

Fizyka cząstek: detektory

prof. dr hab. A.F.Żarnecki

Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych IFD

Wykład V

- Próbujące kalorymetry elektromagnetyczne
- Kalorymetry hadronowe

Kalorymetry

Dokładność pomiaru

Względna dokładność pomiaru energii w kalorymetrze zależy od różnych czynników:

$$\frac{\sigma}{E} = \frac{a}{\sqrt{E}} \oplus \frac{b}{E} \oplus c$$

Poszczególne człony odpowiadają:

- **a**: fluktuacje statystyczne w rozwoju kaskady ($N \sim E \Rightarrow \sigma_N = \sqrt{N} \Rightarrow \sigma_E \sim \sqrt{E}$) oraz związane z mechanizmem odczytu
- **b**: szумы detektora i elektroniki odczytu
- **c**: niejednorodność odpowiedzi, interkalibracja kanałów, nieliniowość elektroniki, wpływy kaskady, itp.

Dla kalorymetru detektora NA48: energia E [GeV]

$$a = 3.5\% \quad b = 4\% \quad c = 0.42\%$$

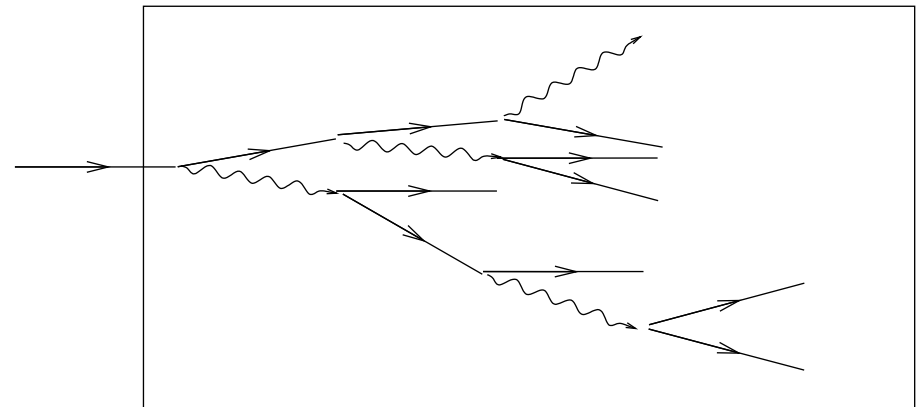
dla dużych energii dominuje człon stały (**c**)

Kalorymetry

Kalorymetry jednorodne

Zalety:

- najlepsza zdolność rozdzielcza
cała deponowana energia zamieniana na sygnał
- wysoki poziomy sygnał
łatwy odczyt, niskie szумы



Wady:

- duże
- drogie
- pomiar tylko kaskad
elektro-magnetycznych

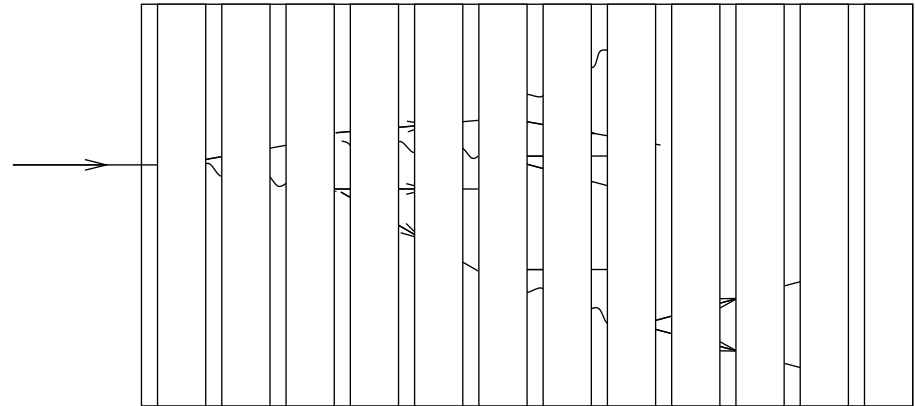
⇒ częściej wykorzystywanym w eksperymentach HEP rozwiązaniem są kalorymetry próbkujące

Kalorymetry

Kalorymetry próbkujące

Kaskada rozwija się w gęstym absorberze.

Rzwoj kaskady jest “próbkowany” w cienkich warstwach aktywnych.



Zalety:

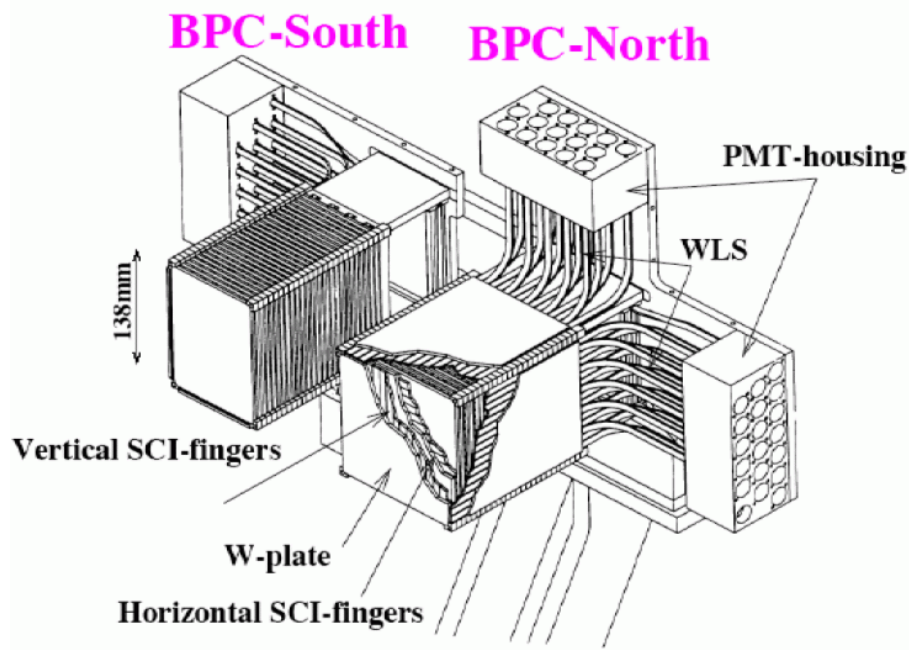
- mniejsze, można użyć bardzo gęstego absorbera
- tańsze, absorber zwykle tańszy od elementów odczytowych
- większe możliwości optymalizacji, zwłaszcza dla kaskad hadronowych

Wady:

- niski sygnał
tylko mały ułamek energii kaskady zamieniany na mierzalny sygnał
- niska zdolność rozdzielcza

Kalorymetry

Kalorymetr BPC detektora ZEUS przy HERA



Umieszczony po obu stronach rury wiązki:
pomiar elektronów rozproszonych pod
bardzo małymi kątami

“Klasyczna” konstrukcja:

wolfram + scyntylator

Odczyt przy pomocy światłowodów z przesunięciem długości fali (WLS)

i fotopowielaczy

⇒ pomiar czasu z dokładnością $< 1 ns$

Głębokość $24 X_0$

Zdolność rozdzielcza $\frac{\sigma}{E} \approx \frac{17\%}{\sqrt{E}}$

Warstwy scyntylatora w postaci pasków o szerokości 8mm ⇒ dokładny pomiar pozycji kaskady ($< 1 mm$)

Kalorymetry

Kalorymetr EM detektora ATLAS

Kalorymetr z ciekłym argonem (LAr)

Odczyt analogiczny jak w kalorymetrze jednorodnym - tylko płyty oddzielające kolejne cele grubsze.

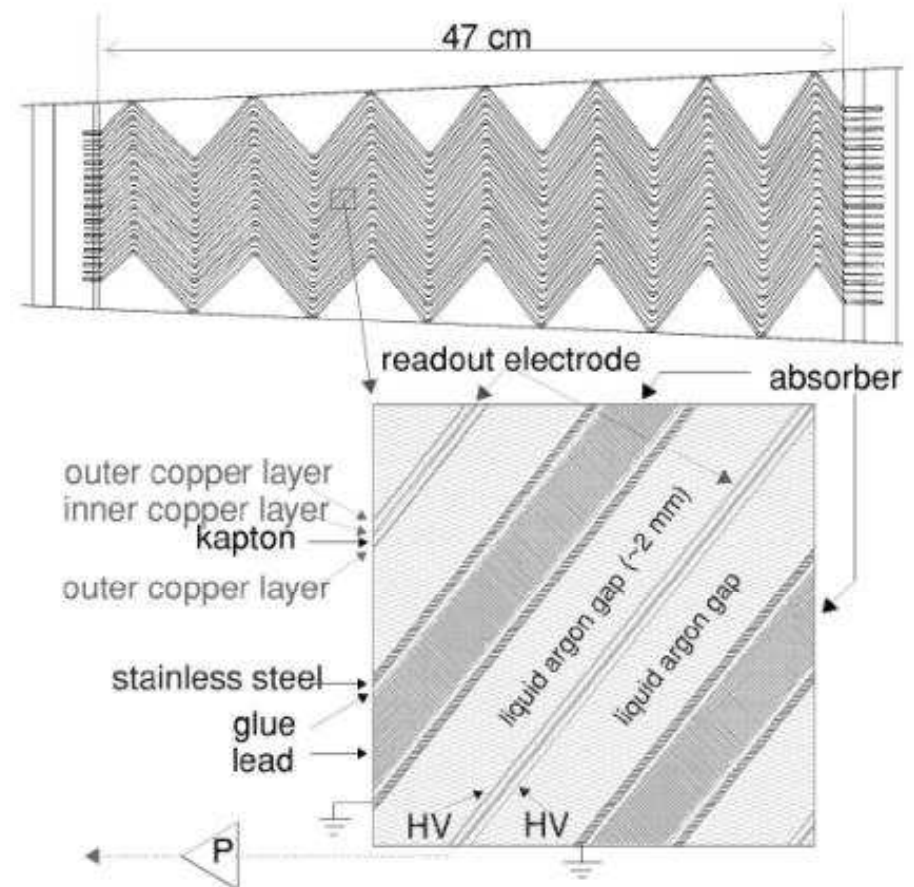
Warstwy ołowiu: 1.1 – 2.2mm (zależnie od kierunku)

Warstwy LAr: 4mm

Zdolność rozdzielcza:

$$\frac{\sigma}{E} = \frac{10\%}{\sqrt{E}} \oplus \frac{25\%}{E} \oplus 0.3\%$$

Rozdzielczość $\frac{\sigma}{E} \sim 1.1\%$ przy $E = 100\text{GeV}$



Kalorymetry

Kalorymetr EM detektora ATLAS

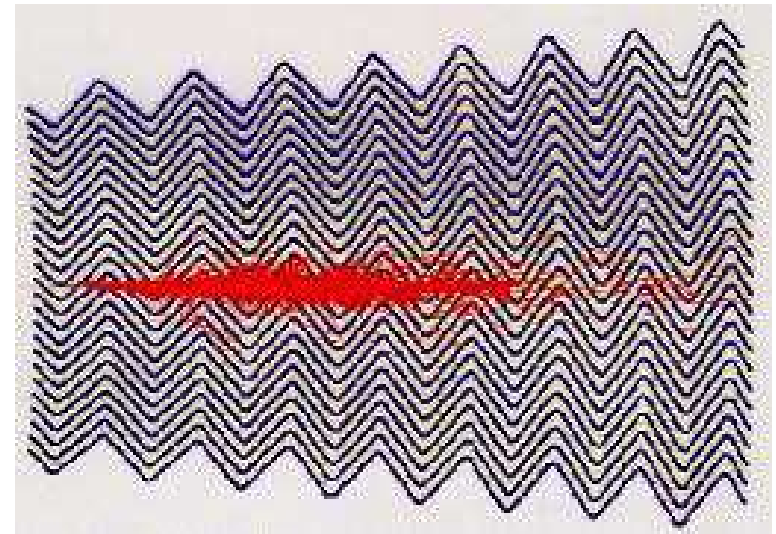
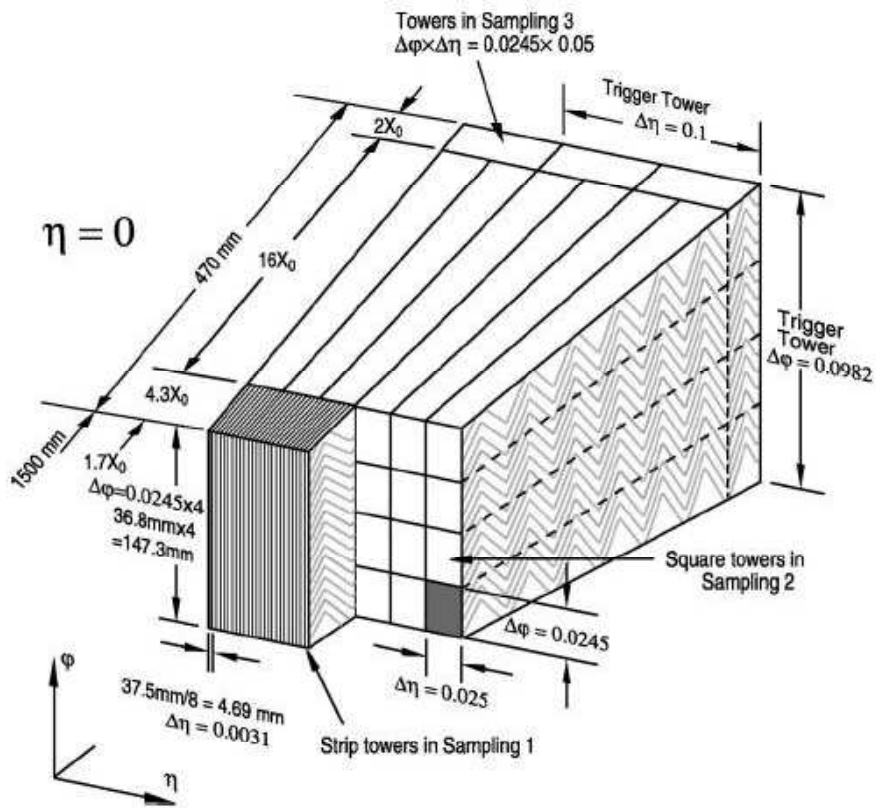


FIG. 17. Schematic view of the segmentation of the ATLAS electromagnetic calorimeter.

Kalorymetry

Dokładność pomiaru

Dla kalorymetrów próbkujących wciąż obowiązuje parametryzacja

$$\frac{\sigma}{E} = \frac{a}{\sqrt{E}} \oplus \frac{b}{E} \oplus c$$

Jednak w człon a wchodzi teraz głównie fluktuacje związane z “próbkowaniem”

- Jedynie mała część energii jest deponowana w warstwach aktywnych. Ułamek ten fluktuuje od przypadku do przypadku $\Rightarrow \left(\frac{\sigma}{E}\right)_{\text{sampl}} \sim \sqrt{\frac{t_{\text{abs}}}{E}}$ gdzie t_{abs} - grubość warstw absorbera
- Dodatkowo depozyt energii w cienkich warstwach może mieć bardzo niesymetryczny rozkład \Rightarrow fluktuacje Landaua
- Cząstki przechodzą rzez warstwę aktywną pod różnymi kątami \Rightarrow fluktuacje długości toru

Kalorymetry

Kalorymetry próbkujące

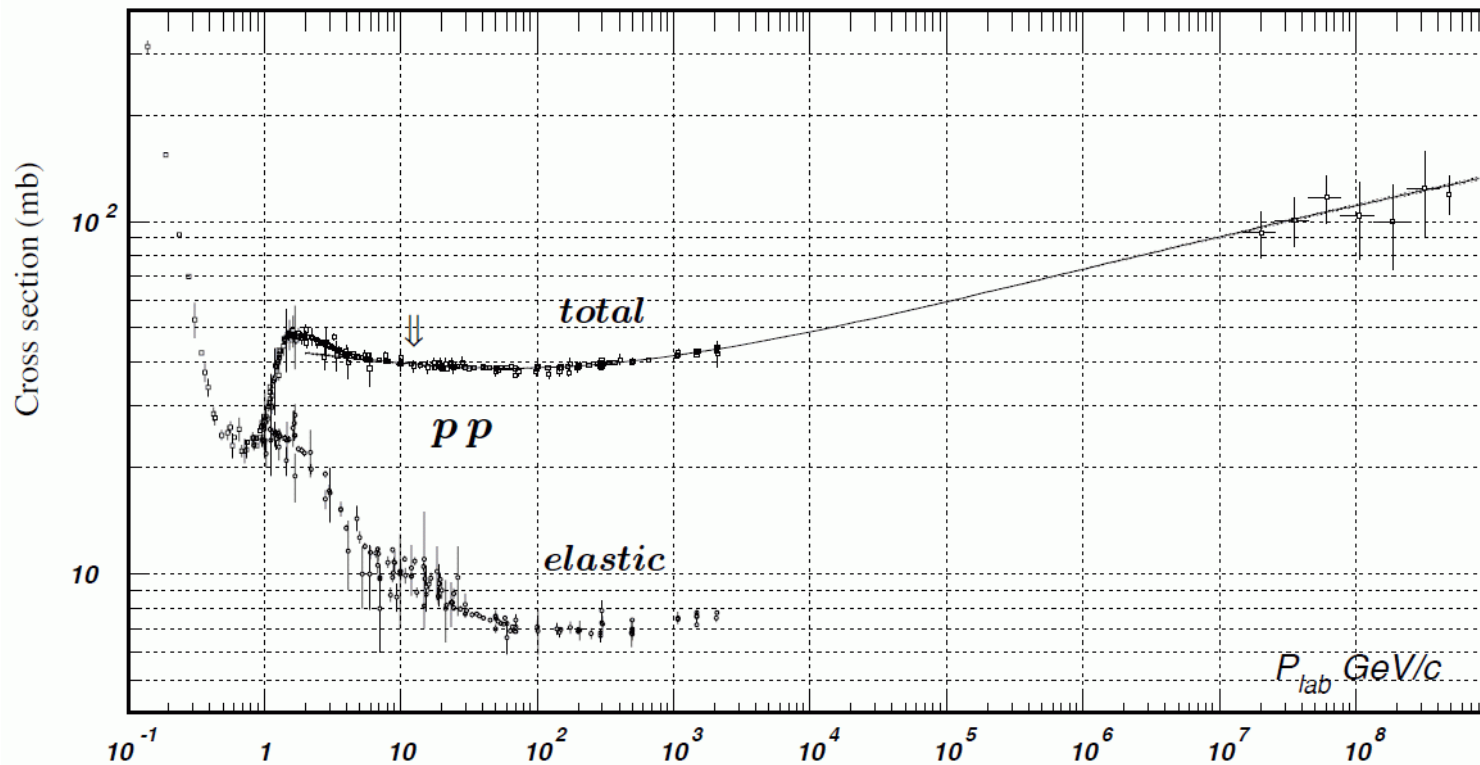
Zdolności rozdzielcze typowych elektromagnetycznych kalorymetrów próbkujących w eksperymentach HEP

Scintillator/depleted U (ZEUS)	$20\text{--}30X_0$	$18\%/\sqrt{E}$	1988
Scintillator/Pb (CDF)	$18X_0$	$13.5\%/\sqrt{E}$	1988
Scintillator fiber/Pb spaghetti (KLOE)	$15X_0$	$5.7\%/\sqrt{E} \oplus 0.6\%$	1995
Liquid Ar/Pb (NA31)	$27X_0$	$7.5\%/\sqrt{E} \oplus 0.5\% \oplus 0.1/E$	1988
Liquid Ar/Pb (SLD)	$21X_0$	$8\%/\sqrt{E}$	1993
Liquid Ar/Pb (H1)	$20\text{--}30X_0$	$12\%/\sqrt{E} \oplus 1\%$	1998
Liquid Ar/depl. U (DØ)	$20.5X_0$	$16\%/\sqrt{E} \oplus 0.3\% \oplus 0.3/E$	1993
Liquid Ar/Pb accordion (ATLAS)	$25X_0$	$10\%/\sqrt{E} \oplus 0.4\% \oplus 0.3/E$	1996

Hadrony

Przekrój czynny

Dla hadronów przekrój czynny na rozpraszanie elastyczne szybko maleje z energią.



Dla $E > 1 GeV$ dominuje r. nieelastyczne, σ_I praktycznie nie zależy od energii.

Hadrony

Droga na oddziaływanie

Prawdopodobieństwo nieelastycznego rozproszenia w funkcji drogi w materiale:

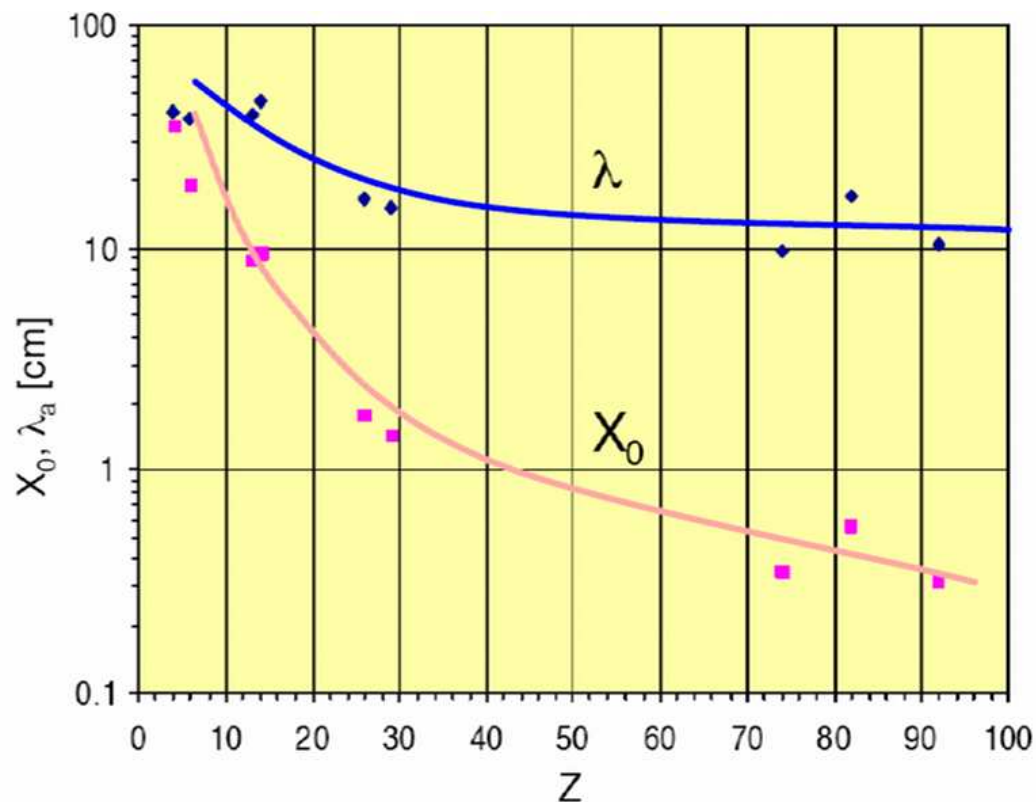
$$p(x) = \frac{1}{\lambda_I} \cdot \exp\left(-\frac{x}{\lambda_I}\right)$$

λ_I - średnia droga na oddziaływanie w danym materiale.

$$\lambda_I \approx 35 \text{ g/cm}^2 A^{1/3}$$

	λ_I	X_0	λ_I/X_0
$_{13}\text{Al}$	39.4 cm	8.9 cm	4
$_{26}\text{Fe}$	16.8 cm	1.76 cm	10
$_{29}\text{Cu}$	15.1 cm	1.43 cm	11
$_{82}\text{Pb}$	17.1 cm	0.56 cm	30

Średnia droga na oddziaływanie maleje z Z , ale nie tak szybko jak X_0



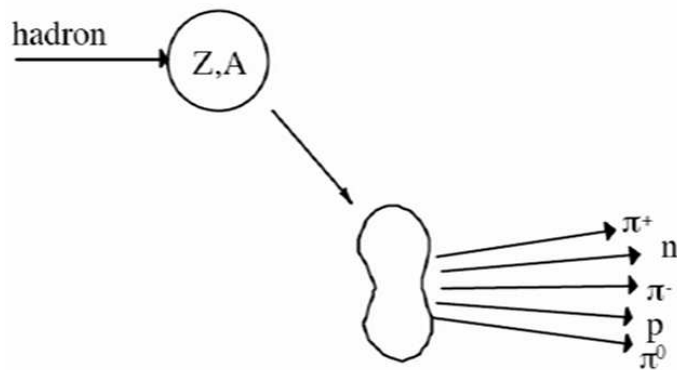
Hadrony

Kaskada hadronowa

Wysokoenergetyczne hadrony (neutralne i naładowane) oddziałują silnie z nukleonami/jądrami ośrodka.

Produkowane są cząstki wtórne.

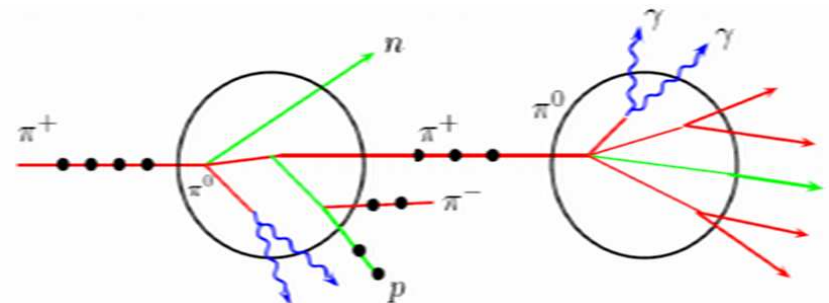
Krotność cząstek $N \sim \ln E$



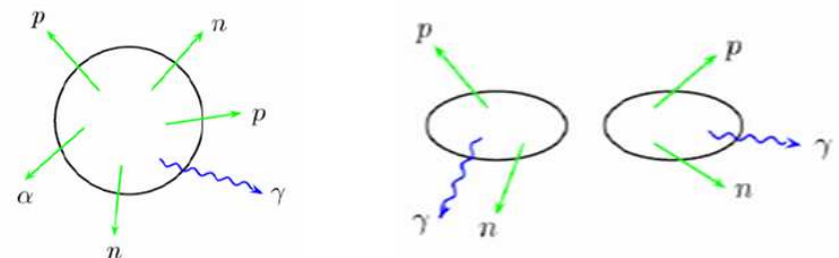
Cząstki wtórne mogą powodować kolejne reakcje \Rightarrow kaskada

Cząstki tracą także energię na wzbudzenia jąder i jonizację.

Rozpady $\pi^0 \Rightarrow$ składowa E-M kaskady



Deekscytacja jąder - opóźniona emisja cząstek



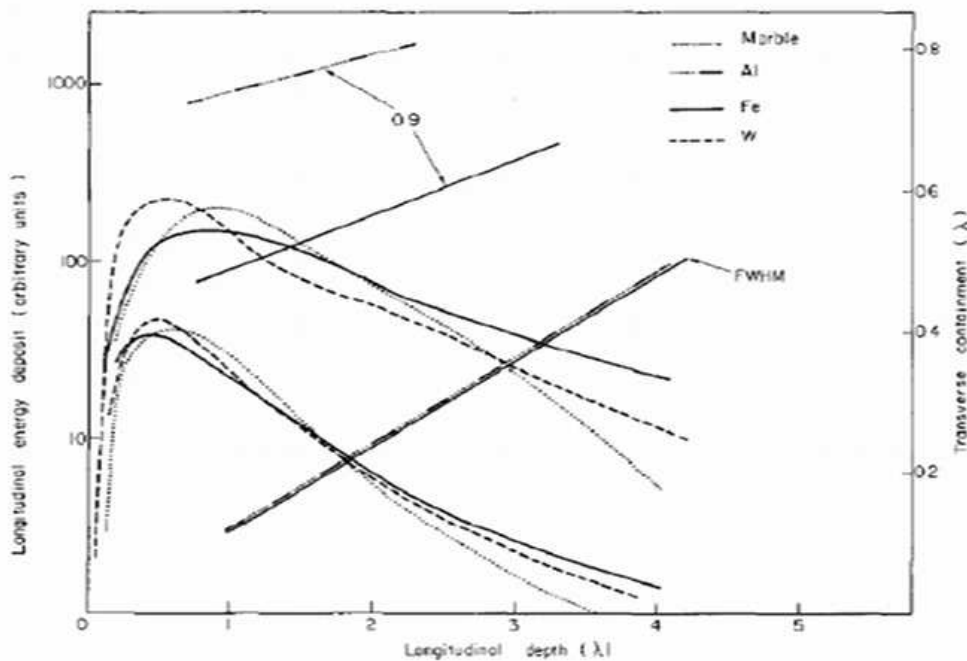
Hadrony

Kaskada hadronowa

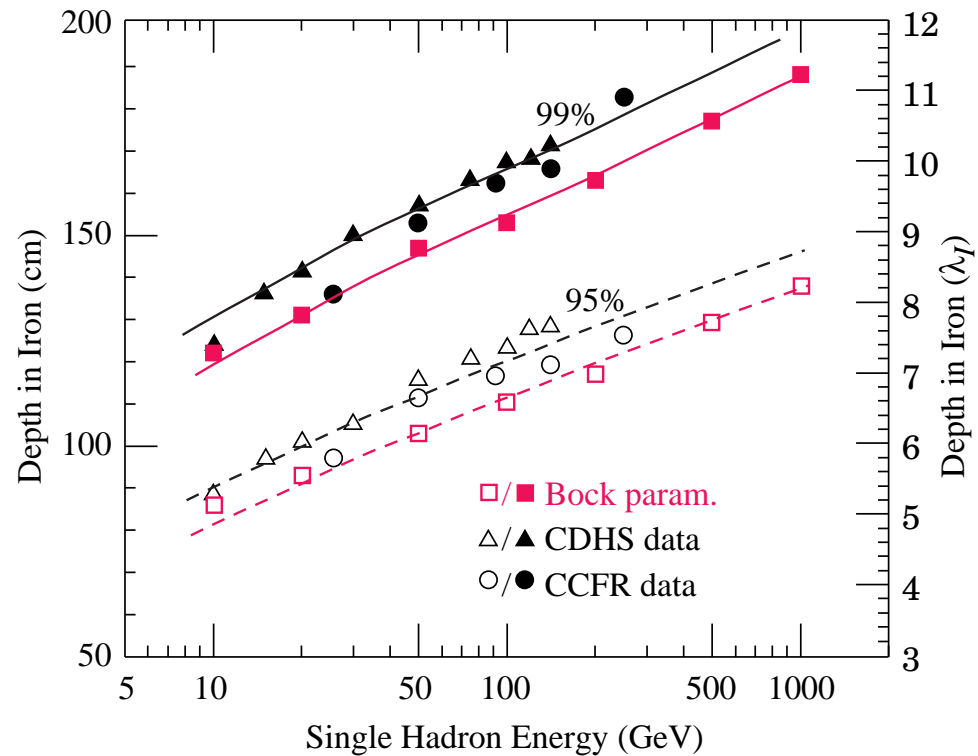
Długość kaskady skaluje się w λ_I

Pozycja maksimum [λ_I]:

$$t_{max} \approx 0.2 \ln E[\text{GeV}] + 0.7$$



Grubość warstwy żelaza potrzebna do “za-trzymania” kaskady (95% lub 99% energii):



również rośnie logarytmicznie z energią

Kalorymetry

Kaskady hadronowe

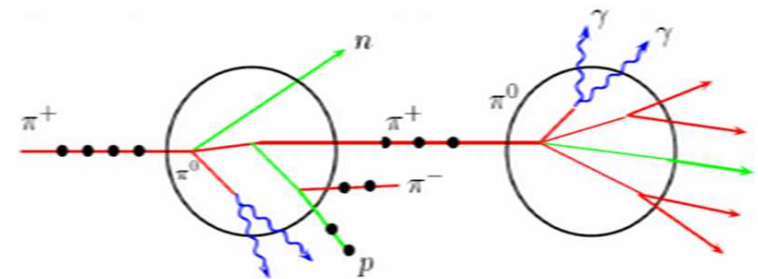
Tak jak w przypadku kaskad elektromagnetycznych, energia cząstki pierwotnej tracona jest w wielu kolejnych (silnych) oddziaływaniach z absorberem.

Zachodzące procesy są jednak dużo bardziej złożone.

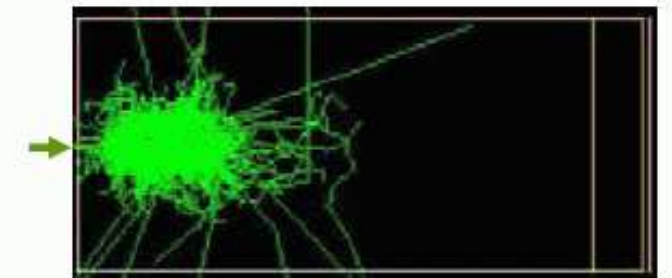
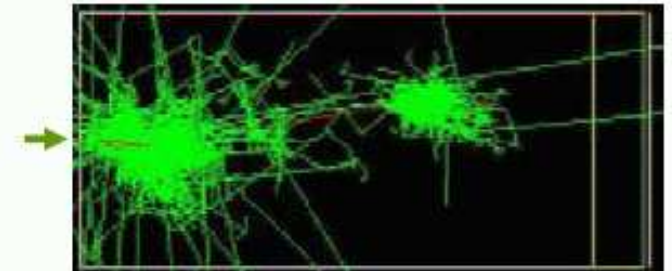
Oprócz produkcji wysokoenergetycznych cząstek wtórnych energia tracona jest na procesy jądrowe: wzbudzenia, rozszczepienia i energie odrzutu jąder.

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

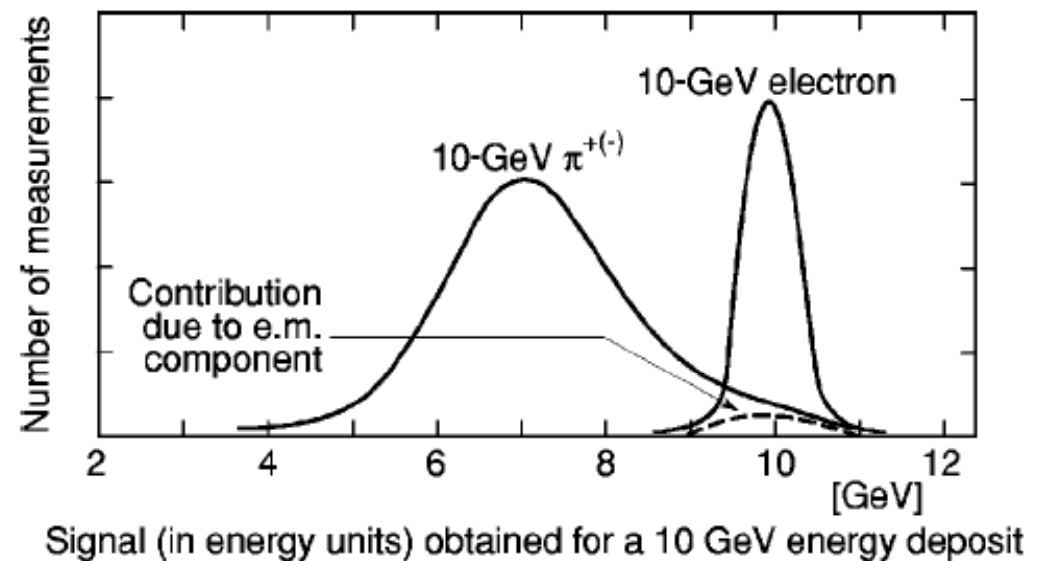
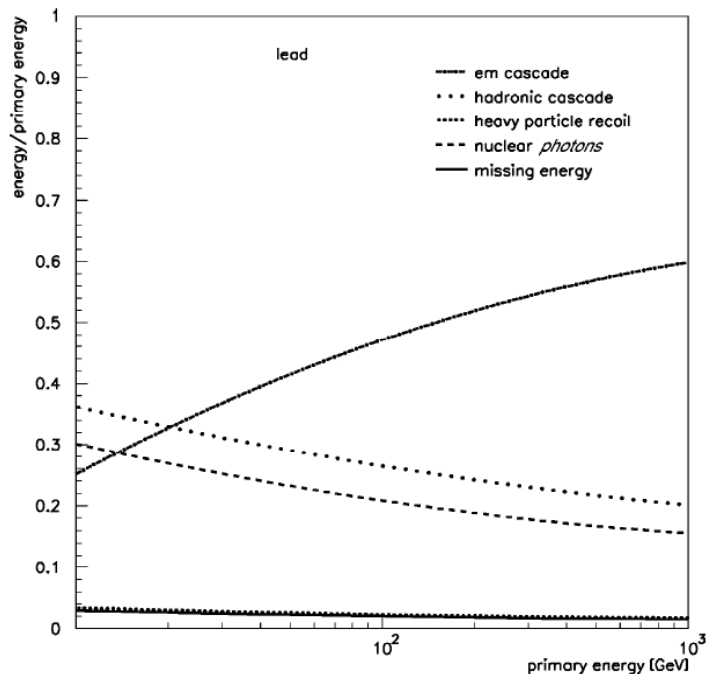
Kalorymetry

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



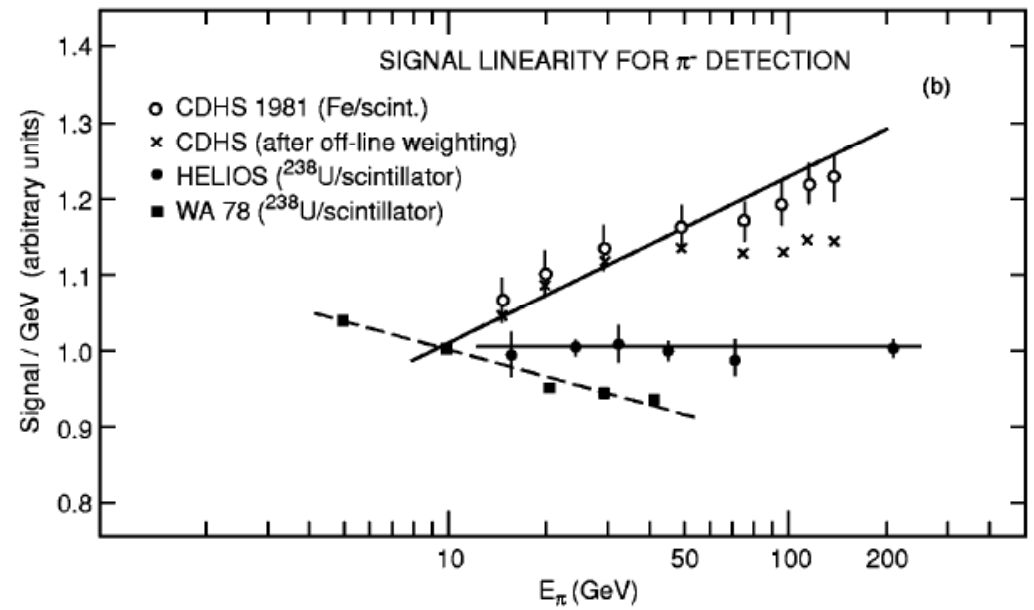
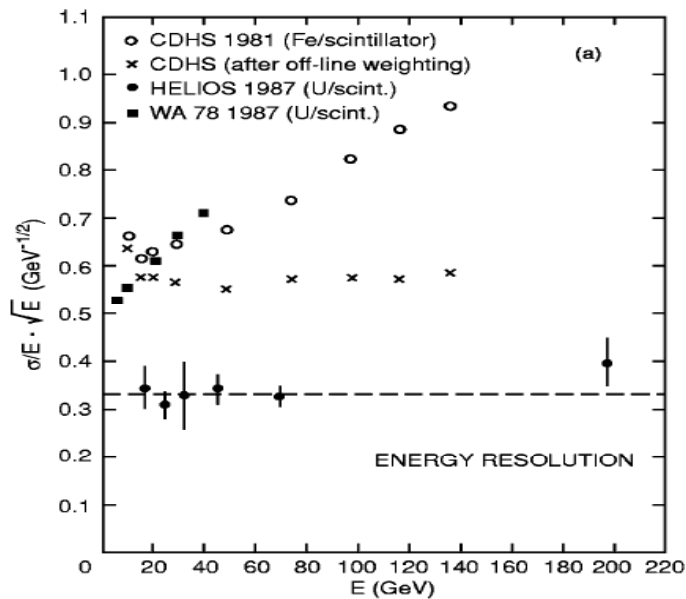
Kalorymetry

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.

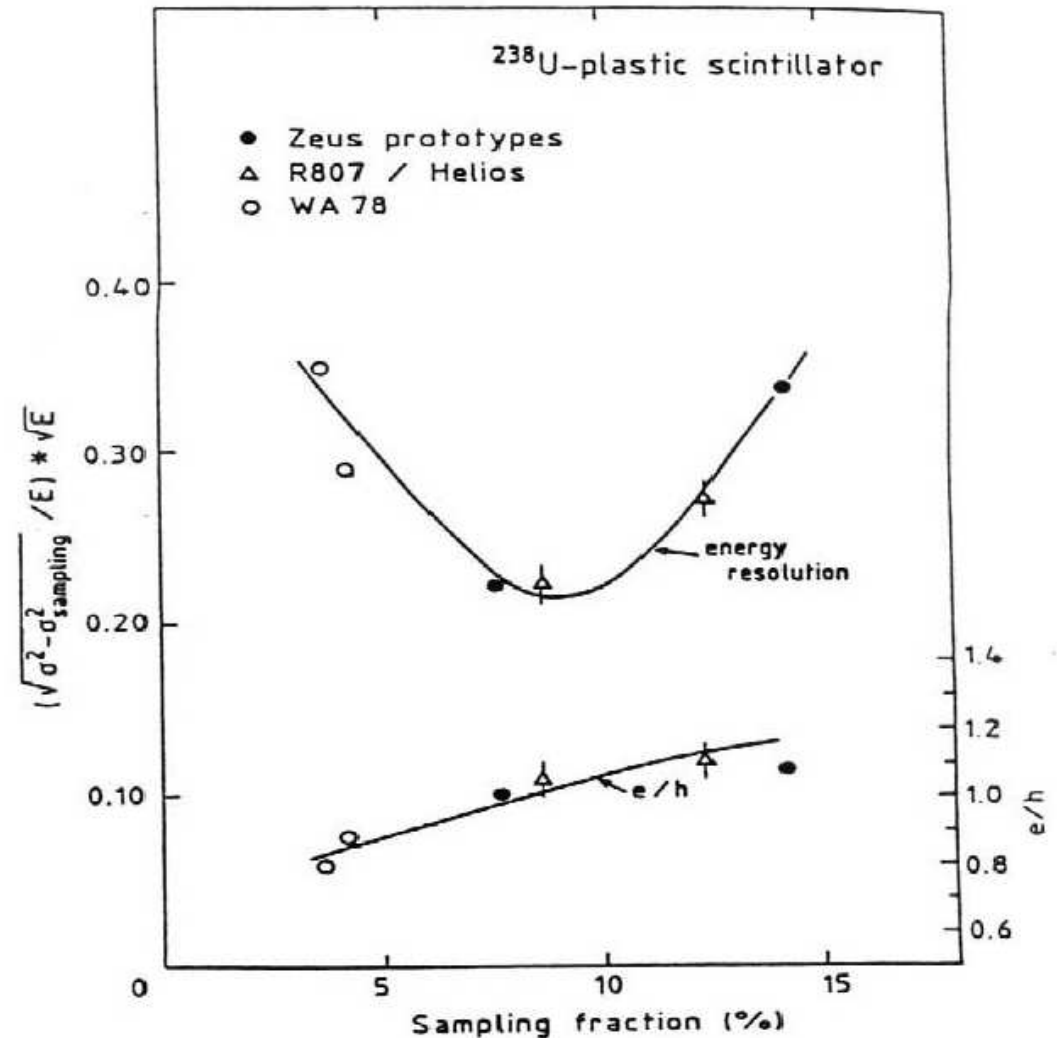
Kalorymetry

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

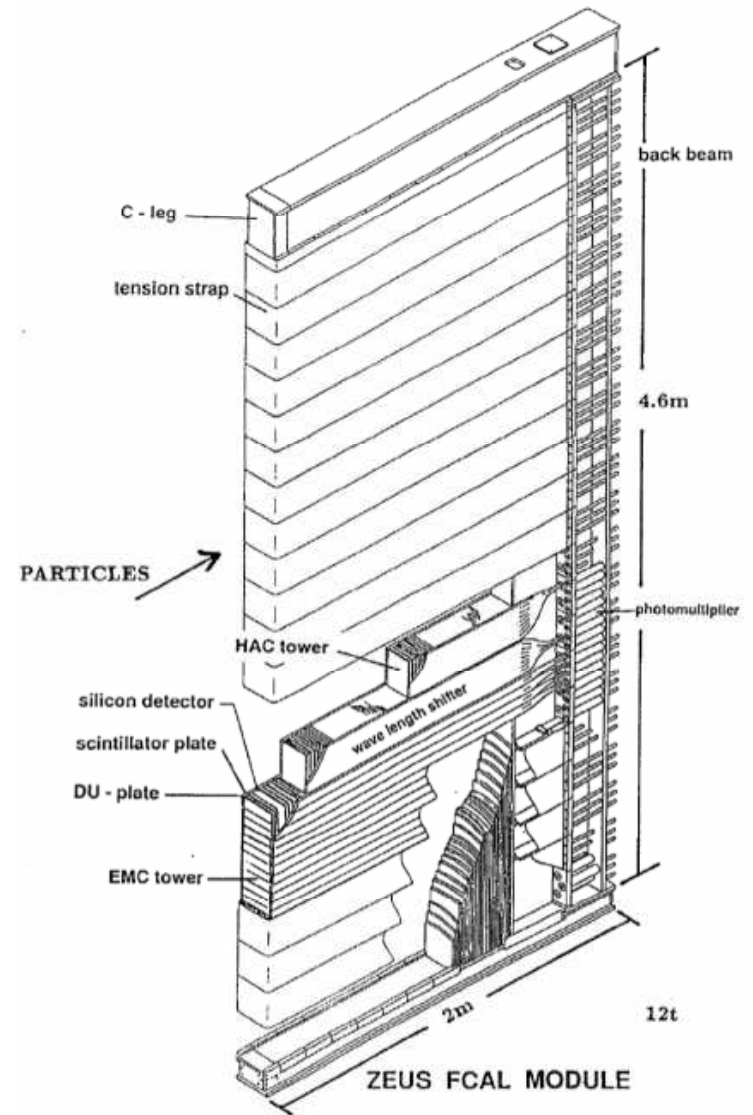
$$\frac{e}{h} = 1.00 \pm 0.02$$

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.

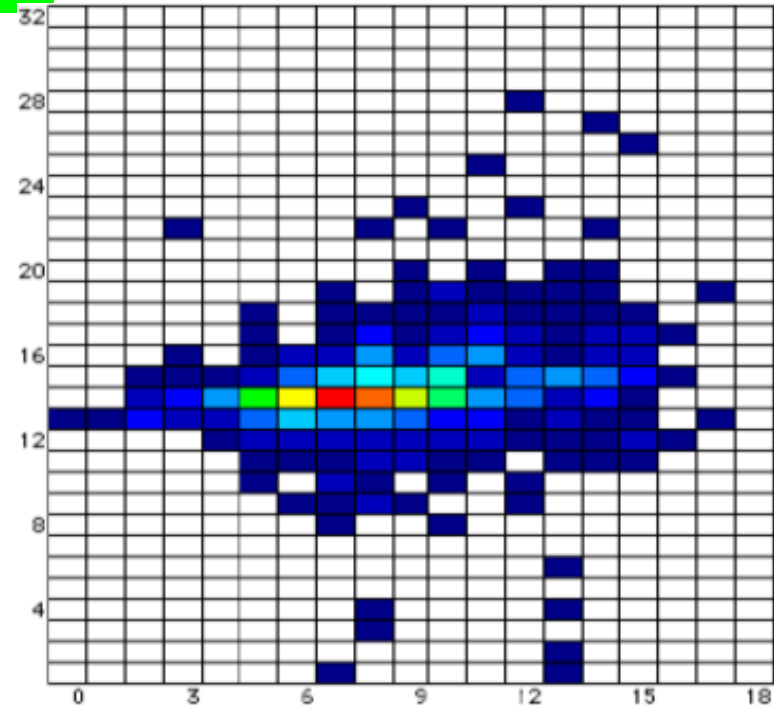
Odpowiedź kalorymetru na pojedynczy hadron:

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

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

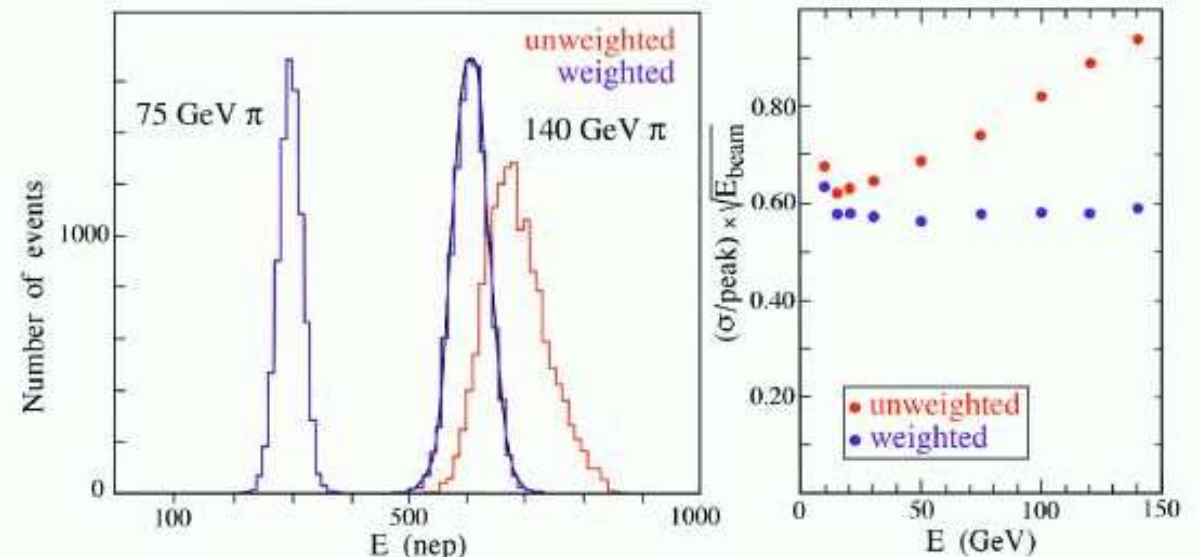
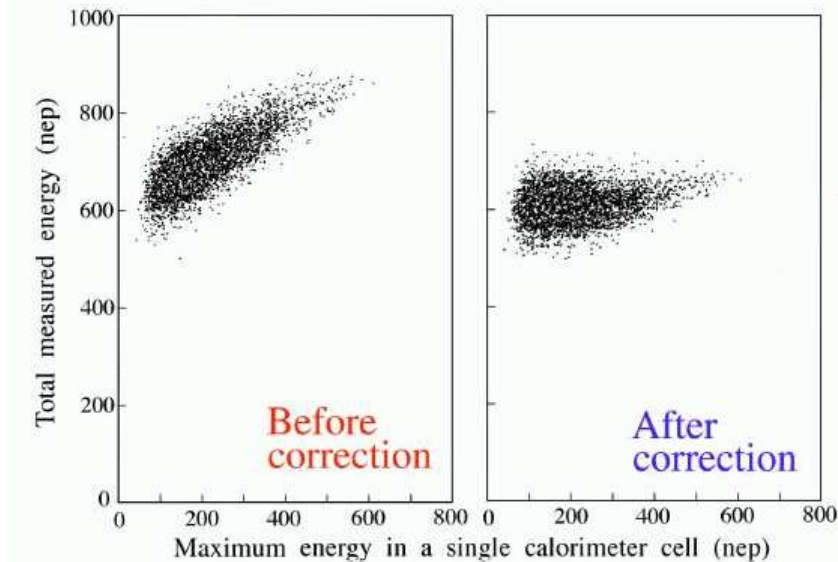
Kompensacja algorytmiczna

Po raz pierwszy zastosowana w eksperymencie WA1.

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

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

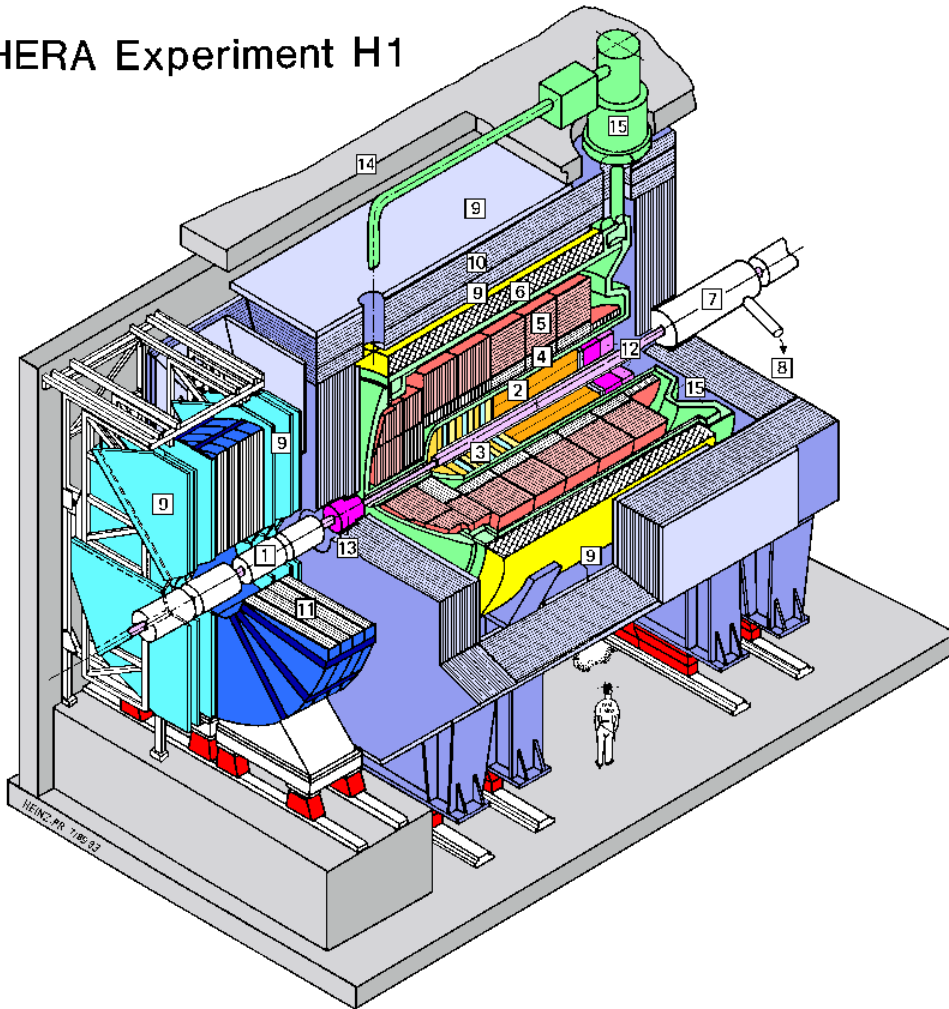
Działa tylko dla pojedynczych cząstek.



Kalorymetry

Kalorymetr detektora H1

HERA Experiment H1

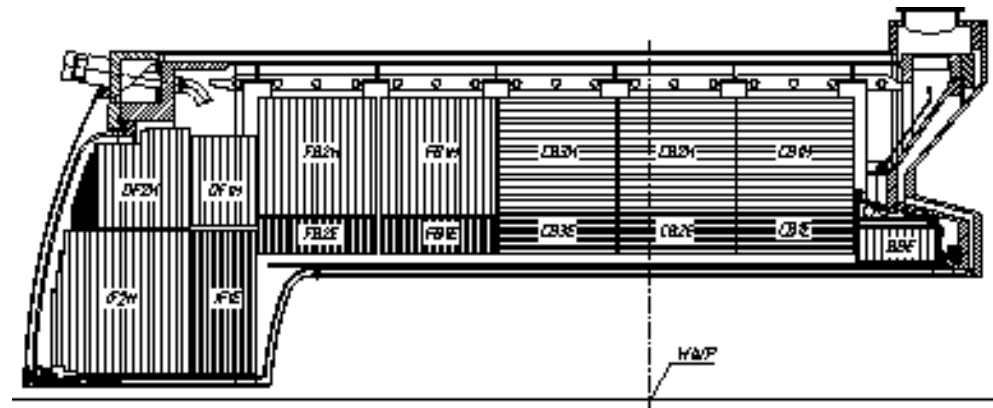


Kalorymetr z **ciekłym argonem**.

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

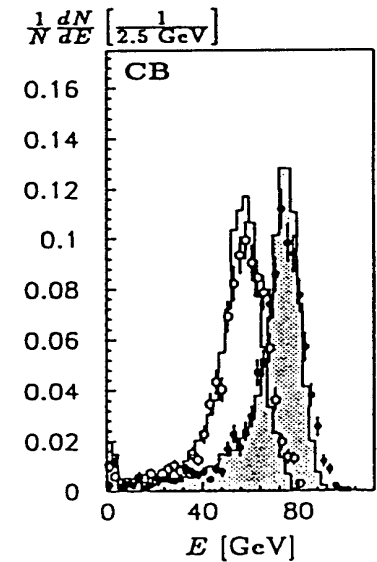
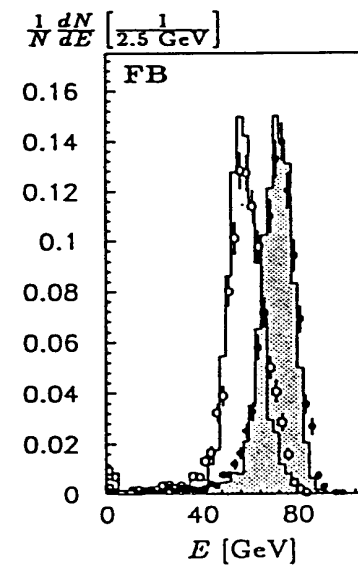
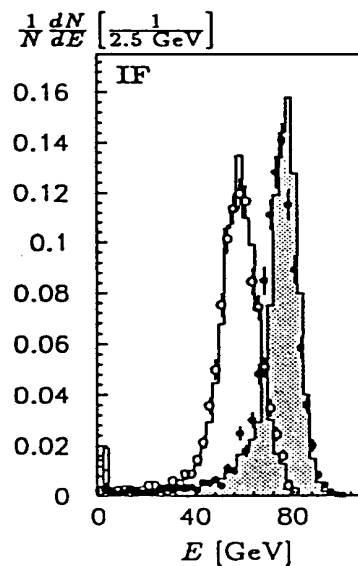
Algorytm kompensacji w pomiarze energii:

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

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

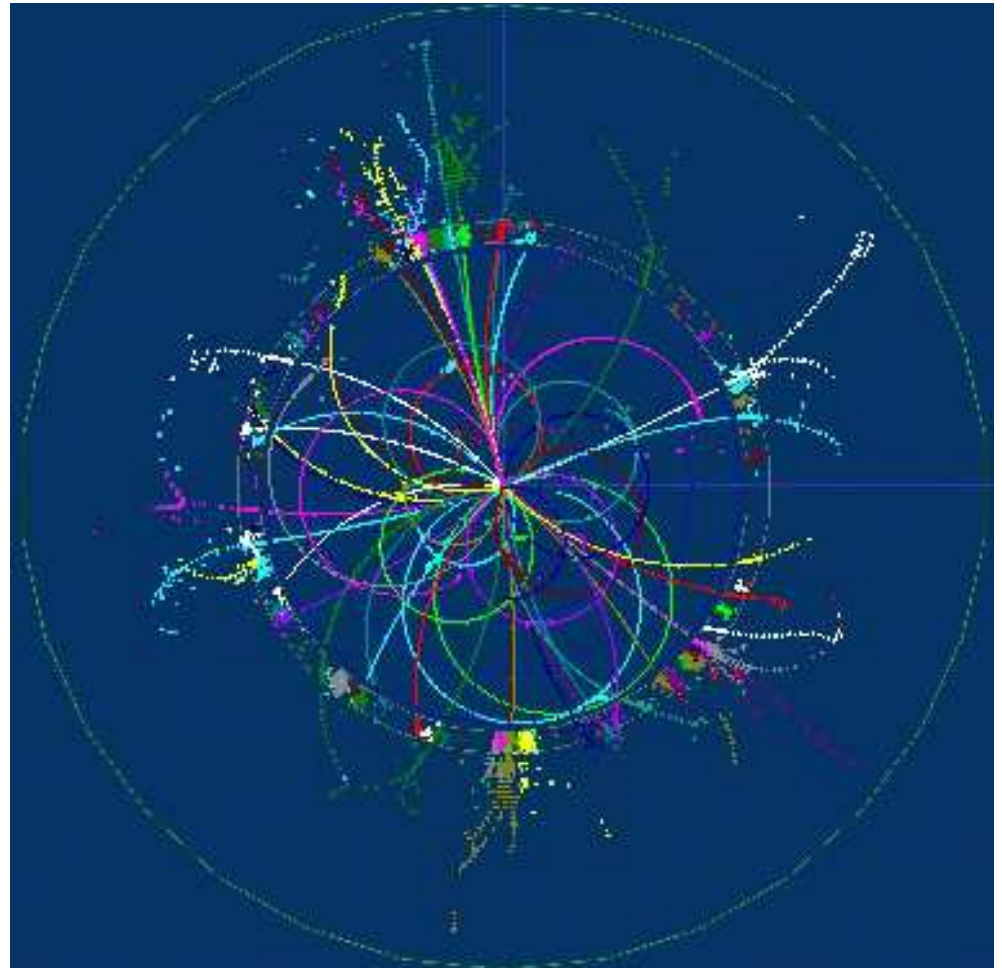
Nowe koncepcje

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

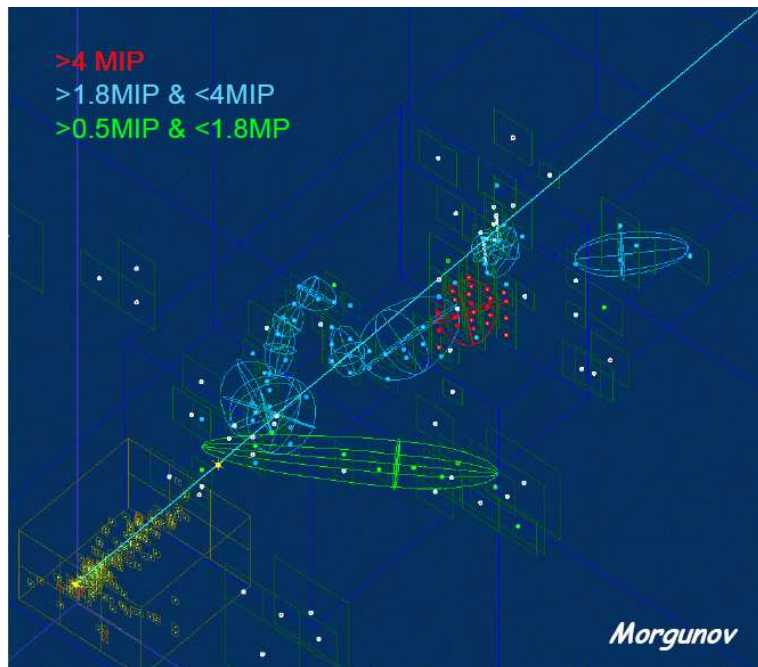


Kalorymetry

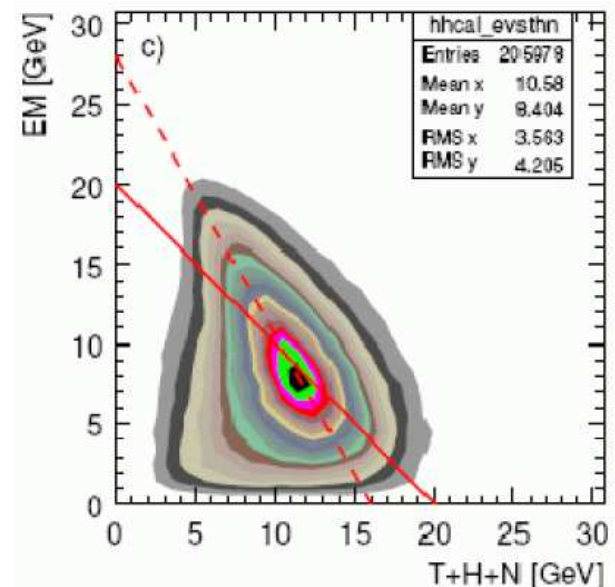
Nowe koncepcje Kalorymetr śladowy

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^+



Kalorymetry

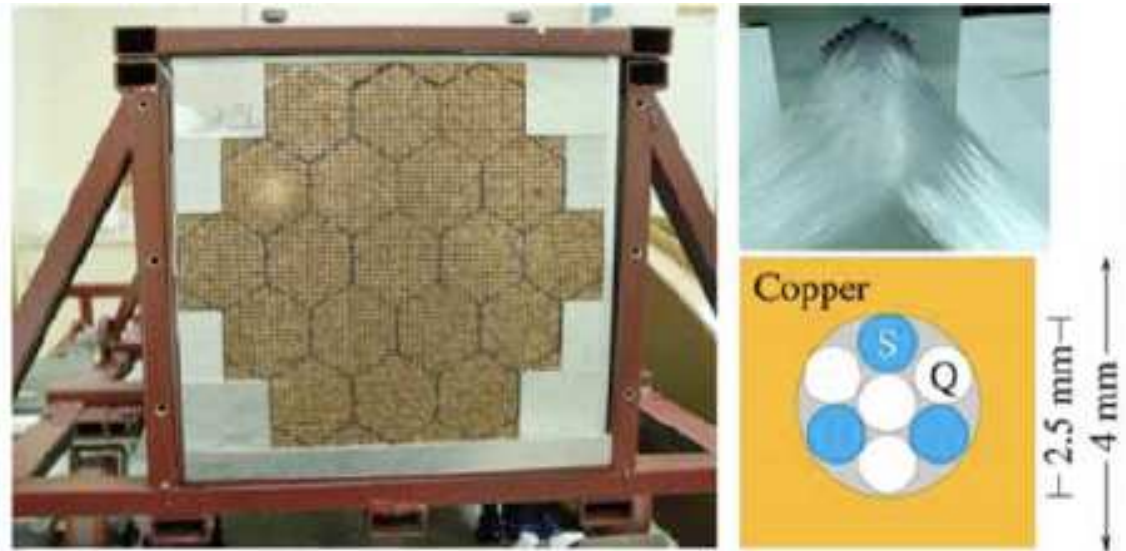
Nowe koncepcje

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

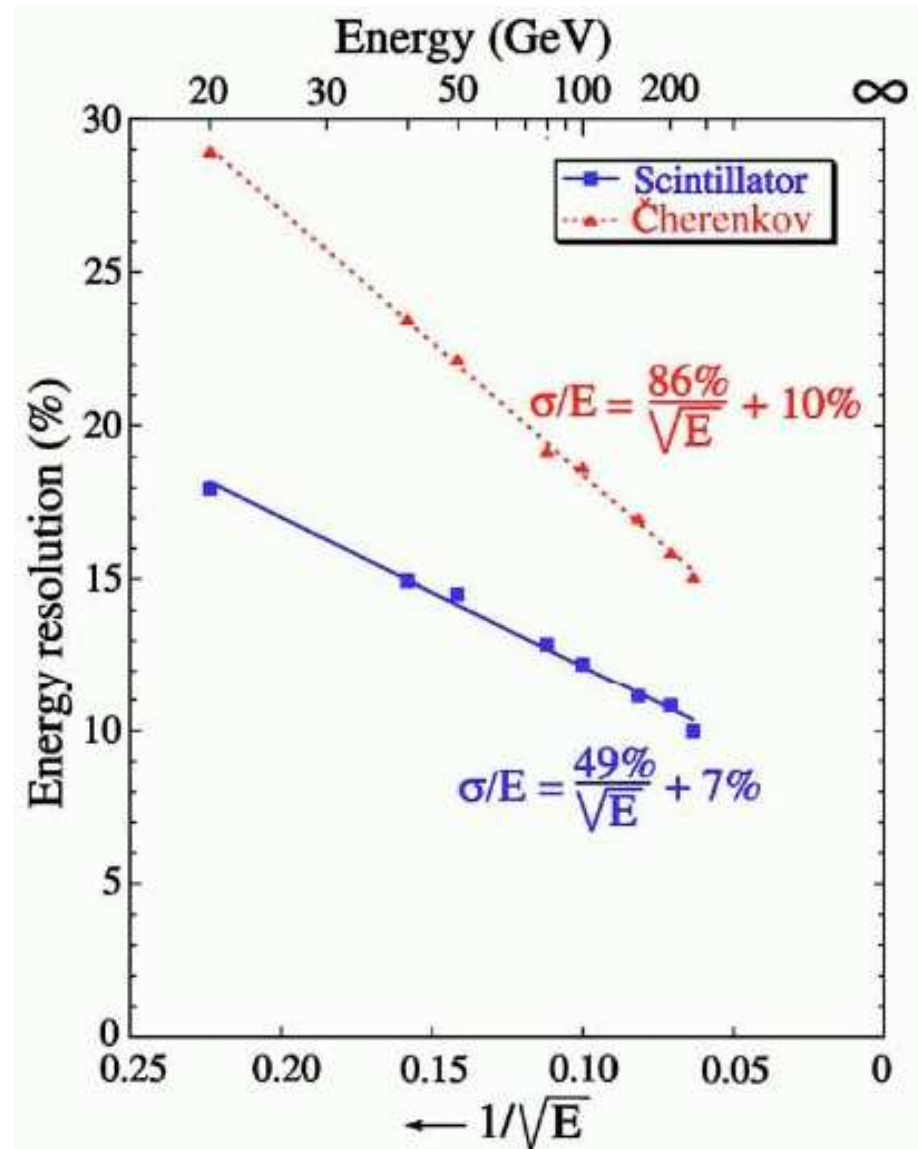
Nowe koncepcje

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:

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

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

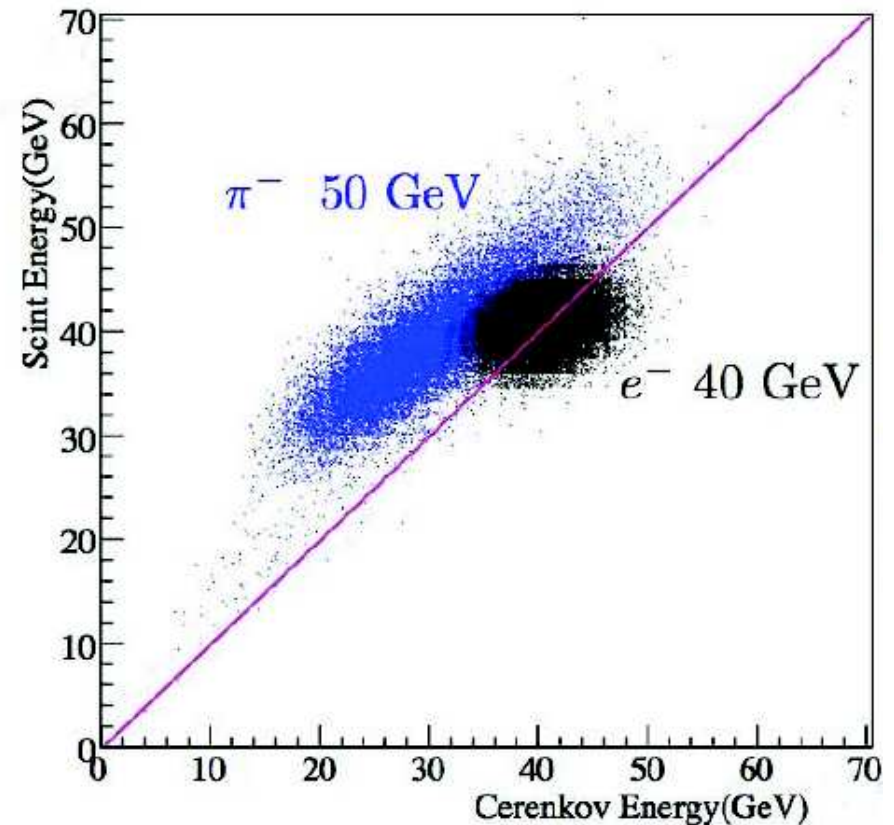
Znając współczynniki tłumienia składowej hadronowej w obu odczytach

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

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

możemy z dwóch pomiarów wyznaczyć f_{em} i E

⇒ znacznie lepsza zdolność rozdzielcza

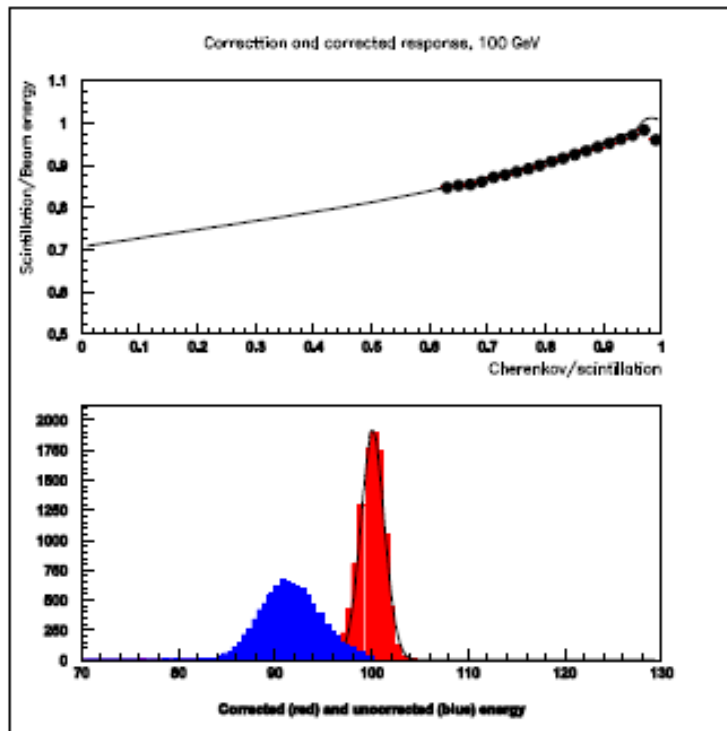


Kalorymetry

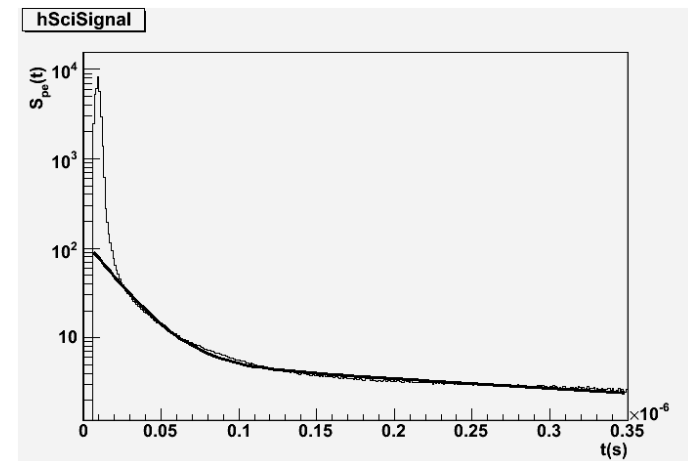
Nowe koncepcje

Podwójny odczyt pozwala na uzyskanie

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



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



\Rightarrow dodatkowa informacja o stratach w procesach jądrowych

\Rightarrow dalsze polepszenie pomiaru energii

Kalorymetry

Nowe koncepcje

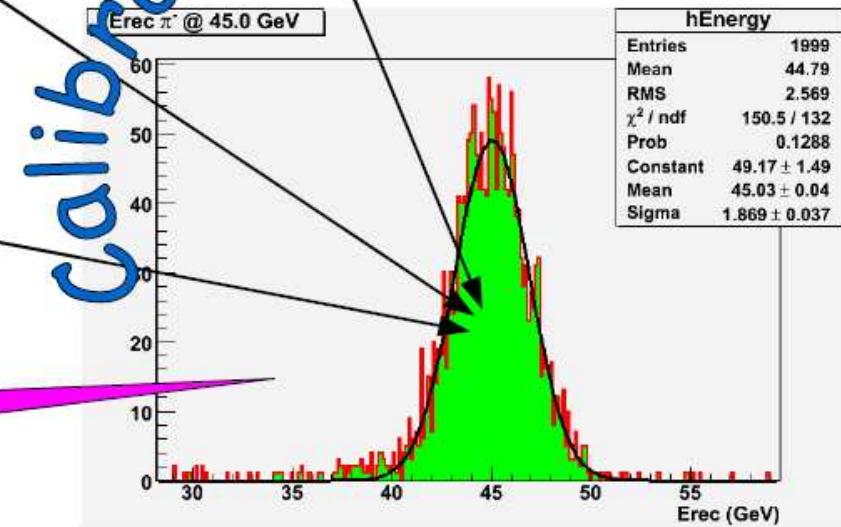
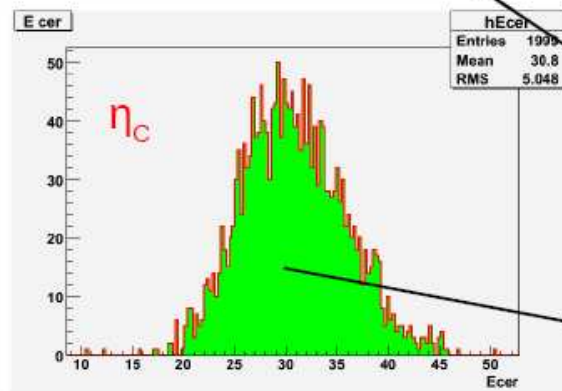
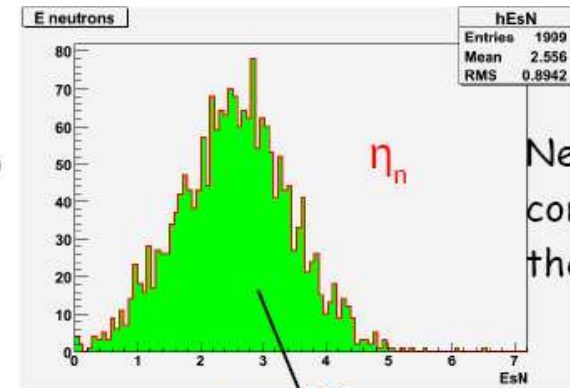
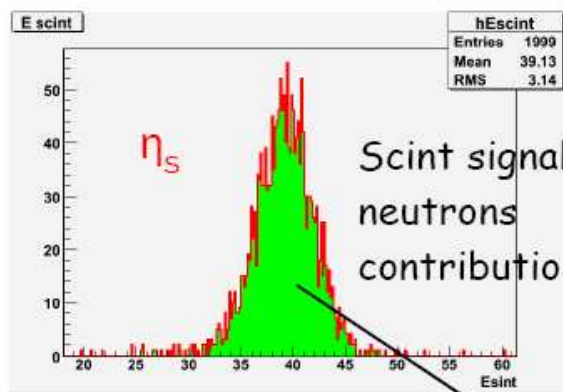
Potrójny odczyt:

- 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.

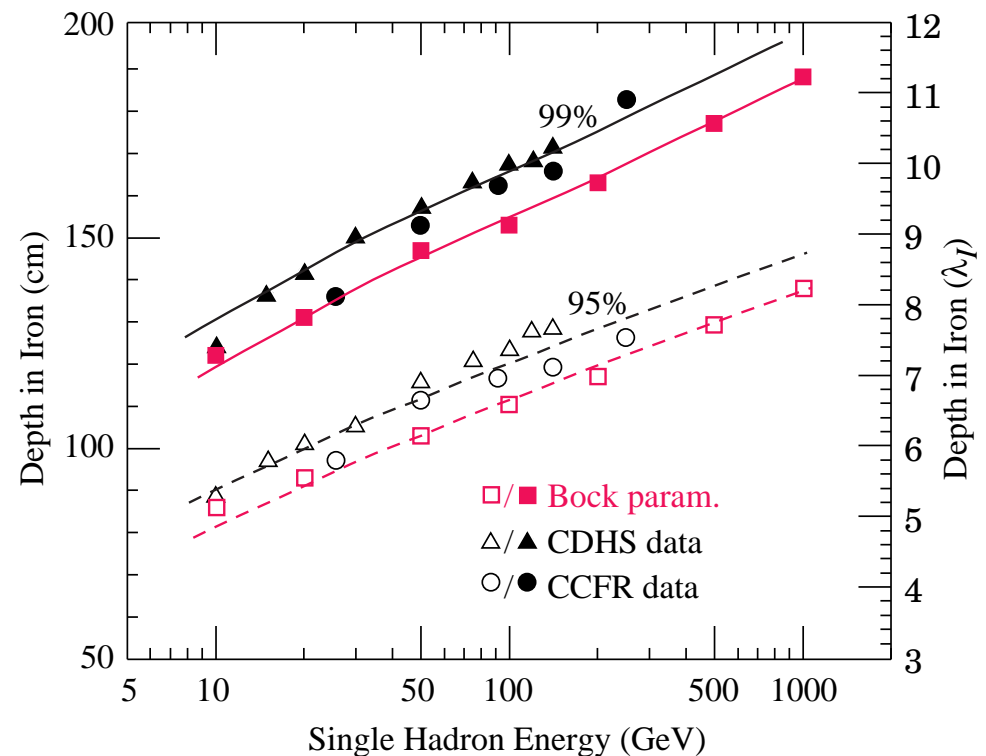
Stosunkowo łatwo zatrzymać 95% kaskad.

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

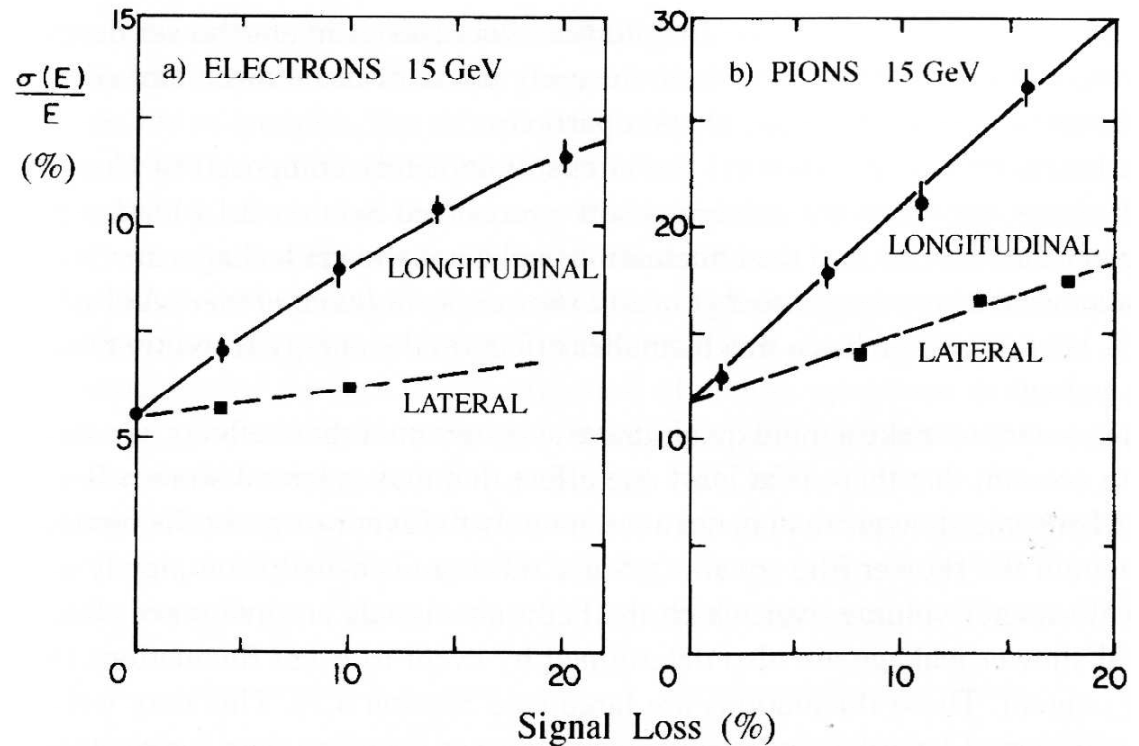
Wpływ wyływów energii na dokładność pomiaru (w przypadku braku poprawek)

Parametryzacja:

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

f - ułamek traconej energii

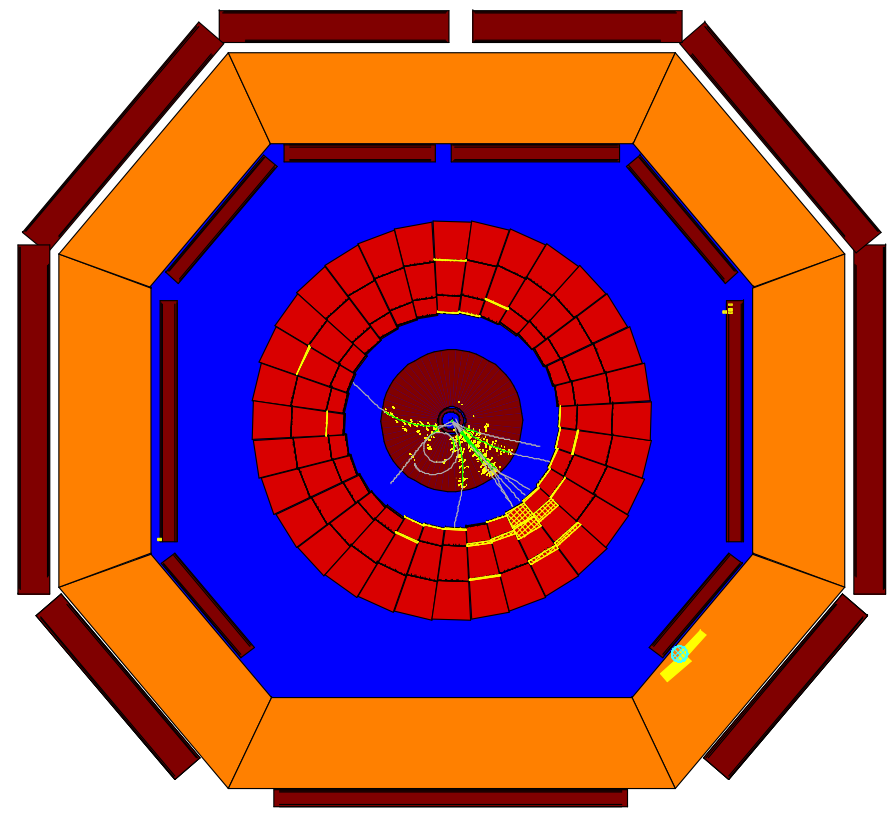
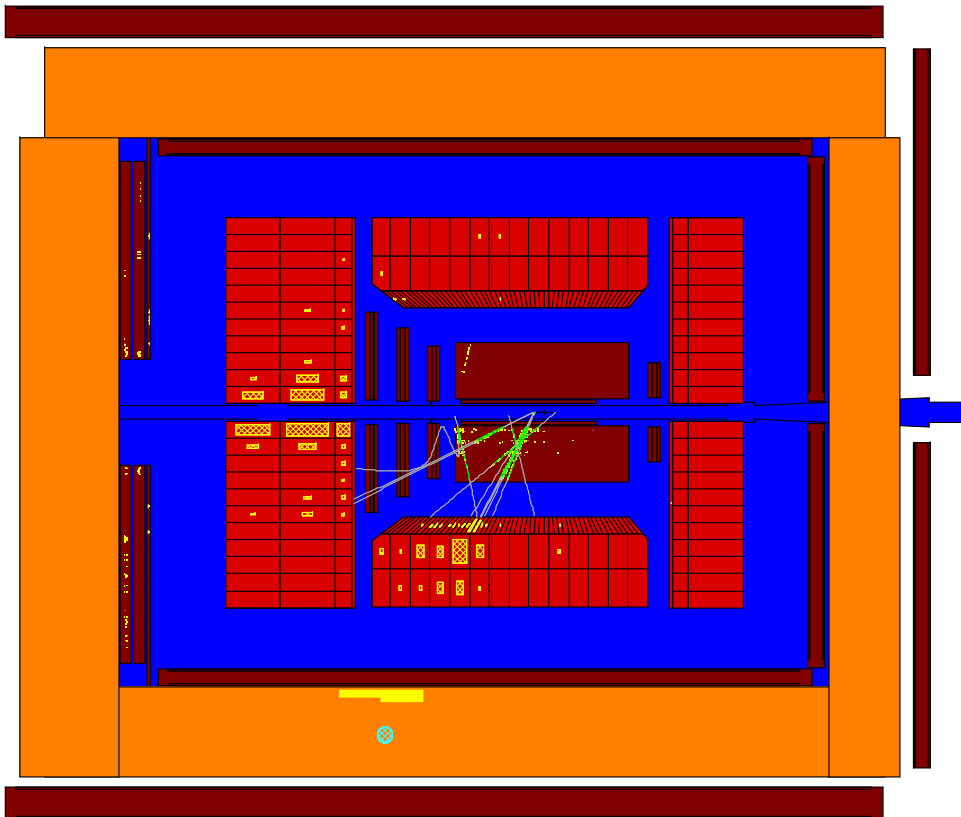
Aby zapewnić dokładny pomiar energii trzeba przynajmniej rozpoznawać takie przypadki.



Kalorymetry

Wyptywy energii

Wyptyw energii jetu obserwowany w kalorymetrze uzupełniającym detektora ZEUS



Kalorymetry

Wyływy energii

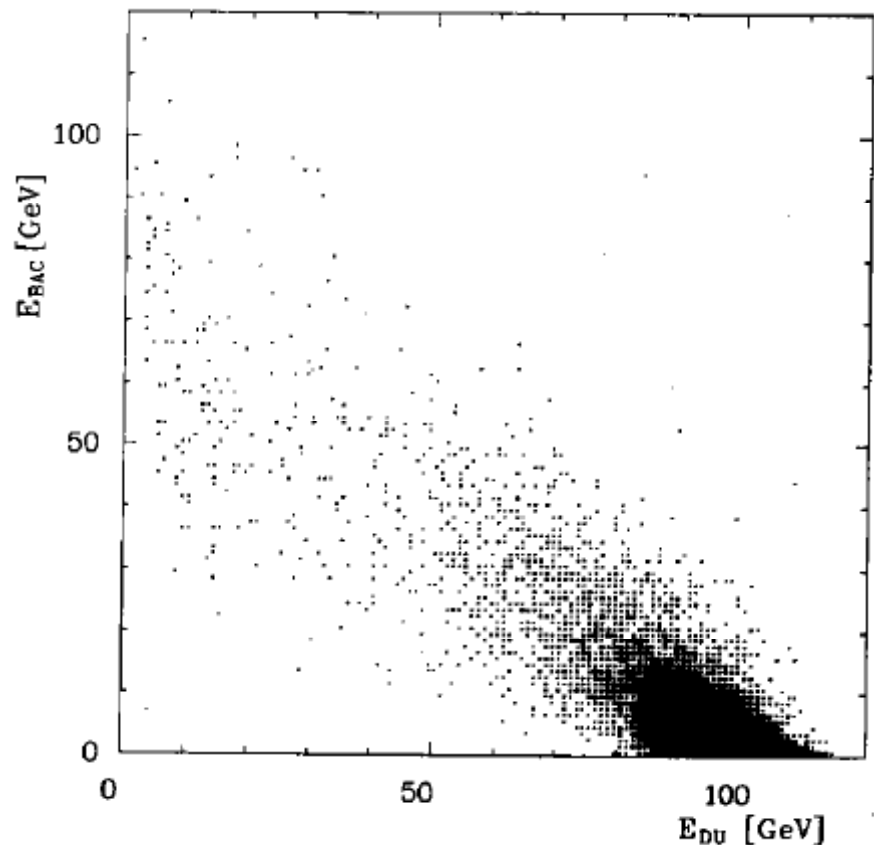
W detektorze ZEUS tzw. kalorymetr uzupełniający (BAC) wykorzystywał płyty stalowe jarzma elektromagnesu, pomiędzy które wstawiono aluminiowe komory proporcjonalne.

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

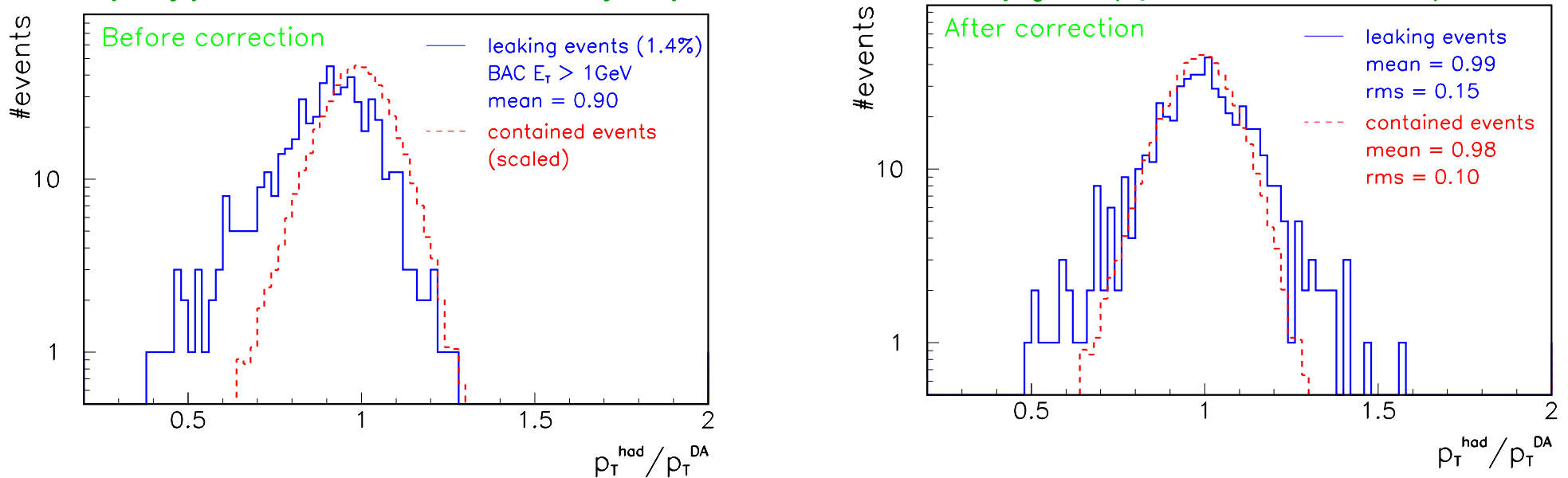


Kalorymetry

Wyływy energii

Wpływ kalorymetru uzupełniającego na pomiar pędu poprzecznego jetu.

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



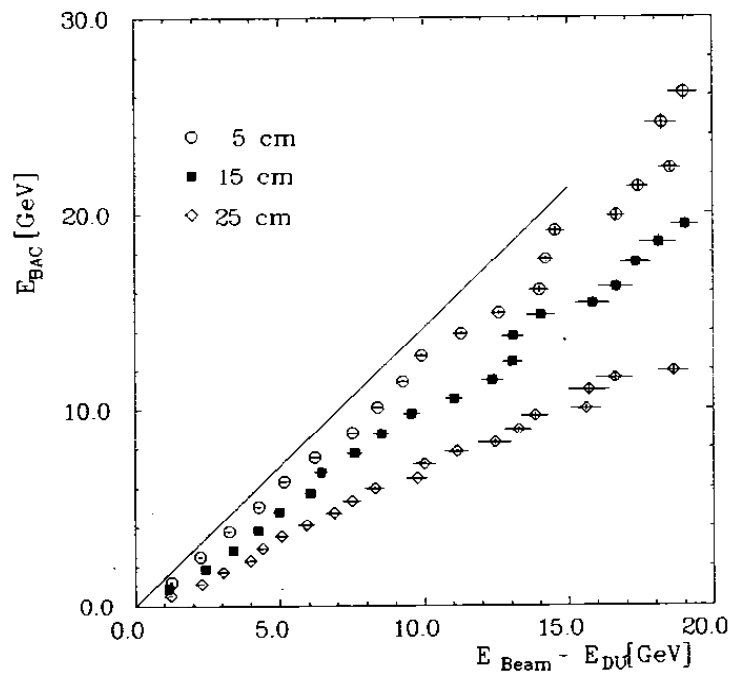
Mimo dużej gorszej zdolności rozdzielczej może efektywnie “odcinać” wpływające kaskady, lub poprawiać ich energię.

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

Kalorymetry

Wyptywy 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)

