

# Metody eksperymentalne w fizyce wysokich energii

prof. dr hab. A.F.Żarnecki

Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych IFD

## Wykład V

- Kalorymetry

# Kalorymetry

Detektory śladowe umieszczone w polu magnetycznym umożliwiają dokładny pomiar pędu cząstek naładowanych.

Dokładność pomiaru maleje jednak z pędem cząstek ( $\sigma(p_T) \sim p_T^2 \oplus \dots$ )

⇒ rozmiary detektorów śladowych rosną liniowo z energią

Detektory śladowe są również “ślepe” na cząstki neutralne (fotony, neutrony, kaony...)

Aby móc dokładnie zrekonstruować energie wszystkich obserwowanych cząstek potrzebujemy alternatywnej metody pomiaru ⇒ kalorymetry

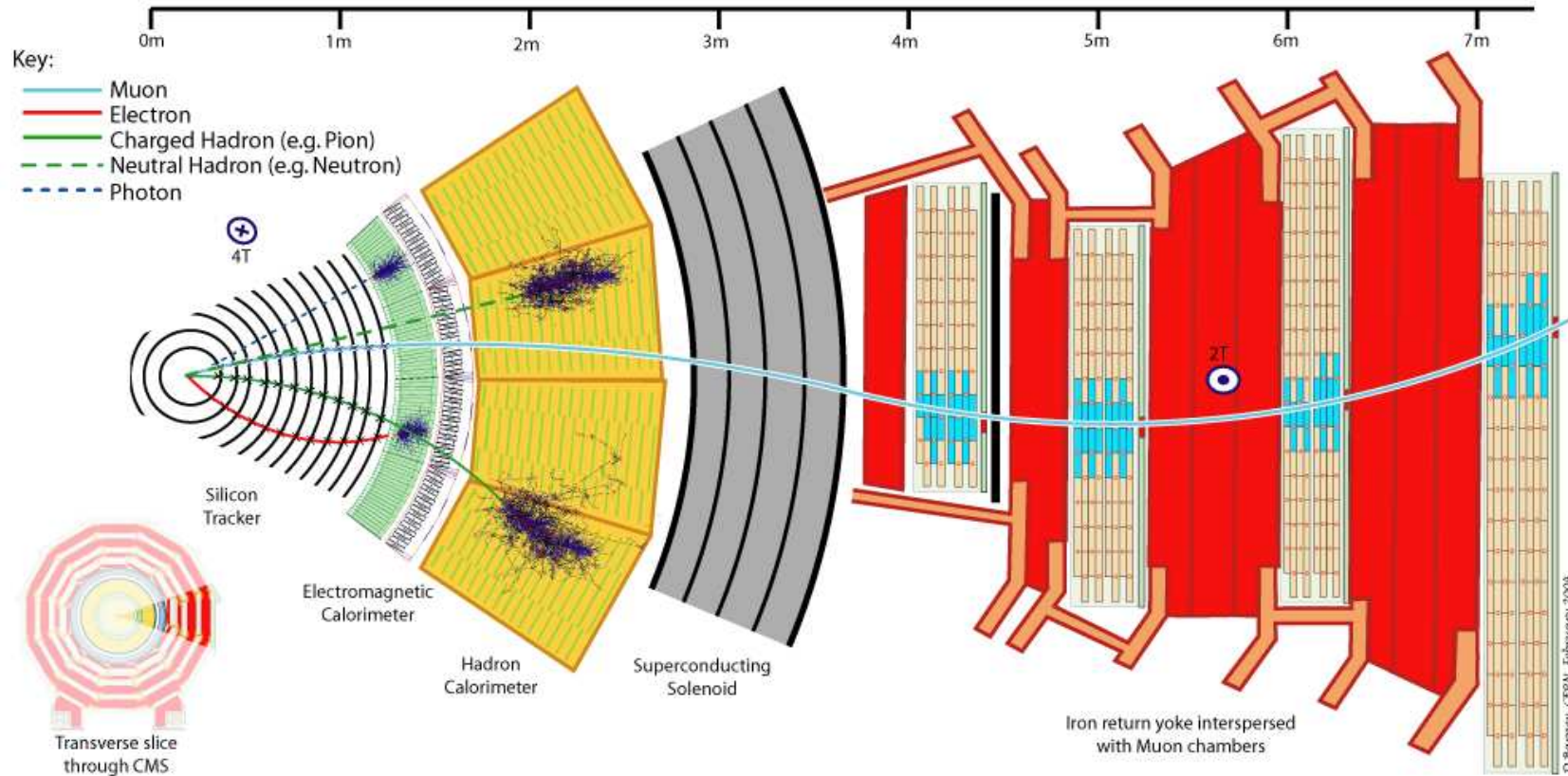
**Kalorymetry:** urządzenia w których wpadające cząstki lub strugi cząstek są całkowicie absorbowane, a część deponowanej energii zamieniana jest na mierzalny sygnał

W wyniku oddziaływania cząstki tworzą się kaskady cząstek wtórnych

- kalorymetry elektromagnetyczne mierzą energie elektronów i fotonów
- kalorymetry hadronowe - innych cząstek stabilnych (oprócz mionów i neutrin)

# Kalorymetry

W eksperymentach kalorymetry naogół umieszczane są za detektorami śladowymi. Jedynymi cząstkami, które przelatują przez kalorymetry bez inicjowania kaskady są miony (i neutrino).



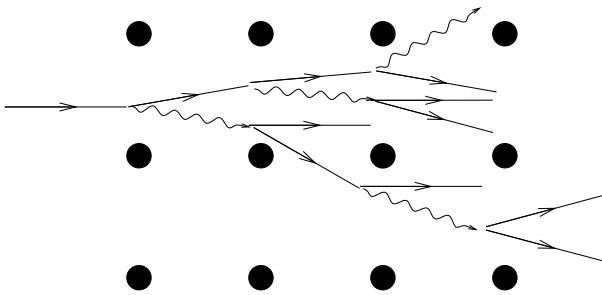
# Kalorymetry

## Kaskada elektromagnetyczna

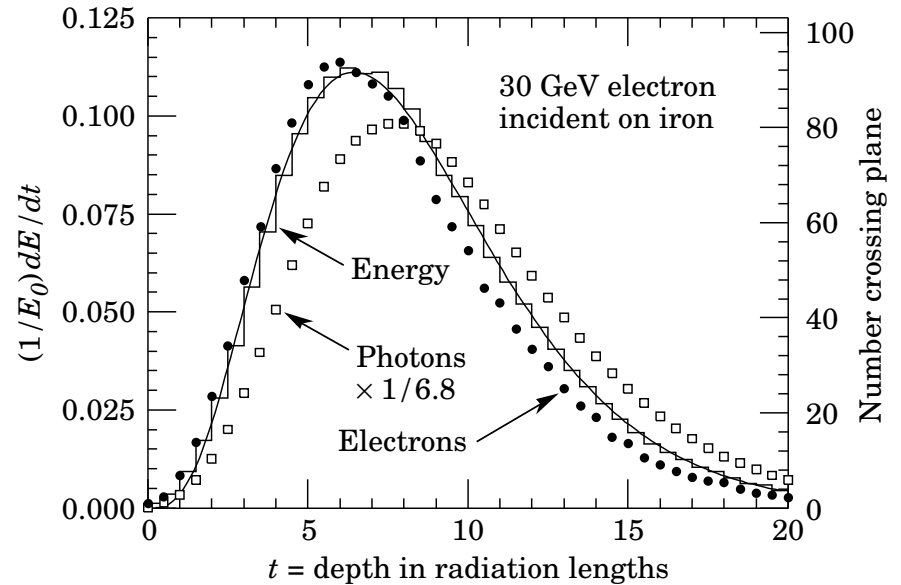
Wysokoenergetyczny foton wpadając w materię konwertuje na parę  $e^+e^-$

Elektron w polu jąder emituje kolejne fotony, które znów konwertują...

Powstaje lawina cząstek, która powiela się tak długo jak  $E_e > E_c$



Gdy energie elektronów spadną poniżej  $E_c \Rightarrow$  starty jonizacyjne kaskada wygasa po ok.  $20 - 30X_0$



Rozmiary podłużne kaskady:  $\sim \ln \frac{E}{E_c}$

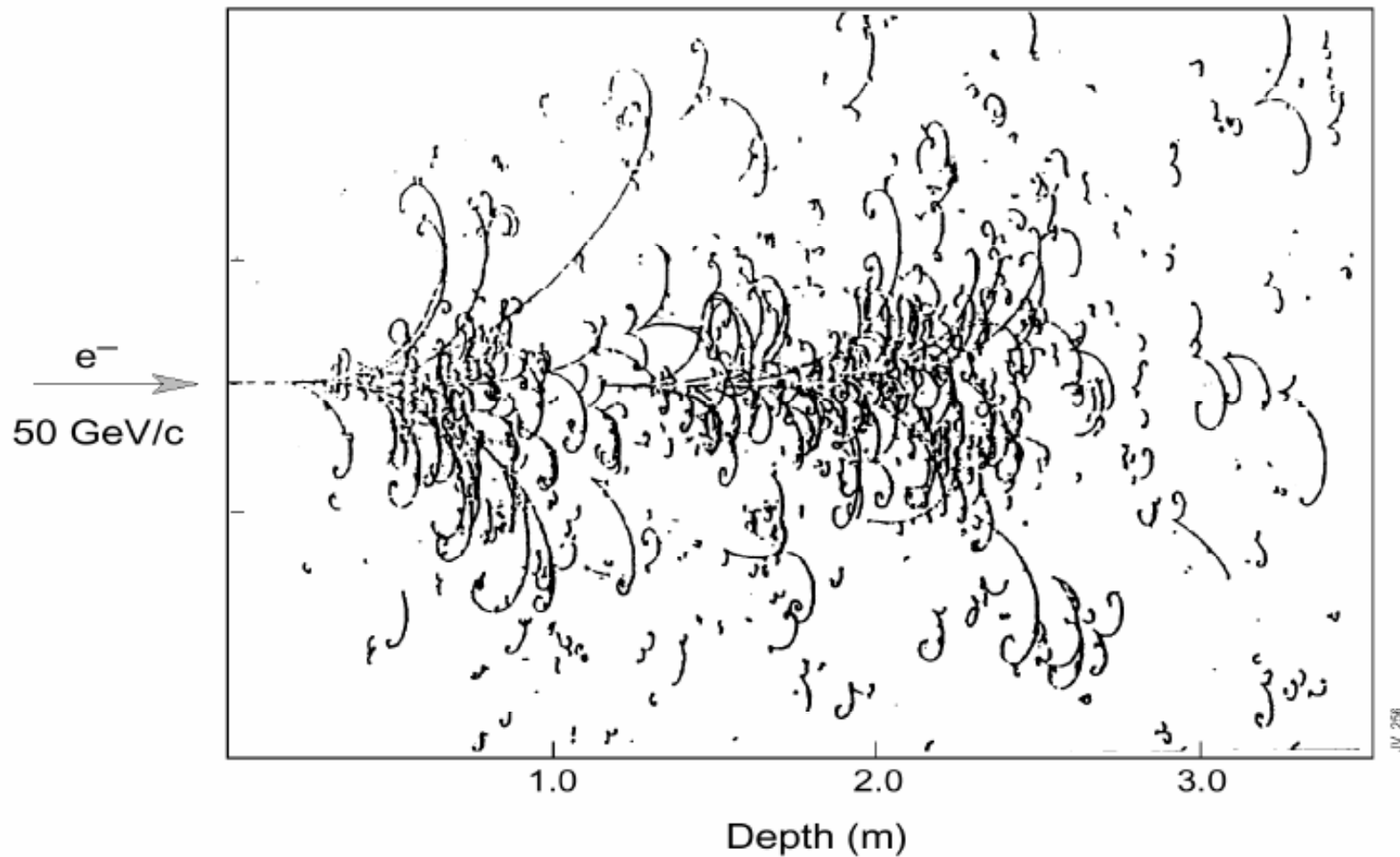
Rozmiary poprzeczne skalują się z tzw. "promieniem Molier":

$$R_M = \frac{21 \text{ MeV}}{E_c} X_0 \sim \frac{A}{Z} \text{ dla } Z \gg 1$$

75% strat energii kaskady w promieniu  $1R_M$  od osi, 95% w  $2R_M$ , 99% w  $3.5R_M$

# Kalorymetry

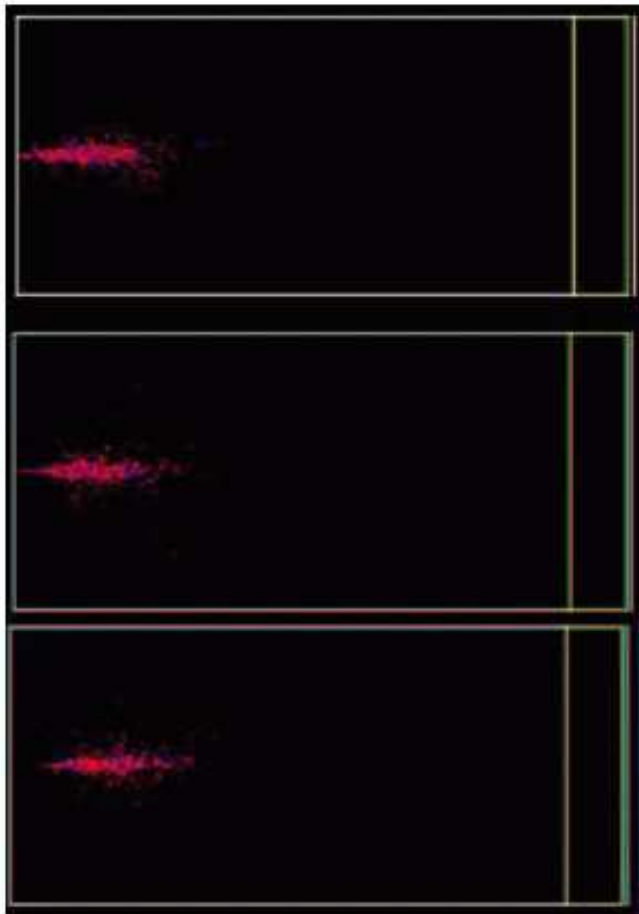
Kaskada elektromagnetyczna w komorze pęcherzykowej BEBC



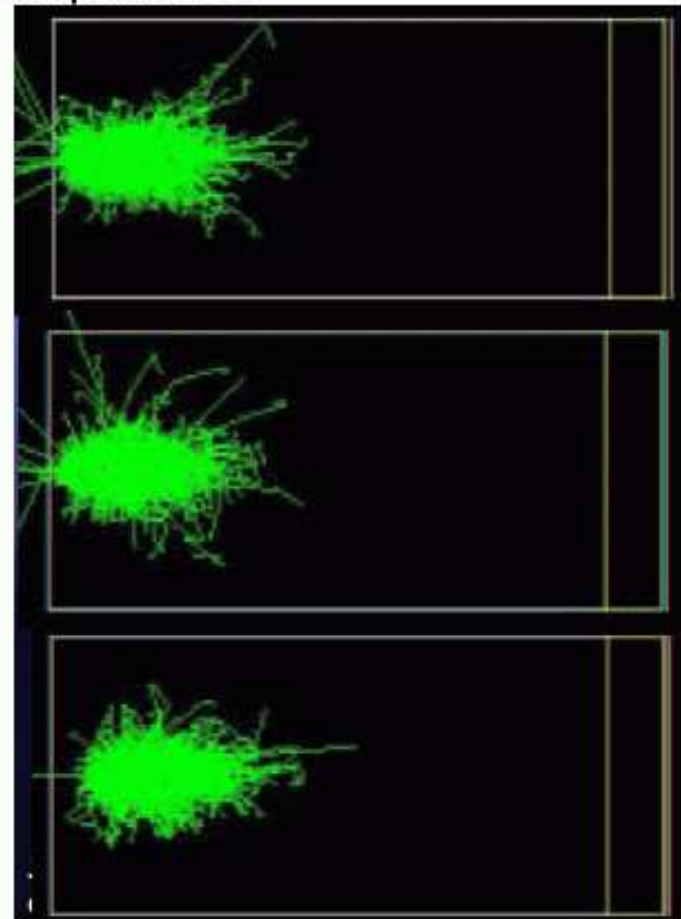
# Kalorymetry

Wyniki symulacji **kaskady elektromagnetycznej** pochodzącej od 20 GeV fotonu

charged particles only



all particles



# Kalorymetry

## Kalorymetry elektromagnetyczne

Jeśli rozmiary bloku materii są odpowiednio duże cała energia cząstki początkowej zostaje zdeponowana w wyniku jonizacji ośrodka przez cząstki kaskady.

Istotą działania kalorymetru jest zamiana (części) depozytu w mierzalny sygnał.

Mierzyć można:

- jonizację ośrodka (całkowity depozyt energii!)
- scyntyłację ośrodka
- promieniowanie Czerenkowa

Możliwe dwa rozwiązania:

- kalorymetr jednorodny  
jeden blok materiału (ew. podzielony na segmenty),  
w którym rozwija się i mierzona jest kaskada
- kalorymetr próbkujący  
absorber, w którym (głównie) rozwija się kaskada,  
przekładany jest elementami aktywnymi mierzącymi sygnał

# Kalorymetry

## Ciekłe gazy szlachetne

Szczególny przypadek:

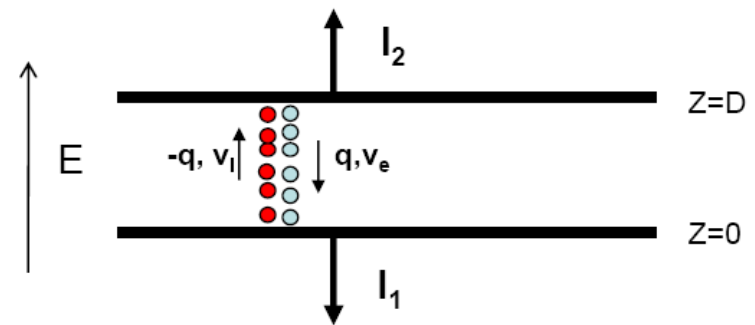
prawie połowa strat energii prowadzi do scyntylacji, druga połowa - jonizacja.

	Ar	Kr	Xe
$Z$	18	36	58
$A$	40	84	131
$X_0$ (cm)	14	4.7	2.8
$R_M$ (cm)	7.2	4.7	4.2
Density (g/cm <sup>3</sup> )	1.4	2.5	3.0
Ionization energy (eV/pair)	23.3	20.5	15.6
Critical energy $\epsilon$ (MeV)	41.7	21.5	14.5
Drift velocity at saturation (mm/ $\mu$ s)	10	5	3

Kr: gęsty  $\Rightarrow$  niewielkie rozmiary detektora

Ar: tani  $\Rightarrow$  duże układy detekcyjne  
także kalorymetry próbkujące

Naogół wykorzystuje się pomiar jonizacji



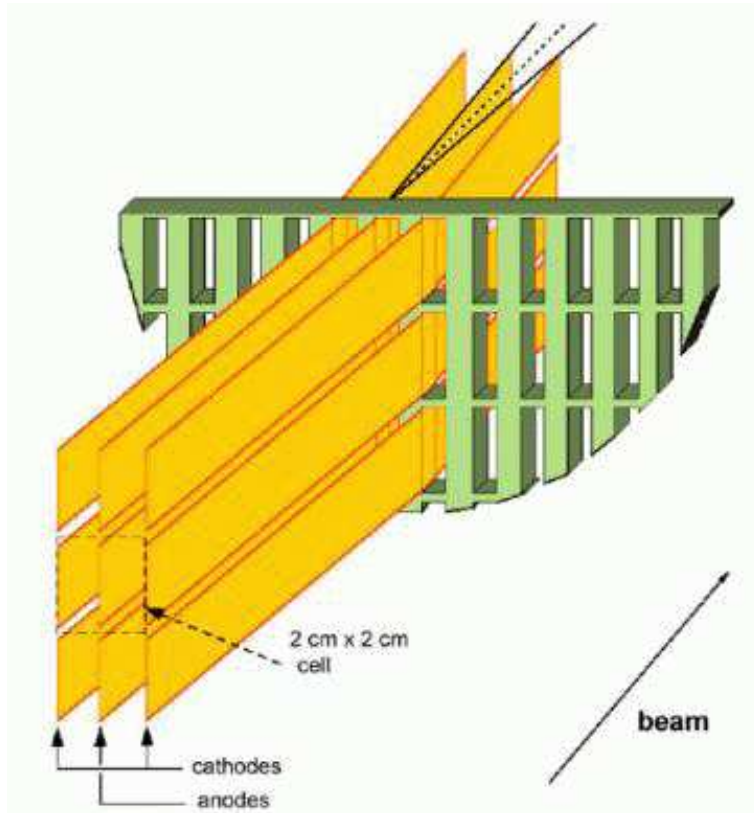
Pomiar zarówno jonizacji jak i światła  
 $\Rightarrow$  najdokładniejszy pomiar energii,  
ale trudny do uzyskania



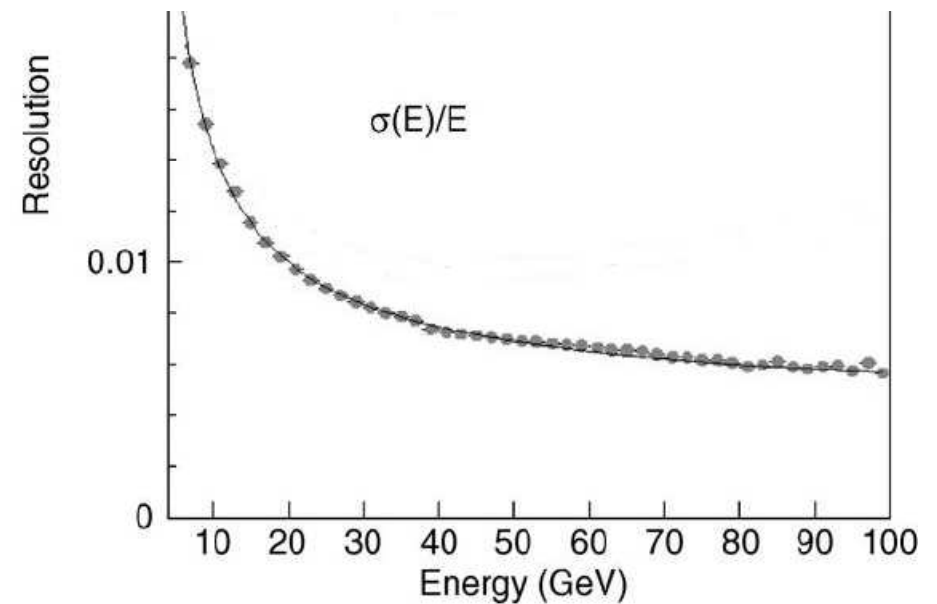
# Kalorymetry

## Ciekłe gazy szlachetne

Kalorymetr detektora NA48: ciekły krypton, cele  $2 \times 2 \text{ cm}^2$ , długość 125 cm ( $27 X_0$ )



Zdolność rozdzielcza w pomiarze energii:



# 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**: szumy 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

## Kryształy

Innym materiałem często używanym w kalorymetrach jednorodnych są (scyntylujące) kryształy nieorganiczne.

Najczęściej wykorzystywane kryształy:

	NaI(Tl)	CsI(Tl)	CsI	BGO	PbWO <sub>4</sub>
Density (g/cm <sup>3</sup> )	3.67	4.53	4.53	7.13	8.28
$X_0$ (cm)	2.59	1.85	1.85	1.12	0.89
$R_M$ (cm)	4.5	3.8	3.8	2.4	2.2
Decay time (ns)	250	1000	10	300	5
slow component			36		15
Emission peak (nm)	410	565	305	410	440
slow component			480		
Light yield $\gamma$ /MeV	$4 \times 10^4$	$5 \times 10^4$	$4 \times 10^4$	$8 \times 10^3$	$1.5 \times 10^2$
Photoelectron yield (relative to NaI)	1	0.4	0.1	0.15	0.01
Rad. hardness (Gy)	1	10	$10^3$	1	$10^5$

# Kalorymetry

## Kryształy

Światło powstające w kryształach odczytywane jest najczęściej przez fotopowielacze (lub detektory krzemowe) mocowane bezpośrednio do ich powierzchni.

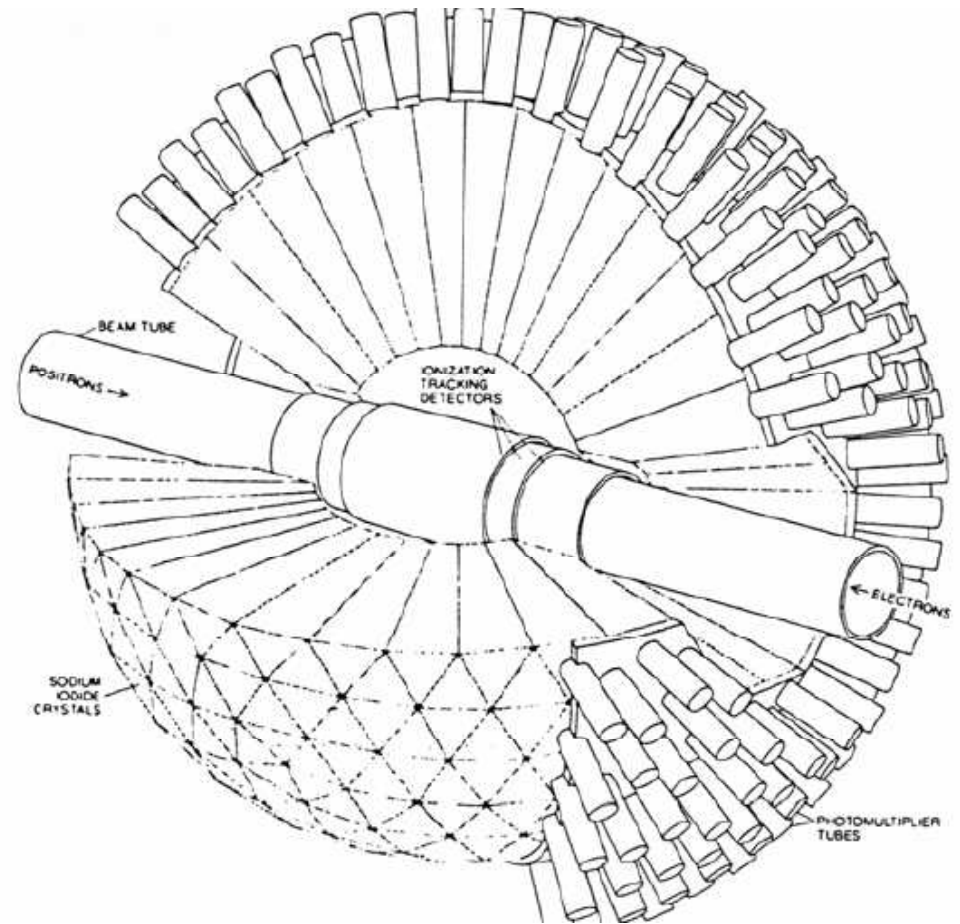
Detektor Cristal Ball (SLAC) ⇒

Odkrycie mezonu  $J/\psi$  (1974)

672 + 60 kryształów NaI(Tl)

pomiar energii fotonów 0.1-1 GeV

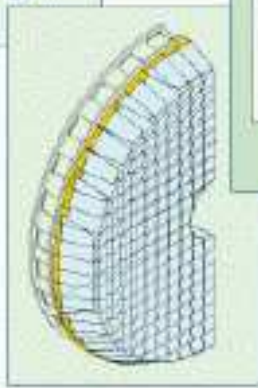
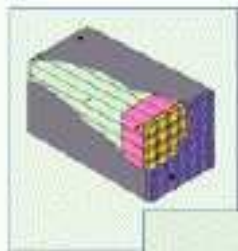
$$\frac{\sigma}{E} = 3.5 - 2.6\%$$



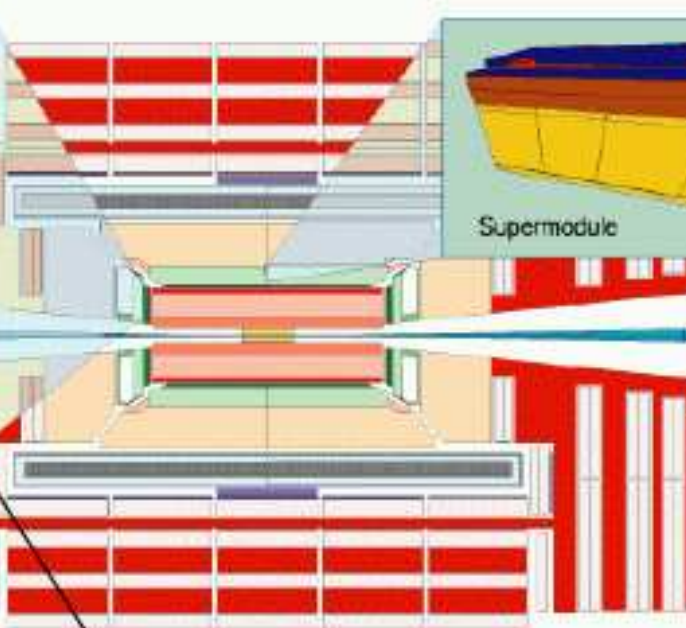
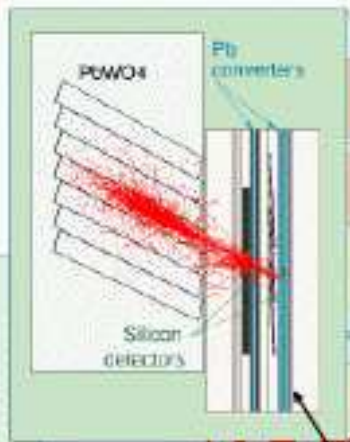
# Kalorymetry

## Kalorymetr EM detektora CMS

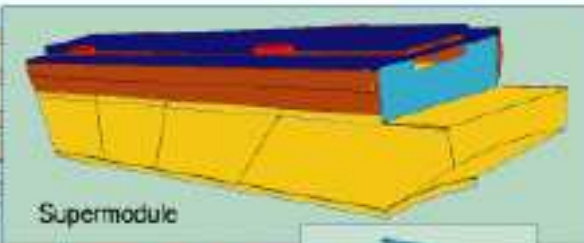
5x5 "supercrystal"



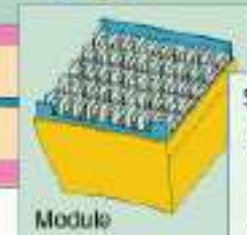
Endcap, readout with VPT



Preshower



Supermodule



Module



Sub module

Barrel, readout with APD

# Kalorymetry

## Kalorymetr EM detektora CMS

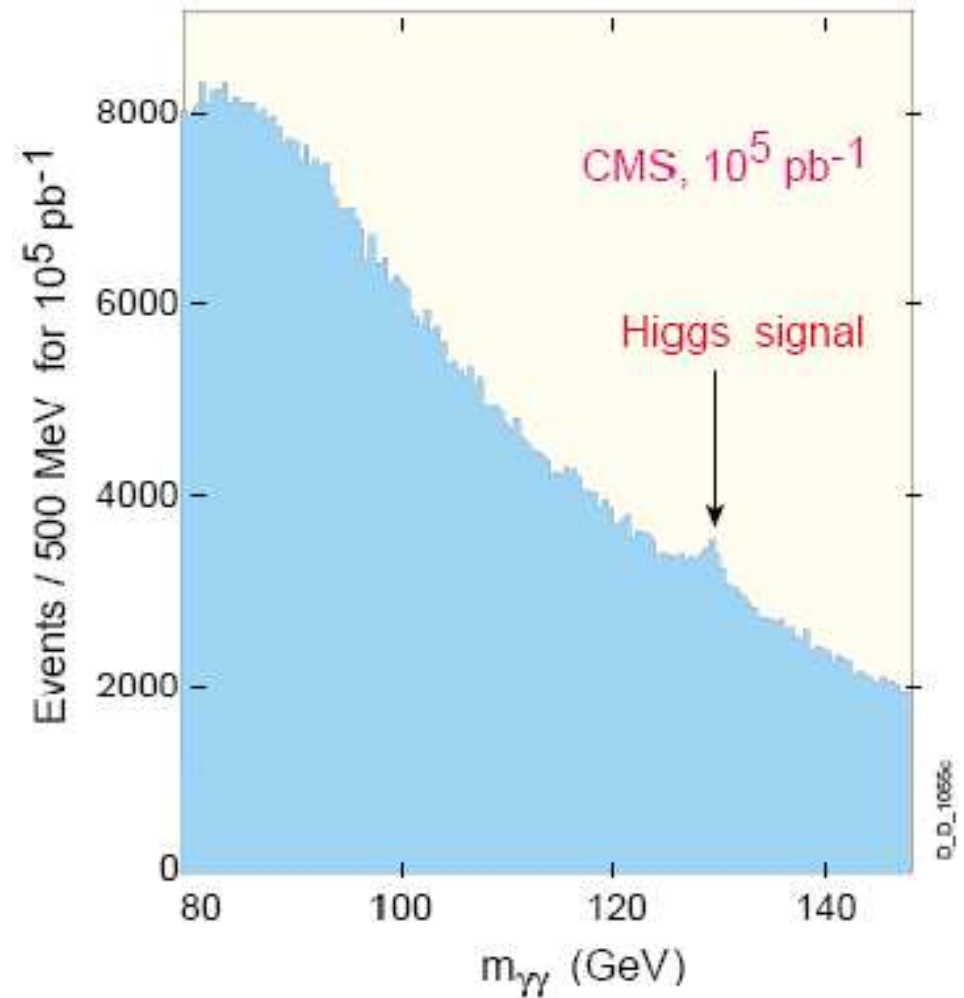
Łącznie 76 000 kryształów

Kryształ sekcji “do przodu”



Rozdzielczość kluczowa dla “wydobycia”  
sygnału  $h \rightarrow \gamma\gamma$

Główny kanał dla  $m_h \sim 120\text{GeV}$

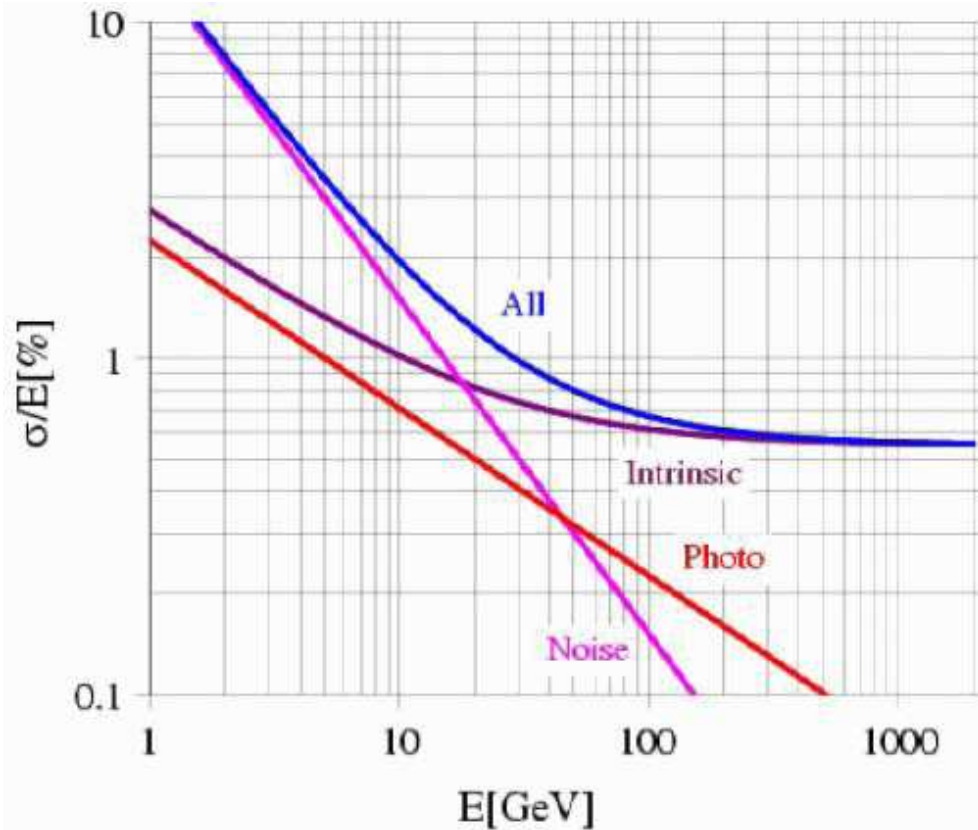




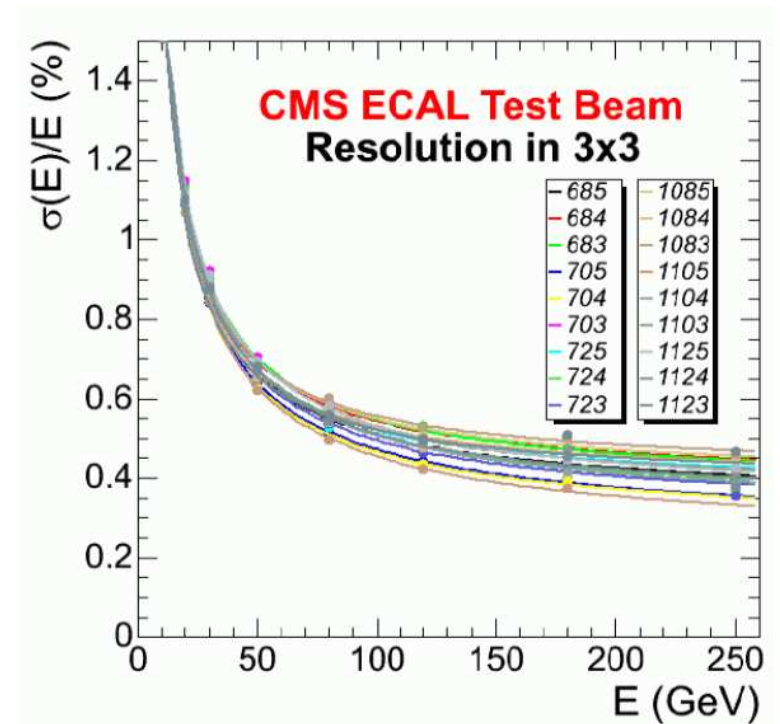
# Kalorymetry

## Kalorymetr EM detektora CMS

Rozdzielczość zakładana



Uzyskana w testach



Rozdzielczość rzędu 0.5% osiągnięta dla  $E > 120\text{GeV}$

# Kalorymetry

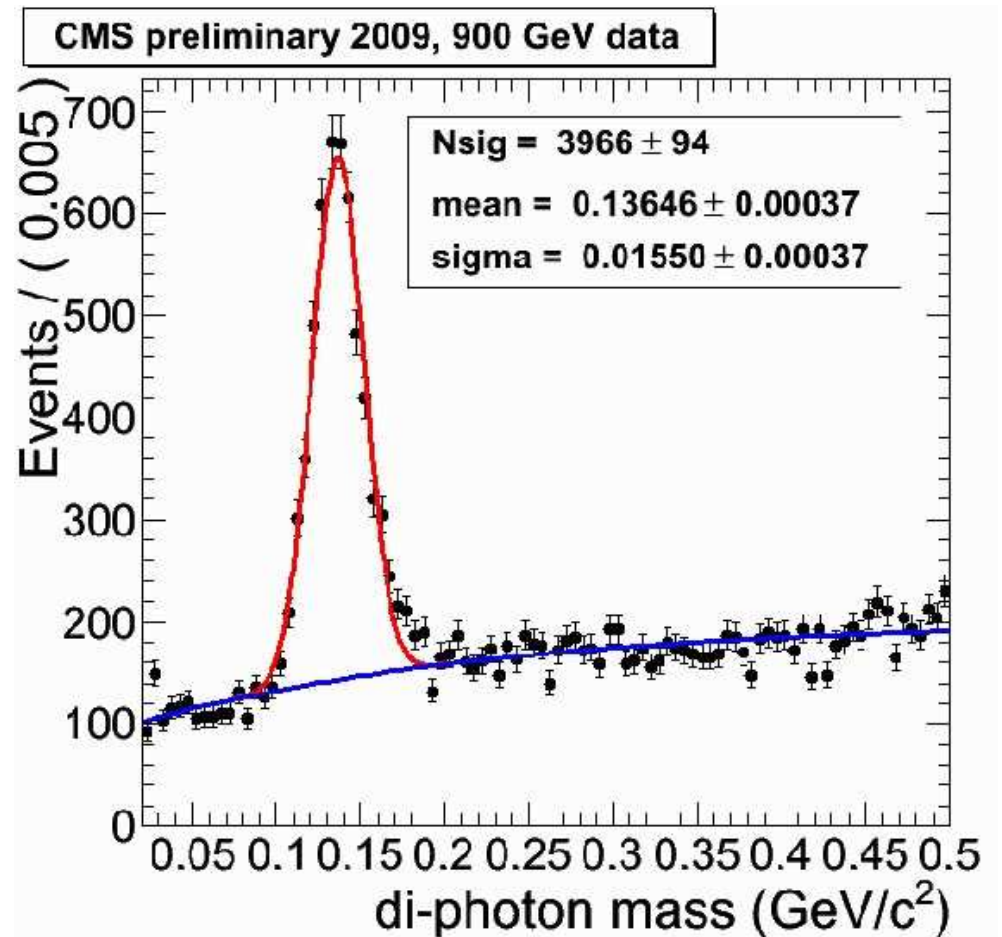
## Kalorymetr EM detektora CMS

Pierwsze wyniki z LHC.

Dane 2009,  $\sqrt{s_{pp}} = 900$  GeV.

Bardzo wyraźny sygnał  $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$

Po zastosowaniu poprawki na straty sygnału związane z progiem detekcji ( $E_{min} = 100$  MeV/kryształ): przesunięcie pozycji maksimum o ok. 20 MeV.





# Kalorymetry

## Kalorymetry jednorodne

Zdolności rozdzielcze typowych kalorymetrów jednorodnych w eksperymentach HEP

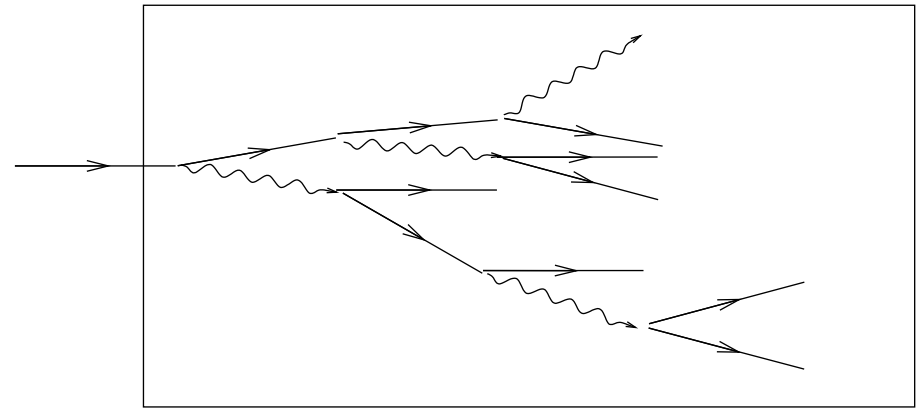
Technology (Exp.)	Depth	Energy resolution	Date
NaI(Tl) (Crystal Ball)	$20X_0$	$2.7\%/E^{1/4}$	1983
Bi <sub>4</sub> Ge <sub>3</sub> O <sub>12</sub> (BGO) (L3)	$22X_0$	$2\%/\sqrt{E} \oplus 0.7\%$	1993
CsI (KTeV)	$27X_0$	$2\%/\sqrt{E} \oplus 0.45\%$	1996
CsI(Tl) (BaBar)	$16\text{--}18X_0$	$2.3\%/E^{1/4} \oplus 1.4\%$	1999
CsI(Tl) (BELLE)	$16X_0$	1.7% for $E_\gamma > 3.5$ GeV	1998
PbWO <sub>4</sub> (PWO) (CMS)	$25X_0$	$3\%/\sqrt{E} \oplus 0.5\% \oplus 0.2/E$	1997
Lead glass (OPAL)	$20.5X_0$	$5\%/\sqrt{E}$	1990
Liquid Kr (NA48)	$27X_0$	$3.2\%/\sqrt{E} \oplus 0.42\% \oplus 0.09/E$	1998

# Kalorymetry

## Kalorymetry jednorodne

### Zalety:

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



### Wady:

- duże
- drogie
- pomiar tylko kaskad  
elektro-magnetycznych

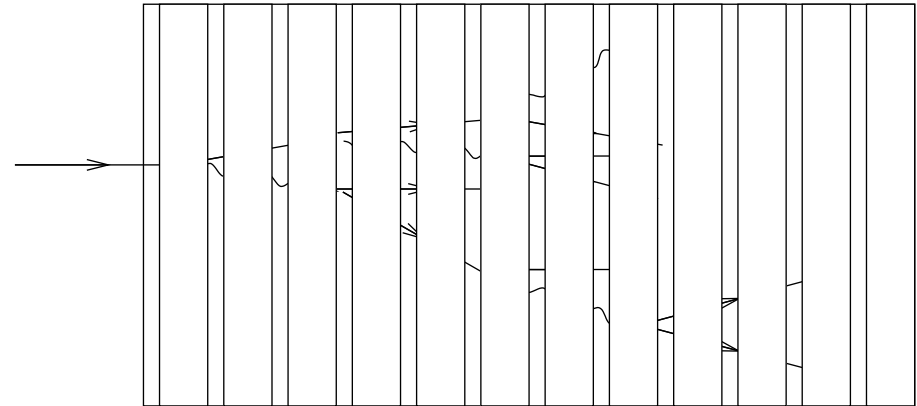
⇒ częściej wykorzystywanym w eksperymentach HEP rozwiązaniem są kalorymetry próbkujące

# Kalorymetry

## Kalorymetry próbkujące

Kaskada rozwija się w gęstym absorberze.

Rzwoj kaskady jest “próbkowany” w cienkich warstwach aktywnych.



Zalety:

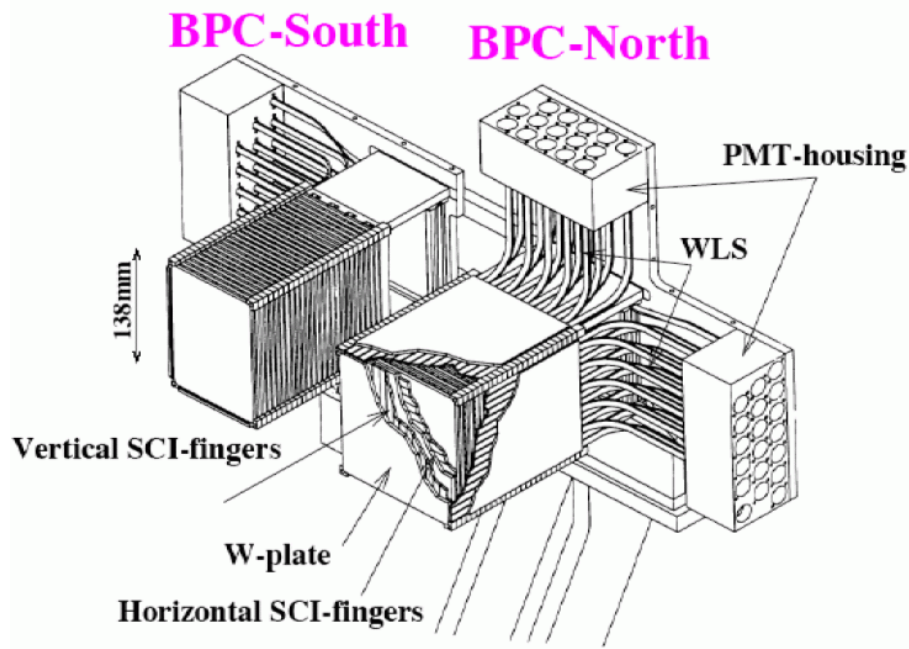
- mniejsze, można użyć bardzo gęstego absorbera
- tańsze, absorber zwykle tańszy od elementów odczytowych
- większe możliwości optymalizacji, zwłaszcza dla kaskad hadronowych

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 scyntyлятора 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.

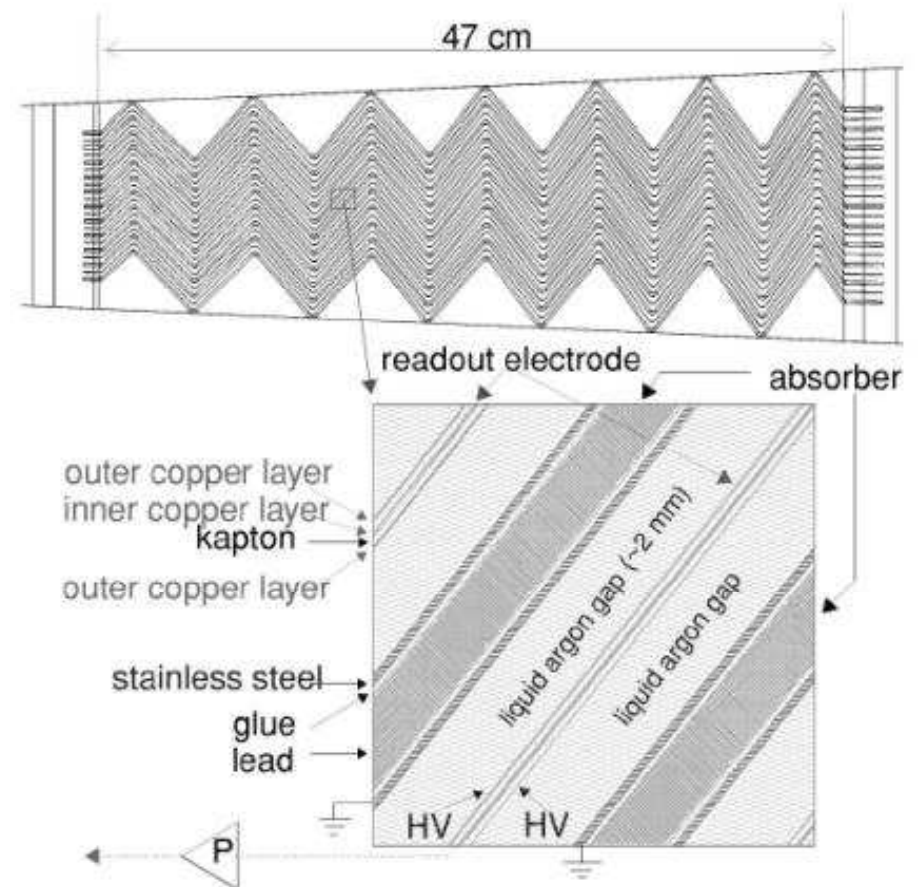
Warstwy ołowiu: 1.1 – 2.2mm (zależnie od kierunku)

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

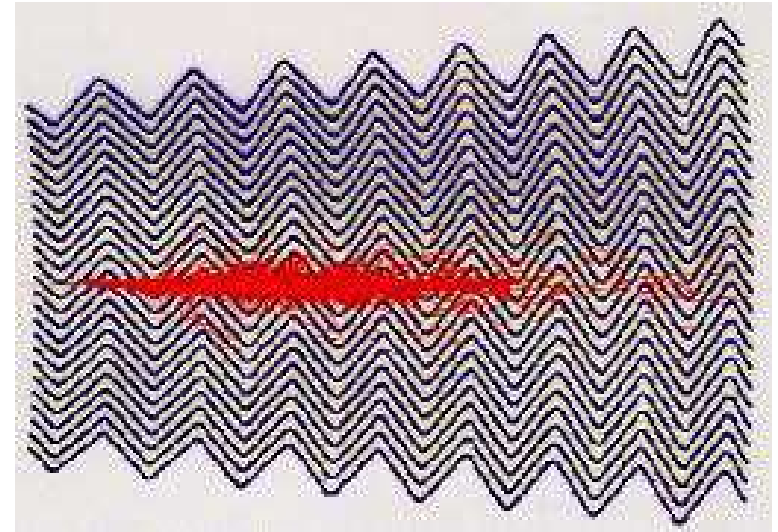
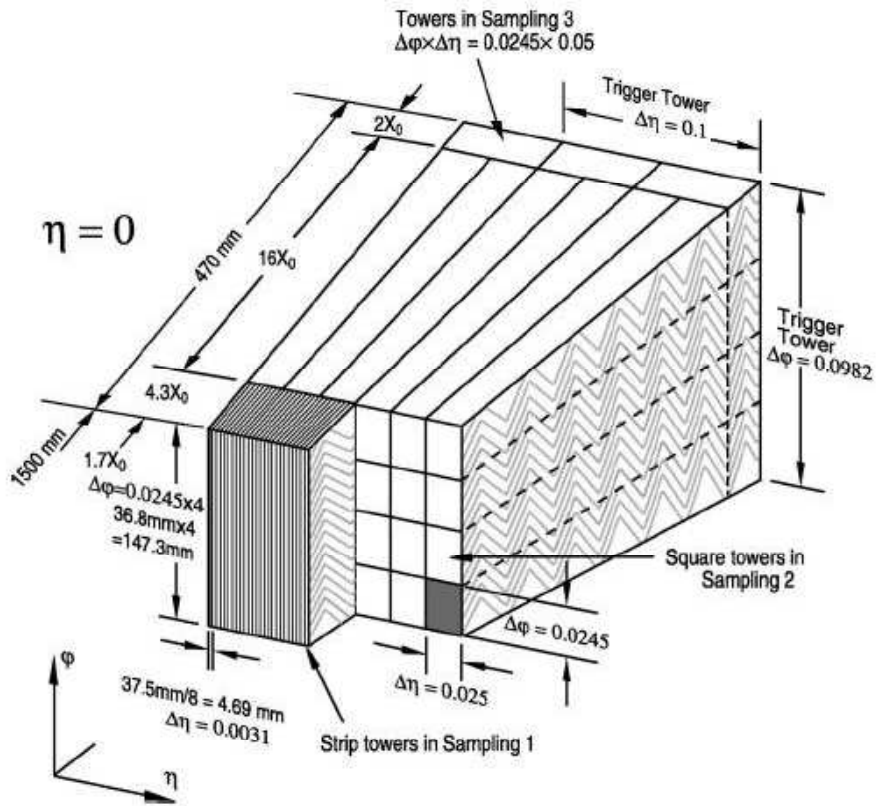


FIG. 17. Schematic view of the segmentation of the ATLAS electromagnetic calorimeter.

# 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  $t_{\text{abs}}$  - grubość warstw absorbera
- Dodatkowo depozyt energii w cienkich warstwach może mieć bardzo niesymetryczny rozkład  $\Rightarrow$  fluktuacje Landaua
- Cząstki przechodzą przez 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



# Kalorymetry

## Kaskady hadronowe

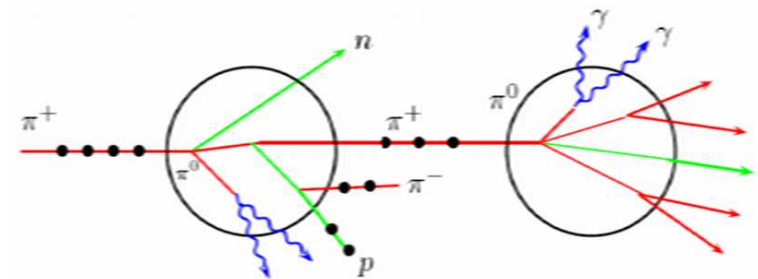
Tak jak w przypadku kaskad elektromagnetycznych, energia cząstki pierwotnej tracona jest w wielu kolejnych (silnych) oddziaływaniach z absorberem.

Zachodzące procesy są jednak dużo bardziej złożone.

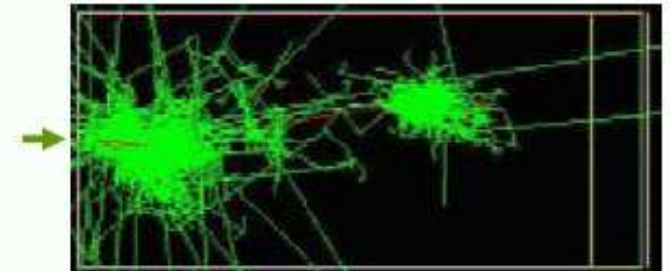
Oprócz produkcji wysokoenergetycznych cząstek wtórnych energia tracona jest na procesy jądrowe: wzbudzenia, rozszczepienia i energie odrzutu jąder.

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  $\pi$  in copper (simulation)



J.P. Wellisch

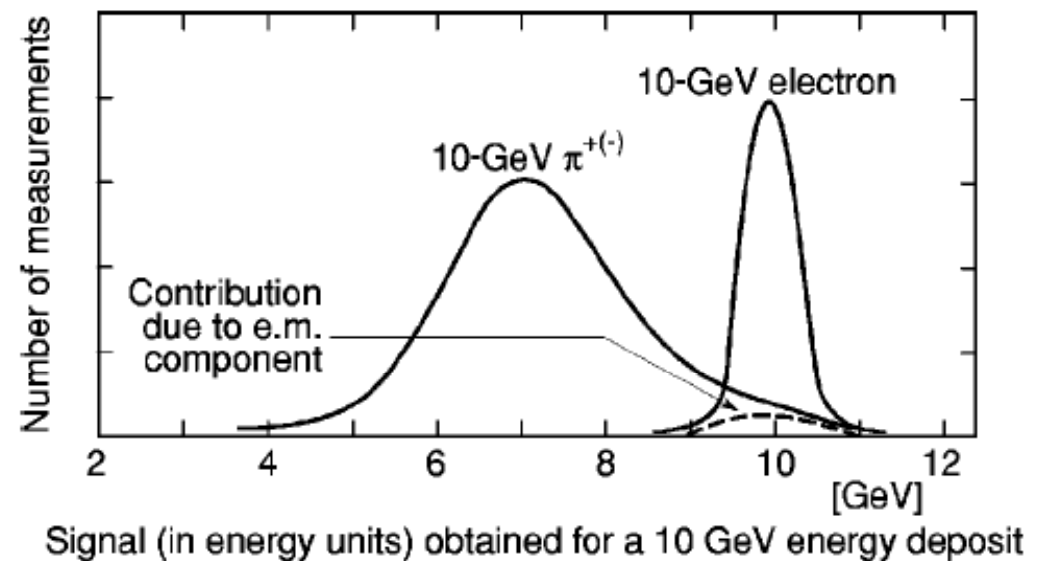
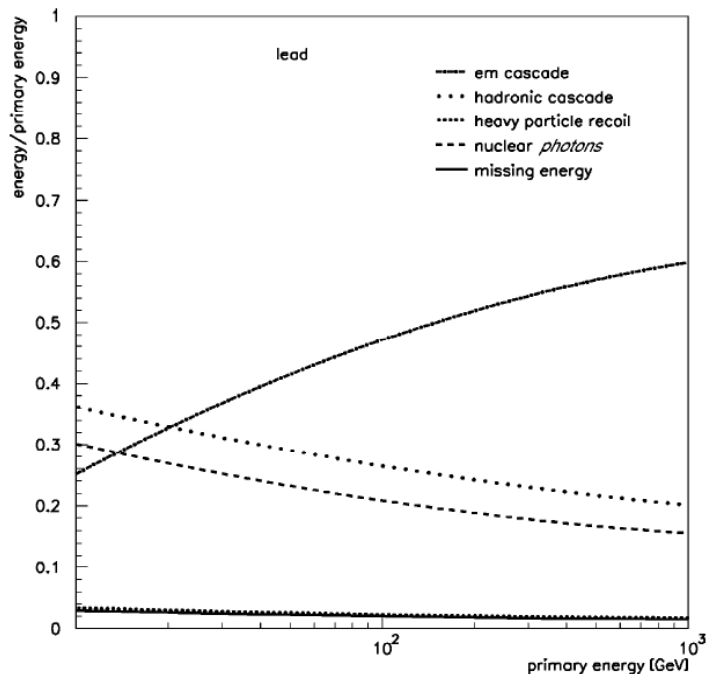
# Kalorymetry

## Kaskady hadronowe

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

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

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



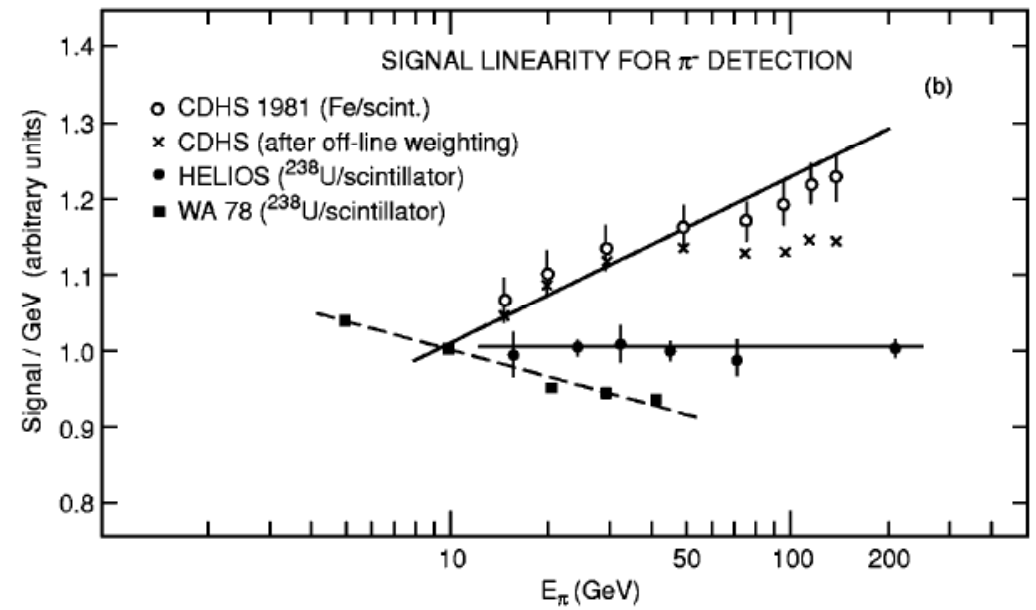
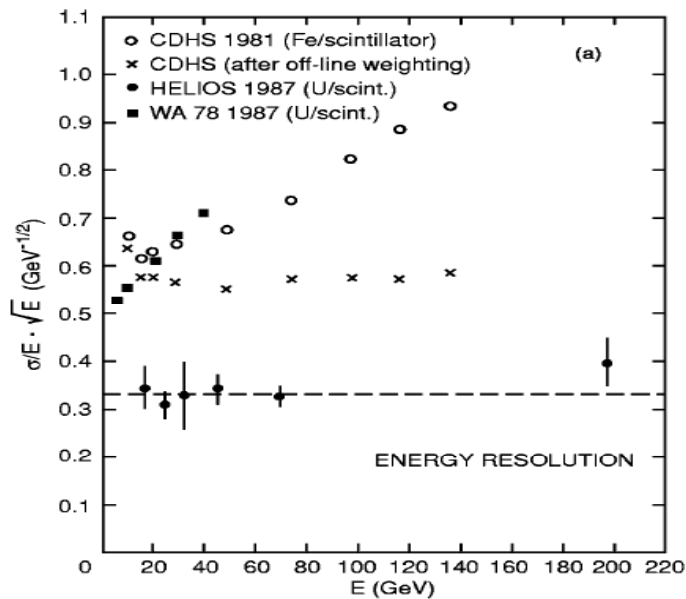
# Kalorymetry

## 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.

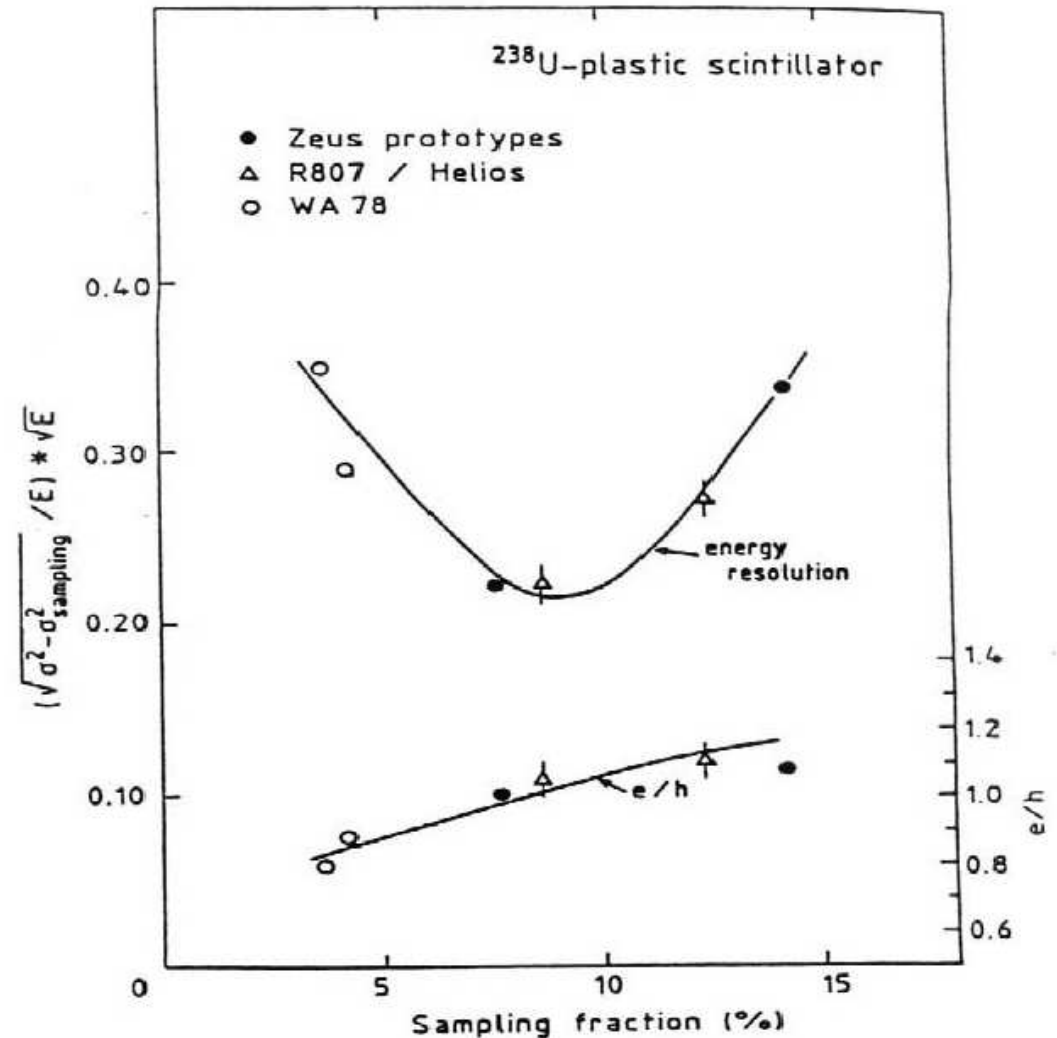
# Kalorymetry

## 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

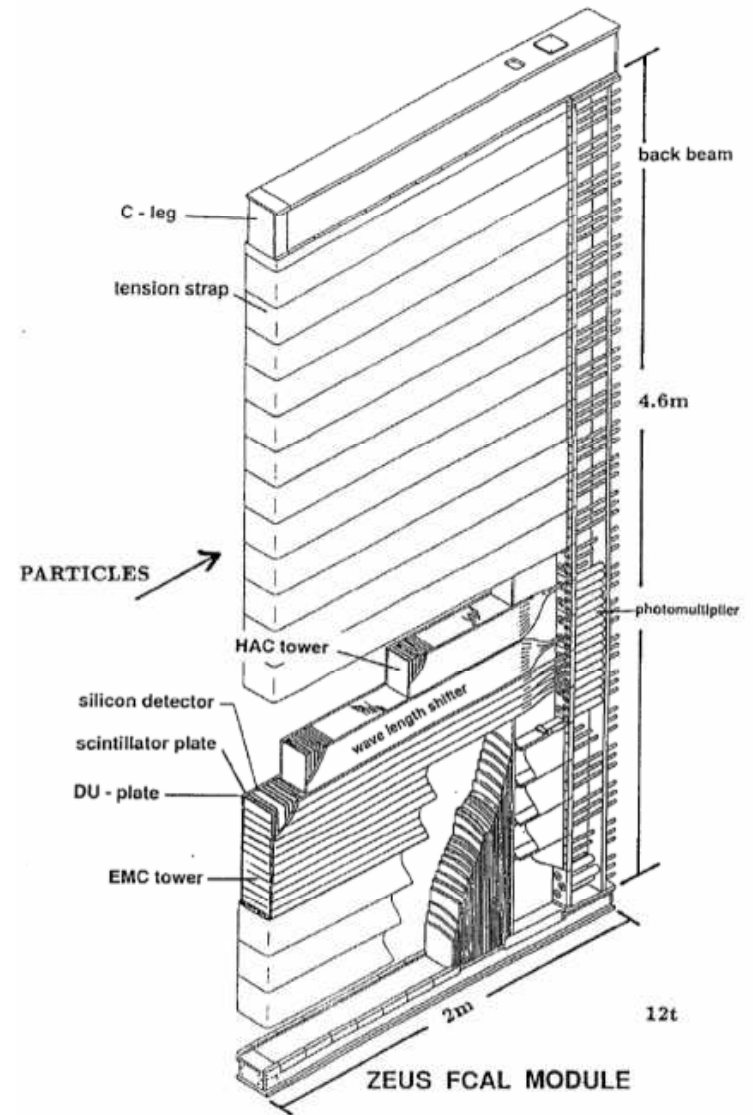
$$\frac{e}{h} = 1.00 \pm 0.02$$

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.

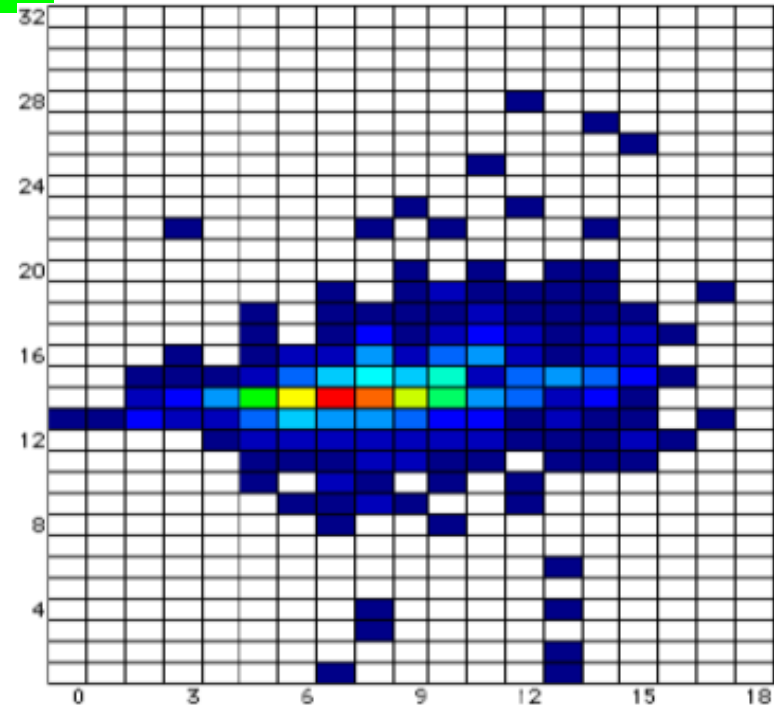
Odpowiedź kalorymetru na pojedynczy hadron:

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

gdzie:  $f_{em}$  - ułamek energii w części EM,

$\eta_{had}$  - tłumienie składowej hadronowej ( $\sim 1.4$ )

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

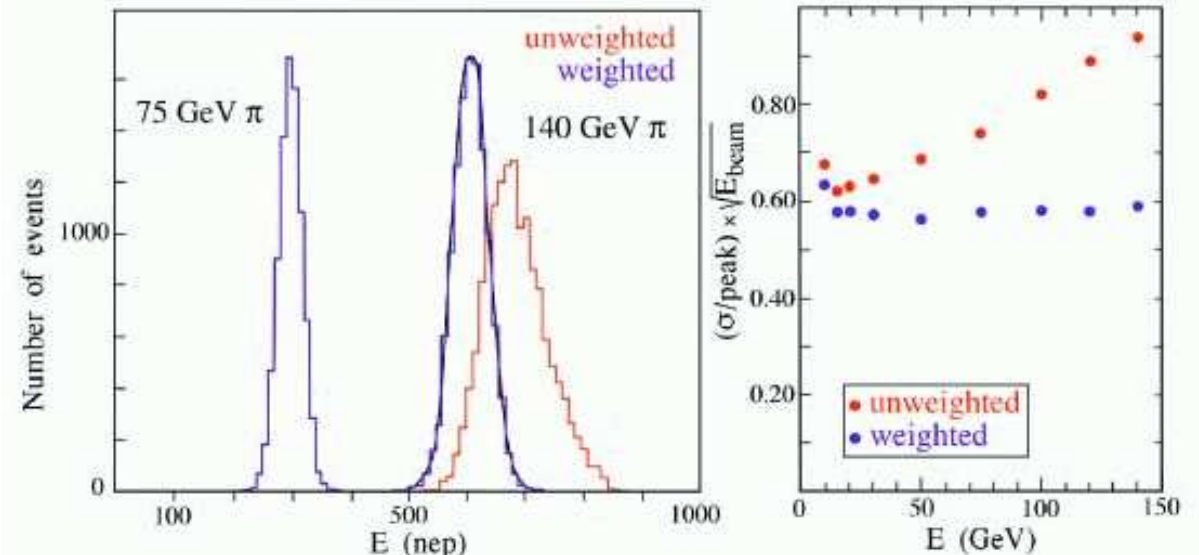
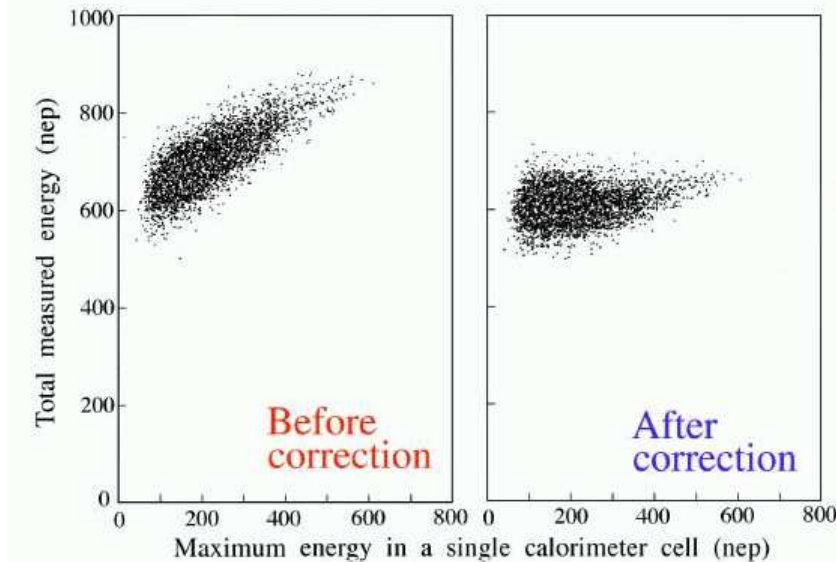
## Kompensacja algorytmiczna

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.

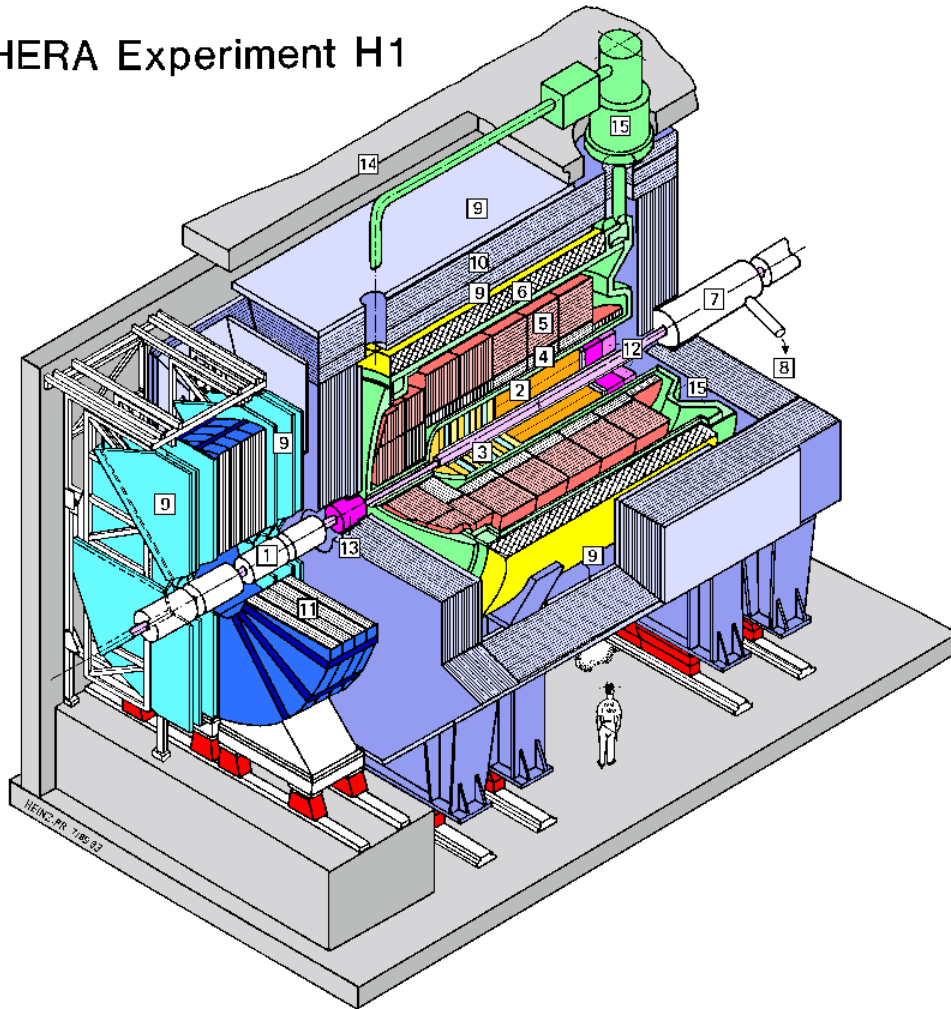




# Kalorymetry

## Kalorymetr detektora H1

HERA Experiment H1

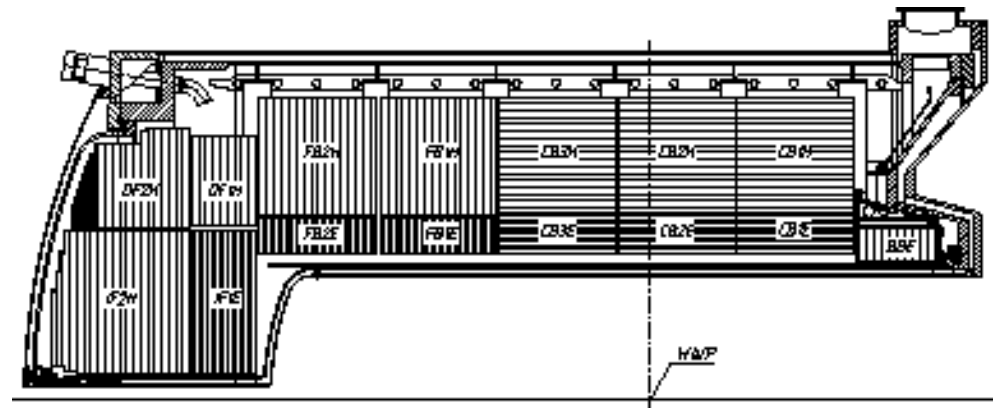


Kalorymetr z **ciekłym argonem**.

Łącznie  $53 \text{ m}^3$ , 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

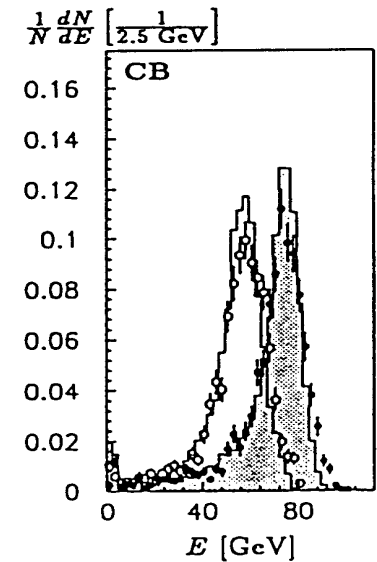
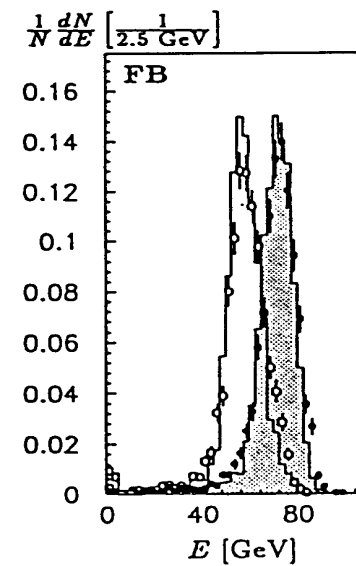
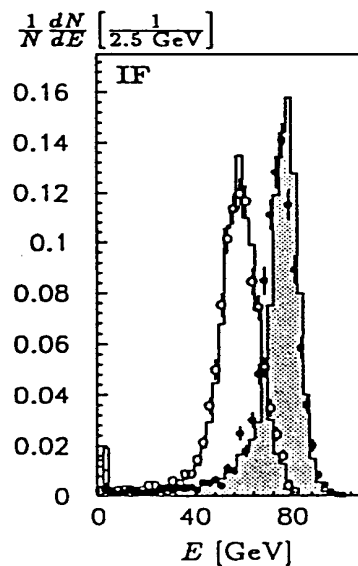
Algorytm kompensacji w pomiarze energii:

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

$E^i$  - energia zmierzona w danej celi,  $V^i$  - jej objętość,  $a$ ,  $b$  i  $\alpha$  - 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

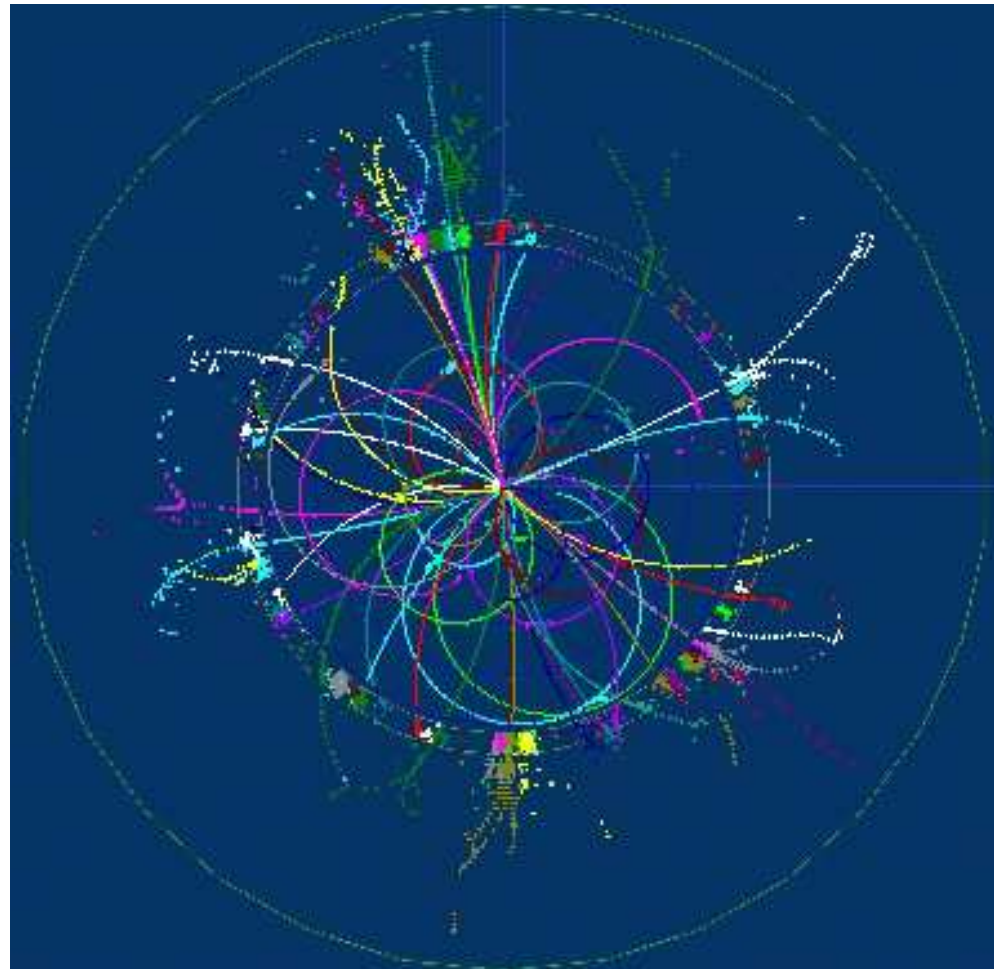
## Nowe koncepcje

### 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

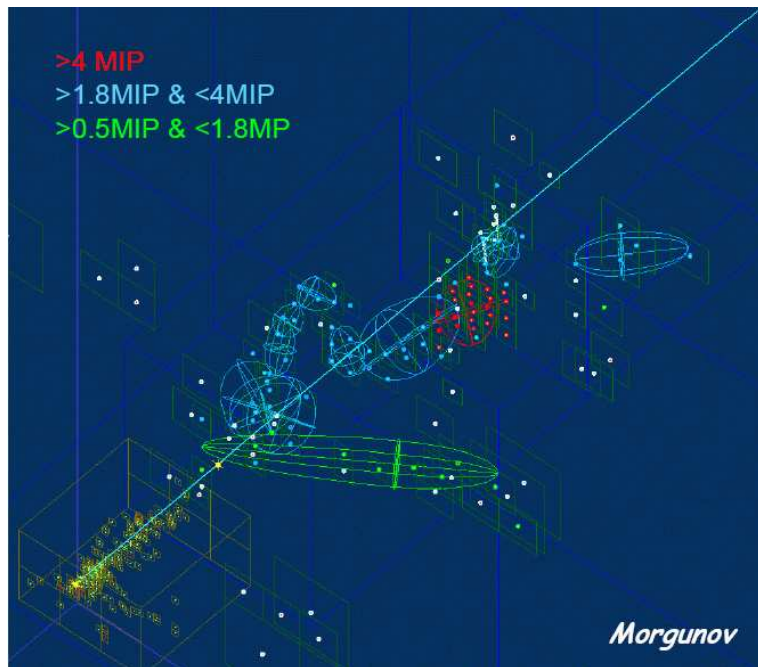


# Kalorymetry

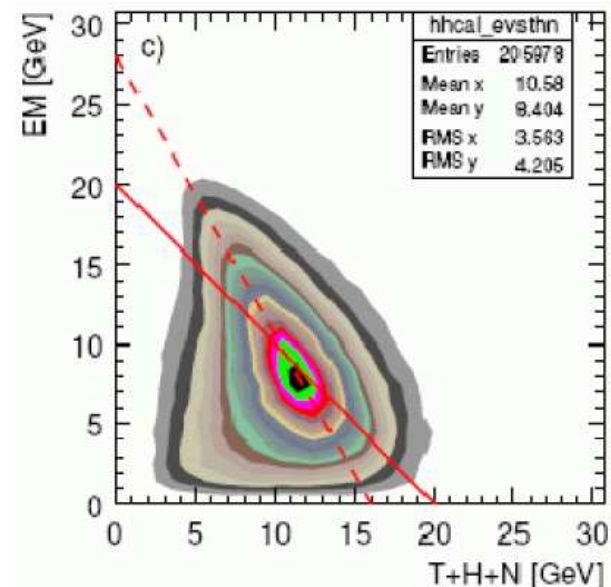
## Nowe koncepcje Kalorymetr śladowy

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  $\pi^+$



# Kalorymetry

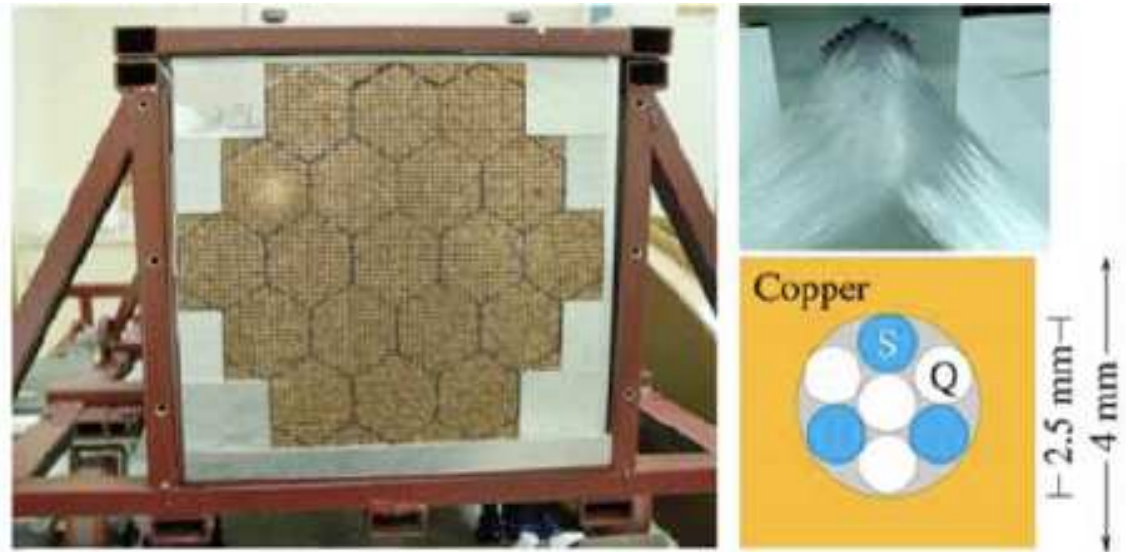
## Nowe koncepcje

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

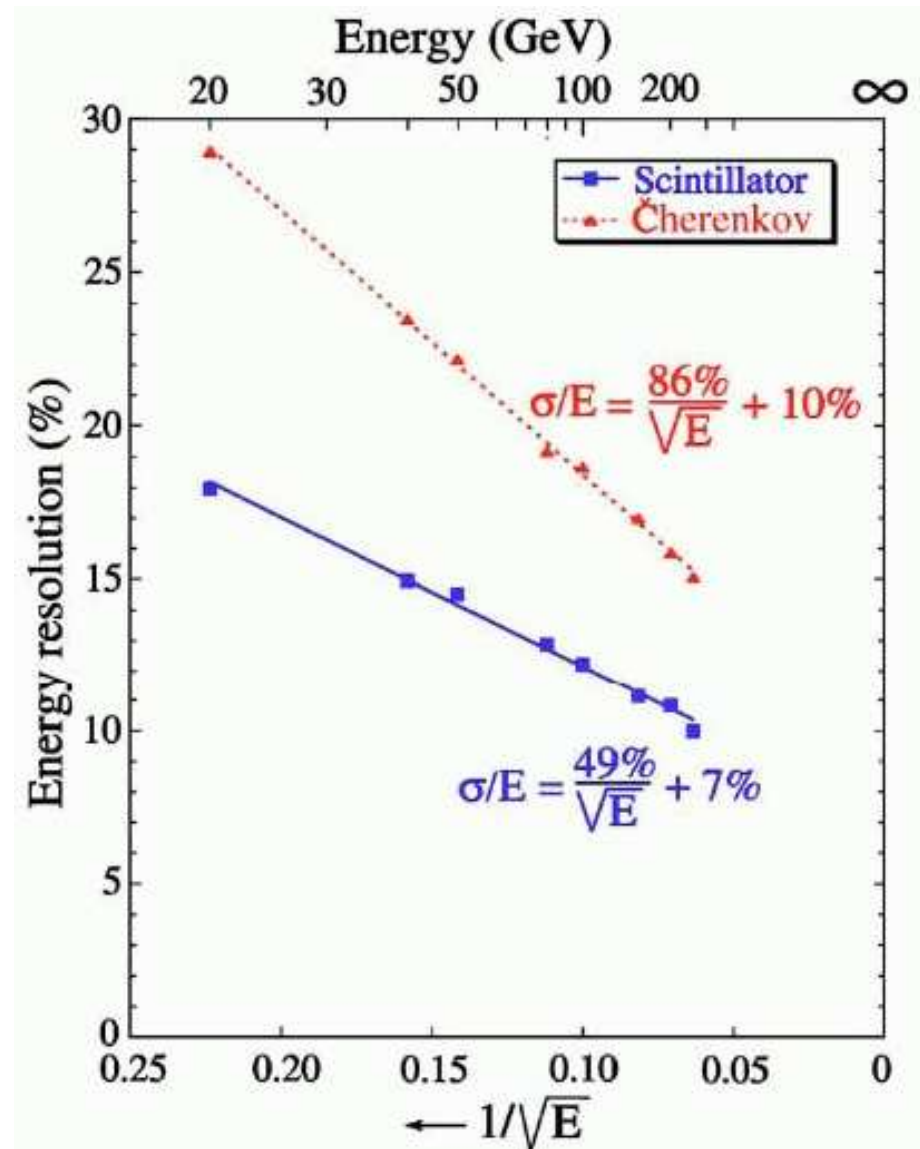
## Nowe koncepcje

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:

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

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

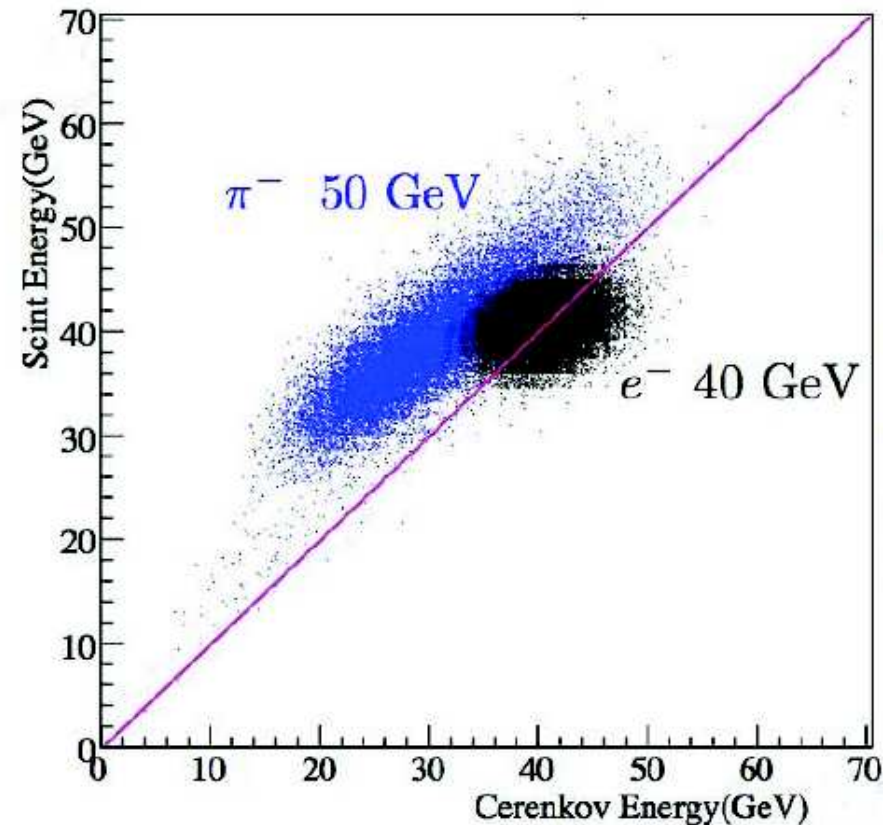
Znając współczynniki tłumienia składowej hadronowej w obu odczytach

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

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

możemy z dwóch pomiarów wyznaczyć  $f_{em}$  i  $E$

⇒ znacznie lepsza zdolność rozdzielcza

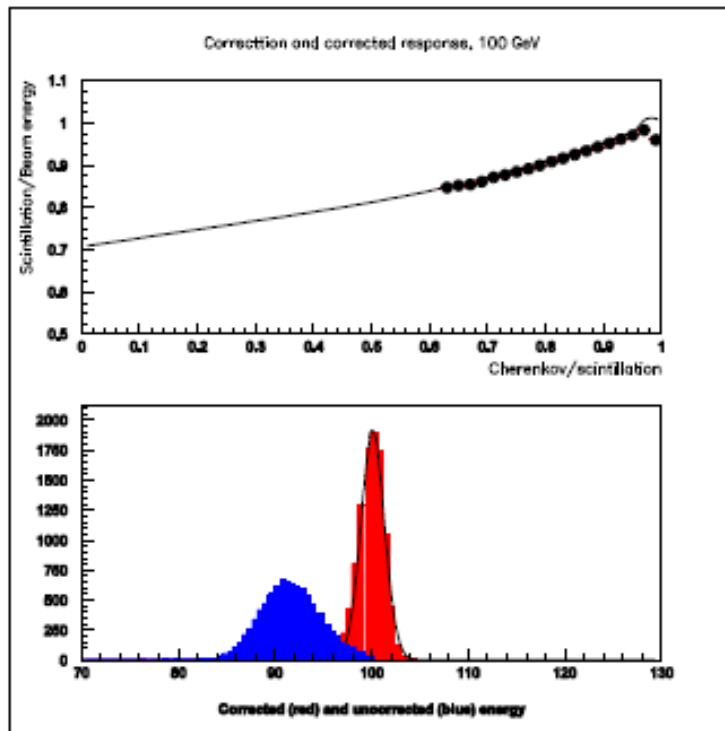


# Kalorymetry

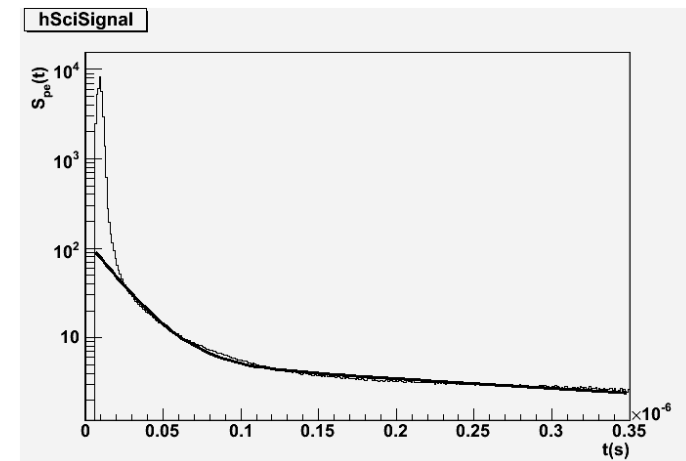
## Nowe koncepcje

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

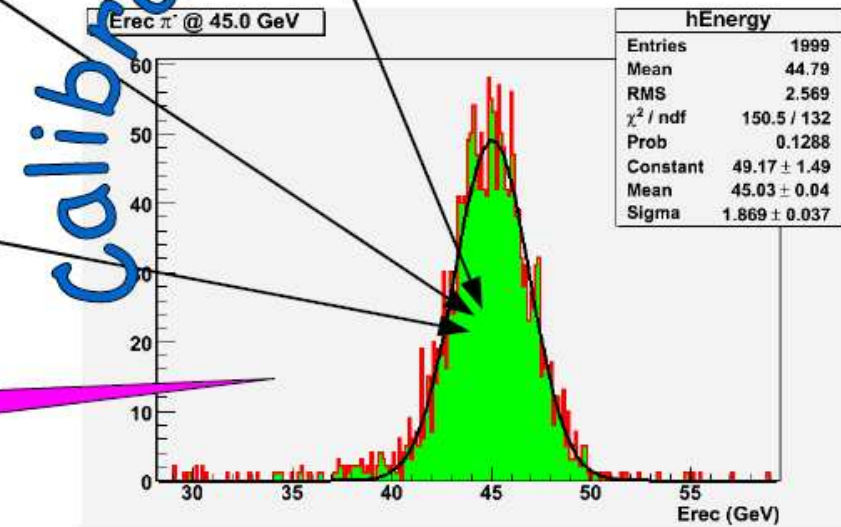
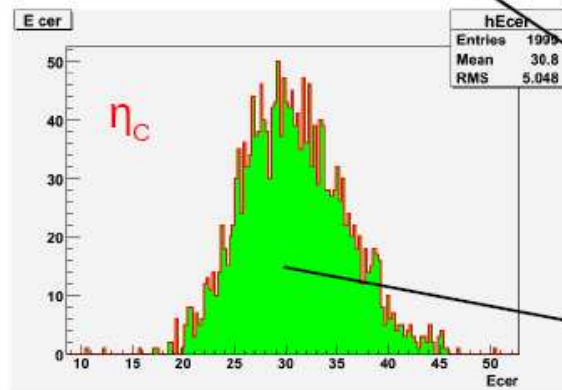
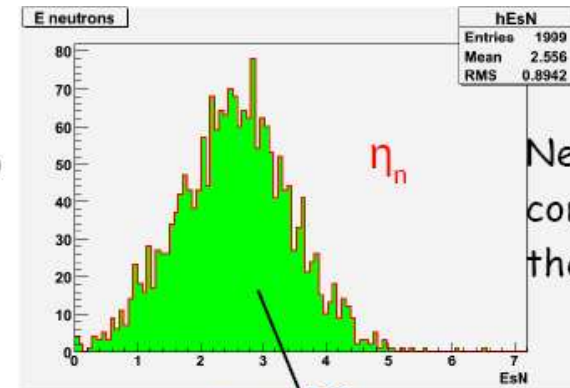
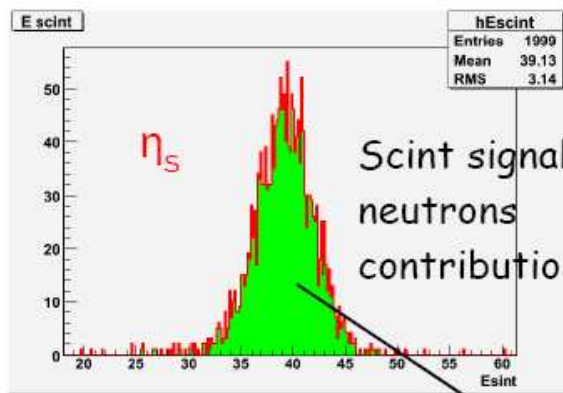
Potrójny odczyt:

- 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.

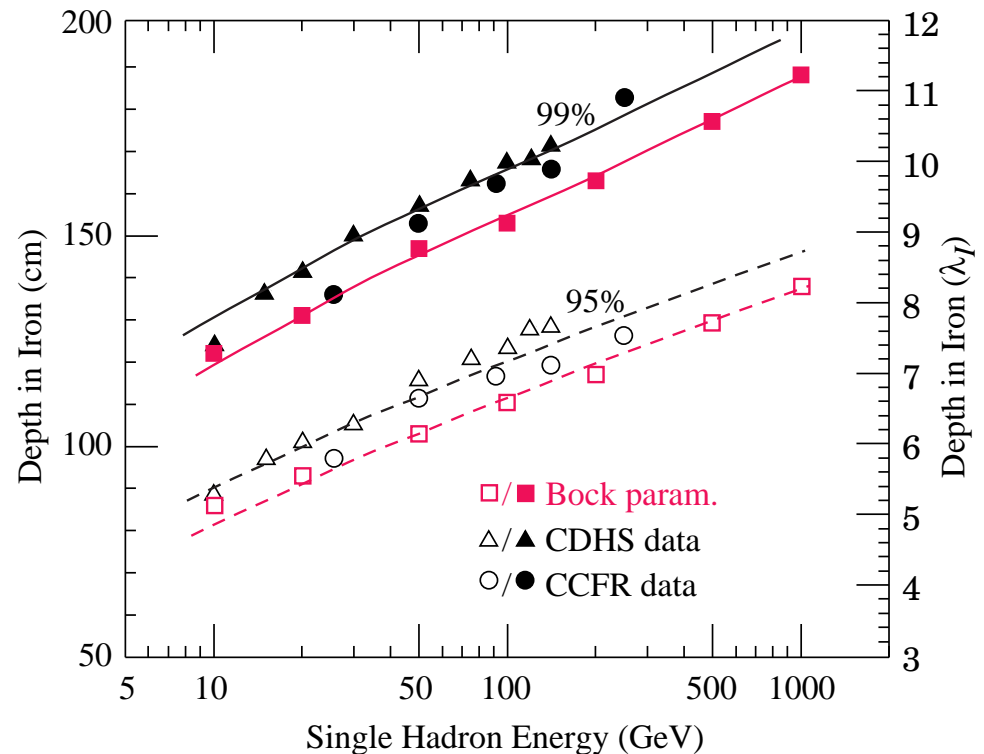
Stosunkowo łatwo zatrzymać 95% kaskad.

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

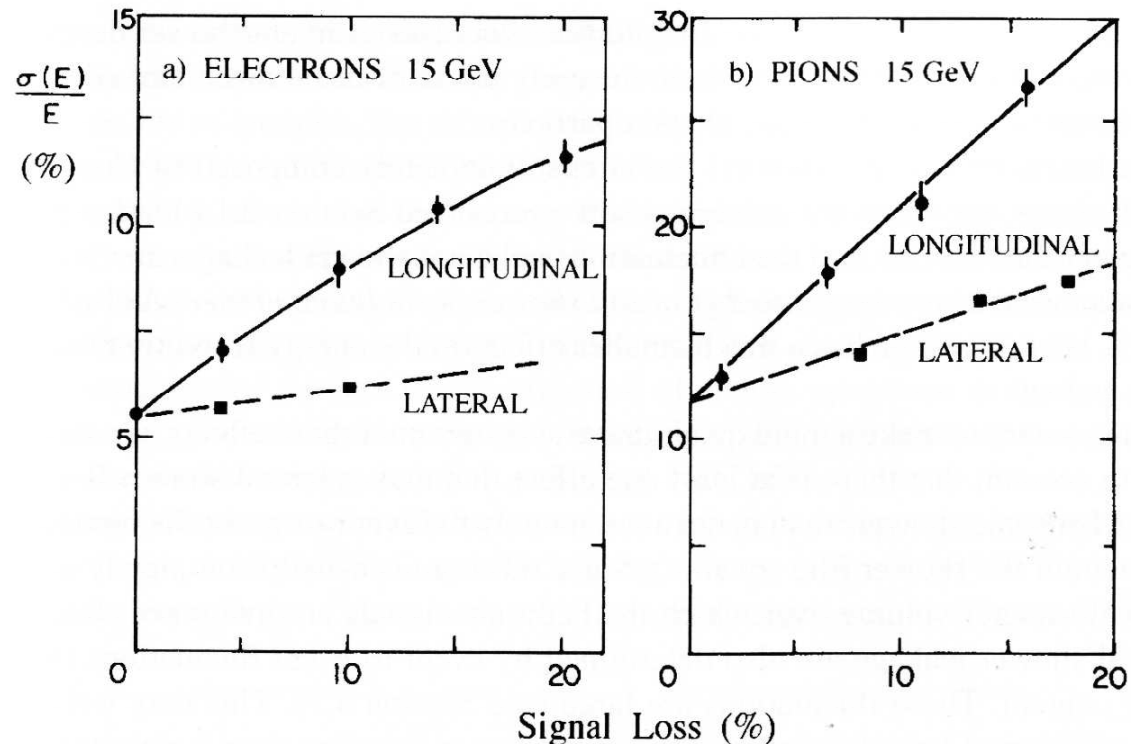
Wpływ wyływów energii na dokładność pomiaru (w przypadku braku poprawek)

Parametryzacja:

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

$f$  - ułamek traconej energii

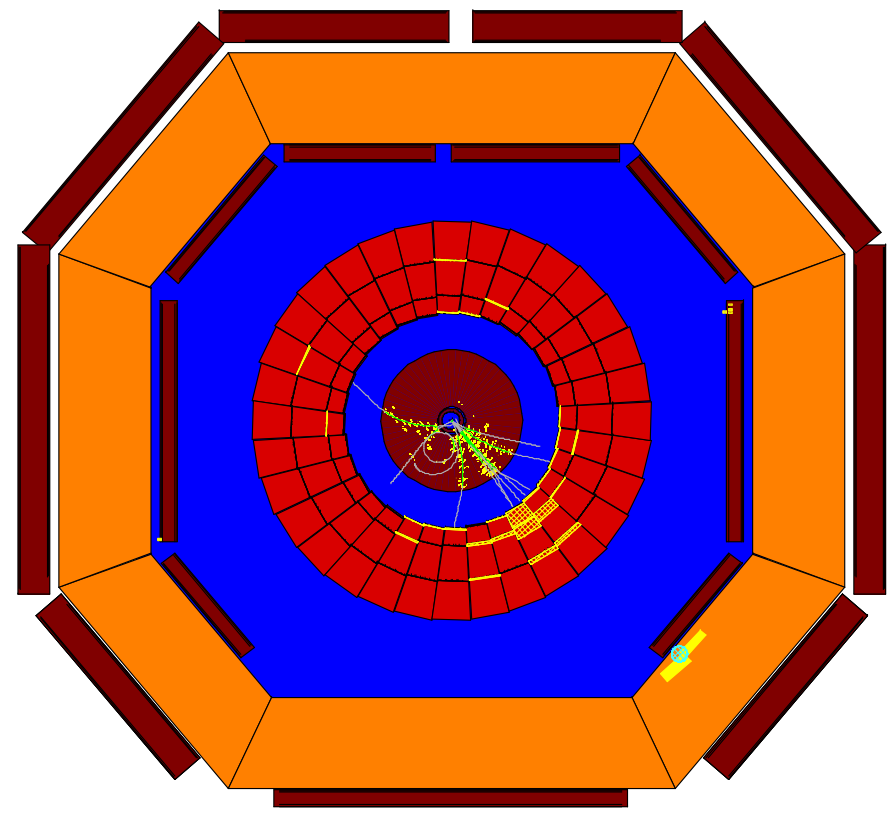
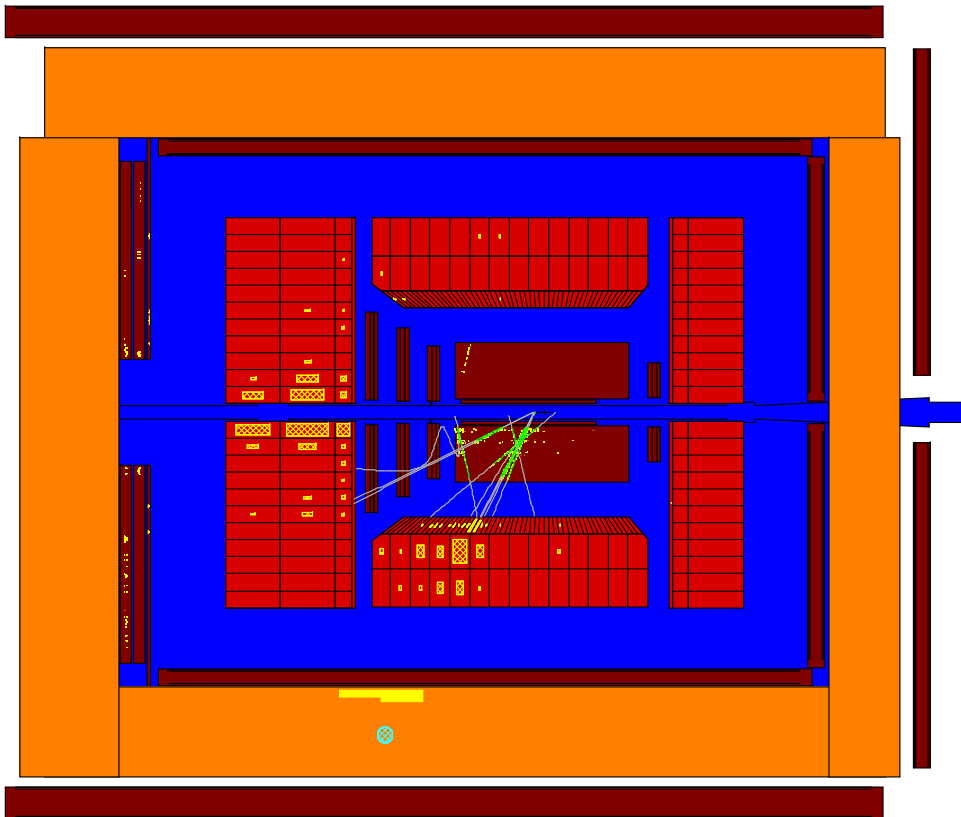
Aby zapewnić dokładny pomiar energii trzeba przynajmniej rozpoznawać takie przypadki.



# Kalorymetry

## Wyptywy energii

Wyptyw energii jetu obserwowany w kalorymetrze uzupełniającym detektora ZEUS



# Kalorymetry

## Wyływy energii

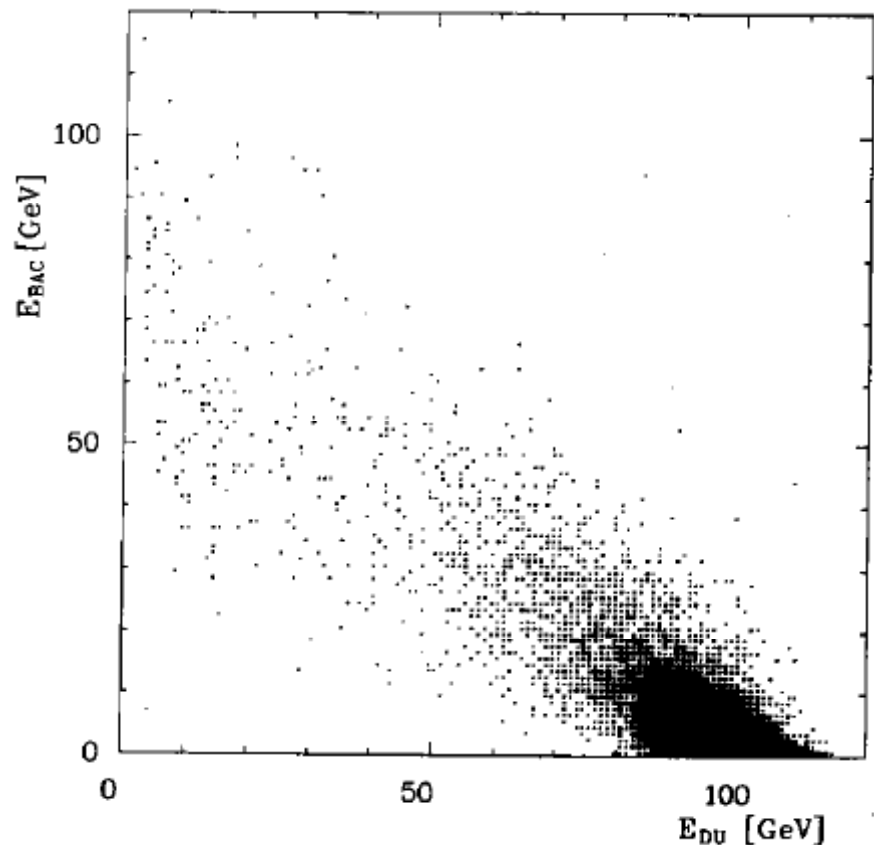
W detektorze ZEUS tzw. kalorymetr uzupełniający (BAC) wykorzystywał płyty stalowe jarzma elektromagnesu, pomiędzy które wstawiono aluminiowe komory proporcjonalne.

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

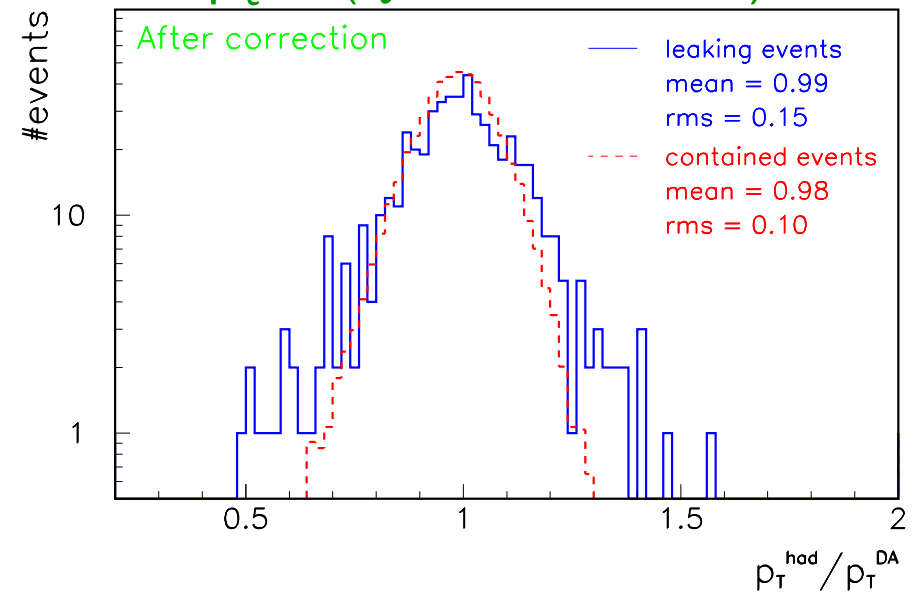
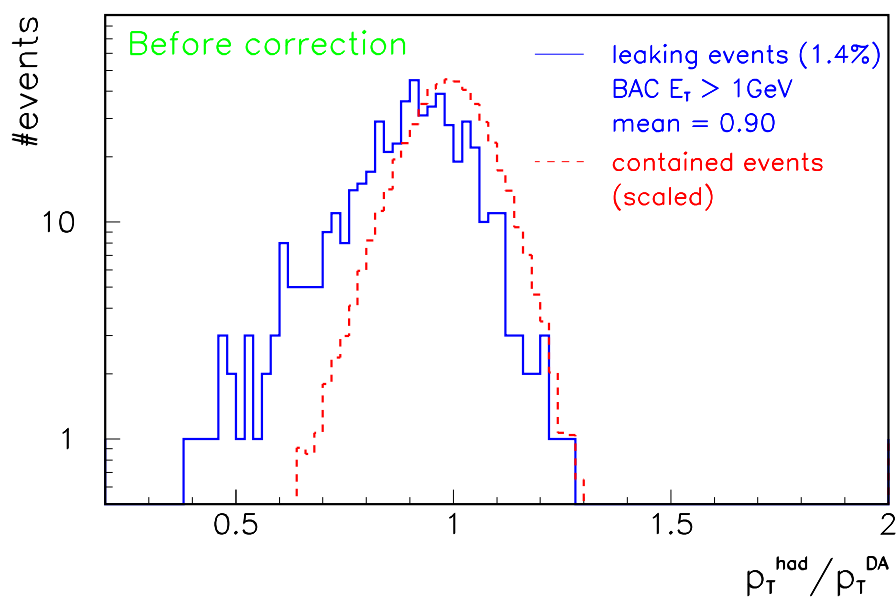


# Kalorymetry

## Wyływy energii

Wpływ kalorymetru uzupełniającego na pomiar pędu poprzecznego jetu.

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



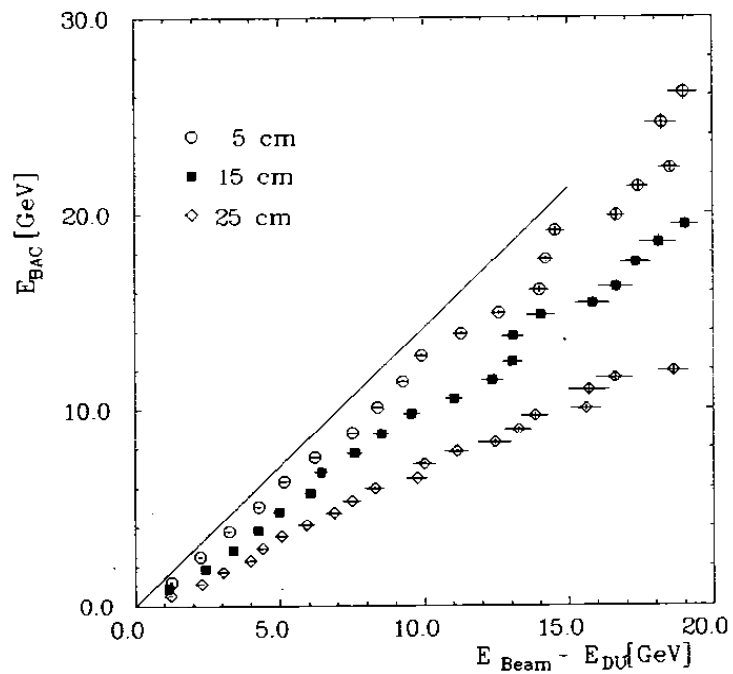
Mimo duży gorszej zdolności rozdzielczej może efektywnie “odcinać” wpływające kaskady, lub poprawiać ich energię.

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

# Kalorymetry

## Wyływy energii

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)

