



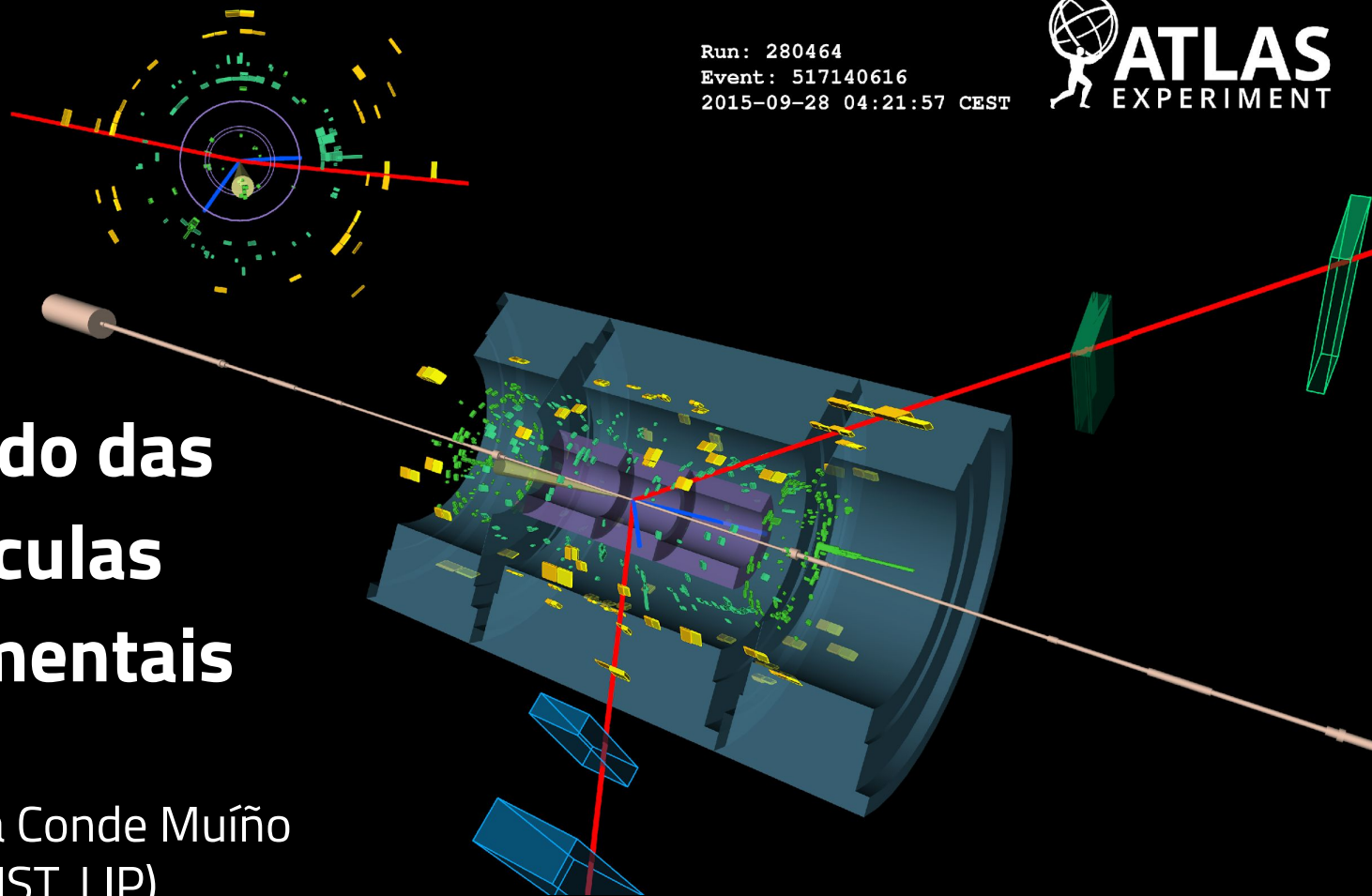
Run: 280464
Event: 517140616
2015-09-28 04:21:57 CEST



O Mundo das Partículas Fundamentais



Patricia Conde Muño
(IST, LIP)

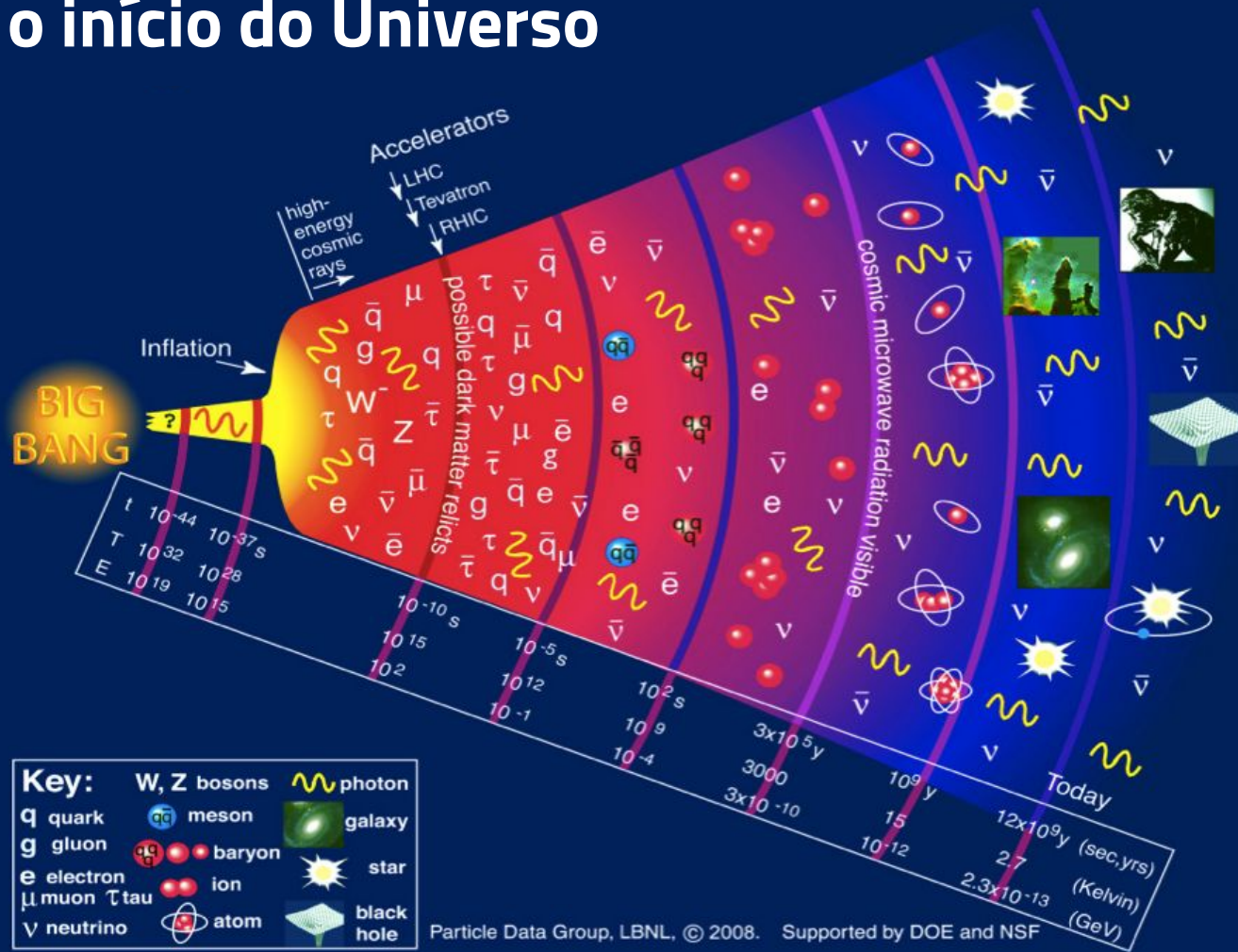


Olhando para o início do Universo

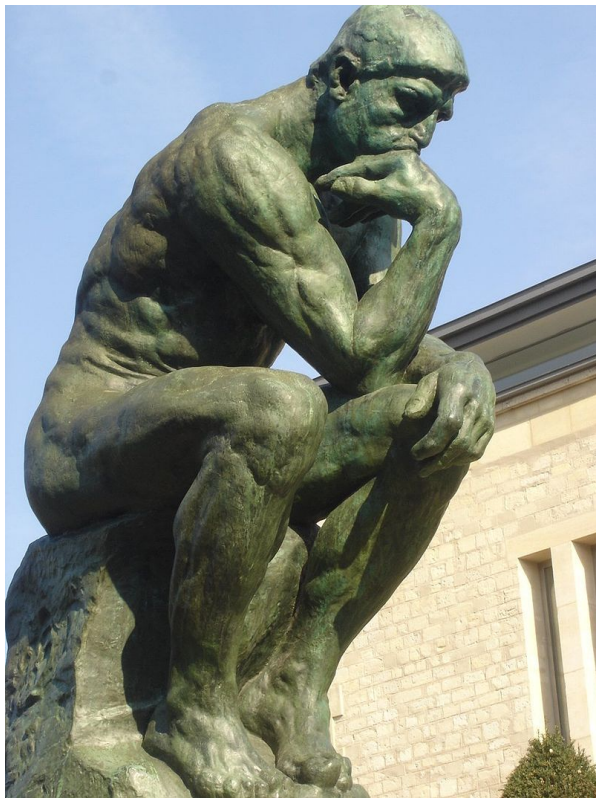
Como se formou o Universo?

Quais são os elementos fundamentais dos quais estamos feitos?

Como é que se combinam para formar a matéria que conhecemos?

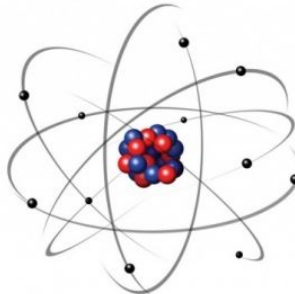
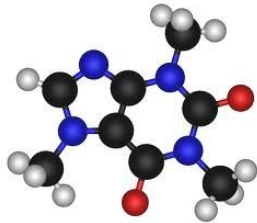


De que é que são feitas as coisas?

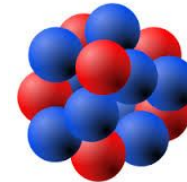


De que é que são feitas as coisas?

- Até ~1930 isto foi todo...



Atom $\sim 10^{-8}$ cm



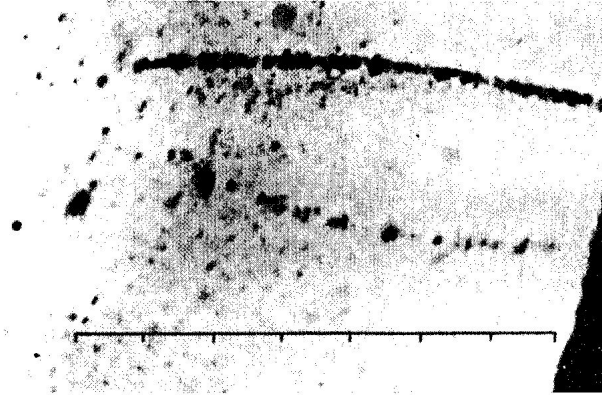
Nucleus
 $\sim 10^{-12}$ cm



Proton
 $< 10^{-13}$ cm

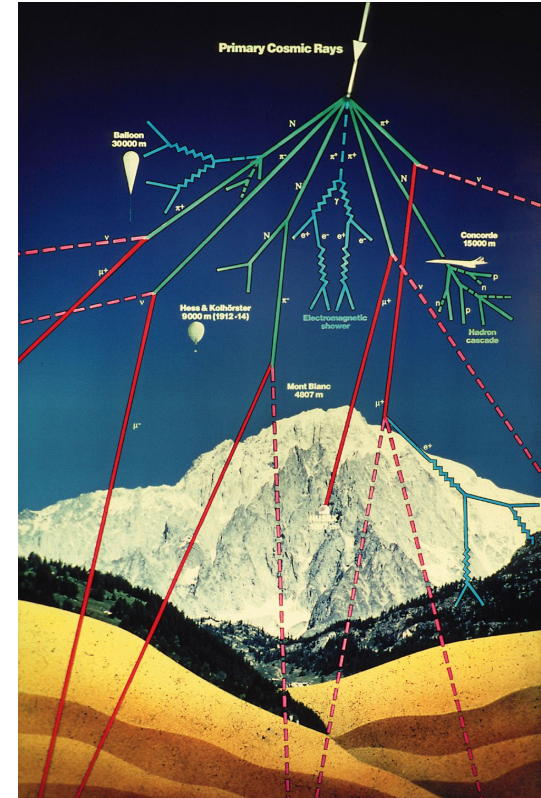
Descoberta do muão 1932

Isidor Rabi: Who ordered that?

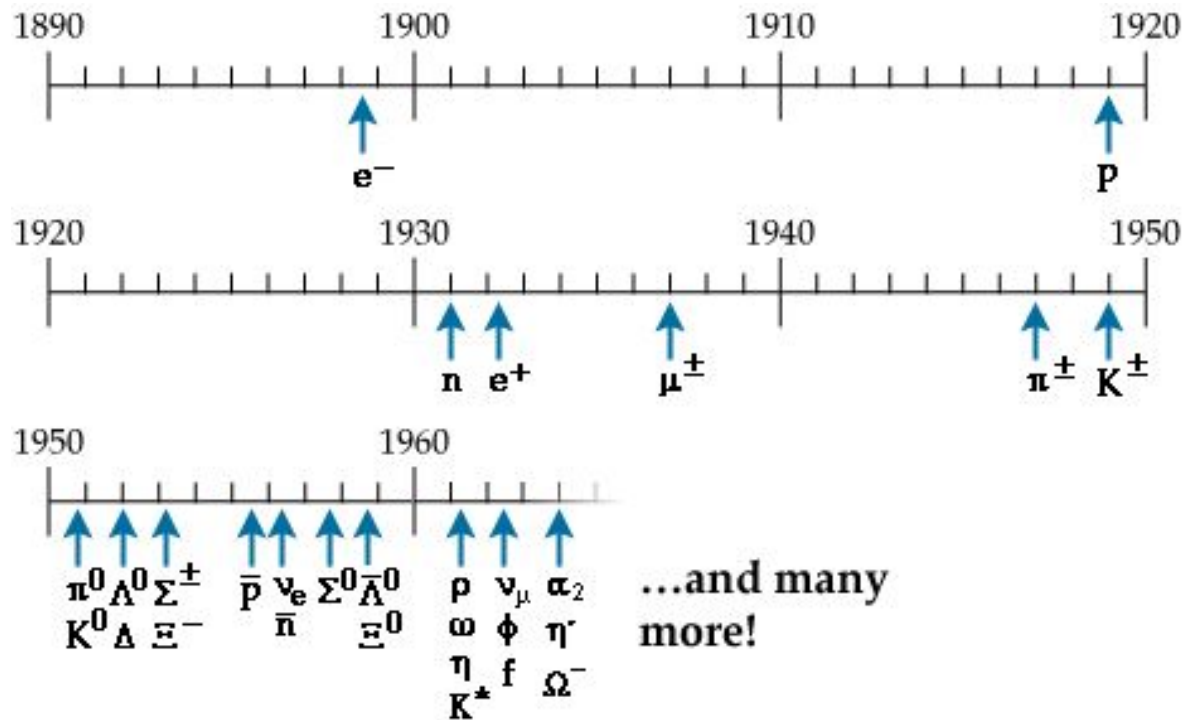


"The other double trace of the same type (figure 5) shows closely together the thin trace of an electron of 37 MeV, and a much more strongly ionizing positive particle with a much larger bending radius. The nature of this particle is unknown; for a proton it does not ionize enough and for a positive electron the ionization is too strong. The present double trace is probably a segment from a "shower" of particles as they have been observed by Blackett and Occhialini, i.e. the result of a nuclear explosion".

Kunze, P., Z. Phys. 83, (1933) 1



Descobrimiento de otras partículas



Simetrias...

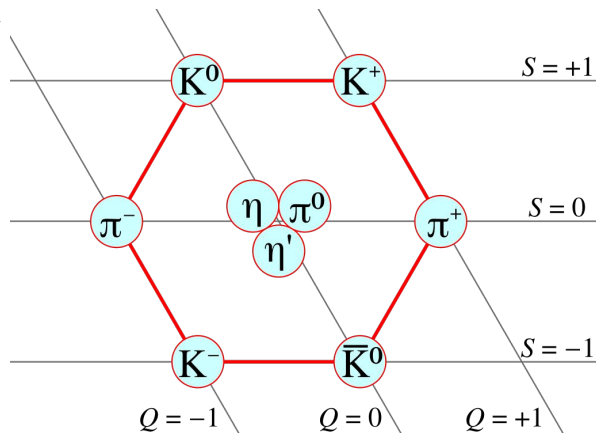
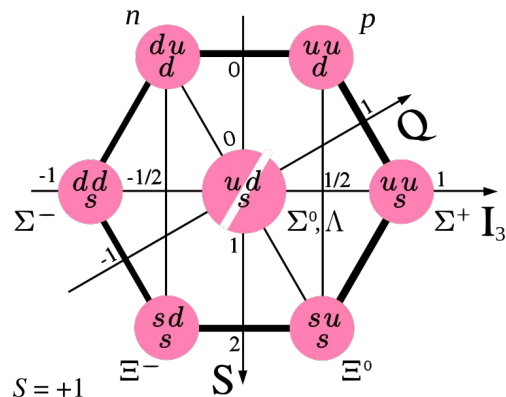
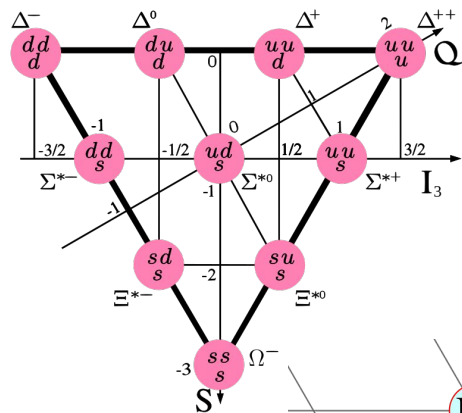


Tabela periódica dos elementos

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
	Atômico																	
	Símbolo																	
	Nome																	
	Massa																	
1	H																	
2	He																	
3	Li	Be																
4	Na	Mg																
5	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
6	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
7	Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
8	Fr	Ra	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr	

Para os elementos sem isótopos estáveis, o número de massa do isótopo com a meia-vida mais longa está entre parênteses.

Tabela Periódica Direitos autorais de design e interface © 1997 Michael Dayan. Ptable.com Última atualização 16/06/2017

O Modelo Padrão da Física de Partículas

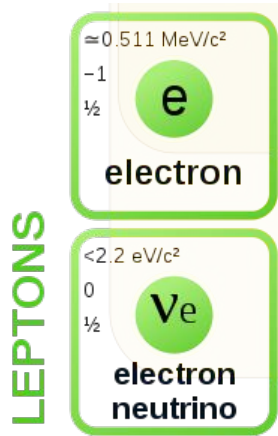
three generations of matter (fermions)			
	I	II	III
mass	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$
charge	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
QUARKS	 up	 charm	 top
	 down	 strange	 bottom
	 electron	 muon	 tau
LEPTONS	 electron neutrino	 muon neutrino	 tau neutrino

Quarks e léptões
spin = $\frac{1}{2}$ (fermiões)

Partículas de
Matéria: fermiões

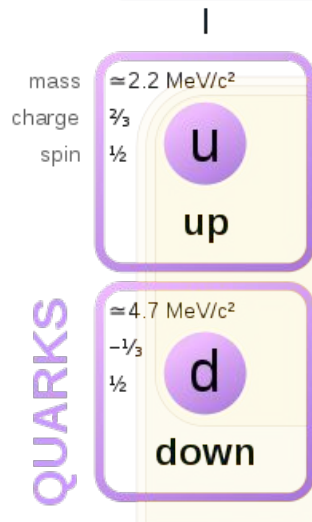
Partículas de matéria: léptões e quarks

- Léptões

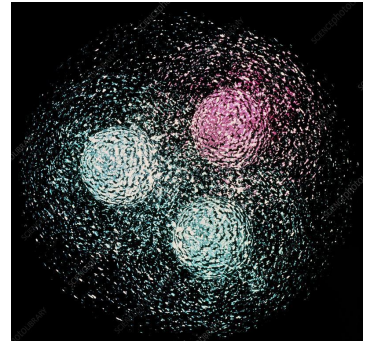


- Quarks:

- Formam os prótons e os neutrões



Protão = uud



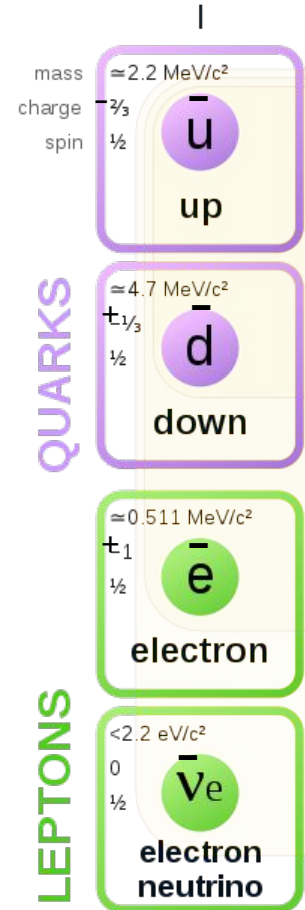
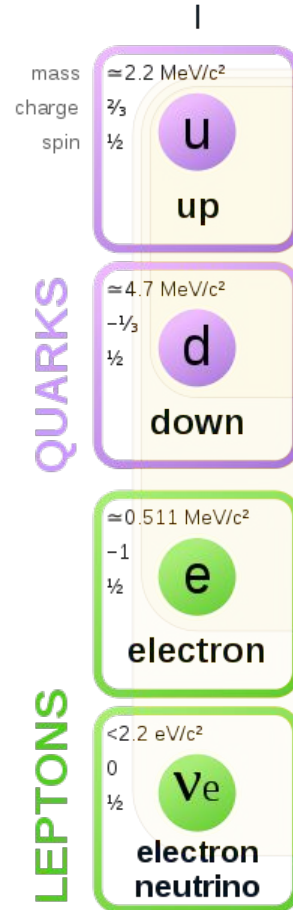
Source: Science Photo Library

Partículas e antipartículas

- Para cada partícula existe uma antipartícula!
 - Carga oposta

Quarks e léptões
spin = $\frac{1}{2}$ (fermiões)

+ As antipartículas!



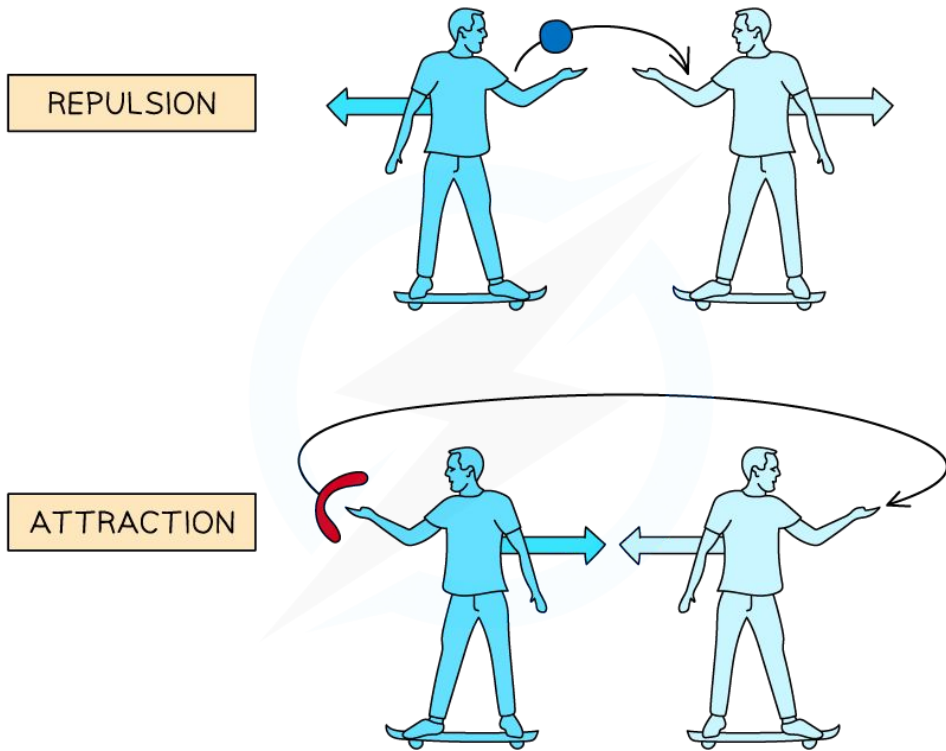
Três famílias

- A mesma estrutura repetem-se 3 vezes
- Cada coluna é uma família
- Cada coluna é uma copia da primeira
 - Diferença principal: as massas!

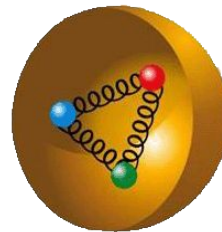
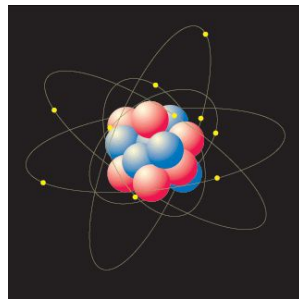
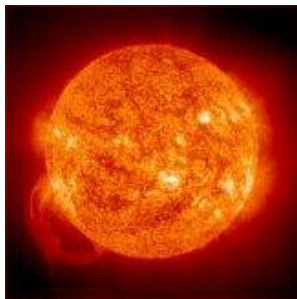
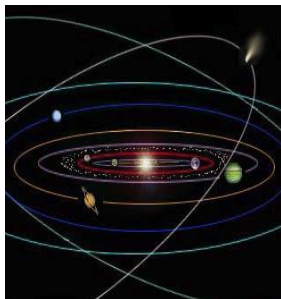
three generations of matter (fermions)			
	I	II	III
QUARKS	mass charge spin $\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ u up	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ c charm	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ t top
	$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d down	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s strange	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b bottom
	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ e electron	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ μ muon	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ τ tau
	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_e electron neutrino	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ muon neutrino	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ tau neutrino

As interacções fundamentais

Acontecem através da troca de outras partículas fundamentais: os bósons

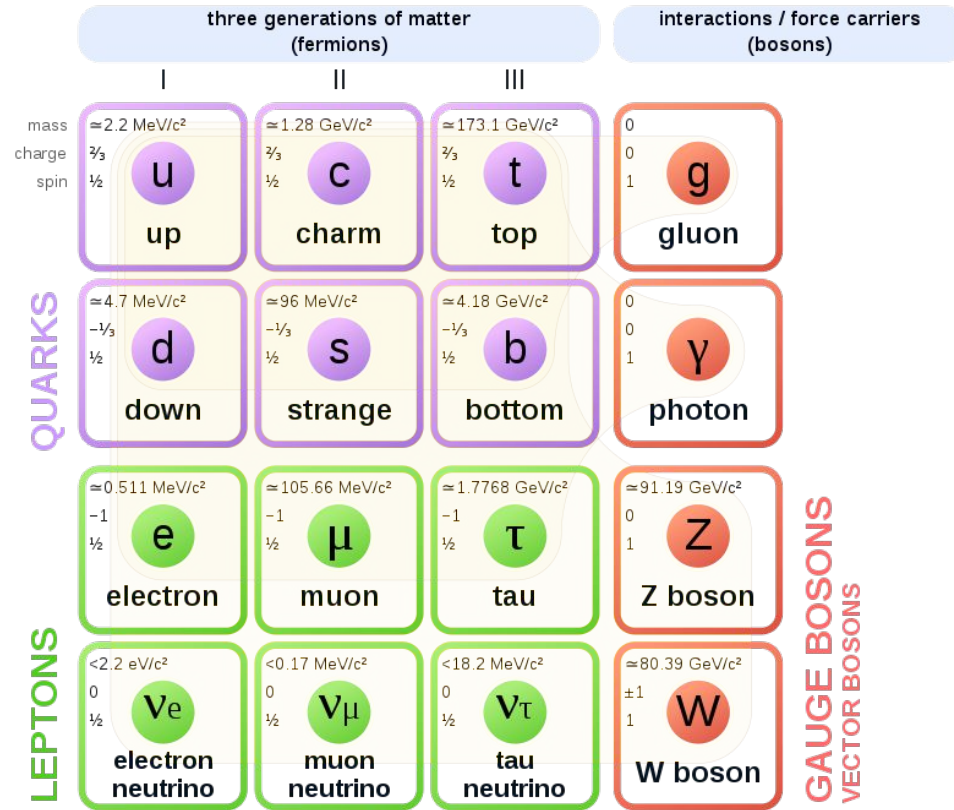


As interações fundamentais



Interacção	<u>Gravitação</u>	<u>Fraca</u>	<u>Electromagnética</u>	<u>Forte</u>
Partícula	gravitão (?)	W^+ , W^- e Z^0	fotão	gluão g
Age sobre	massa	carga de "sabor"	carga eléctrica	"cor"
Força entre 2 protões no núcleo	10^{-36}	10^{-7}	1	20
Responsável por	Sistema solar galáxias	radioactividade beta fusão nuclear	luz, átomos, química, electrónica	hadrões núcleos

O Modelo Padrão da Física de Partículas

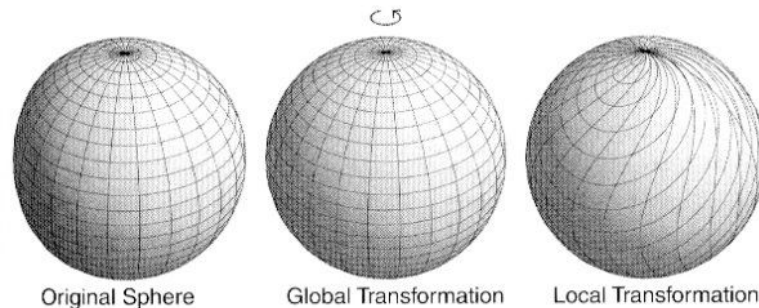


Quarks e léptões
spin = $\frac{1}{2}$ (fermiões)

Mediadores das forças
spin inteiro (bosões)

Simetrias na Teoria de Campo

- Simetrias → Interações!
equações invariantes localmente
para certas simetrias



Grupo de
simetrias do
Modelo Padrão

mudança
de fase

rotações
em 3D

generalização
do SU(2)

$$U(1) \times SU(2) \times SU(3)$$

Fotão
Electromagnetismo

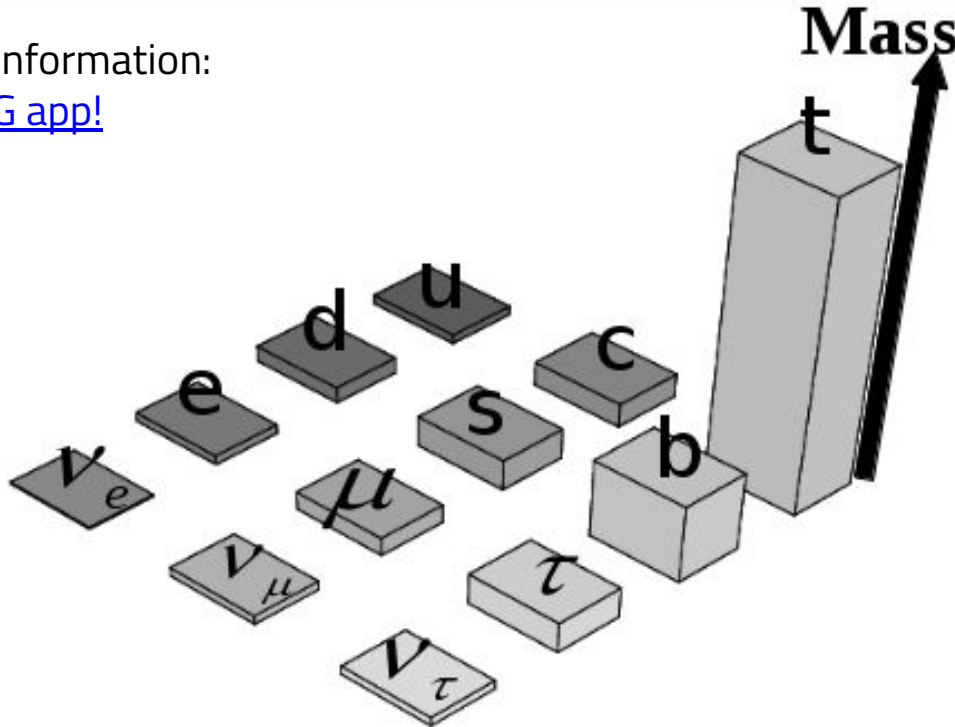
Interacções fracas
Bosões W^+, W^-, Z

Interação forte
Gluões

As massas das partículas

All information:

[PDG app!](#)



- A teoria previa que todas as massas eram zero!
- Porque uma diferença tão grande nas massas das partículas fundamentais?
 - Mecanismo de Higgs
 - Nova particular: bóson de Higgs

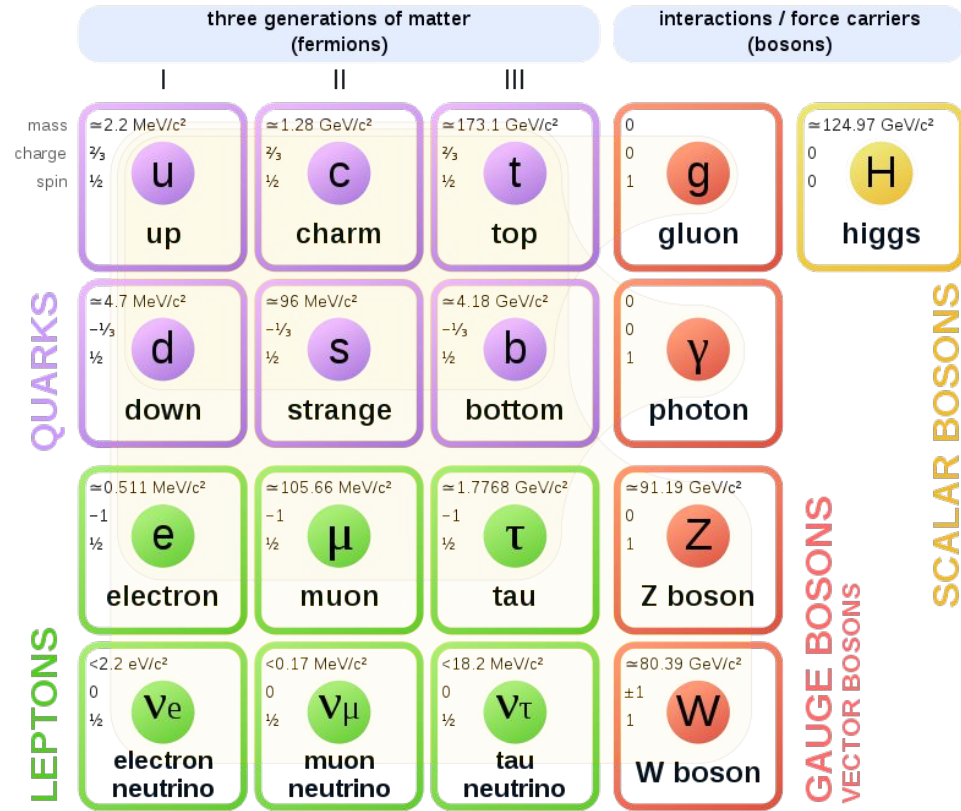
O mecanismo de Higgs

- Prevê um campo que ocupa o universo
- Através da interação com esse campo as partículas elementares adquirem



- Prevê a existência de uma nova partícula, o bóson de Higgs
 - Descoberto em 2012 no LHC pelas experiências ATLAS e CMS

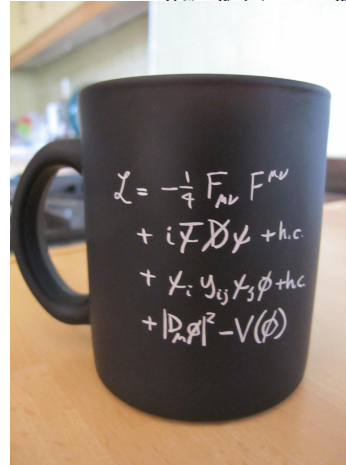
O Modelo Padrão da Física de Partículas



Quarks e léptões
spin = $\frac{1}{2}$ (fermiões)

Mediadores das forças
spin inteiro (bosões)

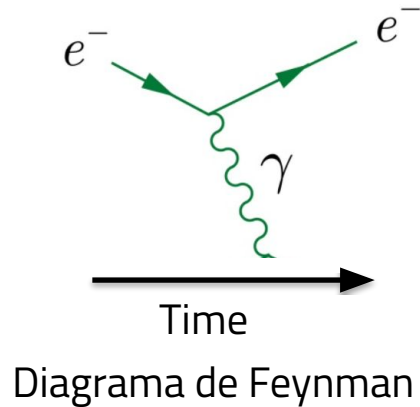
Standard Model



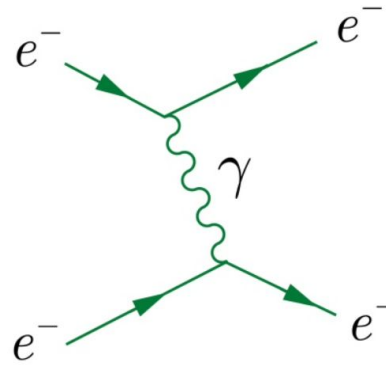
$$\begin{aligned}
 \mathcal{L}_{SM} = & -\frac{1}{2}\partial_\nu g_\mu^a \partial_\nu g_\mu^a - g_s f^{abc} \partial_\mu g_\nu^a g_\mu^b g_\nu^c - \frac{1}{4}g_s^2 f^{abc} f^{ade} g_\mu^b g_\nu^c g_\mu^d g_\nu^e - \partial_\nu W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\
 & M^2 W_\mu^+ W_\mu^- - \frac{1}{2}\partial_\nu Z_\mu^0 \partial_\nu 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 - igc_w (\partial_\nu Z_\mu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - \\
 & W_\nu^+ W_\mu^-) - Z_\nu^0 (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\mu W_\mu^+) + Z_\mu^0 (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\mu 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_\mu W_\mu^+) + A_\mu (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\
 & W_\nu^- \partial_\mu W_\mu^+)) - \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\mu^- W_\nu^+ W_\nu^- + \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\nu^- W_\mu^+ W_\nu^- + g^2 c_w^2 (Z_\mu^0 W_\mu^+ Z_\nu^0 W_\nu^- - \\
 & Z_\nu^0 Z_\mu^0 W_\nu^+ W_\nu^-) + g^2 s_w^2 (A_\mu W_\mu^+ A_\nu W_\nu^- - A_\mu A_\mu W_\nu^+ W_\nu^-) + g^2 s_w c_w (A_\mu Z_\nu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - \\
 & W_\nu^+ W_\mu^-) - 2A_\mu Z_\mu^0 W_\nu^+ W_\nu^-) - \frac{1}{2}\partial_\mu H \partial_\mu H - 2M^2 \alpha_h 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}{g} H + \frac{1}{2}(H^2 + \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}{c_w^2} 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{s_w^2}{c_w} M Z_\mu^0 (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + ig s_w M A_\mu (W_\mu^+ \phi^- - \\
 & \frac{-2c_w^2}{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^+) - \\
 & (\phi^0)^2 + 2\phi^+ \phi^-) - \frac{1}{8}g^2 \frac{1}{c_w} Z_\mu^0 Z_\mu^0 (H^2 + (\phi^0)^2 + 2(2s_w^2 - 1)^2 \phi^+ \phi^-) - \\
 & + W_\mu^- \phi^+) - \frac{1}{2}ig^2 \frac{s_w^2}{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^- + \\
 & 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^- - \\
 & \frac{1}{2}ig s_\lambda \lambda_{ij}^a (\bar{q}_i^\sigma \gamma^\mu q_j^\sigma) g_\mu^a - \bar{e}^\lambda (\gamma \partial + m_e^\lambda) e^\lambda - \bar{\nu}^\lambda (\gamma \partial + m_\nu^\lambda) \nu^\lambda - \bar{u}_j^\lambda (\gamma \partial + \\
 & \partial + m_d^\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) + \\
 & + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (4s_w^2 - 1 - \gamma^5) e^\lambda) + (\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu (\frac{4}{3}s_w^2 - 1 - \gamma^5) d_j^\lambda) + \\
 &) 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} d_j^\kappa)) + \\
 & - ((\bar{e}^\kappa U^{lep\dagger}_{\kappa\lambda} \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{d}_j^\kappa C_{\kappa\lambda}^\dagger \gamma^\mu (1 + \gamma^5) u_j^\lambda)) + \\
 & (-m_e^\kappa (\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) e^\kappa) + \\
 & U^{lep\dagger}_{\lambda\kappa} (1 + \gamma^5) \nu^\kappa) - m_\nu^\kappa (\bar{e}^\lambda U^{lep\dagger}_{\lambda\kappa} (1 - \gamma^5) \nu^\kappa) - \frac{g}{2} \frac{m_\nu^\lambda}{M} H (\bar{\nu}^\lambda \nu^\lambda) - \\
 & \frac{g}{2} \frac{m_\nu^\lambda}{M} H (\bar{e}^\lambda e^\lambda) + \frac{ig}{2} \frac{m_\nu^\lambda}{M} \phi^0 (\bar{\nu}^\lambda \gamma^5 \nu^\lambda) - \frac{ig}{2} \frac{m_\nu^\lambda}{M} \phi^0 (\bar{e}^\lambda \gamma^5 e^\lambda) - \frac{1}{4} \bar{\nu}_\lambda M_{\lambda\kappa}^R (1 - \gamma_5) \hat{\nu}_\kappa -
 \end{aligned}$$

Diagramas de Feynman

- Interação = troca de partículas mediadoras da força (bosões)
- Exemplo: interações electromagnéticas
- Todos os fenómenos electromagnéticos reduzem-se a um processo fundamental



Adicionar mais "peças"



Interação entre dois electrões: repulsão

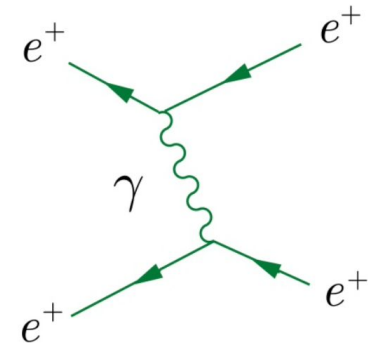
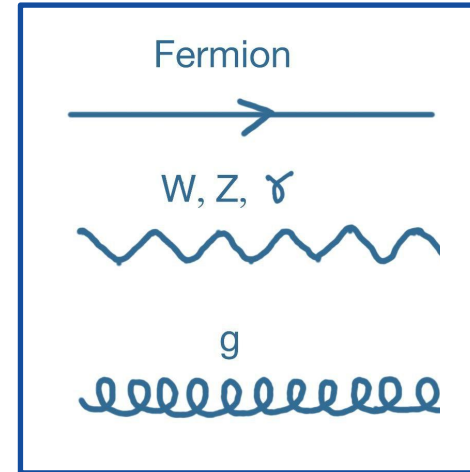
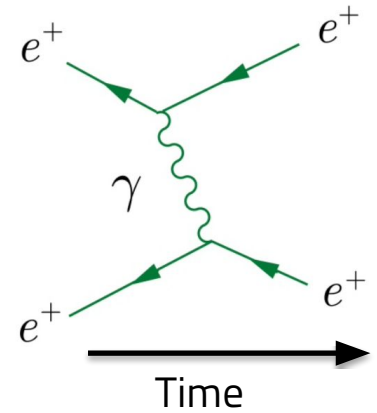


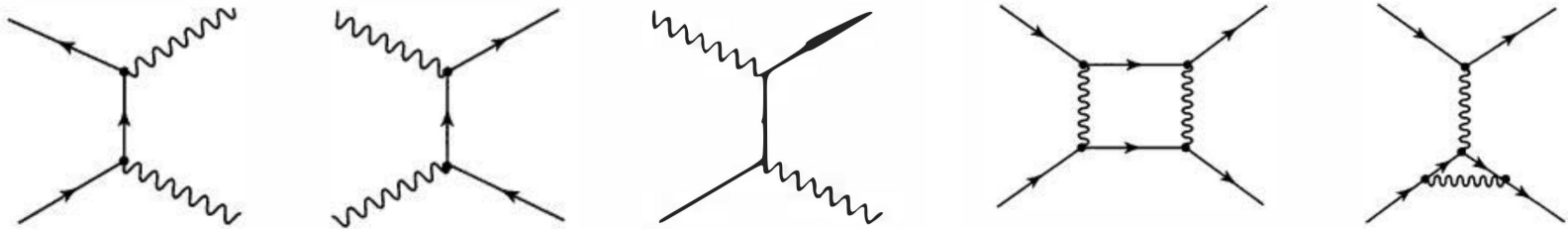
Diagrama de Feynman

- Cada diagrama representa uma interação
 - Regras matemáticas que levam ao cálculo da probabilidade do processo
- Regras precisas de representação
 - Definir direção do tempo
 - Representar:
 - Partículas: setas para frente no tempo
 - Antipartículas: setas para trás no tempo
- Representam cálculos matemáticos:
 - Alguns vértices existem e outros não
 - Depende das regras de simetria da interação



Interação electromagnética

- Outros muitos diagramas possíveis



- “Patas” externas —> representam partículas reais
- Partículas internas —> não se observam (virtuais)
- Interação = soma de todos os possíveis diagramas que levam as mesmas partículas do estado inicial ao estado final
 - Diagramas com máis vértice —> correções de ordem superior
 - Em prática só um número finito de diagramas é preciso

O Sucesso do Modelo Padrão

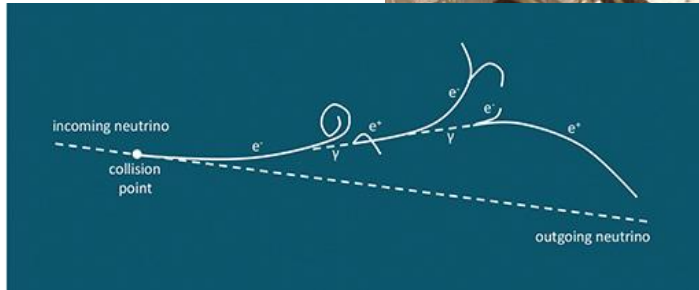
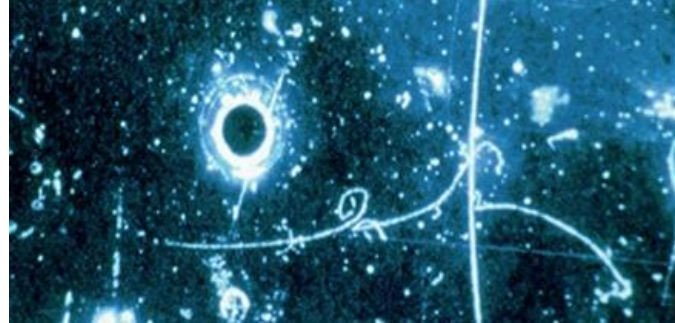
- Previsão da existência de:
 - Bosões W e Z
 - Quark top
 - Bosão de Higgs
- Cálculos ultra-precisos
 - Momento anômalo do electrão

Teoria:

$$a_e = 0.001\,159\,652\,181\,643(764)$$

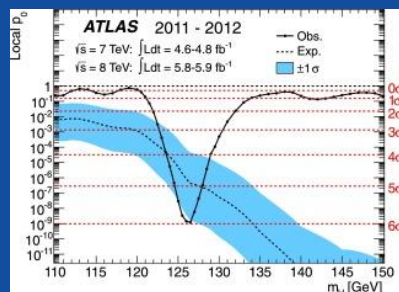
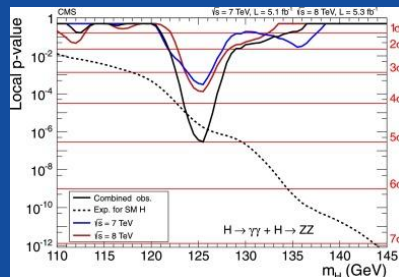
Experiência:

$$a_e = 0.001\,159\,652\,180\,73(28)$$



Descoberta do Bosão de Higgs

4 - Julho - 2012

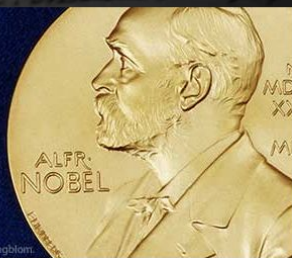


1



2013 NOBEL PRIZE IN PHYSICS

François Englert
Peter W. Higgs



© The Nobel Foundation. Photo: Lovisa Engblom



Prémio Nobel 2013

Prémio Príncipe de Asturias

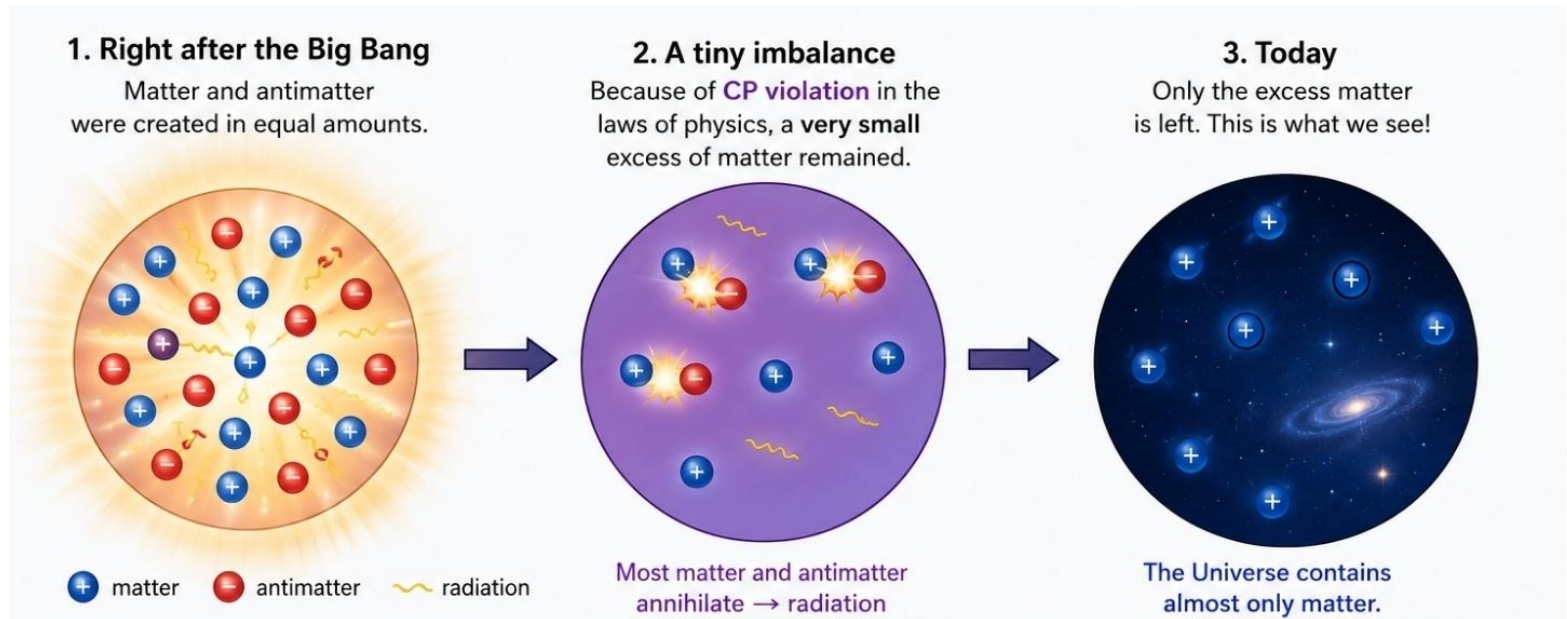




Algumas questões em aberto

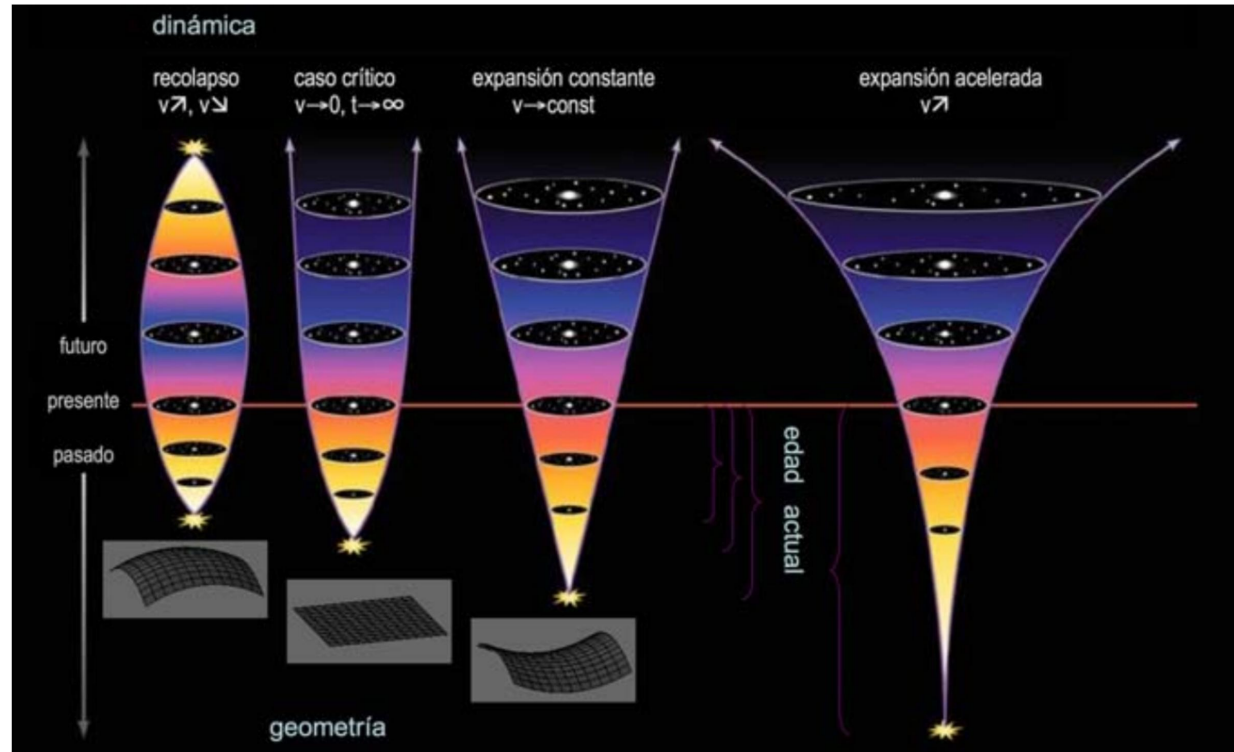
Asimetria matéria-antimatéria

Que aconteceu com a antimatéria?



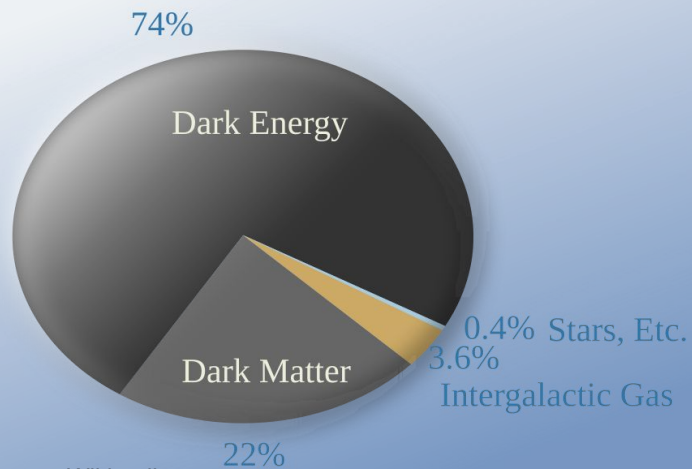
Energia Escura

- Medição de supernovas e galaxias distantes: expansão acelerada do universo
- Fundo cósmico de microondas: geometria plana
- Conclusão: energia escura

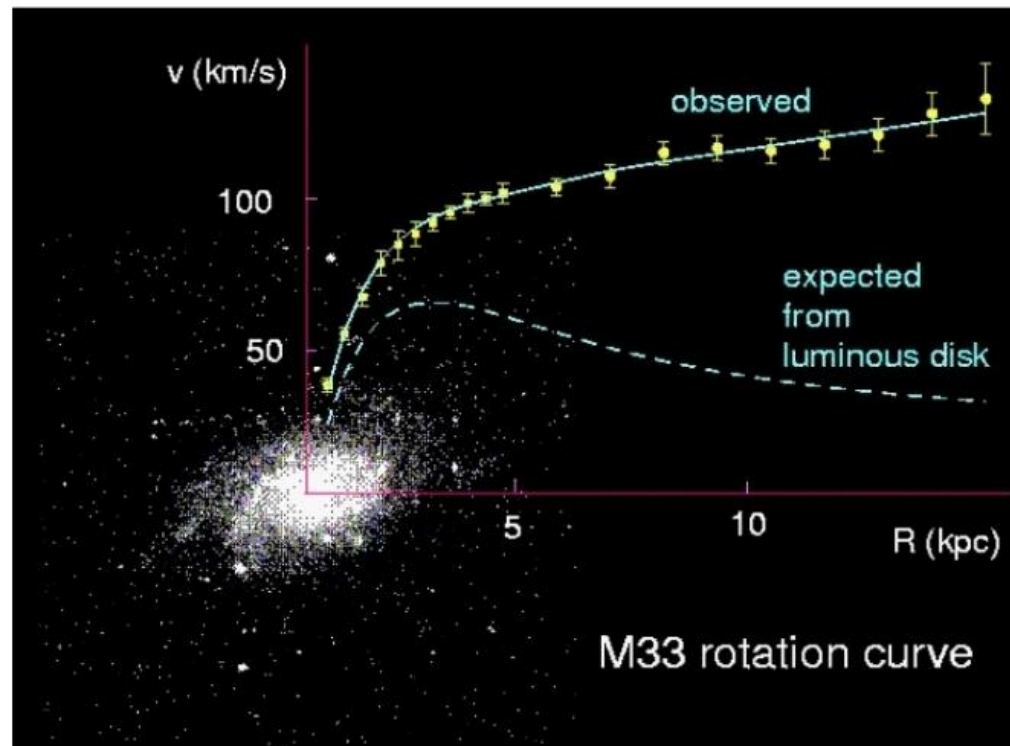


Source: Universo Inverosímil, Vladimir Ávila-Reece

Matéria Escura

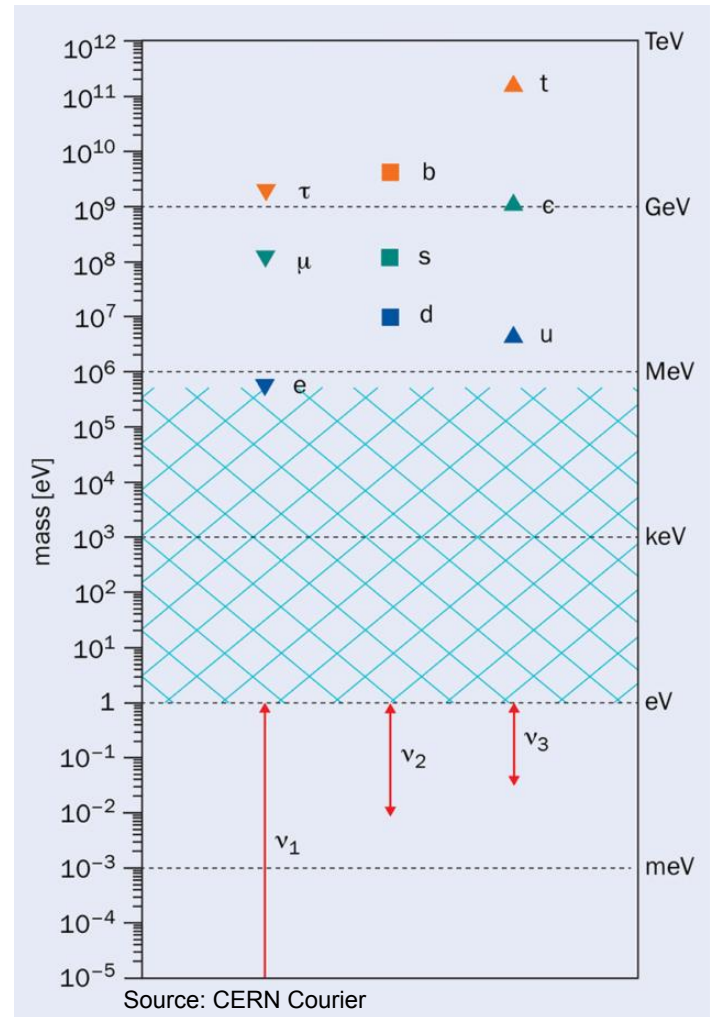


Source: Wikipedia



As massas dos neutrinos

- No Modelo Padrão, os neutrinos não têm massa
- Medições das oscilações de neutrinos (Superkamiokande, SNO) implicam que têm massa não nula mas muito pequena!
- Como? Por que? Por que tão pequenino

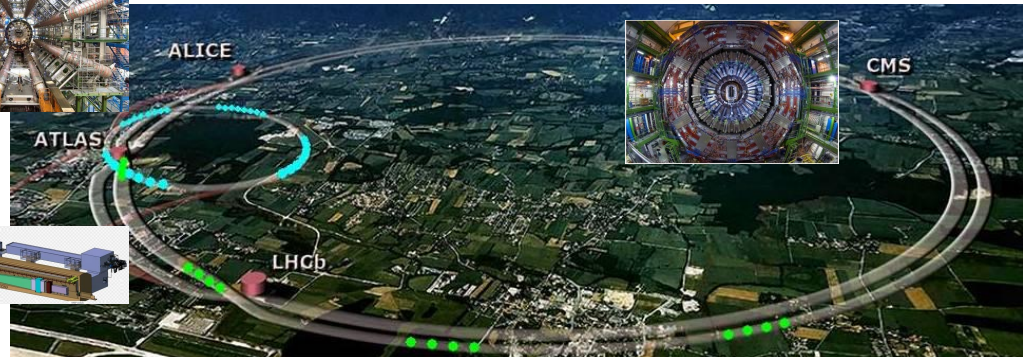
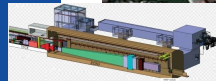
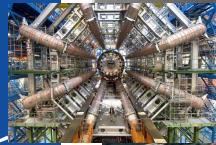
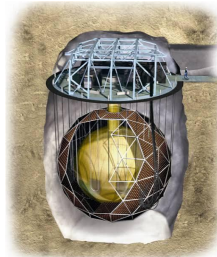
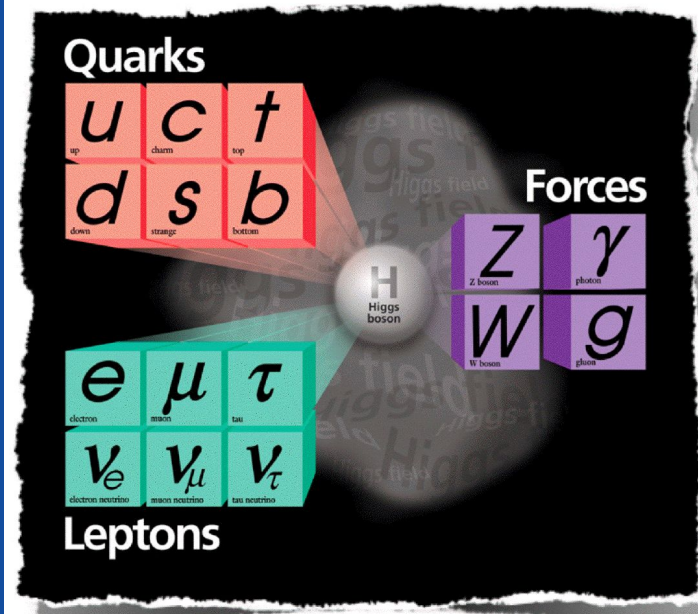


Resumo e Conclusões

O Modelo Padrão é uma teoria muito gira

- Mas não está completa
- Há muitas questões em aberto

Dispomos das máquinas mais potentes para descobrir o que é que falta!



Thanks!



Acknowledgments



REPÚBLICA
PORTUGUESA

FCT

Fundação
para a Ciência
e a Tecnologia

Backup