

# Il passaggio da Geant3 a Geant4



Tommaso Boccali  
SNS Pisa



# Outline



- Geant 3
- Geant 4
  - Perché?
  - Quando
  - Come
  - Stato attuale
- E FLUKA?
- Validazione della fisica
- Performance di calcolo
- Esperienze di ATLAS, CMS



# Geant 3



- La prima versione di **Geant** risale al **1974**, per simulare il passaggio di **UNA** particella (singola!) attraverso **UN** materiale
- **Geant 3** nasce nel 1982 durante lo sviluppo di OPAL, principalmente da parte di **René Brun** e **Andy McPherson**
- Scritto in FORTRAN
  - ~200000 righe di codice (vers 321)
  - Fa uso pesante di Common Block
- Alla base della simulazione degli esperimenti LEP



# Perché Geant4?



- Sviluppo cominciato nel 1993 a KEK e al CERN
- Pensato per gli esperimenti LHC
  - Era chiaro che il software NON sarebbe stato scritto in FORTRAN, ma (almeno in) C++
  - Quidi decisione drastica: in pratica sospendere se attività' di sviluppo su Geant 3, e passare subito ad una versione in C++ su cui concentrare tutti gli sviuppi
- RD44 (1994): progetto di ricerca del CERN, alla fine del quale si è confluiti verso una vera e propria collaborazione Geant4



# Vantaggi



## ■ C++ vs Fortran

- Da un lato più complicato
  - 600000 linee di C++
- Da un altro più gestibile...
- Si combina meglio con gli esperimenti attuali
- (È difficile trovare gente adesso che conosca il Fortran)



# Geant4 adesso



- Siamo arrivati alla versione 6.0
- Grosso lavoro di validazione da parte degli esperimenti LHC
  - Si vuole cercare di arrivare ad una simulazione “realistica” con anticipo rispetto alla presa dati
  - Negli ultimi 2 anni numerose richieste per avere feature avanzate
    - Production cut per regioni
    - Riflessioni nella geometria
  - Gruppo LCG di validazione all'opera



# Una parentesi: FLUKA



- Theory-driven, stand alone
  - copre TUTTA la fisica dai neutroni termici ai raggi cosmici
- A differenza di Geant, conserva automaticamente energia, impulso, numero barionico e carica
- Considerato migliore di Geant per interazioni adroniche a basse energie – background!
- Ma:
  - difficile integrazione col framework degli esperimenti
    - solo ALICE con un approccio di Virtual MC lo ha ben integrato
  - difficile riusabilità della geometria
    - soluzione: FLUGG che permette di rileggere la geometria di Geant4 in FLUKA



# Validazione



## ■ Di cosa?

- Framework (geometria, del fascio, caricamento dell'evento)
- Fisica
- Performance

Geant 4 può essere considerato un prodotto usabile da LHC solo se:

- Rende conto delle interazioni particelle-rivelatori entro un errore considerato accettabile dall'utente
- Permette un'agevole integrazione con i framework degli esperimenti
- Permette di simulare milioni di eventi complessi in tempi ragionevoli e senza eccessivi crash



# Validazione



## ■ Framework

- Poco interessante qui, più un problema per computing science

## ■ Fisica

- Punto cruciale

## ■ Performance

- (purtroppo) altro punto cruciale
  - Non è facile essere performanti e stabili come il fortran
- ... e tra questi ce metterei anche la facilità con cui il programma di simulazione si presti a girare in un ambiente di griglia



# Validazione della fisica



## ■ G3 contro G4?

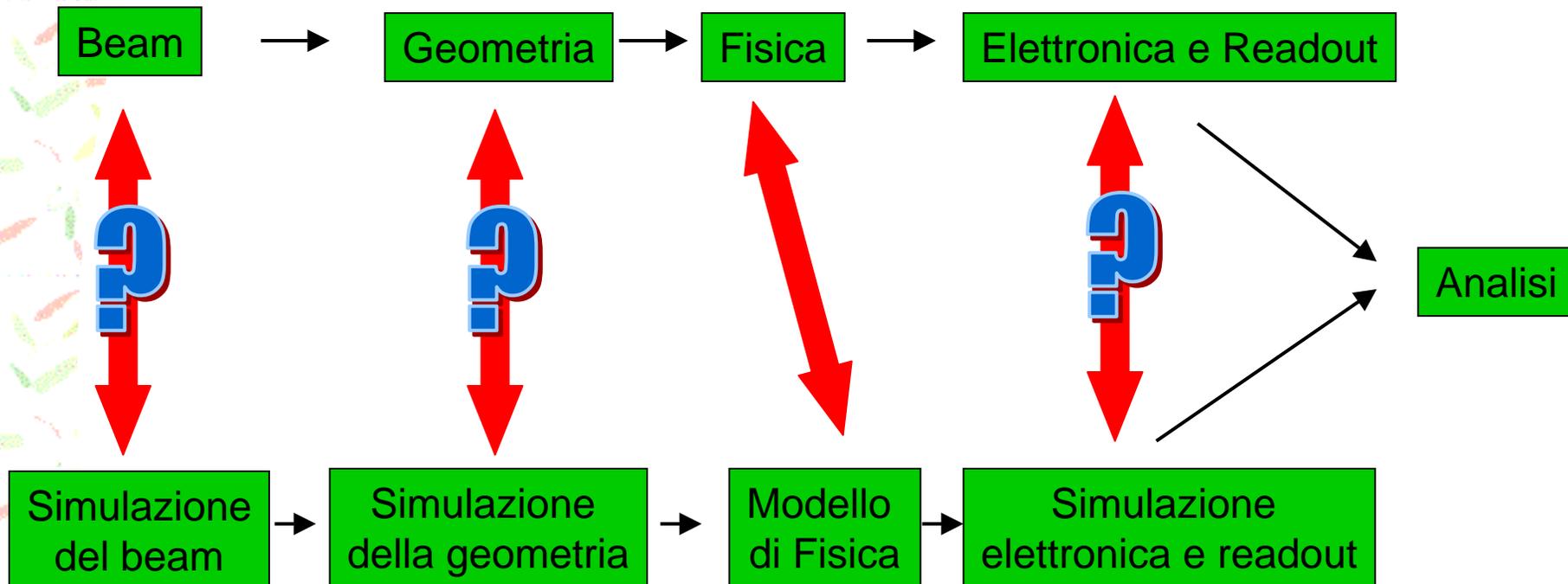
- Ha un qualche interesse?
- ATLAS e CMS hanno ancora dei programmi di simulazione basati su G3
- Può essere utilizzato solo come test iniziale di consistenza, ma per una vera validazione è necessario il confronto con i dati
- Fisica a bassa energia: molti dati disponibili dalla fisica nucleare, da interpretare ...
- G4 contro test beam di LHC (per validare i detector)



# Cosa vuol dire validare la fisica?



- Validare il modello di fisica inserito nel programma di simulazione non è immediato





# Dove si vuole arrivare?



- Dando per scontato che una simulazione perfetta non esiste, il problema è capire quale sia il limite accettabile
  - Per definizione, una simulazione viene considerata usabile se l'errore sistematico che introduce su di una data misura NON è dominante
  - Esempi:  $H \rightarrow \gamma\gamma$ , ATLAS ha dimostrato che una miscalibrazione residua (dopo la calibrazione in situ) di  $\sim 1\%$  sulla risoluzione del calorimetro em è al limite
    - Quindi la simulazione dovrebbe essere affidabile a qualche %, per fare in modo che la successiva calibrazione possa convergere



# Fisica



## ■ Fisica

### ■ Adronica

- Vari modelli disponibili

### ■ Elettromagnetica

- Un unico modello disponibile; possibilità di definire la precisione



# Fisica adronica



- In G4 non esiste un modello teorico valido a tutte le energie che possa descrivere l'evoluzione di uno sciame adronico da principi primi
- Soluzione: usare modelli diversi per diversi processi e preparare **ricette** per applicare il modello giusto nel momento giusto
- Benchmark?
  - ATLAS: 1.5% di errore nella simulazione della risposta a jet di 4 TeV potrebbe generare un falso segnale di Compositeness
    - questo prima di aver calibrato in situ, ma non si può partire da troppo lontano!
    - e non ci sono sample di calibrazione a energia così alta: estrapolare da jets da recoil su  $Z \rightarrow ll$



# Physics list



- In Geant4, queste ricette sono le dette **Physics List**
  - “**patchwork**” di modelli che insieme coprono tutto il range di energia
- Il gruppo **Hadronic Physics Working Group** ne ha preparate un certo numero, a seconda dell'use case dell'utente
- Diverso ambito:
  - Da semplice parametrizzazione dei dati disponibili (veloci!), a modelli teorici poi controllati sui dati (moolto più lente)



# Physics List



## ■ Geant 3:

- Principalmente GEISHA; in realtà a LEP Fluka veniva utilizzato interfacciato a Geant 3

## ■ Geant 4:

- I più usati sono
  - LHEP
  - QGSP

### LHEP

Data Driven  
Parametrizzazioni Low/High  
Energy  
Risonanze non presenti  
In pratica una reimplementazione  
di GHEISHA

### QGSP

Theory Driven, Quark  
Gluon String Model  
Bertini/Binary  
cascade sotto 1.3  
GeV



# Come validare / scegliere il modello?



## ■ Bassa energia:

- Utilizzare dati su scattering di pioni al di sotto del GeV – dati disponibili dalla fisica nucleare

## ■ Media energia:

- Principalmente test beam di LHC; utilizzando SPS è possibile esplorare il range di energie fino a  $\sim O(300)$  GeV

## ■ Alta energia:

- Durante il commissioning e i primi fasci; processi ben noti come  $Z \rightarrow \text{jet jet}$ ,  $Z \rightarrow \ell\ell$  possono essere studiati

## ■ Altissima energia:

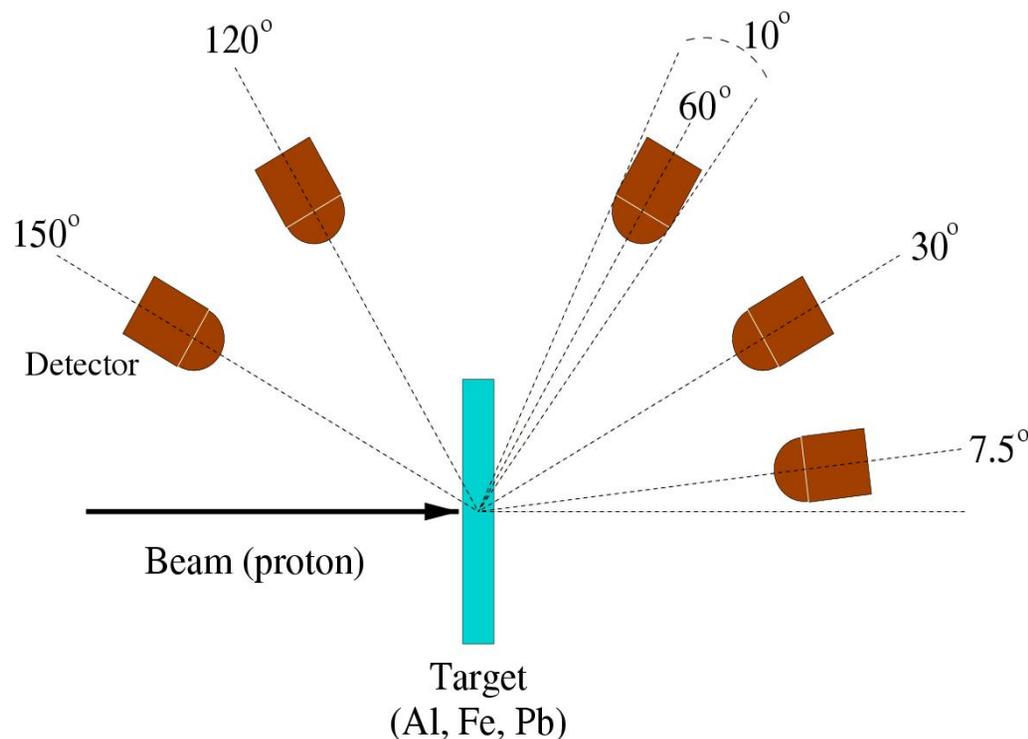
- Solo estrapolazioni: come si comporta un pione da 1 TeV nei calorimetri adronici?

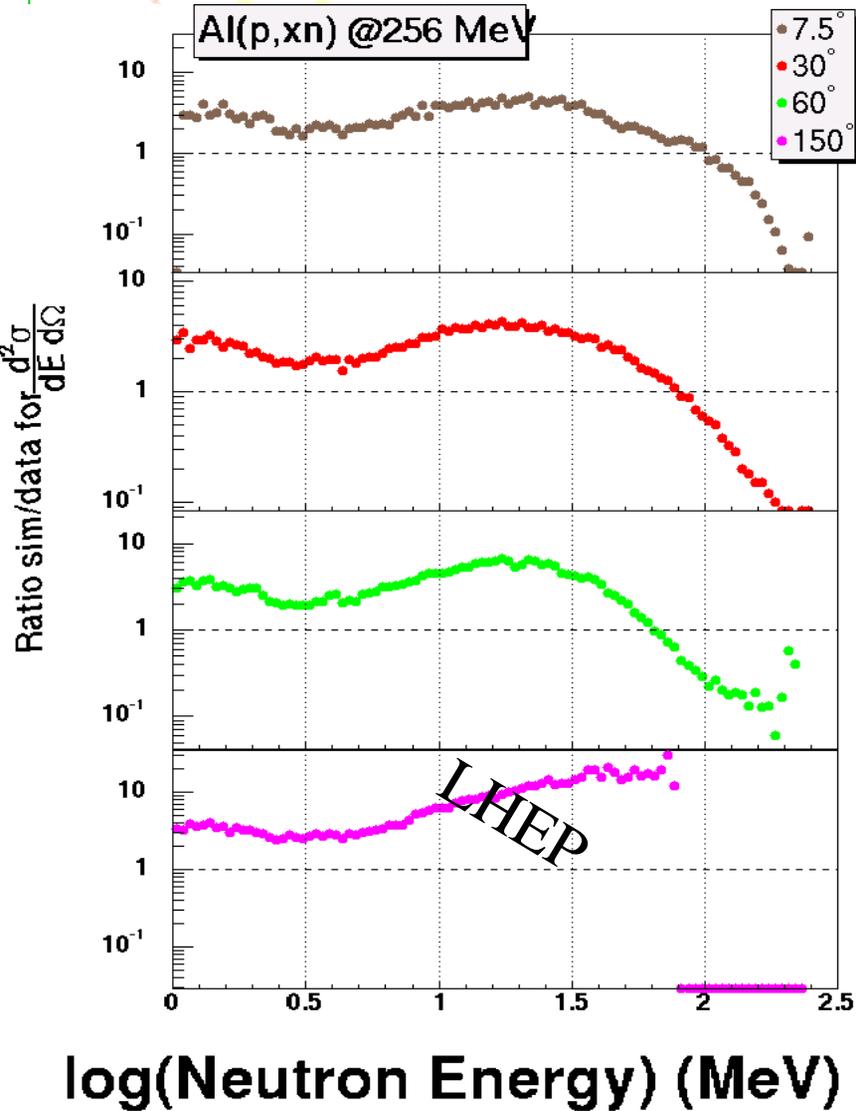
# Basse energie



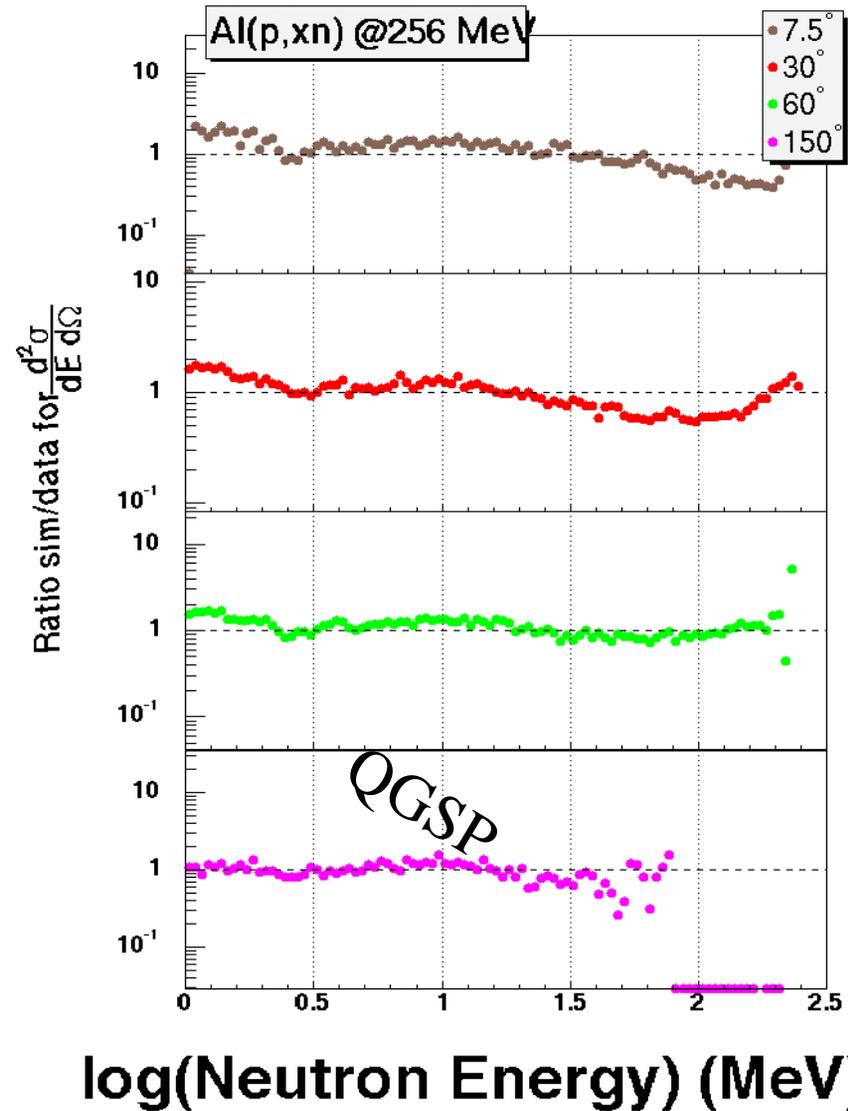
- **ALICE** ha studiato dati di Los Alamos su scattering di protoni su targhetta fissa, rivelando i neutroni a diversi angoli ed energie
- Targhetta sottile: approssimazione di singola interazione
  - Tutto più facile

Protoni da 113, 256, 597 & 800 MeV

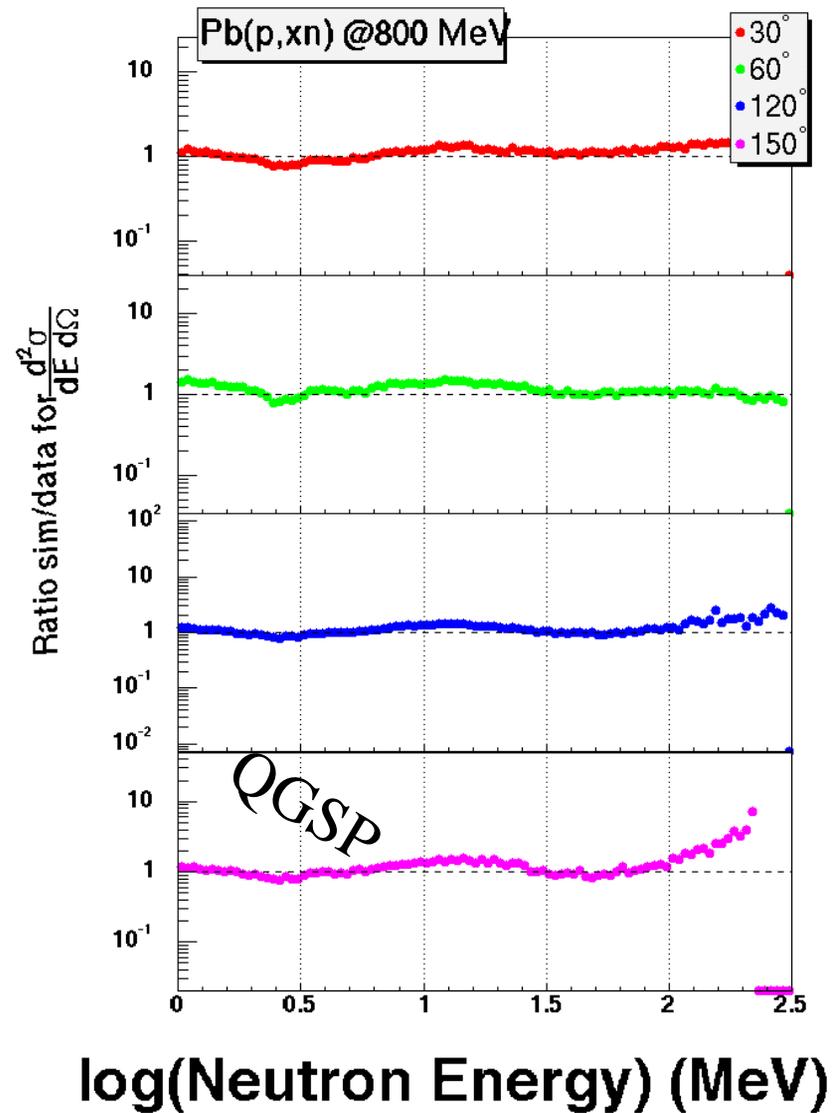
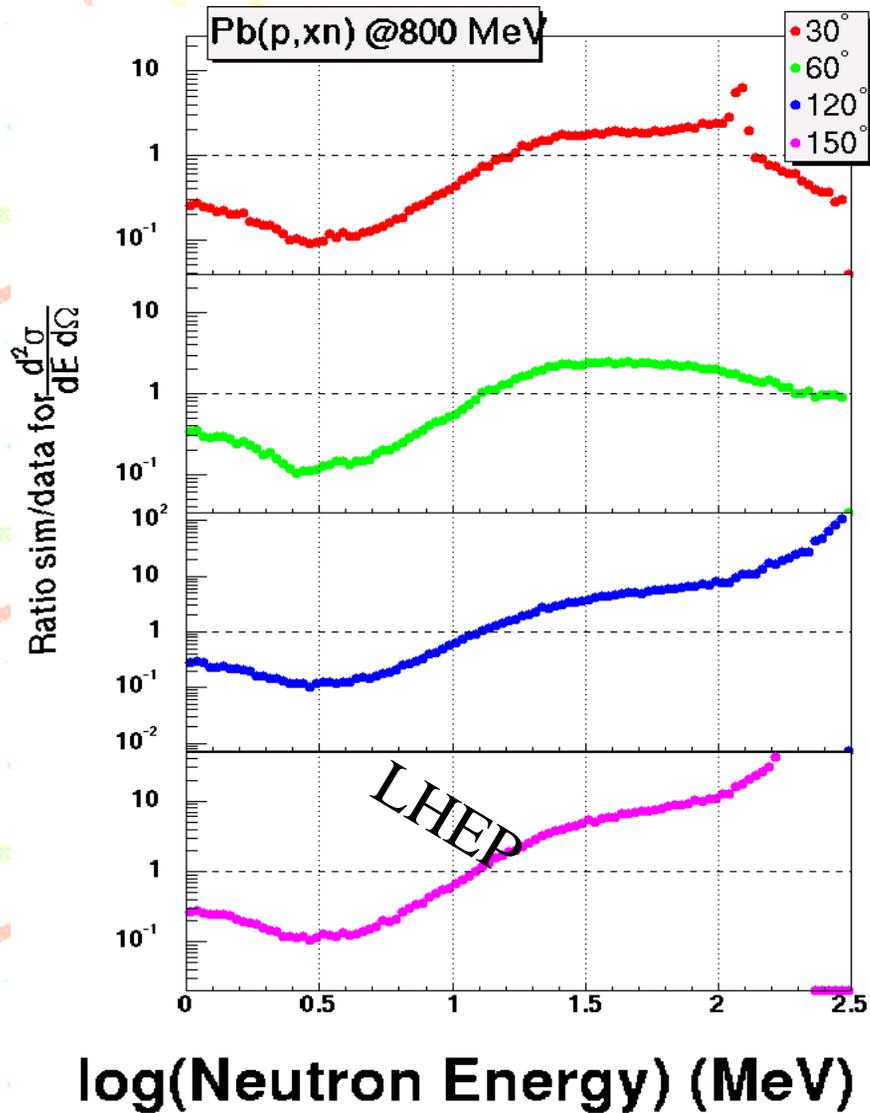




.Boccali



log(Neutron Energy) (MeV)





- LHEP (G4) non descrive bene i dati sperimentali a bassa energia
- QGSP (G4) e Fluka vanno decisamente meglio
  - Accordo meglio dell'ordine del 20% dovunque



# Test Beam di LHC



- ATLAS e CMS hanno concluso un primo programma di test beam sui calorimetri per validare la simulazione
  - ATLAS Hadronic end-cap (HEC)
  - ATLAS Hadronic calorimeter (Tile)
  - CMS HCAL
- Fasci di pioni/elettroni/muoni fra 1-200 GeV disponibili da SPS
- Secondo programma: in questi giorni; **poi**  
**basta** (chiusura di SPS)



# Quali sono le quantità importanti?

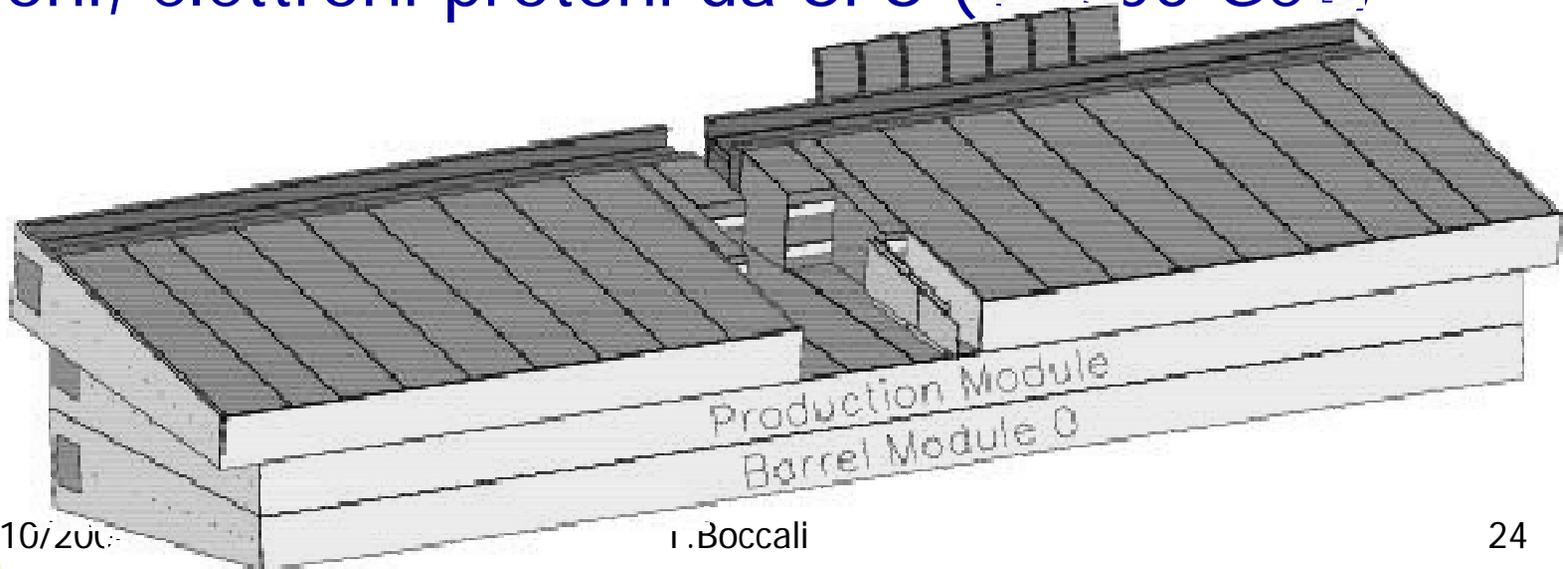


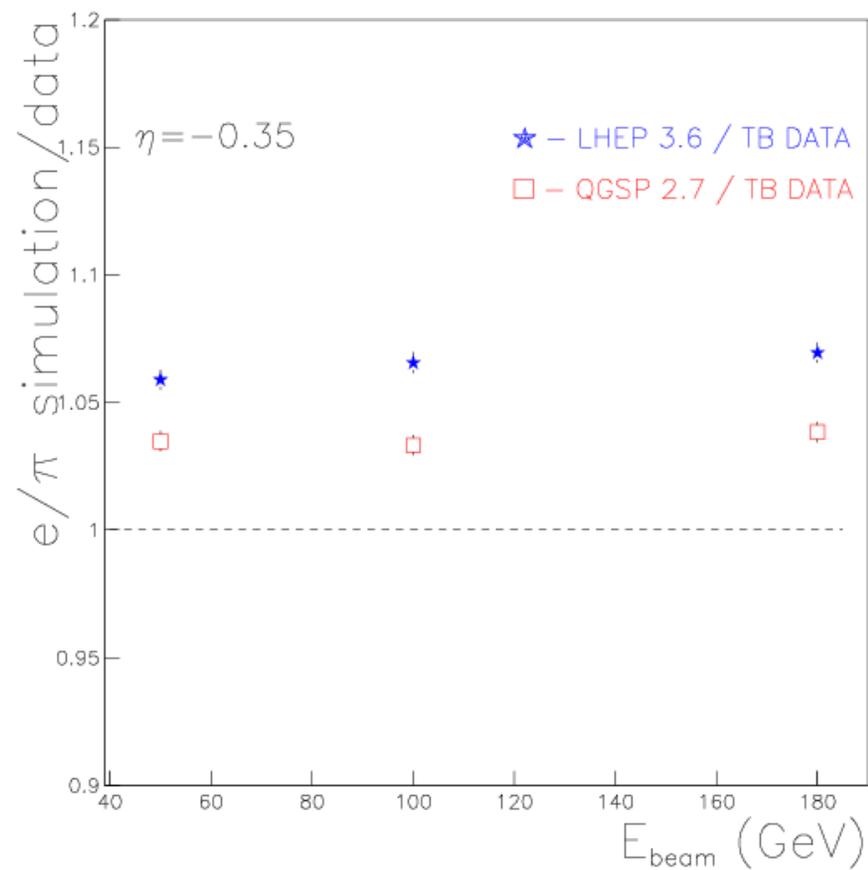
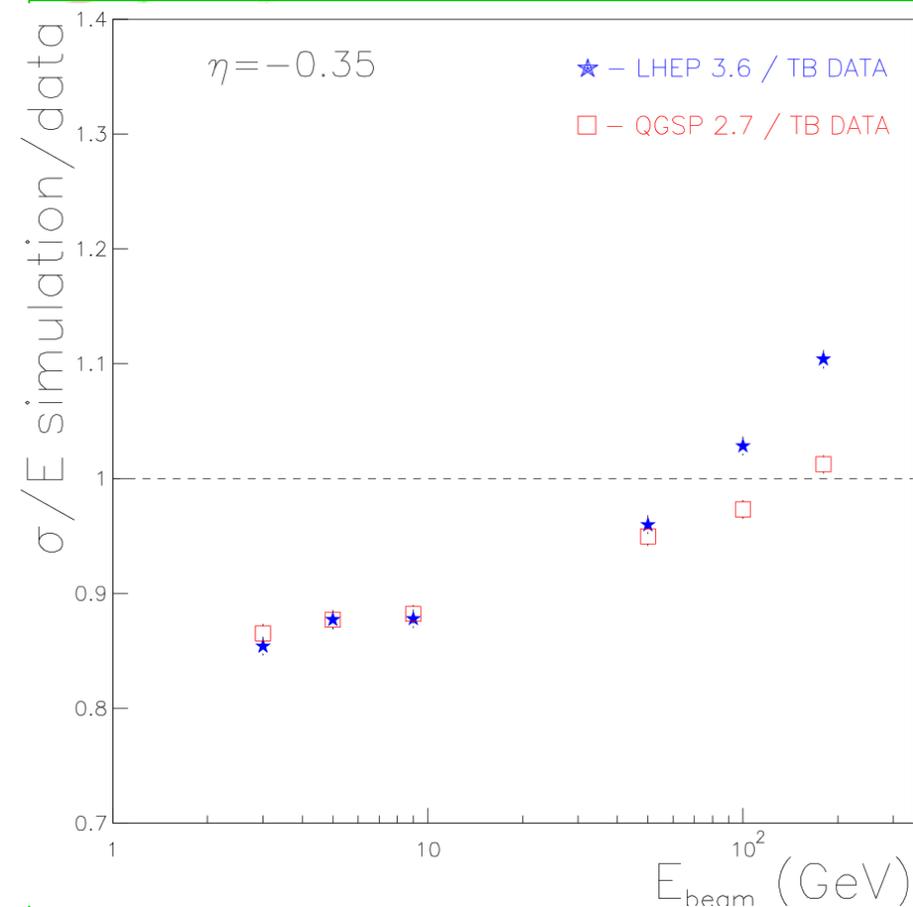
- Energia ricostruita
  - dà la scala assoluta di calibrazione
- Risoluzione energetica
- Separazione adroni/elettroni
- Profilo degli sciami
  - Utilizzabile per identificazione di particelle

# ATLAS TileCAL



- Calorimetro acciaio/fibre scintillanti
- Messi su fascio
  - 2 moduli extended barrel
  - 1 modulo barrel di produzione
  - 1 modulo barrel zero
- Pioni, elettroni protoni da SPS (1 ÷ 300 GeV)



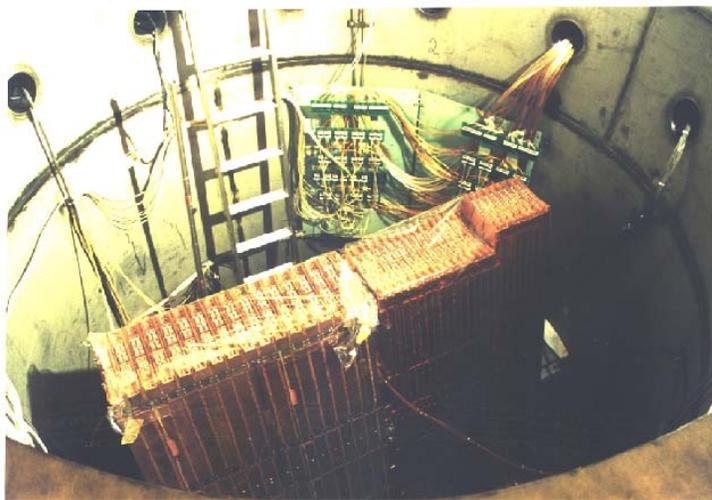


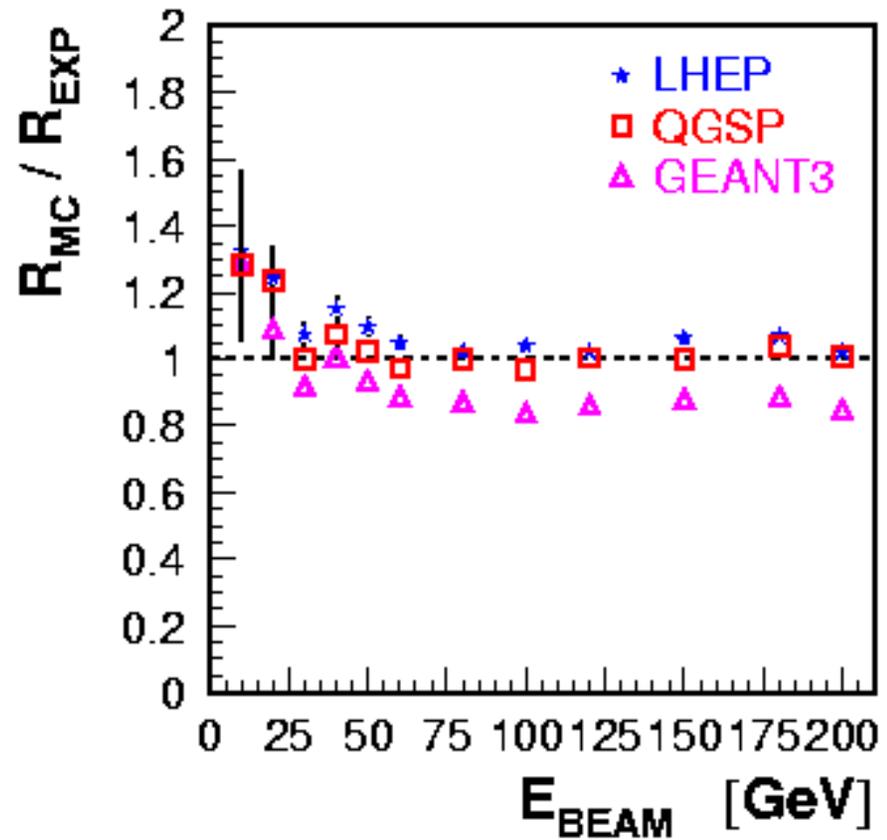
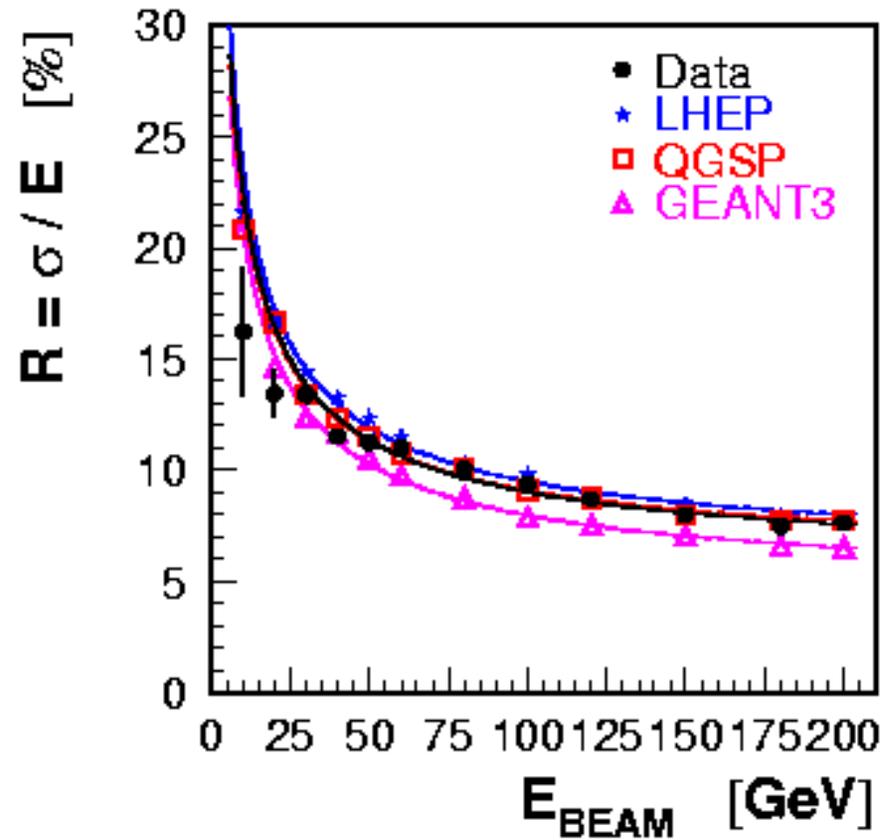
Risoluzione in energia

$e/\pi$



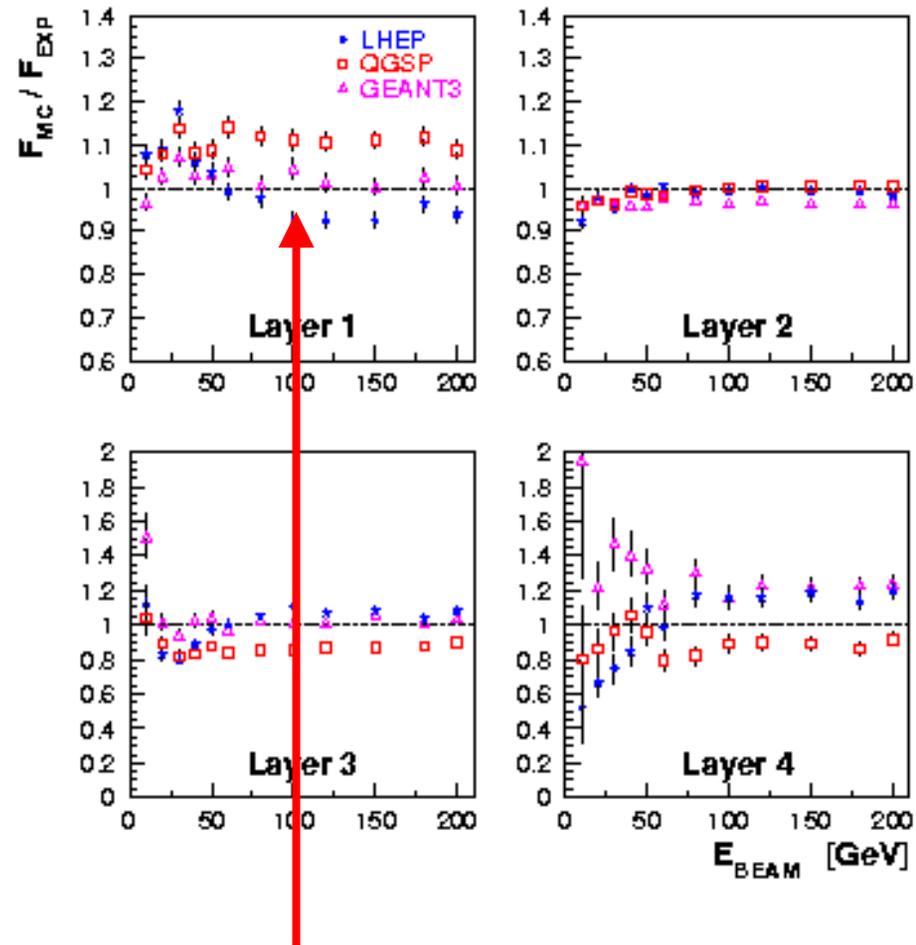
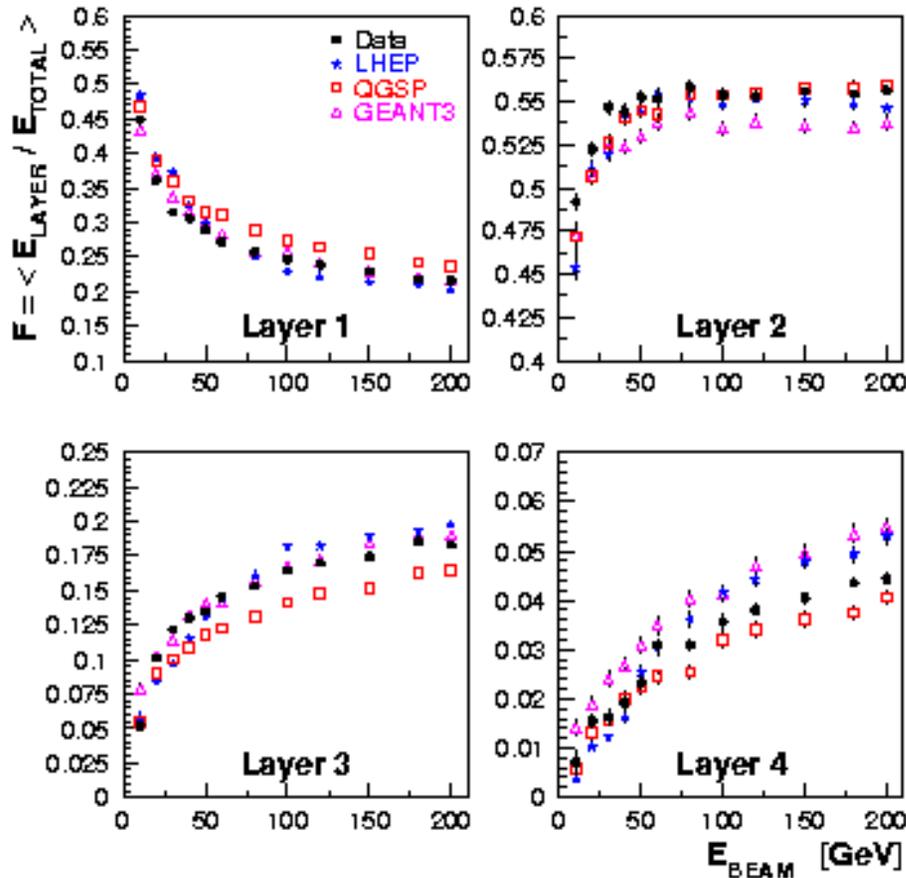
- Hadronic EndCap
  - 2000-2001: moduli HEC
  - 2002: moduli HEC + EMEC (em)
- Calorimetro a sampling rame-LiAr





Risoluzione in energia

# Forma degli shower



Forma longitudinale degli shower

G3 meglio di G4



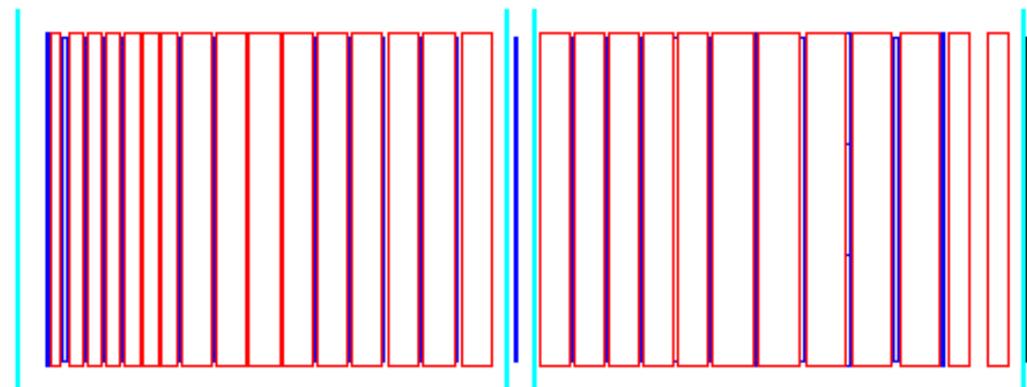
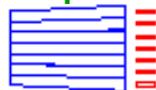
# CMS



- CMS ha avuto due test beam combinati HCAL+ECAL
- HCAL: scintillatore plastico + ottone

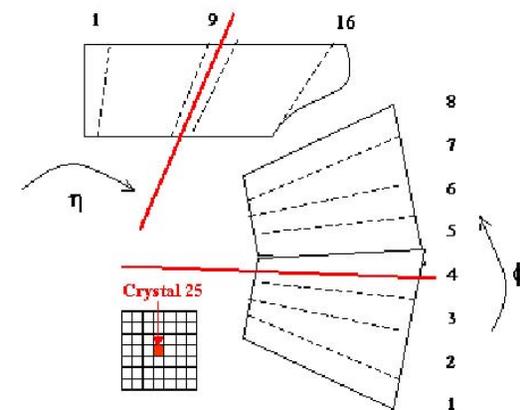
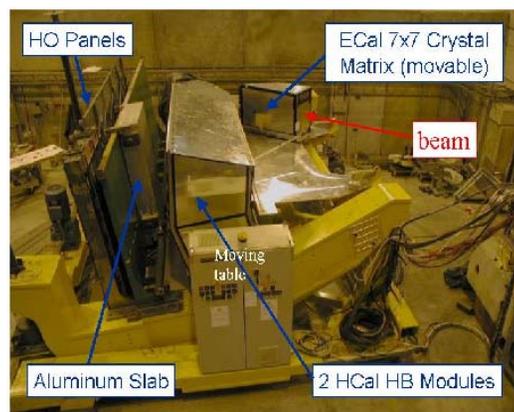
- 1996:

- HCAL barrel
- ECAL prototipo



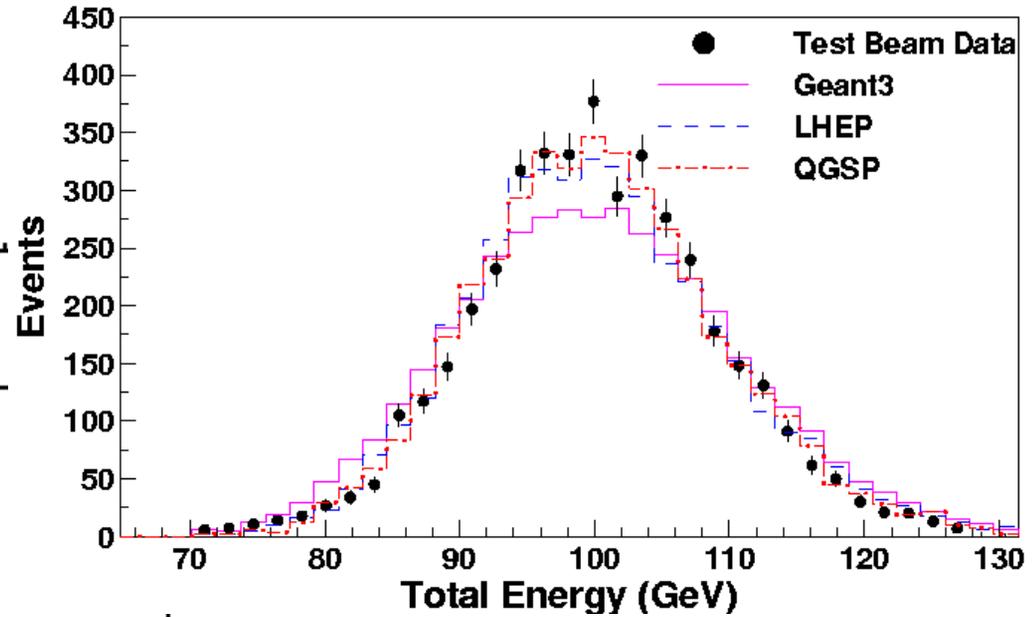
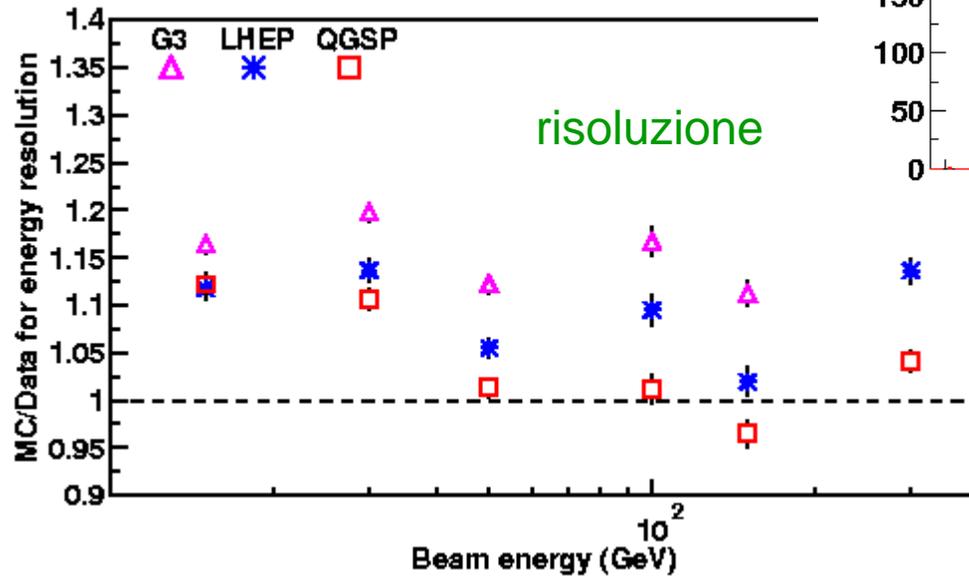
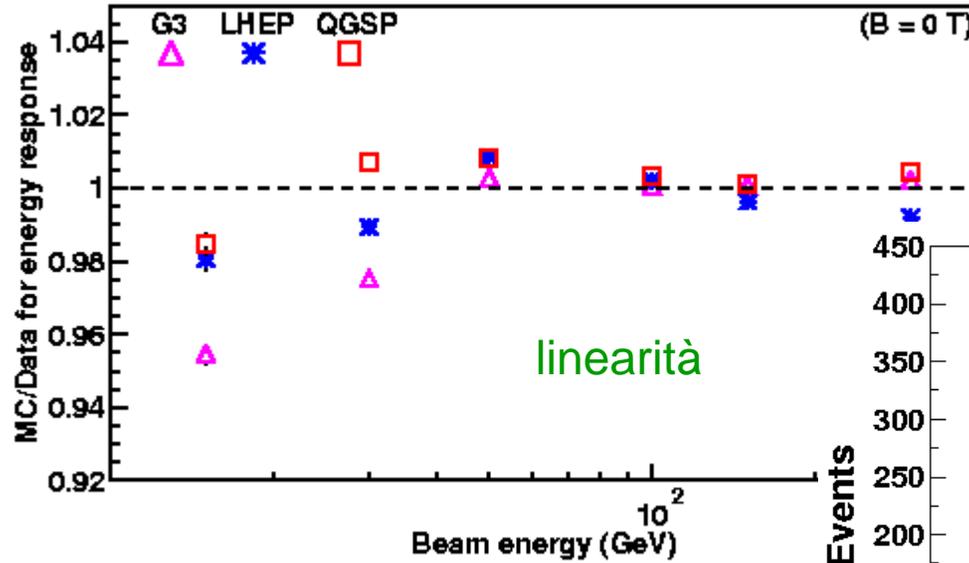
- 2002:

- HCAL barrel + outer
- ECAL mock-up





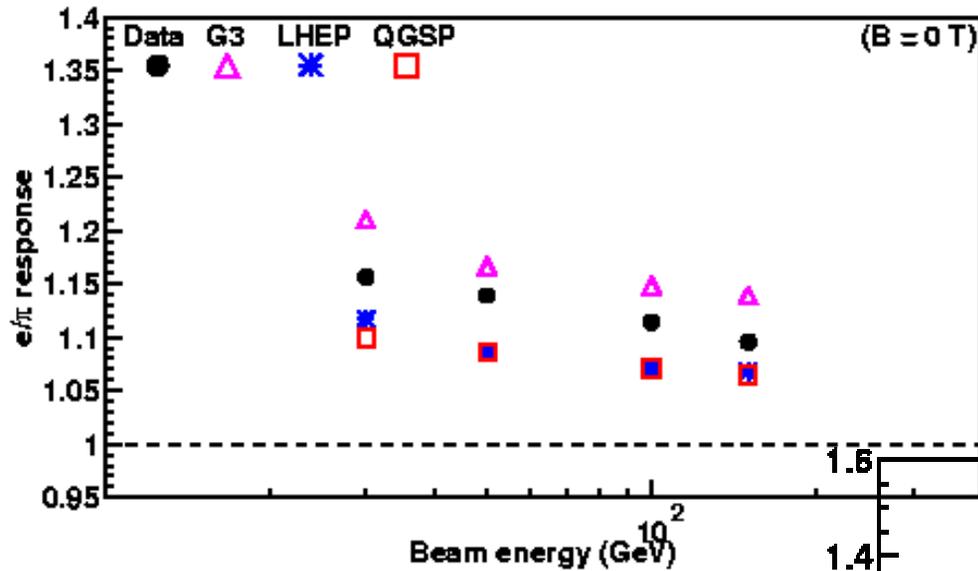
# Risultati



G4 meglio di G3  
QGSP meglio di LHEP

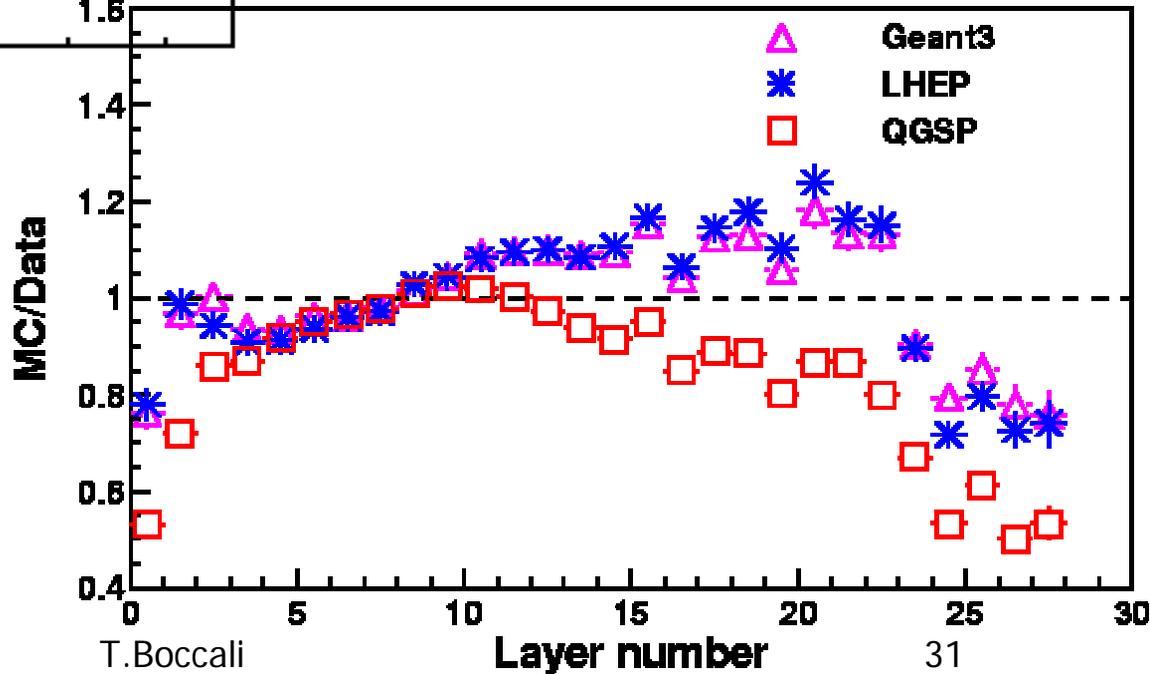


# $e/\pi$ - sciame longitudinale



Sciame longitudinale

Risposta adroni/elettroni





# Conclusioni fisica adronica?



- Generalmente:
  - Geant 4 meglio di Geant3
  - In Geant4, la physics list + complessa QGSP meglio delle parametrizzazioni
- ... purtroppo con eccezioni!
- Risoluzione in energia: 5% QGSP, peggio (30%) a energie sotto i 30 GeV
- Separazione  $e/\pi$ : 5% con QGSP
- Shower profiles: QGSP dà sciame più compatti; LHEP/G3 più larghi
  - Almeno nel caso di HEC, Geant3 meglio di Geant4



# Tracking detectors



## ■ È facile:

- si tratta principalmente di fisica elettromagnetica (ionizzazione); fisica facile e capita “da decenni”
  - dati disponibili da LEP, PHOBOS ...
- Geant4 ha un modello di default senza dover cercare troppe soluzioni alternative
  - Possibilità di variare la precisione tramite i Production Cuts

## ■ È un po' meno facile:

- I detector di tracciamento sono tanti, immersi in un ambiente con alta molteplicità adronica, e sono **molto** precisi
  - Pixel: la risoluzione arriva a  $\sim 10 \mu\text{m}$
  - fisica adronica può avere importanza



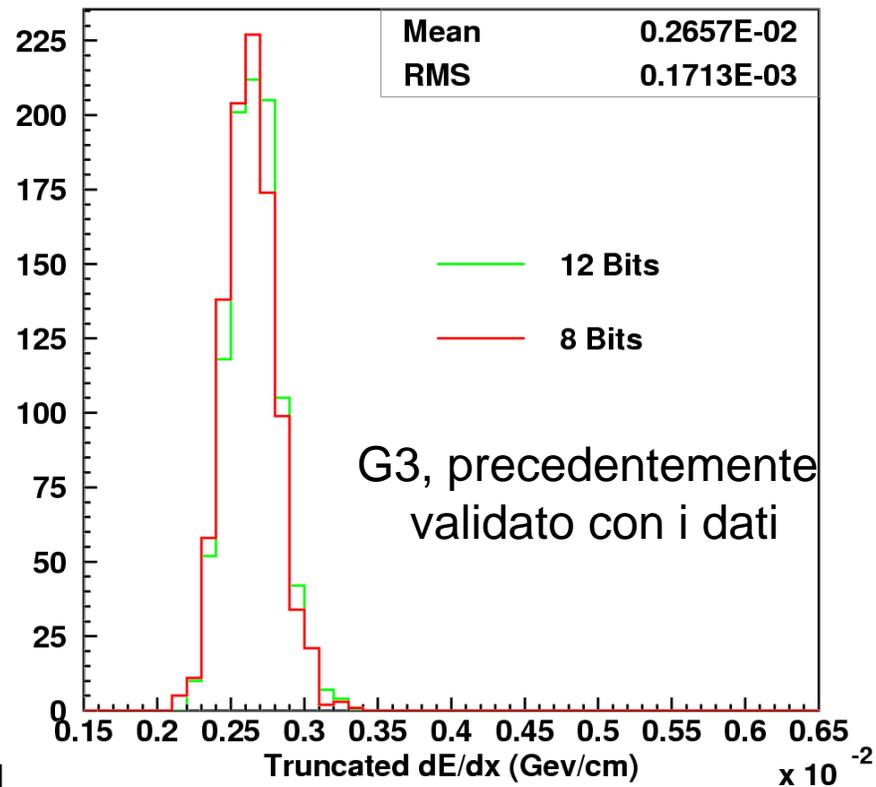
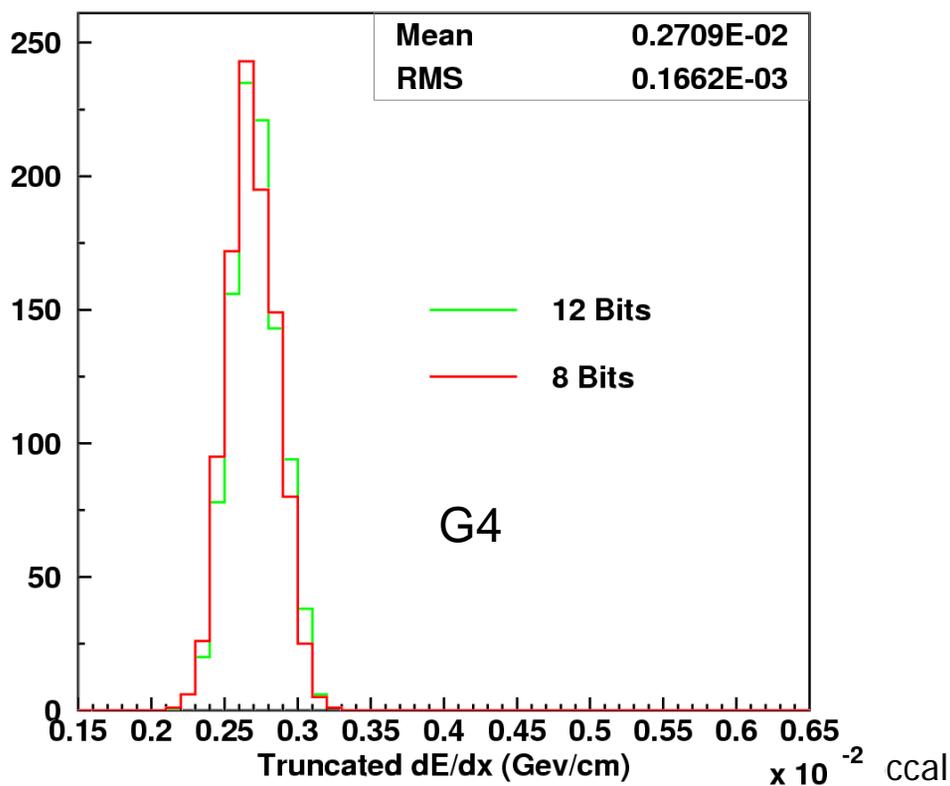
- Ogni particella con un range comparabile con  $10 \mu\text{m}$  deve essere correttamente creata e tracciata
  - $10 \mu\text{m}$  per un elettrone nel silicio =  $30 \text{ keV}$
- L'elettronica è sensibile:  $1 \text{ MIP}$  in  $300 \mu\text{m}$  di silicio  $\sim 150 \text{ keV}$ , con  $S/N \sim 20$  (CMS); quindi
  - non possono essere uccise tracce a basso impulso
  - anche una particella con  $5 \text{ keV}$  può contribuire ad un segnale rivelato
    - ATLAS TRT:  $O(\text{eV})$
- Anche se rare, le interazioni adroniche sono importanti; non tanto per il segnale che lasciano, ma per il fatto che depositano  $O(100 \text{ MIP})$  e possono saturare l'elettronica
- Tanto materiale in giro: simulare correttamente l'assorbimento di adroni da parte del materiale non sensibile



# Energy loss nel silicio



- CMS ha confrontato l'energy loss nel silicio fra dati (ALEPH+PHOBOS) con la risposta di Geant 3 e Geant 4, per studi sul  $dE/dx$  – accordo  $\sim 2\%$

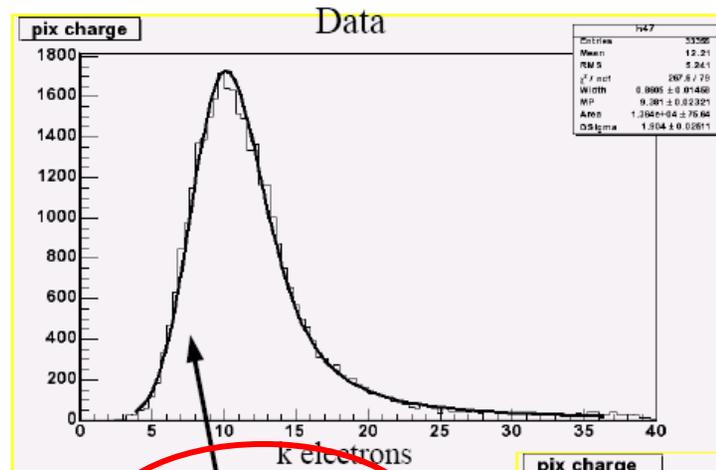


# Nei pixel ...



## ■ CMS:

- 2003 test beam: telescopio (SiStrip) + singolo pixel detector
- Confront con em di Geant4

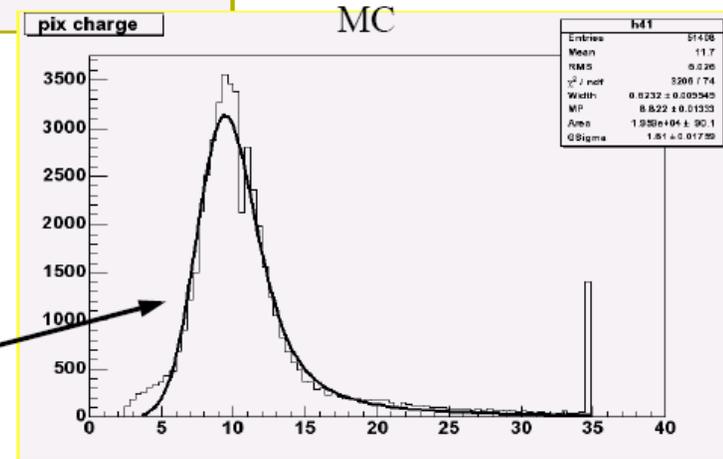


peak=10.4, sigma=2.6  
(fwhm≈7, rms\*≈3.4)

peak=9.8, sigma=2.1  
(fwhm≈5, rms\*≈2.7)

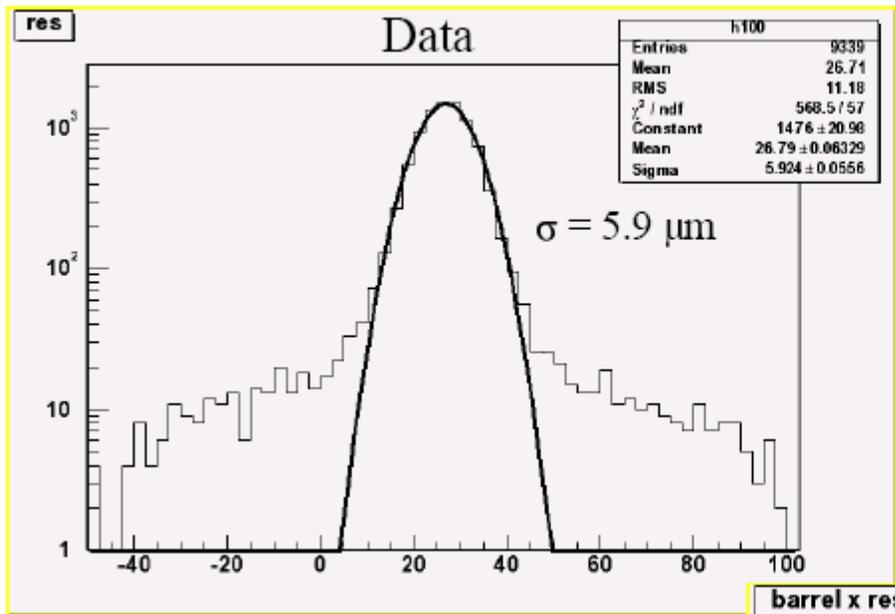
## Pixel charge

- “inside” pixels only (no edge pixels)
- landau+gaus fit

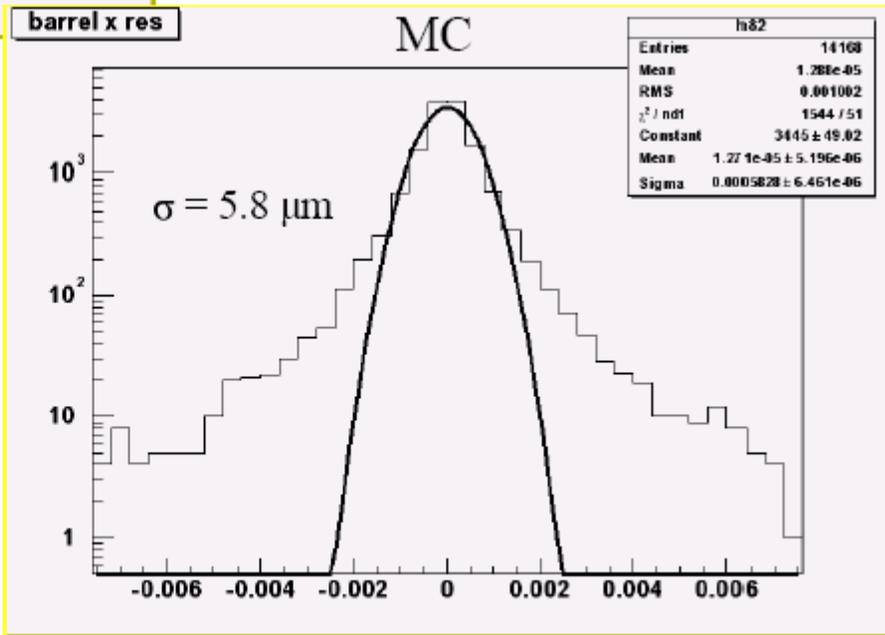
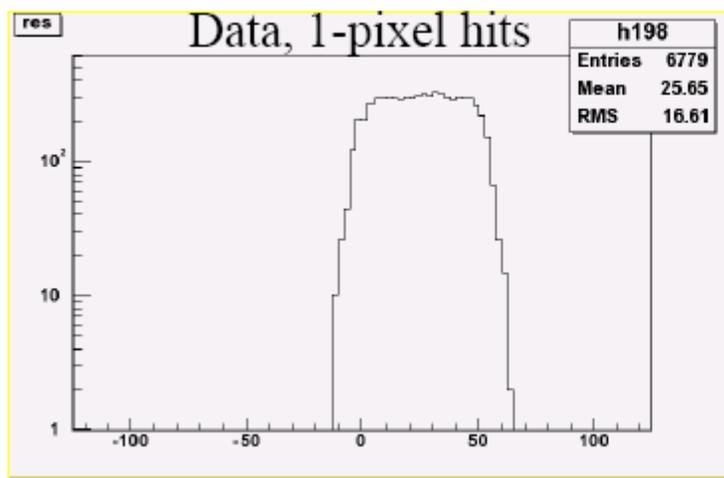




# X position resolution

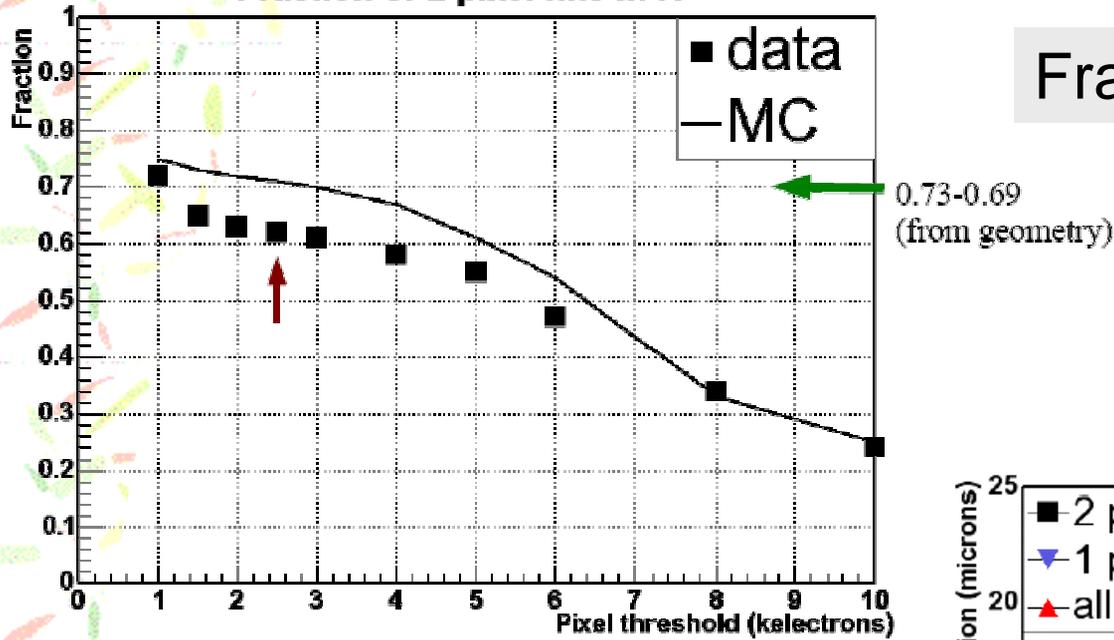


2-pixel hits



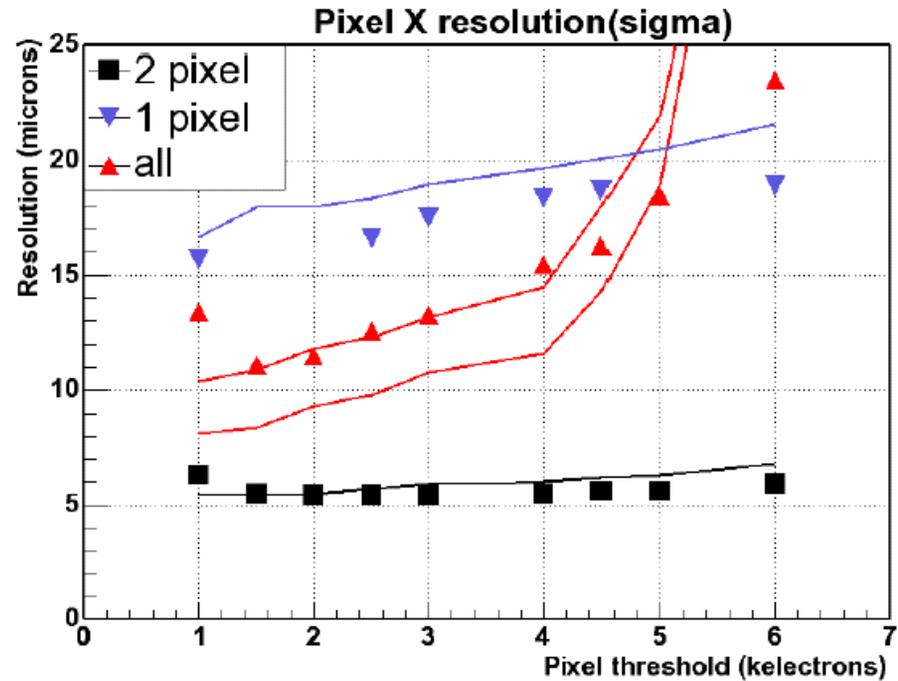


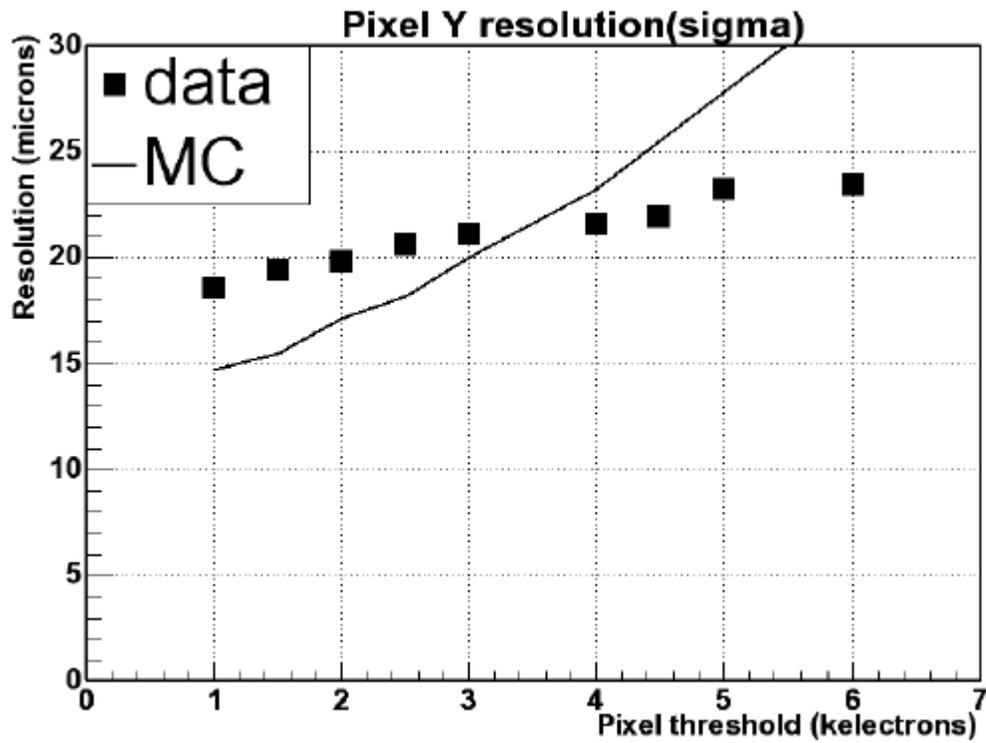
Fraction of 2 pixel hits in X



Frazioni di Hit con 2 pixel

Risoluzioni in funzione della soglia





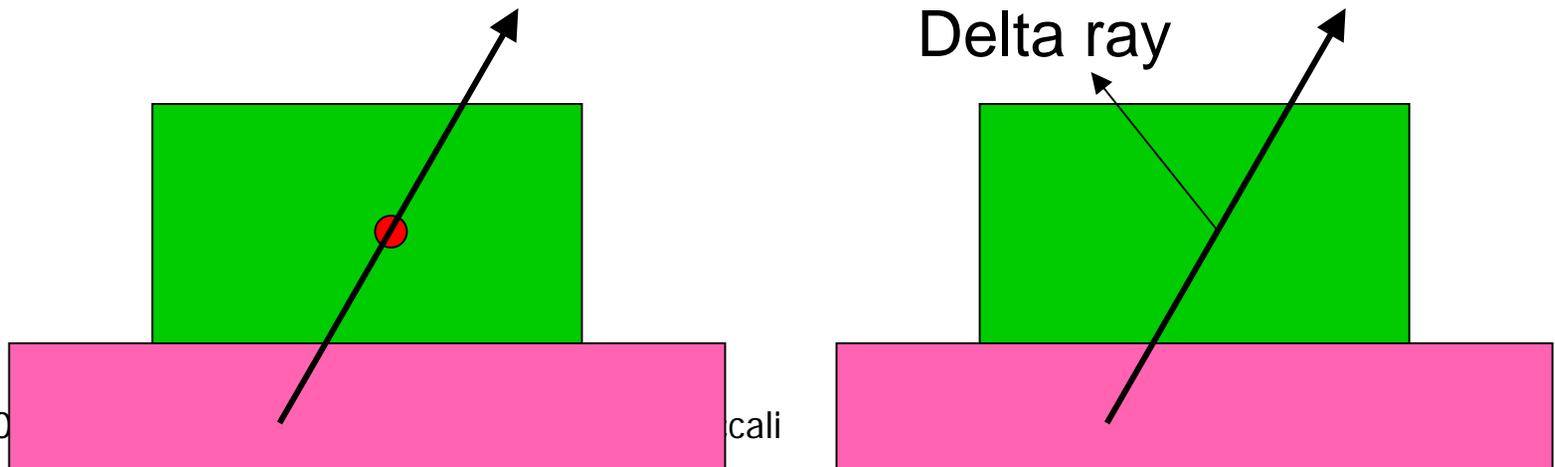
Risoluzioni in rz  
un po' peggio



# Variazione della precisione



- Nella fisica em, l'utente può cambiare la precisione della simulazione con i production cuts
- Caso dei delta rays:
  - Se l'energia dell'elettrone è sotto la soglia, nessun elettrone viene generato, ma la particella primaria perde energia
  - Se l'energia è sopra soglia, un vero elettrone è generato e propagato
- **Thumb rule: creare tutti i delta rays con range comparabile con la risoluzione**

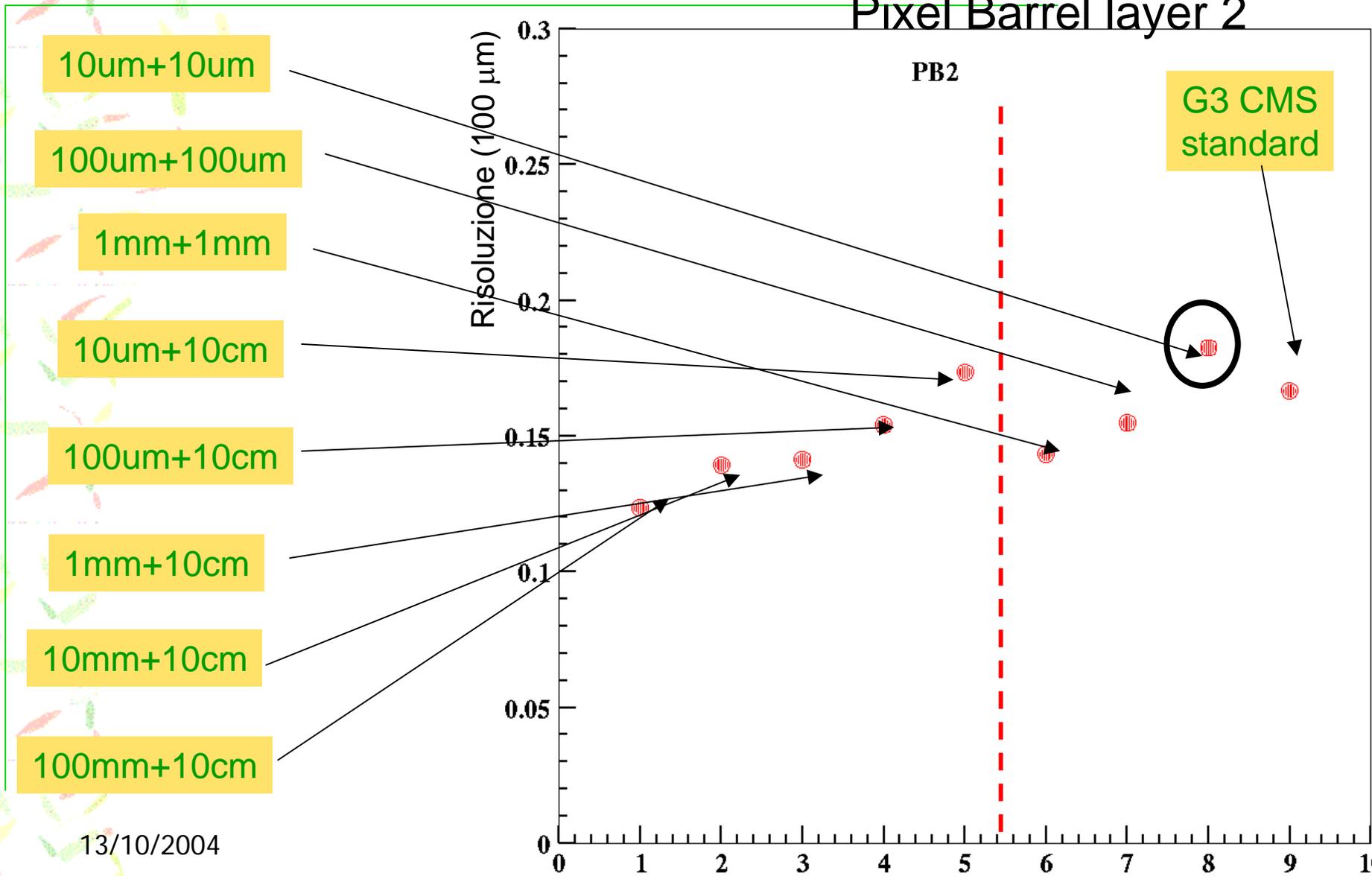




# Risoluzioni in funzione della precisione della simulazione



Pixel Barrel layer 2

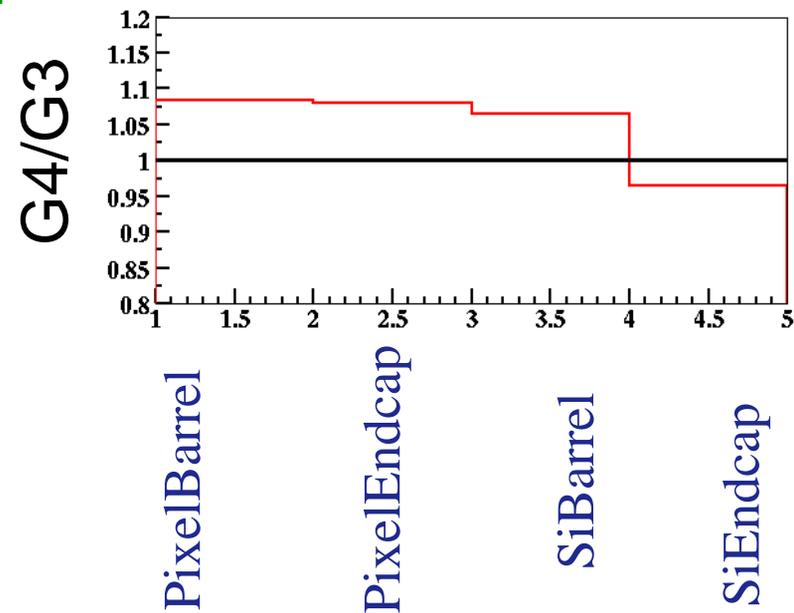
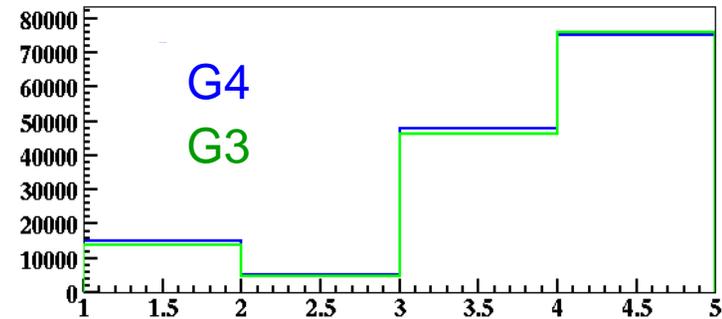




# Effetti sul data rate



- Numero di strip/pixel attivi dopo la zero suppression
- CMS:
  - Geant 3 default alti (~mm)
  - Geant4 10  $\mu\text{m}$  per i pixel, 100  $\mu\text{m}$  per le striip
- Effetto netto: pixel ~10% maggiore occupancy di quanto precedentemente stimato



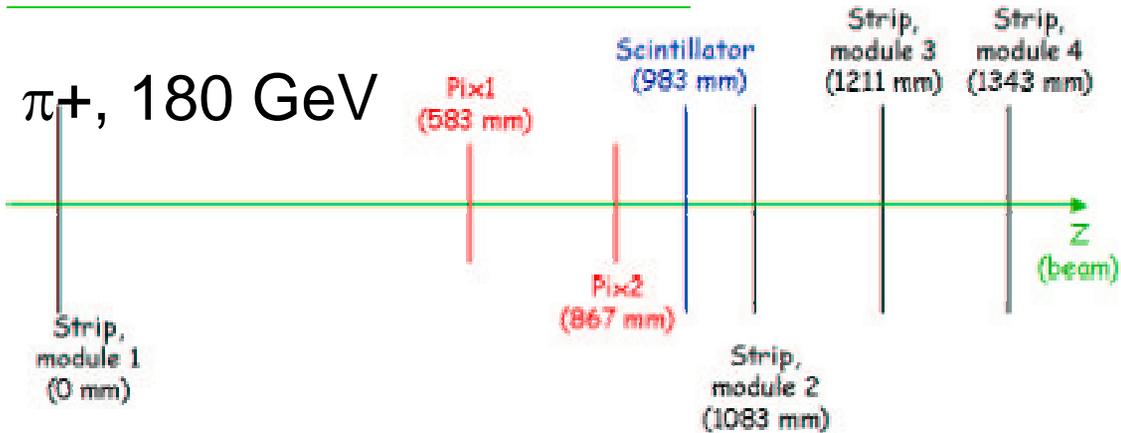


# ATLAS/Pixel

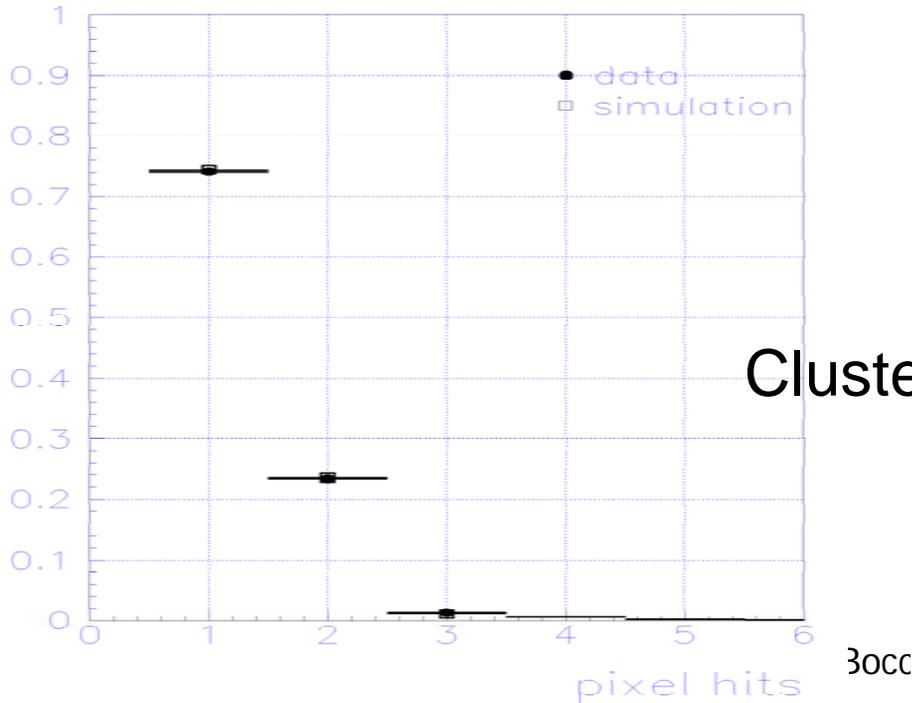


## Test Beam 2002

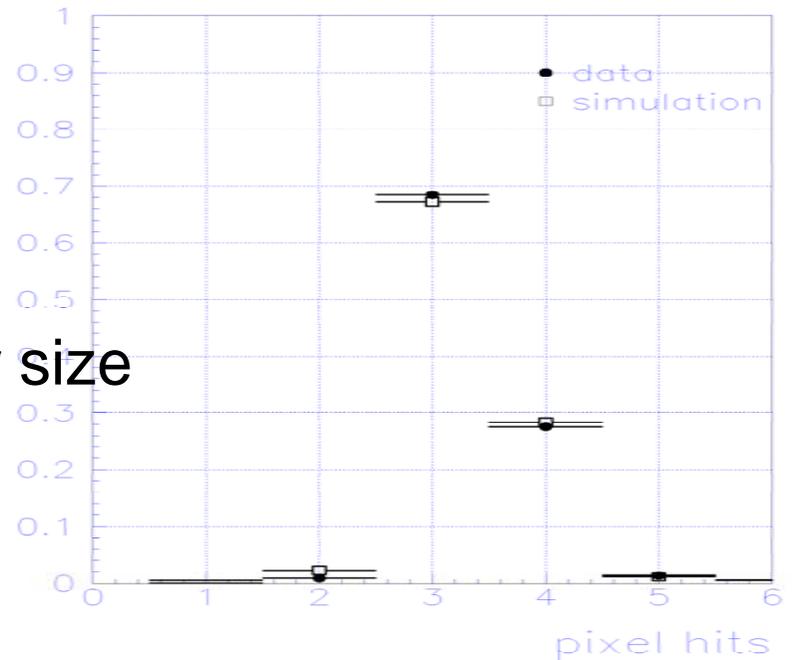
Controllate quantità come cluster size, energia persa...



normal incidence



$\varphi = 30^\circ$





# Interazioni adroniche nei tracker



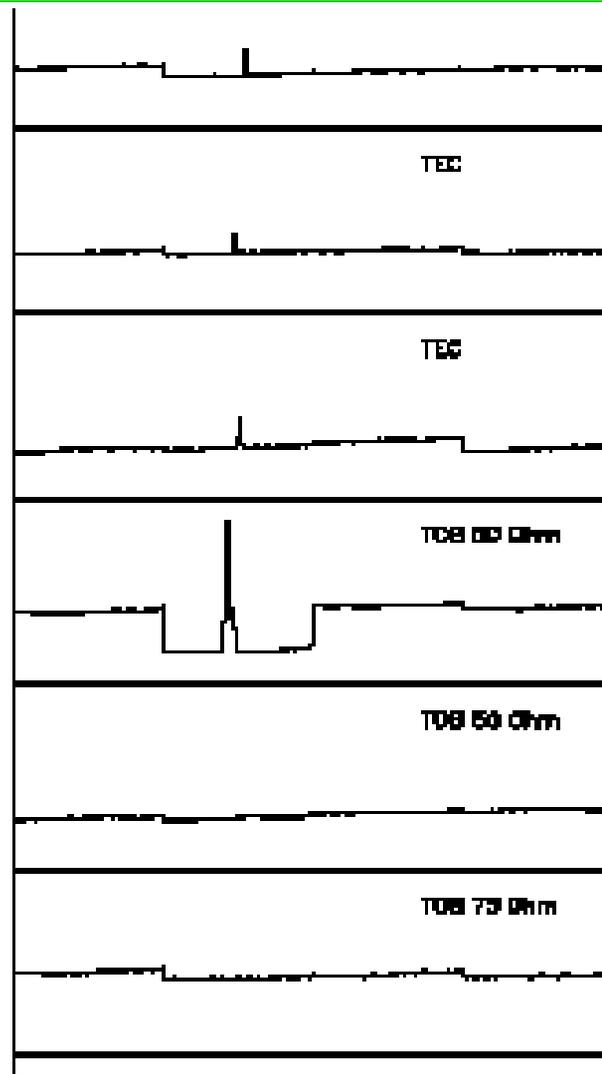
- Quindi tutto ~ok per le interazioni em...
- Le adroniche?
- Sono molto rare ( $10^{-3}$ ) ma:
  - Possono saturare l'elettronica di readout
    - Depositano molte MIP equivalenti  $O(100)$
  - Aiutano a studiare le interazioni adroniche
    - Bersaglio è una targhetta sottile, è possibile applicare un'approssimazione di interazione singola da contrapporre ai calorimetri a grande  $\lambda$
  - (Possono avere un effetto tangibile sull'occupancy)

# Esempio (triste...)



400 ADC counts

- CMS: **HIP effect**, manda in saturazione il chip di readout
- Nulla di grave, ma purtroppo il recovery è lento ( $\sim 1 \mu\text{s}$ )
- È necessaria una simulazione accurata del rate di interazioni adroniche per stimare il tempo morto



Nominal baseline

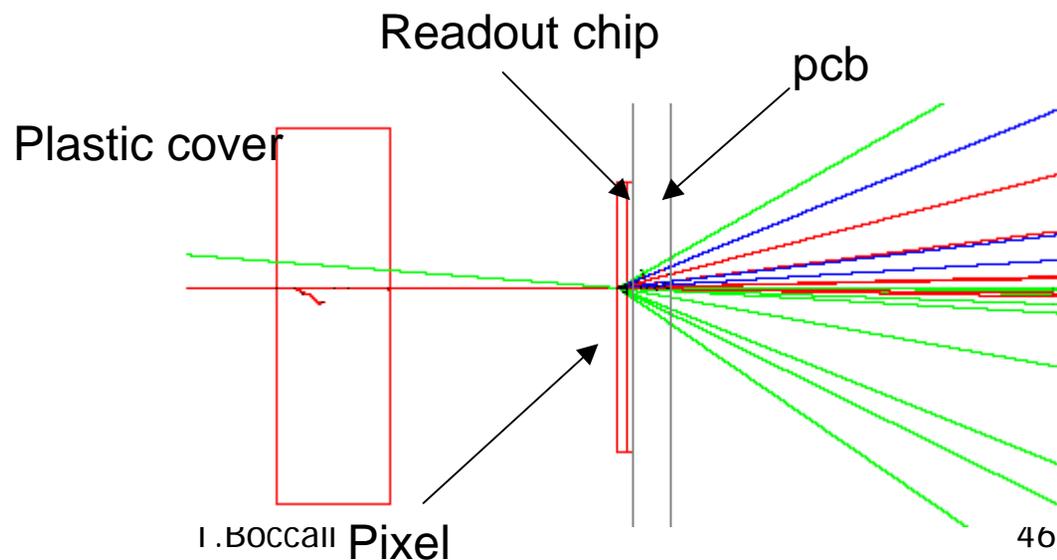
Digital zero

100 ADC counts

625 ns

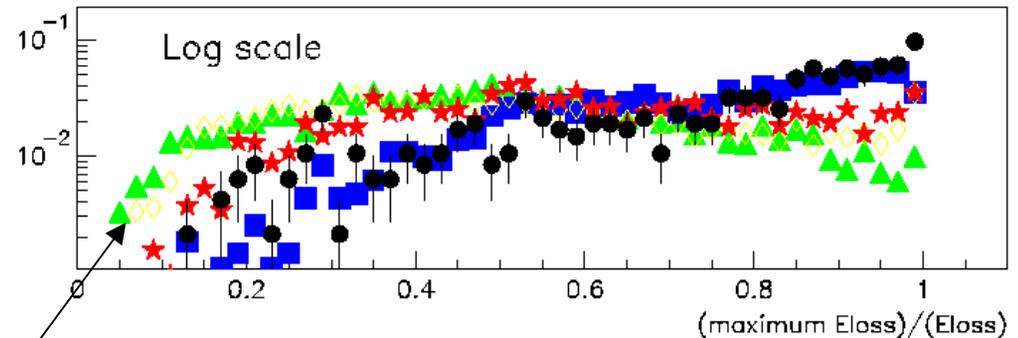
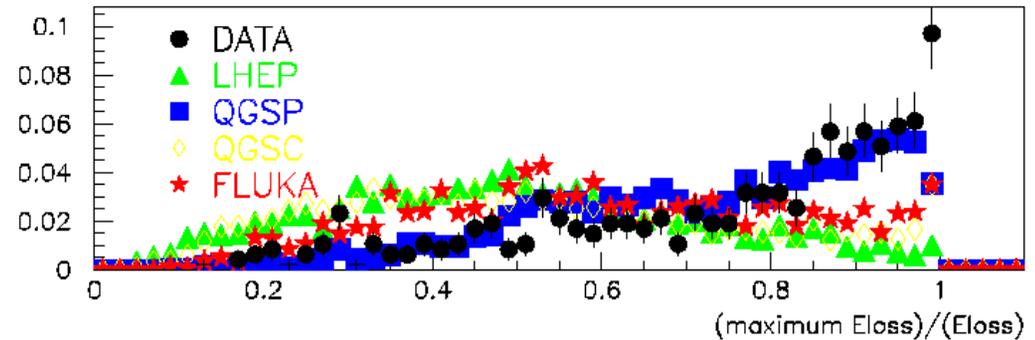


- CMS ha stimato che la probabilità di interazioni che rilascino  $\sim 10$  MeV (energia sufficiente per generare la HIP) è riprodotta da G4 entro un fattore 2
- ATLAS ha utilizzato il test beam di pixel per studi adronici





- Non guardare quantità direttamente dipendenti dagli elettroni raccolti
  - Problemi di calibrazione
- Ma solamente quantità come numero di tracce, distribuzione energetica relativa dei pixel
- Fluka/Geant 4 simili e ~ok!
- LHEP meglio per il numero di tracce uscenti; QGSP per la forma del cluster



Energia del pixel più energetico  
divisa per l'energia totale del cluster



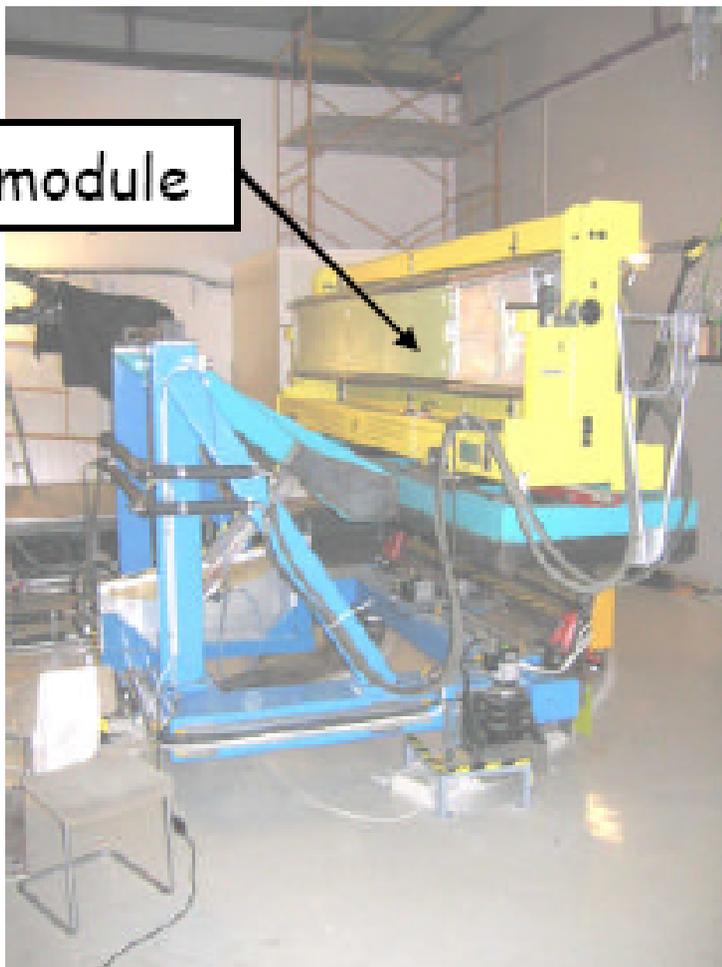
# Calorimetri EM



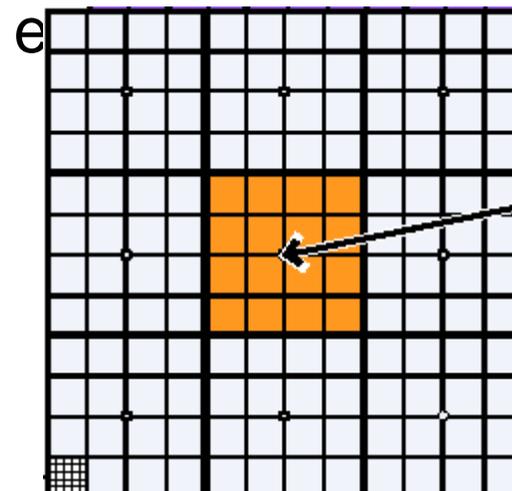
- La simulazione deve essere realistica per scale 100 MeV (jet da pile-up) alla scala del TeV
- Sono importanti non solo risoluzione energetica e la linearità, ma anche la forma dello shower e la risoluzione in posizione
  - particle-id, selezione del vertice primario di interazione
- Sono investiti da una altissima molteplicità adronica
- Benchmark?
  - per non essere il fattore limitante nell'analisi "importante"  $H \rightarrow \gamma\gamma$ , la risoluzione energetica  $\sim 1\%$  (ATLAS)



supermodule



Cristalli di 2  
supermoduli di  
CMS ECAL  
Fascio di elettroni  
20-180 GeV  
Simulazione con  
**SOLAMENTE**  
interazioni

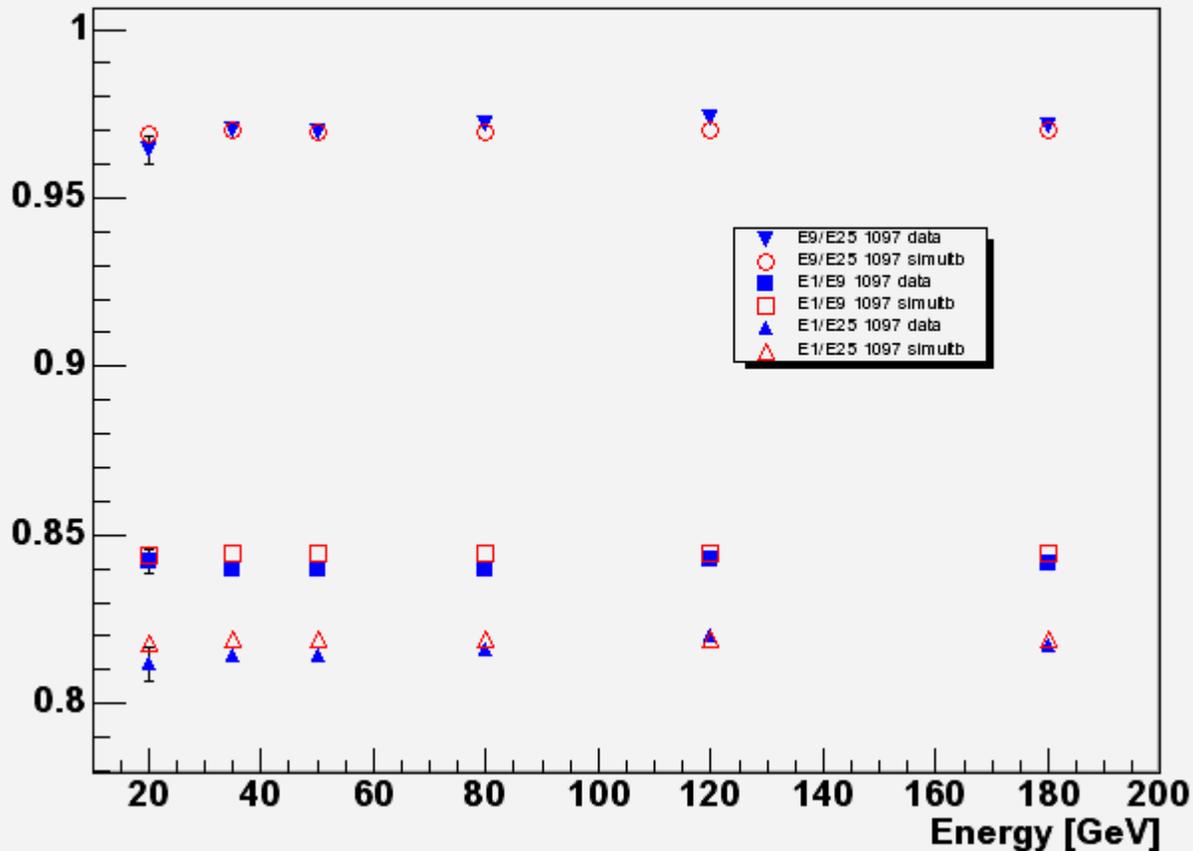




# Misure di contenimento laterale



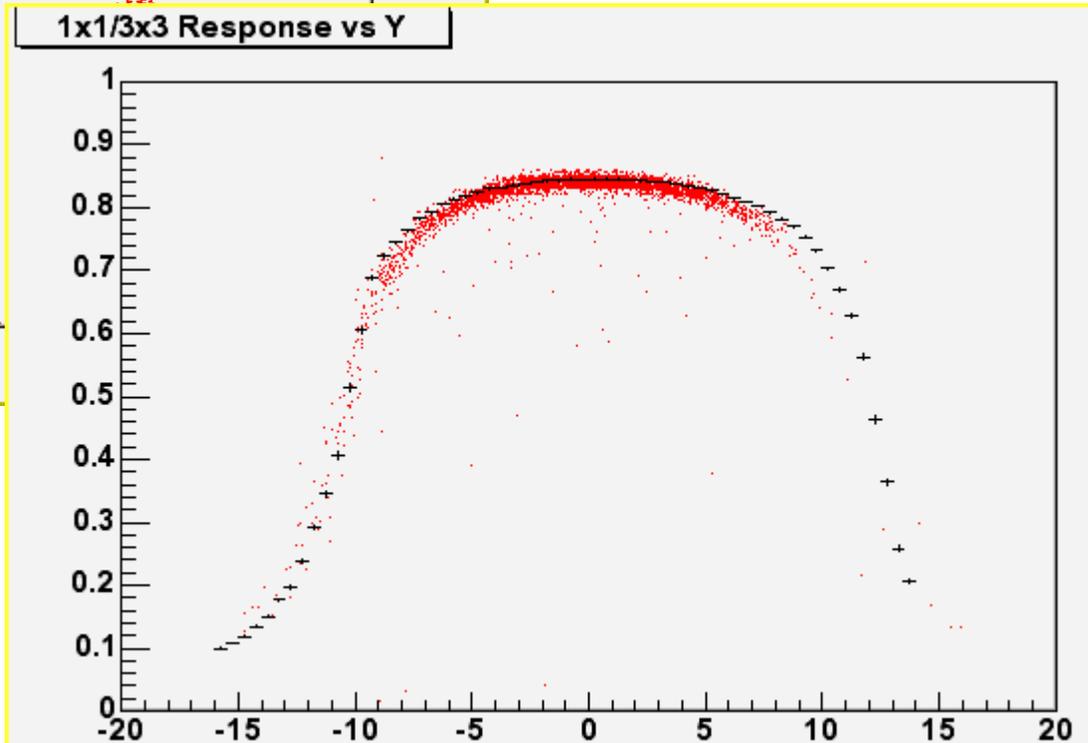
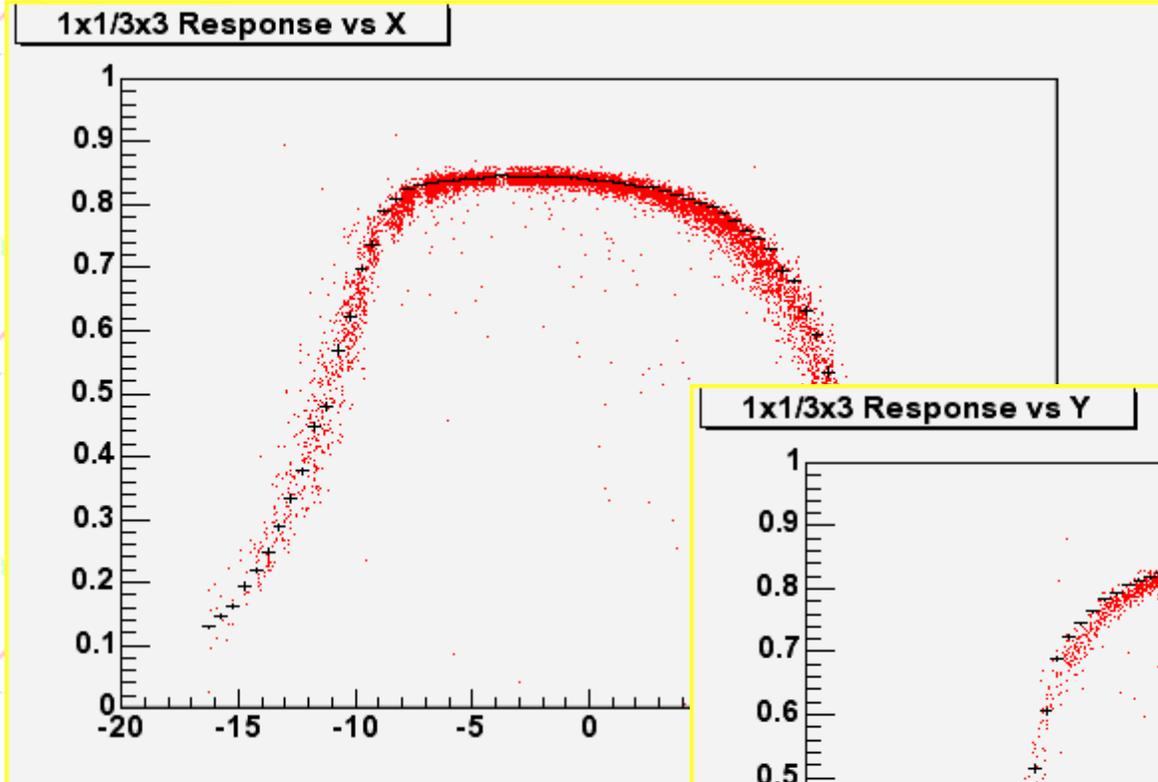
- Confrontare l'energia nel cristallo centrale rispetto a quelli vicini



E1x1/E3x3,  
E1x1/E5x5 e  
E3x3/E5x5

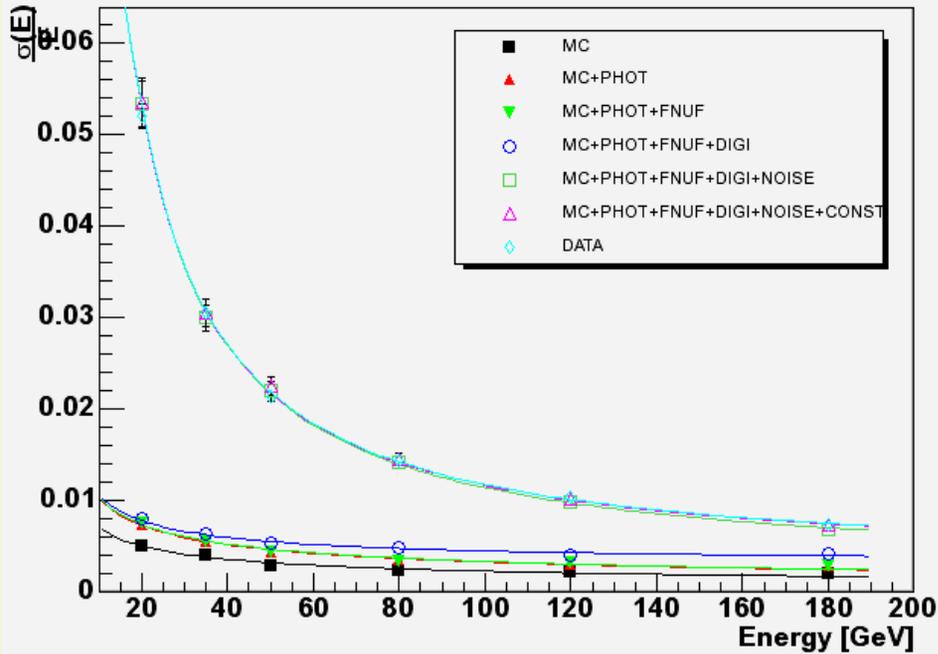


# Contenimento in funzione della posizione del fascio

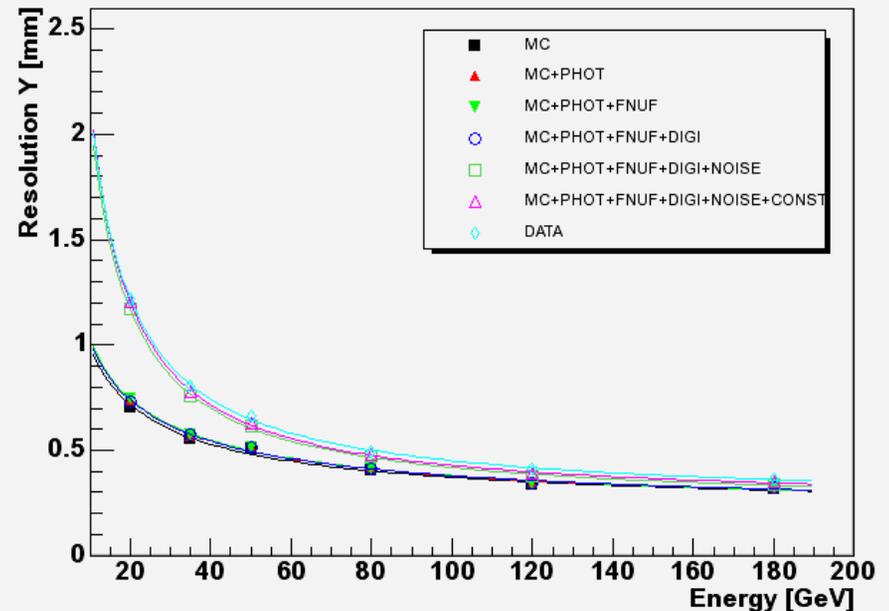




# Risoluzioni energia/posizione



## Risoluzione in posizione



## Risoluzione in energia



# ECAL ...



## ■ Conclusioni

- Accordo giudicato soddisfacente
  - Risoluzioni e contenimento ben simulati
- 
- Adesso: test beam con un intero supermodulo (1700 cristalli) e nuova elettronica



# Rivelatori di muoni



- Anche qui in teoria le cose sono semplici:

- Fisica em; unico parametro davvero libero è la scelta dei production cuts

- ma

- I rivelatori di muoni sono dopo i calorimetri, che nonostante abbiano  $\sim 10 \lambda$  possono lasciar passare particelle

- e qui è importante di nuovo la fisica adronica

- In generale:

- ATLAS + complicato (camera in aria)

- non c'è assorbimento delle particelle che possono arrivare al sistema dei muoni

- CMS ben protetto dal ferro

- bisogna prestare attenzione al multiple scattering

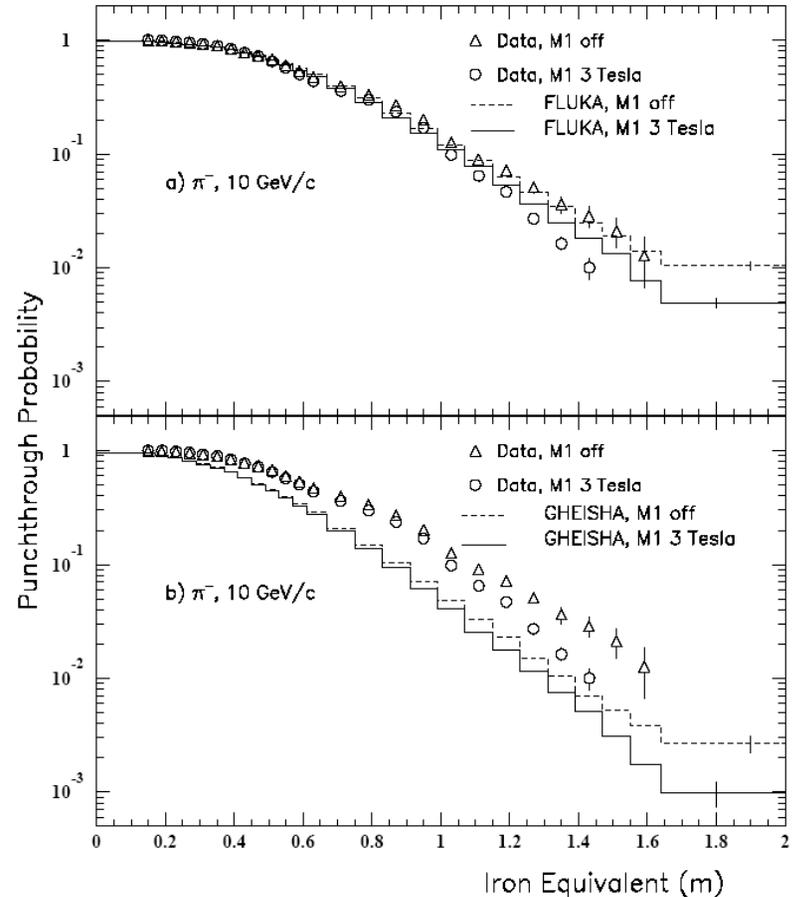


# punch through

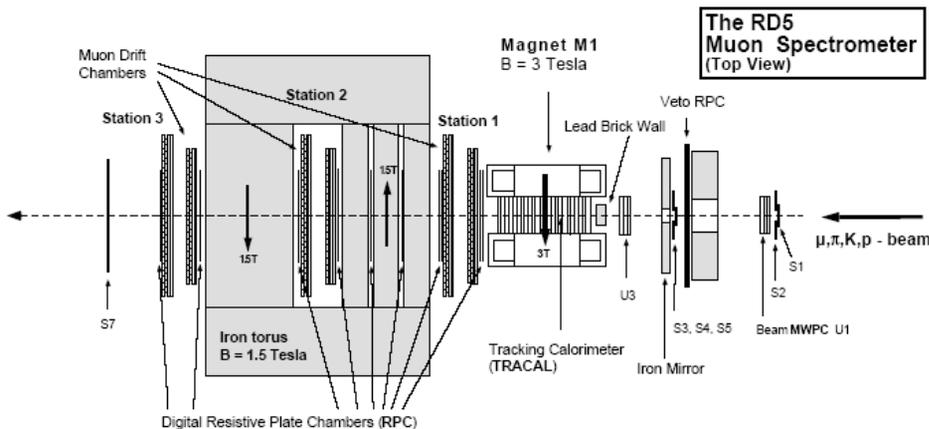


Probabilità di punch through per pioni in RD5 in funzione del ferro presente; sono pioni che

- Passano attraverso i calorimetri e non vengono fermati
- Sono una parte rimanente dello sciamo adronico che non è stato completamente contenuto



accordo considerato sufficiente



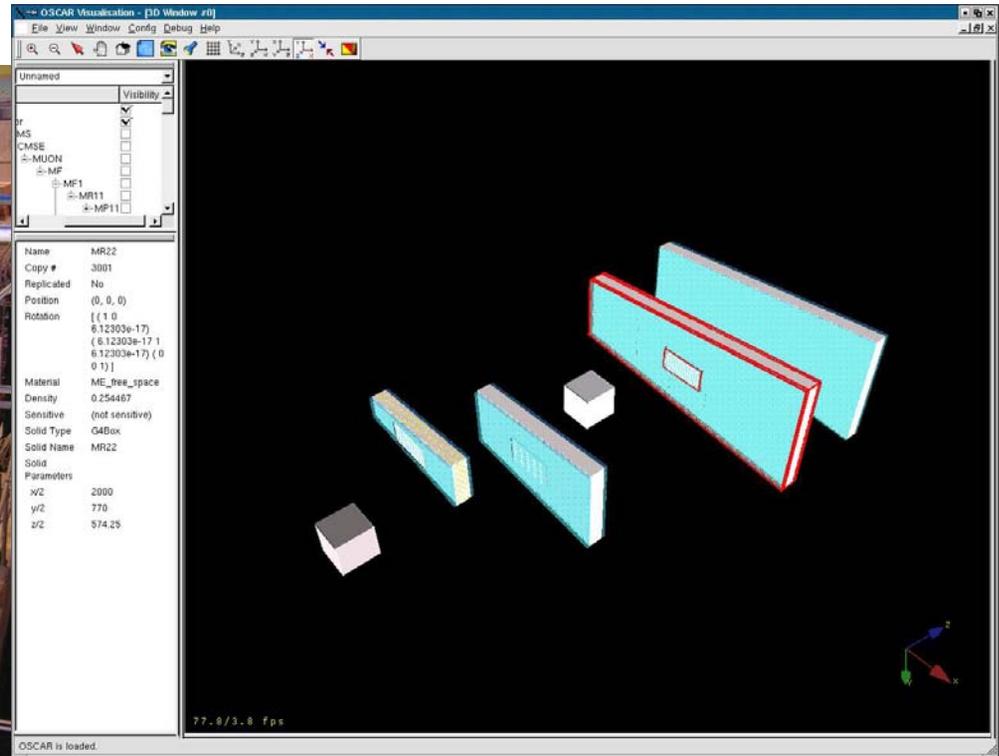


# Anche qui Test Beam...



## ■ CMS:

- Drift tube adesso
- Unici risultati "recenti" sono sulle CSC, ma la simulazione non è ancora completa





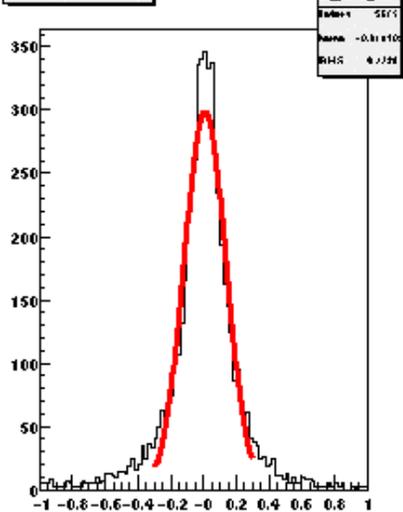
# CMS



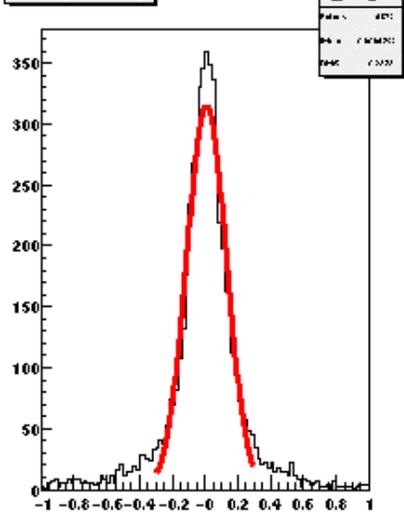
## ■ Confronti G3/G4 tutti ok

risoluzione in Pt a L2

L2 pt resolution



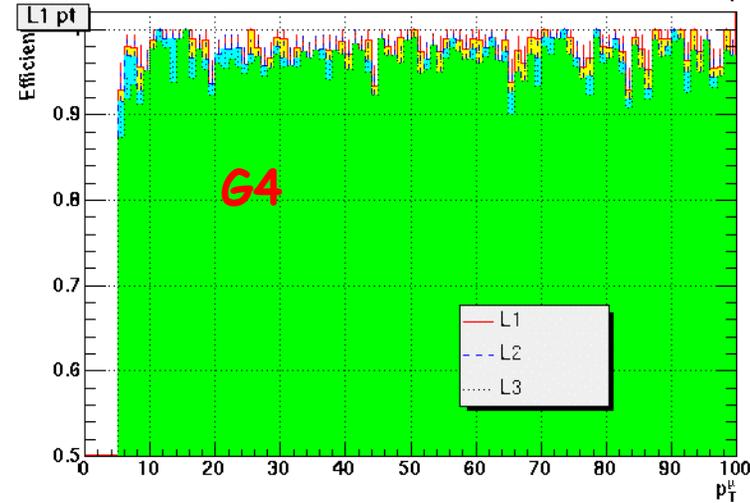
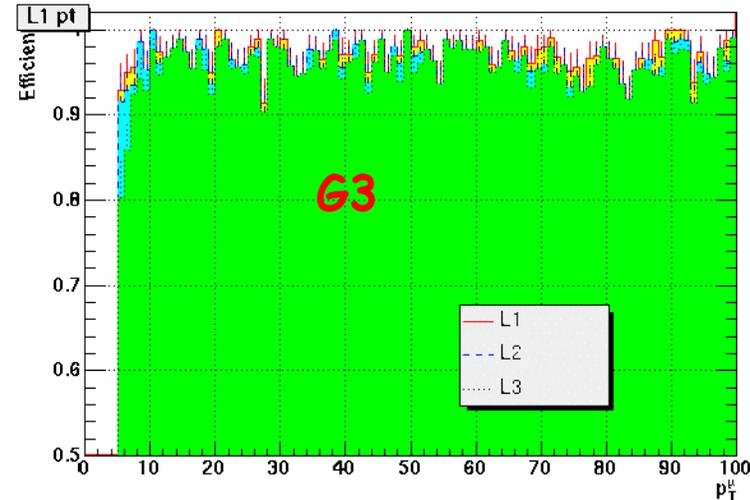
L2 pt resolution



13/10/2004

G. Buccali

Efficienze di trigger

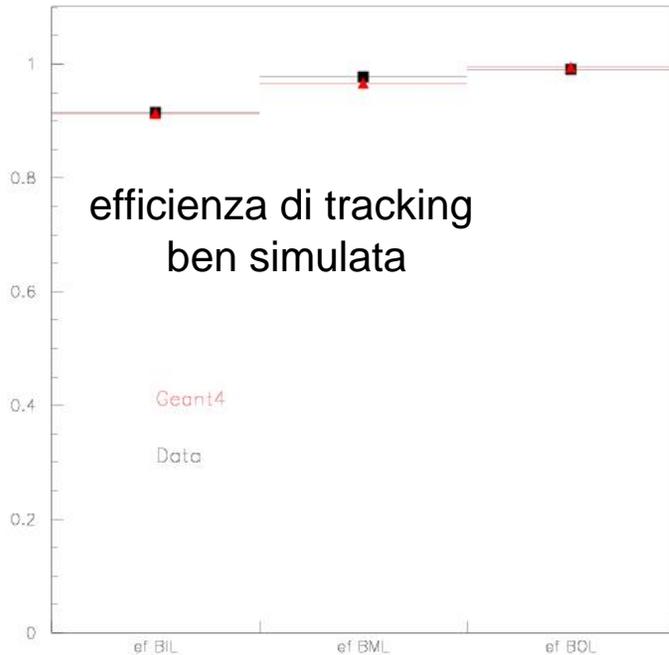
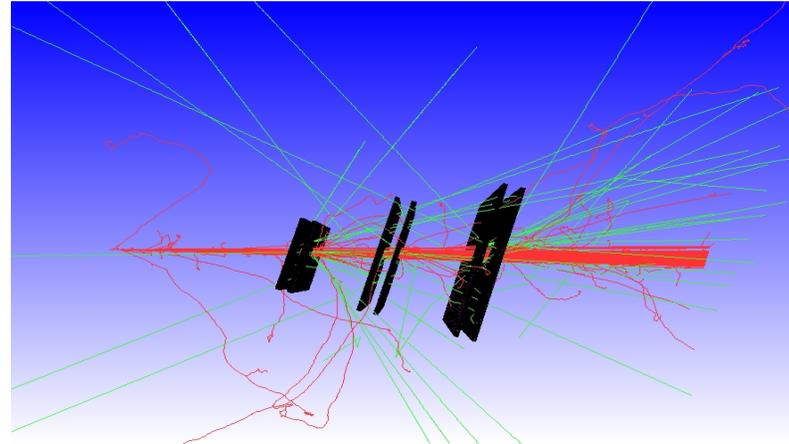




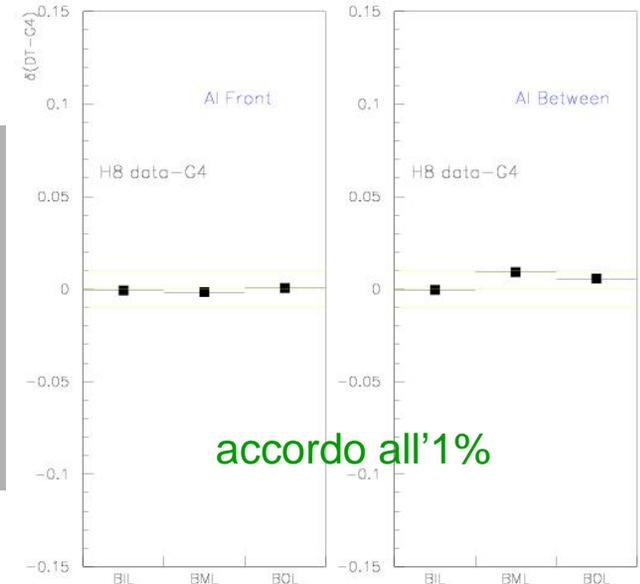
# ATLAS



## ■ TestBeam a H8 confrontato con Geant4



studio sui  $\delta$  rays:  
andando a vedere il numero di volte che più di un segmento è ricostruito (delta ray ad alta energia)

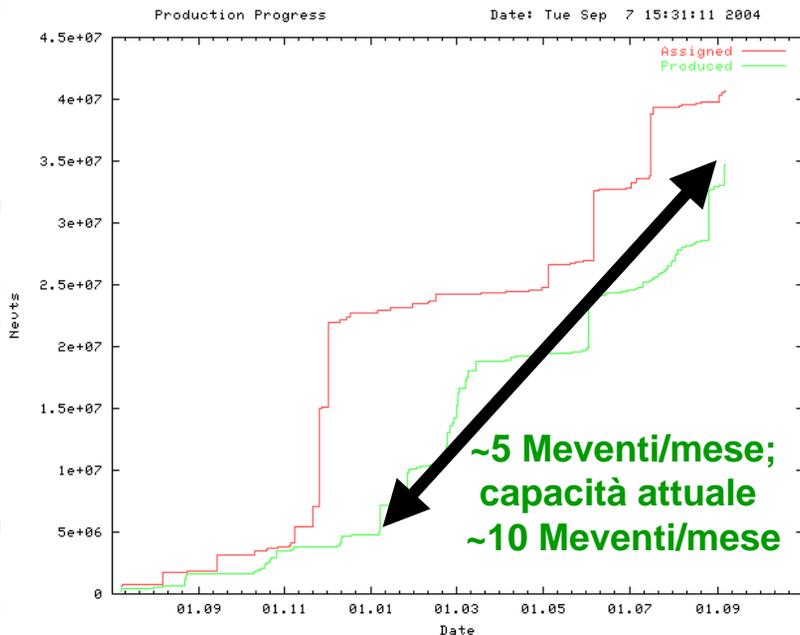




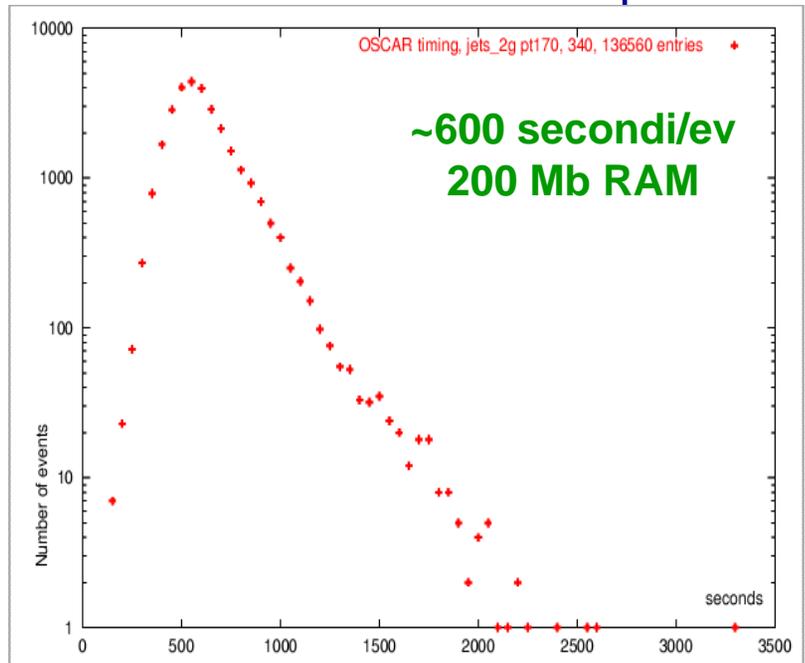
# Esperienza di produzione



- CMS ha prodotto gran parte (~40 milioni) di eventi del DC04 con G4
  - almeno 10% su grid
  - crash rate ~ permille; gran parte dei crash dovuti alla fisica adronica di G4!
  - Indicativamente, 600 secondi a evento
  - L'ultima versione di OSCAR (G4) ha la stessa velocità di cmsim
    - pur avendo tagli di produzione MOLTO più bassi
- ATLAS: per eventi complessi conferma ~600 sec/ev e simili footprint



cali





# Conclusioni



- Conclusioni? Non credo proprio, lavoro appena iniziato
- Notizie positive
  - fisica em sostanzialmente ok
  - fisica adronica sensibilmente migliore di quella di G3
    - ma a volte peggio di FLUKA
- Notizie negative
  - la fisica adronica non è del tutto a posto, e con segnali contrastanti fra i vari test beam
    - Ma solo nel limite in cui possiamo fidarci delle simulazioni del fascio e del readout
  - FLUKA ancora non è inserito nei framework standard, in attesa di un progetto di VMC
- Settembre 2004: ultimo run di SPS; praticamente tutti hanno preso dati
  - **VEDIAMOLI**