



# Misura della massa del Top al Tevatron (CDF)

Caterina Doglioni

# Indice

Il quark Top

Canali di decadimento

Perché misurare la massa del Top

Come misurare la massa del Top

il rivelatore CDF

b-tagging

metodi di analisi dati

Lepton+Jet – Template Method

Dilepton – Matrix Element

All Hadronic

Risultati recenti e combinazione

Sistematiche

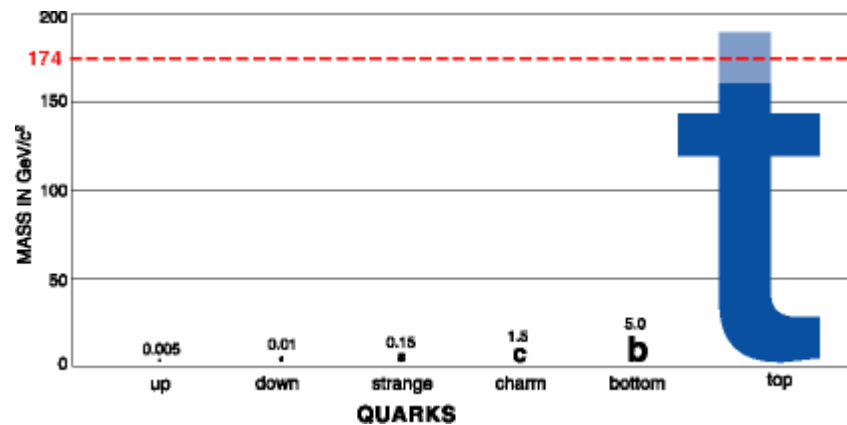
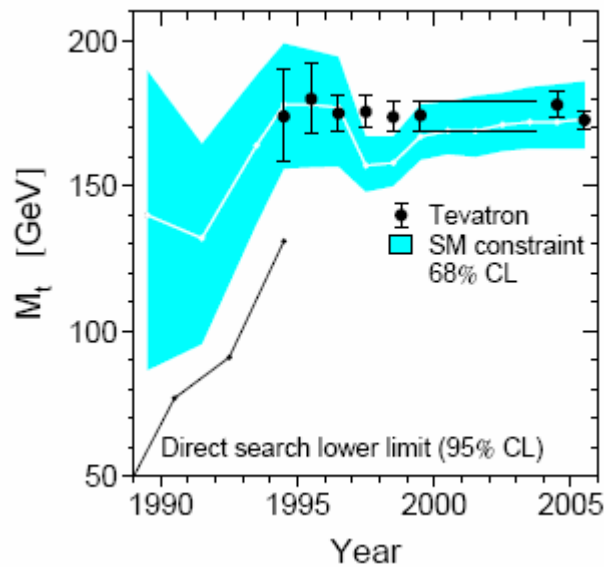
Il futuro

# Il quark Top

Anticipato da LEP (correzioni radiative)

Scoperto da CDF nel 1994

Prima misurazione della massa:  $174 \pm 16 \text{ GeV}/c^2$



# Canali di decadimento

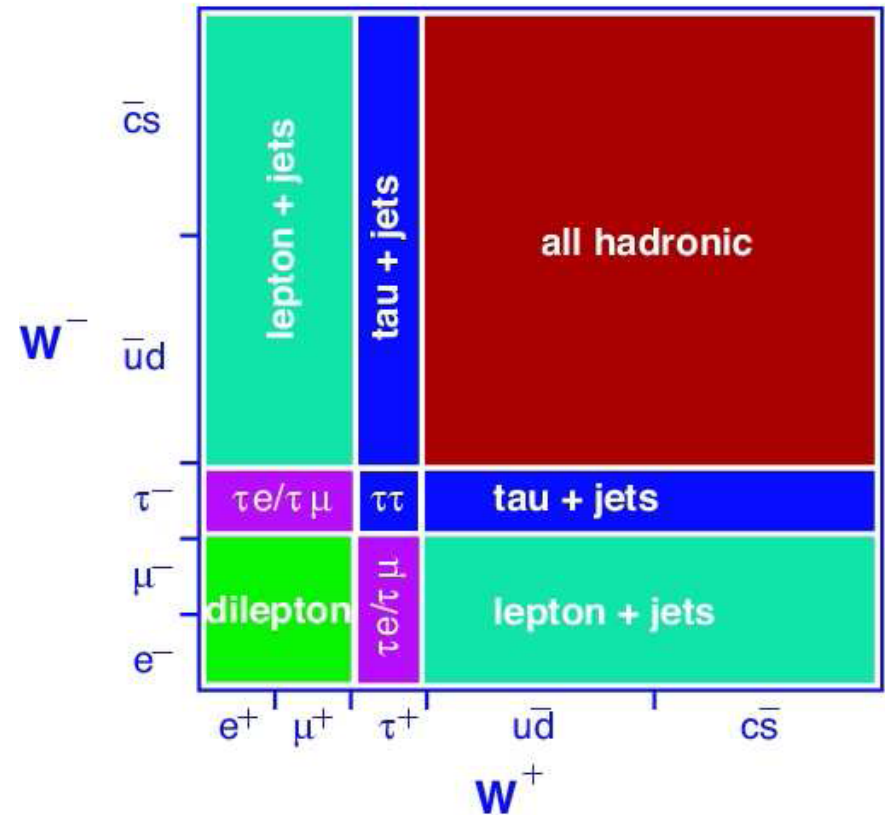
Il Top decade  
prima di adronizzare:

$$\tau_{\text{top}} = 10^{-25} \text{ s}$$

Decade debole verso il **b**  
( $V_{tb}$  CKM= 99,9%)

$$\text{Br}(t \rightarrow Wb) \sim 100\%$$

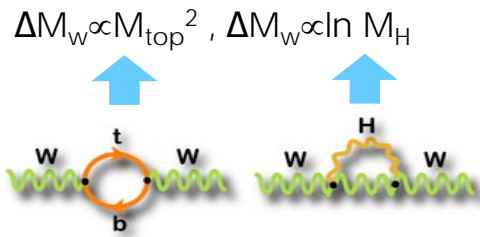
$t\bar{t}$  decay modes



# Perché misurare $M_{\text{top}}$

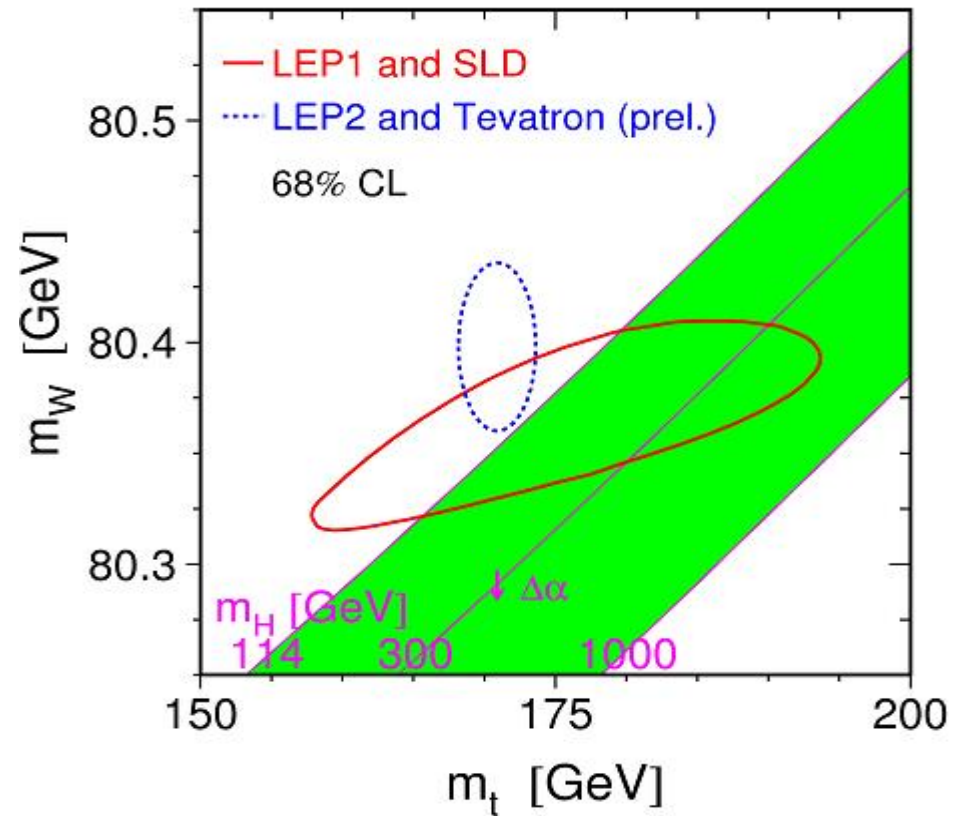
## SM:

- $M_{\text{top}}$  parametro libero
- Correzioni radiative one-loop sensibili a  $M_{\text{top}}^2$
- Legame con la massa dell'Higgs

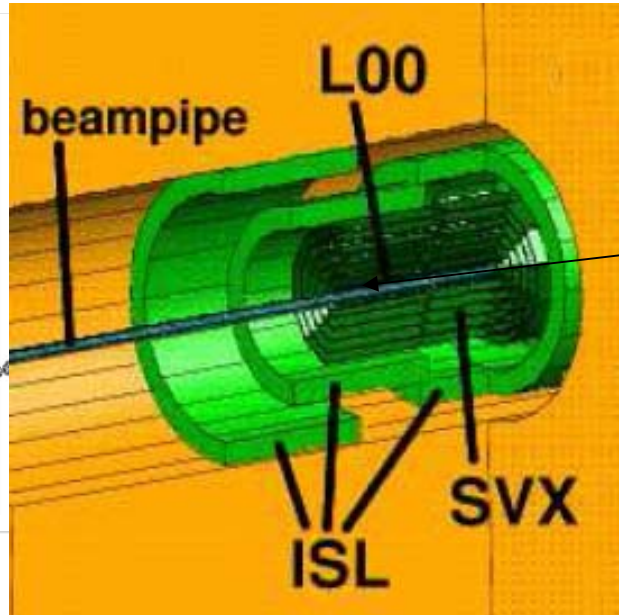


## BSM:

- Supersimmetria?
- Possibile presenza di nuova fisica se discrepanze di misure tra canali o tra teoria/esperimento



# Il rivelatore CDF



Detector al silicio:  
Rivelatori concentrici  
L00 – SVXII - ISL

(stand-alone tracking)

risoluzione complessiva  
sul parametro d'impatto:  
ca 35  $\mu\text{m}$

L00: Layer 00

- posizionato al di fuori del tubo del fascio
- risoluzione sul parametro d'impatto: 17  $\mu\text{m}$

SVXII: Silicon Vertex Detector

- rivelatore di microvertice
- risoluzione sul parametro d'impatto: 28  $\mu\text{m}$

ISL: Intermediate Silicon Layer

- tre strati di silicio a diverse distanze dal fascio

# b-tagging

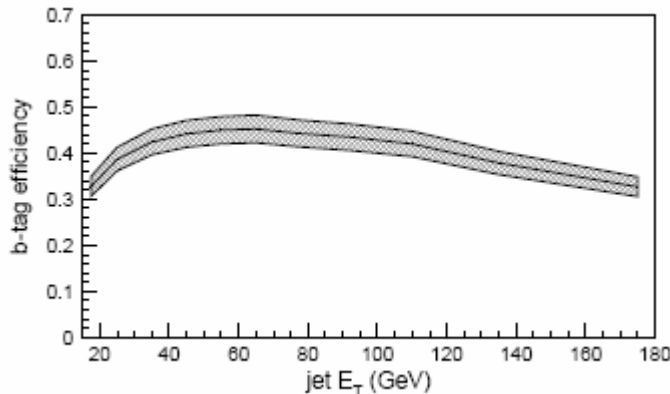
b-jet:

$\tau$  lunga per i mesoni B ( $\sim ps$ )



SECVTX - lifetime tagger:  
identificazione cercando nel jet i  
vertici secondari spostati  
rispetto al vertice primario

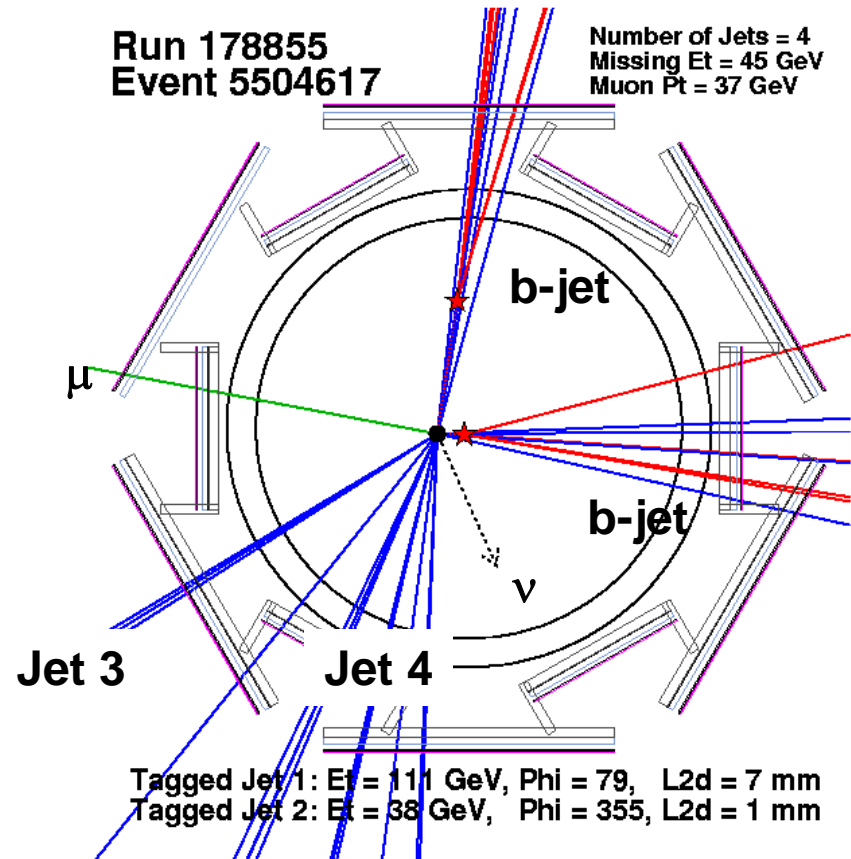
Importanza della risoluzione sul  
parametro d'impatto!



lepton + jet:

Run 178855  
Event 5504617

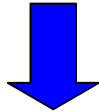
Number of Jets = 4  
Missing  $E_T$  = 45 GeV  
Muon Pt = 37 GeV



# Metodi di misura della massa

## Template Method

confronto di dati e simulazione per osservabile legata a  $M_{\text{top}}$



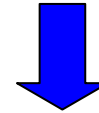
estrazione di  $M_{\text{top}}$   
(JES)

**vantaggio:**

la simulazione (GEANT) considera le peculiarità del detector

## Matrix Element

ricostruzione di ciascun evento  
(inserimento di input teorico)



derivazione dei parametri "dinamici"  
per il processo  $t\bar{t} \rightarrow WbWb$   
(massa, segnale/rumore, JES)

**vantaggio:**

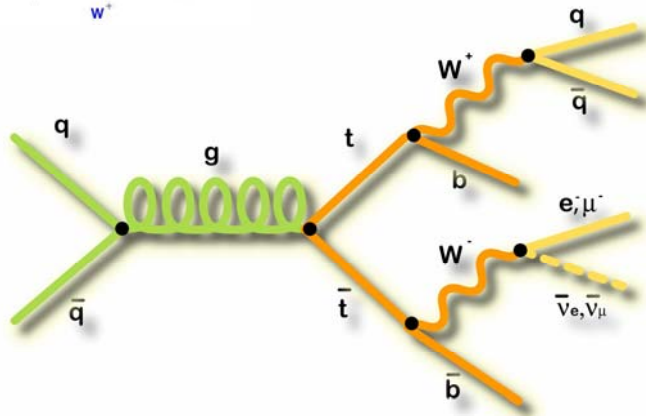
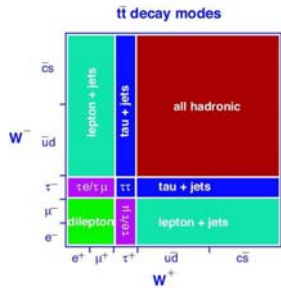
utilizzo del singolo evento (detector a  $4\pi$ )

**svantaggio:**

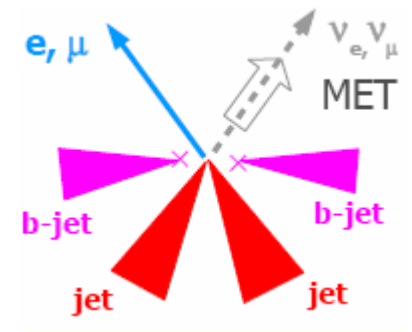
integrazione e modellizzazione complessa



# Lepton + Jet Template Method



**"Golden Channel" (30%)**



Cosa ci si aspetta:  
 Leptone ad alto  $p_T$   
 MET  
 2 b-jets  
 2 jets

vincolo su JES  
 attraverso  $m_{jj}$   
 (presenza di W)  
 ↓  
 errore sistematico  
 trasformato  
 in statistico

Combinatoria (jet-quark)  
 ↓  
 Campioni di dati differenti a  
 seconda del numero di b-tags  
 (differenze nel fondo,  
 numero di eventi nel campione finale)

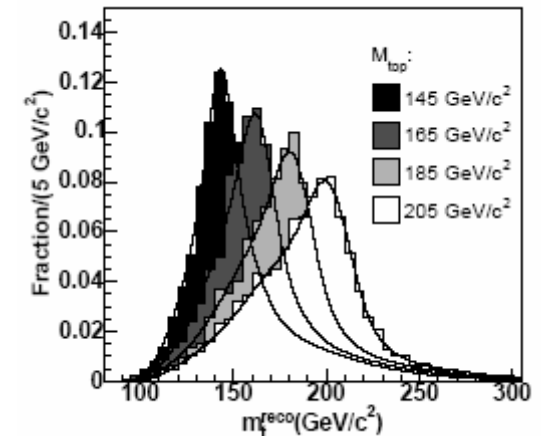
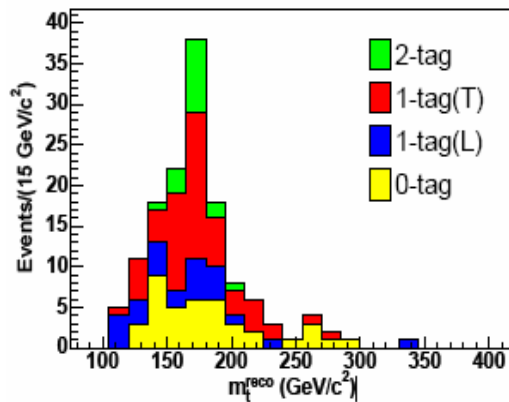
# Template Method

distribuzione della  
massa ricostruita  
 $m_t^{\text{reco}}$  proveniente  
dai dati

## Confronto

distribuzioni di  $m_t^{\text{reco}}$   
da eventi simulati  
(templates)

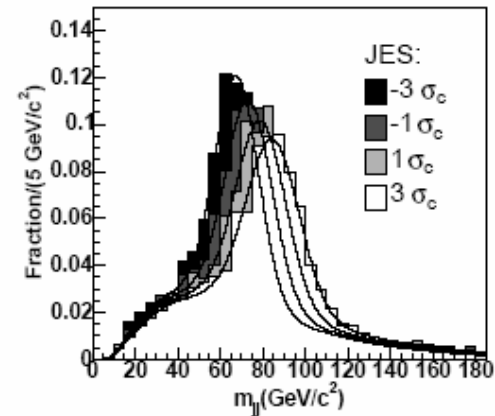
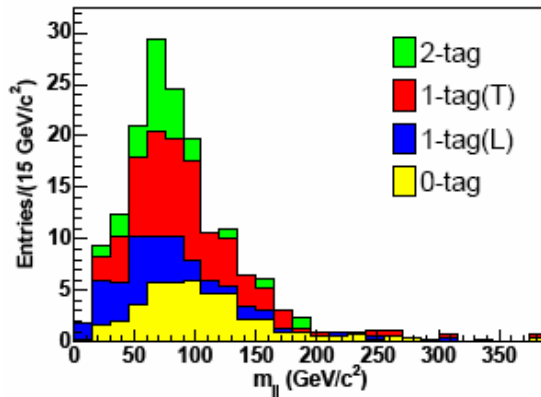
- generatori con ipotesi  $M_{\text{top}}$
- simulato anche il fondo



1. estrarre  $m_t^{\text{reco}}$  con un fit cinematico (input: quantità misurate)
2. fit di likelihood: il template che massimizza la verosimiglianza fornisce  $M_{\text{top}}$

# Calibrazione "in situ"

Allo stesso tempo viene estratta anche  $m_{jj}$   
(massa combinata dei due jet provenienti dal W)



Distribuzione con vincolo ( $M_W$ )  
utilizzata per la calibrazione indipendente della JES

utilizzo della variabile  $\Delta_{\text{JES}}$

Shift nella JES rispetto alla calibrazione standard (talk di Valerio) in termini di  $\sigma$

# Fit cinematico

$$\chi^2 = \sum_{i=\ell, 4jets} \frac{(p_T^{i,fit} - p_T^{i,meas})^2}{\sigma_i^2} + \sum_{j=x,y} \frac{(p_j^{UE,fit} - p_j^{UE,meas})^2}{\sigma_{UE}^2} + \frac{(M_{\ell\nu} - M_W)^2}{\Gamma_W^2} + \frac{(M_{jj} - M_W)^2}{\Gamma_W^2} + \frac{(M_{b\ell\nu} - m_t^{reco})^2}{\Gamma_t^2} + \frac{(M_{bjj} - m_t^{reco})^2}{\Gamma_t^2}$$

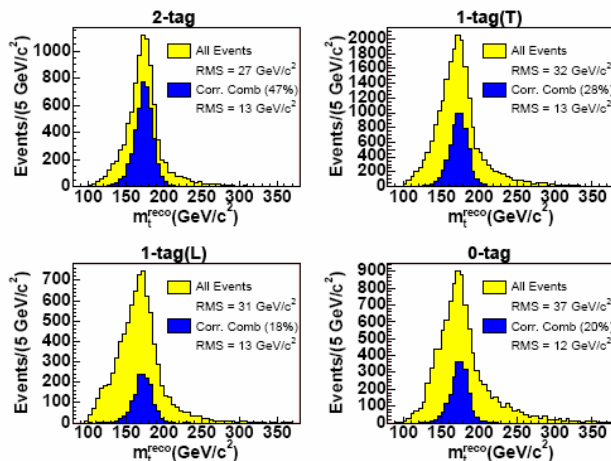
→ fit a  $p_T$  leptone/jet

→ fit a unclustered energy (legata a MET)

→ vincolo su massa invariante dei prodotti di W

→ vincolo  $m_t = m_t$  (ricostruite)

chi quadro per evento e per combinazione jet-quark –  $\chi^2 < 9$  && minimo →  $m_t^{reco}$  in istogramma:



Distribuzione di  $m_t^{reco}$  (MC)

○ : combinazioni jet-quark corrette

○ : anche combinazioni scorrette

↓

Importanza b-tagging

# Fit di likelihood

$$\mathcal{L}_{\text{sample}} = \mathcal{L}_{\text{shape}}^{m_t^{\text{reco}}} \times \mathcal{L}_{\text{shape}}^{m_{jj}} \times \mathcal{L}_{\text{nev}} \times \mathcal{L}_{\text{bg}}$$

Funzione di  $m^{\text{reco}}$ ,  $M_{\text{top}}$ ,  $\Delta_{\text{JES}}$

Funzione di  $n^{\text{signal/background}}$

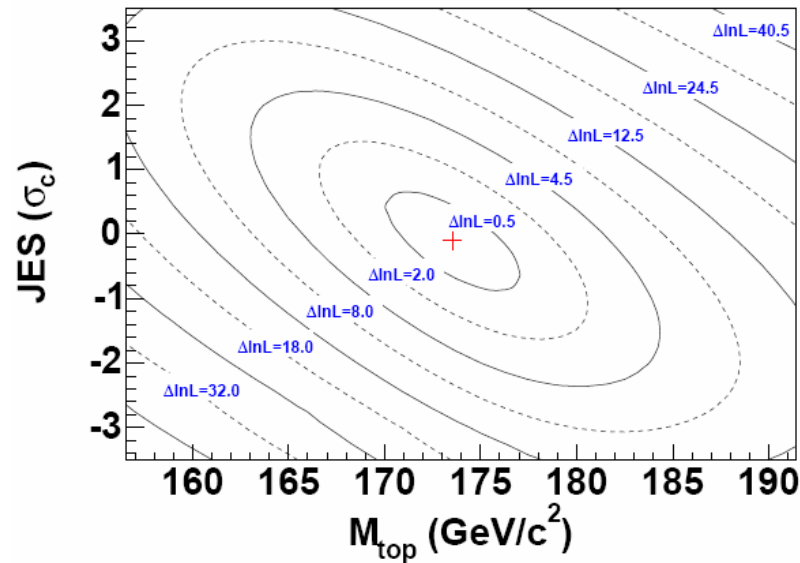
$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{2\text{-tag}} \times \mathcal{L}_{1\text{-tag(T)}} \times \mathcal{L}_{1\text{-tag(L)}} \times \mathcal{L}_{0\text{-tag}} \times \mathcal{L}_{\text{JES}}$$

Solo per questa misura  
(aggiunge statistica):  
vincolo a tener conto della  
calibrazione JES standard

Method	$M_{\text{top}}$ fit result [GeV/ $c^2$ ]	JES fit result [ $\sigma_c$ ]
Default	$173.5^{+3.7}_{-3.6}$ (stat. + JES)	$-0.10^{+0.78}_{-0.80}$
No JES constr.	$174.0 \pm 4.5$ (stat. + JES)	$-0.25 \pm 1.22$
$M_{\text{top}}$ -only	$173.2^{+2.9}_{-2.8}$ (stat.) $\oplus$ 3.1 (JES)	N/A
+ JPB	$173.0^{+2.9}_{-2.8}$ (stat.) $\oplus$ 3.0 (JES)	N/A

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{\text{JES}} &= \exp\left(-\frac{(\text{JES} - \text{JES}^0)^2}{2\sigma_{\text{JES}}^2}\right) \\ &= \exp\left(-\frac{\text{JES}^2}{2}\right) \end{aligned}$$

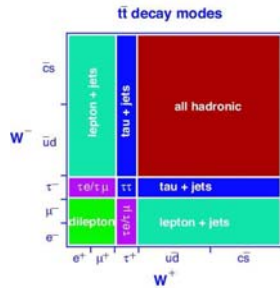
# Risultati



$$L_{\text{int}} = 318 \text{ pb}^{-1}$$

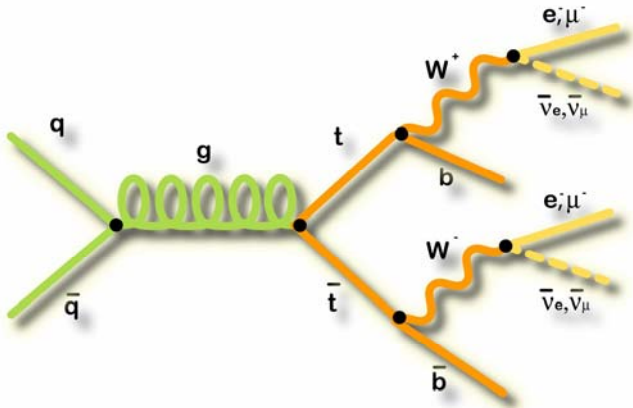
$$173.5^{+3.7}_{-3.6} \text{ (stat. + JES)} \pm 1.3 \text{ (other syst.) GeV}/c^2$$

$$= 173.5^{+3.9}_{-3.8} \text{ GeV}/c^2$$



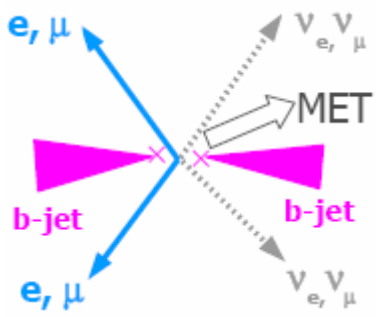
# Dilepton

# Matrix Element



Bassa BR per il  $W \rightarrow l\nu$  (5%)

- Poco fondo
- Legato solo a b-JES (v. slide 23 – problematiche differenti per jet pesanti/leggeri)
- Due neutrini



Cosa ci si aspetta:  
 2 leptoni ad alto  $p_T$   
 MET (underconstrained)  
 2 b-jet

**Bg:**  $Z/\gamma^* + 2\text{jets}$ ,  
 $WW + 2\text{ jets}$ ,  $W + 3\text{jets}$  (fake leptons)

# Matrix Element

elemento di  
matrice con  
quantità misurate

## Convoluzione

funzioni di trasferimento  
(risoluzione del  
detector)

Integrazione su quantità non misurate



Likelihood per il singolo evento (segnale/bg)

1. Calcolo della likelihood in funzione di  $m_{\text{top}}$  per il singolo evento
2. Somma pesata delle probabilità di segnale e background
3. Fit di likelihood: massimizzazione del prodotto delle verosimiglianze dei singoli eventi



# Matrix Element

$$1. P_s(\mathbf{x}|M_t) = \frac{1}{\sigma(M_t)} \frac{d\sigma(M_t)}{d\mathbf{x}}$$

↓  
 quantità misurate  
 (impulso leptone, angoli jet...)

ipotesi:  $p_{T, sistema} = 0$

da calcolare attraverso:

LO Matrix Element

- impulsi leptoni, **b quarks**
- impulsi neutrini

Quantità misurate (assunzione:  
 misurate con precisione)

- impulsi misurati leptoni/**jet**
- angoli misurati leptoni/jet

Quantità non misurate

- Impulsi, energie neutrini

← Funzioni di trasferimento

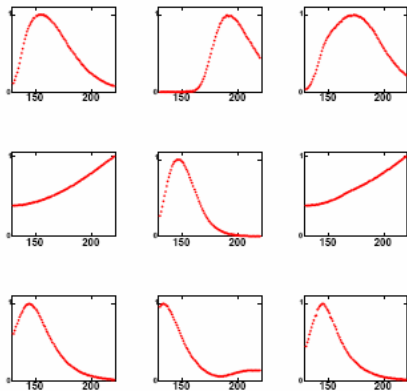
→ Integrazione

$$2. P(\mathbf{x}|M_t) = P_s(\mathbf{x}|M_t)p_s(M_t) + P_{bg_1}(\mathbf{x})p_{bg_1} + P_{bg_2}(\mathbf{x})p_{bg_2} + \dots$$

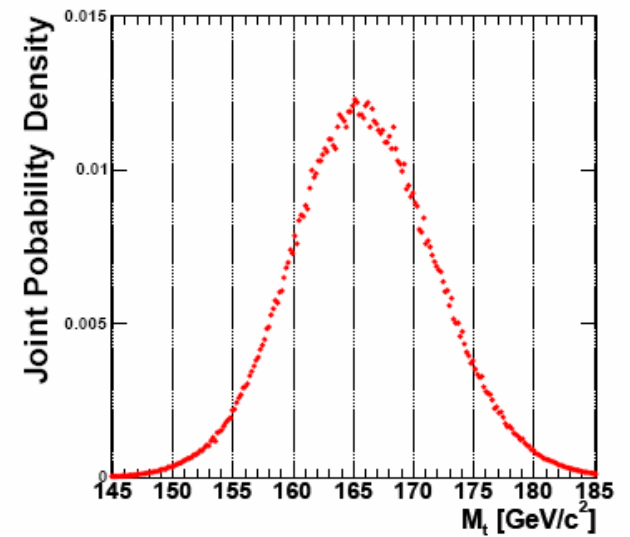
→ ogni evento è pesato dalle probabilità a priori (da MC) di segnale e fondo

3. Moltiplicare le  $P(\mathbf{x}|M_t)$  dei singoli eventi e massimizzare

# Risultati

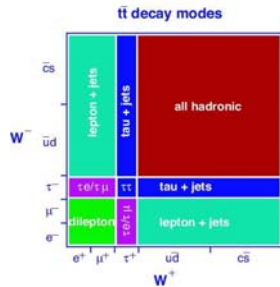


...

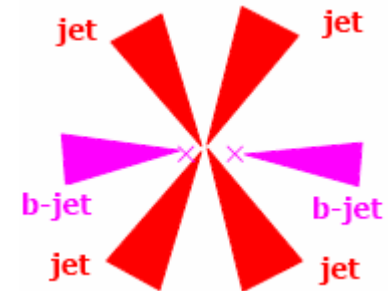
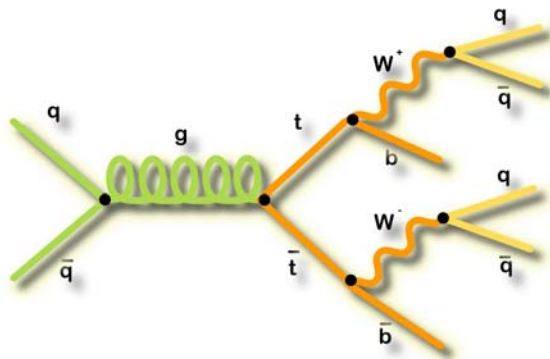


$$L_{\text{int}} = 340 \text{ pb}^{-1}$$

$$M_t = 165.2 \pm 6.1(\text{stat.}) \pm 3.4(\text{syst.}) \text{ GeV}/c^2$$



# All Hadronic



Alta BR per il  $W \rightarrow jj$  (45%)

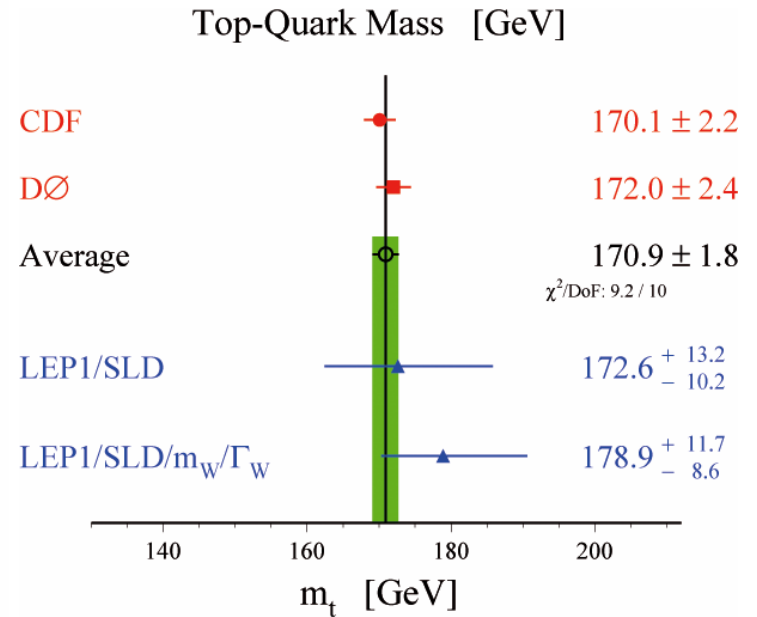
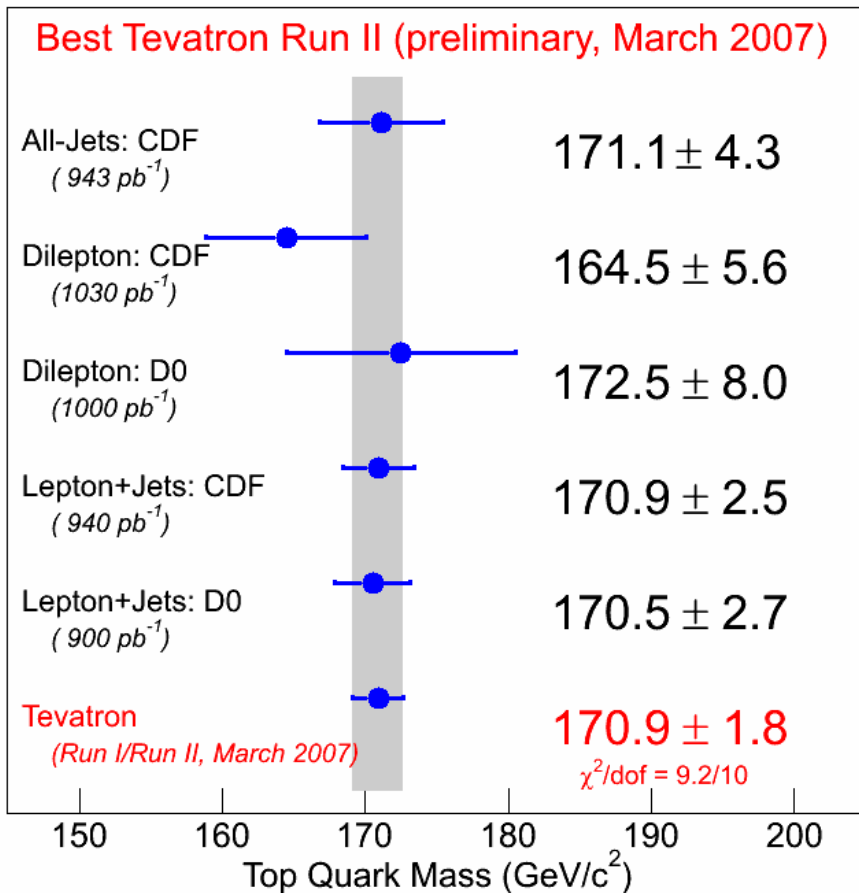
Molto fondo (QCD)  
 Canale legato a JES  
 Possibilità di vincolo su JES  
 attraverso  $m_{jj}$

Cosa ci si aspetta:  
 6 jet, di cui 2 b-jet

# Risultati recenti (GeV/c<sup>2</sup>)

Lepton + Jet $L_{\text{int}} = 940 \text{ pb}^{-1}$	170,9	2,2 (stat+JES)	1,4 (syst)	<ul style="list-style-type: none"><li>• Matrix Element</li><li>• Eliminato vincolo <math>L_{\text{JES}}</math></li></ul>
Dilepton $L_{\text{int}} = 1,0 \text{ fb}^{-1}$	164,5	3,9 (stat)	3,9 (syst)	<ul style="list-style-type: none"><li>• Matrix Element</li><li>• Migliorato modeling ISR/FSR</li><li>• Rimossa ip. <math>p_{\text{T},\text{sys}}=0</math></li></ul>
All Hadronic $L_{\text{int}} = 940 \text{ pb}^{-1}$	171	3,7 (stat+JES)	2,1 (syst)	<ul style="list-style-type: none"><li>• Combinazione ME + Template</li></ul>

# Combinazione dei risultati



# Le sistematiche

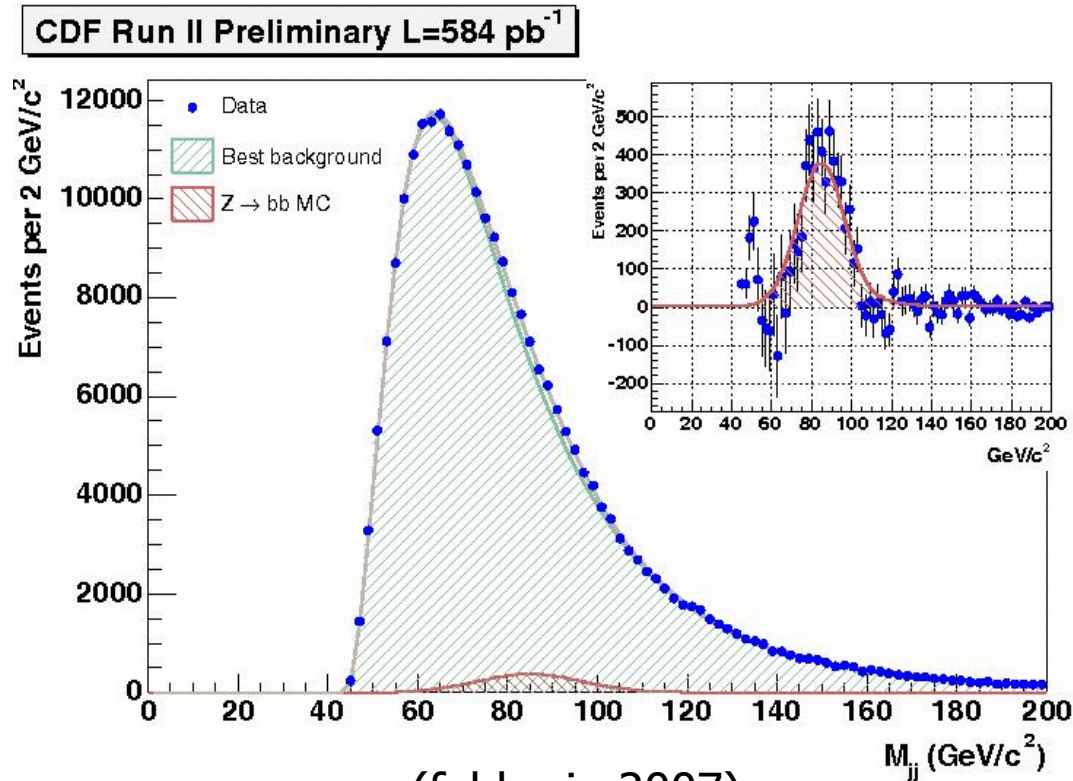
## lepton+jets

Source	$\Delta M_t$ [GeV/ $c^2$ ]
JES residual	0.42
Initial state radiation	0.72
Final state radiation	0.76
Generator	0.19
BG composition and modeling	0.21
Parton distribution functions	0.12
<i>b</i> -JES	0.60
<i>b</i> -tagging	0.31
Monte Carlo statistics	0.04
Lepton $p_t$	0.22
Multiple interactions	0.05
<b>Total</b>	<b>1.36</b>

## dilepton

Source	Size (GeV/ $c^2$ )
<b>Jet Energy Scale</b>	<b>3.5</b>
Multiple Interactions	0.2
Lepton Energy Scale	0.1
Generator	0.9
Method	0.6
Sample composition uncertainty	0.7
Background MC	0.7
Background modeling	0.2
FSR modeling	0.3
ISR modeling	0.3
PDFs	0.8
Total	3.9

# Come ridurre le sistematiche: $Z \rightarrow bb$

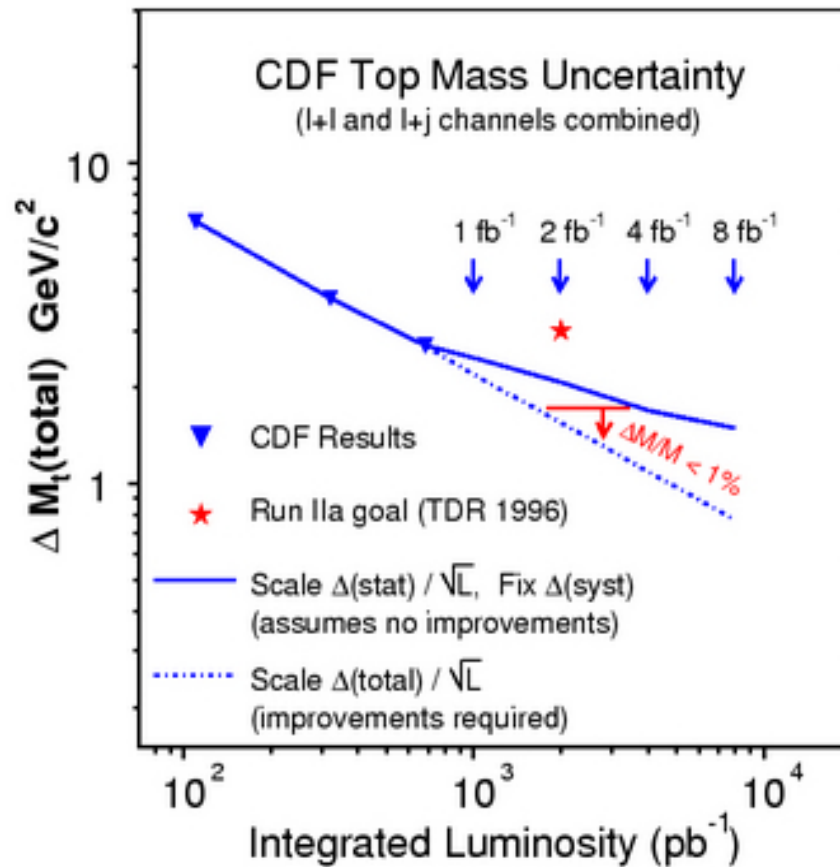


(febbraio 2007)

Massa dello Z ottenuta con precisione a LEP  $\rightarrow$  vincolo su massa dijet

# Il futuro

Proiezione temporale dell'incertezza su  $M_{\text{top}}$



LHC



Grazie dell'attenzione!



# Credits

Pagina web top a CDF: <http://www-cdf.fnal.gov/physics/new/top/top.html>

Articoli principali:

*Top Quark Mass Measurement Using the Template Method in the Lepton + Jets Channel at CDF II* (CDF Collaboration)

*Top Quark Mass Measurement from Dilepton Events at CDF II with the Matrix-Element Method* (CDF Collaboration)

Altri articoli:

*(1) Evidence for top quark production in  $p\bar{p}$  collisions at  $\sqrt{s}=1,8$  TeV* (CDF Collaboration)

*Dynamical Likelihood Method and Top Quark Mass Measurement at CDF* (Kunitaka Kondo)

Immagini (da <http://www-cdf.fnal.gov/physics/alltran.html>) :

*Precision Determination of the Top Quark Mass* (Pedro Movilla Fernandez)

*Top Mass and Decay Properties* (Jeannine Wagner)

Altre immagini:

*Top Quark Production at Hadron Colliders* (Joao Guimaraes da Costa)



Backup slides

# Il quark top

up      charm      **top**



Which cork belongs to which quark? (Don Groom)

down      strange      bottom

---

Spin =  $1/2$

Color triplet

$\Gamma_t \approx 1.4 \text{ GeV}$  (decay as a free quark)

Charge =  $2/3e$

Yukawa coupling ( $m_t/v \approx 1$ )

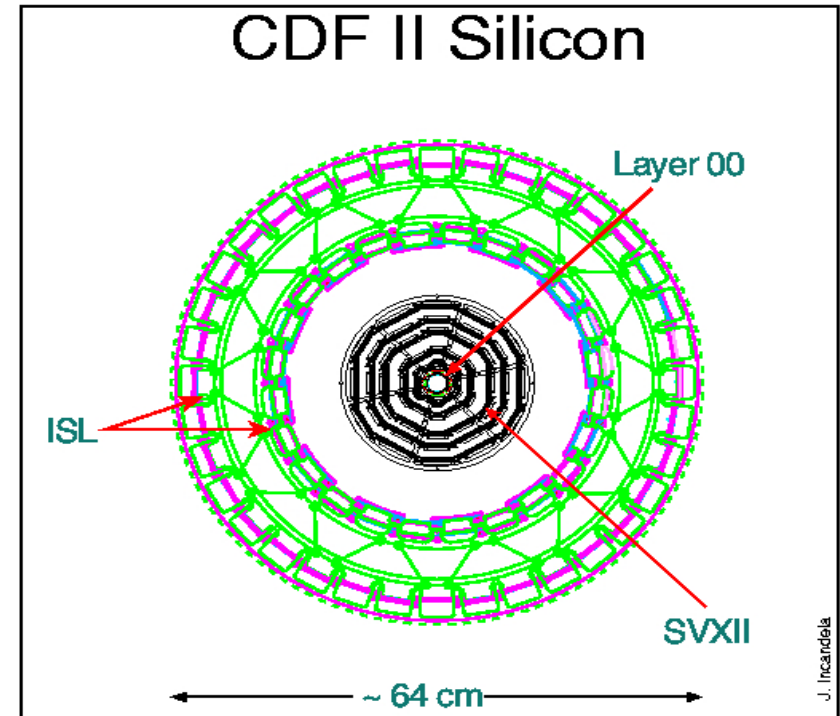
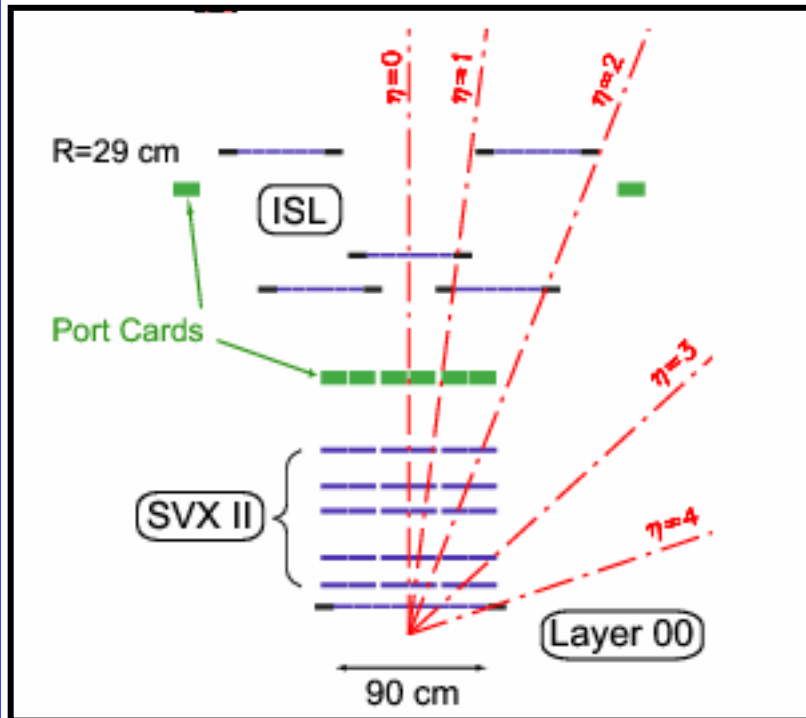
$V_{tb} = 0.99$

---

70% of W bosons from top decay longitudinally polarized

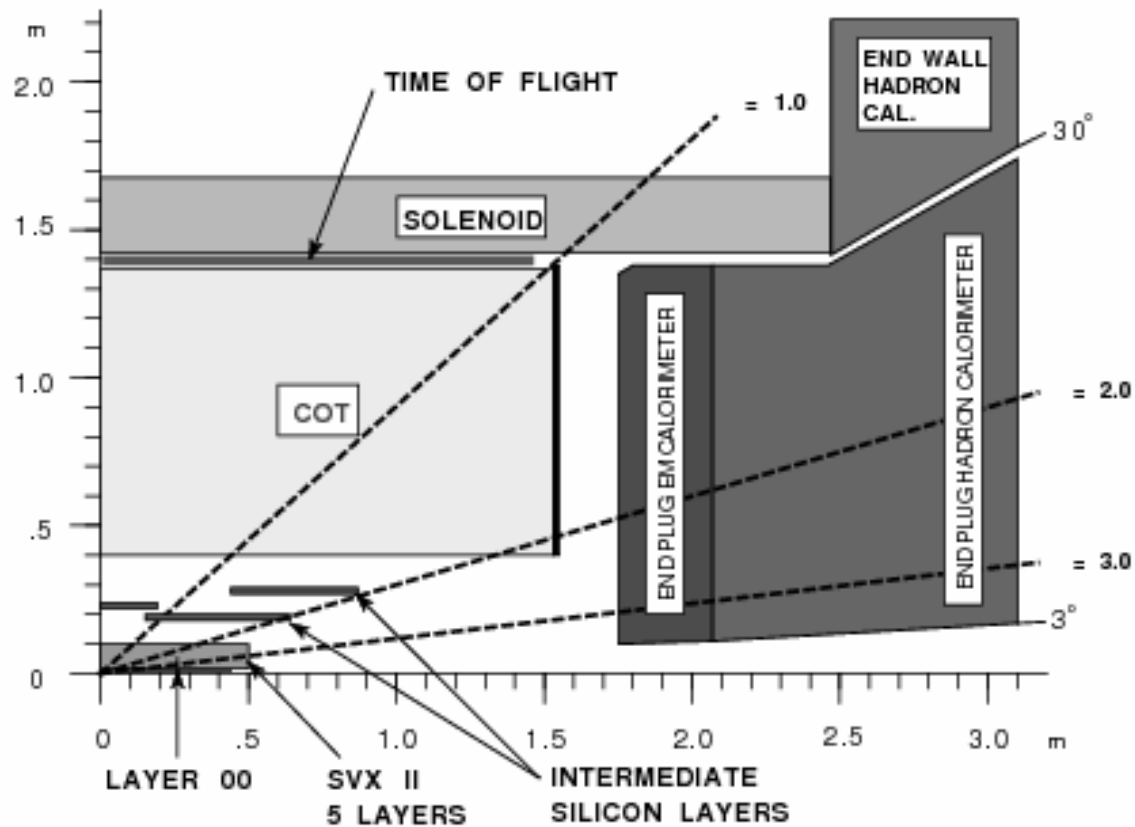
---

# Stand-alone tracking

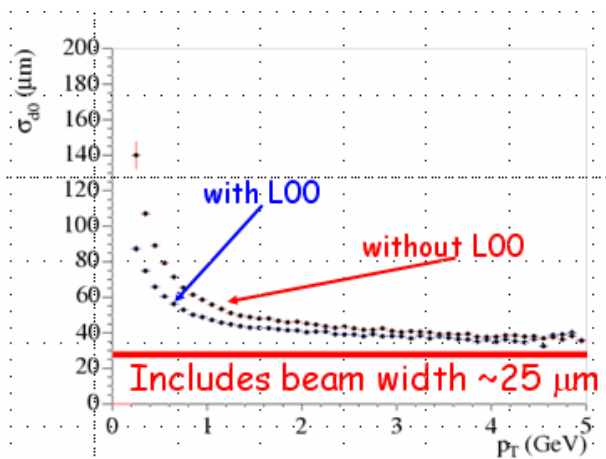
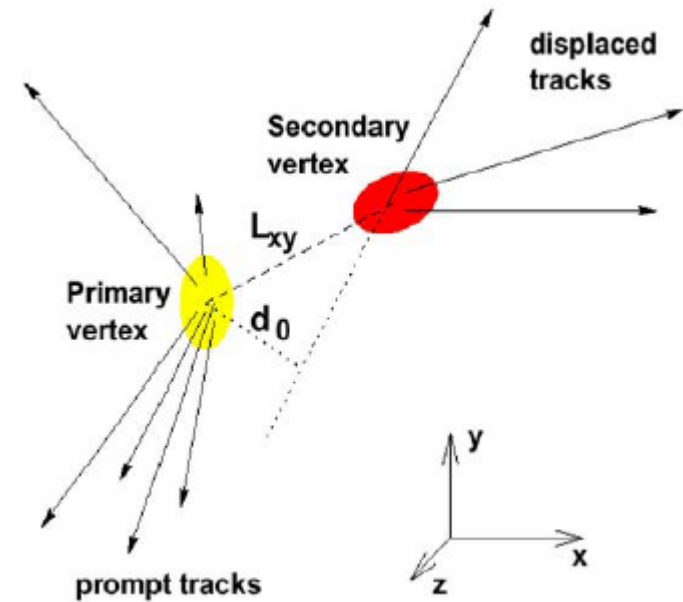
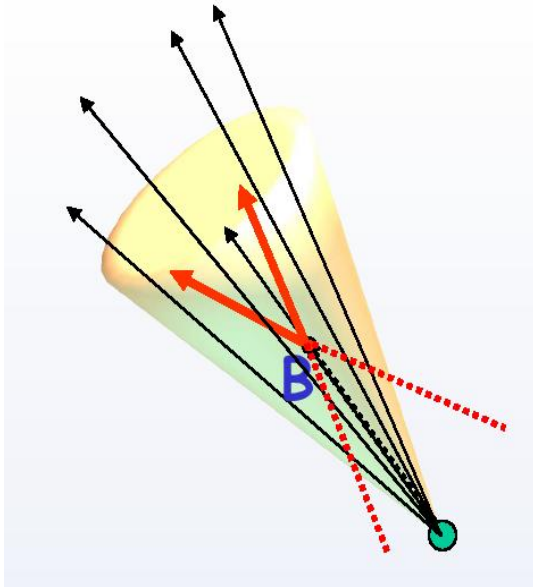


Fino a  $\eta < 2$  il sistema di tracciamento al silicio può considerarsi autosufficiente

# Tracking in dettaglio



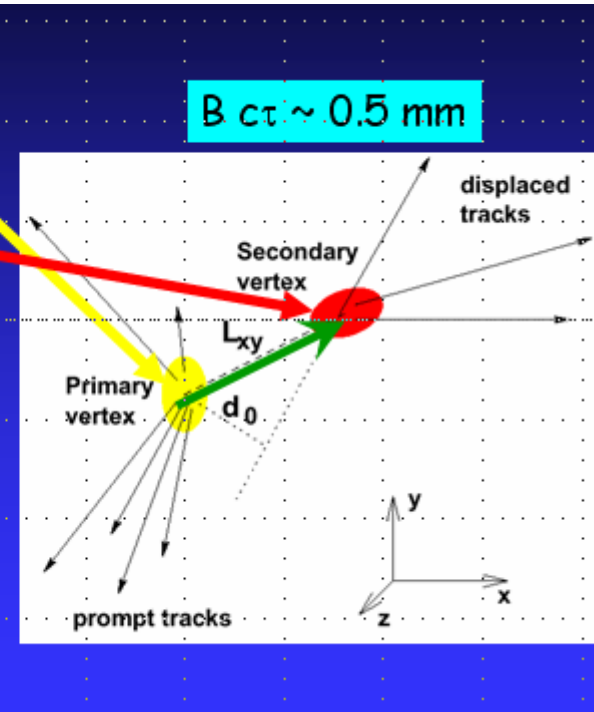
# B-tagging



The CDF secondary vertex detection algorithm, SECVTX, is designed to examine the tracks with large impact parameter ( $d_0$ ) within each jet and to attempt to vertex them to a common point.

# B-tagging

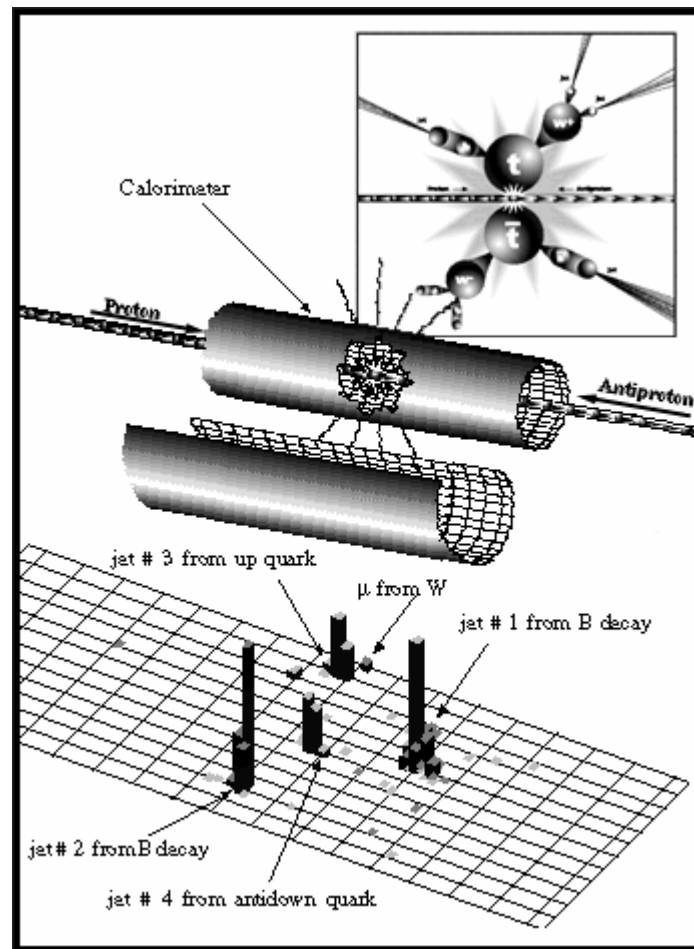
- Use  $b \cdot c\tau$  to discriminate b-jets
- Reconstruct **primary** and **secondary** vertices
- Calculate 2-d **decay length**



Talk di S. Rappoccio



# Calorimeter Towers



# Correzioni radiative: dettagli

$$M_W^2 \left( 1 - \frac{M_W^2}{M_Z^2} \right) = \frac{\pi \alpha_{\text{em}}(M_Z^2)}{\sqrt{2} G_F} \frac{1}{1 - \Delta r_w}$$

$$\Delta r^{(t)} = -\frac{G_F M_W^2}{8\sqrt{2}\pi^2} \left[ 3 \cot^2 \theta_w \frac{M_t^2}{M_W^2} + 2 \left( \cot^2 \theta_w - \frac{1}{3} \right) \ln \frac{M_t^2}{M_W^2} \right. \\ \left. + \frac{4}{3} \ln \cos^2 \theta_w + \cot^2 \theta_w - \frac{7}{9} \right],$$

$$\Delta r^{(H)} = \frac{11}{3} \frac{G_F M_W^2}{8\sqrt{2}\pi^2} \left( \ln \frac{M_H^2}{M_W^2} - \frac{5}{6} \right) \quad \text{for } M_H \gg M_W .$$