



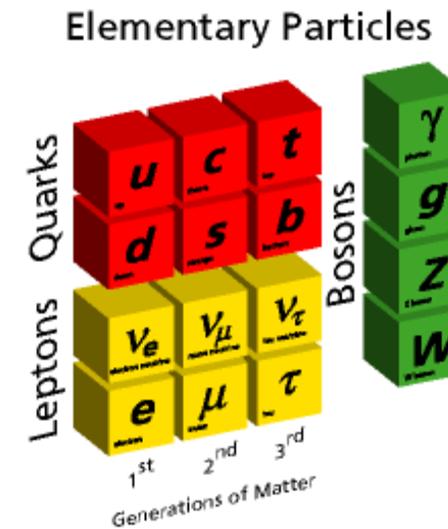
# Modello Standard



E' l'attuale descrizione delle interazioni  
**elettro-deboli** e **forti**  
dei costituenti fondamentali della materia  
**quarks** e **leptoni** ,  
oggetti “puntiformi” di spin  $1/2$ .

E' basata su due teorie di gauge non –abeliane:

- ▶ QCD (Quantum Chromodynamics) : gruppo di simmetria SU(3) di “colore”
- ▶  $QE_WD$  (Quantum Electroweak Dynamics) : gruppo di simmetria SU(2)xU(1)





# Modello Standard



Lagrangiana della  $QE_{WD}$  (cfr. Halzen, Martin, “Quarks & leptons”, cap.13 - 15):

$$L_{QE_{WD}} = L_{gauge} + L_{fermioni} + L_{Higgs} + L_{Yukawa}$$

$$L_{gauge} = -\frac{1}{4} \vec{W}_{\mu\nu} \vec{W}^{\mu\nu} - \frac{1}{4} B_{\mu\nu} B^{\mu\nu}$$

$$L_{fermioni} = L_{lept} + L_{quark} \quad \Rightarrow \text{termini di interazione fermioni - bosoni vettori}$$

$$L_{Higgs} = \frac{1}{2} (D_{\mu} \phi)^2 - V(\phi) \quad \phi = \begin{pmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \end{pmatrix} \quad \begin{aligned} D_{\mu} &= \partial_{\mu} + i \frac{g}{2} \vec{\sigma} \vec{W}_{\mu} - ig' B_{\mu} \\ V &= a \phi^2 + b \phi^4 \end{aligned}$$

$$L_{Yukawa} = -G_i \left[ \bar{L} \phi R + \bar{R} \phi^{T*} L \right] \quad \Rightarrow \text{termini di interazione fermioni-bosoni scalari}$$

L = doppietto left    R = singoletto right



$$L_{lept} = \sum_{l=e,\mu,\tau} \left\{ (\bar{\nu}, \bar{\ell})_L \gamma_\mu \left[ \partial_\mu + i \frac{g}{2} \vec{\sigma} \vec{W}_\mu - ig' B_\mu \right] \begin{pmatrix} \nu \\ \ell \end{pmatrix}_L + \bar{\ell}_R \gamma_\mu \left[ \partial_\mu - ig' B_\mu \right] \ell_R \right\}$$

$$L_{quark} = \sum_{\substack{u=u,c,t \\ d=d,s,b}} \left\{ (\bar{u}, \bar{d})_L \gamma_\mu \left[ \partial_\mu + i \frac{g}{2} \vec{\sigma} \vec{W}_\mu - ig' B_\mu \right] \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L + \bar{u}_R \gamma_\mu \left[ \partial_\mu - ig' B_\mu \right] u_R \right\}$$

$\sigma = (\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$  : matrici di Pauli,  $\vec{W}_\mu, B_\mu$  generatori dei gruppi SU(2), U(1)

$g$   $g'$   $a$   $b$   $G_i$  parametri del modello

$m_e = \frac{G_e v}{\sqrt{2}}$   $m_H = 2\sqrt{a}$  considerando a parte le masse dei fermioni e dell'Higgs restano 3 parametri:  $g$   $g'$   $v$

$v$  minimo del potenziale di Higgs =  $\sqrt{\frac{-a}{2b}}$

Rottura di simmetria





carica elettrone     $\theta_W$  angolo di Weinberg    costante di Fermi

$$\begin{matrix} g & g' & v \end{matrix} \Rightarrow \begin{matrix} e = \frac{gg'}{\sqrt{g^2 + g'^2}} & \sin \theta_W = \frac{g'}{\sqrt{g^2 + g'^2}} & G_F = \frac{1}{v^2 \sqrt{2}} \end{matrix}$$

Misura di  $e$     Es. esperimento di Millikan (gocce di olio caricate ionizzando l'aria di cui si misura la velocità in un campo elettrico)

Misura di  $G_F$     Es. tempo di vita del  $\mu$

Misura di  $\theta_W$     Es. Gargamelle (1973) asimmetria scattering  $p\nu \rightarrow p\bar{\nu}$

$$M_W^2 = \frac{e^2}{4G_F \sqrt{2} \sin^2 \theta_W}$$

$$M_Z = \frac{M_W}{\cos \theta_W}$$

$$\sin^2 \theta_W = 0.23 \Rightarrow M_W = 80 \text{ GeV} \quad M_Z = 92 \text{ GeV}$$

errore  $\cong 10 \%$

Prima della loro scoperta si avevano chiare indicazioni sulla massa

$$\text{UA1 } p\bar{p} \sqrt{s} = 540 \text{ GeV (1993)} \quad M_W = 82.4 \pm 1.1 \text{ GeV} \quad M_Z = 93.1 \pm 1.8 \text{ GeV}$$

( prima evidenza 39 eventi  $W \rightarrow e\nu$  )



# Decadimenti adronici e leptonici della Z



La  $Z^0$  può decadere in 5 *modi* diversi, ciascuno con una sua probabilità:

$Z^0$	$\nu \bar{\nu}$	$p=0,20$ (invisibile)	
	$e^-e^+$	$p=0,0337$	$p_\nu=0,0421$
	$\mu^-\mu^+$	$p=0,0337$	$p_\nu=0,0421$
	$\tau^-\tau^+$	$p=0,0337$	$p_\nu=0,0421$
	$q \bar{q}$	$p=0,699$	$p_\nu=0,8738$

$q \bar{q}$  comprende le seguenti 5 possibilità:  $u \bar{u}$   $d \bar{d}$   $s \bar{s}$   $c \bar{c}$   $b \bar{b}$   
( $t \bar{t}$  escluso in quanto  $m_t > M_Z$ )

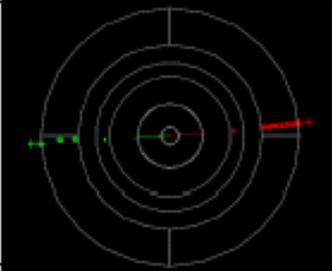


$Z \rightarrow e^+e^-$



- TRK: SI
- N(TRK): 2
- EM CAL: SI
- HAD CAL: NO
- MU: NO

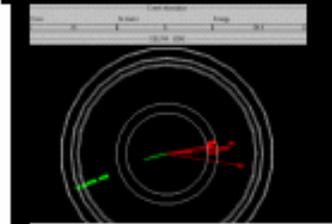
$Z \rightarrow \mu^+\mu^-$



- TRK: SI
- N(TRK): 2
- EM CAL: NO
- HAD CAL: NO\*
- MU: SI +++

$Z \rightarrow \tau^+\tau^-$

[ossia: ee, mu, eμ o adroni + energia non visibile]



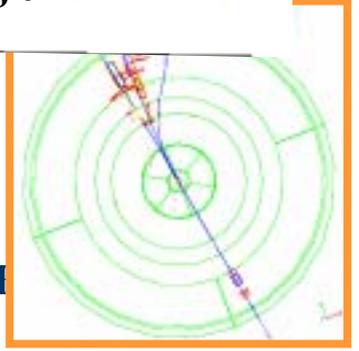
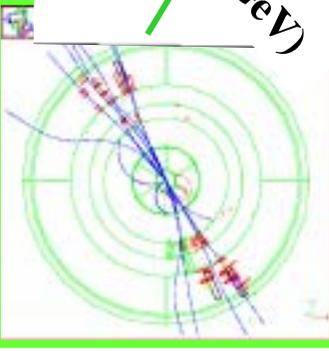
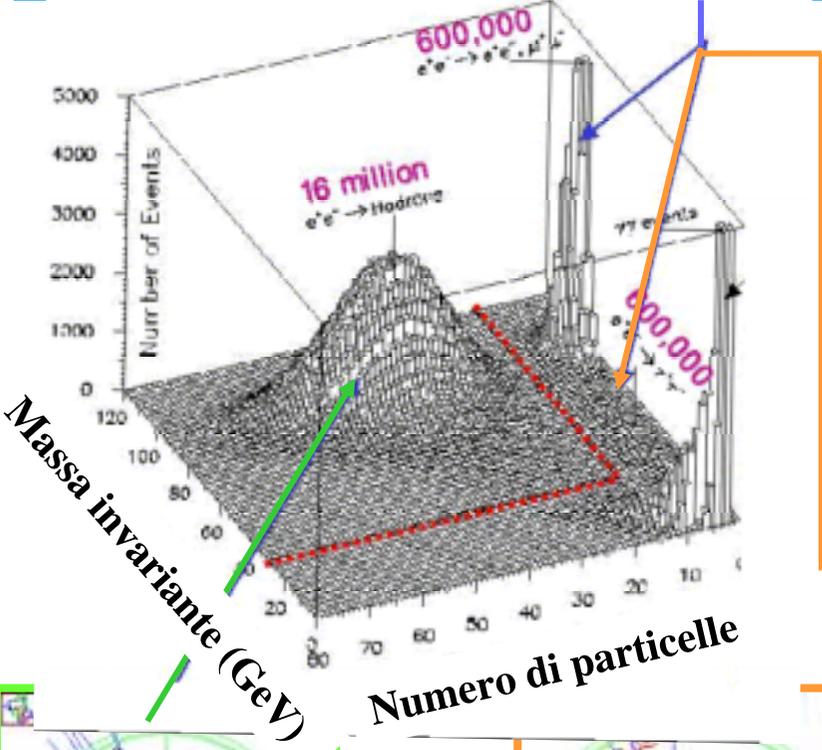
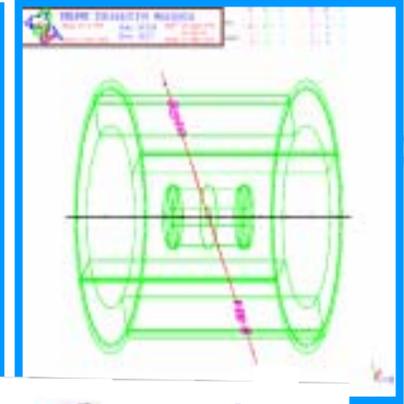
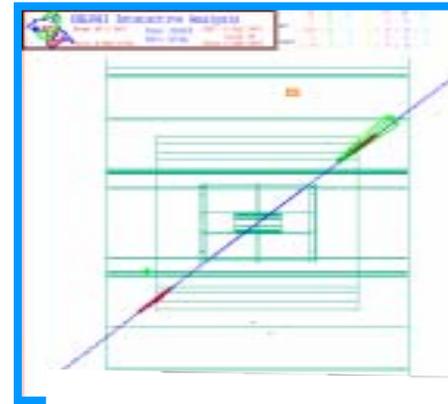
$Z \rightarrow \tau^+\tau^- \rightarrow \text{had had}$

- Vari decadimenti!
- $\tau \rightarrow \nu\nu e$
  - $\tau \rightarrow \nu\nu\mu$
  - $\tau \rightarrow N$  adroni
  - Neutrini sempre!

$Z \rightarrow qq$

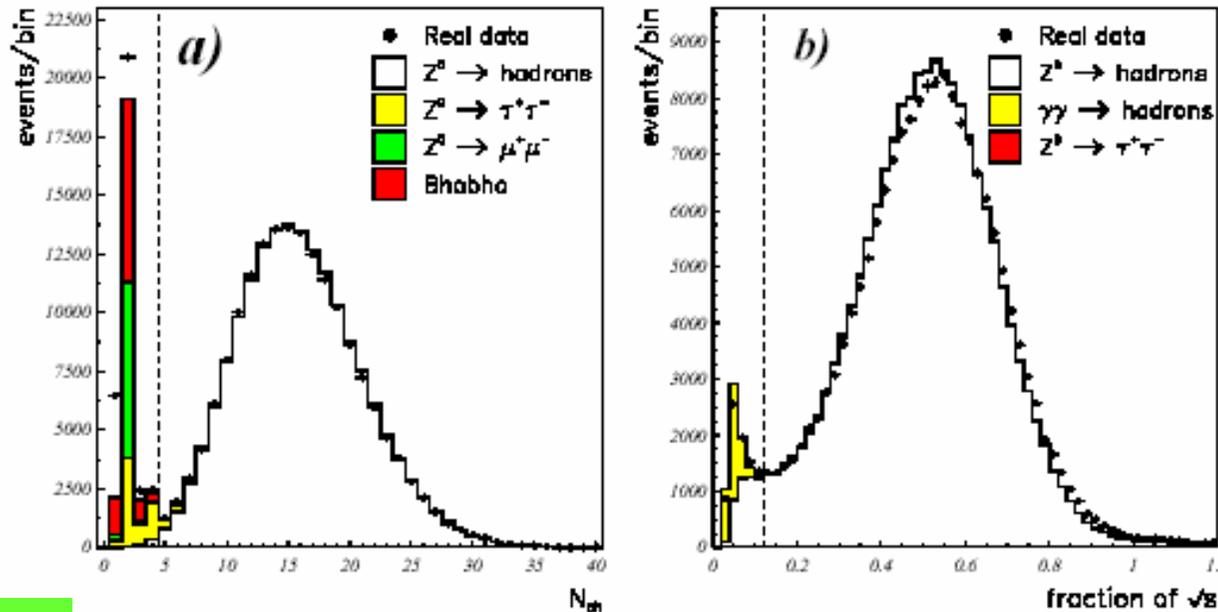


- TRK: SI
- N(TRK): Tante
- EM CAL: SI
- HAD CAL: SI
- MU: SI +++





# Criteri di selezione



## $e^+e^- \rightarrow \text{adroni}$

- Molteplicità di traccia carica (tra 0.4 e 50 GeV)  $\geq 5$
- $E > 12\% \sqrt{s}$

Efficienza  $\cong 96\%$

Contaminazione  $\cong 0.3\%$  (eventi  $\tau$ )

## $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$

- Molteplicità di traccia carica (oltre 1.5 GeV)  $\leq 3$
- $E_{ECAL}^1 > 30 \text{ GeV}$     $E_{ECAL}^2 > 25 \text{ GeV}$     $\Delta\phi < 10^\circ$

Efficienza  $\cong 98\%$

Contaminazione  $\cong 1.0\%$  (eventi  $\tau$ )



## $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$

- Molteplicità di traccia carica (oltre 5 GeV) = 2
  - $p_{\mu 1}$  e  $p_{\mu 2} > 15$  GeV
  - $IP_Z < 4.5$  cm ,  $IP_R < 1.5$  cm
  - $\Delta\phi < 10^\circ$
  - Associazione tracciatore - muon detector
  - $E_{\text{HCAL}} < 10$  GeV (consistente con MIP)
  - $E_{\text{ECAL}} < 1$  GeV (consistente con MIP)
- }  $\oplus$

## $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$

- Molteplicità di traccia carica (oltre 1 GeV)  $\leq 6$
- $E^{\text{tot}} > 8$  GeV ,  $p_{\text{missing}}^T > 0.4$  GeV
- $\Delta\phi > 0.5^\circ$
- ecc



Efficienza  $\cong 99$  %

Contaminazione:  $\sim 1.9$  % eventi  $\tau$   
 $\sim 1.5$  % cosmici

Efficienza  $\cong 70$  %

Contaminazione:  $\sim 0.5$  % eventi  $\mu$   
 $\sim 0.8$  % eventi e  
 $\sim 0.5$  % eventi q



# Distinzione tra i diversi quarks



Classificazione mediante l'uso di una rete neurale

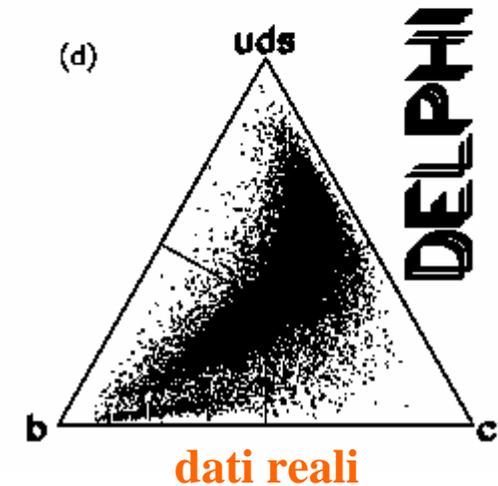
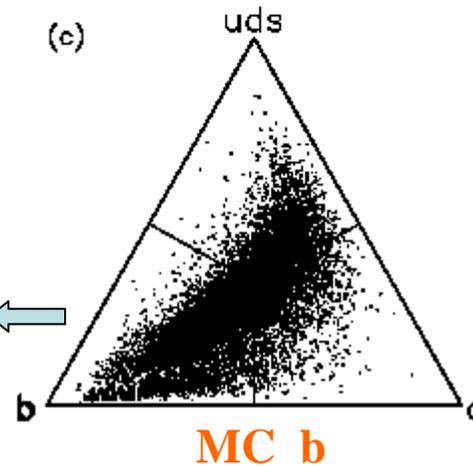
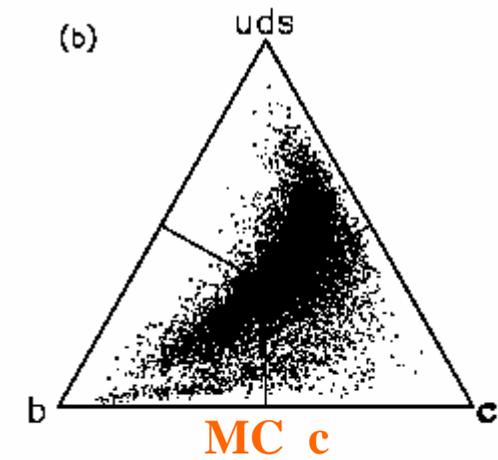
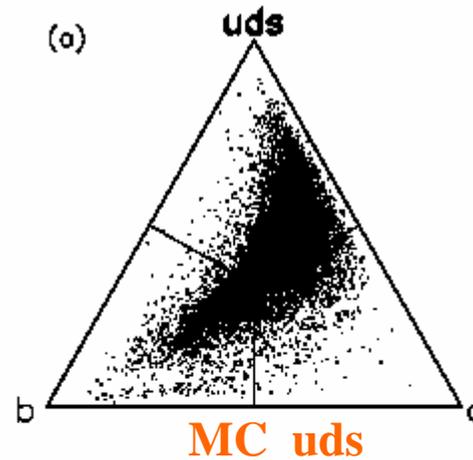
19 variabili in ingresso:

- P del muone piu' energetico
- Pt del muone piu' energetico
- Somma dei parametri d'impatto delle tracce
- Sfericita' , Masse invarianti nei vari jets

3 variabili in uscita:

- Probabilità di quark uds
- Probabilità di quark c
- Probabilità di quark b

$$R_b = \frac{\Gamma_b}{\Gamma_h}$$



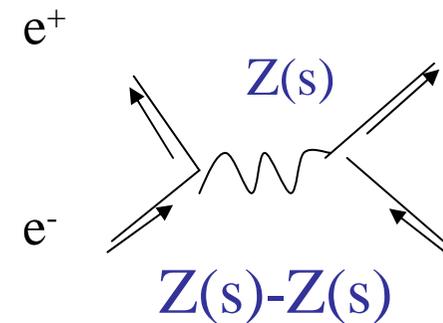
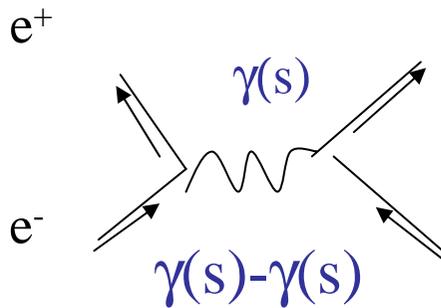


# Line shape della Z



Con line shape si intende l'andamento  $\sigma(s)$   $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$  s intorno ad  $M_Z$   
 Può essere osservato un singolo fermione od un insieme (ad esempio tutti i quarks)

$$\sigma_{TOT} = \sum_f \sigma_{f\bar{f}}$$



$$\left(\frac{d\sigma_{f\bar{f}}}{d\Omega}\right)^{EW} = \left(\frac{d\sigma_{f\bar{f}}}{d\Omega}\right)^{em} + \left(\frac{d\sigma_{f\bar{f}}}{d\Omega}\right)^{int} + \left(\frac{d\sigma_{f\bar{f}}}{d\Omega}\right)^W$$

$$\left(\frac{d\sigma_{f\bar{f}}}{d\Omega}\right)^{em} = \frac{\alpha^2 Q_f^2 N_c}{4s} (1 + \cos^2 \theta)$$

Leptone	I	I <sub>3</sub>
$\nu_e$	1/2	1/2
$e^-_L$	1/2	-1/2
$e^-_R$	0	0

Quark	I	I <sub>3</sub>
$u_L$	1/2	1/2
$d_L$	1/2	-1/2

Quark	I	I <sub>3</sub>
$u_R$	0	0
$d_R$	0	0

Spin isotopico



$$\left( \frac{d\sigma_{f\bar{f}}}{d\Omega} \right)^{EW} = \frac{\alpha^2 Q_F^2 N_C}{4s} \left[ F_1(s)(1 + \cos^2 \vartheta) + F_2(s) \cos \vartheta \right]$$

termine di asimmetria

All'ordine più basso la line shape è semplicemente una Breit-Wigner caratterizzata da 3 parametri  
 Massa ( $M_Z$ ) – Larghezza ( $\Gamma_Z$ ) – Sezione di picco ( $\sigma_0$ )

$$\sigma^{EW}(s) = \frac{s \Gamma_Z^2}{(s - M_Z^2)^2 + M_Z^2 \Gamma_Z^2} \left[ \sigma_0 + I \frac{s - M_Z^2}{s} \right] + \frac{4\pi Q_f^2 \alpha^2 N_C}{3s}$$

termine di risonanza (Breit – Wigner)

( $I \propto Q_e Q_f$ )

$$\sigma_0 = \frac{12\pi \Gamma_e \Gamma_f}{M_Z^2 \Gamma_Z^2} \quad \Gamma_f = N_C \frac{G_F M_Z^3}{6\pi \sqrt{2}} (g_{Vf}^2 + g_{Af}^2) \quad \Gamma_Z = \sum_f \Gamma_f$$

trascurato i termini in  $(m_f / M_Z)^2$

$$g_{Vf} = I_{3f} - 2 Q_f \sin^2 \theta_W$$

$$g_{Af} = I_{3f}$$

$g_V, g_A$ : costanti di accoppiamento vettore e assiale-vettore della Z ai fermioni



$\Gamma_Z$  larghezza della risonanza     $\Gamma_f / \Gamma_Z$  rapporti di decadimento



$$G_F = (1.16637 \pm 0.00001) 10^{-5} GeV \quad M_Z = 91.1876 \pm 0.0021 GeV \quad \sin \theta_W = 0.23120 \pm 0.00015$$

$$\Gamma_f = N_C \frac{G_F M_Z^3}{6\pi\sqrt{2}} (g_{Vf}^2 + g_{Af}^2) \quad g_{Vf} = I_{3f} - 2 Q_f \sin^2 \theta_W \quad g_{Af} = I_{3f}$$

$$\Gamma_\nu = \frac{G_F M_Z^3}{6\pi\sqrt{2}} (1/4 + 1/4) = 165.88 \pm 0.01 MeV \quad \times 3 \text{ famiglie}$$

$$\Gamma_l = \frac{G_F M_Z^3}{6\pi\sqrt{2}} (0.0014 + 1/4) = 83.419 \pm 0.005 MeV \quad \times 3 \text{ famiglie}$$

$$\Gamma_{u.c} = 3 \frac{G_F M_Z^3}{6\pi\sqrt{2}} (0.0368 + 1/4) = 285.446 \pm 0.015 MeV \quad \times 2 \text{ famiglie}$$

$$\Gamma_{d.s,b} = 3 \frac{G_F M_Z^3}{6\pi\sqrt{2}} (0.1197 + 1/4) = 367.95 \pm 0.02 MeV \quad \times 3 \text{ famiglie}$$

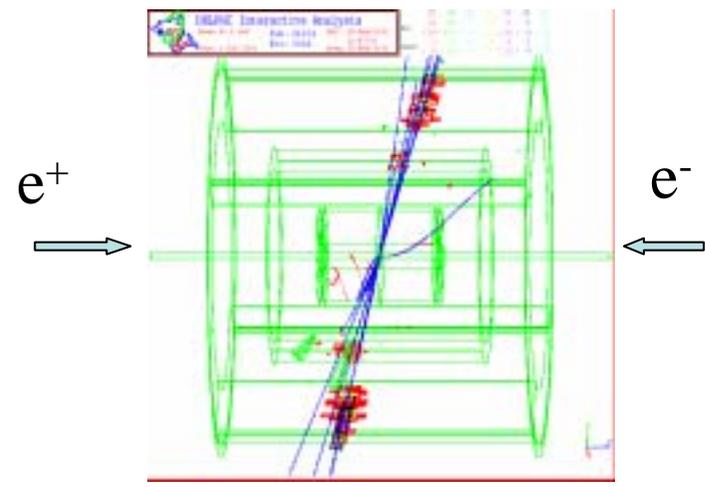
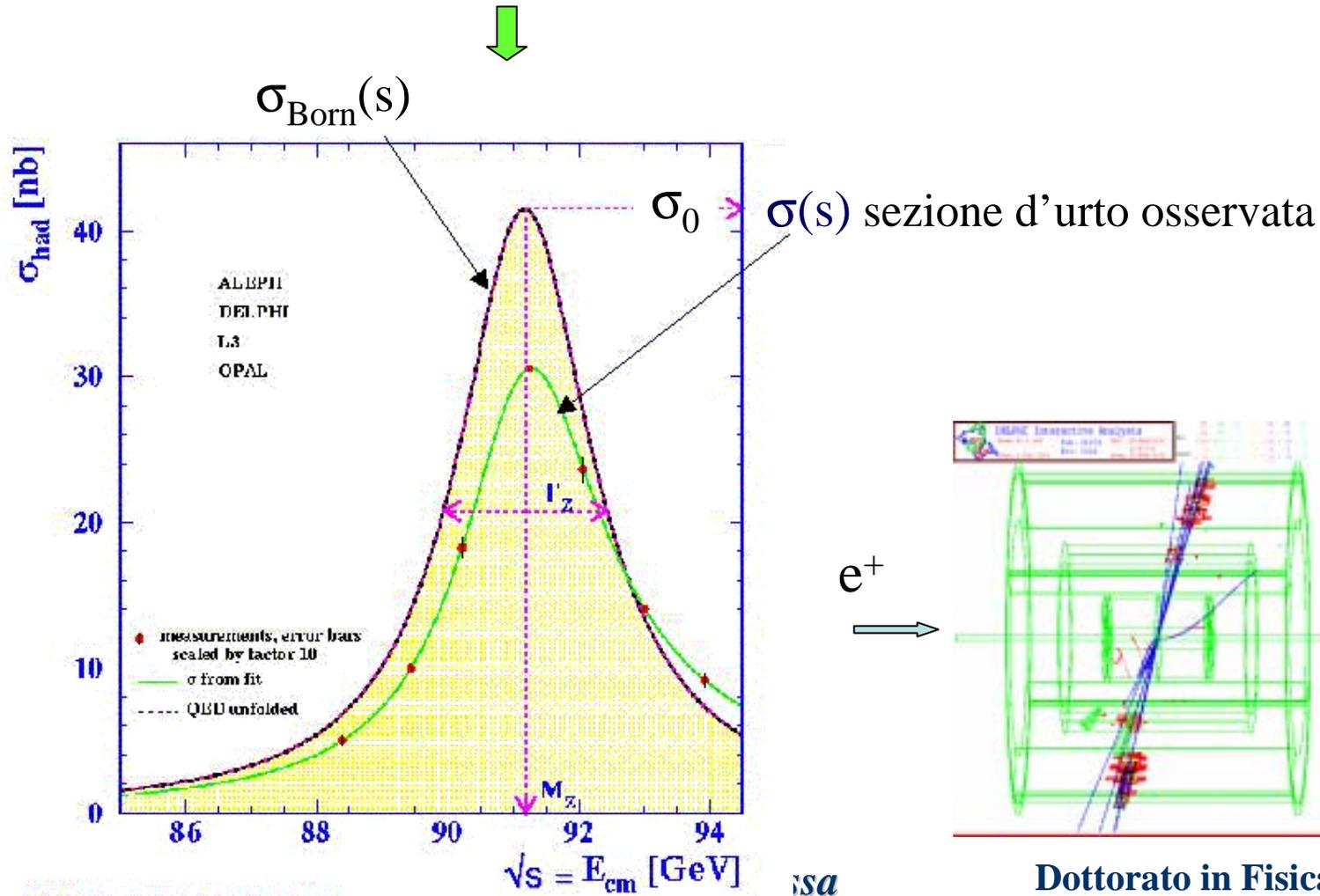
$$\Gamma_Z = 2422.64 \pm 0.07 MeV \quad \Gamma_Z^{sper} = 2495.6 \pm 2.1 MeV \quad \Delta\Gamma \approx 3\%$$



# Rapporti di decadimento

$\sigma(s) \quad e^+e^- \rightarrow \text{adroni}$

Processo	$\Gamma_{ff} / \Gamma_Z$ (%)	B.R. sperim. (%)
Neutrini	20.54	$20.00 \pm 0.06$
Leptoni	10.33	$10.10 \pm 0.02$
Adroni	69.13	$69.91 \pm 0.06$





# Correzioni radiative

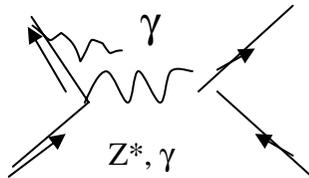


Le **correzioni radiative** modificano significativamente le predizioni a livello albero:

## Correzioni QED

### (1) Radiazione di stato iniziale

Effetto importante: abbassa la sezione d'urto totale di ~30% + spostamento del picco ~100 MeV



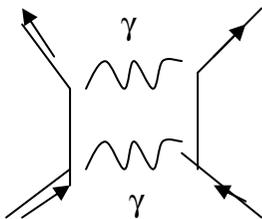
Correzione radiazione di stato iniziale

$$\sigma(s) = \int_0^s [\sigma_{Born}(s' = sz) G(s', s)] ds'$$

$G(s', s)$  = funzione di radiazione di stato iniziale

$1-z = k^2/s$  frazione impulso del fotone

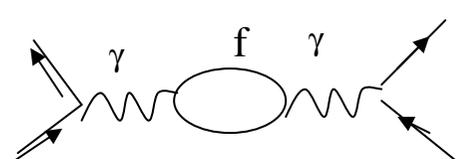
### (2) Interferenza tra rad. di stato iniziale e finale



$$\sigma(s) = \int_0^s [\sigma_{Born}(s' = sz) H(s, s') + \Delta(s, s')] ds'$$



### (3) Correzioni del propagatore (polarizzazione del vuoto)

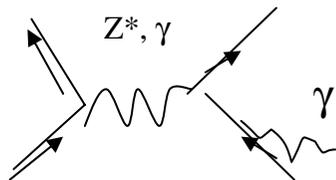


$$+ n \text{ loop} \quad \alpha(Q^2) = \frac{\alpha(\mu^2)}{1 - \frac{\alpha(\mu^2)}{3\pi} \log\left(\frac{Q^2}{\mu^2}\right)} \quad Q^2 \gg m_f^2$$

$$\alpha(Q^2) = \frac{\alpha_0}{1 + \Pi_{\gamma\gamma}(Q^2)} \quad \alpha_0 = \frac{1}{137} \quad \Pi_{\gamma\gamma}(M_Z) \approx -0.064 \Rightarrow \alpha(M_Z) = \frac{1}{128}$$

$$\alpha(95 \text{ GeV}) - \alpha(88 \text{ GeV}) \approx 10^{-6}$$

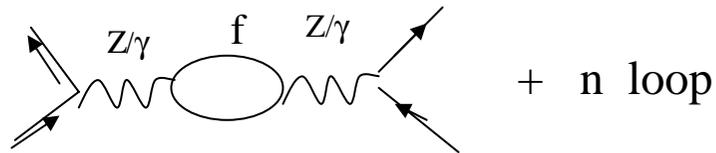
### (1) Radiazione di stato finale



$$\Gamma_h = \sum_f \Gamma_0^f (1 + \delta_{QED}^f) \quad \delta_{QED}^f = \frac{3\alpha Q_f^2}{4\pi}$$



## (1) Correzioni del propagatore



$$\alpha \rightarrow \alpha(s) = \frac{\alpha}{1 + \Pi_{\gamma\gamma}(s)}$$

$$\sin^2 \theta_W \rightarrow \sin^2 \bar{\theta}_W(s) = \sin^2 \theta_W - \cos \theta_W \sin \theta_W \frac{\Pi_{\gamma Z}(s)}{1 + \Pi_{\gamma\gamma}(s)}$$

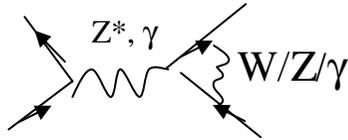
$$G_F \rightarrow G_F(s) = \frac{G_F}{1 + \Pi_Z(s)}$$

$$\Gamma \rightarrow \Gamma(s) = s\Gamma / M_Z^2$$



## (2) Correzioni di vertice

Contribuiscono termini con top virtuale



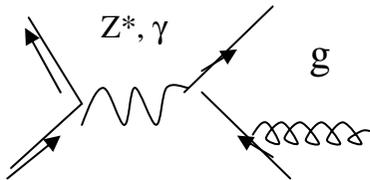
$$g_{Vf} \rightarrow \bar{g}_{Vf}(s, m_t) = \sqrt{\rho_f} (I_{3f} - 2Q_f \sin^2 \theta_W)$$



$$g_{Af} \rightarrow \bar{g}_{Af}(s, m_t) = \sqrt{\rho_f} I_{3f} \quad \rho_f \approx 1 + \frac{\alpha(M_Z)}{\pi} \frac{m_t^2}{m_Z^2}$$

## Correzioni QCD

### (1) Radiazione di stato finale



$$\Gamma_h = \sum_f \Gamma_0^f (1 + \delta_{QED}^f) (1 + \delta_{QCD})$$

$$\delta_{QED}^f = \frac{3\alpha Q_f^2}{4\pi} \approx 0.17\%$$

$$\delta_{QCD}^f = \frac{\alpha_s(M_Z^2)}{\pi} \approx 3.8\%$$



# Line shape



$$\sigma(s) = \int_0^s [\sigma_W(s' = sz)H(s, s') + \Delta(s, s')] ds'$$

Interferenza Scambio fotone

$$\sigma_W(s) = \sigma_0 \frac{s \Gamma_Z^2}{(s - M_Z^2)^2 + (s^2 / M_Z^2) \Gamma_Z^2} + \sigma_{\gamma Z} + \sigma_\gamma$$

$$\sigma_0 = \frac{12\pi \Gamma_e \Gamma_{hadr}}{M_Z^2 \Gamma_Z^2}$$

$$\Gamma_f = N_C \frac{G_F M_Z^3}{6\pi\sqrt{2}} (\overline{g_{V_e}} + \overline{g_{A_e}}) (1 + \delta_f^{QED}) (1 + \delta_f^{QCD})$$

$$\overline{g_{A_f}} = \sqrt{\rho_f} I_{3f}$$

$$\overline{g_{V_f}} = \sqrt{\rho_f} (I_{3f} - 2Q_f \sin^2 \theta_W)$$

$$M_Z \quad \Gamma_Z \quad \sigma_0$$



$$M_Z$$

$$\Gamma_Z$$

$$\sigma_0^h, \sigma_0^e, \sigma_0^\mu, \sigma_0^\tau$$



$$M_Z$$

$$\Gamma_Z$$

$$\Gamma^e \Gamma^h, \Gamma^e \Gamma^e, \Gamma^e \Gamma^\mu, \Gamma^e \Gamma^\tau$$

$$M_Z = 91.1876 \pm 0.0021 \text{ GeV}$$

$$\Gamma_Z = 2.4952 \pm 0.0023 \text{ GeV}$$

$$\Gamma_e / \Gamma_Z = 3.363 \pm 0.004 \%$$

$$\Gamma_\mu / \Gamma_Z = 3.366 \pm 0.007 \%$$

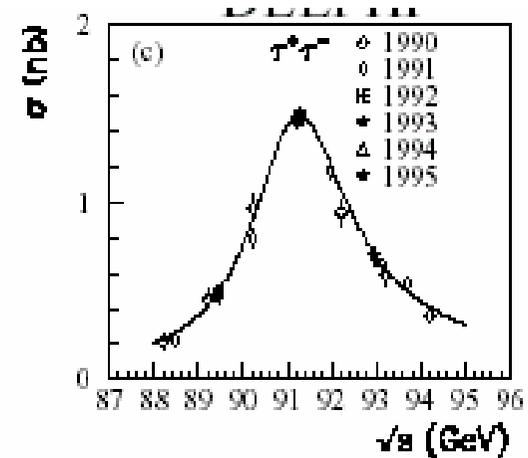
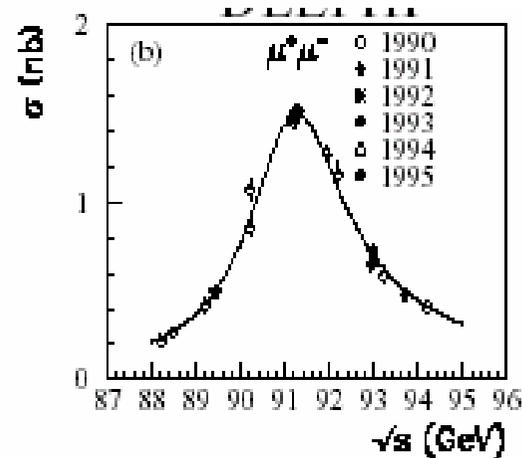
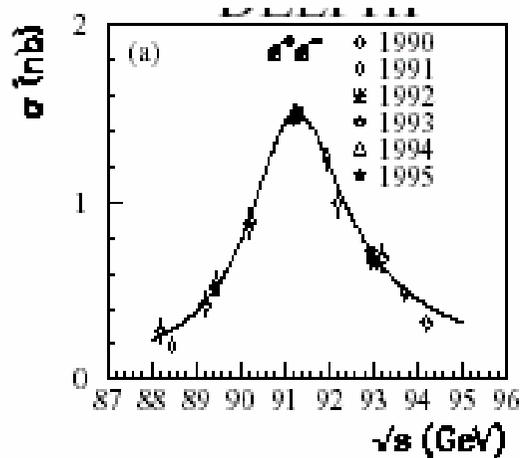
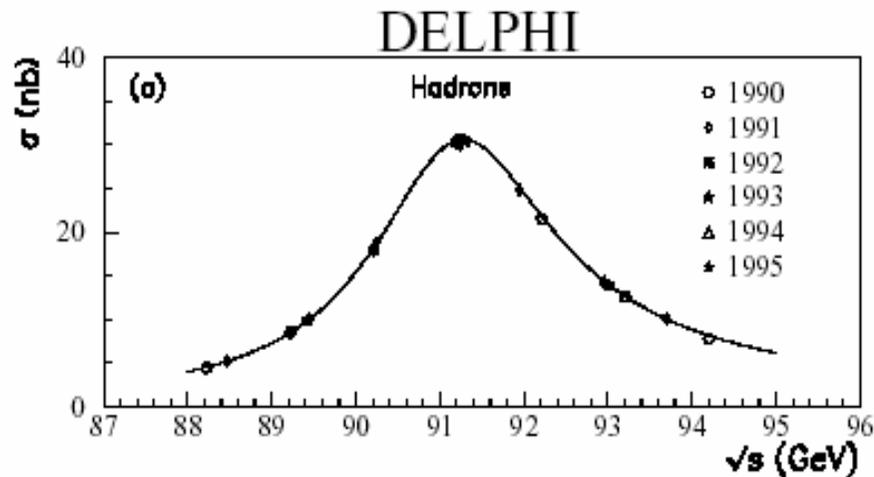
$$\Gamma_\tau / \Gamma_Z = 3.370 \pm 0.008 \%$$

$$\Gamma_h / \Gamma_Z = 69.91 \pm 0.06 \%$$

$$\Gamma_\nu / \Gamma_Z = 20.00 \pm 0.06 \%$$

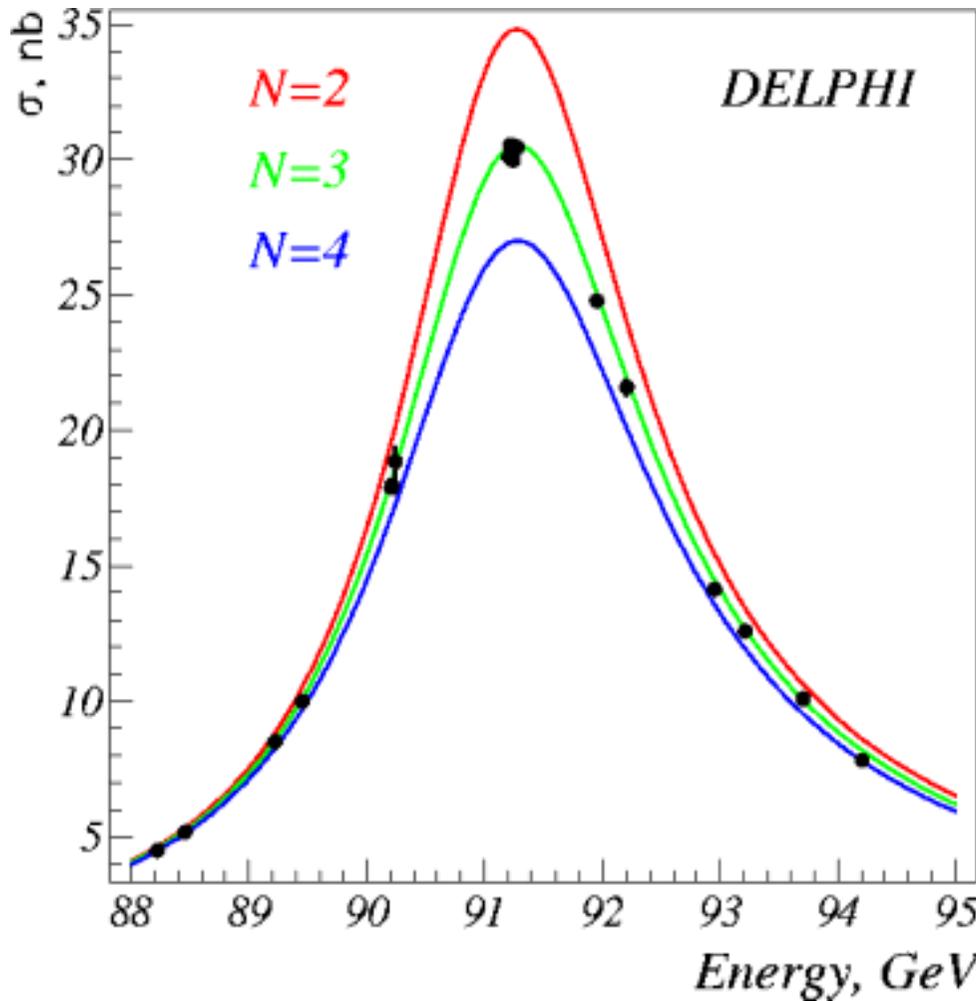
PDG

2004





# Numero di neutrini



Posso aggiungere come parametro libero il numero di famiglie di neutrini

→  $N_\nu = 2.9841 \pm 0.0083$   
 $\Gamma_{inv}^x = -2.7_{-1.5}^{+1.7} \text{ MeV}$

↓  
 $\Gamma_{inv} = \Gamma_Z - \Gamma_{had} - 3\Gamma_{lept} - 3\Gamma_\nu$

assumendo, dallo SM:

$$\frac{\Gamma_\nu}{\Gamma_\ell} = \frac{g_{V\nu}^2 + g_{A\nu}^2}{g_{V\ell}^2 + g_{A\ell}^2} = \frac{1/4 + 1/4}{(-1/2 + 2\sin^2\theta_w)^2 + 1/4} = 1.990$$

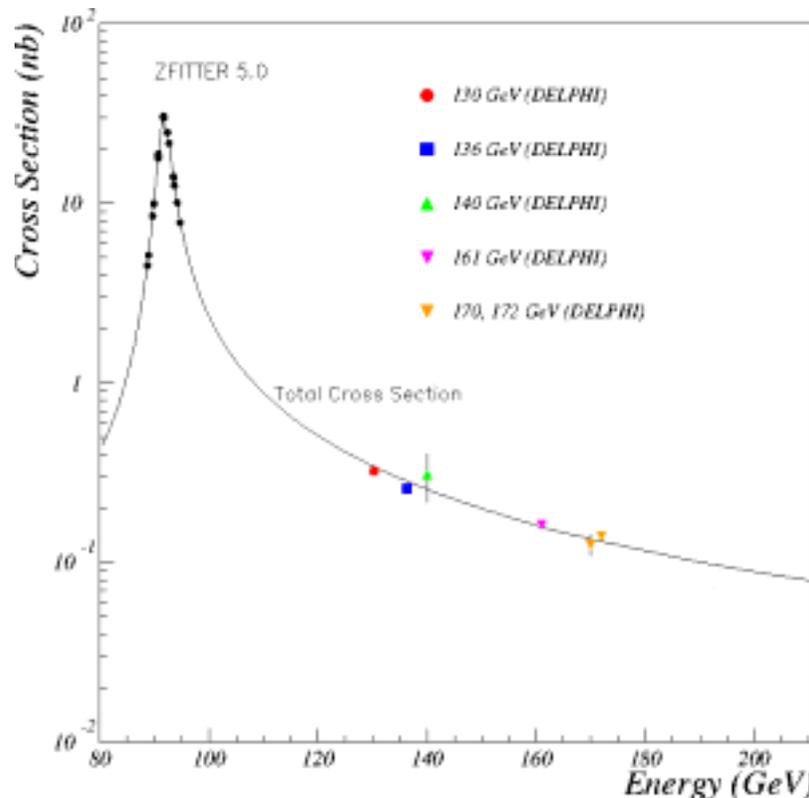
-----> 0.231



# Residua dipendenza dal modello



- assunzione della QED nel calcolo della funzione di radiazione  $H(s,s')$ , dell' ampiezza di interferenza  $\Delta(s,s')$  tra fotoni in stato iniziale e finale, del termine  $\sigma_\gamma(s)$
- assunzione della  $QE_W D$  nel calcolo del termine di interferenza  $\sigma_{\gamma Z}(s)$
- assunzione della QCD nel termine di correzione per la emissione di gluoni negli stati finali adronici

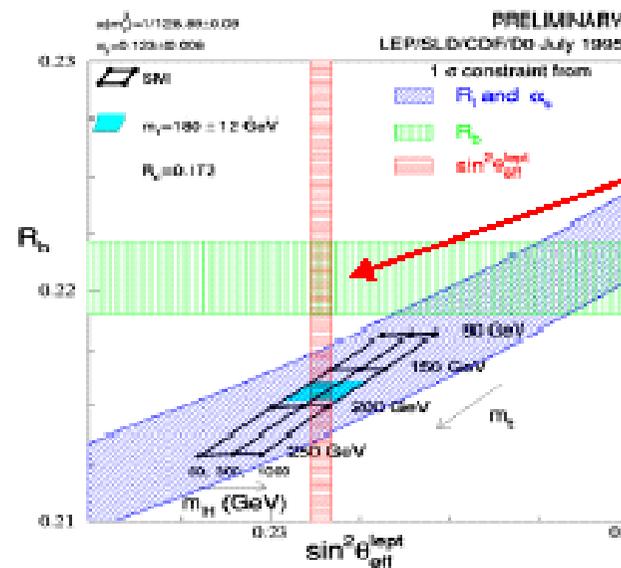
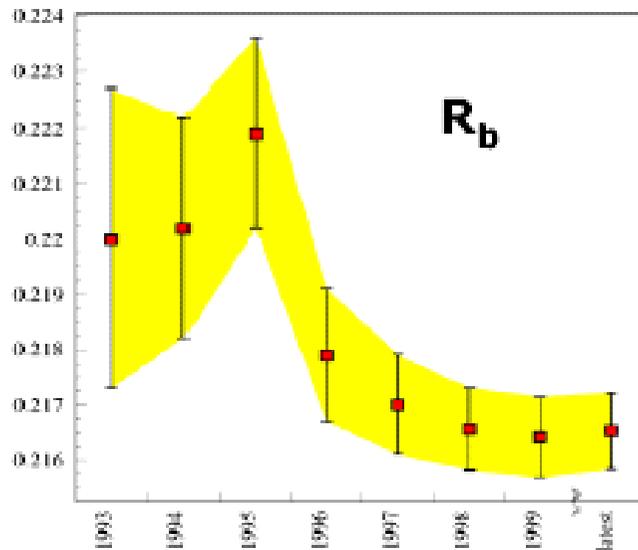
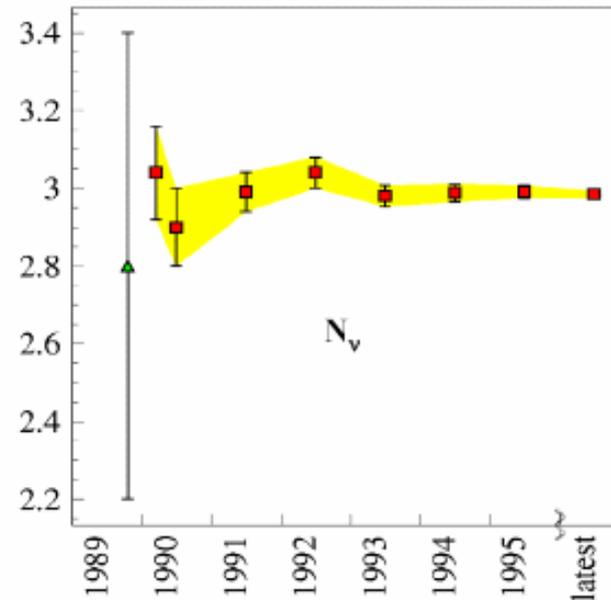
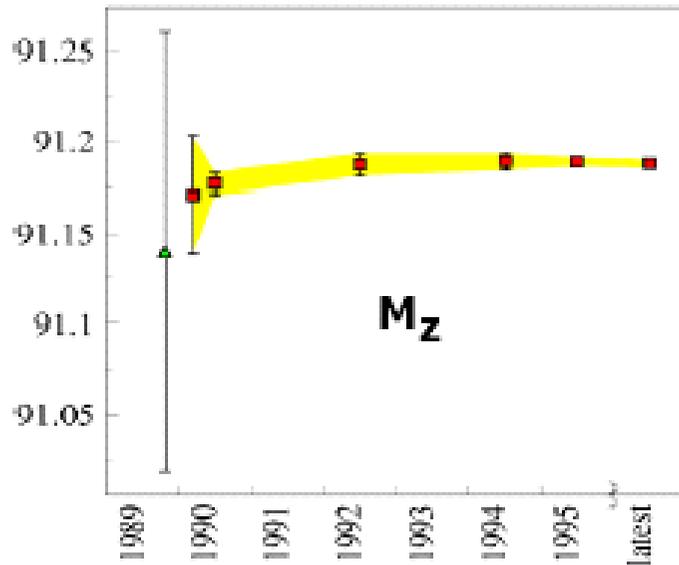


$$\sigma^{EW}(s) = \frac{s \Gamma_Z^2}{(s - M_Z^2)^2 + (s^2 / M_Z^2) \Gamma_Z^2} \left[ \sigma_0 + I \frac{s - M_Z^2}{s} \right] + \frac{4\pi Q_f^2 \alpha^2 N_c}{3s}$$

Con i dati ad alta energia ( $\sqrt{s} = 130-200$  GeV), anche il termine di interferenza può essere ricavato dai dati.



# Misure dal 1989 ad oggi



Padova 18 Maggio 2005

Ezio Torassa

Dottorato in Fisica XX Ciclo



## **Introduzione alla fisica delle particelle sperimentali:**

Quarks & Leptons – Francis Halzen / Alan D. Martin – Wiley International Edition

## **Fondamenti sperimentali della Fisica delle particelle:**

The Experimental Foundation of Particle Physics – Robert N. Cahn / Gerson Goldhaber  
Cambridge University Press

## **Decadimenti adronici e leptonici della Z:**

Determination of Z resonance parameters and coupling from its hadronic and leptonic decays - Nucl. Physics B 367 (1991) 511-574

## **Z Line Shape:**

Z Physics at LEP I CERN 89-08 Vol 1 – Z Line Shape (pag. 89)

Measurement of the lineshape of the Z and determination of electroweak parameters from its hadronic decays - Nuclear Physics B 417 (1994) 3-57