

Enrico Junior Schioppa

# CDF RUNI: l'evidenza del quark top

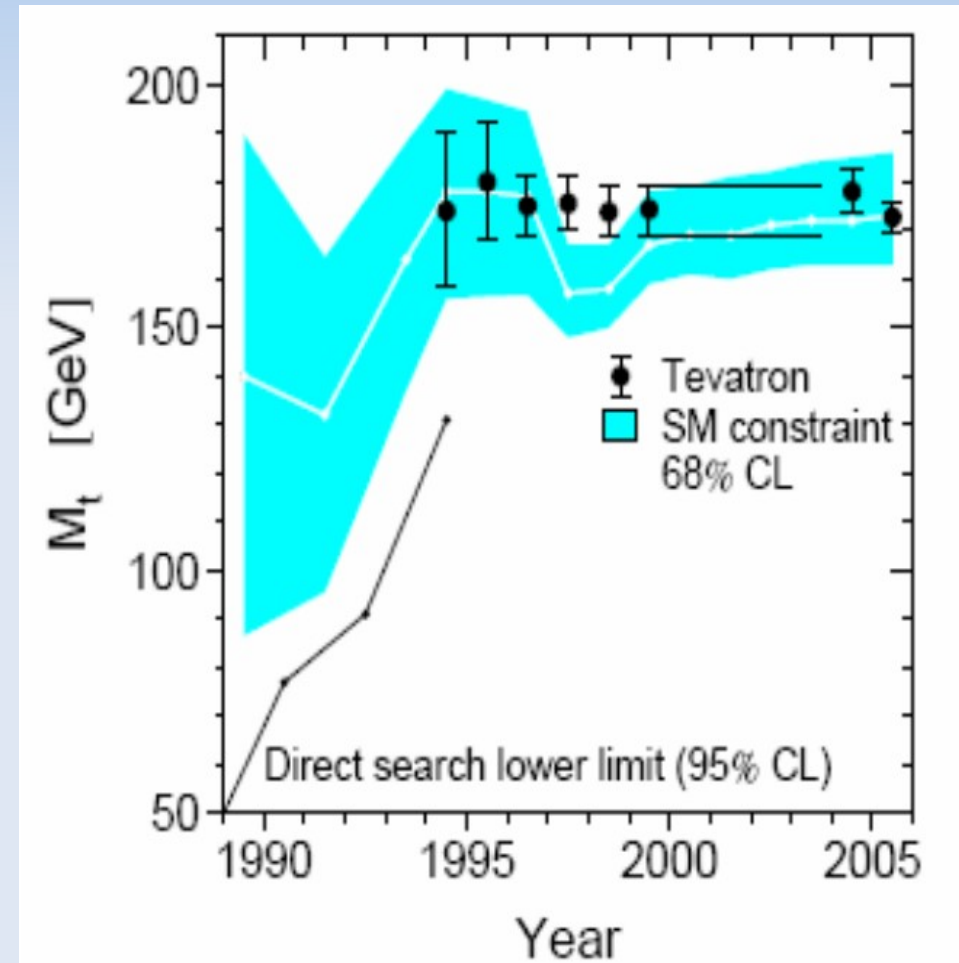
Roma, giugno 2009

# Il quark top

Il Modello Standard prevede l'esistenza del quark top:

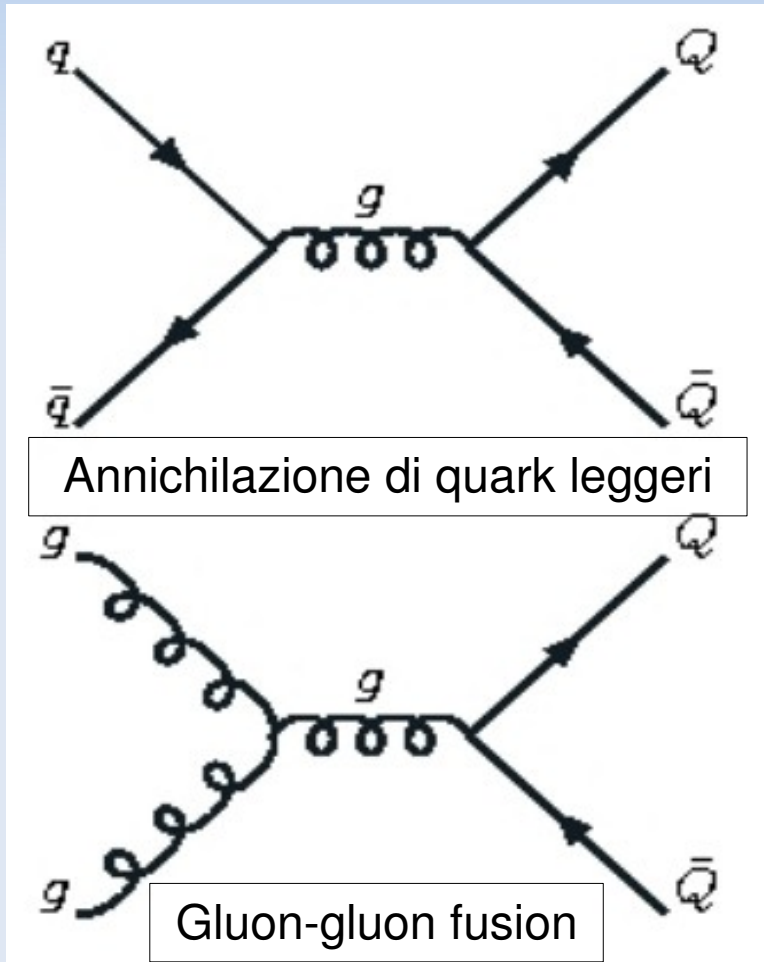
- Il top è la componente  $I_3 = 1/2$  della terza generazione  $\rightarrow$  carica  $q_{\text{top}} = 2/3$
- La teoria prevede  $M_t \sim 177$  GeV

Gli esperimenti a LEP hanno permesso di studiare le correzioni radiative ai processi di SM, mettendo dei constraint alla massa del top, migliorati di anno in anno



# Canali di produzione del top

Processi dominanti:



Ogni partone porta solo una frazione  $x_i$  dell'impulso del protone  $\rightarrow$  la collisione tra due partoni  $i$  e  $j$  avviene ad un'energia efficace  $\sqrt{s}_{\text{eff}} = x_i x_j \sqrt{s}$

Per  $M_t > 100$  GeV e alle energie di CDF ( $\sqrt{s} \sim 2$  TeV), la probabilità di avere una frazione consistente dell'impulso del protone è maggiore per i quark che non per i gluoni  $\rightarrow$  il processo dominante è l'annichilazione

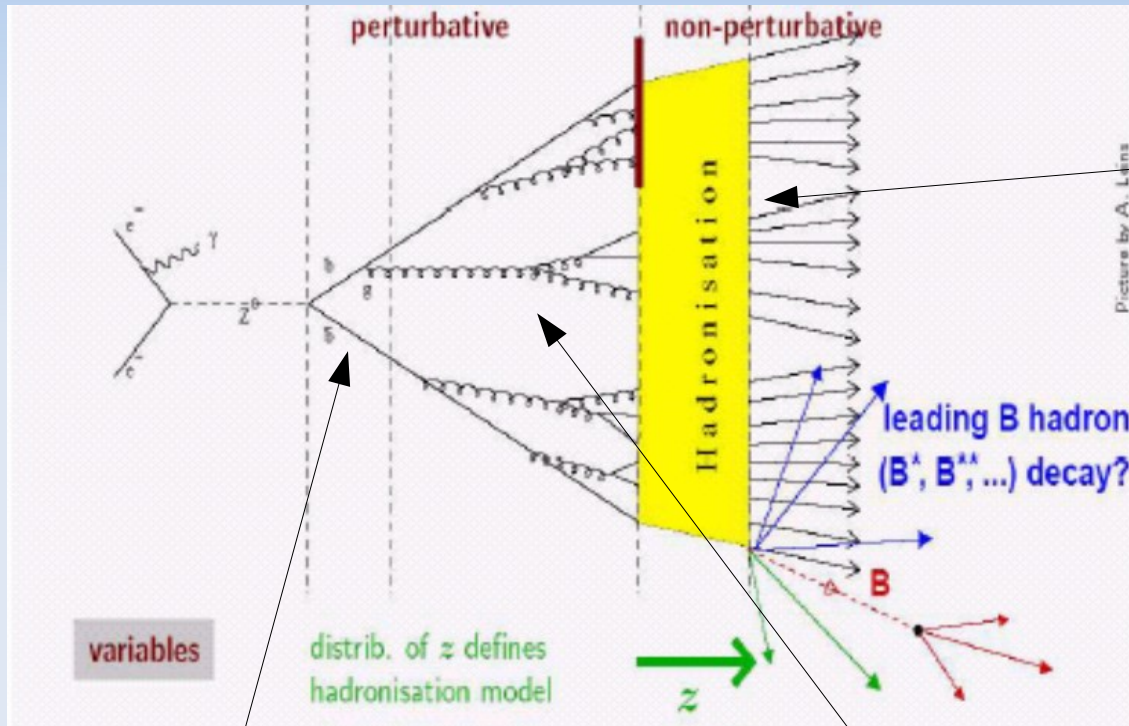
Entrambi i processi + correzioni di ordine superiore vengono tenuti in considerazione per calcolare la sezione d'urto  $\sigma(tt)$  attesa

Valore atteso per  $M_t \sim 177$  GeV

$\rightarrow \sigma(pp \rightarrow tt) \sim 8 \text{ pb}$

# Frammentazione e adronizzazione

I quark leggeri + c + b danno luogo a fenomeni di frammentazione e adronizzazione



In tempi dell'ordine dei  $10^{-22}$  s i quark e i gluoni “si vestono”, ossia danno luogo a stati legati adronici singoletti di colore

Nella collisione viene creata una coppia quark-antiquark

Ogni quark ha una certa probabilità di irradiare gluoni, che a loro volta creano nuove coppie

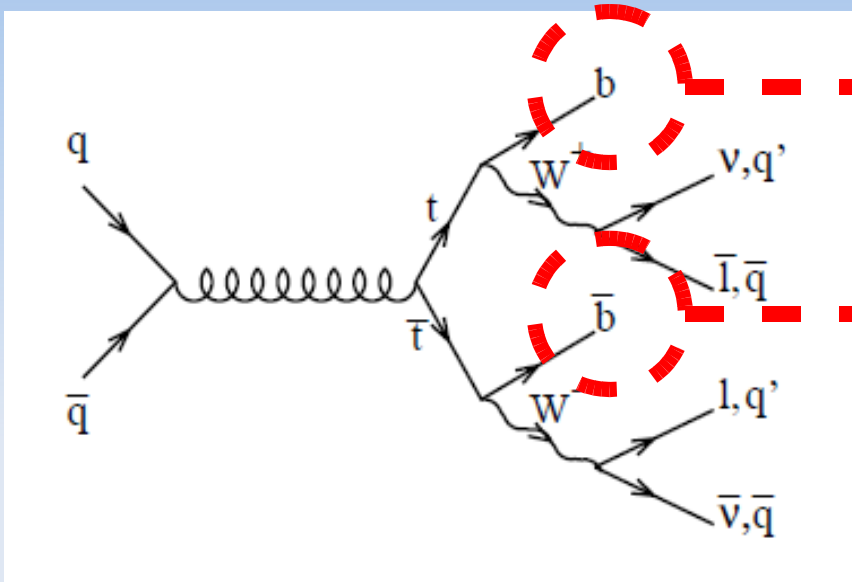
• Questo non è vero per il top!  
Infatti

$$M_t > 90 \text{ GeV} \rightarrow \Gamma_t \sim O(\text{GeV})$$

$$\rightarrow \tau_t \sim O(10^{-25}\text{s}) \ll \text{tempi di adronizzazione} \rightarrow \text{il top non adronizza}$$

• Il top è l'unico caso in cui è possibile osservare il decadimento di un quark nudo

# Decadimenti del top: b-tagging



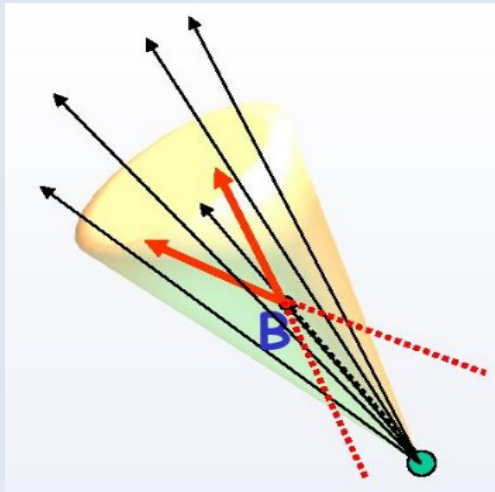
*b-jet*

*b-jet*

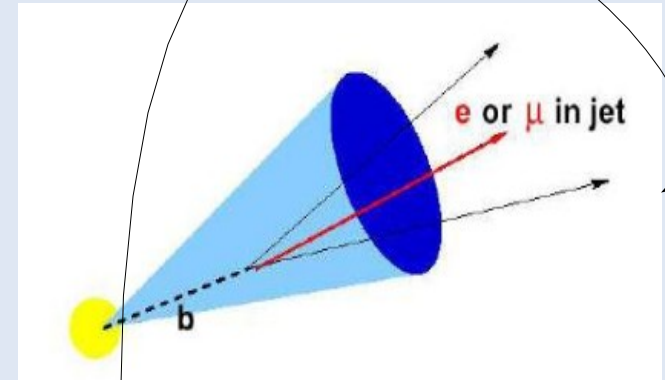
CKM favoured:  
 $t \rightarrow b + W^+$   
 $\sim 100\%$

La presenza di jet con b è la segnatura per l'avvenuta produzione di top

Due possibili modi di individuare jet con b:



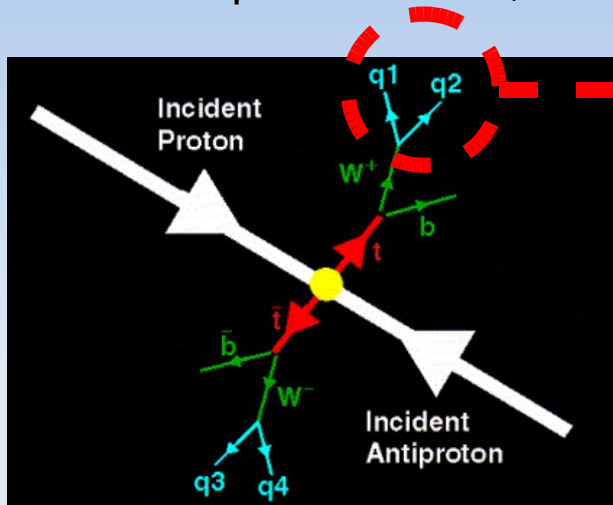
B-tagging:  
 ricostruzione dei vertici secondari di decadimento dei mesoni con beauty



Soft Lepton Tag: osservazione dei prodotti dai decadimenti semileptonici del quark b

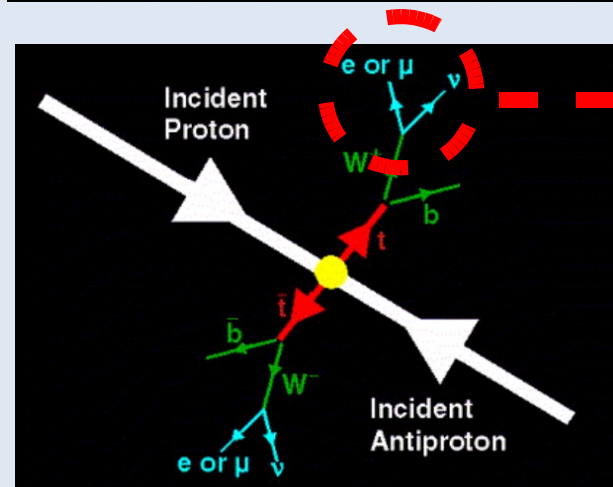
# Decadimenti del W

Oltre ai prodotti del b, vengono studiati i prodotti dei decadimenti dei due bosoni W:



## Decadimenti adronici del W

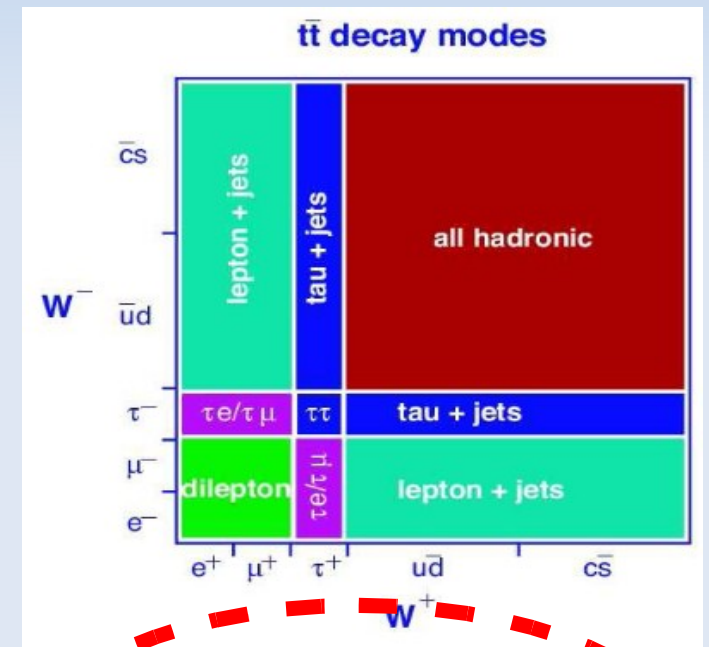
- Favorito in termini di BR
- Sfavorito in termini di fondo QCD



## Decadimenti leptonici del W

- Sfavorito in termini di BR
- Segnatura perfetta del W
- Favorito in termini di pulizia del segnale
- Sfavorito in termini di identificazione dei due neutrini

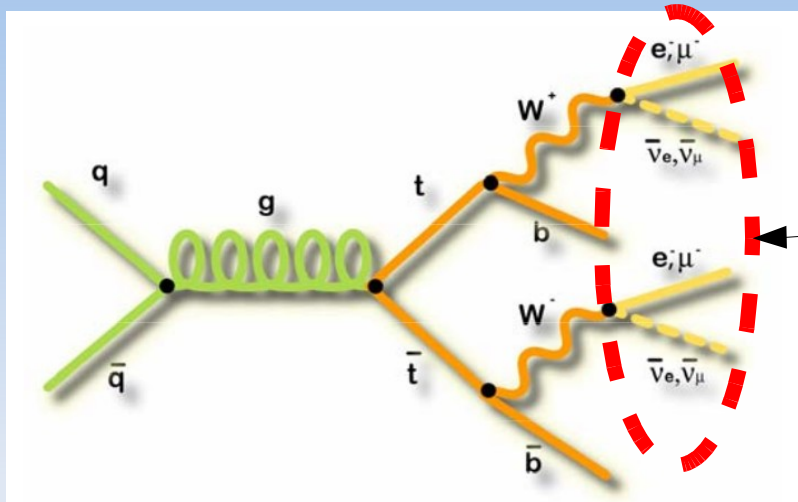
Noti i BR dei due decadimenti, si calcola la probabilità combinata per i due W:



Vengono sfruttati i canali dilepton e lepton+jet



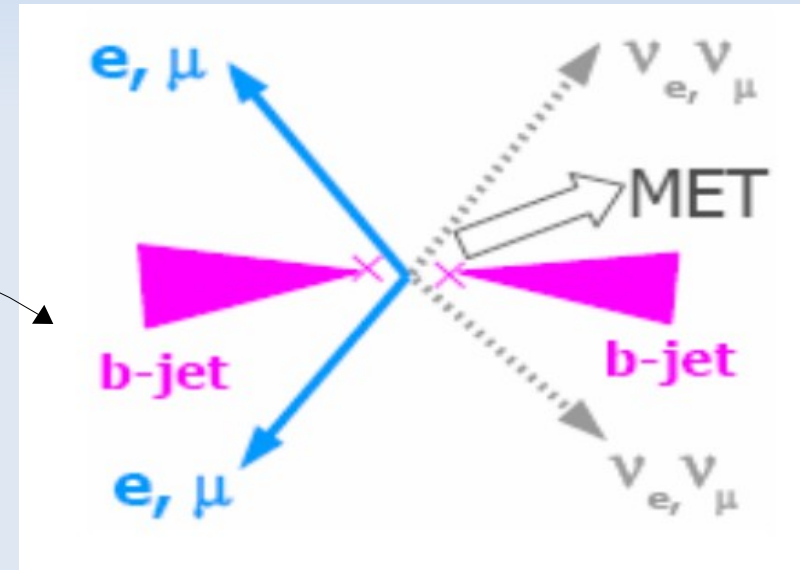
# Canale dileptonico



- Costituisce solo il 5% dei possibili stati finali
- Topologia: 2 leptoni con alto  $p_T$  + grande missing  $E_T$  + 2 b-jets

Requisiti di trigger:

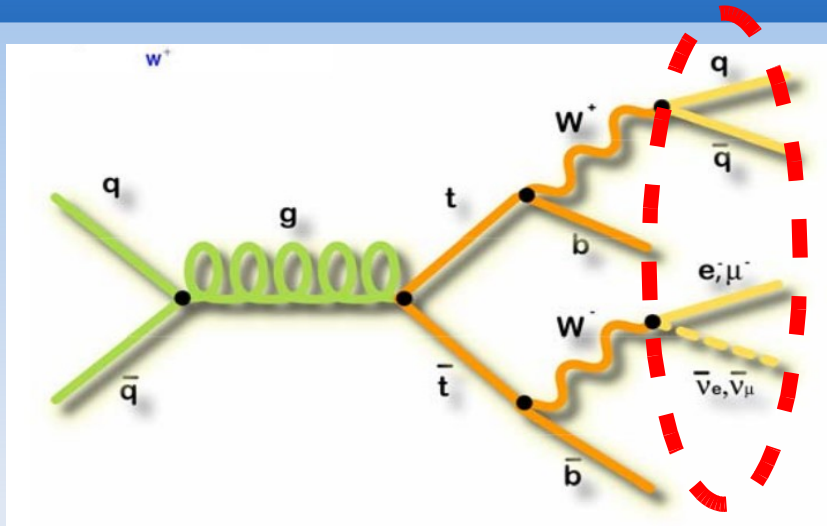
- Due leptoni visibili con  $p_T > 20$  GeV
- Carica opposta dei due leptoni
- Almeno uno dei due leptoni deve avere  $|\eta| < 1.0$  e deve essere isolato
- $E_T > 20$  GeV



Reiezione di background:

- Rimozione di coppie di leptoni con massa invariante tra 70 GeV e 110 GeV, prodotti da decadimenti dello Z
- Per rimuovere decadimenti da leptoni  $\tau$  e mismeasurement di  $E_T$ , richiedo che l'angolo azimutale tra  $E_T$  e il leptone piú vicino sia superiore a  $20^\circ$

# Canale lepton+jet



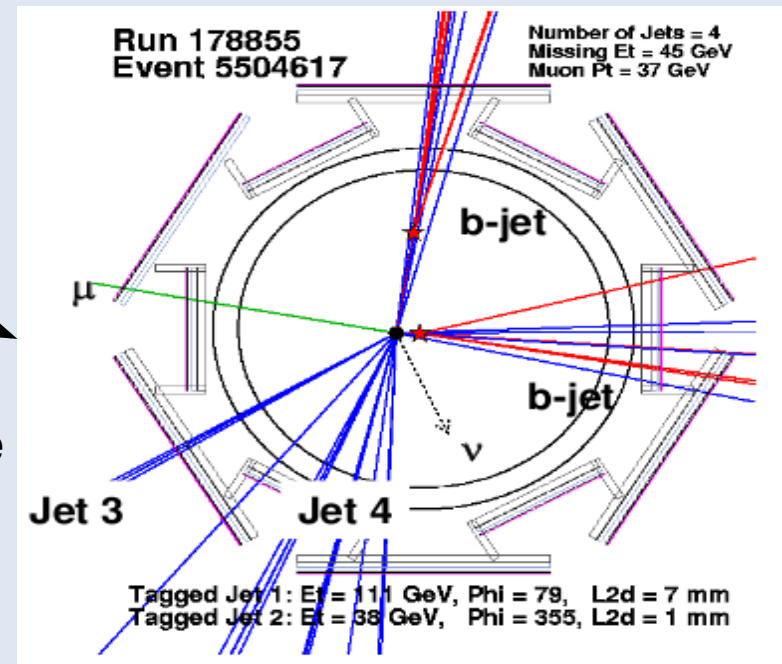
- Costituisce circa il 30% dei possibili prodotti finali
- Buon compromesso tra il rapporto segnale/fondo e la pulizia del segnale
- Caratterizzazione: leptone con alto  $p_T$  + grande missing  $E_T$

Topologia dell'evento:

- Due jet da quark b
- Due jet da quark leggeri
- Un leptone isolato con  $p_T > 20$  GeV e  $|\eta| < 1.0$
- $E_T > 20$  GeV

Background:

- Gli eventi contenenti bosoni Z sono rimossi eliminando le coppie di leptoni con massa invariante tra 70 GeV e 110 GeV
- Gli eventi di produzione diretta di W sono rimossi richiedendo  $N_{jet} \geq 3$
- Ulteriori eventi di background sono rimossi dal b-tagging

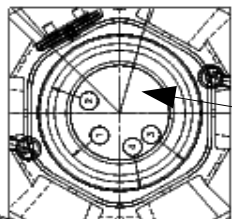




# Silicon Vertex Detector (SVX)

Per ricostruire con la massima precisione i vertici secondari serve un sistema tracciante ad alta risoluzione → tecnologie al silicio

$$\Delta x = 13 \mu\text{m}$$



Posizione del SVX all'interno del detector

Struttura del SVX:

4 strati di rivelatori al silicio

Lunghezza 51 cm

Raggio da 3.0 cm a 7.9 cm

Accettanza 60%

Microstrip da  $60 \mu\text{m}$  ( $55 \mu\text{m}$  per lo strato esterno)

Beam pipe in Be

Ageing del SVX in RUNI: diminuzione del rapporto segnale/rumore → nuovo SVX in RUNII, radiation hard

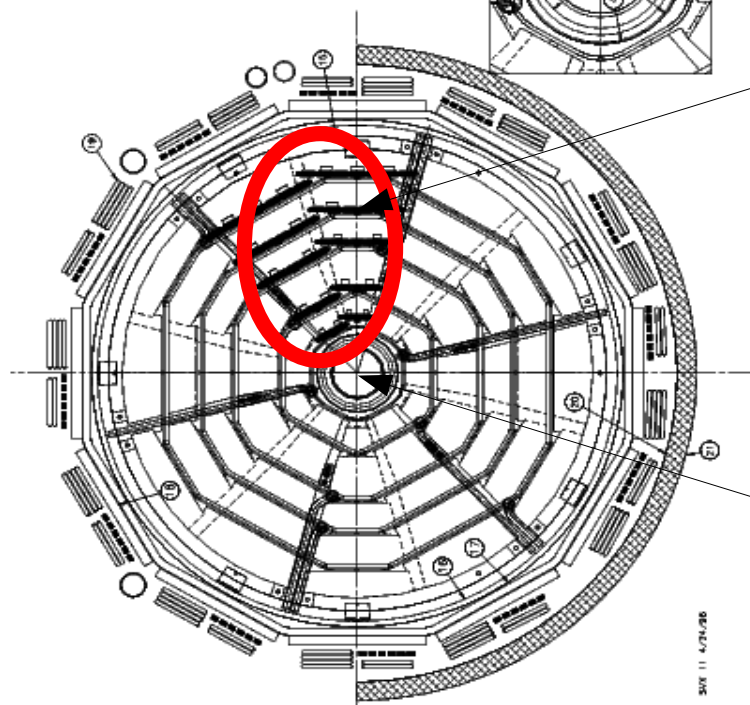
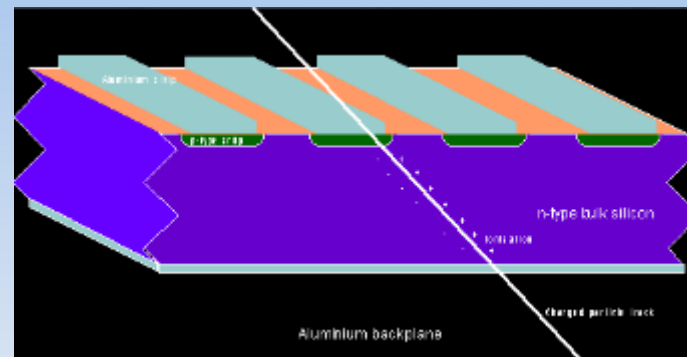
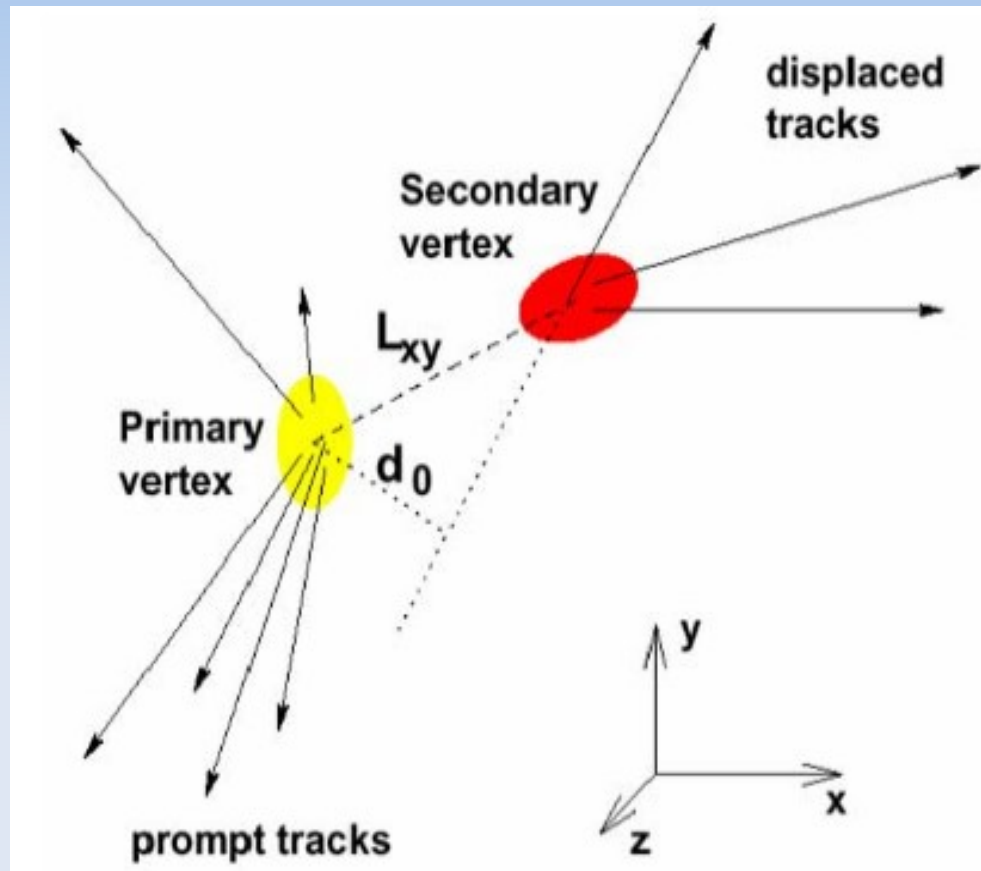


Figure 5.2: The SVX II bulkhead design

# b-tagging: algoritmo SECVTX

- $M_t \gg M_b$      $p_b \gg M_b$   
➡  $\Delta x = \beta\gamma c\tau \sim O(\text{mm})$   
➡ Posso osservare il vertice di decadimento dei mesoni B
- Va ricostruito anche il vertice primario (punto d'interazione)



Parametri utili:

- Distanza della singola traccia dal vertice primario:  $d_0$
- Distanza tra i vertici primario e secondario:  $L_{xy}$

# Algoritmo SECVTX: ricostruzione dei vertici

## Vertici primari:

- Sono distribuiti secondo due gaussiane: una radiale con  $\sigma \sim 25 \mu\text{m}$ , una longitudinale con  $\sigma \sim 28 \text{ cm}$
- La ricostruzione sfrutta l'informazione di traccia dal SVX + VTX (Vertex Drift Chamber) + CTC (Central Tracking Chamber)
- Vengono rimosse le tracce provenienti dal vertice B (quelle con parametro d'impatto maggiore, che contribuiscono maggiormente al  $\chi^2$ )
- Vengono sfruttate anche le tracce dei prodotti dei quark spettatori

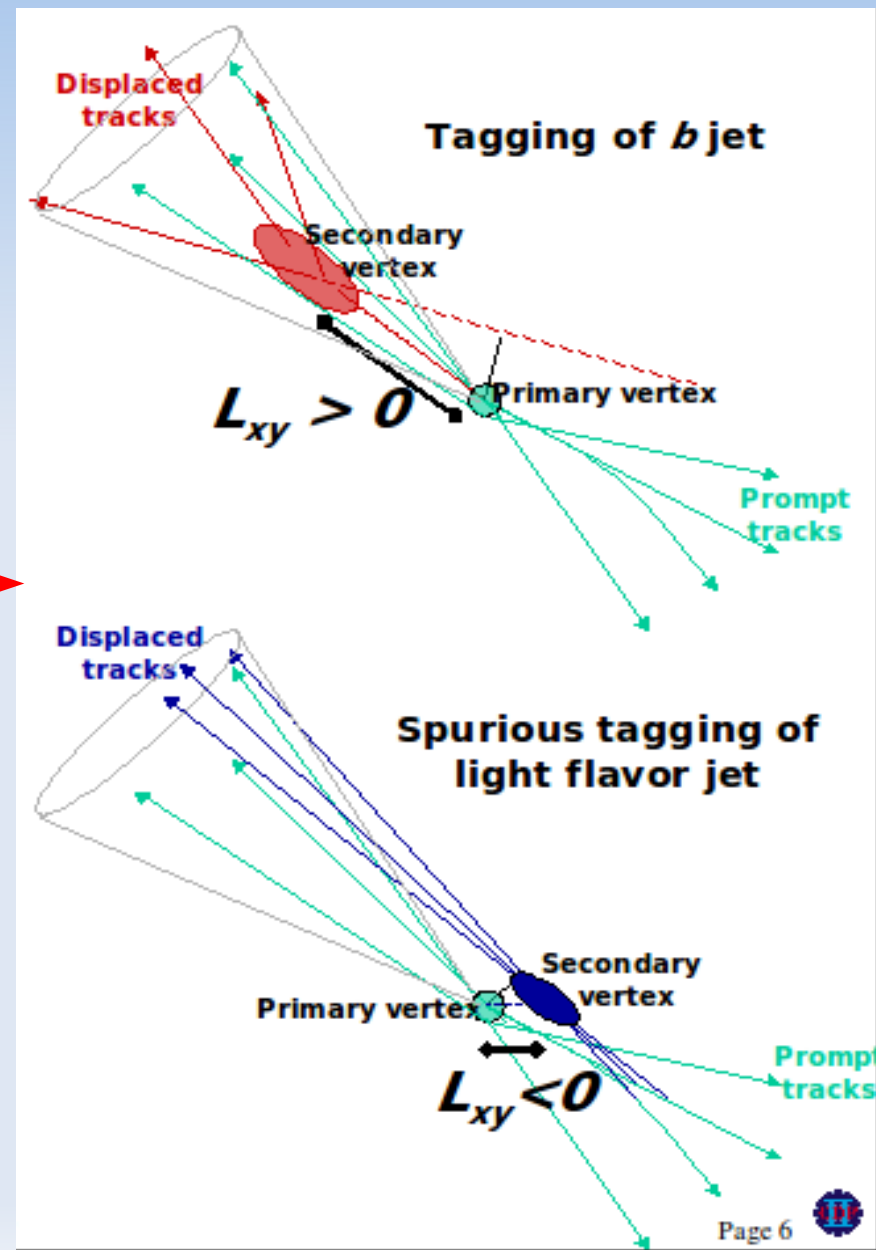
## Vertici secondari:

- 1) Le tracce dei jet con  $E_T > 15 \text{ GeV}$  e  $|\eta| < 2$  sono proiettate sul piano trasverso
- 2) Viene calcolato  $d_0$  per ogni traccia
- 3) Vengono selezionate le tracce con significanza  $d_0/\sigma_{d_0} \geq 3$
- 4) Sulle tracce selezionate viene applicato un algoritmo che consente di fare un fit in 3D imponendo un'origine comune
- 5) L'algoritmo viene ripetuto minimizzando il  $\chi^2$

# Algoritmo SECVTX: ricostruzione dei vertici

- Una volta determinati i due vertici si misura  $L_{xy}$ . A seconda del numero di tracce e della topologia si ha  $\sigma_{L_{xy}} \sim 130 \mu\text{m}$
- Il segno di  $L_{xy}$  è determinato dal coseno dell'angolo fra il vettore e l'asse del jet
- Gli eventi interessanti hanno  $L_{xy} > 0$

➔ L'evento si considera taggato se  $L_{xy}/\sigma_{L_{xy}} \geq 3$



# Efficienza di b-tagging

- Si definisce l'efficienza di tagging:

$$\epsilon_{tag} = \frac{\text{numero di eventi con } b\text{-jet taggati}}{\text{numero totale di eventi con } b\text{-jet}}$$

- L'efficienza di tagging viene calcolata con simulazioni MC
- Per verificare la validità della simulazione si definisce l'efficienza di tagging per eventi  $b \rightarrow l$  in due possibili modi:

$$\epsilon_{sl} = \frac{\text{numero di eventi con } b\text{-jet} + \text{leptone isolato taggati}}{\text{numero totale di eventi con } b\text{-jet} + \text{leptone in un } b\text{-jet taggati}}$$

$$\epsilon_{sl} = \frac{\text{numero di eventi con } b\text{-jet} + \text{leptone taggati}}{(\text{numero totale di eventi con leptone}) \times BR(b \rightarrow l)}$$

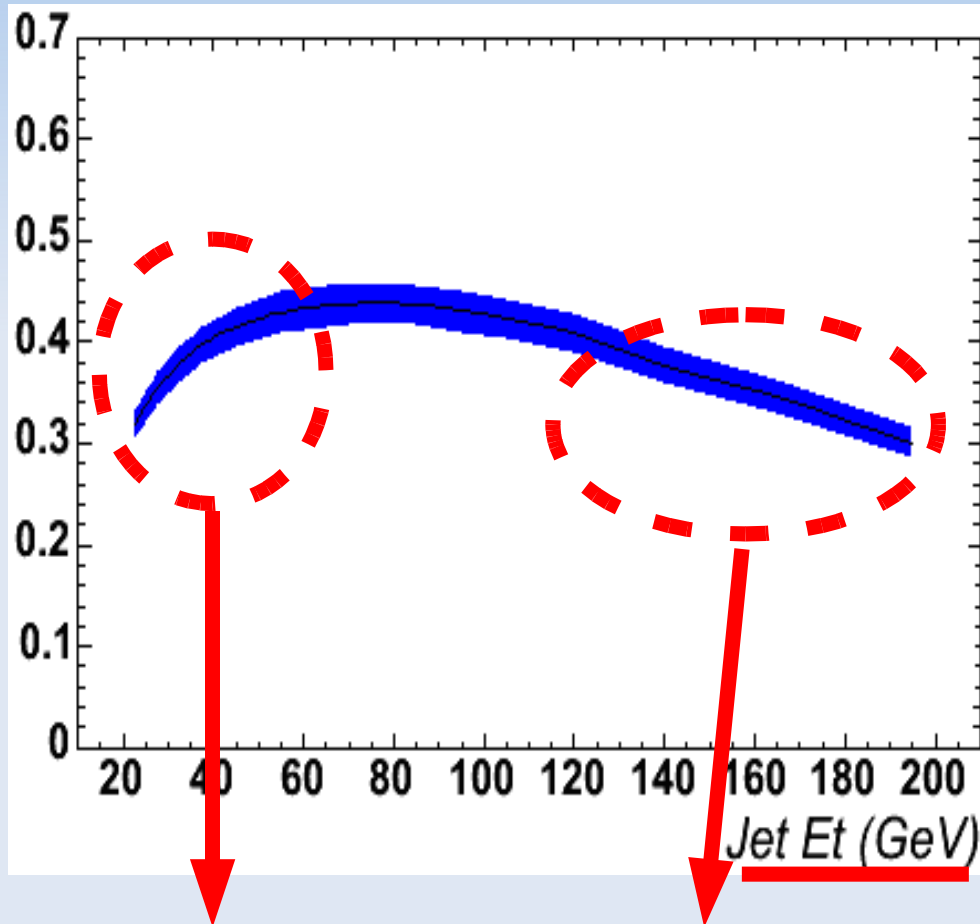
- Vantaggi: può essere sia simulata con MC, sia misurata dai dati

Risultato  $\rightarrow$   $\frac{\epsilon_{sl}^{data}}{\epsilon_{sl}^{MC}} = (0.96 \pm 0.07)$

- Il risultato viene inserito come fattore di scala per l'efficienza  $\epsilon_{tag}$

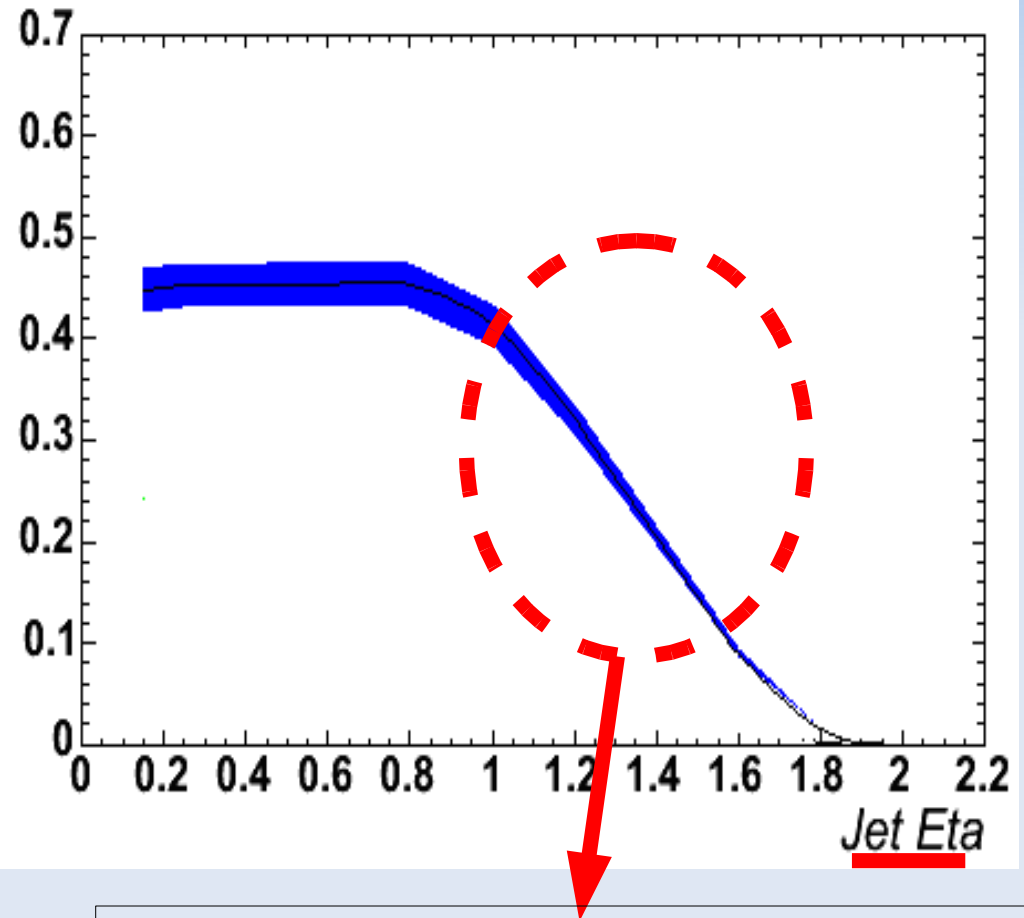
# Efficienza b-tagging: risultati

Efficienza massima intorno al 45%



Diminuisce la  
risoluzione su  $d$

Jet più collimati  
→ aumenta  
l'errore su  $L_{xy}$



Minore accettazione di SVX & CTC  
→ ricostruzione meno precisa  
delle tracce



# Algoritmo SECVTX: valutazione della mistag rate

Valutazione della mistag rate:

1) Dai dati si ricavano le distribuzioni di  $L_{xy}$

2) Poiché  $P_{\text{mistag}}(L_{xy} < 0) = P_{\text{mistag}}(L_{xy} > 0)$ , mentre  $P_{\text{HF}}(L_{xy} < 0) < P_{\text{HF}}(L_{xy} > 0)$ , nel primo caso la distribuzione deve essere simmetrica, nel secondo caso deve essere sbilanciata verso  $L_{xy} > 0$

3) Viene effettuato un fit combinando due distribuzioni:

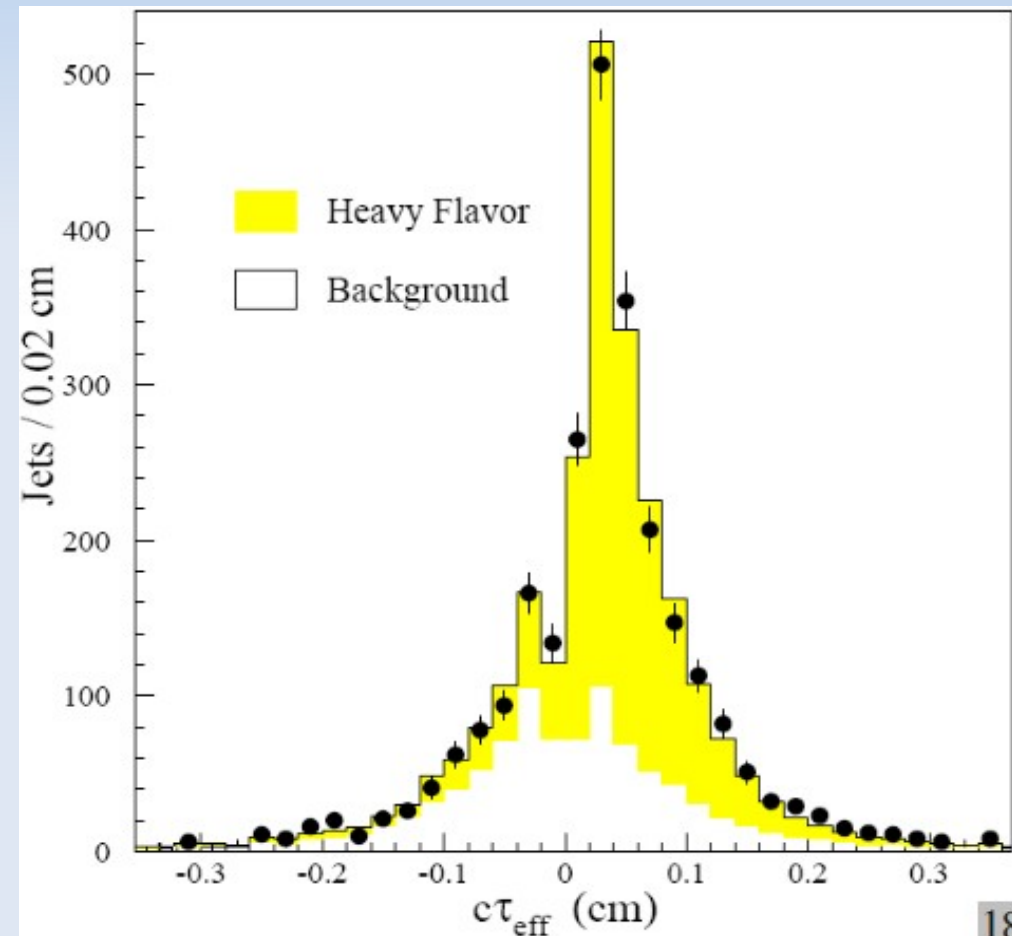
- MC dei decadimenti di b e c
- tracce con zero lifetime (dal PV)

→ ricavo i rispettivi contributi:

75%-25% per il totale, 35%-65% per  $L_{xy} < 0$

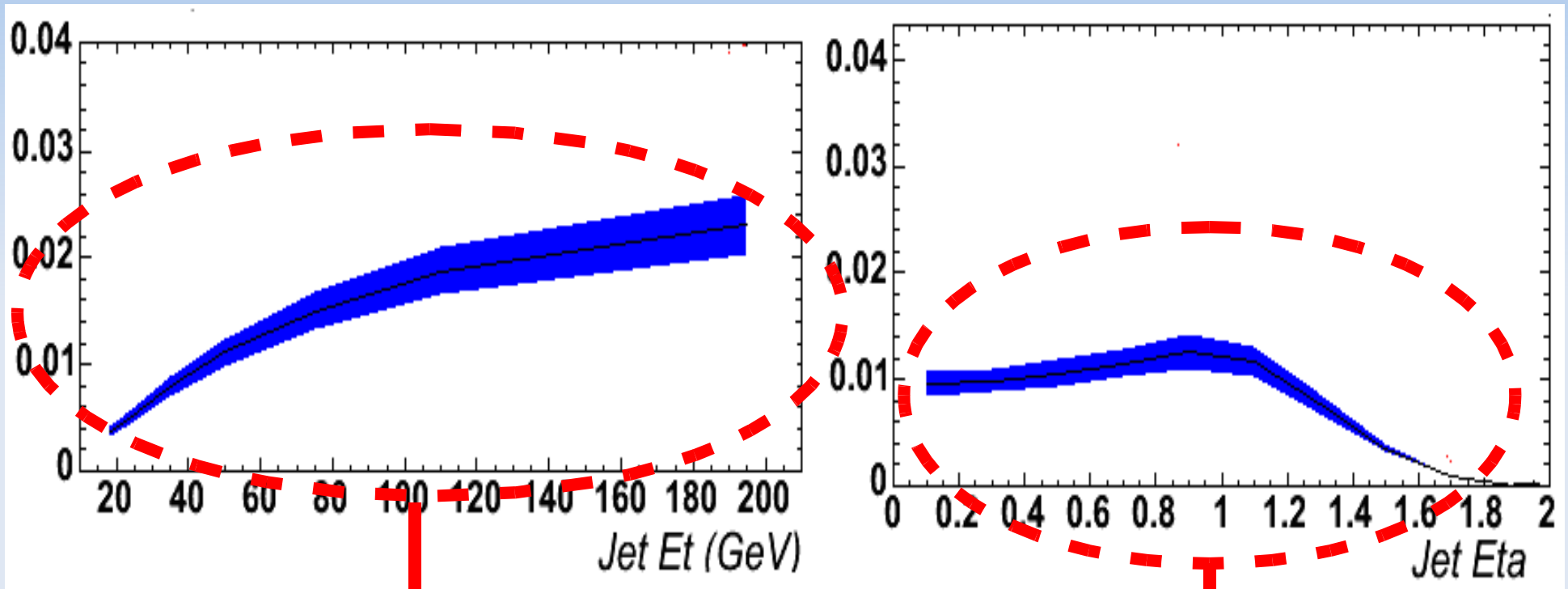
→ Valuto il contributo dei mistag guardando il tag rate degli eventi con  $L_{xy} < 0$

Mistagged jets = jet prodotti da quark leggeri ma erroneamente attribuiti a quark b



# Mistag rate: risultati

Probabilità di mistag  $\sim O(1\%)$

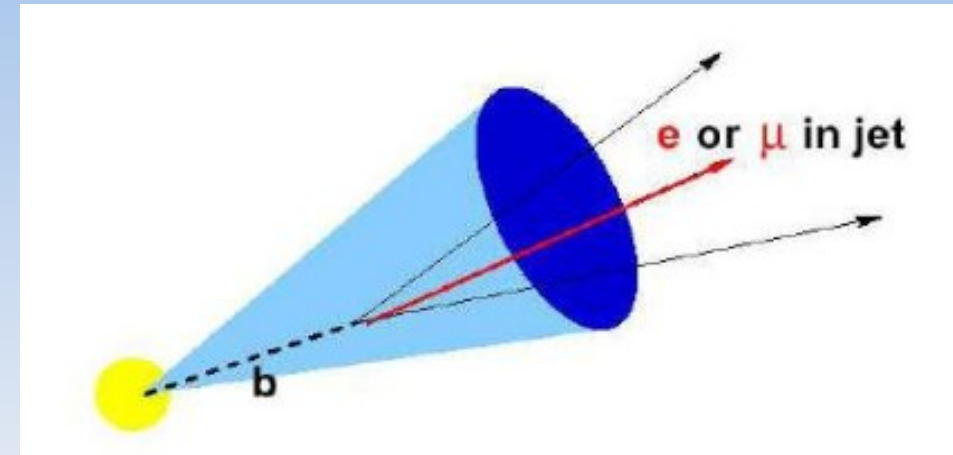


La mistag rate aumenta con l'energia dei jet

Stesso andamento dell'efficienza, a causa della minore precisione nella ricostruzione di traccia all'aumentare della rapidità

# SLT: Soft Lepton Tag

I leptoni prodotti dal decadimento del b sono “soft” rispetto a quelli da W



Identificazione di elettroni soft:

- Tracce da CTC (Central Tracking Chambers) con  $p_T > 2 \text{ GeV}$ ,  $|\eta| < 0.6$  + CEM (Central ElectroMagnetic Calorimeter) + CES (Central Electromagnetic Showermax) + CPR (Central Pre-Radiator)
- Eliminazione di coppie isolate (Drell-Yan)
- Eliminazione di coppie con massa invariante inferiore a  $0.5 \text{ GeV}$  ( $\gamma \rightarrow ee$ )

Identificazione di muoni soft:

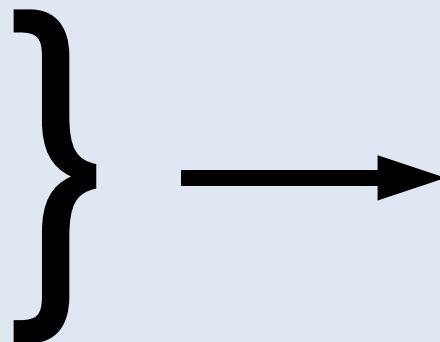
- Tracce da CTC (Central Tracking Chamber) + Camere a muoni per  $p_T > 2 \text{ GeV}$
- Non è richiesta la MIP nei calorimetri → efficienza alta sui muoni non isolati
- Eliminazione di coppie isolate (Drell-Yan)
- Eliminazione di coppie con massa invariante inferiore a  $0.5 \text{ GeV}$  ( $Z, J/\psi \rightarrow \mu\mu$ )

# SLT: background ed efficienza

- Per mantenere alta l'efficienza (evitare leptoni dalle cascate dei jet), viene richiesto  $p_T > 2 \text{ GeV}$
- I leptoni che passano i requisiti dei canali dileptonici e lepton+jet non vengono considerati per il SLT
- L'efficienza del SLT viene calcolata con simulazioni MC
  
- Principali fonti di background: mistagged hadrons, elettroni da  $\gamma \rightarrow ee$ , etc..

Contributi minori da:

- WW, WZ, ZZ (diboson)
- $Z \rightarrow \tau\tau$
- Drell-Yan



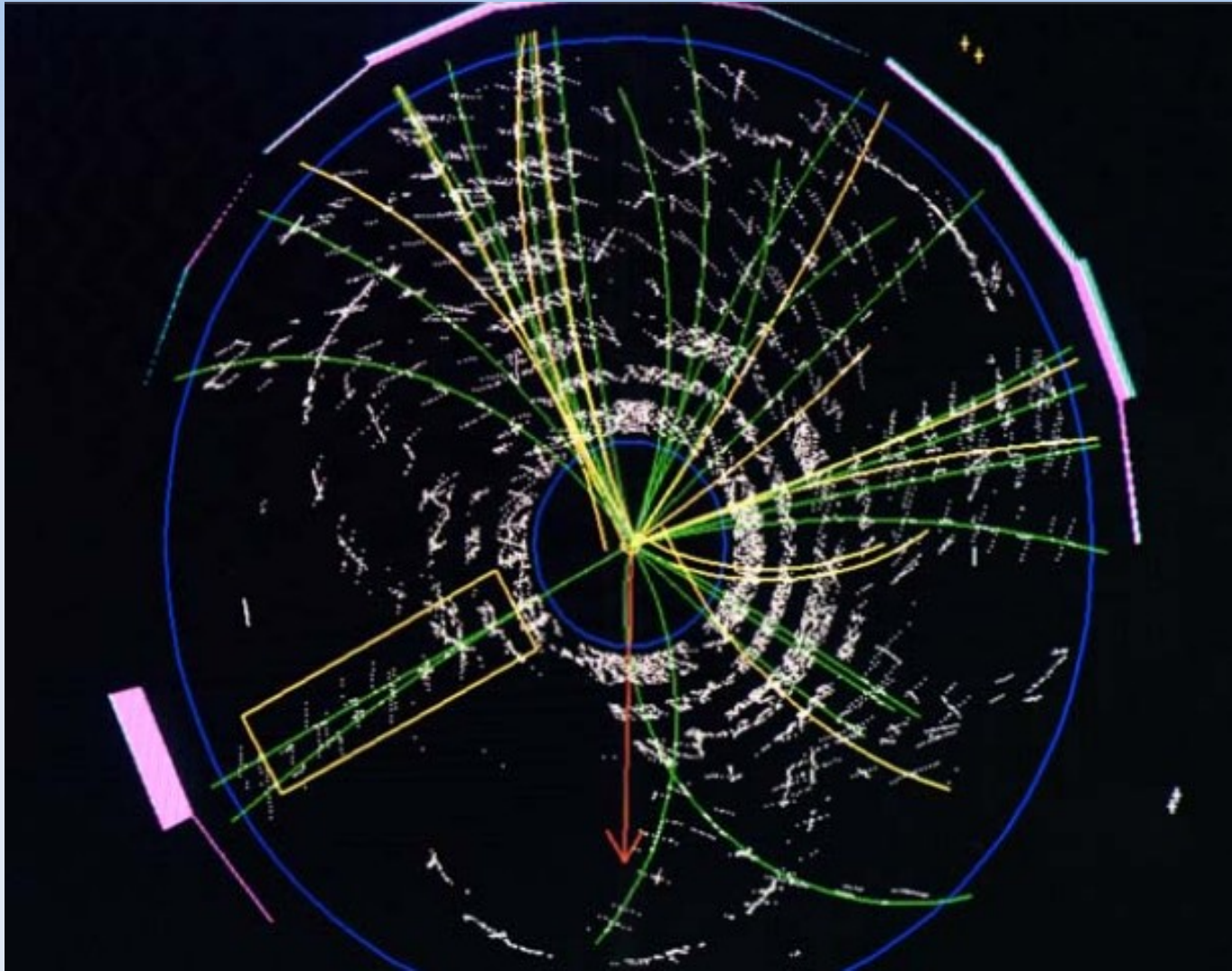
Risultato  
efficienza SLT:  
 $(16 \pm 2)\%$

# Fluttuazioni del background

Evidenza del top  $\leftrightarrow$  probabilità che i segnali non siano fluttuazioni di background

- Si confronta il numero di eventi “buoni” con il numero di eventi attesi per il background
- Si considera il numero di eventi di background attesi ( $N_{\text{backgr}} \pm \sigma_{N_{\text{backgr}}}$ ) come il valore medio di una distribuzione di Poisson, convoluto con una gaussiana di larghezza  $\sigma_{N_{\text{backgr}}}$
- Si calcola di conseguenza la probabilità che il background fluttui fino al segnale
- Se la probabilità è piccola, c'è evidenza di produzione di top...

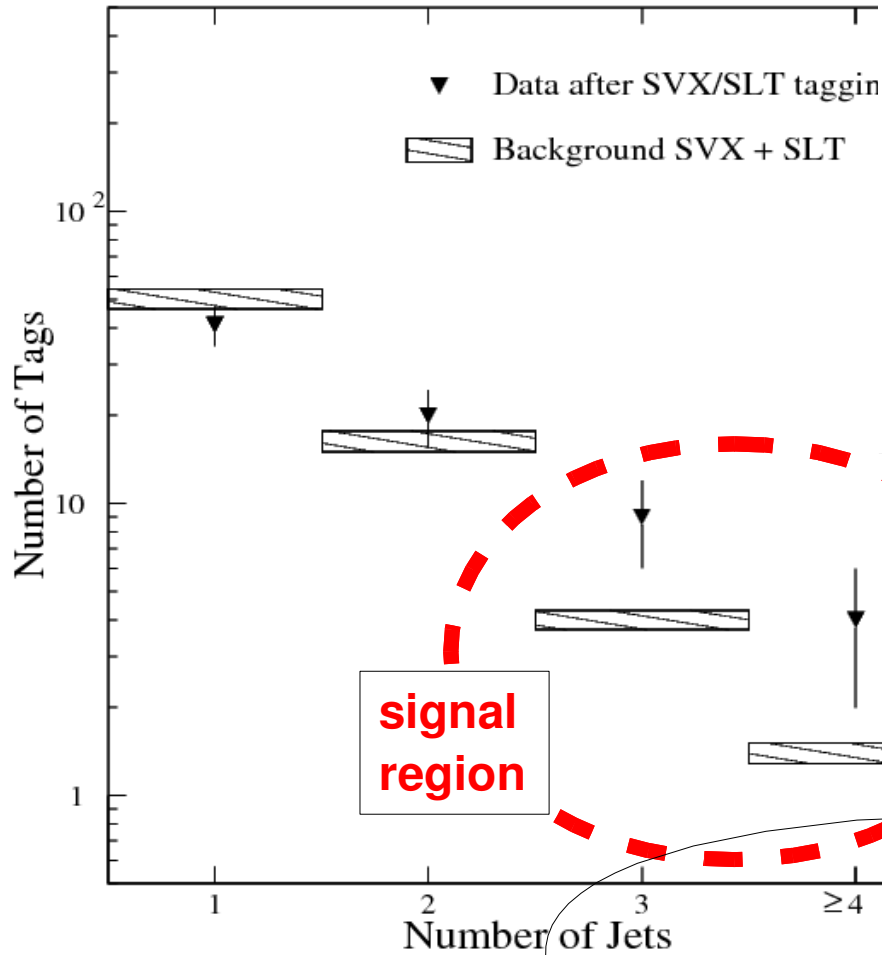
# CDF work in progress, 1992 → 1995



Waiting for results...



# Finally, top evidence!



Channel:	Dilepton	SVX	SLT
$N_{\text{expected}}, M_{\text{top}} = 120 \text{ GeV}/c^2$	$3.7 \pm 0.6$	$7.7 \pm 2.5$	$6.3 \pm 1.3$
$N_{\text{expected}}, M_{\text{top}} = 140 \text{ GeV}/c^2$	$2.2 \pm 0.2$	$4.8 \pm 1.7$	$3.5 \pm 0.7$
$N_{\text{expected}}, M_{\text{top}} = 160 \text{ GeV}/c^2$	$1.3 \pm 0.1$	$2.7 \pm 0.9$	$1.9 \pm 0.3$
$N_{\text{expected}}, M_{\text{top}} = 180 \text{ GeV}/c^2$	$0.68 \pm 0.06$	$1.4 \pm 0.4$	$1.1 \pm 0.2$
Total Background	$0.56^{+0.25}_{-0.13}$	$2.3 \pm 0.3$	$3.1 \pm 0.3$
Observed Events	2	6	7

Table 2: Number of  $t\bar{t}$  events expected assuming the theoretical cross section, and the number of candidate events observed with expected backgrounds.

2 eventi dilepton, background atteso  $0.56^{+0.23}_{-0.13} \rightarrow P_{\text{DIL}} = 12\%$

6 eventi SVX-tagged, background atteso  $2.3 \pm 0.3 \rightarrow P_{\text{SVX}} = 3.2\%$

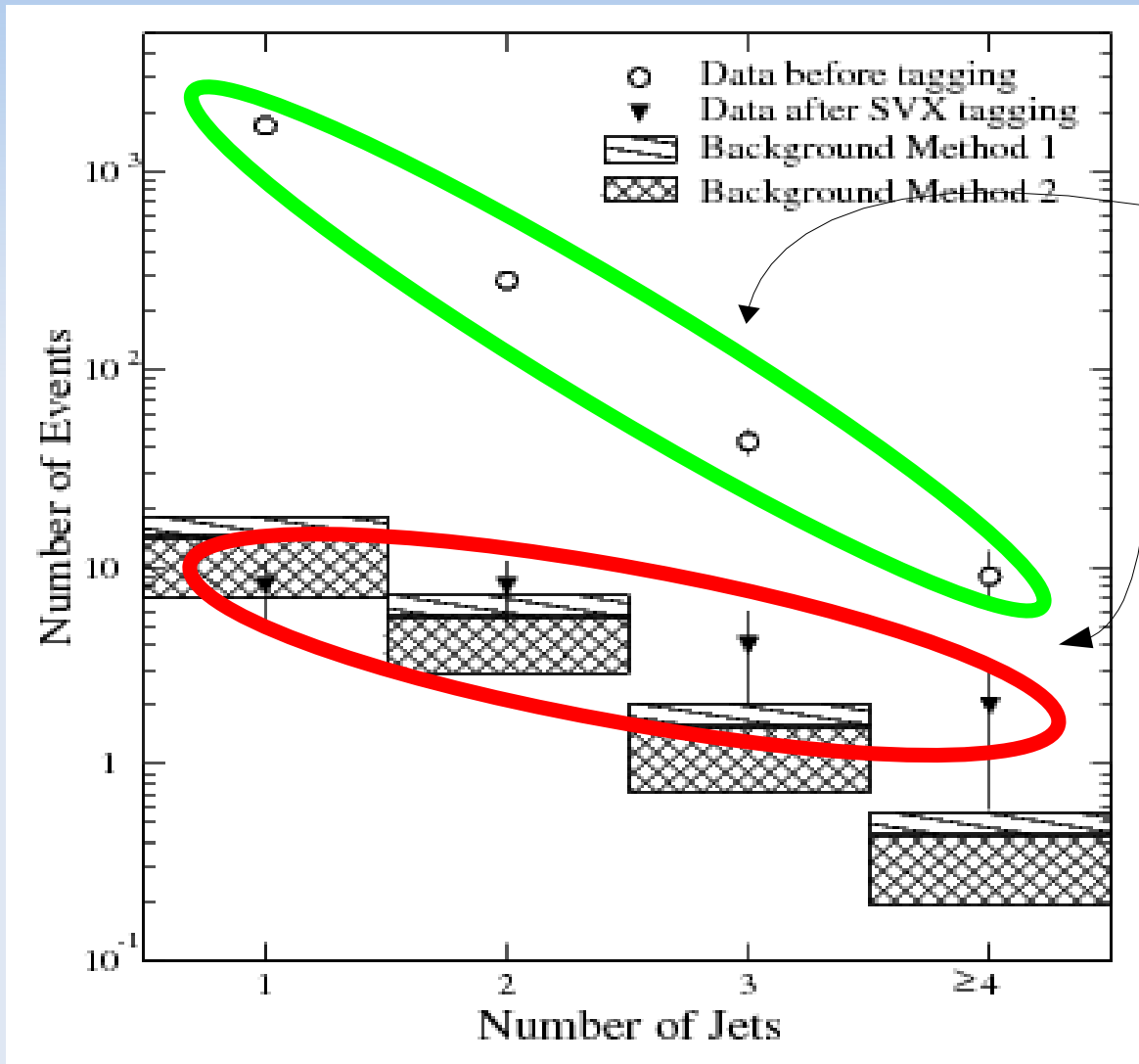
7 eventi SLT-tagged, 3 dei quali sono anche SVX-tagged, background atteso  $3.1 \pm 0.3 \rightarrow P_{\text{SVX}} = 4.1\%$

Canale lepton+jet

Probabilità combinata, deve tener conto delle diverse probabilità per i double tagged events  $\rightarrow$  simulazioni MC  $\rightarrow$  risultato  $P_{\text{combined}} = 0.26\%$ , corrispondente a un eccesso di

2.8  $\sigma$  per una distribuzione gaussiana

# Per completezza, l'importanza del b-tagging



Prima del b-tagging

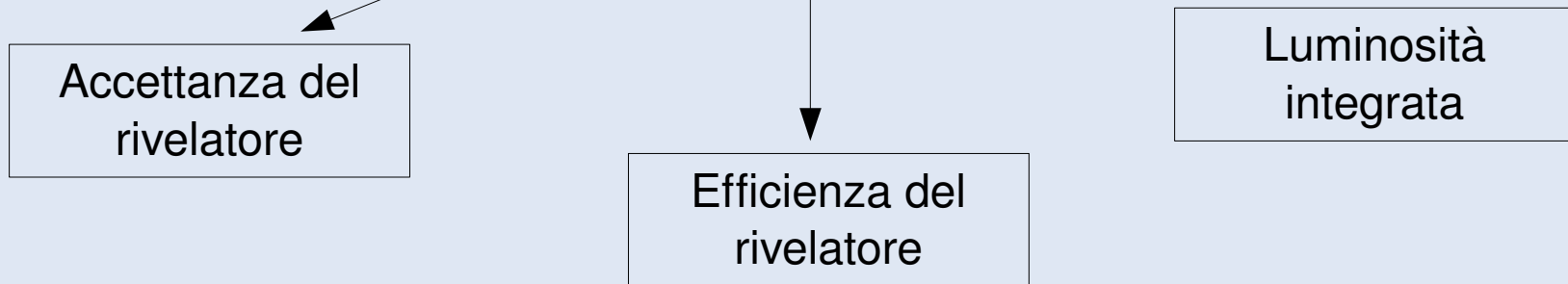
Dopo il b-tagging

Senza il b-tagging il segnale sarebbe completamente coperto dal fondo

# Sezione d'urto

- Assumendo che l'eccesso di segnale rispetto al fondo sia dovuto effettivamente a produzione di coppie  $t\bar{t}$ , è immediato calcolare la sezione d'urto:

$$\sigma = \frac{\#events - \#background}{A \times \epsilon \times \int L dt}$$



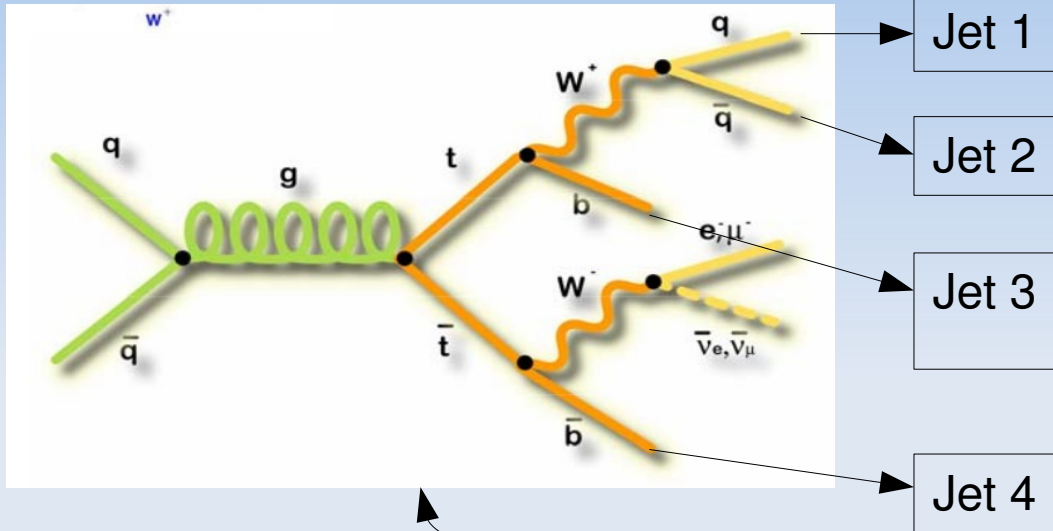
Risultati per  $pp \rightarrow t\bar{t}$ :

$$\bullet \sigma = 13.9^{+6.1}_{-4.8} \text{ pb}$$

Compatibile  
entro l'errore  
con il valore  
aspettato

$$(\text{RUNII: } \sigma = 6.8^{+3.6}_{-2.5} \text{ pb})$$

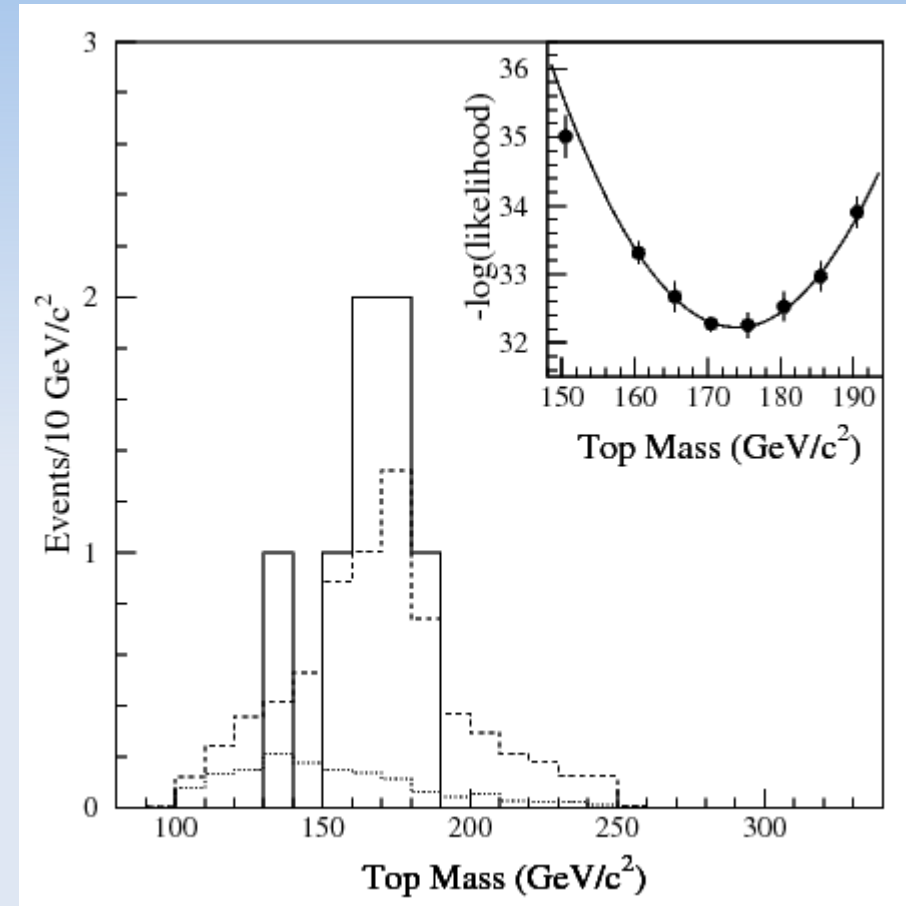
# Spettro di massa



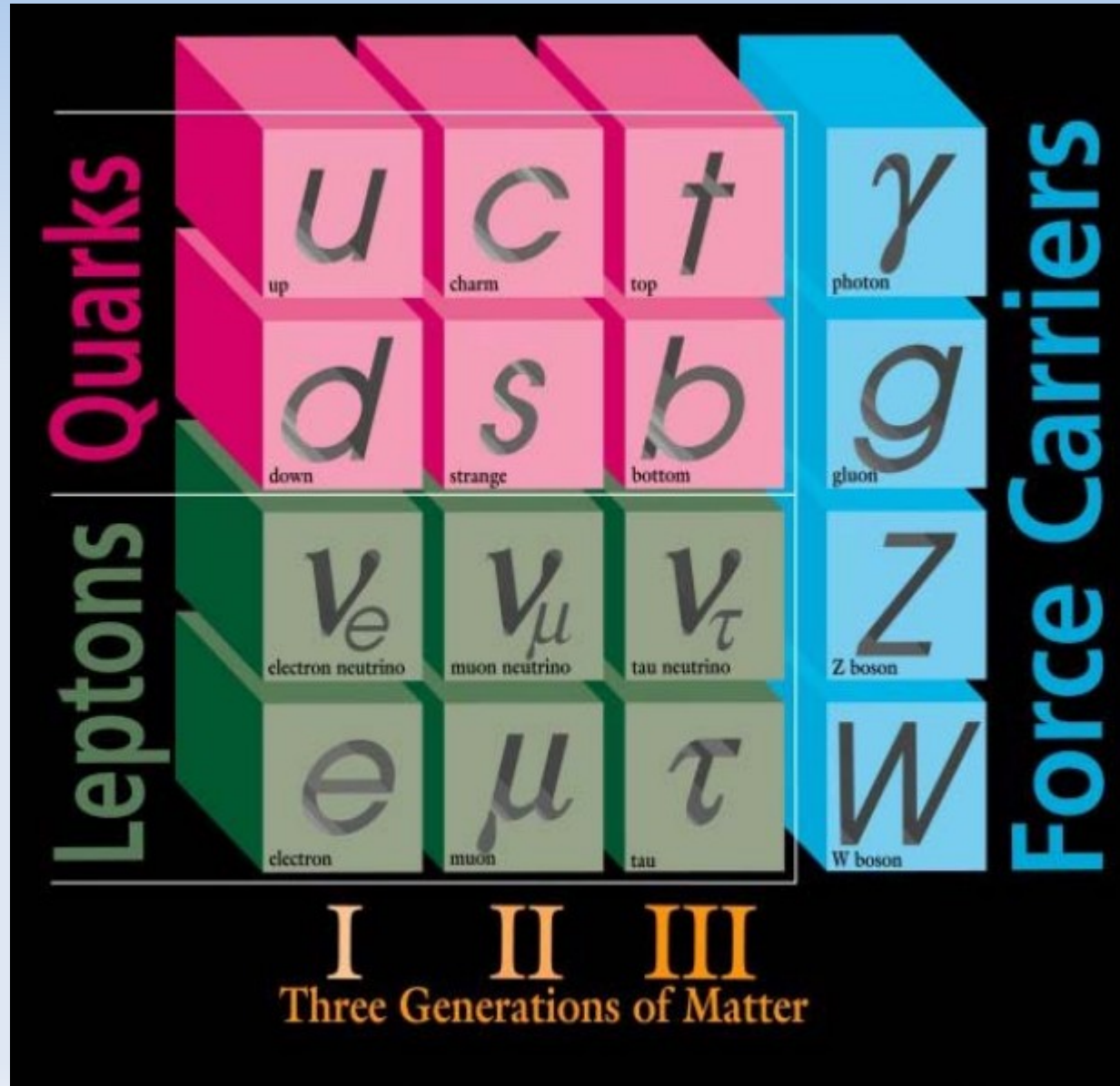
Sempre nell'ipotesi  $pp \rightarrow tt$ , posso ricavare la massa del top da un fit su ognuno dei 7 eventi a 4 jet del canale semileptonico

Dallo spettro di massa ricavo  $M_t = (174 \pm 10^{+13}_{-12}) \text{ GeV}$

Test del  $\chi^2$  sui valori sperimentali di  $M_t$  e  $\sigma(tt)$  con quelli attesi per l'andamento di  $\sigma(tt)$  vs  $M_t$   
 $\rightarrow$  i risultati sono compatibili ad un livello di confidenza del 13% ( $1.5 \sigma$ )



# 11 quark top



# Riferimenti

- *TDR* dell'esperimento CDF
- F. Abe et al., *Evidence for Top Quark Production in  $p\bar{p}$  Collision at  $\sqrt{s} = 1.8$  TeV*, FERMILAB PUB-94/116\_E, CDF/PUB/TOP/PUBLIC/2561, June 13, 1994
- C. Dionisi, Appunti del corso di Fisica Nucleare e Subnucleare 2