

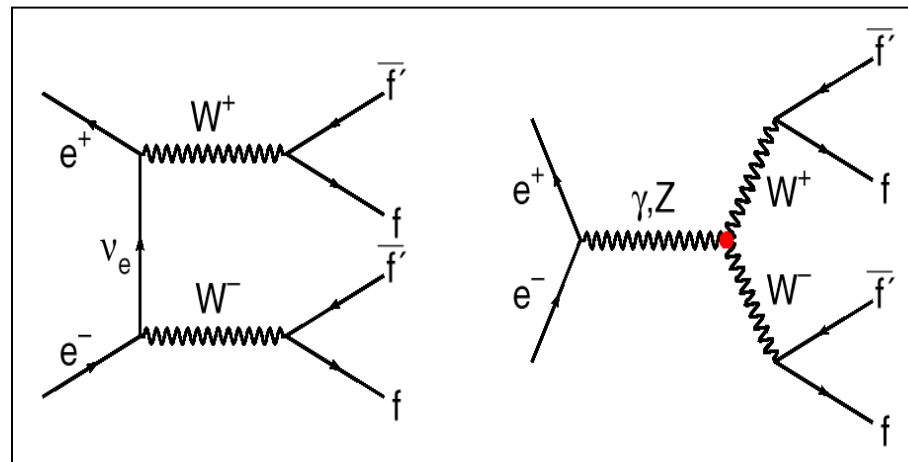
Misura della massa del bosone W a LEP

- Ricostruzione diretta di M_W a LEP2
 - selezione e ricostruzione cinematica degli eventi
 - estrazione di M_W
- Errori sistematici sulla misura di M_W
 - detector
 - adronizzazione
 - interazioni nello stato finale
- Misura delle interazioni nello stato finale
 - Colour Reconnection
 - Correlazioni di Bose-Einstein
- Massa del W e determinazione dei parametri elettrodeboli
- Conclusioni



Eventi WW a LEP2

- Produzione di coppie di W
 - statistica **per esperimento**:
 - 480 pb⁻¹ raccolti
 - **6k eventi WW selezionati**



- Stati finali a 4 fermioni
 - 45% *qqqq* (4 jets)
 - 44% *qqlv* (2 jets + 1 leptone)
 - 11% *lvlv* (2 leptoni)

importanti per la
misura diretta di M_W

- Per una selezione tipica:

Canale	Efficienza	Purezza
<i>qqqq</i>	80 %	80 %
<i>lvqq</i>	75 %	95 %
<i>lvlv</i>	60 %	90 %



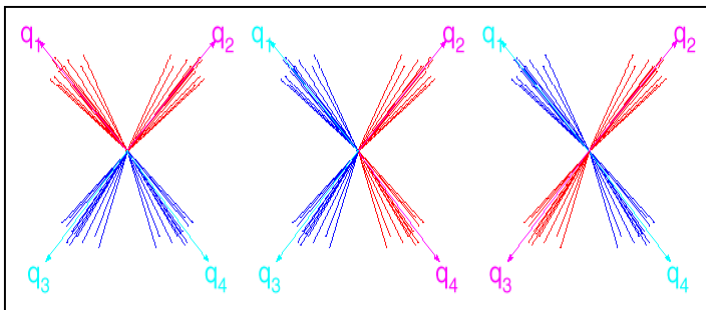
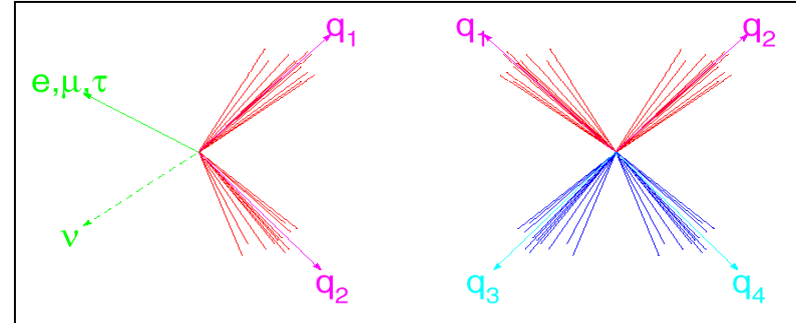
Ricostruzione diretta di MW a LEP2

- **Ricostruzione dell'evento**

- identificazione dei **leptoni**
- **jets**: 2 in qqlv, 4 (o 5) in qqqq

- **Massa invariante $m(qq)$, $m(lv)$**

- migliore risoluzione ottenuta con un **fit cinematico**: (E, p) totale costretto a $(\sqrt{s}, 0)$
- varianti: con o senza $M(w^+) = M(w^-)$, con o senza “energy rescaling”
- l'errore sulla massa invariante dal fit aggiunge informazione per estrarre M_W

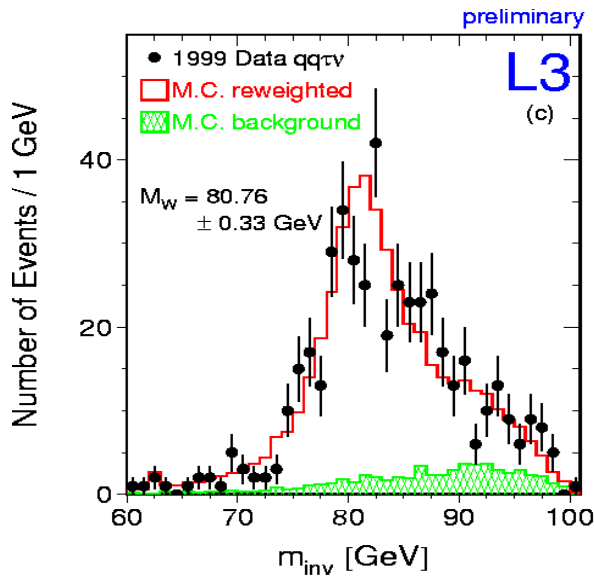


- **In qqqq: pairing dei 4 (o 5) jets**

- pairings per evento: uno; due; tre pesati con la loro probabilità
- più criteri combinati: elemento di matrice WW, migliore χ^2 dal fit, angoli, masse invarianti e loro differenza, jet charge, p_T ...



Estrazione di M_W

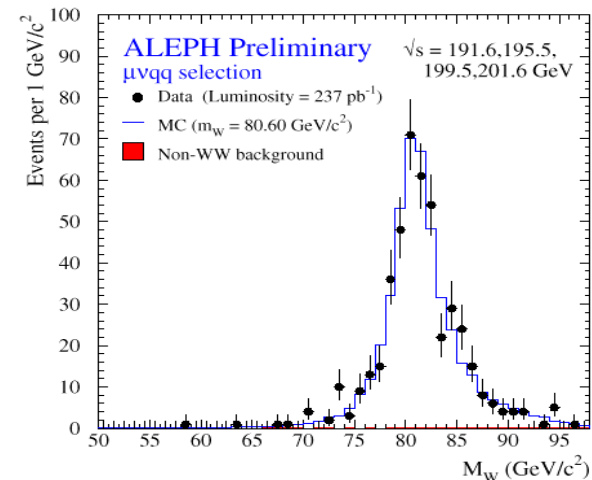
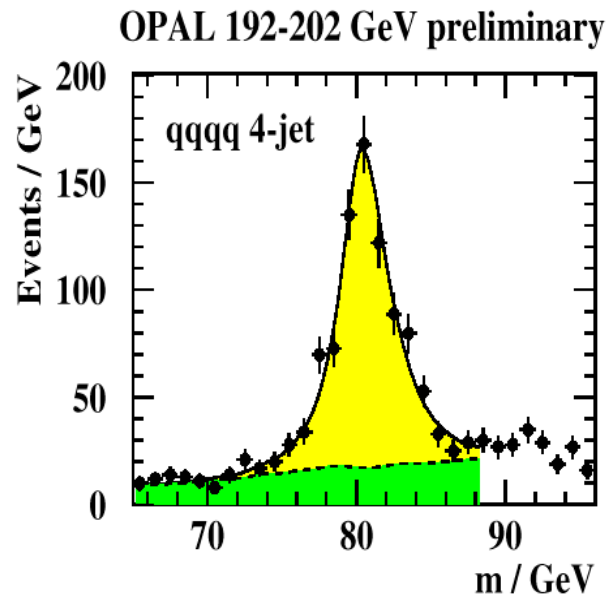
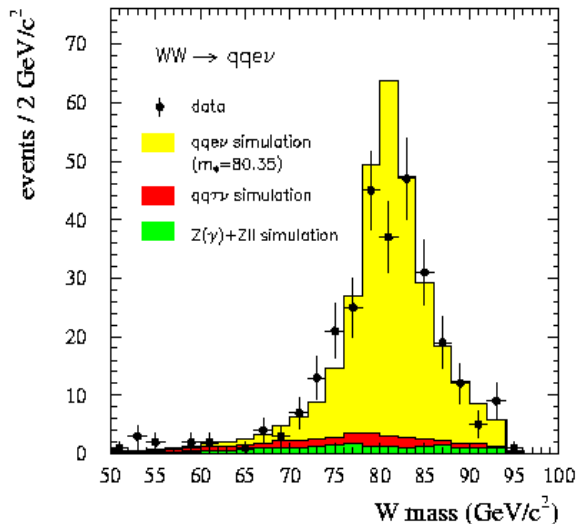


→ Fit dello spettro di massa invariante

- p.d.f. (M_W) dal reweighting della distribuzione MC (A,L,O)
 - bias-free (reweighting evento per evento con elemento di matrice WW)
 - fit di distribuzioni 1-D (m) o n-D (m_1 vs. m_2 ; m vs. σ_m)
- p.d.f. (M_W): Breit-Wigner relativistica asimmetrica (O)
 - necessaria curva di calibrazione del bias

→ Convoluzione o ideogramma

- likelihood (M_W) costruita evento per evento da m e σ_m (D,O)
- M_W ottenuta dal minimo della somma delle likelihood
 - necessaria curva di calibrazione del bias

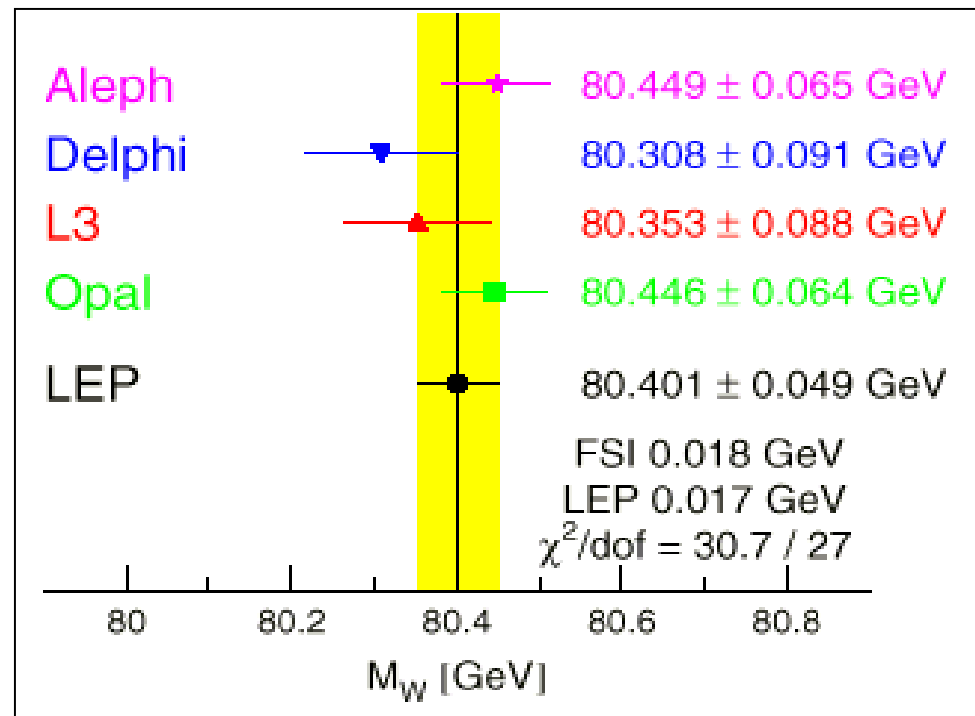


Massa del bosone W a LEP2

Ricostruzione diretta di M_W a LEP2

– risultati *preliminari* per Moriond 2000

- Aleph: 172-202 GeV (1996-1999)
- L3: 172-202 GeV (1996-1999)
- Opal: 172-202 GeV (1996-1999)
- Delphi: 172-189 GeV (1996-1998)



La media LEP sui dati 1996-1999 è limitata dall'errore sistematico:

$$M_W = 80.401 \pm 0.027 \text{ (stat.)} \pm 0.041 \text{ (syst.) GeV}$$

Lo stesso è vero per le misure dei singoli esperimenti se si includono i dati 1999.



Errori sistematici su M_W in ALEPH



ALEPH 189 GeV paper
(CERN-EP/2000-045)

Source	Δm_W (MeV/ c^2)			
	4q	$e\nu q\bar{q}$	$\mu\nu q\bar{q}$	$\tau\nu q\bar{q}$
(a) Correlated errors				
Charged tracking	<1	9	1	4
Lepton angle bias/resol ⁿ	-	15	15	-
Lepton momentum resol ⁿ	-	8	7	-
Jet energy corrections	1	4	1	5
Jet energy resolution	7	10	10	10
Calorimeter simulation	10	15	10	5
Jet angle bias/resolution	5	4	4	5
Fragmentation	30	50	35	35
Initial state radiation	2	<1	<1	<1
LEP energy	17	17	17	17
(b) Uncorrelated errors				
Reference MC Statistics	5	9	9	15
Bkgnd contamination	5	10	3	16
Colour reconnection	30	-	-	-
Bose-Einstein effects	30	-	-	-
Total (a+b)	56	61	46	47

ALEPH 172 - 202 GeV:

$$M_W = 80.449 \pm \underline{0.045(\text{stat.})} \pm \underline{0.047(\text{syst.})} \text{ GeV}$$

← *Calibrazione del detector*

← *Frammentazione (e ISR)*

← *Energia del fascio*

← *Errori non correlati*

← *Final state interactions (qqqq)*



Errori sistematici su M_W a LEP

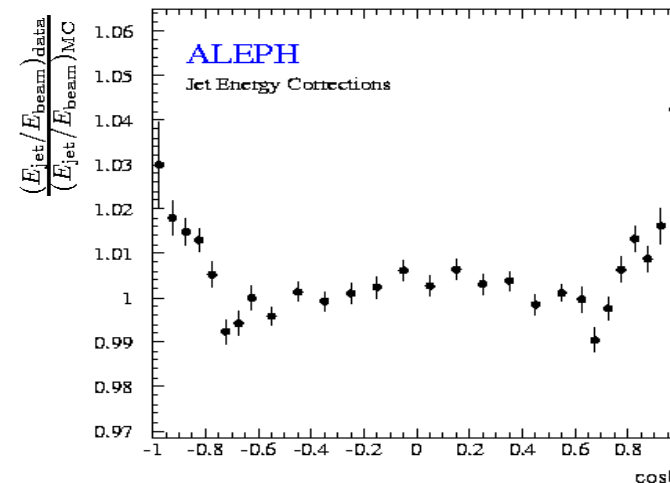
- La media LEP tiene conto delle correlazioni fra canali, anni e esperimenti per 5 diverse sorgenti di errore sistematico:
 - 1. **Errori non correlati** (e.g., statistica MC)
 - 2. **Calibrazione del detector**: errore correlato in un esperimento fra anni e canali
 - 3. **Final state interactions**: errore correlato fra anni e esperimenti nel canale $qqqq$
 - 4. **Frammentazione e ISR**: errore correlato fra anni, canali e esperimenti
 - 5. **Energia del fascio di LEP**: errore correlato fra anni, canali e esperimenti
- Media LEP preliminare per Moriond 2000:
$$M_W = 80.401 \pm 0.027(\text{stat.}) \pm 0.041(\text{syst.}) \text{ GeV}$$
$$\pm 0.006(\text{unc.}) \pm 0.012(\text{det.}) \pm 0.018(\text{FSI}) \pm 0.028(\text{frag.}) \pm 0.017(\text{LEP})$$
- Stretta collaborazione dei 4 esperimenti LEP per la misura finale di M_W
 - Workshops regolari (Creta ott. 1999, CERN apr. 2000, Lisbona nov. 2000)
 - Enfasi sul capire, uniformare, combinare e ridurre gli *errori sistematici*



Errori sistematici dovuti al detector

- Bias sistematico $\equiv$ Differenza fra dati e MC
 - effetti residui dopo le correzioni ad hoc sul MC
 - correzioni globali, effetti residui locali o specifici
- Variabili rilevanti:
 - energia e direzione
 - per jets e leptoni
 - scala assoluta e risoluzione
- Confronto coi dati alla Z è fondamentale
 - per determinare le correzioni ad hoc sul MC
 - per stimare il bias dovuto alle discrepanze residue
 - “MC shaking”, “Mixed Lorentz Boosted Z”...
- Commenti tecnici
 - rischio di double counting dell’errore
 - discrepanza può venire dalla frammentazione
 - grande statistica MC necessaria
 - errore statistico sull eventuale bias sistematico

Correzioni all’energia
dei jets in ALEPH dai
dati al picco della Z



- Molto lavoro fine in tutti gli esperimenti
 - scoperto un baco di Geant dopo 10 anni!
 - *la sistematica del detector non sarà il fattore limitante per la misura finale di M_W a LEP*



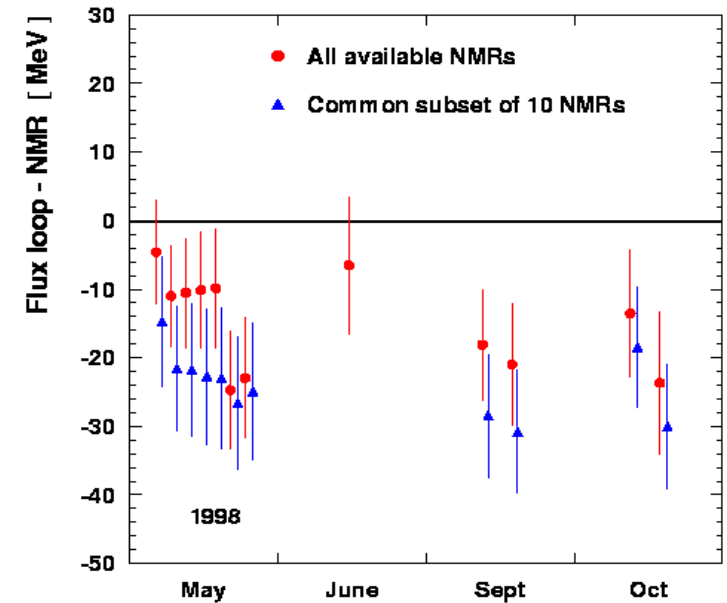
Errore sistematico dovuto all'energia di LEP

Attraverso il fit cinematico, la misura di E_b calibra le scale assolute di energia e impulso!

Misura dell'energia del fascio '98: $\Delta E_b = 20 \text{ MeV}$

- depolarizzazione risonante a $E_b = 41\text{-}61 \text{ GeV}$
- estrapolazione magnetica (NMR e flux-loop)

Source	Error [MeV]		Correlation
	1997	1998	
<u>Extrapolation from NMR polarisation:</u>			
NMR rms/ $\sqrt{N}$ at physics energy	10	8	100%
Different E_{pol} fills	5	4	0%
<u>Flux-loop test of extrapolation:</u>			
NMR flux-loop difference at physics energy	20	15	75%
Field not measured by flux loop	5	5	100%
Polarisation systematic	1	1	100%
e^+e^- energy difference	2	2	100%
Optics difference	4	6	50%
Corrector effects	3	4	50%
Tide	1	1	100%
Initial dipole energy	2	1	0%
Dipole rise modelling	1	1	100%
<u>IP specific corrections ($\delta E_{CM}/2$):</u>			
RF model	4	4	100%
Dispersion	2	2	100%
Total	25	20	



In futuro, tre misure di E_b indipendenti!

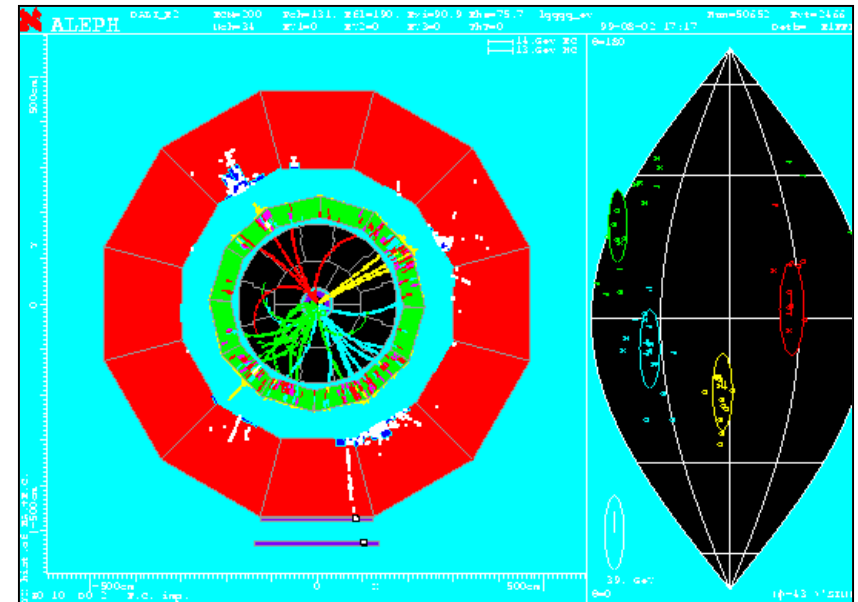
- estrapolazione misure magnetiche
- *synchrotron tune* Q_s vs. VRF
- spettrometro

Ciascuna individualmente con un errore previsto $O(15 \text{ MeV})$!



Errori sistematici dovuti all'adronizzazione

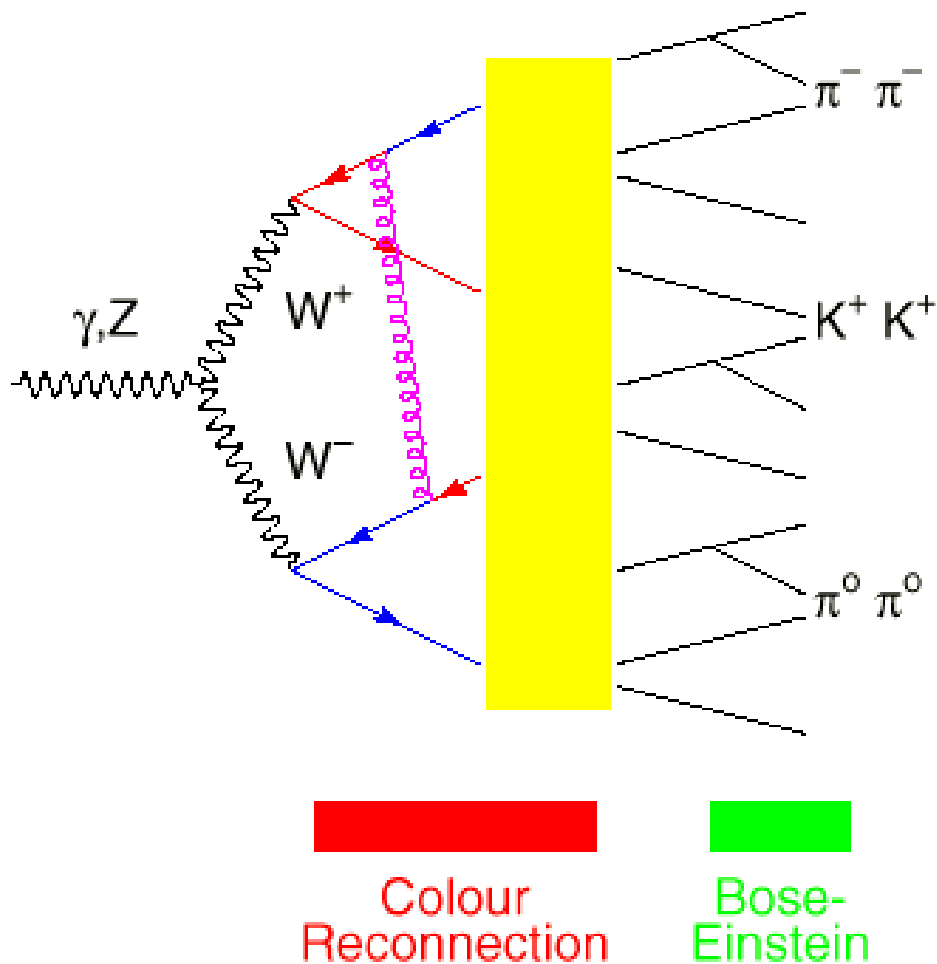
- **Confronto fra Jetset, Herwig e Ariadne**
 - metodo principale per la stima dell'errore sistematico di frammentazione in ADLO
 - **MC riottimizzati alla Z**
 - ADLO usano diversi parametri
- Metodo alternativo: confronto con i dati WW (A)
 - confronto nelle variabili caratteristiche dei jets
 - reweighting degli eventi MC ai dati in bins delle variabili studiate
 - distorsione dello spettro di massa e stima di ΔM_W
 - **Jetset e Herwig descrivono i dati altrettanto bene**
 - la sorgente del ΔM_W fra Jetset e Herwig non è stata ancora capita
- Commenti tecnici
 - rischio di double counting dell'errore
 - la simulazione incorretta del detector può amplificare la differenza fra J/H/A
 - grande statistica MC necessaria
 - errore statistico sull'eventuale bias sistematico



- Studi congiunti in corso in ADLO
 - stima dell'errore usando gli *stessi eventi*
 - differenza eventuale può venire dal detector
 - stima dell'errore con un metodo coerente
 - combinazione con la giusta correlazione
 - **la frammentazione può essere la sistematica limitante per la misura finale di M_W a LEP**



“Final State Interactions” in $WW \rightarrow qqqq$



Le frammentazioni in adroni dei due bosoni W non sono indipendenti

- gli spettri di massa invariante dei prodotti di decadimento sono modificati
→ *bias sistematico sul fit di M_W*

Due meccanismi di interazione nello stato finale sono stati considerati

- **“Colour Reconnection” (CR)**
 - scambio di gluoni soffici (QCD non perturbativa) fra le due stringhe
- **Correlazioni di Bose-Einstein (BEC)**
 - aumento nella produzione di coppie di bosoni identici ($\pi^+\pi^+$, $\pi^-\pi^-$) vicini fra loro nello spazio degli impulsi
- *molti modelli per entrambi i fenomeni!*



“Final State Interactions” e M_W

Solo (molti) modelli fenomenologici esistono per CR e BEC fra W

– **CR:**

- Sjöstrand-Khoze (SKI, SKII, SKII')
- Gustafson-Hakkinen (GH)
- Ariadne (AR1, AR2, AR3)
- Herwig
- Ellis-Geiger (VNI)

– **BEC:**

- Sjöstrand-Lonnblad (BE0, BE2, BE23, BE_m)
- Todorova-Rames
- Kartvelishvili-Kvatadze-Møller

– Ogni modello può avere parametri liberi

L'esistenza stessa di CR o BEC fra i due W in $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$ non è sicura

L'errore sistematico su M_W è ottenuto dal massimo shift nei diversi modelli

Experiment	ΔM_W (CR)	ΔM_W (BEC)
ALEPH	30 MeV	30 MeV
DELPHI	50 MeV	20 MeV
OPAL	50 MeV	50 MeV
L3	47 MeV	55 MeV

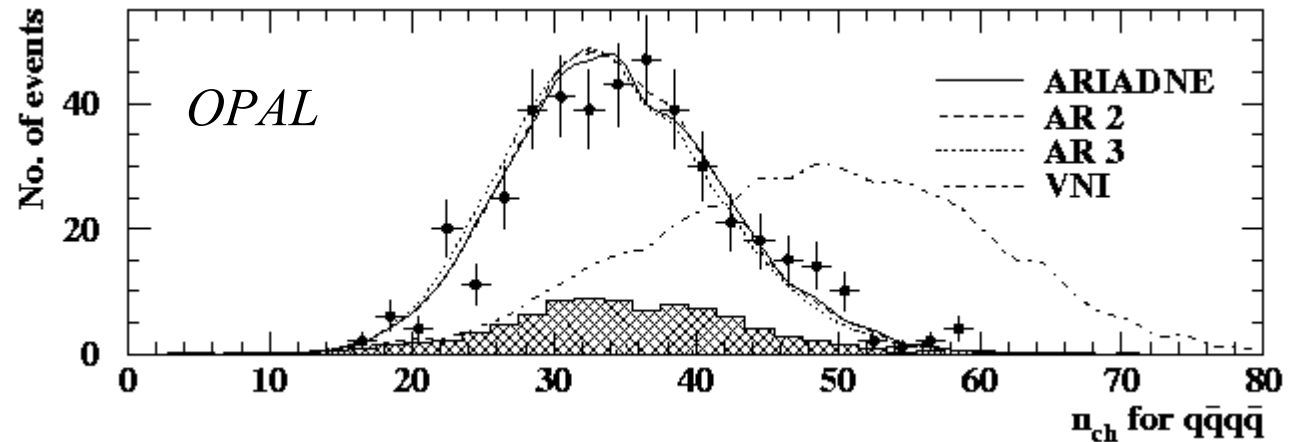
Collaborazione fra i 4 esperimenti per:

- capire/ridurre i diversi errori stimati
- combinare gli errori ($\rightarrow$ correlazione)
- stimare l'errore usando *gli stessi eventi*
- confrontare i metodi usati per escludere o validare *coi dati* i modelli studiati



“Colour reconnection” e molteplicità di tracce

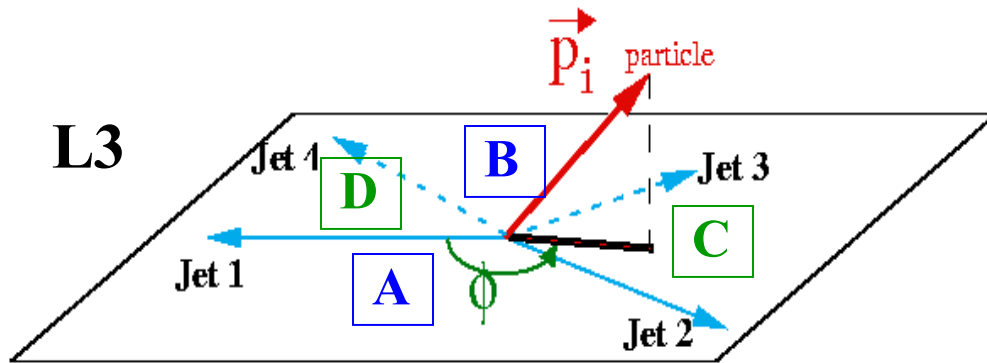
- Alcuni modelli di CR prevedono distorsioni molto visibili delle distribuzioni di alcune *variabili globali*, come la molteplicità di tracce cariche o il thrust
 - il modello VNI di Ellis-Geiger è escluso dai dati
 - il modello AR3 in Ariadne è sfavorito dai dati



- La maggior parte dei modelli non prevedono effetti importanti sulle variabili globali
 - è invece interessante la distribuzione locale delle singole particelle accanto ai jets!

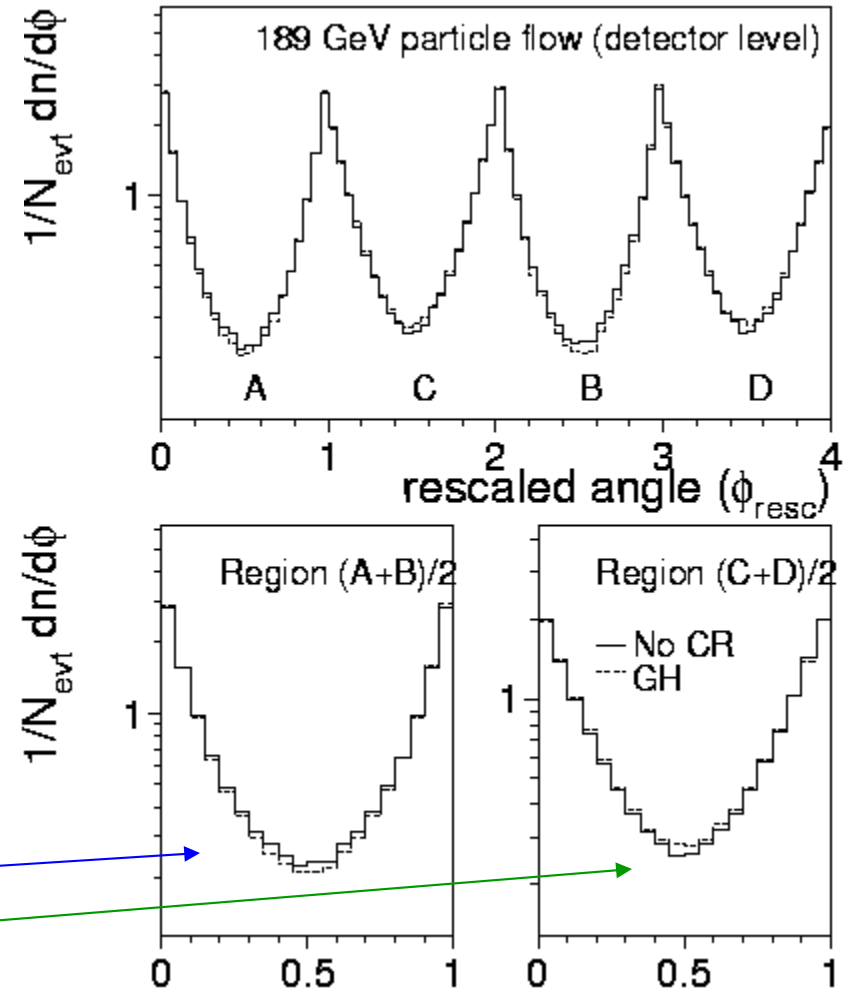


“Colour reconnection” e “particle flow” (I)

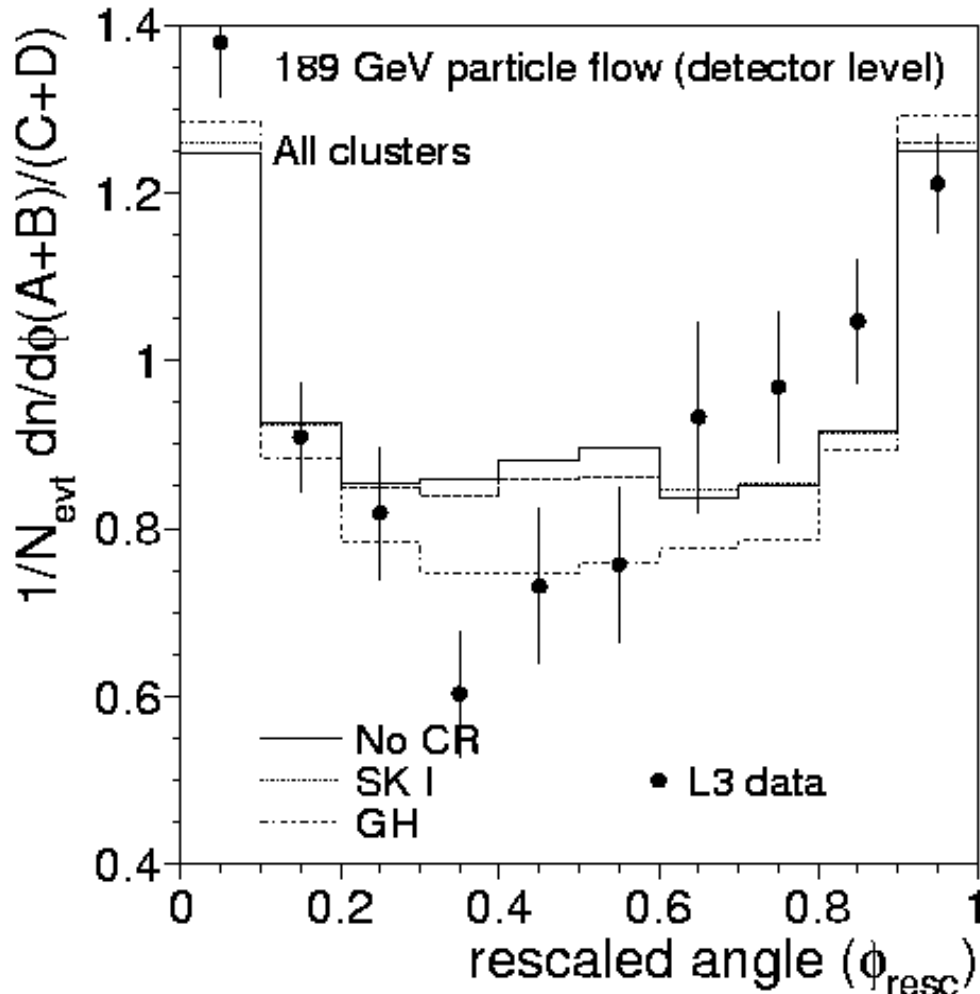


Analisi di L3 del “particle flow”:

- selezione di eventi qqqq planari
- i due W sono le due coppie di jets (12), (34)
- proiezione sul piano (12) di jets e particelle
- due regioni intra-W (A,B) e due inter-W (C,D)
- plot della distribuzione di $\phi_{\text{resc}} = \phi / \phi_{\text{dijet}}$
- in tutti i modelli di CR:
 - A e B si spopolano
 - C e D si ripopolano



“Colour reconnection” e “particle-flow” (II)



Rapporto fra le molteplicità in AB e CD:

$$R_N = \frac{\int_{0.3}^{0.7} \frac{1}{N} \cdot \frac{dn}{d\phi}(\text{regions A+B})}{\int_{0.3}^{0.7} \frac{1}{N} \cdot \frac{dn}{d\phi}(\text{regions C+D})}$$

Model	R_N particle	R_N detector
No CR	1.004 ± 0.006	0.889 ± 0.007
SkII	0.977 ± 0.006	0.875 ± 0.007
SKI	0.974 ± 0.006	0.855 ± 0.007
GH	0.898 ± 0.006	0.776 ± 0.007

Nei dati (L3 a 189 GeV):

$$R_N = 0.76 \pm 0.05 \text{ (stat. only)}$$

Un indizio pro CR (senza sistematici)...

Ottima sensibilità colla statistica finale dei 4 esperimenti LEP!



Correlazioni di Bose-Einstein (I)

- L'osservabile più usata per lo studio delle BEC negli eventi a più bosoni identici è la *funzione di correlazione a due particelle*

$$R(p_1, p_2) = \frac{P(p_1, p_2)}{P_0(p_1, p_2)}$$

pari al rapporto fra le densità a 2 particelle in presenza (P) o assenza (P₀) di BEC.

- Le BEC sono spesso parametrizzate da

$$R(Q) = \frac{P(Q)}{P_0(Q)} = \kappa(1 + \epsilon Q)(1 + \lambda e^{-\sigma^2 Q^2})$$

dove

$$Q^2 = -(p_1 - p_2)^2 = M^2(\pi\pi) - 4m_\pi^2$$

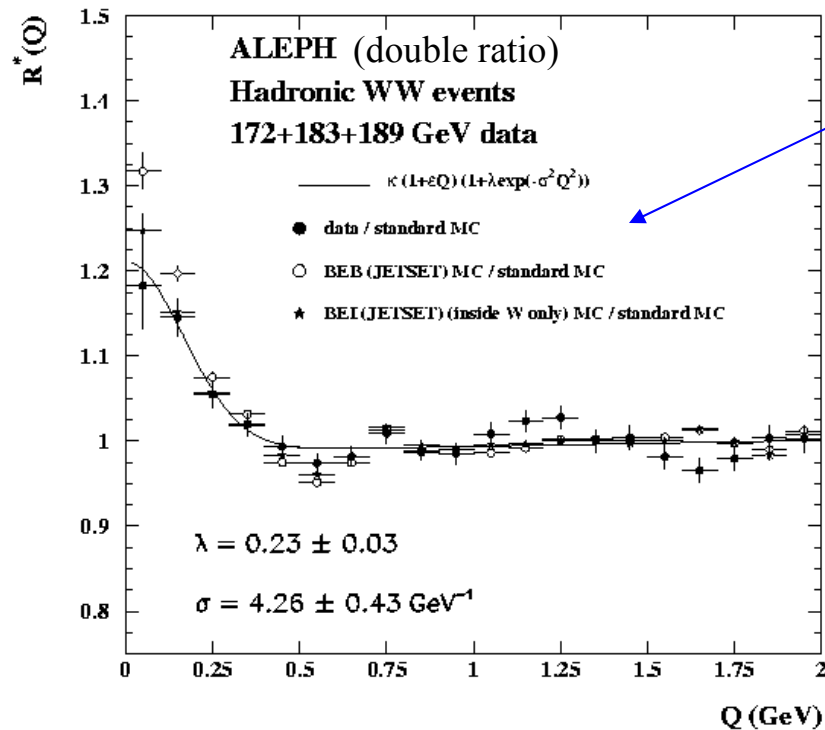
misura la distanza nello spazio degli impulsi fra i due bosoni (di solito, π)

- Le BEC si osservano in eventi $Z \rightarrow q\bar{q}$ su coppie di π (e K) carichi e neutri
→ fit dei parametri dei modelli BEC!
- In eventi WW, BEC possono esistere:
 - *dentro ai W* (fra π dal decay di un W)
 - *fra i W* (fra π dai decays di due W)
 - il bias su M_W viene dalle BEC *fra W*
- Diverse analisi possibili di BEC *fra W* normalizzano R con diverse densità P₀
 - single ratio (data/MC_no_BE)
 - N⁺⁺ in qq $\bar{q}\bar{q}$
 - double ratio (data/MC_no_BE)
 - N⁺⁺ in qq $\bar{q}\bar{q}$ / N⁺⁻ in qq $\bar{q}\bar{q}$
 - N⁺⁺ in qq $\bar{q}\bar{q}$ / N⁺⁺ in mixed lvqq



Correlazioni di Bose-Einstein (II)

$$R^*(Q) = \left(\frac{N_{\pi^{++},--}(Q)}{N_{\pi^{+-}}(Q)} \right)^{\text{data}} / \left(\frac{N_{\pi^{++},--}(Q)}{N_{\pi^{+-}}(Q)} \right)^{\text{MC}_{\text{no BE}}}$$



BEC dentro un W:

osservata con certezza

BEC fra i due W:

Sfavorita da Aleph

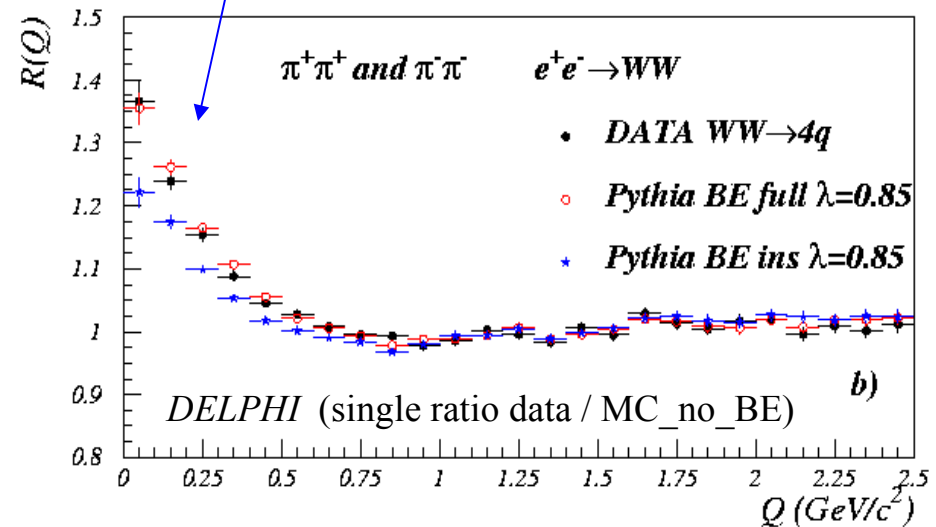
Favorita da Delphi

Analisi molto diverse

Rapporto R, modelli BE, background...

Studi sistematici e confronti incrociati in atto...

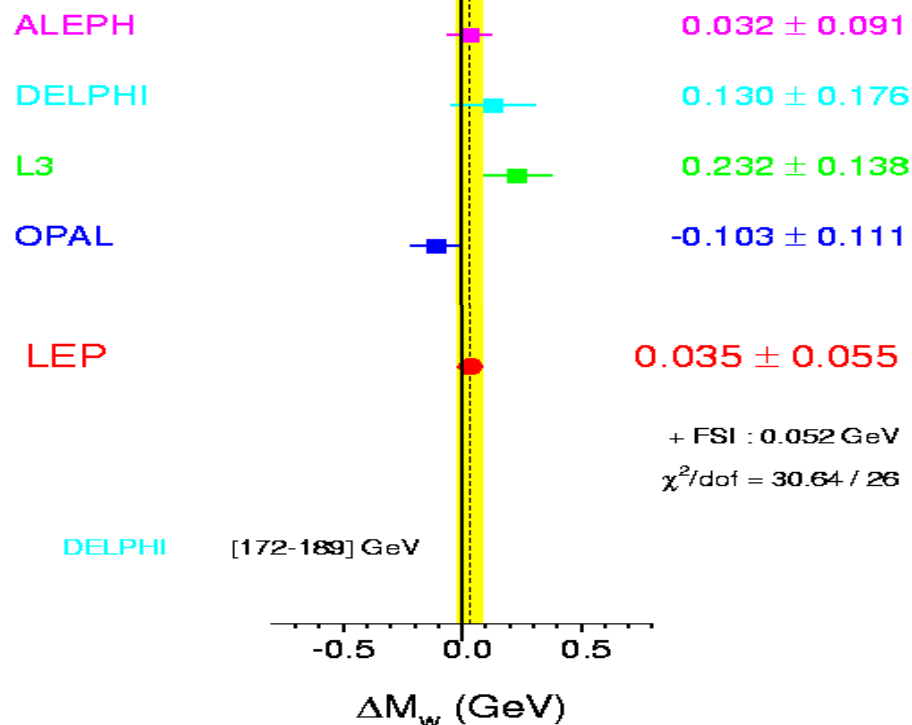
Statistica in aumento!



Differenza (massa 4q) - (massa non-4q)

Winter 00 - Preliminary

ΔM_W (GeV)



La misura della massa nei canali con disintegrazioni del W in leptoni non è influenzata dalla presenza eventuale di FSI.

Una differenza fra le misure di massa nei canali 4q e non-4q potrebbe quindi essere un indizio di FSI (CR e/o BE).

Media LEP *preliminare* per Moriond 2000:

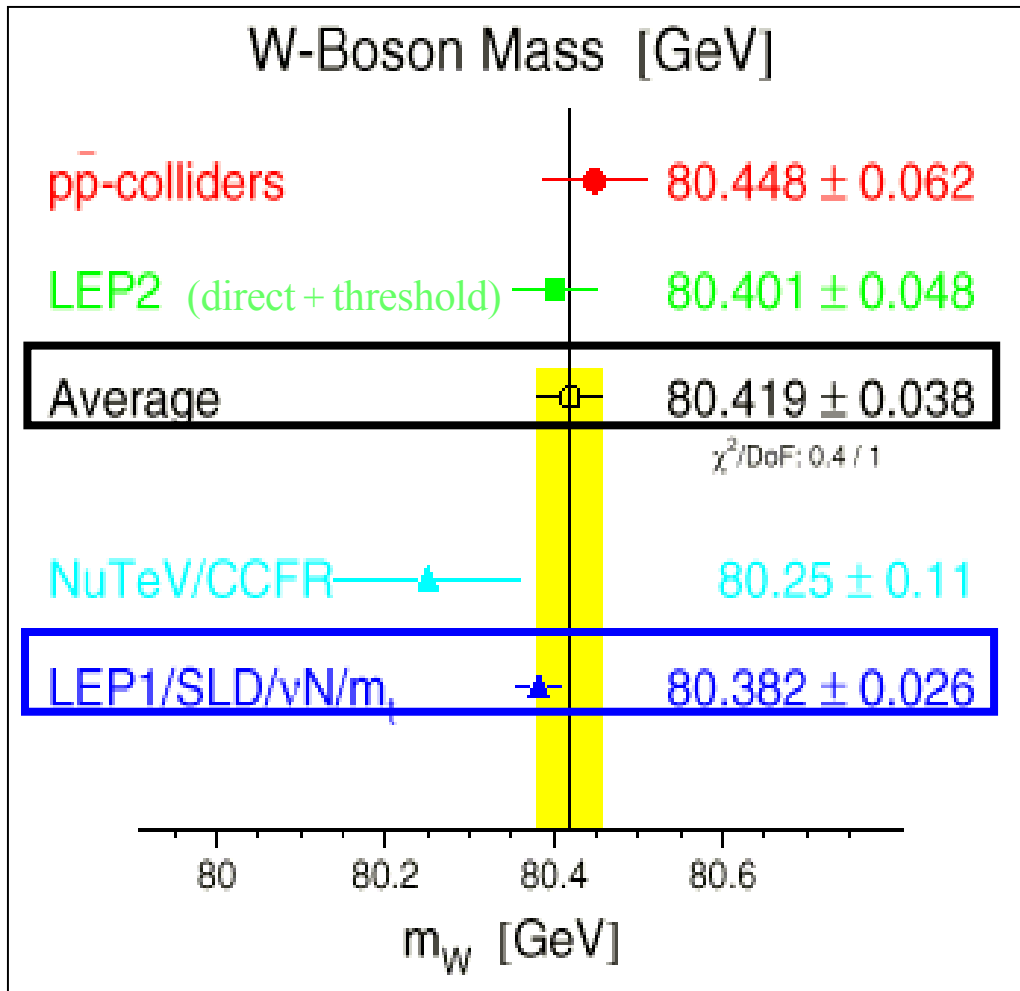
$$\Delta M_W = 35 \pm 55 \text{ MeV}$$

compatibile con zero.

L'errore FSI di 52 MeV nel canale 4q *non è incluso*.



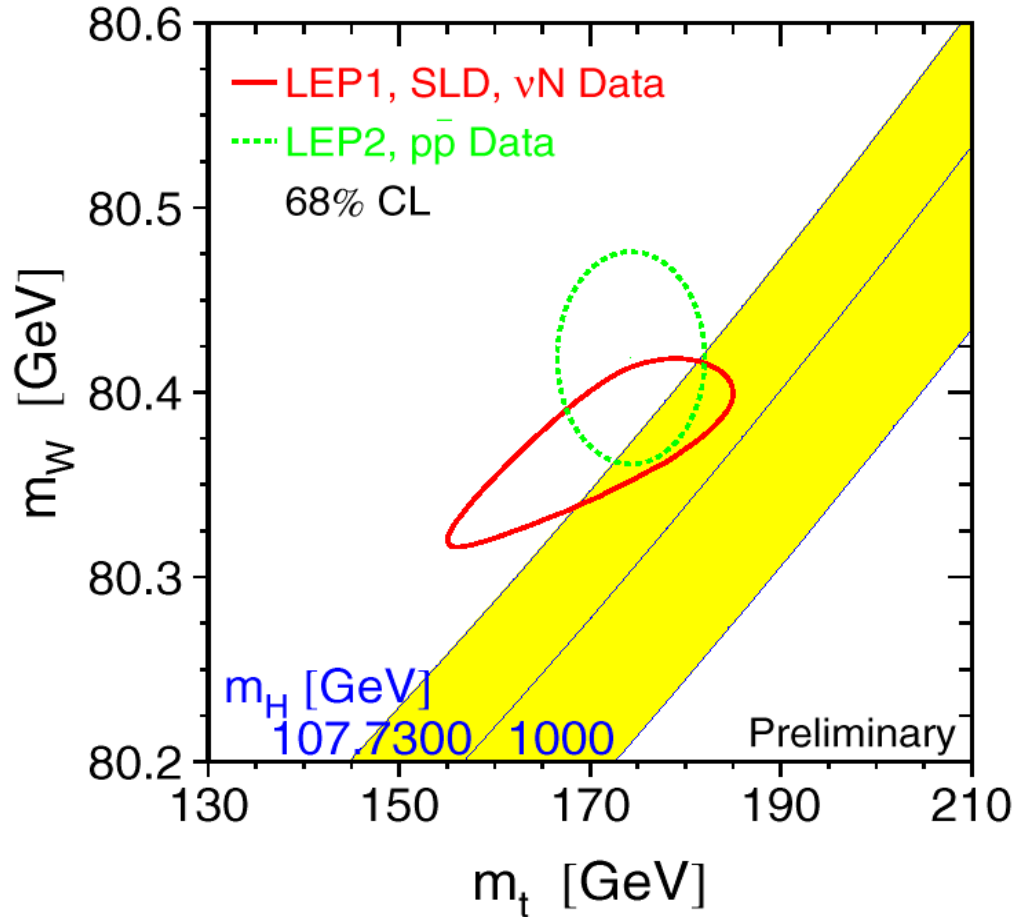
Massa del bosone W



- La precisione sulla misura diretta di M_W a LEP2 ha superato quella ottenuta ai colliders adronici
- La misura di M_W è in accordo col fit globale degli altri dati elettrodeboli
 - La precisione sulla media mondiale di M_W si avvicina ora a quella della previsione indiretta dal fit



Massa del bosone W e fits elettrodeboli



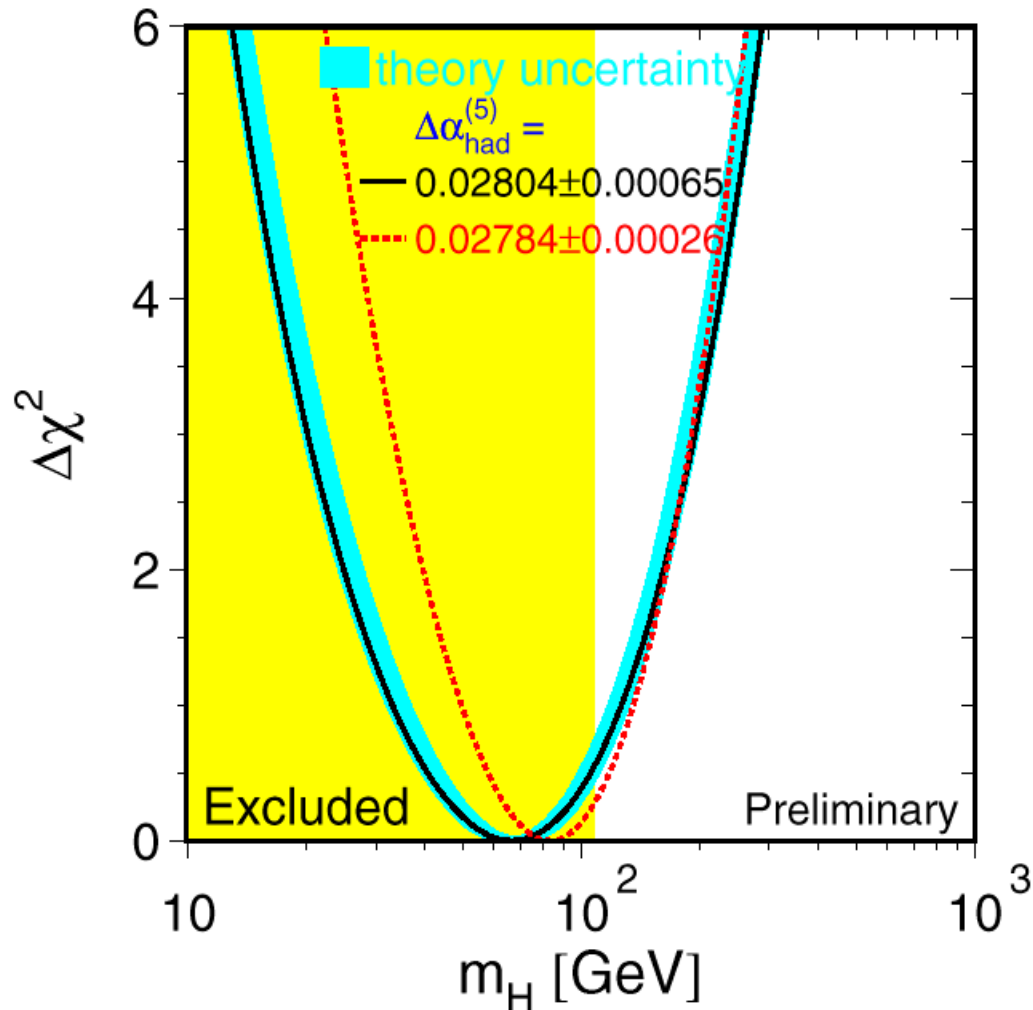
Il bosone di Higgs nel Modello Standard è leggero

Le misure al picco della Z (su tutte, $\sin^2\theta_W$) sono le più sensibili alla massa dell'Higgs

- ma la sensibilità a M_{Higgs} della attuale misura di M_W comincia ad avvicinarsi!



Massa del bosone di Higgs



Dai fits SM ai dati elettrodeboli:

$$\log(m_H / \text{GeV}) = 1.82^{+0.28}_{-0.30}$$

$$m_H = 67^{+60}_{-33} \text{ GeV}$$

$$m_H < 188 \text{ GeV @ 95\% CL}$$

Limite dalla ricerca diretta a LEP2:

$$m_H > 107.7 \text{ GeV @ 95\% CL}$$



Conclusioni

- LEP misura la massa del M_W con precisione crescente
 - includendo i dati del 1999, $\Delta M_W = 49 \text{ MeV}$
 - lo sforzo attuale è nel **ridurre i sistematici**
- 2000: ultimo anno di presa dati di LEP
 - luminosità integrata finale per esperimento fra 600 e 650 pb⁻¹
 - FSI: ottime prospettive di poter evidenziare o escludere BE/CR nei dati
 - Maggiore statistica per ridurre le sistematiche su MW
 - $\Delta M_W = 30 \text{ MeV}$ alla fine di LEP?
 - l' Higgs SM è leggero...

