



# MASTERCLASS 2008

SPRACE

Centro Regional de Análise de São Paulo

# Programa

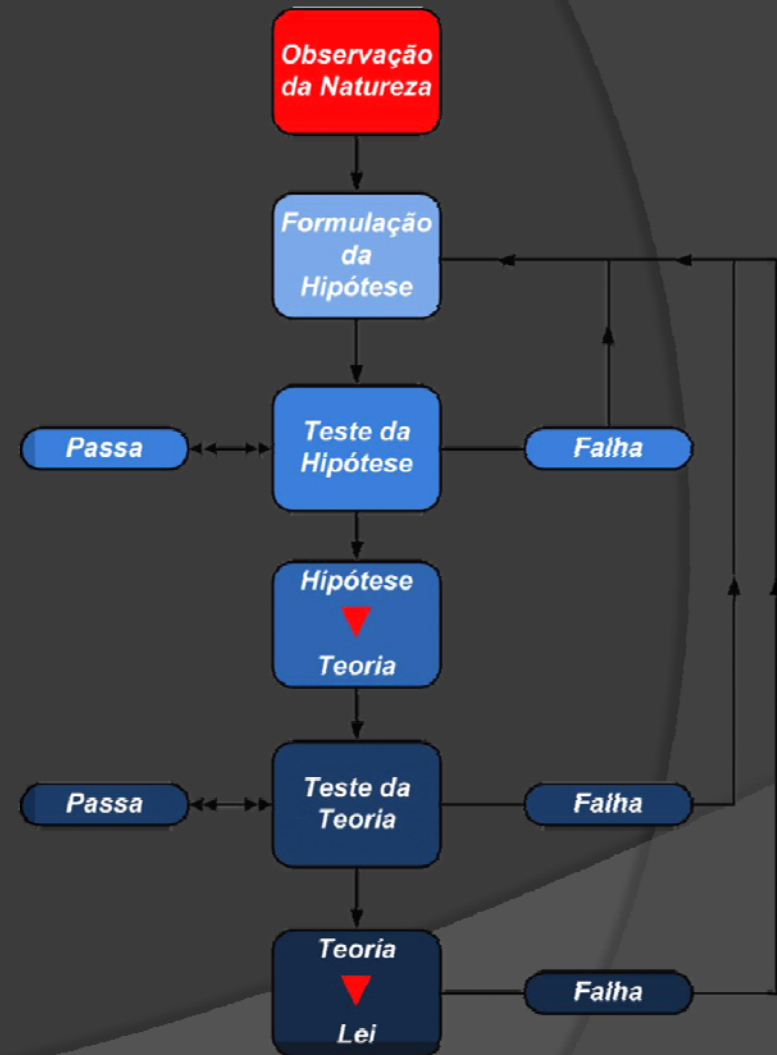
- ◉ Do que o mundo é feito:  
As partículas e suas interações
- ◉ Explorando o mundo subatômico:  
Aceleradores e detectores
- ◉ Um pouco de história:  
Descobertas do último século
- ◉ O Large Electron Positron Collider e o Z
- ◉ Exercício MasterClass:  
Identificando eventos no decaimento do Z

Parte 3

# Um pouco de história: Descobertas do último século

# Interlúdio: O Método Científico

- **Caracterização** do objeto de investigação
  - Observação e obtenção de dados
- **Hipótese** que possa explicar o fenómeno
  - Teórica (modelo matemático) ou asserção hipotética (característica geral)
- **Predições** a partir da hipótese e acessível ao experimento
  - Raciocínio, dedução da hipótese e teoria
- **Experimentos**: teste da hipótese
  - Teste da caracterização, hipótese e predições
- **Análise** e interpretação dos dados
  - Objetividade para evitar a parcialidade
- **Divulgação** dos métodos e dados
  - Experimento deve poder ser reproduzido



# O Elétron e o Núcleo Atômico

1896

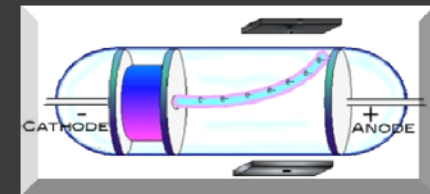
- Becquerel

Evidência da radioatividade espontânea no decaimento do urânio.

1897

- Thomson

Descoberta do elétron nos raios catódicos



1911

- Millikan

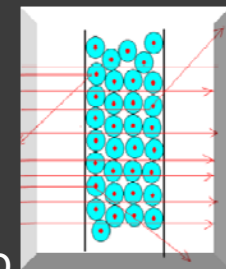
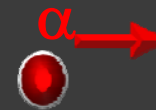
Medida da carga do elétron

- Rutherford (Geiger e Marsden 1909)

Evidência do núcleo atômico

Modelo para a estrutura atômica

Conclusão: Existem pequenos objetos carregados = Núcleo



Au

cintilador

1919

- Rutherford

Descoberta do próton, constituinte do núcleo ( $\alpha + \text{Átomo} \rightarrow p + X$ )

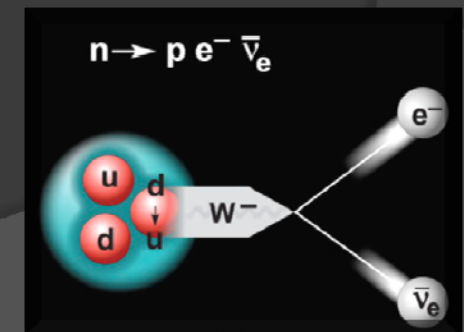
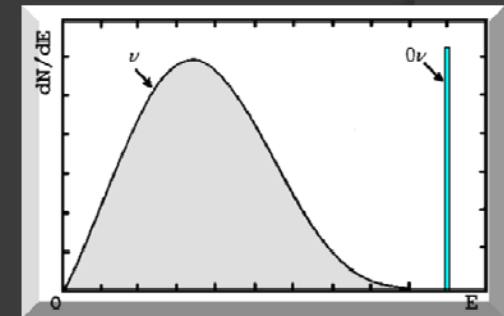
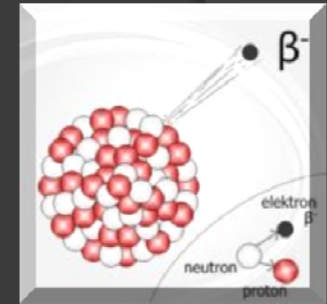
1932

- Chadwick

Primeira evidência do nêutron ( $\alpha + \text{Be} \rightarrow \text{C} + n$ )

# O Decaimento Beta e o Neutrino

- O espectro do decaimento  $\beta$  é contínuo
  - Chadwick (1914) e Ellis e Wooster (1927)
- 1930
  - Pauli
    - Sugere a existência de uma partícula leve, neutra e fracamente interagente que seria também emitida no decaimento  $\beta$
  - Fermi
    - Propõe uma teoria para o decaimento  $\beta$ , assumindo a existência do neutrino.
- 1949
  - Wheeler e Tiomno; Lee, Rosenbluth e Yang
    - Proposta da universalidade da interação de Fermi (Interação Fraca)
    - Decaimento  $\beta$ , decaimento do  $\mu$ , etc. deve ter a mesma natureza e intensidade



# Raios C3smicos

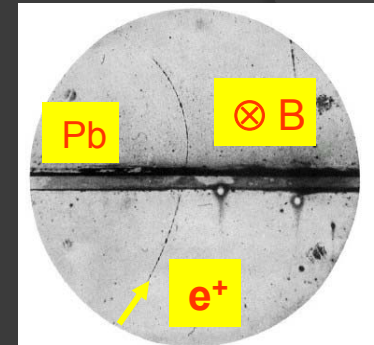
- **Maior energia** do que a radia33o alfa
- **Menor controle** da produ33o e detec33o das part33culas

## 1932

- Anderson

Descoberta do **P3sitr3n**

- Curvatura dos tra33os: part33cula com carga positiva
- N3o era absorvida: n3o podia ser o pr3ton



## 1937

- Anderson e Neddermeyer

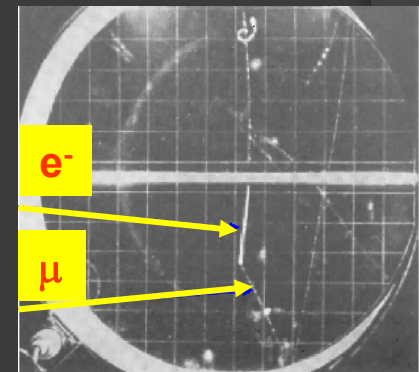
Descoberta do **M3u3n** ( $\mu \rightarrow e + \nu_e + \nu_\mu$ )

- Penetrante: n3o era o p3on (Yukawa)
- $M_e < M_\mu < M_p$

- I. I. Rabi (Columbia): **“Who ordered that?”**

At3 hoje n3o sabemos a resposta

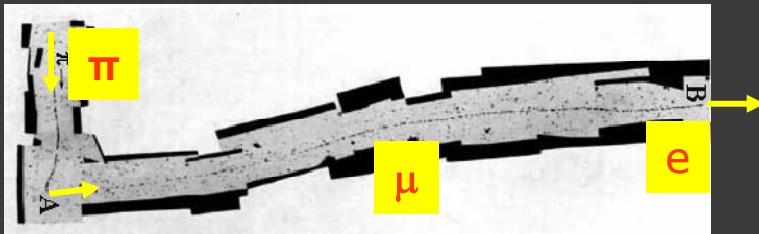
Foi a primeira part3cula da segunda gera33o a ser descoberta abrindo um novo horizonte



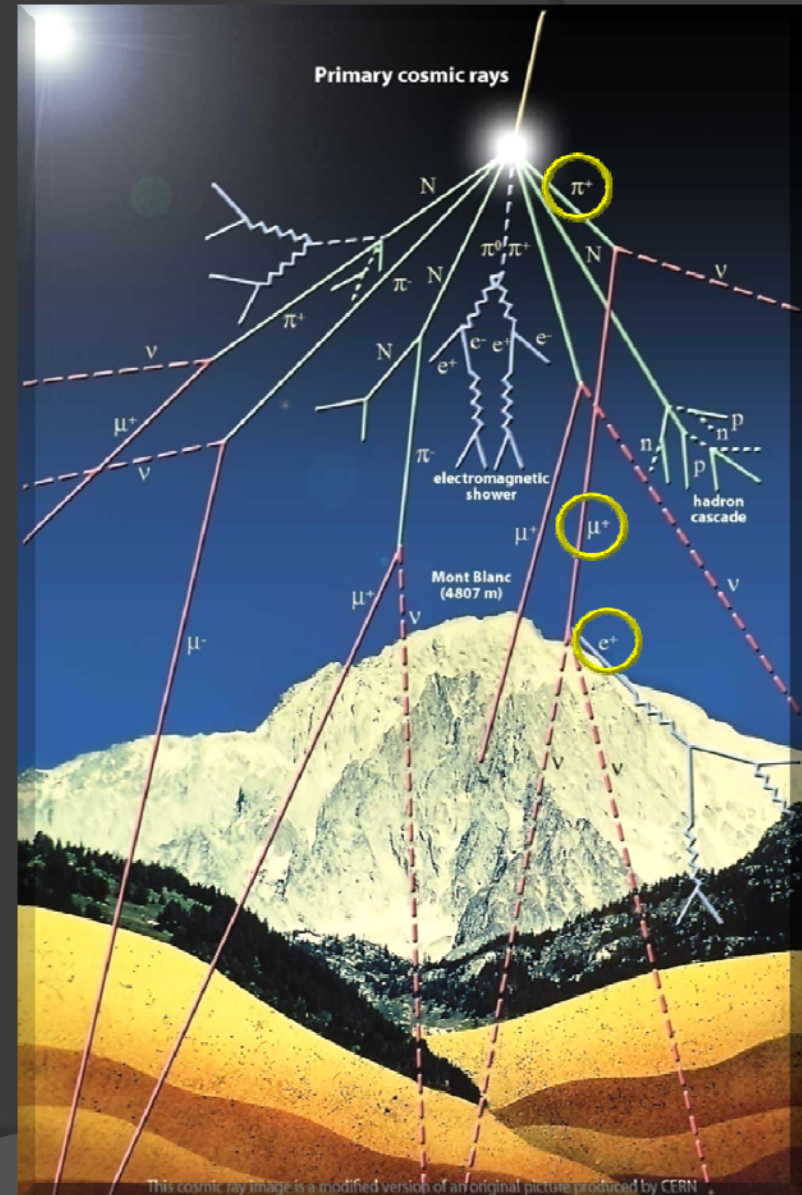
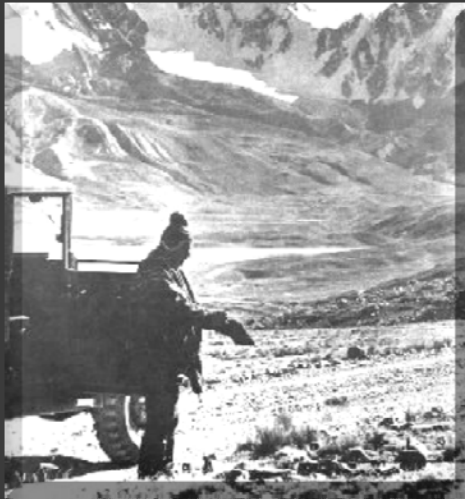
# Píon

1947

- Lattes, Occhialini e Powell
- ## Descoberta do píon



Monte Chacaltaya, Bolívia, 5.600 m





# Partículas Estranhas

## ◎ 1943-1959

- Bristol, Manchester, École Polytechnique, Caltech, Berkeley  
Raios Cósmiticos

## ◎ 1953-54

- Cosmotron (BNL), Bevatron (LBL)

Aceleradores de prótons com 3 a 6 GeV

- Produção de **Partículas Estranhas** ( $\Lambda$ ,  $K$ ,  $\Sigma$ , ...)

Produzidas via interação forte e decaindo em partículas que **interagem fortemente**.

Porém a **vida média** observada foi  **$10^{10}$  vezes maior** do que o esperado para decaimento forte.

## ◎ 1952-53

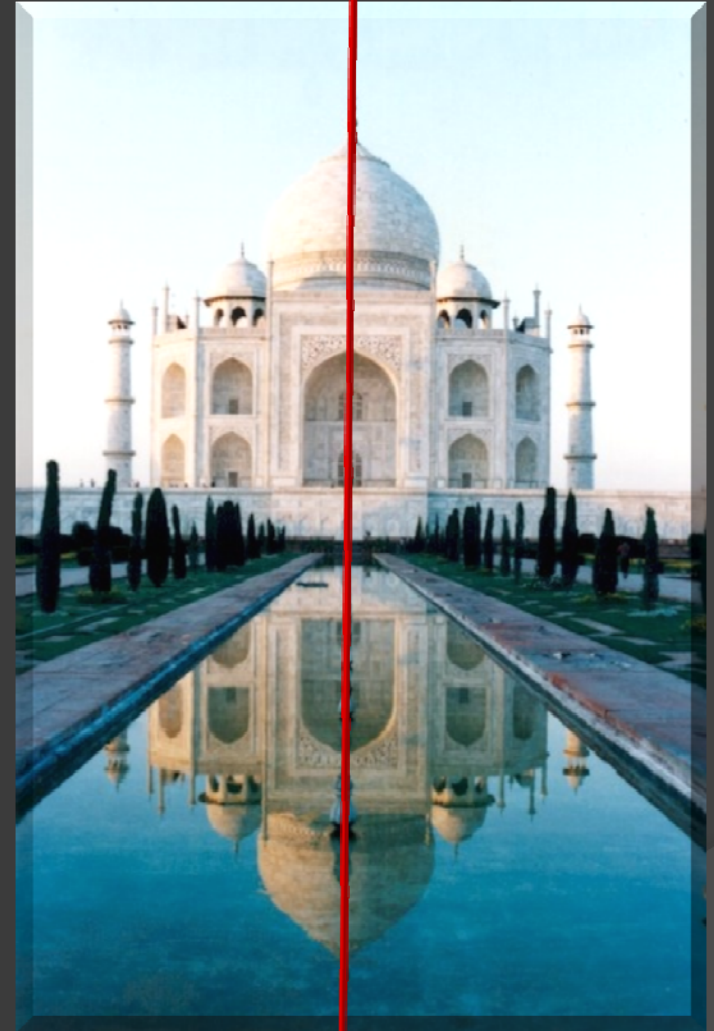
- Pais, Gell-Mann

Produção Associada: são **produzidas aos pares**

Existe **novo número quântico** conservado pelas interações forte e eletromagnética mas violado pela interação fraca

# Uma reflexão...

- Como se comportariam as leis da Física em um mundo refletido no espelho?
  - O Taj Mahal é simétrico pela transformação de reflexão, ou seja possui uma invariância sob reflexão
- Esquerda-Direita é uma simetria da Natureza?
- Ou, como diria Alice:  
“Perhaps Looking-glass milk isn’t good to drink”.  
Through the Looking Glass, Lewis Carroll



# Simetrias Discretas

- Três outras simetria são importantes:
  - Paridade (P): reversão de todas as coordenadas espaciais
    - Inversão do espaço
  - Reversão Temporal (T): fazer o tempo andar “para trás”
    - Inversão do tempo
  - Conjugação de Carga (C): trocar matéria por anti-matéria
    - Inversão da Carga
- 1955
  - Alvarez e Goldhaber; Birge et al.: Enigma  $\theta$ - $\tau$ 
    - “Duas” partículas pareciam ser um único estado (mesma massa e largura) mas decaíam em estados de paridade oposta. Portanto a Paridade poderia estar sendo violada em transições fracas
- 1956
  - Lee e Yang
    - Propõe testar a conservação da paridade espacial
- Até 1957 acreditava-se que as **leis da Física** fossem **invariantes por P** e que nenhum experimento pudesse distinguir ou privilegiar “direita” ou “esquerda”.

# Violação da Paridade

● 1957

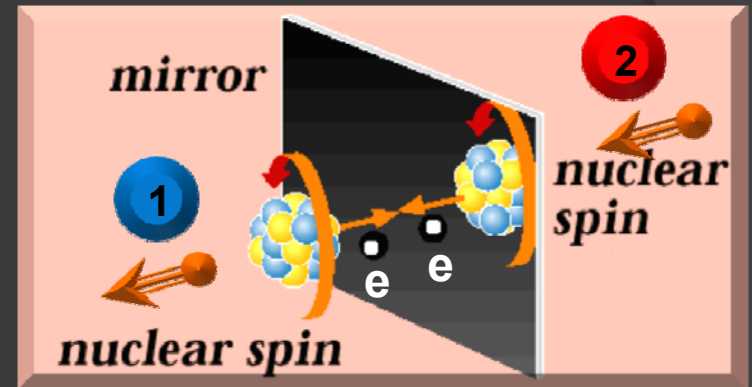
• Wu et al.

Primeira evidência da **não conservação da paridade**:  
distribuição angular dos elétrons emitidos no decaimento  $\beta$

Cobalto em forte campo magnético  
e observou o decaimento beta



Elétrons são emitidos na  
direção **oposta** ao campo



- Situação **1** é aquela que ocorre na natureza.
- Configuração especular **2** **não** é observada na natureza.

- Garwin, Lederman e Weinrich; Friedman e Telegdi  
Confirmação da violação da paridade no decaimento do múon.

# Antinúcleons e Ressonâncias

## ◎ 1955

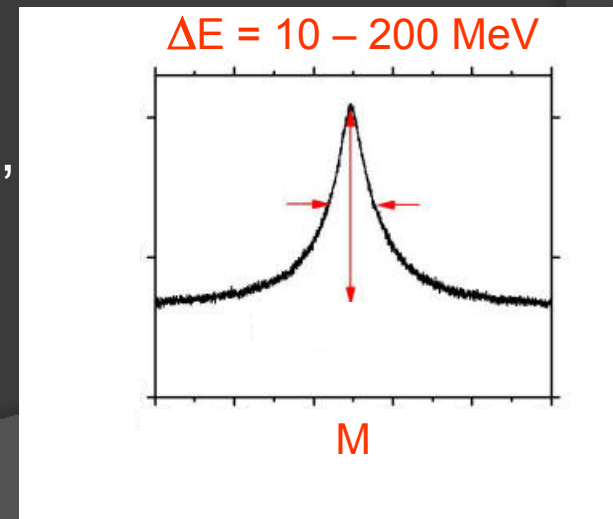
- O. Chamberlain, E. Segré  
Descoberta do **anti-próton**  
Bevatron:  $p + p \rightarrow p + p + p + p$

## ◎ 1956

- B. Cork, Lamberton, Piccioni, Wenzel  
Descoberta do **anti-nêutron**  
Bevatron:  $\bar{p} + p \rightarrow \bar{n} + n$

## ◎ 1952-1964

- Fermi, Alvarez, Erwin, Pevsner e Block,  
Ticho e Connolly, Samios e Shutt  
Descoberta de **várias ressonâncias**  
( $\Delta$ ,  $\Sigma$ ,  $K^*$ ,  $\rho$ ,  $\eta$ ,  $\phi$ ,  $\Omega^-$ ) com vida média extremamente pequena



## ◎ 1958

- Feynman e Gell-Mann; Marshak e Sudarshan; Sakurai  
Interação fraca universal com **estrutura V-A**
- Goldhaber, Grodzins e Sunyar  
Primeira evidência da **helicidade negativa do  $\nu_e$**   
Interação tipo V-A é confirmada

## ◎ 1959

- Reines e Cowan  
Confirmação da detecção do **neutrino** em  $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$

## ◎ 1961

- Salam e Ward  
Invenção do **princípio de gauge** como base para a construção de teorias de campos quântica para campos fundamentais interagentes.
- Glashow  
Primeira introdução do **bóson vetorial intermediário neutro  $Z^0$**

## ◎ 1962

- Danby et al.:  
Primeira evidência do **neutrino do múon**:  $\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + (\nu_\mu / \bar{\nu}_\mu)$

# A Violação de CP

- 1964
  - J. W. Cronin e V. L. Fitch
    - Brookhaven National Laboratory (BNL)

Observaram que o decaimento dos kaons ( $K^0$ ) violam simetria de CP.

$$K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \pi^0 (21\%)$$

$$\pi^+ \pi^- \pi^0 (13\%)$$

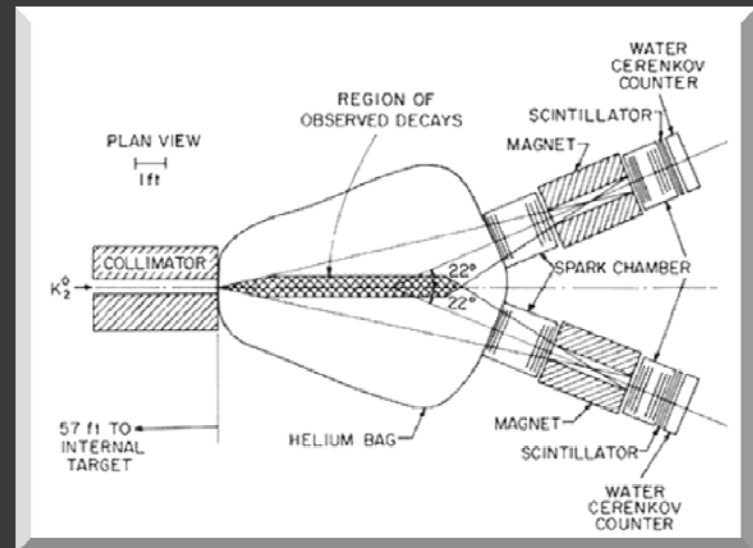
$$\pi^+ \pi^- (0.2\%)$$

$$\pi^0 \pi^0 (0.1\%)$$

$$K_S^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- (69\%)$$

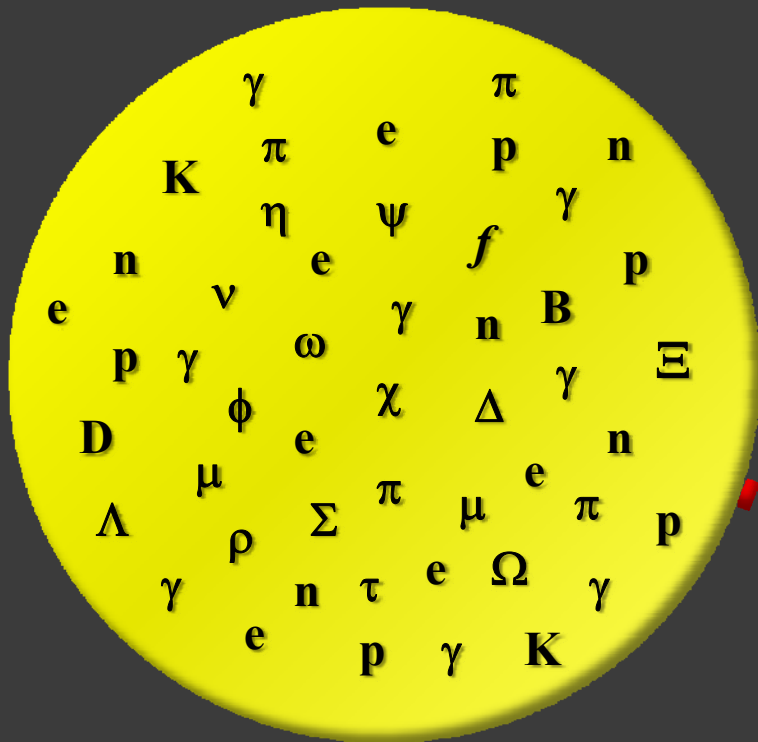
$$\pi^0 \pi^0 (31\%)$$

$$\pi^+ \pi^- \pi^0 (0.00003\%)$$



- Teorema: CPT é uma simetria da Natureza,
  - Reversão do tempo não reverteria algumas reações

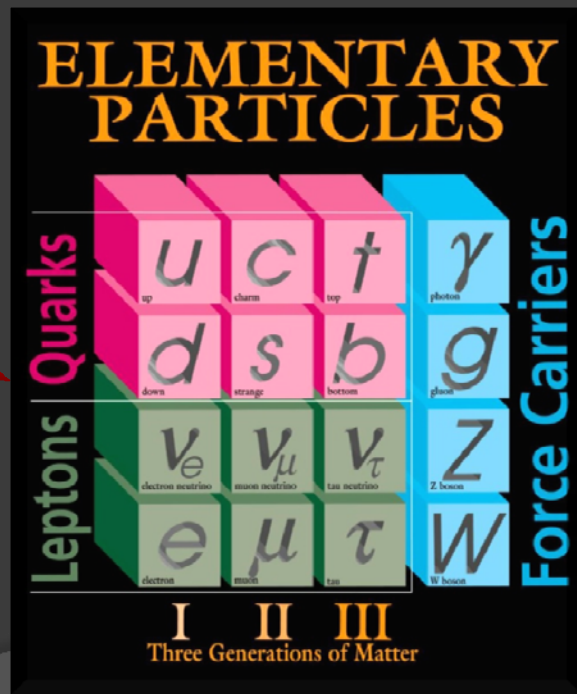
# Década de 50



	IA																	0						
1	H																	He						
2	Li	Be																	B	C	N	O	F	Ne
3	Na	Mg	III B	IV B	V B	VI B	VII B	VIII B	IB			II B	Al	Si	P	S	Cl	Ar						
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr						
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe						
6	Cs	Ba	*La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn						
7	Fr	Ra	+Ac	104	105	106	107	108	109	110	111	112	114	116	118									

*Lanthanide Series	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
+Actinide Series	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr





# Modelo a Quarks

◎ 1965

- Gell-Mann, Zweig

Modelo a quarks: u, d, s

◎ 1969

- Colaboração SLAC-MIT

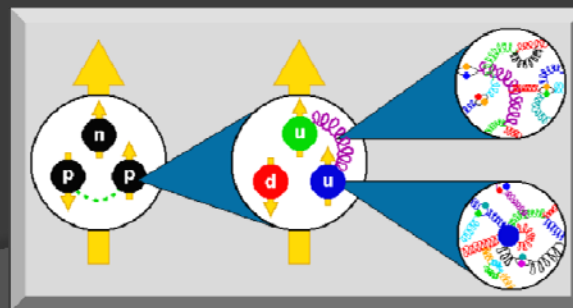
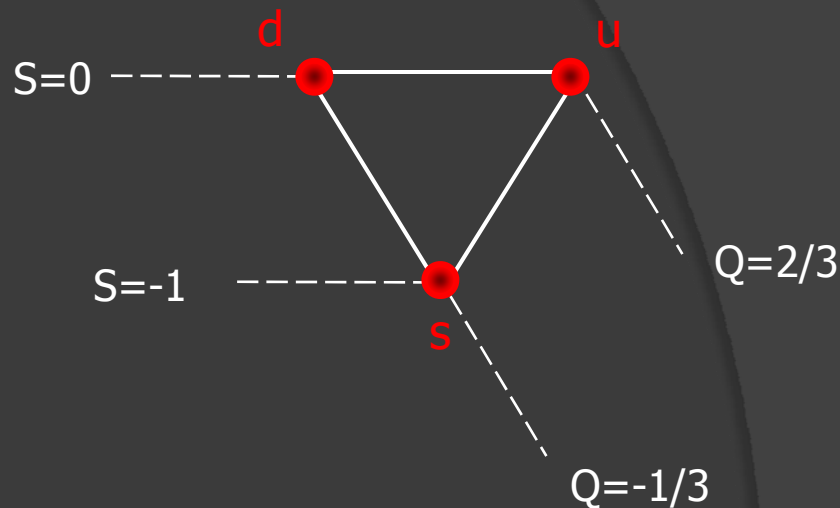
Evidência de **pequenos objetos** carregados dentro do **nucleon**  
Descoberta dos **quarks!**

Acelerador linear de elétrons do SLAC:  $e + H \rightarrow e + X$

◎ 1967

- Bjorken, Feynman

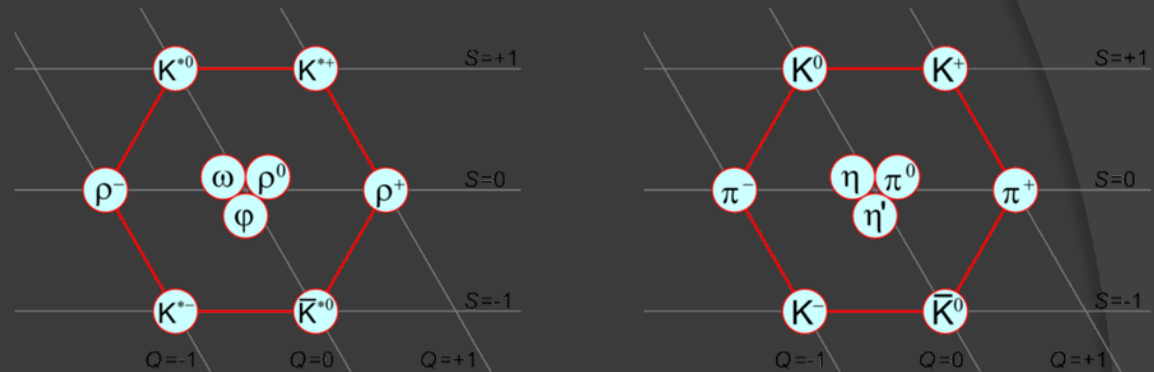
Modelo a Partons



# Simetria e Sub-estrutura Hadrônica

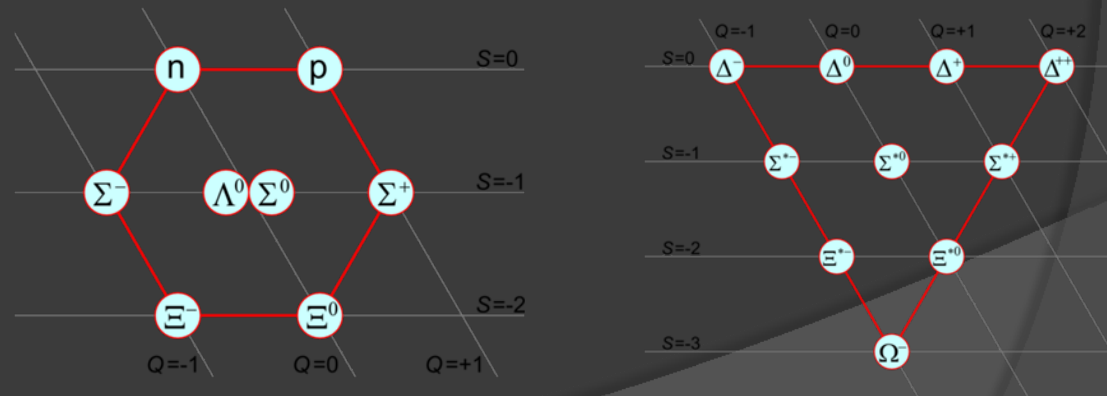
- Mesons

- Quark-Antiquark



- Barions

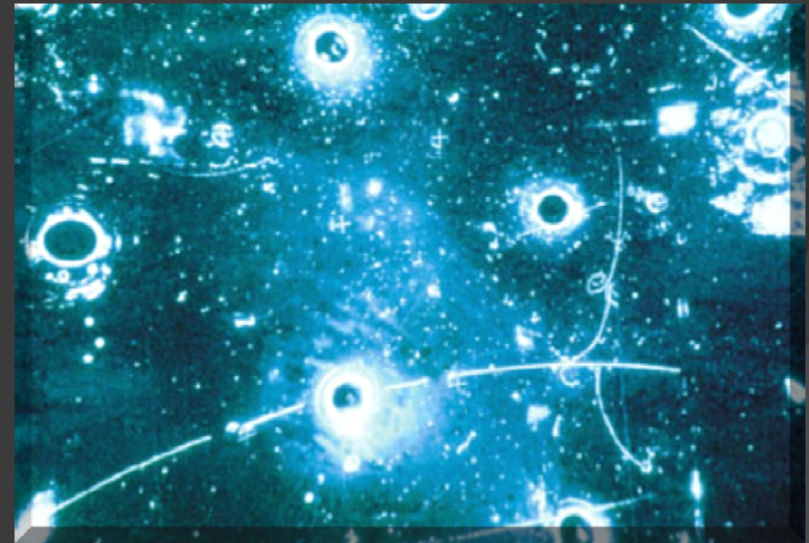
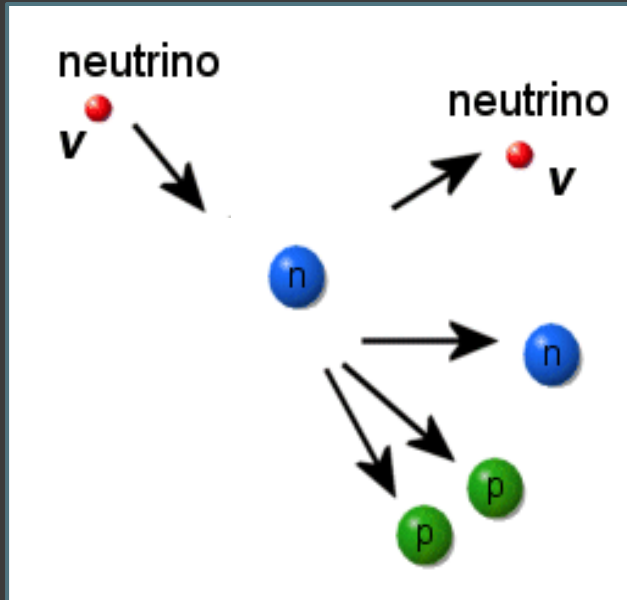
- Quark-quark-quark



# Corrente Neutra

● 1972

- Colaboração Gargamelle (Hasert et al.)
  - Descoberta da **Corrente Neutra**
  - Ausência de elétron ou múon no evento
  - Predita pelo Modelo Padrão em 1967



# Uma Revolução em Novembro

## 1974

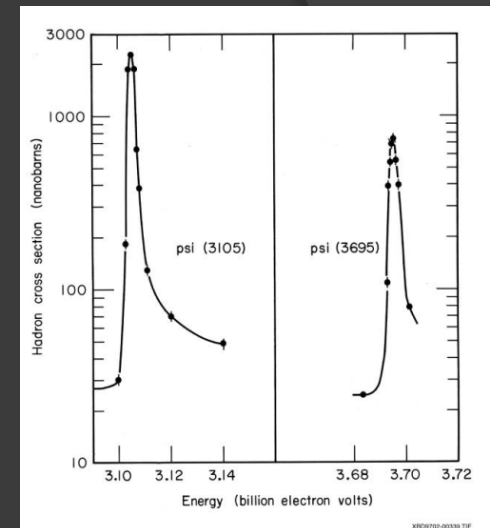
- Colaboração MIT-BNL, Ting et al.

AGS (próton em alvo fixo no BNL)

Descoberta do  $J$  (submetido em 12/11/74)

Reação  $p + Be \rightarrow e^+ + e^- + X$

Pico na massa invariante do par  $e^+ e^-$   
em  $M = 3.1 \text{ GeV}$



- Colaboração Mark I, Richter et al.

SPEAR ( $e^+e^-$  a 2,5-7,5 GeV no SLAC)

Descoberta do  $\psi$  (submetido em 13/11/74)

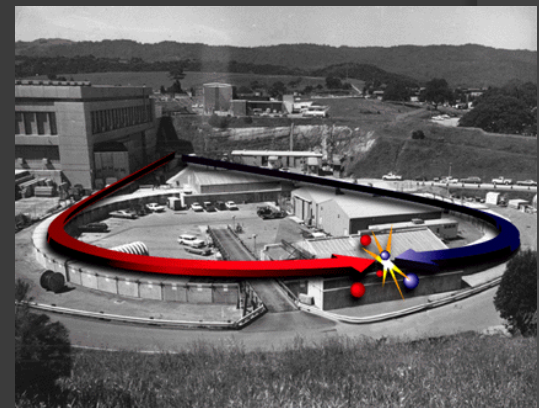
Reação  $e^+ + e^- \rightarrow \text{hádrons}$

Pico na seção de choque em  $E = 3.1 \text{ GeV}$

- Quark **Charm** é descoberto!

Predito em 1970 por Glashow, Iliopoulos e Maiani

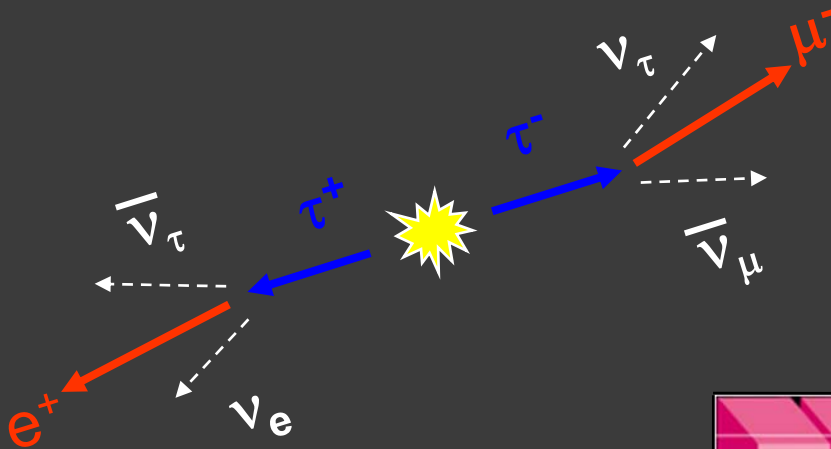
Segue a descoberta do espectro charmoso ( $\psi'$ ,  $\psi''$ ,  $\chi$ ,  $\eta_c$ , ...)



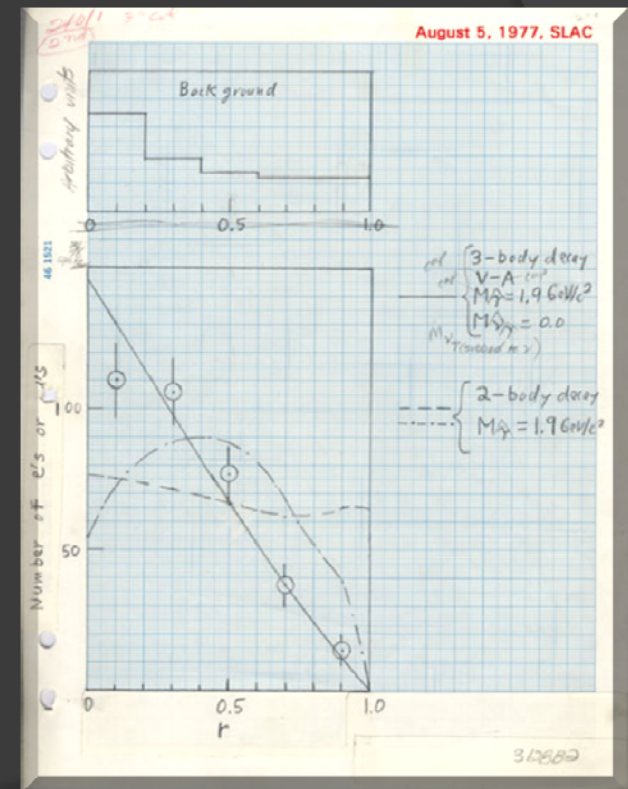
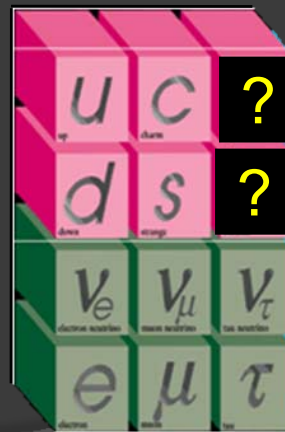
# Um Novo Lépton

● 1975

- Colaboração Mark I (SPEAR @ SLAC), Perl et al.  
Observação  $e^+ + e^- \rightarrow e^+ + \mu^- + (\geq 2 \text{ outras})$   
 $M = 1.8 \text{ GeV}$



Sugere a existência de **2 novos quarks**



# Três Anos Depois...

◎ 1977

• Lederman et al.

400 GeV próton-núcleon @ Fermilab

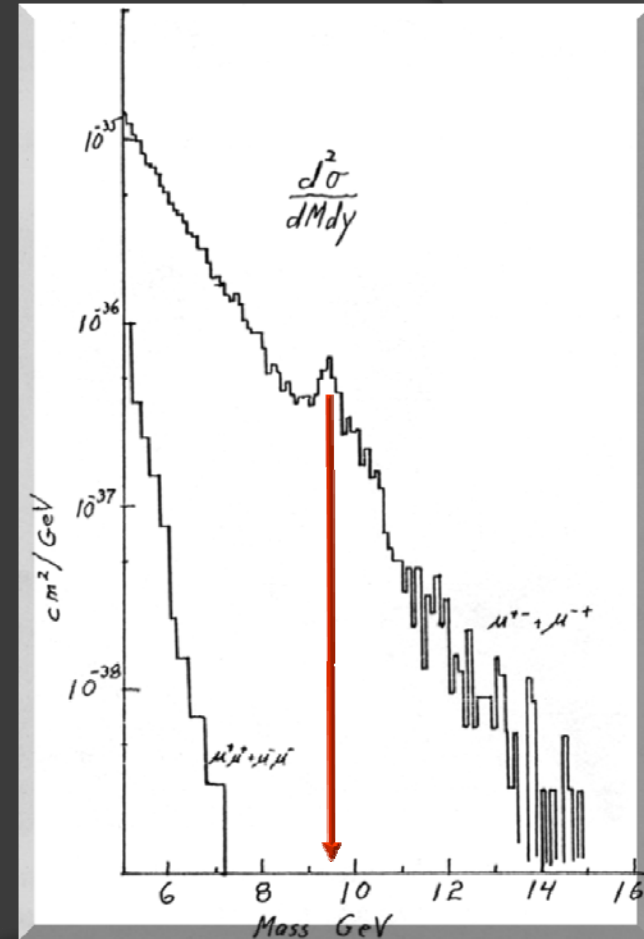
Descoberta do  $\Upsilon$  (Quark Bottom)

Reação  $p + (\text{Cu, Pt}) \rightarrow \mu^+ + \mu^- + X$

Pico na massa invariante do par  $\mu^+\mu^-$

$M = 9.5 \text{ GeV}$

Espectro também é descoberto

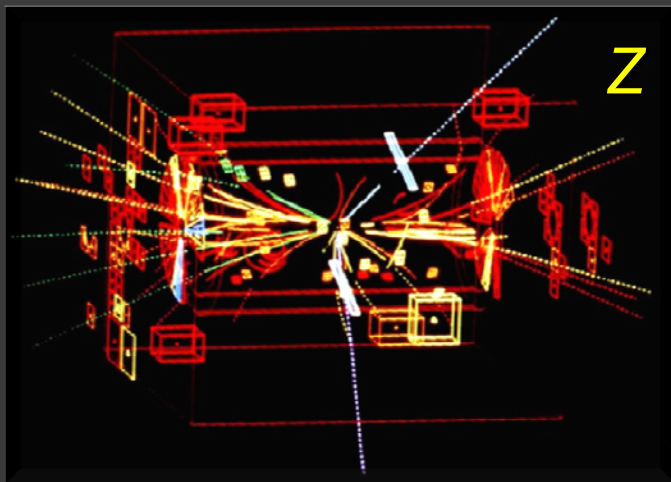


$\Upsilon', \Upsilon'', \chi_b, \dots$

# Descoberta do W e Z

◎ 1983

- Colaborações UA1 e UA2, Rubbia et al.  
Colisões próton-antipróton no SppS do CERN  
 $M_W = 80 \text{ GeV}$  e  $M_Z = 91 \text{ GeV}$
- Preditos pelo Modelo Padrão (1967)
- Massa correta!



$$p + \bar{p} \rightarrow Z(\rightarrow \ell^+ + \ell^-) + X$$



$$p + \bar{p} \rightarrow W(\rightarrow \ell + \nu) + X$$

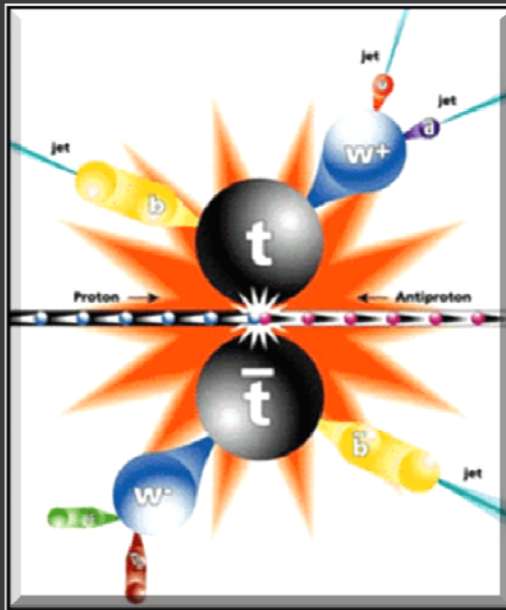
# O Quark Top

1995

- Colaborações CDF e DØ

Colisões próton-antipróton a 1,8 TeV

$M = 180 \text{ GeV}$



$$p + \bar{p} \rightarrow t(b + W^+ \rightarrow \text{jatos}) + \bar{t}(\bar{b} + W^- \rightarrow \ell^- \bar{\nu})$$

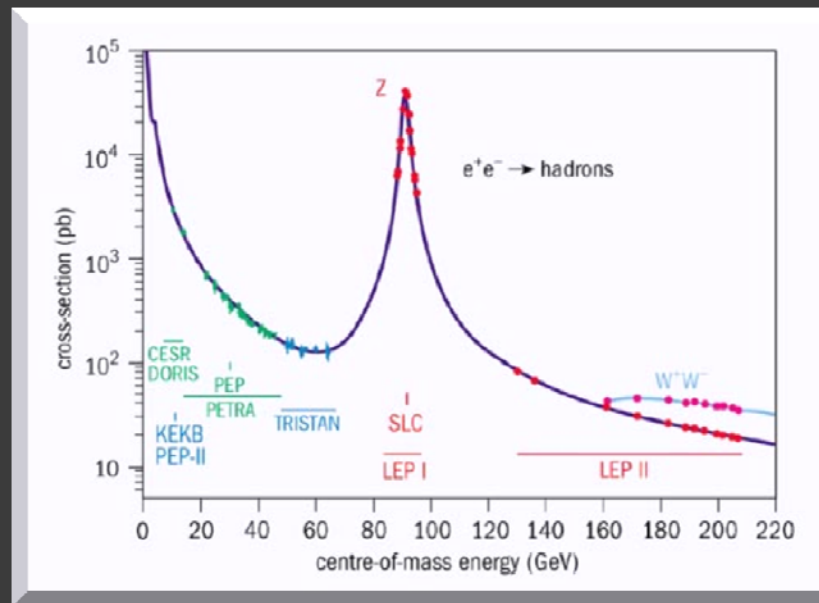


# Medidas Precisas

## ● Década de 90

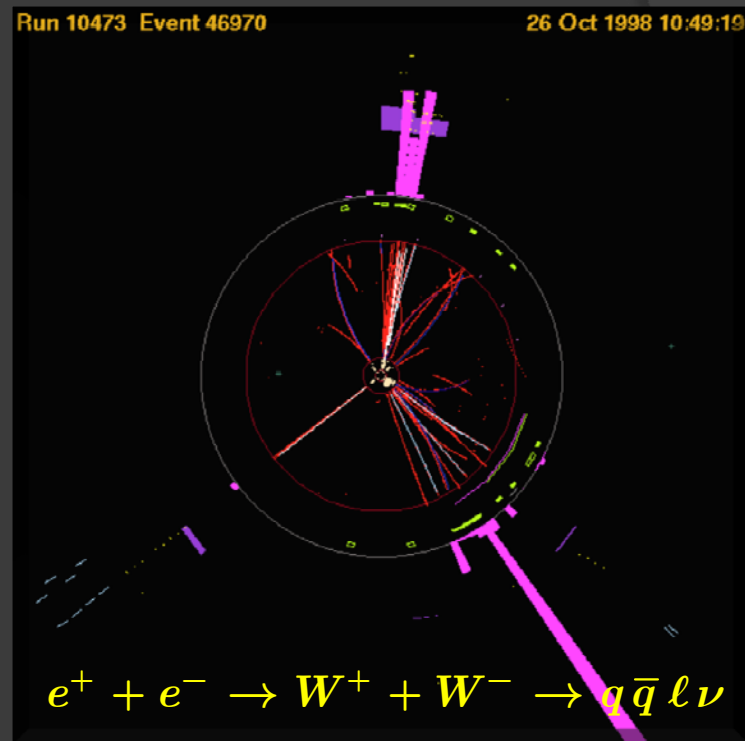
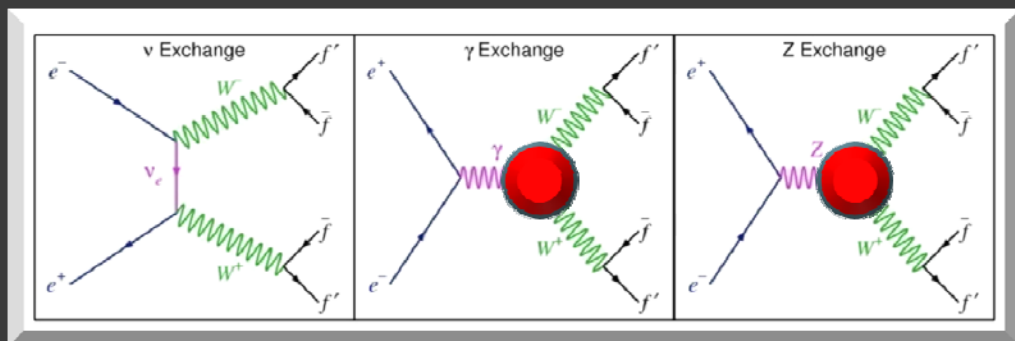
- Colaborações ALEPH, DELPHI, L3 e OPAL
- Large Electron Positron (LEP) Collider @ CERN

Medidas precisas das propriedades do bóson Z



# LEP II

## ● Produção de Pares $W^+W^-$



# Bóson de Higgs: O Grande Desafio

◎ 20??

- Colaborações Atlas e CMS (CERN)
  - Colisões próton-próton a 14 TeV

