

Misura della massa del W a LEP

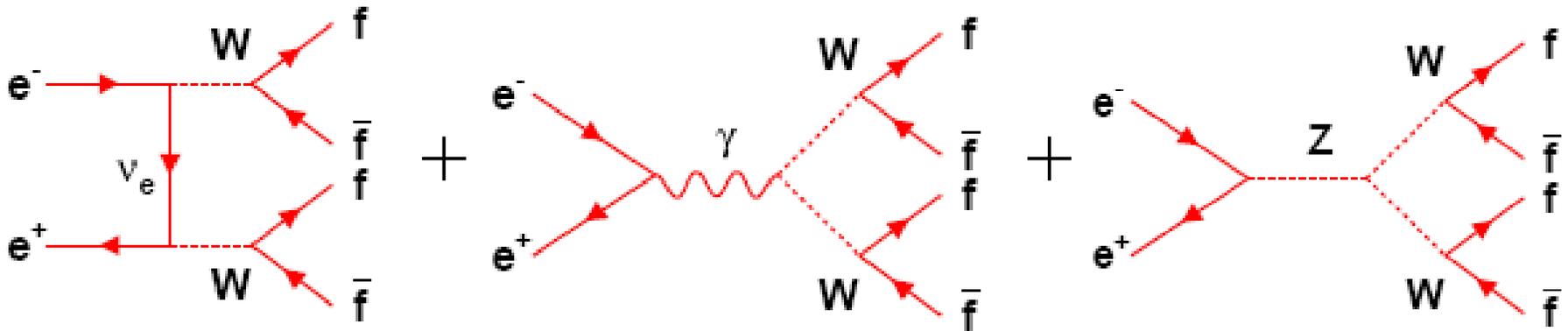
Matteo Pompili

Strategia

utilizzando fasci di e^+e^- si producono una coppia di bosoni W e si concentra poi l'attenzione sui prodotti dei loro decadimenti

Processi in studio

L'elemento di matrice del processo $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$ è dato dalla somma di tre contributi



I decadimenti dei W possono dare tre stati finali:

canale adronico: $W^+W^- \rightarrow q\bar{q}q\bar{q}$ $q = u, d, s, c, b$

canale semileptonico: $W^+W^- \rightarrow \bar{q}q \ell\nu$ $\ell = e, \mu, \tau$

canale leptonic: $W^+W^- \rightarrow \ell\nu\ell\nu$

Strategie per la misura

- Metodo della soglia:

la soglia cinematica delle produzioni di coppie di W dipende da M_W

$$\sigma(e^+e^- \rightarrow W^+W^-) = \sigma(M_W, \sqrt{s})$$

- Metodo della ricostruzione diretta:

M_W è ricavata dalla massa invariante del decadimento $W \rightarrow ff$

$$m_{\text{inv}}(W) = m_{\text{inv}}(ff)$$

- Metodo dell'angolo:

L'angolo compreso tra il fermione e l'antifermione di $W \rightarrow ff$ ha un limite inferiore dipendente da M_W

$$\alpha_{\text{min}} \leq \alpha_{ff} \leq 180^\circ$$

$$\cos \alpha_{\text{min}} = 1 - 8(M_W)^2/s$$

- Metodo del punto finale:

L'energia di ogni fermione proveniente da $W \rightarrow ff$ ha un limite inferiore e superiore dipendenti da M_W

$$E_- \leq E_f \leq E_+$$

$$E_{\pm} \leq (\sqrt{s}/4)[1 \pm (1 - 4M_W^2/s)^{1/2}]$$

Applicabile se entrambi i fermioni del decadimento sono visibili (es. $W \rightarrow q\bar{q}$)

Applicabile per μ ed e con energie misurate con alta precisione

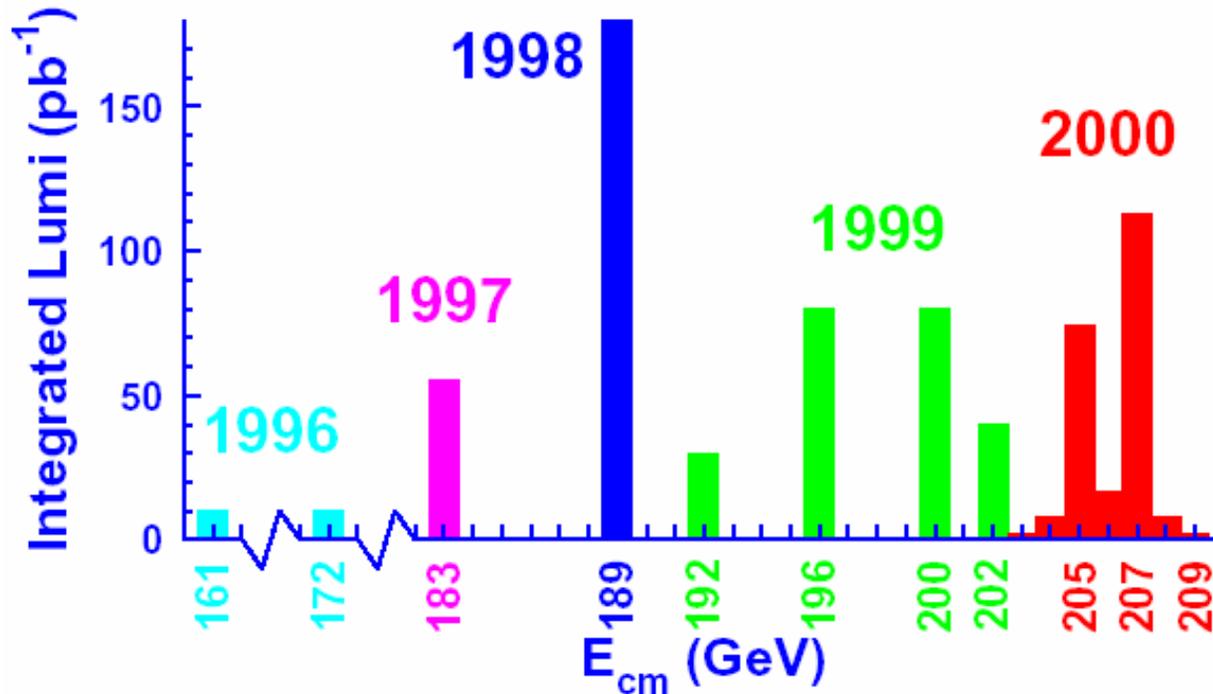
Gli ultimi due metodi utilizzano solo i decadimenti che sono ai margini delle distribuzioni



Statisticamente meno potenti dei primi due che fanno uso di tutti gli eventi

Negli esperimenti si è fatto uso del metodo a soglia e della ricostruzione diretta

Condizioni di misura



LEP-II: $\sqrt{s} = 161 - 209$ GeV

Massima luminosità integrata in un anno:

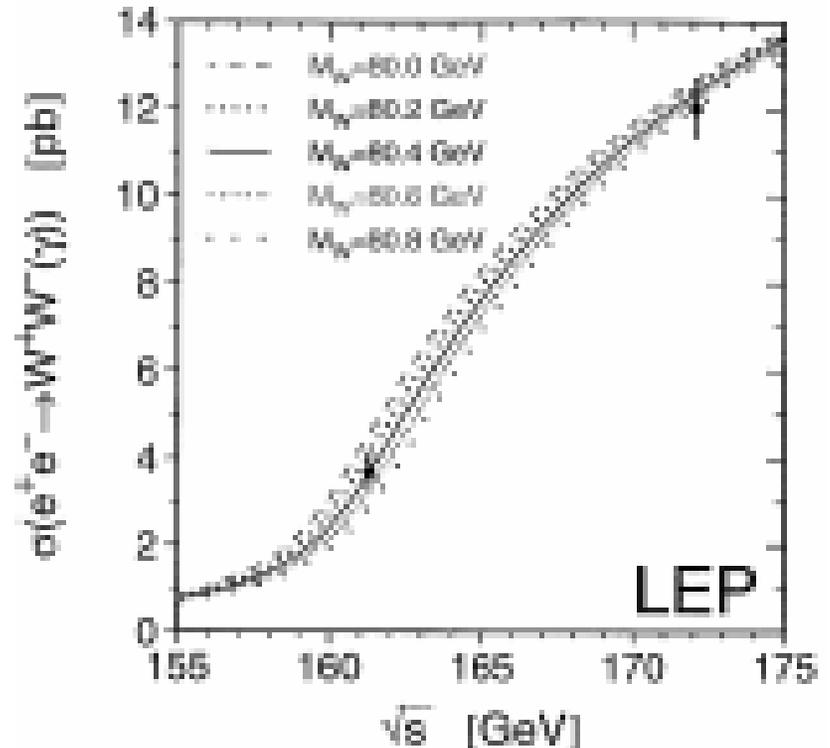
254 pb⁻¹ a LEP-II

Metodo della soglia

- Si misura la sezione d'urto a differenti energie del c.d.m. intorno al valore $2 M_W$.

Vicino al valore di soglia, la sezione d'urto cresce rapidamente al crescere di \sqrt{s}

- Dal Modello Standard è possibile ricavare la sezione d'urto come funzione di \sqrt{s} ($\sigma = \sqrt{s}$)
- Questo permette di ricavare il valore di M_W misurando la sezione d'urto



Errori

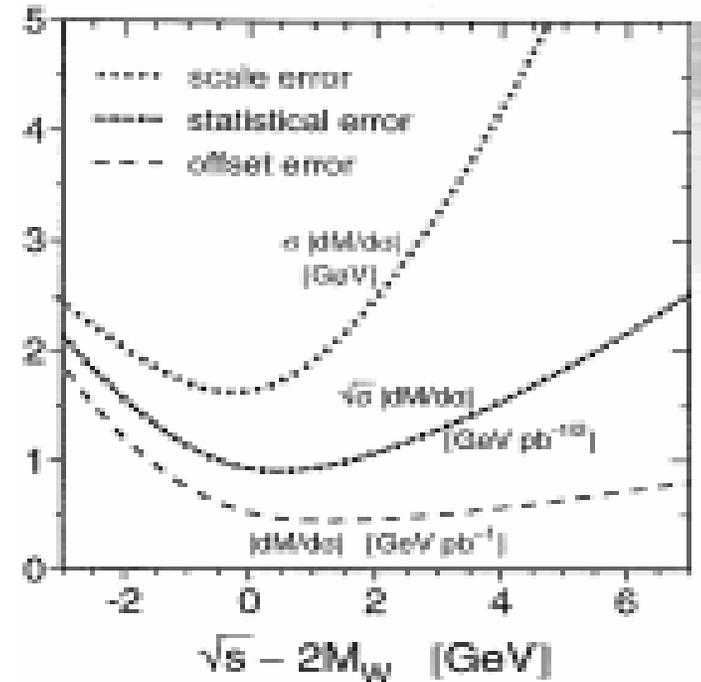
- La sensibilità della sezione d'urto su M_W è data da
$$\delta M_W = \delta\sigma / (d\sigma_{WW} / dM_W)$$

3 tipi di errore $\delta\sigma$ contribuiscono all'errore totale della sezione d'urto:

- errore statistico $\delta\sigma \propto (\sigma_{WW})^{1/2}$ (es. luminosità)
- errore sistematico di scala $\delta\sigma \propto \sigma_{WW}$
- errore sistematico di offset $\delta\sigma = \text{cost.}$ (es. sottrazione del fondo)

$$\delta M_W \propto \begin{cases} (dM_W/d\sigma)\sqrt{\sigma_{WW}} , \\ (dM_W/d\sigma)\sigma_{WW} , \\ dM_W/d\sigma . \end{cases}$$

- Un'incertezza di scala del 2% causa un'errore di 34 MeV su M_W
- L'errore sulla sottrazione del fondo nei vari canali $W \rightarrow W \rightarrow f\bar{f}$ è al massimo di 0.1 pb e comporta un errore di 50 MeV su M_W
- A causa del valore della luminosità, meno di 100 pb^{-1} , l'errore statistico è quello dominante



- La sensibilità della misura è massima a un valore superiore di circa 0.5 GeV rispetto al valore nominale della soglia di $2M_W$
- Il metodo della soglia è quindi più efficiente per determinazioni di M_W con una misura di sezione d'urto all'energia ottimale $\sqrt{s} = 2M_W + 0.5 \text{ GeV} = 161 \text{ GeV}$

Nel 1996 LEP- II lavorava a un'energia di c.d.m. $\sqrt{s} = 161.33 \pm 0.05$ GeV.

Ogni esperimento collezionava una luminosità di 10 pb^{-1} e selezionava circa 30 eventi

Canali della misura

- Canale leptónico: $W^+ W^- \rightarrow \ell \nu \ell \nu$

Caratterizzato da:

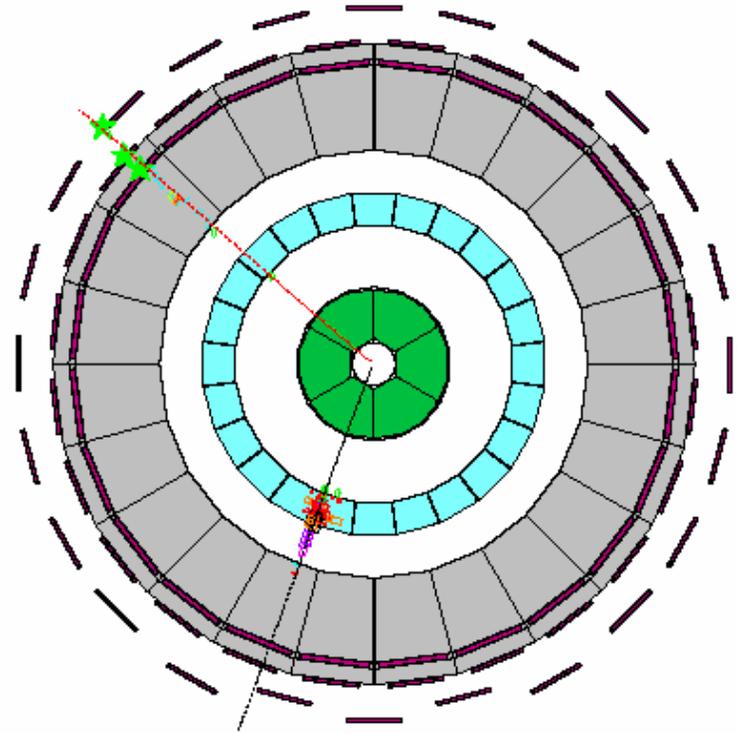
- 2 leptoni acoplanari di alta energia
- 3 sapori leptonici possibili \rightarrow 6 differenti stati finali
- Energia mancante a causa dei due neutrini non rivelati

Canali della misura

- canale leptónico: $W \square W \square \rightarrow \ell \nu \ell \nu$

Peculiarità:

- Presenza di due leptoni carichi acoplanari di alta energia
- 3 sapori leptonici possibili \rightarrow 6 differenti stati finali
- Energia mancante a causa dei due neutrini non rivelati
- Poiché il τ ha vita media breve (0.3 psec), per identificarlo sono usate delle selezioni speciali, basate sulla topologia degli eventi, dopo la ricostruzione dei jet



- Efficienza tipica ~ 30 (τ) – 70 %
- Purezza tipica ~ 75 (τ) – 90 %

- Canale adronico: $W^+ W^- \rightarrow \bar{q}q\bar{q}q$

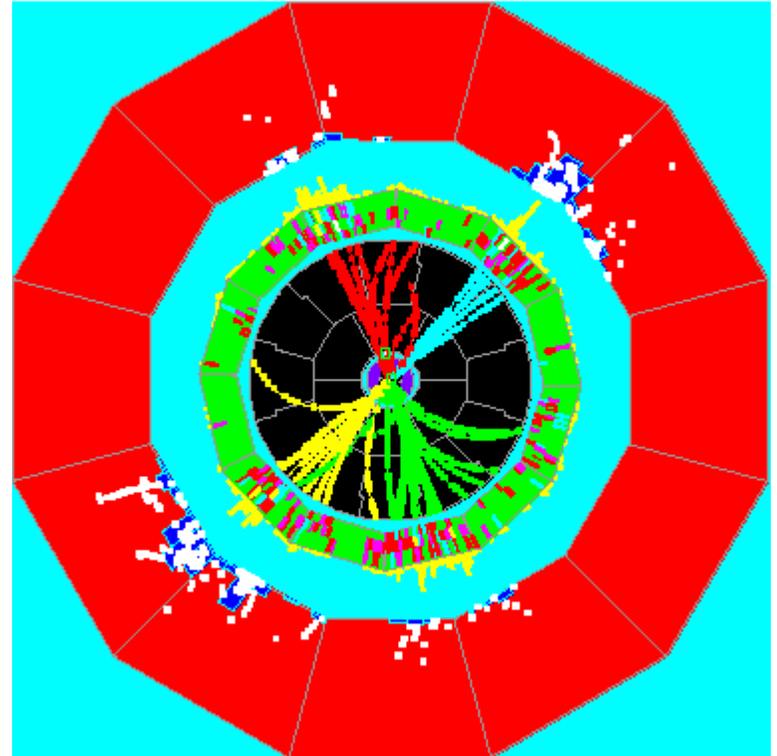
Caratterizzato da:

- Presenza di 4 jet adronici (in configurazione back to back)
- Tutta l'energia è rivelata
- Nessun leptone o fotone altamente energetici

$$W \square W \square \rightarrow qq6 qq$$

Peculiarità:

- Presenza di 4 jet adronici
- Tutta l'energia è rivelata
- Nessun leptone o fotone altamente energetici
- Fondo principale derivante da $e \square e \square \rightarrow qq$ (QCD)
- Fondo derivante da $e \square e \square \rightarrow ZZ \rightarrow qqqq$ (per energie del c.d.m. $\sqrt{s} > 2M_Z$)



$$W \square W \square \rightarrow qq6 qq$$

- Efficienza tipica $\sim 85 - 90 \%$
- Purezza tipica $\sim 80 \%$

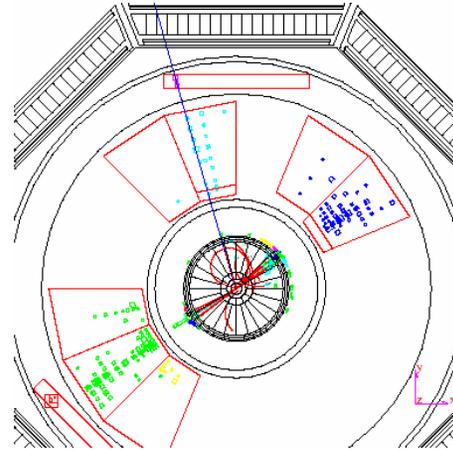
- Canale semileptonico: $W^+ W^- \rightarrow \bar{q}q \ell \nu$

Caratterizzato da:

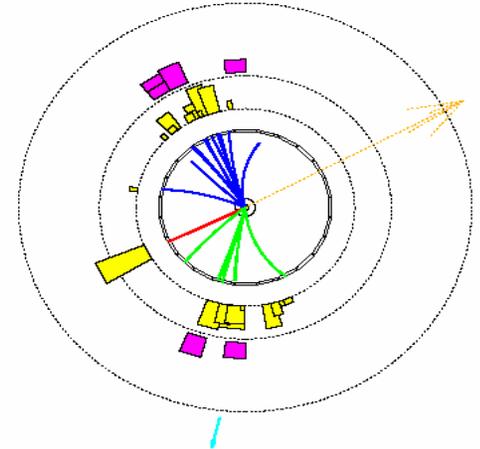
- Presenza di 2 jet adronici
- Presenza di un leptone carico di alta energia
- Energia mancante a causa del neutrino non rivelato

Peculiarità:

- Presenza di 2 jet adronici
- Presenza di un leptone carico di alta energia
- Energia mancante a causa del neutrino non rivelato
- Fondo derivante da processi $e^+e^- \rightarrow qq$ e da produzione inclusiva di leptoni



$$W^+W^- \rightarrow qq e \nu$$



$$W^+W^- \rightarrow qq \mu \nu$$

- Efficienza tipica $\sim 60(\tau) - 90 \%$
- Purezza tipica $\sim 80(\tau) - 95 \%$

Fondo canale leptonic

- Fondo derivante da

- $e^- e^- \rightarrow \ell^- \ell^- (\gamma)$ \longrightarrow

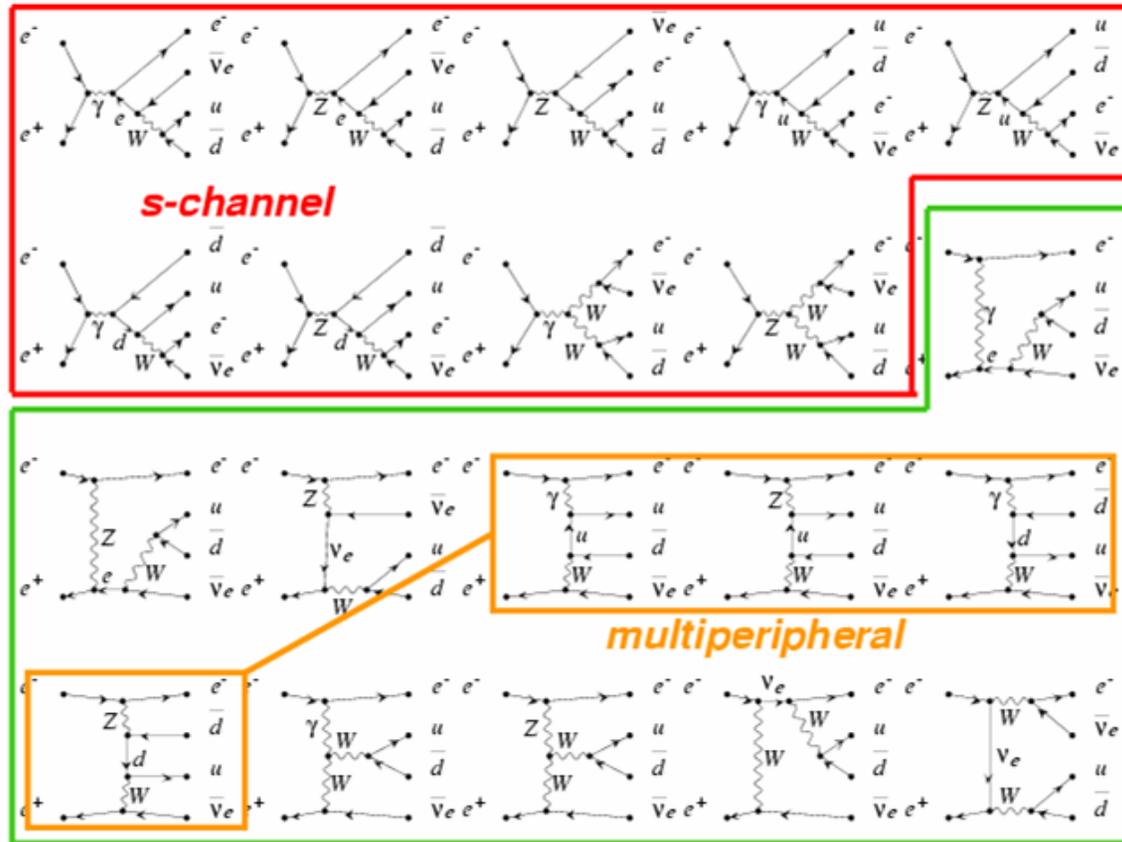
- $e^- e^- \rightarrow \gamma \gamma$

Può essere ridotto
richiedendo che i due
leptoni finali siano
acoplanari

Fondo canale semileptonico

- Fondo derivante da
- Produzione inclusiva di leptoni in eventi $q\bar{q}$

inserire???



All 4f diagrams (enqq)

Fondo canale adronico

Fondo derivante da:

- $e^+e^- \rightarrow \bar{q}q(\gamma)$ (QCD)

Risultati

Nel 1996 LEP- II lavorava a un'energia di c.d.m. $\sqrt{s} = 161.33 \pm 0.05$ GeV.

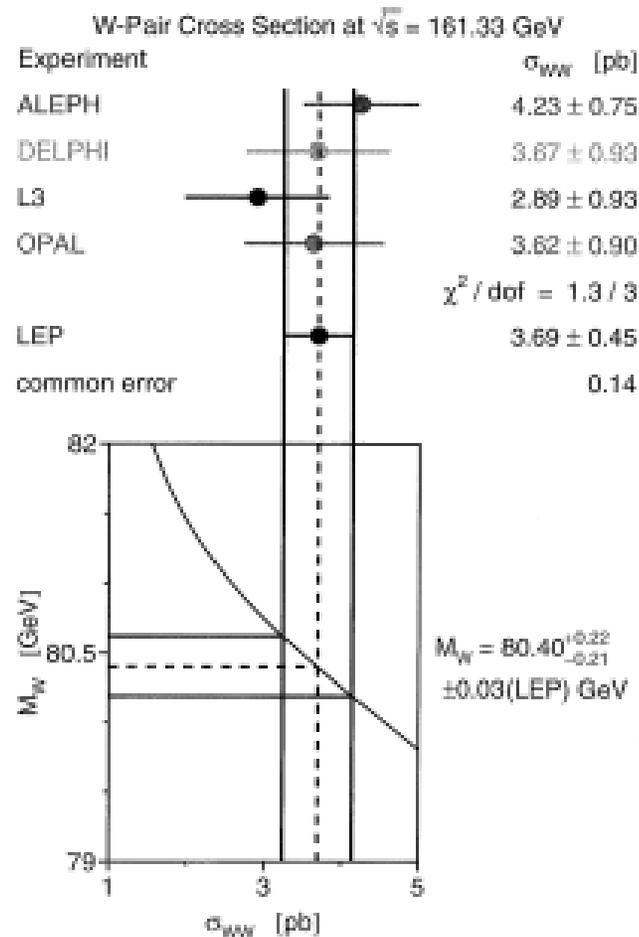
Ogni esperimento collezionava una luminosità di 10 pb^{-1} e selezionava circa 30 eventi

La sezione d'urto media è $\sigma_{WW} = 3.69 \pm 0.45 \text{ pb}$

A questo valore corrisponde un valore di massa

$$M_W = 80.40_{-0.21}^{+0.22} \pm 0.03 \text{ GeV}$$

Il primo errore è sperimentale, il secondo dovuto all'incertezza nella calibrazione dell'energia del beam del LEP



Metodo della ricostruzione diretta

A LEP le energie del c.d.m. sono state via via aumentate fino a raggiungere il valore $\sqrt{s} = 209 \text{ GeV}$

In tali condizioni il metodo ottimale per misurare M_W è quello della ricostruzione diretta.

I fermioni dei processi $e^+e^- \rightarrow W^+W^- \rightarrow f\bar{f}f\bar{f}$ sono ricostruiti misurando l'energia e gli angoli polari e di azimuth, θ e φ , dei fermioni visibili.

Si può quindi ricavare la massa invariante dei prodotti del decadimento del W

Vantaggi

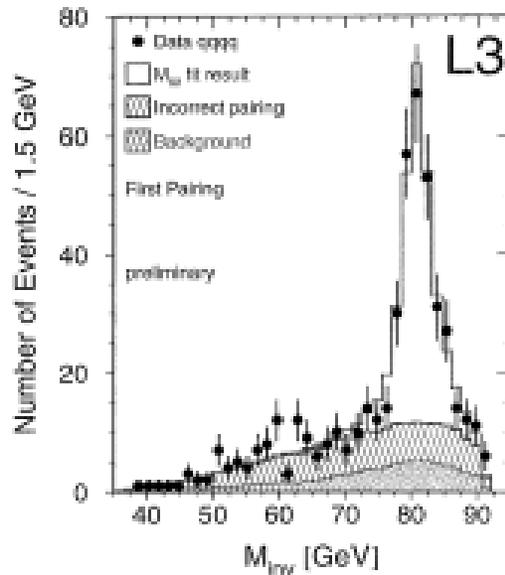
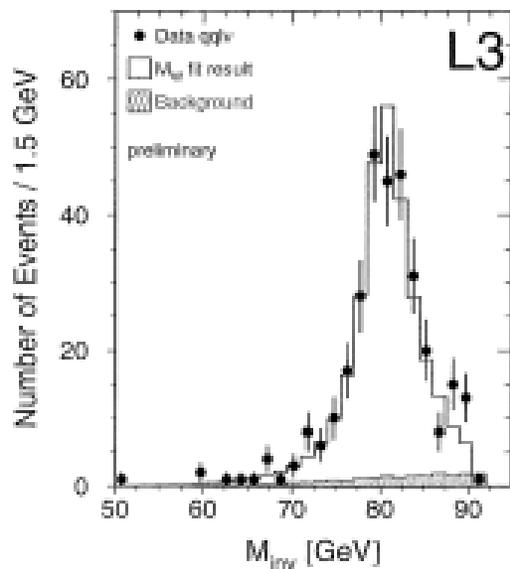
- Numero elevato di eventi WW disponibili a causa della sezione d'urto più grande
- Il sistema di laboratorio coincide con il c.d.m., semplificando l'analisi cinematica degli eventi
- L'utilizzo di un fit cinematico che impone la conservazione del quadrimpulso e una massa uguale per i due W permette la determinazione della cinematica del neutrino negli eventi semileptonici

Svantaggi

- La sensibilità della sezione d'urto totale delle coppie WW da M_W è ridotta
- Non si può effettuare una misura di M_W utilizzando i processi leptonici $W^+W^- \rightarrow \ell\nu\ell\nu$ a causa della presenza dei due neutrini
- Difficoltà associata ai processi adronici per raggruppare i 4 jet:
a priori ci sono 3 possibilità:
 $(1,2)(3,4)$, $(1,3)(2,4)$, $(1,4)(2,3)$

Come raggruppare i jet adronici?

- Si utilizzano degli algoritmi, richiedendo, ad esempio, la combinazione con la più piccola differenza di massa; oppure la combinazione tale che la somma delle due masse risulti la maggiore.
- Per ognuna delle possibilità si esegue un fit cinematico
- Viene scelto il fit con la più alta probabilità di verosimiglianza
- Per migliorare i risultati si considera anche la seconda migliore combinazione



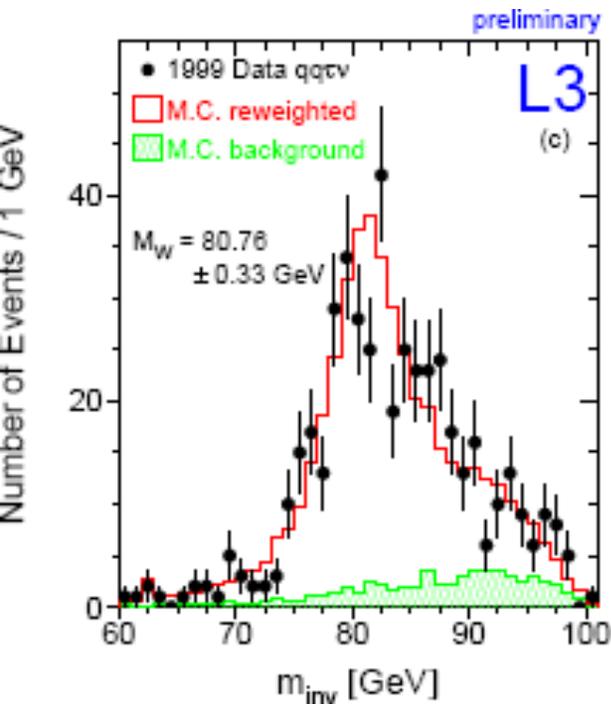
Distribuzioni delle
masse invarianti a
 $\sqrt{s} = 183 \text{ GeV}$

Gli accoppiamenti errati dei
jet danno una distribuzione
più larga e non piccata

Misura di M_w

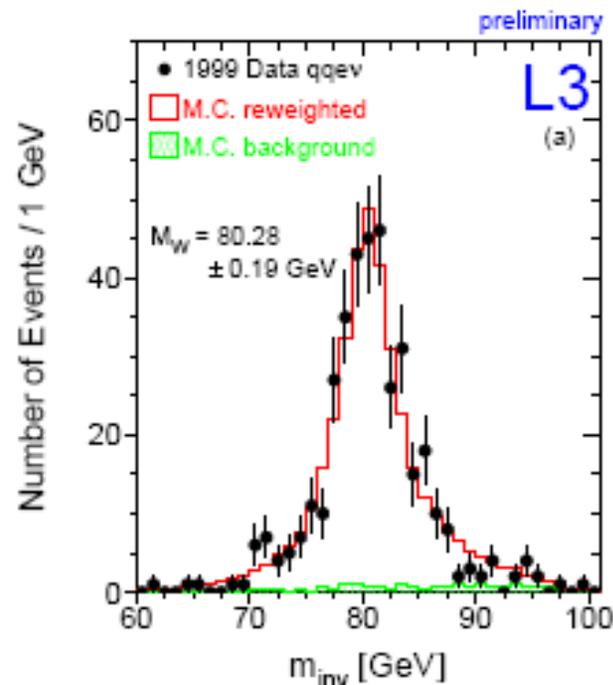
- M_w è determinata basandosi sullo spettro della massa ricostruita
- Con un Monte Carlo è possibile costruire dei campioni a diversi valori di M_w .
- Successivamente è aggiunto il fondo, indipendentemente da M_w e i risultati del Monte Carlo sono confrontati con i dati sperimentali

Distribuzione delle masse invarianti a $\sqrt{s} = 192 - 202$ GeV



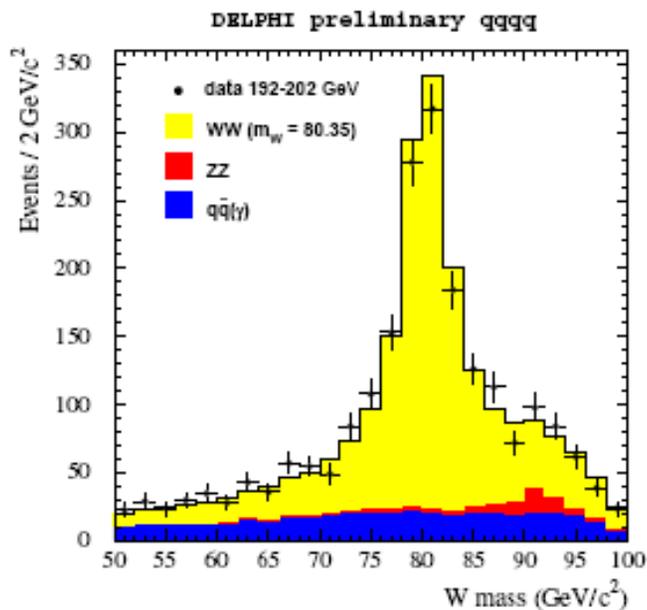
$W \rightarrow W \rightarrow qqev$

$M_W = 80.28$ GeV



$W \rightarrow W \rightarrow qq\tau\nu$

$M_W = 80.76$ GeV

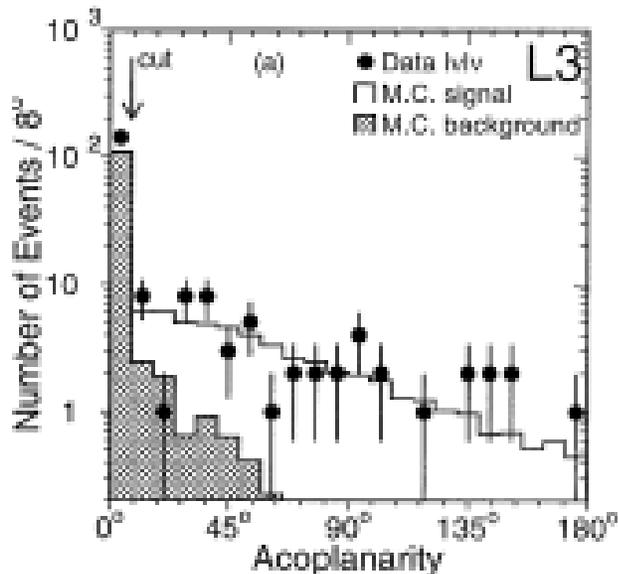


$W \rightarrow W \rightarrow qqqq$

$M_W = 80.35$ GeV

Fondi

- Oltre ai fondi presenti già a energie $\sqrt{s} = 161$ GeV, sono presenti anche processi $e^+e^- \rightarrow ZZ \rightarrow qqqq$
- Si ricorre a diverse variabili per ridurre i vari fondi



Acoplanarità di leptoni carichi a $\sqrt{s} = 183$ GeV

Per determinare le sezioni d'urto di ogni canale di decadimento $e^+e^- \rightarrow W^+W^- \rightarrow f\bar{f}f\bar{f}$ e le relative branching ratio si usa il metodo della massima verosimiglianza (Likelihood)

La sezione d'urto del canale i -esimo è determinata massimizzando $P(N_i, \mu_i)$, ossia la probabilità di Poisson di osservare N_i eventi, essendo μ_i quelli aspettati

$$L = \prod_i P(N_i, \mu_i)$$

$$\mu_i = \left(\sum_j \varepsilon_{ij} \sigma_j + \sigma_i^{bg} \right) \mathcal{L}$$

È possibile ricavare la sezione d'urto totale σ_{WW} e le branching ratios del decadimento del W

$$\sigma(qqqq) = \sigma_{WW} \cdot B(W \rightarrow qq)B(W \rightarrow qq)$$

$$\sigma(qq\ell\nu) = \sigma_{WW} \cdot (W \rightarrow qq)(B(W \rightarrow e\nu) + B(W \rightarrow \mu\nu) + B(W \rightarrow \tau\nu))$$

$$\sigma(\ell\nu\ell\nu) = \sigma_{WW} \cdot (B(W \rightarrow e\nu) + B(W \rightarrow \mu\nu) + B(W \rightarrow \tau\nu))^2$$

Branching fractions of W decay. The hadronic branching fractions are determined under the assumption of charged-current lepton universality [163]

Experiment	$B(W \rightarrow e\nu)$	$B(W \rightarrow \mu\nu)$	$B(W \rightarrow \tau\nu)$	$B(W \rightarrow q\bar{q})$
ALEPH	$11.2 \pm 0.8 \pm 0.3$	$9.9 \pm 0.8 \pm 0.2$	$9.7 \pm 1.0 \pm 0.3$	$69.0 \pm 1.2 \pm 0.6$
DELPHI	$9.9 \pm 1.1 \pm 0.5$	$11.4 \pm 1.1 \pm 0.5$	$11.2 \pm 1.7 \pm 0.7$	$67.5 \pm 1.5 \pm 0.9$
L3	$10.5 \pm 0.9 \pm 0.2$	$10.2 \pm 0.9 \pm 0.2$	$9.0 \pm 1.2 \pm 0.3$	$70.1 \pm 1.3 \pm 0.4$
OPAL	$11.7 \pm 0.9 \pm 0.3$	$10.1 \pm 0.8 \pm 0.3$	$10.3 \pm 1.0 \pm 0.3$	$67.9 \pm 1.2 \pm 0.6$
Average	10.9 ± 0.5	10.3 ± 0.5	10.0 ± 0.6	68.8 ± 0.8
SM	10.8	10.8	10.8	67.5

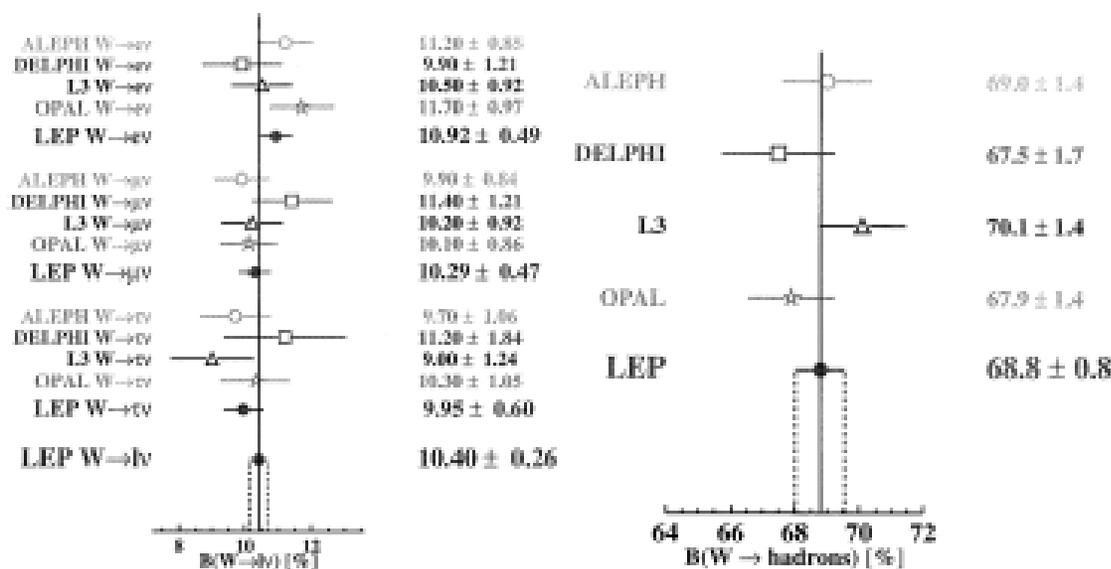


Fig. 5.51. Branching fractions of W decay. The hadronic branching fractions are determined under the assumption of charged-current lepton universality [163]. The Standard Model expectations are 10.8 and 67.5%, respectively.

Errori

L'errore sistematico su M_W è stimato essere 0.04 GeV per il canale semileptonico e 0.10 GeV per quello adronici.

Gli errori sistematici comuni agli esperimenti derivano:

- dalla calibrazione dell'energia del beam, $\delta M_W / M_W = \delta\sqrt{s}/\sqrt{s}$,
- dalle incertezze di frammentazione
- dalle interazioni forti nello stato finale (FSI) nel canale adronico. Gli effetti FSI tra i prodotti del decadimento di diverse W può portare a uno scambio del quadrimpulso tra i due sistemi adronici, con la conseguente non conservazione individuale delle masse invarianti (stimato a 90 MeV)

L'errore statistico è stimato essere circa 30 MeV per entrambi i canali

Risultati

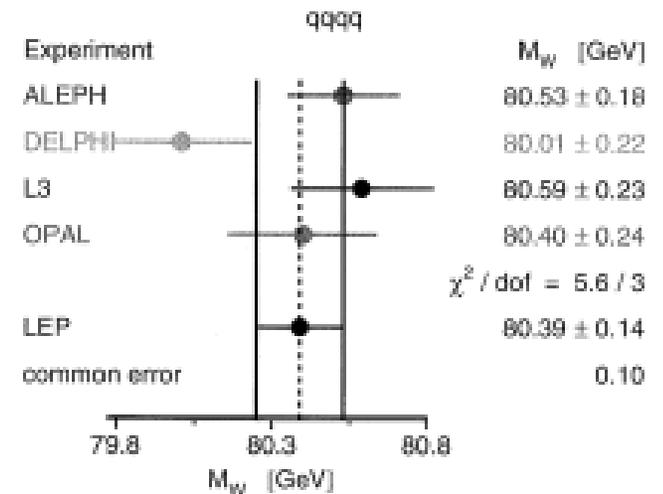
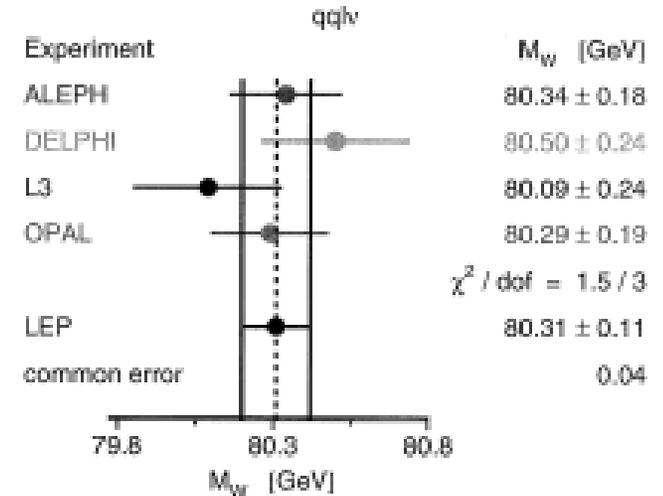
I risultati sono:

$$M_W(qq\ell\nu) = 80.31 \pm 0.11 \text{ GeV}$$

$$M_W(qqqq) = 80.39 \pm 0.14 \text{ GeV}$$

Mediando i due canali si ha:

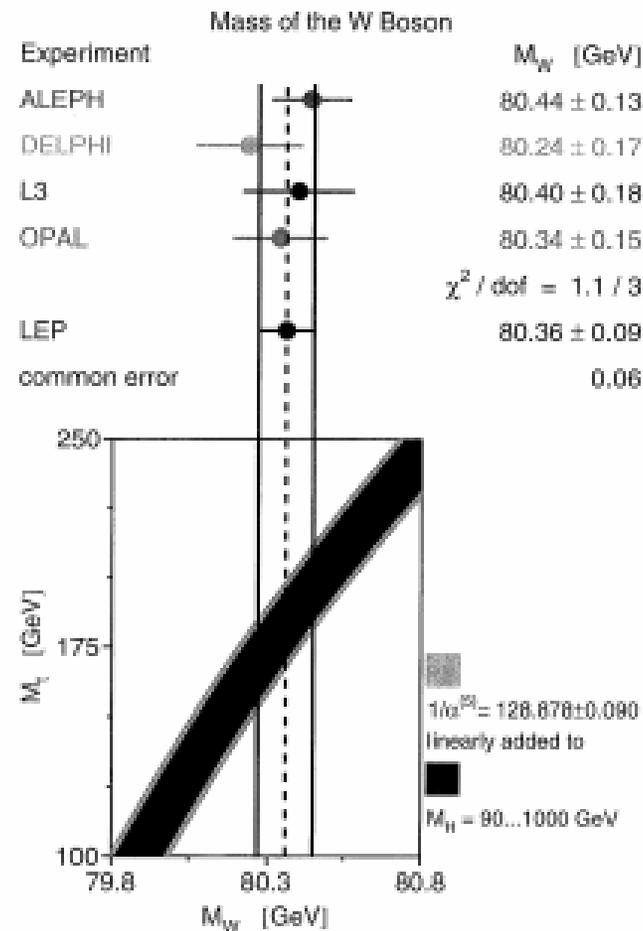
$$M_W(ffff) = 80.36 \pm 0.09 \text{ GeV}$$



- $M_W(\text{soglia}) = 80.40_{-0.21}^{+0.22} \pm 0.03 \text{ GeV}$
- $M_W(m_{\text{inv}}) = 80.36 \pm 0.09 \text{ GeV}$

Mediando i risultati del metodo della soglia con quello della ricostruzione diretta, l'errore migliora per meno di 10 MeV

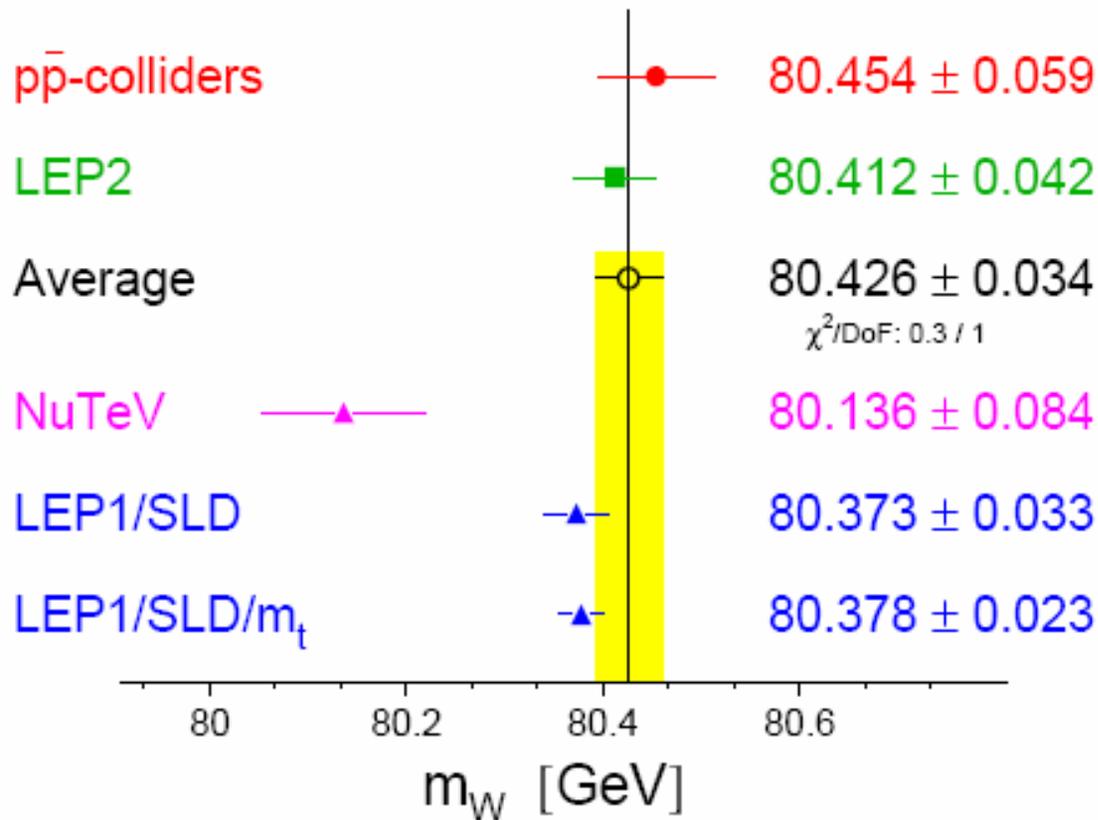
- $M_W(\text{ffff}) = 80.37 \pm 0.09 \text{ GeV}$



Confronto dei risultati

- $M_W(\text{TEVATRON}) = 80.41 \pm 0.09 \text{ GeV}$
- $M_W(\text{LEP}) = 80.37 \pm 0.09 \text{ GeV}$

La media è $M_W = 80.39 \pm 0.06 \text{ GeV}$



Commenti finali

La sezione d'urto $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$ misurate a LEP sono in accordo con il modello standard che prevede un vertice di 3 bosoni: $WW\gamma$ e WWZ

