

Física de Partículas: conceitos básicos e descobertas

Vitor Oguri

Departamento de Física Nuclear e Altas Energias
Instituto de Física Armando Dias Tavares
Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ)

Rio de Janeiro, 27 de março de 2020

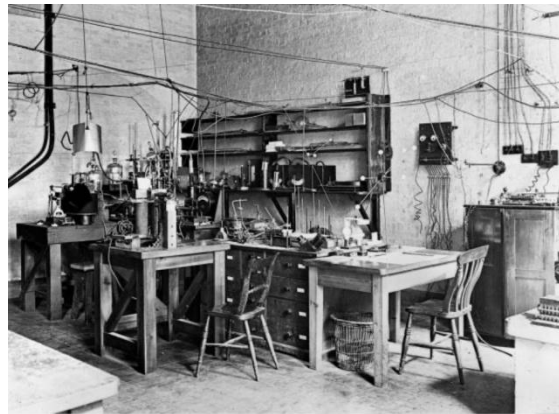
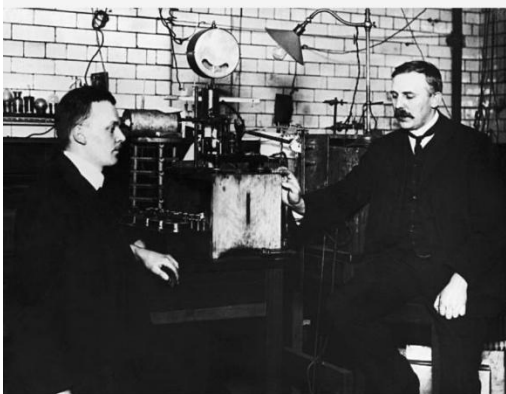
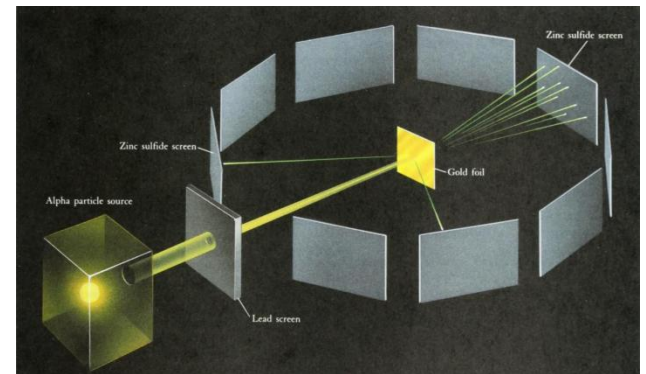
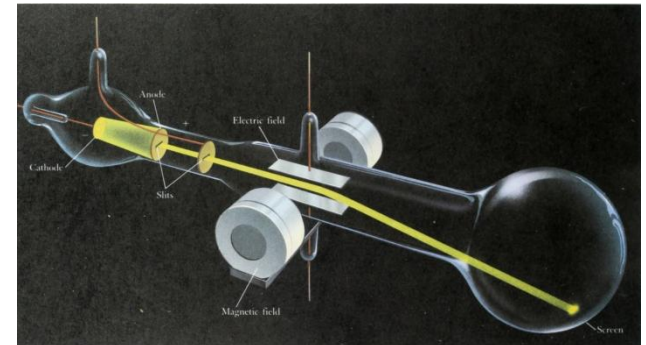
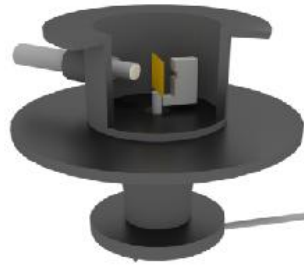
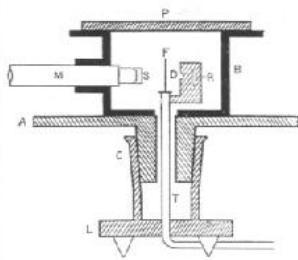
Conceitos básicos

- pequeno número de constituintes básicos (partículas elementares)
 - **férmions de $spin\ 1/2$:**
léptons (e^- , ν_e , μ^- , ν_μ , τ^- , ν_τ) **quarks (u , d , c , s , t , b)**
 - **bósons de $spin\ 1$, mediadores das interações eletromagnética (γ) , fraca ($W^\pm$, Z) e forte (glúons – g)**
- **interações fracas : reveladas pela instabilidade nuclear**
- **interações fortes : responsáveis pela estabilidade nuclear**

Cronologia das Partículas

❑ pré-quântica (1926)

- elétron (e^-) – Zeeman, Thomson (1897)
- fóton (γ) – Einstein (1905), Compton (1925)
- próton (p) – Rutherford (Cavendish – 1919)

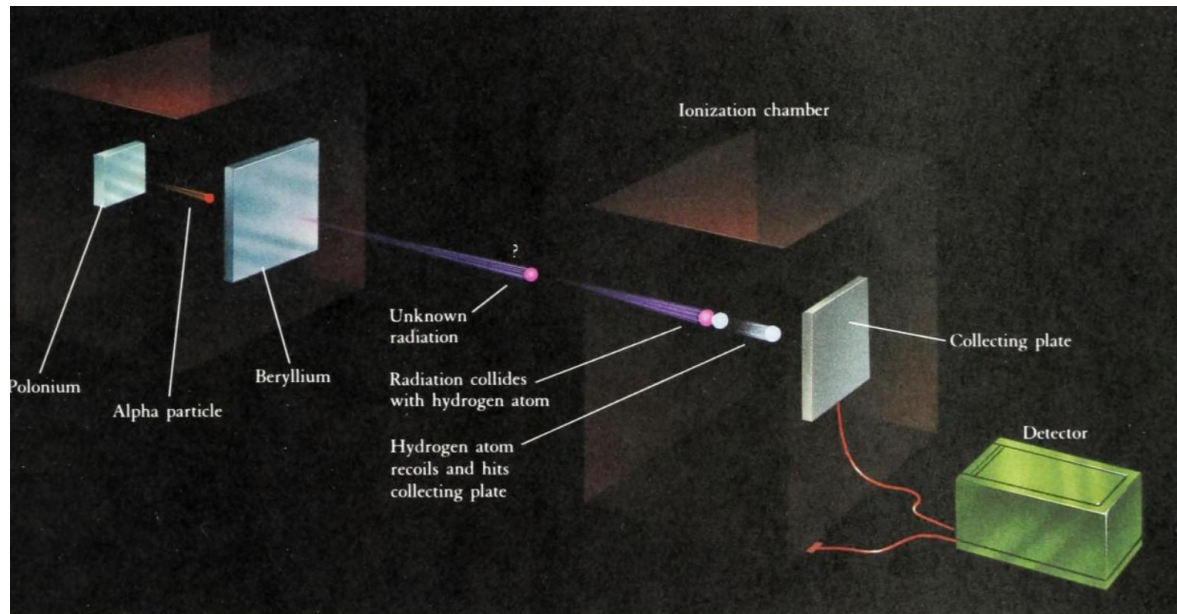


aparato de Geiger-Marsden
contagem visual das cintilações

Cronologia das Partículas

❑ pré-eletrodinâmica (QED – 1947)

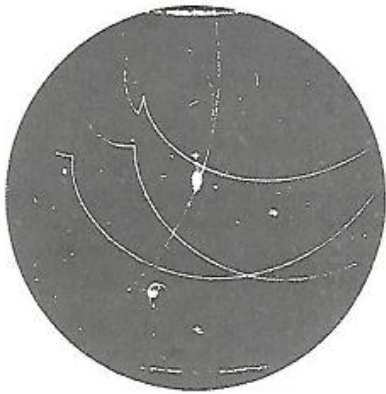
- neutrino (ν) – Pauli (1931) (decaimento beta: $n \rightarrow p + e + \nu$)
- nêutron (n) – Chadwick (Cavendish – 1932)



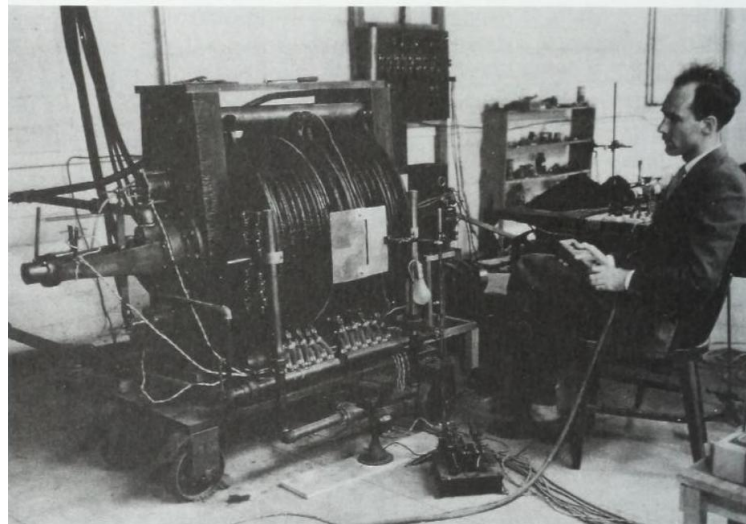
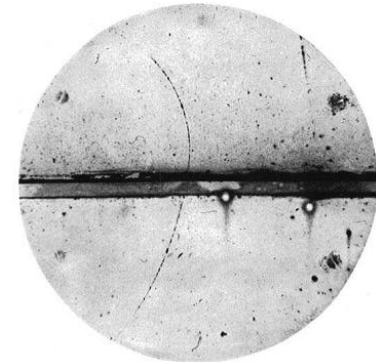
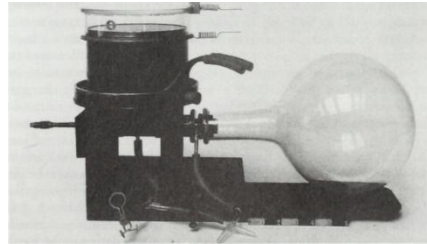
Cronologia das Partículas

□ pré-eletrodinâmica (QED – 1947) – raios cósmicos

- pósitron (e^+) Anderson (Caltech – 1932) (câmara de nuvens)
($m_{e^+} = m_{e^-}$ $q_{e^+} = |q_{e^-}| > 0$) (primeira antipartícula)
- múons (μ^-, μ^+)
Anderson/Neddermeyer (1936)



- mais penetrantes que elétrons
- menos penetrantes que prótons
($m_e < m_\mu < m_p$) $\Rightarrow m_\mu \sim 207 m_e$
- curvatura menor que dos elétrons
- curvatura maior que dos prótons
($(e/m)_p < (e/m)_e < (e/m)_\mu \Rightarrow q_{\mu^-} = q_e$)



Cronologia das Partículas

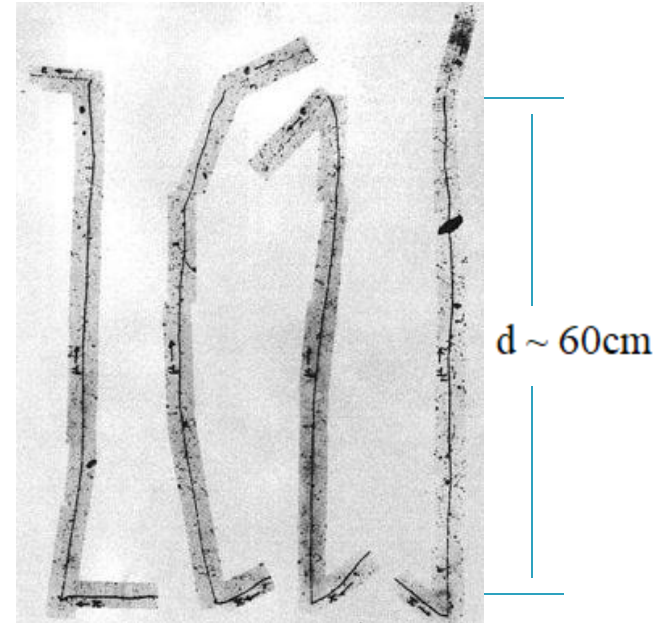
□ pré-eletrodinâmica (QED – 1947) – raios cósmicos

- píons (π^- , π^+) Lattes, Occhialini & Powell (Bristol) (emulsões fotográficas)

$$\begin{aligned}\pi^+ &\rightarrow \mu^+ + \nu_{\mu}^- \\ \pi^- &\rightarrow \mu^- + \nu_{\mu}^-\end{aligned}\quad \tau_{\pi^\pm} = 2.6 \times 10^{-8} \text{ s (meia vida)}$$

- energia inicial dos píons estimada pela distância de parada
- energia dos múons sempre a mesma (d) => decaimento de 2 corpos

- partículas estranhas (1950 – Caltech)



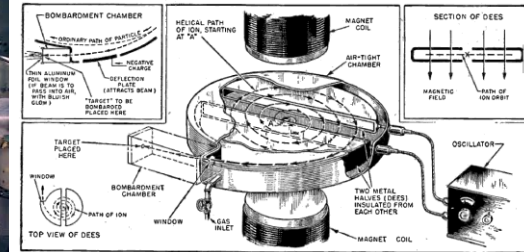
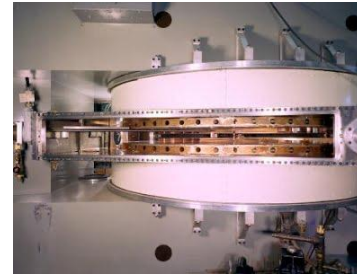
Cronologia das Partículas

❑ início da era dos aceleradores de alvo fixo

- **Cíclotron (Lawrence – Berkeley – 1931)**

- π^+ , π^- (Lattes/Garner – 1948)

- $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ $\tau_{\pi^0} = 0.8 \times 10^{-16} \text{ s}$ (1950)



- **Cosmotron (BNL – p@3.3GeV – 1953)**

- píons e partículas estranhas (K^0 , Λ^0)



- **Bevatron (Berkeley – p@6.2GeV – 1954)**

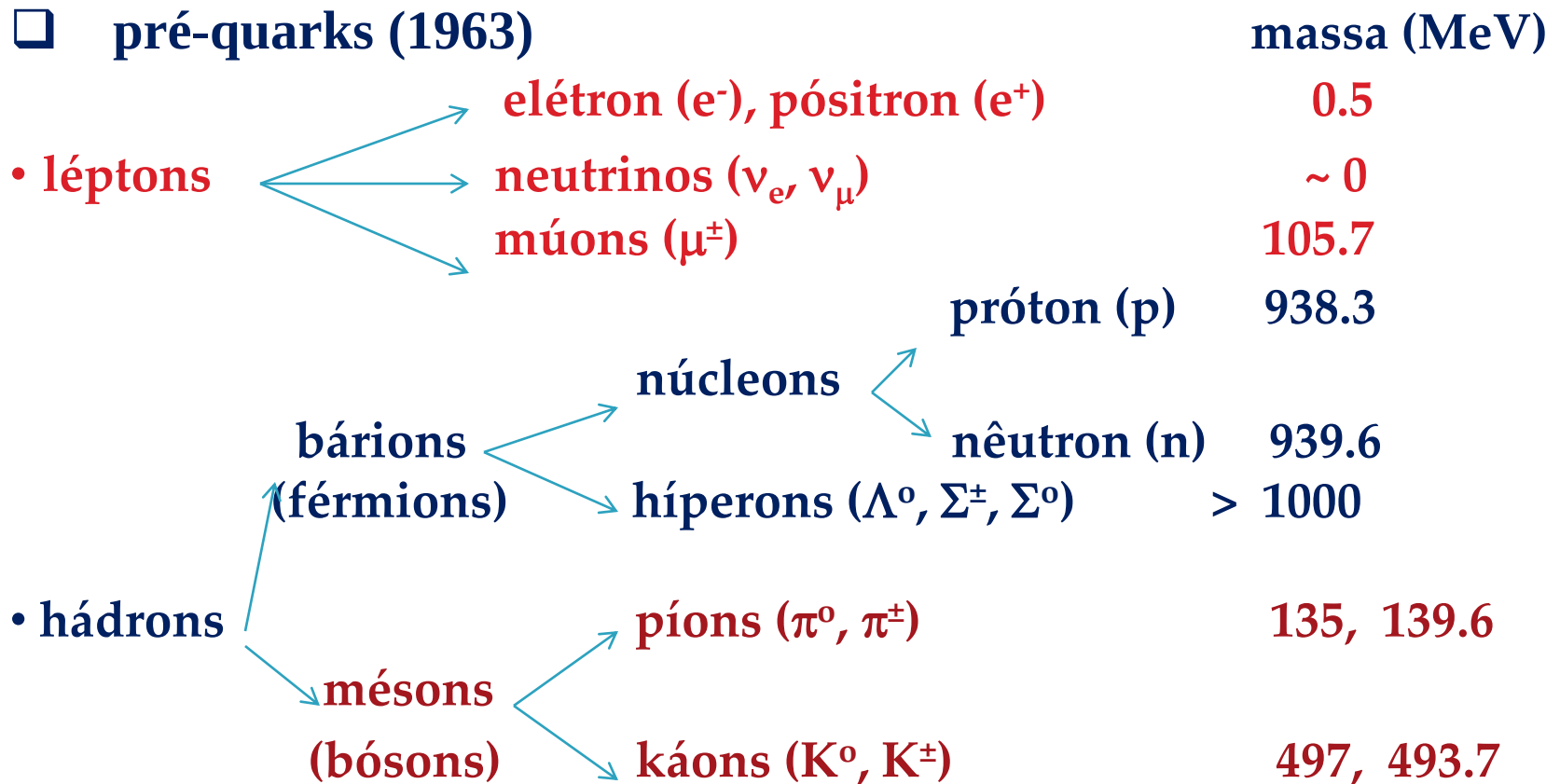
- antipróton ($\bar{p}$) (Segrè/Chamberlain-1955)

- antinêutron ($\bar{n}$) (Cork et. al.-1956)

- (Δ , ρ^0)



Cronologia das Partículas



carga elétrica (Q) dos léptons e hádrons = $\pm$ múltiplo inteiro da carga elementar (e)

Cronologia das Partículas

□ últimos 50 anos	massa (GeV)
• quark c – (J/Ψ) Ting (Brookhaven), Richter (SLAC), 1974	1.5
• lépton τ Perl (SLAC), 1975	1.78
• quark b – (Y) Lederman (Fermilab), 1977	5.0
• bósons $W^\pm, Z$ UA1 (CERN), 1983	
• quark t – CDF/D0 (Fermilab), 1995	173
• neutrino do t – DONUT (Fermilab), 2000	
• bóson de Higgs (H) – ATLAS/CMS (CERN), 2012	125

Descobertas em altas energias

Experimentos de alvo fixo

- PS – CERN, p@28 GeV (1959)
 - correntes neutras (Gargamelle – 1973)
- AGS – BNL, p@33 GeV (1960)
 - ν_μ (Lederman/Schwartz/Steinberg – 1962)
 - CP violation (Cronin/Fitch – 1964)
 - J/Ψ (quark c) (Ting – 1974)
- LINAC – SLAC, e^- @20 GeV (1966)
 - DIS (quarks u,d) (Friedman/Kendall/Taylor – 1969)



- Fermilab, p@400 GeV (1970)
 - Y (quark b) (Lederman – 1977)

Descobertas em altas energias

Experimentos em anéis colisores

- SPEAR – SLAC, e^+e^- @3.7 GeV (1972)
 - J/Ψ (Richter – 1974)
 - τ (Perl – 1975)
- Petra – DESY, e^+e^- @40 GeV (1978)
 - jatos de glúons (1979)
- ISR – CERN, pp @60 GeV (1971)
 - stochastic cooling
- SPS – CERN, $p\bar{p}$ @540-630 GeV (1981)
 - $W^\pm$, Z (Rubia et. al. – UA1 – 1983)
- LEP I, II – CERN, e^+e^- @91, 210 GeV (1989, 1996)
 - medidas precisas dos bósons $W^\pm$, Z
 - limite de massa do bóson de Higgs

Fermilab

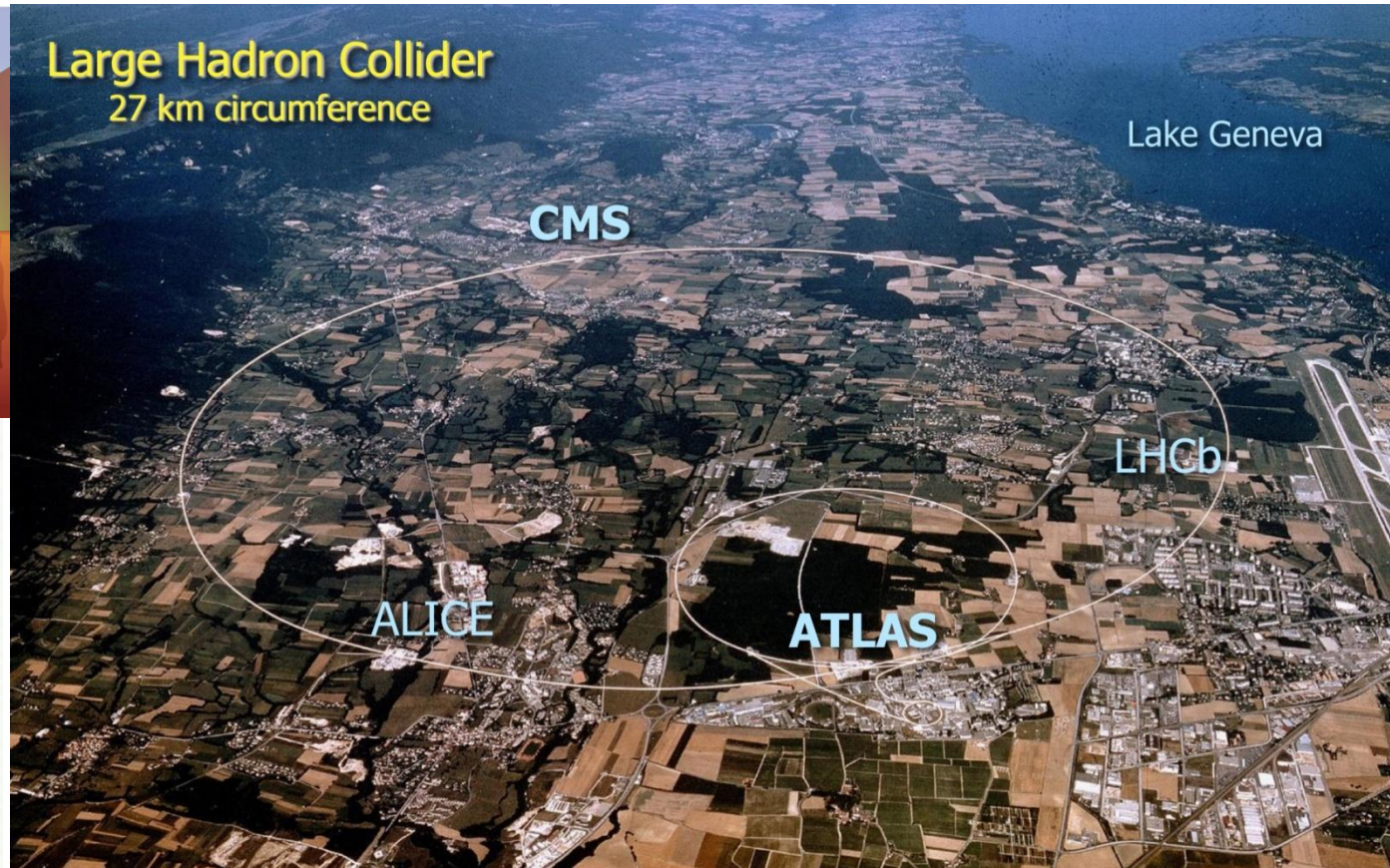
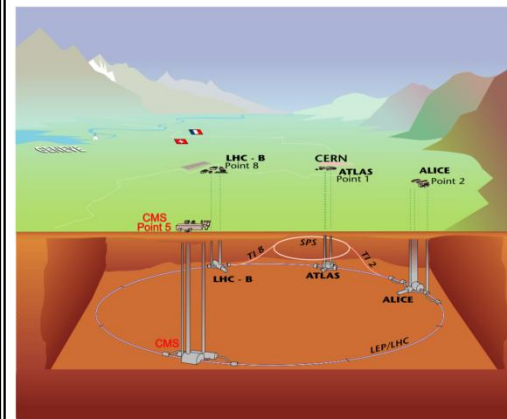
Tevatron I, II – $p\bar{p}$ @1.8, 2 TeV (1992, 2001)
- quark top (t) (CDF/DZERO – 1995)



comprimento ~6 km

CERN

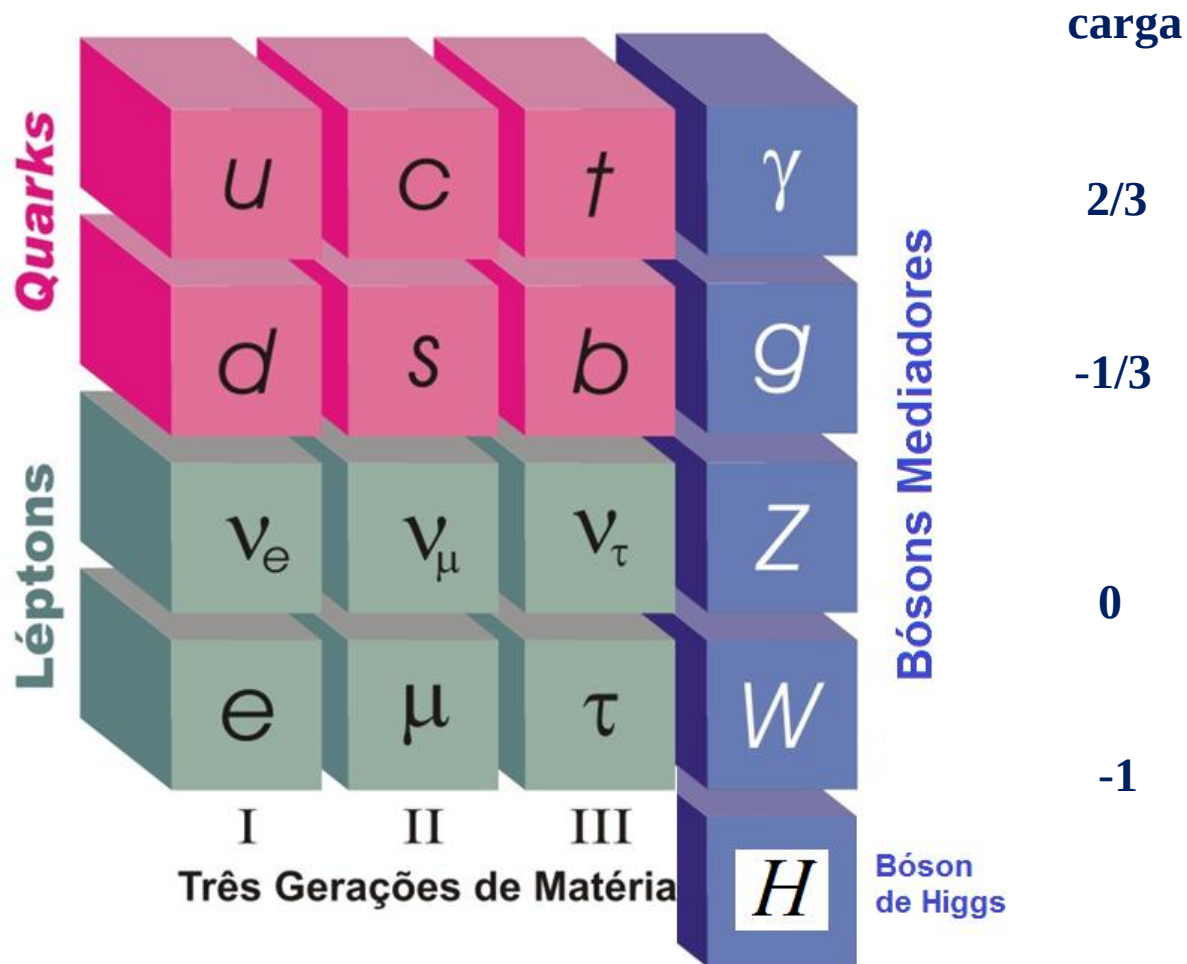
LHC – CERN, pp@7 TeV (2011) , pp@13 TeV (2015)
- bóson de Higgs (H) (ATLAS/CMS – 2012)



Quarks

- Os **quarks**, elementos constituintes dos hádrons e diretamente envolvidos nas interações fortes, foram postulados por Murray Gell-Mann e G. Zweig, nos anos de 1960, segundo **argumentos de simetria**.
- Do ponto de vista dinâmico, começaram a emergir dos experimentos de R. Hofstadter no centro de aceleradores de elétrons da Universidade de Stanford (1950), ao estabelecer que **o próton não é uma partícula elementar**.
- Finalmente, foram estabelecidos no SLAC, em 1969, nos experimentos de espalhamento profundamente inelástico elétron-próton, liderados por J.I. Friedman/H.W. Kendall (MIT) e R.E. Taylor (SLAC), e interpretados por J.D. Bjorken e R. Feynman (**modelo a partons**).

Partículas elementares do Modelo Padrão



Leis de conservação e números quânticos

- As leis de conservação do **momentum**, da **energia** e do **momentum angular** estão associadas às simetrias ou às invariâncias de um sistema de partículas com relação às operações de translações espaço-temporais e de rotações.
- As interações fundamentais entre as partículas estão sujeitas também a outros princípios de invariância, expressos pela conservação de algumas propriedades caracterizadas pelos chamados **números quânticos**:
 - a **carga elétrica** (Q), a **estranheza** (S), a **paridade** (P), o **isospin** (I),
 - a **conjugação de carga** (C), os **números leptônico** (L) e **bariônico** (B).

Números quânticos (aditivos)

- **Carga elétrica (Q) (conservada em todos os processos)**

a toda partícula de carga Q corresponde uma antipartícula de carga -Q

- **Número bariônico (B) (conservado em todos os processos)**

$p \rightarrow e^+ + \pi^0$ (não observado)

$B = 1$ (número bariônico dos bárions)

$B = -1$ (número bariônico dos antibárions)

$B = 1/3$ (quarks) $B = -1/3$ (antiquarks)

- **Número leptônico (L) (conservado em todos os processos)**

$e^- + e^+ \rightarrow \pi^- + \pi^+$ (não observado)

$\mu^- \rightarrow e^- + \gamma$ (não observado)

$L_e = 1 (e^-, \nu_e)$	$L_\mu = 1 (\mu^-, \nu_\mu)$	$L_\tau = 1 (\tau^-, \nu_\tau)$
$L_e = -1 (e^+, \bar{\nu}_e)$	$L_\mu = -1 (\mu^+, \bar{\nu}_\mu)$	$L_\tau = -1 (\tau^+, \bar{\nu}_\tau)$

Números quânticos (aditivos)

- **Estranheza (S)** Nishijima/Gell-Mann (1953)
(conservada apenas nas interações fortes e eletromagnéticas)

- méson K^0 e bárion Λ^0
(Rocheste/Butler – Manchester)
(1947 - raios cósmicos - câmara de Wilson)

- partículas neutras produzidas em pares
por interações fortes:



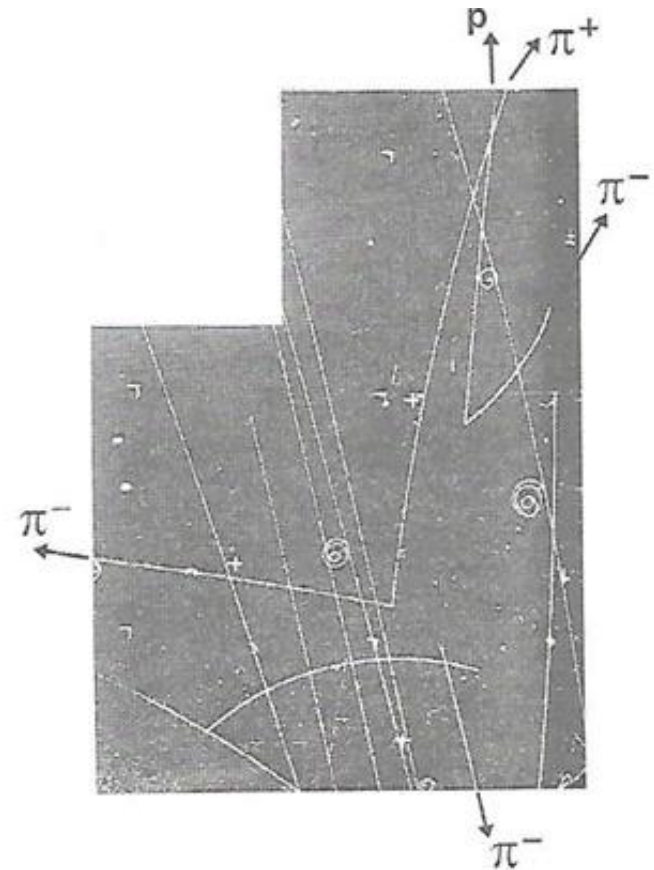
decaem por interações fracas (10^{-10} s):



$$S(K^0) = 1$$

$$S(\Lambda^0) = -1$$

- **Hipercarga (Y)** : $Y = B + S$



Câmara de bolhas do
Cosmotron (BNL-1953)

Paridade

Paridade (reflexão especular)

(polares)	$\vec{r}, \vec{p}, \vec{J}, \vec{A}, \vec{E}$	$\xrightarrow{\quad}$	$\xleftarrow{\quad}$	$-\vec{r}, -\vec{p}, -\vec{J}, -\vec{A}, -\vec{E}$	$(-)$
(axiais)	$\vec{\omega}, \vec{L}, \vec{S}, \vec{B}$	$\xrightarrow{\quad}$	$\xrightarrow{\quad}$	$\vec{\omega}, \vec{L}, \vec{S}, \vec{B}$	$(+)$

helicidade

- positiva (+) $\vec{S} \cdot \vec{p} > 0$
- negativa (-) $\vec{S} \cdot \vec{p} < 0$

Números quânticos (multiplicativos)

- Paridade (P)** de um estado com relação a reflexões especulares
(conservada apenas nas interações fortes e eletromagnéticas)

- 1 partícula: $P(\vec{r}) = -\vec{r}, \quad r \rightarrow r,$
 $\theta \rightarrow \pi - \theta,$
 $\phi \rightarrow \pi + \phi.$

$$Y_l^m(\theta, \phi) = \sqrt{\frac{(2l+1)(l-m)!}{4\pi(l+m)!}} P_l^m(\cos\theta) e^{im\phi}$$

$$P_l^m(\cos\theta) \rightarrow P_l^m(-\cos\theta) = (-1)^{l-m} P_l^m(\cos\theta)$$

$$e^{im\phi} \rightarrow (-1)^m e^{im\phi}$$

$$Y_l^m \rightarrow (-1)^{l-m} (-1)^m Y_l^m \rightarrow (-1)^l Y_l^m$$

$P^2 = 1$ (idempotente) $\rightarrow$ autovalores = +1 ou -1

$$P\psi_{nlm} = (-1)^l \psi_{nlm}$$

n	l	m	$\psi_{nlm}(r, \theta, \varphi)$
1	0	0	e^{-r/a_B}
2	0	0	$\left(1 - \frac{1}{2} \frac{r}{a_B}\right) e^{-r/2a_B}$
	1	0	$re^{-r/2a_B} \cos\theta$
		± 1	$re^{-r/2a_B} \sin\theta e^{\pm i\varphi}$
3	0	0	$\left[1 - \frac{2}{3} \frac{r}{a_B} \frac{2}{27} \left(\frac{r}{a_B}\right)^2\right] e^{-r/3a_B}$
	1	0	$\left(1 - \frac{1}{6} \frac{r}{a_B}\right) re^{-r/3a_B} \cos\theta$
		± 1	$\left(1 - \frac{1}{6} \frac{r}{a_B}\right) re^{-r/3a_B} \sin\theta e^{\pm i\varphi}$
	2	0	$r^2 e^{-r/3a_B} (3 \cos^2\theta - 1)$
		± 1	$r^2 e^{-r/3a_B} \sin\theta \cos\theta e^{\pm i\varphi}$
		± 2	$r^2 e^{-r/3a_B} \sin^2\theta e^{\pm i2\varphi}$

Números quânticos (multiplicativos)

- paridade de 2 partículas:

$$Y_{l_1}^{m_1}(\theta_1, \phi_1) Y_{l_2}^{m_2}(\theta_2, \phi_2) \rightarrow (-1)^{l_1+l_2} Y_{l_1}^{m_1}(\theta_1, \phi_1) Y_{l_2}^{m_2}(\theta_2, \phi_2)$$

alteração do número e tipo de partículas $\rightarrow$ paridade intrínseca (η)

- **Paridade total:** $P_{12} = (-1)^l \eta_1 \eta_2$ ($l = l_1 + l_2$)

Interação fraca muda sabor das partículas $\rightarrow$ não conservação da paridade

$$\vec{A} > - \vec{A} \text{ (potencial vetorial)} \rightarrow \eta_\gamma = -1 \text{ (fóton)}$$

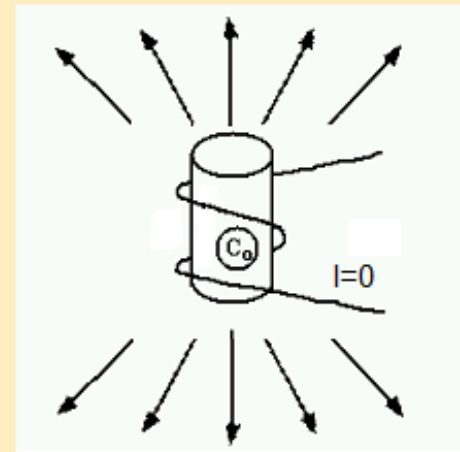
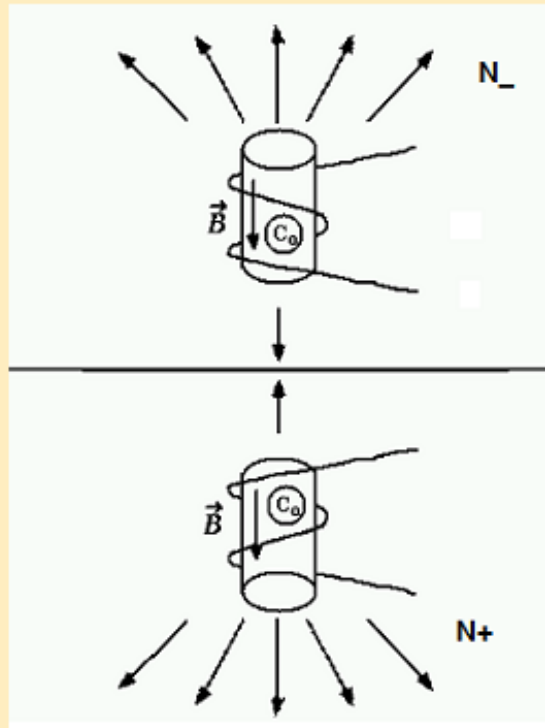
$$\begin{aligned} \eta_{\text{próton, nêutron}} &= 1, & \eta_{\text{férmion}} &= - \eta_{\text{antiférmion}} & \rightarrow & \eta_{\text{quark}} = 1, \eta_{\text{antiquark}} = -1 \\ \eta_{\text{píons, káons}} &= -1, & \eta_{\text{bóson}} &= - \eta_{\text{antibóson}} \end{aligned}$$

$$P_{\text{bárion}=1} = 1 \quad (l=0)$$

$$P_{\text{méson}=1} = -1 \quad (l=0)$$

Violação da paridade (Lee/Yang -1956)

Experimento de Wu et al. (1957)



resultados do experimento:

- $N_- \gg N_+$
- elétrons com helicidade (-) definida

Helicidade e neutrino do múon

Experimento de Goldhaber et al. (1957)

- neutrinos têm helicidade negativa
- antineutrinos têm helicidade positiva

Experimento de Lederman et al. (1963)

- neutrinos do múon e do elétron são distintos (número leptônico)

Números quânticos (multiplicativos)

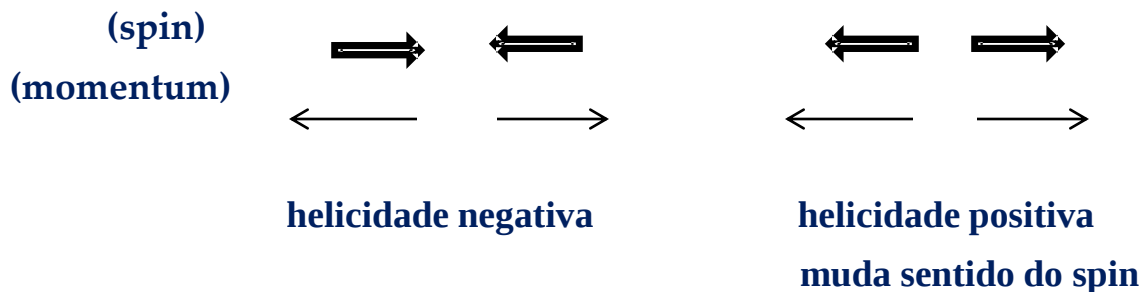
- **Conjugação de carga (C)**
(conservada apenas nas interações fortes e eletromagnéticas)

$$C | Q, B, L_{e\mu\tau}, S \rangle = | -Q, -B, -L_{e\mu\tau}, -S \rangle \quad (\text{momentum e spin não alterados})$$

$C^2 = 1$ (idempotente) $\rightarrow$ autovalores = +1 ou -1

- Interação forte: $\pi^- + p \rightarrow \Lambda^0 + K^0 \Rightarrow \pi^+ + \bar{p} \Rightarrow \Lambda^0 + \bar{K}^0$

- Interação fraca: $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \Rightarrow \pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$



Números quânticos (multiplicativos)

- **Conjugação de carga (C)**

- Apenas estados de mésons neutros não estranhos ($Q = B = L_{e\mu\tau} = S = 0$) são autoestados de C com autovalores +1 (π^0, η^0) e -1 ($\gamma, \rho^0, J/\Psi$)

- troca de sinal da carga elétrica $\rightarrow$ troca de sinal do potencial vetorial
 $C_\gamma = -1$

- $\pi^0, \eta^0 \rightarrow 2\gamma \Rightarrow C_{\pi^0, \eta^0} = C_\gamma C_\gamma = (-1)(-1) = 1$

- $\rho^0 \rightarrow \pi^0 + \gamma \Rightarrow C_{\rho^0} = C_{\pi^0} C_\gamma = (1)(-1) = -1$

Isospin

- **Isospin (I)**

- Uma vez que prótons (p) e nêutrons (n) possuem o mesmo spin ($J = \frac{1}{2}$), têm massas bem próximas e as interações fortes nos núcleos não dependem de suas cargas elétricas, sendo de mesma intensidade para interações próton-próton, próton-nêutron ou nêutron-nêutron; Heisenberg (1932) considera que ambos seriam estados, ou manifestações, de uma partícula, o núcleon (N).
- Prótons (p) e nêutrons (n) só seriam diferenciados pelas interações eletromagnéticas (sensíveis à carga elétrica) ou pelas interações fracas (decaimento beta).
- De modo análogo ao spin $J = \frac{1}{2}$, define-se um operador isospin $I = \frac{1}{2}$, tal que o próton e o nêutron seriam os dois autoestados (dubletos) de I^2 e da componente I_3 (autovalores $\pm \frac{1}{2}$).

	I_3	dublete	carga (Q)	massa (MeV)
núcleon ($I = \frac{1}{2}$)	+1/2	$p = 1/2, 1/2\rangle$	1	938,3
	-1/2	$n = 1/2, -1/2\rangle$	0	939,5

Isospin

- **Isospin (I)**
 - As interações fortes não distinguem prótons e nêutrons, ou seja, os dubletos; assim, **o isospin é conservado nas interações fortes.**
 - Diz-se que **as interações fortes exibem simetria de isospin.**
 - As interações fracas e eletromagnéticas não exibem a simetria de isospin, mas em baixas energias as interações fracas são bem menos intensas ($\sim 0,001\%$) do que as interações eletromagnéticas, e essas, por sua vez, bem menos intensas ($\sim 1\%$) do que as interações fortes; diz-se, então, que a simetria de **isospin é uma simetria aproximada** da natureza.

Isospin

- **Isospin dos píons**
 - De modo análogo aos núcleons, devido à proximidade de suas massas, a simetria de isospin foi estendida aos 3 píons (π^+ , π^0 , π^-).
 - Os píons foram associados a um tripleto de isospin $I=1$, que correspondem aos autovalores (1, 0, -1) de I_3 .

píon ($I = 1$)	I_3	tripleto	carga (Q)	massa (MeV)
	+1	$\pi^+ = 1, +1\rangle$	1	139,6
	0	$\pi^0 = 1, 0\rangle$	0	135
	-1	$\pi^- = 1, -1\rangle$	-1	139,6

Multipletos de isospin (Gell-Mann, Zweig – 1964)

- **Núcleons e píons,**

dubleto ($I = 1/2$) de núcleons (p, n) e do tripleto ($I = 1$) dos píons (π^+, π^0, π^-)

- **Os outros hádrons foram também classificados por Gell-Mann e Ne'eman como multipletos de isospin:**

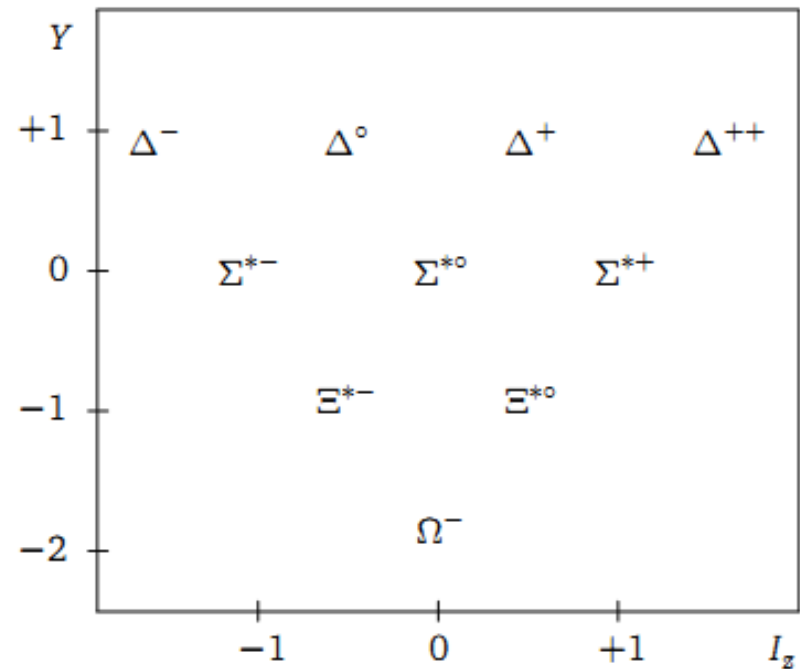
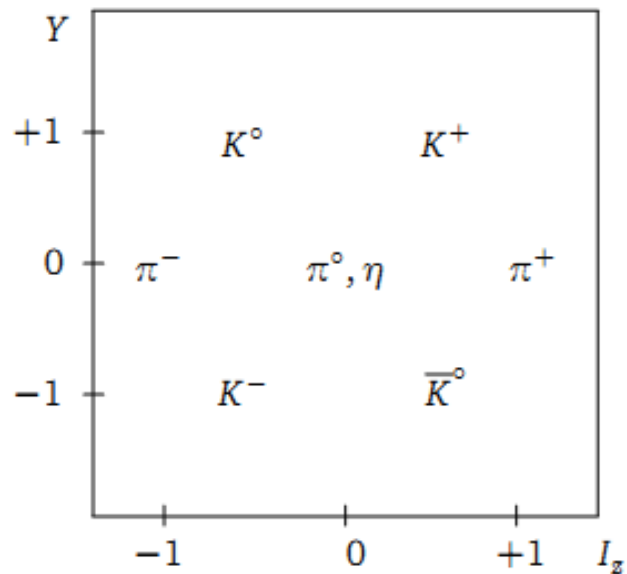
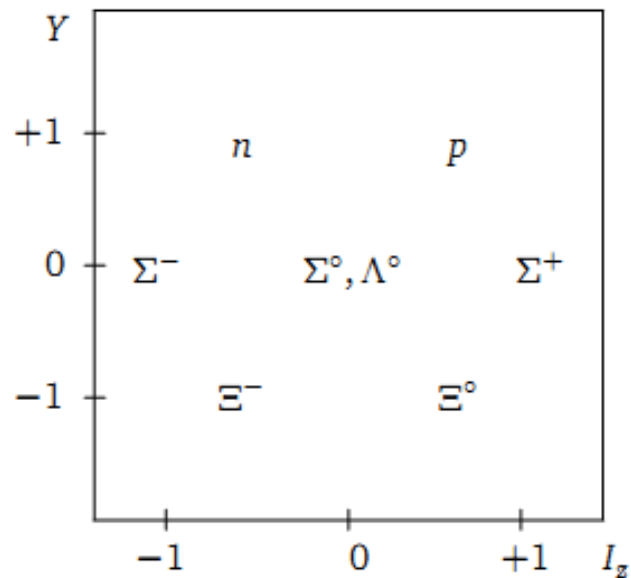
quadrupletto ($I = 3/2$): ($\Delta^{++}, \Delta^+, \Delta^0, \Delta^-$)

tripletos ($I = 1$): ($\Sigma^+, \Sigma^0, \Sigma^-$), (ρ^+, ρ^0, ρ^-)

dubleto ($I = 1/2$): (Ξ^0, Ξ^-), (K^+, K^0)

singlete ($I = 0$): (Λ^0)

O caminho óctuplo de Gell-Mann



Composição de autoestados de isospin

- De modo análogo à composição de spins, a partir da composição dos autoestados

$$|1/2, +1/2\rangle_1 \text{ e } |1/2, -1/2\rangle_1 \quad \text{associados a um isospin } I_1 = 1/2$$

$$|1/2, +1/2\rangle_2 \text{ e } |1/2, -1/2\rangle_2 \quad \text{associados a um isospin } I_2 = 1/2$$

pode-se obter os seguintes estados compostos

$$\text{triplete } \left\{ \begin{array}{l} |1, +1\rangle = |1/2, +1/2\rangle_1 |1/2, +1/2\rangle_2 \\ |1, 0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} [|1/2, +1/2\rangle_1 |1/2, -1/2\rangle_2 + |1/2, -1/2\rangle_1 |1/2, +1/2\rangle_2] \\ |1, -1\rangle = |1/2, -1/2\rangle_1 |1/2, -1/2\rangle_2 \end{array} \right. \quad (I=1)$$

$$\text{singlete } \left\{ |0, 0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} [|1/2, +1/2\rangle_1 |1/2, -1/2\rangle_2 - |1/2, -1/2\rangle_1 |1/2, +1/2\rangle_2] \right. \quad (I=0)$$

- Simbolicamente: $1/2 \otimes 1/2 = 1 \oplus 0$ (isospin)

$$2 \otimes 2 = 3 \oplus 1 \quad (\text{dimensão})$$

Os quarks u (up), d (down), s (strange)

- Baseado no êxito da predição dos resultados de alguns experimentos de espalhamentos píon-núcleon, a partir da composição de dois isospins $\frac{1}{2}$, ou seja, o fato de que os estados associados a uma partícula podem ser obtidos a partir de estados associados a outras partículas, Sakata (1956) tem a ideia de que deveria haver partículas elementares que constituiriam as outras partículas.
- Para Sakata, essas partículas elementares seriam os prótons, os nêutrons e os lambdas, ou seja, o tripleto (p, n, Λ^0) e o tripleto conjugado ($\bar{p}, \bar{n}, \bar{\Lambda}^0$).
- Os mésons seriam constituídos por duas partículas (uma partícula e uma antipartícula), e os demais bárions por três partículas (2 partículas e 1 antipartícula, ou 1 partícula e 2 antipartículas).
- O caminho óctuplo só foi esclarecido quando Gell-Mann e Zweig (1964) retomam a ideia de Sakata, propondo que os constituintes elementares dos hádrons seriam três férmions de spin $\frac{1}{2}$, genericamente denominados quarks u (up), d (down) e s (strange), e os respectivos antiquarks $\bar{u}$, $\bar{d}$ e $\bar{s}$.

Composição dos hádrons

- De modo análogo ao modelo de Sakata, os bárions seriam obtidos pela combinação de 3 quarks, e os mésons pela combinação de um quark e um antiquark, obedecendo às seguintes composições:

$$3 \otimes \bar{3} = 8 \oplus 1 \quad (\text{mésons})$$

$$3 \otimes 3 \otimes 3 = 10 \oplus 8 \oplus 8 \oplus 1 \quad (\text{bárions})$$

- De acordo com as propriedades estabelecidas para os hádrons, os quarks estariam permanentemente confinados nos hádrons, e teriam as seguintes propriedades:

	<i>quarks</i>			<i>antiquarks</i>		
	<i>u</i>	<i>d</i>	<i>s</i>	$\bar{u}$	$\bar{d}$	$\bar{s}$
carga (<i>Q</i>)	+ 2/3	-1/3	-1/3	-2/3	+1/3	+1/3
nº bariônico (<i>B</i>)	+ 1/3	+ 1/3	+ 1/3	-1/3	-1/3	-1/3
estranheza (<i>S</i>)	0	0	-1	0	0	+1
<i>isospin</i> (<i>I</i> ₃)	+ 1/2	-1/2	0	-1/2	+ 1/2	0
hipercarga (<i>Y</i>)	+ 1/3	+1/3	-2/3	-1/3	-1/3	+ 2/3

Composição dos hádrons

- quarks e antiquarks (spin $\frac{1}{2}$)

u,c,t (Q=2/3) d,s,b (Q=-1/3) $\bar{u},\bar{c},\bar{t}$ (Q=-2/3) $\bar{d},\bar{s},\bar{b}$ (Q=1/3)

- mésons** (pares de quark-antiquark) (Q=1,0,-1)

π^+ (u $\bar{d}$) π^0 (u $\bar{u}$, d $\bar{d}$) π^- (u $\bar{d}$)
 K^+ (u $\bar{s}$) K^0 (d $\bar{s}$) K^- ($\bar{u}s$) $\bar{K}^0$ ($\bar{d}s$)

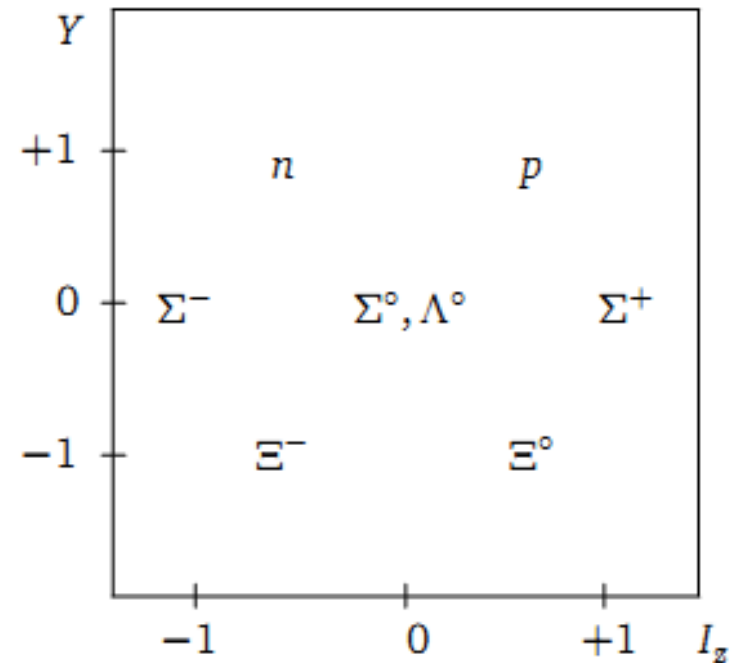
- bárions** (trinca de quarks ou antiquarks) (Q= inteiro)

p(uud) $\bar{p}(\bar{u}\bar{u}\bar{d})$
 n(udd) $\bar{n}(\bar{u}\bar{d}\bar{d})$
 Λ^0 (uds) $\bar{\Lambda}^0(\bar{u}\bar{d}\bar{s})$
 Σ^+ (uus) Σ^0 (uds) Σ^- (dds)

$S(K^0) = 1, S(\Lambda^0) = -1 \rightarrow S(s) = -1, S(\bar{s}) = 1$

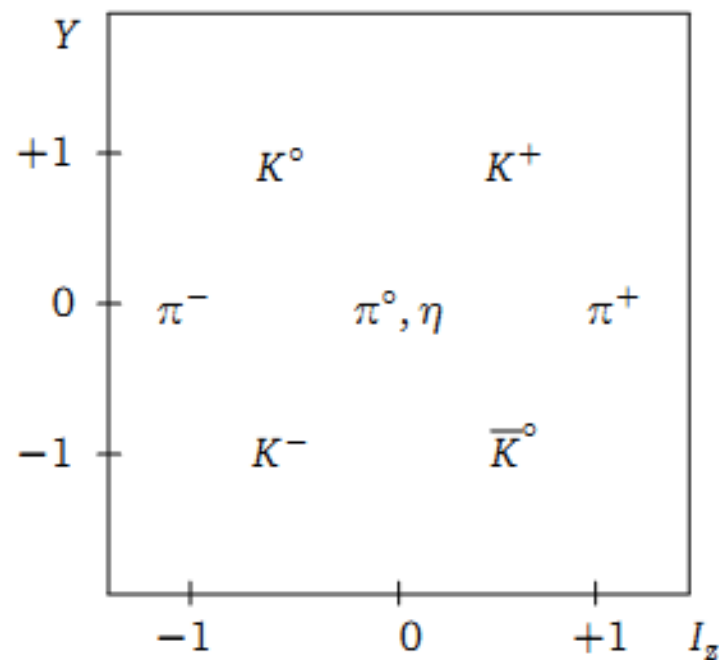
Octeto dos bárions

octeto dos bárions	I	S
$p(uud) \quad n(udd)$	$1/2$	0
$\Sigma^+(uus) \quad \Sigma^0(uds) \quad \Sigma^-(dds)$	1	-1
$\Xi^0(uss) \quad \Xi^-(dss)$	$1/2$	-2
$\Lambda^0(uds)$	0	-1



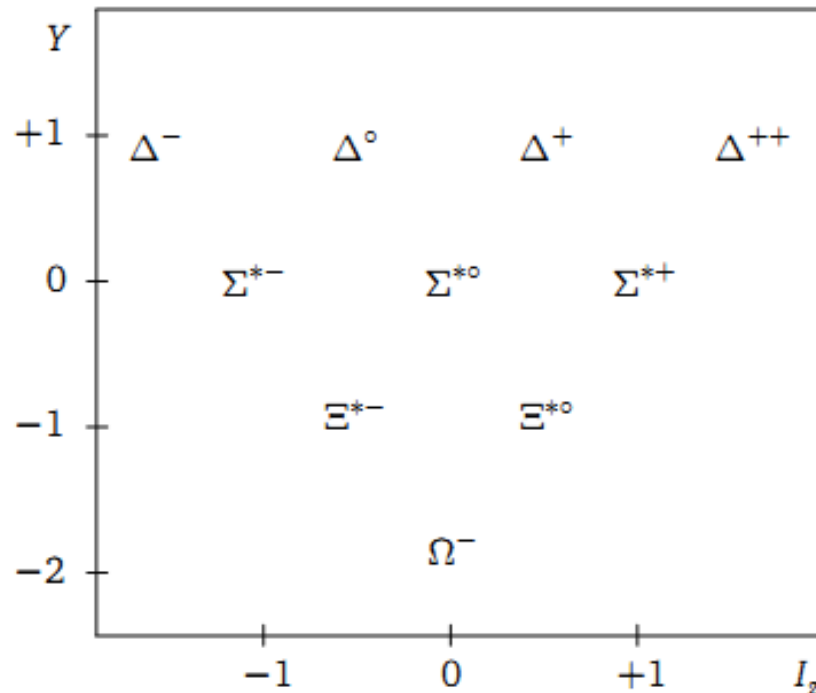
Noneto dos mésons

noneto dos mésons	I	S
$K^+(u\bar{s}) \quad K^0(d\bar{s})$	$1/2$	$+1$
$\pi^+(u\bar{d}) \quad \pi^0(u\bar{u}, d\bar{d}) \quad \pi^-(\bar{u}d)$	1	0
$\bar{K}^0(\bar{d}s) \quad K^-(\bar{d}s)$	$1/2$	-1
$\eta(u\bar{u}, d\bar{d}, s\bar{s})$	0	0
$\eta'(u\bar{u}, d\bar{d}, s\bar{s})$	0	0



Decuplete dos bárions

decuplete dos bárions	I	S
$\Delta^{++}(uuu)$ $\Delta^+(uud)$ $\Delta^0(udd)$ $\Delta^-(ddd)$	$3/2$	0
$\Sigma^{*+}(uus)$ $\Sigma^{*0}(uds)$ $\Sigma^{*-}(dds)$	1	-1
$\Xi^{*0}(uss)$ $\Xi^{*-}(dss)$	$1/2$	-2
$\Omega^-(sss)$	0	-3



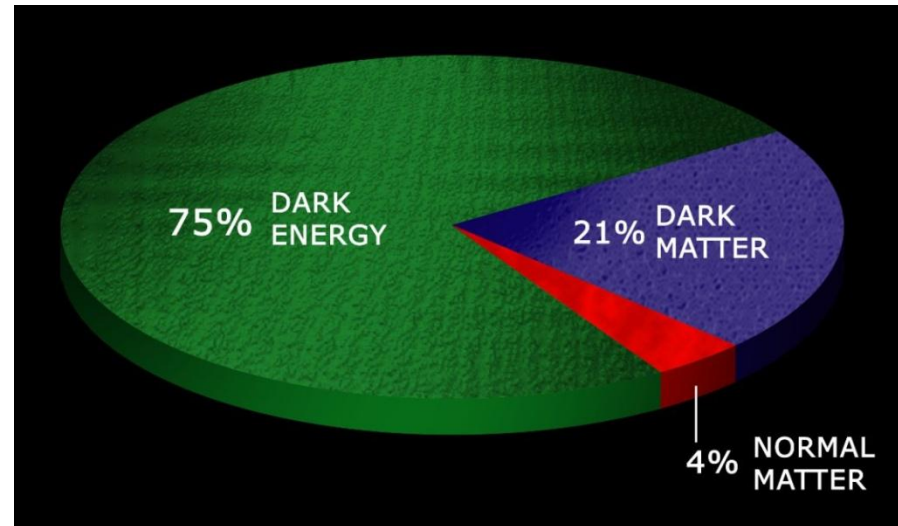
Cronologia dos experimentos, descobertas, modelos, teorias, detectores e aceleradores

Experimentos	Hipóteses, modelos e teorias	Detectores e aceleradores
nêutron (n) (Chadwick, Cavendish - 1932)	equação de Dirac (1928)	câmara de nuvens (Wilson - 1912)
pósitron (e ⁺) (Anderson, Caltech - 1932)	antipartícula (Dirac - 1930) e neutrino (Pauli - 1930)	contador Geiger (1928)
múons (μ [±]) (Anderson/Neddermeyer, Caltech - 1939)	isospin (Heisenberg - 1932)	Ciclotron (80keV) (Lawrence, Berkeley - 1930)
píons (π [±]) (Lattes/Occhialini/Powell, Bristol - 1947)	beta decay (Fermi - 1934)	câmara de bolhas (Glaser, Berkeley - 1952)
(K ⁰ , Λ ⁰) (Rochester/Butler, Manchester - 1947)	píons (Yukawa - 1935)	Cosmotron (BNL) (3.3 GeV - 1953)
μ _e anômalo (Kusch/Foley, Columbia - 1947)	QED (Feynman, Tomonaga, Schwinger - 1947)	Bevatron (Berkeley) (6.2 GeV - 1954)
ressonância (Δ) (Fermi <i>et al</i> , Chicago - 1952)	estranheza (Gell-Mann, Nishijima - 1953)	SLAC (e@180 MeV - 1955)
antipróton (Chamberlain <i>et al</i> , Berkeley - 1955)		spark chamber (Conversi, CERN - 1955)
antinêutron (Cork <i>et al</i> , Berkeley - 1956)		PS/CERN (p@28 GeV - 1959)
raio do próton (Hofstadter <i>et al</i> , SLAC - 1956)		AGS/BNL (p@33 GeV - 1960)
violação da paridade (Wu <i>et al</i> , NBS - 1957)	violação da paridade (Lee, Yang - 1956)	
helicidade do neutrino (Goldhaber <i>et al</i> , BNL - 1957)		SLAC (e ⁻ ou e ⁺ @50 GeV - 1966)
ressonância (ρ ⁰) (Erwin <i>et al</i> , BNL - 1961)		
ressonância (Alvarez <i>et al</i> , Berkeley - 1961)		
neutrino do múon (ν _μ) (Lederman <i>et al</i> , BNL - 1962)	mixing flavor (Cabibbo - 1963)	MWPC (Charpak <i>et al</i> , CERN - 1968)
(Ω ⁻) (Samios <i>et al</i> , BNL - 1964)	quarks (Gell-Mann, Zweig - 1964) e Higgs (1964)	Fermilab (p@400 GeV - 1970)
CP violation (Cronin <i>et al</i> , BNL - 1964)	SU _c (3) (cor) (Greenberg, Han, Nambu - 1964-65)	ISR/CERN (pp@60 GeV - 1971)
deep inelastic (Friedman <i>et al</i> , SLAC - 1969)		
WNC (Lagarrigue <i>et al</i> , Gargamelle, CERN - 1973)	EW (Glashow, Salam, Weinberg - 1967)	drif chamber (Walenta <i>et al</i> , CERN - 1971)
charm (c) - J (Ting <i>et al</i> , BNL - 1974)	charm (GIM - 1970)	SPEAR/SLAC (e ⁺ e ⁻ @3.7+3.7 GeV - 1972)
Ψ (Richer <i>et al</i> , SLAC - 1974)		
τ (Perl <i>et al</i>) jets (Hanson <i>et al</i>) - (SLAC - 1975)	renormalizabilidade (Veltman, 't Hooft - 1972)	PETRA/DESY (e ⁺ e ⁻ @40 GeV - 1978)
bottom (b) (Lederman <i>et al</i> , Fermilab - 1977)	bottom - CKM (Kobayashi, Maskawa - 1973)	SPS/CERN (ppbar@540-630 GeV - 1981)
gluon jets (TASSO, DESY - 1979)		LEP I/CERN (e ⁺ e ⁻ @91 GeV - 1989)
W [±] , Z (Rubia <i>et al</i> - UA1, CERN - 1983)	QCD (Callann, Gross, Politzer, Wilzek, Fritzsch,	TEVATRON I/Fermilab (ppbar@1.8 TeV - 1972)
	Gell-man, Leutwyler <i>et al</i> - 1973)	LEP II/CERN (e ⁺ e ⁻ @210 GeV - 1996)
top (t) (CDF/Dzero, Tevatron - Fermilab - 1995)		TEVATRON II/Fermilab (ppbar@2 TeV - 2001)
neutrino do tau (ν _τ) (DONUT, Fermilab - 2000)		LHC/CERN (pp@7 TeV - 2010, pp@13 TeV - 2015)
Higgs (H) (ATLAS/CMS - 2012)		

Desafios e indagações

- três famílias de léptons e quarks?
 - diferenças de massa
 - massa dos neutrinos
 - matéria X antimatéria (assimetria)
-

- gravitação quântica
- dimensões extras
- matéria escura
- energia escura



Sugestões de leitura

- **L. Abreu, V. Oguri & A. Santoro, “ Próximas descobertas em Física de Altas Energias ”, Livraria da Física, 2018.**
- **F. Caruso, V. Oguri & A. Santoro, “ Partículas elementares: 100 anos de descobertas ”, Livraria da Física, 2012.**
- **R.N. Cahn, G. Goldhaber, “ The Experimental Foundations of Particle Physics ”, 2ed., Cambridge, 2009.**
- **A. Bettini, “ Introduction to Elementary Physics ”, Cambridge, 2ed., 2014.**
- **B.R. Martin, B. Shaw, “ Particle Physics ”, 3ed., Wiley, 2008.**
- **M. Veltman, “ Facts and Mysteries in Elementary Particle ”, World Scientific, 2003.**