

# Misura della massa del quark Top

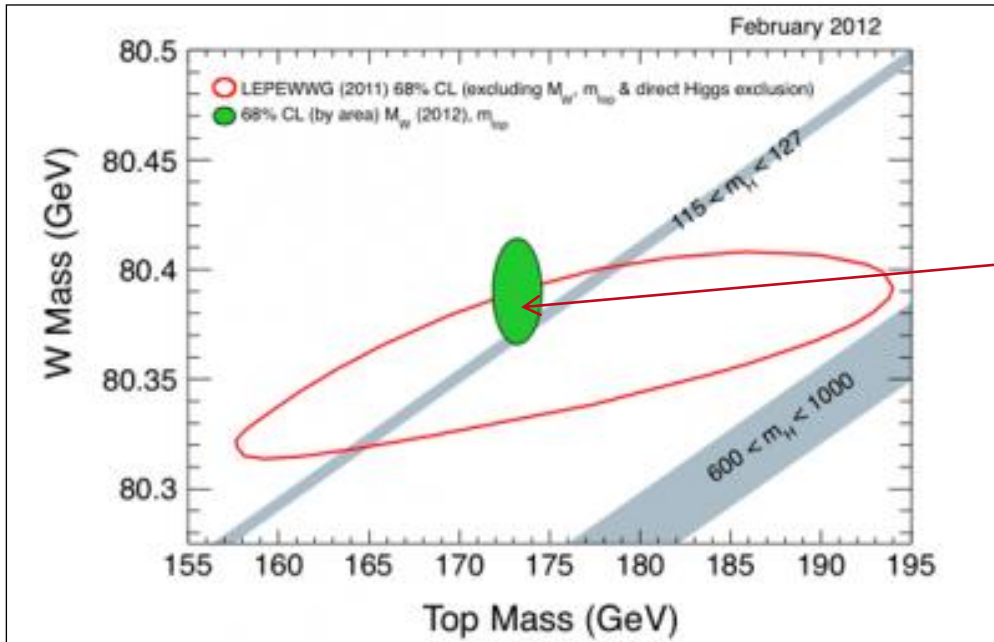
*Corso di Fisica Nucleare e Subnucleare II*  
*Prof. Dionisi*

Claudia Tambasco

Tutor: Marco Rescigno

Tutor: Fabrizio Margaroli

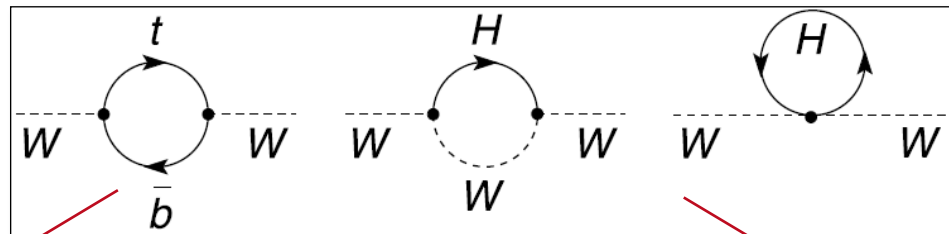
# La massa del Top



Nel **1994** CDF RUN I del Tevatron  
 $M_t = 174 \pm 13 \text{ GeV}/c^2$

→ Vincoli sulla massa dell'Higgs

La massa del bosone di Higgs è strettamente connessa alla massa  $M_W$  e  $M_t$  attraverso le correzioni radiative (one-loop):



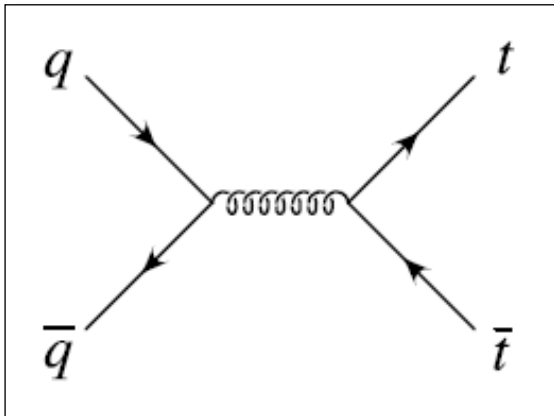
$$\Delta M_W \propto M_t^2$$

$$\Delta M_W \propto \ln(M_H)$$

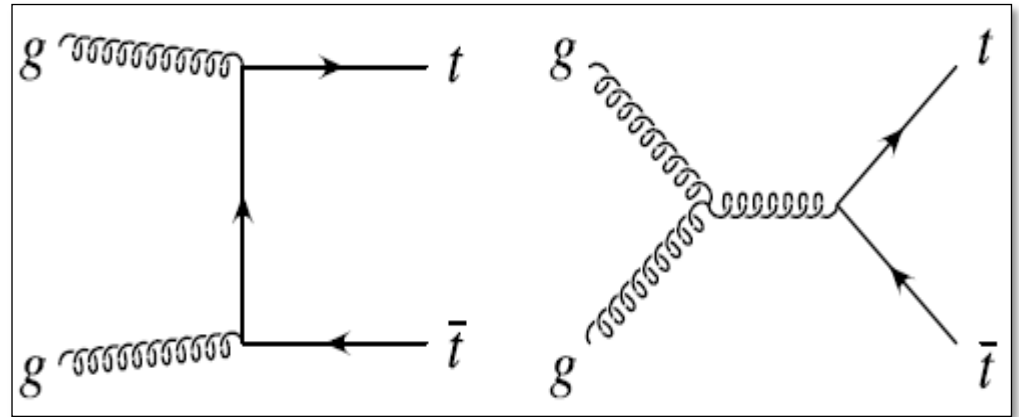
# Produzione del quark Top

- In collider adronici produzione t-tbar (Tevatron, LHC...)

## Light quark annihilation



## Gluon Fusion



	Run I 1.8 TeV	Run II 1.96 TeV	LHC 7 TeV
q-qbar	90%	85%	10%
g-g	10%	15%	90%
$\sigma(\text{pb})$	5 pb	7 pb	160 pb

# Decadimento del Top quark (I)

$$\begin{bmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} |d\rangle \\ |s\rangle \\ |b\rangle \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |d'\rangle \\ |s'\rangle \\ |b'\rangle \end{bmatrix}$$

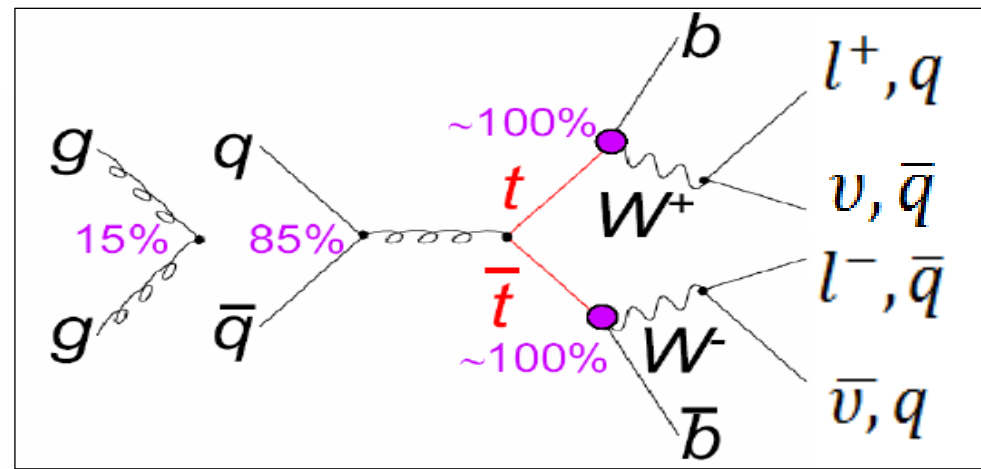
Il quark Top decade debole verso il b  
(Matrice *CKM flavour changin weak decays*)

99,9%

$$\tau_t \approx 4 \times 10^{-25} \text{ s}$$

**Vita media troppo breve  
NON ADRONIZZA!**

$$\text{BR}(t \rightarrow W^+ + b) \sim 100\%$$

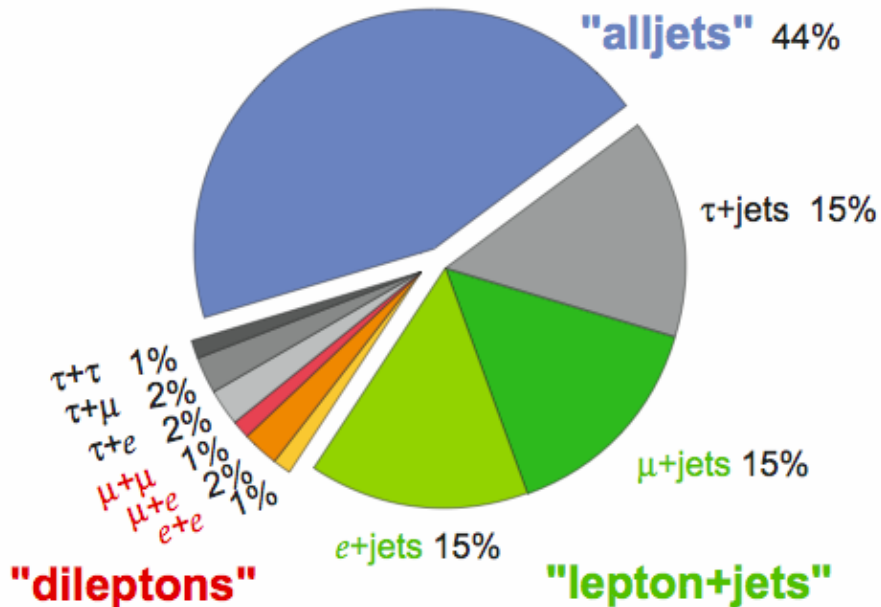


# Decadimenti del Top quark (II)

Dal decadimento del W si identifica il canale per la misura diretta della massa del quark top

- **Dilepton events:**  $W \rightarrow l + \nu$
- **All hadronic events:**  $W \rightarrow q\bar{q}$
- **Lepton+jets events:**  $W \rightarrow l + \nu$   
 $W \rightarrow q + \bar{q}$

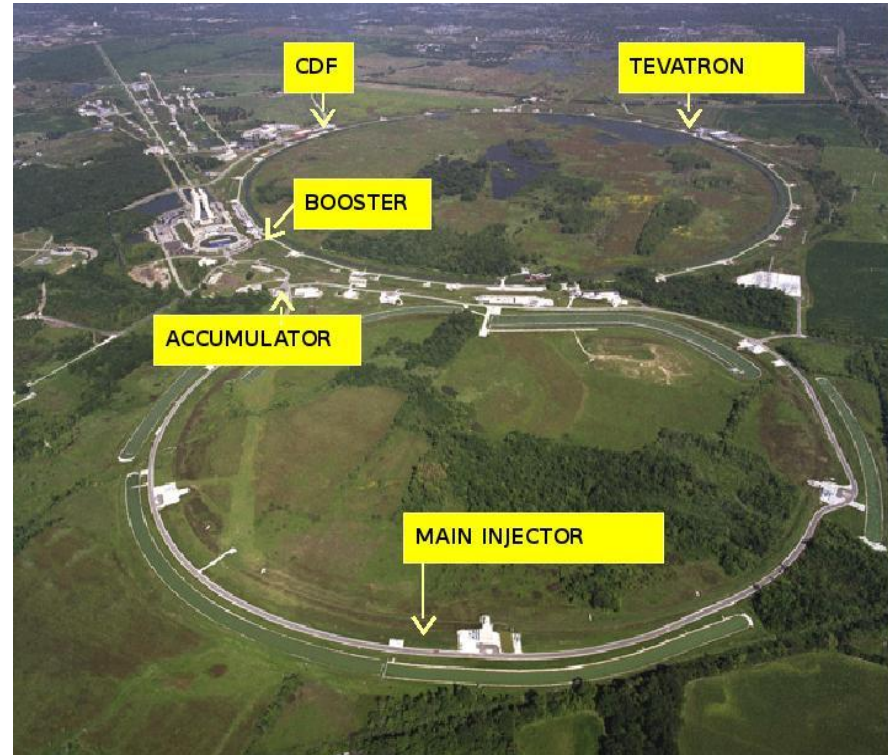
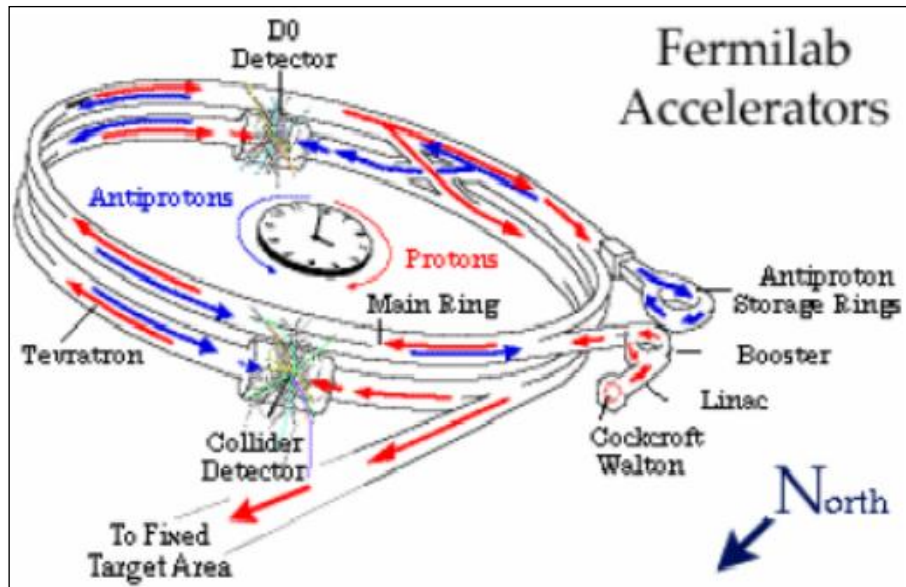
6 jets fondo QCD



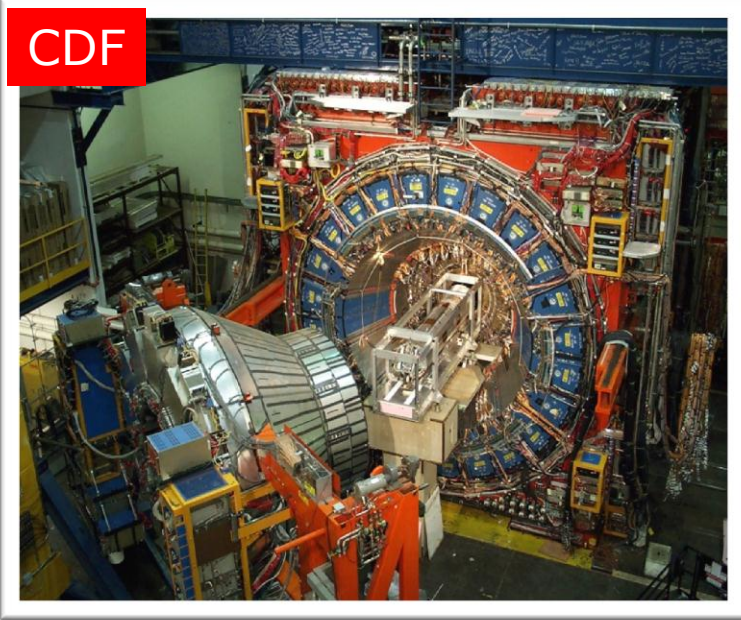
$c\bar{s}$	electron+jets	muon+jets	tau+jets	all-hadronic	
$u\bar{d}$					
$\tau^+$					
$e^-$	$e^+$	$\mu^+$	$\mu^-$	dileptons	
$W$ decay	$e^+$	$\mu^+$	$\tau^+$	$u\bar{d}$	$c\bar{s}$

# II Tevatron

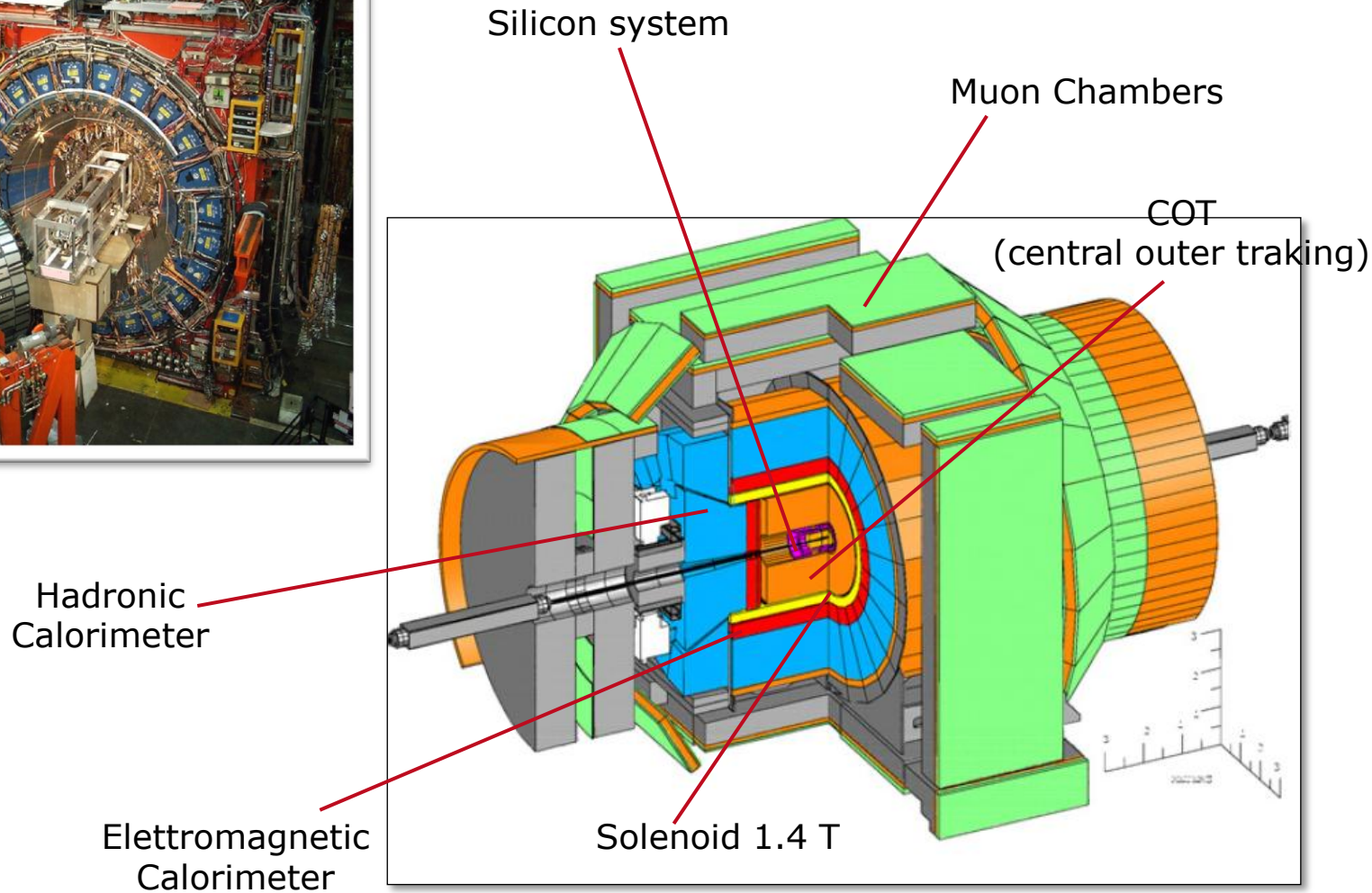
- Collisore  $p\bar{p}$  a Fermilab (Chicago)
- $\sqrt{s} = 1.96 \text{ TeV}$  Run II ( $1.8 \text{ TeV}$  Run I)
- 36x36 bunches separati da 396 ns
- Massima luminosità  $\sim 3 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$



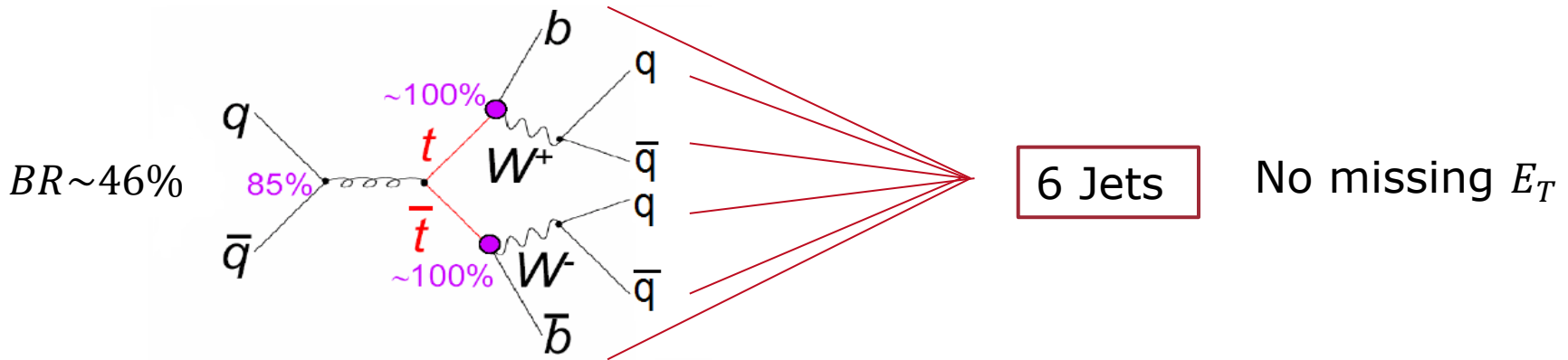
# Collider Detector at Fermilab



CDF



# Jets e il canale all-hadronic



- Dopo il trigger a multi jet dedicato il background di QCD è di tre ordini di grandezza superiore rispetto al segnale!

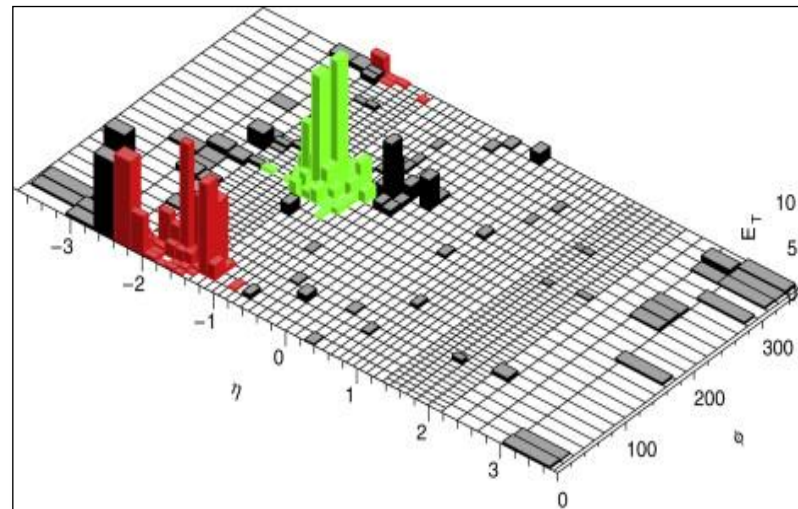
□ Un jet è un cono stretto di particelle prodotte dall'adronizzazione dei partoni che crea un deposito localizzato di energia nei calorimetri adronici

➔ Come si ricostruisce un jet?



# Ricostruzione jet: cone algorithm (JETCLU)

- ❑ Deposito  $E_T > 1\text{GeV}$  (**seed towers**)
- ❑ **Precluster**: le celle calorimetriche vengono raggruppate in coni di raggio  $\Delta R = \sqrt{\Delta\eta^2 + \Delta\phi^2} = 0.4$
- ❑ Per ogni precluster si trova il baricentro con media pesata in  $E_T$  e si disegna un nuovo cono
- ❑ **Cluster**: tutte le towers con  $E_T > 100\text{ MeV}$  all'interno del cono di raggio  $\Delta R < 0.4$
- ❑ Il procedimento viene iterato finchè la configurazione di cluster diventa stabile



$$E_T^{jet} = \sum_{i=0}^{N_{tow}} E_{Ti}$$

$$\phi^{jet} = \sum_{i=0}^{N_{tow}} \frac{E_{Ti}\phi_i}{E_T^{jet}}$$

$$\eta^{jet} = \sum_{i=0}^{N_{tow}} \frac{E_{Ti}\eta_i}{E_T^{jet}}$$

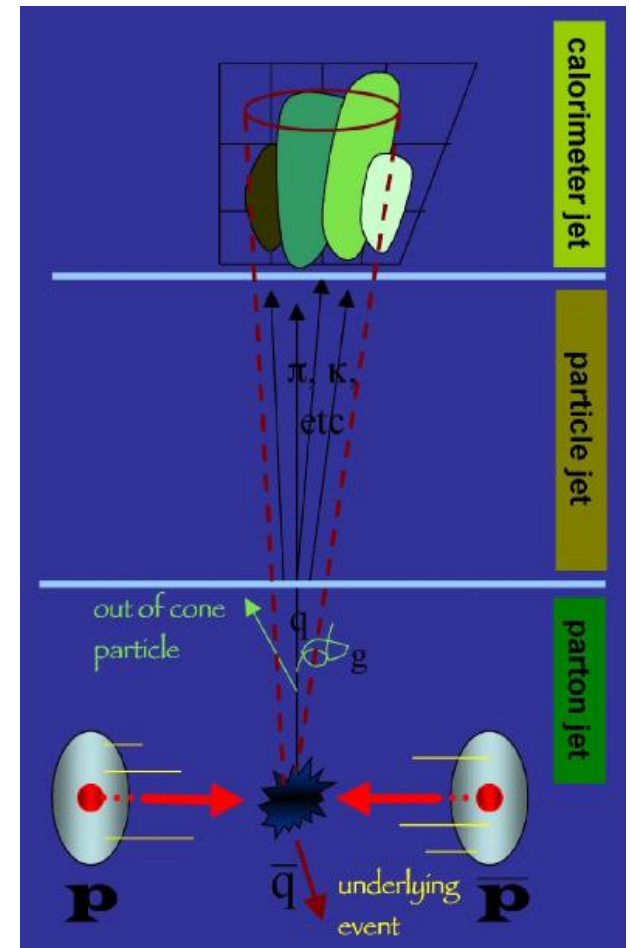
# Energia dei jet: correzioni

Per risalire all'energia del partone che ha prodotto il jet bisogna tenere conto di alcune correzioni per l'energia...

Gli errori sulla misura dell'energia dei jet sono, ad es. dovuti a:

- Non linearità della risposta del calorimetro
- Regioni non coperte dai rivelatori
- Energia del jet al di fuori dell'algoritmo di clustering
- Risposta del calorimetro per differenti particelle
- **Multiple Interaction**  
(più interazioni di tipo forte all'interno della stessa collisione)

Fenomeni non perturbativi fenomenologicamente descritti da eventi generati da simulazioni Monte Carlo



# Calibrazione: correzioni all'energia dei jet

Per ricostruire l'energia del partone che ha generato il jet si deve moltiplicare l'energia del jet ricostruito per un **fattore correttivo**:

$$E_T = C \times E_{T_{raw}}$$

**Absolute scale:** energia più probabile per particelle nel cono con  $\Delta R < 0.4$   
Correzione estratta dalle simulazioni MC

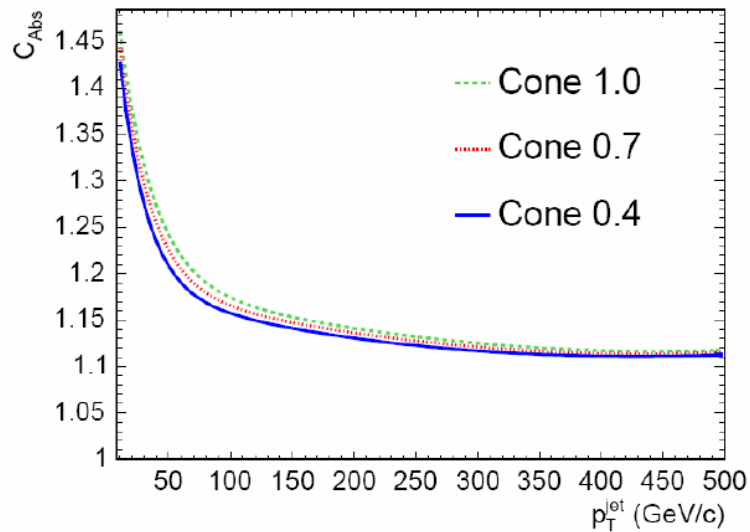
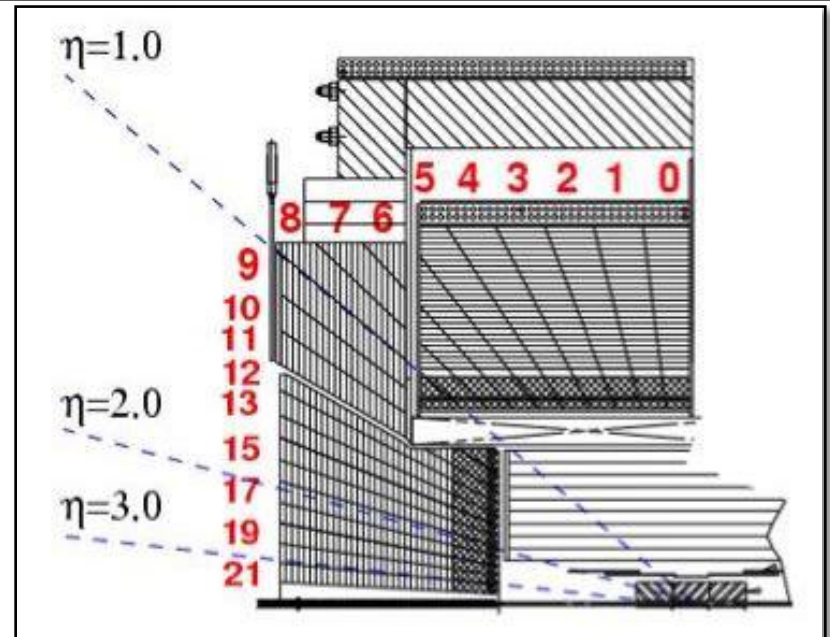


Figure 22: Absolute corrections for different cone sizes as a function of calorimeter jet  $p_T$ . The solid line shows the corrections for cone size 0.4, the dashed for 0.7 and the dotted for 1.0.

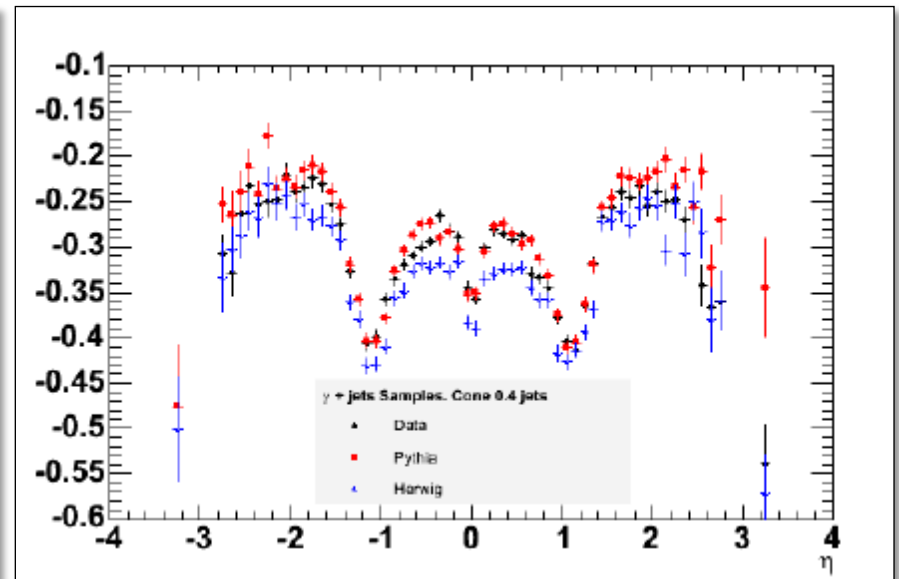
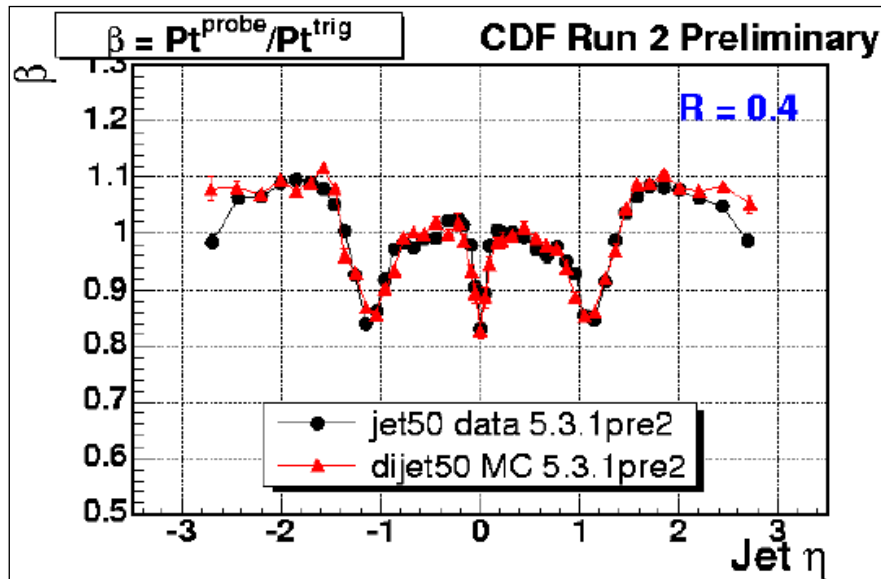
**Relative Scale:** correzione in funzione di  $p_T$  e pseudo-rapidity.  
Ottenuta dal confronto dati e PYTHIA



# Test per la relative scale

**Jet-Jet Balance:** per gli eventi a due getti in assenza di neutrino non c'è missing energy e la differenza  $P_{T1} - P_{T2}$  deve essere nulla (eventi back-to-back)

**Photon Jet-Balance:** la risoluzione del calorimetro e.m. è maggiore di quello adronico e dall'energia del  $\gamma$  si misura l'energia del jet (eventi back-to-back)



❑ Questi test vengono effettuati nella regione  $0.2 < |\eta| < 0.6$

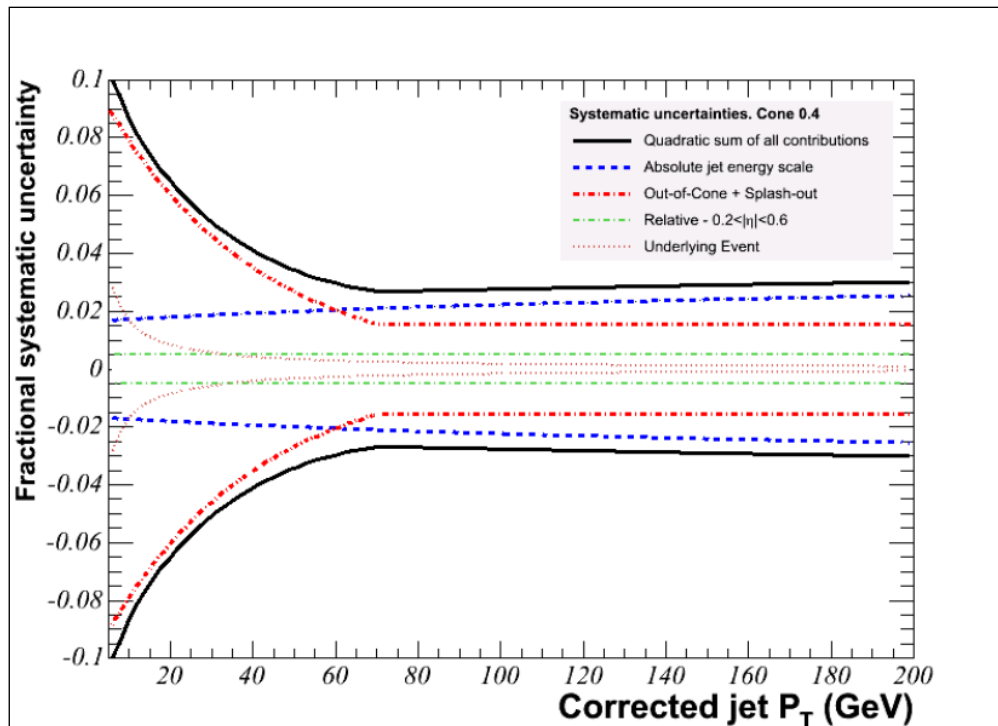
❑ Dopo aver apportato queste correzioni all'energia dei jet la risposta del calorimetro è quasi indipendente dalla *pseudorapidity*.

# Altre correzioni per la calibrazione

**Multiple Interaction correction:** si ottiene misurando l'energia contenuta nei coni  $\eta$ - $\phi$  random in eventi di minimum bias.

**Out of cone correction:** ottenuta dal confronto dei dati con simulazioni MC

Dalla somma di tutti i contributi si ottiene la **Sistematica Totale**



□ JES rappresenta l'incertezza sistematica per la conoscenza dell'energia dei jet (MC e dati)

Precisione JES  $\sigma_{JES} \sim 3\%$

➔ **calibrazione in situ per diminuire l'incertezza!**

$$JES = 1 + \Delta JES \cdot \sigma_{JES}$$

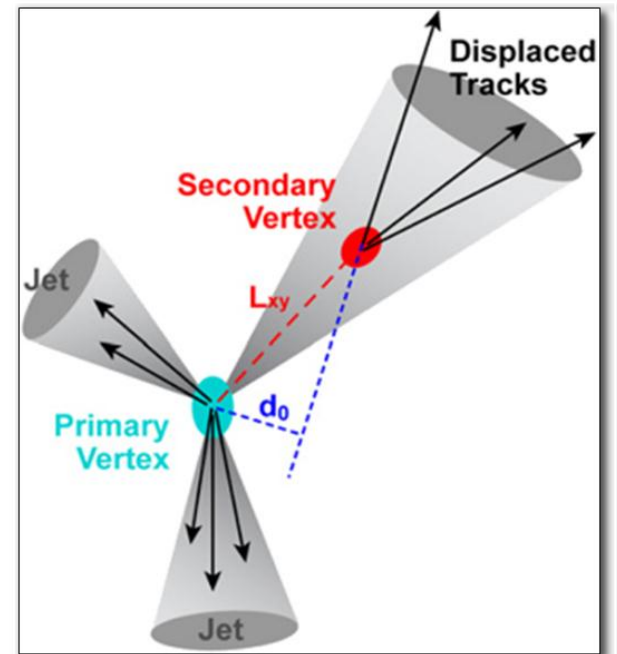
# Identificazione b-jets: Secondary Vertex b-tagging (lifetime tag)

- I Mesoni B hanno ( $c\tau \cong 450\mu m$ )  
 ➔ se  $p_T \approx 50 GeV$  1~4 mm
- S'individua il vertice secondario  
 ➔ **Rivelatore di vertice al Silicio**

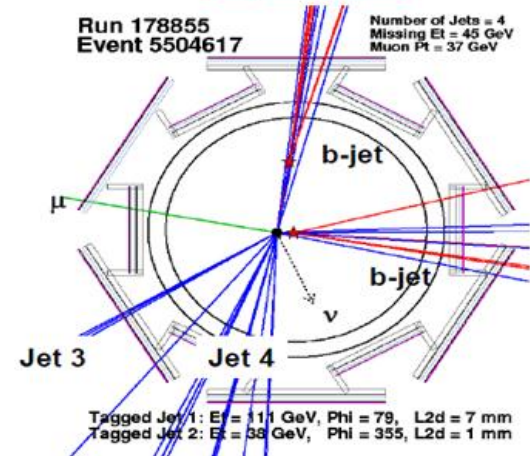
$$\varepsilon_{tag} (SVX) \sim 48\%$$

Misurando  $d_0$  indentifico gli aventi da b riducendo il background

Tipicamente:  $d_0 \sim 0(100 \mu m)$   
 Risoluzione  $35\mu m$  tracce con  $p_T > 2 GeV/c$



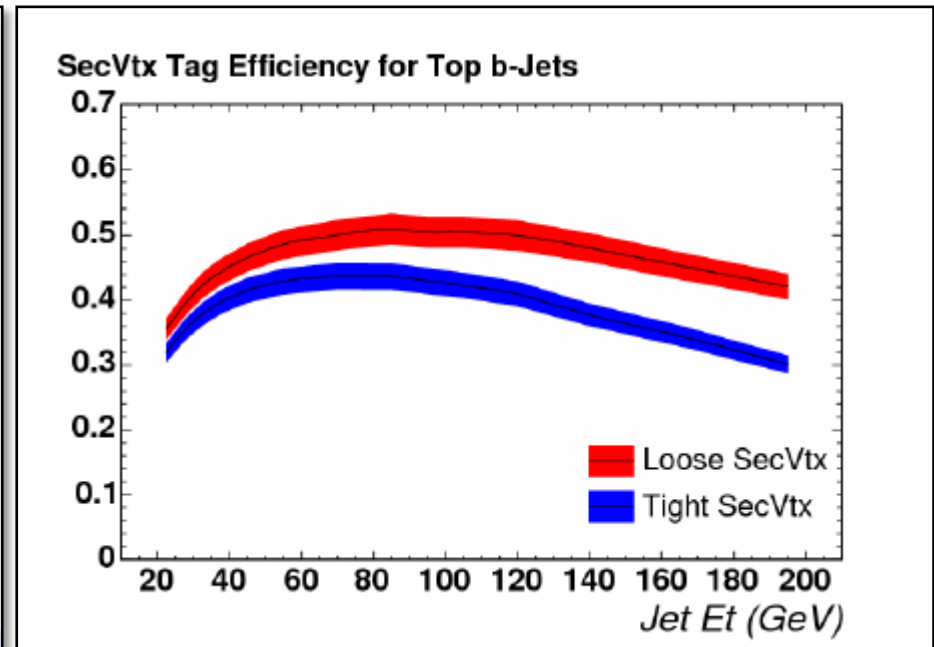
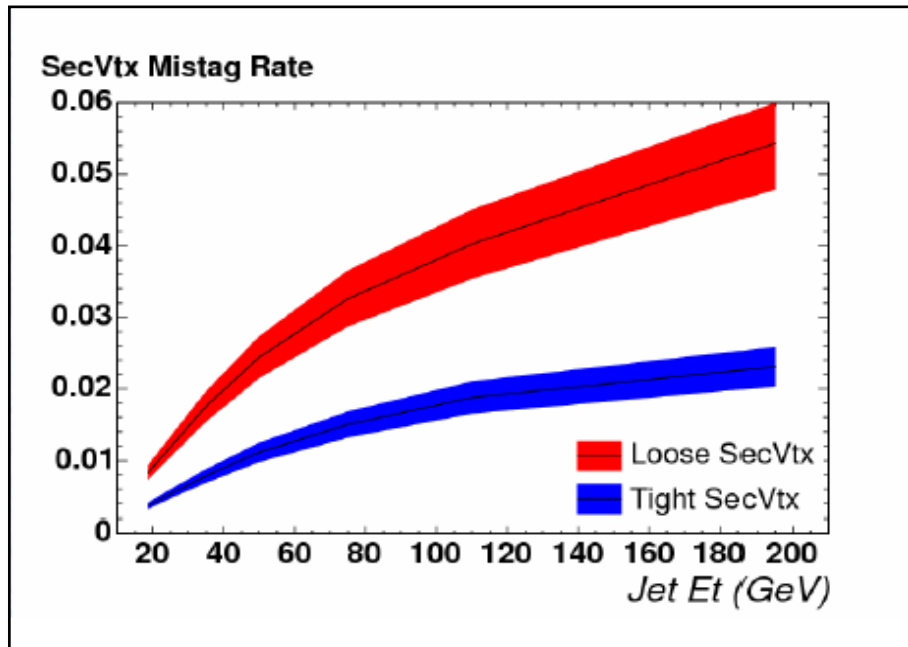
lepton + jet:



# Mistag ed efficienza del SecVtx Tagging

**Mistag Rate:** Probabilità che un jet di un quark leggero venga taggato come b-jet

L'efficienza del b-tagging viene valutata a partire da simulazioni MC



❑ Il mistag aumenta con l'energia  $E_T$  dei getti

❑ Inefficienza a basso  $E_T$  dei getti

# Misura $M_t$ canale all-hadronic (CDF) Neural Network

Il canale all-hadronic (BR~46%) è dominato dal **background della QCD**

Per migliorare il rapporto segnale-fondo  $S/B$  oltre al b-tagging dei jet è stato implementato un algoritmo di **neural network NN** basato su un set di variabili cinematiche in input per l'attivazione dei nodi della rete

TABLE I. Input variables to the neural network.

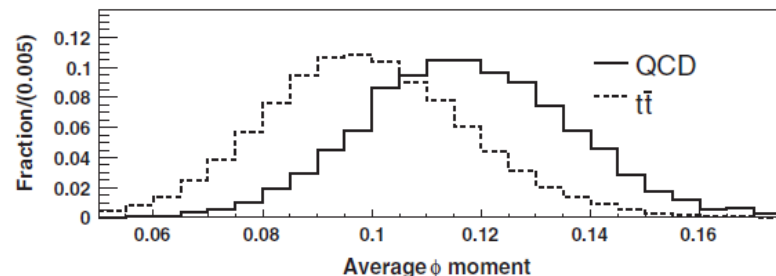
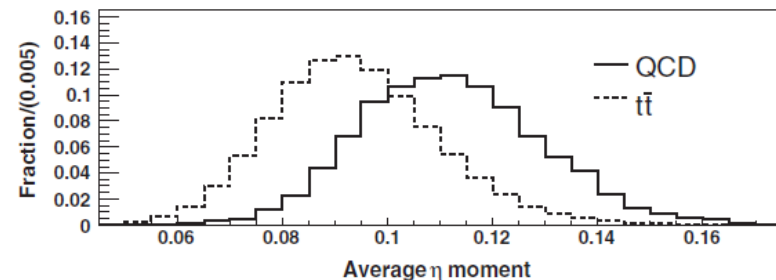
Variable	Description
$\sum E_T$	Scalar sum of selected jets $E_T$
$\sum_3 E_T$	As above, except the two highest- $E_T$ jets
$C$	Centrality
$A$	Aplanarity
$M_{2j}^{\min}$	Minimum dijet invariant mass
$M_{2j}^{\max}$	Maximum dijet invariant mass
$M_{3j}^{\min}$	Minimum trijet invariant mass
$M_{3j}^{\max}$	Maximum trijet invariant mass
$E_T^{*,1}$	$E_T \sin^2 \theta^*$ for the highest- $E_T$ jet
$E_T^{*,2}$	$E_T \sin^2 \theta^*$ for the next-to-highest- $E_T$ jet
$\langle E_T^* \rangle$	Geometric mean over the remaining jets
$\langle M_\eta^* \rangle$	Geometric mean over the untagged jets
$\langle M_\phi^* \rangle$	Geometric mean over the untagged jets



$N_{out}$

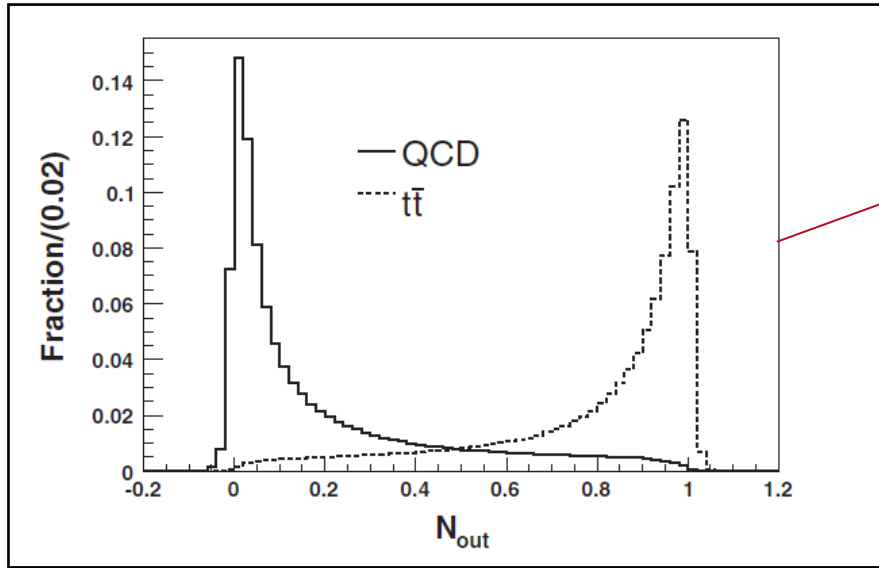
Valore dell'output node della rete

- Attraverso la NN si ottiene anche una selezione offline dei jet provenienti da gluoni (QCD) e dei jet provenienti dai quark pesanti



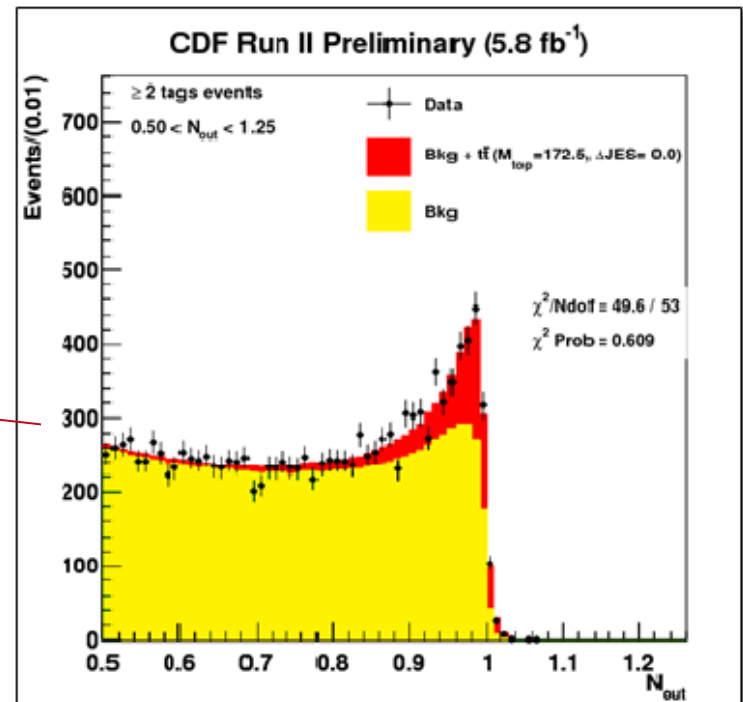


# NN: divisione background di QCD - segnale



$N_{out}$  per i multi-jet di QCD e per eventi simulati  $t\bar{t}$

Il segnale spicca dal fondo per  $0.85 \leq N_{out} \leq 1$



# Template Method: ricostruzione massa Top

**All-hadronic:**

$$t\bar{t} \rightarrow q\bar{q}W^+W^- \rightarrow b\bar{b}q_1\bar{q}_2q_3\bar{q}_4$$

90 permutazioni possibili assegnando a turno ogni jet al rispettivo quark  
2 o più b-tag  $\rightarrow$  6 permutazioni

Per ogni permutazione possibile la cinematica dell'evento viene ricostruita minimizzando la funzione  $\chi^2$  definita come:

Massa invariante della coppia dei quark del W

80.4 GeV/c<sup>2</sup>

Massa coppia quark del W e quark b

2.1 GeV

$$\chi^2 = \frac{(m_{jj}^{(1)} - M_W)^2}{\Gamma_W^2} + \frac{(m_{jj}^{(2)} - M_W)^2}{\Gamma_W^2} + \frac{(m_{jjb}^{(1)} - m_t^{\text{rec}})^2}{\Gamma_t^2} + \frac{(m_{jjb}^{(2)} - m_t^{\text{rec}})^2}{\Gamma_t^2} + \sum_{i=1}^6 \frac{(p_{T,i}^{\text{fit}} - p_{T,i}^{\text{meas}})^2}{\sigma_i^2}$$

Le massa di t e t-bar vengono considerate uguali

1.5 GeV

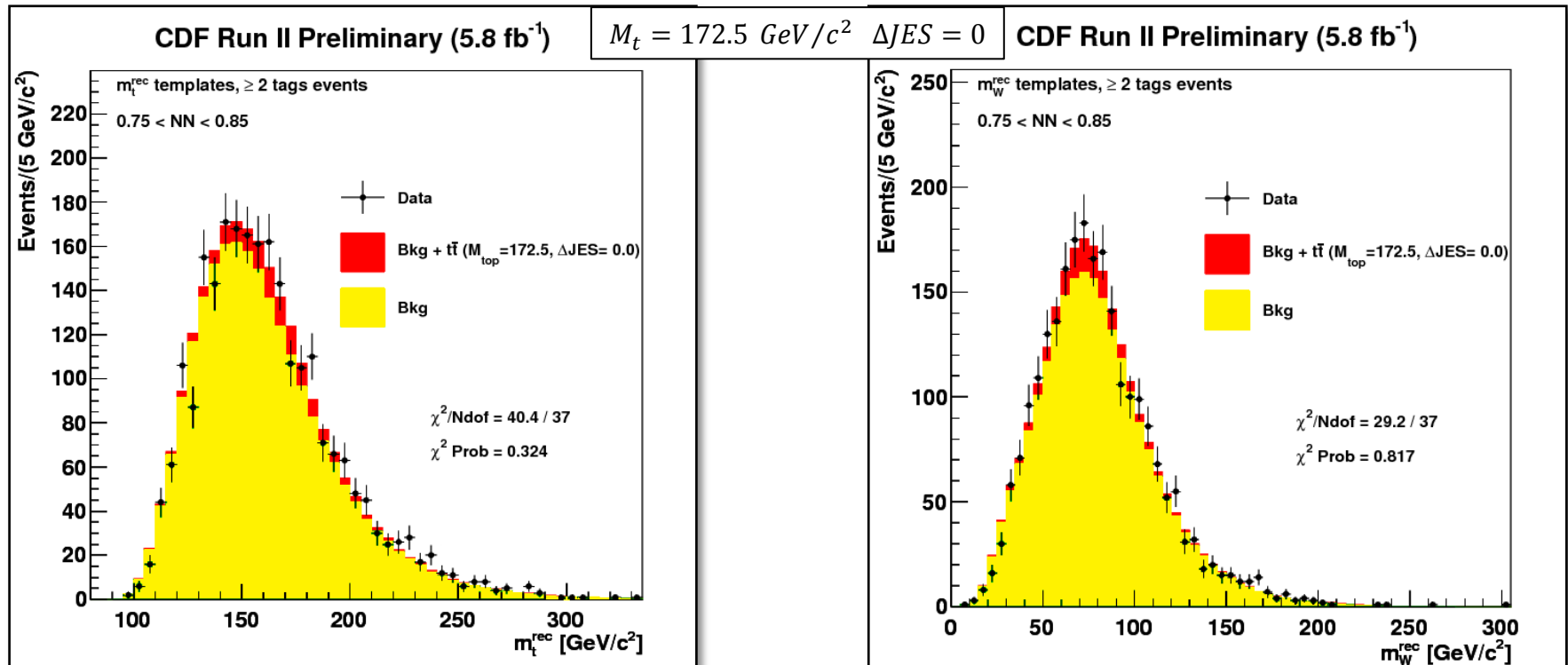
Constringe  $p_T$  fissato dei jet a quello misurato con la risoluzione sperimentale

Viene selezionato  $m_t^{\text{rec}}$  della permutazione che minimizza il  $\chi^2$  che sarà usato per il fit di likelihood. Per ricostruire la massa  $m_W$  la procedura è la stessa

# Template Method: background

Il background di QCD viene modellato a partire dai dati (data-driven) poiché a priori non ne conosco la distribuzione.

Il campione dei dati per valutare il bkg deve avere almeno un b-tag. Si considera un range di valori di  $N_{out}$  per cui il segnale è dominato dal bkg e si confronta lo shape simulato del bkg con la distribuzione dei dati.



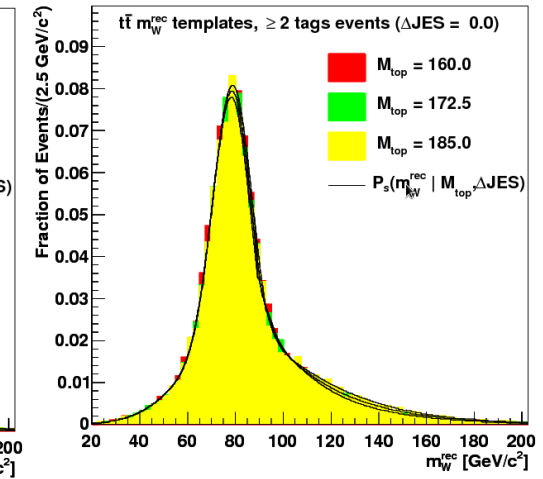
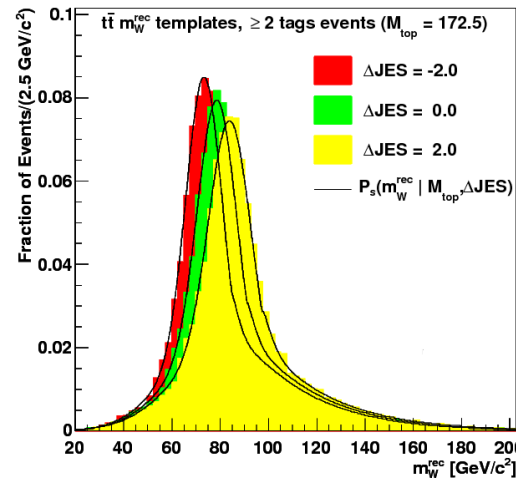
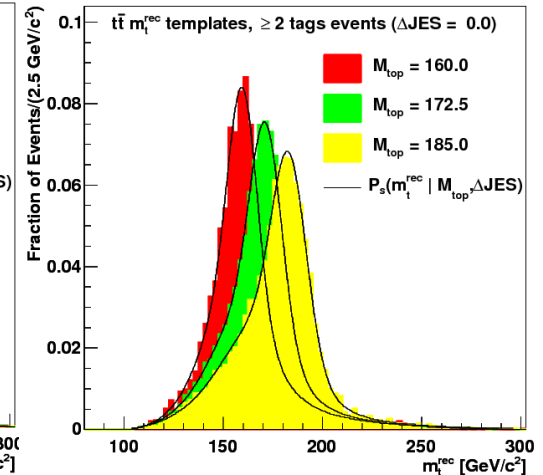
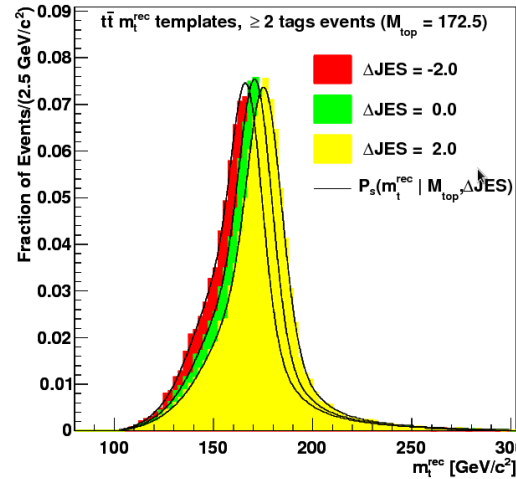
# Signal Probability Density Functions (p.d.f.'s)

$M_T$  e  $\Delta\text{JES}$  misurati simultaneamente



**calibrazione *in situ***

calibro l'energia dei jet a usando gli eventi top stessi



- ❑ I fit (p.d.f.'s) per  $m_t^{\text{rec}}$  e  $m_W^{\text{rec}}$  dipendono da  $M_T$  e  $\Delta\text{JES}$
- ❑ I parametri del fit sono scritti come funzioni lineari di queste due variabili
- ❑ Variando  $m_W^{\text{rec}}$  ottengo  $\Delta\text{JES}$  *in situ*

# Template Method: Likelihood Fit

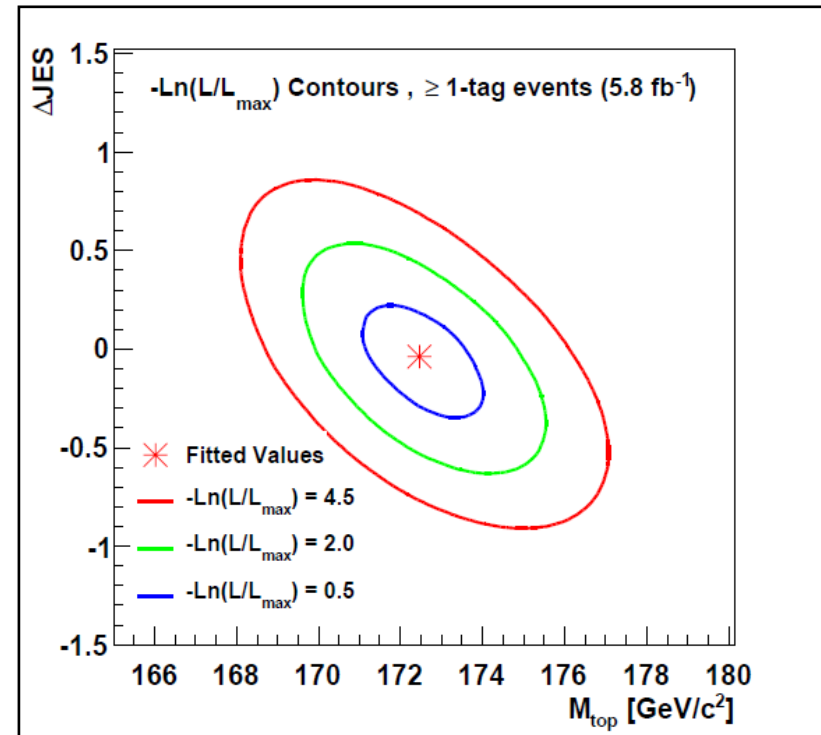
Per il fit di massima verosimiglianza si usa la seguente funzione di likelihood:

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{1\text{ tag}} \times \mathcal{L}_{\geq 2\text{ tags}} \times \mathcal{L}_{\Delta\text{JES}_{\text{constr}}} \longrightarrow \text{Termine gaussiano che costringe JES al valore } \Delta\text{JES} = 0 \text{ (entro la sua incertezza)}$$

$$\mathcal{L}_{1, \geq 2\text{ tags}} = \mathcal{L}_{\Delta\text{JES}} \times \mathcal{L}_{\text{evts}} \times \mathcal{L}_{M_{\text{top}}} \times \mathcal{L}_{N_{\text{constr}}^{\text{bkg}}}$$

In questo termine compaiono i parametri liberi del fit  $M_t$  e  $\Delta\text{JES}$  contenuti nelle p.d.f's

In figura è mostrato il log-likelihood in due dimensioni. Al centro abbiamo il minimo della likelihood che corrisponde al valore di  $M_t$  ottenuto dal fit.



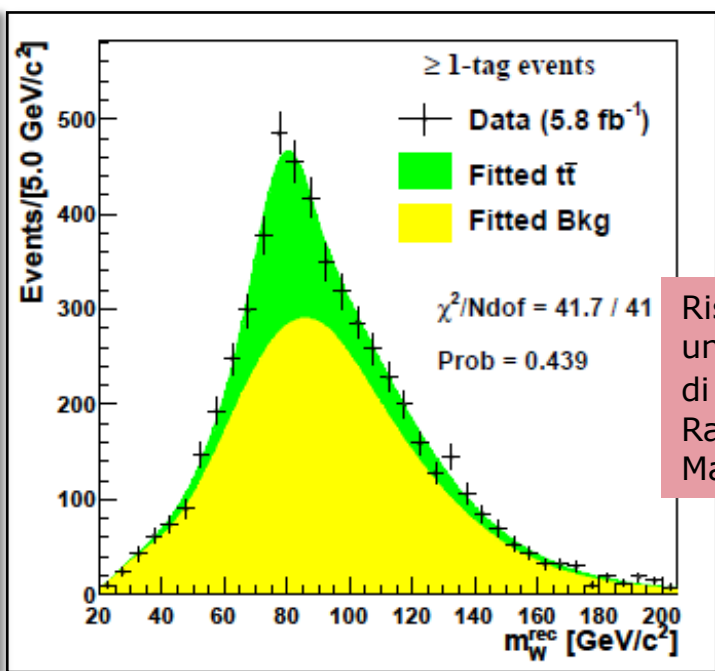
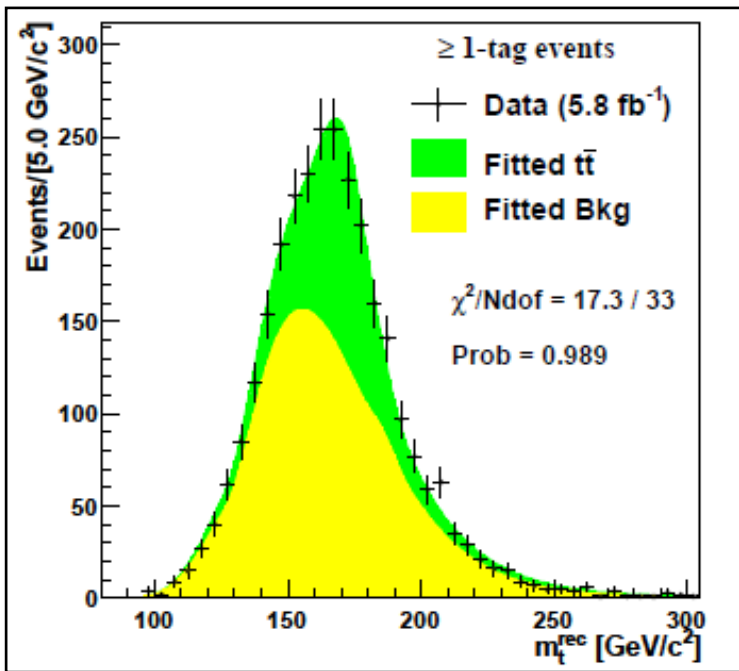
# Risultati CDF (RunII) All-Hadronic

Effettuata la selezione degli eventi e la stima del background vengono ricostruite le masse  $m_t^{rec}$  e  $m_w^{rec}$  successivamente utilizzate come **dati input** per il **fit di likelihood**. Dopo la procedura di calibrazione sono stati ottenuti i seguenti risultati:

$$M_{top} = 172.5 \pm 1.4(stat) \pm 1.0(JES) GeV/c^2$$

$$\Delta JES = -0.1 \pm 0.3(stat) \pm 0.3(M_{top})$$

Errore dovuto a Jes ridotto di un terzo!

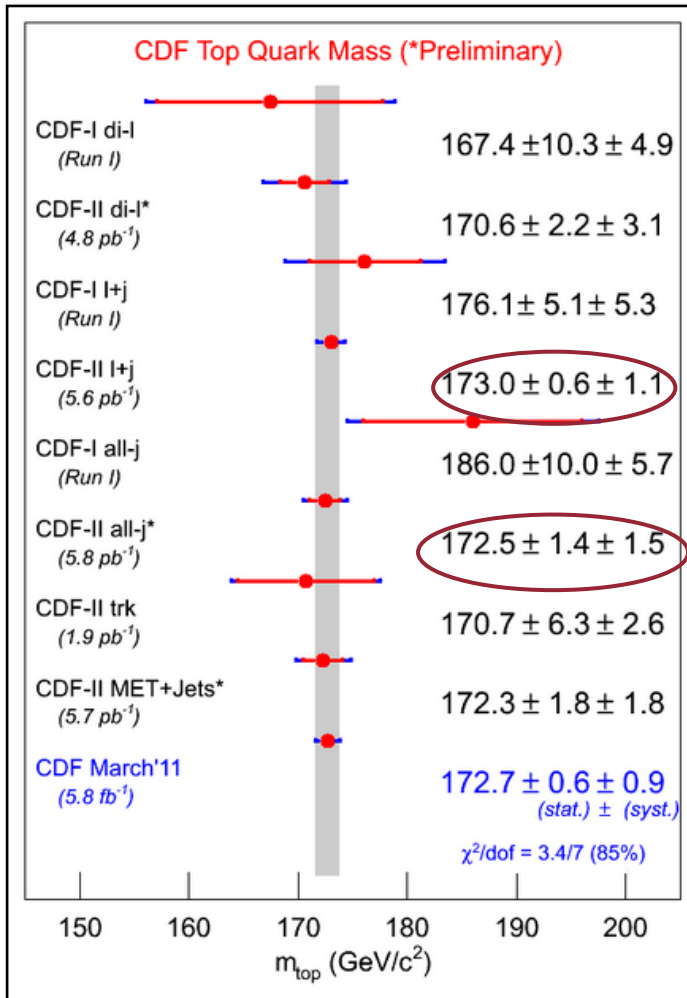


Risultati ottenuti per una luminosità integrata di  $5.8 fb^{-1}$  e  $\sqrt{s} = 1.96 TeV$   
Raccolta dati: Marzo 2001-Febbraio 2010

# Conclusioni

$$M_{top} = 172.5 \pm 2.0(\text{stat} + \text{syst}) \text{GeV}/c^2$$

- È stata presentata la misura della massa del quark top nel canale all-hadronic (RunII)
- La selezione degli eventi è basata principalmente su NN e b-tagging
- Con la calibrazione *in situ* l'incertezza sistematica dovuta a JES si riduce a  $1.0 \text{ GeV}/c^2$



- ❑ Il valore ottenuto di  $M_t$  è il secondo più preciso dopo quello ottenuto dal canale I+jet
- ❑ Il peso relativo di questa misura nella combinazione di tutte le misure è del 15%
- ❑ Misura indipendente di  $\Delta JES$

Migliorata di molto rispetto al RUN I

TABLE III: Sources of systematic uncertainty affecting the  $M_{top}$  and  $\Delta JES$  measurements. The total uncertainty is obtained by the quadrature sum of each contribution.

Source	$\delta M_{top}$ (GeV/c <sup>2</sup> )	$\delta \Delta JES$
Residual bias	0.2	0.03
Calibration	0.1	0.01
Generator	0.5	0.21
Initial / final state radiation	0.1	0.04
b-jet energy scale	0.2	0.05
b-tag	0.1	0.01
Residual JES	0.4	--
Parton distribution functions	0.2	0.04
Multiple $p\bar{p}$ interactions	0.1	0.04
Color reconnection	0.3	0.12
Statistics of templates	0.3	0.05
Background	0.6	0.11
Trigger	0.2	0.04
Total	1.1	0.29

# Bibliografia

- Measurement of the Top Quark Mass in the All-Hadronic Mode at CDF (7 Aprile 2012)
- Precision measurements of the top quark mass from the Tevatron in the pre-LHC era (Angela Barbaro Galtieri, Fabrizio Margaroli and Igor Volobouev) 2012 Rep. Prog. Phys. 75 056201
- Measurement of the top quark mass and pp tt cross section in the all-hadronic mode with the CDF II detector (PHYSICAL REVIEW D 81, 052011 (2010)
- Identificazione di quark b (Dott.Marco Rescigno)
- Misura dell'energia dei jet (Dott.Marco Rescigno)
- Measurement of  $M_{top}$  in the all-hadronic channel using 5.8fb<sup>-1</sup> of data Luca Brigliadori Andrea Castro Contact Bologna University & INFN
- CDF RUN II CDF Run 2 Jet Algorithms Jay R. Dittmann Baylor University / CDF TeV4LHC Workshop December 1, 2004
- Generic Jet Energy Corrections at CDF A journey from calorimeter to partons... Conveners: Monica D'Onofrio

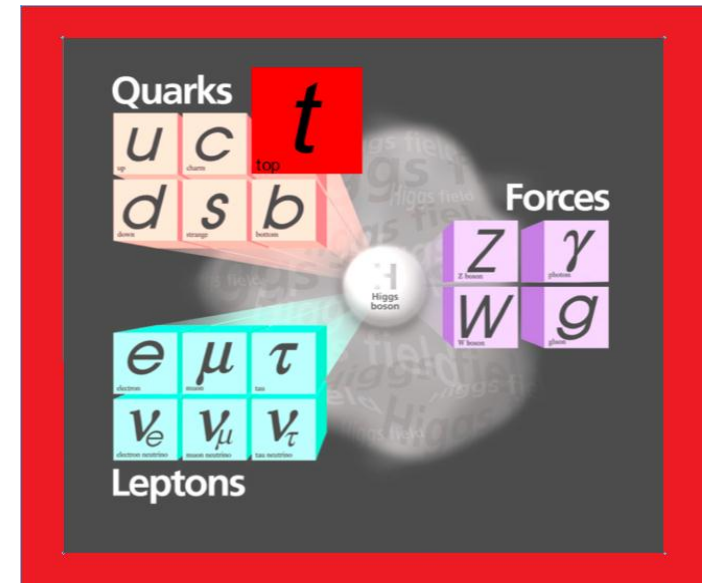
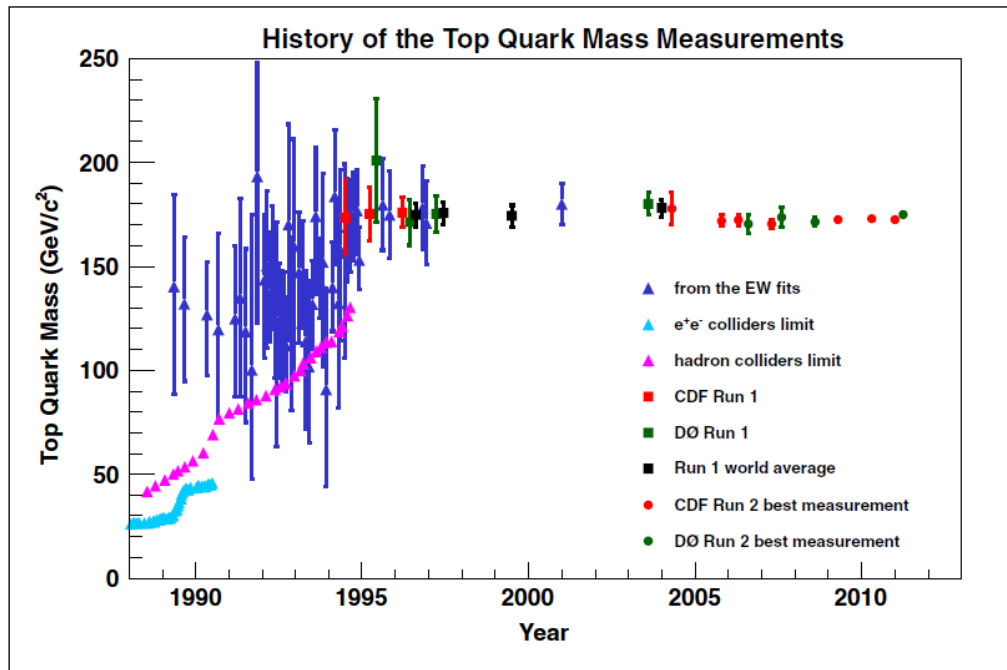


# **Back-up Slides**

# Scoperta del quark Top

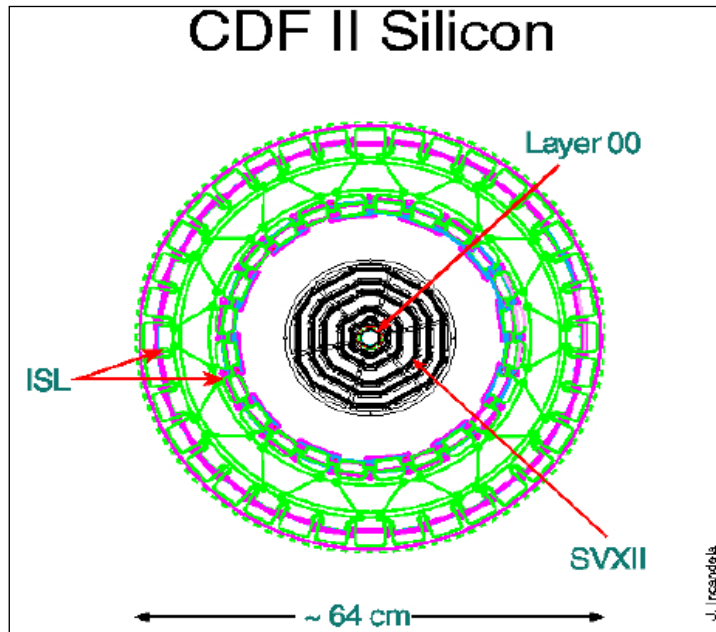
- Verifica del Modello Standard
- Completa la terza generazione di quark insieme al b (doppietto d'isospin)

Ricerca del top (dal 1977) limiti inferiori sulla massa  $M_t$  (Slac, Lep, UA1, UA2..)



**1994** Run I del Tevatron:  
 $M_t = (174 \pm 13) \text{ GeV}/c^2$   
Collisioni p-pbar **CDF Detector**  
**Misura Diretta**

# Silicon Vertex Detector (CDF)

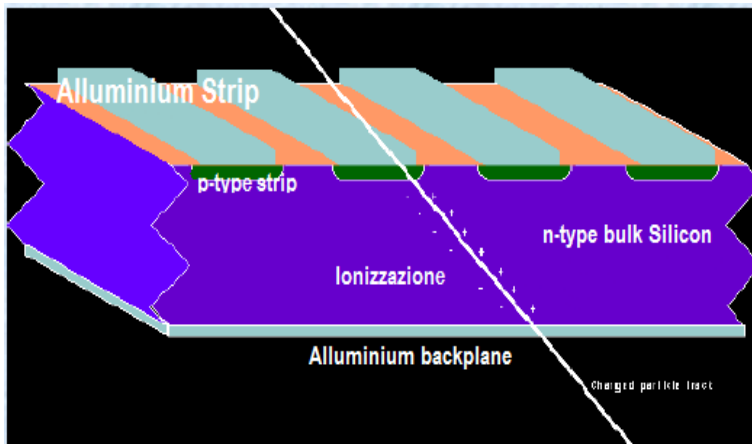


Posizionato vicino alla beam pipe e costituito da tre rivelatori concentrici:

**Layer 00-SVXII-ISL**

## Funzionamento dei Rivelatori al Silicio:

- Bulk di silicio drogato n e nella parte superiore sono posizionate strip di silicio drogate p
- La parte sottostante del bulk e le strip di silicio sono coperte da uno spessore di alluminio ed è applicato un campo elettrico
- La particella carica ionizza il Silicio
- Le buche si muovono verso le strip p-type e gli elettroni verso lo spessore di alluminio
- Si crea quindi una corrente che viene raccolta dai readout channel associati agli spessori di alluminio che coprono ogni strip di silicio
- Dalla corrente raccolta si capisce dove è passata la particella carica nel rivelatore



# Identificazione b-jets

## Soft Lepton Tagging

- Leptone soft dai mesoni B  
➔ impulso trasverso  $p_T \sim 1 \text{ GeV}$

$$\varepsilon_{tag}(\text{SLT}) \sim 15\%$$

