

LA SCOPERTA DEL QUARK TOP A CDF

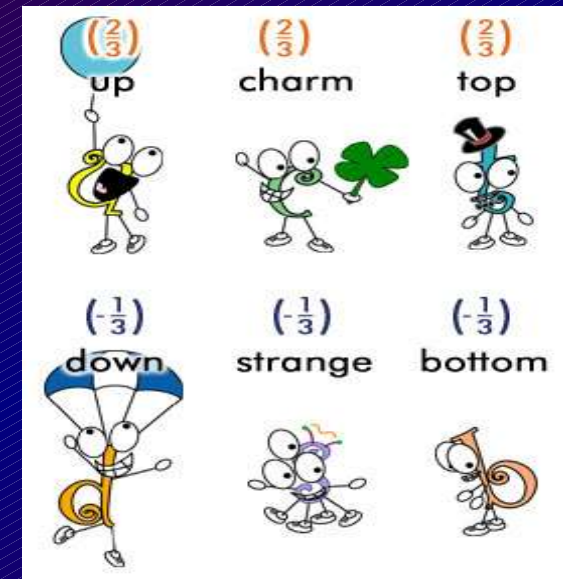


Fisica Nucleare e subnucleare II – Prof. Dionisi

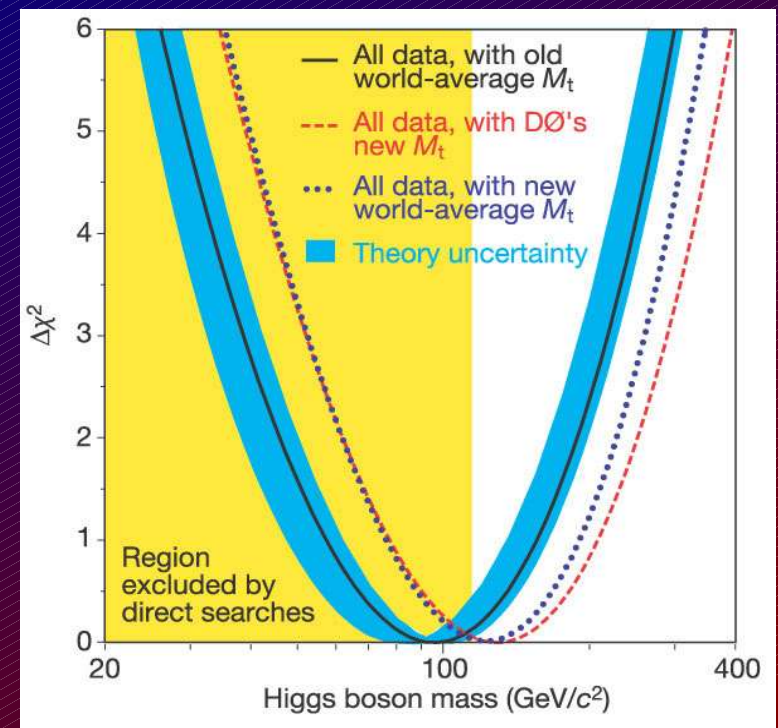
Alessandro Palma

L' IMPORTANZA DI SCOPRIRE IL QUARK TOP

- SM: partner del doppietto $SU(2)_L$ di isospin debole ($I_3 = +1/2$, $Q = +\frac{2}{3}e$) del quark b



- SM: Massa del top legata alla massa dell' Higgs (da correzioni radiative)



Alcune proprietà del quark top

- Decade debole quasi solo verso il b

$$V_{tb} = 0.999 \text{ @90\% CL (da PDG)} \longrightarrow g_{tb} \simeq g_W$$

- Non adronizza

- Per formare un adrone (es.*toponium*) serve un tempo $O(10^{-22} \text{ s})$
- $\Gamma = \alpha_W m_t = (g^2/4\pi) m_t = (4.2 * 10^{-3}) * (180 \text{ GeV}) =$
 $= 1 \text{ GeV}$ (approx.)
- $\tau_{\text{top}} = \Gamma^{-1} = O(10^{-25} \text{ s}) \longrightarrow$ vita media troppo breve !

Misura indiretta di M_{top} a LEP

- Correzioni NLO con *top loop* virtuali nel propagatore dello Z^0
- Valore finale:

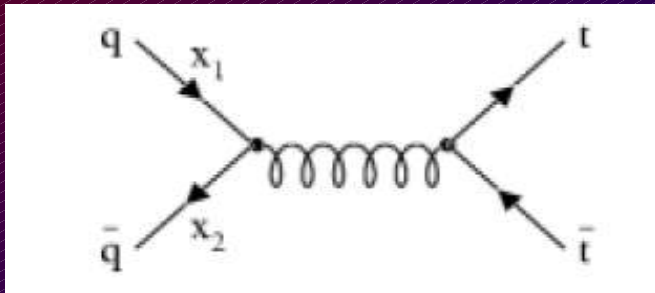
$$171.5^{+11.9}_{-9.4} \text{ GeV}$$

NEL 1995 CDF MISURA LA MASSA DEL TOP
IN MANIERA DIRETTA!

Produzione del top

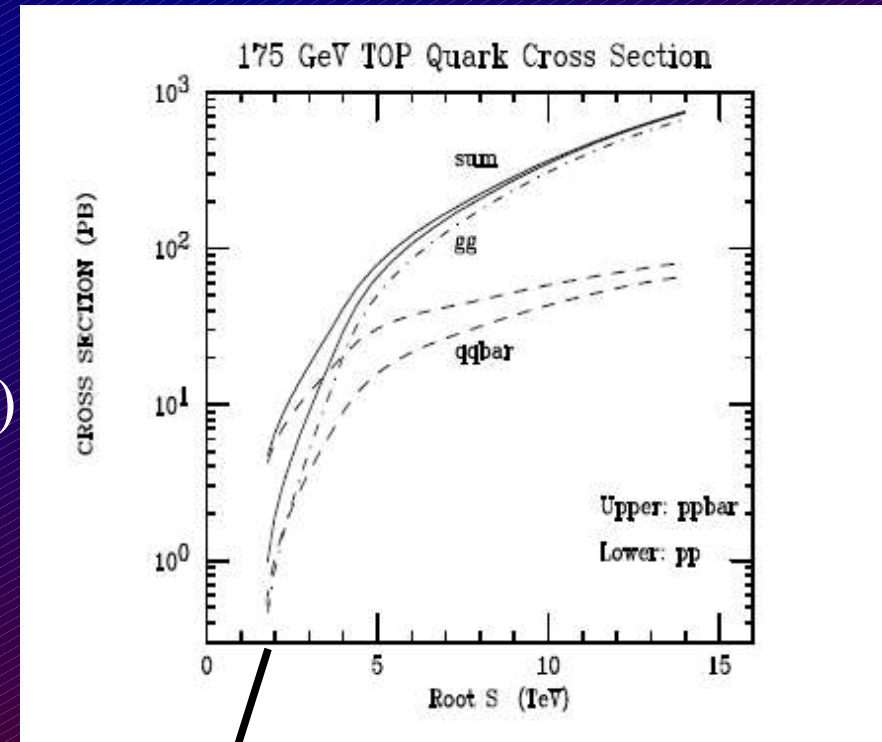
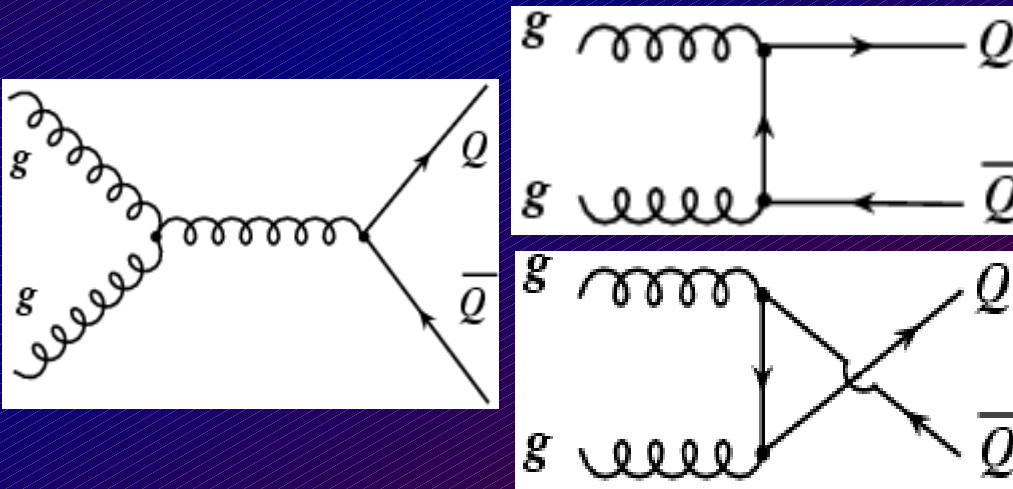
Produzione in collider adronici (Tevatron, LHC...)

(a) **light quark annihilation** (90% @ Tevatron, 13% @ LHC)



$$\sqrt{s_{eff}} = \sqrt{s x_1 x_2} \geq 2 m_{top}$$

(b) **gg fusion** (10% @ Tevatron, 87% @ LHC)



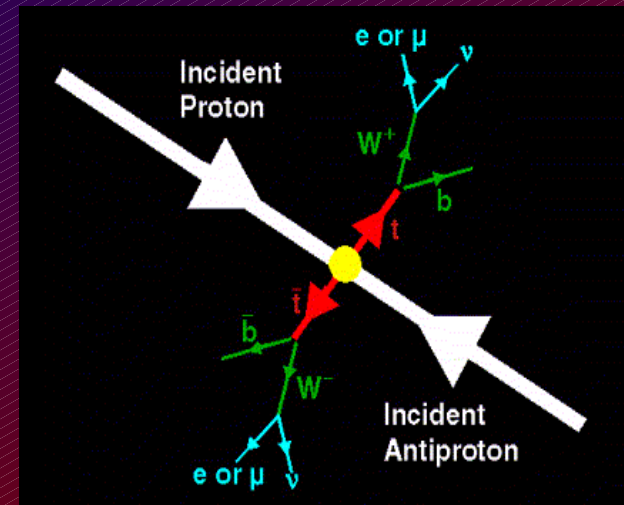
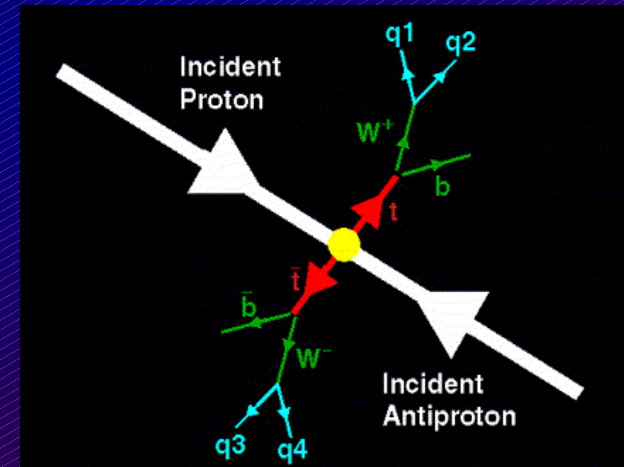
$\sigma(ttbar) = 6.2 \pm 1.2 \text{ pb @ Tevatron Run 1}$

Canali per misura diretta di M_{top} (I)

Unico decadimento debole (vd. CKM) è: $tt \rightarrow WWbb$

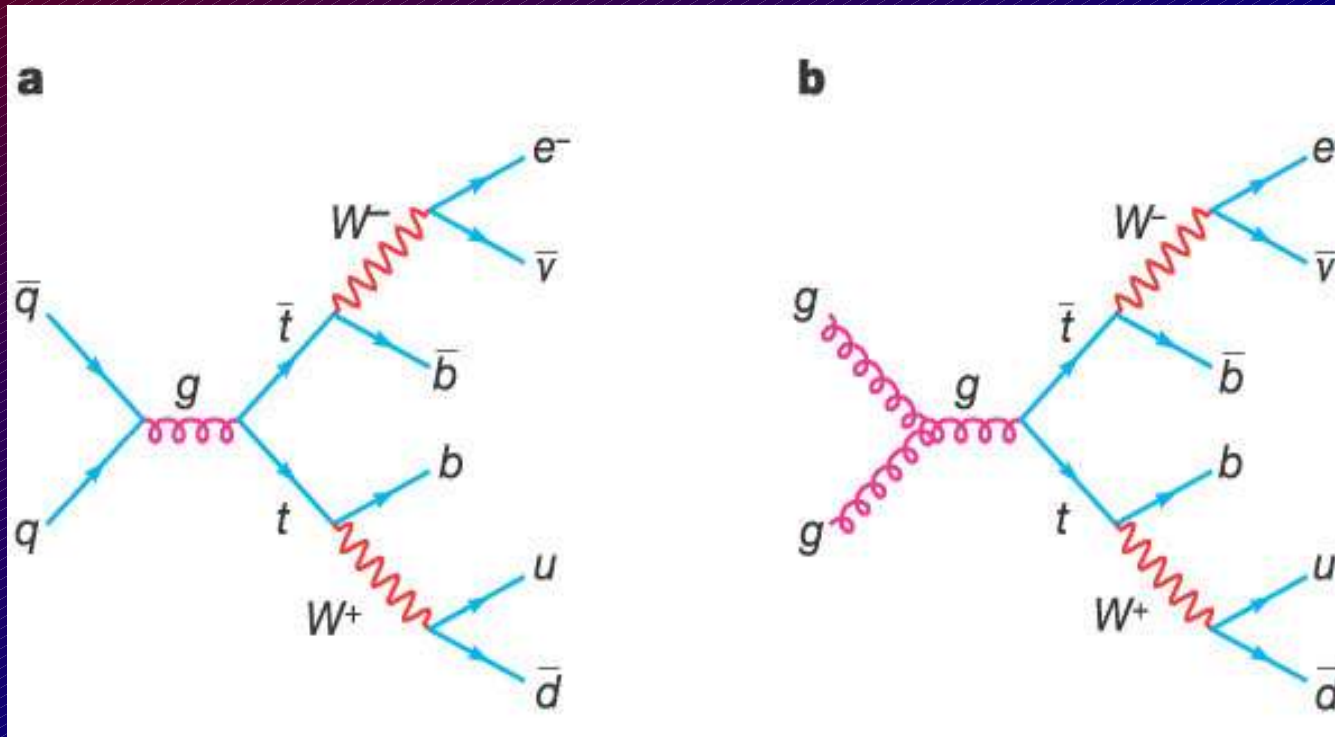
Poi...

- All jets events: entrambi i W in quark + antiq.
- Dilepton events: entrambi i W semileptonico
($e\nu, \mu\nu, \tau\nu$)



Canali per misura diretta di M_{top} (II)

- Lepton+jets events: un W decade in quark-antiquark, l'altro leptonic



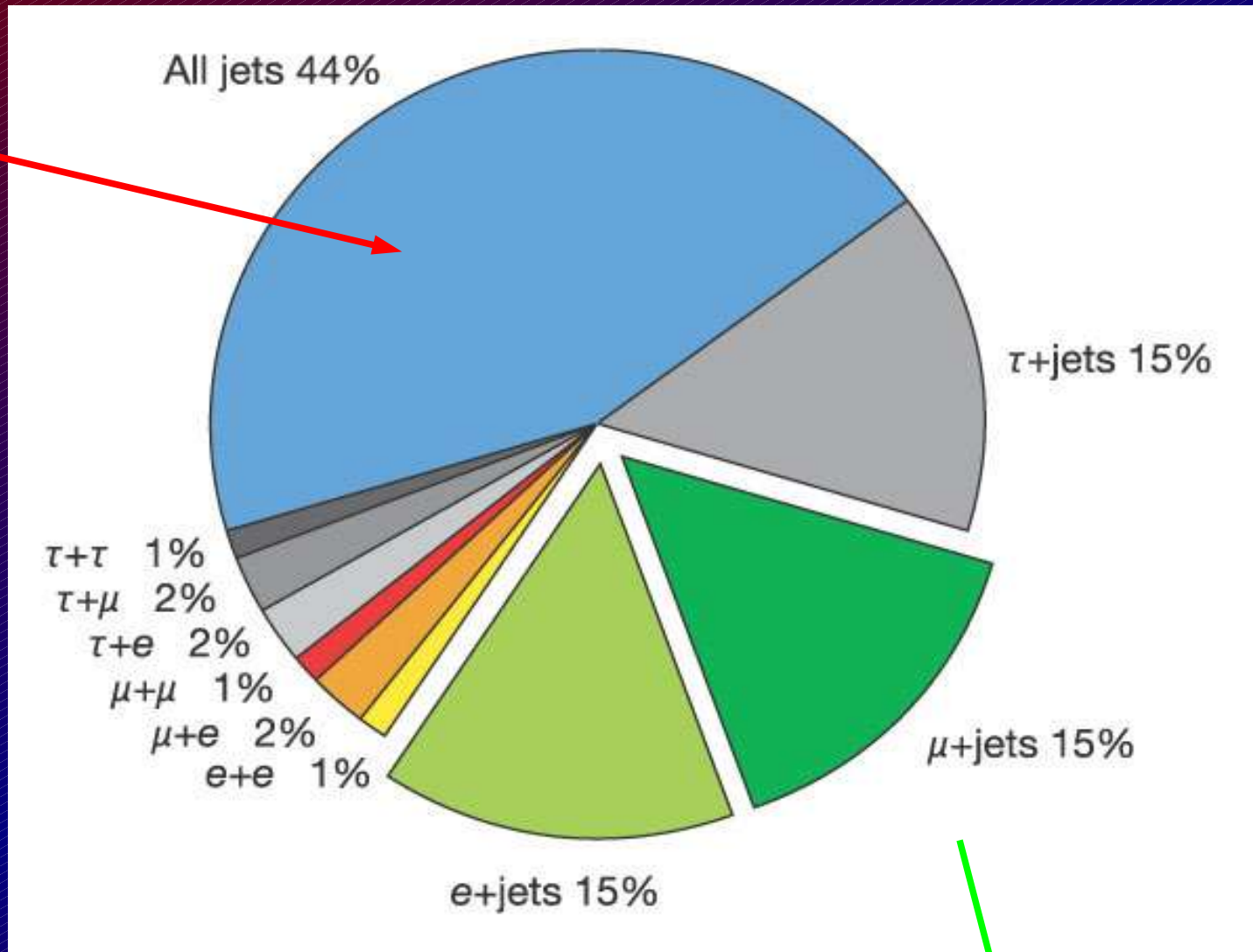
SEGNATURA:

- $e(\mu)$ molto energetico
- 2 b-jets
- 2 light-quark jets
- Missing transverse energy

Questo canale permette la più accurata misura di massa del top!!!

Branching ratio dei vari canali

Problema:
QCD
multijet
background



Universalità leptonica CC

Canali e signature

<u>Channel</u>	<u>BR</u>	<u>Signature</u>
Di-lepton (ee/e μ / $\mu\mu$)	5%	2 high- P_T leptons + 2 b-jets + missing E_T
Lepton (e/μ) + jet	30%	1 high-P_T lepton + 4 jets (2b) + missing E_T
All hadronic	44%	6 jets, no missing E_T

Ricostruzione dei jet

Algoritmo iterativo di cono con raggio ΔR :

$$\Delta R \equiv \sqrt{\Delta\eta^2 + \Delta\phi^2} = 0.4.$$

- Si considerano le *tower* del calorimetro con deposito $E_T > 1$ GeV
- Si schematizzano *preclusters* di insiemi di tower contigue (max. 7 x 7) con depositi decrescenti di E_T
- Per ogni precluster, si trova il baricentro con media pesata in E_T includendo tutte le tower con depositi $E_T > 100$ MeV a distanza max. dal baricentro $\Delta R = 0.4$.
- (4) Il segmento vertice primario-baricentro diventa l'asse del jet.
- (5) Si reitera finchè la configurazione di clusters è stabile.

Se 2 jets si sovrappongono ?

Se $\geq 75\%$ della E_T del jet più piccolo è nella regione di sovrapposizione, “fondere” i jet; altrimenti, assegnare l'energia nella regione di sovrapposizione al jet più vicino..

$$E_T^{jet} \equiv \sum_i E_T^i$$

$$\eta^{jet} \equiv \left(\sum_i E_T^i \eta_i \right) / E_T^{jet}$$

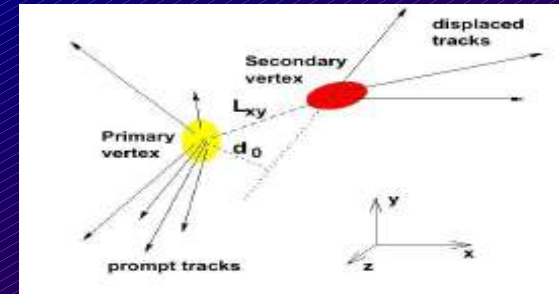
$$\phi^{jet} \equiv \left(\sum_i E_T^i \phi_i \right) / E_T^{jet}$$

$$E_T^{jet} = E \sin\theta^{jet}$$

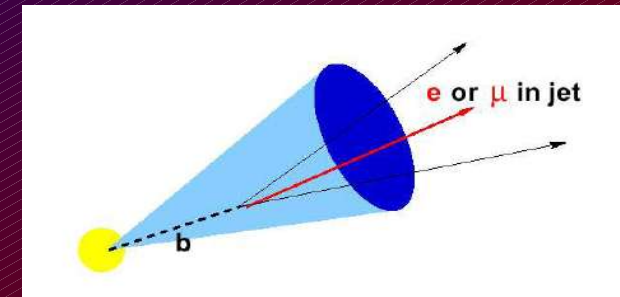
$$\theta^{jet} = \tan^{-1} \left[\frac{\sqrt{\left(\sum_i E_x^i \right)^2 + \left(\sum_i E_y^i \right)^2}}{\sum_i E_z^i} \right]$$

Identificazione di b-jets

- Importante stabilire la presenza di 2 b-jets (*b-tagging*)
- 2 algoritmi di *b-tagging*:
 - **Algoritmo SVX** (*Silicon Vertex*): cerca vertice secondario all'interno di jet con $E_T > 15 \text{ GeV}$, a distanza $R < 0.4$ dall'asse del cono del jet $\epsilon_{\text{tag}} = 48\%$

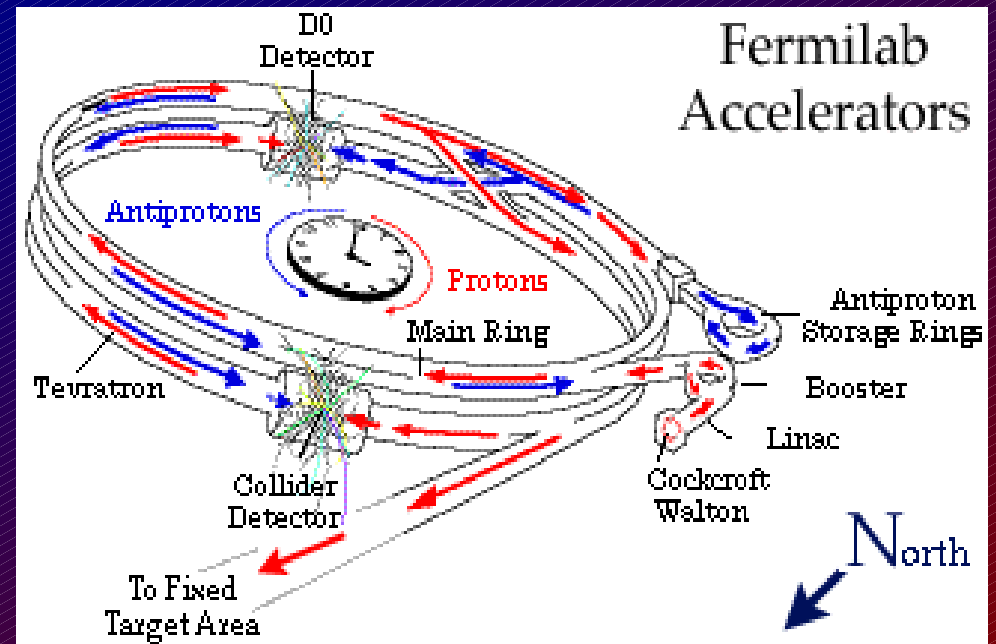


- **Algoritmo SLT** (*Soft Lepton Tag*): cerca un leptone che possa provenire da un jet da quark b, ovvero $P_T > 2 \text{ GeV}/c$ e $R < 0.4$ dall'asse di jets con $E_T > 8 \text{ GeV}$ $\epsilon_{\text{tag}} = 15\%$



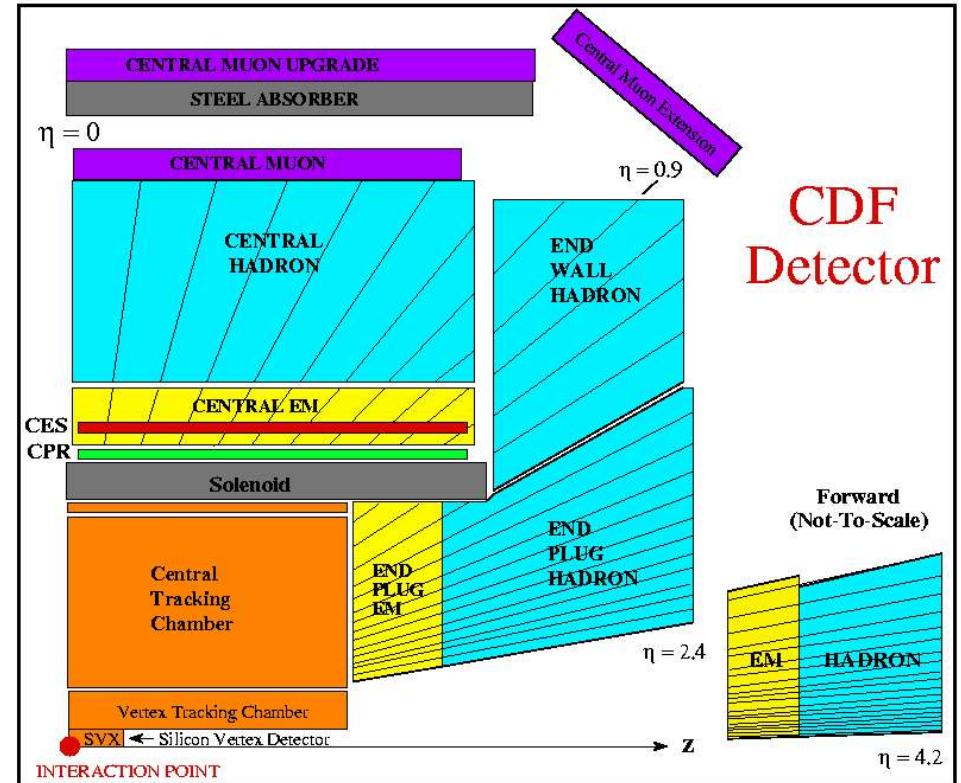
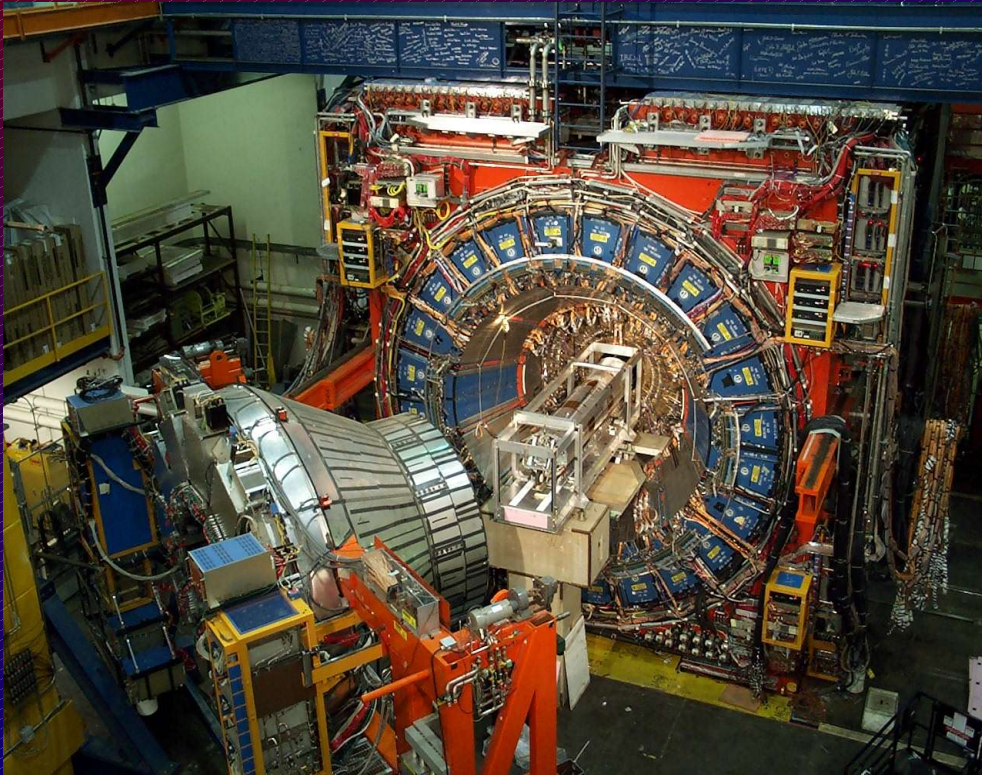
Tevatron

- Collisionatore ppbar a Fermilab (Batavia, Chicago)
- $\sqrt{s} = 1.96 \text{ TeV}$ (1.8 TeV Run I)
- Numero di bunches: 36 (6 in Run I)
- Massima luminosità raggiunta: $3 \cdot 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ($9.0 \cdot 10^{30} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ in Run I)



CDF: generalità

Collider Detector at Fermilab



Schema del detector CDF in Run I

CDF: apparati di rivelazione

- Triplice sistema di tracking ($B = 1.4$ T solenoidale) :
 - CTC (Central Tracking Chamber): camera a drift cilindrica (raggio:1.3m, lunghezza: 3.2m) $|\eta| < 1$ ($40^\circ < \theta < 140^\circ$)
 - TPC (Time Projection Chamber) $|\eta| < 3.5$ ($3.4^\circ < \theta < 176.6^\circ$)
 - SVX (Silicon Vertex Detector): 4 strati di rivelatori Si a 3.0, 4.2, 6.8 e 7.9 cm dalla beamline $|\eta| < 1$

$$\sigma(p_T)/p_T = 0.09\% * p_T \text{ (GeV/c)}$$

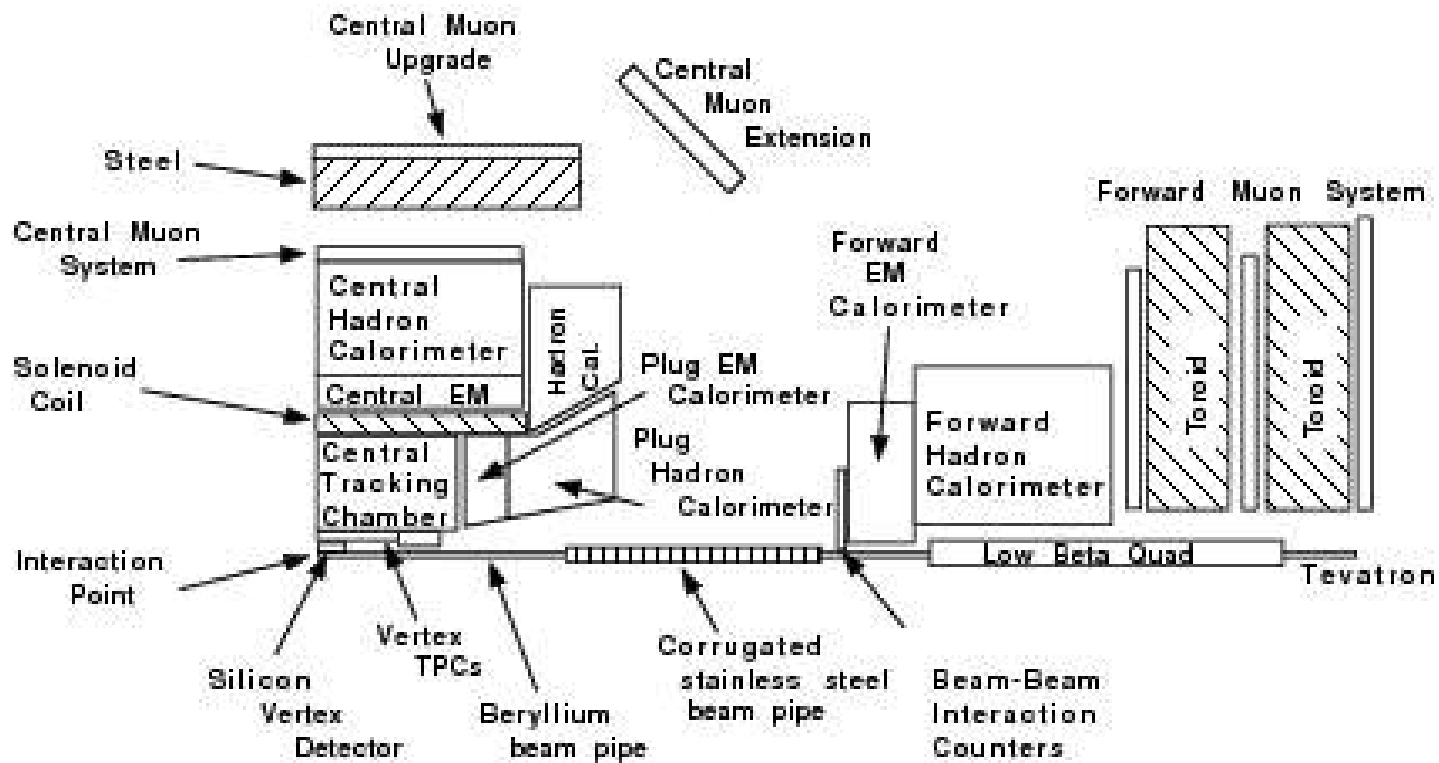
- Triplice struttura di camere per muoni:
 - CMU (Central Muon System) $|\eta| < 0.6$ ($57^\circ < \theta < 123^\circ$)
 - CMP (Central Muon Upgrade) $|\eta| < 0.6$
 - CMX (Central Muon Extension) $0.6 < |\eta| < 1$

- Calorimetri em e adronici (segmentati) : \longrightarrow

- CEM, PEM, FEM
- CHA, WHA, PHA, FHA

Detector	η range	Energy resolution
CEM	$ \eta < 1.1$	$13.5\%/\sqrt{E_T} \oplus 2\%$
PEM	$1.1 < \eta < 2.4$	$22\%/\sqrt{E_T} \oplus 2\%$
FEM	$2.2 < \eta < 4.2$	$26\%/\sqrt{E_T} \oplus 2\%$
CHA	$ \eta < 0.9$	$50\%/\sqrt{E_T} \oplus 3\%$
WHA	$0.7 < \eta < 1.3$	$75\%/\sqrt{E_T} \oplus 4\%$
PHA	$1.3 < \eta < 2.4$	$106\%/\sqrt{E_T} \oplus 6\%$
FHA	$2.4 < \eta < 4.2$	$137\%/\sqrt{E_T} \oplus 3\%$

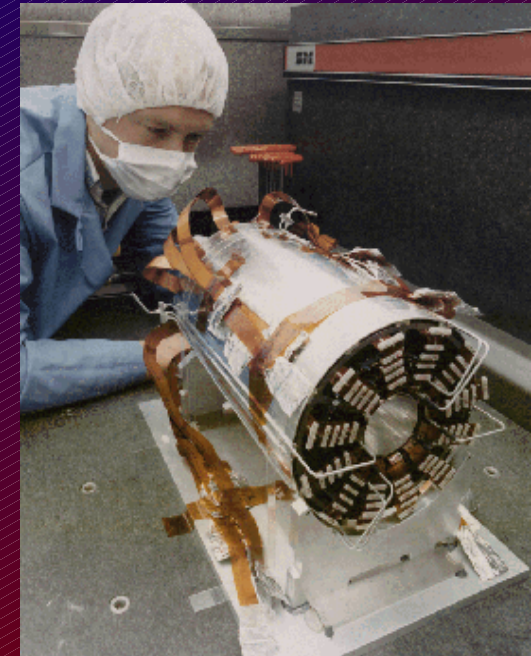
CDF : schema del detector



Silicon Vertex Detector (I)

- SVX, sostituito dopo 19 pb-1 con una versione *radiation hard* (SVX')
- Vertexing in 2D (3D in Run II) --> solo piano trasverso
- Struttura base: 4 layer di strips di larghezza 60 μm
- Incertezza sul punto $O(10 \mu\text{m})$ --> sui vertici dipende dal n. di tracce!

- Principio di funzionamento:
 - × giunzione p-n Si polarizzata in inversa
 - × regione di svuotamento
 - × energia incidente crea EHPs (1 EHP/3.81 eV @ 77 K)



Silicon Vertex Detector (II)

Come si sceglie un candidato di vertice secondario?

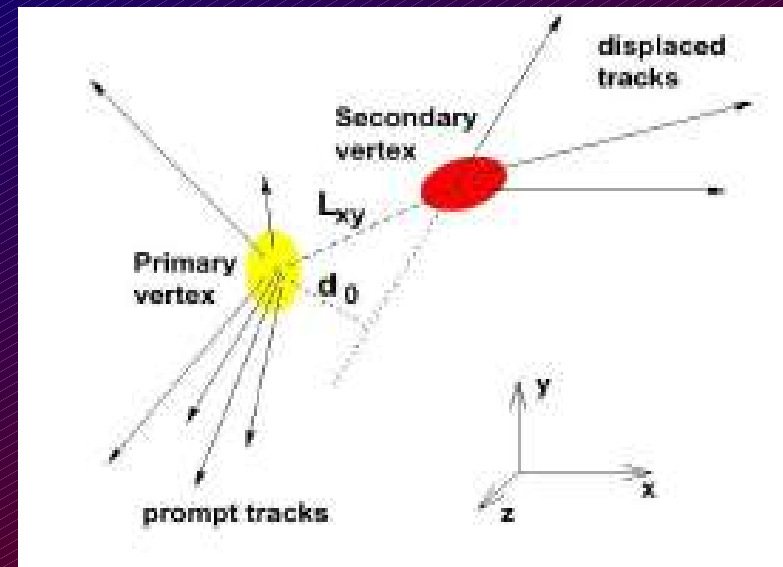
- ✓ Si ricostruisce il vertice primario con un fit pesato delle tracce
- ✓ Quantità determinante: significatività del parametro d' impatto
richiesta $>$ soglia per almeno 3 tracce

$$d_0/\sigma(d_0)$$

Tipicamente :

$$d_0 = O(100 \mu\text{m}) \quad (c\tau_b = 450 \mu\text{m})$$

$$\sigma(d_0) = 50 \mu\text{m} \quad (35\mu\text{m da beam spot})$$



Silicon Vertex Detector (III)

e + 4 jet event

40758_44414

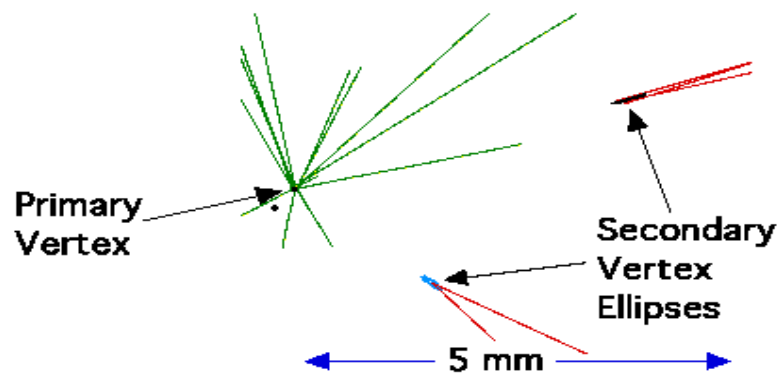
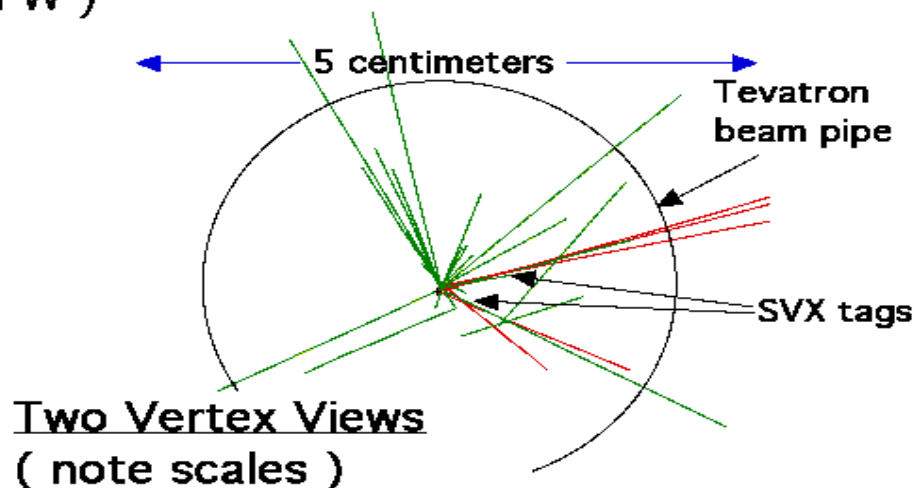
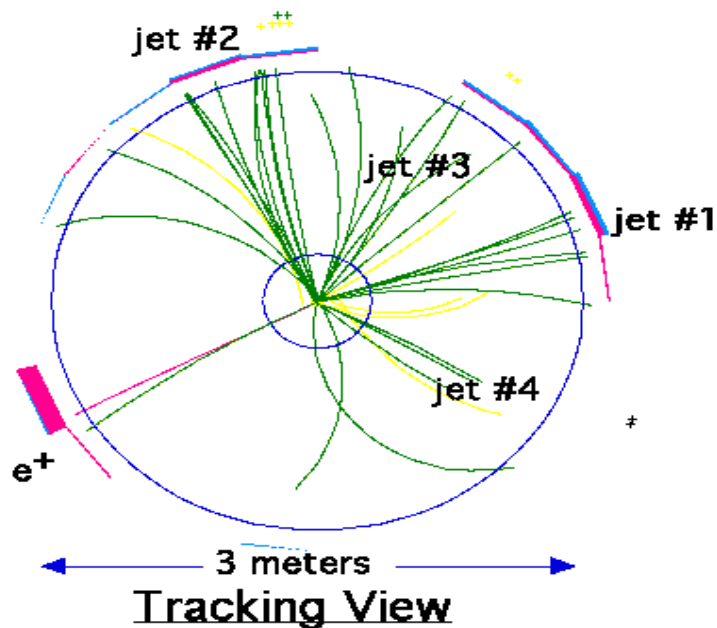
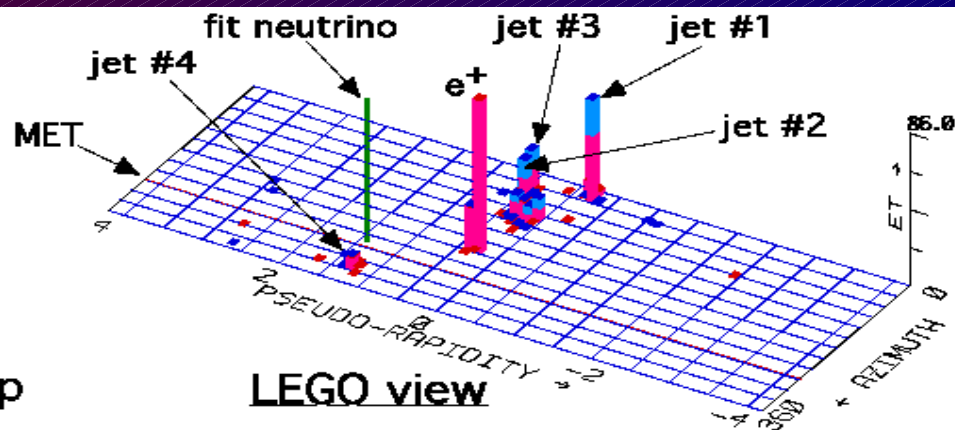
24-September, 1992

TWO jets tagged by SVX

fit top mass is $175 \pm 10 \text{ GeV}/c^2$

e^+ , Missing E_T , jet #4 from top

jets 1,2,3 from top (2&3 from W)



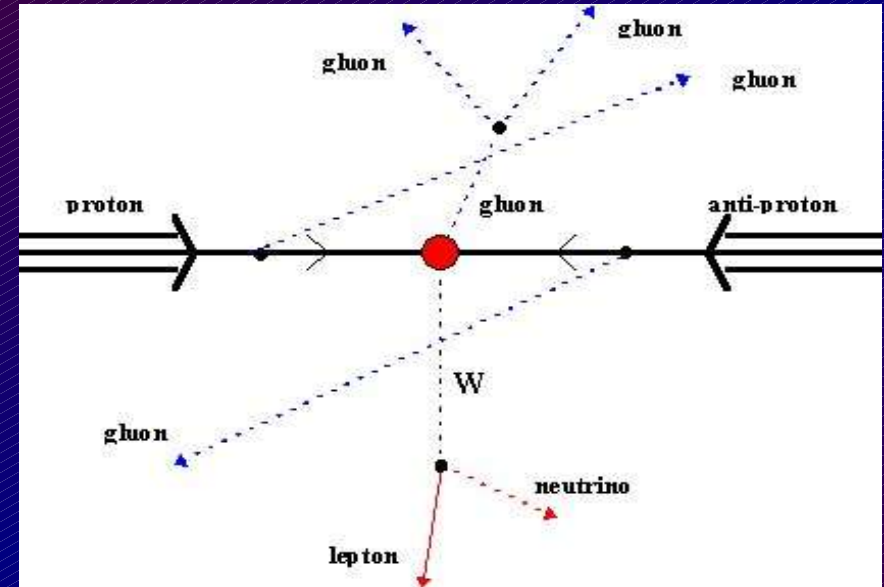
Run della prima misura di massa del top

- Tevatron: **Run I** ($\sqrt{s}=1.8 \text{ TeV}$)
- 2 periodi di presa dati:
 - Run 1a: **Sett. 1992 - giugno 1993** (19.7 pb^{-1})
 - Run 1b: **Febb. 1994 – luglio 1995** (86.3 pb^{-1})
- Luminosità integrata totale: **106 pb⁻¹**

Principali fondi

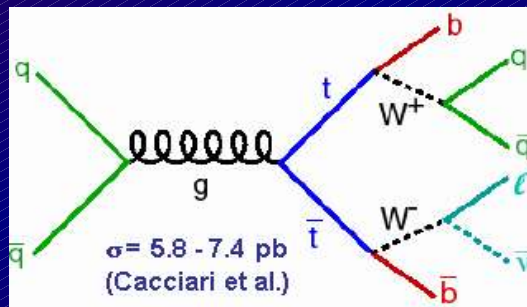
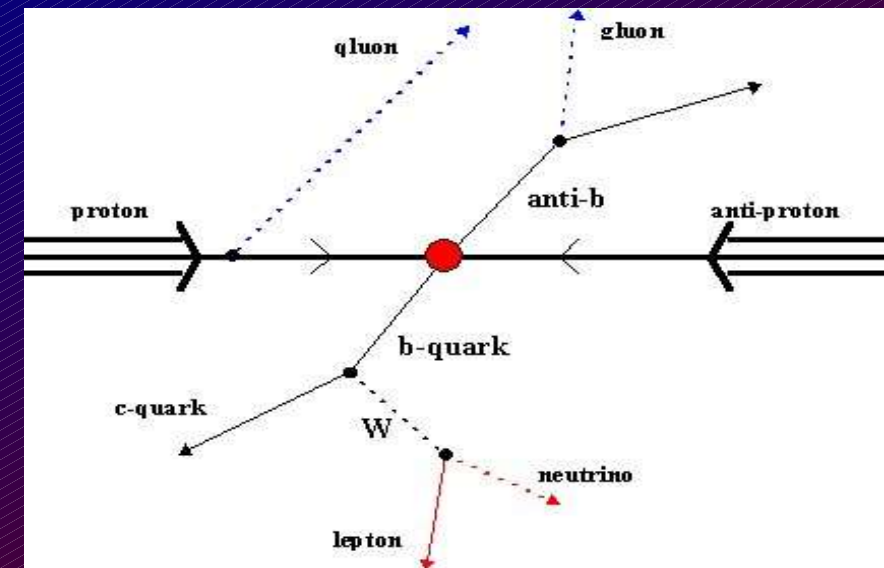
- W + jets

- $q\bar{q} \rightarrow W g g g g$ ($W \rightarrow l\nu$)
- $q\bar{q} \rightarrow W g g q\bar{q}$ ($W \rightarrow l\nu$)



- b pair + jets

- $q\bar{q} \rightarrow g g W q\bar{q}$

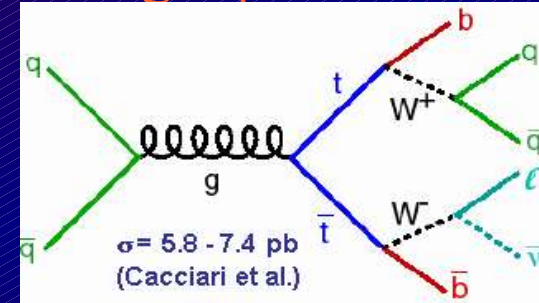


= il segnale!

→ TAGLI CINEMATICI per migliorare il rapporto S/B

Tagli sulla cinematica del lepton +jets (I)

SEGNATURA : 1 high- P_T lepton+ 4 jets (2b) +missing E_T



- (1) Un e (μ) con $P_T > 20 \text{ GeV}/c$ e $|\eta| < 1$, isolato da jets
- (2) Missing $E_T > 20 \text{ GeV}$
- (3) Esclusi i candidati di evts puramente leptonici ($WW \rightarrow 2l2\nu$)
- (4) Esclusi i candidati di eventi con bosoni Z (evts con coppia leptone-antileptone dello stesso flavour, e con massa invariante tra 75 e 105 GeV/c^2)
- (5) Vertice primario entro 60 cm da $z=0.0$ (z = asse dei fasci)
- (6) Presenza di almeno 3 jets con $E_T > 15 \text{ GeV}$ e $|\eta| < 2.0$
- (7) Per eventi con almeno 3 jets che soddisfano il (6), presenza di un ulteriore jet con $E_T > 8 \text{ GeV}$ e $|\eta| < 2.4$
- (8) Si richiede $\chi^2 < 10.0$ (v.dopo)

Tagli sulla cinematica del lepton +jets (II)

Per gli e del punto (1), si vogliono tagliare i fondi dovuti a

- ✓ elettroni generati da *photon conversion* ($\gamma \rightarrow e^+e^-$)
 - ✓ Richiesta di una *matching track* nel SVX
 - ✓ Massa invariante con ogni altra track nel CTC $> 0.5 \text{ GeV}/c^2$
- ✓ Adroni carichi
 - ✓ depositi energia nei calorimetri: HAD / EM $< 5\%$
 - ✓ $E_T/P_T < 1.8$

Tagli sulla cinematica del lepton +jets (III)

Per i μ del punto (1), si vogliono tagliare i fondi dovuti a

- ✓ Adroni carichi che superino il calorimetro adronico
 - ✓ Richiedo che il deposito di energia in HCAL sia quello di una particella al minimo di ionizzazione
- ✓ Muoni cosmici
 - ✓ Constraint sulla traccia: estrapolazione a meno di 3 mm dalla beamline e a meno di 5 cm (lungo z) dal vertice primario

Se ci si limita a questi tagli cinematici, 74% di fondo!

→ ALTRA SELEZIONE : b-tagging

Mass subsamples

- Evts di Classe 1 : esattamente 3 jets con $E_T > 15$ GeV e $|\eta| < 2.0$ ed un jet con $E_T > 8$ GeV e $|\eta| < 2.4$
 - Evts di Classe 2: 4 o più jets con $E_T > 15$ GeV e $|\eta| < 2.0$
- ✓ S/B diverso, maggiore per la Classe 2 dove i jet hanno E_T maggiore

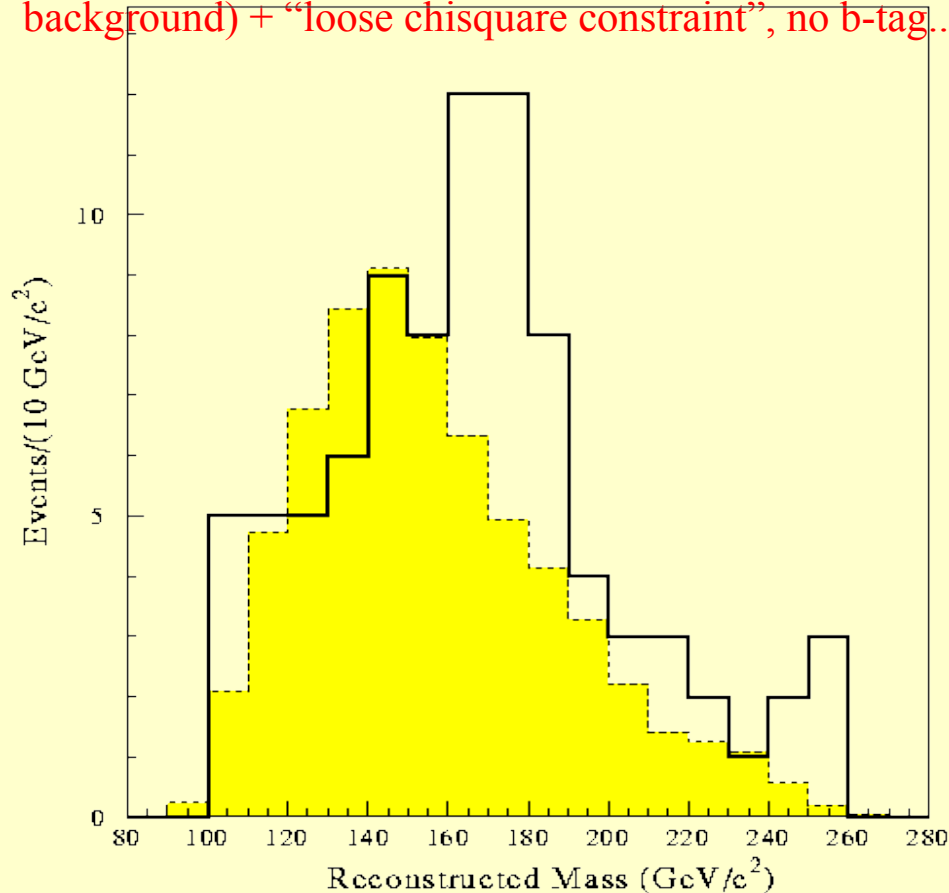
Subsample	Events	S/B	$M_{\text{top}} \pm \Delta M_{\text{stat}}$ GeV/c ²
SVX double	5	25/1	170.1 ± 9.3
SVX single	15	7.5/1	178.0 ± 7.9
SLT	14	2.5/1	142.0_{-14}^{+33}
No tag	42	1/1	180.8 ± 9.0
Combined	76		175.8 ± 4.8

Ricostruzione di M_{top}

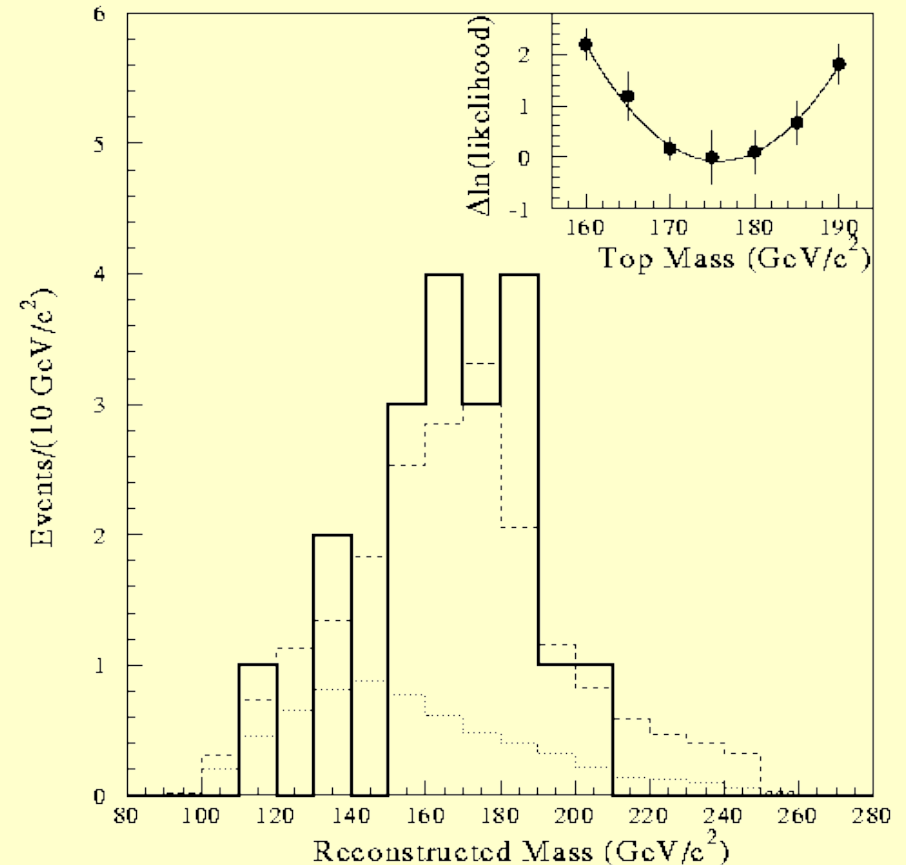
$$\chi^2 = \sum_{l,jets} \frac{(\hat{P}_T - P_T)^2}{\sigma_{P_T}^2} + \sum_{i=x,y} \frac{(\hat{U}'_i - U'_i)^2}{\sigma_{U'_i}^2} + \frac{(M_{l\nu} - M_W)^2}{\sigma_{M_W}^2} +$$

$$\frac{(M_{jj} - M_W)^2}{\sigma_{M_W}^2} + \frac{(M_{l\nu j} - M_t)^2}{\sigma_{M_t}^2} + \frac{(M_{jjj} - M_t)^2}{\sigma_{M_t}^2}$$

88 evts dopo tagli cinematici (ca. 70% W+jets background) + “loose chisquare constraint”, no b-tag...



...di cui 19 evts con almeno 1 b-tag



Risultati

- Lepton+jets

$$176.1 \pm 5.1(\text{stat.}) \pm 5.3(\text{syst.}) \text{ GeV}/c^2$$

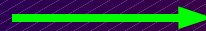
- 3 channels

$$176.1 \pm 6.6 \text{ GeV}/c^2$$

- CDF + D0

$$172.1 \pm 7.1 \text{ GeV}/c^2$$

Errori sistematici dovuti principalmente
a incertezza sull' energia dei jets



Source	Value (GeV/c ²)
Jet Energy Scale	4.4
Initial State Rad.	1.3
Final State Rad.	2.2
Bckg Spectrum	1.3
b-tag bias	0.4
PDF	0.3
MC Generator	0.1
Total	5.3

Errori sistematici e jets

Correzioni su p_T dei jets

Multiple event correction

$$P_T(R) = (P_T^{raw}(R) \times f_{rel} - UEM(R)) \times f_{abs}(R) - UE(R) + OC(R). \quad (5.1)$$

1

2

3

4

5

3

- Calorimeter energy response

5

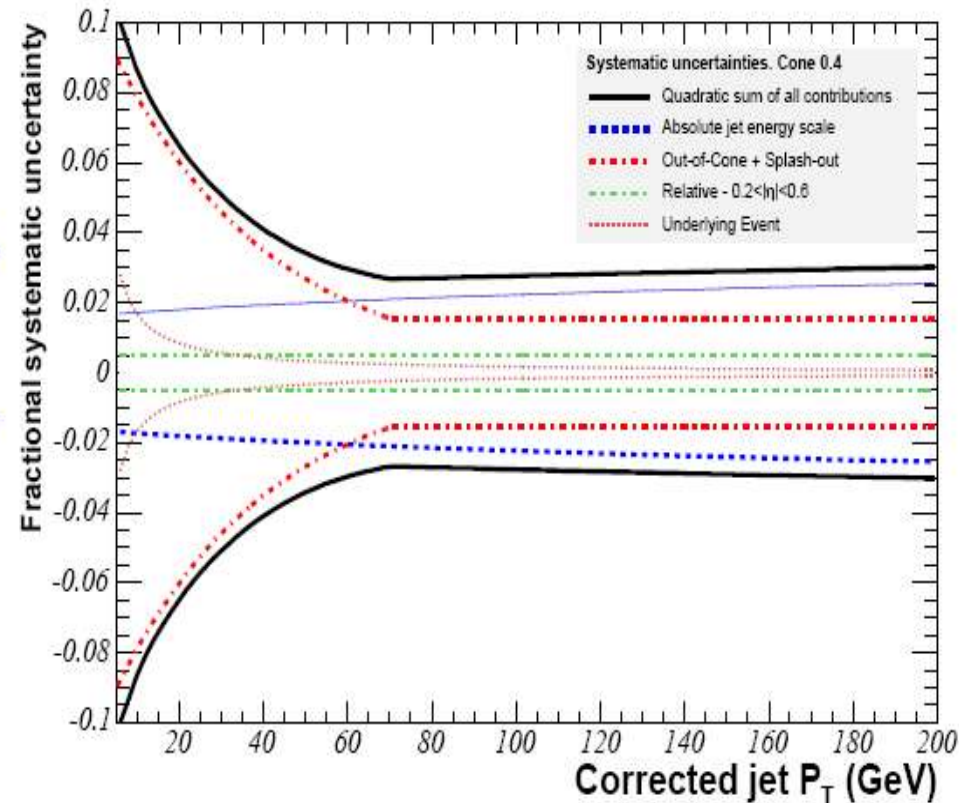
- Energy falls outside the jet reconstruction cone

1

- Non-uniformity of the calorimeter

4

- Energy from underlying event



SOLUZIONE(?):calibrazione, MC