

Misure elettrodeboli di precisione al LEP
Toni Baroncelli
INFN - RomaIII

*Corso di Fisica Sperimentale Particelle
Elementari Anno 2007*

Dipartimento di Fisica Edoardo Amaldi

Lezione 1: LEP-1

- Acceleratori & rivelatori; relazioni di base dello SM; il processo $Z \rightarrow f\text{-(anti)}f$; sezioni d'urto ed asimmetrie
- La 'lineshape' della Z
- Misure di asimmetria
- Risultati da quarks b & c

Lezione 2: LEP-2

- e^+e^- in W^+W^- e ZZ
- Ricerca di Higgs

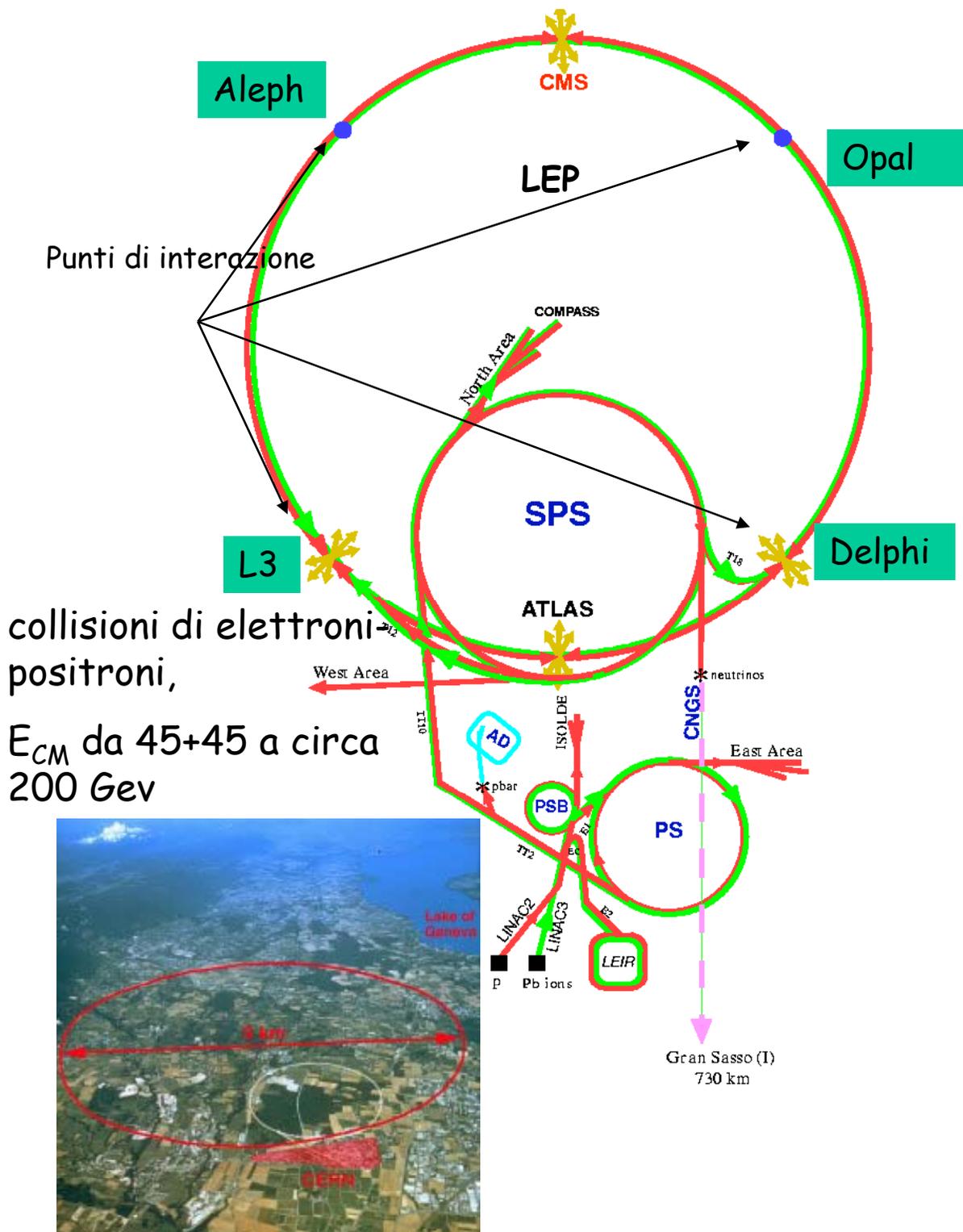
Lezione 3: Colliders

- Misure EW a colliders adronici: Tevatron, LHC

Lezione 4: Colliders

- Ricerche di Higgs

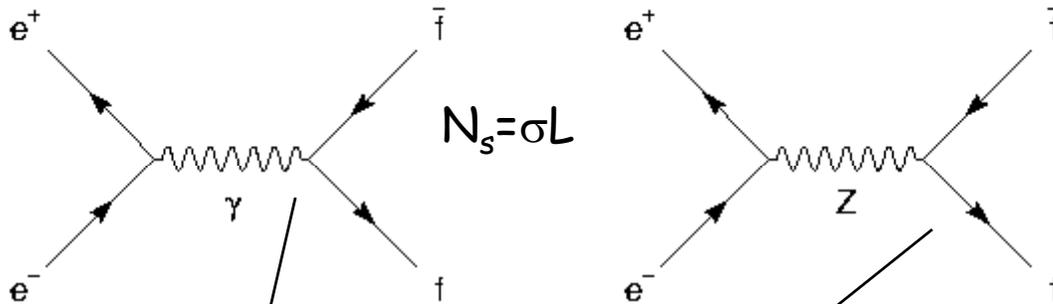
Il complesso degli acceleratori del CERN



collisioni di elettroni e positroni,
 E_{CM} da 45+45 a circa 200 Gev

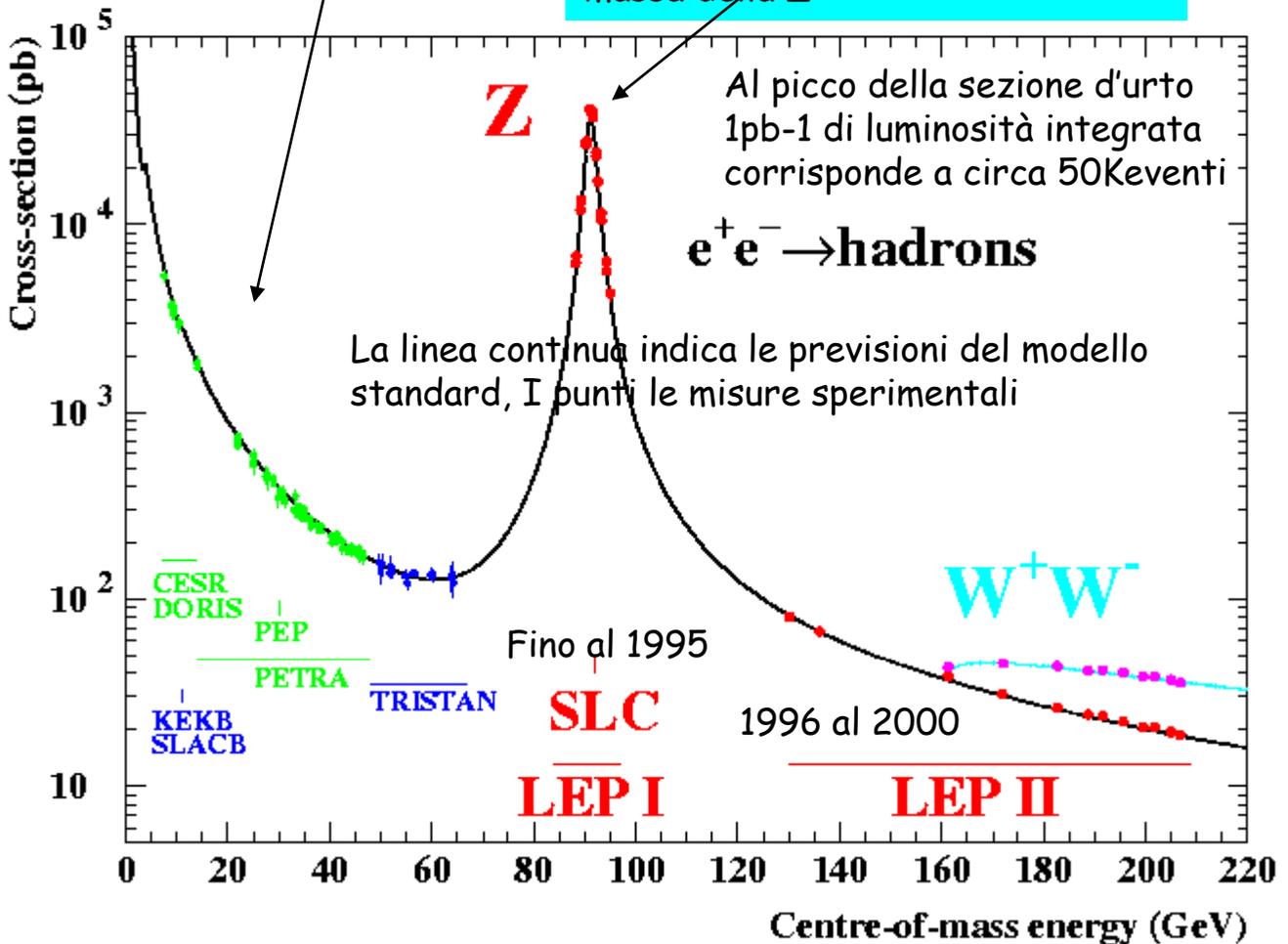
Relazioni di base del Modello Standard al LEP

Il processo di base $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$ avviene all'ordine più basso attraverso lo scambio di fotoni e Z



Determina l'andamento $1/s$ ed il picco a 0

Determina il picco di risonanza alla massa della Z



Gli eventi raccolti al LEP

Gli esperimenti al LEP sono stati disegnati in modo da assicurare un'efficienza di trigger pari a circa il 100%. Gli eventi acquisiti vengono classificati in diversi canali usando selezioni topologiche.

La selezione degli eventi è scelta in modo da massimizzare l'efficienza e l'accettanza angolare; questo consente di minimizzare le correzioni da applicare alle misure.

In particolare:

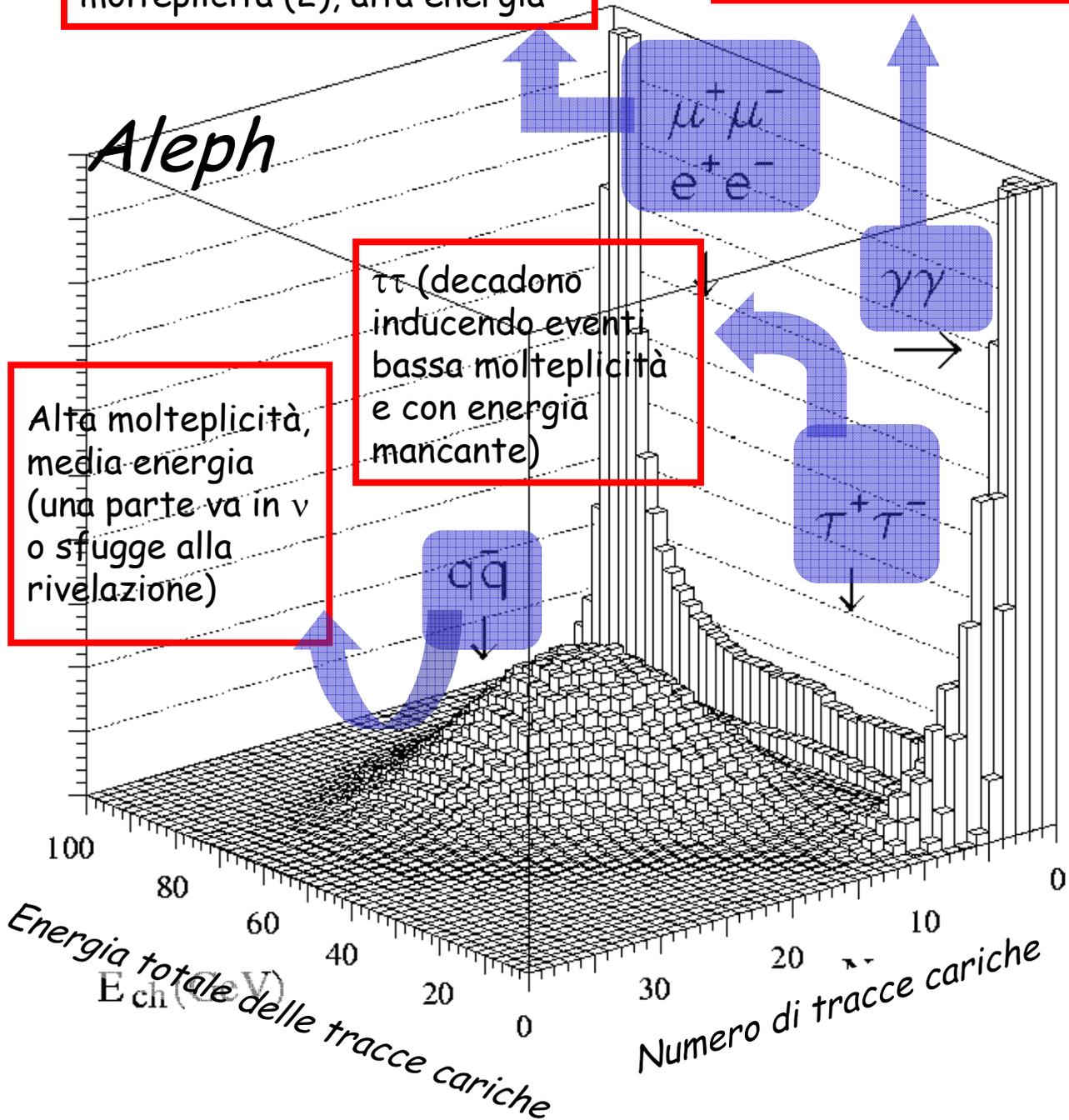
- è necessario accettare efficacemente eventi con ISR e FSR; questo di nuovo minimizza le correzioni da apportare;
- è cruciale distinguere efficientemente eventi indotti da leptoni e da quarks;
- la distinzione tra le diverse specie di leptoni consente lo studio dell'universalità degli accoppiamenti dello Z ai vari leptoni.

Il fondo di macchina, dovuto a interazioni beam-gas residuo, beam (off momentum electrons)-apparato è molto piccolo. L'unico fondo è dovuto ad eventi $\gamma\gamma$.

La selezione di eventi

Coppia di $ee, \mu\mu$: bassa molteplicità (2), alta energia

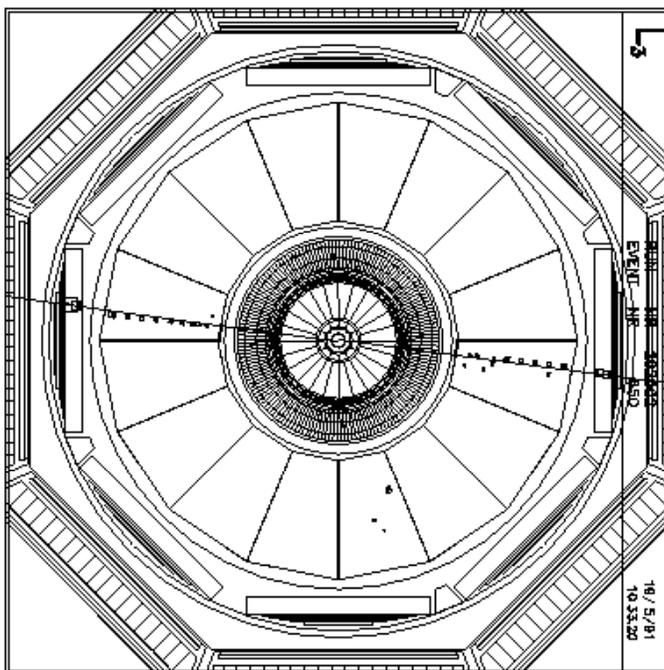
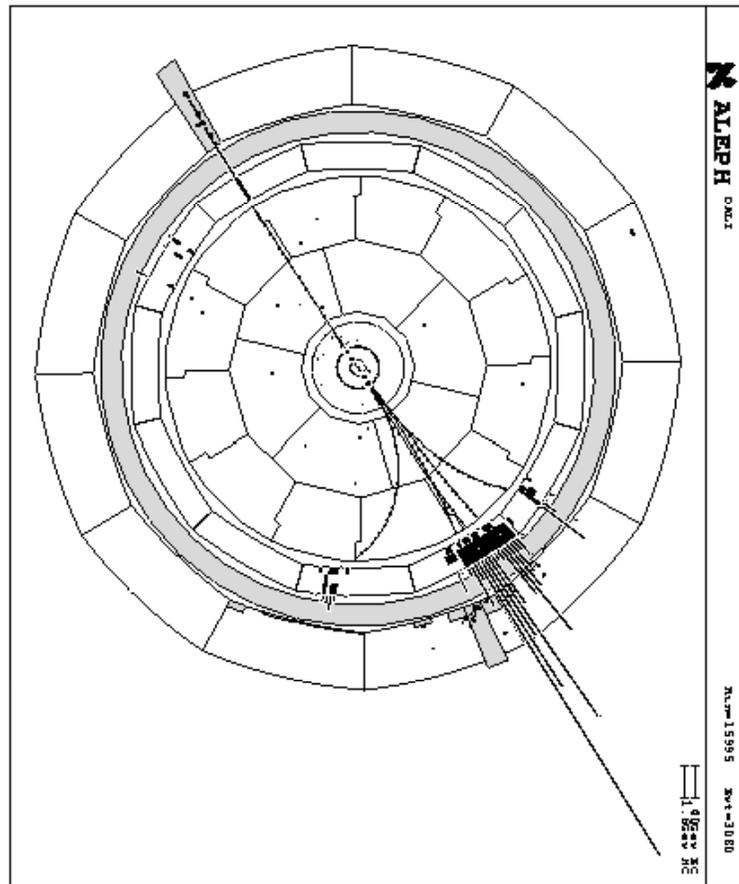
Eventi per la maggior parte nella beam pipe, bassa molteplicità e bassa energia



Le topologie

Evento $\tau^+\tau^-$ visto in Aleph: decadimento in muone + neutrino in alto, decadimento adronico in basso

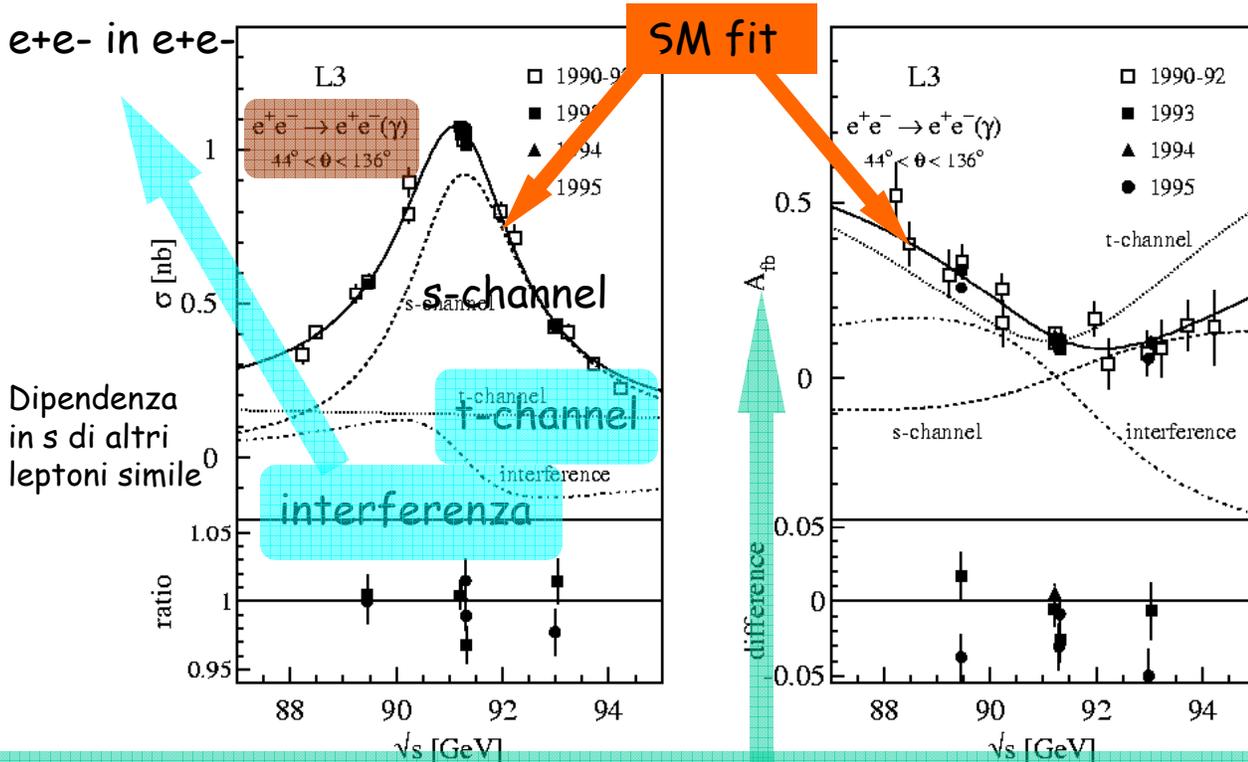
Le topologie degli eventi al LEP sono estremamente pulite e facilmente ricostruibili



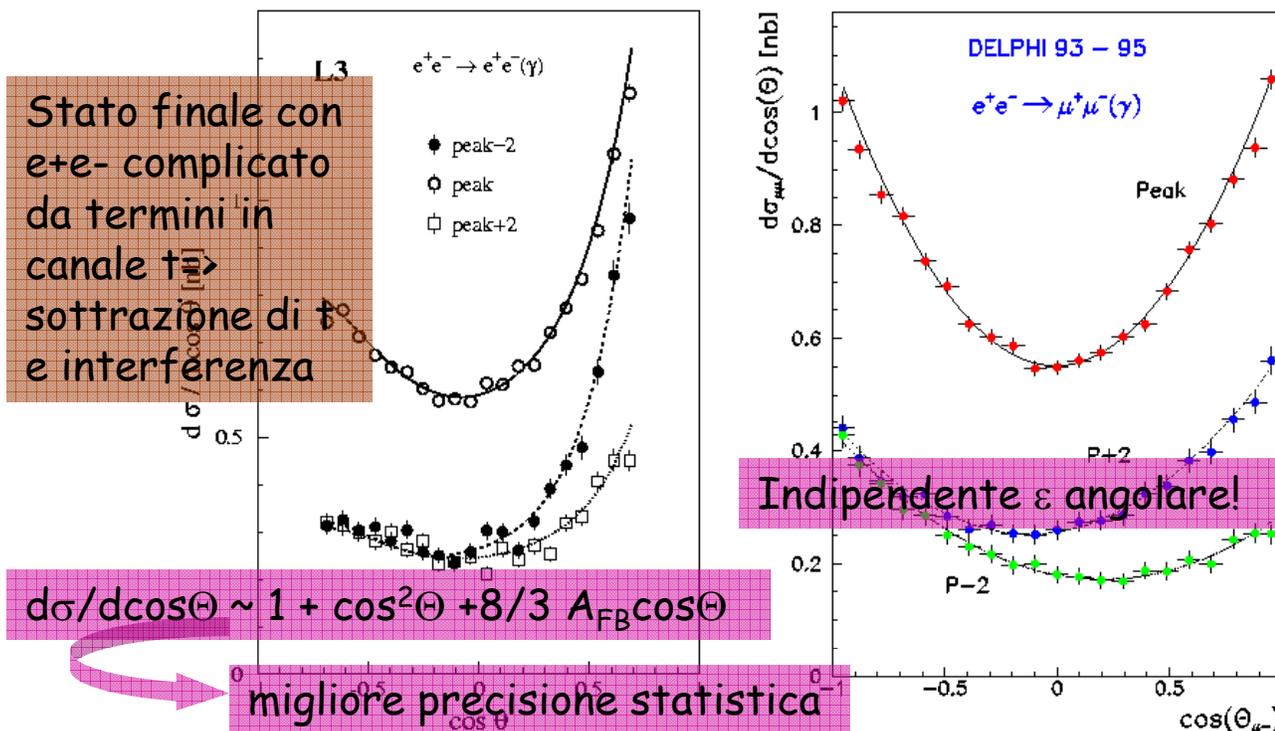
Evento $e^+e^- \Rightarrow e^+e^-$

- 2 tracce cariche di alta energia e di carica opposta
- energia misurata nei calorimetri è circa uguale al p misurato nei rivelatori di traccia

Dipendenza della sezione d'urto dall'energia e diversi contributi



$A_{FB} = (N_f - N_b) / (N_f + N_b)$ dipende dall'accettazione in $\cos\Theta$, carica



I parametri di fit

The full set

of nearly uncorrelated pseudo-observables from EWWG.

- Total Z width: $\Gamma_Z = 2.4952 \pm 0.0023 \text{ GeV}$,

- Z peak cross section:
$$\sigma_{had}^0 \equiv \frac{12\pi}{m_Z^2} \cdot \frac{\Gamma_{ee}\Gamma_{had}}{\Gamma_Z^2},$$

- Ratios $R_f^0 \equiv \Gamma_{had}/\Gamma_{ff}$ for $f = e, \mu, \tau$; also $R_q^0 \equiv \Gamma_{qq}/\Gamma_{had}$ for $q = b, c, s$,

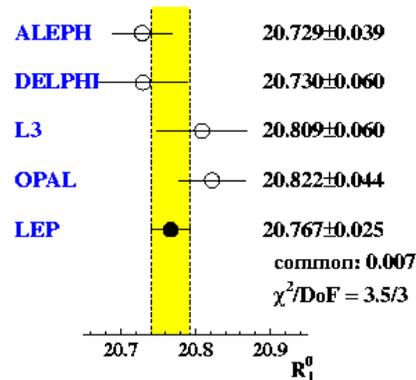
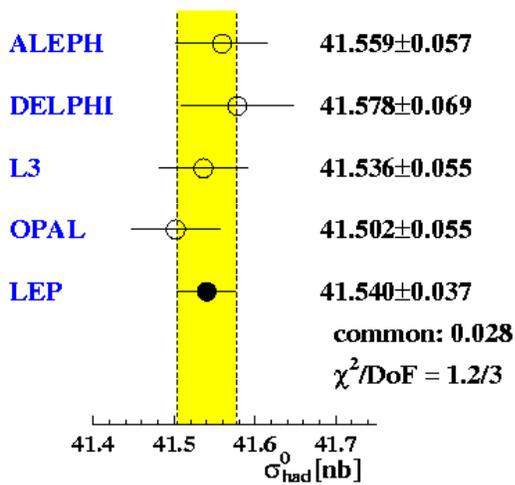
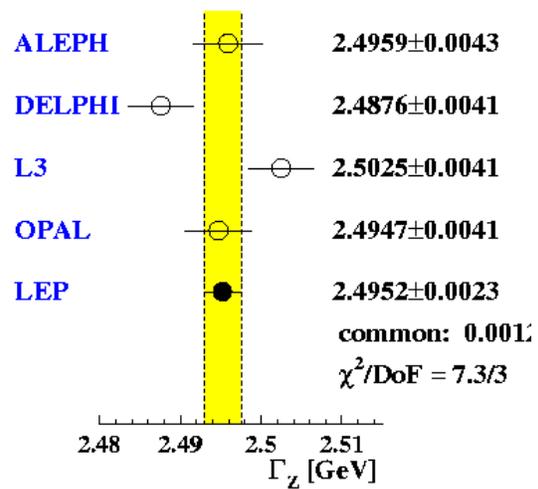
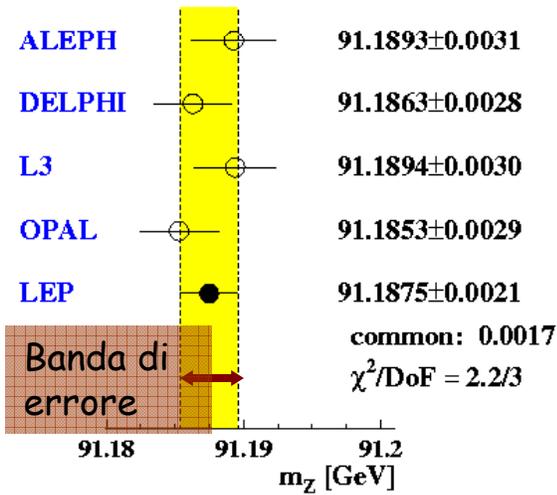
- Forward backward asymmetries for $f = e, \mu, \tau; b, c, s$. At Z pole:

$$A_{FB}^{0,f} \equiv \frac{3}{4} A_e A_f$$

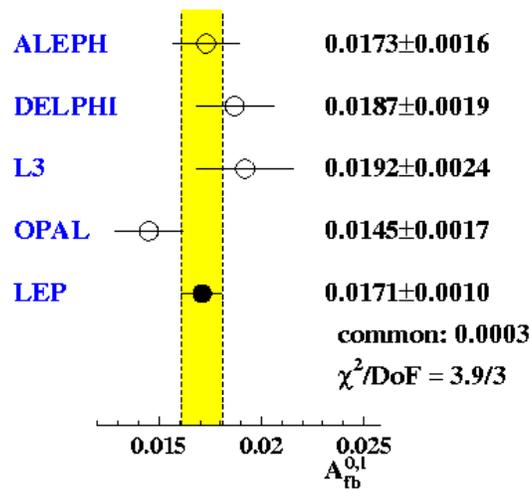
$$A_f \equiv \frac{2g_{Vf}g_{Af}}{g_{Vf}^2 + g_{Af}^2},$$

- τ polarisation:
$$P_\tau(\cos\theta) = -\frac{A_\tau(1 + \cos^2\theta) + 2A_e \cos\theta}{1 + \cos^2\theta + 2A_\tau A_e \cos\theta}.$$

Misura combinata di m_Z , Γ_Z , σ_h^0 , R_l^0 , $A_{FB}^{0,l}$



$\chi^2/DoF \sim 1$ indica misure 'ben distribuite'



.. la massa dello Z: accuratezza 2×10^{-5}

The final result

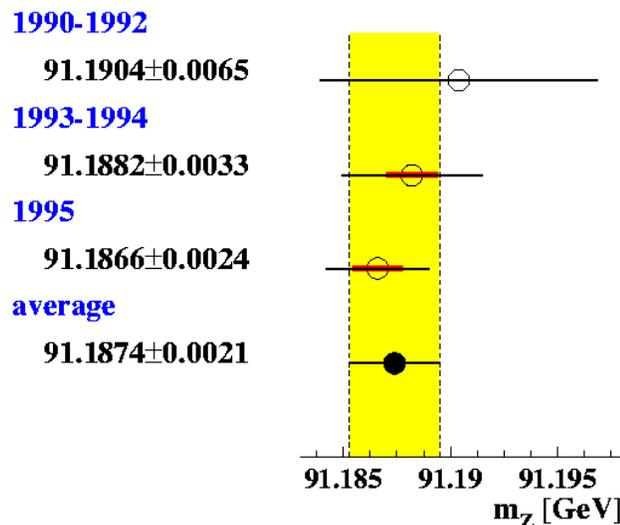
$2 \cdot 10^{-5}$ accuracy for one of the most fundamental constants:

$$m_Z = 91.1874 \pm 0.0021 \text{ GeV}$$

This cannot be exceeded with any one of the future machines, not even with a GigaZ Linear Collider!

Essential:

- Beam energy measurement using the technique of **resonant depolarisation** plus careful control of all machine parameters, still **dominant error of $\pm 1.7 \text{ MeV}$** ,
- Close cooperation with theory.



Il numero di specie di neutrino

Number of light neutrinos N_ν

One of the questions asked by the **LEPC** before recommending approval of the experiments:

What is the expected accuracy for neutrino counting?

Best value from accurate measurement of Γ_{inv}/Γ_{ll} divided by $\Gamma_{\nu\nu}/\Gamma_{ll}$ from MSM; $\Gamma_{inv} = \Gamma_Z - \Gamma_{had} - \Gamma_{ll}(3-\delta_\tau)$:

Average: $N_\nu = 2.9841 \pm 0.0083$ (2 σ below 3).

$$\Gamma_{inv}^x = -2.7^{+1.7}_{-1.5} \text{ MeV}$$

$$\Gamma_{inv} = N_\nu \Gamma_{\nu\nu}$$

without lepton universality		correlations
Γ_{had} [MeV]	1745.8 ± 2.7	
Γ_{ee} [MeV]	83.92 ± 0.12	-0.29
$\Gamma_{\mu\mu}$ [MeV]	83.99 ± 0.18	0.66 -0.20
$\Gamma_{\tau\tau}$ [MeV]	84.08 ± 0.22	0.54 -0.17 0.39

$$\frac{\Gamma_{inv}}{\Gamma_{\ell\ell}} = N_\nu \left(\frac{\Gamma_{\nu\nu}}{\Gamma_{\ell\ell}} \right)_{SM}$$

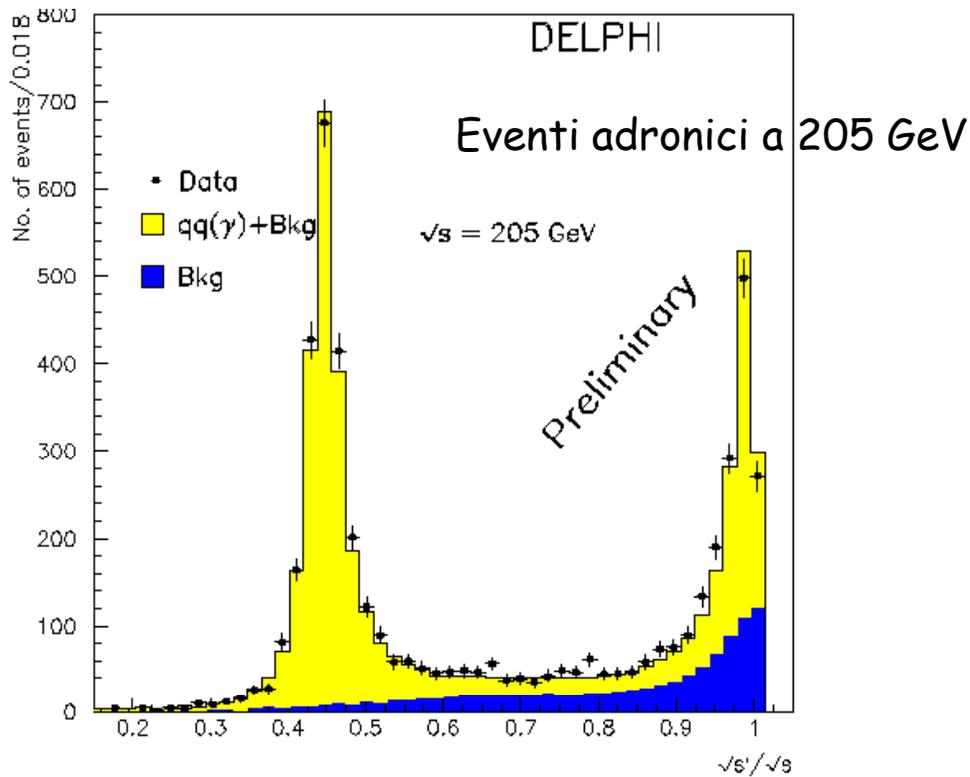
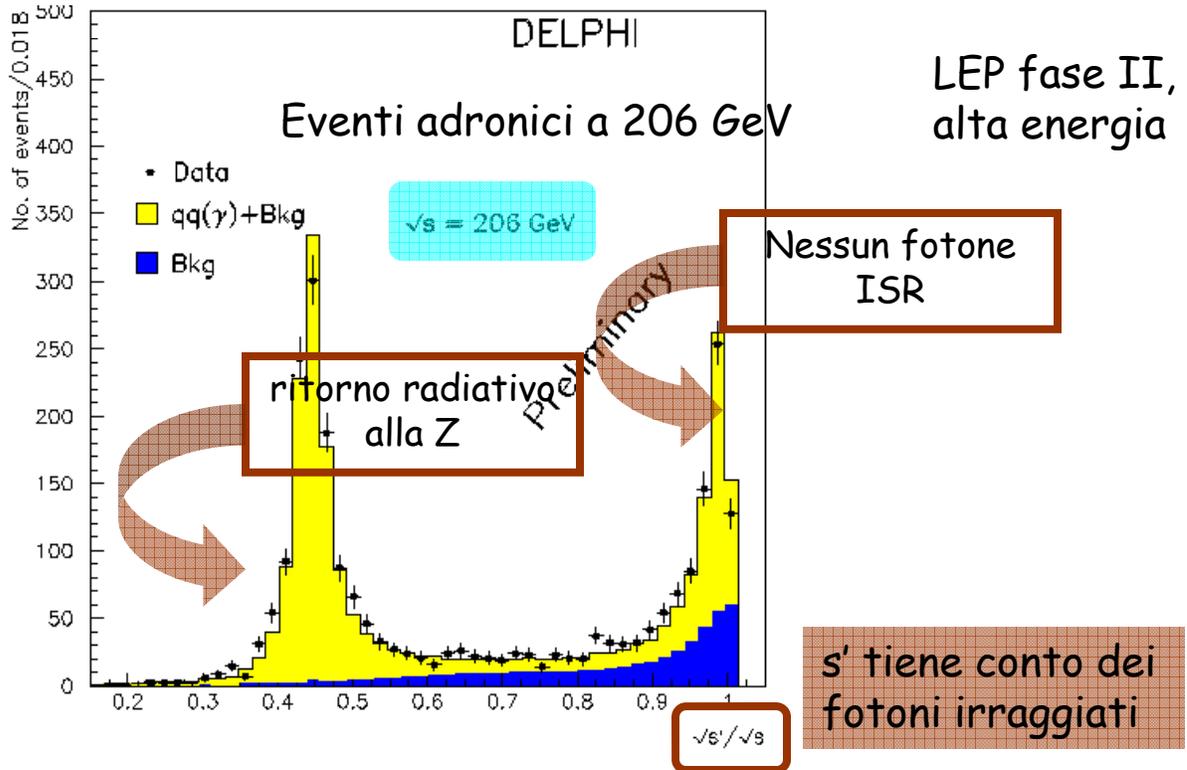
with lepton universality		
Γ_{inv} [MeV]	499.0 ± 1.5	
Γ_{had} [MeV]	1744.4 ± 2.0	-0.29
$\Gamma_{\ell\ell}$ [MeV]	83.984 ± 0.086	0.49 0.39
$\Gamma_{inv}/\Gamma_{\ell\ell}$	5.942 ± 0.016	
σ_ℓ^0 [nb]	2.0003 ± 0.0027	

Valore predetto dallo SM = 1.9912 +/- 0.0012

Nel rapporto alcuni errori sistematici si cancellano!

La deviazione da 3 può essere interpretata come presenza di nuova fisica: nuove particelle invisibile 'accoppiate' alla Z contribuirebbero.

Produzione di coppie di fermioni ad alta energia



Selezione di quarks c e b

Eventi indotti dal decadimento della Z in coppie di quarks pesanti, bb (e cc), possono essere identificati con alta efficienza e purezza ('tag'). Tutte le grandezze EW corrispondenti possono essere calcolate: Γ_b/Γ_{had} (sezione d'urto) ed asimmetrie A_{FB}^b . Esistono diverse tecniche di 'tag':

- lifetime tag (gli adroni bottomati volano alcuni mm da vertice dell'interazione prima di decadere); 
- lepton tag (gli adroni bottomati decadono in c attraverso decadimenti semileptonici producendo leptoni di alto momento ed alto momento trasverso)
- D meson tags (gli adroni bottomati decadono in adroni charmati che possono essere identificati)

Lifetime tag

Le due tecniche più efficienti e pure sono basate su due modi diversi di usare il lifetime tag: parametri di impatto e vertici secondari

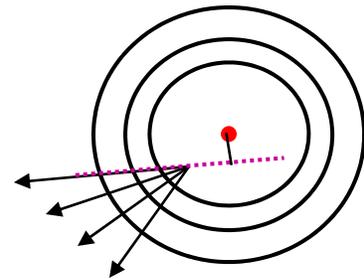
Il decadimento di un adrone bottomato



$$\delta = \gamma\beta c \tau \sin\psi$$

$$\sim c\tau (\sim 300 \mu\text{m})$$

Vista $r\phi$



Alcuni parametri:

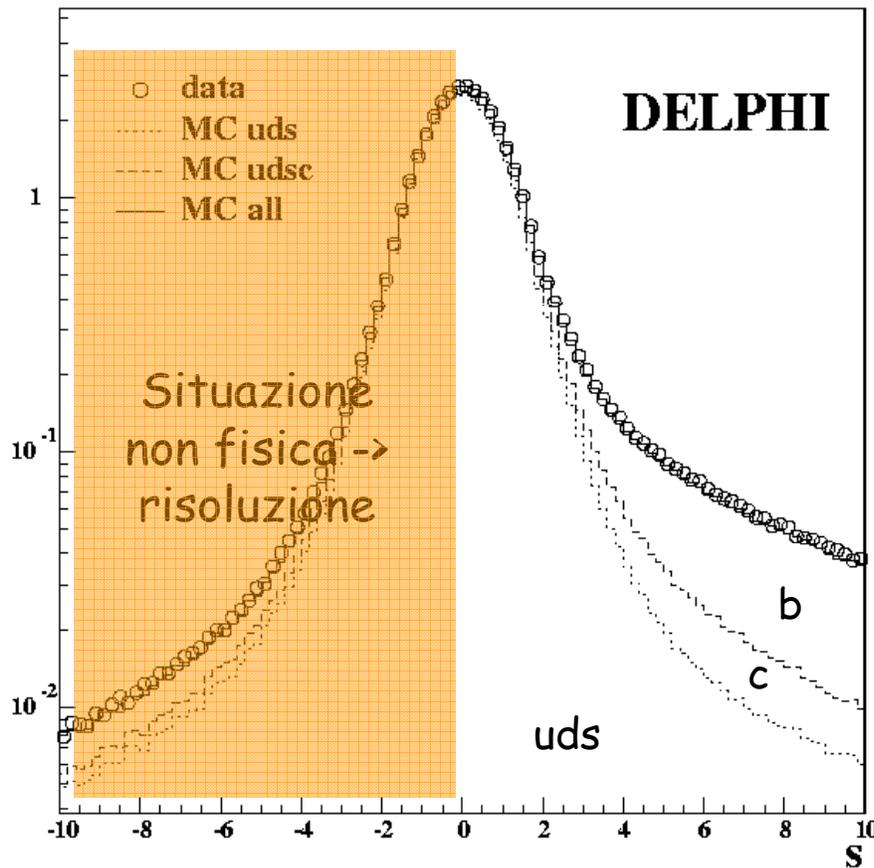
- la vita media di un adrone bottomato è 1.5 ps
- gli adroni bottomati al picco della Z vengono sono energetici: vengono prodotti con circa 30 GeV (su 45!)
- la molteplicità media carica è circa 5
- gli adroni viaggiano circa 3 mm prima di decadere; i rivelatori di vertice al silicio hanno una risoluzione 1 o 2 ordini di grandezza inferiore

	3D	1Dx1D	3D	1Dx1D	3D
	ALEPH	DELPHI	L3	OPAL	SLD
Num. of layers	2	3	2	2	3
Radius of layers (cm)	6.5/11.3	6.3/9/11	6.4/7.9	6.1/7.5	2.9-4.1
$R\Phi$ imp. par. res. (μm)	25*	20	30	16	13
z imp. par. res. (μm)		30	100	35	24
Primary Vertex res. $x \times y \times z$ (μm)	58 × 10 ×60	22 × 10 ×22	42 × 10 ×100	80 × 12 ×85	6.4 × 6.4 ×15

Topologia di eventi indotti da quarks c e b

Vertice primario:

determinato per ogni evento usando l'estrapolazione delle tracce cariche nella regione della beam spot usata come vincolo (dim. orizzontale $100 \mu\text{m}$, verticale $<10 \mu\text{m}$). Le tracce mal compatibili con il vertice primario vengono rimosse dal fit in iterazioni successive.



$$S = \text{significanza} = \frac{\delta}{\Delta(\delta)}$$

Tags leptonici

Un'altra tecnica per selezionare quarks pesanti è basata sulla identificazione di leptoni nell'evento che, nel caso di quarks b, c , originano da decadimenti semileptonici di adroni pesanti. Il b e il c decadono in elettroni e muoni nel 20% degli eventi. Adroni bottomati danno leptoni con alto momento (frammentazione) e momento trasverso (massa). Adroni charmati danno leptoni con grande momento ma con momento trasverso limitato.

Nei decadimenti semileptonici del b e del c la carica del leptone è correlata alla carica del quark di partenza

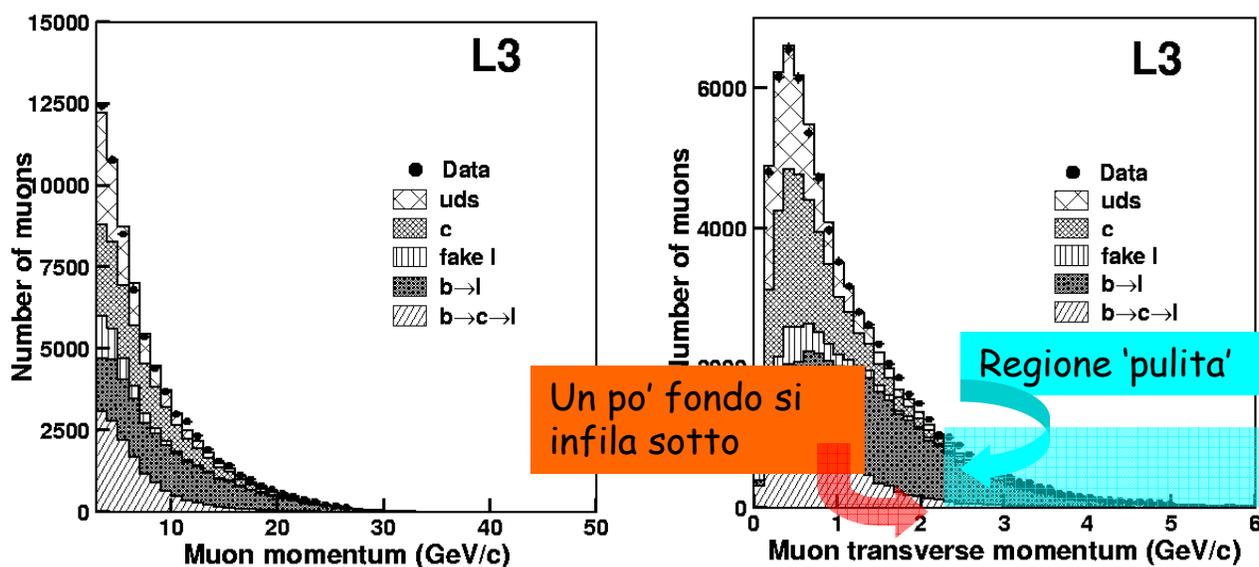
$$b \rightarrow l^-$$

$$c \rightarrow l^+$$

La presenza di un leptone consente contemporaneamente di taggare un quark b , distinguerlo da un anti- b e conoscerne la direzione (ma la direzione del jet è migliore) $\rightarrow A_{FB}^b$ con leptoni è (apparentemente facile). NB: b e c danno leptoni di segno opposto (asimmetria opposta!) e

$$b \rightarrow c \rightarrow l^+$$

quindi bisogna conoscere la composizione del campione e l'origine dei leptoni.



Misura di larghezze parziali: R_b

Per misurare la frazione di un certo tipo di quark in un campione di eventi adronici è in principio sufficiente taggarli, contarli, correggere per l'efficienza, conoscere gli eventi di fondo. In alcuni casi si fa effettivamente così.

$$\Gamma_x / \Gamma_{\text{had}} = (N_x^{\text{tag}} - N_{\text{fondo}}) / (\varepsilon_x^{\text{tag}} N_{\text{had}})$$

Se il tag è sufficientemente puro è in genere possibile conoscere il fondo sufficientemente bene, ma rimane comunque difficile conoscere l'efficienza di selezione sufficientemente bene usando la simulazione soltanto.

La tecnica di doppio tag consente di determinare l'efficienza di tag direttamente dai dati senza usare la simulazione. L'idea di base è che 1) se c'è un b, ce ne è un altro; 2) I prodotti di decadimento sono in genere confinati in un emisfero soltanto.

Il confronto tra il numero di eventi con un emisfero taggato o con entrambi gli emisferi taggati consente di ricavare l'efficienza di tag.

$$\begin{array}{l}
 f_s = \varepsilon_b R_b + \varepsilon_c R_c + \varepsilon_{\text{uds}} \overbrace{(1 - R_b - R_c)}^{R_{\text{uds}}=1-R_b-R_c} \\
 f_d = \varepsilon_b^{(d)} R_b + \varepsilon_c^{(d)} R_c + \varepsilon_{\text{uds}}^{(d)} (1 - R_b - R_c),
 \end{array}$$

f_s frazione di eventi con 1 emisfero taggato

ε_x efficienza di tag singolo flavour x

f_d frazione di eventi con 2 emisferi taggati

$\varepsilon_x^{(d)}$ efficienza di tag doppio flavour x

$\varepsilon_x^{(d)} = (1 + C_x) \varepsilon_x^2$ (C_x tiene conto della correlazione di 2 emisferi)

Il doppio tag

Per b tags abbastanza puri si può assumere C_c & $C_{uds} \sim 0$. Se si trascurano le correlazioni di emisfero

$$R_b = f_s^2 / f_d$$

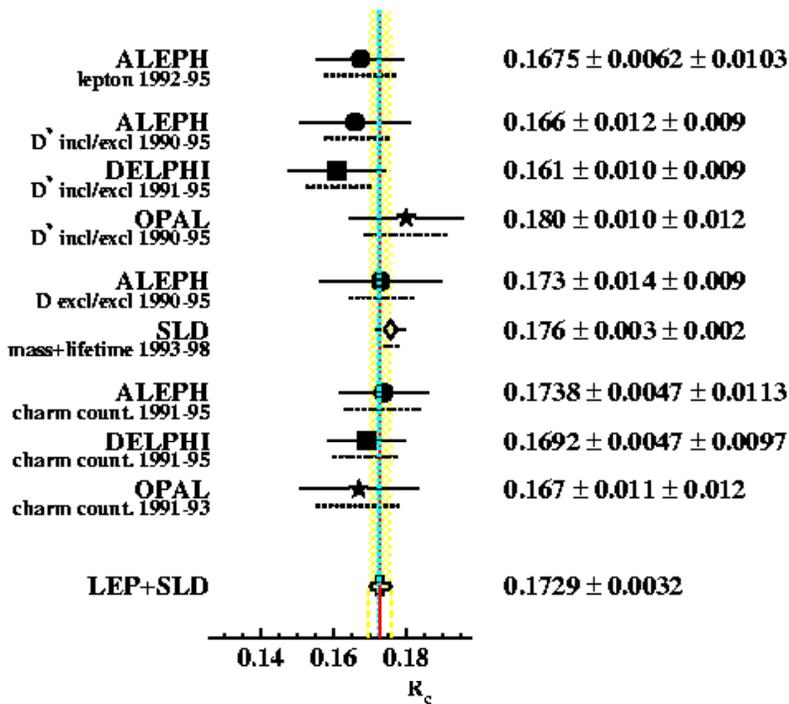
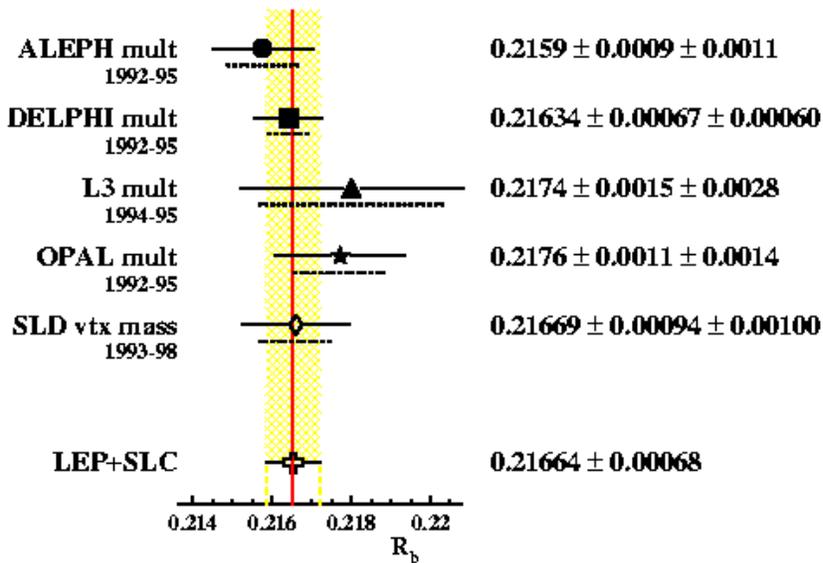
indipendentemente da ε_b che non deve essere determinata usando la simulazione. In realtà, per avere una misura sufficientemente precisa, bisogna tener conto di molti fattori di correzione. In pratica le correlazioni e le incertezze sulle efficienze di tag di un flavour x contano come

$$\Delta R_b = 2 R_x \Delta \varepsilon_x / \varepsilon_b$$

$$\Delta R_b = \Delta C_b R_b$$

quindi è necessario sviluppare un b-tag molto efficiente e molto puro per limitare le incertezze nella misura. Le equazioni di doppio tag introdotte sopra contengono più incognite (5) che misure (2). Quindi ε_c , ε_{uds} e C_b vengono 'comprate' dalla simulazione, R_c viene fissato al valore dello SM e fatto variare entro gli errori.

Risultati su R_b e R_c con tags di diverso tipo



Misura di A_{FB}^b

Come sempre l'asimmetria avanti/indietro di un quark b A_{FB}^b è definita come

$$A_{FB}^{q\bar{q}} = \frac{\sigma_F^q - \sigma_B^q}{\sigma_F^q + \sigma_B^q}$$

dove le sezioni d'urto sono integrate su tutto l'emisfero. La sezione d'urto differenziale rispetto all'angolo polare Θ è

$$\frac{\partial \sigma^q}{\partial \cos \theta} = \sigma_{\text{tot}}^q \left[\frac{3}{8} (1 + \cos^2 \theta) + A_{FB}^{q\bar{q}} \cos \theta \right].$$

Viene usata per fittare la distribuzione angolare dei dati

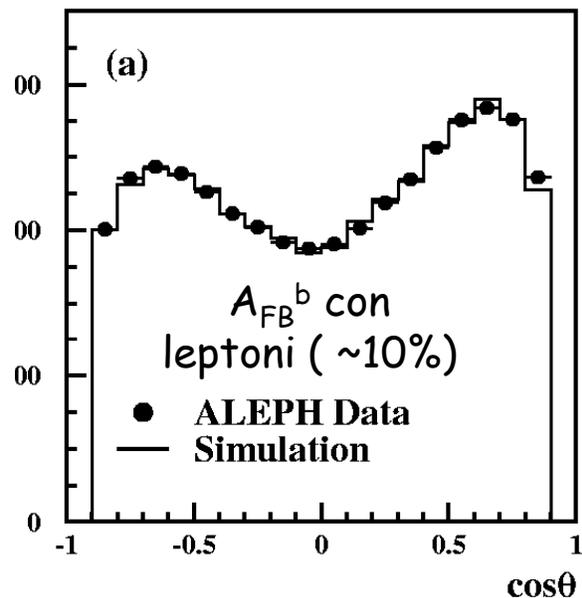
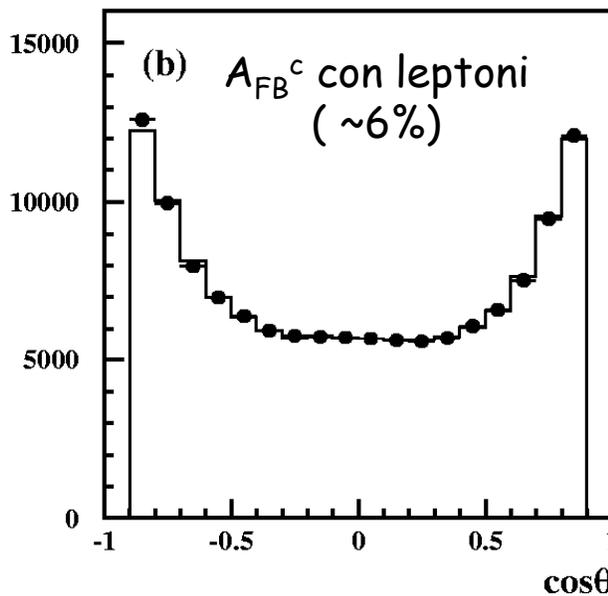
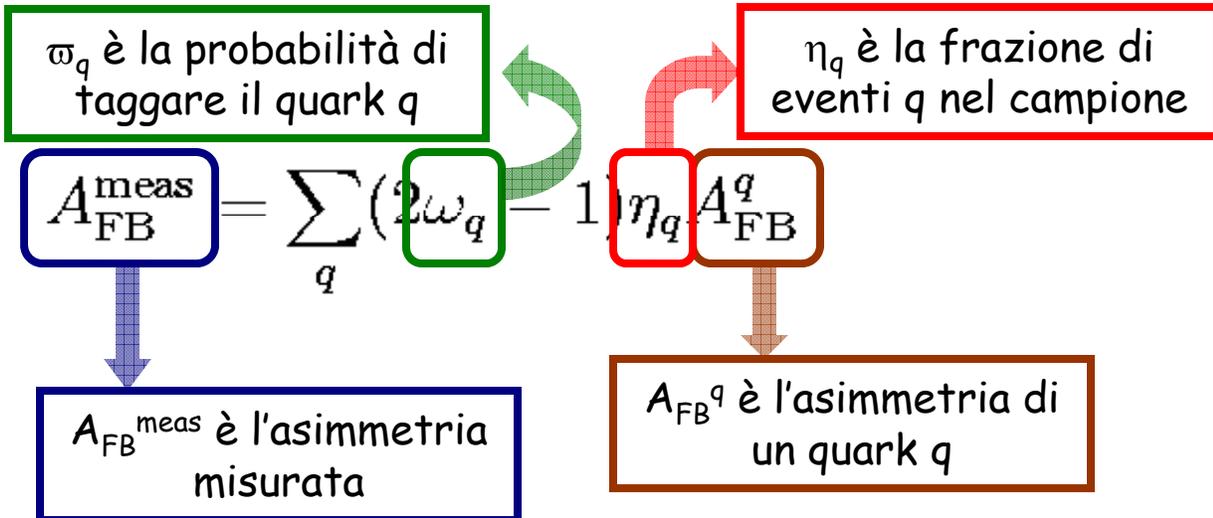
Tre problemi:

- taggare un evento con b
- definire la direzione del 'quark' b
- riconoscere il b dall'anti- b (carica del quark)

- stessa tecnica di R_b
- direzione del *thrust* dell'evento (asse dell'evento)
- il jet che contiene il quark viene identificato usando diverse tecniche: leptoni, jet-charge, vertex charge ed altre.

Misura di Asimmetria

In tutte le analisi l'asimmetria sperimentale è data da



Lepton source	charge correlation	fraction for $p_t > 1.25\text{GeV}$
$b \rightarrow \ell^-, b \rightarrow \bar{c} \rightarrow \ell^-$	1	0.795
$b \rightarrow c \rightarrow \ell^+$	-1	0.046
$c \rightarrow \ell^+$	1	0.048
background	weak	0.111

Misure di asimmetria, jet charge e vertex charge

La carica media di tutte le particelle di un jet (di un emisfero) è correlata con la carica del quark che l'ha generato. La carica media Q_h viene costruita come

$$Q_h = \frac{\sum_i q_i p_{||i}^k}{\sum_i p_{||i}^k},$$

La sommatoria è estesa a tutte le particelle del jet (emisfero) con carica q_i e momento longitudinale $p_{||i}$. Il parametro k varia tra 0.3 e 1 e viene scelto in modo da ottimizzare la separazione tra q e anti- q .

La carica del vertice secondario (quando esiste ed ha carica diversa da zero) identifica fortemente la carica del quark primario.

$$f_{SS} = 2\omega_q(1 - \omega_q)$$

La probabilità ω_q di identificare correttamente la carica di un quark, può essere ricavata dai dati stessi. La probabilità di sbagliare è $(1 - \omega_q)$. La probabilità di taggare lo stesso segno di quark due volte in un campione puro di 'q' è

$$f_{SS} = \omega_q(1 - \omega_q).$$

Jet charge in eventi di b

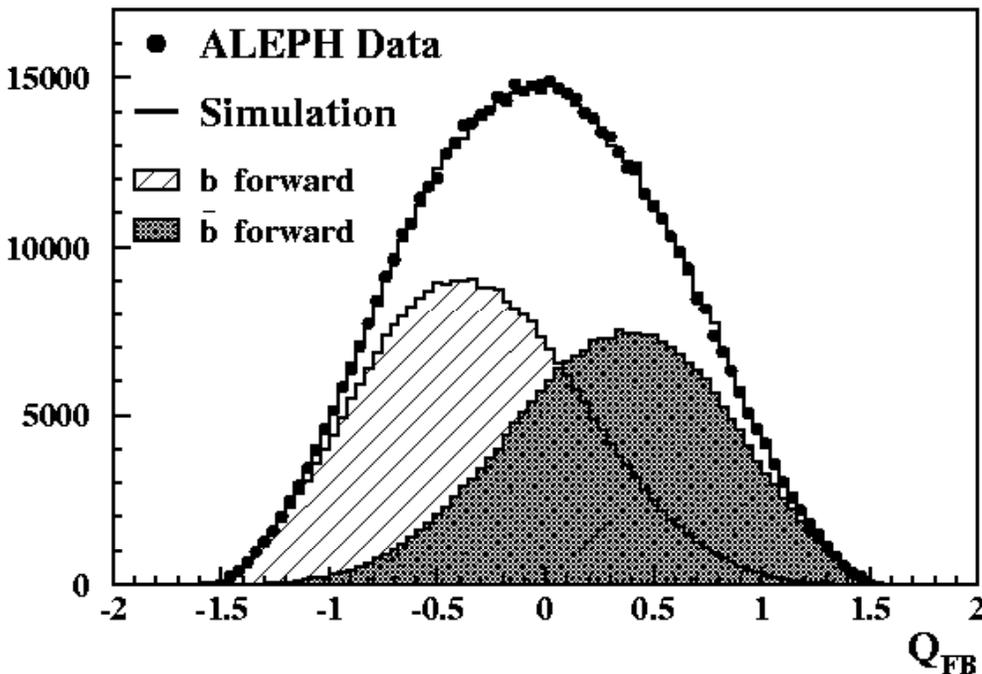
$\langle Q_{FB} \rangle = \langle Q_F - Q_B \rangle$ Esistono modi per ricavare parametri dell'analisi direttamente dai dati. Q_F, Q_B sono la carica media nell'emisfero F e B rispettivamente. Q_q e $Q_{\bar{q}}$ la carica media del quark e anti-q.

$= \delta_q A_{FB}^{q\bar{q}}$

$\delta_q = \langle Q_q - Q_{\bar{q}} \rangle$,

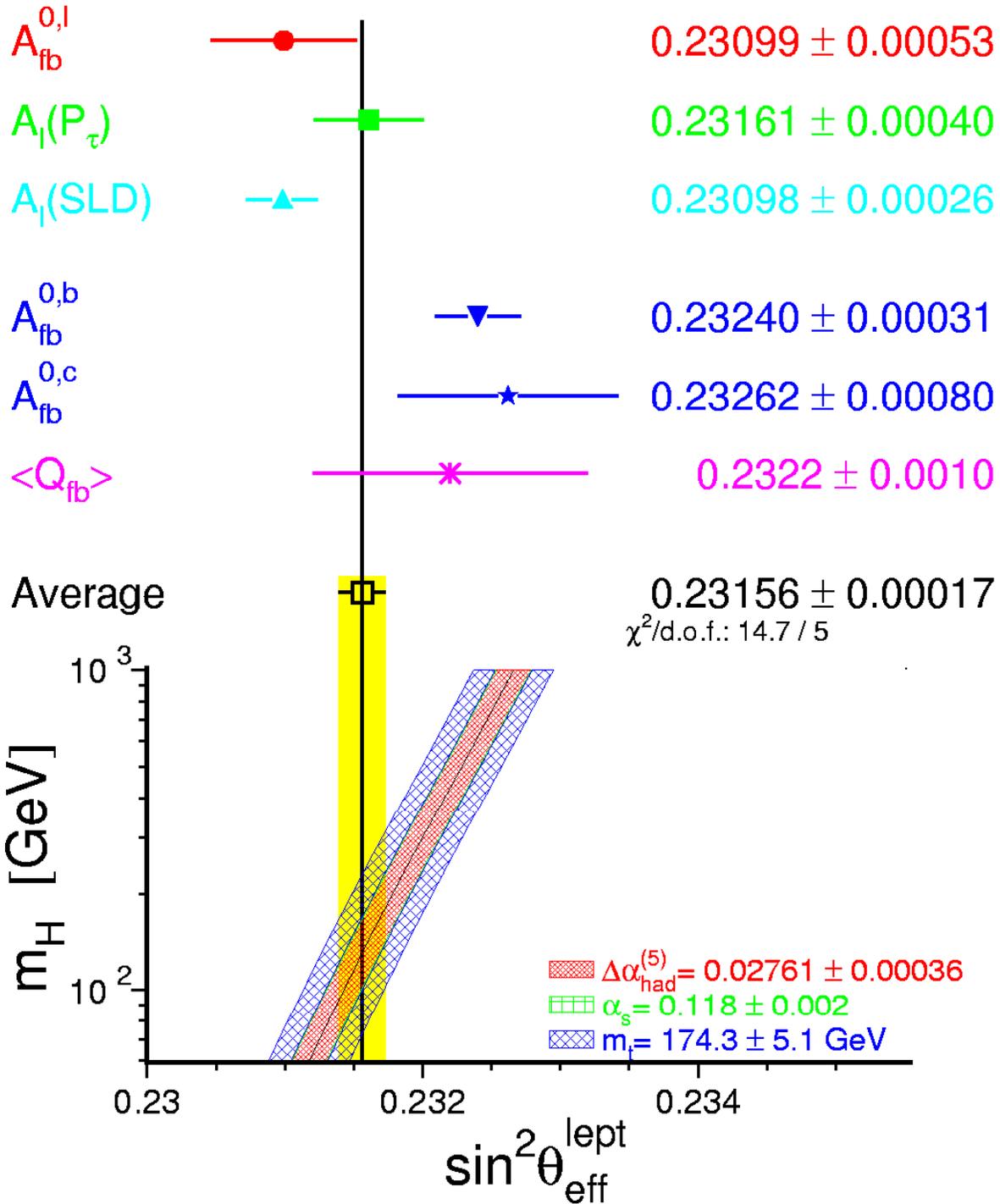
La carica media viene relazionata ad una asimmetria (che in assenza di asimmetria sarebbe nulla)

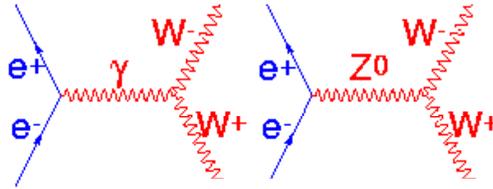
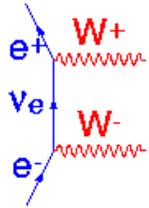
$$\left(\frac{\delta_q}{2}\right)^2 = \frac{\langle Q_F \cdot Q_B \rangle + \rho_{q\bar{q}} \sigma(Q)^2 + \mu(Q)^2}{1 + \rho_{q\bar{q}}}$$



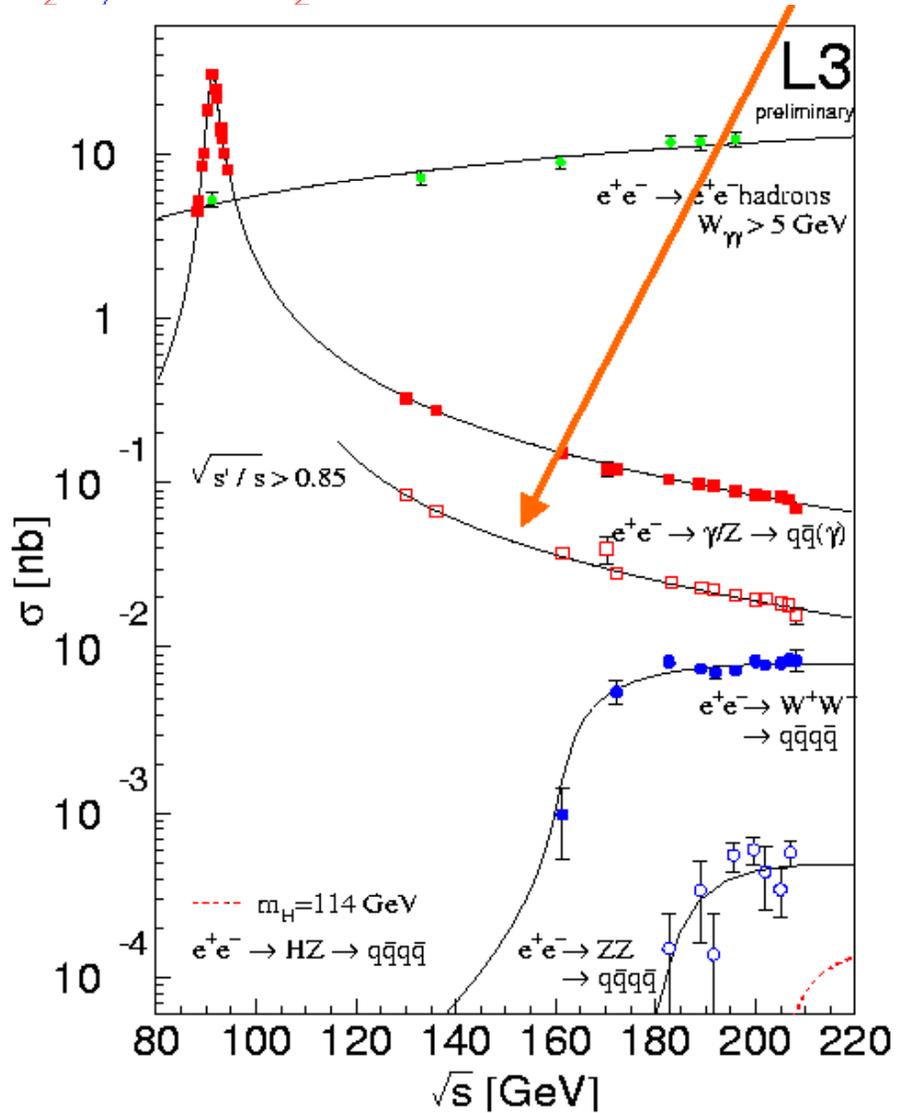
La carica media in un emisfero b non è molto diversa da quella di un anti-b. Un taglio a $Q_{FB} < 0$ seleziona correttamente circa il 60% di quarks b

La misura di $\sin^2\Theta^W$ nelle varie misure





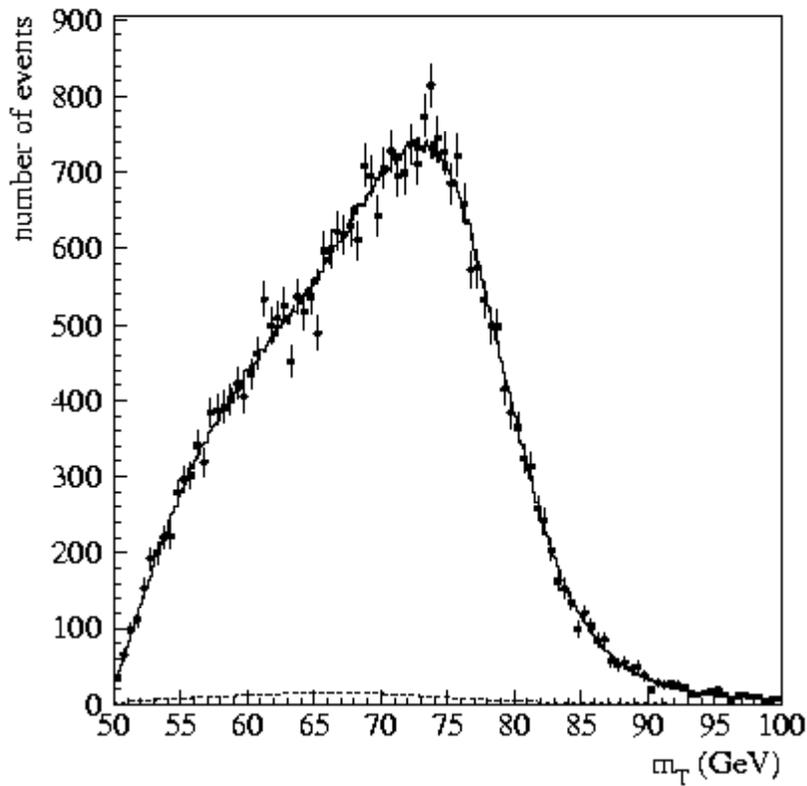
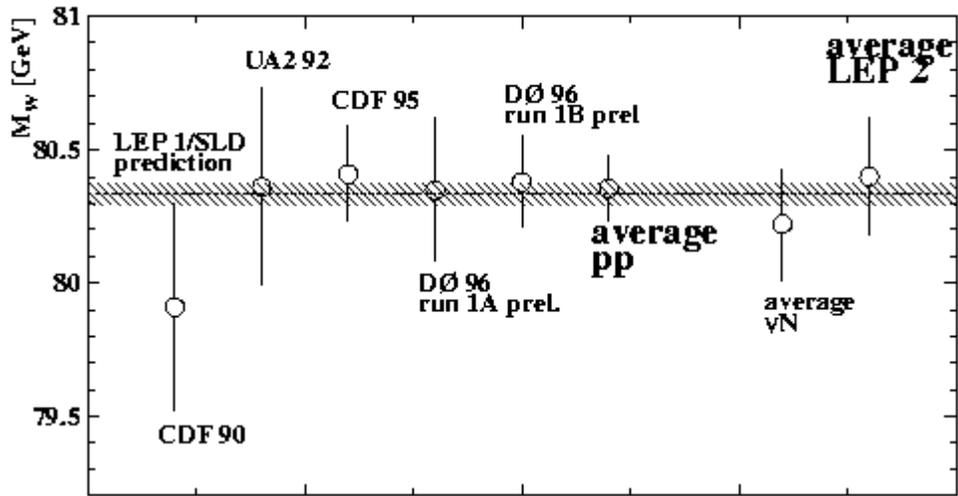
La fisica del W



E_{CM} [GeV]	σ_{W+W^-} [pb]	$N_{ev}/500\text{pb}^{-1}$
161	3.6	1800
175	13.8	6900
192	17.1	8600

$$Br(W \rightarrow q_i \bar{q}_j) = N_c \delta_{QCD} \delta_{mass} Br(W \rightarrow \ell \nu),$$

La massa del W ai colliders adronici

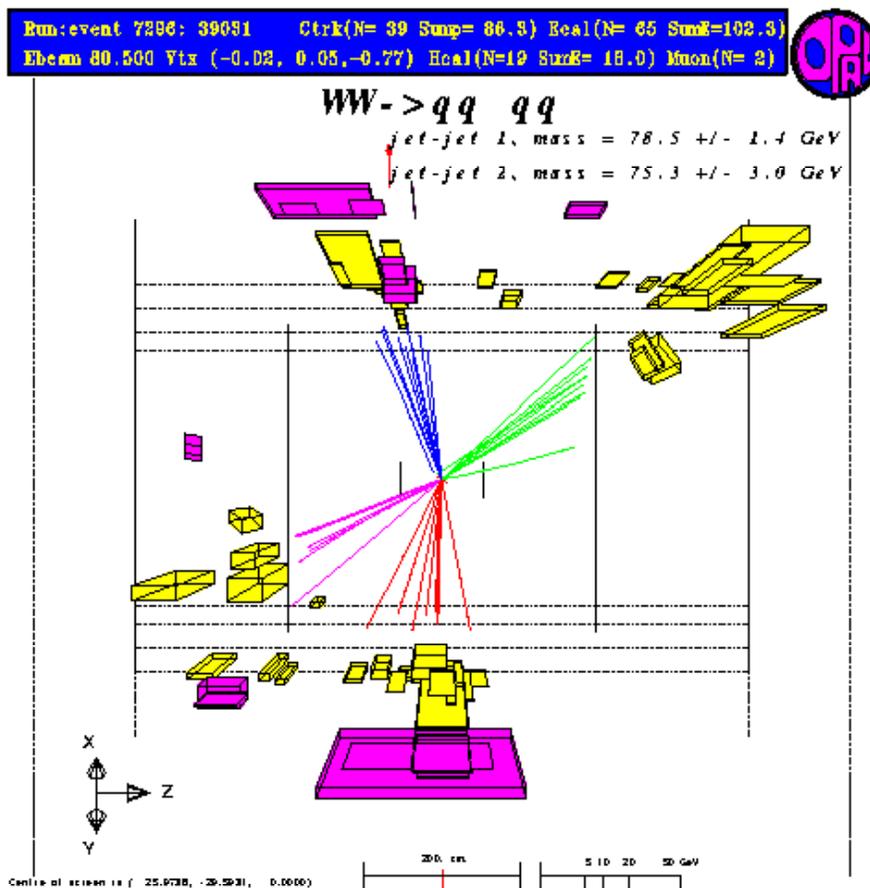


$$M_t^W = \sqrt{2p_t^l p_t^\nu (1 - \cos \phi(l, \nu))}$$

Il decadimento del W

topology	Br with CC universality	Br with corrections
$jjjj$	' $6/9 \times 6/9$ '	45.6%
$jjlv$	' $2 \times 6/9 \times 3/9$ '	43.8%
$lvlv$	' $3/9 \times 3/9$ '	10.6%

Table 4: W^+W^- event signatures and branching fractions



Selezione di coppie di W in canali completamente leptonici

WW \rightarrow $l\nu l\nu$ (fully leptonic)

2 high energy acoplanar leptons + missing energy

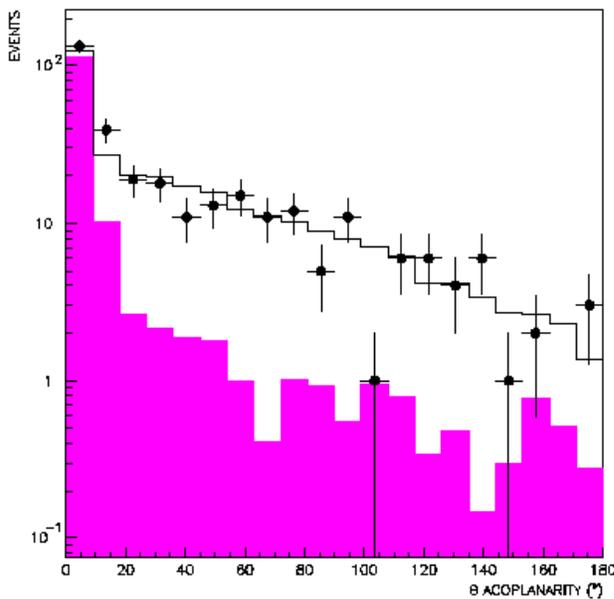
Bkg: $ll(\gamma)$, ZZ, Zee

Cut based selection

(+ an independent one as cross-check):

- Preselection: low multiplicity, two object topology
- Acoplanarity
- Lepton identification + channel-dependent cuts on E_{jet} , E_{trans}

Large cross-talk b/w channels



Eff. \sim 40-70%

Bkg = 0.134 pb

(P \sim 88%)

canali misti

WW \rightarrow qq ν (semileptonic)

2 hadronic jets + 1 high energy, isolated lepton (or tau jet) + P_{miss} due to neutrino

Main bkg: qq(γ), ZZ, Zee

Cut based selection:

- lepton energy and isolation (only one !)
- missing momentum not pointing to beam pipe
- hadronic system with large invariant mass

Relative likelihood selection as cross-check

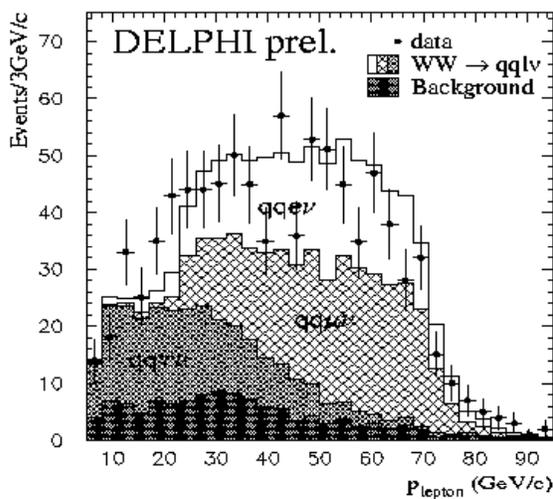
Efficiency varies with lepton type: 93% for μ

78% for e

56% for τ

Bkg = 0.67 pb

(P ~ 88%)



canali adronici

WW \rightarrow qqqq (fully hadronic)

4-jet topology, large multiplicity and visible energy

Main backgrounds: $qq(\gamma)$, ZZ

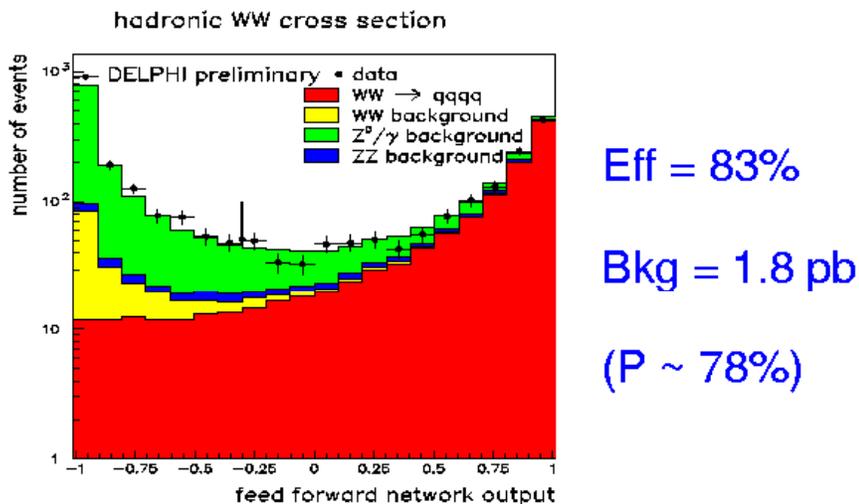
Discriminating variables combined in ANN:

- reconstructed s'
- 4-jet topology: $d_{\text{join}(3-4)}$, θ_{min}^{ij} , min. jet multiplicity
- event shape: Thrust, Spher, Fow-Wolfram momenta, min. jet broadening

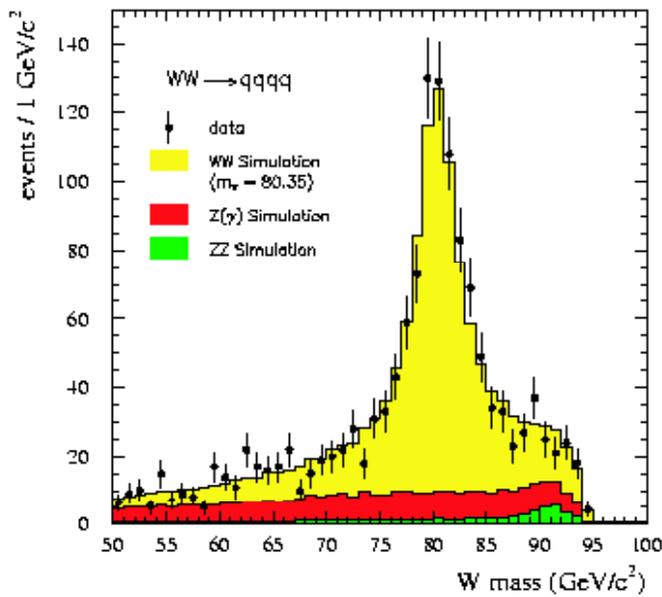
- Probability from constrained fit with masses= m_W

Fit to ANN output distribution

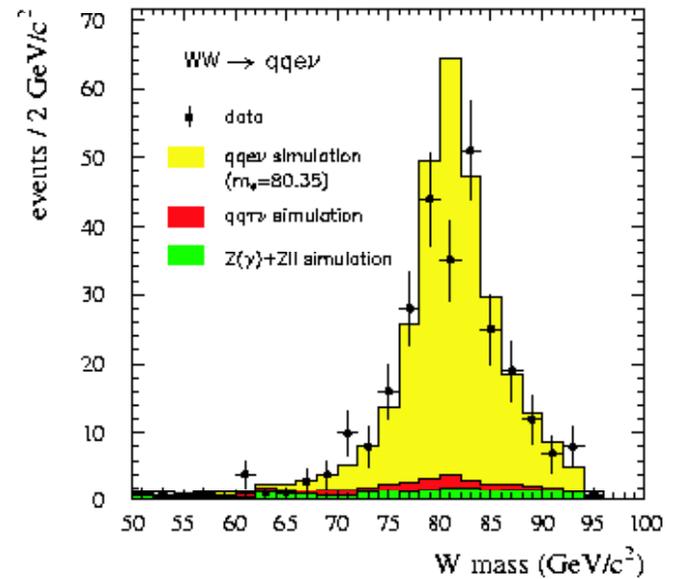
Independent cut-based analysis less used as cross-check



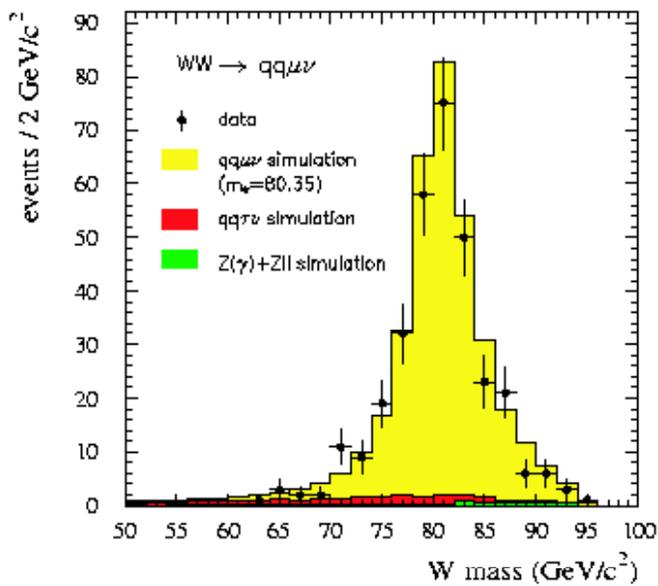
La massa del W nei vari canali



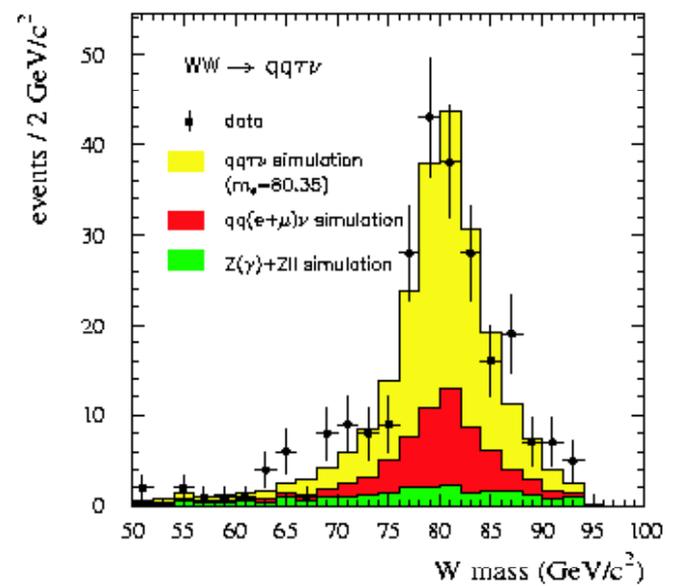
(a)



(b)



(c)



(d)

Il canale adronico, problemi sperimentali

- jet pairing ambiguity

4 jets \rightarrow 3 possible combinations

Only one carries the correct information on m_W .

Correct combination can be chosen from kin. fit results in $\sim 70\%$ of events.

Include **all combinations** with weight depending on kinematic fit result (χ^2) \Rightarrow **gain $\sim 10\%$** on error

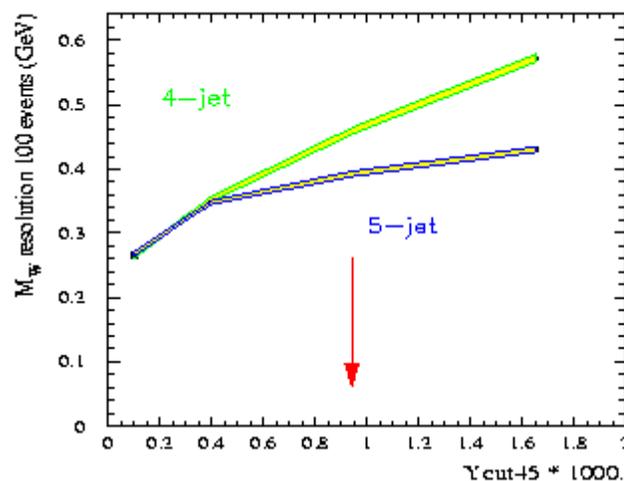
- qqqq \rightarrow jjjj ?

Hard gluon radiation gives 5-jet topology. Forcing 4 jets can wash out mass information.

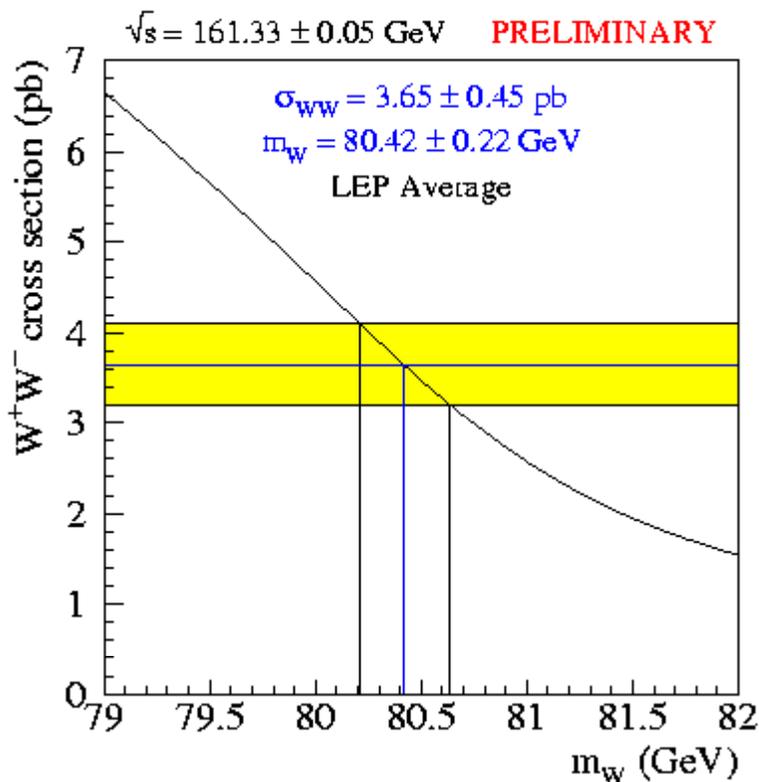
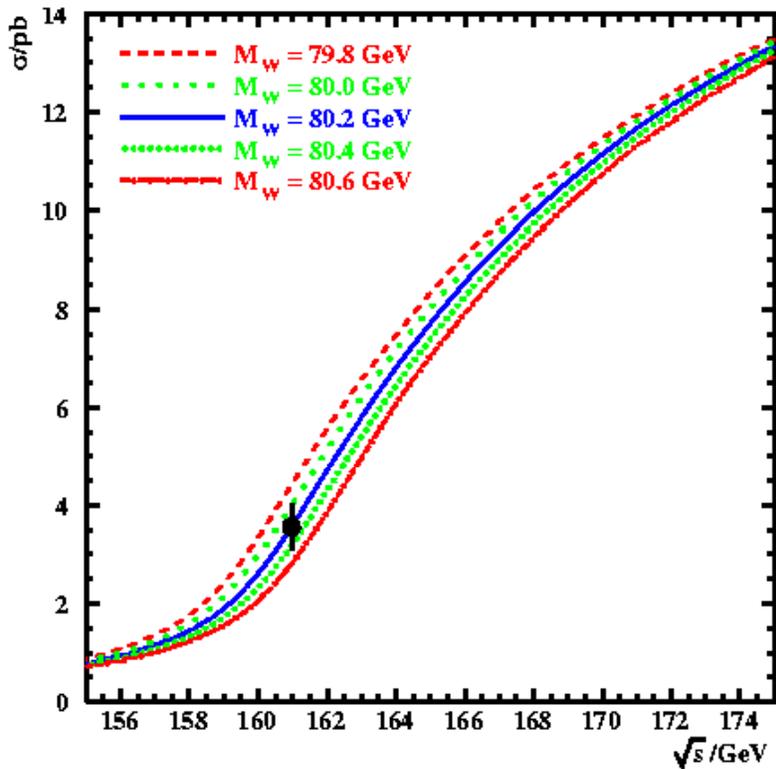
Solution \rightarrow **Reconstruct 5 jets** when $Y_{\text{cut}}(45) > 10^{-3}$

Nb of possible combinations = 10 : more difficult to choose the right one

Also in this case, use all of them, with weight dep. on k_t of gluon jet \Rightarrow **gain $\sim 7\%$** on error

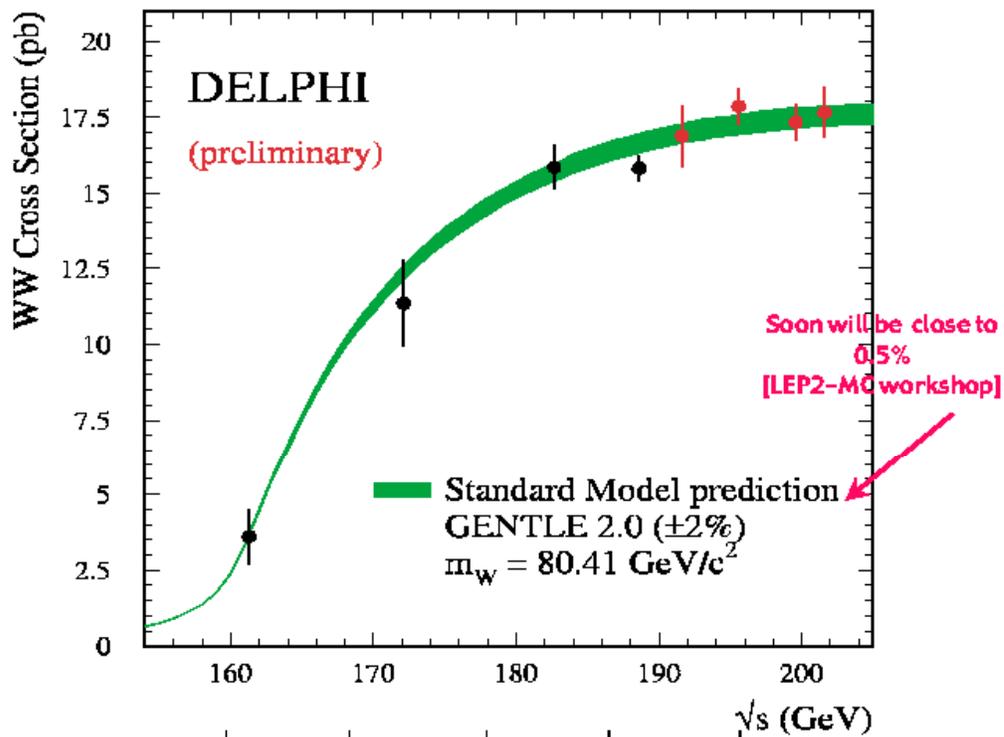


La massa del W al LEP



La sezione d'urto WW in DELPHI

WW cross section

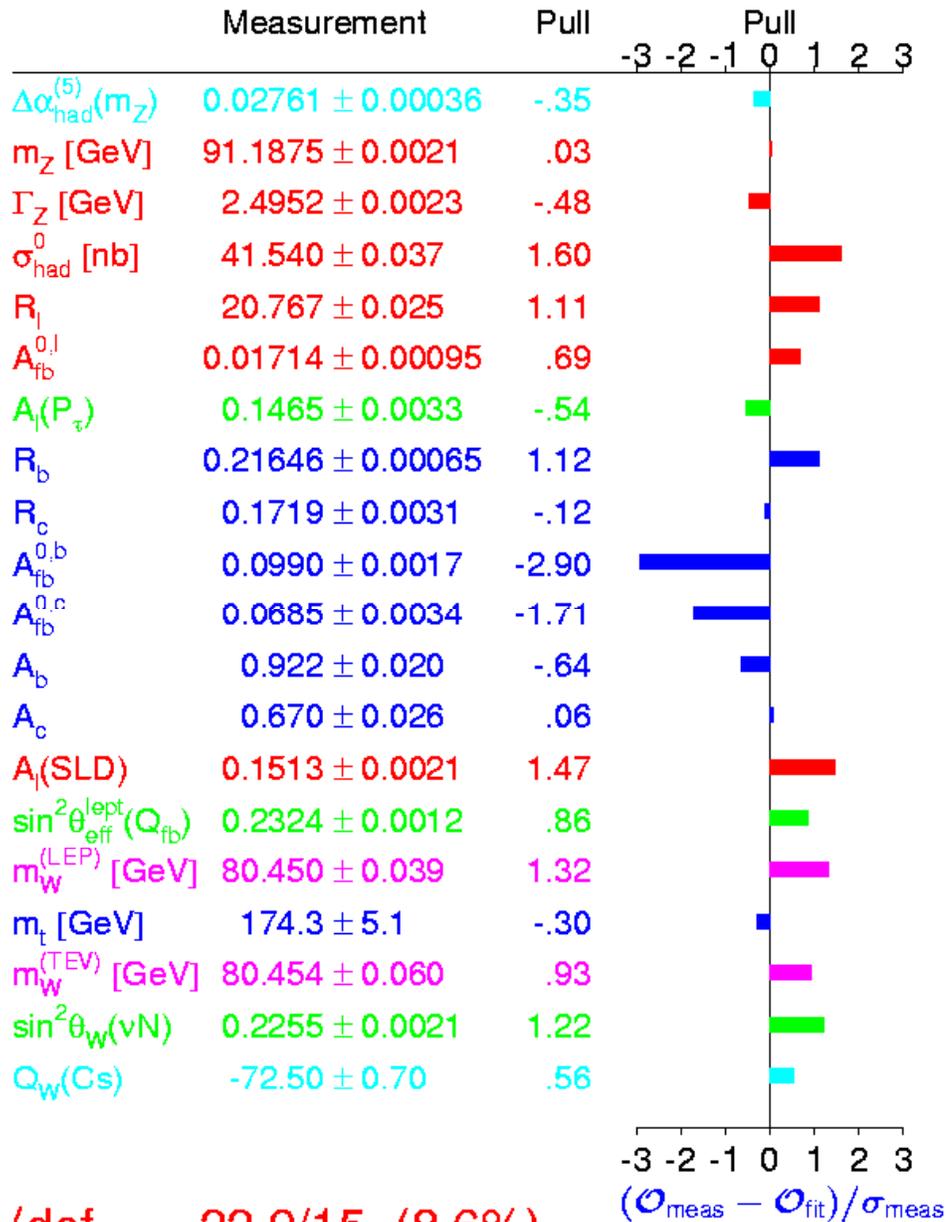


E_{cm}	status	$\sigma(WW)$ pb	stat	syst	QCD
189	Final	15.83	0.38	0.20	0.07
192	Prel.	16.90	1.00	0.22	0.07
196	Prel.	17.86	0.59	0.22	0.07
200	Prel.	17.35	0.56	0.22	0.07
202	Prel.	17.67	0.81	0.23	0.07

Sommario delle misure EW

Test of the MSM

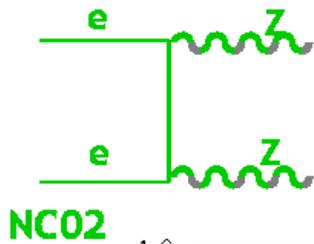
Summer 2001



12

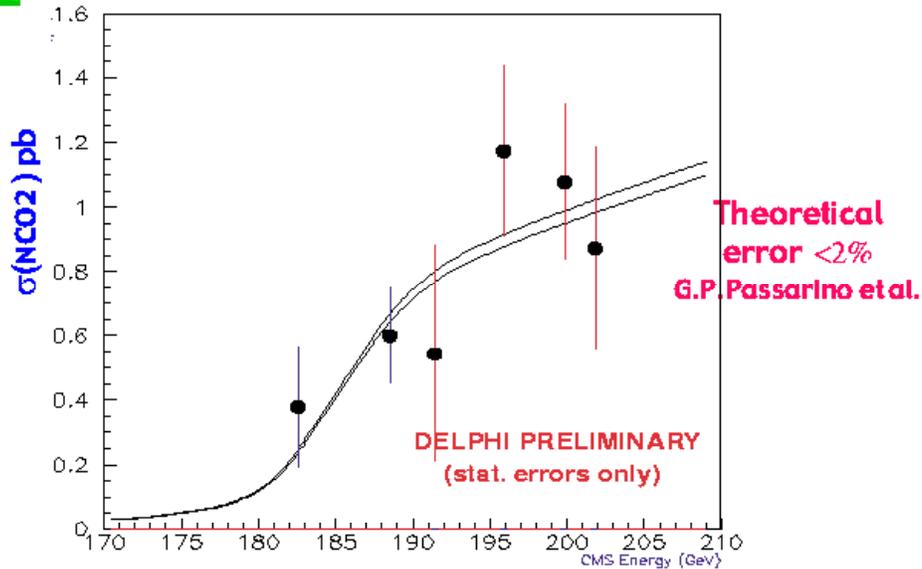
La produzione di coppie ZZ

ZZ physics from $\sqrt{s}=183-202$ GeV



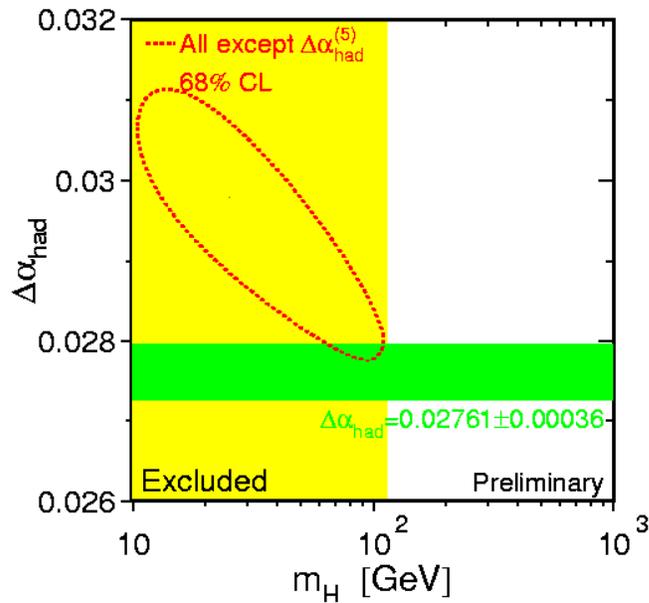
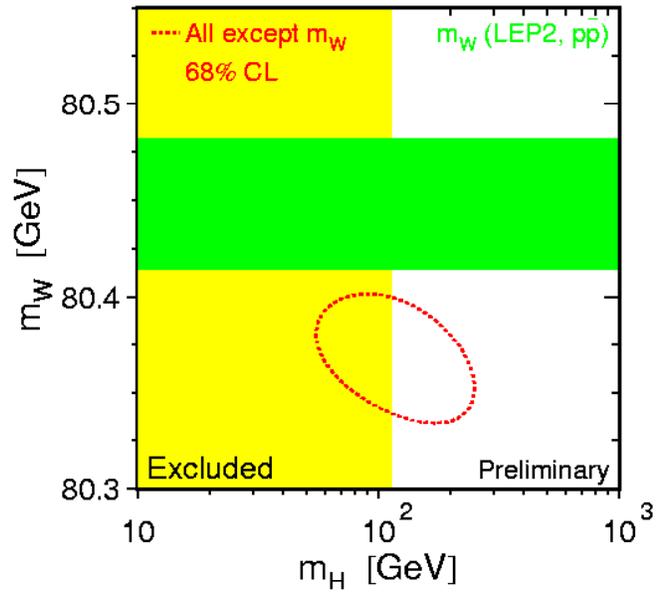
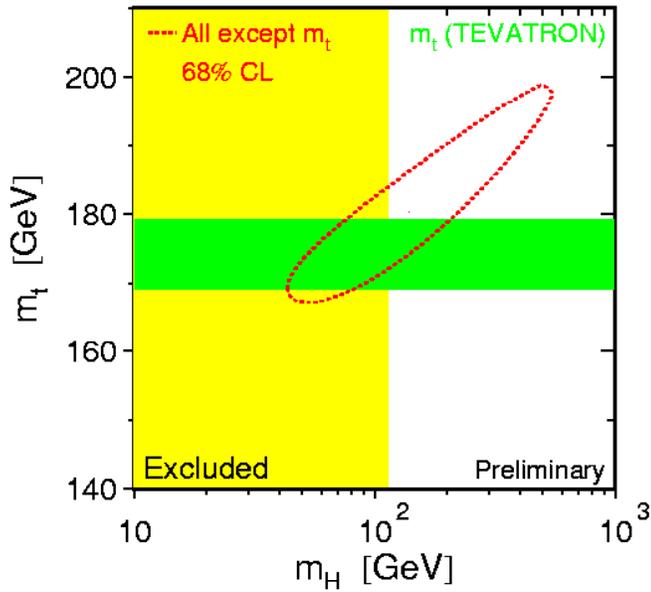
ZZ

- bbqq, qqqq 48.9%
- qqee, qqμμ 9.2%
- qqνν, 28 %
- llνν 2.7%
- llll 1 %



E_{cm}	status	$\sigma(ZZ)$ pb	stat	syst	SM pb
183	Final	0.38	0.18	0.04	0.25
189	Final	0.60	0.13	0.07	0.65
192	Prel.	0.55	0.33		0.79
196	Prel.	1.17	0.27		0.92
200	Prel.	1.08	0.24		1.00
202	Prel.	0.87	0.31		1.02

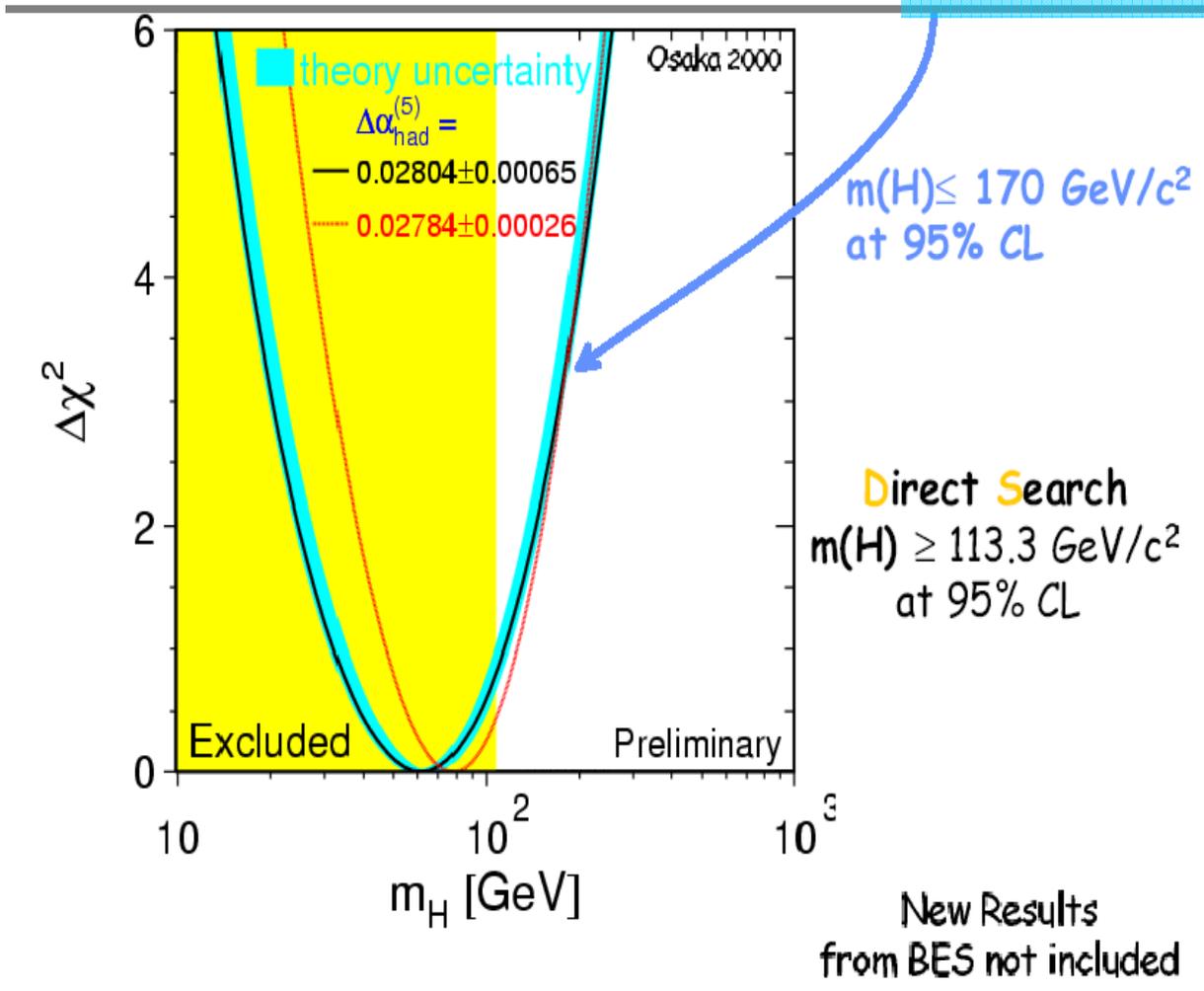
Plots di correlazione



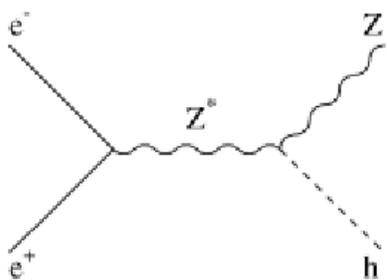
La massa del bosone di Higgs: misura indiretta

$$m(H) = 62^{+53}_{-30} \text{ GeV}/c^2$$

Limiti da misure elettrodeboli

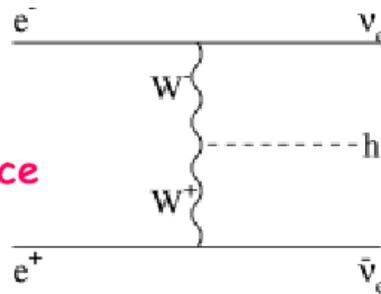


Higgs al Lep: produzione & sezione d'urto

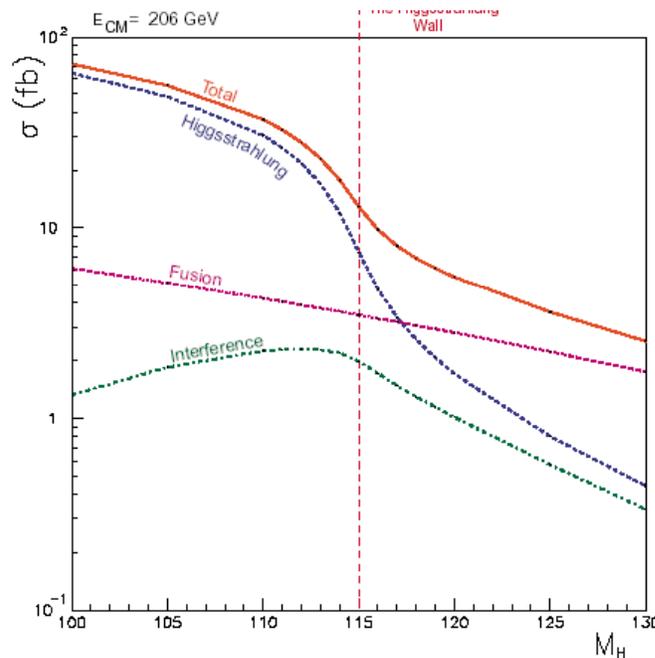


Modo dominante
 $m(H) \leq \sqrt{s} - m(Z)$

+
 positive
 interference



Debole ma possibilità di raggiungere
 masse + alte

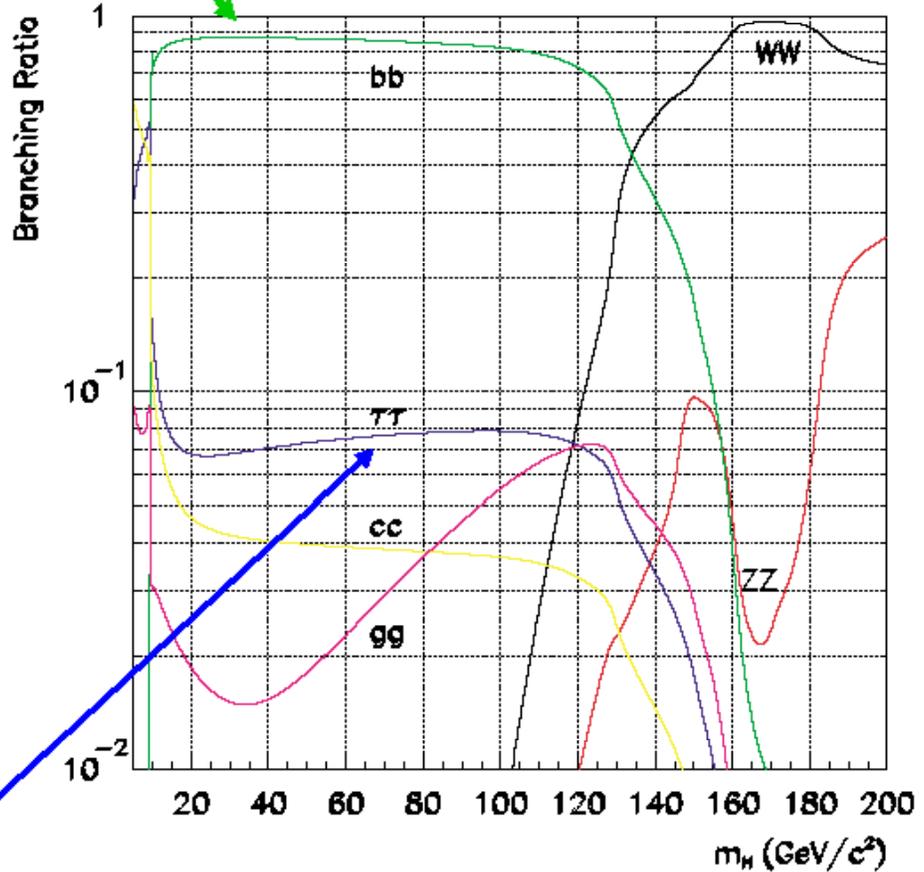


E_{cm} (GeV)	91	130	136	161	172	183	189	192	196	200	202	204-209
Lum(pb^{-1}) per exp.	175	2,5	2,5	11	11	55	160	30	80	80	40	~150

Modi di decadimento dell'Higgs

L'Higgs preferisce decadere nella coppia di $(f\bar{f})$
più pesante cinematicamente accessibile: $H \rightarrow b\bar{b}$

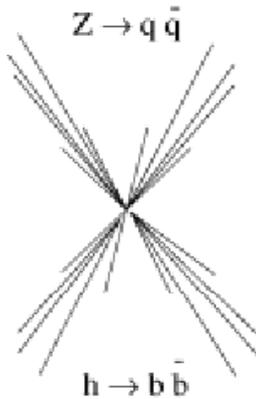
$$\text{BR}(H \rightarrow b\bar{b}) \approx 85\%$$



$$\text{BR}(H \rightarrow \tau\tau) \approx 8\%$$

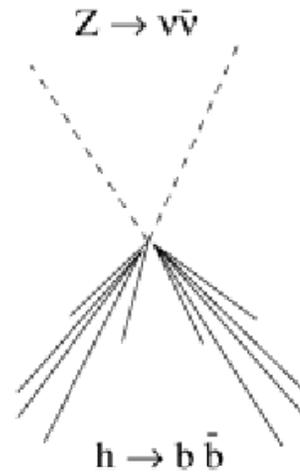
Topologie di questi decadimenti

4 jets



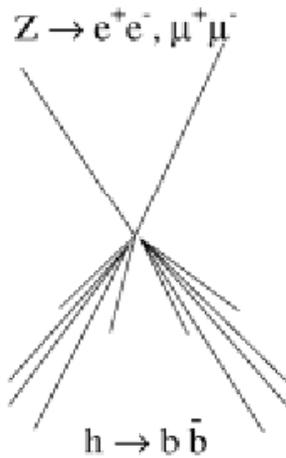
60%

2 jets & missing energy



19%

2 jet & 2 lepton



6%

Or a τ instead of the b

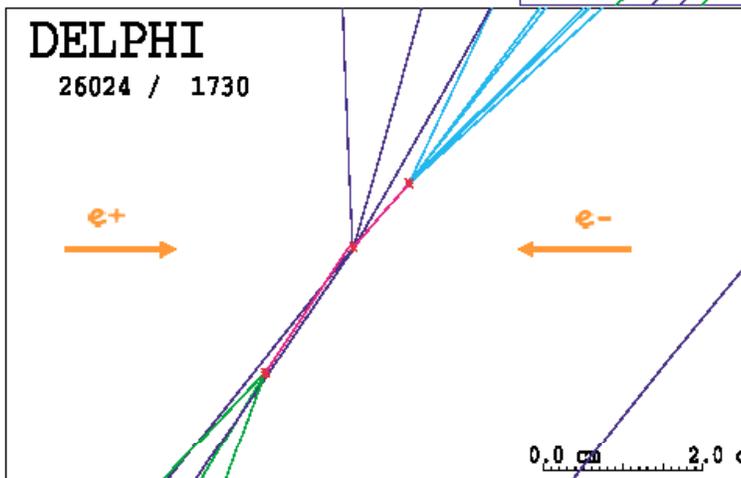
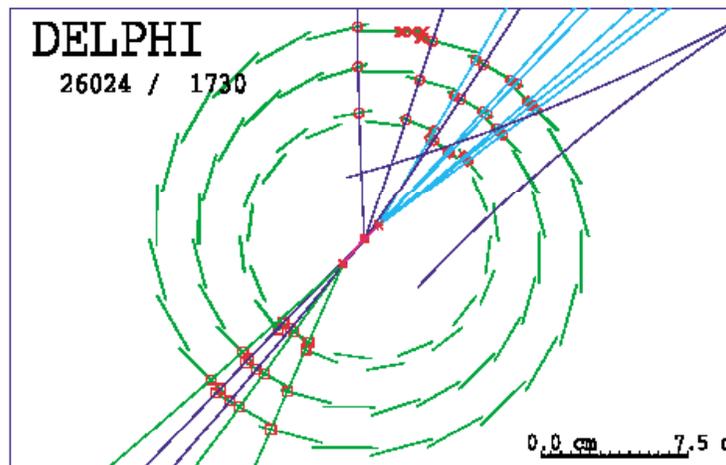
Il ruolo dei rivelatori di vertice

Rivelatori di vertice sono fondamentali nella ricerca di Higgs. Nel caso in cui anche lo Z decade in 2 b (~20% di tutti i decadimenti adronici) si ha una topologia con 4 b distintissima che non può essere generata dal decadimento della Z

$$m(b) \approx 4.5 \text{ GeV}/c^2$$
$$\tau(b) = 1.564 \pm 0.014 \text{ ps}$$

Silicon Microvertex detectors !

$ee \rightarrow Z \rightarrow bb$

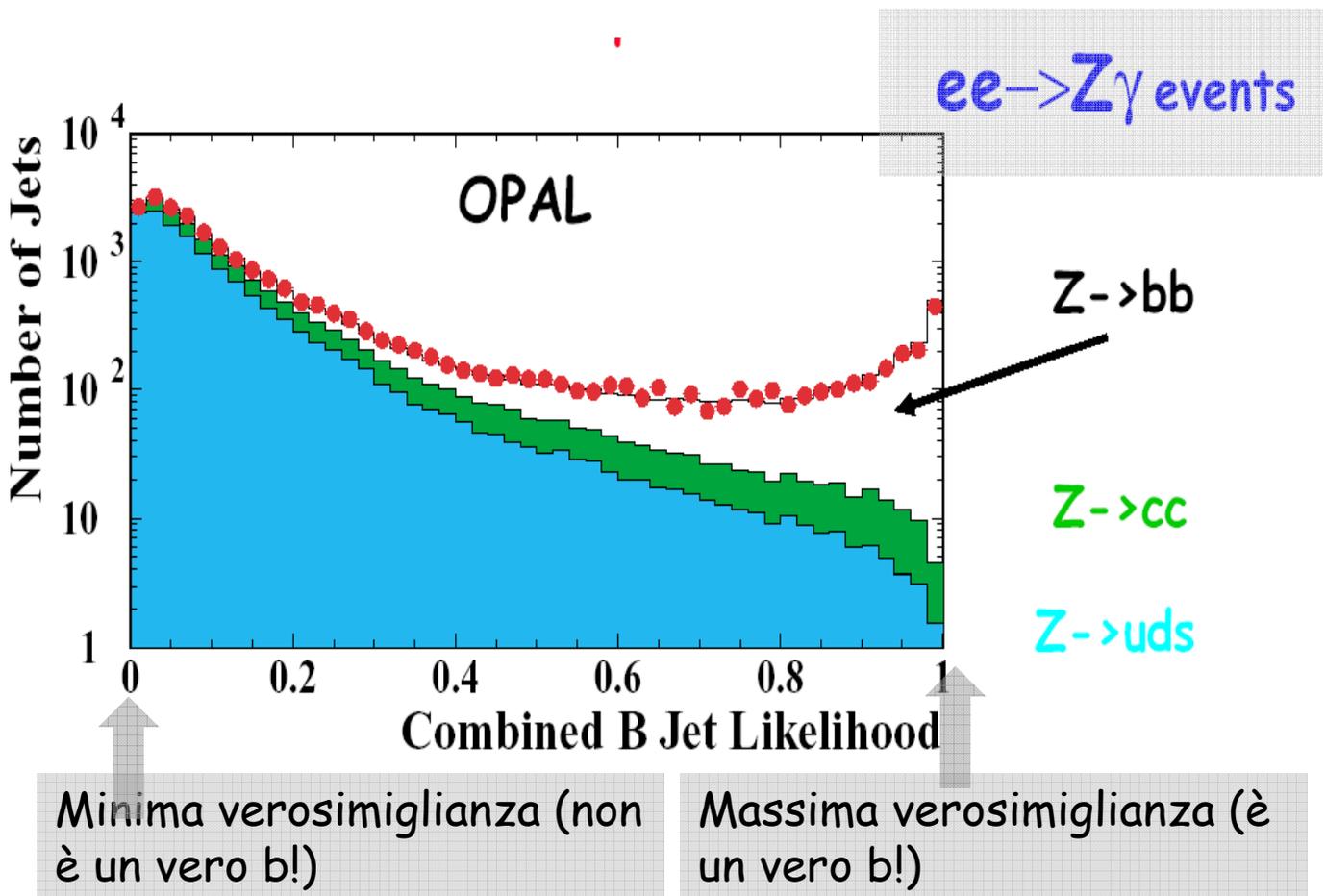


Beam spot size $\approx 120 \times 10 \mu\text{m}$
Resolutions on:
Primary vertex $\approx 20 \times 10 \mu\text{m}$
Impact Par $\approx 28 \mu\text{m}$ in $R\phi$
 $\approx 35 \mu\text{m}$ in z

La combinazione di diversi tags

Combinando diversi tags (di vita media, leptónico, di massa di vertici secondari, di momento di tracce prodotte) si può ottimizzare l'identificazione di b e calcolare la

'probabilità che 1 jet sia di b'



Come scegliere efficienza (e quindi la purezza)?

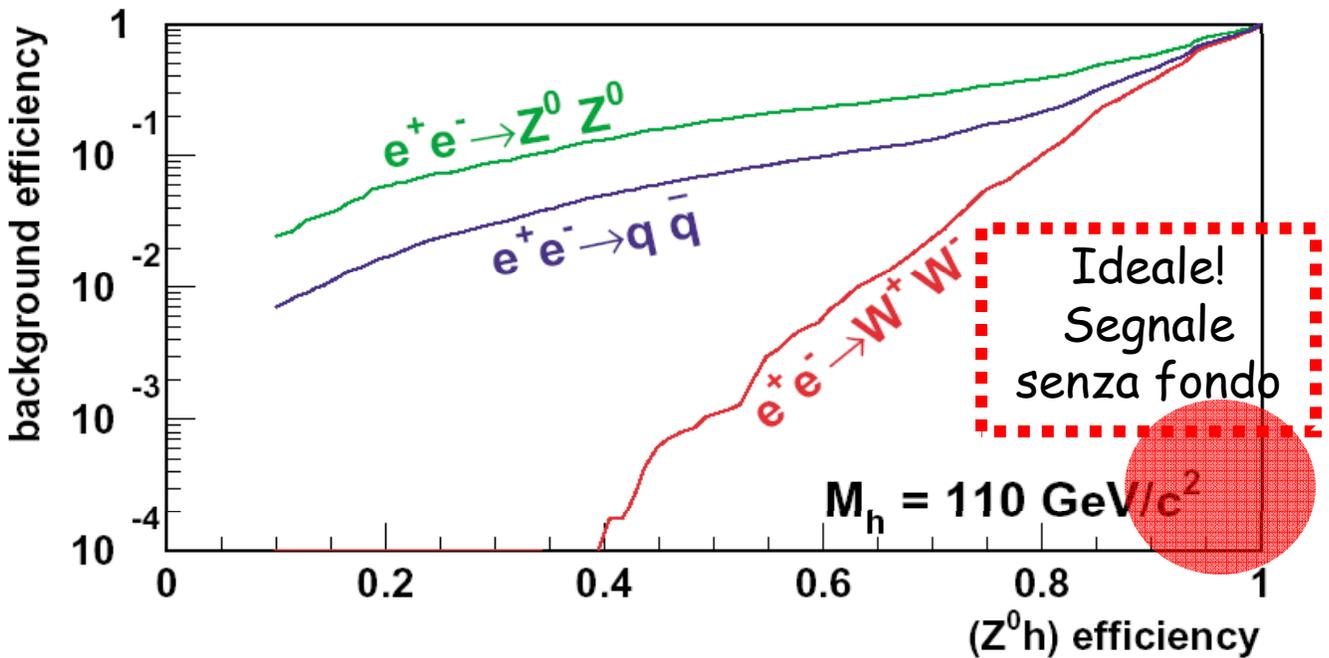
Se applichiamo una selezione ad un campione di dati questa agisce diversamente su *Segnale* e *Fondo*.

$$\text{Efficienza} = \frac{N_x^1}{N_x^0}$$

$$\text{Purezza} = \frac{N_S^1}{N_S^1 + N_F^1}$$

	Numero di eventi di segnale	Numero di eventi di fondo
prima selezione	N_S^0	N_F^0
dopo la selezione	N_S^1	N_F^1

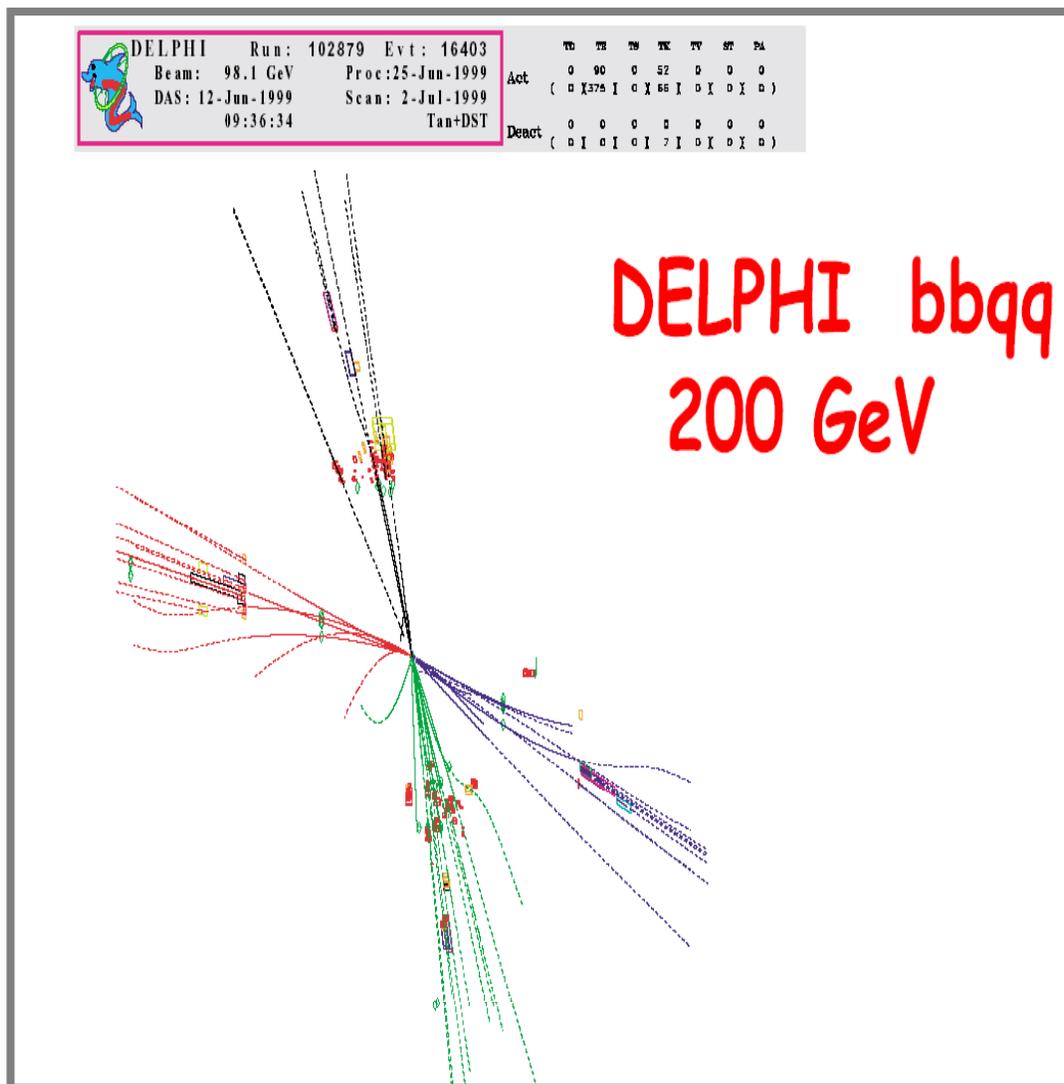
DELPHI (204 GeV)

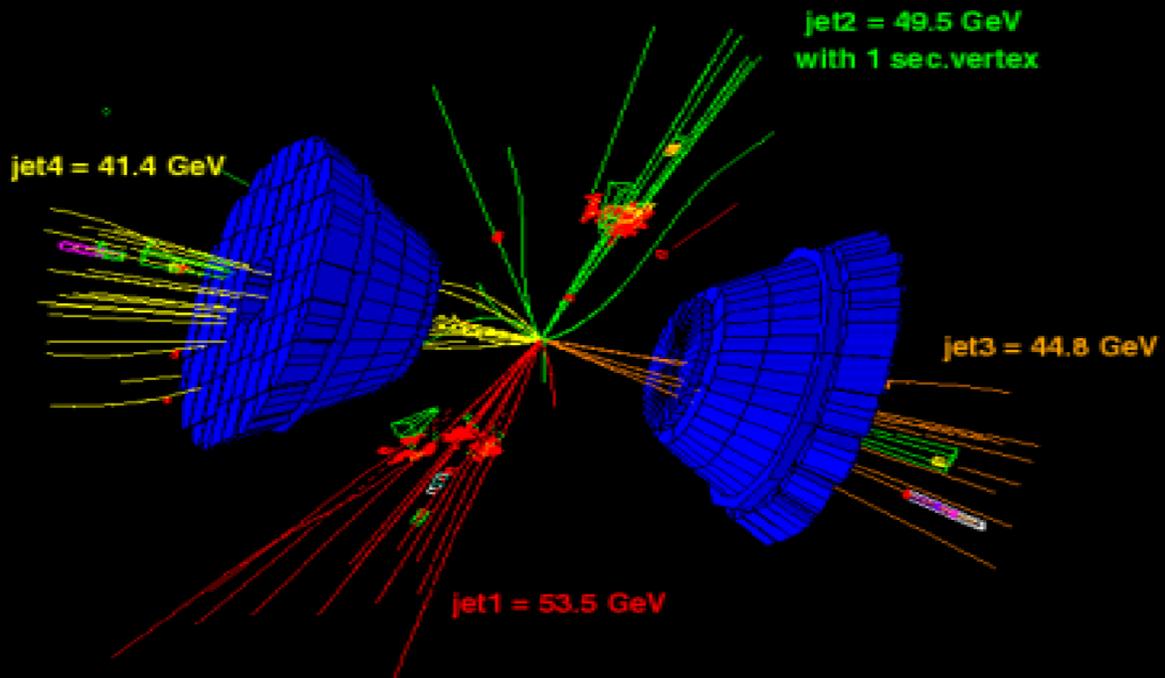


Il canale a 4 jets

Problema: come combinare i 4 jets? Diverse tecniche (anche applicate contemporaneamente)

- se ci sono solo 2 b-jets questi vengono associati
- si richiede che una coppia dia uno Z
- si verifica la compatibilità dell'evento con diverse ipotesi: HZ, WW, ZZ





4C fit :	5C fit Z mass :	5C fit eq mass:
$M_{j1j2} = 118.6 \text{ GeV}/c^2$	$M_{j1j2} = 114.0 \text{ GeV}/c^2$	$M_{j1j2} = 102.5 \text{ GeV}/c^2$
$M_{j3j4} = 86.7 \text{ GeV}/c^2$	$\chi^2 = 3.67$	$\chi^2 = 6.51$

Disc. var. = 0.768 (>0.75 \Leftrightarrow S/B>1)

Anti-QCD Var. = 0.97
(0=QCD , 1=No QCD)

Compatibility with WW :

Prob = 0.78 (4 jets) , Prob = 0.86 (5 jets)
but no combination with $\Sigma M = 161 \text{ GeV}/c^2$

No pairing compatible with ZZ

Combined b-tag = 0.044

Fits cinematici: le energie e le direzioni degli oggetti dell'evento (jets & leptoni isolati) vengono modificate compatibilmente con gli errori di misura in modo da

4C fit: conservazione momento ed energia

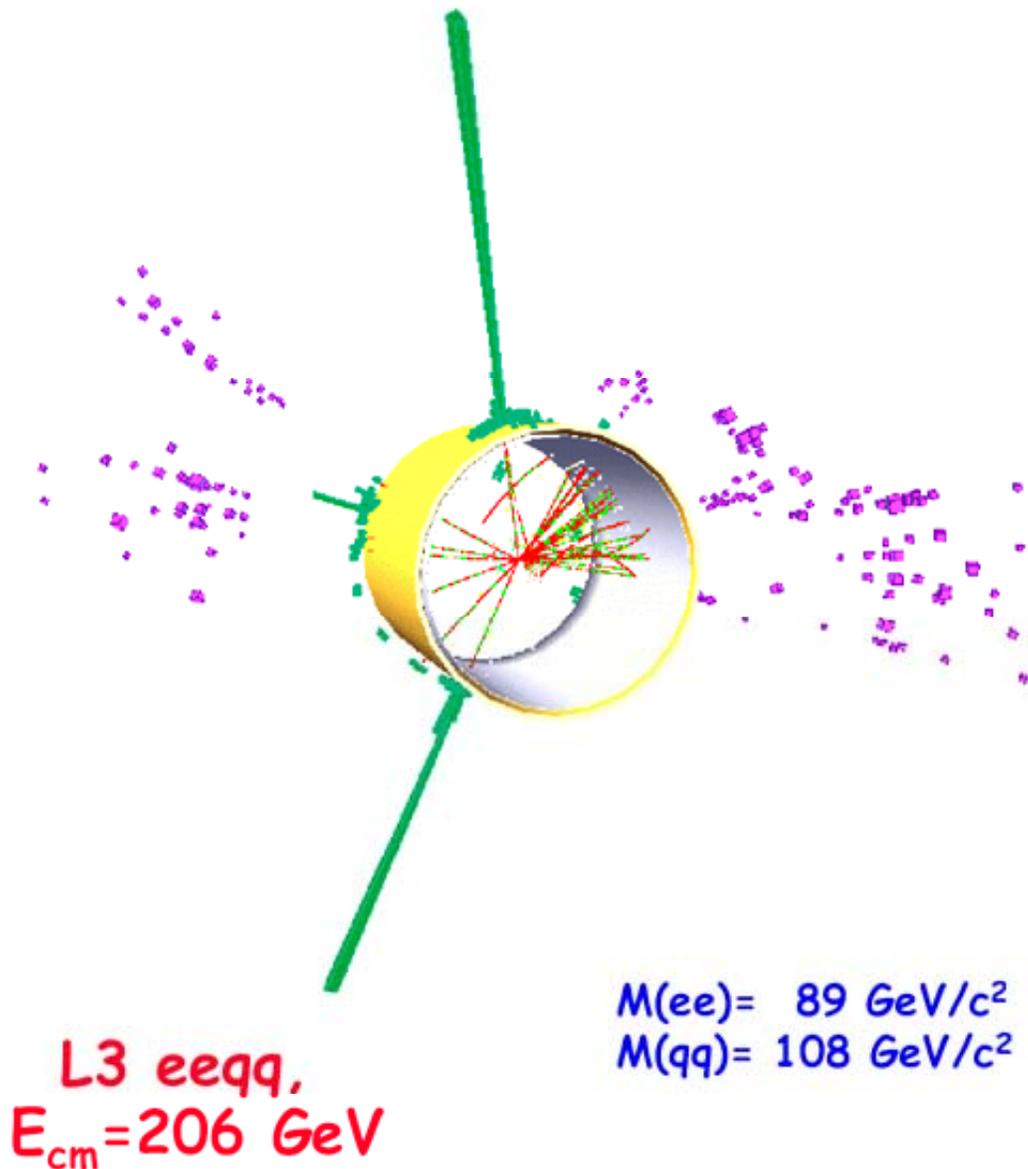
5C fit: come 4C+1 massa viene fissata

5C masse uguali: come 4C + 2 masse uguali

} χ^2

Il canale $HZ \rightarrow llqq$

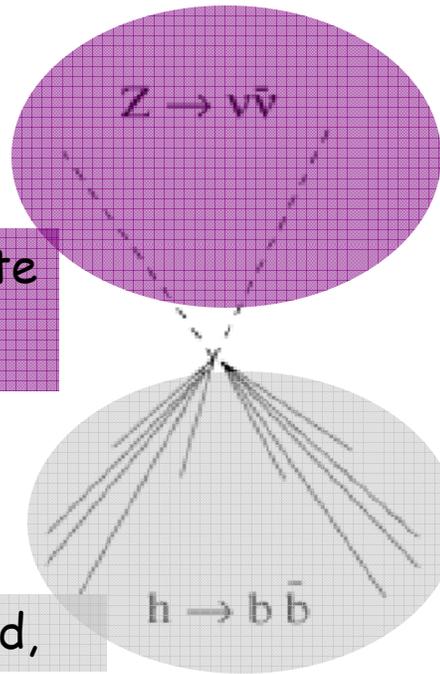
...il campione migliore! Ma soltanto il 3% dei decadimenti dell'Higgs per ogni specie leptonica. Eventi puliti ma pochi!



Il canale $ZH \rightarrow \nu\bar{\nu}bb$
'missing energy'

energia mancante

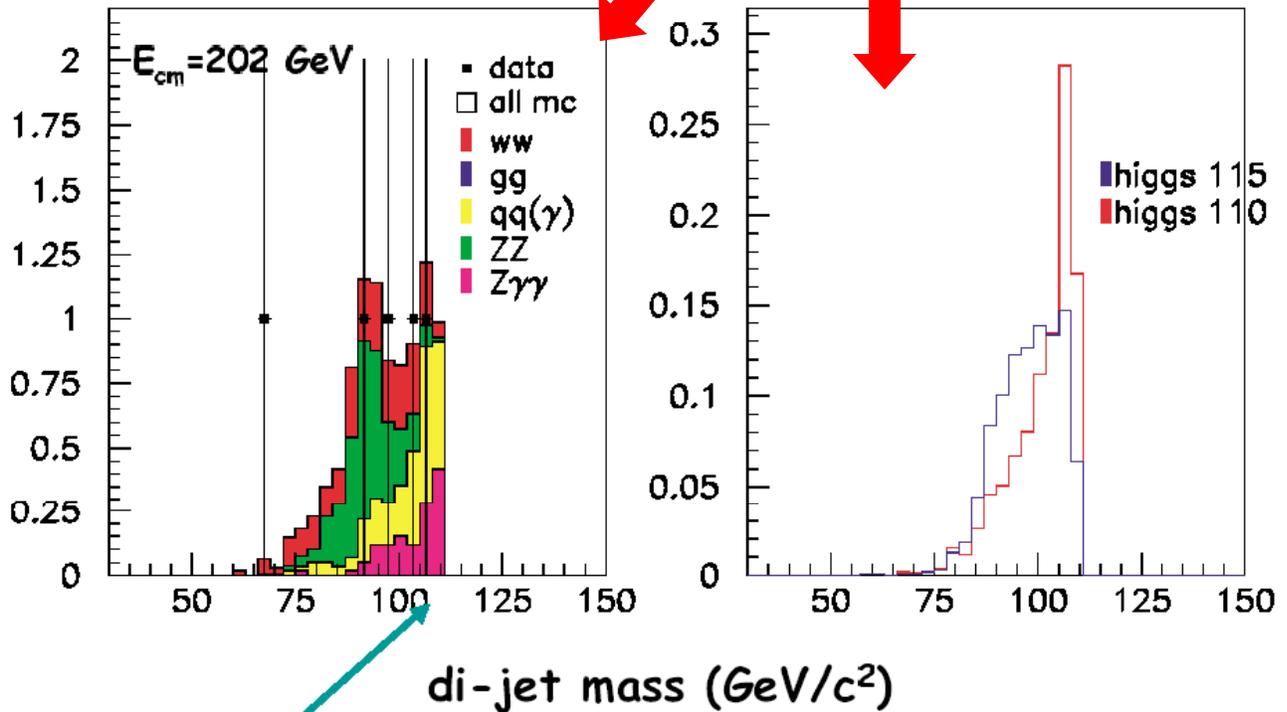
$$M(\nu\bar{\nu}) = M_Z$$



Jets acoplanari, b-tagged,

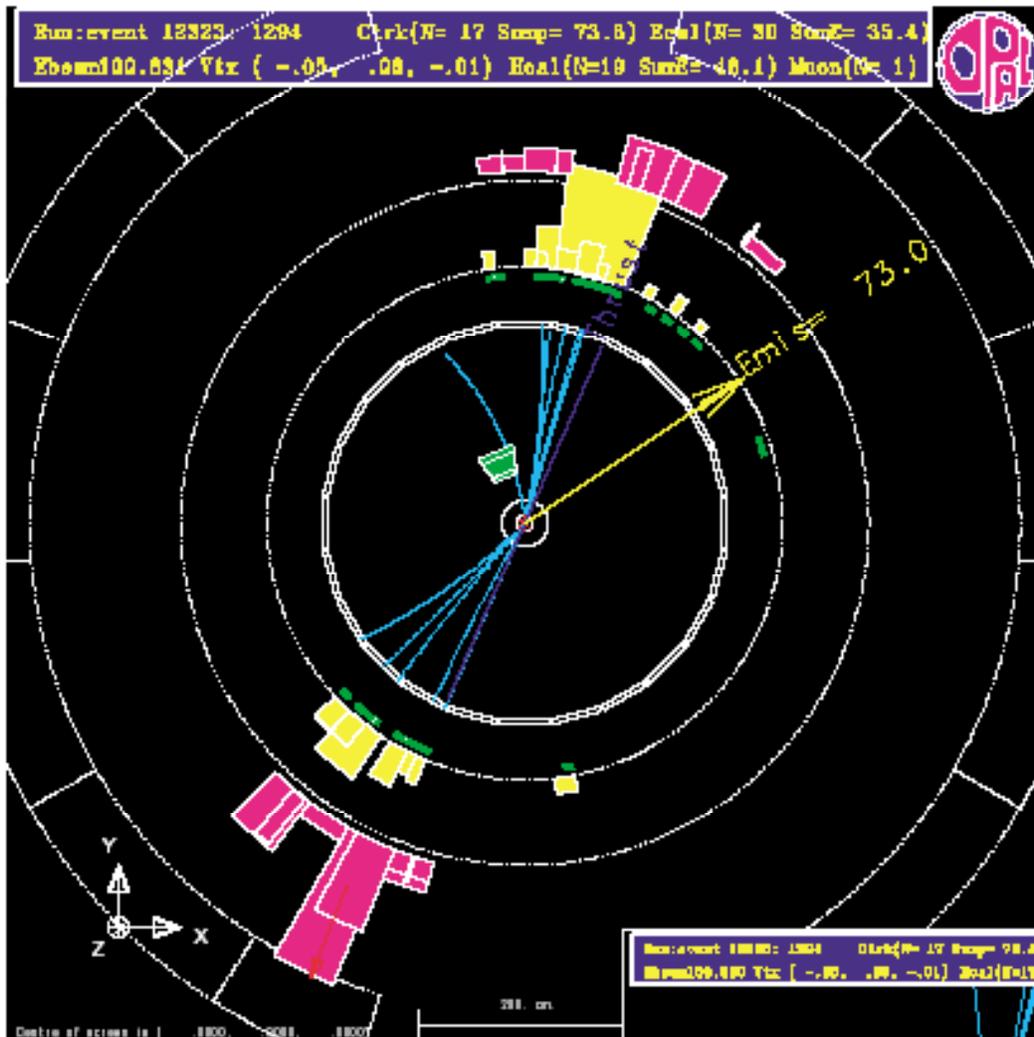
In questo campione 4 eventi!
Confronto dati / simulazione
con diversi fondi

Notare diverse scale!

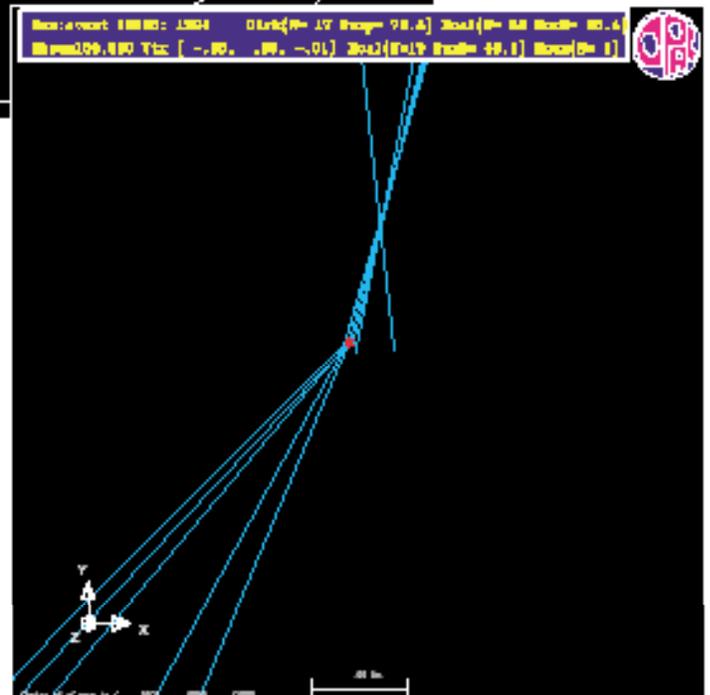


$$M(jj) = E_{cm} - M(Z)$$

OPAL $v\bar{v}qq$, $E_{cm}=202 \text{ GeV}$

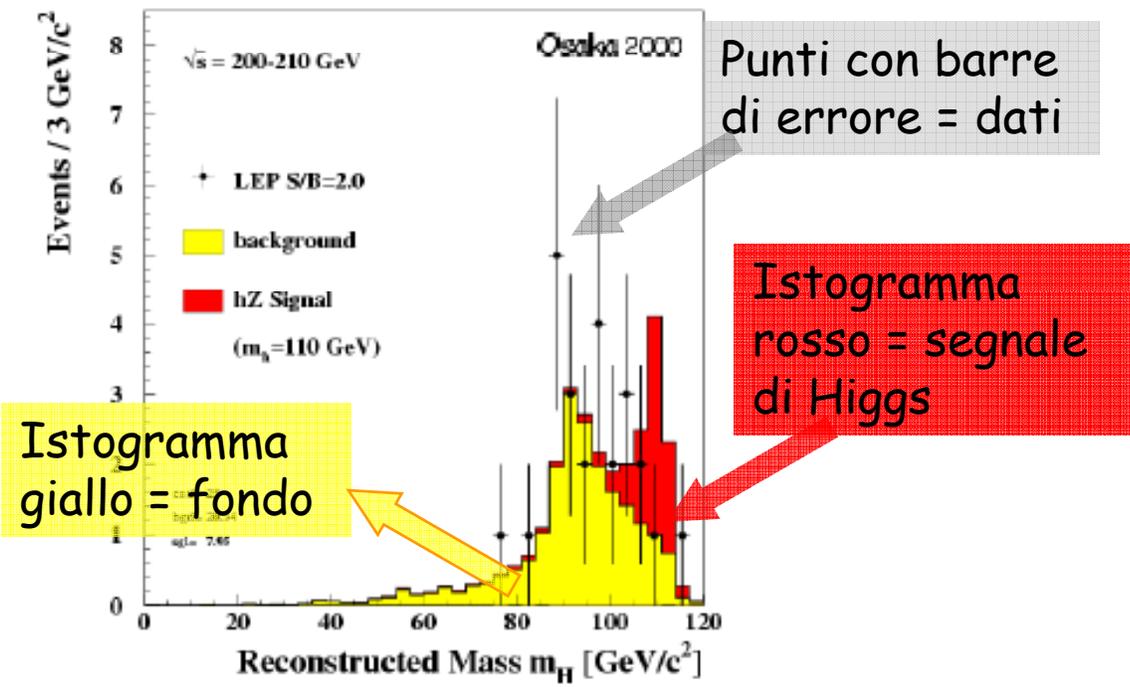


$M(qq)=106.9 \text{ GeV}/c^2$



Analisi statistica dei risultati

From the LEP HIGGS working group



Significant candidates from all channels:
 H_{qq} , $H_{\nu\nu}$, H_{ll} , $qq\tau\tau$

All 4 experiments: $L=350 \text{ pb}^{-1}$
 120 pb^{-1} above $E_{\text{cm}}=206 \text{ GeV}$

DATA	25.0
MC	20.3
Higgs (110)	7.9

Un segnale di Higgs è segnalato da un eccesso di eventi rispetto a quelli dovuti al solo fondo

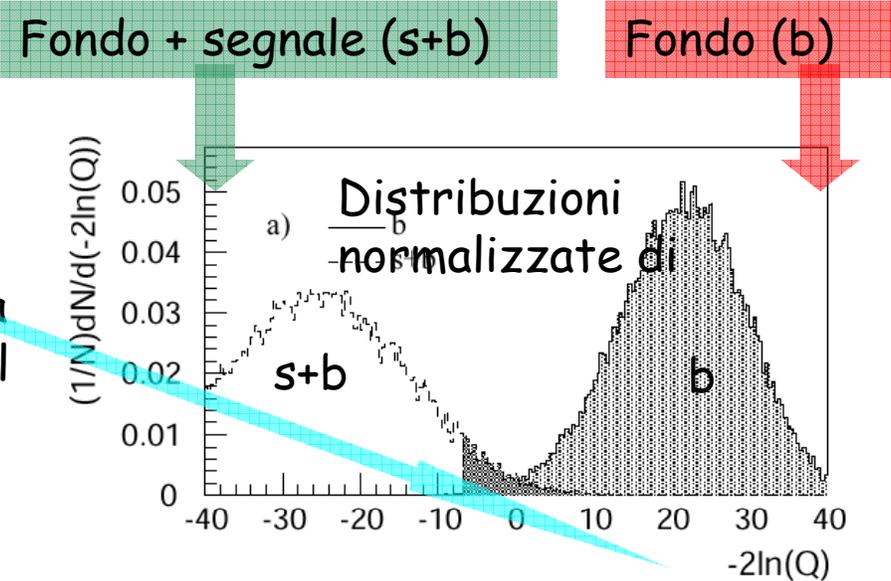
Calcolo dei limiti superiori: $M_H < ?$

Se il numero di eventi non è sufficiente per affermare con certezza l'esistenza di una particella di Higgs vengono calcolati i limiti superiori.

2 ipotesi:

- nel campione c'è solo fondo ('b');
- nel campione c'è fondo e segnale ('s+b');

Un'unica variabile Q raccoglie tutte le informazioni che permettono la classificazione del singolo evento in b o $s+b$

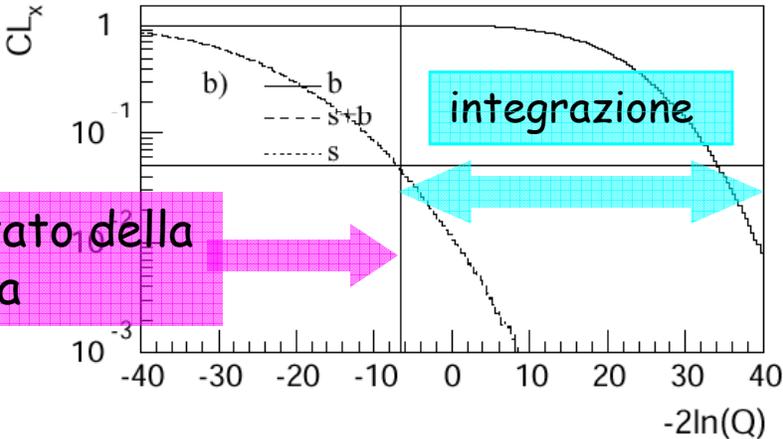


L'integrale della distribuzione da

$CL_b(m_H)$ e

$CL_{s+b}(m_H)$

Risultato della misura



I risultati parziali (ma ufficiali)

La presenza di un Higgs si manifesterebbe con una valle nella curva $1-CL_b(m_H)$; più pronunciata è la valle più significativo è il segnale.

Valori di $1-CL_b(m_H)$ pari a 5.7×10^{-7} (2.7×10^{-3}) corrispondono ad una scoperta a 5 (3) σ

