

Misure esclusive ed
inclusive di $|V_{cb}|$ nei
decadimenti semileptonici
dei mesoni B

Diego Monorchio

Università “Federico II” di Napoli e INFN

Incontri di Fisica delle Alte Energie

Torino 14-04-04

Sommario

■ Misure esclusive

- Framework teorico:
HQET
- Strategia di analisi
- LEP vs. B-factories
- $|V_{cb}|$ in $B \rightarrow D^* \ell \nu$
- $|V_{cb}|$ in $B \rightarrow D \ell \nu$
- Risultati

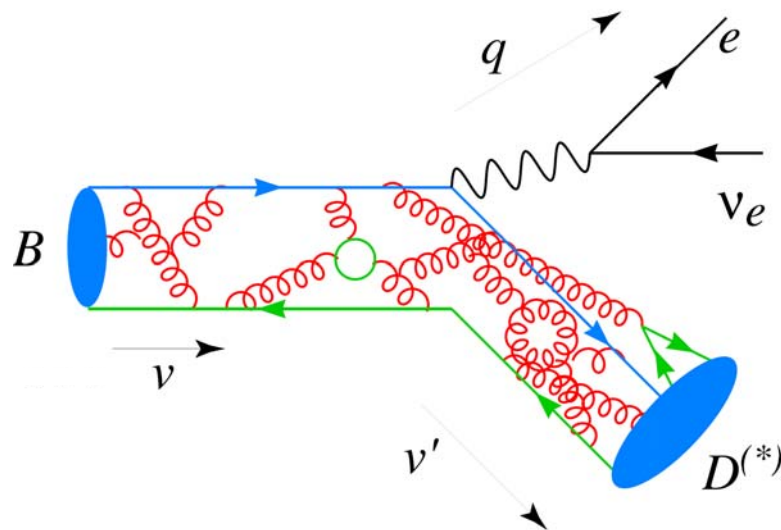
■ Misure inclusive

- Framework teorico:
OPE
- Strategia di analisi
- LEP vs. B-factories
- Momenti dello spettro leptónico
- Momenti dello spettro in M_X
- Risultati

V_{cb} nei decadimenti esclusivi $B \rightarrow D^{(*)} \ell \nu$

La **HQET** fornisce la relazione tra $|V_{cb}|$ e la larghezza di decadimento differenziale $d\Gamma/dw$

$$w \equiv v \cdot v' = \frac{(M_{B^0}^2 + M_{D^{*+}}^2 - q^2)}{(2M_{B^0} M_{D^{*+}})}$$



$$\frac{d\Gamma(\bar{B} \rightarrow D^{*} \ell^{-} \bar{\nu}_{\ell})}{dw} = \frac{G_F^2}{48\pi^3} |V_{cb}|^2 \mathcal{F}_{(*)}^2(w) \mathcal{K}_{(*)}(w)$$

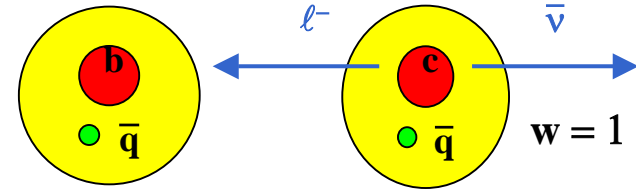
Funzioni note
(spazio delle fasi)
si annullano in
 $w=1$

Fattori di forma della transizione
adronica $B \rightarrow D^{(*)}$:

- Non sono noti dalla teoria
- Nel limite di Heavy Quark Symmetry $\mathcal{F}_{(*)}(1) \rightarrow 1$

$B \rightarrow D^* \ell \nu$ v.s. $B \rightarrow D \ell \nu$

A partire dalle misure di $|V_{cb}| F_{(*)}(w)$ si ottiene $|V_{cb}|$ estrapolando il valore a $w=1$ (zero recoil).



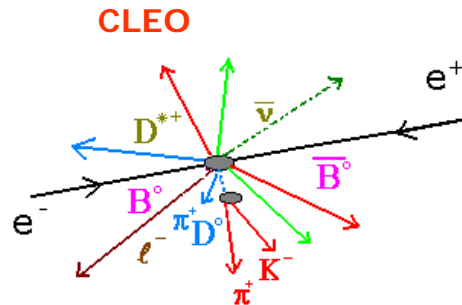
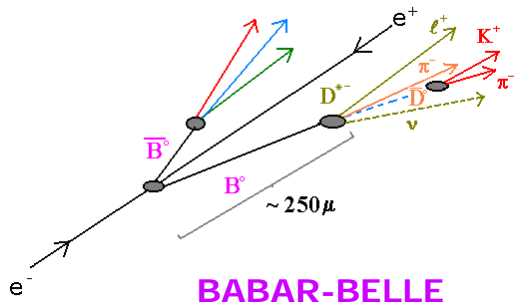
Il decadimento $B \rightarrow D^* \ell \nu$ presenta notevoli vantaggi rispetto a $B \rightarrow D \ell \nu$:

- $\text{BR}(B_d^0 \rightarrow D^* \ell^- \nu) \sim 4 \text{ BR}(B_d^0 \rightarrow D \ell^- \nu)$
- $\mathcal{K}_D(w \rightarrow 1) \sim (1-w)^{3/2}$ mentre $\mathcal{K}_{D^*}(w \rightarrow 1) \sim (1-w)^{1/2}$.
- Il fondo combinatorio è inferiore.
- Correzioni al primo ordine in $1/m_Q$ nulle per $F_{D^*}(1)$ ma non per $F_D(1)$.
 - L'estrazione di $|V_{cb}|$ è affetta da una minore incertezza teorica.

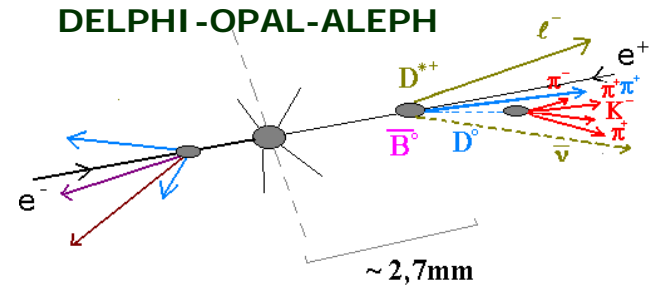
Lo studio del decadimento $B \rightarrow D \ell \nu$ costituisce comunque un importante check di consistenza della HQET.

B → D*lv: B-factories v.s. LEP

$Y(4S) \rightarrow B\bar{B}$



$Z \rightarrow b\bar{b}$

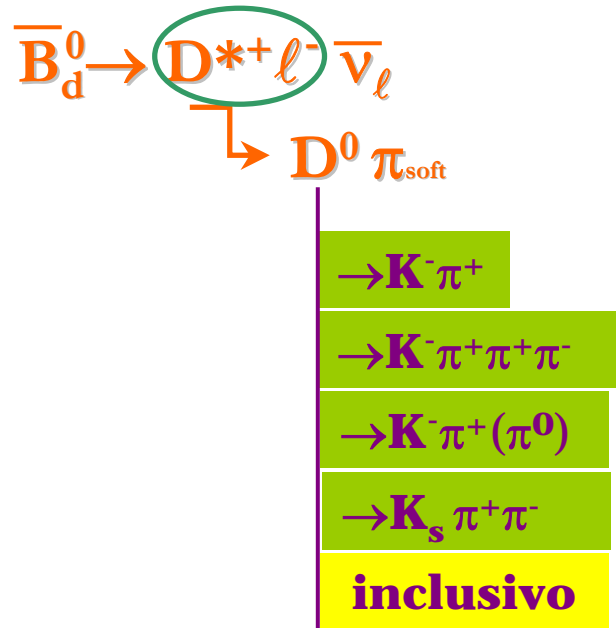


- $p_B \sim 0.3-1.0 \text{ GeV}$
 - Efficienza fortemente dipendente da w e dall'impulso del π_{soft}
- Vincoli dalla cinematica del decadimento a due corpi
 - Miglior reiezione dei fondi
 - Miglior risoluzione in w

- $p_B \sim 30 \text{ GeV}$
 - Efficienza costante in w
 - $p_{\text{soft}} \sim 1 \text{ GeV}$
- Energia del B non ben determinata
 - Più difficile la soppressione dei fondi
 - Peggior risoluzione in w

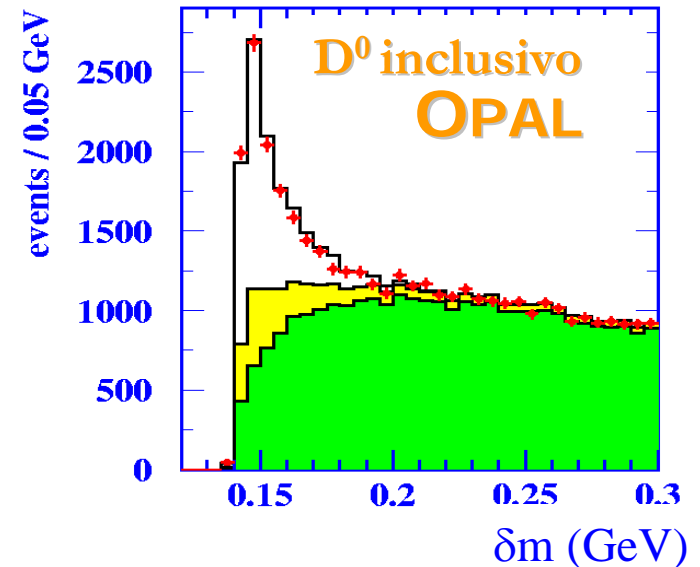
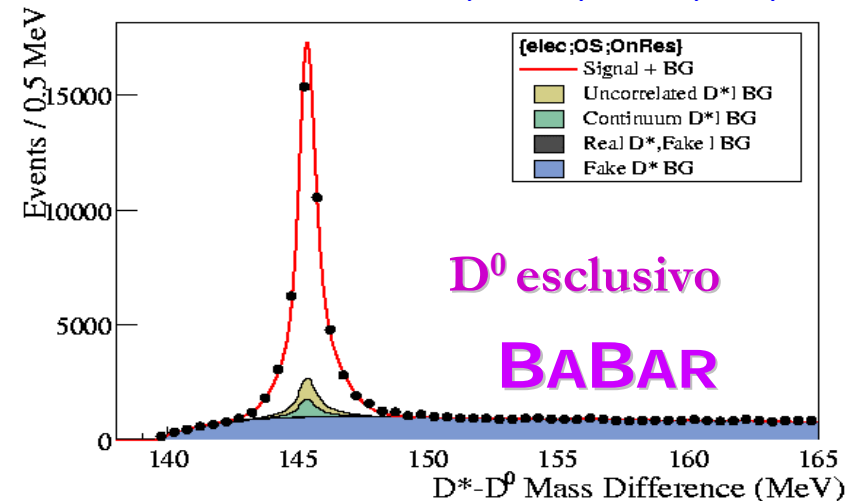
Selezione degli eventi

Si selezionano candidati $D^* \ell \nu$:



- Criteri per l'identificazione del leptone
- Tagli cinematici per ridurre la contaminazione di eventi di fondo

$$\delta m = m(D^0 \pi) - m(D^0)$$

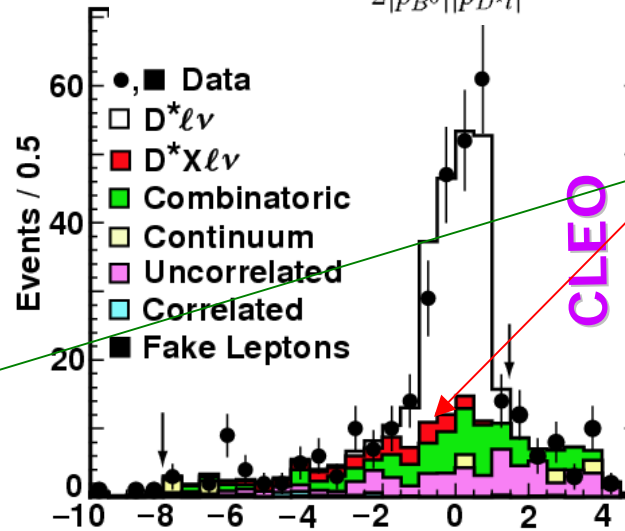
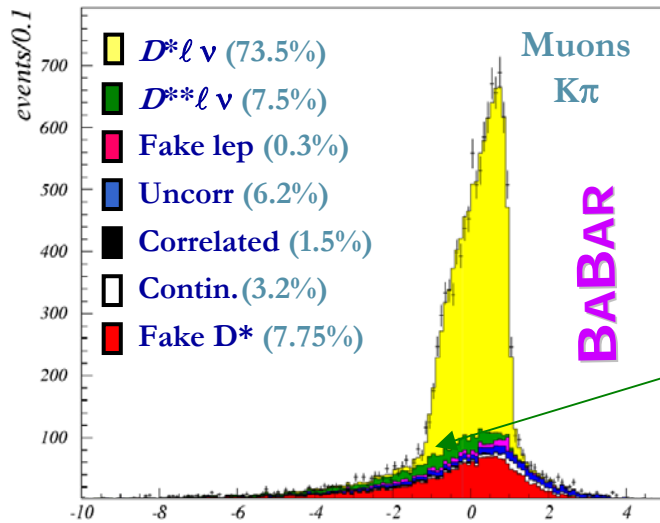


Stima del fondo da $B \rightarrow D^* X \ell \nu$

Alla Y(4S) si fa uso della variabile: $\cos\theta_{BY} = \frac{-(m_{B^0}^2 + m_{D^{*1}}^2 - 2E_{B^0}E_{D^{*1}})}{2|p_{B^0}| |p_{D^{*1}}|}$

In signal
 $= \cos\theta_{B-D^*l}$

In D^{**} background
 $= \cos\theta_{B-D^*l} - \frac{m_{\nu-X}^2}{2|p_{B^0}| |p_{D^{*1}}|}$

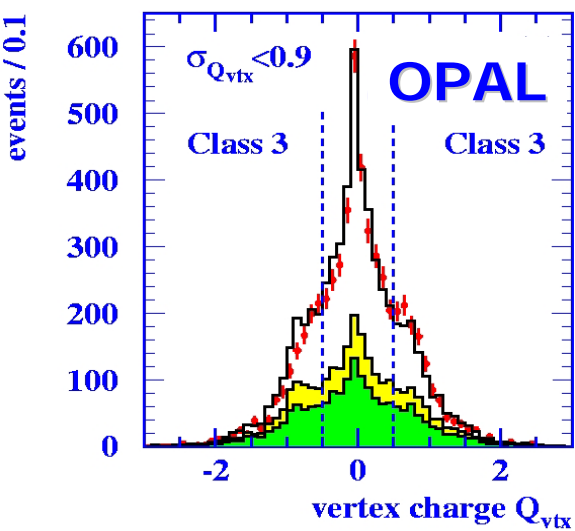
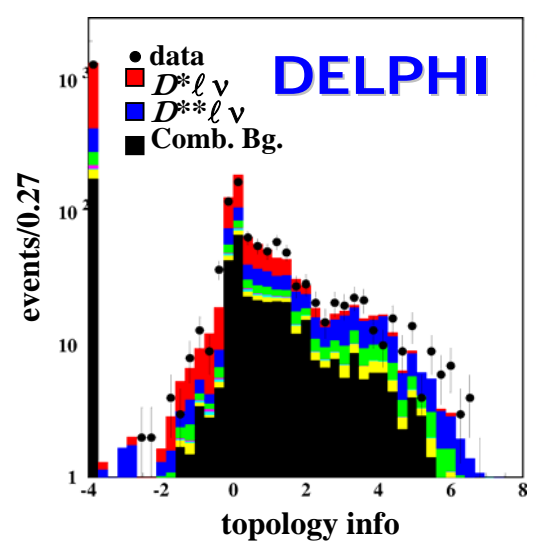


Coda a $\cos\theta_{BY} < -1$

Numero di eventi di segnale e di fondo D^{**} determinato in ciascun bin di w da un fit in $\cos\theta_{BY}$

Alla Z si utilizzano variabili topologiche.

La componente di eventi $B \rightarrow D^* X \ell \nu$ determinata simultaneamente a $|V_{cb}|F(1)$ in un maximum likelihood fit.



Fit a $|V_{cb}|F(w)$

Parametrizzazione di Caprini, Neubert, Lellouch [NPB 530, 153 '98]:

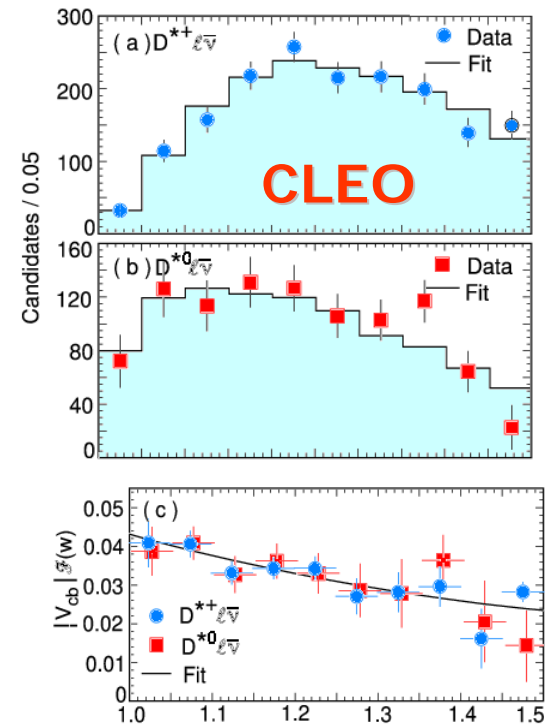
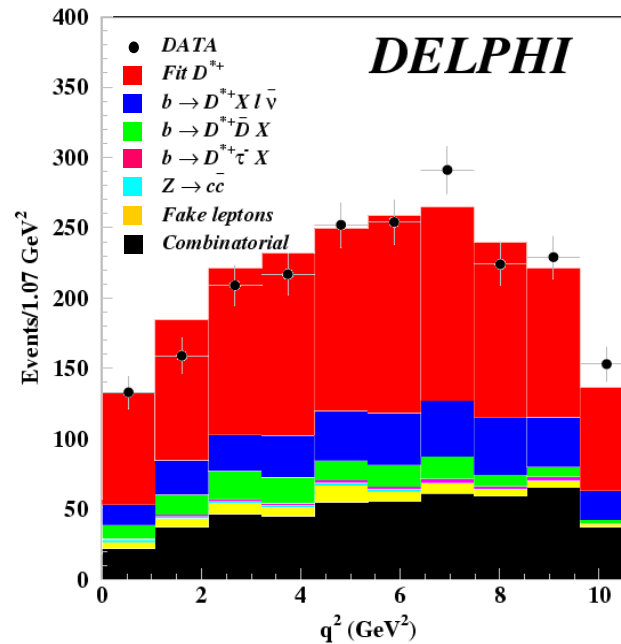
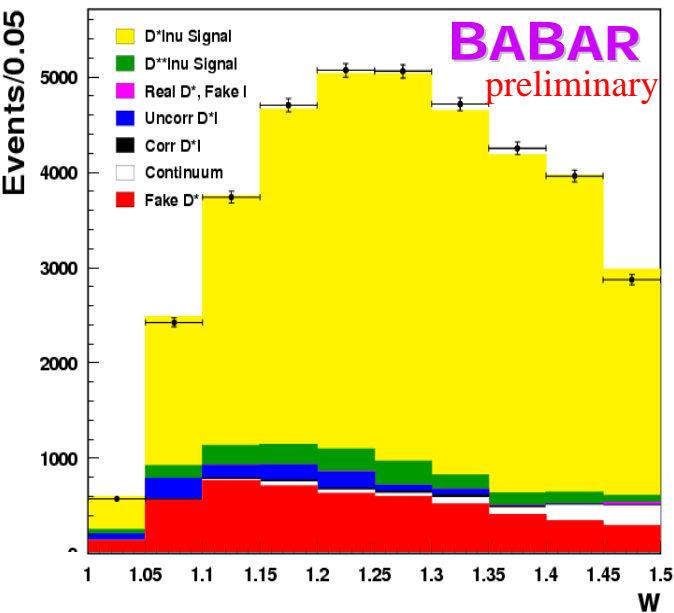
$$F(w) = F(1) [1 - 8\rho_A^2 z + (53\rho_A^2 - 15)z^2 - (231\rho_A^2 - 91)z^3] G[R_1(w), R_2(w)]$$

Parametri da determinare
tramite il fit a $|V_{cb}|F(w)$

$$z = \frac{\sqrt{w+1} - \sqrt{2}}{\sqrt{w+1} + \sqrt{2}}$$

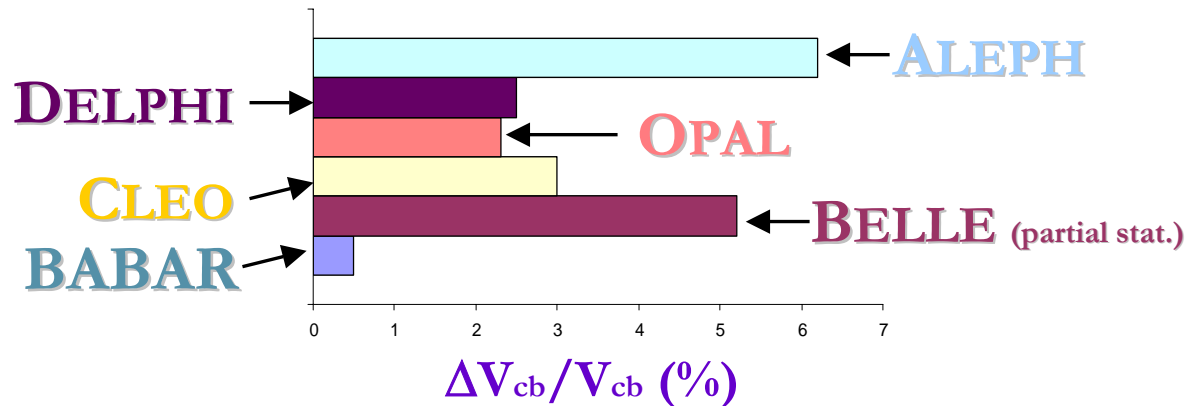
Funzionale noto

Misurati da CLEO
[PRL 76, 3898 '96]



Principali sorgenti di errore

Confronto tra gli errori **statistici**



Principali contributi all'errore **sistematico**

Y(4S)

- $\text{Br}(Y(4S) \rightarrow BB)$, $\text{Br}(D^0)$
- Efficienza ricostruzione soft pion
- Efficienza ricostruzione altre tracce
- Composizione fondo D^{**}
- $R_1(1) R_2(1)$

Z

- $B(b \rightarrow B^0)$
- Efficienza di selezione delle tracce
- Risoluzione in w
- Composizione fondo D^{**}
- $R_1(1) R_2(1)$

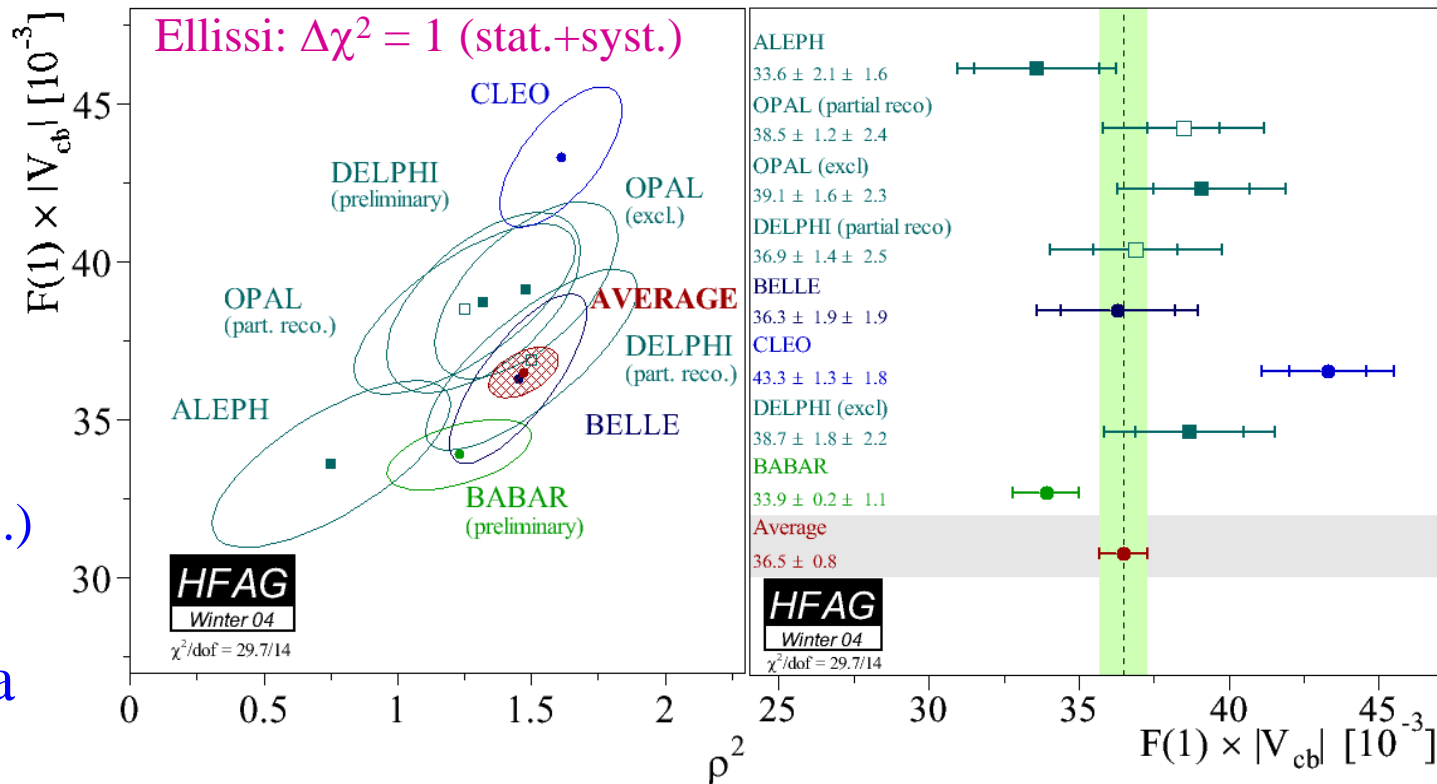
Media Mondiale

Misure riscaldate
agli stessi
parametri di input:
 $B(Y(4S) \rightarrow B^0 B^0)$,
 $B(b \rightarrow B^0)$,
 $B(D^* \rightarrow D^0 \pi)$,
 $B(D^0 \rightarrow K\pi, K3\pi, \dots)$

Misura dominata
dall'incertezza
teorica



Scarsa consistenza
tra i risultati



$$F(1)|V_{cb}| = (36.5 \pm 0.8) \times 10^{-3} \quad \rho_A^2 = 1.47 \pm 0.13$$

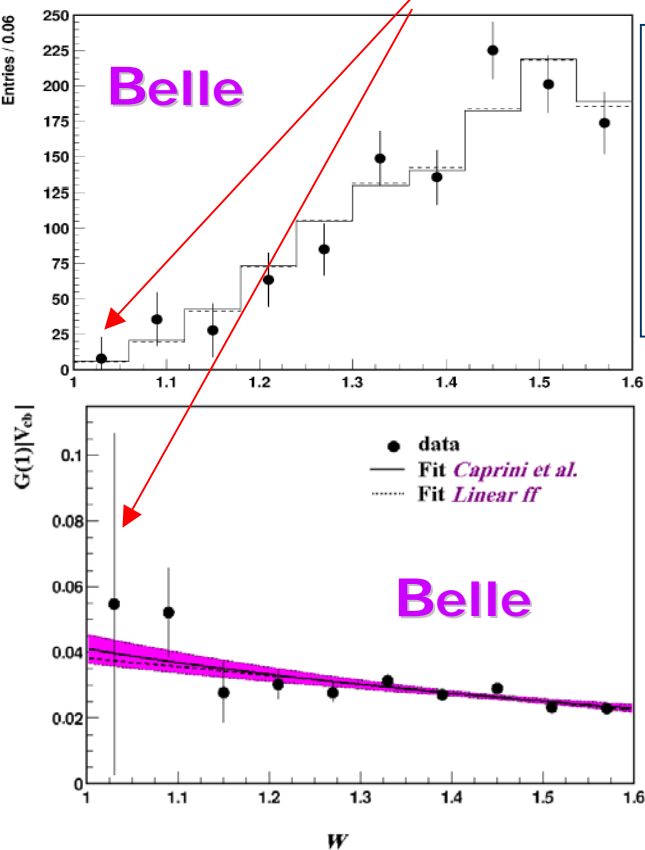
$$\chi^2/\text{d.o.f.} = 2.12 \quad \text{corr}(F(1)|V_{cb}|, \rho_A^2) = 0.49$$

Usando $F(1) = 0.91 \pm 0.04_{\text{theo}}$

$$|V_{cb}| = (40.1 \pm 0.9_{\text{exp}} \pm 1.8_{\text{theo}}) 10^{-3}$$

$|V_{cb}|$ da $B \rightarrow D^* \ell \nu$

- Stessa tecnica di $D^* \ell \nu$
- Fondo combinatorio e da $D^* \ell \nu$
- Soppressione di elicità a $w \rightarrow 1$



Test HQET

Dai risultati di Belle su $D^* \ell \nu$ e $D^+ \ell \nu$

$$\rho_D^2 - \rho_{D^*}^2 = -0.23 \pm 0.29 \pm 0.20$$

$$\mathcal{G}(1) / \mathcal{F}(1) = 1.16 \pm 0.14 \pm 0.12$$

Compatibile con le previsioni teoriche

World average

$$\mathcal{G}(1) |V_{cb}| = (42.4 \pm 3.7) \times 10^{-3}$$

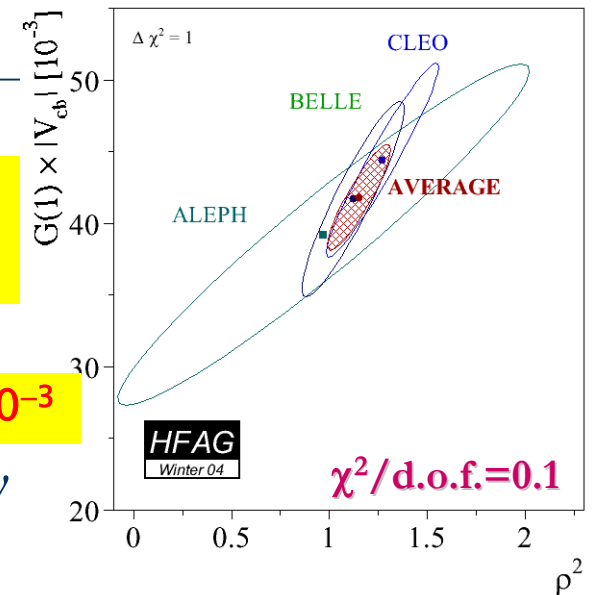
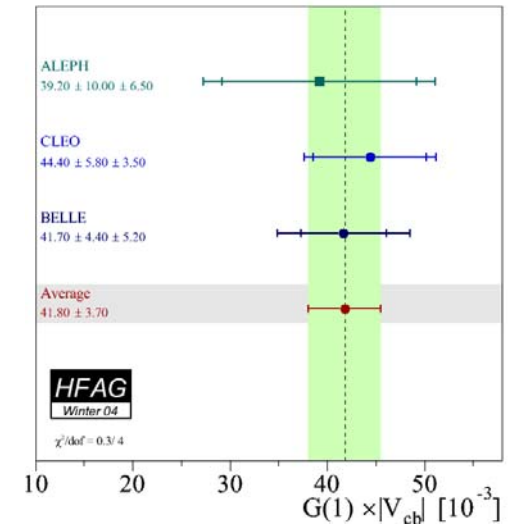
$$\rho_G^2 = 1.16 \pm 0.16$$

Con $\mathcal{G}(1) = 1.04 \pm 0.6$

$$|V_{cb}| = (40.8 \pm 3.6_{\text{exp}} \pm 2.4_{\text{theo}}) \times 10^{-3}$$

Compatibile con $B \rightarrow D^* \ell \nu$

Errore del 10%



Misure inclusive di $|V_{cb}|$

$|V_{cb}|$ può essere determinato a partire dalla misura della larghezza di decadimento inclusiva:

$$\Gamma_{sl}(b \rightarrow c\ell\bar{\nu}) = \gamma_{th} |V_{cb}|^2 = \frac{Br(b \rightarrow c\ell\bar{\nu})}{\tau_b}$$

Assunzione dualità quark-adrone
 $\sum_j \Gamma(B \rightarrow X_c^j l \nu) = \Gamma(b \rightarrow c l \nu)$

Coefficiente teorico.

Fino al 2002 rappresentava il principale contributo all'errore su $|V_{cb}|$.

Determinato sperimentalmente al 1%.

L'origine dell'errore teorico su γ_{th} resa esplicita dalla
 Espansione **OPE** (**O**perator **P**roduct **E**xpansion)

Kinetic mass scheme

$$\gamma_{th} |V_{cb}|^2 = \frac{G_F^2 m_b^5}{192\pi^3} |V_{cb}|^2 (1 + A_{ew}) A_{pert}(r, \mu) \left[z_0(r) \left(1 - \frac{\mu_\pi^2 - \mu_G^2 + \frac{\rho_D^3 + \rho_{LS}^3}{m_b}}{2m_b^2} \right) - 2(1-r)^4 \frac{\mu_G^2 + \frac{\rho_D^3 + \rho_{LS}^3}{m_b}}{m_b^2} + d(r) \frac{\rho_D^3}{m_b^3} + \mathcal{O}(1/m_b^4) \right]$$

Correzioni perturbative di QCD
 Sviluppo in α_s

Fattore di spazio delle fasi

All'ordine $(1/m_b)^3$ 6 parametri non noti
 Necessità di trovare vincoli sperimentali.....

Parametri OPE e ruolo dei momenti

Parametri da determinare:

- $m_b(1\text{GeV})$, $m_c(1\text{GeV})$ masse cinetiche dei quark
- Ad $O(1/m_b^2)$
 - μ_π energia cinetica del quark b all'interno del mesone
 - μ_G accoppiamento cromomagnetico dello spin del quark b al campo gluonico
- Ad $O(1/m_b^3)$
 - ρ_D termine di Darwin
 - ρ_{LS} termine di spin-orbita

Strategia

- Misura dei momenti:
- Fit dei parametri sfruttando le relazioni ricavate dalla **OPE**

$$\langle X^n \rangle (E_{cut}) = \frac{\int (X - X^0)^n \frac{d\Gamma}{dX} dX}{\int \frac{d\Gamma}{dX} dX} \Bigg|_{E_l > E_{cut}}$$

Distribuzione di massa adronica M_X o spettro in energia del leptone E_ℓ nei decadimenti inclusivi $B \rightarrow X_c \ell \nu$

Lepton energy spectrum

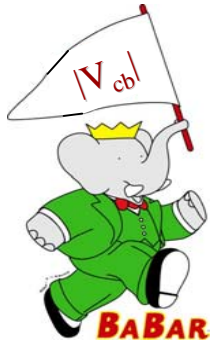
$$\langle E_l^n \rangle_{E_l > E_0} = f_n^\ell(E_0, m_b, m_c, \mu_G^2, \mu_\pi^2, \rho_D^3, \rho_{LS}^3)$$

Mass of hadronic system

$$\langle M_x^n \rangle_{E_l > E_0} = f_n^x(E_0, m_b, m_c, \mu_G^2, \mu_\pi^2, \rho_D^3, \rho_{LS}^3)$$

Analisi dei momenti: BaBar vs. Delphi

Risultati recenti



- Vincoli cinematici utili nella selezione dei fondi.
- Informazioni dall'altro B dell'evento
- Taglio minimo sull'impulso del leptone necessario per una buona identificazione.



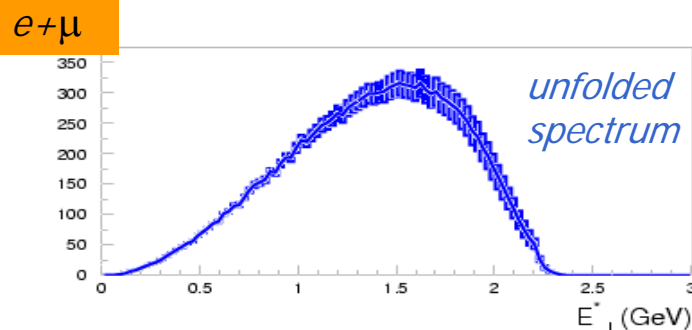
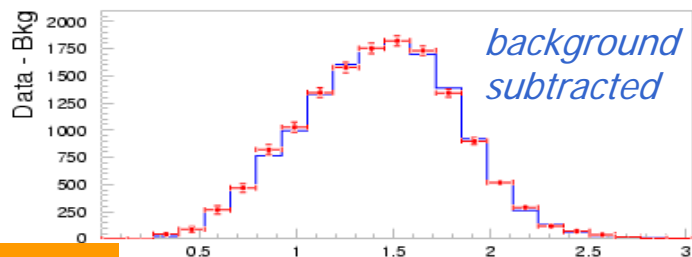
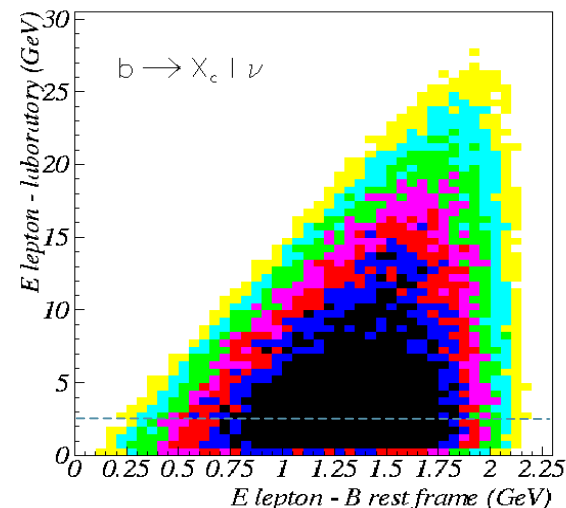
- Peggior risoluzione nel ricostruire il sistema dei B
- Il boost del mesone B ($p_B \sim 30 \text{ GeV}$) offre la possibilità di esplorare l'intero spettro leptonic
- Uso di formule non troncate per i momenti

Delphi: Momenti dello spettro leptonic

Taglio $p_{\ell}^{\text{Lab}} > 2.5 \text{ GeV}$:

- Ottima reiezione del fondo fake-lepton
- Sensibilità a tutto lo spettro di energia del leptone nel sistema di riferimento del B

Ricostruzione completa del sistema adronico X_c e del neutrino (missing energy).



Risoluzione su $p_{\ell}^* \sim 250 \text{ MeV}$

Fondo principale: eventi $b \rightarrow c \rightarrow \ell$

Risultati della misura dei primi 3 momenti:

$$\langle E_{\ell} \rangle = 1.383 \pm 0.012_{\text{stat}} \pm 0.009_{\text{sys}} \text{ GeV}$$

$$\langle (E_{\ell} - \langle E_{\ell} \rangle)^2 \rangle = 0.192 \pm 0.005_{\text{stat}} \pm 0.008_{\text{sys}} \text{ GeV}^2$$

$$\langle (E_{\ell} - \langle E_{\ell} \rangle)^3 \rangle = -0.029 \pm 0.005_{\text{stat}} \pm 0.006_{\text{sys}} \text{ GeV}^3$$

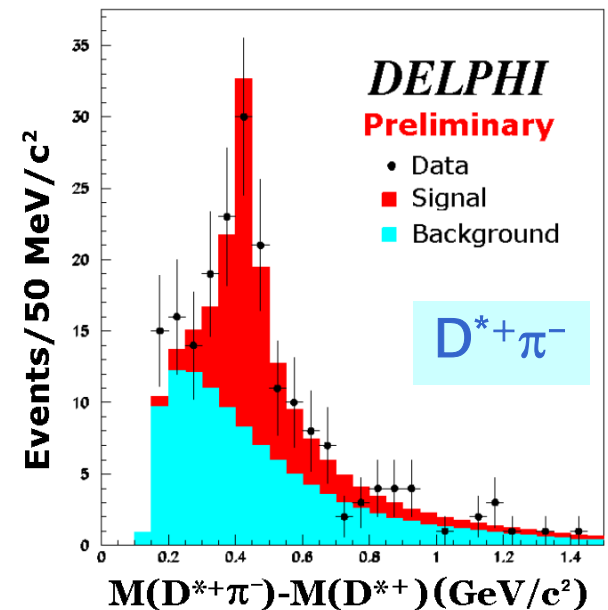
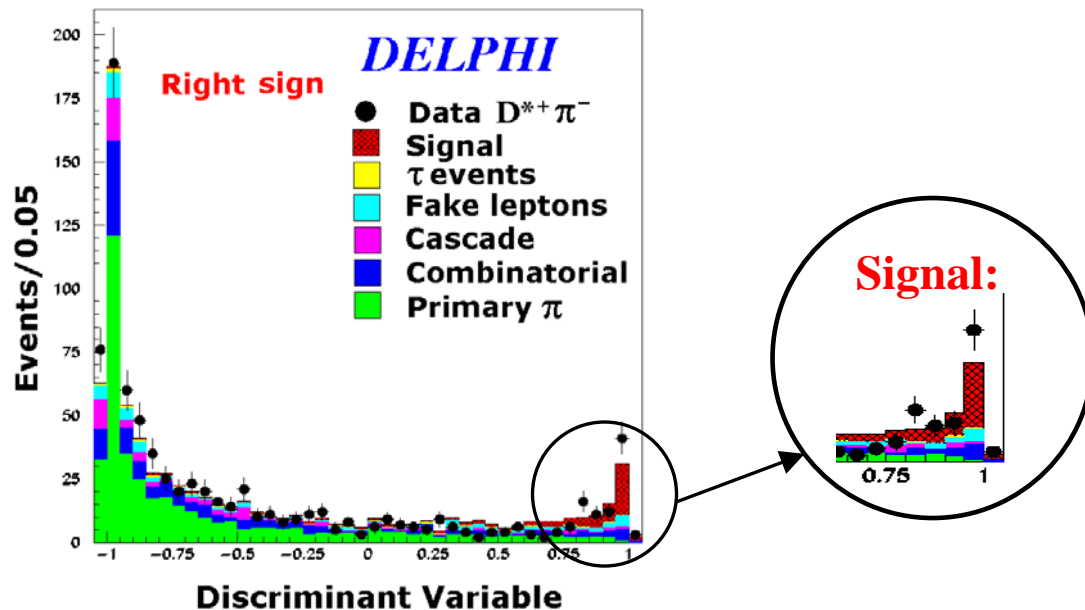
Delphi: Momenti dello spettro in M_X

Ricostruzione esclusiva dei decadimenti $B^0 \rightarrow D^{**} \ell \nu$ con la D^{**} che decade nei canali:

$D^{**} \rightarrow D^0 \pi^+$, $D^{**} \rightarrow D^+ \pi^-$, $D^{**} \rightarrow D^{*+} \pi^-$.

Una variabile discriminante costruita a partire dalle informazioni topologiche dell'evento separa il segnale dal fondo.

Fit in $\Delta_M = M(D^{(*)}\pi) - M(D^{(*)})$ in cui si tiene conto dei contributi degli stati risonanti e non.



Delphi: Momenti dello spettro in M_X

Dal fit si ottengono:

- la misura del branching ratio complessivo

$$BR(B^0 \rightarrow D^{**} \ell^- \nu) = (2.6 \pm 0.5 \pm 0.4)\%$$

- Contributo dominante dalla risonanza D_1^* .
- Le masse e le larghezze dei diversi stati risonanti e la slope della componente non risonante

Dalla relazione:

$$\langle m_H^n \rangle = p_D m_D^n + p_{D^*} m_{D^*}^n + (1 - p_D - p_{D^*}) \langle m_{D^{**}}^n \rangle$$

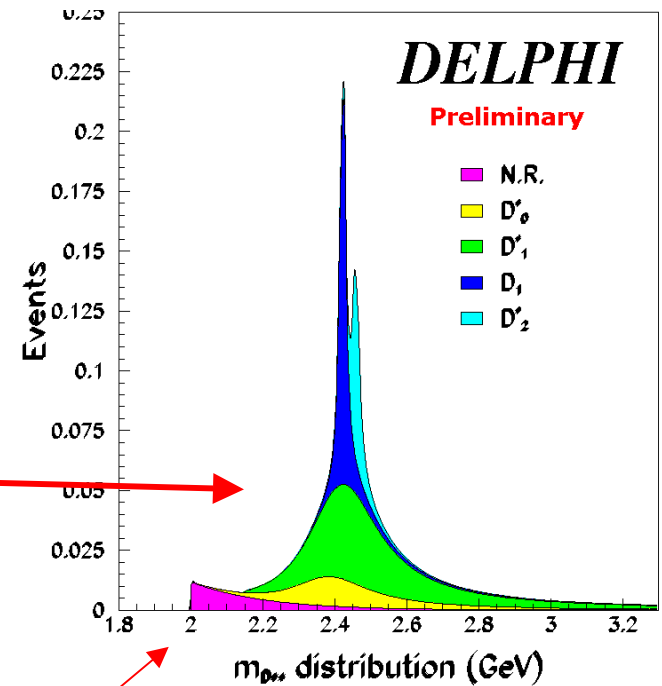
si determinano i momenti dello spettro in M_X :

$$M_1 = \langle m_H^2 - \bar{m}_D^2 \rangle = 0.647 \pm 0.046 \pm 0.093 \text{ (GeV}/c^2)^2$$

$$M_2 = \langle (m_H^2 - \bar{m}_D^2)^2 \rangle = 1.98 \pm 0.23 \pm 0.29 \text{ (GeV}/c^2)^4$$

$$M_2' = \langle (m_H^2 - \langle m_H^2 \rangle)^2 \rangle = 1.56 \pm 0.18 \pm 0.17 \text{ (GeV}/c^2)^4$$

$$M_3' = \langle (m_H^2 - \langle m_H^2 \rangle)^3 \rangle = 4.05 \pm 0.74 \pm 0.31 \text{ (GeV}/c^2)^6$$



Delphi: Fit ai parametri OPE

Da un fit simultaneo ai momenti dello spettro leptonic e dello spettro in M_X vengono determinati i 4 parametri OPE:
 $m_b(1 \text{ GeV}), m_c(1 \text{ GeV}), \mu_\pi^2, \rho_D^3$

Nel fit sono fissati i parametri:

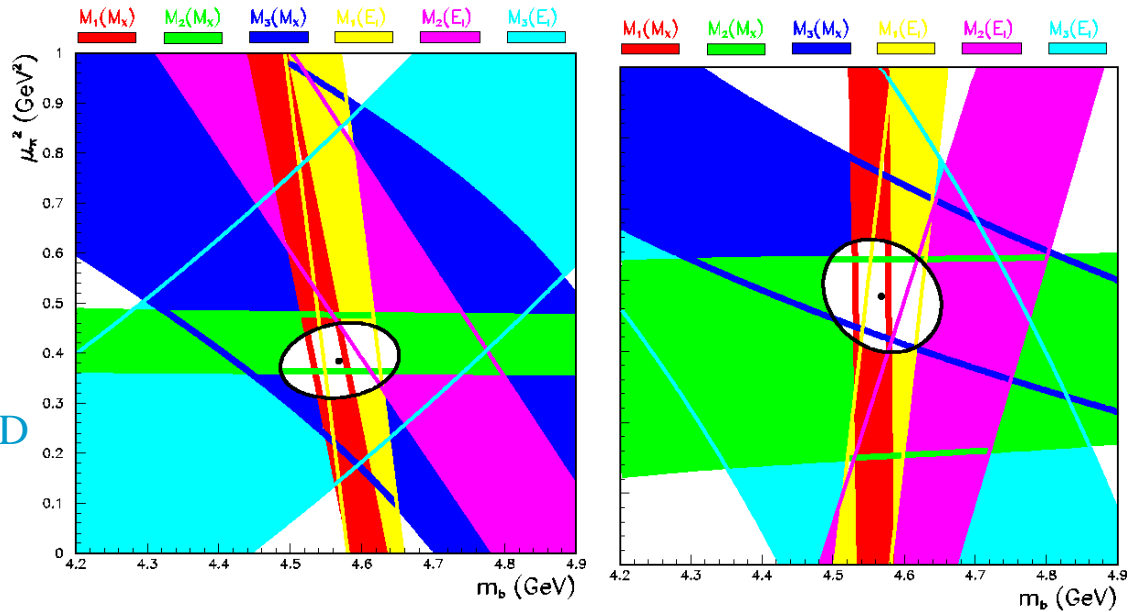
$$\mu_G^2 = 0.35 \pm 0.05 \text{ GeV}^2$$

$$\rho_{LS}^3 = -0.15 \pm 0.15 \text{ GeV}^3$$

ed imposti i vincoli:

$$m_b^{\text{kin}} = 4.57 \pm 0.10 \text{ GeV}$$

$$m_c^{\text{kin}} = 1.05 \pm 0.30 \text{ GeV}$$



Value \pm error fit \pm sys. mom. \pm sys. theo.

$$m_b^{\text{kin}}(1\text{GeV}) = 4.570 \pm 0.082 \pm 0.010 \pm 0.005 \text{ GeV}$$

$$m_c^{\text{kin}}(1\text{GeV}) = 1.133 \pm 0.134 \pm 0.019 \pm 0.020 \text{ GeV}$$

$$\mu_\pi^2 = 0.382 \pm 0.070 \pm 0.031 \pm 0.020 \text{ GeV}^2$$

$$\rho_D^3 = 0.089 \pm 0.039 \pm 0.004 \pm 0.010 \text{ GeV}^3$$

$\chi^2/\text{d.o.f.} = 0.96$

LEP $\tau_b, BR(\bar{B} \rightarrow X_c \ell \bar{\nu}_\ell)$

$m_b, m_c, \mu_\pi^2, \rho_D^3, \mu_G^2, \rho_{LS}^3$

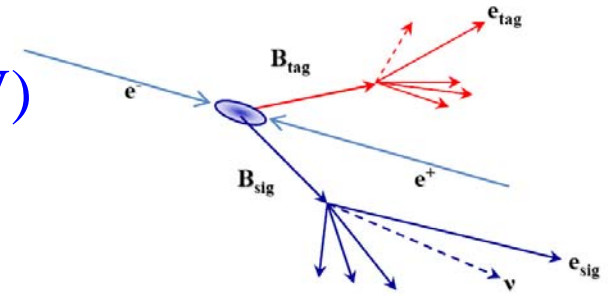
$$|V_{cb}| = 42.4 \times (1 \pm 0.015_{\text{expt.}} \pm 0.019_{\text{fit.}} \pm 0.010_{\text{theo.}}) \times 10^{-3}$$

$\alpha_s(m_b/2, 2m_b)$

BaBar: Momenti dell'impulso del leptone

Selezione basata sull'identificazione di un elettrone di tag altamente energetico ($p^* > 1.4 \text{ GeV}$) e di un elettrone di segnale con $p^* > 0.5 \text{ GeV}$.

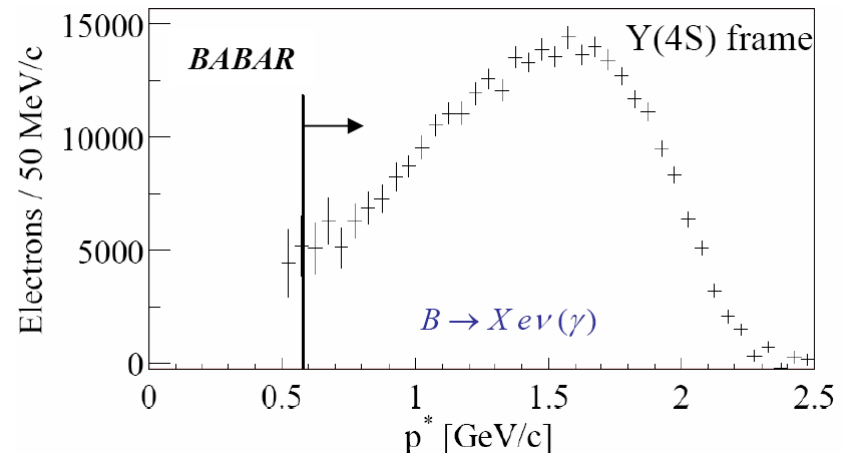
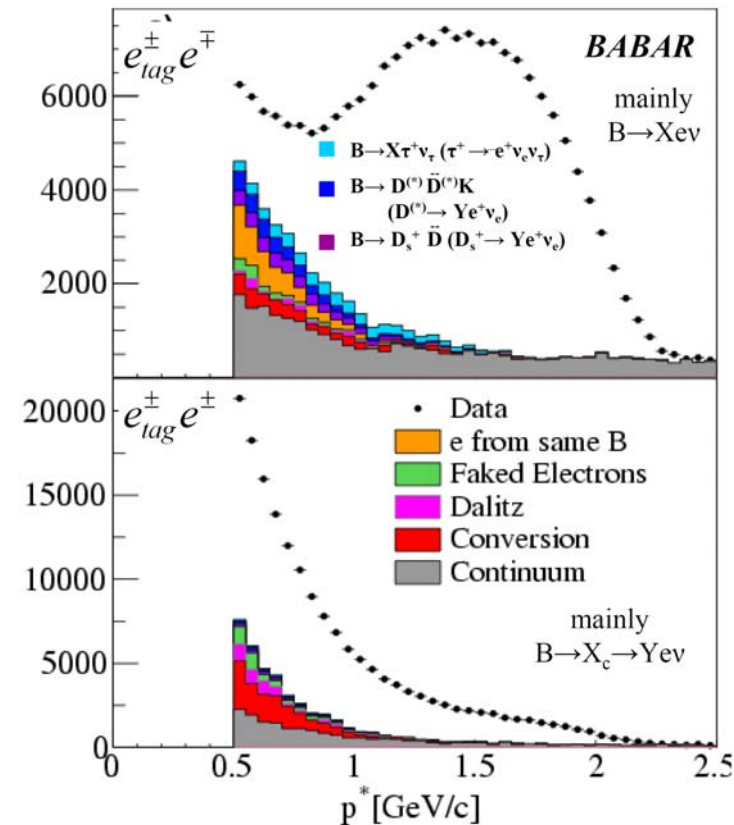
Campione di eventi suddiviso nei sottocampioni unlike-sign e like-sign.



Lo spettro dell'elettrone in eventi di segnale si ottiene dalla formula

$$\frac{dN_{b \rightarrow xev}}{dp} = \frac{1}{\epsilon_e} \left[\frac{1}{\epsilon_{cut}} \frac{1 - f_0 \chi_0}{(1 - 2f_0 \chi_0)} \frac{dN_{e^- e^+}}{dp} - \frac{f_0 \chi_0}{(1 - 2f_0 \chi_0)} \frac{dN_{e^- e^+}}{dp} \right]$$

ed applicando correzioni agli effetti di Bremsstrahlung



BaBar: Momenti dello spettro in M_X

Ricostruzione completa del decadimento adronico di uno dei due mesoni B dell'evento.

Decadimento semileptonico dell'altro B:

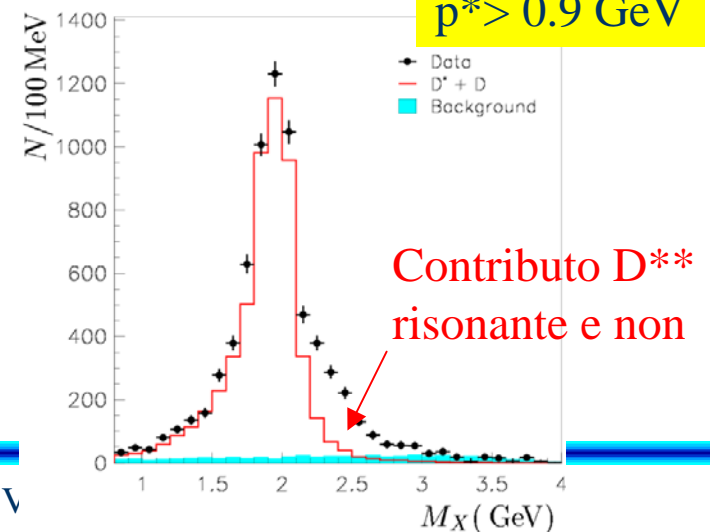
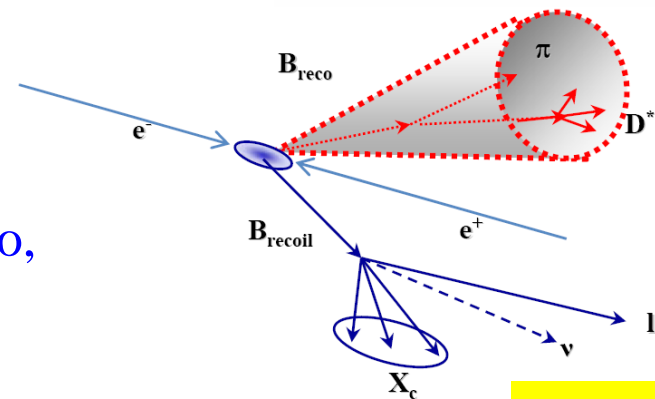
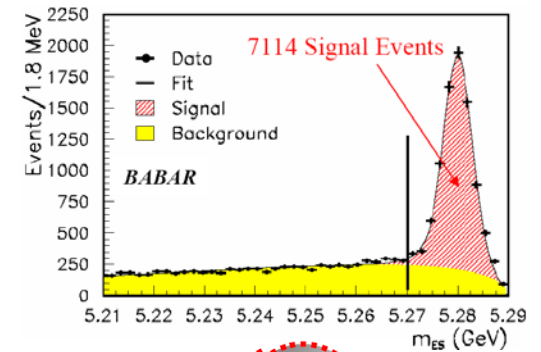
- Identificazione del leptone
- Ricostruzione del sistema adronico X_c .
- p_{miss} assegnata al neutrino.

M_X determinata da un fit cinematico:

- Imponendo conservazione del quadrimpulso, $m_\nu=0$, m_B
- Risoluzione su $M_X \sim 350$ MeV

Simulazione MC utilizzata per:

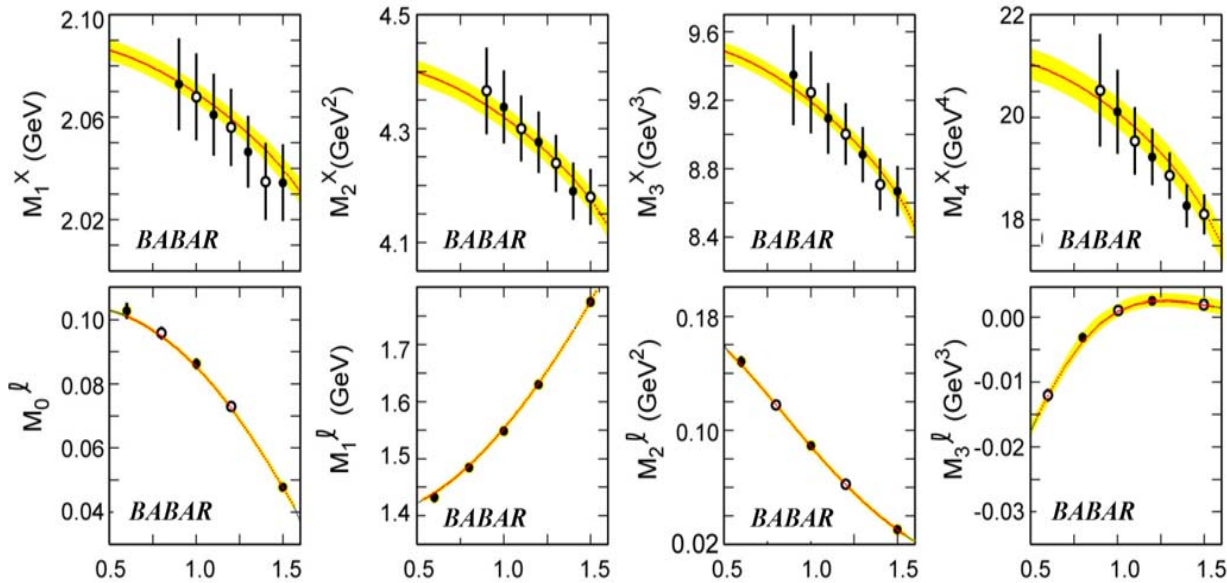
- stima delle efficienze
- stima dei fondi
- Definizione di una procedura di calibrazione della scala di massa che ha consentito la determinazione diretta dei momenti $\langle M_X^n \rangle$



BaBar: Fit ai parametri OPE

$\chi^2/d.o.f.=15/20$

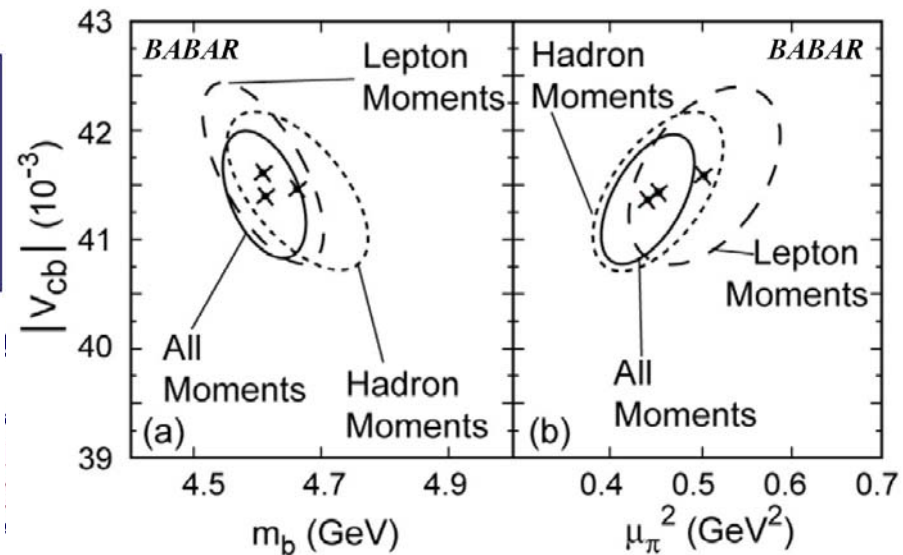
- Misura dei Momenti per diversi valori di E_{cut}
- Fit simultaneo lasciando tutti i parametri liberi
- Punti altamente correlati (utilizzati nel fit solo i punti pieni)



Risultati:

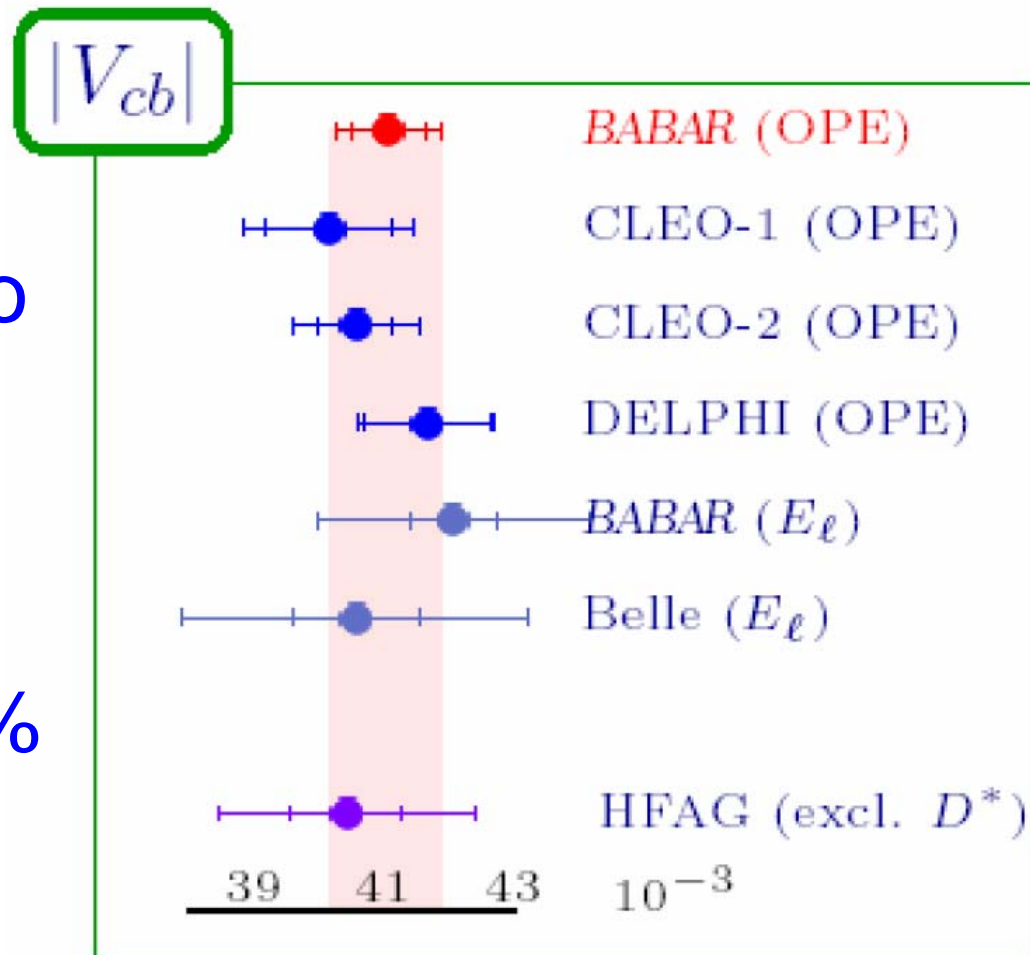
$ V_{cb} $	$= (41.4 \pm 0.4_{\text{exp}} \pm 0.4_{\text{HQE}} \pm 0.2_{\alpha_s} \pm 0.6_{\Gamma_{SI}}) \times 10^{-3}$
$Br(B \rightarrow X_c e \nu)$	$= (10.61 \pm 0.16_{\text{exp}} \pm 0.06_{\text{HQE}}) \%$
$m_b(1 \text{ GeV})$	$= (4.61 \pm 0.05_{\text{exp}} \pm 0.04_{\text{HQE}} \pm 0.02_{\alpha_s}) \text{ GeV}$
$m_c(1 \text{ GeV})$	$= (1.18 \pm 0.07_{\text{exp}} \pm 0.06_{\text{HQE}} \pm 0.02_{\alpha_s}) \text{ GeV}$

μ_π^2	$= (0.45 \pm 0.04_{\text{exp}} \pm 0.04_{\text{HQE}} \pm 0.01_{\alpha_s}) \text{ GeV}^2$
μ_G^2	$= (0.27 \pm 0.06_{\text{exp}} \pm 0.03_{\text{HQE}} \pm 0.02_{\alpha_s}) \text{ GeV}^2$
ρ_D^3	$= (0.20 \pm 0.02_{\text{exp}} \pm 0.02_{\text{HQE}} \pm 0.00_{\alpha_s}) \text{ GeV}^3$
ρ_{LS}^3	$= (-0.09 \pm 0.04_{\text{exp}} \pm 0.07_{\text{HQE}} \pm 0.01_{\alpha_s}) \text{ GeV}^3$



Risultati $|V_{cb}|$ inclusivo

- Ottima consistenza tra le misure
- Significativo aumento della precisione con l'introduzione delle analisi dei momenti
- Errore teorico dal 5% al 2% negli ultimi 2 anni!



Conclusioni

- **Misure esclusive** $|V_{cb}|^{media} = (40.1 \pm 0.9_{exp} \pm 1.8_{theo})10^{-3}$
 - Limitate dalla sistematica e dalla teoria
 - Numerose sistematiche comuni ai vari esperimenti
 - $B(b \rightarrow B^0)$, $B(\Upsilon(4S) \rightarrow B^0 B^0)$, D BR's, contributo D^{**} , fattori di forma R_1 R_2 ...
 - Attesa riduzione dell'errore teorico su F(1)
- **Misure inclusive** $|V_{cb}|^{babar} = (41.4 \pm 0.4_{exp} \pm 0.4_{OPE} \pm 0.6_{th})10^{-3}$
 - Grosso successo delle analisi dei momenti nella riduzione dell'errore teorico
 - Nessuna evidenza di violazione dualità quark-adrone
- **Determinante ruolo delle B-factories nella misura di precisione di $|V_{cb}|$ ma notevole contributo in quest'area anche dagli esperimenti al LEP (Delphi in particolare).**

Backup slides

Ricostruzione della variabile w

$$w = \frac{m_B^2 + m_{D^*}^2 - q^2}{2m_B m_{D^*}}$$

E, p conservation,
vertex info...

$$q^2 = (p_{\ell^-} + p_{\bar{\nu}_\ell})^2 = (p_{\bar{B}} - p_{D^*})^2$$

Measured

From missing
energy

From decay
products

