

Metody eksperymentalne w fizyce wysokich energii

prof. dr hab. A.F.Żarnecki

Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych IFD

Wykład VI

- Kalorymetry (dok.)
- Detektory identyfikacji cząstek

Kalorymetry

Kaskady hadronowe

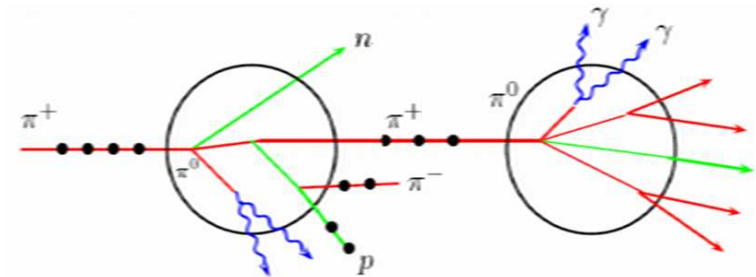
Tak jak w przypadku kaskad elektromagnetycznych, energia cząstki pierwotnej tracona jest w wielu kolejnych (silnych) oddziaływaniach z absorberem.

Zachodzące procesy są jednak dużo bardziej złożone.

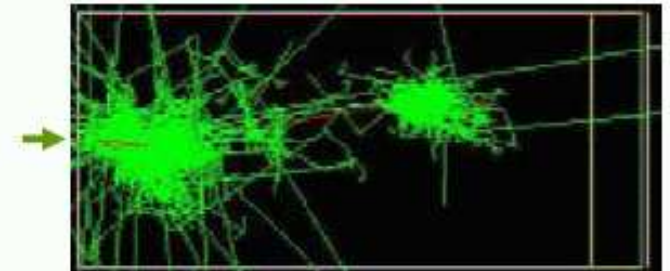
Oprócz produkcji wysokoenergetycznych cząstek wtórnych energia tracona jest na procesy jądrowe: wzbudzenia, rozszczepienia i energie odrzutu jąder.

Produkowane są cząstki o energiach rzędu MeV.

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



20 GeV π in copper (simulation)



J.P. Wellisch

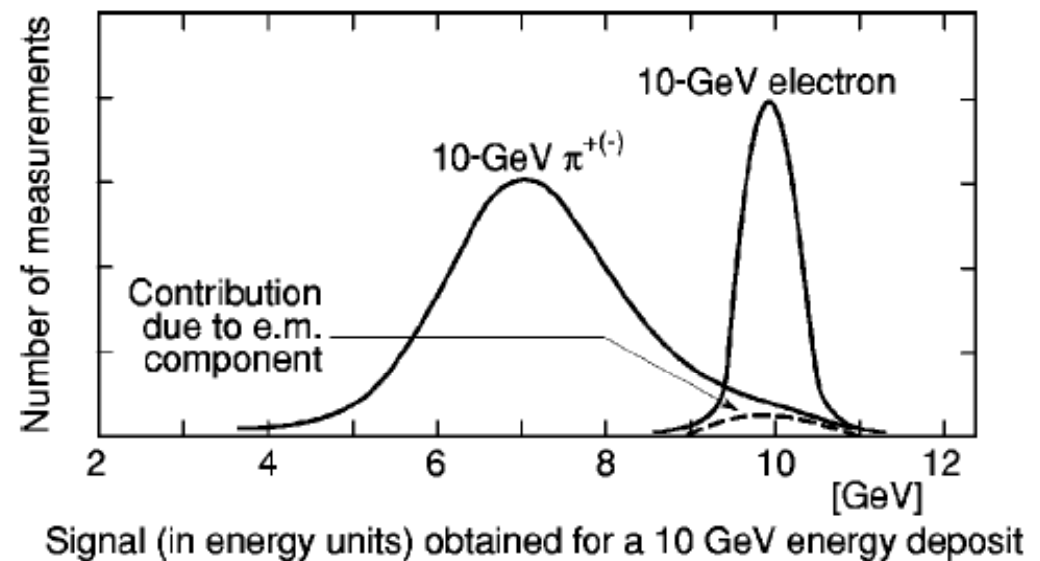
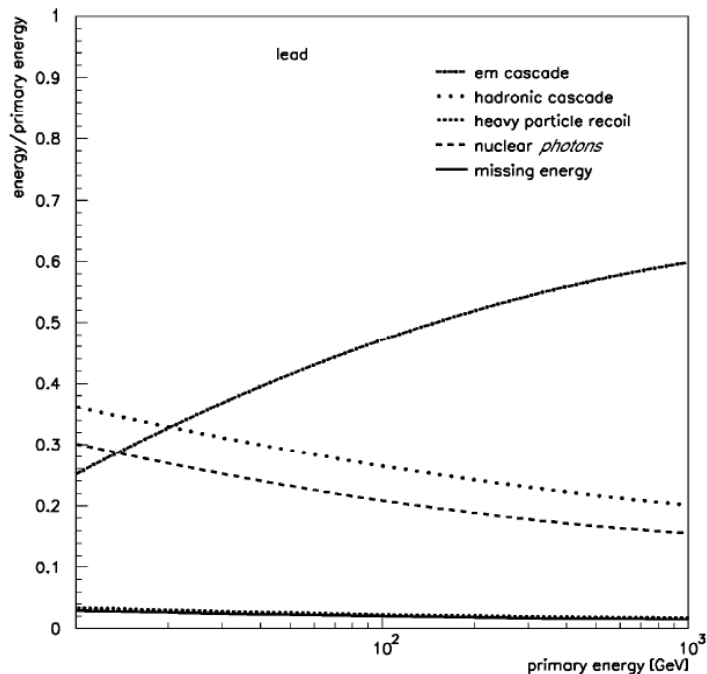
Kalorymetry

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



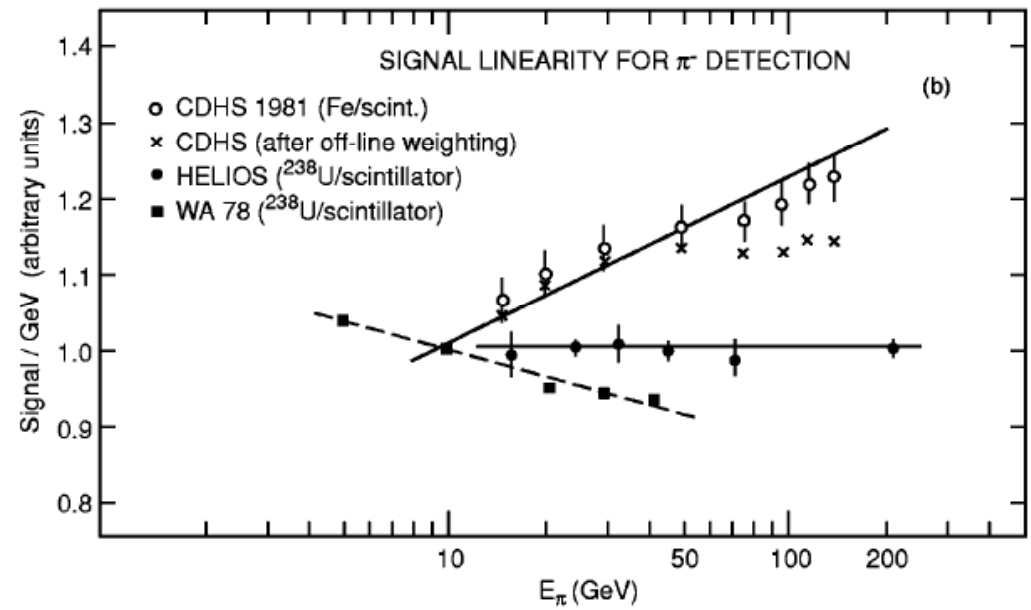
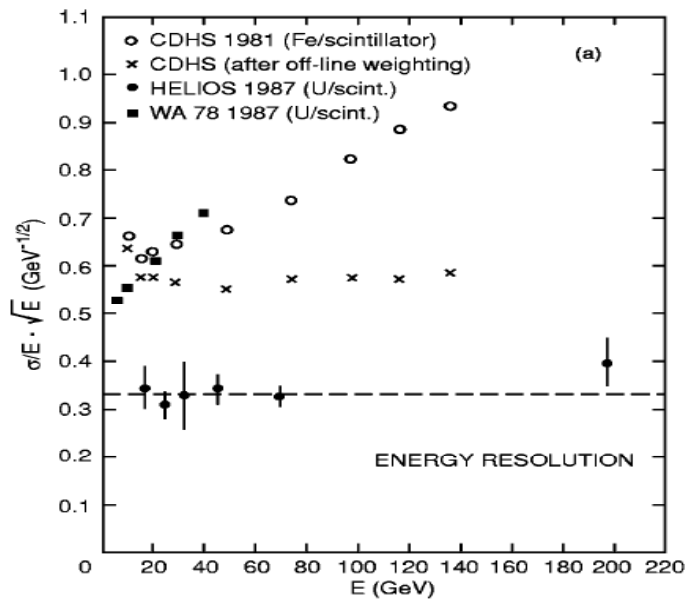
Kalorymetry

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

Kalorymetr detektora ZEUS

Płyty uranowe 3.3 mm
w kopertach ze stali nierdzewnej.

Płyty scyntylatora 2.6 mm

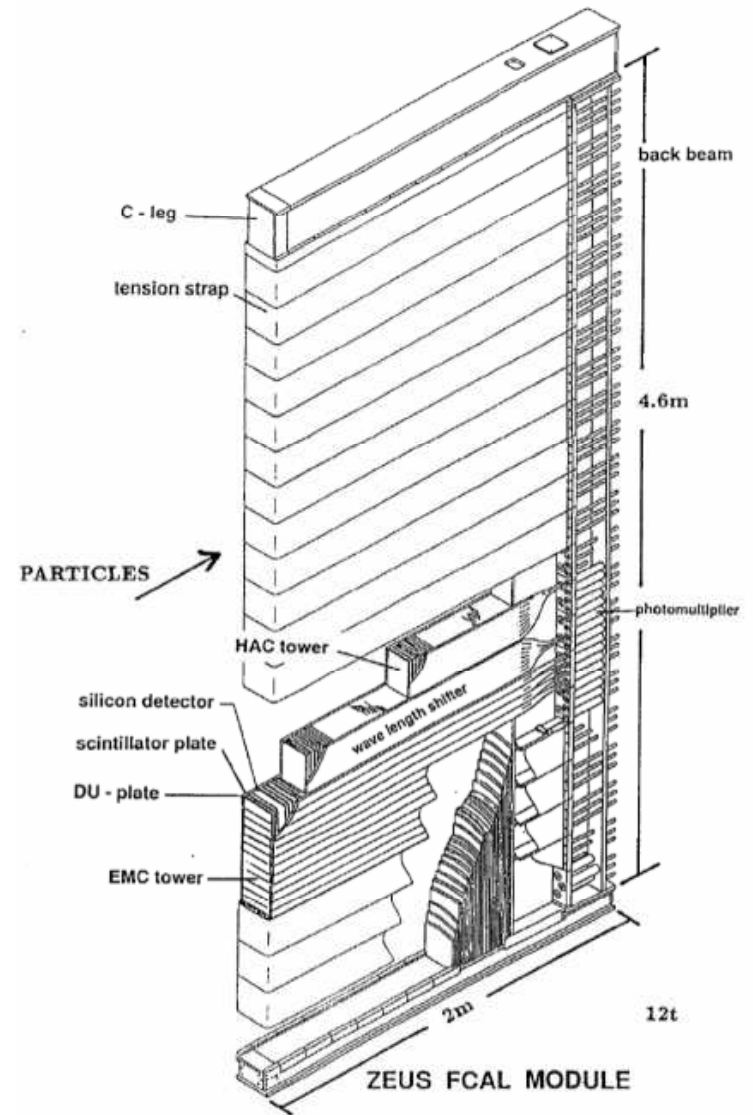
$$\frac{e}{h} = 1.00 \pm 0.02$$

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.

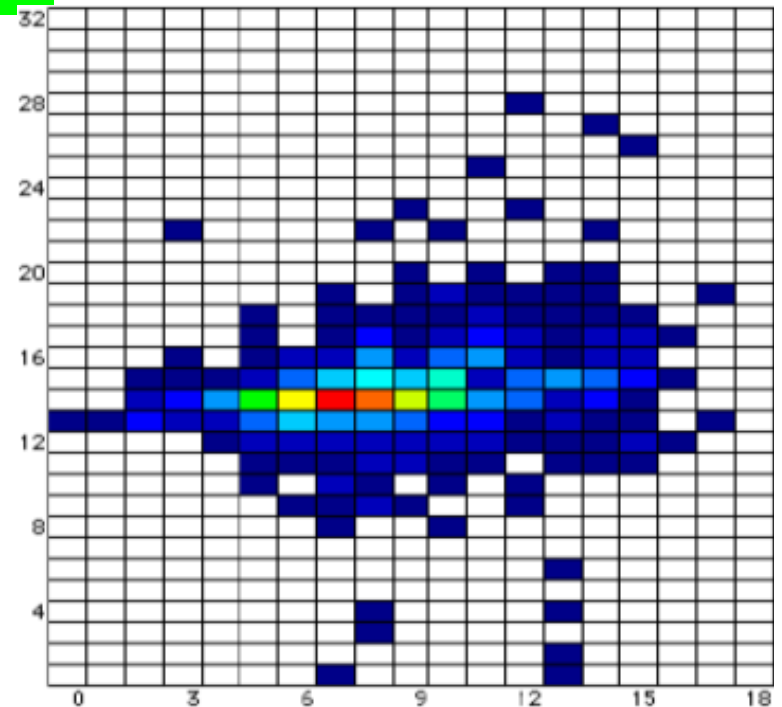
Odpowiedź kalorymetru na pojedynczy hadron:

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

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

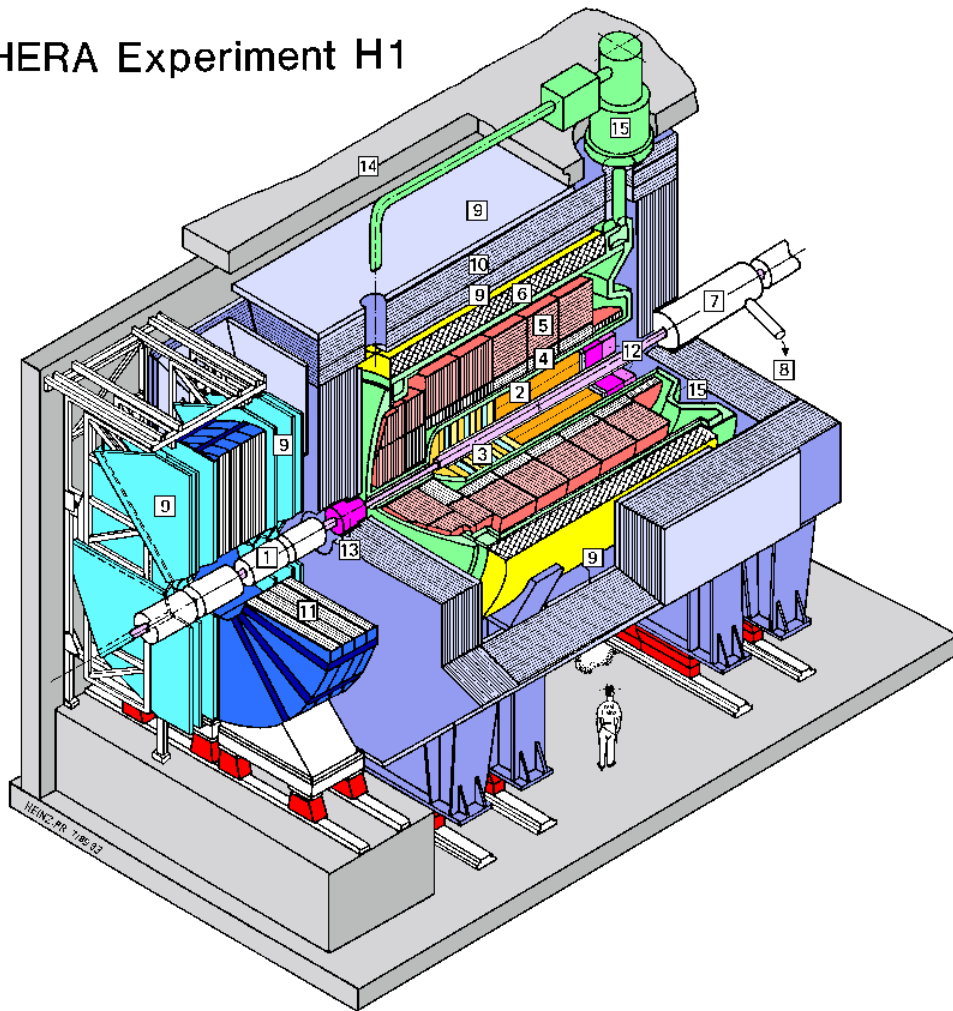
($X_0 \ll \lambda_{int}$)

\Rightarrow można oszacować f_{em}

Kalorymetry

Kalorymetr detektora H1

HERA Experiment H1

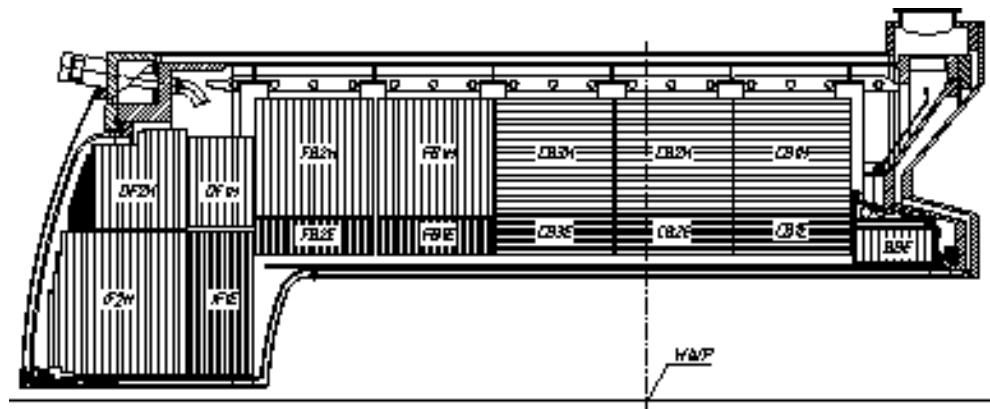


Kalorymetr z **ciekłym argonem**.

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

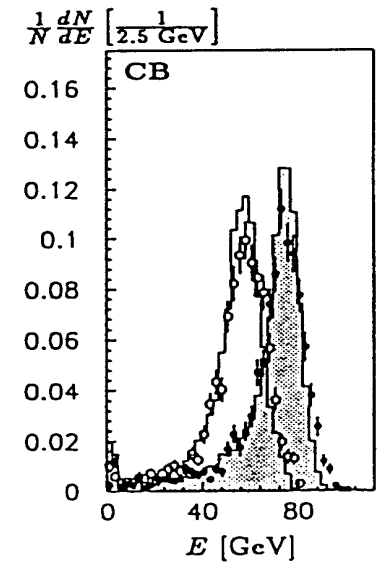
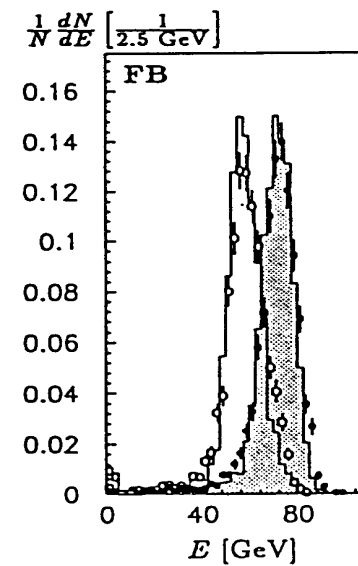
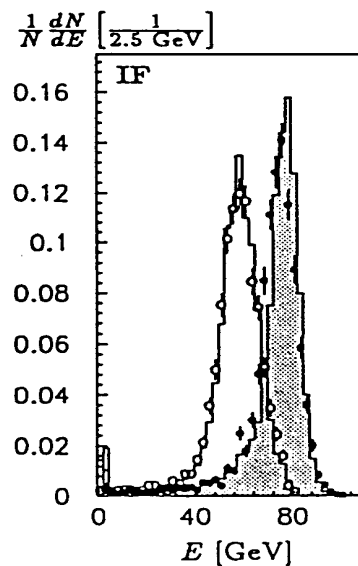
Algorytm kompensacji w pomiarze energii:

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

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

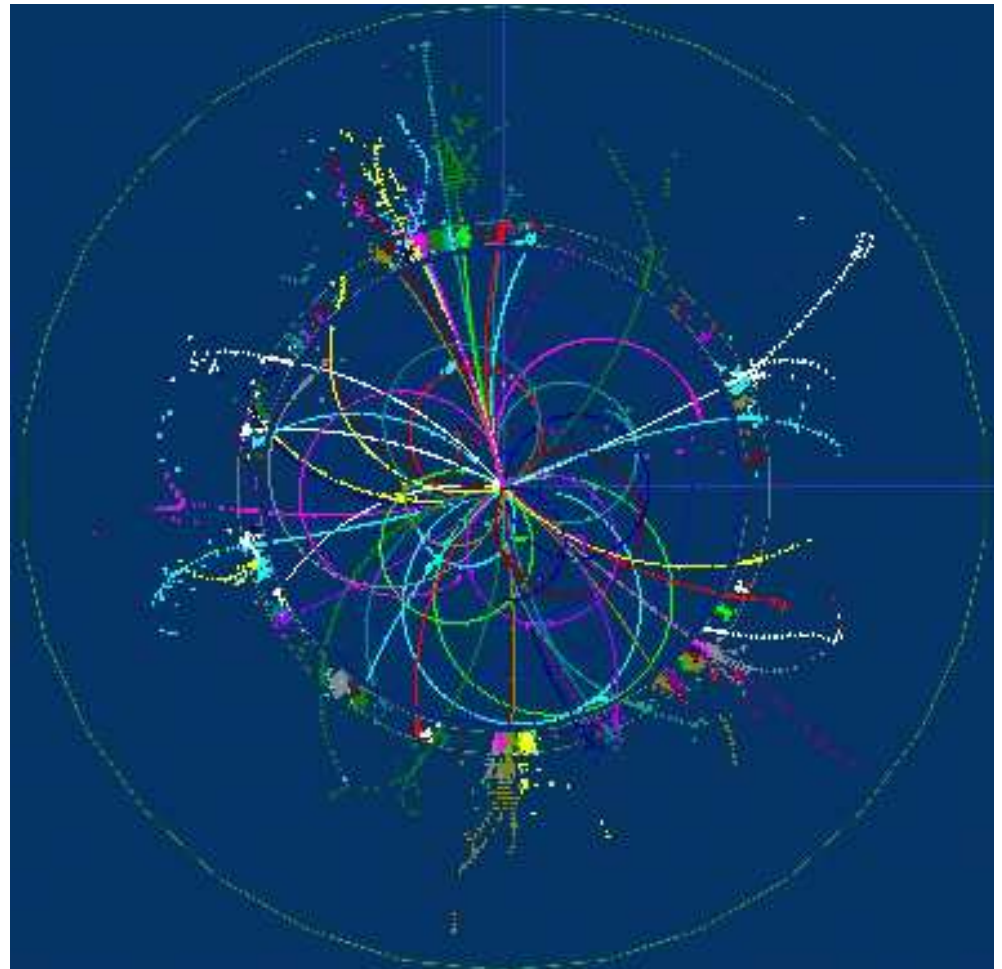
Nowe koncepcje

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

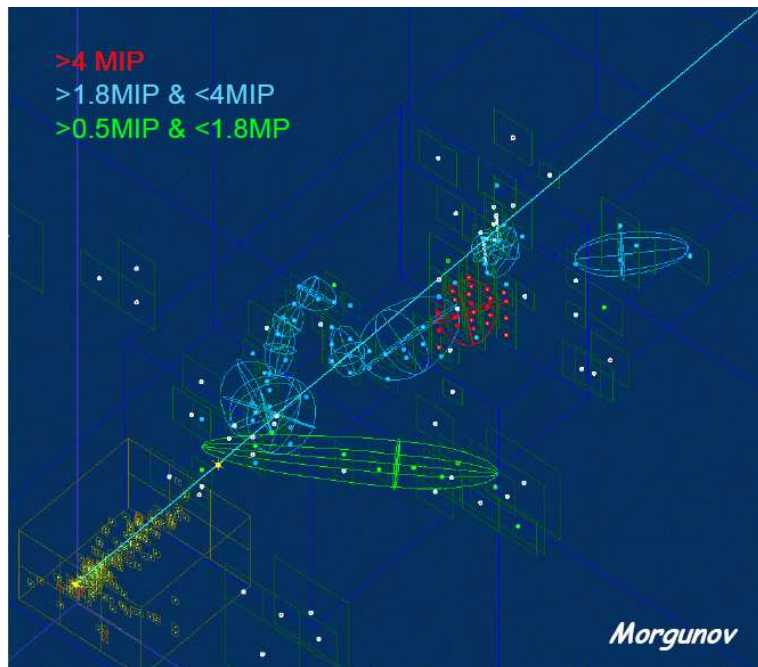


Kalorymetry

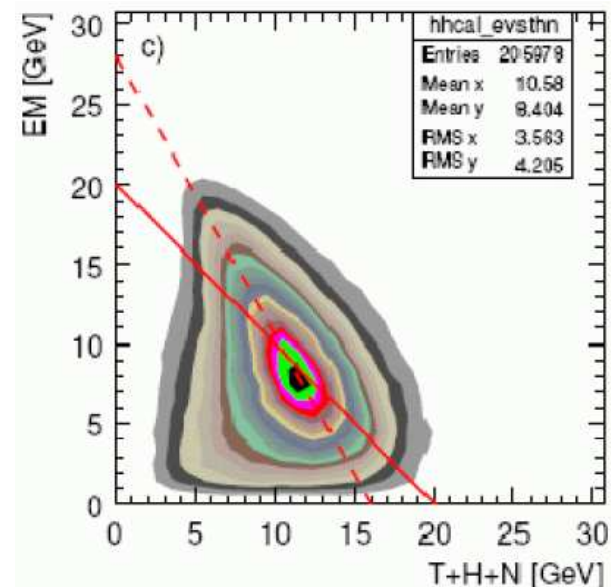
Nowe koncepcje Kalorymetr śladowy

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^+



Kalorymetry

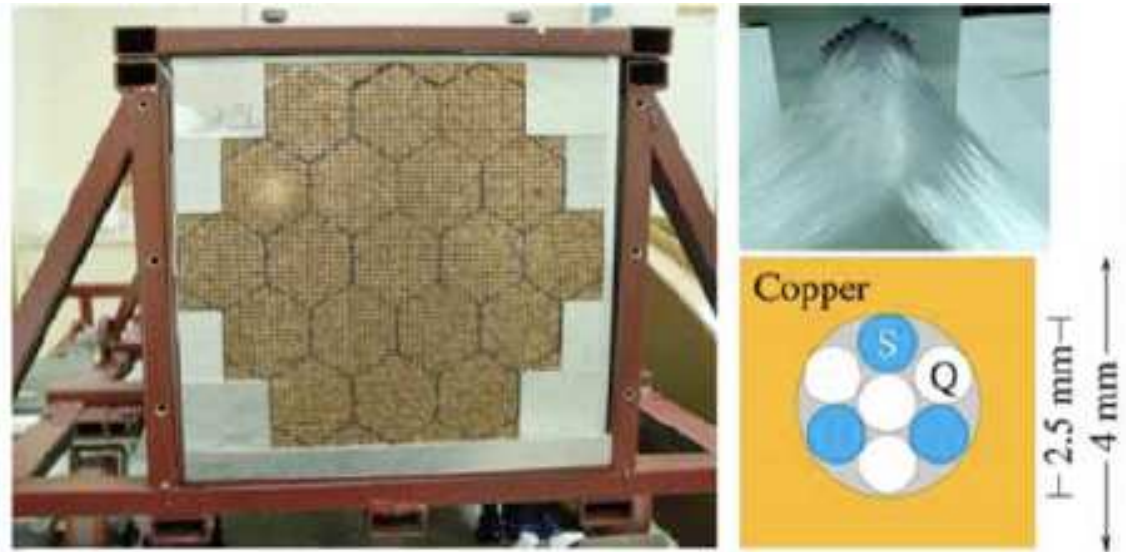
Nowe koncepcje

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

Dwa niezależne pomiary energii cząstki pierwotnej:

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

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

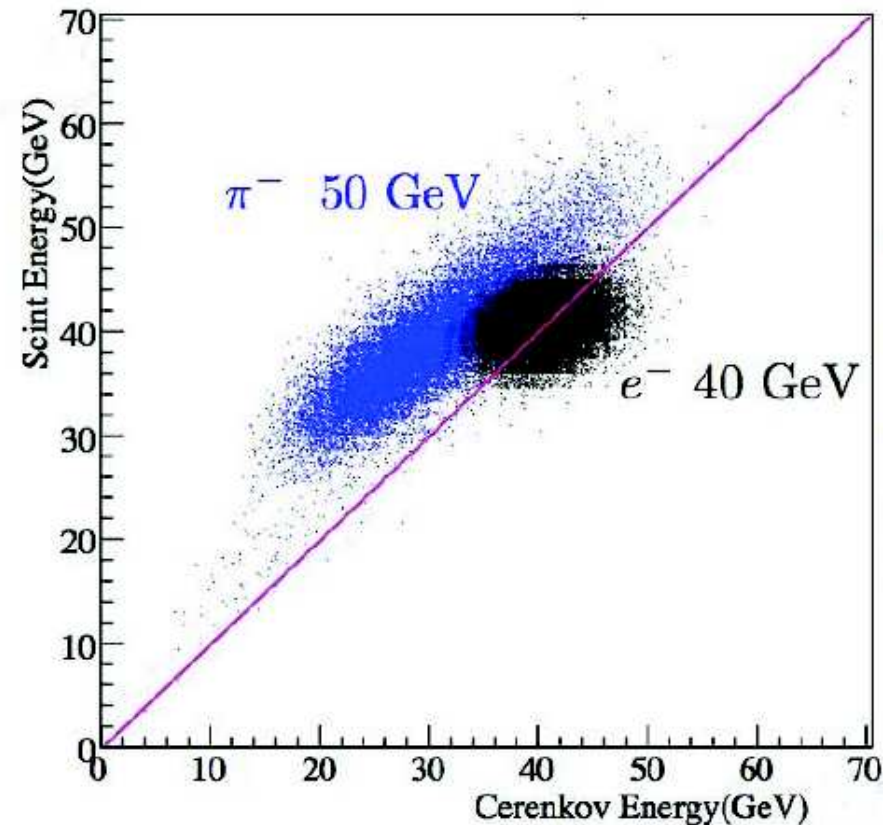
Znając współczynniki tłumienia składowej hadronowej w obu odczytach

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

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

możemy z dwóch pomiarów wyznaczyć f_{em} i E

⇒ znacznie lepsza zdolność rozdzielcza

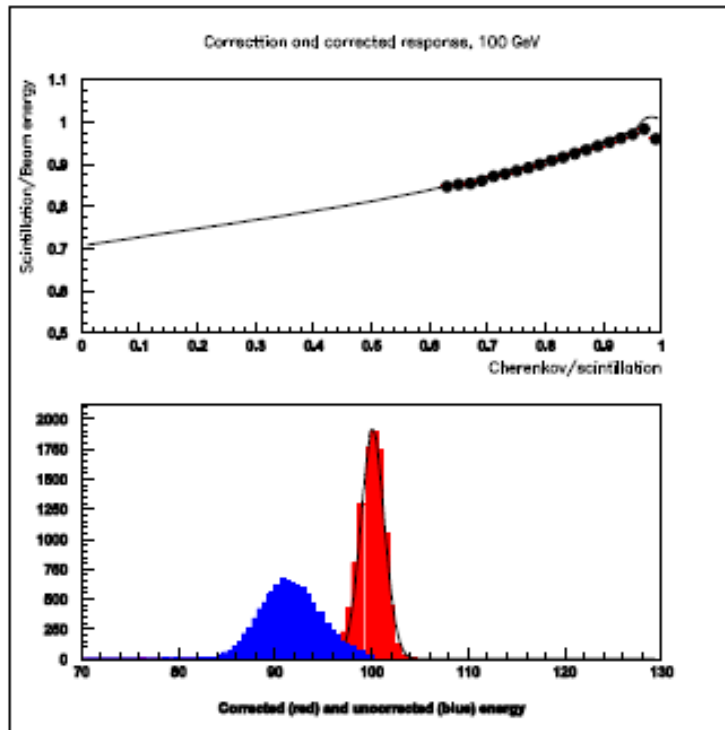


Kalorymetry

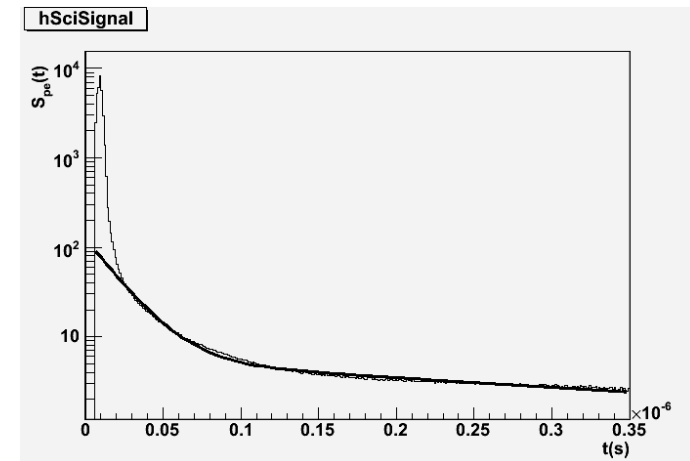
Nowe koncepcje

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

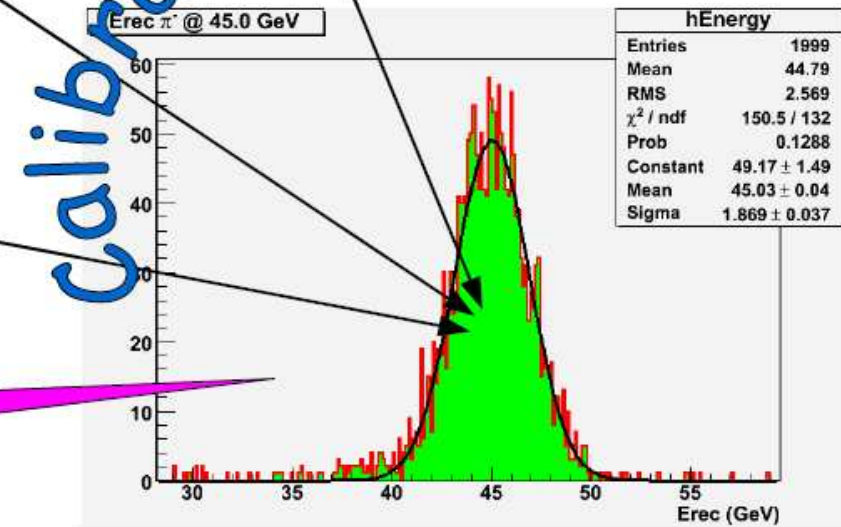
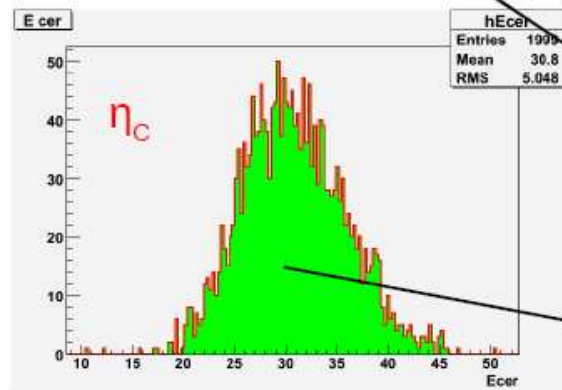
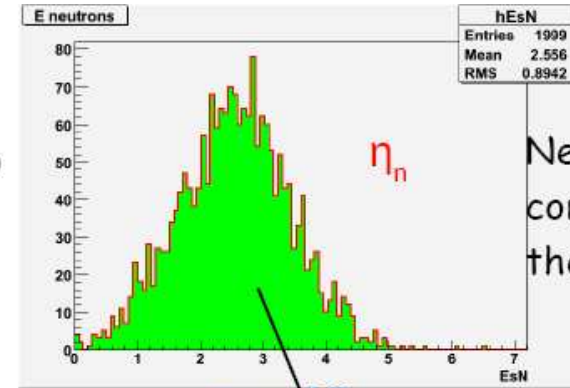
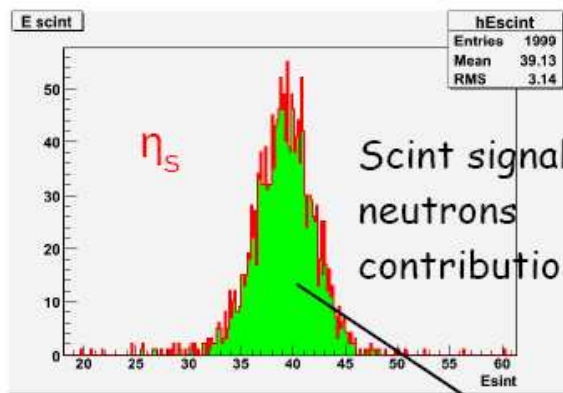
Potrójny odczyt:

- 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.

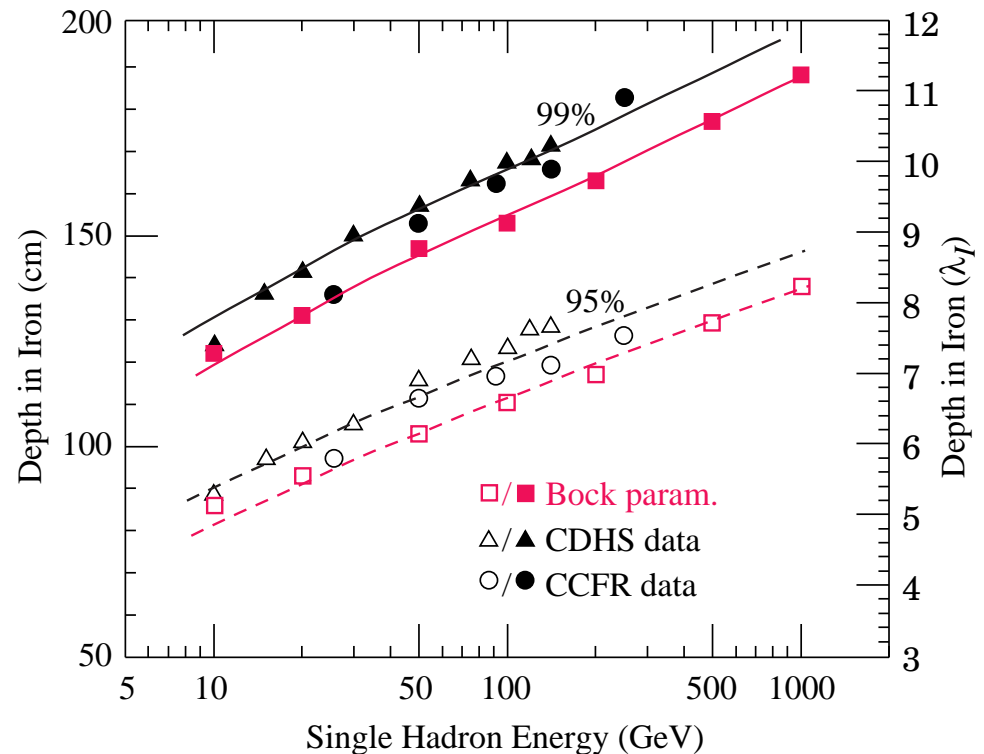
Stosunkowo łatwo zatrzymać 95% kaskad.

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

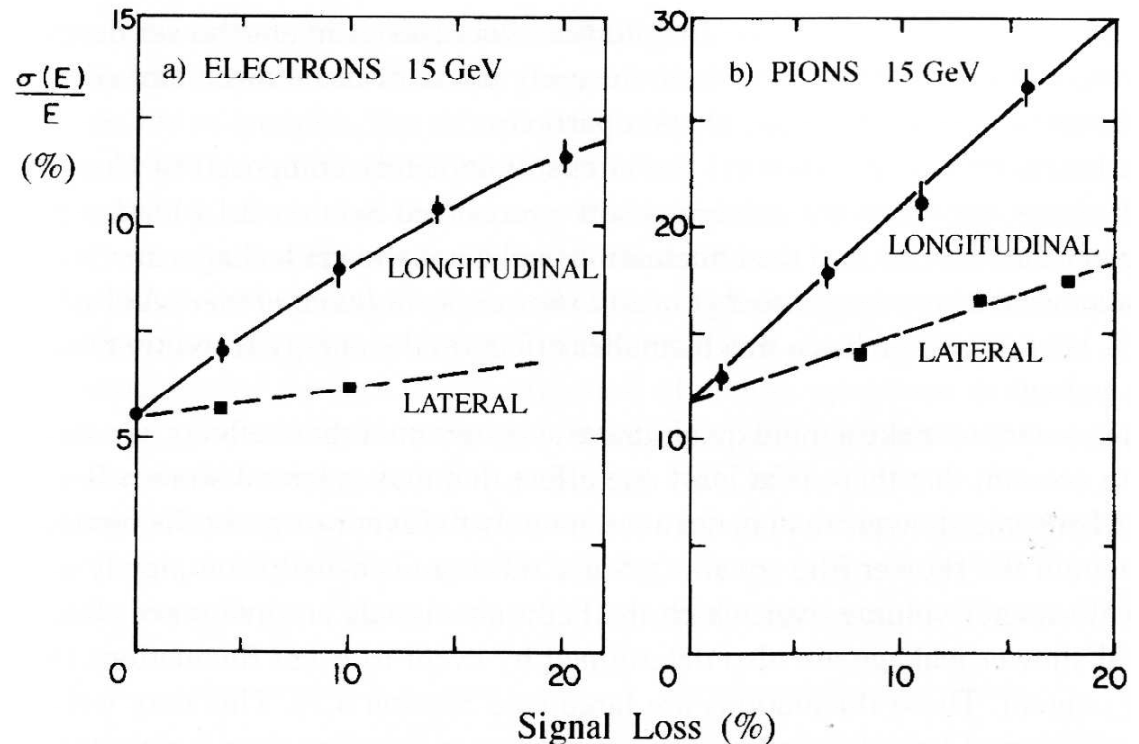
Wpływ wyływów energii na dokładność pomiaru (w przypadku braku poprawek)

Parametryzacja:

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

f - ułamek traconej energii

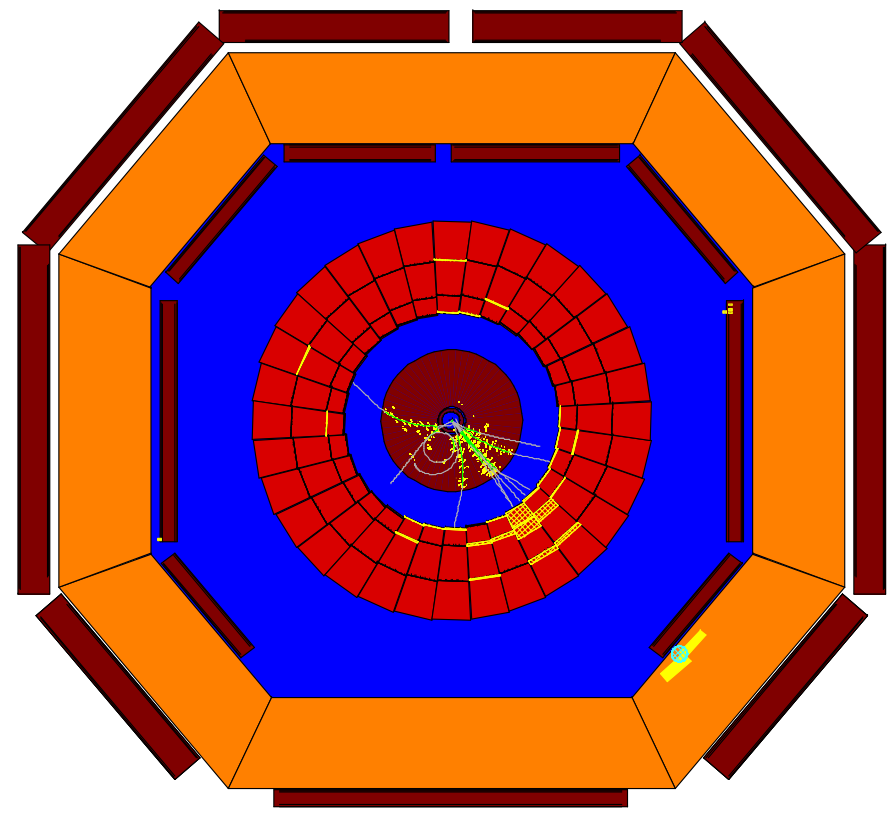
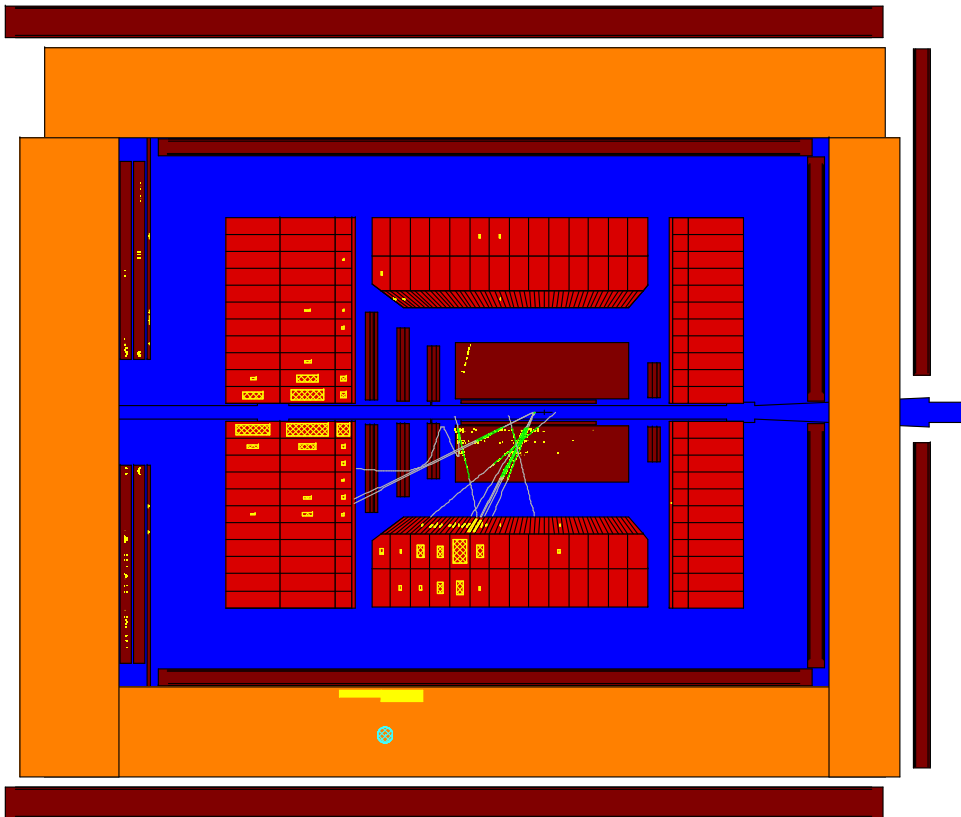
Aby zapewnić dokładny pomiar energii trzeba przynajmniej rozpoznawać takie przypadki.



Kalorymetry

Wyptywy energii

Wyptyw energii jetu obserwowany w kalorymetrze uzupełniającym detektora ZEUS



Kalorymetry

Wyływy energii

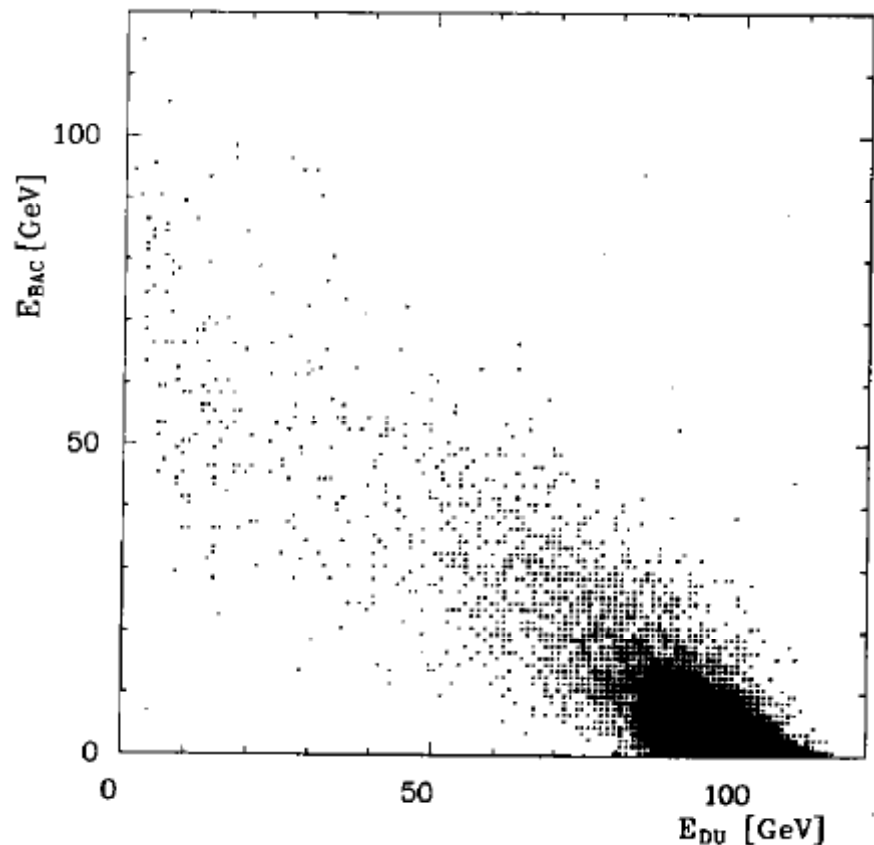
W detektorze ZEUS tzw. kalorymetr uzupełniający (BAC) wykorzystywał płyty stalowe jarzma elektromagnesu, pomiędzy które wstawiono aluminiowe komory proporcjonalne.

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

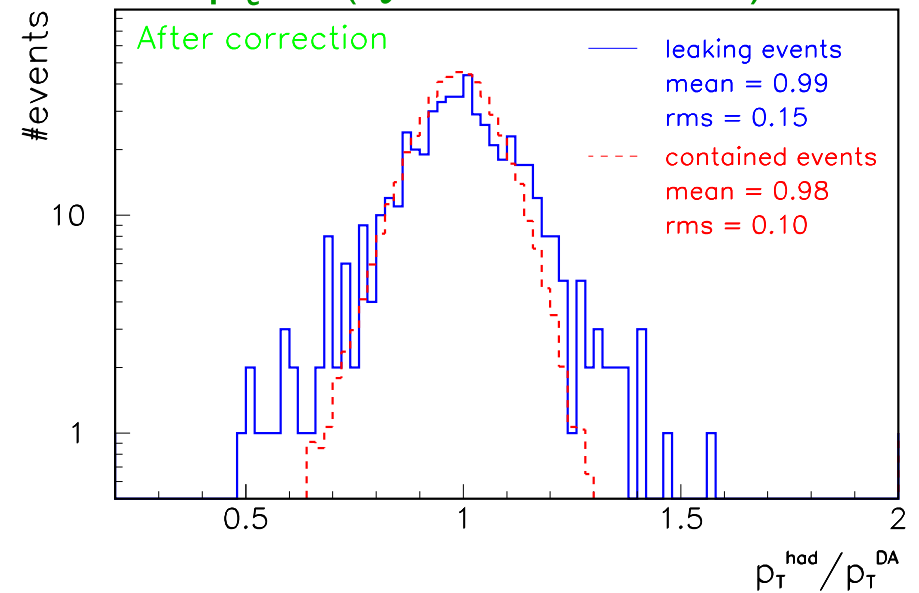
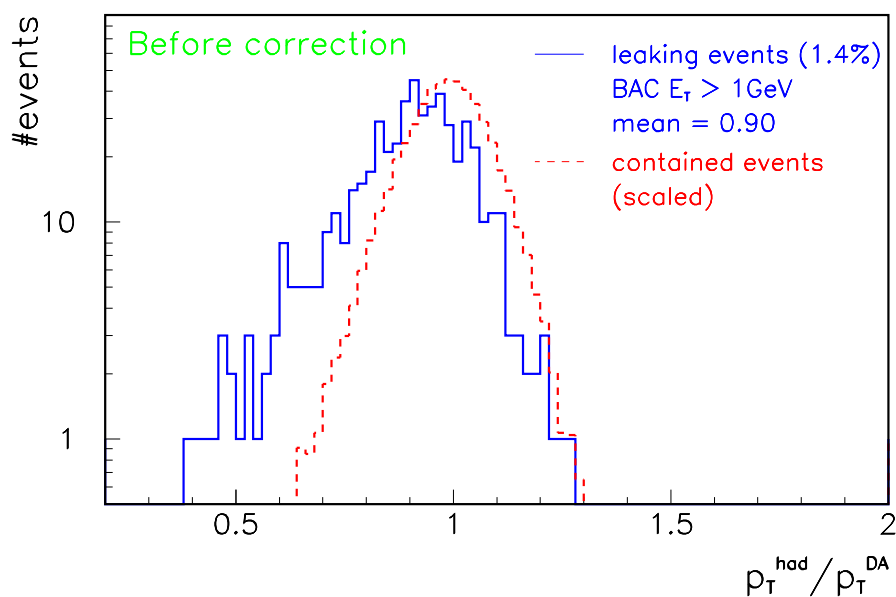


Kalorymetry

Wyływy energii

Wpływ kalorymetru uzupełniającego na pomiar pędu poprzecznego jetu.

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



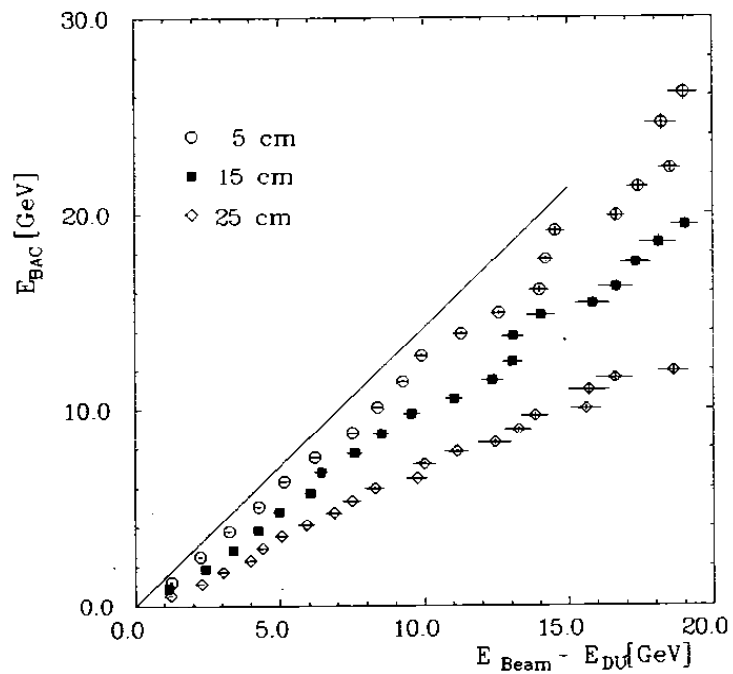
Mimo duży gorszej zdolności rozdzielczej może efektywnie “odcinać” wpływające kaskady, lub poprawiać ich energię.

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

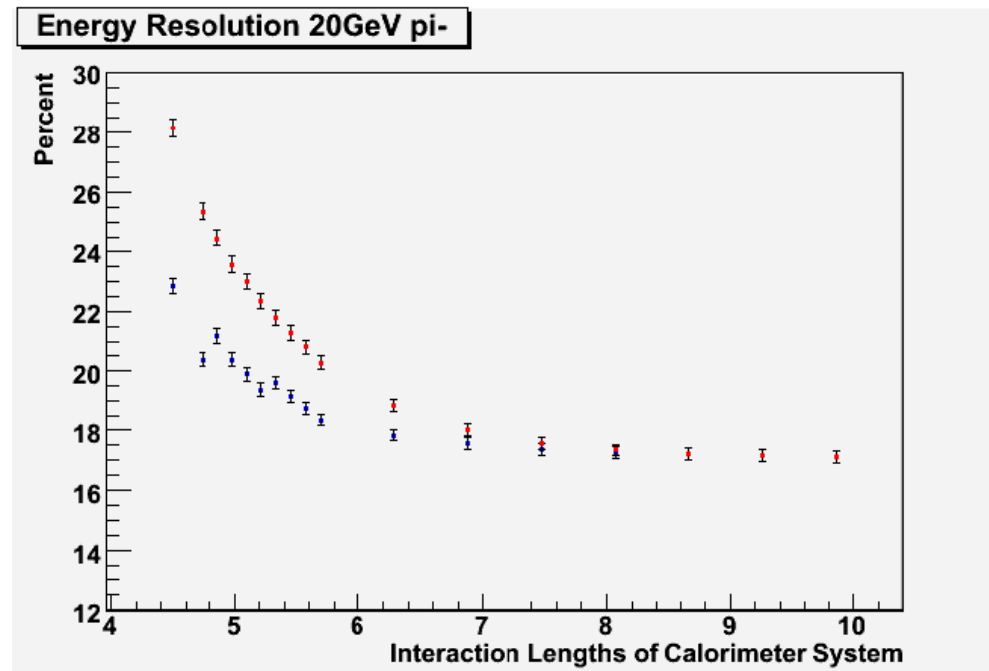
Kalorymetry

Wyływy energii

Wyrażna 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)

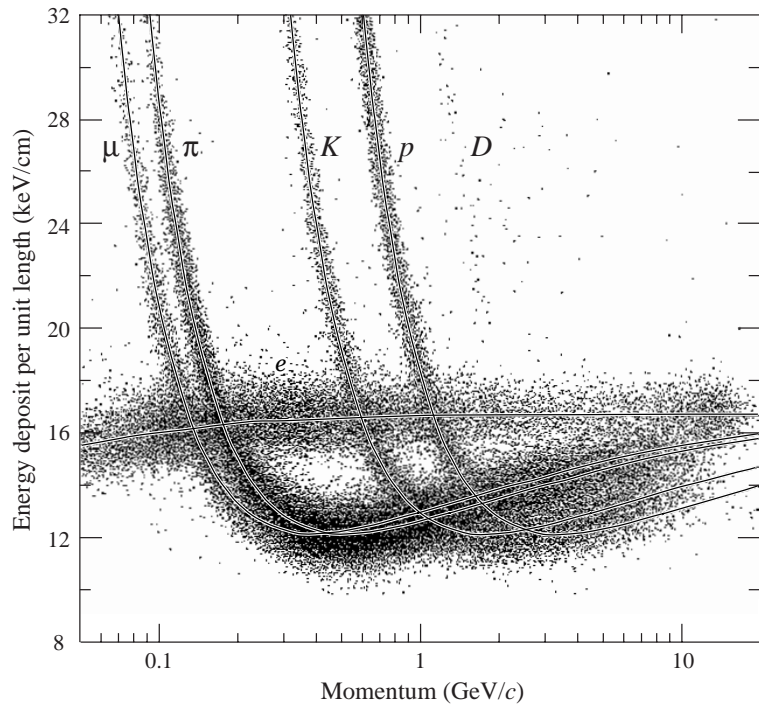


Identyfikacja cząstek

Omówione dotychczas typy detektorów pozwalają jedynie na pośrednią identyfikację

Detektory śladowe

Jednoczesny pomiar dE/dx i pędu \Rightarrow możliwość rozróżnienia cząstek o różnej masie
 \Rightarrow różnym współczynnikiem γ **Niestety tylko w ograniczonym zakresie !...**



Kalorymetry

Pomiar rozmiarów kaskady

\Rightarrow odróżnienie elektronów/fotonów od hadronów

Kalorymetry + d. śladowe

\Rightarrow odróżnienie cząstek naładowanych i obojętnych
np. elektron vs foton

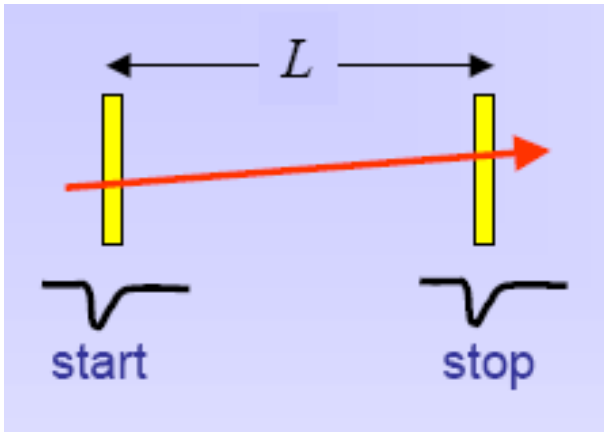
Kalorymetry + detektory mionowe

\Rightarrow identyfikacja mionów

Identyfikacja cząstek

Liczniki czasu przelotu Time-of-Flight (TOF)

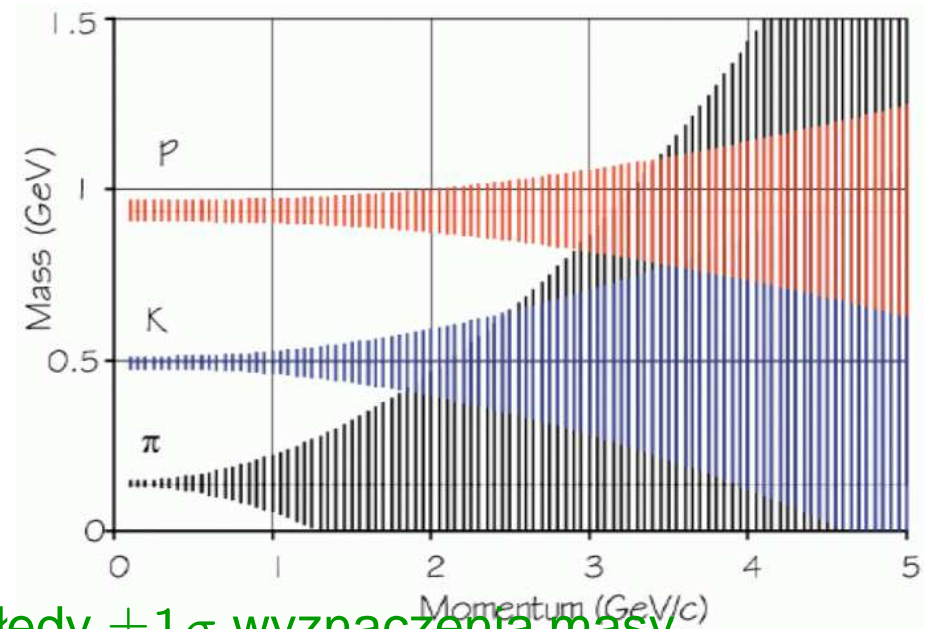
Pomiar czasu przelotu cząstki o znanym pędzie pozwala wyznaczyć jej masę:



$$p = \beta\gamma m$$

$$l = \beta ct \Rightarrow m^2 = \frac{p^2}{l^2} (c^2 t^2 - l^2)$$

Przykład: $l = 12m$, $\sigma_t = 150ps$, $\frac{\sigma_p}{p} = 1\%$

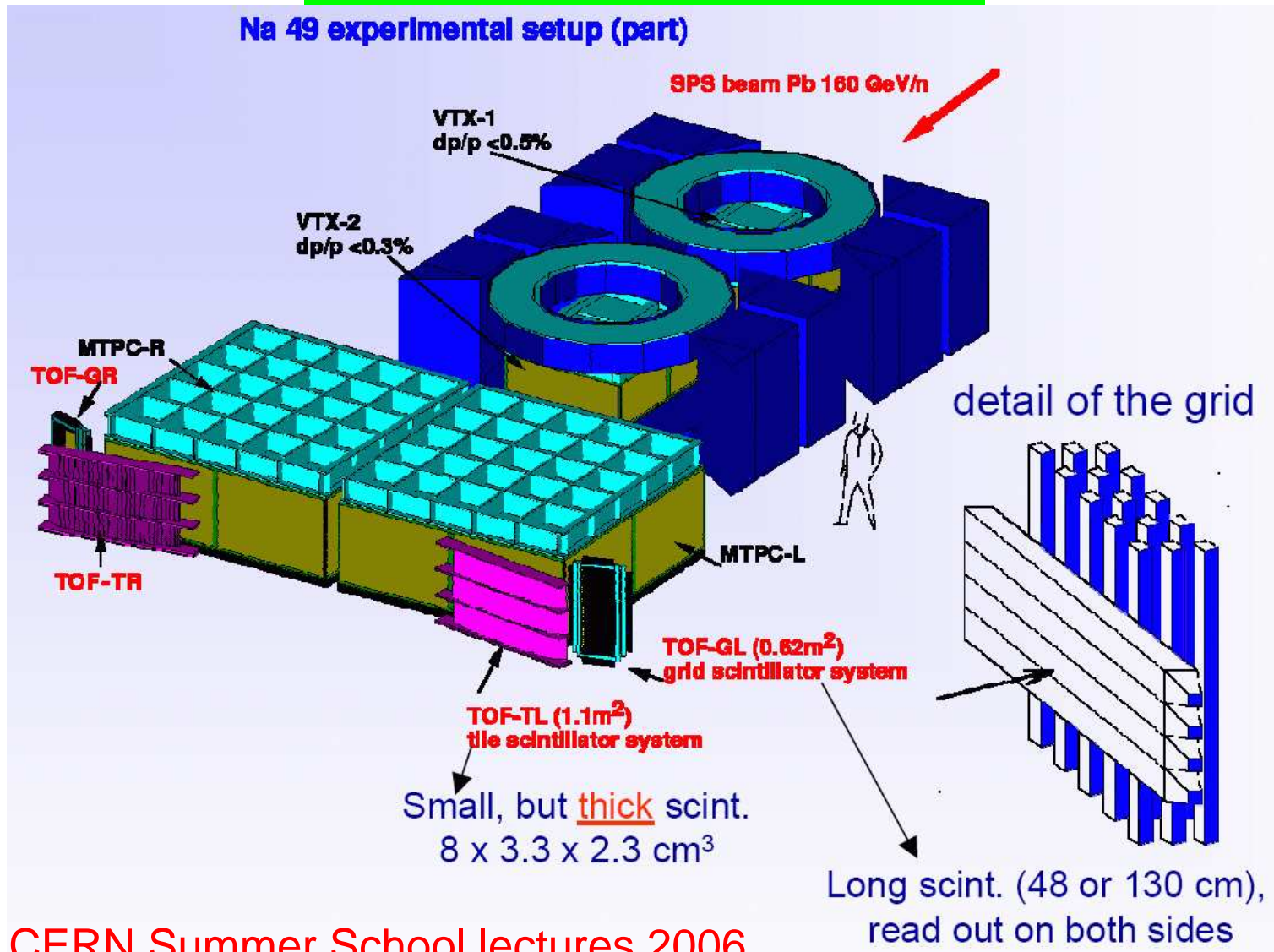


Błędy $\pm 1\sigma$ wyznaczenia masy

Dobra identyfikacja cząstek niskoenergetycznych ($p \sim m$)

Identyfikacja cząstek

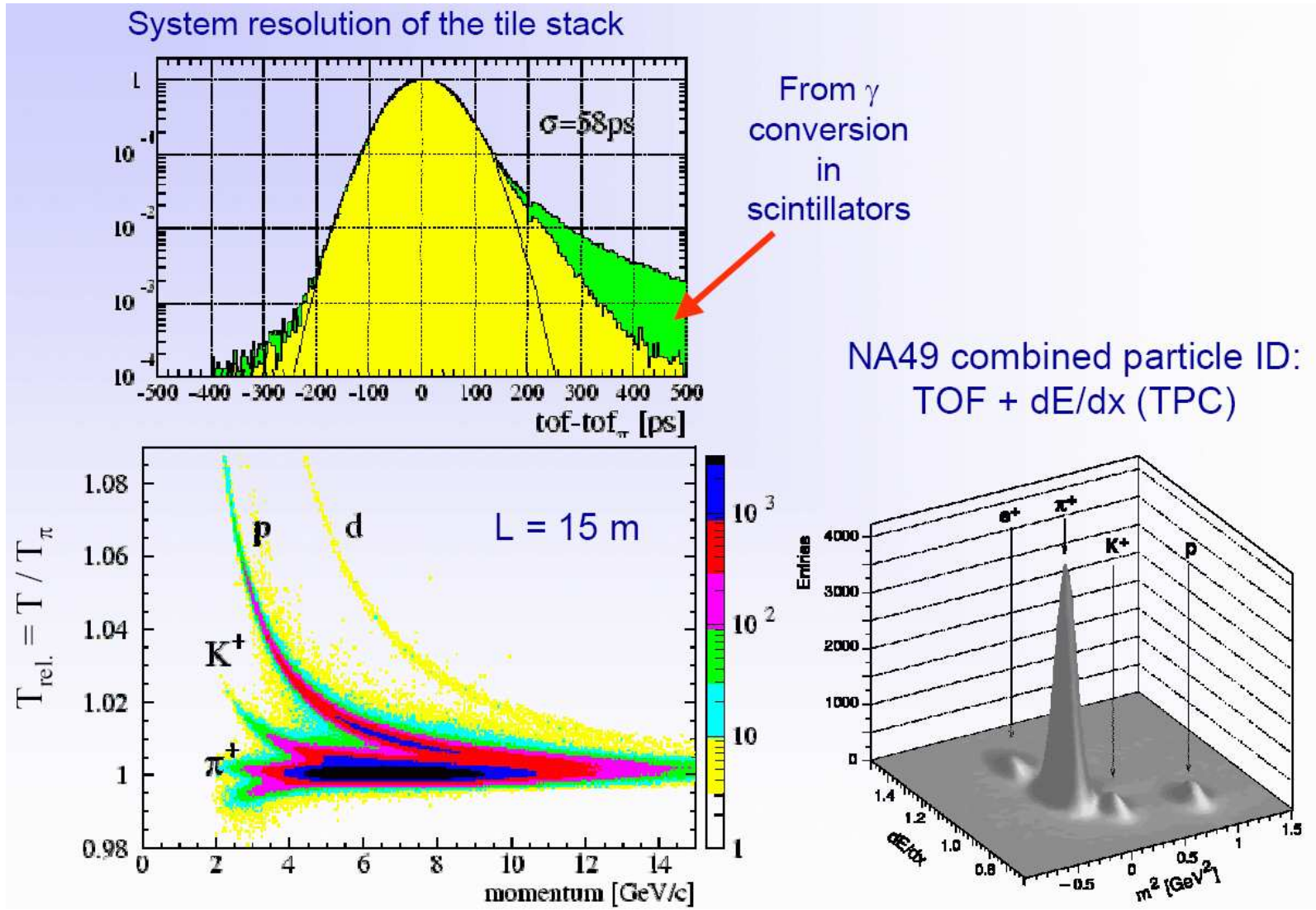
TOF @ NA49



O.Ullaland, CERN Summer School lectures 2006

Identyfikacja cząstek

TOF @ NA49

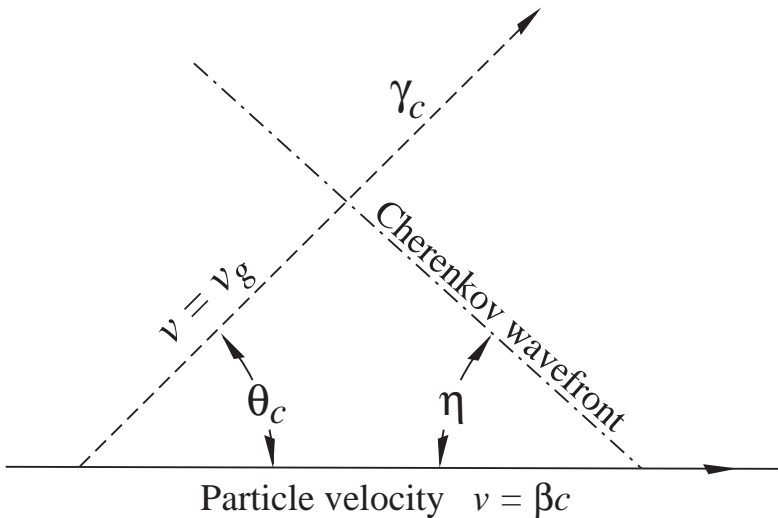


Promieniowanie Czerenkowa

Jeśli cząstka porusza się w ośrodku z prędkością większą niż prędkość światła ($\beta > \frac{1}{n}$) **wzbudzone atomy** mogą wypromieniować **niewielką część** traconej energii w postaci spójnej fali.

Kąt emisji promieniowania:

$$\cos \theta_c = \frac{1}{n\beta}$$



Widmo promieniowania jest ciągłe.

Liczba emitowanych fotonów na jednostkę energii:

$$\frac{d^2 N_\gamma}{dE_\gamma dx} = \frac{\alpha z^2}{\hbar c} \sin^2 \theta_c$$
$$\approx 370 \frac{1}{\text{eV} \cdot \text{cm}} \cdot \sin^2 \theta_c$$

Pomiar kąta rozwarcia stożka pozwala na bezpośredni pomiar prędkości cząstki!

Identyfikacja cząstek

Progowe detektory Czerenkowa

Promieniowanie Czerenkowa emitowane jest tylko gdy $\beta > \frac{1}{n}$.

Liczba emitowanych fotonów

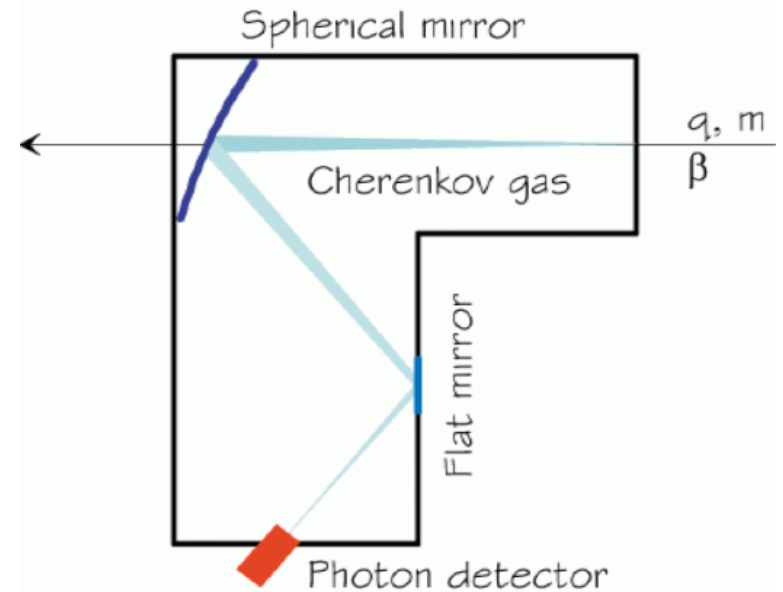
$$N_{ph} \sim \sin^2 \theta = 1 - \frac{1}{n^2 \beta^2}$$

rośnie szybko powyżej progu.

⇒ “tagowanie” cząstek powyżej progu

⇒ efektywna rozróżnianie cząstek o różnych masach

Najczęściej stosuje się układy kilku liczników o różnych n ⇒ możliwość identyfikacji w szerszym zakresie pędów

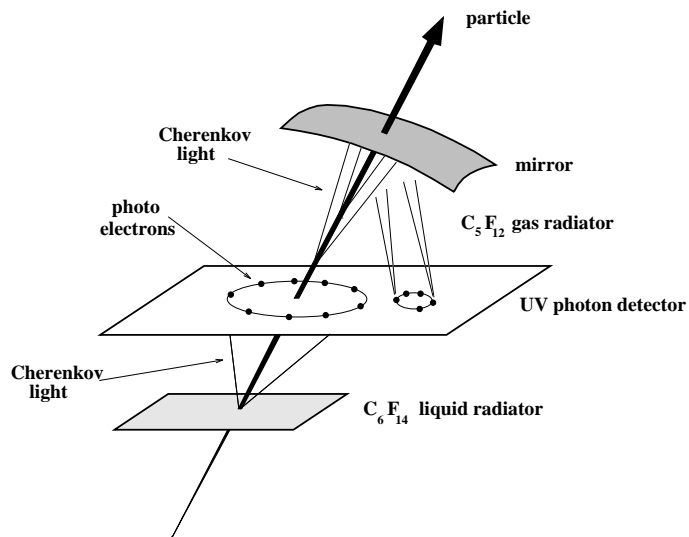


materiał	$n-1$	γ_{thr}
kwarc	0.46	1.37
woda	0.33	1.52
aerożel	0.025-0.075	2.7-4.6
izobutan	0.00127	19.9
powietrze	$2.8 \cdot 10^{-4}$	41.2
hel	$3.3 \cdot 10^{-5}$	123

Identyfikacja cząstek

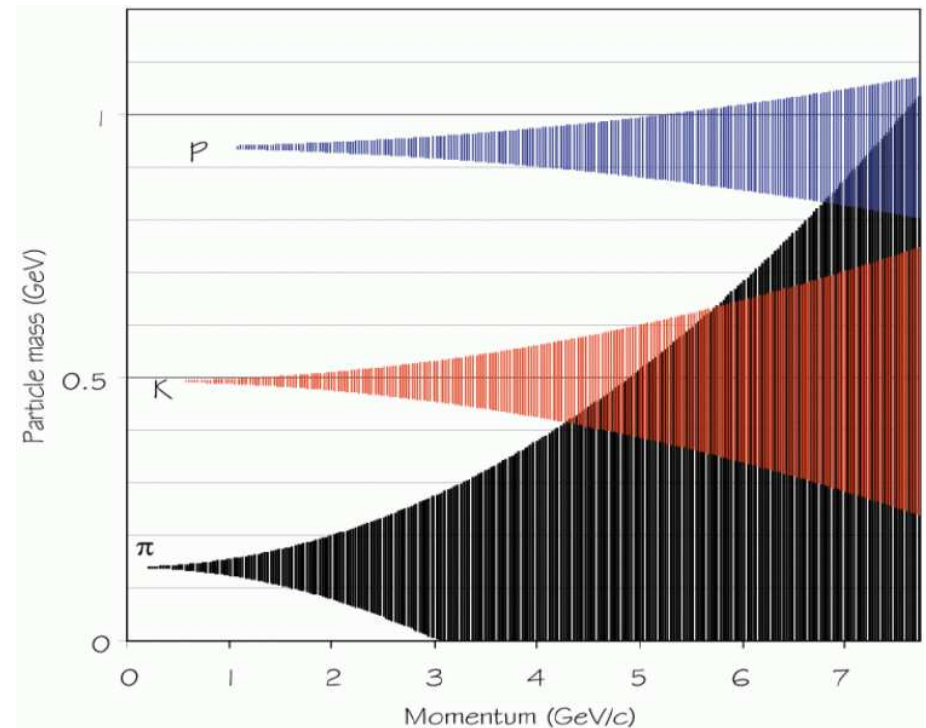
Detektory RICH Ring Imaging CHerenkov detector

Jeśli światło emitowane przez cząstkę skierujemy na zwierciadło wklęsłe to otrzymamy obraz w kształcie okręgu w płaszczyźnie ogniskowej.



Rozmiar okręgu pozwala wyznaczyć kąt emisji promieniowania \Rightarrow prędkość

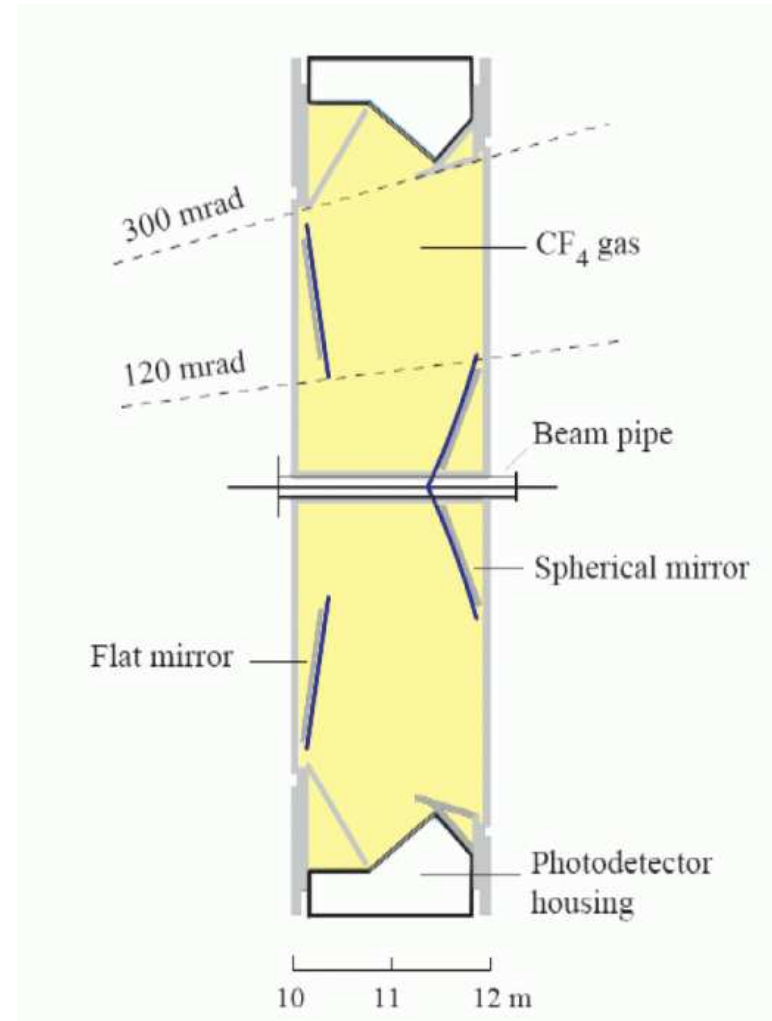
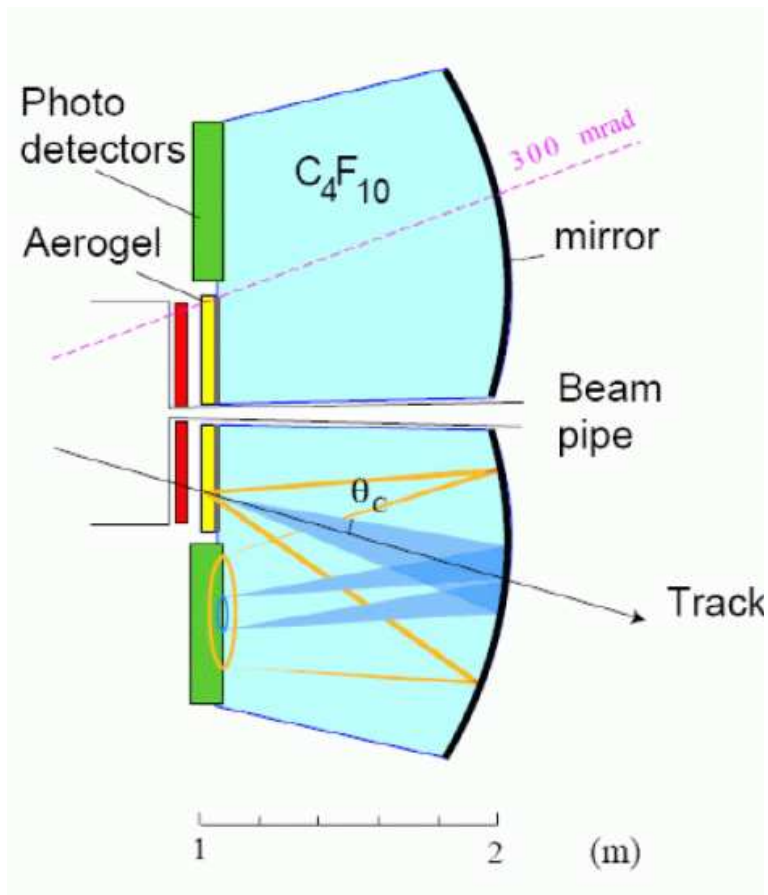
Przykład: $n = 1.333$, $\sigma_\theta = 15 \text{ mrad}$,
 $\frac{\sigma_p}{p^2} = 5 \cdot 10^{-5}$



Identyfikacja cząstek

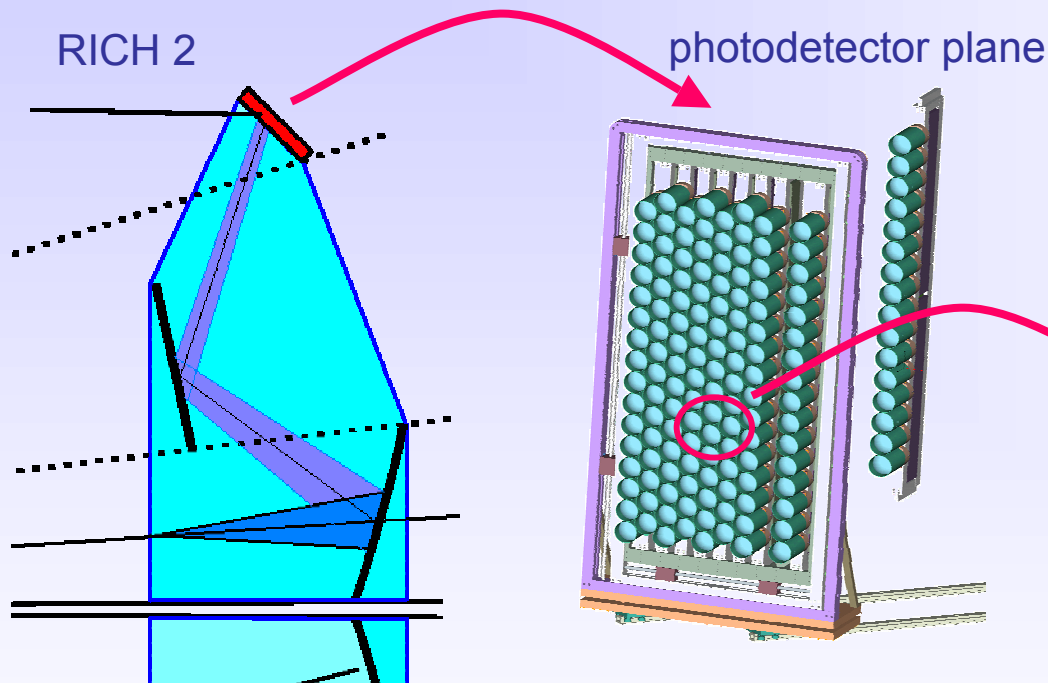
Detektory RICH

@ LHCb

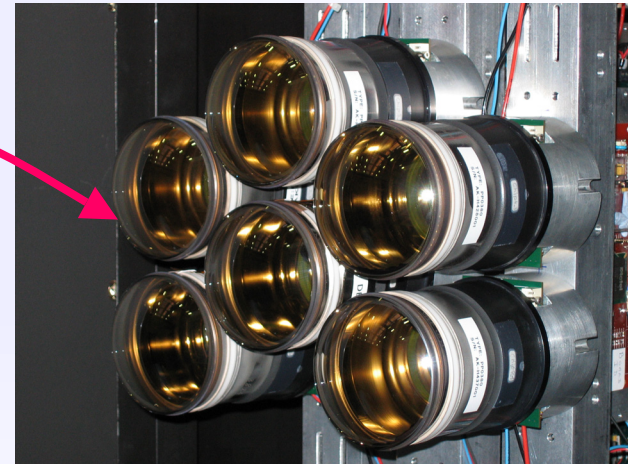




2 RICH detectors in LHCb



beam test in 2004 with 6 HPDs

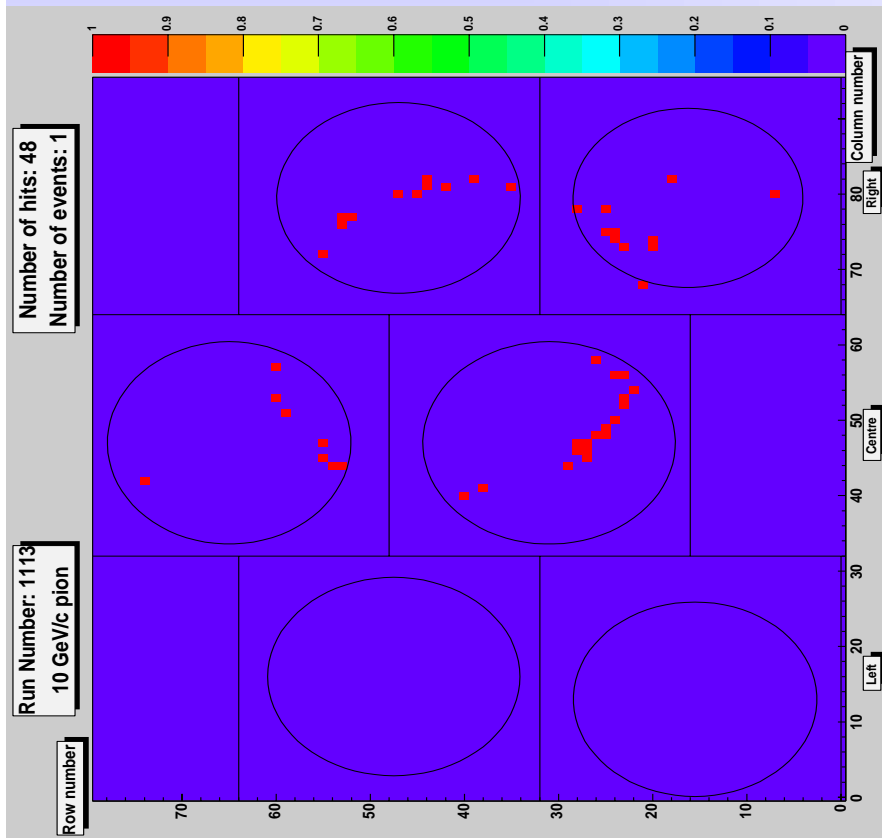




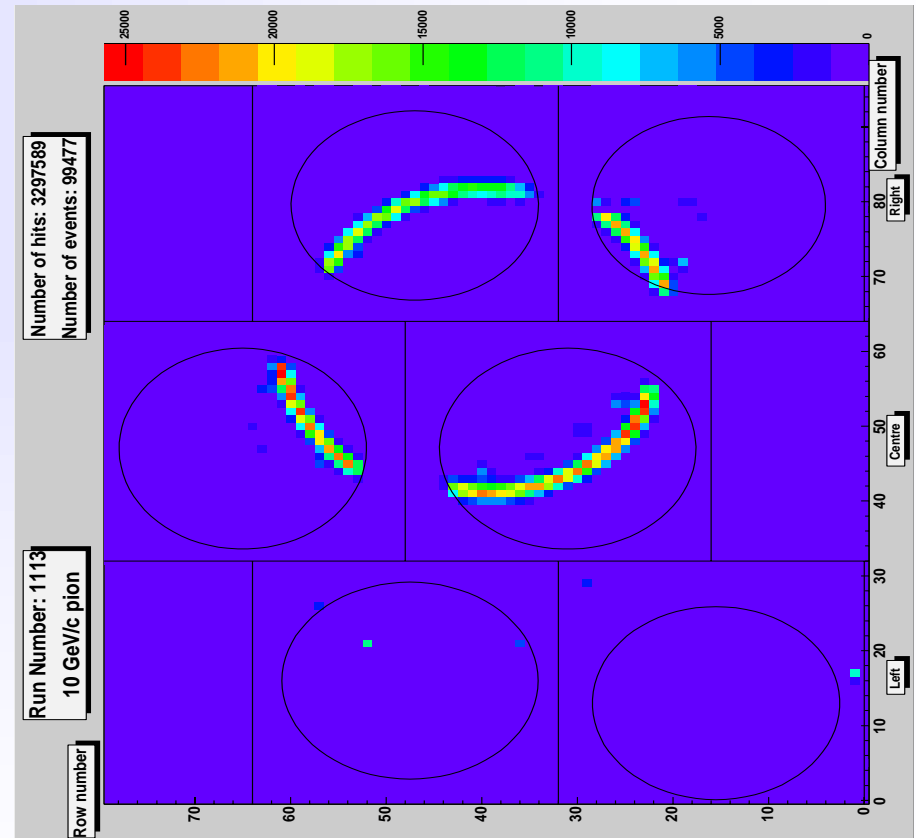
2 RICH detectors in LHCb

Beam test results with C_4F_{10} radiator gas (autumn 2004).

Single pion (10 GeV/c)



Superimposed events (100 k pions, 10 GeV/c)

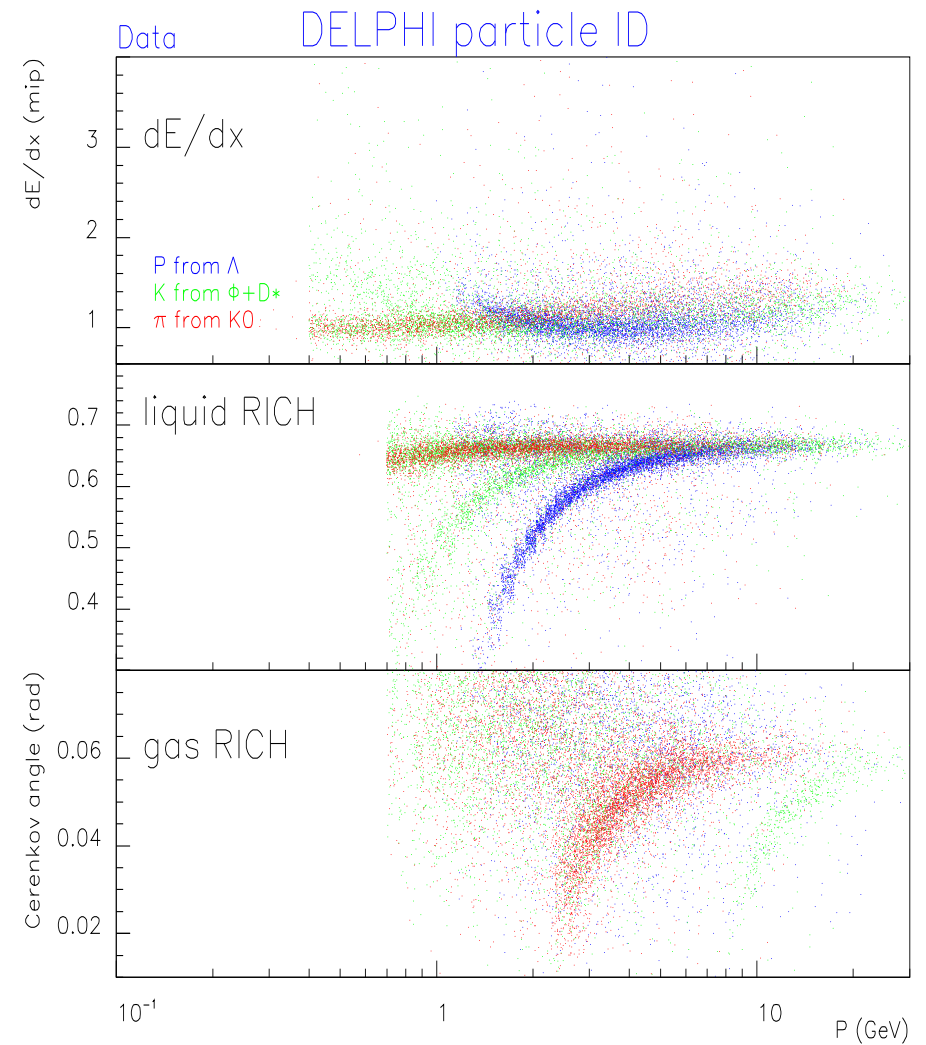
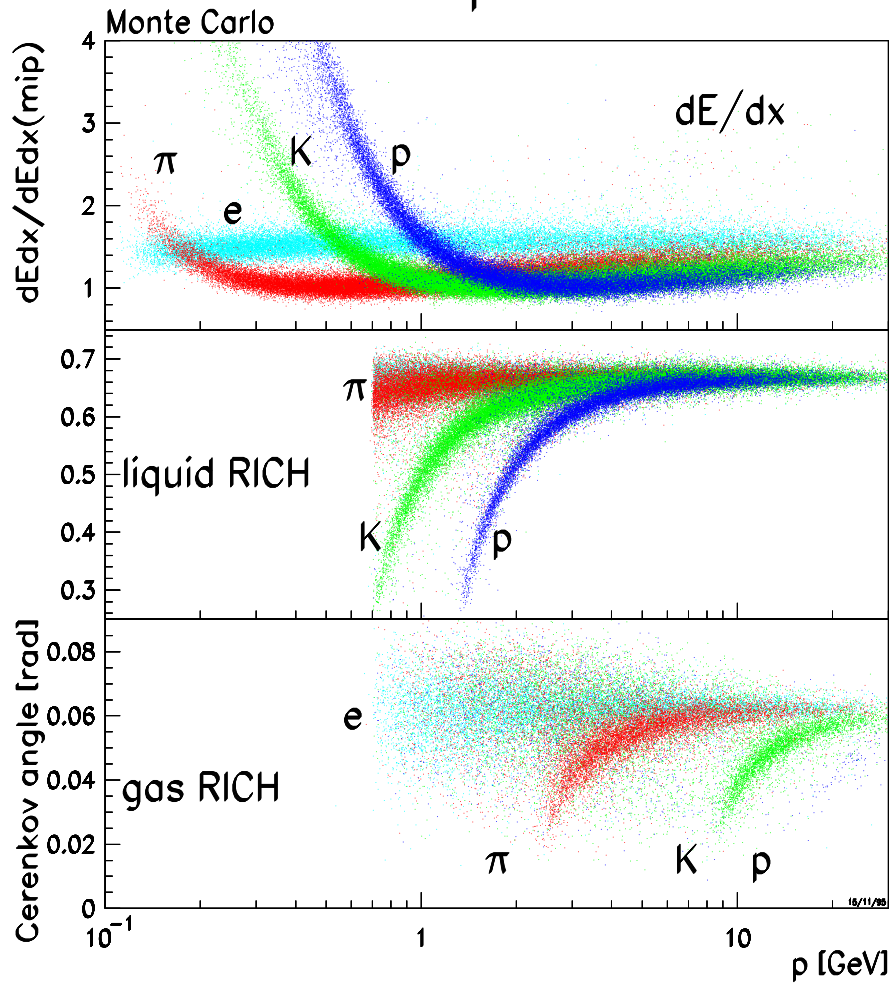


Identyfikacja cząstek

Detektory RICH

@ DELPHI

DELPHI particle ID



Identyfikacja cząstek

Promieniowanie przejścia

Transition radiation

Promieniowanie gamma emitowane przez ultra-relatywistyczne cząstki przy przechodzeniu przez granicę dwóch ośrodków o różnym stałej dielektrycznej.

Średnia wypromieniowana energia:

$$W \approx \frac{\alpha}{3} \hbar \omega_p \gamma$$

ω_p - częstość plazmowa ($\hbar \omega_p \sim 20 eV$)

Energie fotonów $\hbar \omega \approx \frac{1}{4} \hbar \omega_p \gamma$

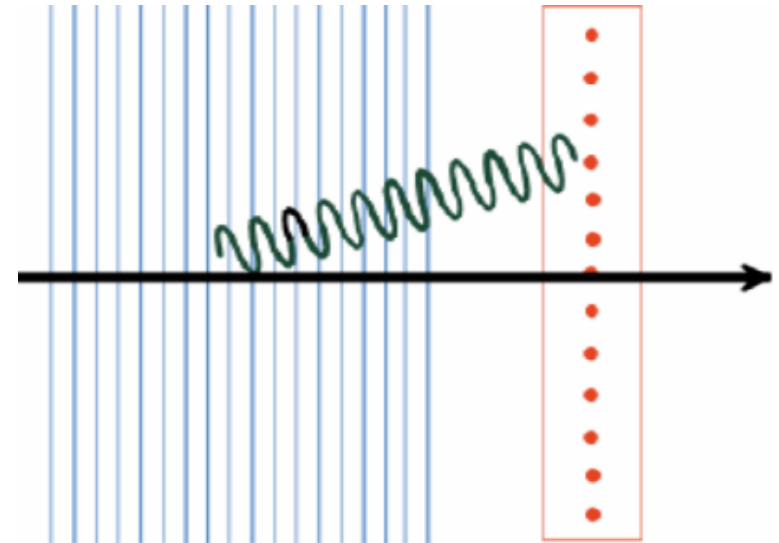
⇒ prawdopodobieństwo emisji $\sim \alpha = \frac{1}{137}$

Aby uzyskać mierzalny efekt potrzebny jest układ wielu naprzemian ułożonych warstw.

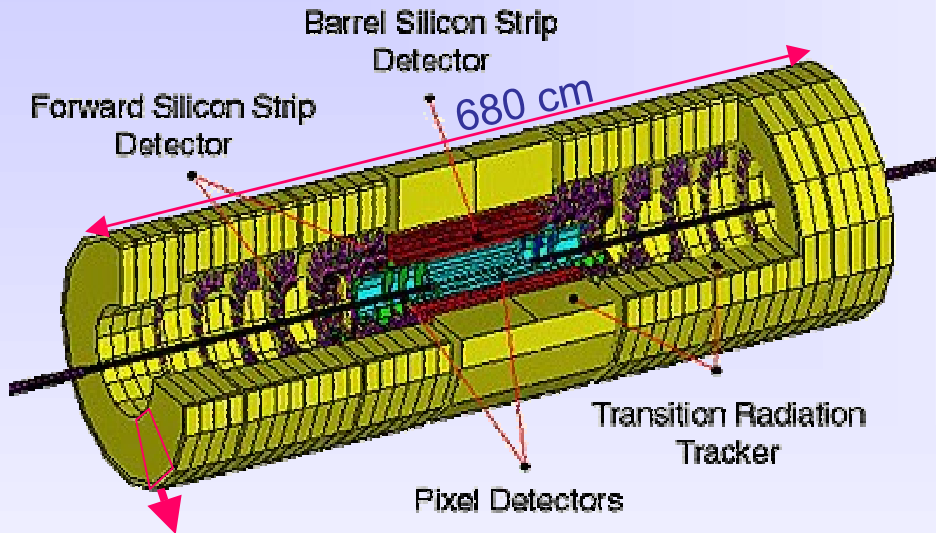
Kąt emisji promieniowania $\theta \sim \frac{1}{\gamma}$

⇒ fotony rejestrowane wzdłuż toru cząstki, widoczne jako wzrost dE/dx

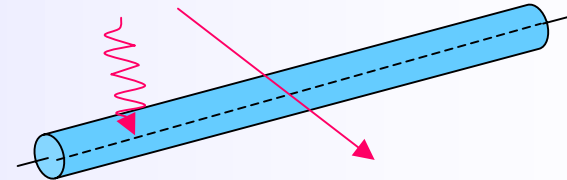
Najczęściej wykorzystywane do rozróżniania e^\pm / π^\pm przy wysokich pędach



The ATLAS Transition Radiation Tracker (TRT)



Straw tubes (d = 4mm) based tracking chamber with TR capability for electron identification.



Active gas is Xe/CO₂/O₂ (70/27/3) operated at $\sim 2 \times 10^4$ gas gain; drift time ~ 40 ns (fast!)

Radiators

- Barrel: Propylen fibers
- Endcap: Propylen foils
d=15 μ m with 200 μ m spacing.

Counting rate $\sim 6-18$ MHz at LHC design luminosity 10^{34} cm⁻²s⁻¹

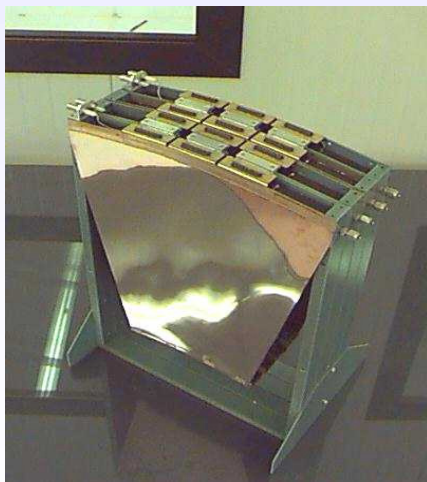
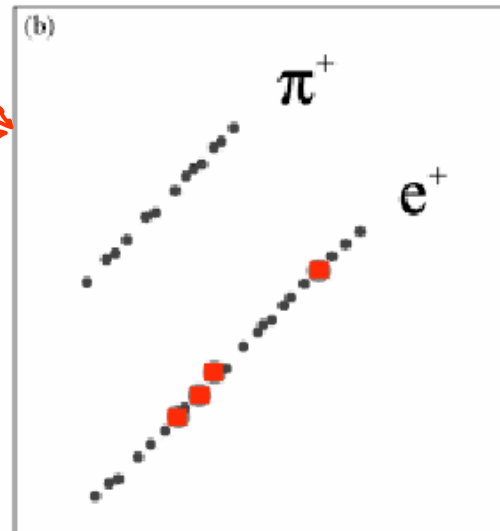
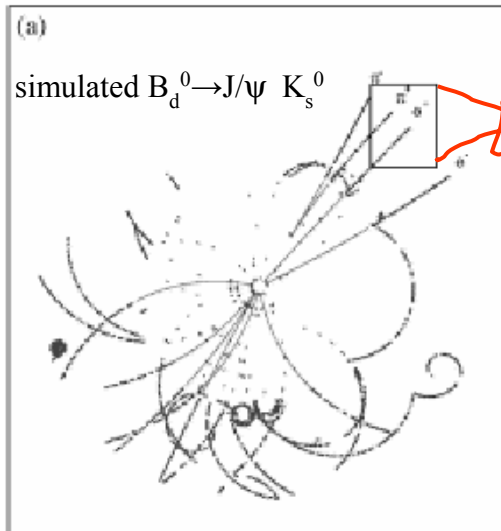
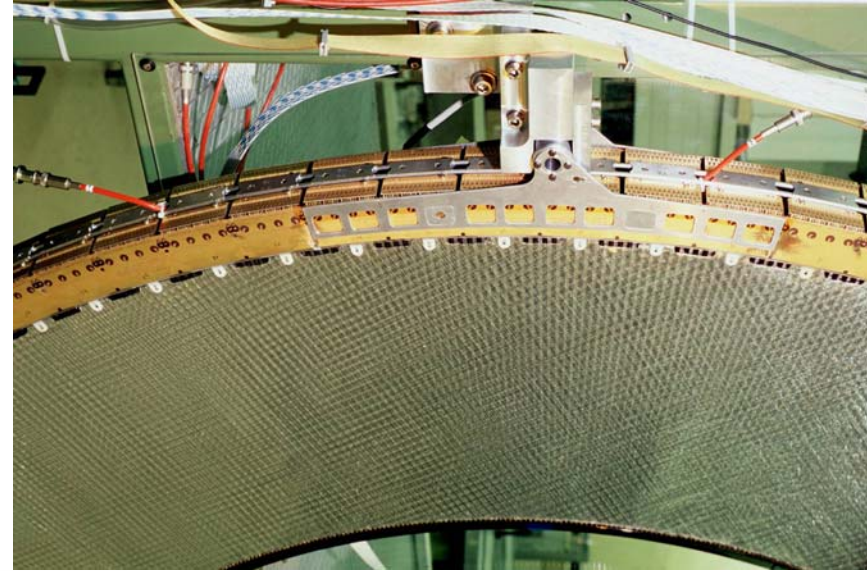
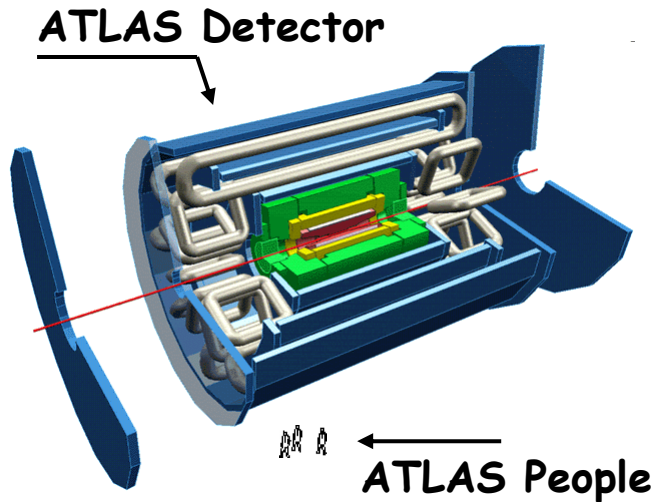
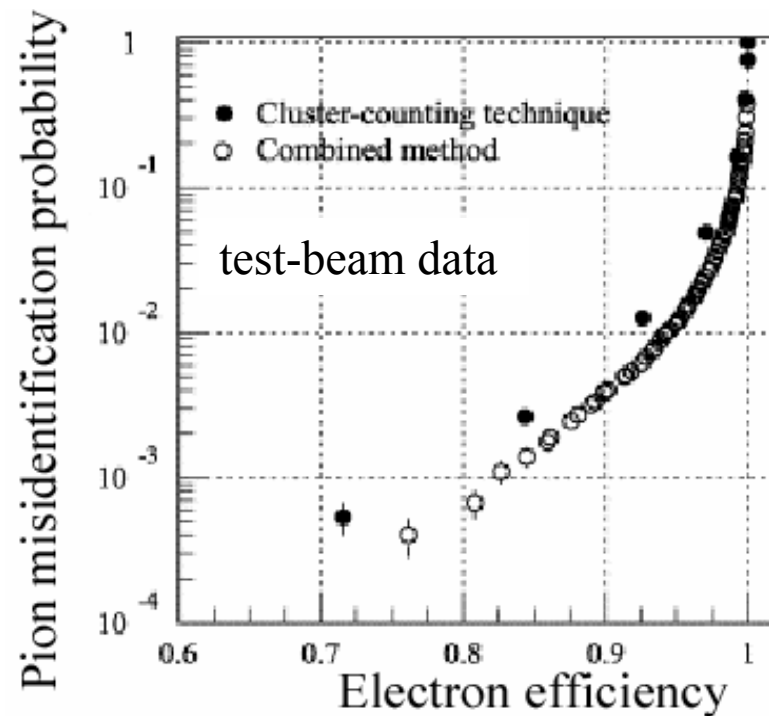


photo of an endcap TRT sector.

and just an example of one who pick up the challenge



The small box selects a part of a pion track from the K_s^0 decay and of an electron track from a J/ψ decay, shown in an enlarged frame.



A little summary about Particle Identification

Pion-Kaon separation for different PID methods.

The length of the detectors needed for 3σ separation.

