

Misura dell'energia dei jet

Corso Fisica Nucleare Specialistica

Sapienza Università' di Roma

Dott. Marco Rescigno

Contenuti di questa lezione

- Produzione di jet
- Minimum bias
- Algoritmi di ricostruzione dei jet
 - Cone, Midpoint e Kt
- Studio degli underlying-events
- Misura e calibrazione scala di energia dei jets a CDF
 - Photon-jet balancing
 - Z-jet balancing
- Esempio: misura sezione d'urto dei jet

Minimum Bias (MB)

- La vastissima maggioranza della sezione d'urto inelastica protone-protone (~ 50 mb su 70 al TeVatron!) e' costituita da interazioni soffici (produzione di particelle di basso impulso trasverso)

Process	Cross-section (mb)	
	PHOJET	PYTHIA
non-diff.	69	55
single diff.	11	14
double diff.	4	10
central diff.	1	-
total inelastic	85	79
elastic	35	23
total	120	102

Single
Diffractive

Double
Diffractive

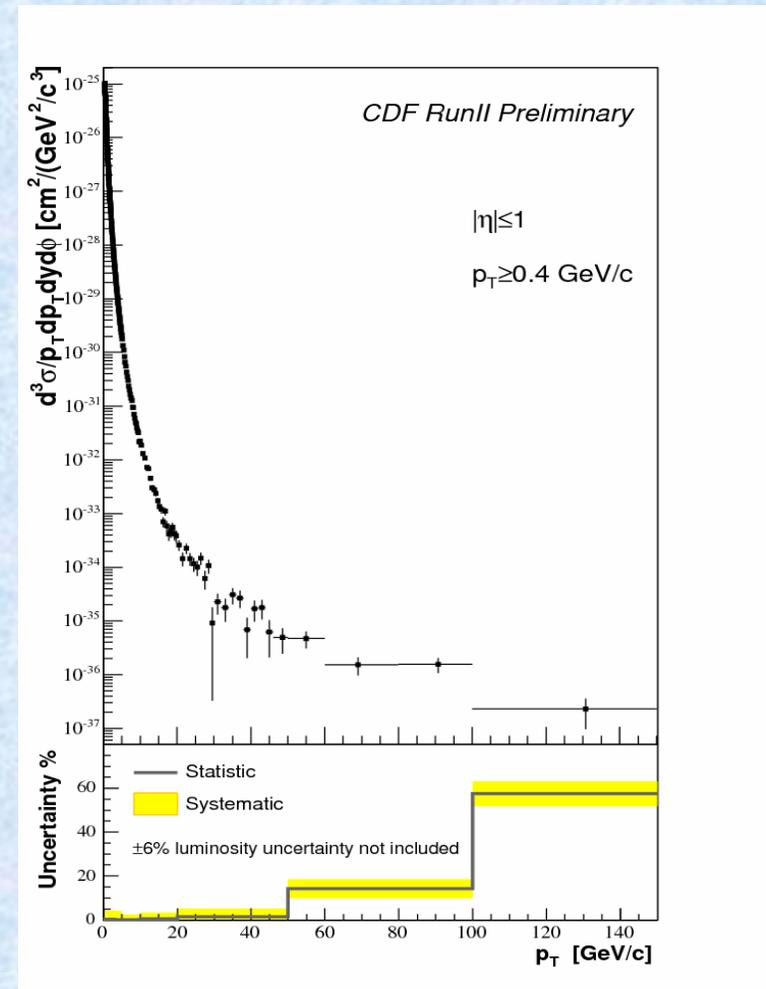
Non
Diffractive

$$\sigma_{tot} = \sigma_{elas} + \sigma_{sd} + \sigma_{dd} + \sigma_{nd}$$

- Minimum bias : eventi raccolti senza richieste particolari di segnali sul rivelatore, storicamente richiedendo la coincidenza di segnali sui due lati del rivelatore (indicando che sia il protone che l'anti-protone si sono "rotti")

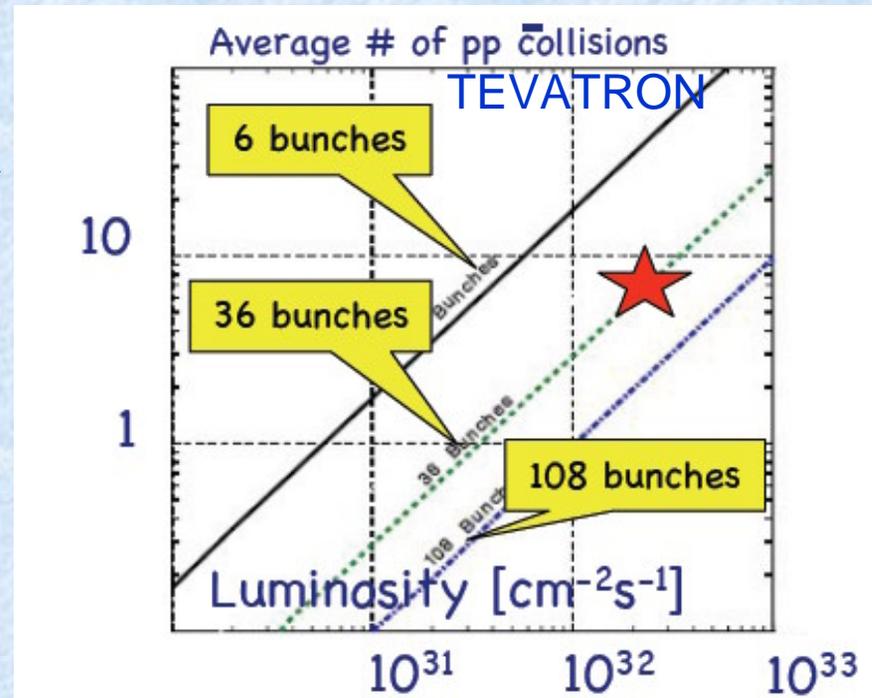
Misura della sezione d'urto di MB a CDF

- Eventi caratterizzati da bassa molteplicità carica e basso P_T
- Misura recente di CDF utilizza dati a bassa luminosità istantanea (max 1 interazione per evento)
- Trigger richiede un numero molto basso di hit nel calorimetro (efficienza calcolata utilizzando 0 bias event → random trigger)
- La sezione d'urto di questo processo è stato misurato su 13 ordini di grandezza!
- Studio importante anche nella prima fase di LHC. Trigger dedicati → basati su scintillatori che si buttano dopo i primi mesi di operazione (danneggiamento da radiazione)



Rilevanza sperimentale del MB

- La comprensione del rate e delle caratteristiche degli eventi di Minimum Bias e' importante per descrivere le caratteristiche degli eventi ad un collider ad alta luminosita', infatti la stragrande maggioranza delle interazioni e' MB
- Al Tevatron alla luminosita' di picco $3E32 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1} \sim 10$ interazioni per bunch crossing (con distribuzione di Poisson!)
- A LHC a $1E34 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1} \sim 20$ interazioni per bunch crossing



NB: piu' alta la frequenza di crossing (ovvero numero di pacchetti) a parita' di luminosita' minore il numero di interazioni per crossing

Estrapolazione a differente \sqrt{s}

Molteplicità
carica ~ 4 a
TeVatron

Incertezza del
50%
sull'estrapolazione

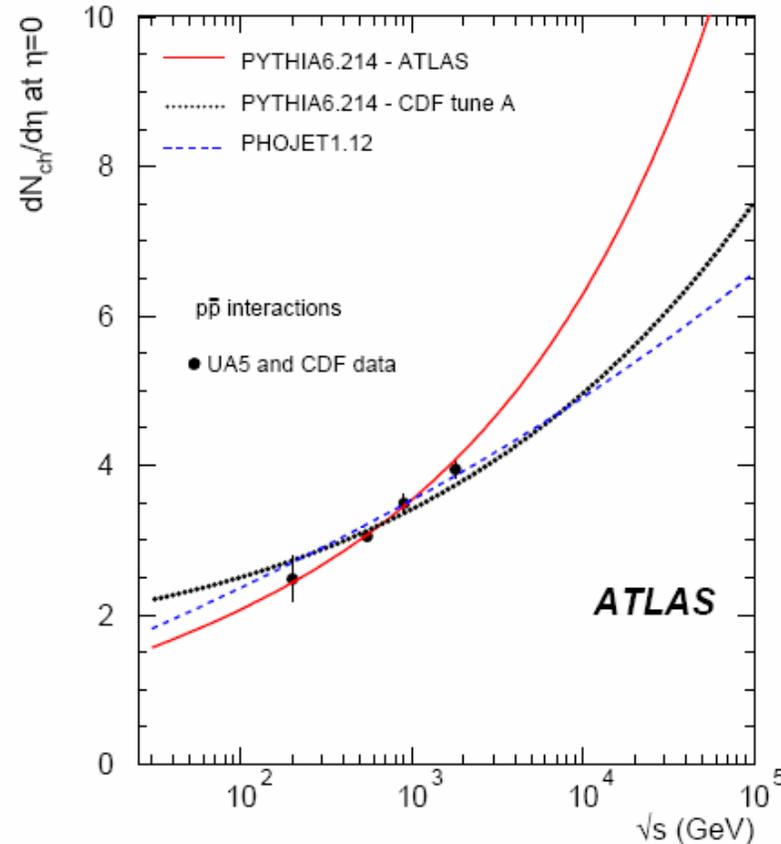
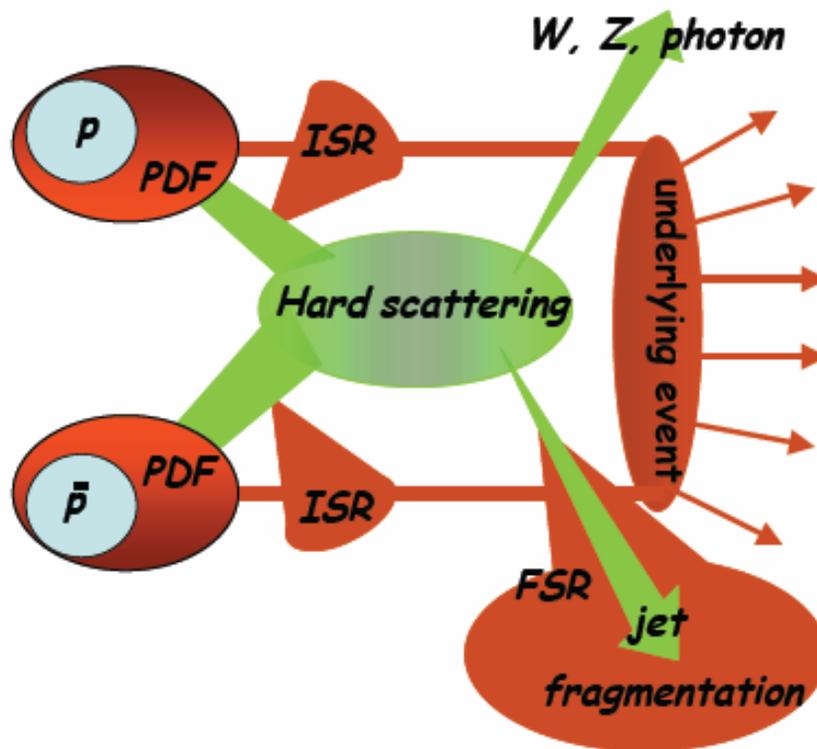


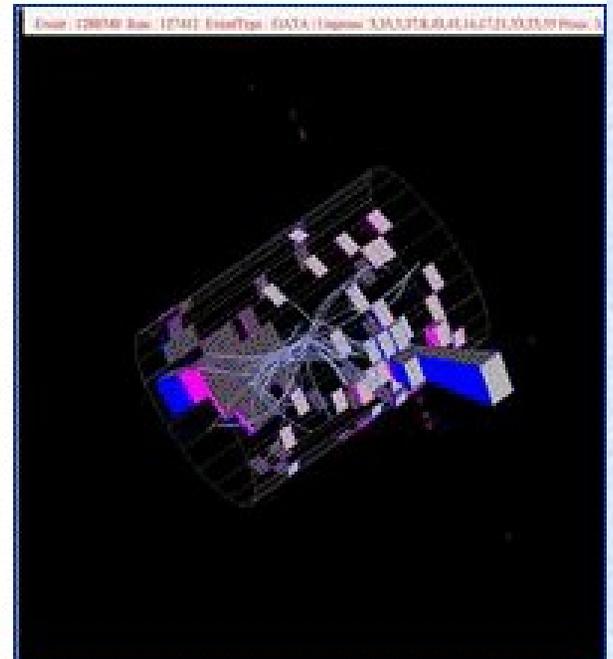
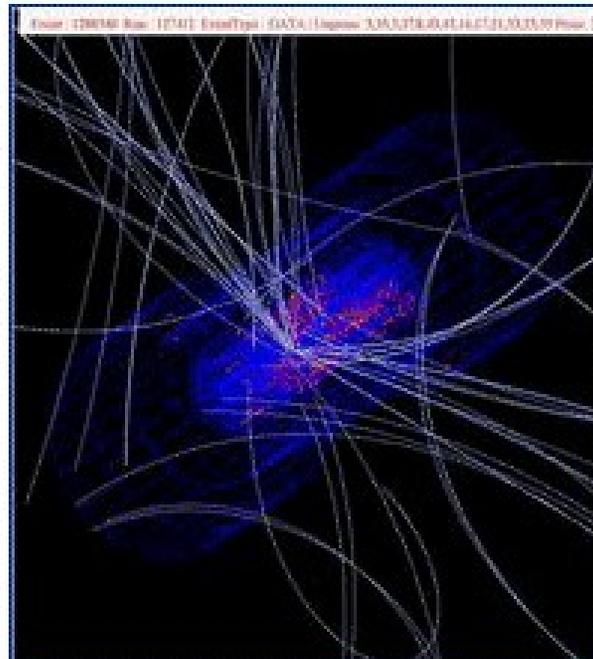
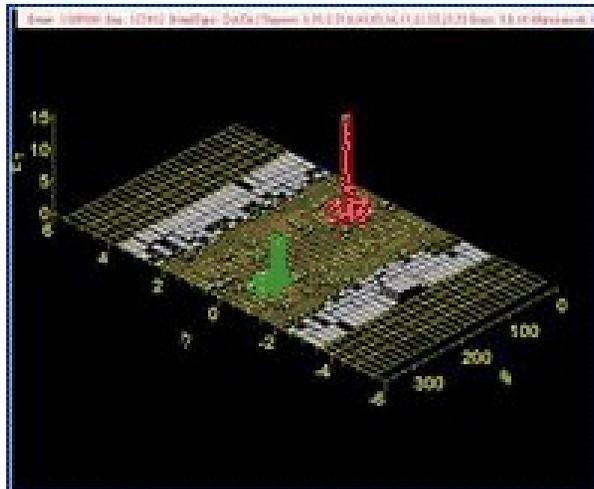
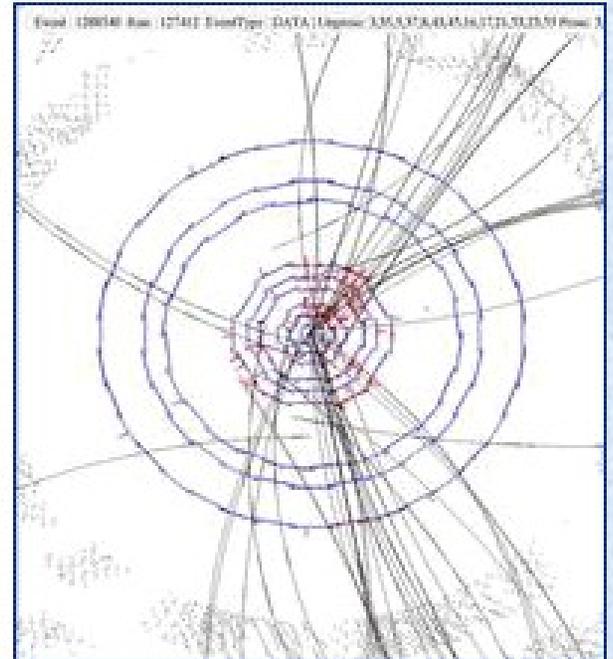
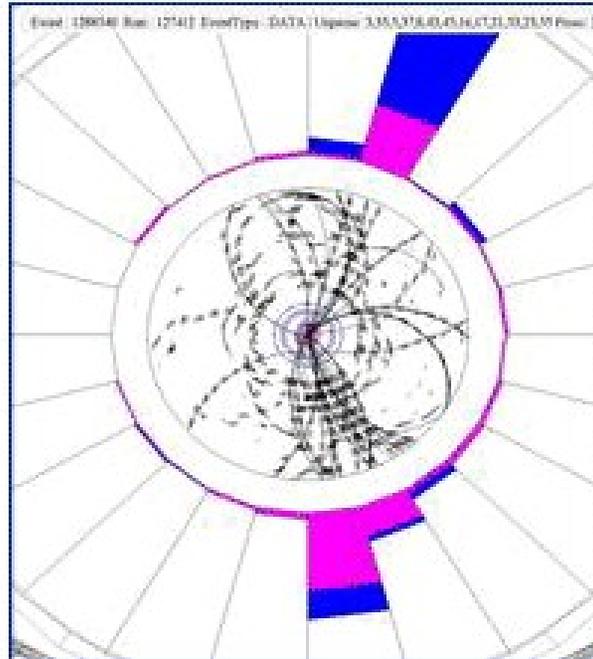
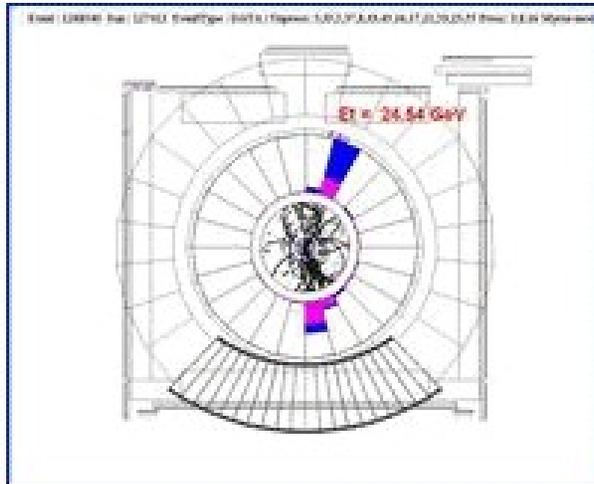
Figure 1: Central charged particle density for non-single diffractive inelastic $p\text{-}\bar{p}$ collisions.

Interazioni protone-(anti)protone

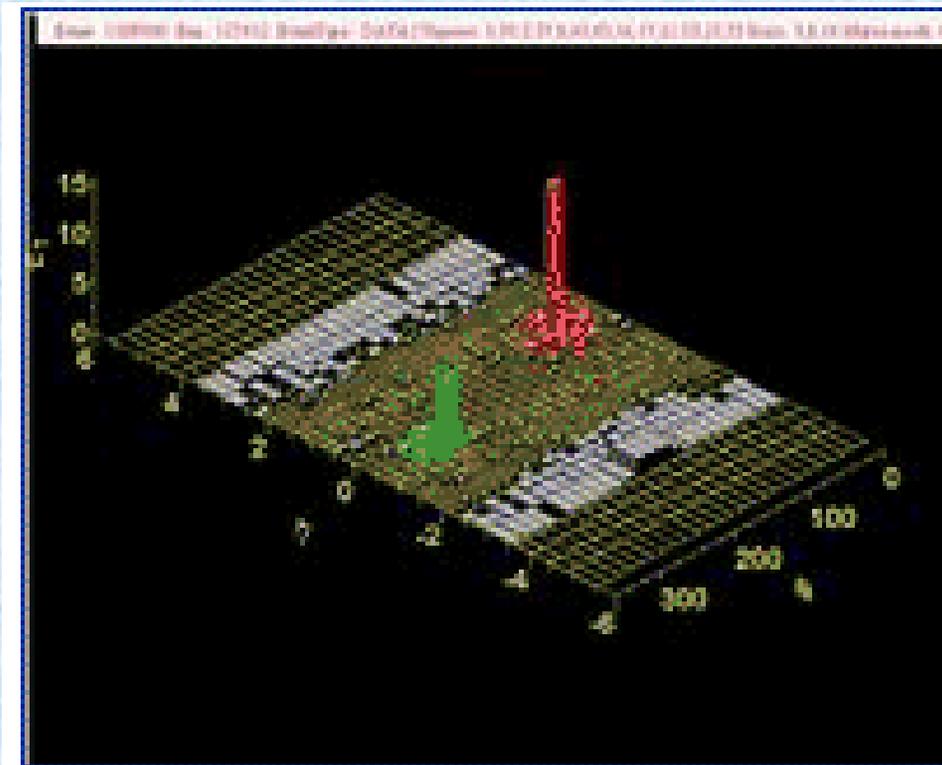
A typical Tevatron event consist of:



- Production QCD related
- Hard scattering:
 - ✓ perturbative regime
- underlying event & soft physics:
 - ✓ phenomenological models



Jet events



! Jet events

ges

Jet Algorithms

- Devono consentire di riconoscere tutti i jet e permettere di collegare l'esperimento alla QCD
- Importanti criteri:
 - Stabili per l'emissione collineare (“collinear safe”): si trovano lo stesso numero se invece di una particella ne troviamo due collineare con la stessa energia totale
 - Stabili verso l'infrarosso (“infrared safe”): trovano gli stessi jet anche in presenza di radiazione soffice sovrapposta allo scattering duro (underlying event)
- Non deve dipendere dai dettagli del rivelatore
- Comportamento “civile” con l'aumentare della luminosita' e dell'occupancy del rivelatore
- Facile da calibrare e efficiente nell'uso della CPU

Jet Kinematics

- Possibile definire jet utilizzando, celle calorimetriche, particelle MC dello stato finale o partoni
- Una volta clusterizzate le “celle” definiamo:

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

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

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

- Definizione semplice → facile applicare boost
- Approssimazione buona per masse jet piccole

Cone Algorithms JETCLU

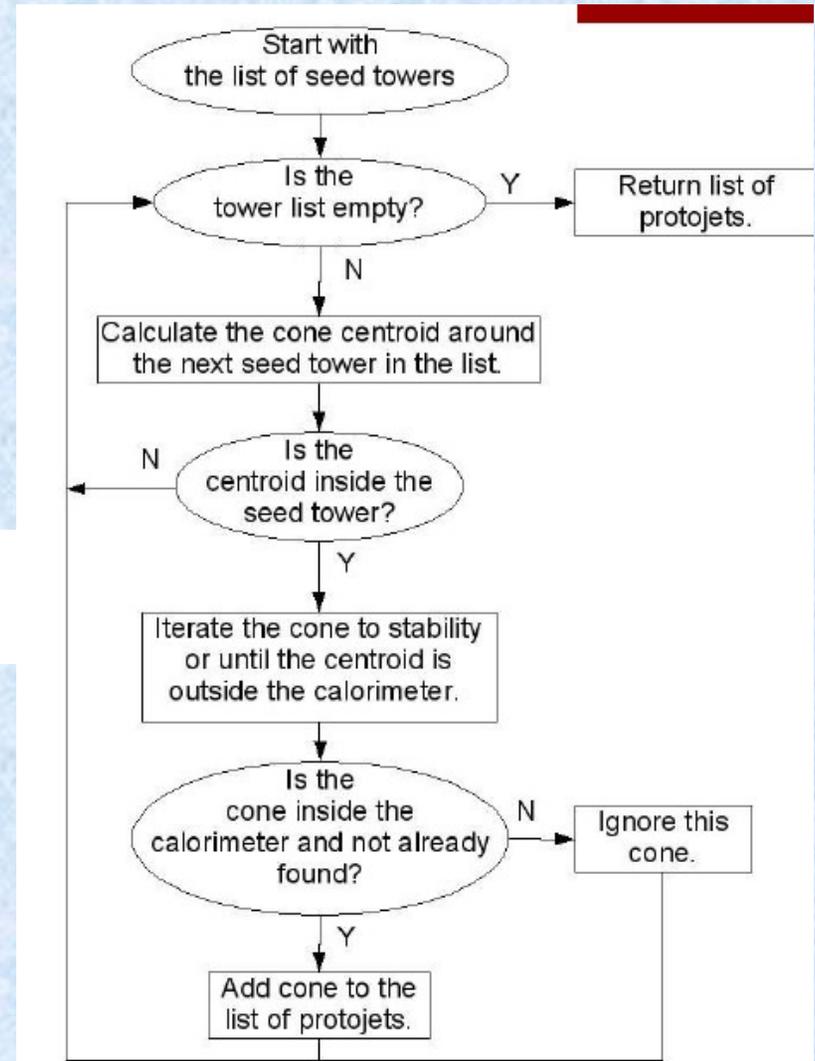
- Scelta tradizionale ai collider, per la semplicità dell'algoritmo, la semplice caratteristica geometrica e il limitato utilizzo di CPU

- Si clusterizzano le celle in coni di raggio

$$R = \sqrt{\eta^2 + \phi^2}$$

- Seeded algorithm (tipico seed tower $E_t > 1 \text{ GeV}$)

- Non infrared e collinear safe!



Cone Algorithm: MidPoint

- Evoluzione dell'algorithmo cono
- Si aggiunge alla lista dei seeds il “midpoint” tra il seed i -esimo e tutti gli altri che sono entro una distanza $d < 2R$
- Si avvicina alle prestazioni di un algorithmo cono senza l'utilizzo di seeds (\rightarrow infrared safe)
- Senza rendere eccessivamente costoso in termini di CPU l'algorithmo

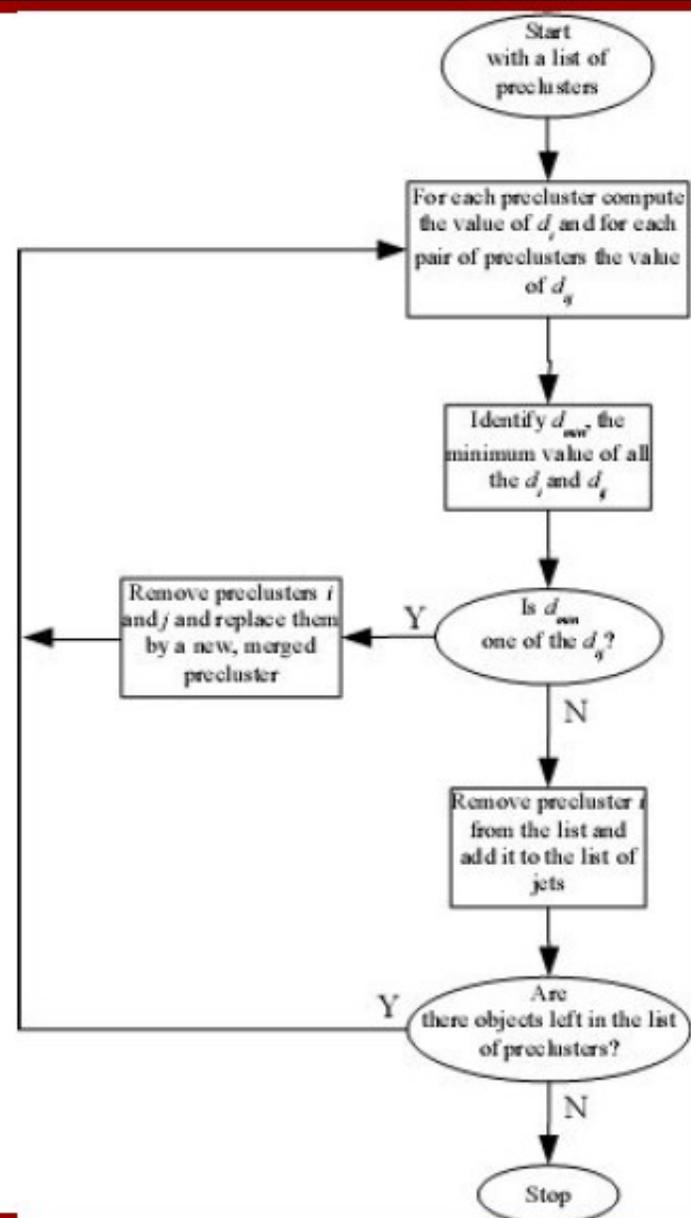
k_T Algorithm I

- Clustering algorithm most commonly used at hadron colliders.
- For all energy clusters define:

$$d_i = p_{T,i}^2$$
$$d_{ij} = \min(p_{T,i}^2, p_{T,j}^2) \frac{(y_i - y_j)^2 + (\phi_i - \phi_j)^2}{D^2}$$

where $D \sim 1$ is a parameter of the algorithm.

- d_{ij} is the minimal relative transverse momentum between i and j .



K_T algorithm

- Tipicamente il tempo di esecuzione di questo algoritmo e' troppo elevato (cresce con n^3)
- Si introducono soglie minime per velocizzare l'algoritmo...
- Recentemente appaiono in letteratura algoritmi che abbinano le buone caratteristiche teoriche con la velocita' di esecuzione
 - gli esperimenti al Tevatron per ora non trovano differenze significative nelle misure effettuate, ma il panorama e' piuttosto effervescente in questo momento
 - misure di QCD sono le prime a poter essere effettuate a LHC a bassa luminosita'!

k_T / Midpoint Jet cross-section ratio

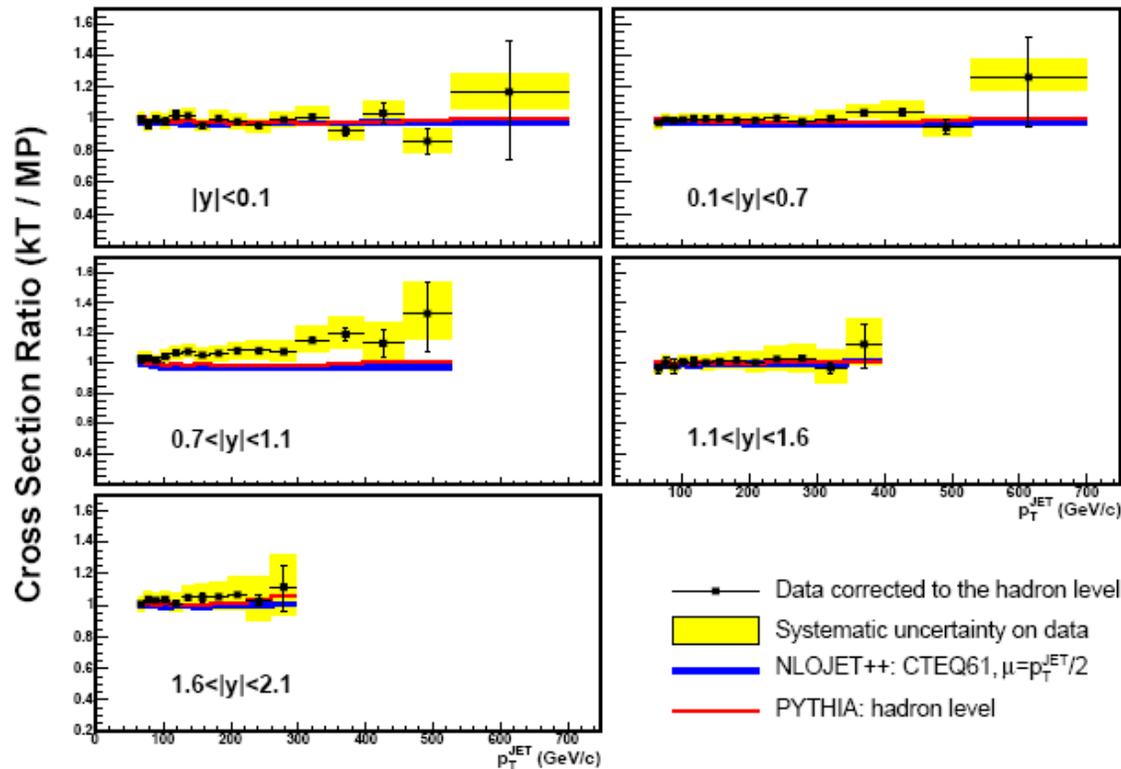
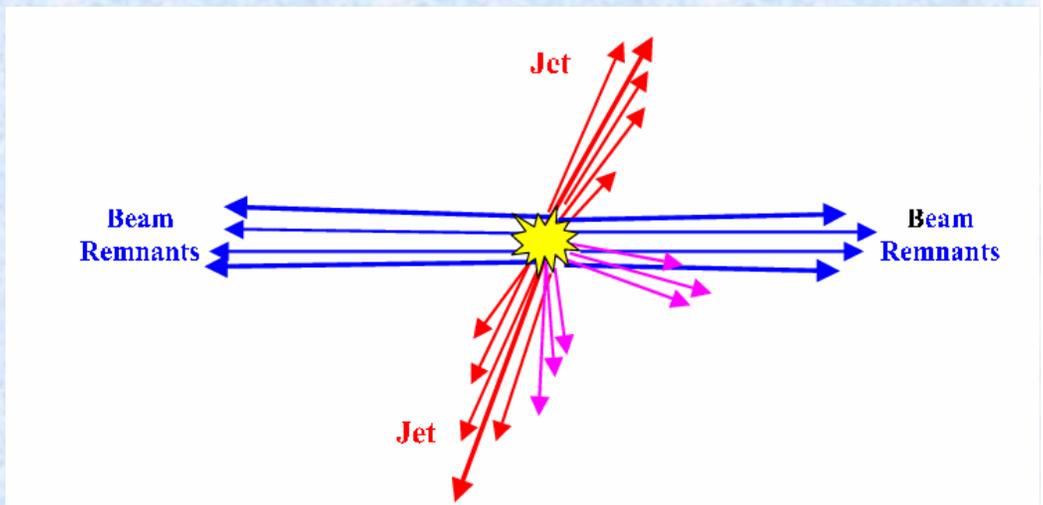
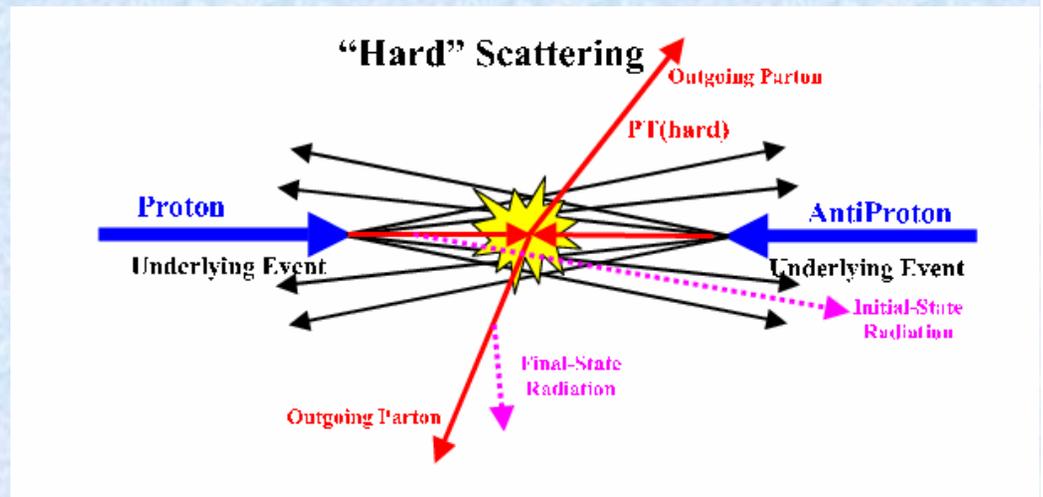


FIG. 17: The ratio of the inclusive jet cross sections measured using the k_T and Midpoint jet finding algorithms (black). The systematic uncertainty on the ratio is given as the yellow band. The predictions from NLO pQCD and PYTHIA for this ratio are shown in blue and red lines, respectively.

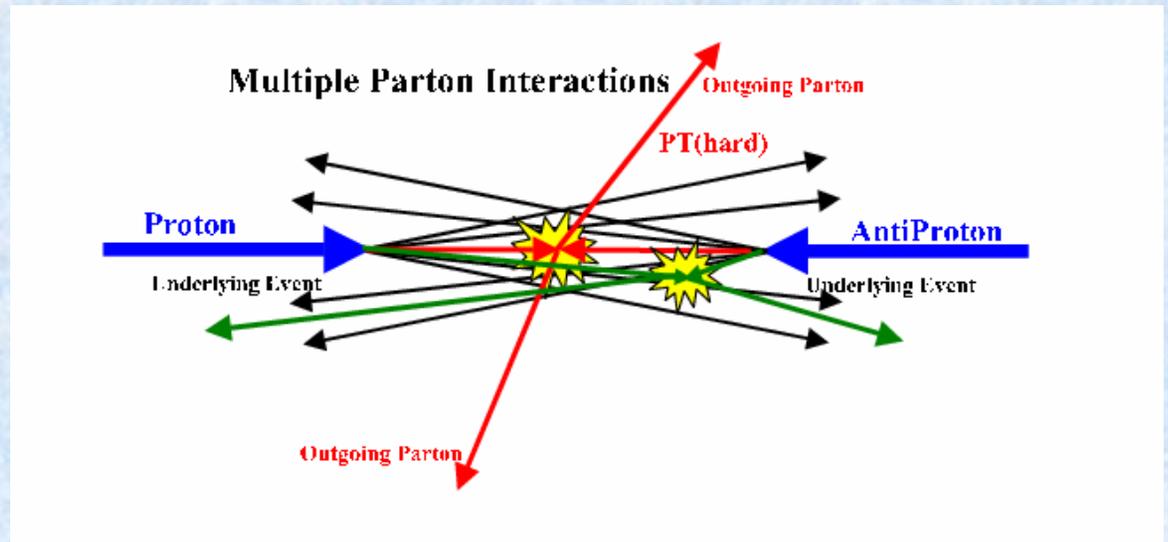
Produzione di Jet in interazioni p-(anti)p

- Produzione di jet adronici nelle collisioni p-p
- Oltre ai jet prodotti nello scattering duro dobbiamo considerare il così-detto “underlying event” composto da
 - Beam Remnants (a differenza che per particelle collidenti puntiformi)
 - Radiazione di QCD da stato iniziale e finale (ISR,FSR)
 - ...



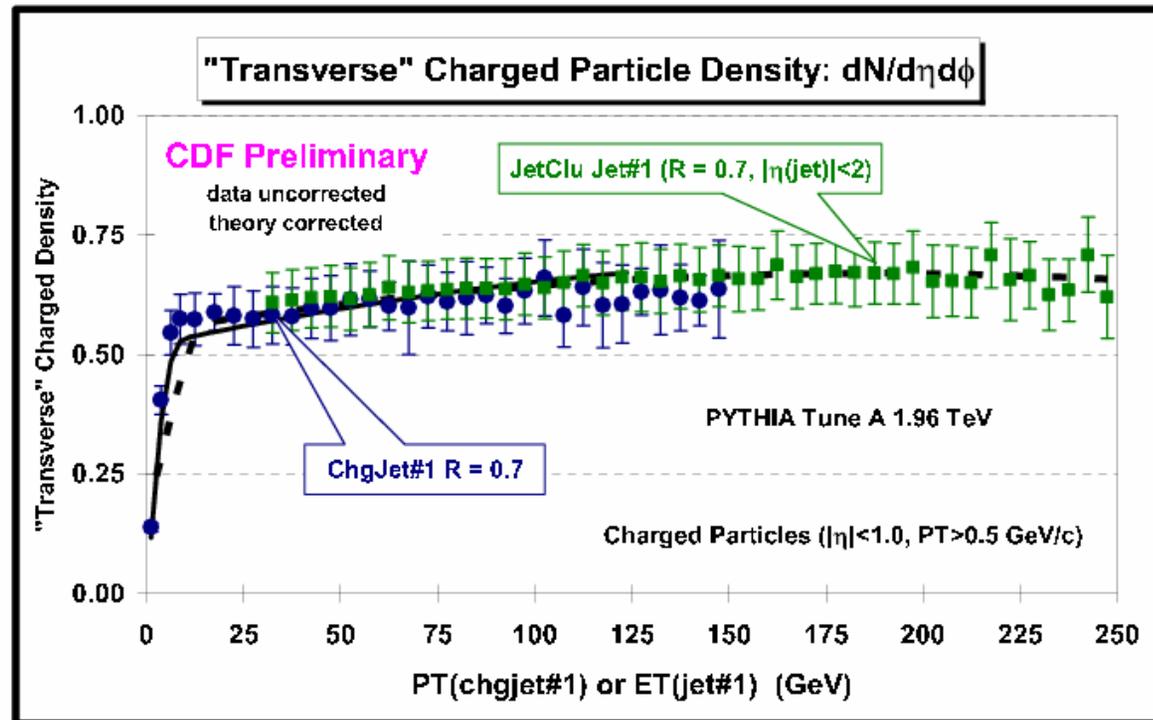
Produzione di Jet in interazioni p-(anti)p

- E talvolta da ulteriori interazioni soffici in una singola collisione protone-protone dette: Multiple Parton Interactions (MPI)

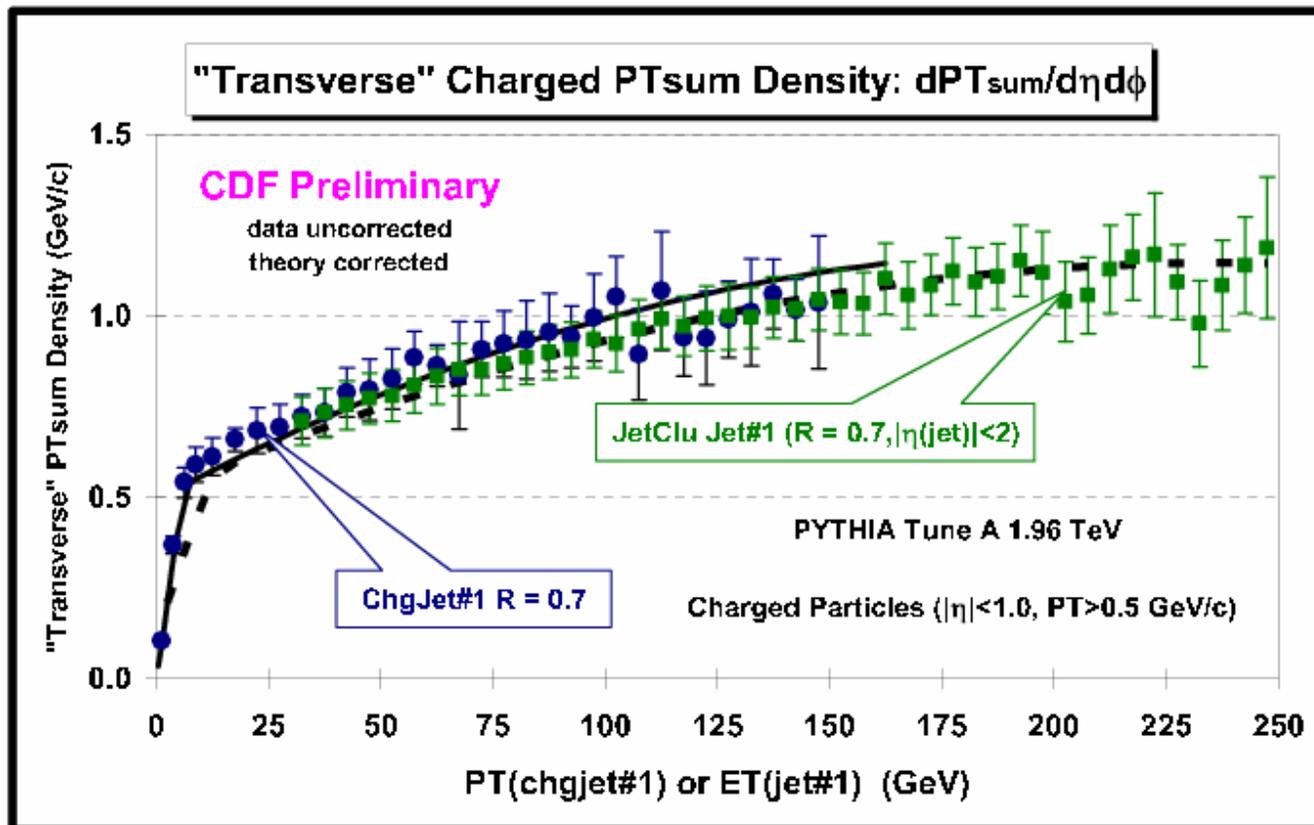


- Questi fenomeni non-perturbativi vengono modellati fenomenologicamente ed opportunamente codificati nei normali generatori di eventi Monte Carlo

Charged particle density

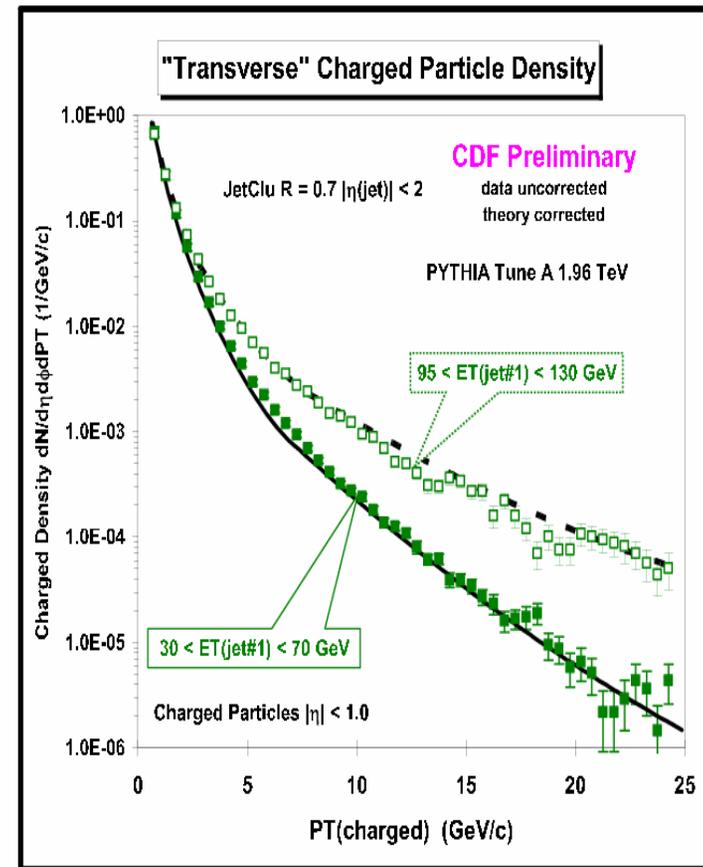


Transverse Momentum Density



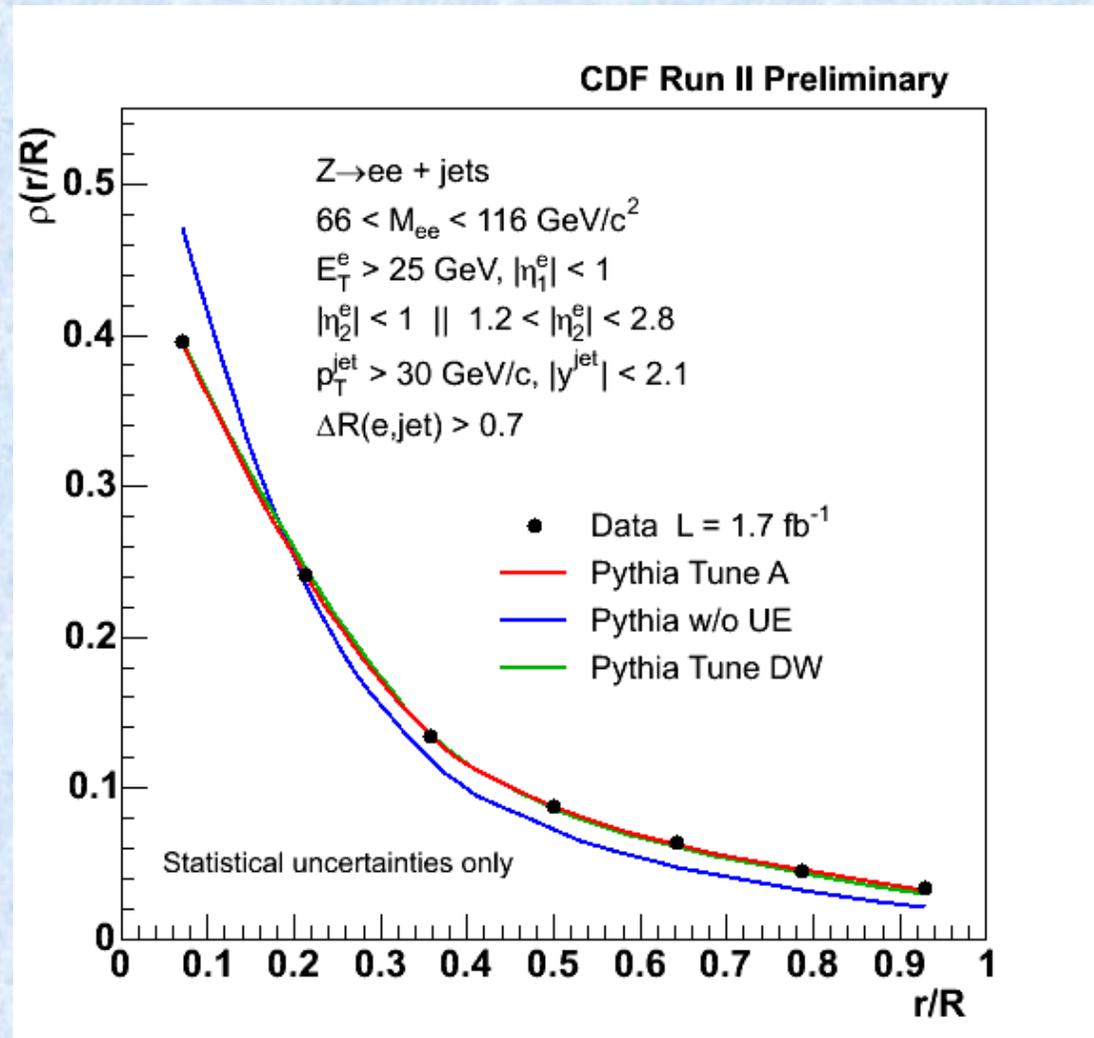
Pt spectra of underlying event particles

- A crescente energia del jet principale corrisponde uno spettro dell'underlying event sempre piu' duro (code piu' elevate della distribuzione) dovuto all'aumentare della probabilita' di emettere gluoni hard a grande angolo
- Andamento ben riprodotto dal tuning di CDF



Trasverse energy flow e forma dei jet

- Impatto significativo dell'underlying event anche su jet duri ($E_T > 30 \text{ GeV}$) prodotti in processi di alto pt, in questo caso $Z + \text{jet}$
- Ben riprodotto dai tuning sperimentali al TeVatron
- Tune DW vs Tune A \rightarrow modelli alternativi da cui si puo' ricavare una sistematica



CDF - Calorimetri

- Central Electro-Magnetic (CEM) Calorimeter
 - Lead-scintillator
 - $\sigma(E)/E = 13.5/\sqrt{E}\% \oplus 1.5\%$ (for electrons)
- Central HAdron Calorimeter (CHA)
 - Iron-scintillator
 - $\sigma(E)/E = 50\% / \sqrt{E} \oplus 3\%$ (for single pions)
- Plug Electro-Magnetic (PEM) Calorimeter
 - Lead-scintillator
 - $\sigma(E)/E = 16/\sqrt{E}\% \oplus 1\%$
- Plug HAdron Calorimeter (PHA)
 - Iron-scintillator
 - $\sigma(E)/E = 50\% / \sqrt{E} \oplus 5\%$

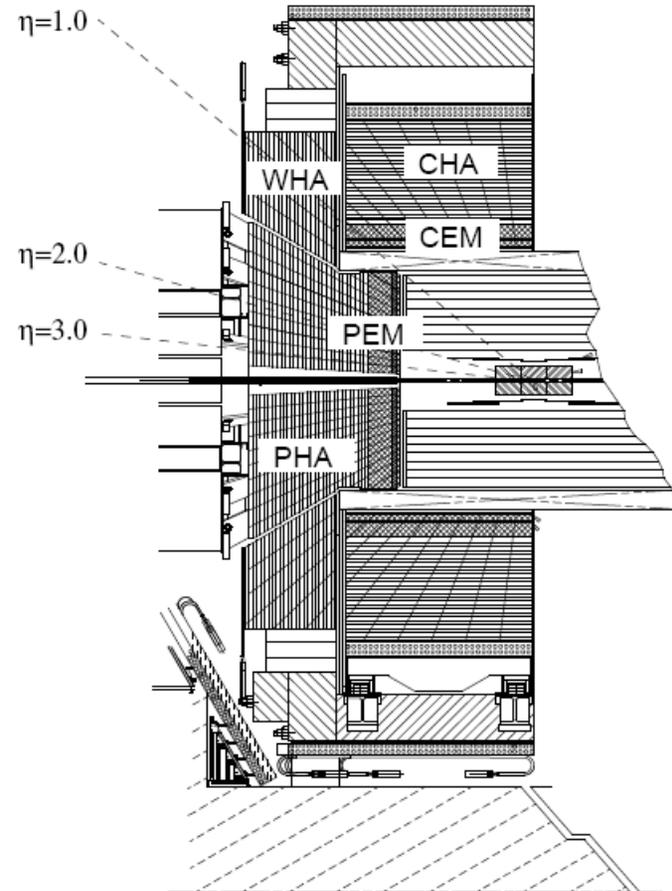
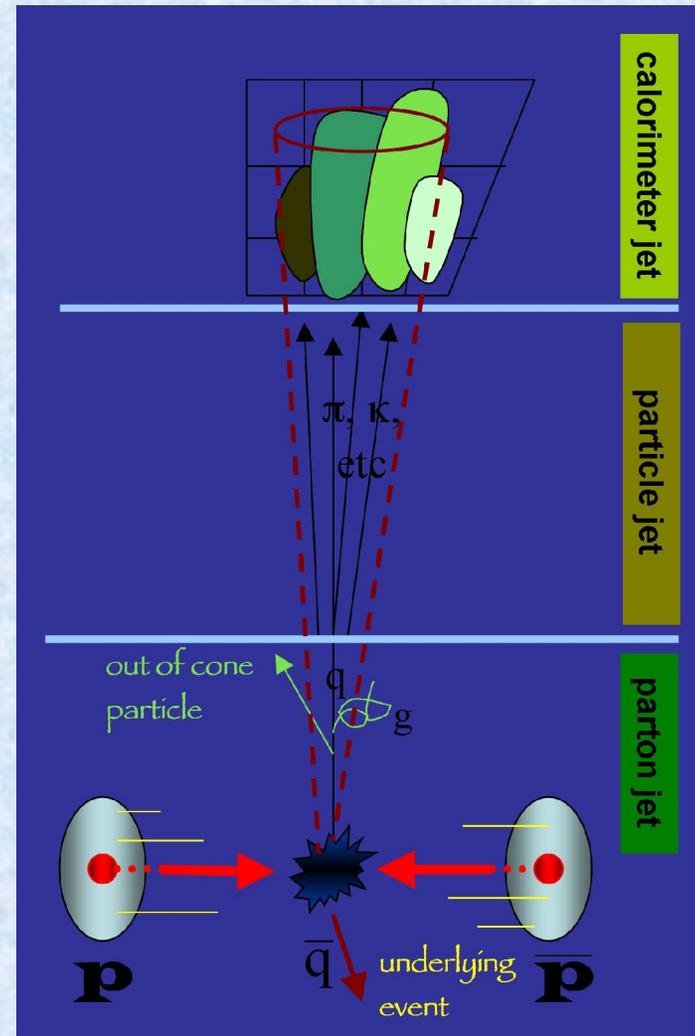


Figure 1: Elevation view of one half of the CDF detector displaying the components of the CDF calorimeter: CEM, CHA, WHA, PEM and PHA.

Misura dell'energia dei jet – Jet corrections

- Jet correction are used to scale the measured energy of the jet energy back to the energy of the final state particle level jet.
- Additionally, there are corrections to associate the measured jet energy to the parent parton energy, so that direct comparison to the theory can be made.
- Currently, the jet energy scale is the major source of uncertainty in the top quark mass measurement and inclusive jet cross section.
- The CDF jet energy corrections are divided into different levels to accommodate different effects that can distort the measured jet energy, such as, response of the calorimeter to different particles, non-linearity response of the calorimeter to the particle energies, un-instrumented regions of the detector, spectator interactions, and energy radiated outside the jet clustering algorithm.



Correzioni in serie

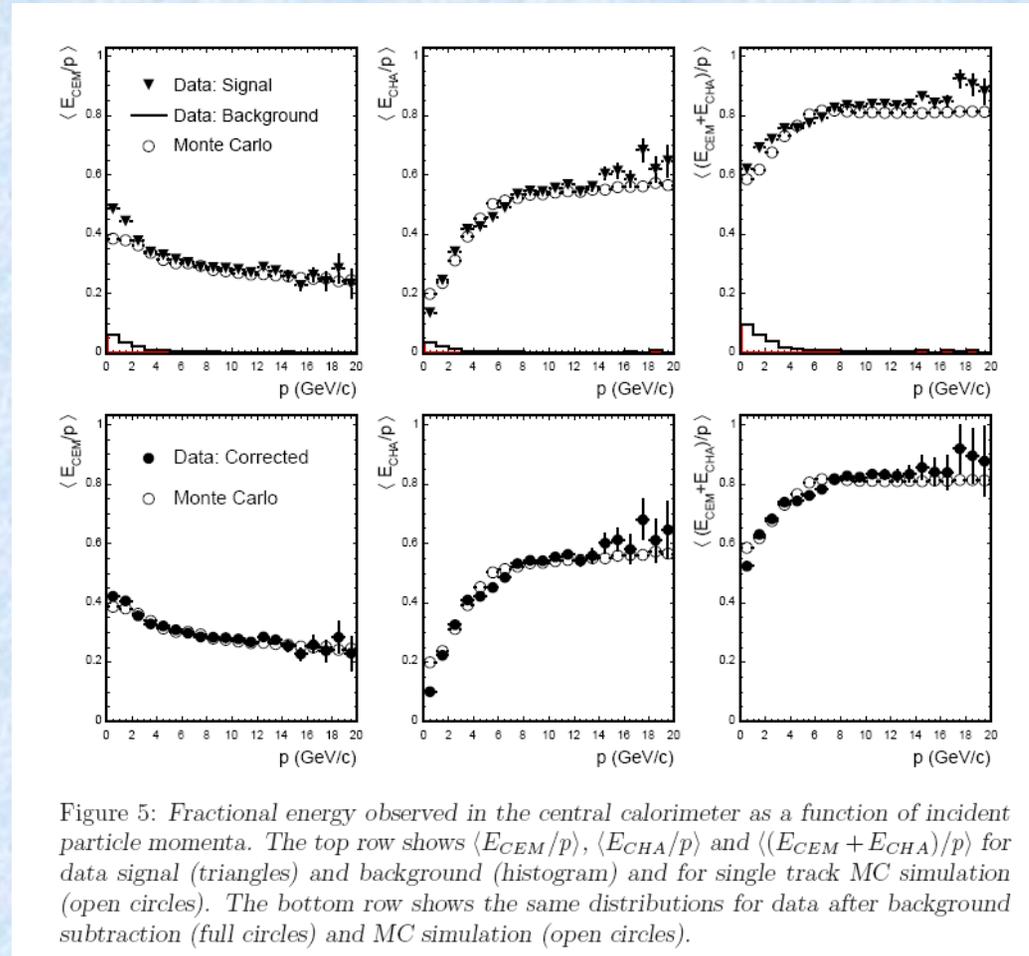
- Vedremo in dettaglio i seguenti step:
- "Online/ Offline calibrations"
 - Risposta dei calorimetri a particelle singole
- "Absolute"
- "Eta-dependent"
- "Multiple Interactions"
- "Underlying event"
- "Out-of-cone"

Tuning della simulazione del rivelatore

- Step essenziale per la successiva calibrazione assoluta
- Si utilizzano simulazioni parametriche della risposta del calorimetro elettromagnetico e adronico, e c'è quindi la necessità di derivare i parametri dallo studio dei dati
- Sorgenti di dati:
 - Single particle data → tracce isolate
 - Test beam (pioni)
 - $J/\psi \rightarrow ee$ e $Z \rightarrow ee$ per la parte elettromagnetica
- Nota: 70% circa dell'energia di un jet è di tipo adronico 30% elettromagnetico ($\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$), con grosse fluttuazioni!

E/ p calibration

- Nella parte centrale del rivelatore il confronto tra la scala del tracker e quella del calorimetro ci fornisce la correzione necessaria per effetti di non linearita', zone morte etc.



Test beam vs simulazione

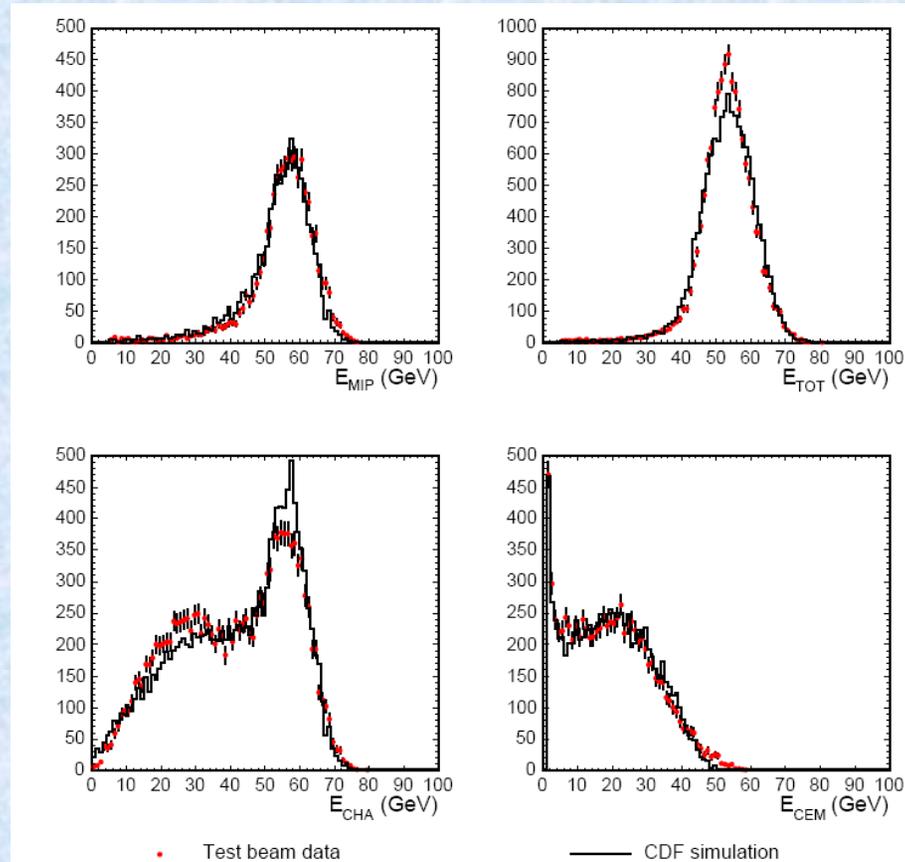


Figure 6: Top left: Energy observed in CHA for particles that do not interact in the CEM. Total (top right), CEM (bottom right) and CHA (bottom left) energy for charged pions with $p = 57$ GeV/c. The test beam data (points) are compared to the CDF simulation (solid line).

Risposta alla parte elettromagnetica

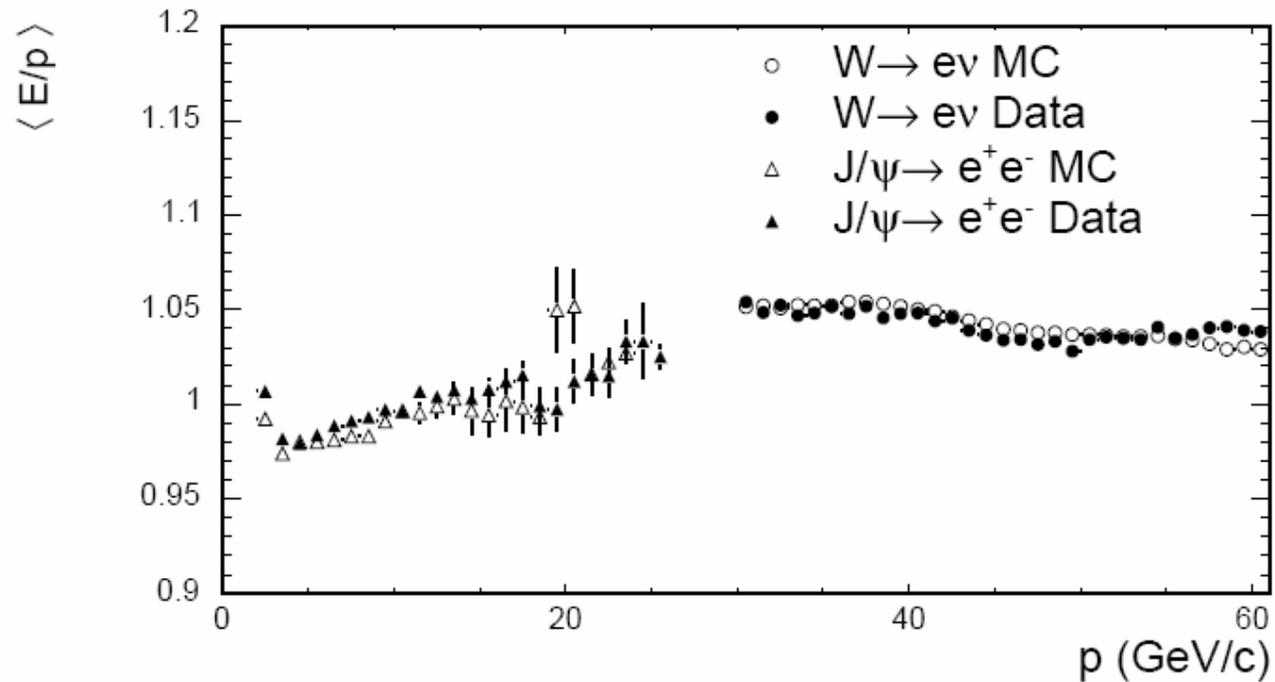


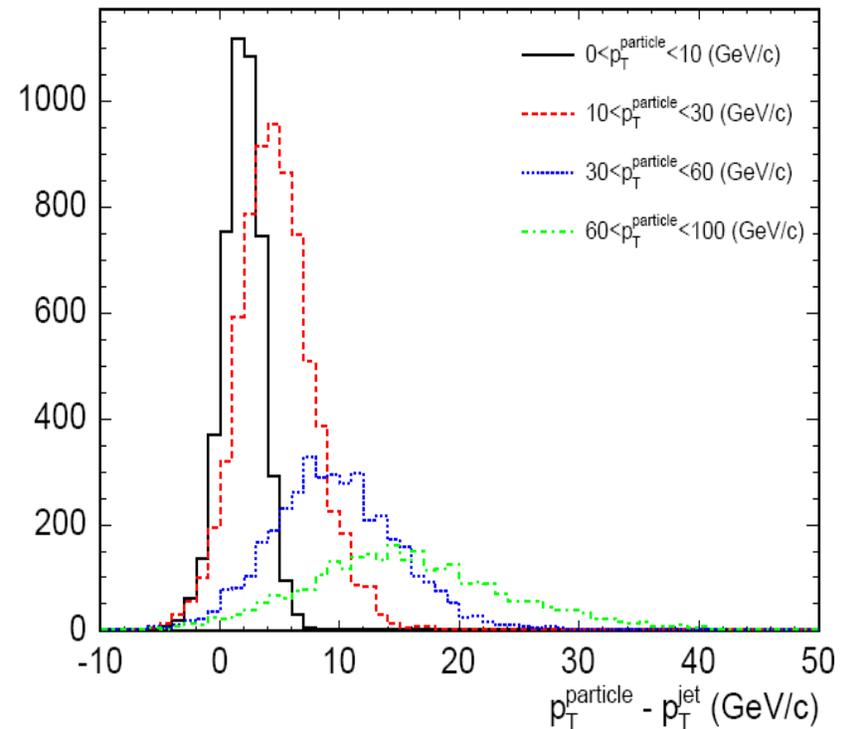
Figure 10: $\langle E/p \rangle$ versus p for electrons and positrons from $J/\psi \rightarrow e^+e^-$ and $W \rightarrow e^\pm\nu_e$ data (closed triangles and circles) and MC samples (open triangles and circles) samples.

Time dependent calibration

- Il sistema del calorimetro è controllato periodicamente con sistema di laser (per guadagno PMT) e utilizzando delle sorgenti mobili
- Vengono inoltre utilizzati i picchi dello Z e della $J/\psi \rightarrow \mu\mu$ per tenere traccia delle variazioni temporali

Absolute corrections

- L'energia assoluta del jet e' definita come la piu' probabile energia trasportata dalle particelle all'interno del cono
- Ottenuta da un fit alle distribuzioni MC in funzione dell'energia dei jet



Absolute corrections

- Ripetuto per ciascuno dei valori del raggio dei coni studiato a CDF
- Correzione simile per ciascuno dei valori di R
- Dipende essenzialmente dalla risposta dei calorimetri (non linearita' a bassa energia)

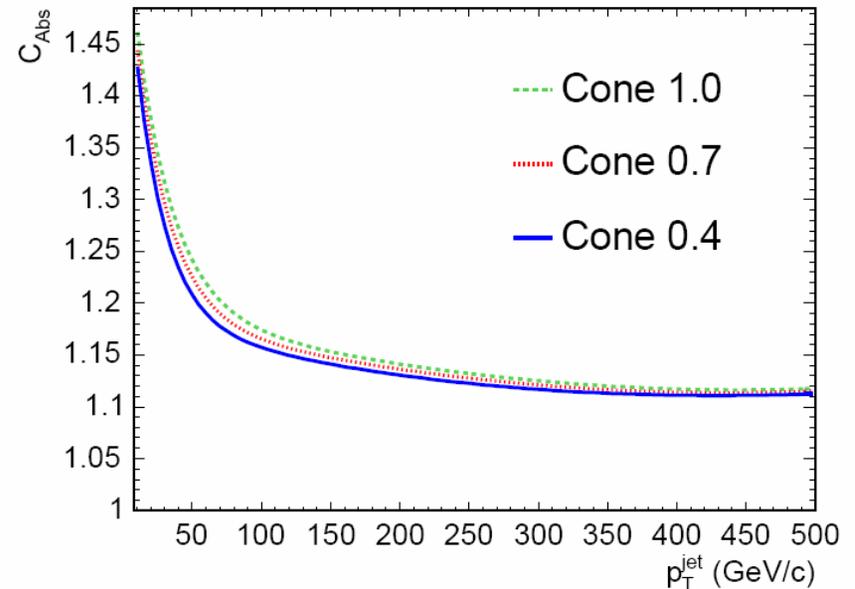
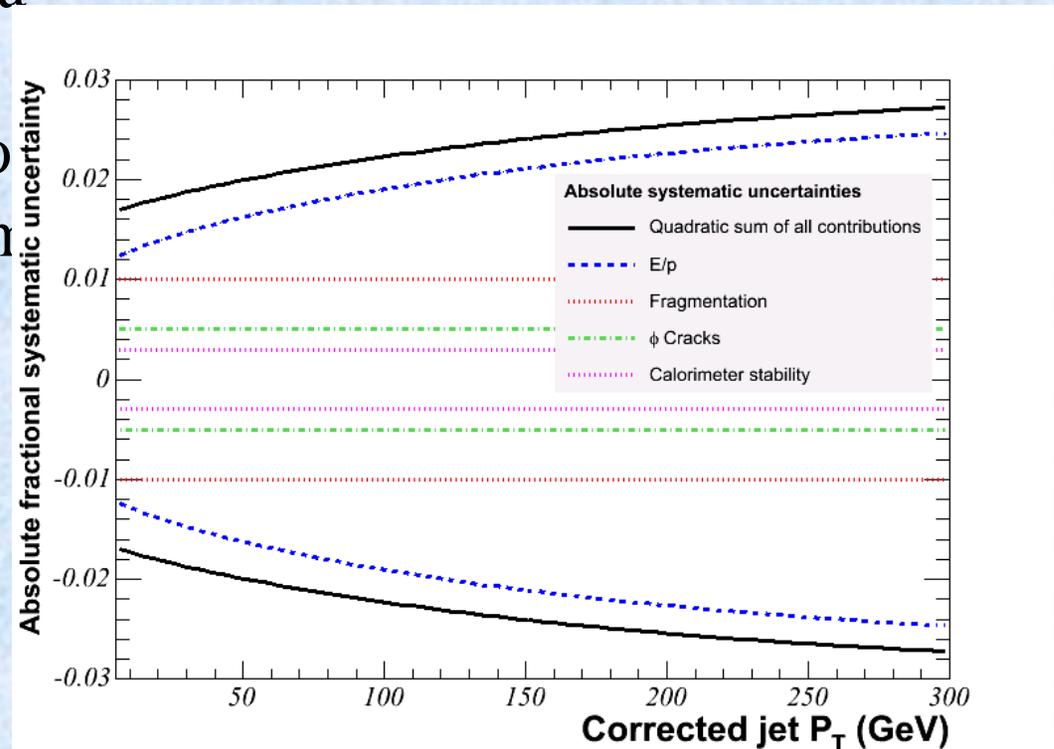


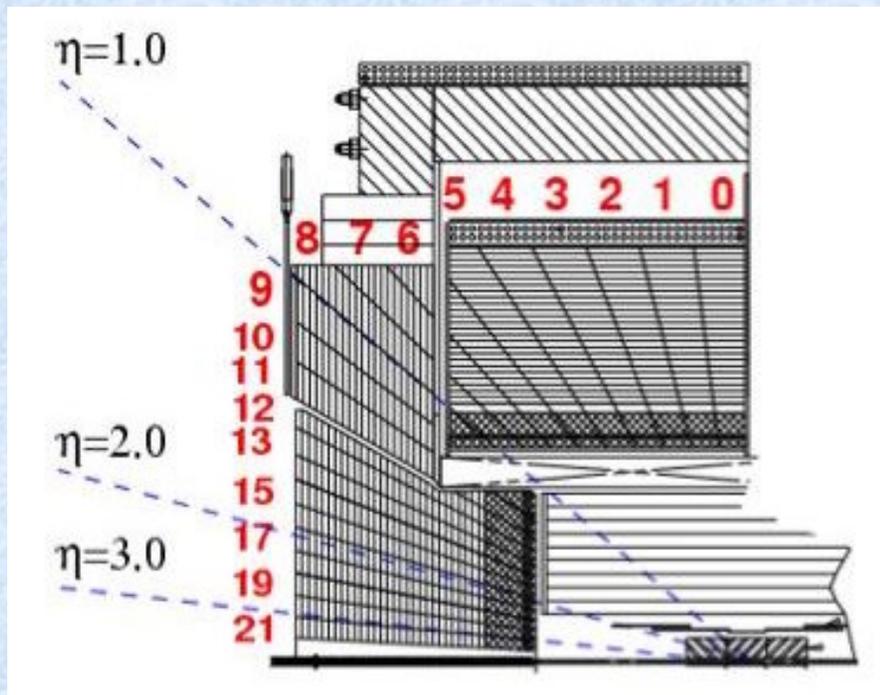
Figure 22: Absolute corrections for different cone sizes as a function of calorimeter jet p_T . The solid line shows the corrections for cone size 0.4, the dashed for 0.7 and the dotted for 1.0.

Absolute corrections - uncertainties

- Dominato dall'incertezza nella calibrazione E/p del calorimetro adronico (vecchi dati del test beam ad alto impulso)



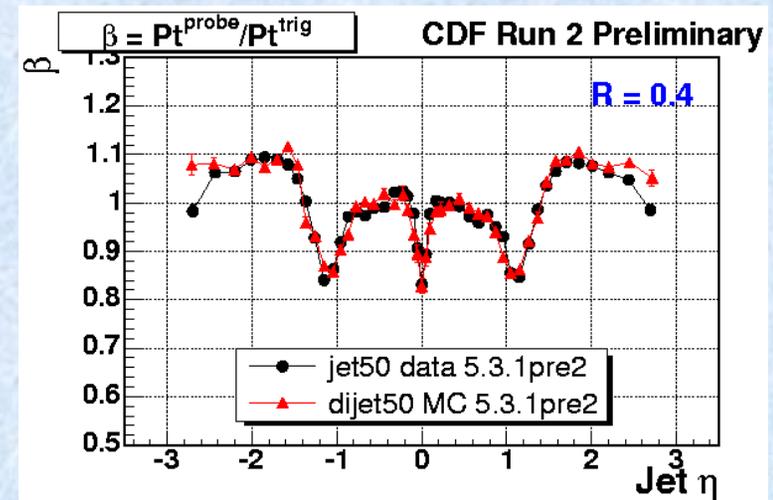
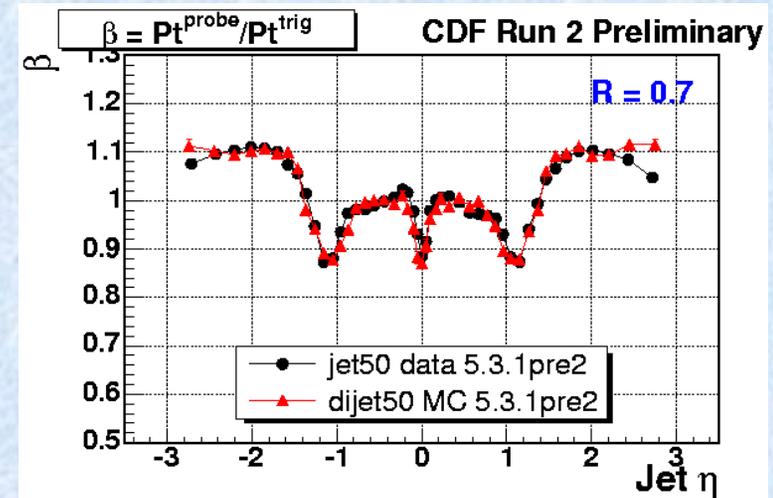
Plug relative calibration



- Since the central calorimeters are better calibrated and understood, this correction scales the forward calorimeters to the central calorimeter scale.
- This correction is obtained using Pythia and data di-jet events.
- The transverse energy of the two jets in a $2 \rightarrow 2$ process should be equal. This property is used to scale jets outside the $0.2 < |\eta| < 0.6$ region to jets inside the region.
- This region is chosen since it is far away the cracks or non-instrumented regions. This results in a correction as a function of pseudo-rapidity and P_t .
- Good agreement of the relative response of the calorimeter between PYTHIA di-jet production and data.

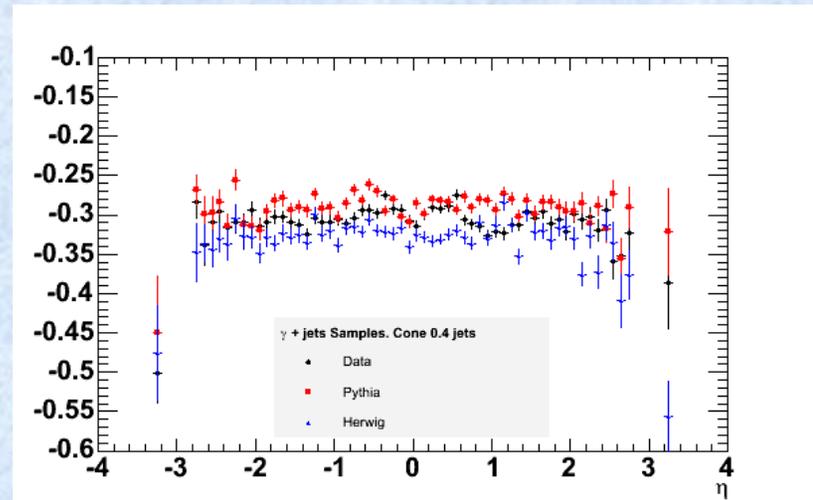
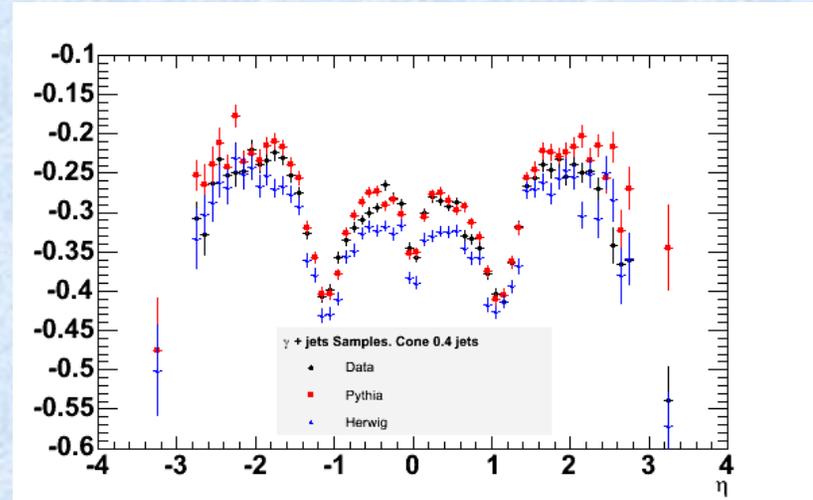
Plug relative calibration

- Jet-Jet balance
- Pt1-Pt2 should be 0 in the absence of missing energy (neutrinos) or additional jets
- $\beta = p_{T}^{\text{probe}} / P_{T}^{\text{trig}}$ used to calculate relative corrections
- Procedure repeated for any available cone size

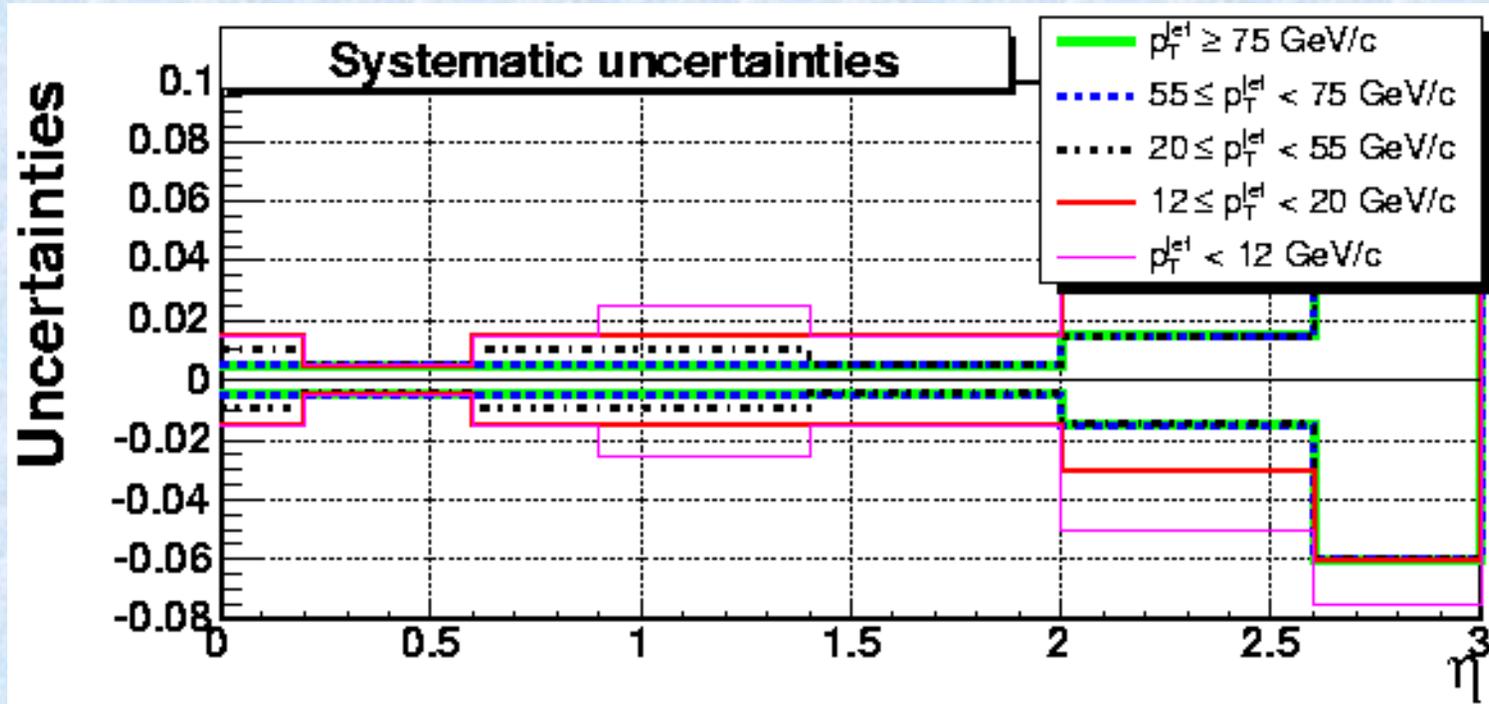


Plug relative calibration

- Photon-jet balance costituisce un potente cross-check
- La risoluzione del calorimetro elettromagnetico e' molto migliore di quello adronico



Relative correction systematics



- Dal confronto Dati MC in funzione della rapidita'

Multiple interaction

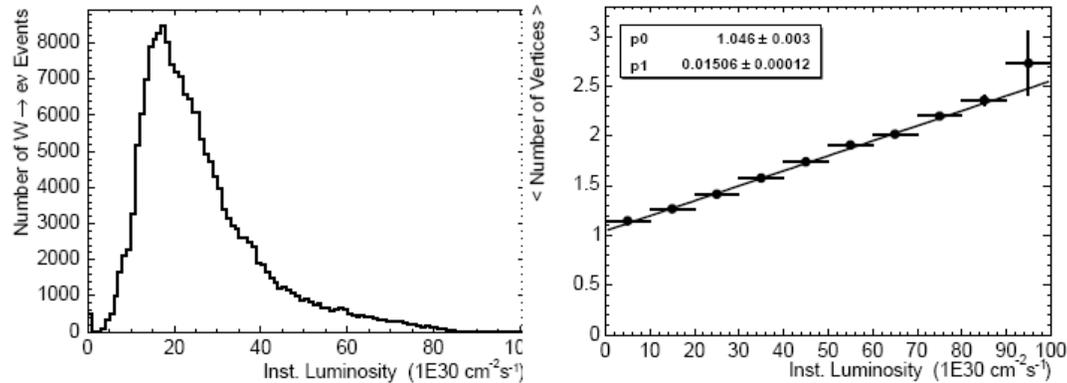
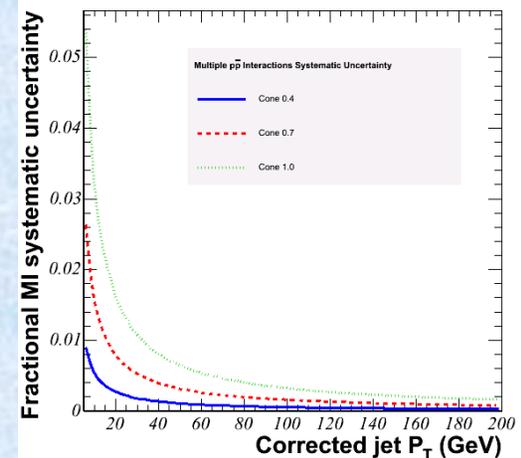
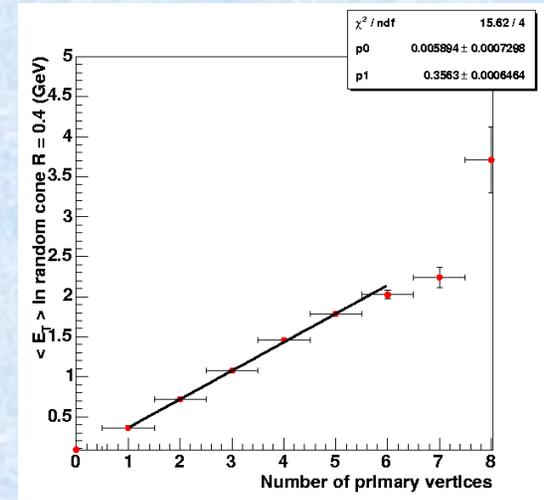


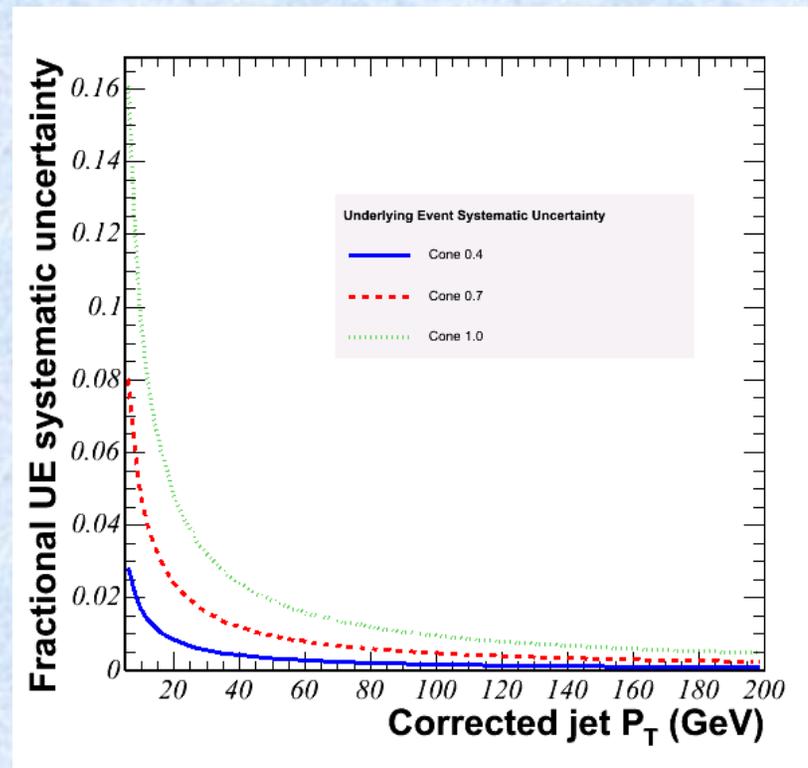
Figure 26: Left: Instantaneous luminosity for $W \rightarrow e\nu$ events measured up to September 2004. Right: Mean number of reconstructed vertices in $W \rightarrow e\nu$ events versus the instantaneous luminosity. Also shown is a straight line fit.

- Ad alta luminosita' instantanea
- Il numero di vertici ricostruito e' un buon estimatore della luminosita'
- La correzione dipende dal raggio R
- Ottenuta misurando l'energia contenuta in coni $\eta-\phi$ random in eventi Minimum Bias



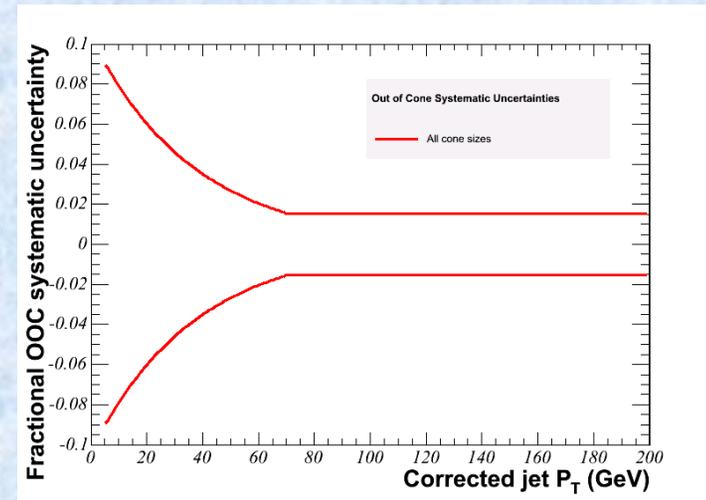
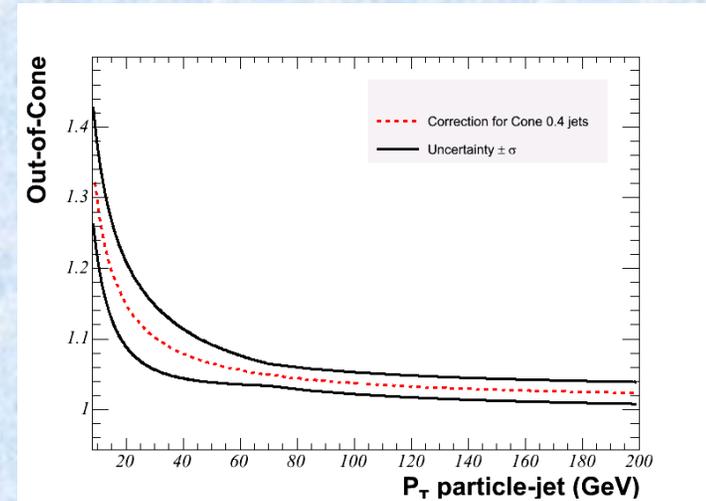
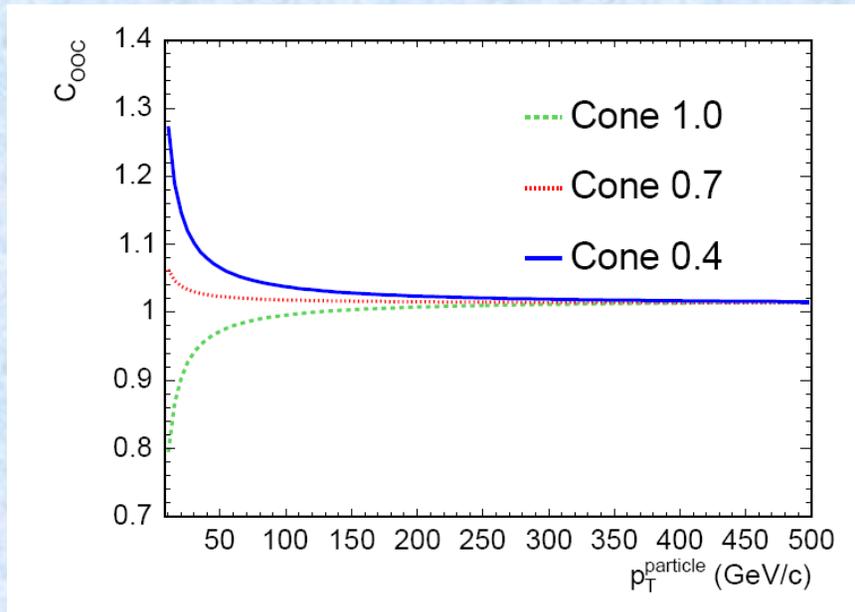
Underlying Event correction

- Dal confronto dei jet a livello particella con e senza l'underlying event in Pythia
- Correzione importante soprattutto per coni grandi → incertezza maggiore a basso Et

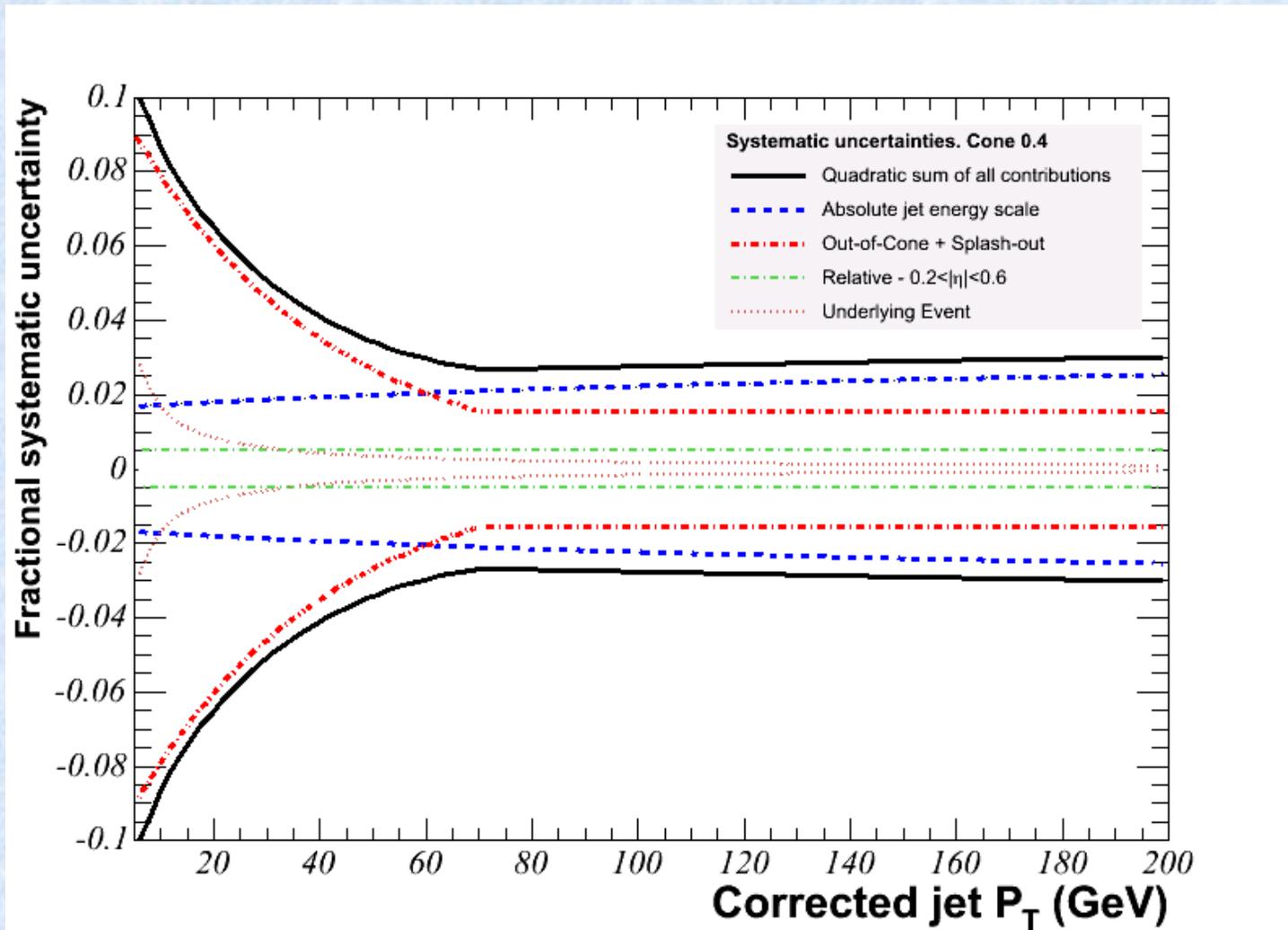


Out-of-cone correction

- Anche qui il confronto e' con un modello MC



Sistematica totale



Test Finali/ gamma - jet

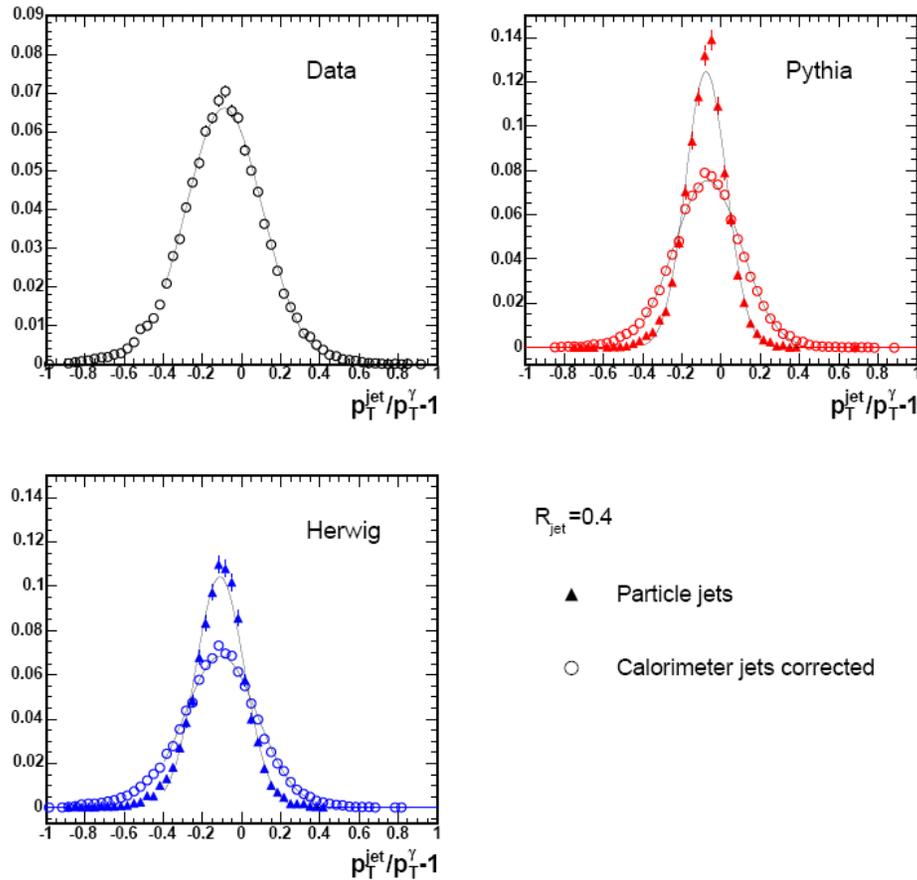
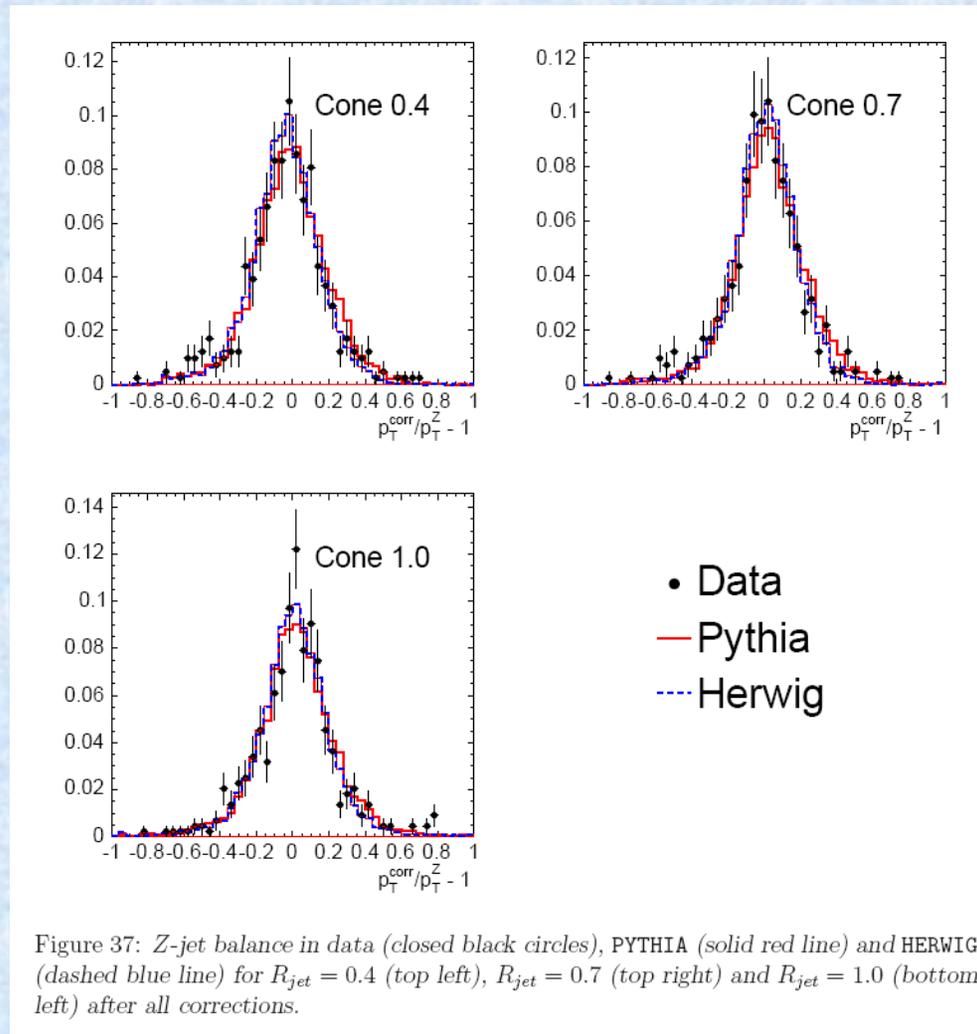


Figure 35: γ -jet balance in data, PYTHIA and HERWIG for $R_{jet}=0.4$. Overlaid is the corresponding γ -jet balance on particle level jets (triangles) calculated using particles at generator level without detector simulation. The distributions are normalized to 1.

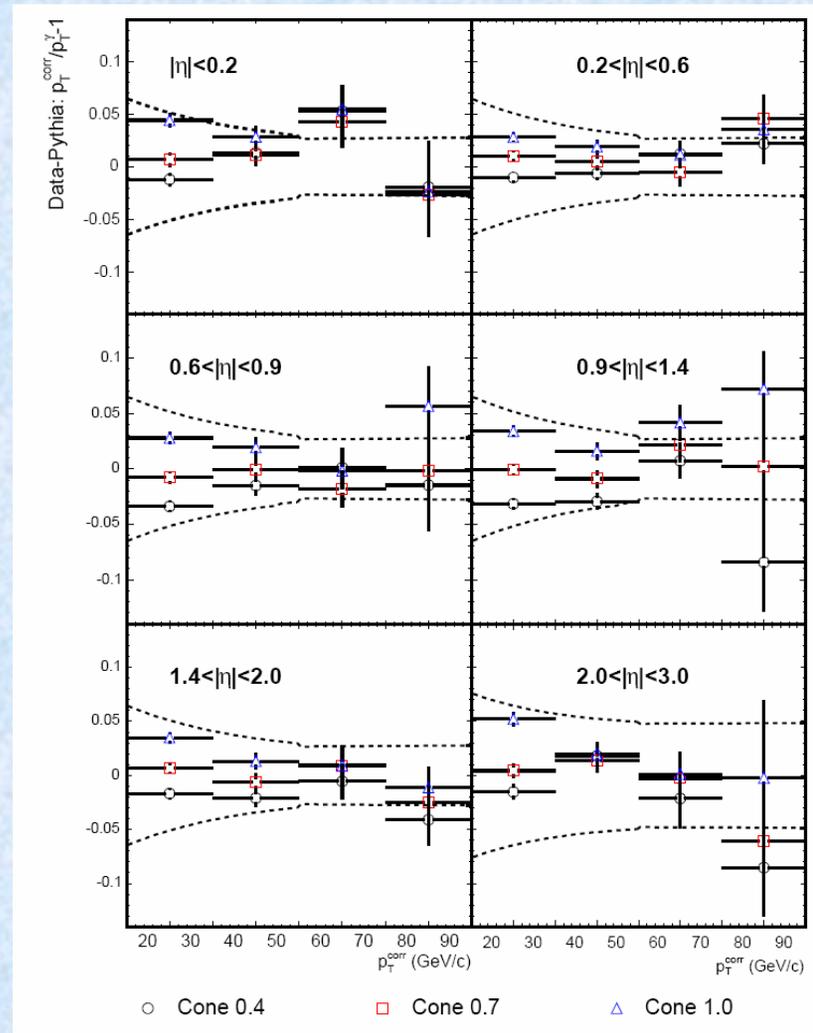
Sample	$R_{jet}=0.4$	$R_{jet}=0.7$	$R_{jet}=1.0$
Data	-0.019 ± 0.001	0.010 ± 0.001	0.024 ± 0.001
PYTHIA	-0.001 ± 0.001	0.011 ± 0.001	0.000 ± 0.001
HERWIG	-0.040 ± 0.001	-0.018 ± 0.001	-0.023 ± 0.001

Sample	$R_{jet}=0.4$	$R_{jet}=0.7$	$R_{jet}=1.0$
Calorimeter jets			
Data	0.199 ± 0.001	0.191 ± 0.001	0.191 ± 0.001
PYTHIA	0.176 ± 0.001	0.171 ± 0.001	0.169 ± 0.001
HERWIG	0.192 ± 0.001	0.181 ± 0.001	0.178 ± 0.001

Test finali/ Z-jet

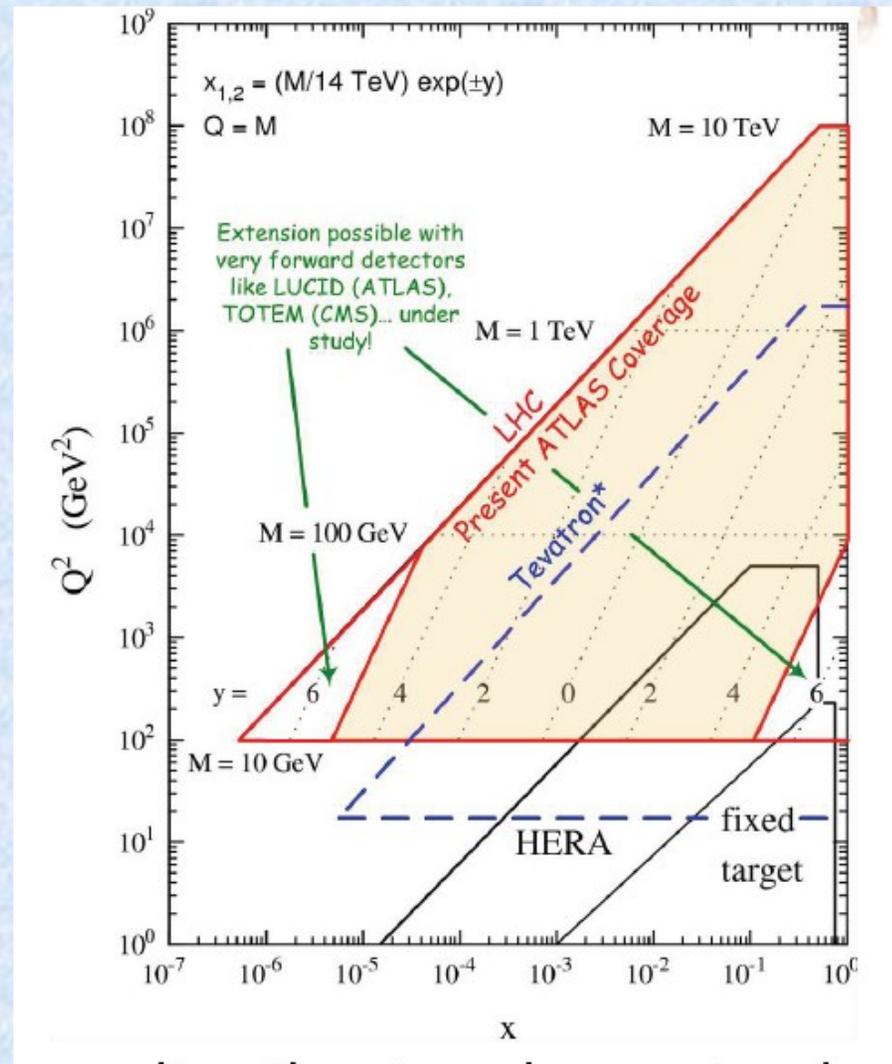


Verifica sistematiche



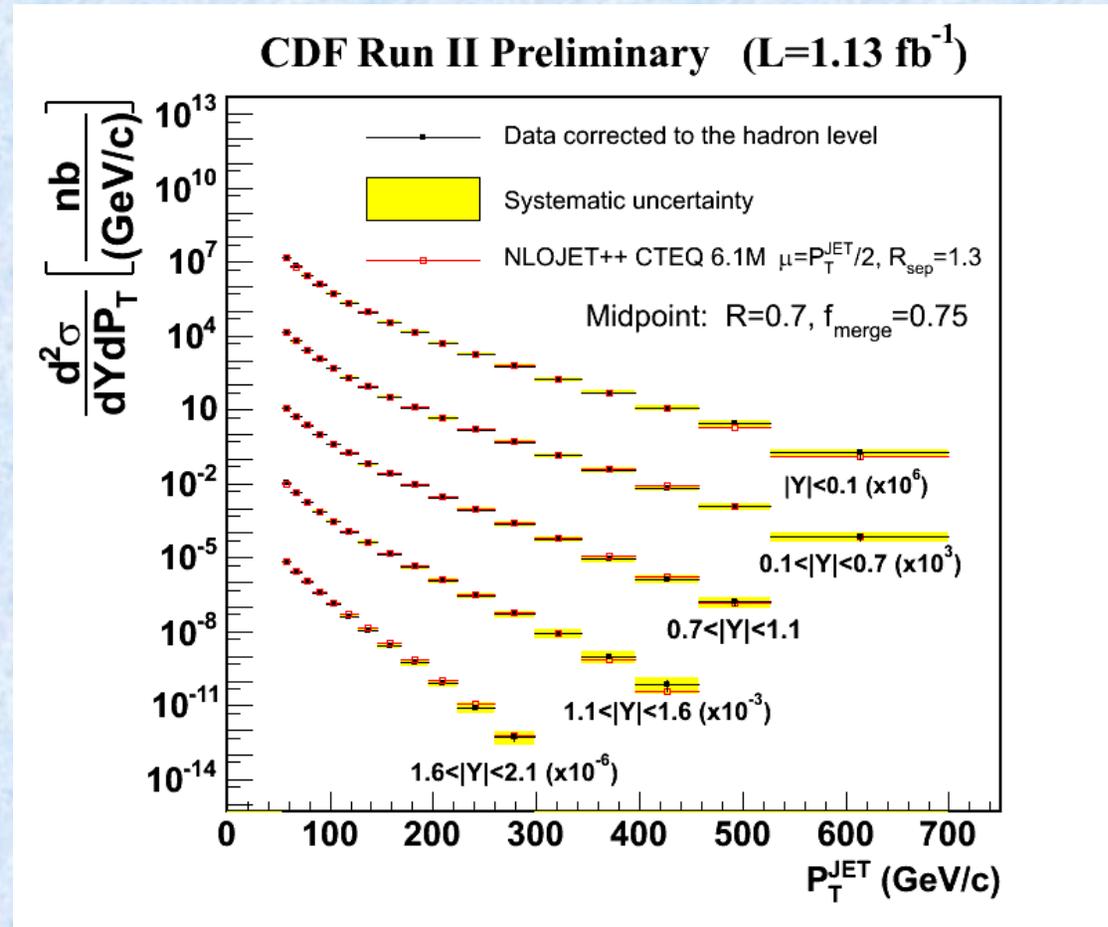
Sezione d'urto inclusiva di jets

- Il processo piu' frequente al collider
 - Test QCD
 - Verifica natura puntiforme dei quark
 - Constraint sulle PDF del protone
 - Particolarmente importante ad alta rapidita' → basso x

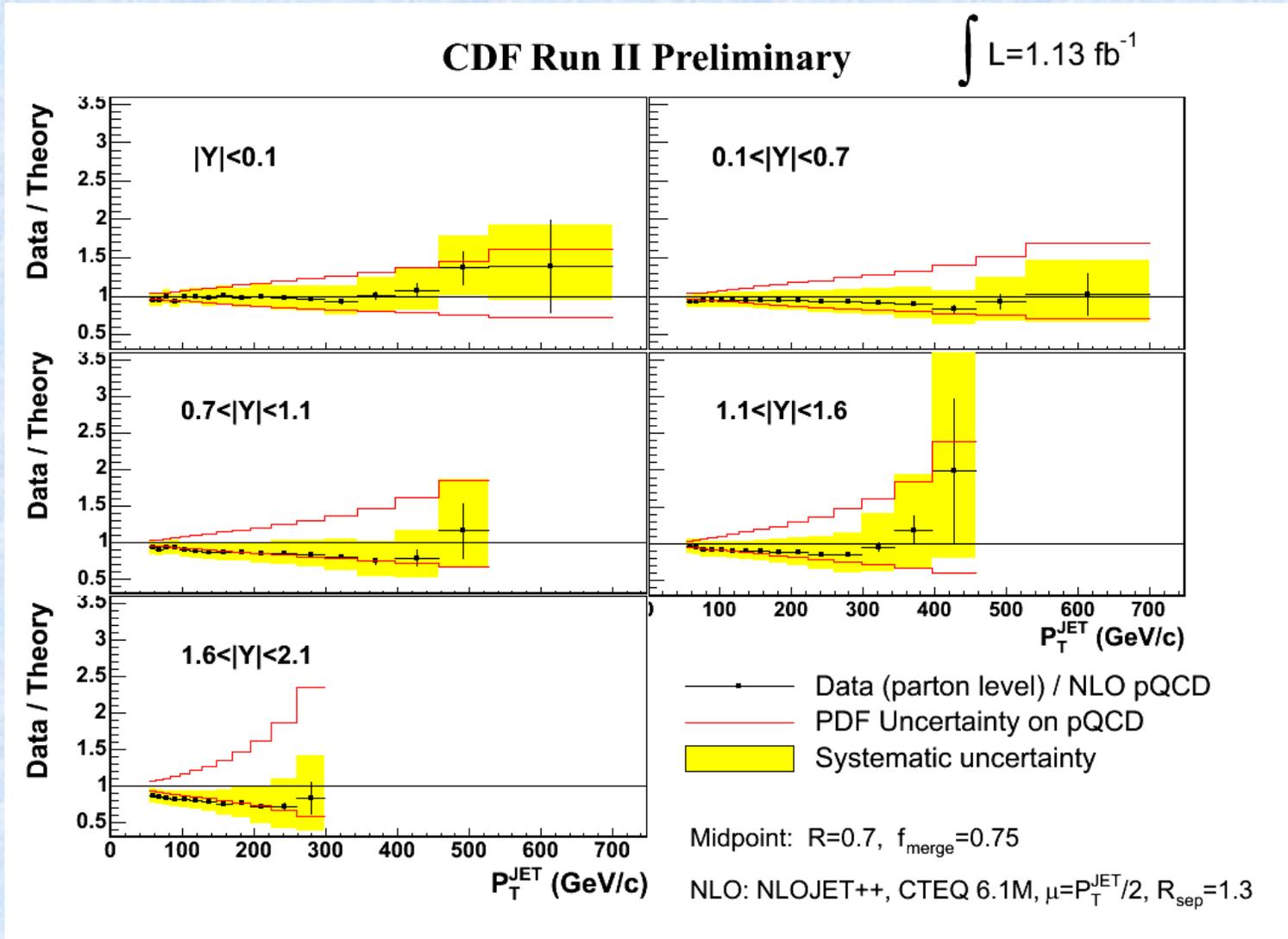


Sezione d'urto inclusiva di jets

- Misura fino a 2.1 unita' di rapidita'
- Studio e confronto con la teoria su 8 ordine di grandezza



Confronto con la teoria



Impatto della sistematica su JES

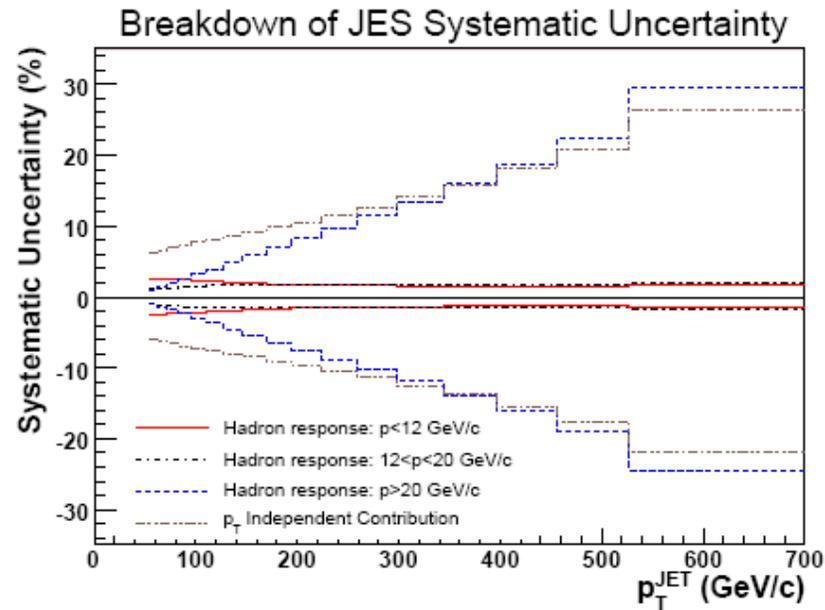


FIG. 12: The percentage uncertainty on the jet cross section in the rapidity region $0.1 < |y| < 0.7$ due to different components of the jet energy scale systematic uncertainties. The decomposition includes contributions due to the description of the calorimeter response to hadrons for three different ranges of hadron momentum and a p_T -independent component. More information can be found in the text.

Conclusioni

- Conoscenza della scala di energia dei jet a livello del 3% ad alta energia (10% a bassa energia)
- Calibrazione complessa che richiede l'utilizzo e la comprensione di molti dati diversi
- Attualmente sistematica principale per misure di jet e per la sezione d'urto dei jet
- Importante anche per la misura di precisione del top, sebbene in questo caso siano state introdotte tecniche di calibrazione in-situ
- La fisica dei jet e' complicata....

This document was created with Win2PDF available at <http://www.win2pdf.com>.
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.
This page will not be added after purchasing Win2PDF.