



A TEORIA DE QUASE TUDO

GLÁUBER CARVALHO DORSCH



Universidade Federal
do Espírito Santo



Parque Botânico da Vale

10 de Março de 2019

O Modelo Padrão da Física de Partículas:

Uma teoria de quase tudo



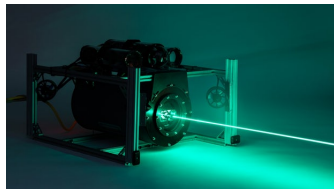
O Modelo Padrão da Física de Partículas:

Uma teoria de quase tudo



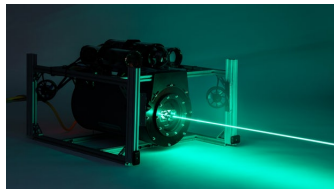
O Modelo Padrão da Física de Partículas:

Uma teoria de quase tudo



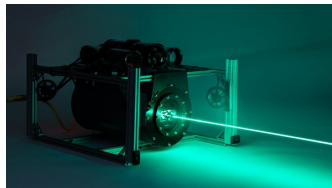
O Modelo Padrão da Física de Partículas:

Uma teoria de quase tudo



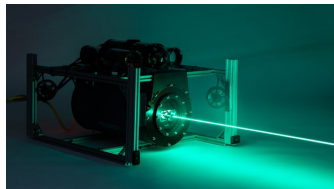
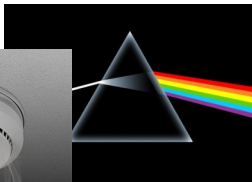
O Modelo Padrão da Física de Partículas:

Uma teoria de quase tudo



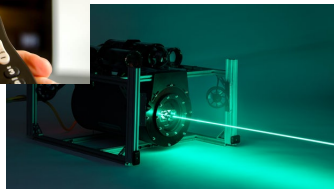
O Modelo Padrão da Física de Partículas:

Uma teoria de quase tudo



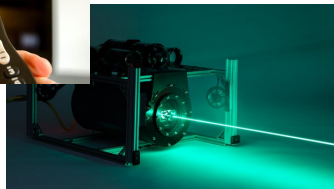
O Modelo Padrão da Física de Partículas:

Uma teoria de quase tudo



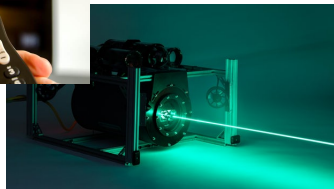
O Modelo Padrão da Física de Partículas:

Uma teoria de quase tudo



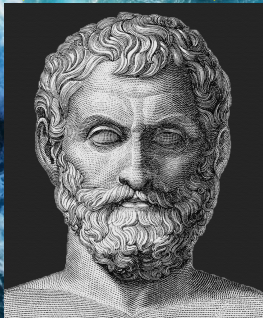
O Modelo Padrão da Física de Partículas:

Uma teoria de quase tudo



Do que é constituída a matéria?

Tales de Mileto
(ca. 625 – 548 AC)

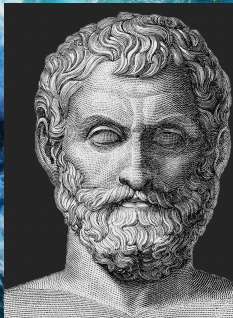


Pioneiro da
filosofia ocidental

Do que é constituída a matéria?

Mitologia do Oriente-Médio

Tales de Mileto
(ca. 625 – 548 AC)

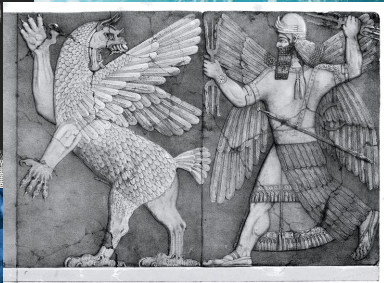


Pioneiro da
filosofia ocidental

Babilônia

Enuma Elish

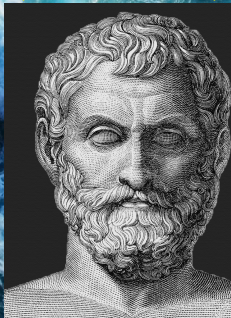
Mundo criado pelo encontro de
Apsu (águas doces)
e Tiamat (águas salgadas)



Do que é constituída a matéria?

Mitologia do Oriente-Médio

Tales de Mileto
(ca. 625 – 548 AC)



Pioneiro da
filosofia ocidental

Babilônia

Enuma Elish

Mundo criado pelo encontro de
Apsu (águas doces)
e Tiamat (águas salgadas)



Israel

Genesis 1:2

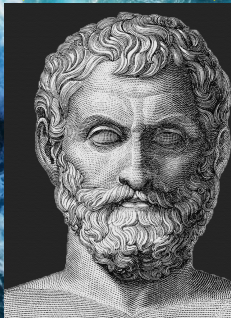
“...e o espírito de Deus
pairava sobre as águas.”



Do que é constituída a matéria?

Mitologia do Oriente-Médio

Tales de Mileto
(ca. 625 – 548 AC)



Pioneiro da
filosofia ocidental

Babilônia

Enuma Elish

Mundo criado pelo encontro de
Apsu (águas doces)
e Tiamat (águas salgadas)



Israel

Genesis 1:2

“...e o espírito de Deus
pairava sobre as águas.”



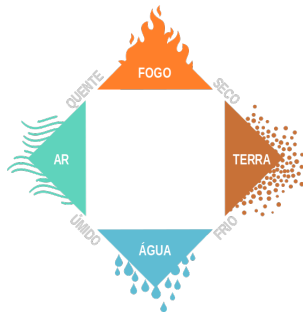
Anaximandro (*apeiron*), Anaxímenes (*ar*), Heráclito (*fogo*)...

Do que é constituída a matéria?

DOUTRINA DOS QUATRO ELEMENTOS

Empédocles (494 – 434 A.C.)

Aristóteles (384 – 322 A.C.)

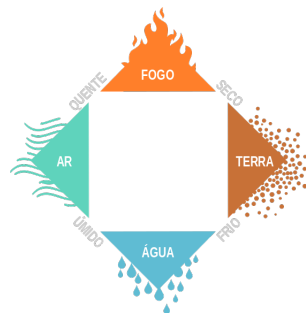


Do que é constituída a matéria?

DOUTRINA DOS QUATRO ELEMENTOS

Empédocles (494 – 434 A.C.)

Aristóteles (384 – 322 A.C.)



ATOMISMO (á-tomo = indivisível)



O atomismo grego é mecanicista.

Leucipo (séc. V A.C.)

Demócrito (460 – 370 A.C.)

“Por convenção há cor,
Por convenção há doce,
Por convenção há amargo,
Mas na realidade há átomos e espaço.”

A matéria é composta de átomos

Triunfo do atomismo a partir do século XIX. Evidências incluem:

- ▶ Lei das Proporções em Química

Por ex. Lei de Proust:

“Substâncias puras contêm sempre os mesmos elementos combinados na mesma proporção em massa.”

gás cloro		gás hidrogênio		ácido clorídrico
71 g	+	2 g	→	73 g
142 g	+	4 g	→	146 g

A matéria é composta de átomos

Triunfo do atomismo a partir do século XIX. Evidências incluem:

- ▶ Lei das Proporções em Química

Por ex. Lei de Proust:

“Substâncias puras contêm sempre os mesmos elementos combinados na mesma proporção em massa.”

gás cloro		gás hidrogênio		ácido clorídrico
71 g	+	2 g	→	73 g
142 g	+	4 g	→	146 g
150 g	+	4 g	→	

A matéria é composta de átomos

Triunfo do atomismo a partir do século XIX. Evidências incluem:

- ▶ Lei das Proporções em Química

Por ex. Lei de Proust:

“Substâncias puras contêm sempre os mesmos elementos combinados na mesma proporção em massa.”

gás cloro		gás hidrogênio		ácido clorídrico	gás cloro	
71 g	+	2 g	→	73 g		
142 g	+	4 g	→	146 g		
150 g	+	4 g	→	146 g	+	8 g

A matéria é composta de átomos

Triunfo do atomismo a partir do século XIX. Evidências incluem:

- ▶ Lei das Proporções em Química

Por ex. Lei de Proust:

“Substâncias puras contêm sempre os mesmos elementos combinados na mesma proporção em massa.”

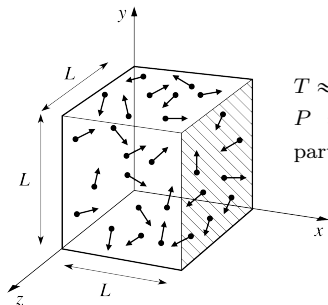
gás cloro		gás hidrogênio		ácido clorídrico	gás cloro	
71 g	+	2 g	→	73 g		
142 g	+	4 g	→	146 g		
150 g	+	4 g	→	146 g	+	8 g
		+		→	2	

A matéria é composta de átomos

Triunfo do atomismo a partir do século XIX. Evidências incluem:

- ▶ Lei das Proporções em Química
- ▶ Teoria Cinética dos Gases

Pode-se **deduzir** as propriedades e leis dos gases assumindo serem constituídos de corpúsculos em movimento.



$T \approx$ energia devido ao movimento das partículas

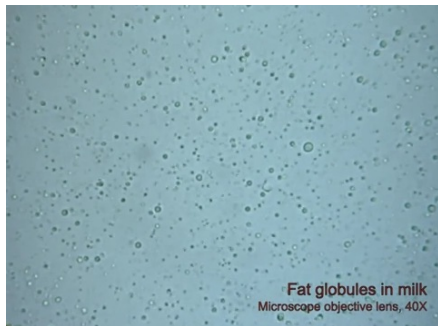
$P \approx$ força sobre as paredes devido a colisões das partículas

$$PV \propto T$$

A matéria é composta de átomos

Triunfo do atomismo a partir do século XIX. Evidências incluem:

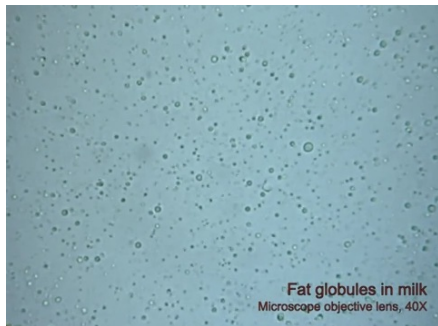
- ▶ Lei das Proporções em Química
- ▶ Teoria Cinética dos Gases
- ▶ Movimento Browniano



A matéria é composta de átomos

Triunfo do atomismo a partir do século XIX. Evidências incluem:

- ▶ Lei das Proporções em Química
- ▶ Teoria Cinética dos Gases
- ▶ Movimento Browniano

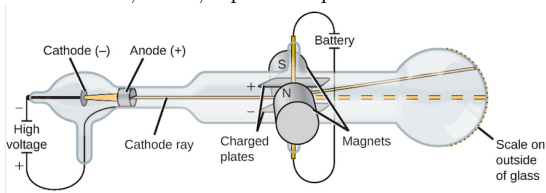


Einstein (1905): colisões das moléculas do líquido com as partículas de gordura.

A ESTRUTURA ATÔMICA:
DIVIDINDO O “INDIVISÍVEL”

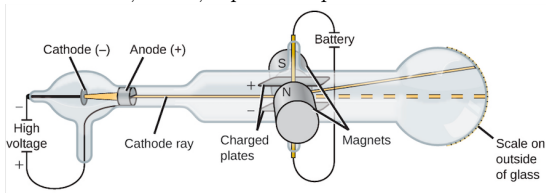
Os elétrons

- ▶ Em 1897 Thompson mostrou que os “raios catódicos” são formados por partículas de massa 2000 vezes menor que o átomo mais leve. As propriedades da partícula independiam do material do cátodo. Descobriu-se, assim, a primeira partícula subatômica: **o elétron**.



Os elétrons

- Em 1897 Thompson mostrou que os “raios catódicos” são formados por partículas de massa 2000 vezes menor que o átomo mais leve. As propriedades da partícula independiam do material do cátodo. Descobriu-se, assim, a primeira partícula subatômica: **o elétron**.

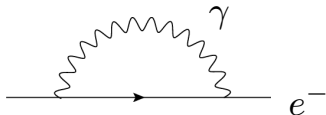


Uma corrente elétrica é um fluxo de **elétrons**!

Os elétrons

Os elétrons possuem **carga elétrica**.

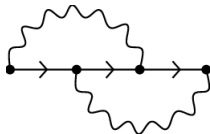
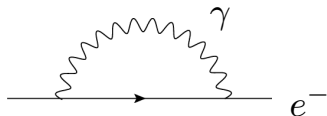
Nunca andam sozinhos! Estão sempre acompanhados de **fótons**.



Os elétrons

Os elétrons possuem **carga elétrica**.

Nunca andam sozinhos! Estão sempre acompanhados de **fótons**.

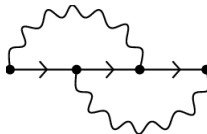
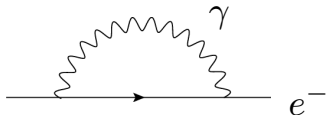


etc. ...

Os elétrons

Os elétrons possuem **carga elétrica**.

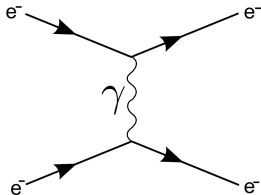
Nunca andam sozinhos! Estão sempre acompanhados de **fótons**.



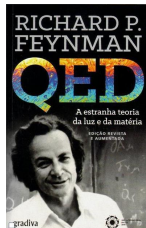
etc...

Cargas elétricas “conversam” entre si (interagem) através da troca de **fótons**.

O **fóton** é a partícula mediadora da **interação eletromagnética**.



Richard Feynman,
“QED: A estranha teoria
da luz e da matéria”



LÉPTONS

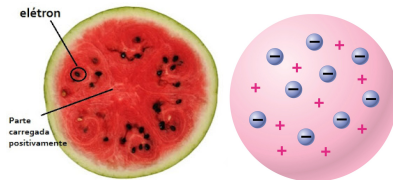
0.511 MeV/c² -1 1/2  elétron			0 0 1  fóton	

BÓSONS DE CALIBRE

O núcleo atômico

Thompson mostrou que
dentro dos átomos há elétrons.

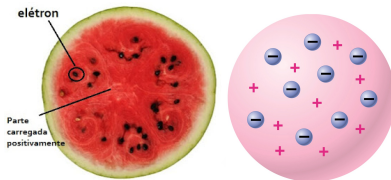
Modelo atômico de Thompson



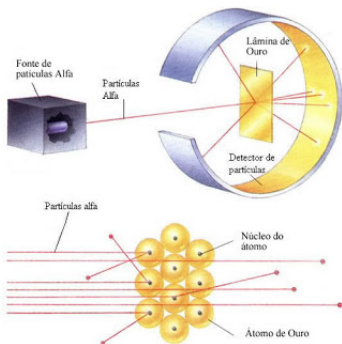
O núcleo atômico

Thompson mostrou que
dentro dos átomos há elétrons.

Modelo atômico de Thompson

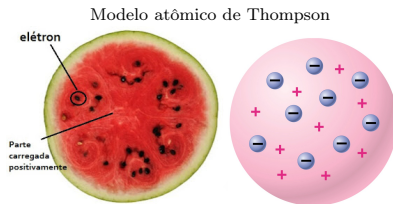


O experimento de Rutherford (1911)



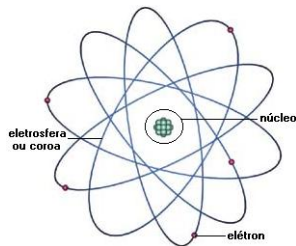
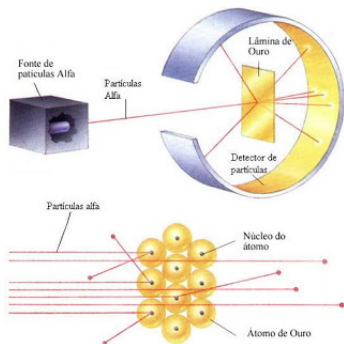
O núcleo atômico

Thompson mostrou que dentro dos átomos há elétrons.



O experimento de Rutherford (1911)

Aprox. 1 em cada 8000 partículas incidentes rebatiam.



Em 1932, Chadwick descobriu que o núcleo atômico é composto de **prótons e nêutrons**.

Tabela periódica

1 H hidrogênio 1,008																	18 He hélio 4,0026
3 Li lítio 6,94	4 Be berílio 9,0122																
11 Na sódio 22,990	12 Mg magnésio 24,305																
19 K potássio 39,098	20 Ca cálcio 40,078(4)	21 Sc escândio 44,956	22 Ti titânio 47,867	23 V vanádio 50,942	24 Cr cromio 51,996	25 Mn manganês 54,938	26 Fe ferro 55,845(2)	27 Co cobalto 58,933	28 Ni níquel 58,693	29 Cu cobre 63,546(3)	30 Zn zinco 65,38(2)	31 Ga gálio 69,723	32 Ge germânio 72,630(8)	33 As arsênio 74,922	34 Se selênio 78,971(8)	35 Br bromo 79,904	36 Kr criptônio 83,798(2)
37 Rb rubídio 85,468	38 Sr estrôncio 87,62	39 Y ítrio 88,906	40 Zr zircônio 91,224(2)	41 Nb nióbio 92,906	42 Mo molibdênio 95,95	43 Tc tecnécio [98]	44 Ru rutênio 101,07(2)	45 Rh ródio 102,91	46 Pd paládio 106,42	47 Ag prata 107,87	48 Cd cádmio 112,41	49 In índio 114,82	50 Sn estanho 118,71	51 Sb antimônio 121,76	52 Te telúrio 127,60(3)	53 I iodo 126,90	54 Xe xenônio 131,29
55 Cs césio 132,91	56 Ba bário 137,33	57 a 71															
87 Fr frâncio [223]	88 Ra rádio [226]	89 a 103															
72 Hf hafnício 178,49(2)	73 Ta tântalo 180,95	74 W tungstênio 183,84	75 Re rênio 186,21	76 Os ósio 190,23(2)	77 Ir irídio 192,22	78 Pt platina 195,08	79 Au ouro 196,97	80 Hg mercúrio 200,59	81 Tl talho 204,38	82 Pb chumbo 207,2	83 Bi bismuto 208,98	84 Po polônio [209]	85 At astato [210]	86 Rn radônio [222]			
104 Rf rutherfordio [261]	105 Db dúbnio [268]	106 Sg seabórgio [266]	107 Bh bohrio [271]	108 Hs hásio [284]	109 Mt meitnério [278]	110 Ds darmstadtio [281]	111 Rg roentgenio [281]	112 Cn copernício [285]	113 Nh nihônio [286]	114 Fl fleróvio [289]	115 Mc moscóvio [288]	116 Lv livermório [293]	117 Ts tennesso [294]	118 Og oganssônio [294]			
57 La lantanio 138,91	58 Ce cério 140,12	59 Pr praseodímio 140,91	60 Nd neodímio 144,24	61 Pm promécio [145]	62 Sm samário 150,36(2)	63 Eu europio 151,96	64 Gd gadolínio 157,25(3)	65 Tb térbio 158,93	66 Dy disprósio 162,50	67 Ho hólmio 164,93	68 Er érbio 167,26	69 Tm tulio 168,93	70 Yb itêrbio 173,05	71 Lu lutécio 174,97			
89 Ac actínio [227]	90 Th tório 232,04	91 Pa protactínio 231,04	92 U urânio 238,03	93 Np neptúnio [237]	94 Pu plutônio [244]	95 Am amerício [243]	96 Cm cúrio [247]	97 Bk berquélio [247]	98 Cf califórnia [251]	99 Es einstênio [252]	100 Fm fêrmio [257]	101 Md mendelévio [258]	102 No nobélio [259]	103 Lr laurêncio [262]			

3	número atômico
Li	simbolo químico
lítio	nome
6,94	peso atômico (massa atômica relativa ou número de massa do isótopo mais estável)

www.tabelaperiodica.org

Licença de uso Creative Commons By-NC-SA 4.0 - Use somente para fins educacionais

Caso encontre algum erro favor avisar pelo mail luisbrudna@gmail.com

Versão IUPAC/SBQ (pt-br) com 5 algarismos significativos, baseada em DOI:10.1515/pac-2015-0305 - atualizada em 23 de maio de 2018

DECAIMENTOS RADIOATIVOS:
O INÍCIO DA FÍSICA NUCLEAR

Decaimento radioativo: início da Física Nuclear

No início do séc. XX, sabia-se que vários núcleos atômicos apresentam decaimentos do tipo:

nêutron $\rightarrow$ próton + elétron...

(por ex. ${}^{14}_6\text{C} \rightarrow {}^{14}_7\text{N} + e^- \dots$)

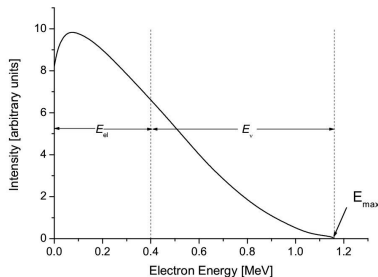
Decaimento radioativo: início da Física Nuclear

No início do séc. XX, sabia-se que vários núcleos atômicos apresentam decaimentos do tipo:

nêutron $\rightarrow$ próton + elétron...

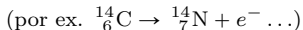
(por ex. ${}^{14}_6\text{C} \rightarrow {}^{14}_7\text{N} + e^- \dots$)

Mas o espectro contínuo do e^- violava conservação de energia-momento...

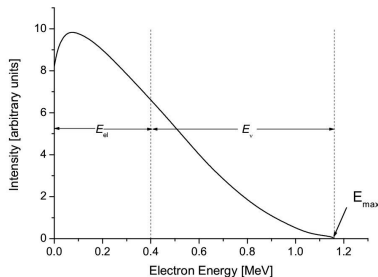


Decaimento radioativo: início da Física Nuclear

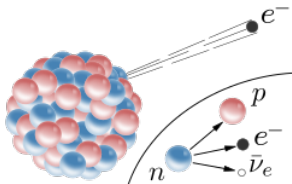
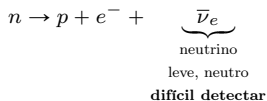
No início do séc. XX, sabia-se que vários núcleos atômicos apresentam decaimentos do tipo:



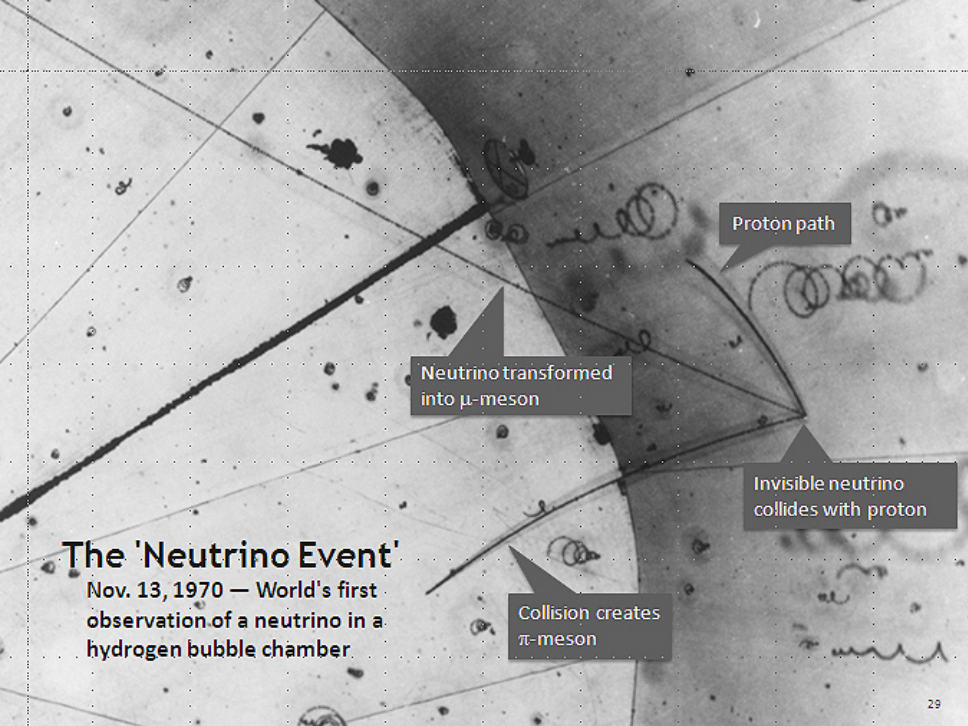
Mas o espectro contínuo do e^- violava conservação de energia-momento...



Em 1930 Pauli sugeriu que a reação correta seria



O neutrino “rouba” parte da energia do elétron.
Primeira detecção direta de neutrinos foi em 1956!
Partícula **predita pela teoria!**



Proton path

Neutrino transformed
into μ -meson

Invisible neutrino
collides with proton

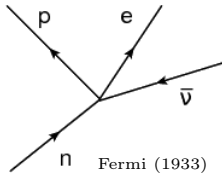
Collision creates
 π -meson

The 'Neutrino Event'

Nov. 13, 1970 — World's first
observation of a neutrino in a
hydrogen bubble chamber.

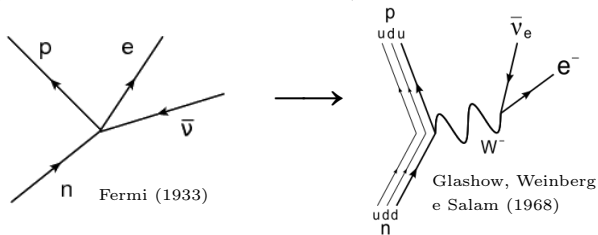
A interação fraca

O decaimento radioativo não é de origem eletromagnética (não é devido a uma troca de fótons).



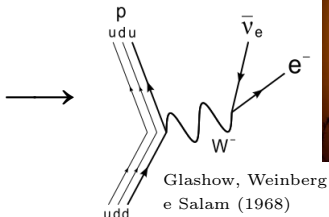
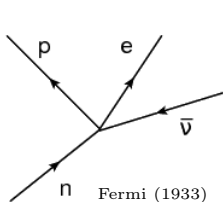
A interação fraca

O decaimento radioativo não é de origem eletromagnética (não é devido a uma troca de fótons).



A interação fraca

O decaimento radioativo não é de origem eletromagnética (não é devido a uma troca de fótons).



- ▶ $W^{\pm}$ e Z mediadores da **interação fraca**.
- ▶ Curto alcance ($r \sim 1\% r_{\text{próton}}$)
 $M_{W,Z} \sim 100 M_{\text{próton}}$.
- ▶ Detectados em 1983:
Super Proton Synchrotron,
CERN



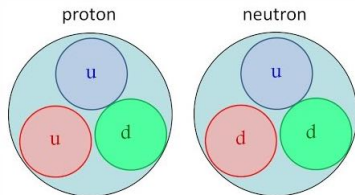
LÉPTONS

			0 0 1 γ fóton	BÓSONS DE CALIBRE
0.511 MeV/c² -1 1/2 e elétron		91.2 GeV/c² 0 1 Z bóson Z		
1/2 ν_e neutrino d'électron		80.4 GeV/c² ±1 1 W bóson W		

DENTRO DO NÚCLEO ATÔMICO...

Quarks e a interação nuclear forte

Nos anos 1950 e 60 o experimento de Rutherford foi repetido a mais altas energias, revelando que prótons e nêutrons possuem uma sub-estrutura.

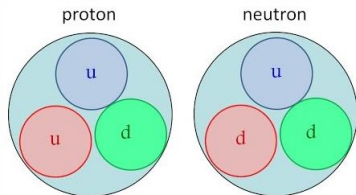


Constituídos dos chamados **quarks**

Prótons e nêutrons são formados por quarks **up** ($q = 2/3$) e **down** ($q = -1/3$).

Quarks e a interação nuclear forte

Nos anos 1950 e 60 o experimento de Rutherford foi repetido a mais altas energias, revelando que prótons e nêutrons possuem uma sub-estrutura.



Constituídos dos chamados **quarks**

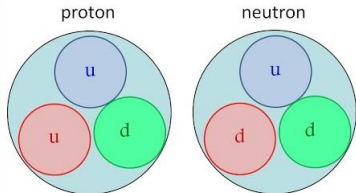
Prótons e nêutrons são formados por quarks **up** ($q = 2/3$) e **down** ($q = -1/3$).

Quarks possuem outra propriedade (outro tipo de carga), chamada “**cor**”.

A interação associada à “**cor**” é chamada **interação forte**, mediada por **gluons**.

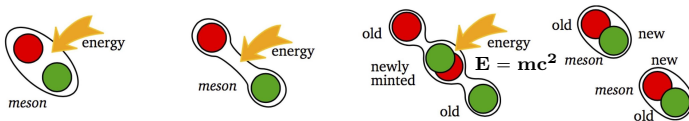
Quarks e a interação nuclear forte

Nos anos 1950 e 60 o experimento de Rutherford foi repetido a mais altas energias, revelando que prótons e nêutrons possuem uma sub-estrutura.



Constituídos dos chamados **quarks**
Prótons e nêutrons são formados por quarks **up** ($q = 2/3$) e **down** ($q = -1/3$).

Quarks possuem outra propriedade (outro tipo de carga), chamada “**cor**”.
A interação associada à “**cor**” é chamada **interação forte**, mediada por **gluons**.
Quarks não podem ser observados isoladamente (confinamento de cor):



A dinâmica de quarks e gluons é descrita pela **Cromodinâmica Quântica**.

QUARKS

LÉPTONS

$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$ $2/3$ $1/2$  up			 glúon	
$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$  down			 fóton	
$0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 $1/2$  elétron			$91.2 \text{ GeV}/c^2$ 0 1  bóson Z	
$< 2.2 \text{ eV}/c^2$ 0 $1/2$  neutrino do elétron			$80.4 \text{ GeV}/c^2$ ± 1 1  bóson W	

BÓSONS DE CALIBRE

O BÓSON DE HIGGS

O bóson de Higgs e o LHC

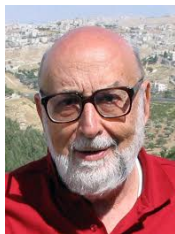
De onde vêm as massas das partículas elementares?

É fundamental que venham da interação com alguma partícula.

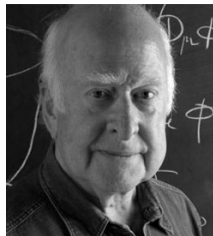
Essa partícula é o **bóson de Higgs**, prevista em 1964.



Robert Brout
(1928—2011)



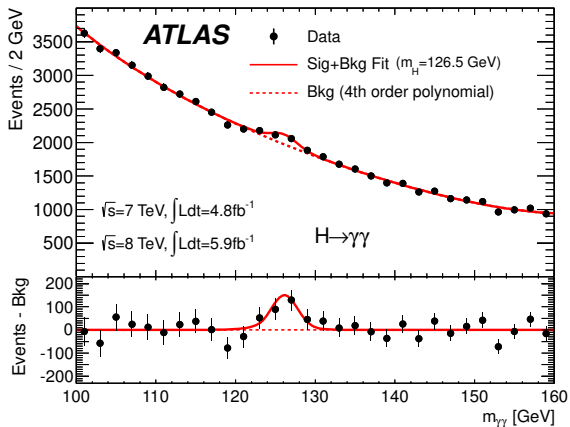
François Englert
(1932—)



Peter Higgs
(1929—)

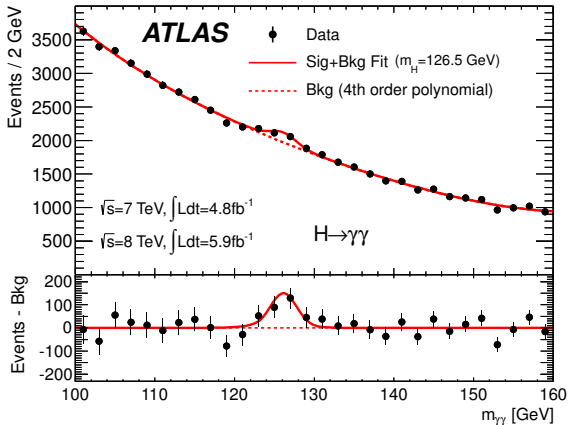
A descoberta do bóson de Higgs

Em 04 de Julho de 2012, os esforços foram recompensados.



A descoberta do bóson de Higgs

Em 04 de Julho de 2012, os esforços foram recompensados.



O Modelo Padrão de Física de Partículas estava, então, completo.

QUARKS

LÉPTONS

$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$

$2/3$
 $1/2$

u

up

$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$

$-1/3$
 $1/2$

d

down

$0.511 \text{ MeV}/c^2$

-1
 $1/2$

e

elétron

$< 2.2 \text{ eV}/c^2$

0
 $1/2$

ν_e

neutrino do
elétron

0
 0
 1

g

glúon

0
 0
 1

γ

fóton

$91.2 \text{ GeV}/c^2$

0
 0
 1

Z

bóson Z

$80.4 \text{ GeV}/c^2$

± 1
 1

W

bóson W

$\approx 126 \text{ GeV}/c^2$

0
 0
 0

H

bóson de
Higgs

BÓSONS DE CALIBRE

QUARKS

LÉPTONS

BÓSONS DE CALIBRE

massa→ $\approx 2.3 \text{ MeV/c}^2$ carga→ $2/3$ spin→ $1/2$ u up	$\approx 1.275 \text{ GeV/c}^2$ $2/3$ $1/2$ c charm	$\approx 173.07 \text{ GeV/c}^2$ $2/3$ $1/2$ t top	0 0 1 g glúon	$\approx 126 \text{ GeV/c}^2$ 0 0 H bóson de Higgs
$\approx 4.8 \text{ MeV/c}^2$ $-1/3$ $1/2$ d down	$\approx 95 \text{ MeV/c}^2$ $-1/3$ $1/2$ s strange	$\approx 4.18 \text{ GeV/c}^2$ $-1/3$ $1/2$ b bottom	0 0 1 γ fóton	
0.511 MeV/c^2 -1 $1/2$ e elétron	105.7 MeV/c^2 -1 $1/2$ μ múon	1.777 GeV/c^2 -1 $1/2$ τ tau	91.2 GeV/c^2 0 1 Z bóson Z	
$< 2.2 \text{ eV/c}^2$ 0 $1/2$ ν_e neutrino do elétron	$< 0.17 \text{ MeV/c}^2$ 0 $1/2$ ν_μ neutrino do múon	$< 15.5 \text{ MeV/c}^2$ 0 $1/2$ ν_τ neutrino do tau	80.4 GeV/c^2 ±1 1 W bóson W	

Desafios e problemas em aberto

O Modelo Padrão explica quase tudo sobre a matéria que nos rodeia...

...e faz previsões extremamente precisas (ex. momento magnético anômalo)...

$$\begin{aligned} a_e^{\text{exp}} &= 0.001\,159\,652\,180\,73(28) \\ a_e^{\text{teoria}} &= \end{aligned}$$

Desafios e problemas em aberto

O Modelo Padrão explica quase tudo sobre a matéria que nos rodeia...

...e faz previsões extremamente precisas (ex. momento magnético anômalo)...

$$a_e^{\text{exp}} = 0.001\,159\,652\,180\,73(28)$$

$$a_e^{\text{teoria}} = 0.$$

Desafios e problemas em aberto

O Modelo Padrão explica quase tudo sobre a matéria que nos rodeia...

...e faz previsões extremamente precisas (ex. momento magnético anômalo)...

$$a_e^{\text{exp}} = 0.001\,159\,652\,180\,73(28)$$

$$a_e^{\text{teoria}} = 0.0$$

Desafios e problemas em aberto

O Modelo Padrão explica quase tudo sobre a matéria que nos rodeia...

...e faz previsões extremamente precisas (ex. momento magnético anômalo)...

$$a_e^{\text{exp}} = 0.001\,159\,652\,180\,73(28)$$

$$a_e^{\text{teoria}} = 0.00$$

Desafios e problemas em aberto

O Modelo Padrão explica quase tudo sobre a matéria que nos rodeia...

...e faz previsões extremamente precisas (ex. momento magnético anômalo)...

$$a_e^{\text{exp}} = 0.001\,159\,652\,180\,73(28)$$

$$a_e^{\text{teoria}} = 0.001$$

Desafios e problemas em aberto

O Modelo Padrão explica quase tudo sobre a matéria que nos rodeia...

...e faz previsões extremamente precisas (ex. momento magnético anômalo)...

$$a_e^{\text{exp}} = 0.001\,159\,652\,180\,73(28)$$

$$a_e^{\text{teoria}} = 0.001\,1$$

Desafios e problemas em aberto

O Modelo Padrão explica quase tudo sobre a matéria que nos rodeia...

...e faz previsões extremamente precisas (ex. momento magnético anômalo)...

$$a_e^{\text{exp}} = 0.001\,159\,652\,180\,73(28)$$

$$a_e^{\text{teoria}} = 0.001\,15$$

Desafios e problemas em aberto

O Modelo Padrão explica quase tudo sobre a matéria que nos rodeia...

...e faz previsões extremamente precisas (ex. momento magnético anômalo)...

$$a_e^{\text{exp}} = 0.001\,159\,652\,180\,73(28)$$

$$a_e^{\text{teoria}} = 0.001\,159$$

Desafios e problemas em aberto

O Modelo Padrão explica quase tudo sobre a matéria que nos rodeia...

...e faz previsões extremamente precisas (ex. momento magnético anômalo)...

$$a_e^{\text{exp}} = 0.001\,159\,652\,180\,73(28)$$

$$a_e^{\text{teoria}} = 0.001\,159\,6$$

Desafios e problemas em aberto

O Modelo Padrão explica quase tudo sobre a matéria que nos rodeia...

...e faz previsões extremamente precisas (ex. momento magnético anômalo)...

$$a_e^{\text{exp}} = 0.001\,159\,652\,180\,73(28)$$

$$a_e^{\text{teoria}} = 0.001\,159\,65$$

Desafios e problemas em aberto

O Modelo Padrão explica quase tudo sobre a matéria que nos rodeia...

...e faz previsões extremamente precisas (ex. momento magnético anômalo)...

$$a_e^{\text{exp}} = 0.001\,159\,652\,180\,73(28)$$

$$a_e^{\text{teoria}} = 0.001\,159\,652$$

Desafios e problemas em aberto

O Modelo Padrão explica quase tudo sobre a matéria que nos rodeia...

...e faz previsões extremamente precisas (ex. momento magnético anômalo)...

$$a_e^{\text{exp}} = 0.001\,159\,652\,180\,73(28)$$

$$a_e^{\text{teoria}} = 0.001\,159\,652\,1$$

Desafios e problemas em aberto

O Modelo Padrão explica quase tudo sobre a matéria que nos rodeia...

...e faz previsões extremamente precisas (ex. momento magnético anômalo)...

$$a_e^{\text{exp}} = 0.001\,159\,652\,180\,73(28)$$

$$a_e^{\text{teoria}} = 0.001\,159\,652\,18$$

Desafios e problemas em aberto

O Modelo Padrão explica quase tudo sobre a matéria que nos rodeia...

...e faz previsões extremamente precisas (ex. momento magnético anômalo)...

$$a_e^{\text{exp}} = 0.001\,159\,652\,180\,73(28)$$

$$a_e^{\text{teoria}} = 0.001\,159\,652\,181$$

Desafios e problemas em aberto

O Modelo Padrão explica quase tudo sobre a matéria que nos rodeia...

...e faz previsões extremamente precisas (ex. momento magnético anômalo)...

$$a_e^{\text{exp}} = 0.001\,159\,652\,180\,73(28)$$

$$a_e^{\text{teoria}} = 0.001\,159\,652\,181\,643(764)$$

É como dizer a distância Vitória – São Paulo com a precisão de um fio de cabelo!

Desafios e problemas em aberto

O Modelo Padrão explica quase tudo sobre a matéria que nos rodeia...

...e faz previsões extremamente precisas (ex. momento magnético anômalo)...

...mas **muitos problemas** permanecem em aberto.

- ▶ **O Problema da Hierarquia:** por quê a gravidade é tão mais fraca que as demais interações?

Desafios e problemas em aberto

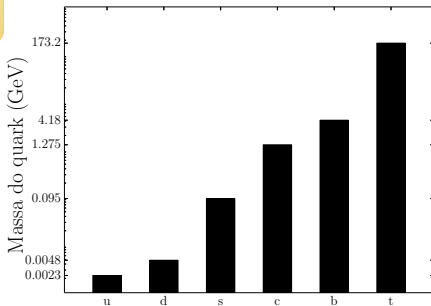
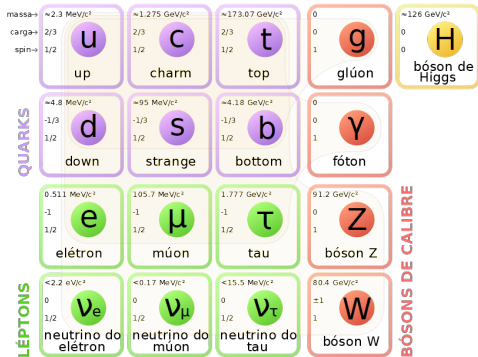
O Modelo Padrão explica quase tudo sobre a matéria que nos rodeia...

... e faz previsões extremamente precisas (ex. momento magnético anômalo)...

... mas **muitos problemas** permanecem em aberto.

- **O Problema da Hierarquia:** por quê a gravidade é tão mais fraca que as demais interações?

- **Por quê três gerações? Por quê massas hierarquizadas?**



Desafios e problemas em aberto

O Modelo Padrão explica quase tudo sobre a matéria que nos rodeia...

...e faz previsões extremamente precisas (ex. momento magnético anômalo)...

...mas **muitos problemas** permanecem em aberto.

- ▶ **O Problema da Hierarquia:** por quê a gravidade é tão mais fraca que as demais interações?
- ▶ **Por quê três gerações? Por quê massas hierarquizadas?**
- ▶ **Por quê há mais matéria do que anti-matéria no Universo?**

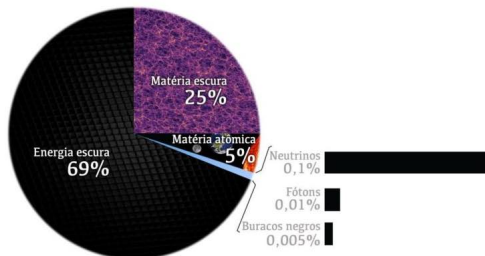
Desafios e problemas em aberto

O Modelo Padrão explica quase tudo sobre a matéria que nos rodeia...

... e faz previsões extremamente precisas (ex. momento magnético anômalo)...

... mas **muitos problemas** permanecem em aberto.

- ▶ **O Problema da Hierarquia:** por quê a gravidade é tão mais fraca que as demais interações?
- ▶ **Por quê três gerações? Por quê massas hierarquizadas?**
- ▶ **Por quê há mais matéria do que anti-matéria no Universo?**
- ▶ **Do que são constituídas a Matéria e Energia escuras?**



Desafios e problemas em aberto

O Modelo Padrão explica quase tudo sobre a matéria que nos rodeia...

...e faz previsões extremamente precisas (ex. momento magnético anômalo)...

...mas **muitos problemas** permanecem em aberto.

- ▶ **O Problema da Hierarquia:** por quê a gravidade é tão mais fraca que as demais interações?
- ▶ **Por quê três gerações? Por quê massas hierarquizadas?**
- ▶ **Por quê há mais matéria do que anti-matéria no Universo?**
- ▶ **Do que são constituídas a Matéria e Energia escuras?**
- ▶ **Gravitação Quântica?** (Teoria de Cordas?)

Desafios e problemas em aberto

O Modelo Padrão explica quase tudo sobre a matéria que nos rodeia...

...e faz previsões extremamente precisas (ex. momento magnético anômalo)...

...mas **muitos problemas** permanecem em aberto.

- ▶ **O Problema da Hierarquia:** por quê a gravidade é tão mais fraca que as demais interações?
- ▶ **Por quê três gerações? Por quê massas hierarquizadas?**
- ▶ **Por quê há mais matéria do que anti-matéria no Universo?**
- ▶ **Do que são constituídas a Matéria e Energia escuras?**
- ▶ **Gravitação Quântica?** (Teoria de Cordas?)

Ainda há muito a ser explorado sobre o Universo!

Muitas descobertas excitantes por vir!