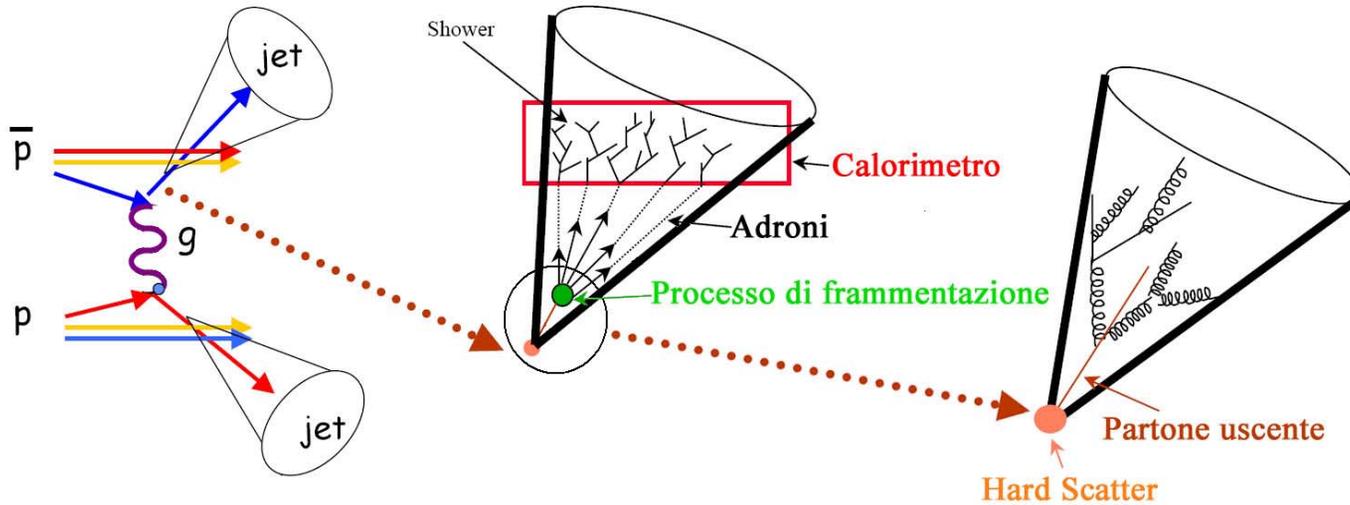


Correzioni alla scala di energia dei jet

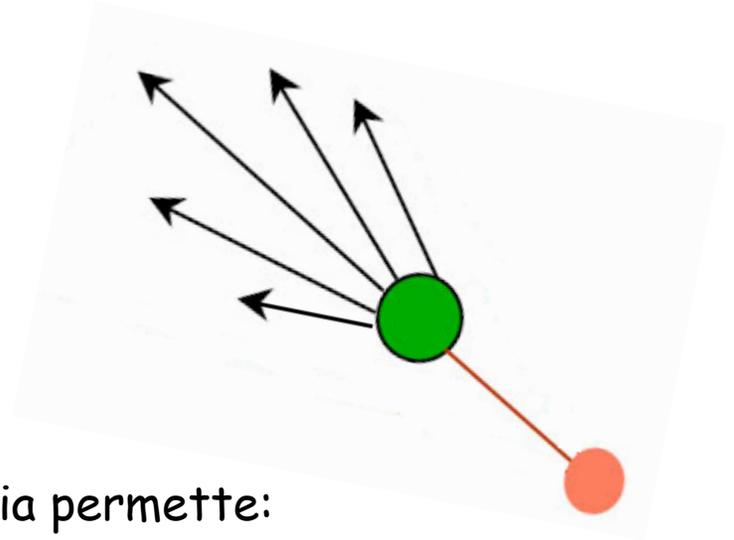
Corso di fisica Subnucleare II a.a. 2006/2007
Presentazione di Valerio Consorti

Cosa è un jet



- Il partone, dotato di colore, prodotto nell' hard scatter evolve in una cascata di quark e gluoni dai quali, attraverso un processo di adronizzazione, si genera un insieme di particelle prive di colore i cui impulsi sono mediamente collineari con l'impulso del partone che li ha generati → *JET*
- I jet sono una delle prove sperimentali dei quark e dei gluoni.

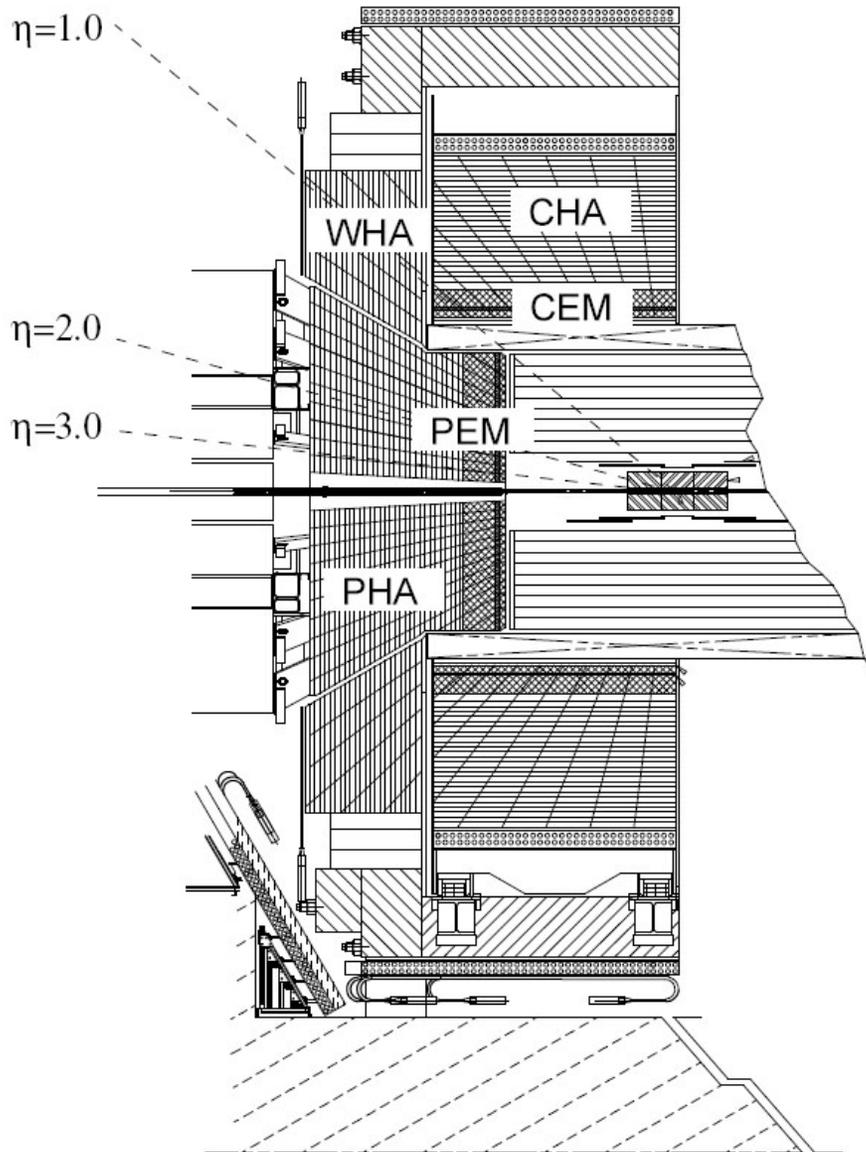
Perché misurare la scala di energia di un jet



La determinazione accurata della scala di energia permette:

- importanti raffronti fra teoria ed esperimenti ad esempio nella misura di sezioni d'urto
- attraverso la misura dell'energia del jet di risalire all'energia del partone che lo ha generato e dunque alla sua massa

Calorimetro di CDF



E' composto da 5 parti differenti di cui 2 sono calorimetri elettromagnetici:

1. CEM (central electromagnetic)
2. PEM (plug electromagnetic)

e 3 sono calorimetri adronici:

1. CHA (central hadronic)
2. WHA (wall hadronic)
3. PHA (plug hadronic)

Calorimetro di CDF

- Calorimetri centrali:

Coprono la regione polare $|\eta| < 1.1$ e sono divisi in due settori ad $\eta = 0$. Ogni settore è composto da torri di ampiezza 15° in azimuth e 0.1 in η .

-Il CEM è profondo 18 lunghezze di radiazione e garantisce una risoluzione in energia in risposta alla singola particella di $\frac{\sigma(E_T)}{E_T} = \frac{13.5\%}{\sqrt{E_T}} \oplus 1.5\%$

-Il CHA è profondo 4.7 lunghezze d'interazione e garantisce una risoluzione in energia in risposta alla singola particella di $\frac{\sigma(E_T)}{E_T} = \frac{50\%}{\sqrt{E_T}} \oplus 3\%$

-Il WHA è profondo 4.7 lunghezze d'interazione e garantisce una risoluzione in energia in risposta alla singola particella di $\frac{\sigma(E_T)}{E_T} = \frac{75\%}{\sqrt{E_T}} \oplus 4\%$

- Calorimetri in avanti:

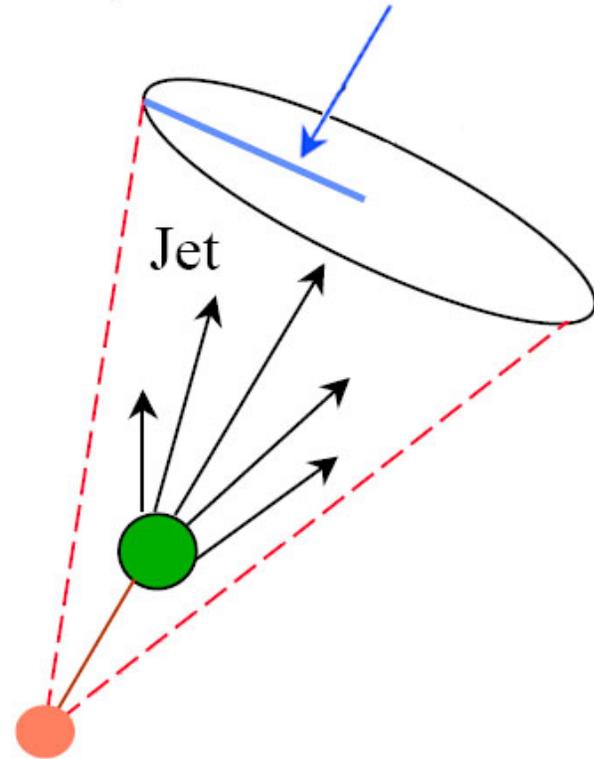
Coprono la regione polare compresa fra $1.1 < |\eta| < 3.6$ e sono segmentati in torri ampie 7.5° per $|\eta| < 2.11$ e 15° per $|\eta| > 2.11$.

-Il PEM è profondo 23.2 lunghezze di radiazione e garantisce una risoluzione in energia in risposta alla singola particella di $\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{16\%}{\sqrt{E}} \oplus 1\%$.

-Il PHA è profondo 6.8 lunghezze d'interazione e garantisce una risoluzione in energia in risposta alla singola particella di $\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{80\%}{\sqrt{E}} \oplus 5\%$

Algoritmo di clustering

$$R = \sqrt{(\eta^{tower} - \eta^{jet})^2 + (\phi^{tower} - \phi^{jet})^2}$$



L'algoritmo utilizzato a CDF per l'individuazione di un jet nell'ambito della misura della scala di energia è stato l'algoritmo del cono.

- si raggruppano tutte le torri che hanno accumulato $E_{Ti} = E_i \sin(\theta_i) > 1 \text{ GeV}$
- le torri che verificano questa condizione sono numerate in ordine di energia decrescente
- per ognuna di queste torri si definisce un cluster di torri ad essa adiacenti in raggio $R = 0.4, 0.7, 1.0$
- creata questa prima lista di cluster viene calcolata l'energia e la direzione del jet:

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

- la procedura viene ripetuta iterativamente fino a quando la lista di torri assegnate al cluster non risulta stabile.

Algoritmo di clustering

Se alla fine delle iterazioni emergono 2 cluster sovrapposti:

- se la sovrapposizione investe più del 50% delle torri allora i 2 cluster vengono fusi in un unico jet.
- se la sovrapposizione è minore del 50% le torri in comune vengono divise fra i 2 jet attribuendo ognuna di esse al jet più vicino

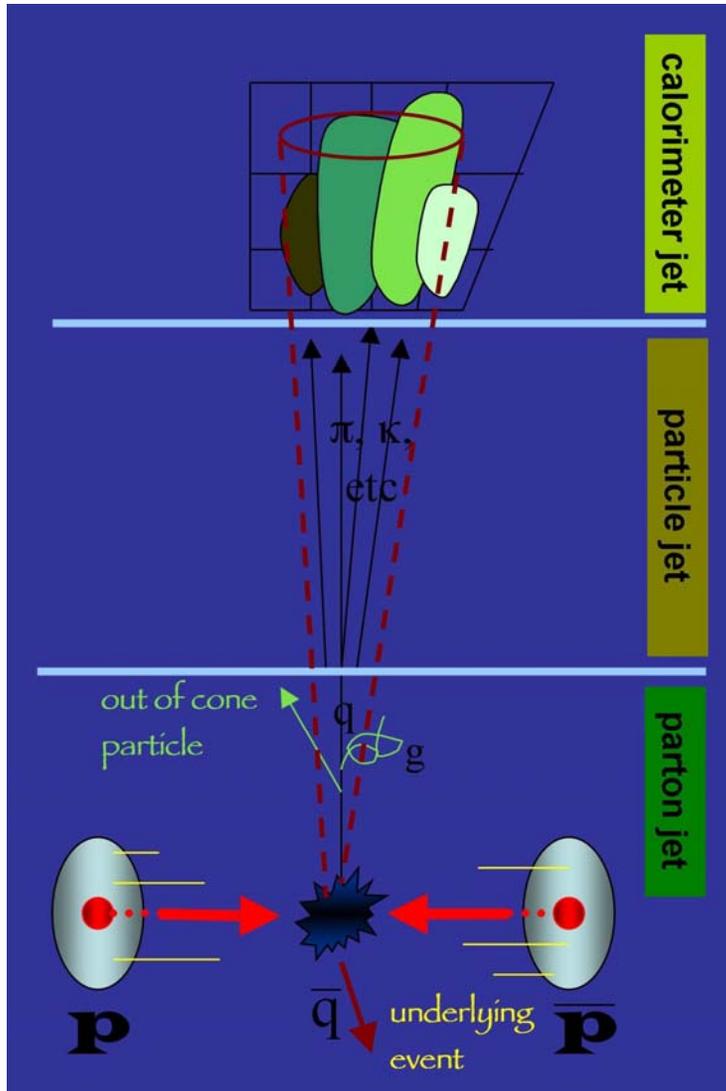
I parametri effettivi del jet vengono ricavati dalla lista finale delle torri come:

$$E_{jet} = \sum_{i=0}^{N_{tow}} E_i, \quad p_x^{jet} = \sum_{i=0}^{N_{tow}} E_i \sin(\theta_i) \cos(\phi_i), \quad p_y^{jet} = \sum_{i=0}^{N_{tow}} E_i \sin(\theta_i) \sin(\phi_i), \quad p_z^{jet} = \sum_{i=0}^{N_{tow}} E_i \cos(\theta_i)$$

$$p_T^{jet} = \sqrt{(p_x^{jet})^2 + (p_y^{jet})^2}, \quad E_{T,jet} = E_{jet} \sin \theta_{jet}, \quad \phi_{jet} = \arctan \frac{p_y^{jet}}{p_x^{jet}}, \quad \sin \theta_{jet} = \frac{p_T^{jet}}{\sqrt{(p_x^{jet})^2 + (p_y^{jet})^2 + (p_z^{jet})^2}}$$

Misura dell'energia di un jet

$$p_T^{parton} = (p_T^{jet} \times C_\eta - C_{MI}) \times C_{Abs} - C_{UE} + C_{OOC}$$



C_η : correzione che assicura una risposta omogenea del calorimetro su tutto il range di variabilità della semi-rapidità η .

C_{Abs} : correzione della risposta del calorimetro ad una particella del jet con impulso p .

C_{MI} : correzione che tiene conto delle possibili interazioni multiple all'interno dello stesso bunch crossing.

C_{UE} : correzione che tiene conto degli underlying events.

C_{OOC} : correzione che tiene conto dell'energia fuoriuscita dal cono.

Metodo di bilanciamento con i dijet

Anche dopo la calibrazione, la risposta dei calorimetri presenta ancora una forte dipendenza da η . \longrightarrow metodo del *dijet balancing*.

Metodo del dijet balancing:

- consiste nel richiedere in eventi a due jet un bilanciamento dell'impulso nel piano trasverso.
- definito "jet trigger" un jet con $0.2 < |\eta| < 0.6$ e "probe jet" l'altro, definiamo la funzione di bilanciamento β_{dijet} come:

$$\beta_{dijet} \equiv \frac{2 + \langle f_b \rangle}{2 - \langle f_b \rangle} = \frac{p_T^{probe}}{p_T^{trigger}}$$

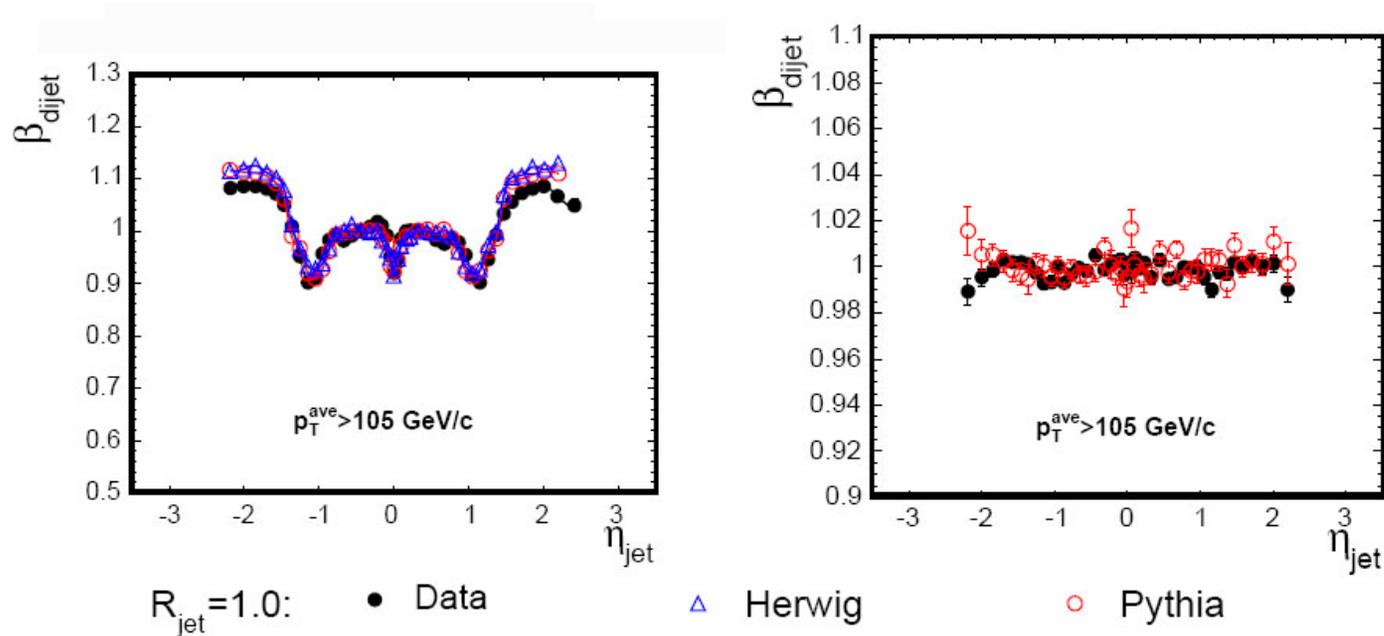
dove $f_b \equiv \frac{\Delta p_T}{p_T^{ave}} = \frac{p_T^{probe} - p_T^{trigger}}{(p_T^{probe} + p_T^{trigger})/2}$

Se il bilanciamento in η fosse perfetto la $\beta_{dijet}(\eta)$ sarebbe una costante pari ad 1.

Selezione degli eventi per la riduzione della radiazione di QCD:

- I jet devono essere back to back sul piano r - Φ .
- Se c'è un terzo jet questo deve essere molto meno energetico dei due principali.
- La media degli impulsi trasversi dei due jet deve essere 5 GeV sopra la soglia di trigger.
- La significanza della missing energy definita come $E_T/\sqrt{\sum_i E_{T,i}}$, dove E_T è la missing energy e la somma è estesa su tutto il calorimetro deve essere piccola.

Stima dell'errore sistematico dipendente da η



L'errore sistematico a questa correzione è stato ottenuto variando i tagli sulla selezione degli eventi ed il metodo di fit e prendendo ogni variazione di β_{dijet} come errore sistematico.

$ \eta $ range	0.0 – 0.2	0.2 – 0.6	0.6 – 0.9	0.9 – 1.4	1.4 – 2.0	2.0 – 2.6	2.6 – 3.6
$p_T < 12 \text{ GeV}/c$	1.5 %	0.5 %	1.5 %	2.5 %	1.5 %	5.0 %	7.5 %
$12 \leq p_T < 25 \text{ GeV}/c$	1.5 %	0.5 %	1.5 %	1.5 %	1.5 %	3.0 %	6 %
$25 \leq p_T < 55 \text{ GeV}/c$	1.0 %	0.5 %	1.0 %	1.0 %	0.5 %	1.5 %	6 %
$p_T \geq 55 \text{ GeV}/c$	0.5 %	0.5 %	0.5 %	0.5 %	0.5 %	1.5 %	6 %

Correzione assoluta all'energia dei jet

Scopo: trasformare l'energia del jet calorimetrico nella corrispondente energia del jet di particelle che lo ha generato.

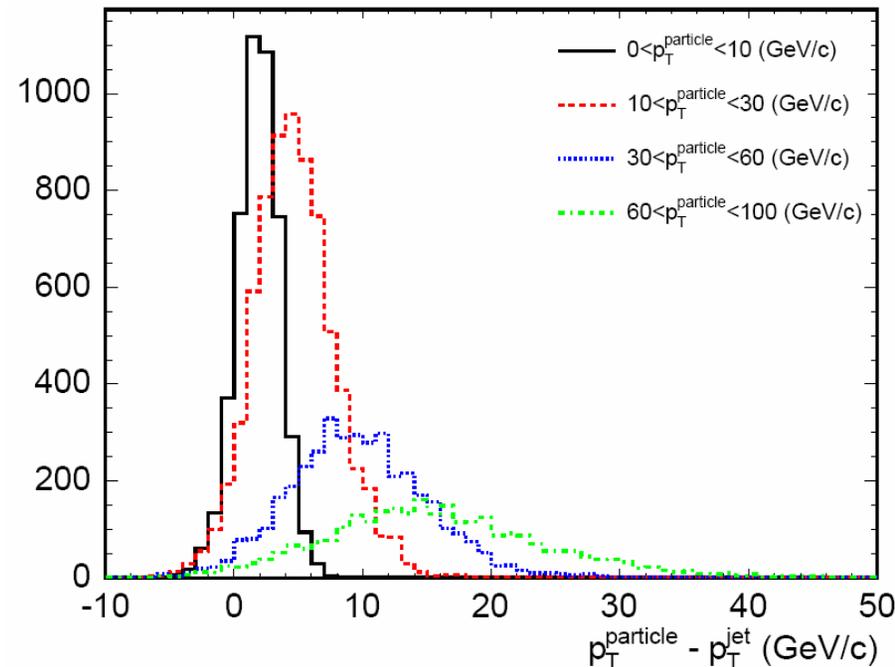
- *energia assoluta* di un jet: valore più probabile dell'impulso trasverso del jet calorimetrico dato un jet di particelle di impulso trasverso fissato.

La densità probabilità $d\mathcal{P}$ di avere un jet calorimetrico con $P < p_T < P + dP$ generato da un jet di particelle di un dato impulso trasverso, è parametrizzabile in funzione di $\Delta p_T = p_T^{\text{particle}} - p_T^{\text{jet}}$.

In un jet l'impulso delle particelle non è fissato dunque bisogna fare la convoluzione di $d\mathcal{P}$ con lo spettro di impulsi delle particelle appartenenti al jet.

Questa distribuzione è stata fittata con una likelihood su un *set di dijet simulati con PYTHIA* per fissarne i parametri liberi con le seguenti richieste:

1. $0.2 < |\eta_{\text{jet}}| < 0.6$
2. il jet deve essere uno dei due jet principali
3. ogni jet di particelle deve coincidere con il più vicino jet calorimetrico con un $\Delta R < 0.1$



Errore sulla correzione assoluta all'energia dei jet

L'errore da associare a questa correzione proviene da tre fonti:

- l'incertezza sulla risposta alla singola particella,
- l'incertezza sullo spettro di particelle
- l'incertezza sulla stabilità della scala di energia del calorimetro.

1) Incertezza sulla risposta alla singola particella:

Detta dunque $R(p)$ la risposta alla singola particella, l'incertezza sulla scala di energie del jet sarà data da:

$$\Delta E/E = (E - E^\pm)/E = \left[\sum_{i=1}^N p_i R(p_i) - \sum_{i=1}^N p_i R(p_i) (1 \pm \Delta(E/p)) \right] / E = \mp \sum_{i=1}^N p_i R(p_i) \Delta(E/p) / E$$

dove $\Delta(E/p)$ è l'incertezza su $\langle E/p \rangle$ ovvero sulla risposta media del calorimetro ad una particella di impulso p .

Errore sulla correzione assoluta all'energia dei jet

2) Incertezza sullo spettro di particelle:

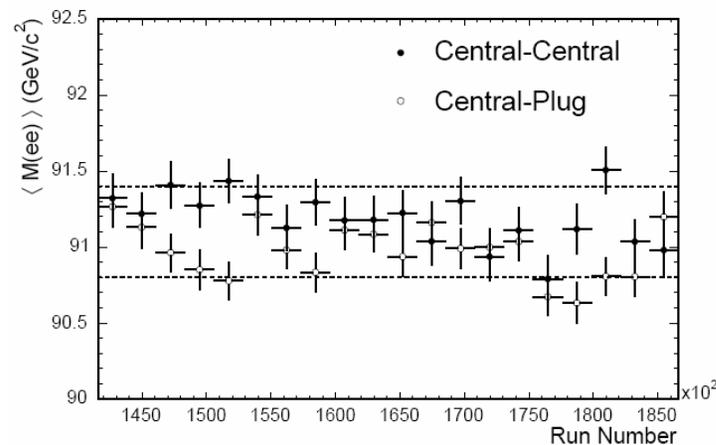
E' dovuto ai modelli di adronizzazione implementati nei simulatori utilizzati, PYTHIA e HERWIG, e dalla stima dell' efficienza sulla ricostruzione della traccia.

Definito:

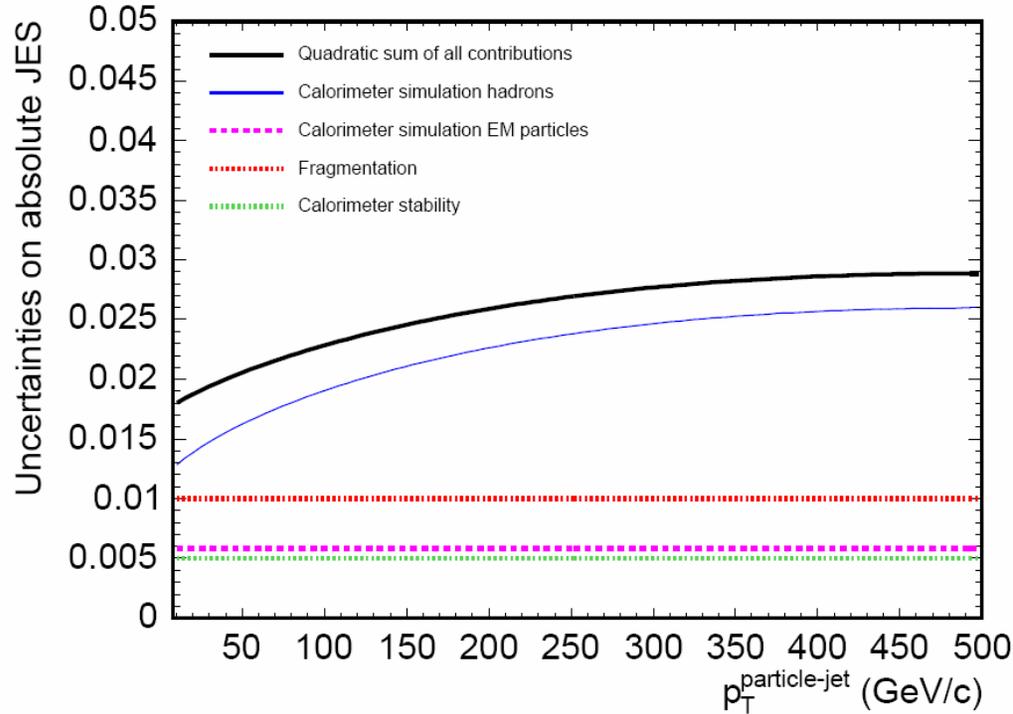
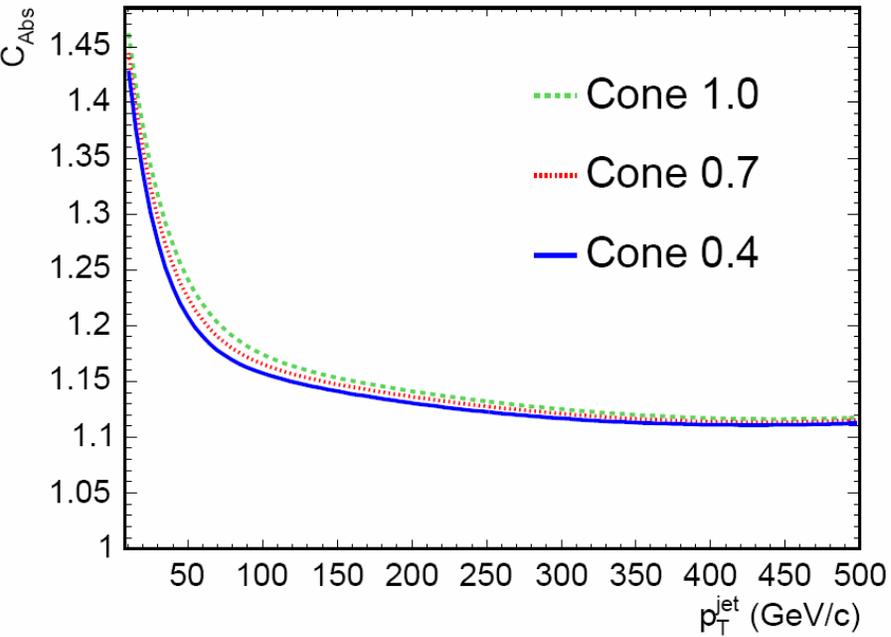
$$R_{ave} = \frac{\sum_{i=1}^N p_i R(p_i)}{\sum_{i=1}^N p_i}$$

l'errore sistematico sarà dato dalla differenza di questa grandezza calcolata attraverso la simulazione e direttamente dai dati sperimentali.

3) Incertezza sulla stabilità della scala di energia del calorimetro



Andamenti di C_{Abs} e dell'errore sistematico v.s. p



Correzione dovuta all'interazione multipla $p\bar{p}$

Il numero di interazioni $p\bar{p}$ in un bunch crossing segue una distribuzione Poissoniana con una media che cresce linearmente con la luminosità.

Queste interazioni extra fanno sì che l'energia misurata del jet possa risultare maggiore di quella effettiva.

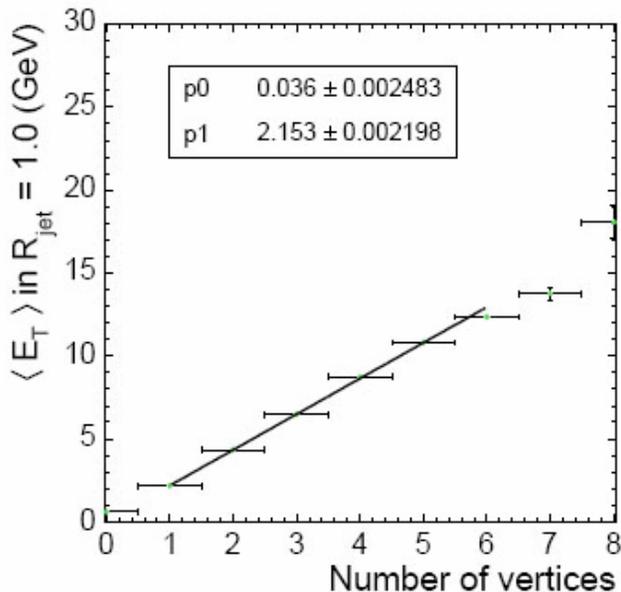
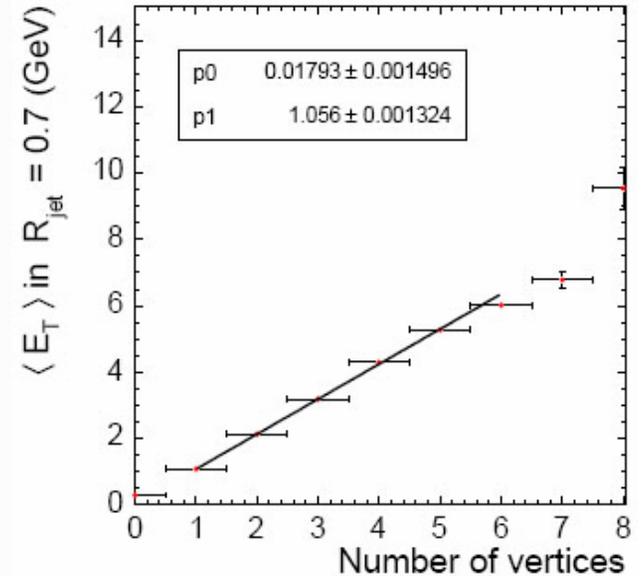
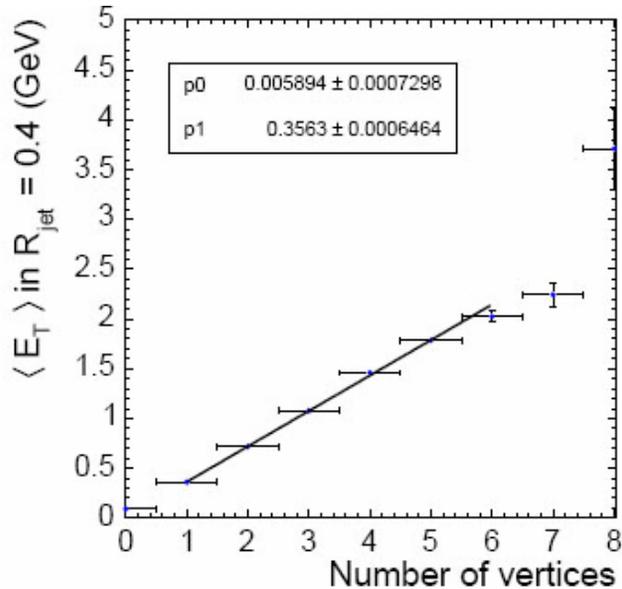
Il miglior estimatore del numero medio di interazioni è il numero di z-vertici N_{vtx} ricostruiti dall'intersezione delle tracce con l'asse del fascio.

- Procedura di correzione:

Si è usato un campione di dati minimum bias e si è studiata l'energia trasversa rilasciata da questi in un cono definito selezionando in modo random una seed tower nella regione $0.2 < |\eta| < 0.6$ in funzione del N_{vtx} .

L'incertezza su questa correzione dipende dall'efficienza dell'algoritmo di ricostruzione dei vertici .

Correzione dovuta all'interazione multipla pp



E' stato riscontrato un andamento lineare.
La correzione da apportare all'energia del jet
sarà pertanto:

$$\langle E_T \rangle = p1 \times N_{\text{vtx}}$$

Il fatto che l'intercetta non risulti nulla è dovuto
ad inefficienze sulla ricostruzione dei vertici. Di
ciò se ne tiene conto attribuendo alla correzione un
errore sistematico del 15%.

Correzione dovuta all' OOC e agli UE

La correzione C_{OOC} tiene conto dell'energia persa fuori dal cono in cui è stato definito il jet. I principali processi che portano a questa perdita di energia sono due:

- 1) radiazione di gluoni nello stato finale a grandi angoli rispetto al partone iniziale (FSR)
- 2) particelle che spiraleggiano nel COT ed escono dal cono o non raggiungono il calorimetro.

La correzione C_{UE} tiene invece conto di quell'energia assegnata al jet ma che proviene invece da eventi non correlati al partone che ha generato il jet come:

- 1) particelle generate da gluoni prodotti per radiazione nello stato iniziale (ISR).
- 2) particelle provenienti da partoni spettatori con una connessione di colore con gli altri partoni del protone.

Correzione dovuta all' OOC e agli UE

Procedura:

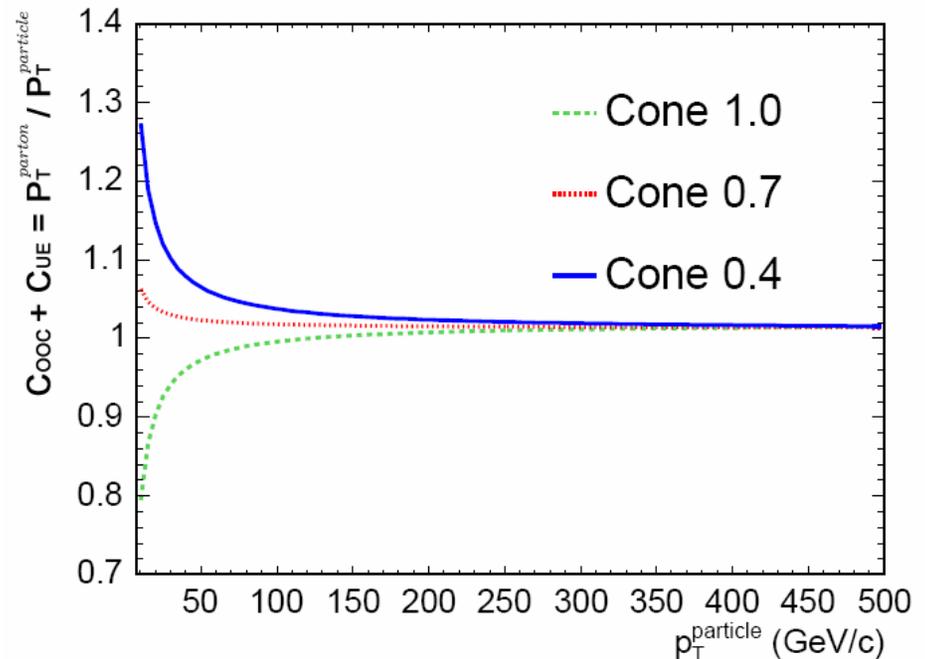
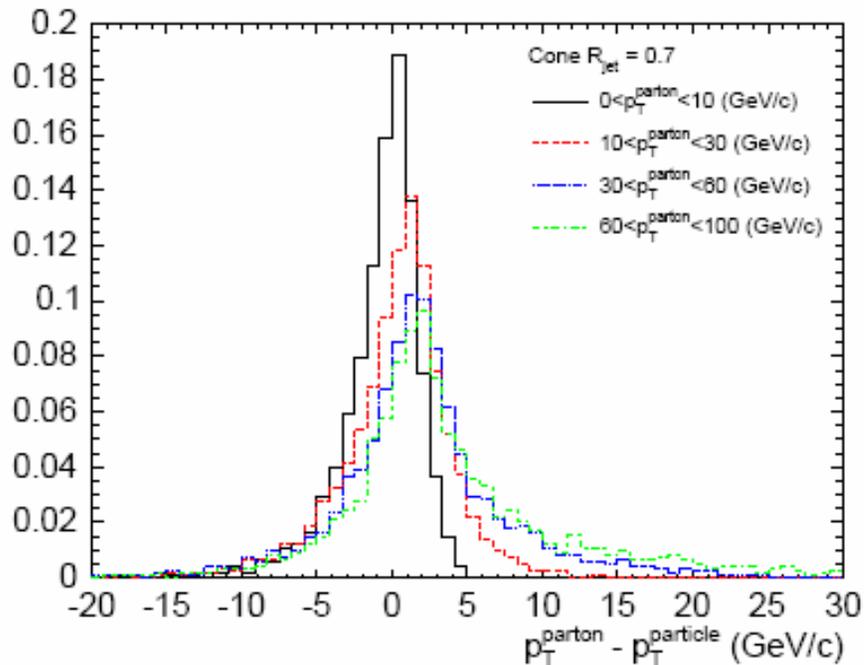
Campione:

- dijet di particelle simulati con PYTHIA

richieste:

- corrispondenza col partone iniziale in $\Delta R < 0.4$.
- $0.2 < |\eta| < 0.6$

Come fatto per la correzione assoluta al livello calorimetrico, ora si è parametrizzato la distribuzione dei jet di particelle in funzione della differenza $p_T^{\text{parton}} - p_T^{\text{particle}}$.



Verifica delle correzioni con γ -jet

Poiché l'energia del fotone viene misurata molto accuratamente nel CEM questo costituisce un valido test sulla correzione della scala di energia dei jet.

Il principali background sono $\pi^0 \longrightarrow \gamma\gamma$ e $\eta \longrightarrow \gamma\gamma$.

Selezione degli eventi

fotoni con:

- $p_T > 27 \text{ GeV}$

-meno di 1 GeV rilasciato nelle torri entro un raggio $\Delta R = 0.4$

Per ridurre il background dovuto alla QCD si è richiesto che:

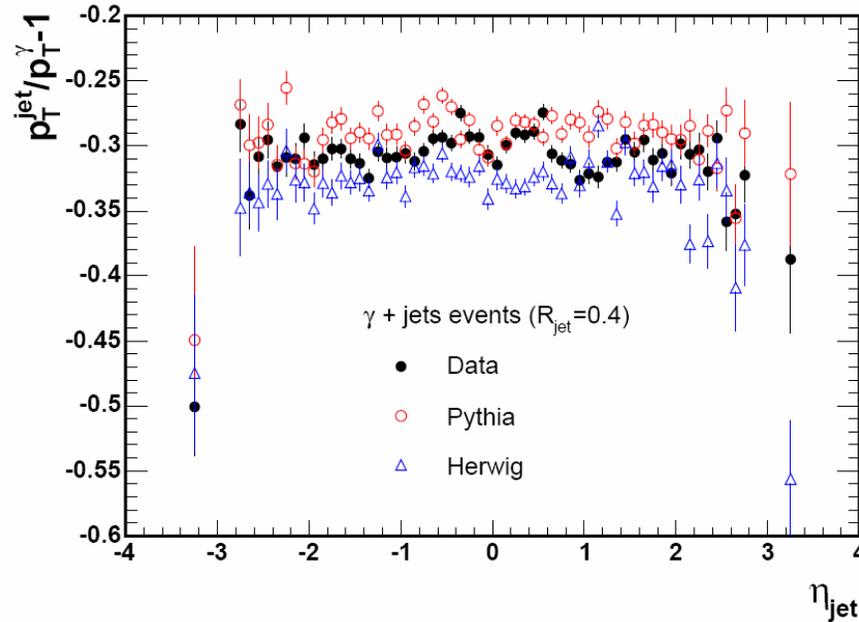
-il fotone ed il jet fossero back to back

-gli eventi avessero solo un jet

- $N_{\text{vtx}} = 1$

Verifica delle correzioni con γ -jet

Dopo l'applicazione della correzione C_η il bilanciamento sul piano trasverso dei γ -jet misurato è:



Se si aggiunge anche C_{Abs} :

Se aggiungiamo anche COOC e CUE:

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

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

Verifica delle correzioni con Z-jet

Si è usato un campione di Z-jet e si è selezionato il canale $Z \rightarrow l^+l^-$.

Vantaggio rispetto ai γ -jet:

- bassissimo livello di background

Svantaggi rispetto ai γ -jet:

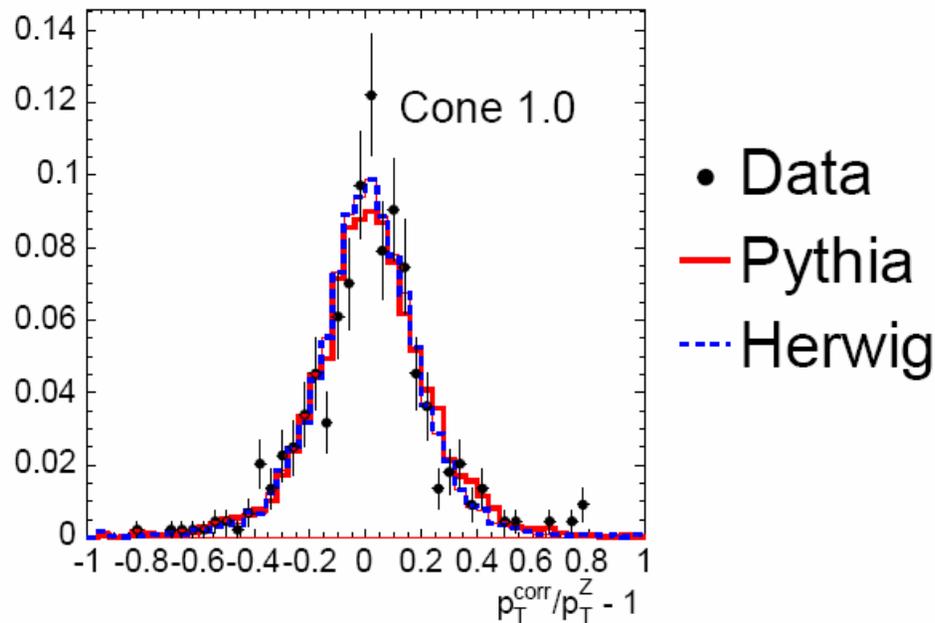
- poca statistica di eventi

Selezione degli eventi:

1. Z e jet devono essere back to back $\longrightarrow \Delta\Phi(\text{jet},Z) > 3 \text{ rad}$
2. non ci devono essere altri jet con $p_T > 3 \text{ GeV}$
3. $|\eta| < 2.4$

Verifica delle correzioni con Z-jet

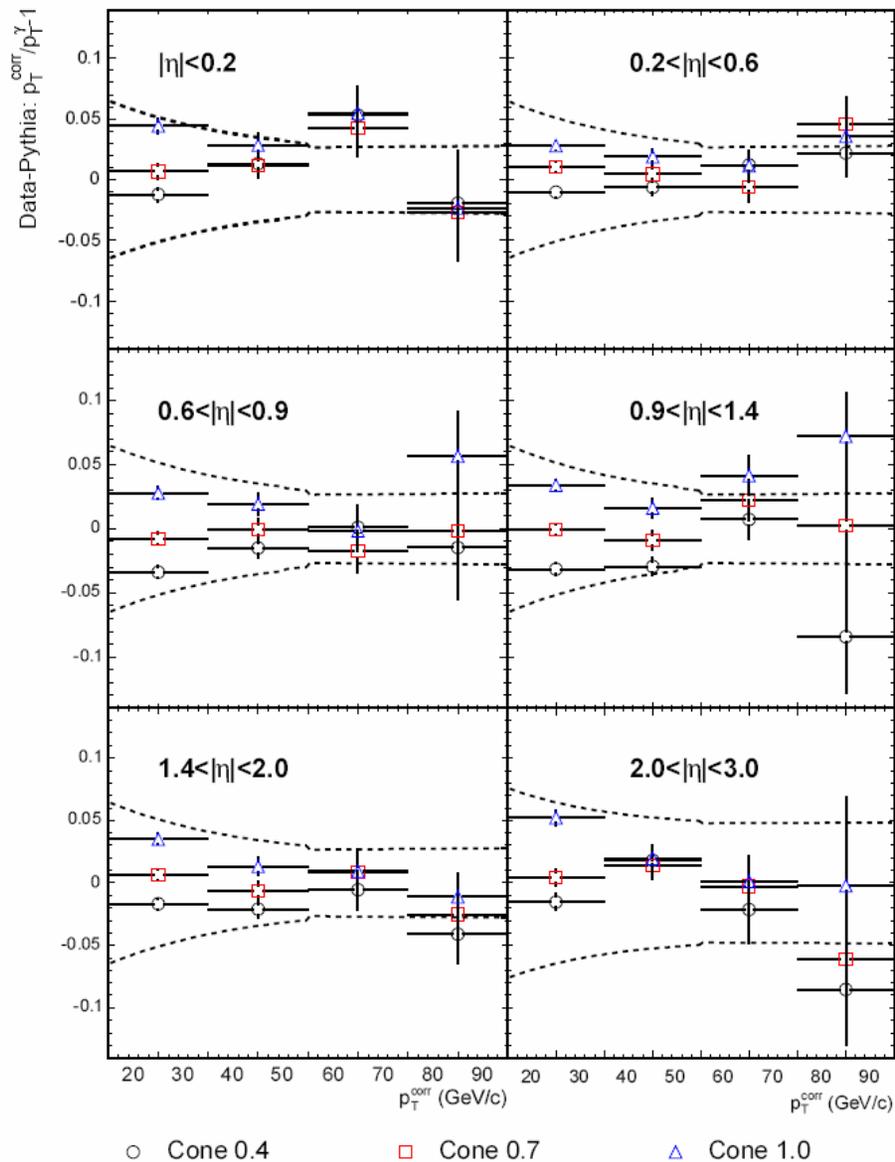
Come fatto per i γ -jet, anche qui è stato misurato il bilanciamento degli impulsi sul piano trasverso.



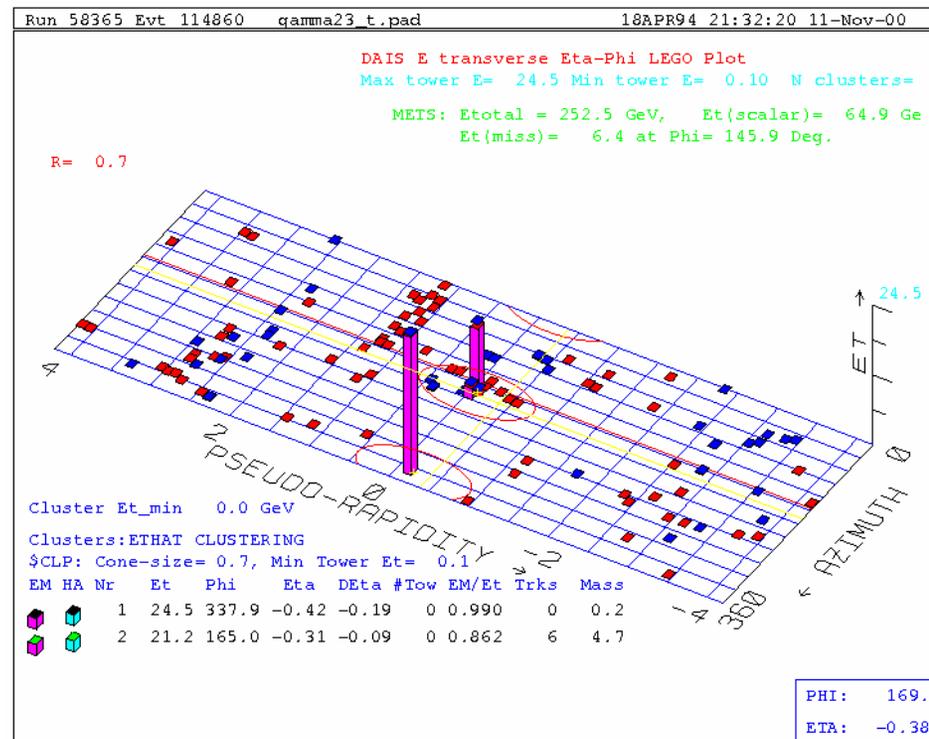
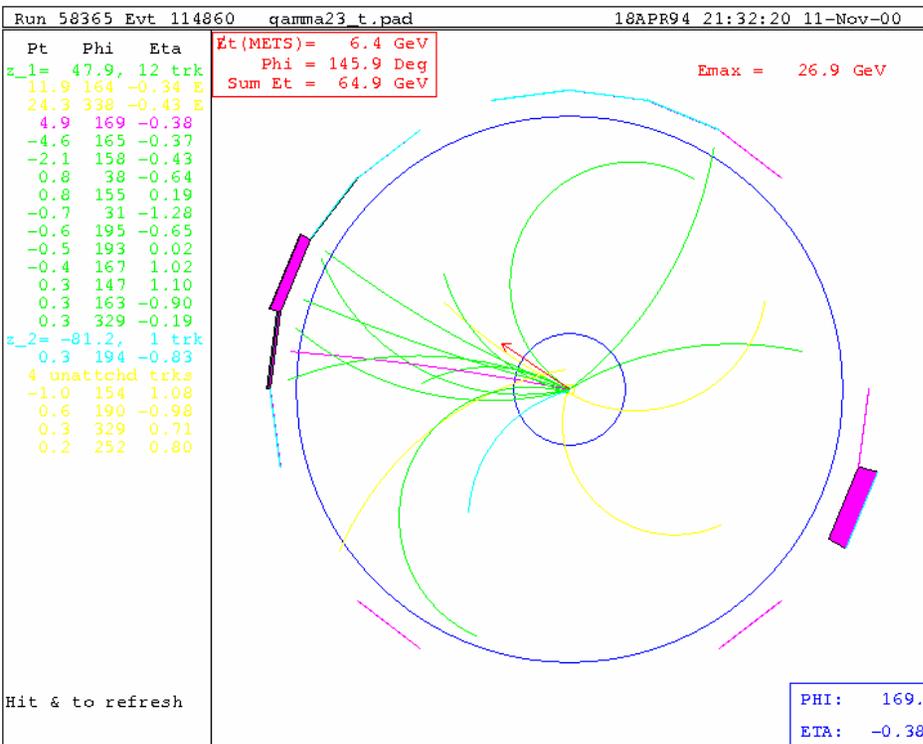
Sample	$R_{jet} = 0.4$	$R_{jet} = 0.7$	$R_{jet} = 1.0$
Data	-0.026 ± 0.009	0.007 ± 0.009	0.013 ± 0.009
PYTHIA	-0.016 ± 0.003	0.019 ± 0.003	0.015 ± 0.003
HERWIG	-0.032 ± 0.003	-0.011 ± 0.002	-0.009 ± 0.003

Verifica dell'incertezza con γ -jet

Per verificare le incertezze è stata graficata la differenza fra i bilanciamenti ottenuti dai dati sui γ -jet e dalle simulazioni con PYTHIA in funzione di p_T del γ .

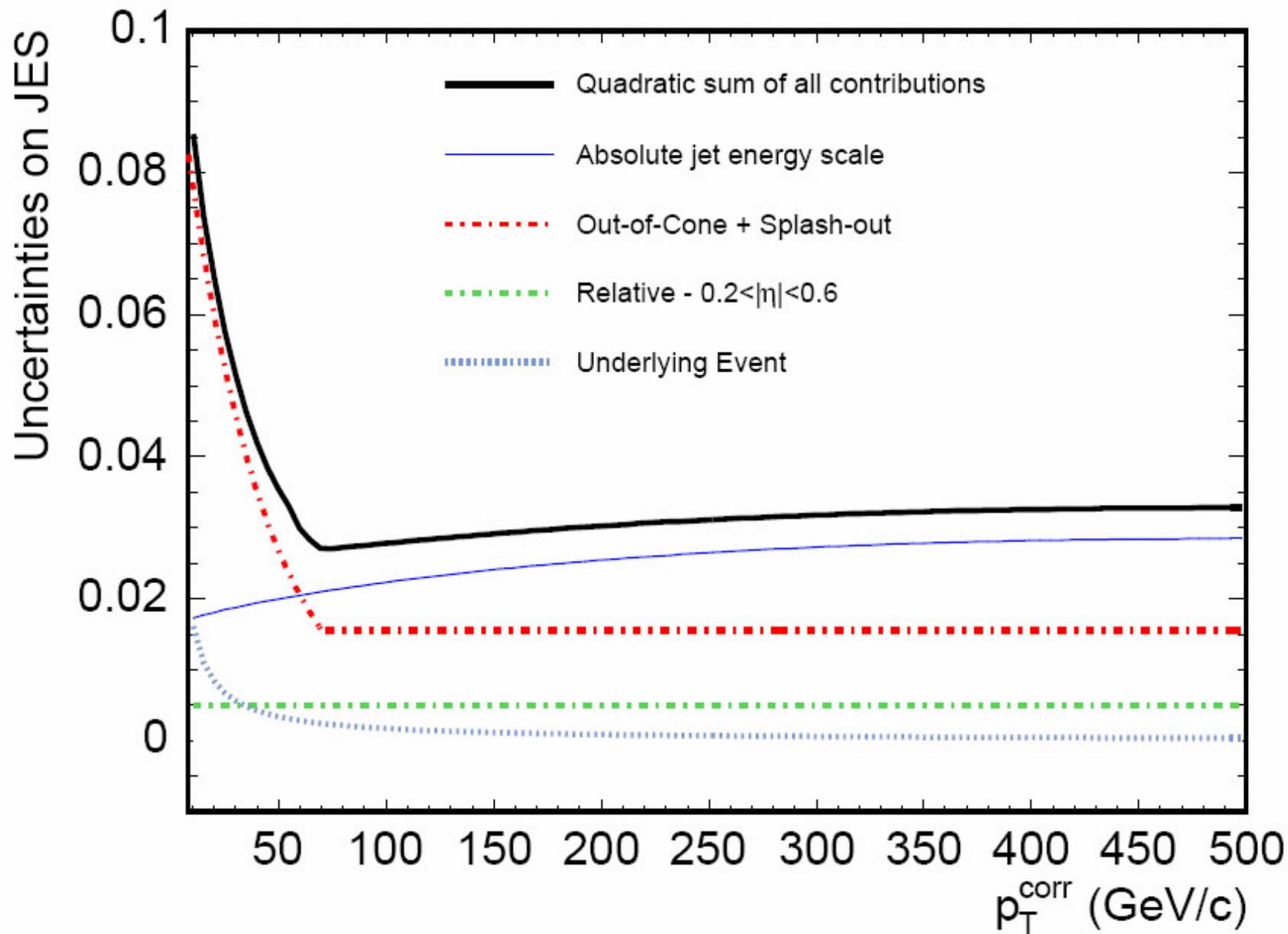


Eventi γ -jet



Evento γ -jet rilevato a CDF nella run-I.
Si noti la totale assenza di attività adronica attorno al fotone.

Conclusioni



Bibliografia

- [1] A. Bhatti, F. Cannelli, B. Heinemann: "Determination of jet energy scale at collider detector at Fermilab"
Nucl.Instrum.Meth. A566 (2006) 375-412
- [2] C. Dionisi: Dispense del corso di fisica subnucleare II
- [3] M. D'Onofrio, K. Hatakeyama, A. Metha: "Generic jet energy corrections at CDF"
<http://www-cdf.fnal.gov/physics/new/top/2004/jets/cdfpublic.html>