

## La fisica a LEP-200.

Alla fine del 1995 LEP inizio' ad aumentare l'energia nel centro di massa. I primi run nel 1995 furono alle energie del centro di massa di 130 e 136 GeV. Nel 1996 si presero dati alle energie di 161 e 172 GeV nel centro di massa, ovvero alla soglia di produzione di 2 W e subito sopra. Negli anni successivi si aumento' di energia fino ad arrivare ad un massimo di 209 GeV nel 2000, ultimo anno di presa dati di LEP.

In tabella sono elencate per ogni anno le energie nel centro di massa e la luminosita' raccolta per esperimento.

Anno	1995	1995	1996	1996	1997	1998	1999	1999	1999	1999	2000
Ecm	130	136	161	172	183	189	192	196	200	202	204-209
Lum(pb <sup>-1</sup> )	2.5	2.5	11	11	55	160	30	80	80	40	220

All'aumentare dell'energia del centro di massa si va oltre la risonanza del bosone Z, e la sezione d'urto per i processi a 4 fermioni diventano accessibili. In particolare sopra l'energia di 161 GeV si apre la produzione di WW reali e per energie superiori di 183 GeV coppie di ZZ reali possono essere prodotte.

Molti processi e dunque diversi stati finali sono stati studiati con precisione a LEP2. La figura 32 mostra le previsioni del MS e le misure sperimentali dell'esperimento L3.

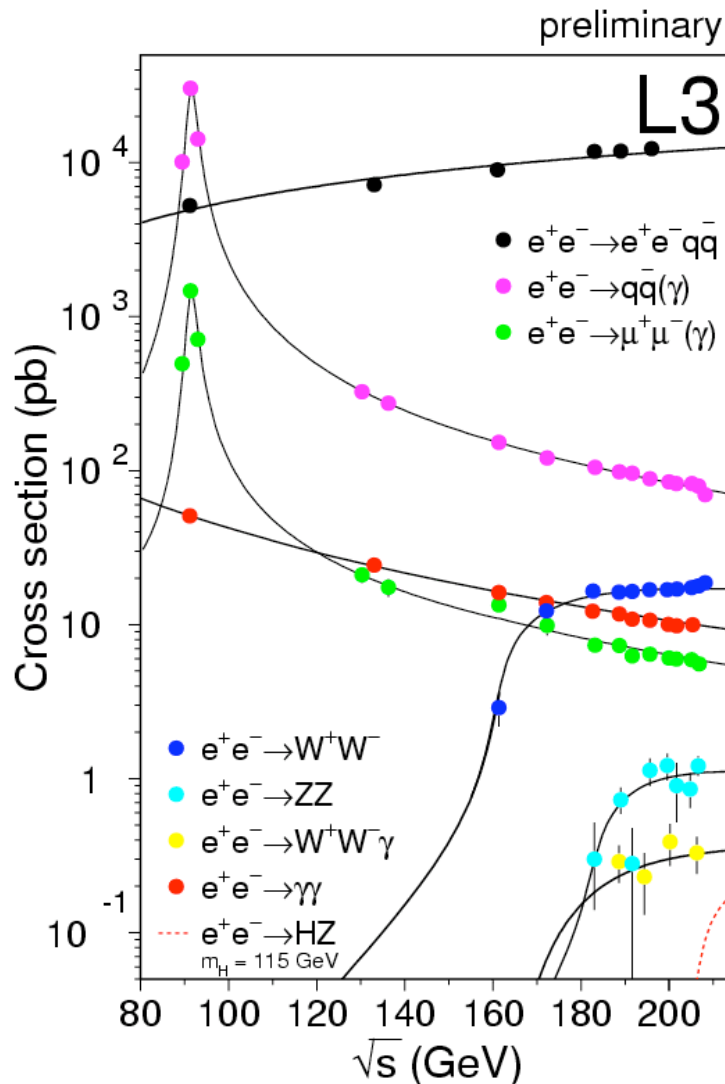
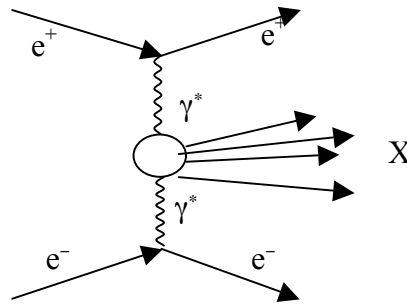


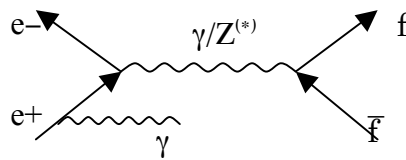
Fig.32

Possiamo distinguere 3 tipi di processi.

1) I processi in cui vengono scambiati 2 fotoni virtuali (caratterizzati da alte sezioni d'urto) hanno nello stato finale i 2 elettroni scatterati e il prodotto dell'adronizzazione dei 2 fotoni virtuali. Un esempio di processo a "2 fotoni" e' mostrato qua di seguito.



2) I processi a 2 fermioni, ovvero dove vengono prodotti solo 2 fermioni nello stato finale:



Per questo tipo di processo si avranno tre tipi di eventi. i) Eventi in cui tutta l'energia viene trasferita dai 2 elettroni ai 2 fermioni. I 2 fermioni saranno back-to-back nello spazio e l'evento sara' collineare e coplanare. ii) Eventi in cui un fotone energetico viene emesso da uno dei due elettroni incidenti (radiazione di stato iniziale o ISR) e il propagatore sara' una  $Z$  reale. I 2 fermioni saranno coplanari, ma non acollineari, in quanto la  $Z$  rincula rispetto al fotone di ISR. Il fotone di ISR ha una distribuzione piccata a  $\theta=0^\circ$ , per cui la maggior parte di essi andra' nella beam-pipe e non verra' rivelata. Una piccola percentuale puo' invece entrare nel rivelatore ed eventualmente adronizzare in 1 o piu' jet o particelle. Tra questi due tipi di eventi caratterizzati da alta sezione d'urto, c'e' la terza topologia: iii) i due fermioni prodotti non risuonano alla  $Z$ , e hanno un'energia intermedia tra  $M_Z$  e  $E_{cm}$ . Il fotone di ISR emesso puo' o meno essere rivelato e puo' o meno adronizzare.

La figura 33 mostra la distribuzione di massa invariante dello stato finale a due fermioni (due quark in questo caso) per  $E_{cm}=172$  GeV. Si riconosce il picco alla  $Z$ , seguito dalla zona intermedia e infine la risalita di sezione d'urto per  $E_{qq}=E_{cm}$ .

La figura 34 mostra un evento  $\bar{e}e \rightarrow Z \rightarrow \gamma\bar{q}q$ . L'evento nel piano trasversale e' coplanare (come gli eventi a LEP-100) ma nel piano lungo la direzione dei fasci e' acollineare, ovvero i due fermioni rinculano rispetto al fotone che viene perso lungo la beam pipe.

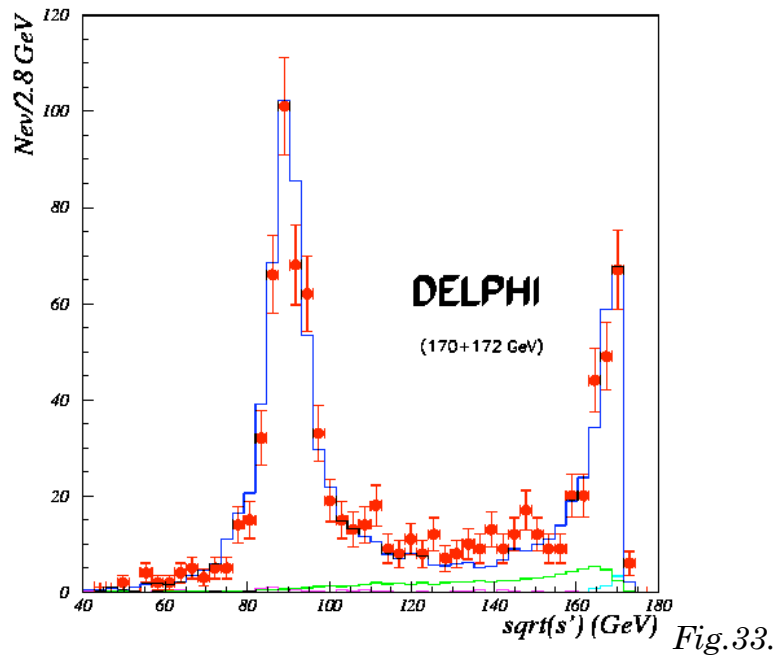


Fig.33.

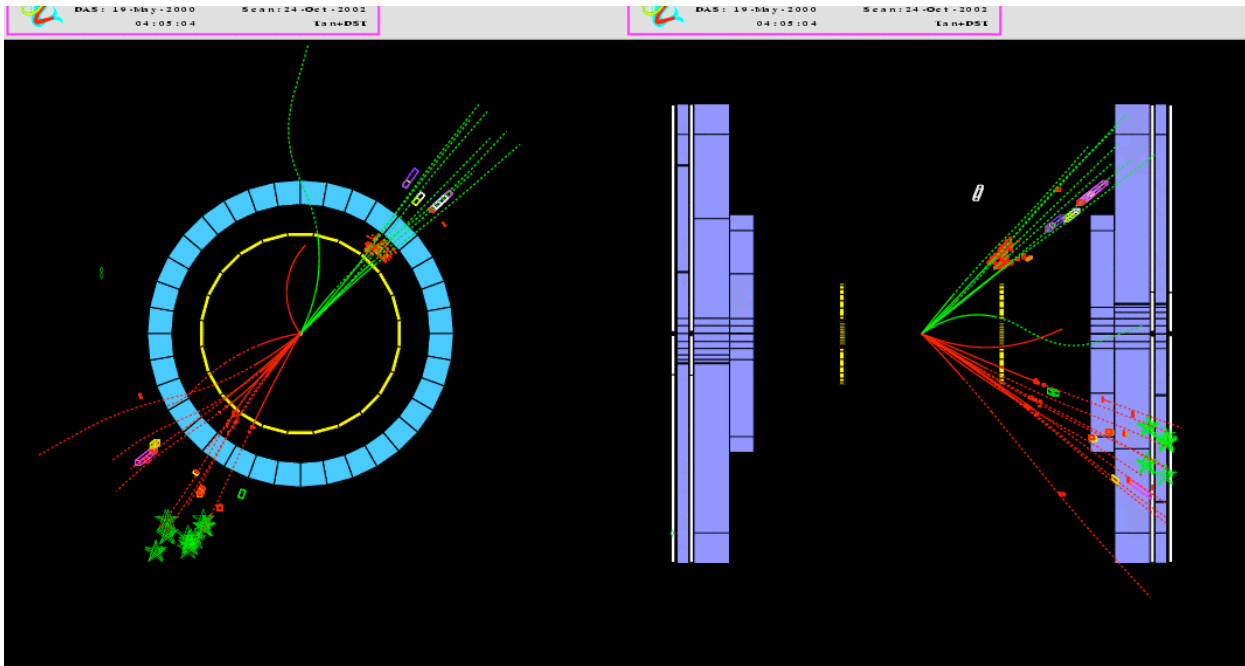
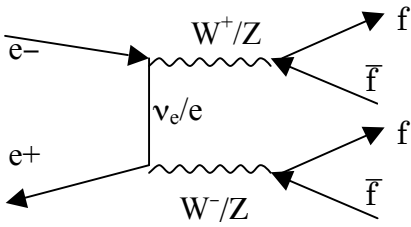
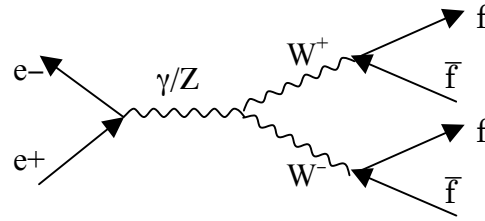


Fig.34

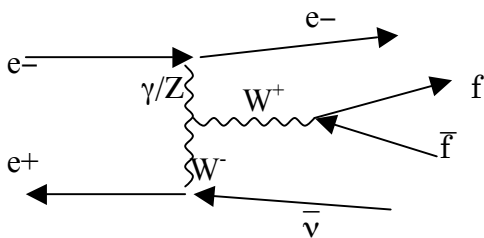
3) I processi a 4 fermioni. Di questi si hanno 2 categorie: processi in cui vengono prodotti 2 bosoni nell'urto tra elettrone e positrone e processi in cui 1 solo bosone di gauge viene prodotto, come mostrato nei digrammi seguenti



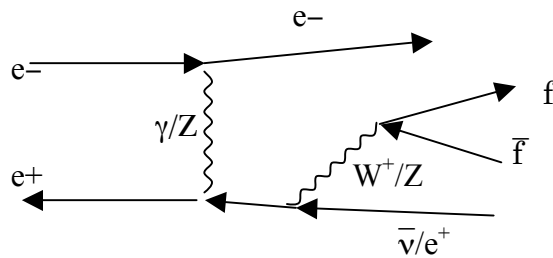
Produzione di coppie di WW o ZZ



Produzione di coppie di WW



Produzione di singolo W



Produzione di singolo W o singolo Z

Fig.35

Questi ultimi due processi non sono mostrati in figura 32, ma sono entrambi stati misurati a LEP. Le sezioni d'urto sono piccole e dell'ordine del pb. Nello stato finale si avranno 4 fermioni. Si osserva un buon accordo tra dati e predizioni del MS.

La misura delle sezioni d'urto di tutti questi processi (a 2 e 4 fermioni) in funzione dell'energia del centro di massa e' un buon test del Modello Standard. La precisione raggiunta a LEP nella misura dei processi a 2 e 4 fermioni e' stata superiore del previsto e si sono di conseguenza dovuti raffinare i conti teorici. (Ricordiamo che a Torino molti teorici hanno partecipato attivamente ai conti e alla scrittura dei MonteCarli per LEP2: E.Accomando, A.Ballestrero, E.Maina, G.Passarino, R.Pittau).

Forse la misura di sezione d'urto piu' importante e' quella di produzione di coppie di bosoni W, mostrata in figura 36. Le 3 curve sono le predizioni teoriche del MS nel caso in cui: a) solo il primo diagramma di figura 35 (ovvero lo scambio di neutrino) contribuisca, 2) anche il secondo diagramma di figura 35, ovvero la produzione di WW mediante accoppiamento triplo con un fotone contribuisca insieme al processo di scambio di neutrino, e infine 3) sia lo scambio di neutrino sia i digrammi con accoppiamento triplo con fotone e con Z contribuiscano. I dati sperimentali sono in perfetto accordo con la terza curva. Questa e' una chiara evidenza sperimentale che esistano gli accoppiamenti triplici e la teoria delle interazioni elettrodeboli sia una teoria abeliana.

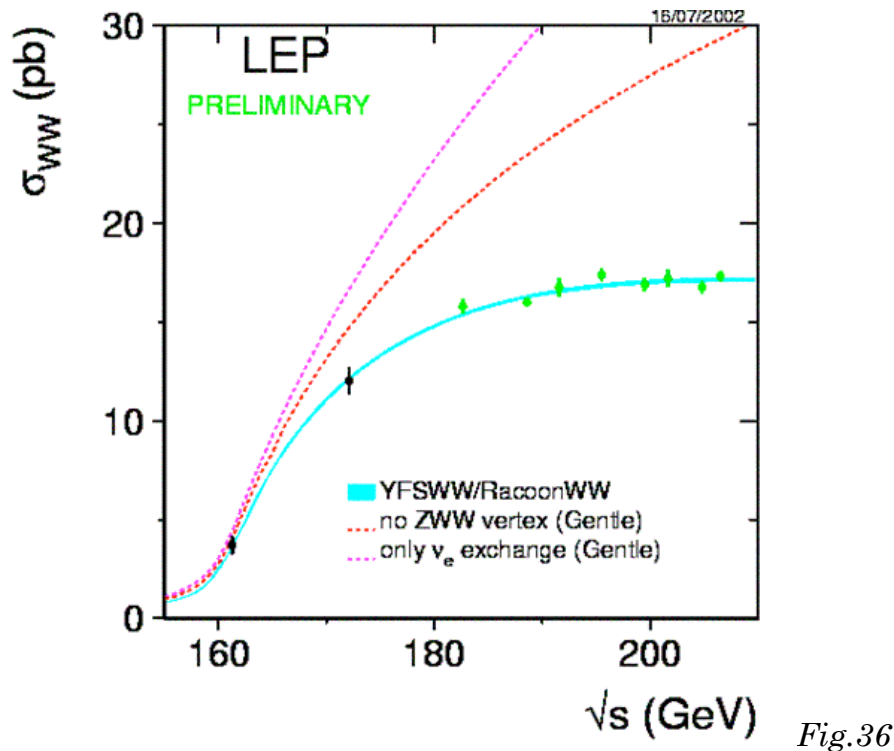


Fig.36

A LEP e' possibile anche misurare gli accoppiamenti tra bosoni di gauge, ovvero i vertici triplici, con risoluzioni del %, e gli accoppiamenti quartici con risoluzione inferiore, dato che le sezioni d'urto sono inferiori. Si misurano diversi da zero e in accordo con il MS gli accoppiamenti  $ZWW$ ,  $\gamma WW$ ,  $Z\gamma WW$ ,  $\gamma\gamma WW$  e si misurano nulli, in accordo con il MS, gli accoppiamenti  $ZZ\gamma$ ,  $ZZZ$ .

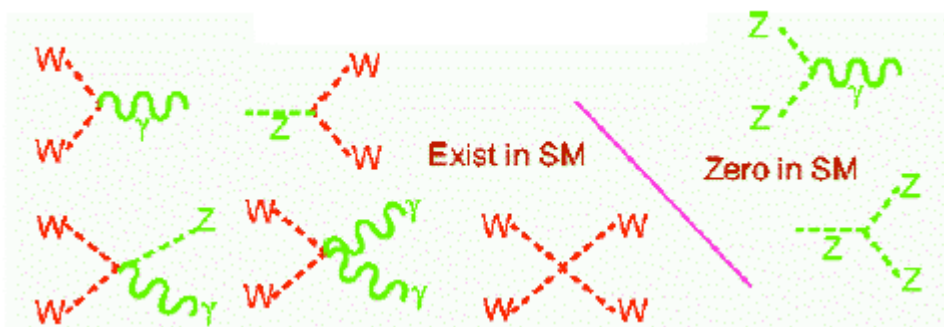


Fig.37

Di particolare importanza per la fisica elettrodebole e' la misura della massa del bosone W. Una alta precisione sul valore della sua massa e' necessaria per un test stringente del MS e per la misura indiretta della massa dell'Higgs via l'espressione delle correzioni radiative. In figura 38 sono mostrati 4 tipici eventi di produzione di coppie di W:

$$\begin{aligned}
 e^+e^- &\rightarrow W^+W^- \rightarrow e^+\nu_e\mu^-\bar{\nu}_\mu \\
 e^+e^- &\rightarrow W^+W^- \rightarrow q\bar{q}'e\nu_e \\
 e^+e^- &\rightarrow W^+W^- \rightarrow q\bar{q}'\mu^-\bar{\nu}_\mu \\
 e^+e^- &\rightarrow W^+W^- \rightarrow q\bar{q}'q''\bar{q}'''
 \end{aligned}$$

In aggiunta vi sono gli stati finali in cui il W decade in leptone tau e neutrino tau. A causa della presenza di uno o piu' neutrini nello stato finale, la precisione sulla misura della massa varia per i diversi stati finali. Di ugual peso sono gli stati finali totalmente adronici e

quelli semileptonici, mentre gli stati finali totalmente leptonici hanno un peso del solo 10%. A LEP il fatto di avere 1 solo neutrino nello stato finale non crea problemi, in quanto l'energia nel centro di massa (ovvero dell'interazione tra elettrone e positrone) e' estremamente ben nota e la conservazione energia-impulso puo' essere utilizzata come vincolo.

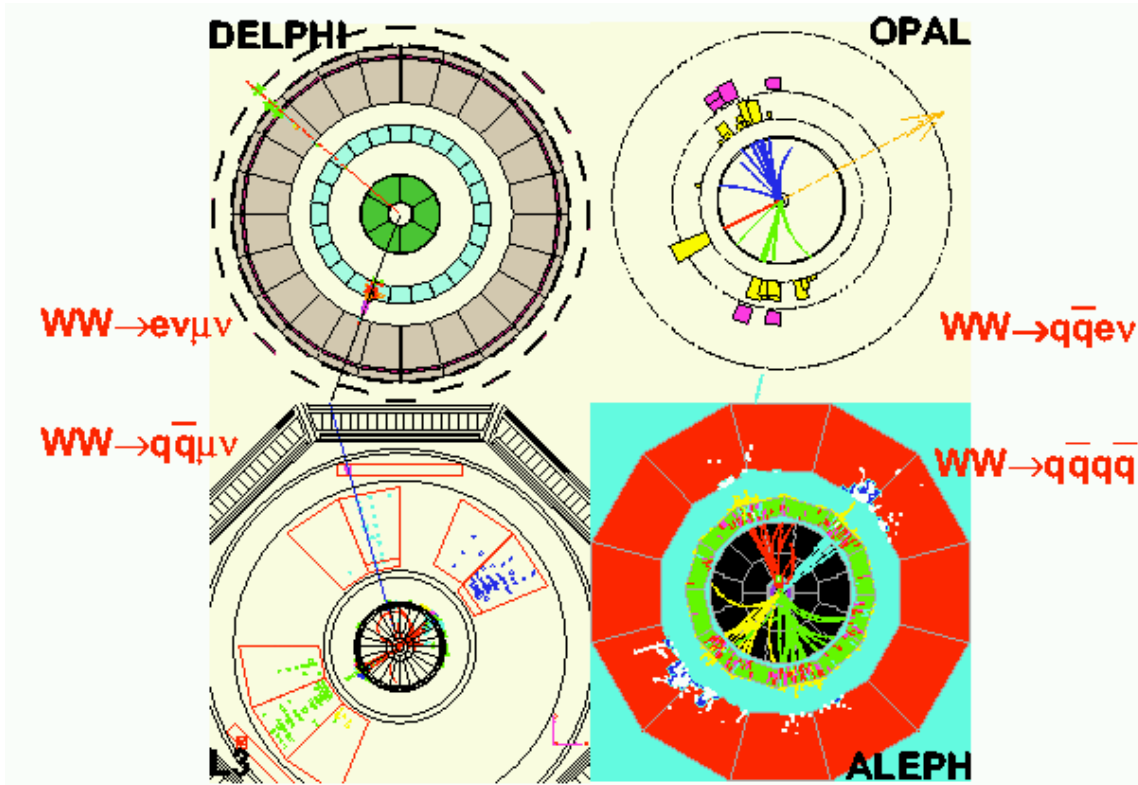


Fig.38

A LEP si sono misurate sia la massa, sia la larghezza del bosone W, sia le frazioni di decadimento (i Branching Ratios). Questi risultati sono finali. I valori mediati sui 4 esperimenti a LEP sono:

$$\begin{aligned}
 M(W) &= 80.376 \pm 0.033 \quad GeV/c^2 \\
 \Gamma(W) &= 2.196 \pm 0.083 \quad GeV/c^2 \\
 BR(W \rightarrow e\nu) &= 10.54 \pm 0.17 \\
 BR(W \rightarrow \mu\nu) &= 10.54 \pm 0.16 \\
 BR(W \rightarrow \tau\nu) &= 11.09 \pm 0.22 \\
 BR(W \rightarrow l\nu) &= 10.69 \pm 0.09 \\
 BR(W \rightarrow q\bar{q}) &= 67.92 \pm 0.27
 \end{aligned}$$

### Il Fit Elettrodebole Globale:

Combinando tutte le misure di precisione di LEP e SLD, con le misure del Tevatron e di altri esperimenti quali NuTeV e quello che misura la violazione di parita' nel cesio, e confrontandole con le predizioni teoriche del MS (ovvero con i programmi ZFITTER e ToPaZ0), si puo' effettuare un test stringente del Modello Standard e infine ottenere

informazioni sulla massa dell'Higgs. Le misure dirette e le misure indirette di alcune quantità possono essere messe a confronto ottenendo un ottimo test di consistenza.

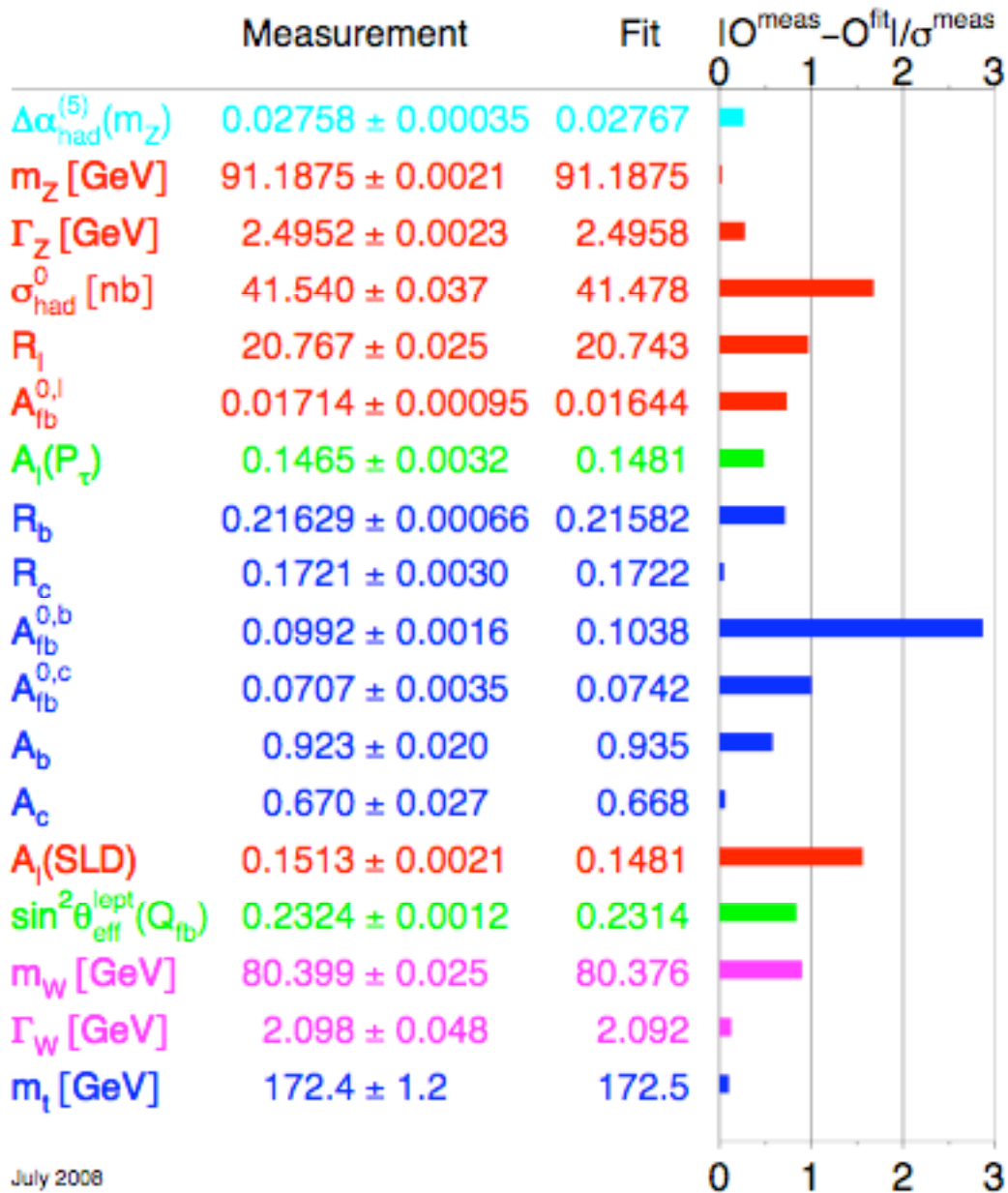


Fig.39

In figura 39 sono riassunti tutti i risultati sperimentali e la consistenza con il valore predetto dal MS. Si vede come ci sia un ottimo accordo tra dati e teoria. Solo la misura delle asimmetrie dei quark pesanti devia per piu' di 2 sigma. La probabilita' del fit e' del ~25%, ovvero un "chiquadro" per gradi di liberta' di 15/13.

Il fit globale puo' essere espresso in funzione della massa dell'unica particella predetta e non ancora osservata sperimentalmente (ovvero il bosone di Higgs). Come illustrato in figura 40, si hanno i limiti seguenti:

$$m(H) = 84_{-26}^{+34} \text{ GeV}/c^2$$

$$m(H) < 154 \text{ GeV}/c^2 \quad \text{al} \quad 95\%CL$$

Mentre dalle ricerche dirette dell'Higgs a LEP-200 si ha il limte inferiore di:

$m(H) < 114.4 \text{ GeV}/c^2$  al 95% CL.

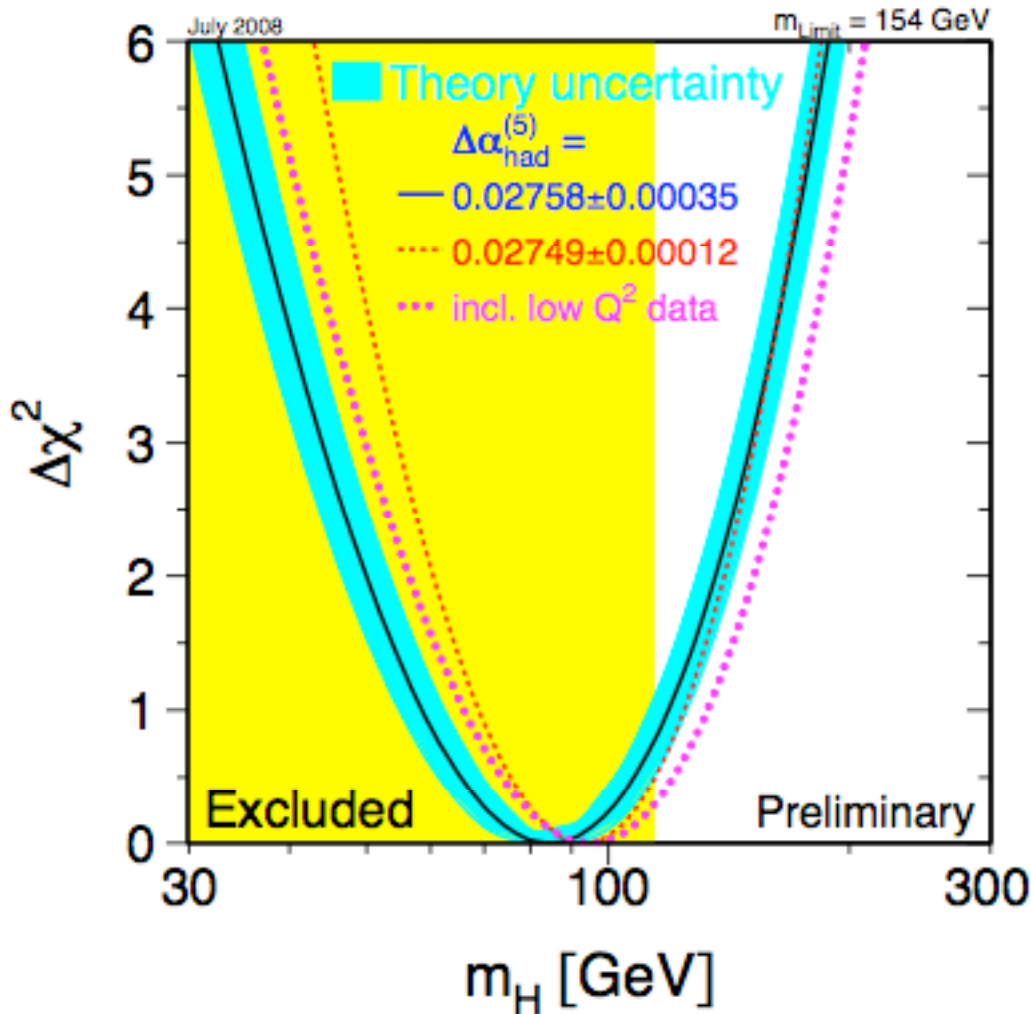


Fig.40

In figura 40 la curva nera e' il risultato del fit ai dati sperimentali, e la banda blu e' l'errore teorico. La curva rossa rappresenta il risultato del fit ai dati sperimentali quando viene variata la costante di accoppiamento elettromagnetica,  $\alpha_{\text{em}}$ . La curva tratteggiata rosa subito a lato di quella sperimentale nera, rappresenta il risultato se non si include l'esperimento NuTeV. La banda gialla a sinistra e' la zona esclusa al 95%CL dalla ricerca diretta a LEP-200. Si nota come, dati i risultati sperimentali all'estate 2004, ci sia una forte indicazione che la massa dell'Higgs sia leggera e sotto i 200 GeV. Bisogna pero' anche notare che la dipendenza delle correzioni radiative dalla massa dell'Higgs non sia forte (e' solo logaritmica) e che alcune misure danno indicazioni contrastanti sul valore centrale della massa dell'Higgs: ad esempio la massa del W e l'asimmetria Left-Right suggeriscono una massa dell'Higgs molto bassa (intorno ai 50 GeV), mentre le asimmetrie dei quark pesanti indicano masse dell'Higgs molto alta (intorno ai 500 GeV) cosi' come la misura di NuTeV.

In figura 41 a sinistra sono mostrate le varie misure dirette e indirette della massa del W. Le due misure dirette sono in ottimo accordo tra loro pur essendo ottenute in modo molto diverso: la prima al collider protone-antiprotone (agli esperimenti CDF e D0 al Tevatron) e misurando la massa trasversa in decadimenti semileptonici. La seconda e' la misura di LEP



ottenuta da una ricostruzione tridimensionale e usando tutti i diversi decadimenti. Le misure indirette della massa del W provengono invece dalla misura di  $\sin^2\theta_W$  all'esperimento NuTeV su fascio di neutrini, dal fit a tutte le misure di precisione di SLD e LEP (escusa la misura diretta della massa del W) e infine aggiungendo al fit anche la misura della massa del quark top a CDF e D0. I due set di misure sono in ottimo accordo tra loro (a parte a misura di NuTeV) e indicano la preferenza per un Higgs leggero, come e' mostrato nella figura 41 a destra.

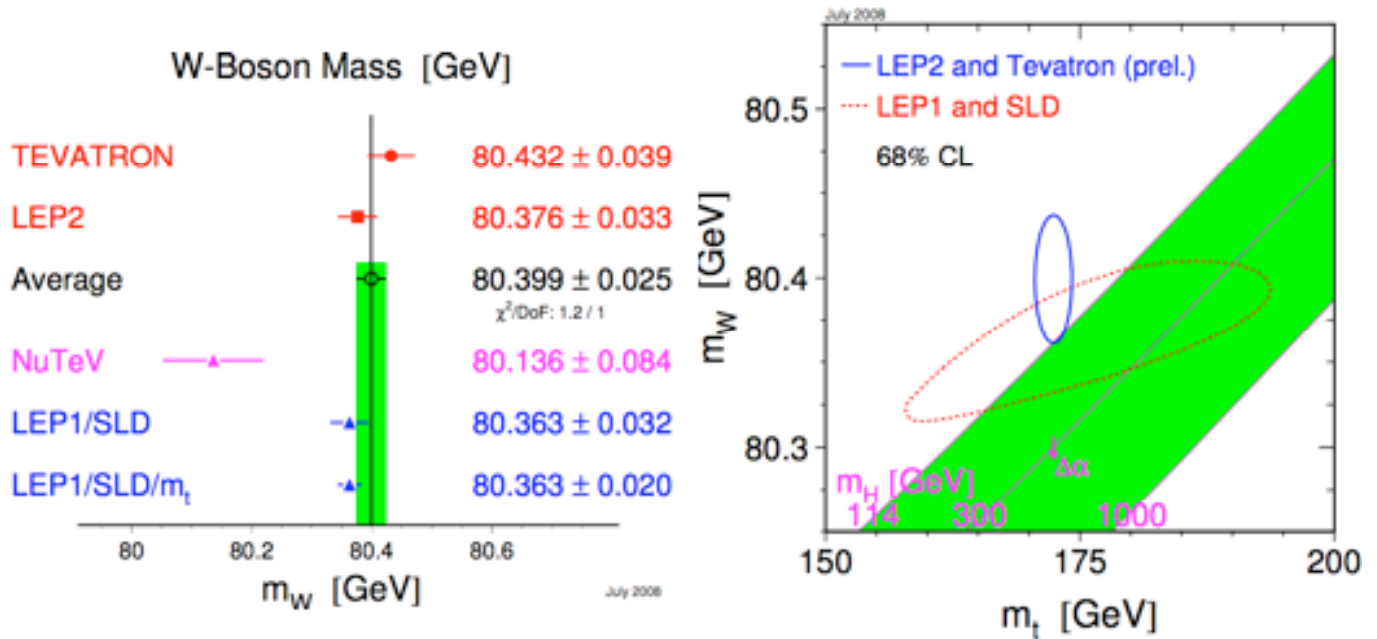


Fig.41

Analogamente altri test di consistenza si possono ottenere paragonando variabili tra loro ottenute in modo diverso e sempre confrontandole con le predizioni del MS.

Per riassumere: tutti i risultati raccolti a LEP, a SLD e al Tevatron hanno provato che il Modello Standard descrive perfettamente le interazioni elettrodeboli fino a scale di energia del centinaio di GeV. Il bosone di Higgs, campo scalare fondamentale che spiega il perché le particelle hanno la massa, non e' pero' ad oggi ancora stato rivelato. Solo agli acceleratori futuri (all'LHC e ad un Linear Collider) si potra' definitivamente rivelare l'Higgs, se esiste, o scoprire il meccanismo alternativo che dona la massa alle particelle.

I tre parametri indipendenti del MS sono ad oggi noti con le seguenti precisioni:

$\alpha_{em}$	e' la meno precisa:	$3.1 \times 10^{-4}$ ,	ovvero 700 ppm
$m(Z)$		$2 \times 10^{-5}$ ,	23 ppm
$G_F$		$8.6 \times 10^{-6}$	9 ppm
ed infine			
$\alpha_s$		$2.3 \times 10^{-2}$	