

Fizyka cząstek: detektory

prof. dr hab. A.F.Żarnecki

Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych IFD

Wykład IV

- Kalorymetry elektromagnetyczne
- Kalorymetry hadronowe

Kalorymetry

Kaskady hadronowe

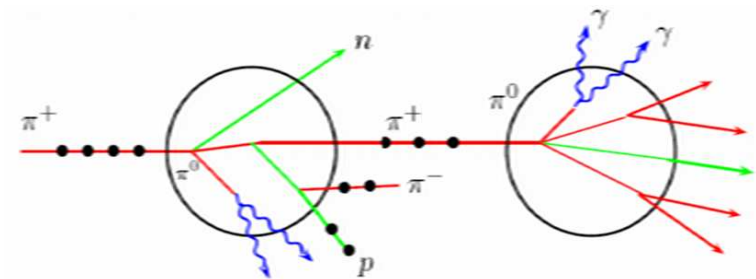
Tak jak w przypadku kaskad elektromagnetycznych, energia cząstki pierwotnej tracona jest w wielu kolejnych (silnych) oddziaływaniach z absorberem.

Zachodzące procesy są jednak dużo bardziej złożone.

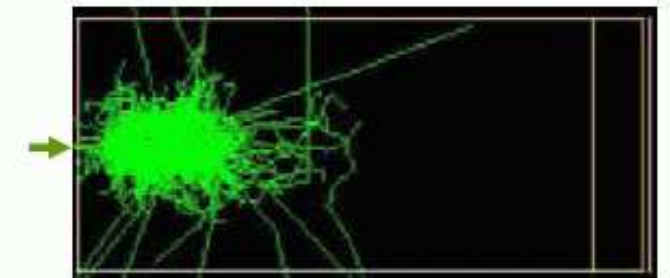
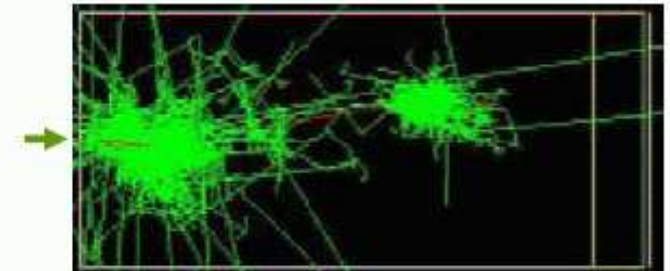
Oprócz produkcji wysokoenergetycznych cząstek wtórnych energia tracona jest na procesy jądrowe: wzbudzenia, rozszczepienia i energie odrzutu jąder.

Produkowane są cząstki o energiach rzędu MeV.

Część energii jest “niewidoczna” (procesy jądrowe, neutrino z rozpadów). Fluktuacje \Rightarrow zdolność rozdzielcza dużo gorsza niż dla kaskad E-M



20 GeV π in copper (simulation)



J.P. Wellisch

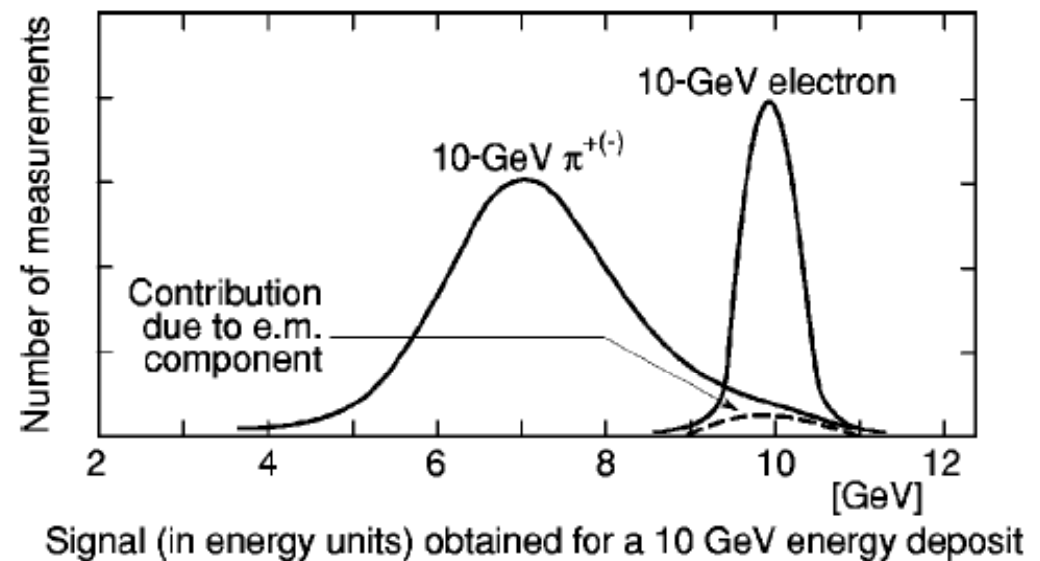
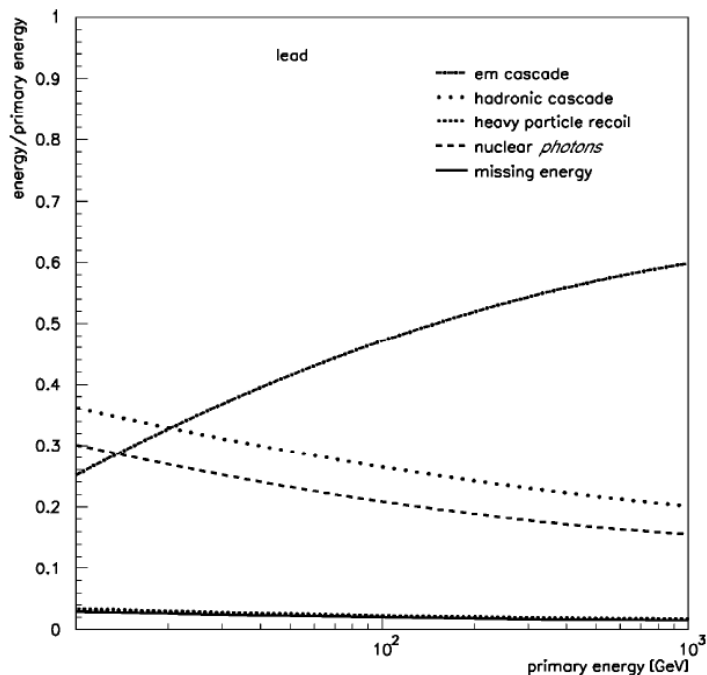
Kalorymetry

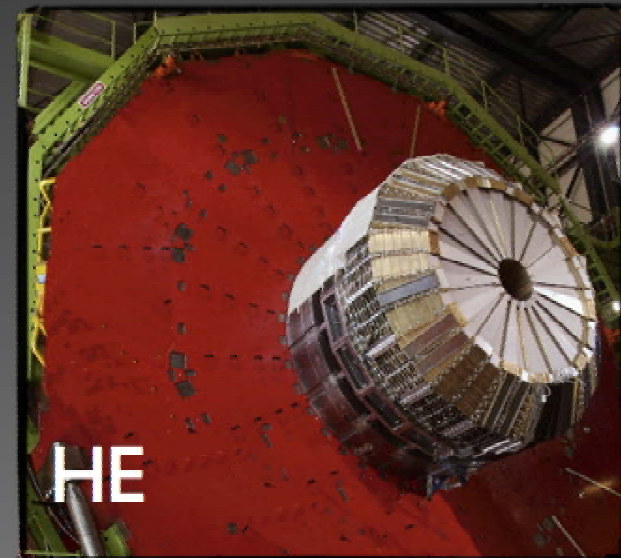
Kaskady hadronowe

Rzędu połowy energii kaskady hadronowej deponowane jest w postaci składowej elektromagnetycznej, pojawiającej się w wyniku rozpadu π^0

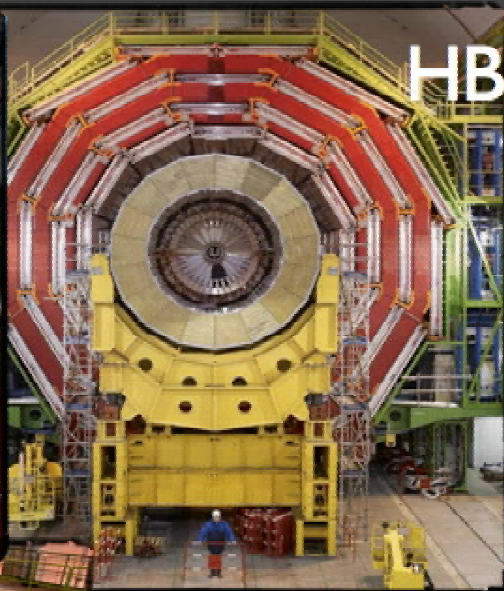
Składowa ta podlega bardzo dużym fluktuacjom \Rightarrow duży wkład do rozdzielczości

Średni udział składowej E-M rośnie z energią \Rightarrow nieliniowość

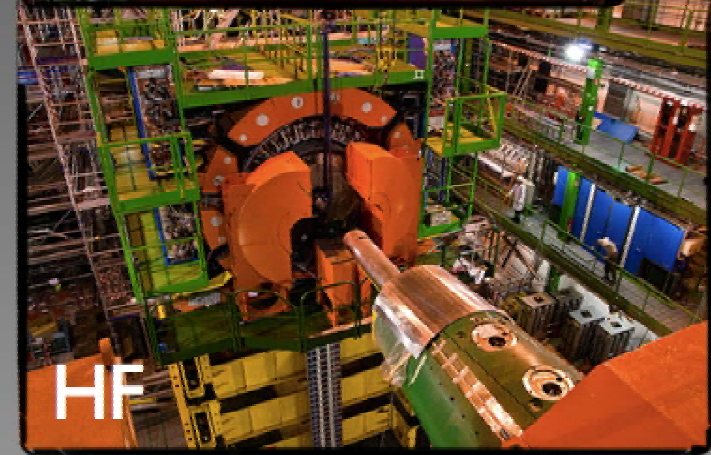




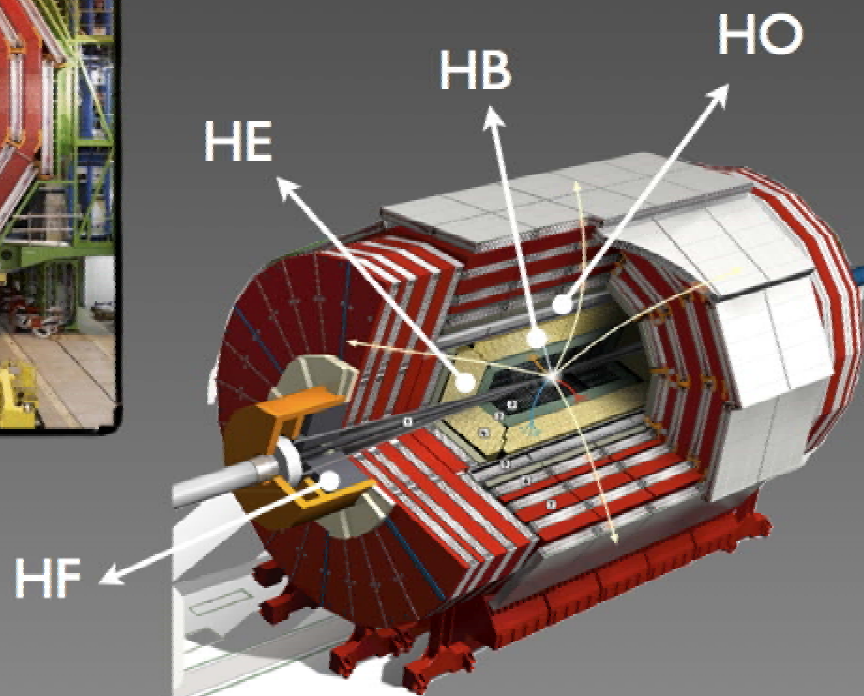
HE



HB



HF

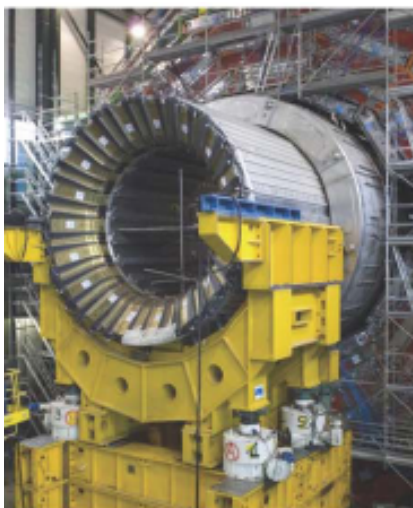
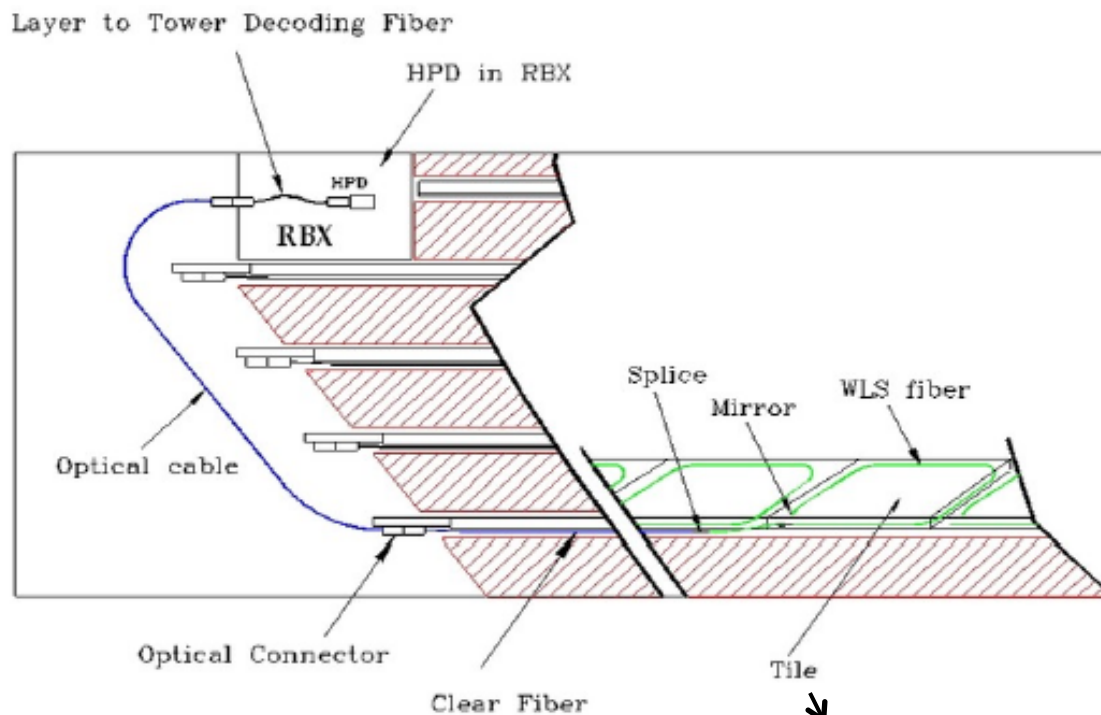


Detector	Active Material	Absorber	Readout	# Channels
HB/HE/HO	Scintillator Tile	Brass	Hybrid Photo-Diode (HPD)	2592/2592/2160
HF	Quartz Fiber	Steel	PMT	1728

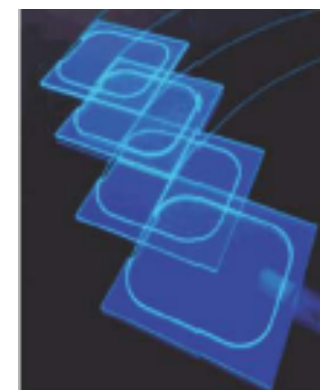
CMS HCAL -- Barrel

Common technology used for HCAL Barrel and Endcap

Insertion of tiles into wedge



Tile and WLS fiber



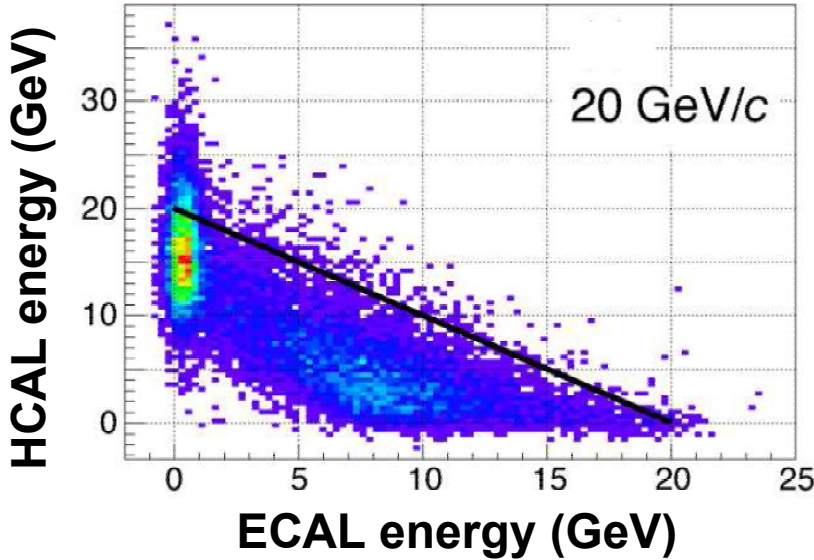


Non-compensation effect on energy resolution

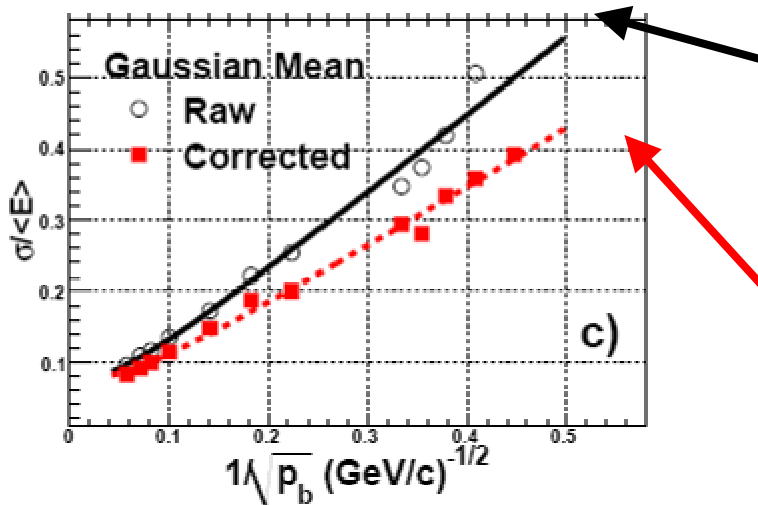


TEST-BEAM

CMS HCAL+ECAL single pion energy response



1) Non compensation $e/h \sim 1.4$ causes intrinsic sensitivity to **fluctuations** in the electromagnetic component of the shower and **non linearity**. Non-linearity can be corrected.



$$\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{110.7\%}{\sqrt{E}} \oplus 7.3\%$$

$$\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{84.7\%}{\sqrt{E}} \oplus 7.4\%$$

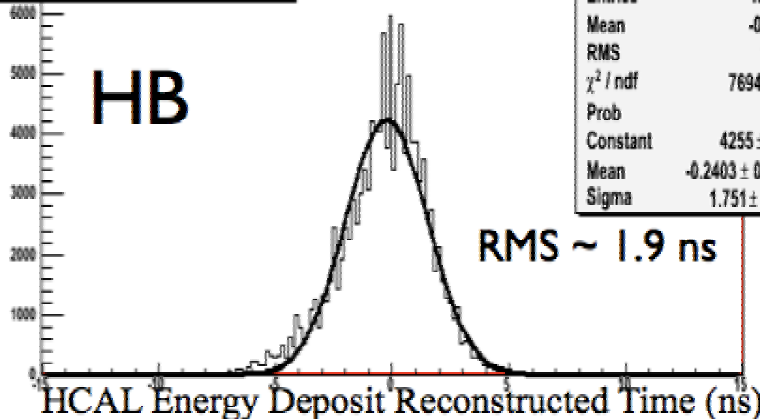
Timing Synchronization

Before

After

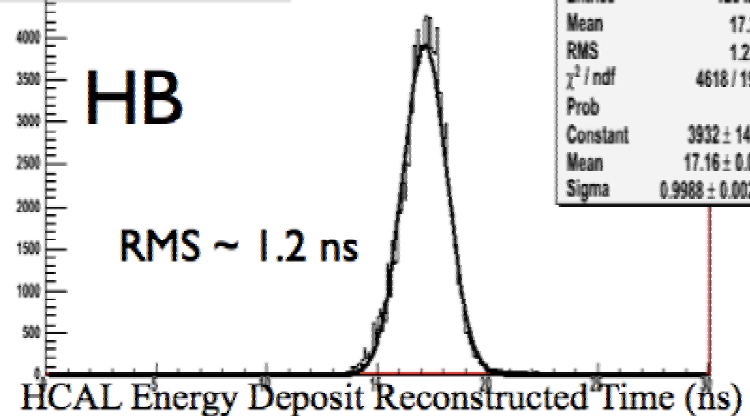
CMS DP 2009-014

Run 120015: HB individual tower timing (ns)



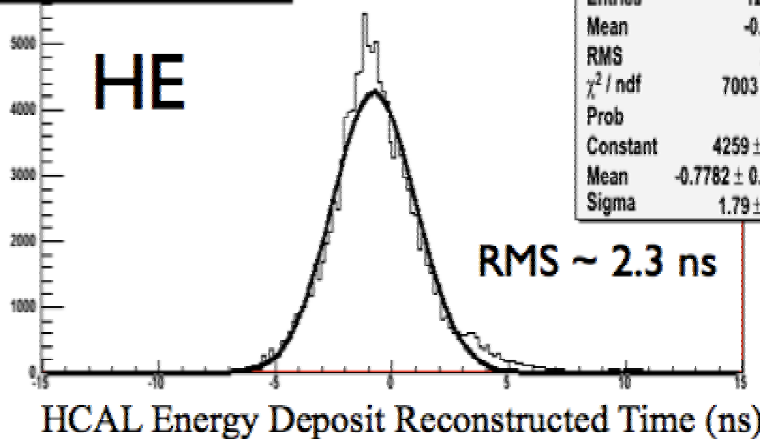
HB timing	
Entries	124410
Mean	-0.3516
RMS	1.917
χ^2 / ndf	7694 / 123
Prob	0
Constant	4255 ± 16.8
Mean	-0.2403 ± 0.0056
Sigma	1.751 ± 0.005

Run 121993: HB individual tower timing (ns)



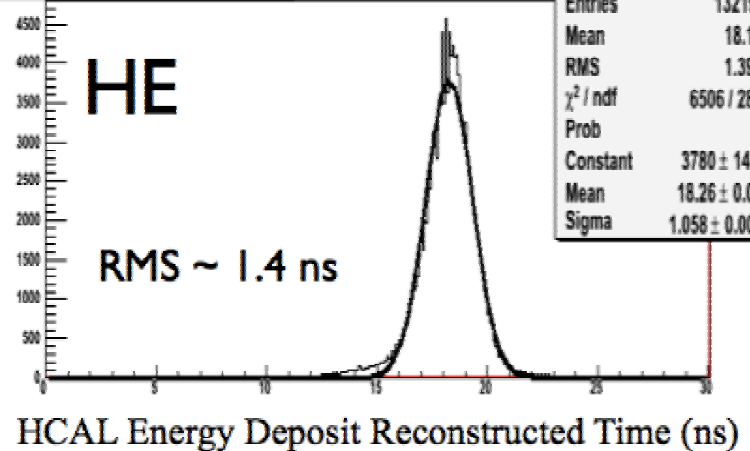
HB timing	
Entries	128425
Mean	17.21
RMS	1.221
χ^2 / ndf	4618 / 193
Prob	0
Constant	3932 ± 14.9
Mean	17.16 ± 0.00
Sigma	0.9988 ± 0.0025

Run 120015: HE individual tower timing (ns)



HE timing	
Entries	126494
Mean	-0.5314
RMS	2.291
χ^2 / ndf	7003 / 146
Prob	0
Constant	4259 ± 16.2
Mean	-0.7782 ± 0.0054
Sigma	1.79 ± 0.00

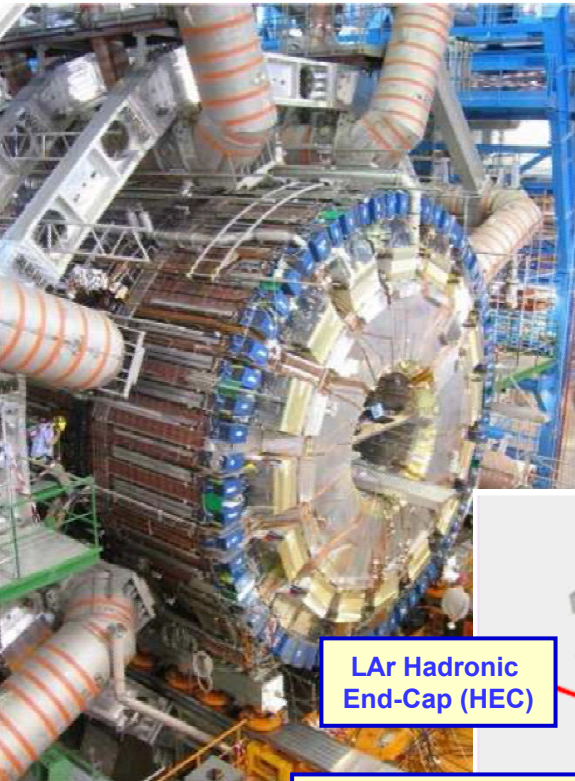
Run 121993: HE individual tower timing (ns)



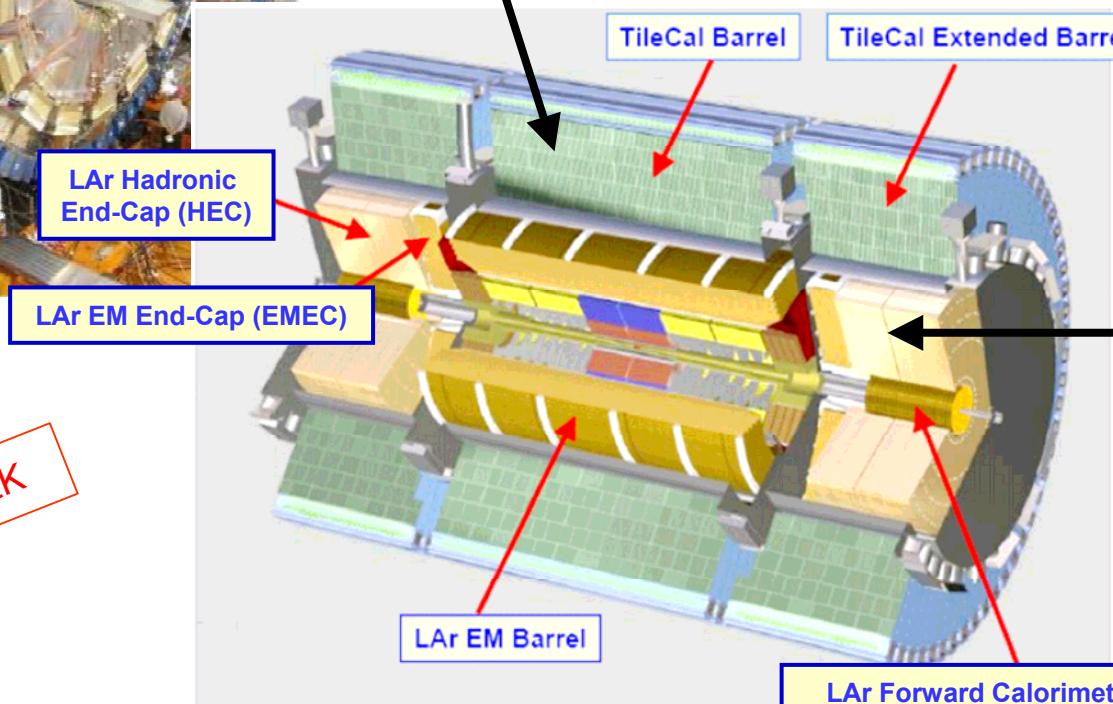
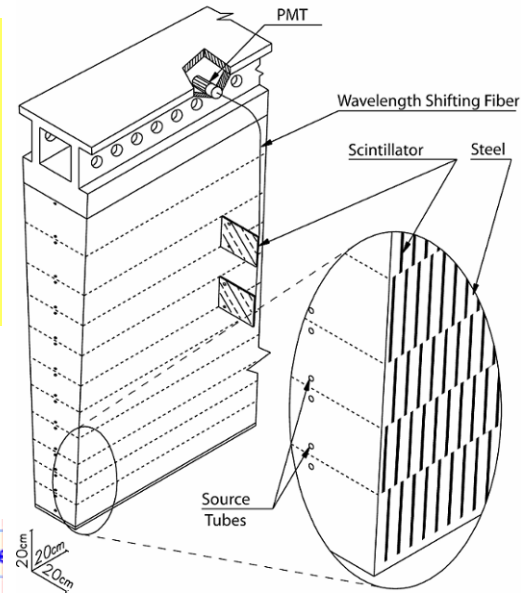
HE timing	
Entries	132191
Mean	18.17
RMS	1.398
χ^2 / ndf	6506 / 280
Prob	0
Constant	3780 ± 14.3
Mean	18.26 ± 0.00
Sigma	1.058 ± 0.003



The ATLAS HCAL



Barrel HCAL (TileCal):
Steel/Plastic scintillator. Tiles perpendicular to beam axis. Wavelength shifting fibers carry light to PMT. It covers $|\eta| < 1.7$



Endcap HCAL (HEC):
Cu-LAr 4 wheels
 10λ
4 longitudinal samplings
 $\Delta\eta \times \Delta\phi = 0.1 \times 0.1$ and
 0.2×0.2 for $|\eta| > 2.5$

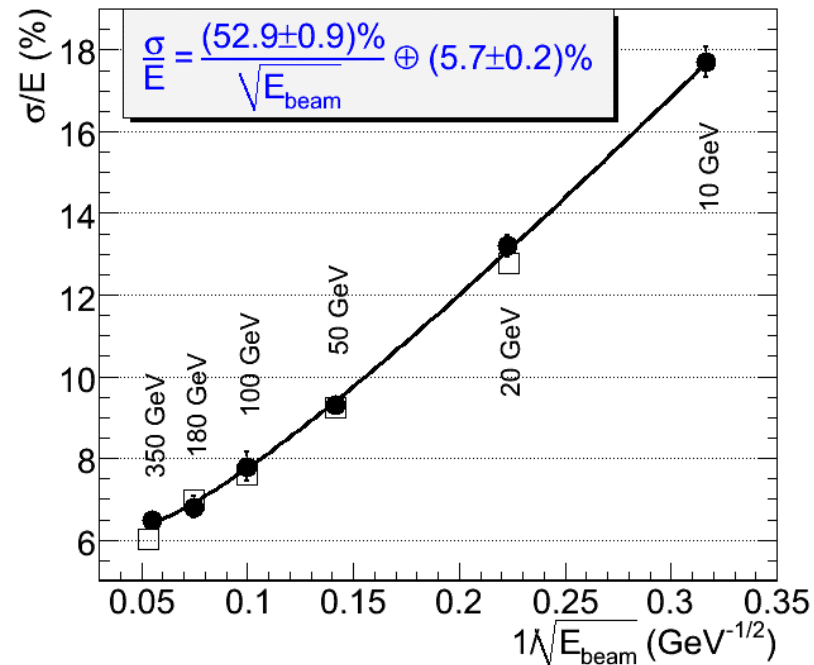
TALK



The ATLAS HCAL performance

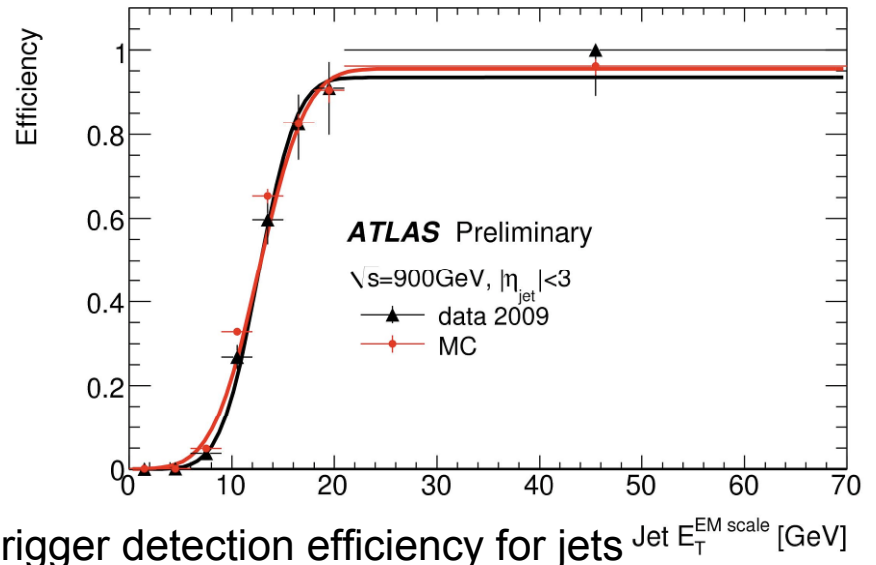
Test-beam Energy resolution for pions

TEST-BEAM



Tile calorimeter channels 9800 97.3% operational
Hadr. Endc. LAr channels 5600 99.9% operational
Forward LAr channels 3500 100% operational

2009 COLLISIONS



Trigger detection efficiency for jets of $E_T > 5$ ADC counts ($\sim 5\text{GeV}$)

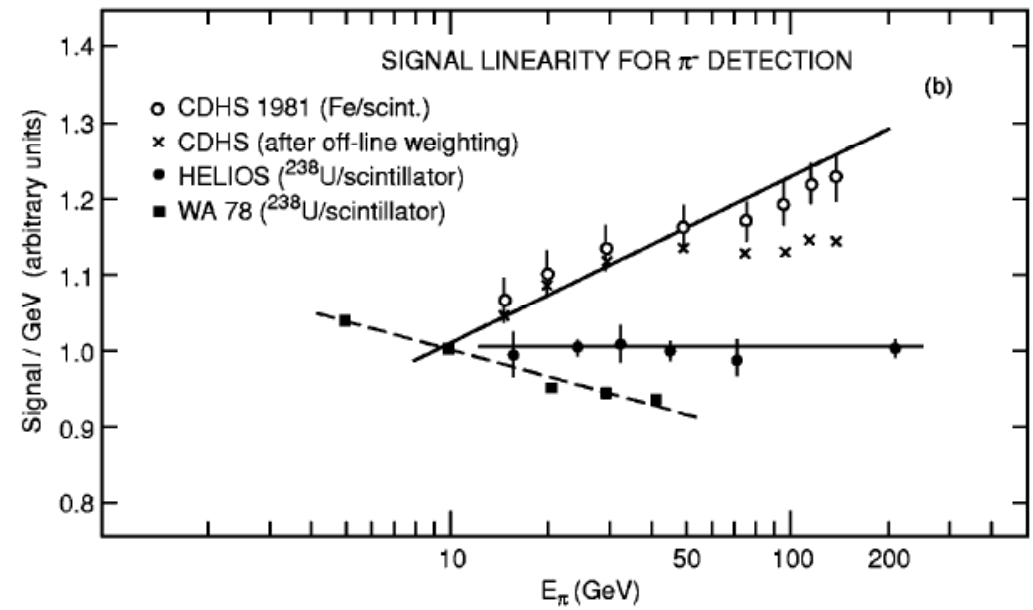
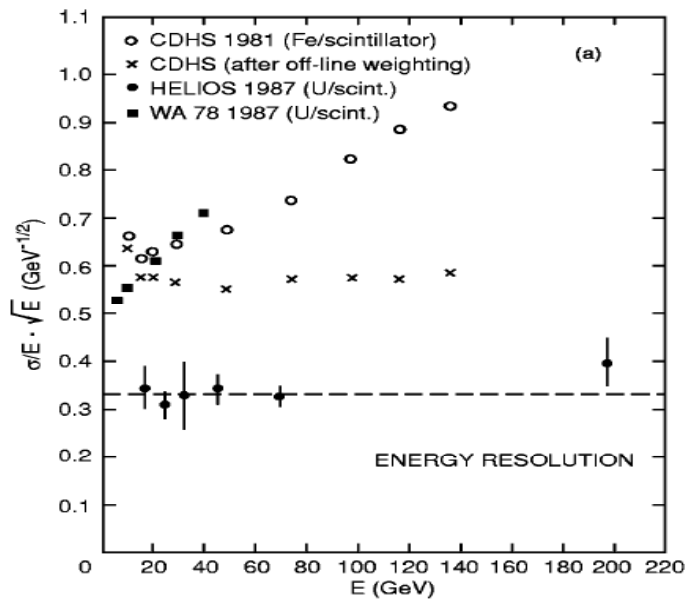
Kalorymetry

Kompensacja

Pomiar energii kaskad hadronowych można istotnie polepszyć jeśli zrównamy odpowiedź kalorymetru dla składowej hadronowej i elektromagnetycznej \Rightarrow kompensacja

Kalorymetr ma wtedy taką samą odpowiedź dla elektronów i hadronów: $e/h = 1$

Kompensację można uzyskać poprzez odpowiednią konstrukcję detektora (dobór materiału i grubości warstw)



Kalorymetry

Kompensacja

Aby uzyskać kompensację należy:

- tłumić odpowiedź detektora dla składowej E-M
- odzyskać przynajmniej część energii traconej w procesach jądrowych

Kompensujące kalorymetry próbkujące zbudowano z powodzeniem stosując uran lub ołów jako absorbery + scyntylatory organiczne jako materiał aktywny

Ciężki (duże Z) absorber i lekki (małe Z) materiał aktywny

⇒ składowa hadronowa jest efektywniej próbkowana niż składowa EM

$$U : \lambda_{int} \approx 33X_0 \qquad Sci : \lambda_{int} \approx 1.9X_0$$

$$\frac{(\Delta\lambda_{int})_{Sci}}{(\Delta\lambda_{int})_U} \approx 18 \frac{(\Delta X_0)_{Sci}}{(\Delta X_0)_U}$$

W scyntylatorze organicznym można “odzyskać” część energii licznie produkowanych w procesach jądrowych neutronów dzięki ich elastycznym rozproszeniom na protonach.

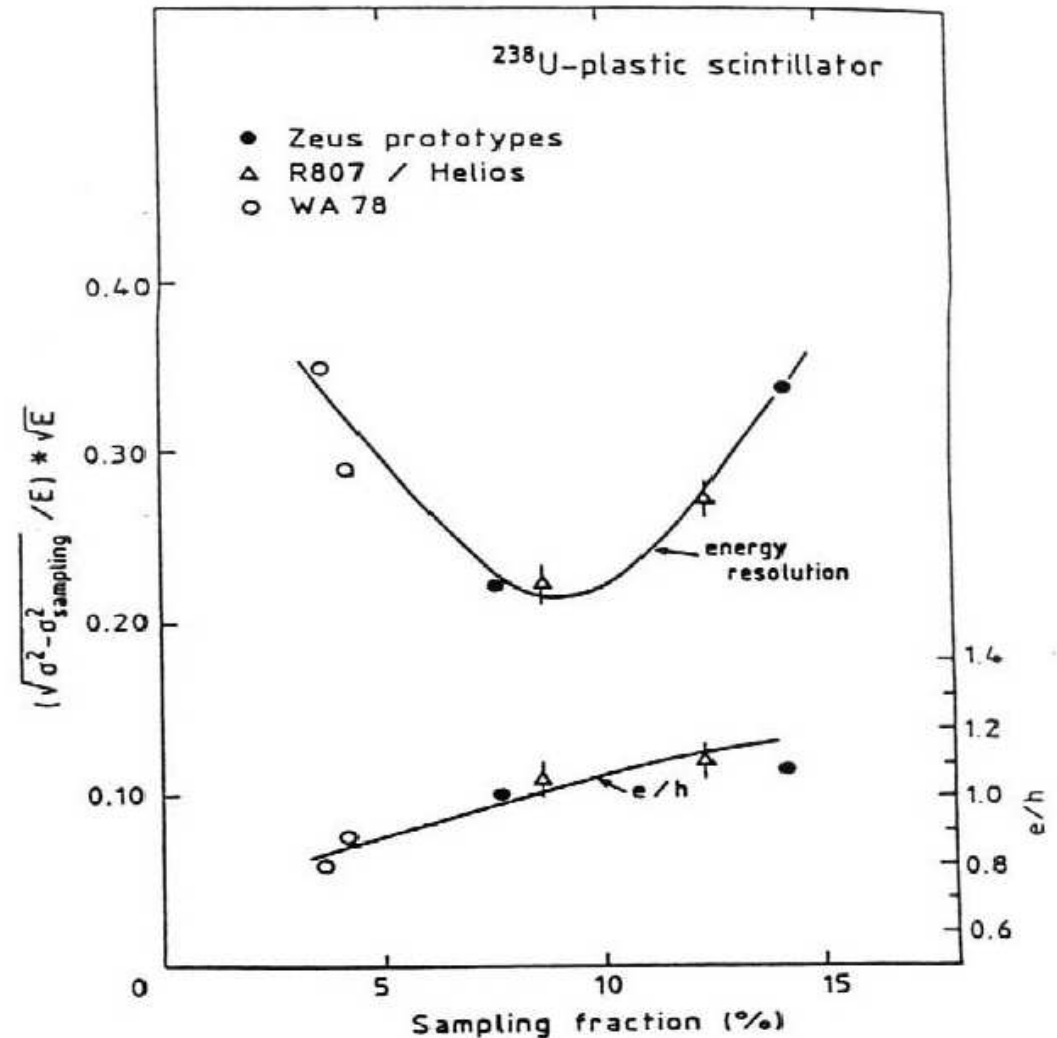
Kalorymetry

Kompensacja

Procesy leżące u podstaw **rozwoju kaskady hadronowej** wciąż nie są dostatecznie dobrze poznane.

W latach 80 **symulacje komputerowe** nie były jeszcze dobrze rozwinięte.

Parametry potrzebne do uzyskania kompensacji trzeba było **dobrać doświadczalnie**.



Kalorymetry

Kalorymetr detektora ZEUS

Płyty uranowe 3.3 mm
w kopertach ze stali nierdzewnej.

Płyty scyntylatora 2.6 mm

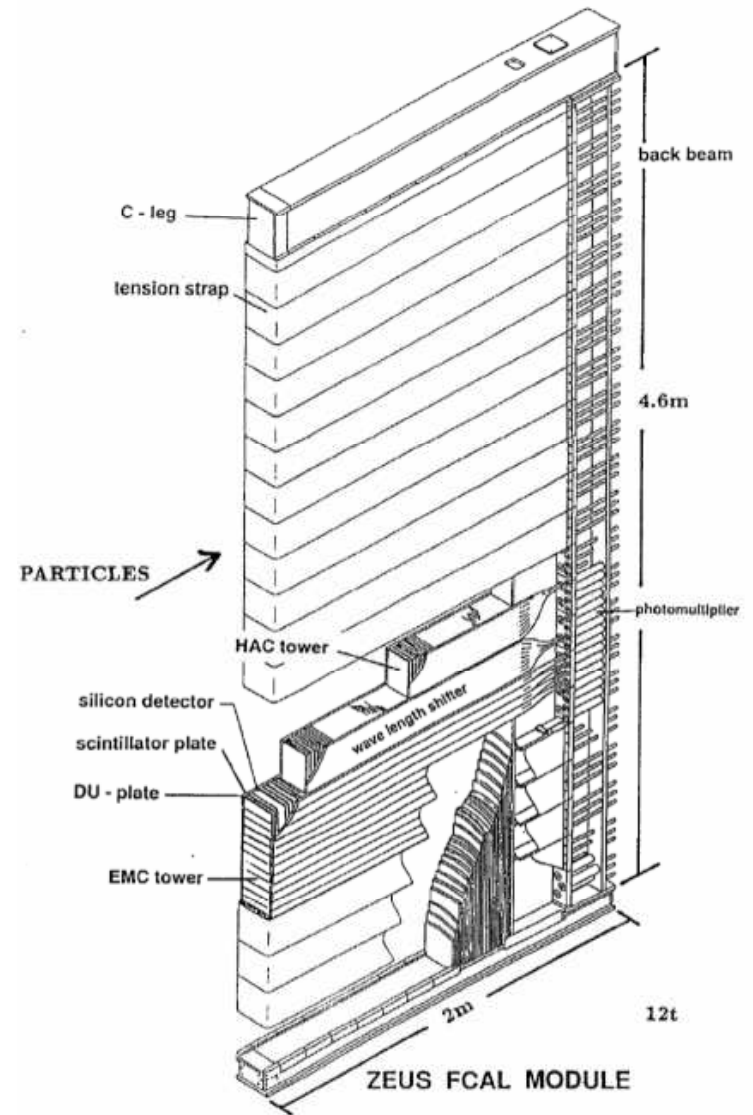
$$\frac{e}{h} = 1.00 \pm 0.02$$

Podział podłużny na sekcję elektromagnetyczną
i dwie sekcje hadronowe

$$\frac{\sigma}{E} \approx \frac{18\%}{\sqrt{E}} \quad \text{dla elektronów}$$

$$\frac{\sigma}{E} \approx \frac{35\%}{\sqrt{E}} \quad \text{dla hadronów}$$

w warunkach testowych



Kalorymetry

Kompensacja algorytmiczna

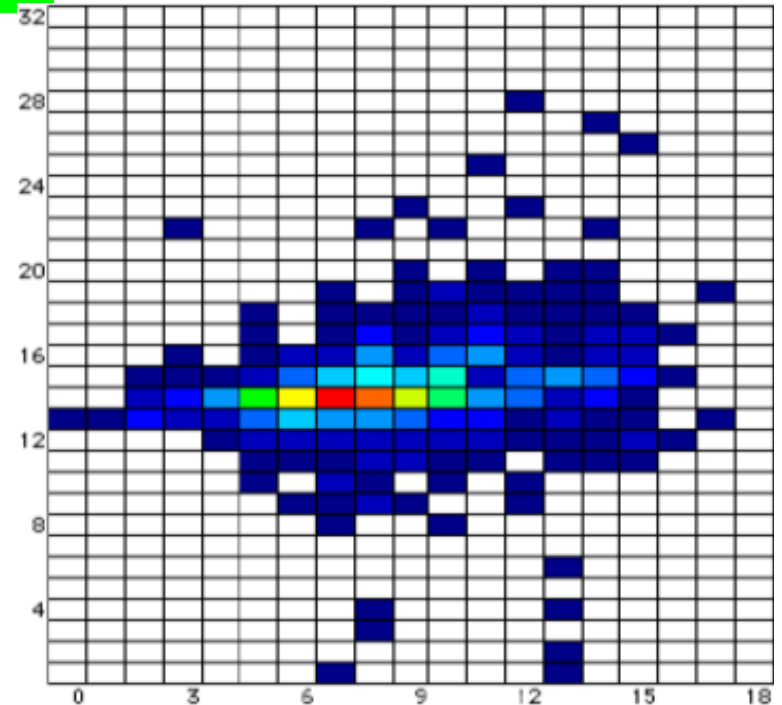
Jeśli nie dobierzemy odpowiednio materiałów absorbera i detektora odpowiedź kalorymetru na część elektromagnetyczną i hadronową kaskady będą różne.

Odpowiedź kalorymetru na pojedynczy hadron:

$$E_{meas} = (f_{em} + (1 - f_{em})/\eta_{had}) \cdot E$$

gdzie: f_{em} - ułamek energii w części EM,
 η_{had} - tłumienie składowej hadronowej (~ 1.4)

Jeśli jesteśmy w stanie zrekonstruować f_{em} możemy istotnie **polepszyć dokładność pomiaru**.



W kalorymetrze od dużej segmentacji część EM kaskady widoczna jest jako

silnie zlokalizowane depozyty

($X_0 \ll \lambda_{int}$)

\Rightarrow można oszacować f_{em}

Kalorymetry

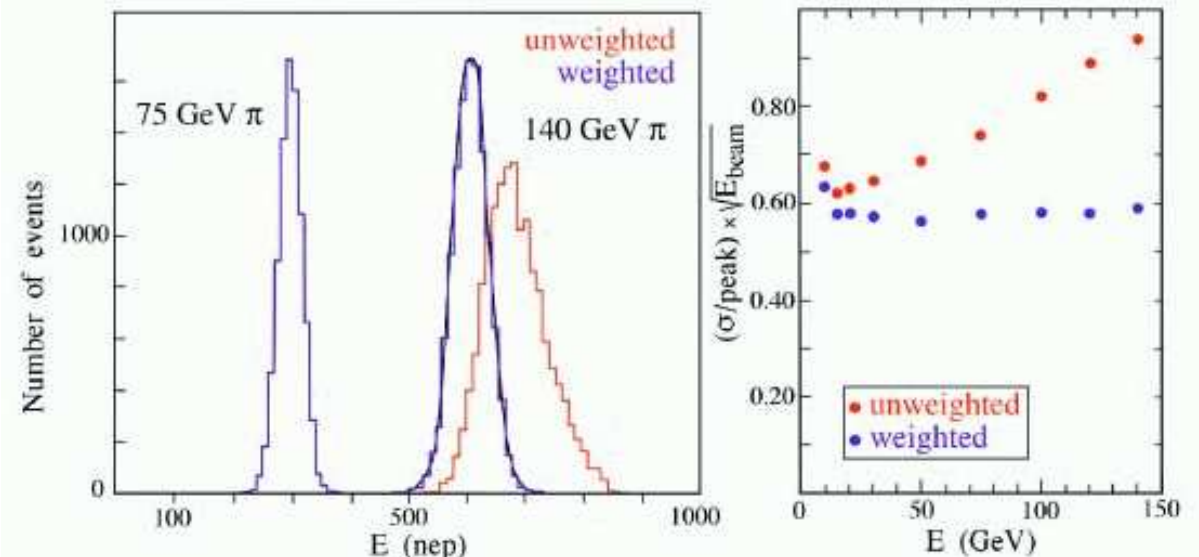
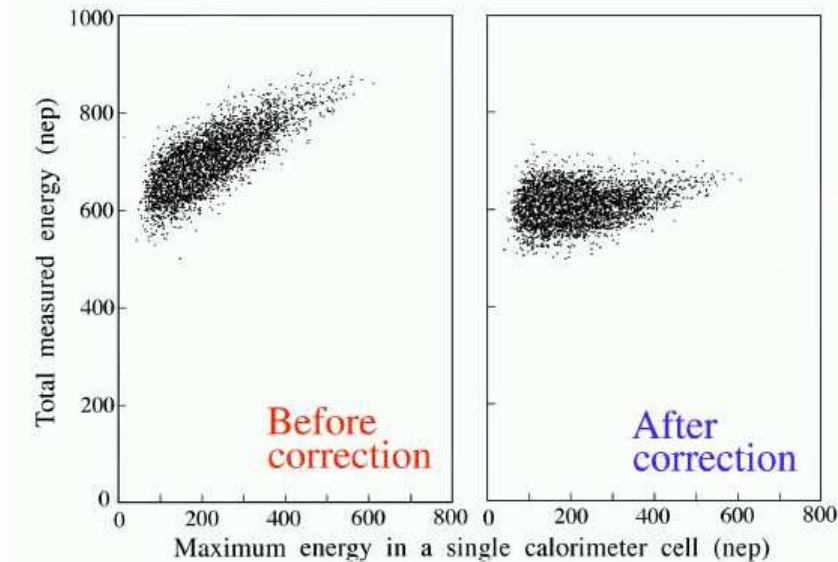
Kompensacja algorytmiczna

Po raz pierwszy zastosowana w eksperymencie WA1.

Składowa EM oceniana na podstawie **maksymalnego depozytu** w pojedynczej celi.

Znacząca **poprawa rozdzielczości**, zwłaszcza dla dużych energii.

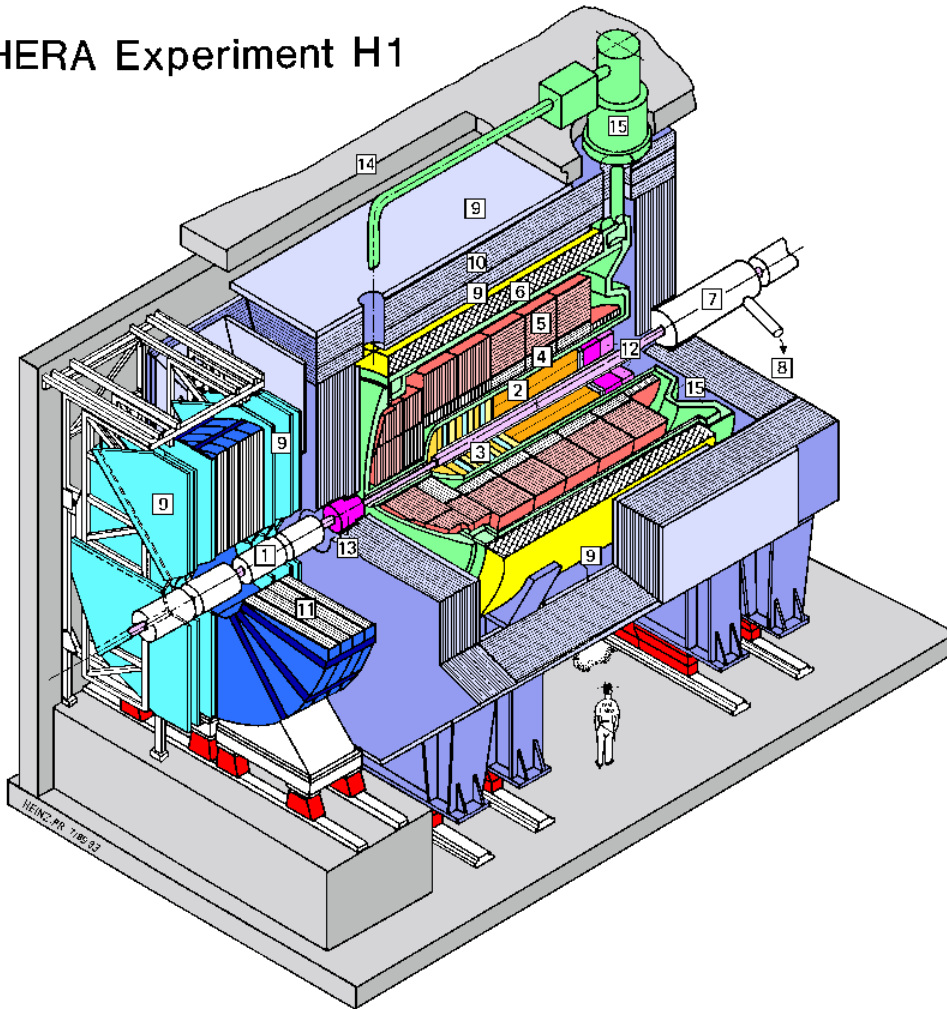
Działa tylko dla pojedynczych cząstek.



Kalorymetry

Kalorymetr detektora H1

HERA Experiment H1

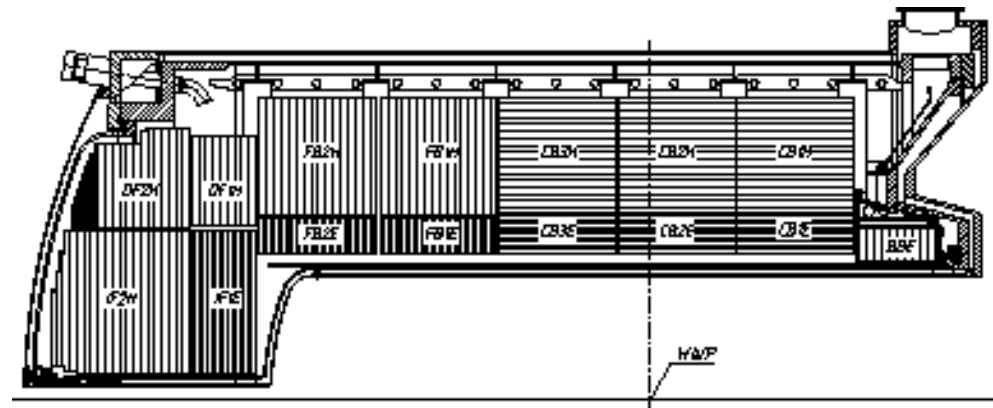


Kalorymetr z **ciekłym argonem**.

Łącznie 53 m^3 , napięcie odczytu 1.5 kV przy 2.4 mm warstwach LAr.

Absorber: **ołów** w części EM, **stal** w części hadronowej.

45 000 segmentów odczytu ("cel")



Kalorymetry

Kalorymetr detektora H1

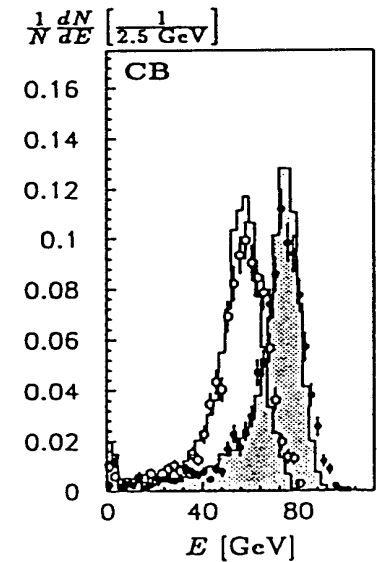
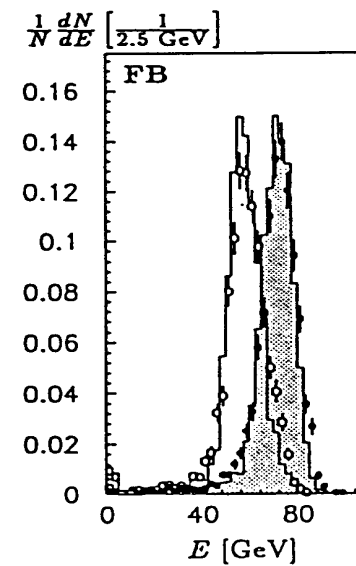
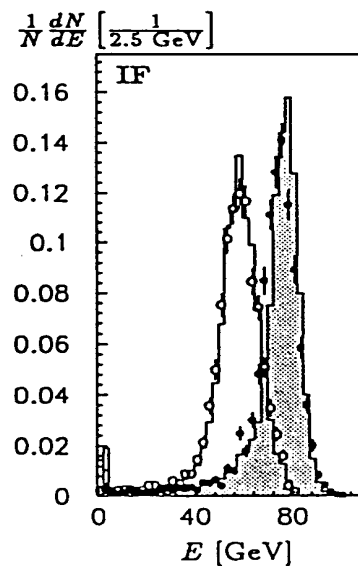
Algorytm kompensacji w pomiarze energii:

$$E_{rec} = \sum_{i \in cele} E^i \cdot \left[a + b \cdot \exp\left(\frac{-\alpha E^i}{V^i}\right) \right]$$

E^i - energia zmierzona w danej celi, V^i - jej objętość, a , b i α - współczynniki algorytmu

Rekonstrukcja energii
pionu 80 GeV w różnych
częściach kalorymetru
(przed i po poprawkach)

$$\frac{\sigma_E}{E} \approx \frac{70\%}{\sqrt{E}} \rightarrow \frac{55\%}{\sqrt{E}}$$



Kalorymetry

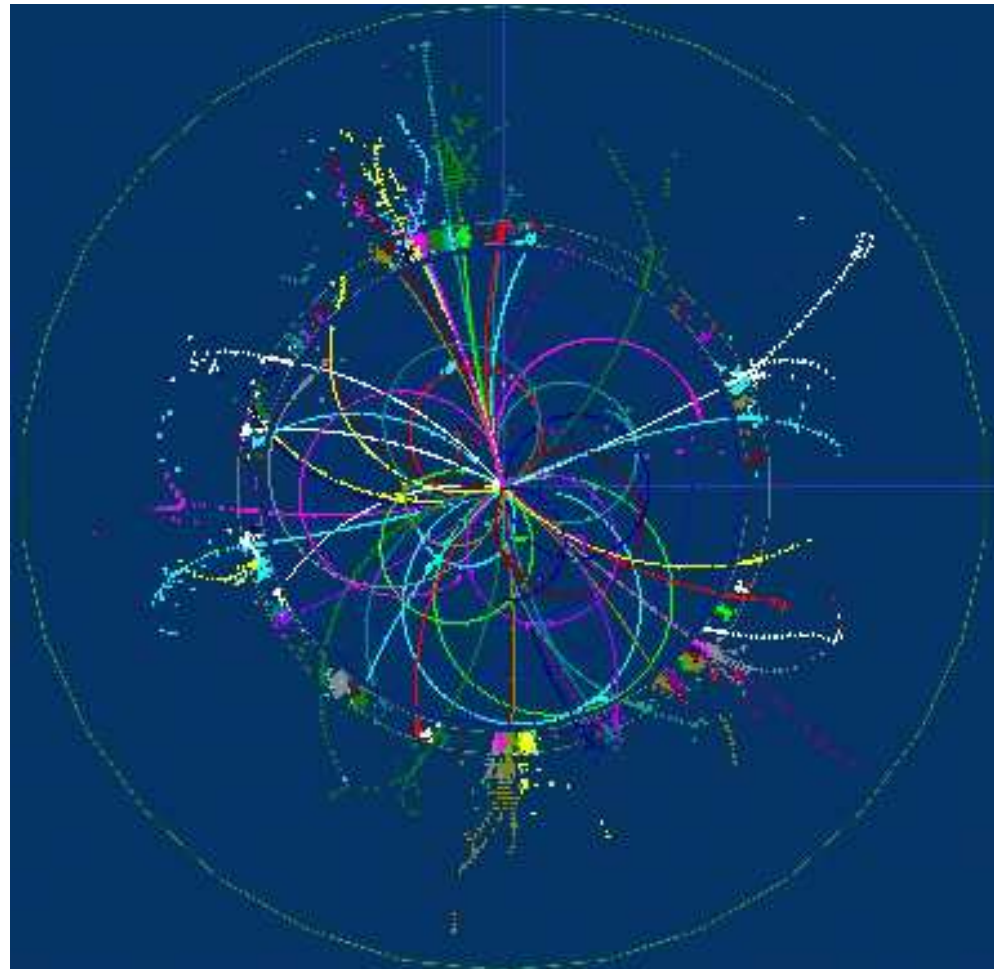
Nowe koncepcje

Propozycja kalorymetru dla detektora przy ILC

Detektor wyposażony w “kalorymetr śladowy” umożliwia pełną identyfikację wszystkich produkowanych cząstek i optymalny pomiar energii.

PFA - Particle Flow Algorithm

rekonstrukcja przypadku “cząstka po cząstce” na podstawie informacji z kalorymetrów i detektorów śladowych

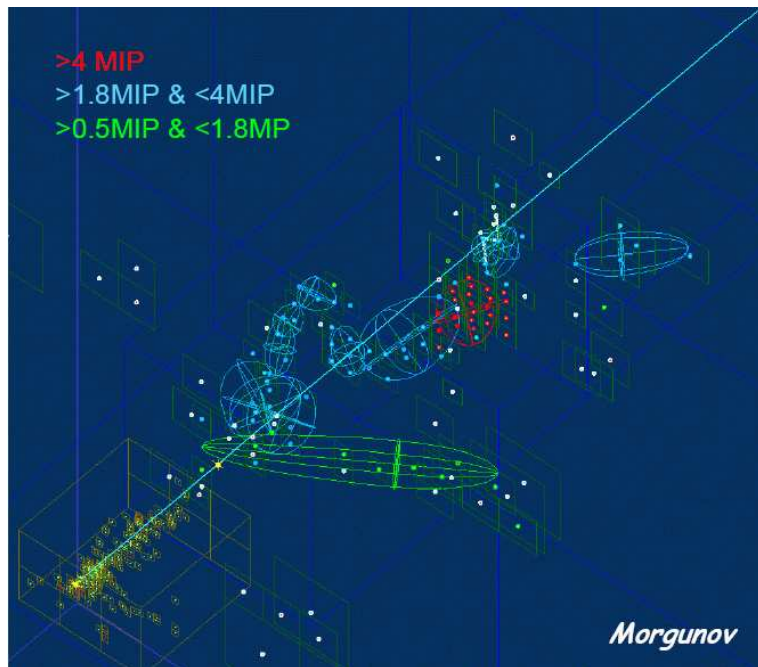


Kalorymetry

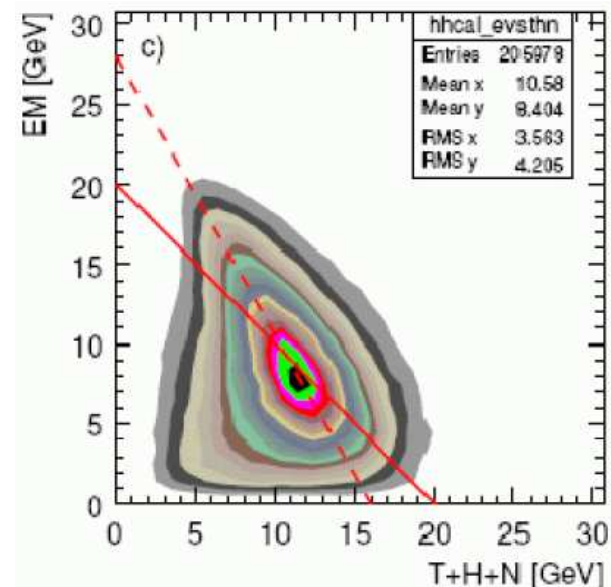
Nowe koncepcje Kalorymetr śladowy

Na podstawie “śladów” mierzonych w kalorymerze można depozyt energii podzielić na wkłady od **kaskad E-M**, **naładowanych hadronów**, neutronów i **jonizację**.

Powinno to pozwolić rekonstruować całkowitą energię kaskady hadronowych z dokładnością rzędu $\frac{\sigma_E}{E} \approx \frac{30\%}{\sqrt{E}}$ (przy $E \sim 100$ GeV)



Korelacja części EM i pozostałych składowych dla 20 GeV π^+

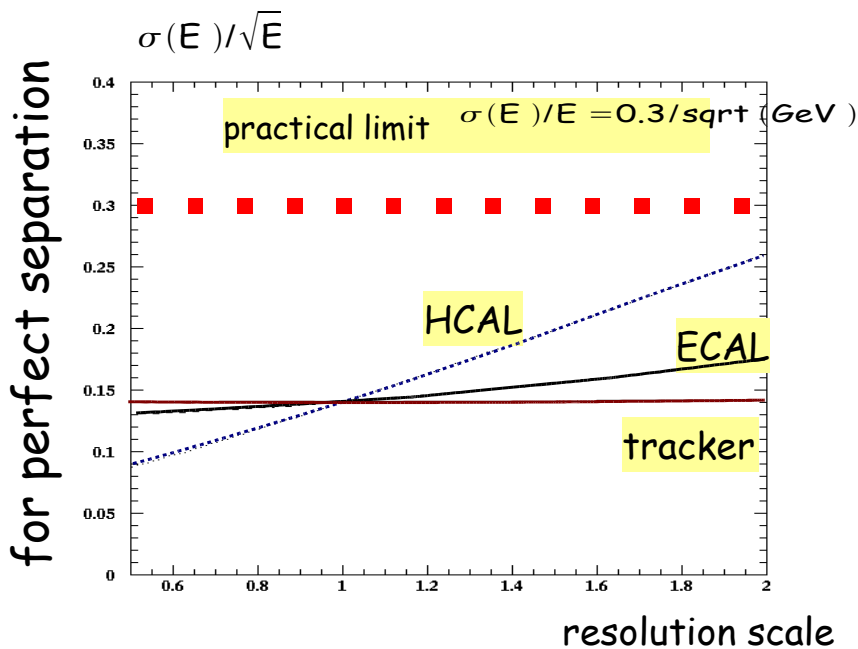
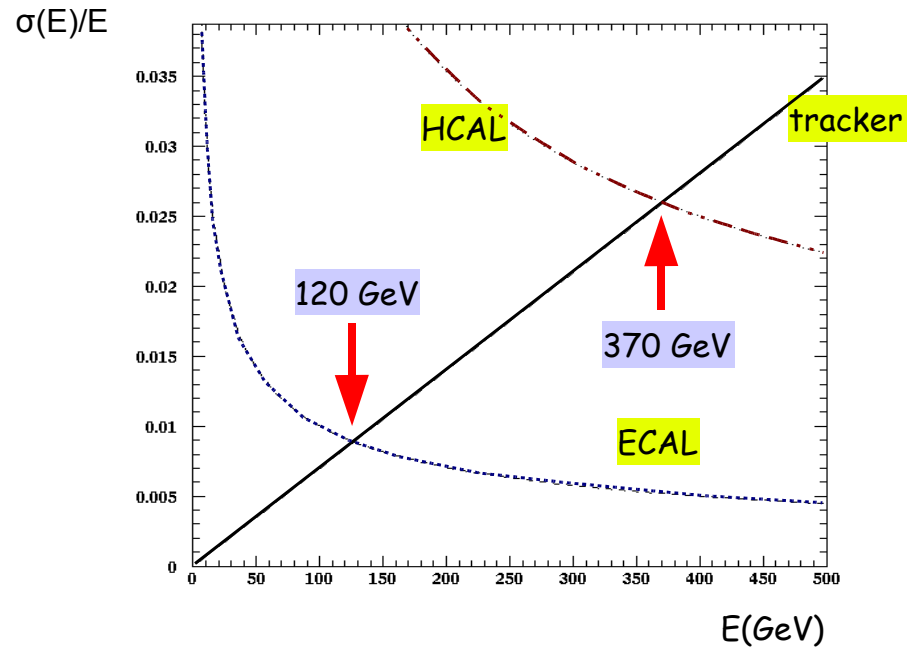


Particle Flow: Basics

$$\sigma(\text{Jet}) = \sqrt{\sum \epsilon_T^2 E_i^4 + \sum \epsilon_{\text{ECAL}}^2 E_i + \sum \epsilon_{\text{HCAL}}^2 E_i}$$

Resolution is dominated by **HCAL**
and by
"confusion" term

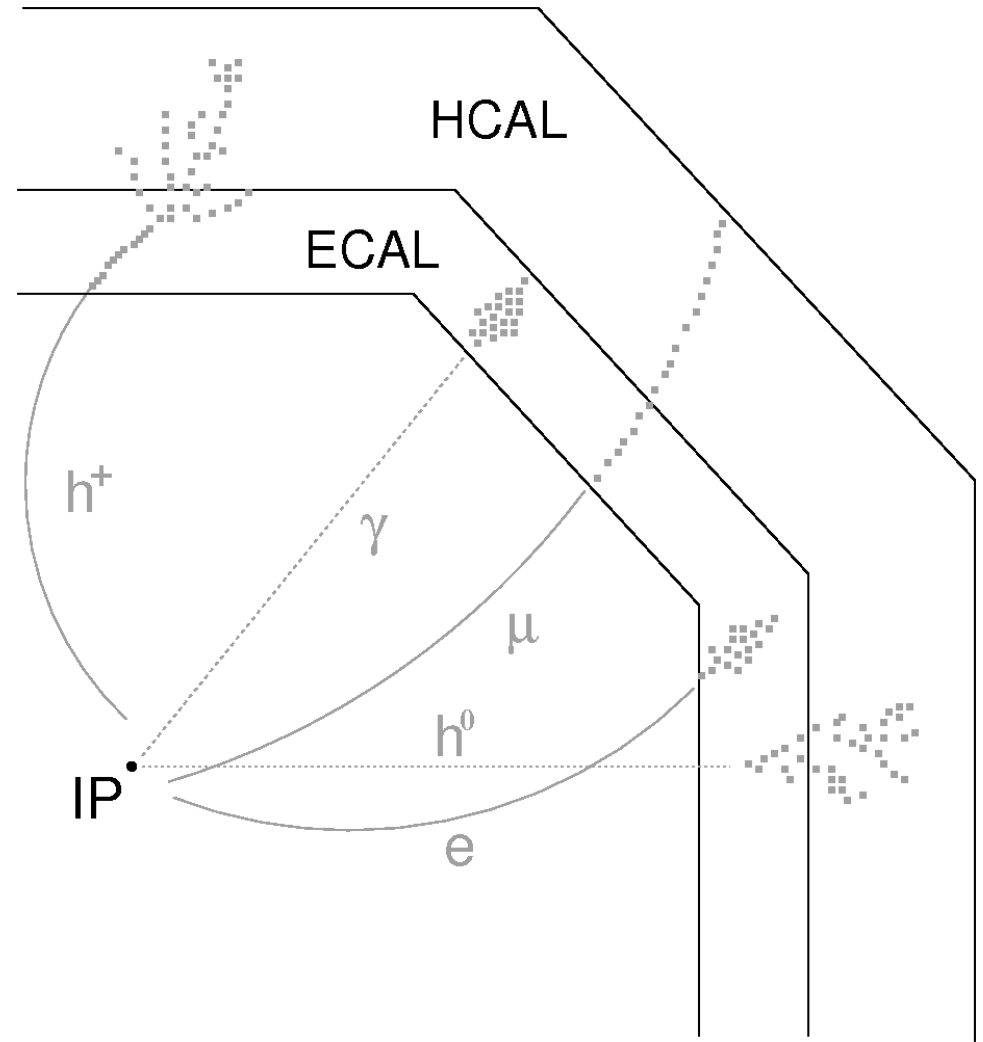
Resolution tracker - Calorimeter



- design detector to
- minimize confusion term
 - minimize the role of the HCAL
 - for the rest: build the best HCAL possible

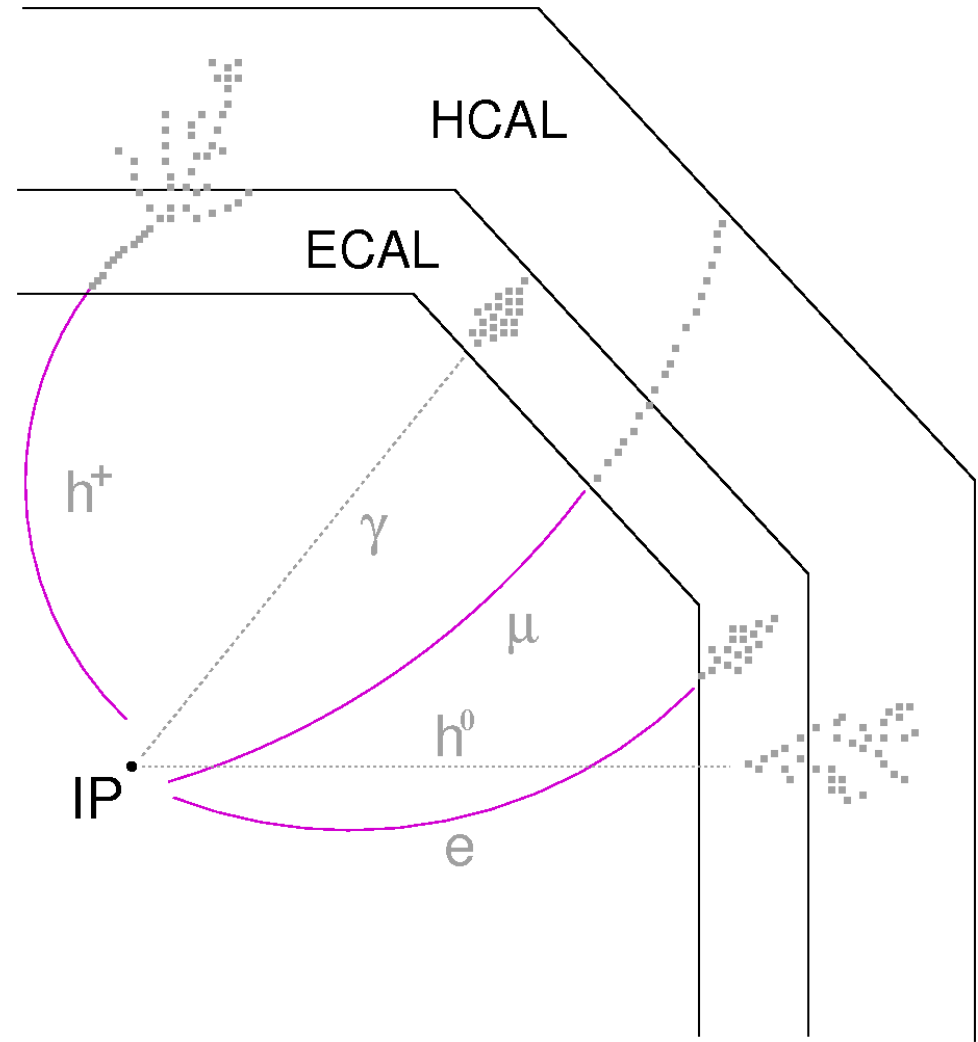
Effect of changing the
resolutions by a scale factor

Track-Based Particle Flow Concept



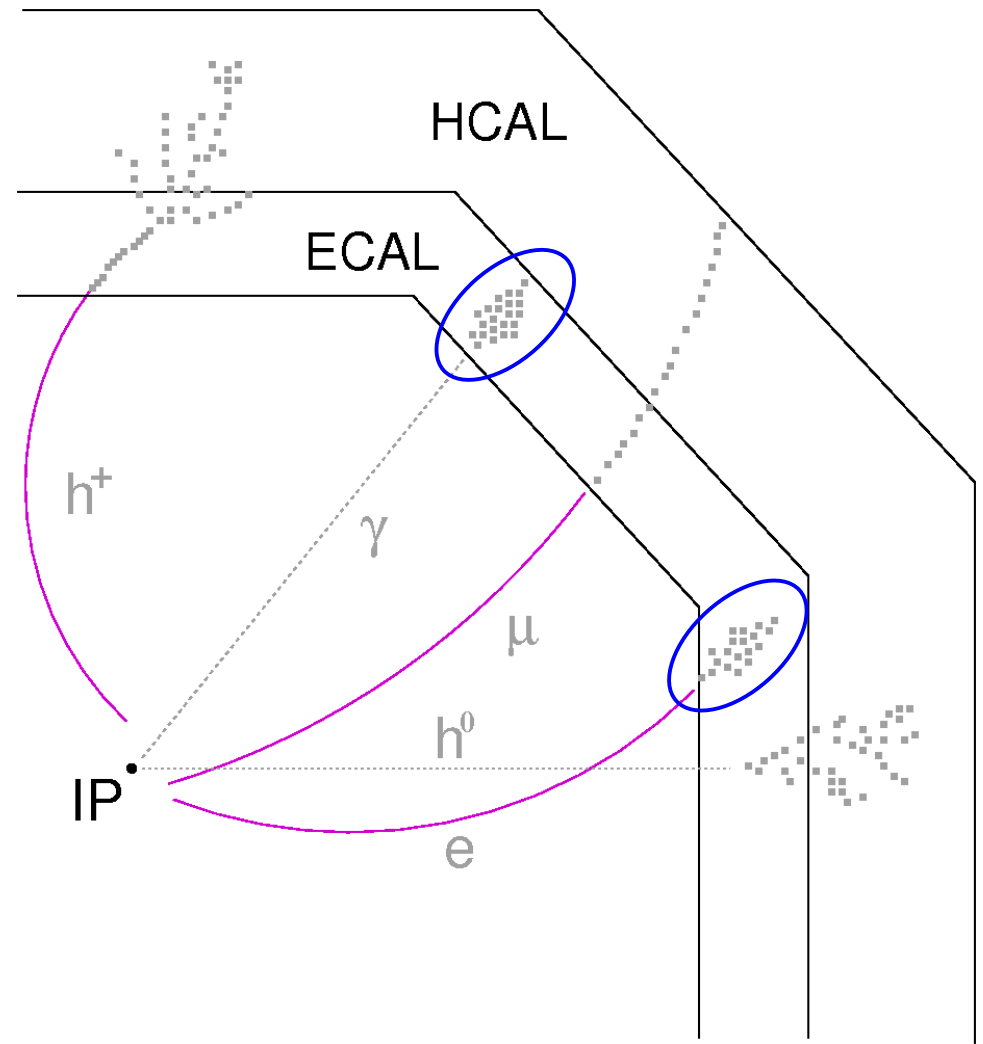
Track-Based Particle Flow Concept

1. tracking (Silicon and TPC)



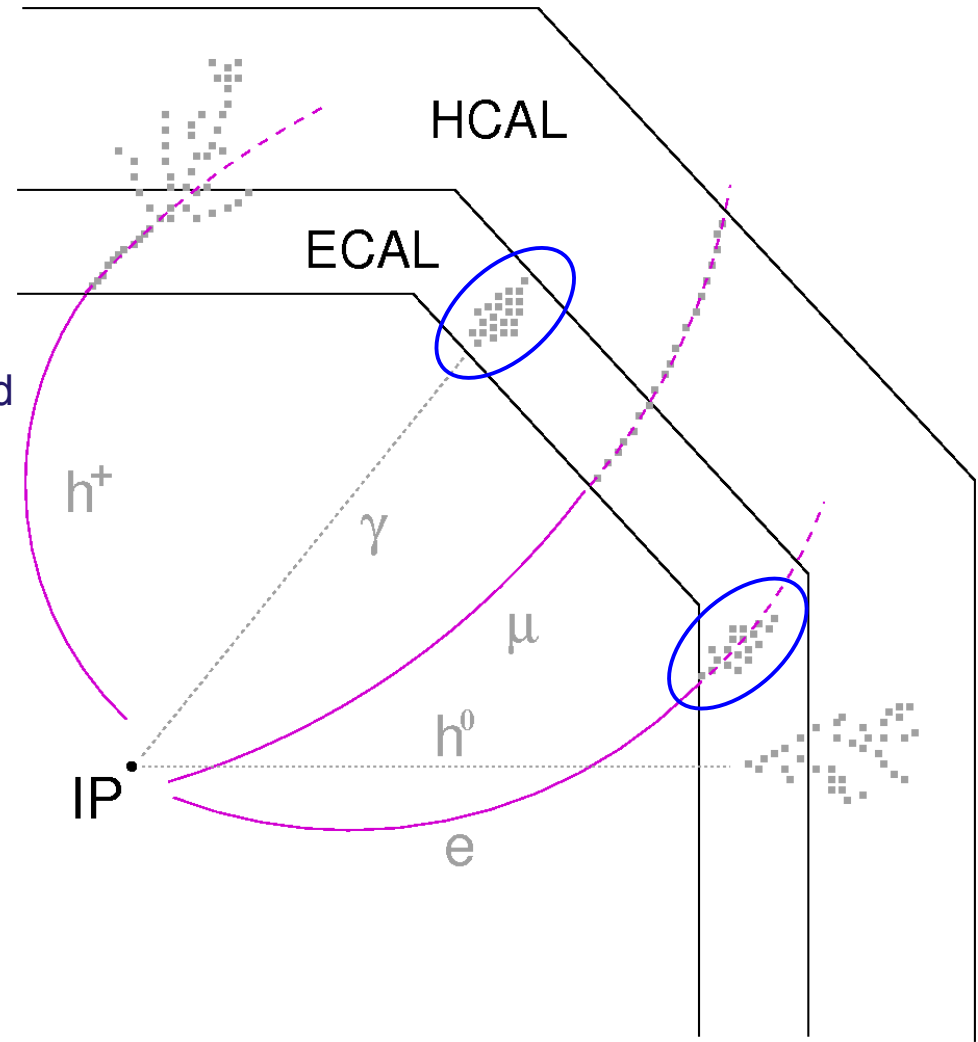
Track-Based Particle Flow Concept

1. tracking (Silicon and TPC)
2. find photon candidates



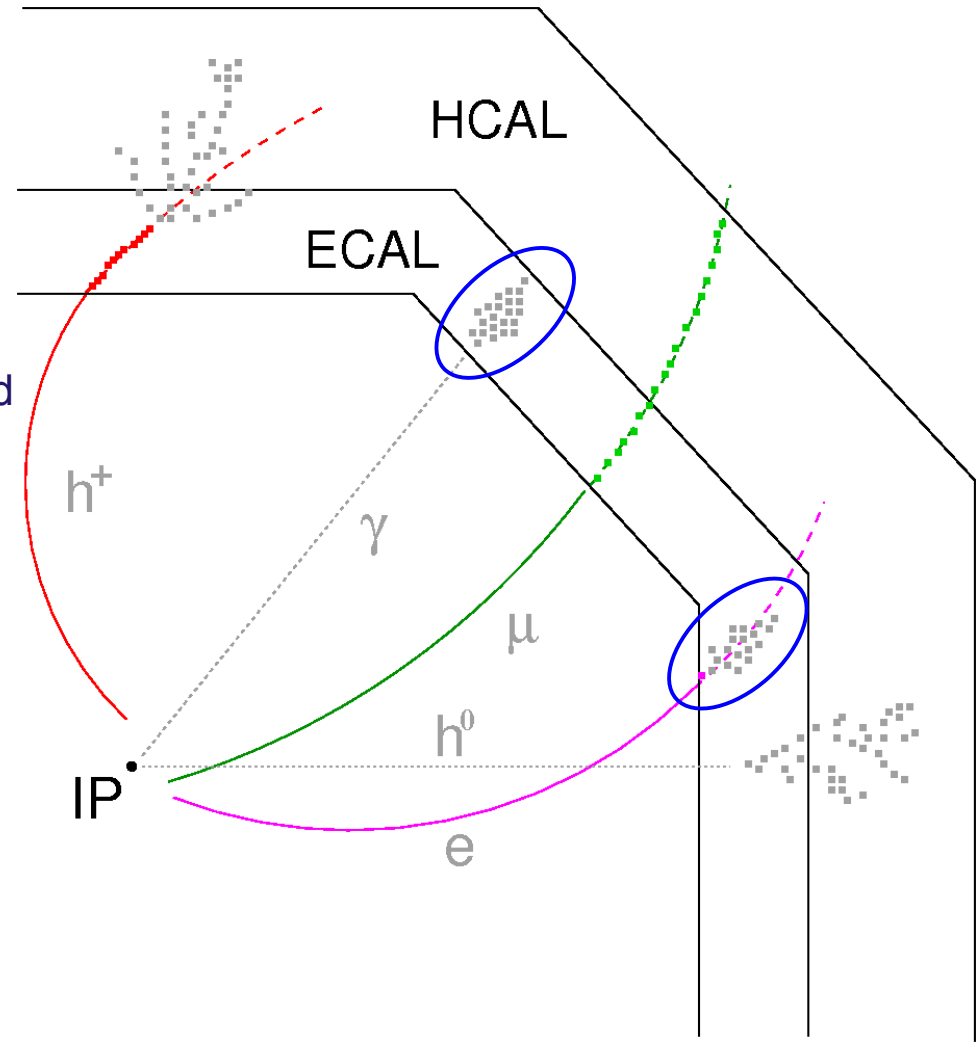
Track-Based Particle Flow Concept

1. tracking (Silicon and TPC)
2. find photon candidates
3. extrapolate tracks into Calorimeter
 - different models, with and w/o energy loss, multiple scattering, ...
 - dedicated Geometry description needed



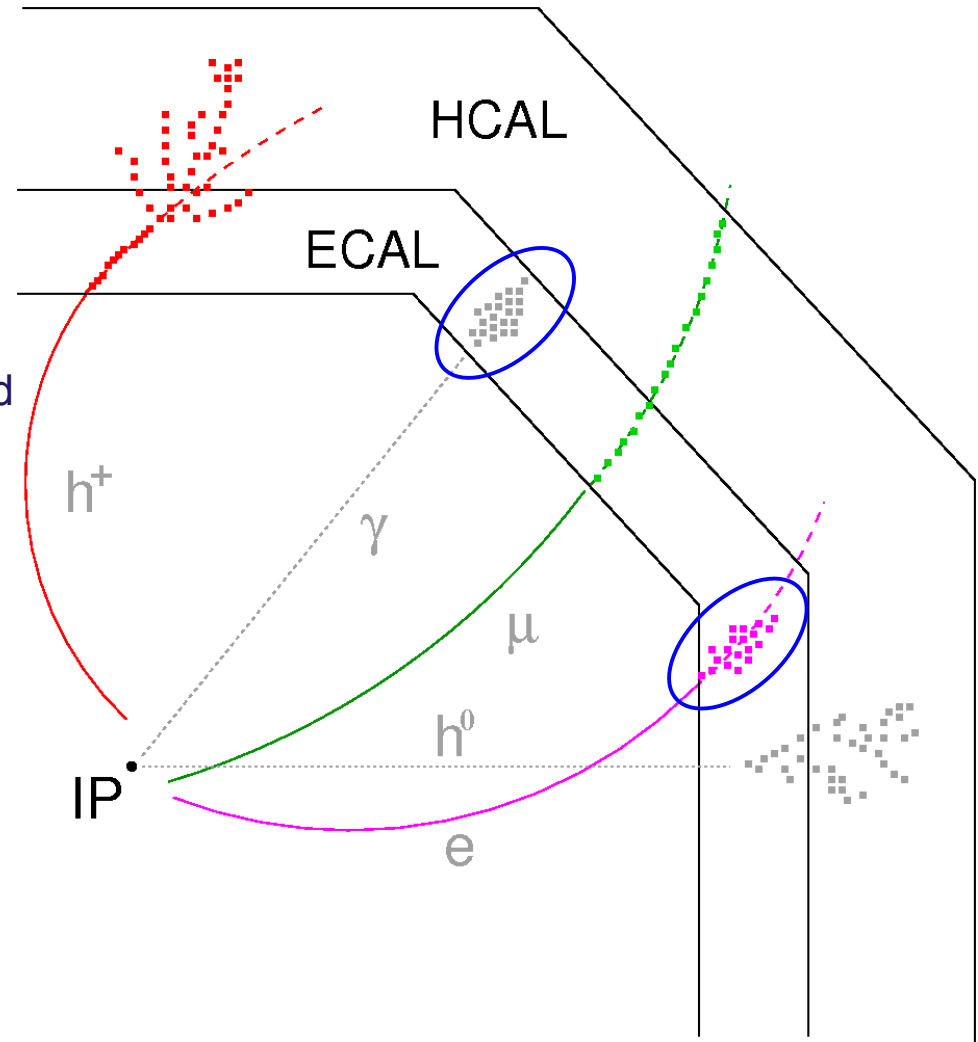
Track-Based Particle Flow Concept

1. tracking (Silicon and TPC)
2. find photon candidates
3. extrapolate tracks into Calorimeter
 - different models, with and w/o energy loss, multiple scattering, ...
 - dedicated Geometry description needed
4. assign MIP stub to track, find muons



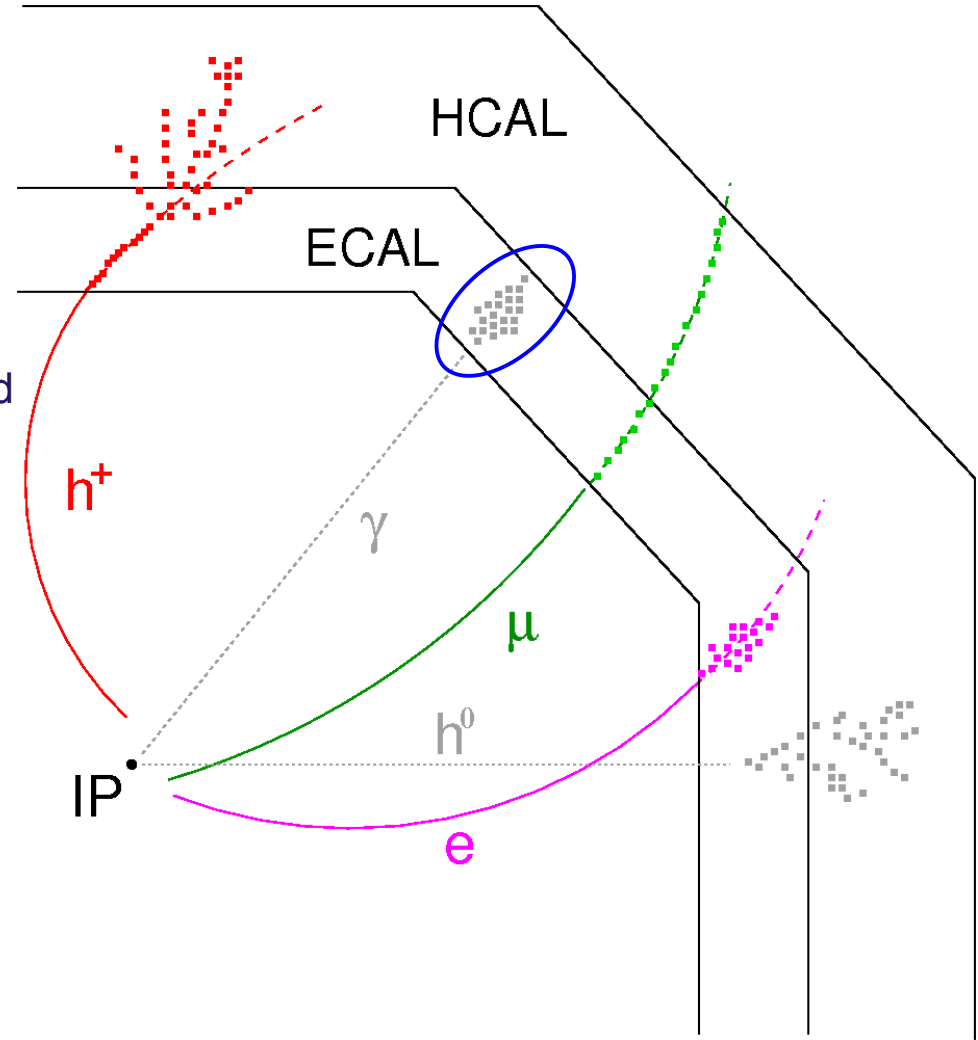
Track-Based Particle Flow Concept

1. tracking (Silicon and TPC)
2. find photon candidates
3. extrapolate tracks into Calorimeter
 - different models, with and w/o energy loss, multiple scattering, ...
 - dedicated Geometry description needed
4. assign MIP stub to track, find muons
5. clustering (ECAL and HCAL)
 - variable, depending on track and photon candidates
 - different algorithms



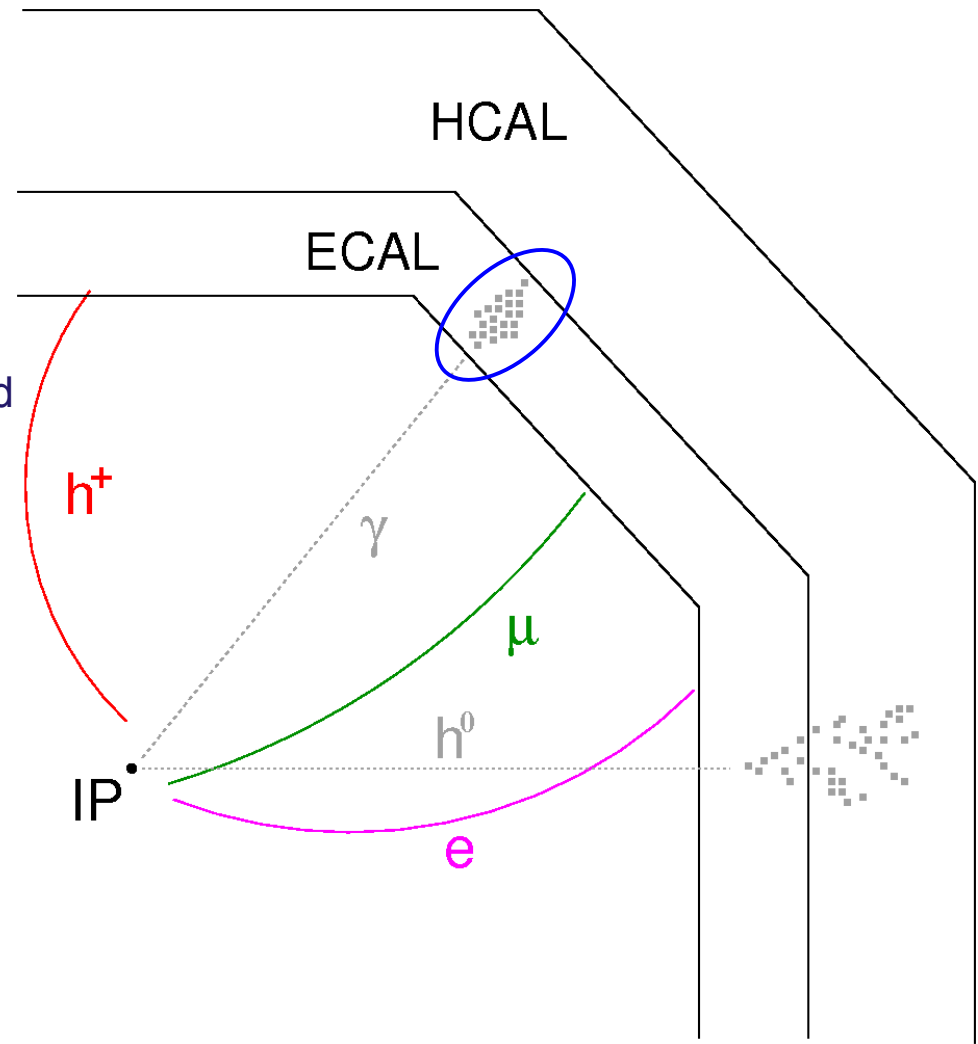
Track-Based Particle Flow Concept

1. tracking (Silicon and TPC)
2. find photon candidates
3. extrapolate tracks into Calorimeter
 - different models, with and w/o energy loss, multiple scattering, ...
 - dedicated Geometry description needed
4. assign MIP stub to track, find muons
5. clustering (ECAL and HCAL)
 - variable, depending on track and photon candidates
 - different algorithms
6. particle ID for $e^{+/-}$, $h^{+/-}$



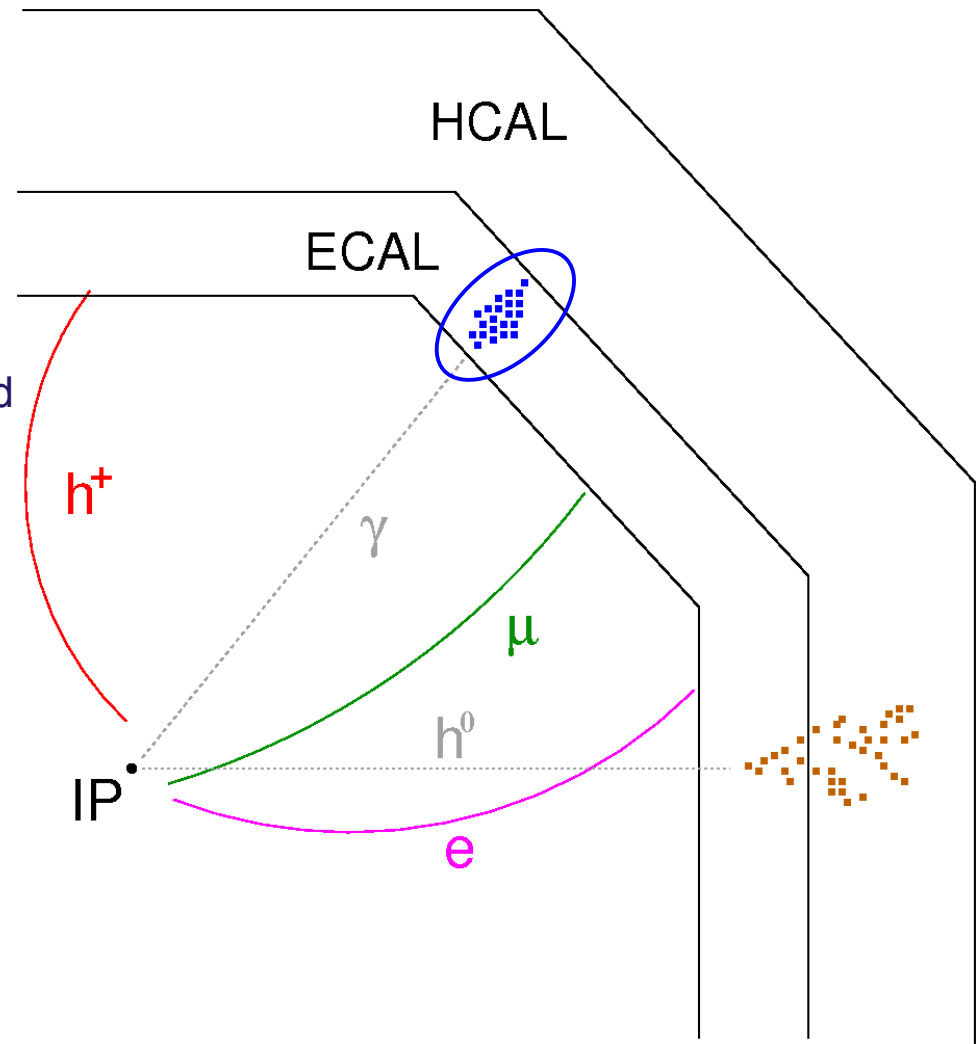
Track-Based Particle Flow Concept

1. tracking (Silicon and TPC)
2. find photon candidates
3. extrapolate tracks into Calorimeter
 - different models, with and w/o energy loss, multiple scattering, ...
 - dedicated Geometry description needed
4. assign MIP stub to track, find muons
5. clustering (ECAL and HCAL)
 - variable, depending on track and photon candidates
 - different algorithms
6. particle ID for $e^{+/-}$, $h^{+/-}$
7. remove 'charged' Calorimeter hits



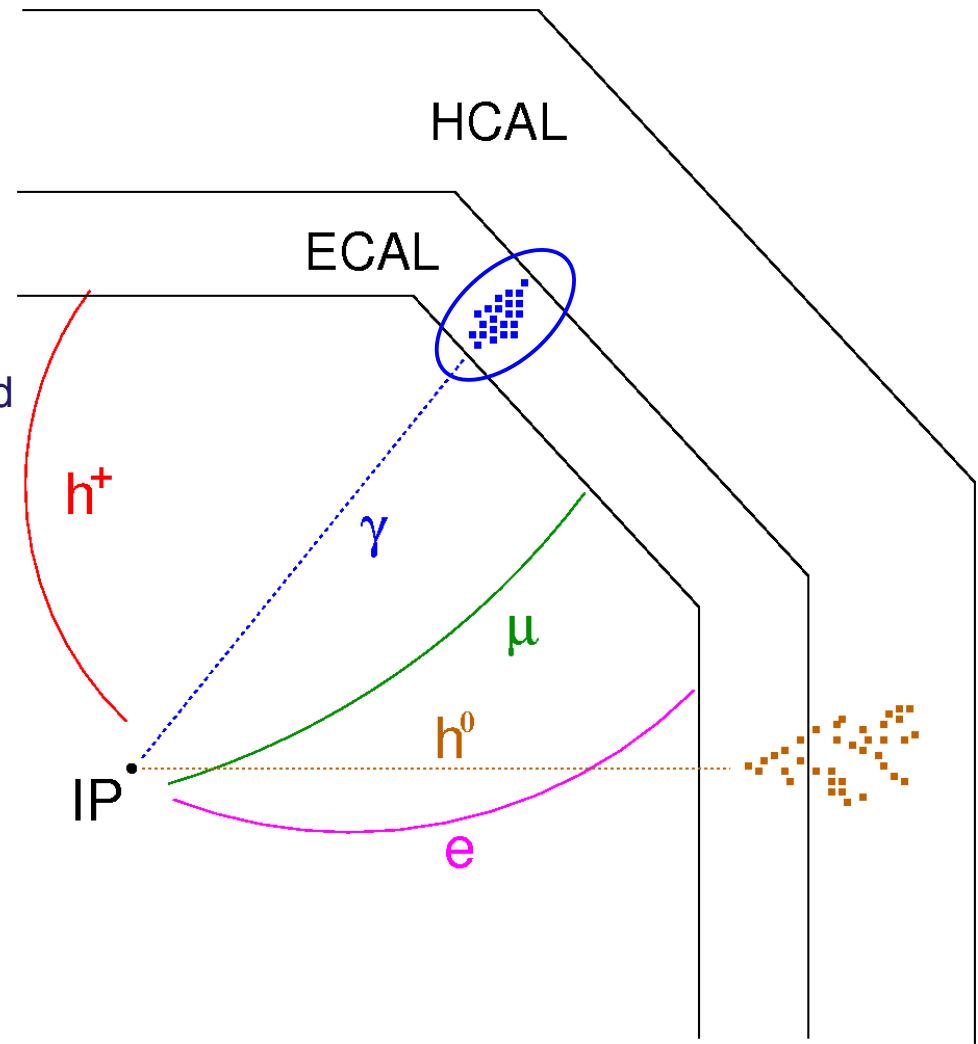
Track-Based Particle Flow Concept

1. tracking (Silicon and TPC)
2. find photon candidates
3. extrapolate tracks into Calorimeter
 - different models, with and w/o energy loss, multiple scattering, ...
 - dedicated Geometry description needed
4. assign MIP stub to track, find muons
5. clustering (ECAL and HCAL)
 - variable, depending on track and photon candidates
 - different algorithms
6. particle ID for $e^{+/-}$, $h^{+/-}$
7. remove 'charged' Calorimeter hits
8. clustering on 'neutral' hits



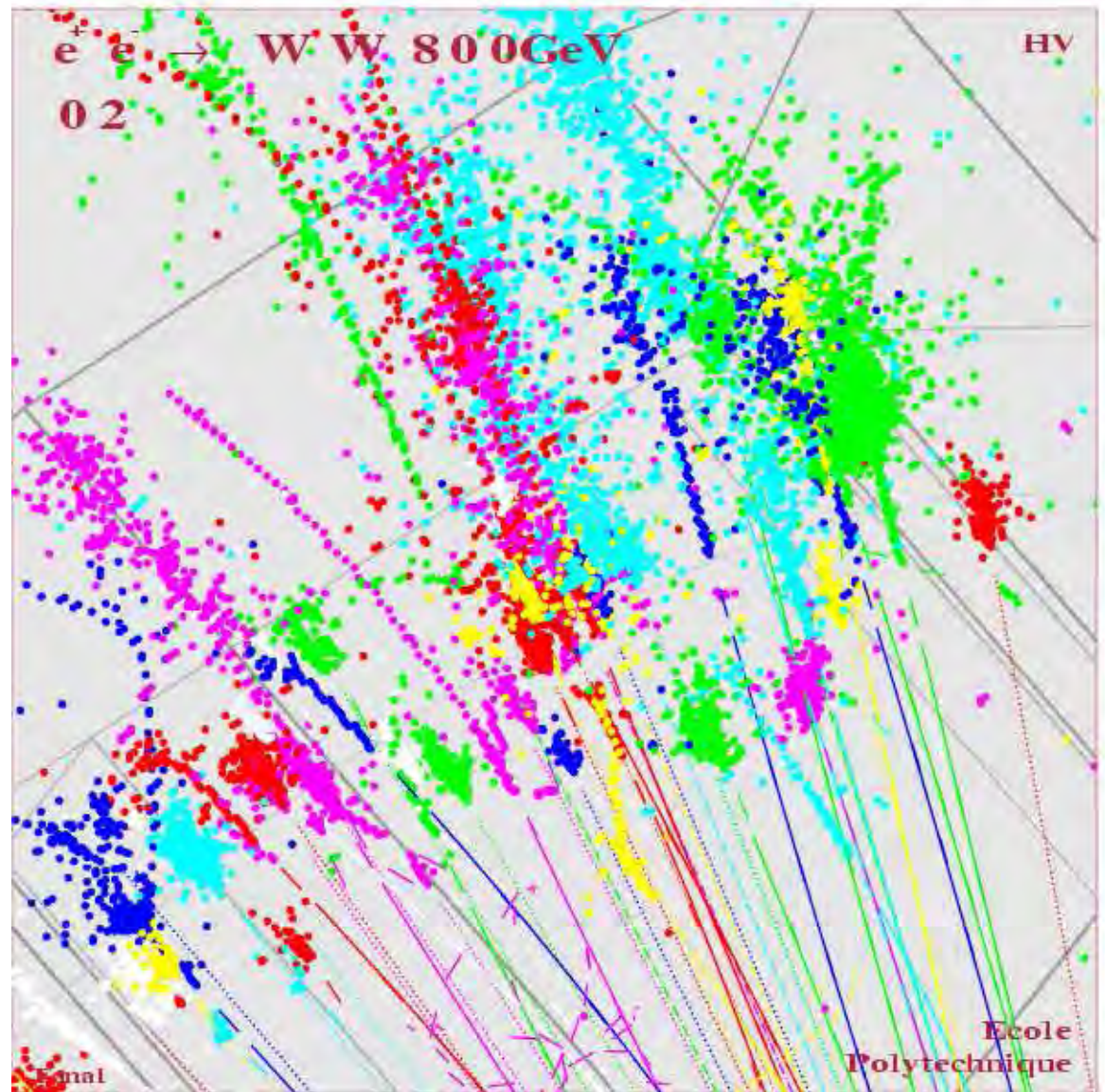
Track-Based Particle Flow Concept

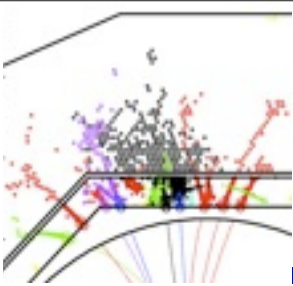
1. tracking (Silicon and TPC)
2. find photon candidates
3. extrapolate tracks into Calorimeter
 - different models, with and w/o energy loss, multiple scattering, ...
 - dedicated Geometry description needed
4. assign MIP stub to track, find muons
5. clustering (ECAL and HCAL)
 - variable, depending on track and photon candidates
 - different algorithms
6. particle ID for $e^{+/-}$, $h^{+/-}$
7. remove 'charged' Calorimeter hits
8. clustering on 'neutral' hits
9. particle ID for photons and h^0



Main problem: Confusion

- At high energy jets are very narrow
- ⇒ Tracks are very close at the calorimeter
- Need very fine granularity of calorimeter and sophisticated software to separate showers
- Energy resolution still dominated by confusion term

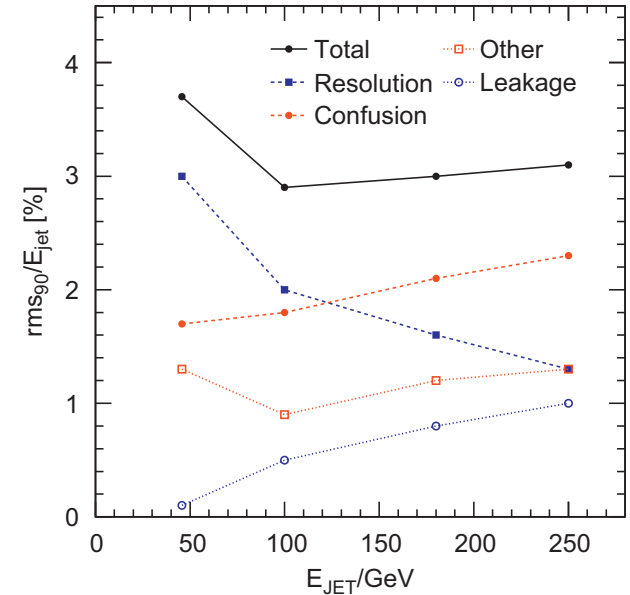
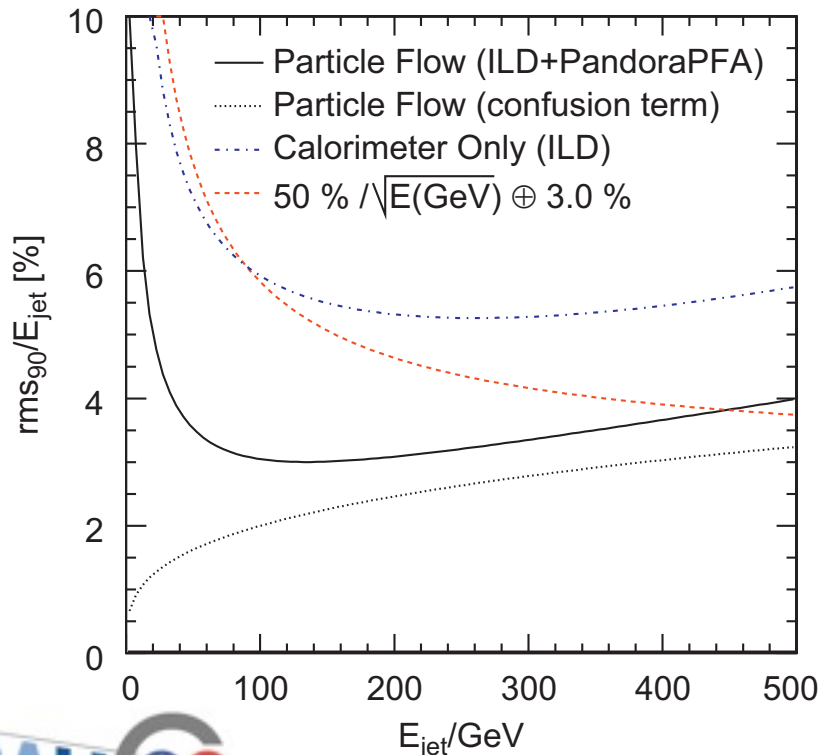




Understand particle flow performance

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{21}{\sqrt{E}} \oplus 0.7 \oplus 0.004E \oplus 2.1 \left(\frac{E}{100} \right)^{+0.3} \%$$

Resolution Tracking Leakage Confusion



- Particle flow is always better
 - even at high jet energies
- HCAL resolution does matter
 - also for confusion term
- Leakage plays a role, too

Kalorymetry

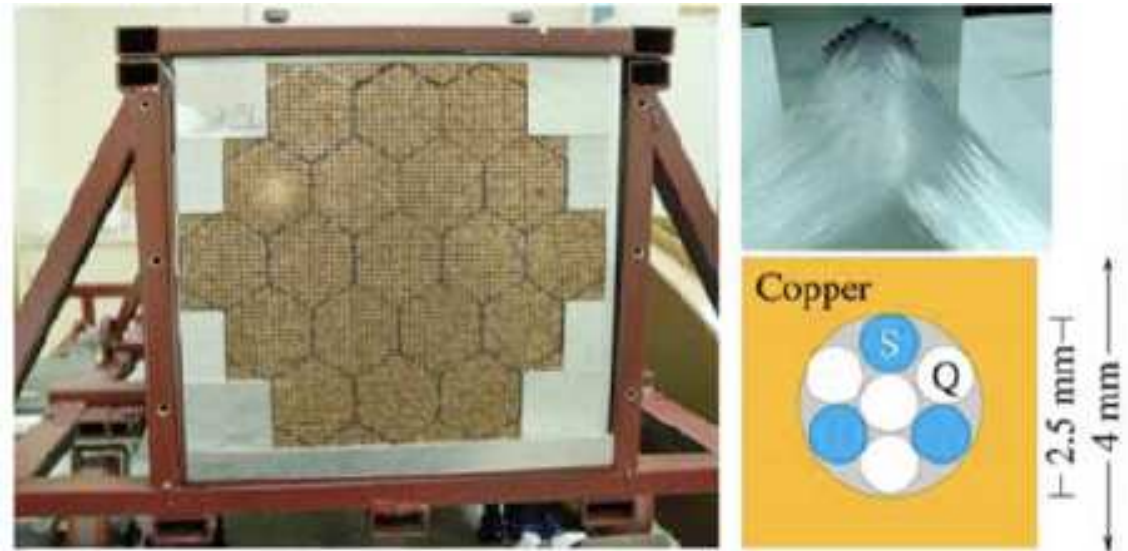
Nowe koncepcje

Projekt DREAM

Kalorymetr o podwójnym odczycie:

- “klasyczne” scyntylatory
pomiar wszystkich składowych kaskady
- czyste włókna, w których cząstki emitują promieniowanie Czerenkowa
pomiar głównie składowej EM

Prototyp



19 wież

36 000 włókien o średnicy 0.8 mm

Kalorymetry

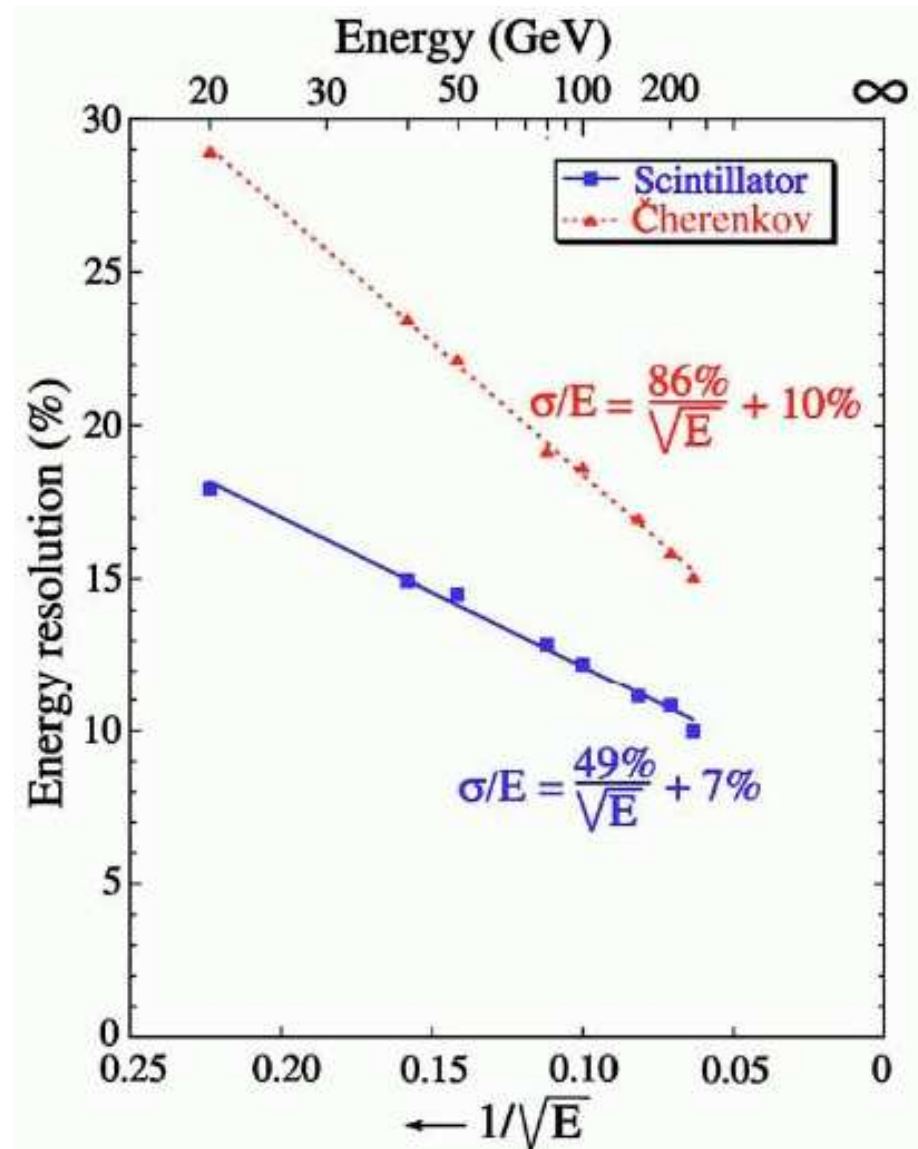
Nowe koncepcje

Wyniki testowe DREAM

Rozdzielczość w funkcji energii padającego pionu.

Każdy z odczytów działa poprawnie i pozwala na niezależny pomiar.

Uzyskiwane rozdzielczości nie są jednak zadawalające.



Kalorymetry

Nowe koncepcje

Dwa niezależne pomiary energii cząstki pierwotnej:

$$E_{Sci} = (f_{em} + (1 - f_{em})/\eta_{Sci}) \cdot E$$

$$E_{Cz} = (f_{em} + (1 - f_{em})/\eta_{Cz}) \cdot E$$

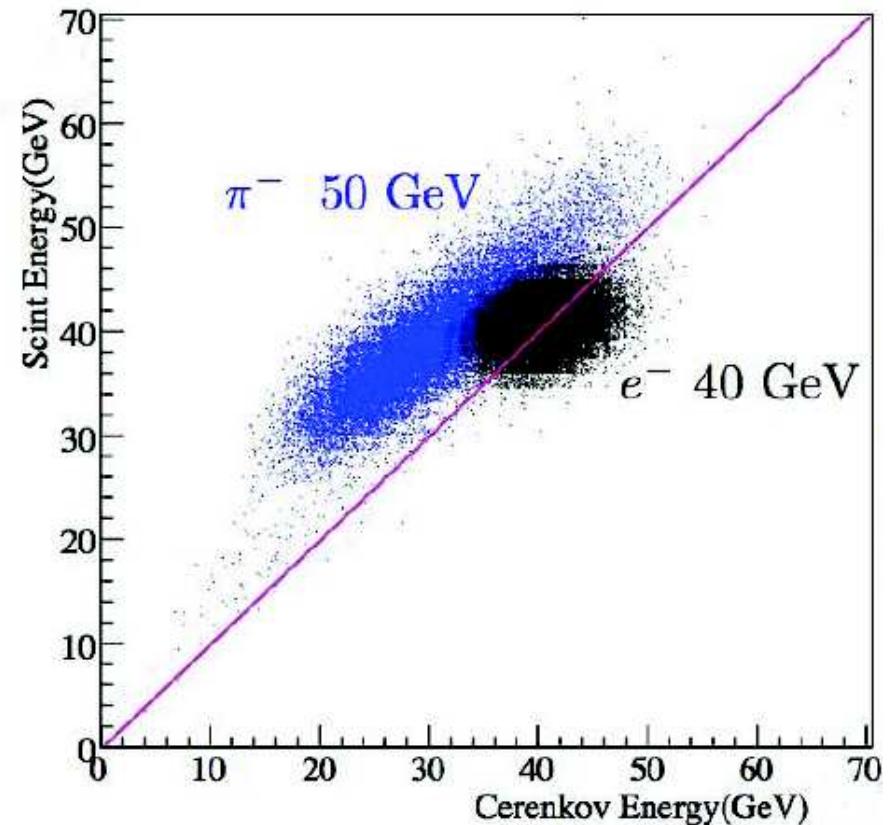
Znając współczynniki tłumienia składowej hadronowej w obu odczytach

$$\eta_{Sci} \approx 1.4$$

$$\eta_{Cz} \approx 5.0$$

możemy z dwóch pomiarów wyznaczyć f_{em} i E

⇒ znacznie lepsza zdolność rozdzielcza

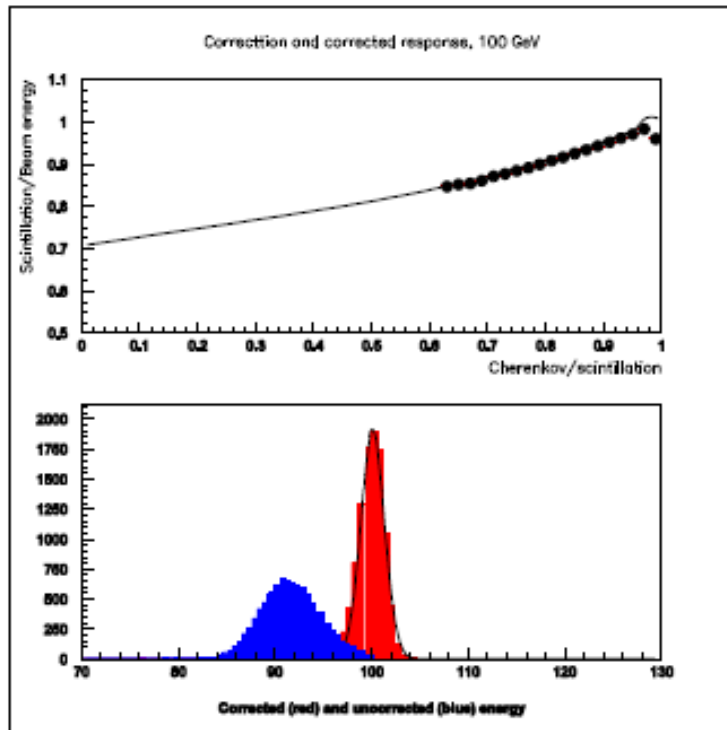


Kalorymetry

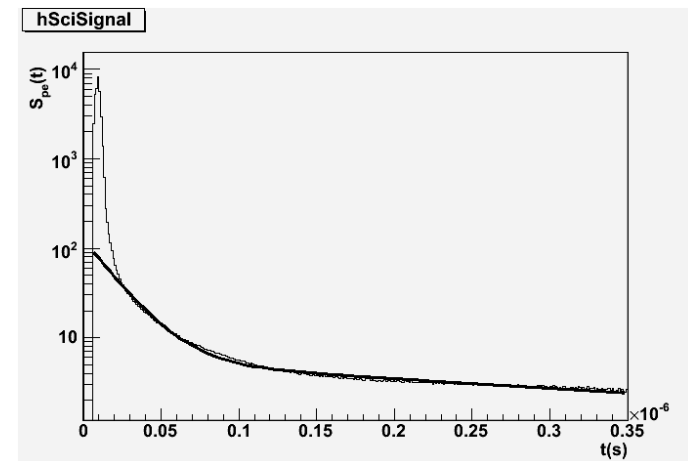
Nowe koncepcje

Podwójny odczyt pozwala na uzyskanie

$$\frac{\sigma_E}{E} \approx \frac{35\%}{\sqrt{E}} \oplus 1.5\%$$



Jeśli wykorzystamy scyntylator organiczny o długim czasie wyświelania \Rightarrow możemy zrekonstruować opóźnioną składową od neutronów



\Rightarrow dodatkowa informacja o stratach w procesach jądrowych

\Rightarrow dalsze polepszenie pomiaru energii

Kalorymetry

Nowe koncepcje

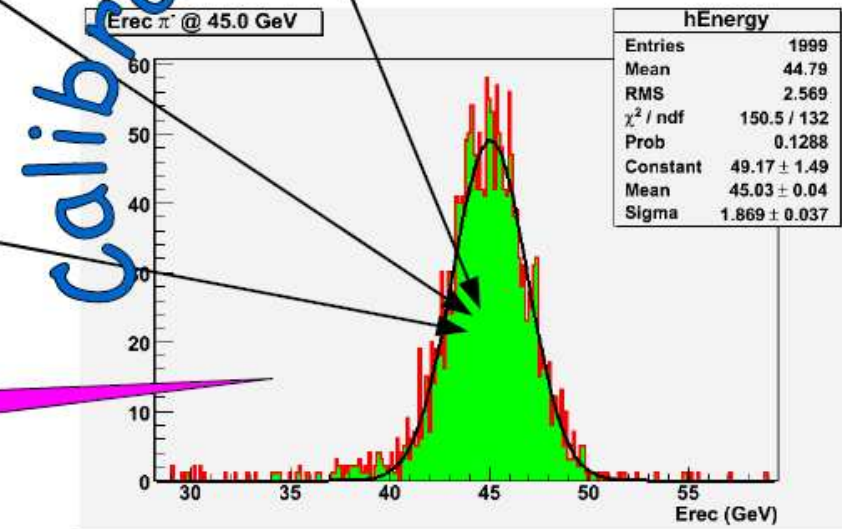
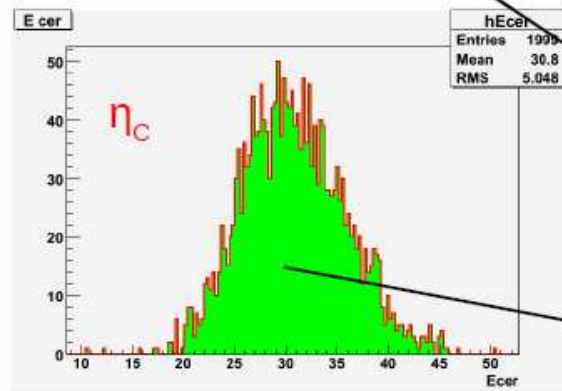
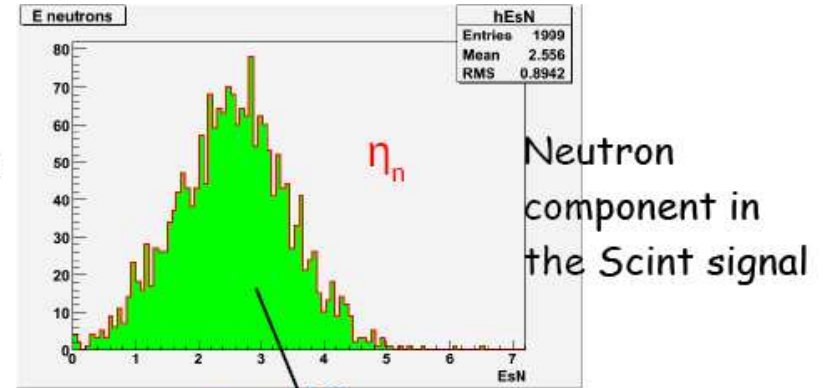
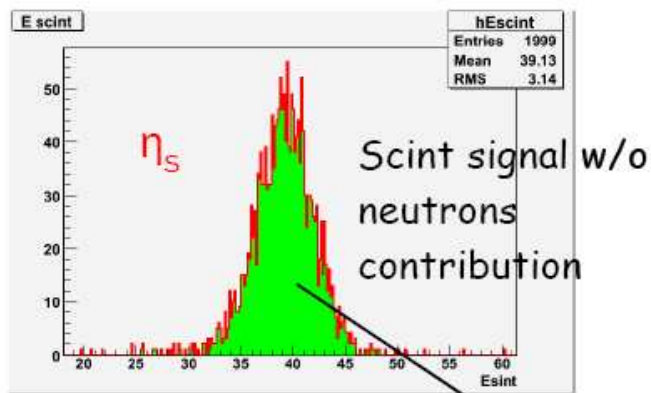
Potrójny odczyt:

- scyntylacja
- p. Czerenkowa
- neutrony

pozwała uzyskać

$$\frac{\sigma_E}{E} \approx \frac{26\%}{\sqrt{E}} \oplus 1.5\%$$

Symulacja dla detektora przy ILC



Kalorymetry

Wyływy energii

Grubość warstwy absorbera potrzebna do “zatrzymania” kaskady hadronowej rośnie logarytmicznie z energią.

Haskady hadronowe podlegają bardzo dużym fluktuacjom.

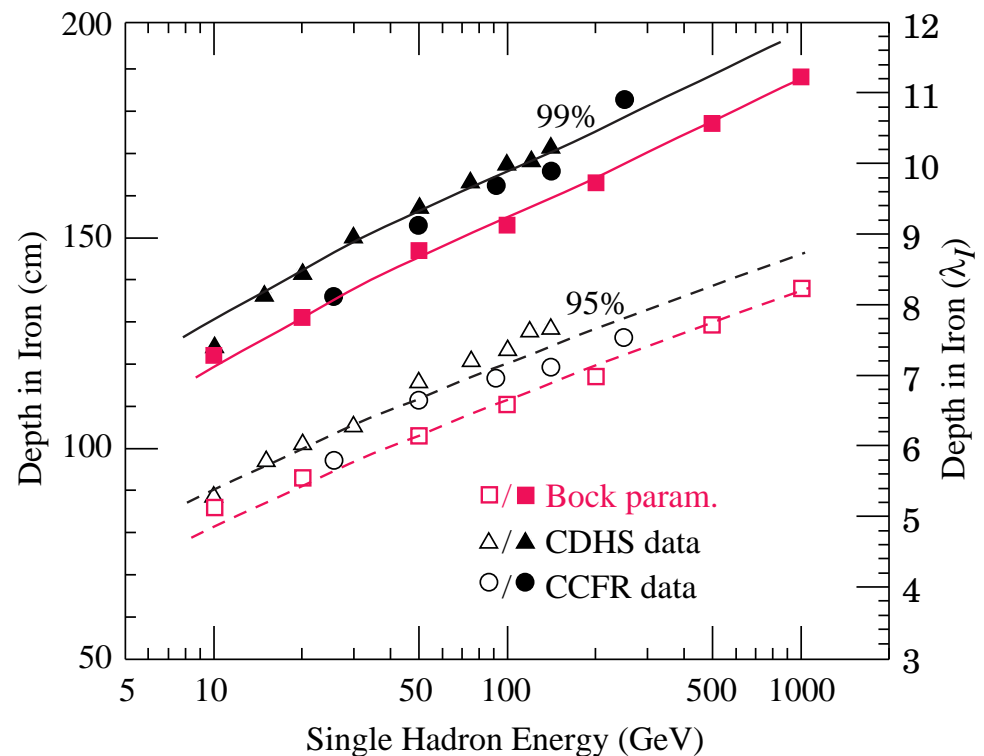
Stosunkowo łatwo zatrzymać 95% kaskad.

Żeby zawsze zatrzymać 99% kaska głębokość kalorymetru musi wzrosnąć o prawie $3 \lambda_{int}$

Wszystkich kaskad (100%) praktycznie nie możemy zatrzymać

⇒ ma to istotny wpływ na dokładność pomiaru energii

Kluczowe w przypadku poszukiwania “nowej fizyki” (brakująca energia)



Kalorymetry

Wyływy energii

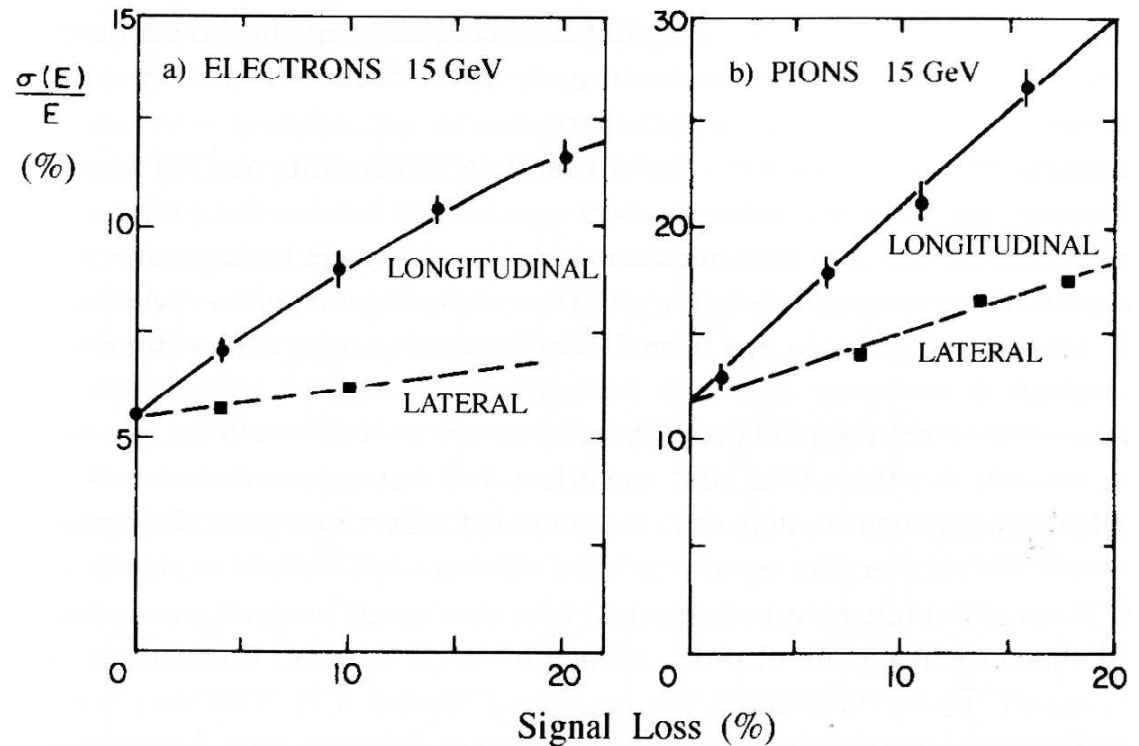
Wpływ wyływów energii na dokładność pomiaru (w przypadku braku poprawek)

Parametryzacja:

$$\frac{\sigma}{E} \approx \left. \frac{\sigma}{E} \right|_{f=0} (1 + 2f\sqrt{E})$$

f - ułamek traconej energii

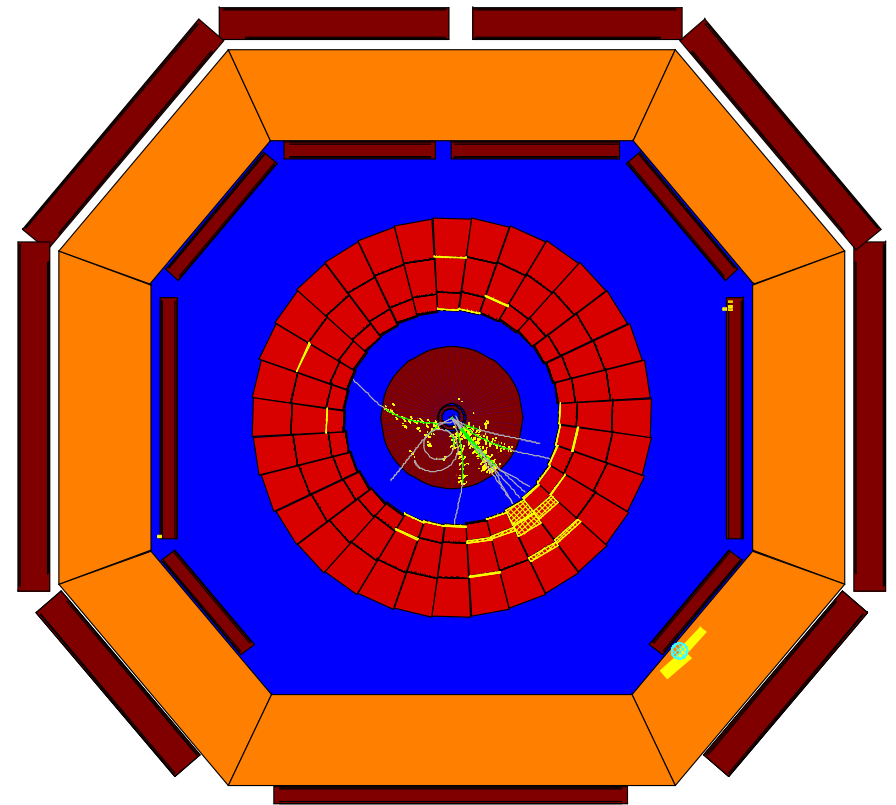
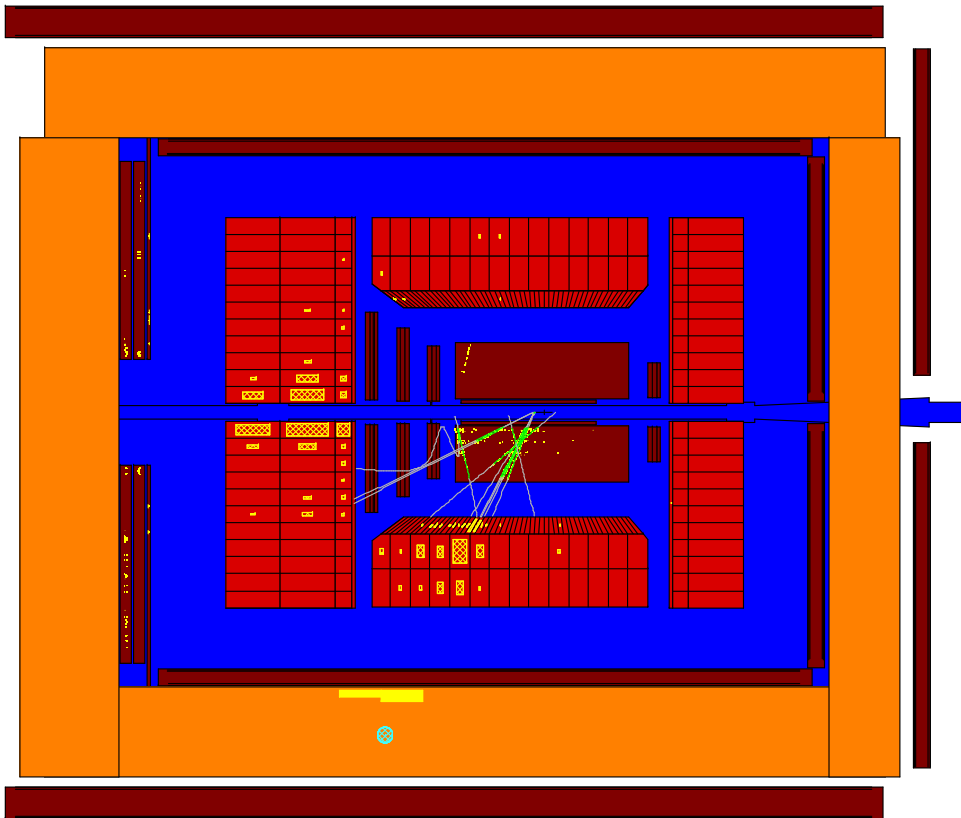
Aby zapewnić dokładny pomiar energii trzeba przynajmniej rozpoznawać takie przypadki.



Kalorymetry

Wyptywy energii

Wyptyw energii jetu obserwowany w kalorymetrze uzupełniającym detektora ZEUS



Kalorymetry

Wyływy energii

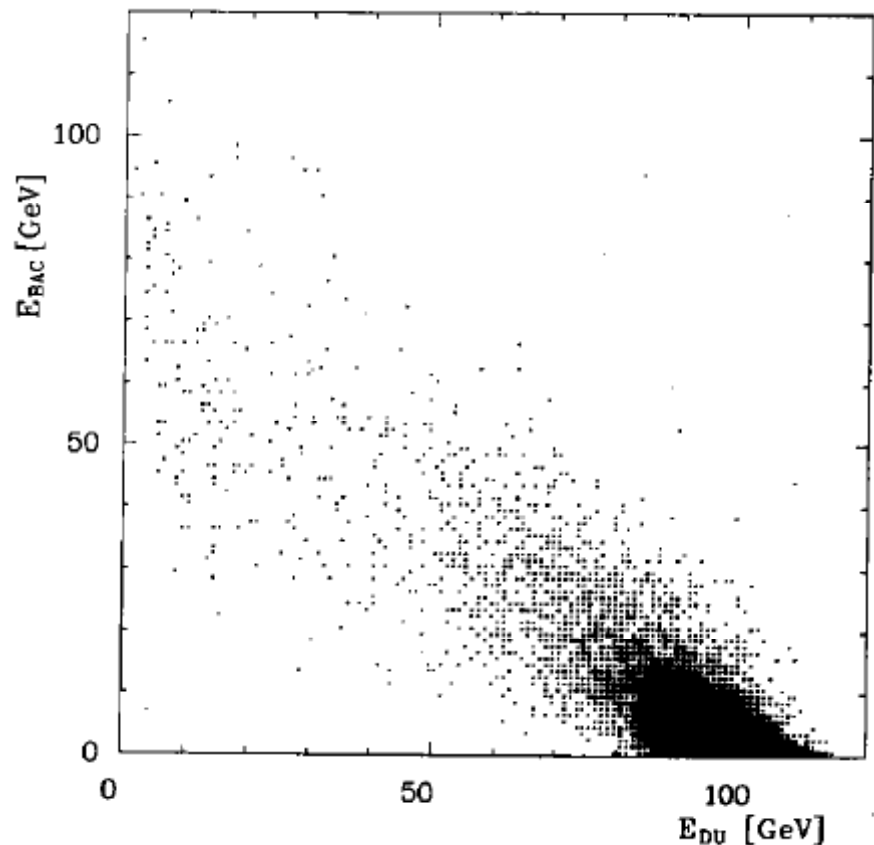
W detektorze ZEUS tzw. kalorymetr uzupełniający (BAC) wykorzystywał płyty stalowe jarzma elektromagnesu, pomiędzy które wstawiono aluminiowe komory proporcjonalne.

Zbudowany przez grupę IFD UW, we współpracy z IPJ i AGH Kraków.

Rozdzielczość BAC:

$$\frac{\sigma_E}{E} \approx \frac{120\%}{\sqrt{E}}$$

Korelacja mierzonych energii - dane testowe

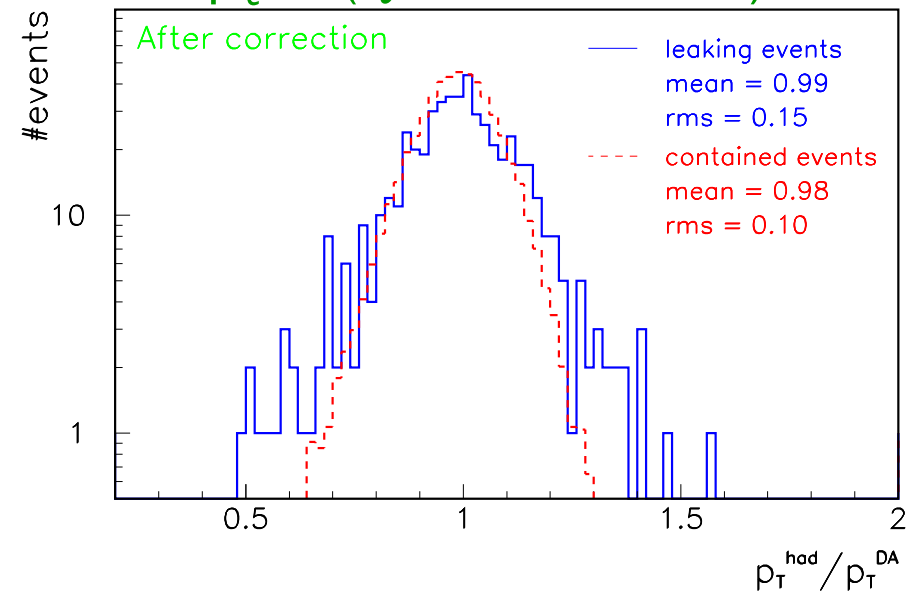
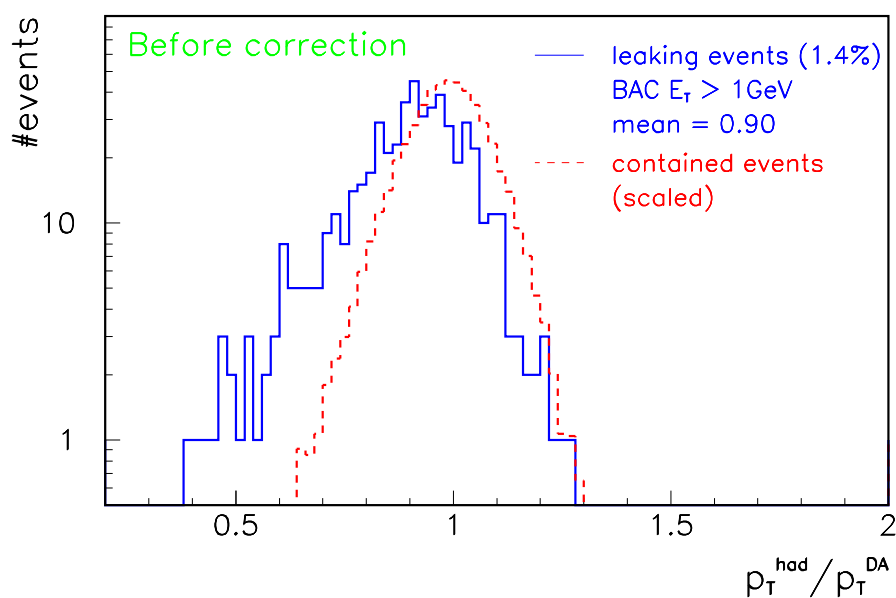


Kalorymetry

Wyływy energii

Wpływ kalorymetru uzupełniającego na pomiar pędu poprzecznego jetu.

Próbka przypadków NC DIS z dużym przekazem czteropędu ($Q^2 > 200 \text{ GeV}^2$)



Mimo dużej gorszej zdolności rozdzielczej może efektywnie “odcinać” wpływające kaskady, lub poprawiać ich energię.

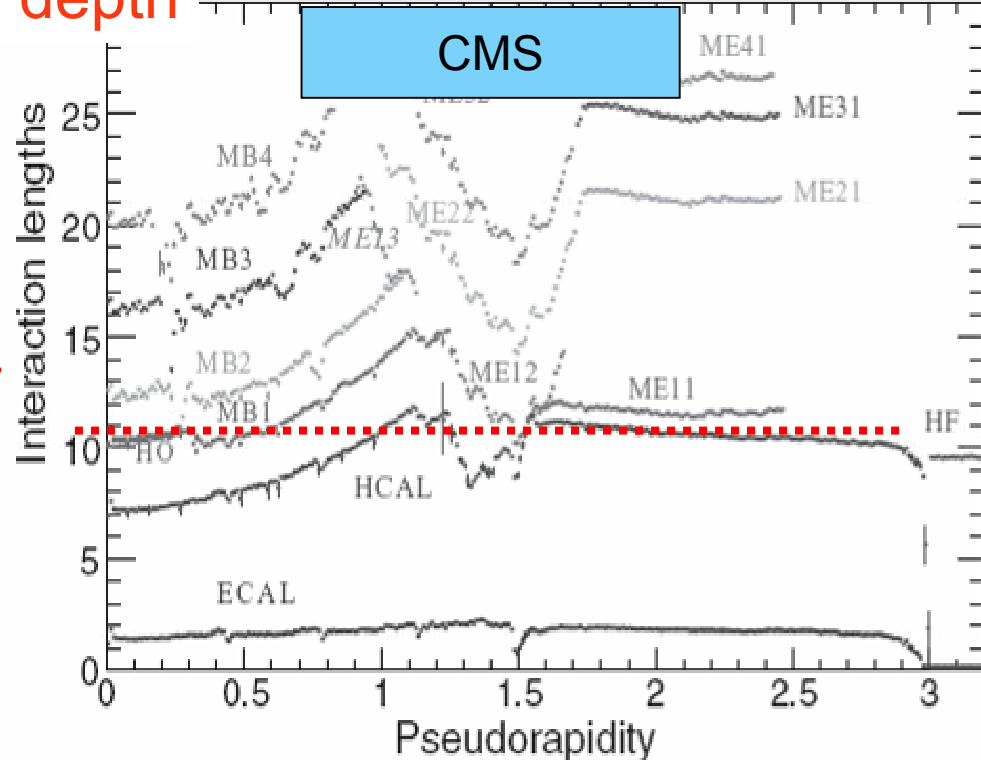
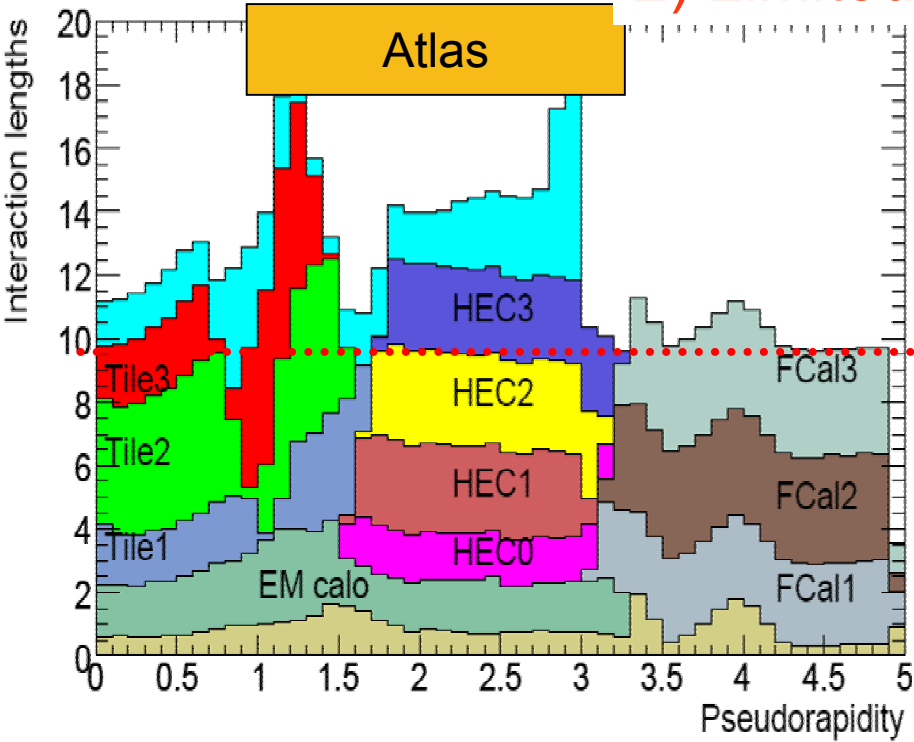
W innych eksperymentach tego typu kalorymetr określany jest najczęściej mianem “tail catcher”



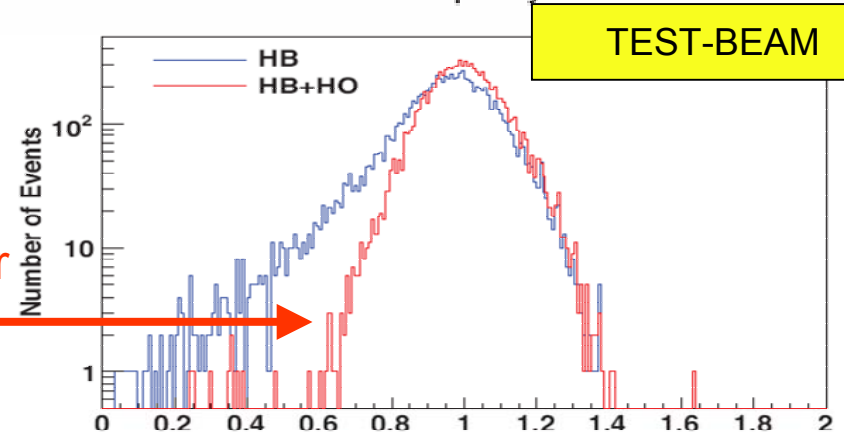
Depth effect on energy resolution



2) Limited depth



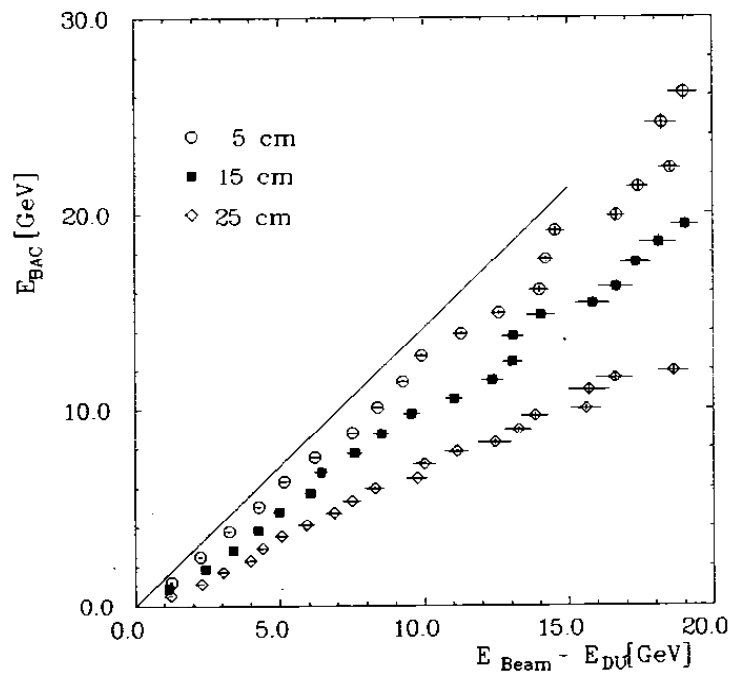
- CMS HB is compact and contained in the solenoid
- 5% of a 300 GeV pion energy escapes HB
- CMS HO improves the energy resolution for pions of 300 GeV and linearity



Kalorymetry

Wyływy energii

Wyraźna korelacja między odpowiedzią BAC i energią brakującą w kalorymetrze centralnym nawet jeśli pomiędzy nimi jest gruba warstwa niekatywna (wyniki testów)



Tail catcher istotnie poprawia pomiar energii nawet jeśli jest umieszczony za solenoidem o grubości $1.5\lambda_{int}$ (wyniki symulacji)

