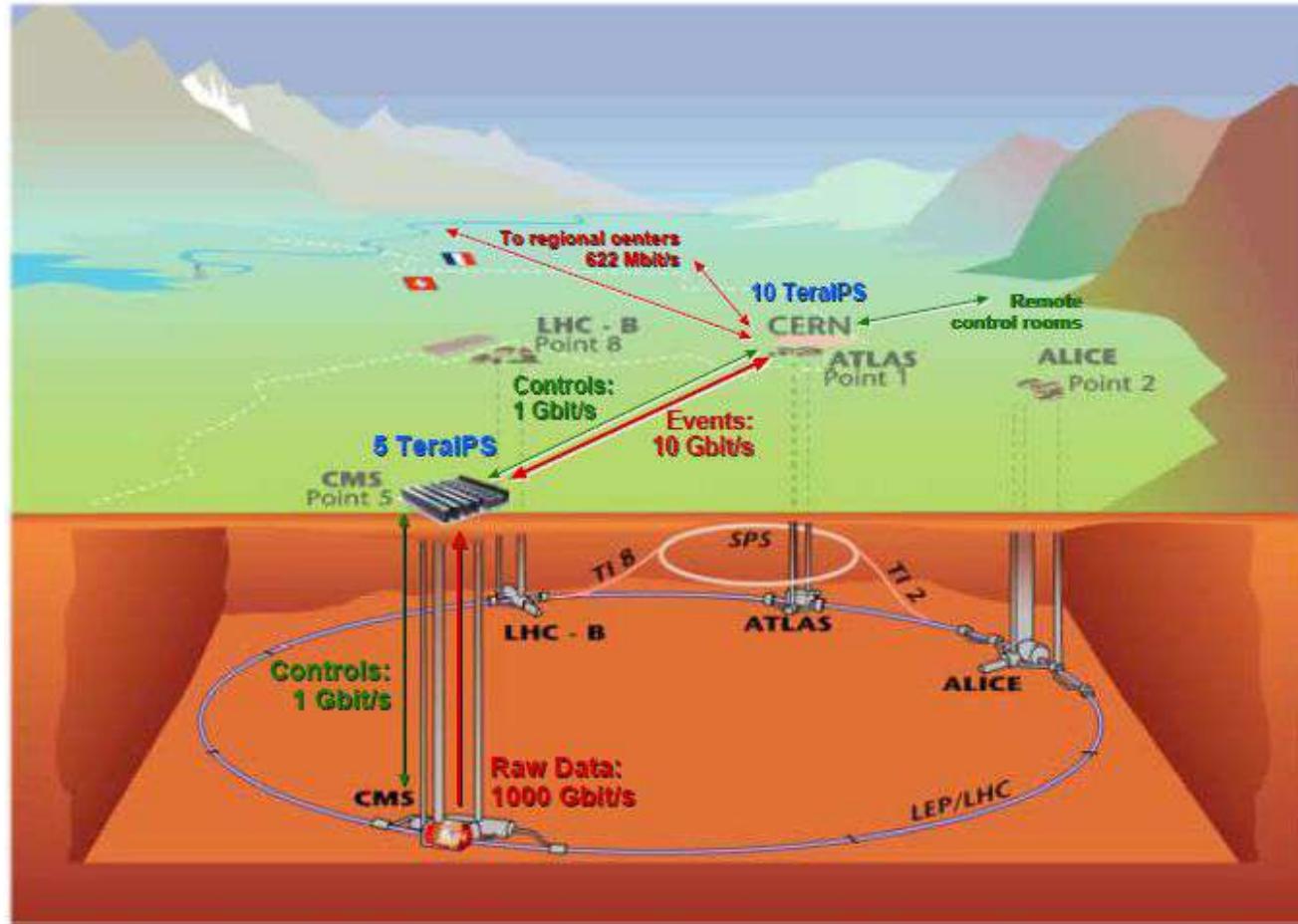
# A aquisição de dados



# A seleção de eventos de interesse



# Fluxo de dados $CMS \rightarrow$ Armazenamento



# LHC - Computação em GRID

Processing LHC Data

## CMS Experiment



Online System

0.2 - 1.5 GB/s

- 10s de Petabytes/yr para ~2008
- 1000 Petabytes em < 10 anos?
- > 50% de CPUs estão em Tier2s

Tier 0

CERN Computer Center

Tier 1

Korea

UK

Russia

FNAL

Tier 2

DISUN →

Caltech

UCSD

UERJ

Sprace

Tier 3

UCLA

UCR

Tier 4

Physics caches

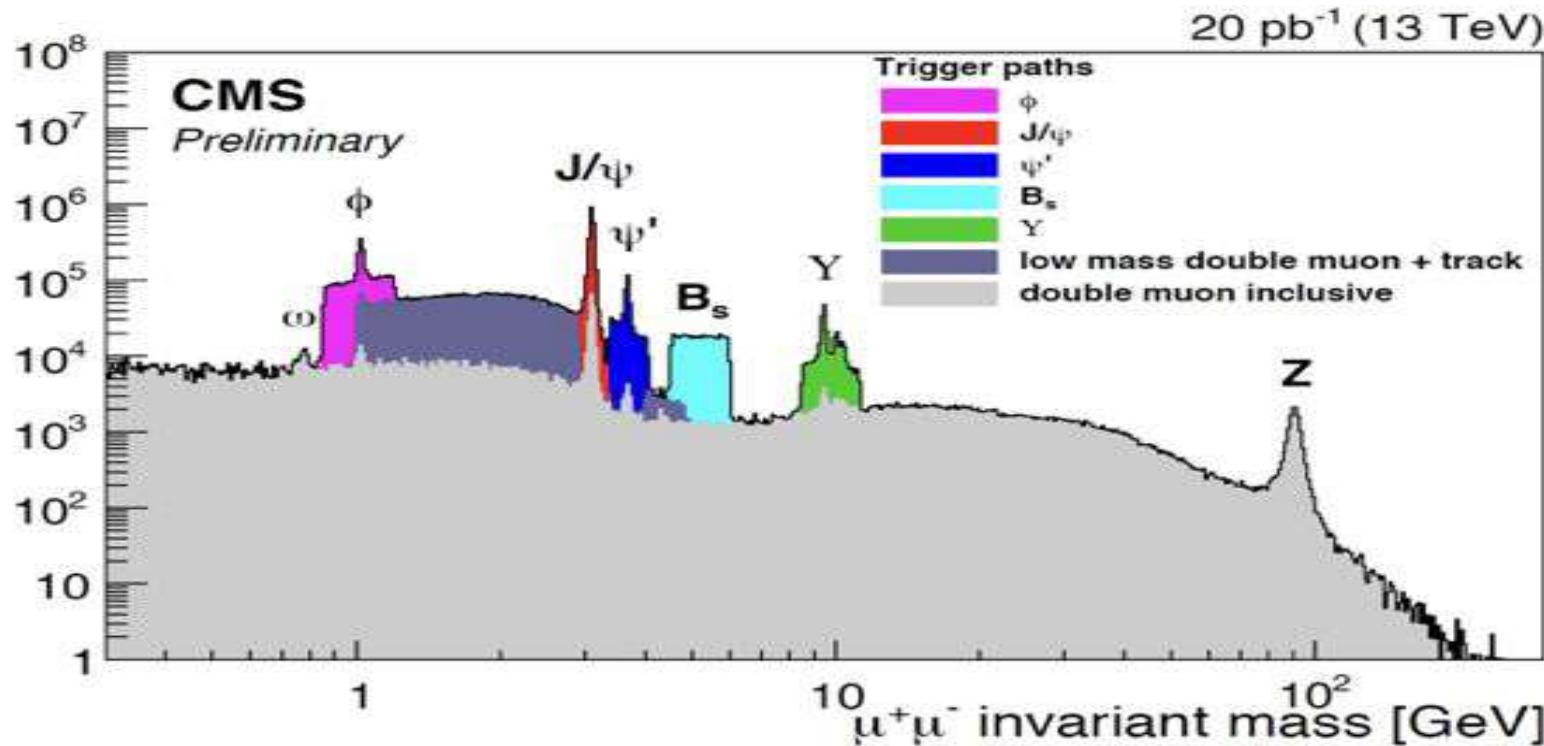
PCs



# Resultados

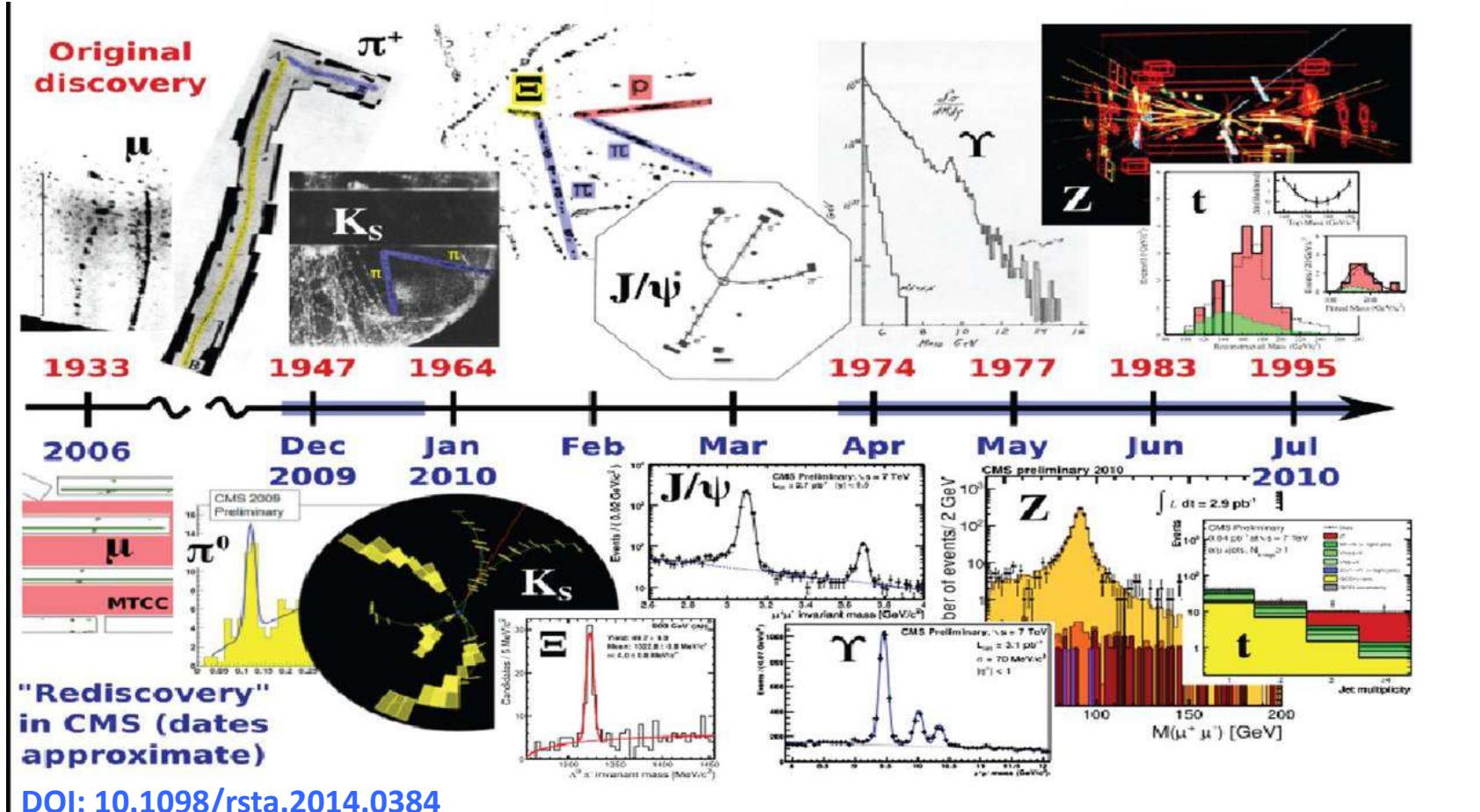
## Toda a física do século XX em alguns dias

Em alguns meses o LHC redescobriu toda a Física dos últimos 50 anos!!!



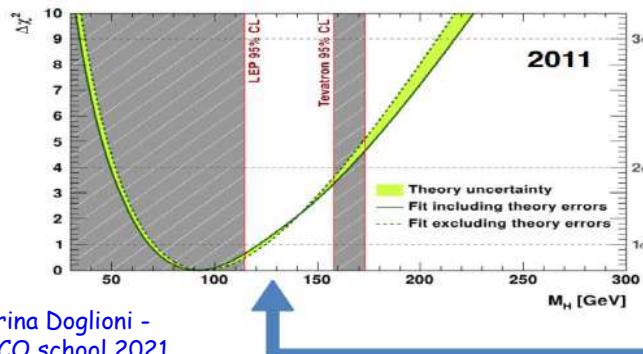
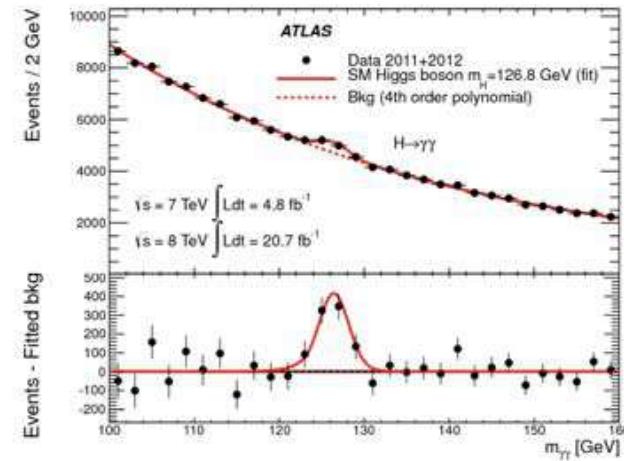
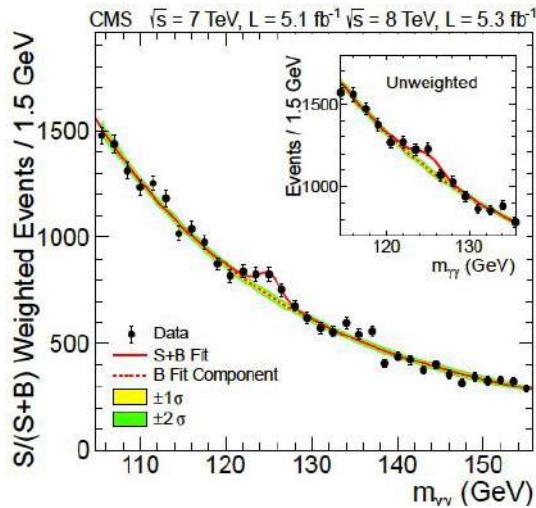
# Resultados

## Toda a física do século XX em alguns dias



DOI: [10.1098/rsta.2014.0384](https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0384)

# Em 2012 um novo Bóson foi observado no CMS e no ATLAS com 125 GeV de massa



The Higgs boson mass as of May 2015

arXiv:1503.07589

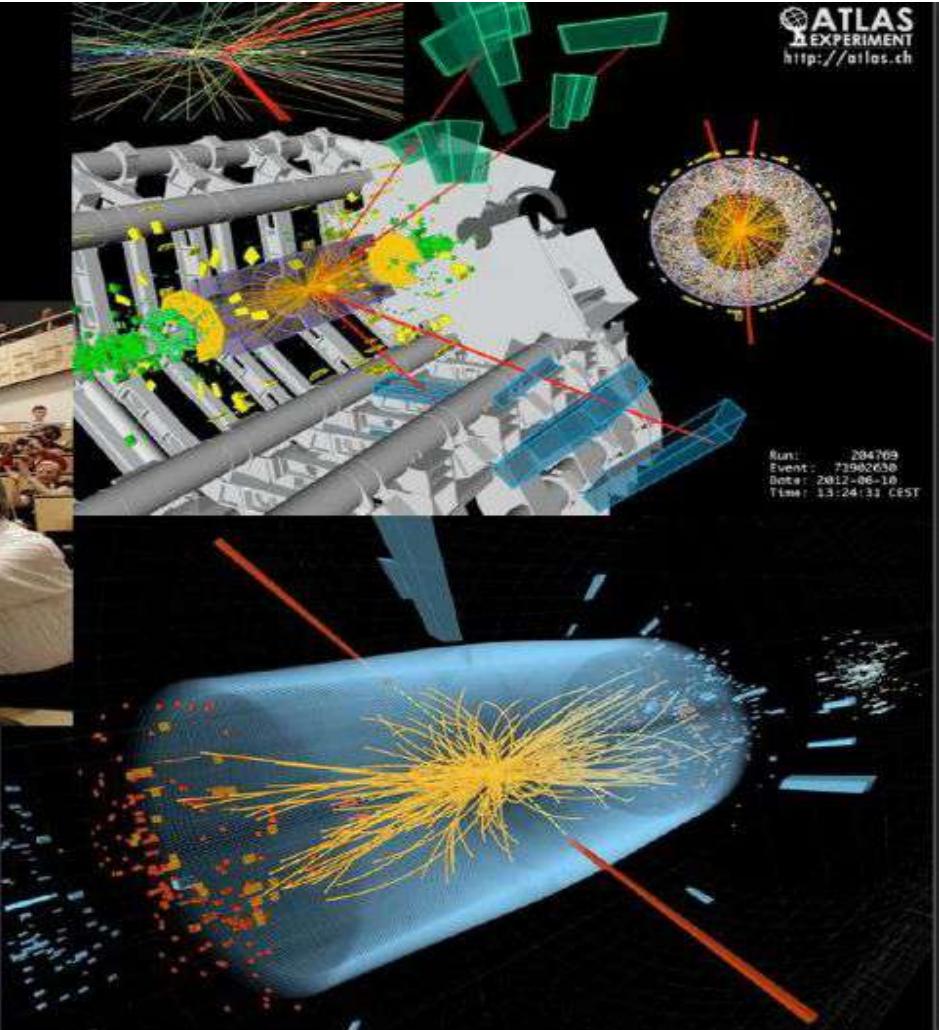
$$m_H = 125.09 \pm 0.24 \text{ GeV}$$

2012.7.4

## discovery of Higgs-like boson



theory : 1964  
concept : 1984  
construction : 2001

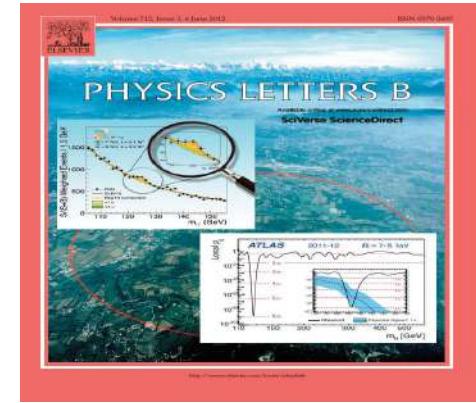


# Nobel 2013



O prêmio nobel de 2013 foi concedido para François Englert e Peter W. Higgs “pela descoberta teórica de um mecanismo que contribuiu para o nosso conhecimento da origem das massa das partículas subatômicas”.

## A descoberto do Higgs trouxe muita atenção do mundo científico



O mito da massa das partículas foi destruído



# Outras perguntas?



# Obrigado pela sua atenção!!!



Absence of evidence is  
not necessarily  
evidence of absence..

Professor John Ellis, SUSY enthusiast



# Referências

"FÍSICA MODERNA ORIGENS CLÁSSICAS E FUNDAMENTOS QUÂNTICOS", Vitor Oguri e Francisco Caruso

"Introduction into Hadron Collider Physics", Caterina Doglioni, Lund University (SE), 2021

Introdução à Física de Partículas, Wagner Carvalho

The CMS detector - CERN

A aventura das partículas

CERN

<http://www.lishep.uerj.br/>

Escola de professor de Física do CERN