

# Fizyka cząstek: detektory

prof. dr hab. A.F.Żarnecki

Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych IFD

## Wykład IV

- Kalorymetry elektromagnetyczne
- Kalorymetry hadronowe

# 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

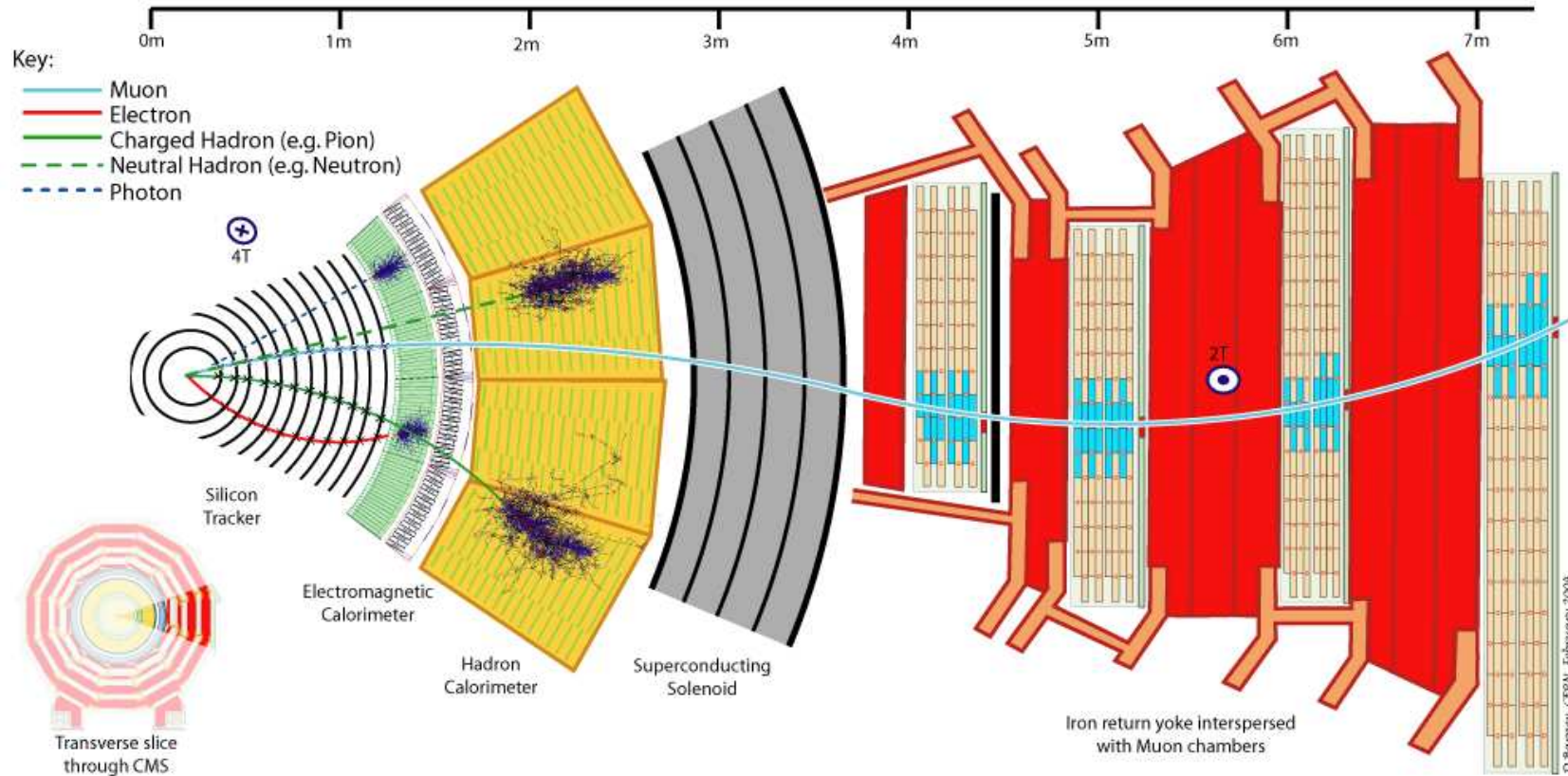
**Kalorymetry:** urządzenia w których wpadające cząstki lub strugi cząstek są całkowicie absorbowane, a część deponowanej energii zamieniana jest na mierzalny sygnał

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)

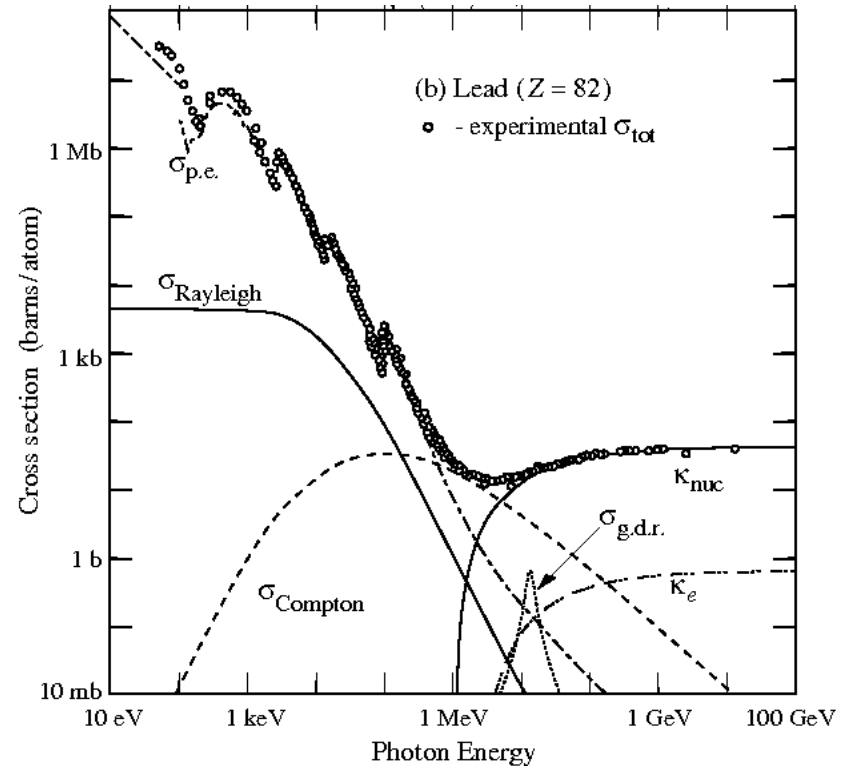
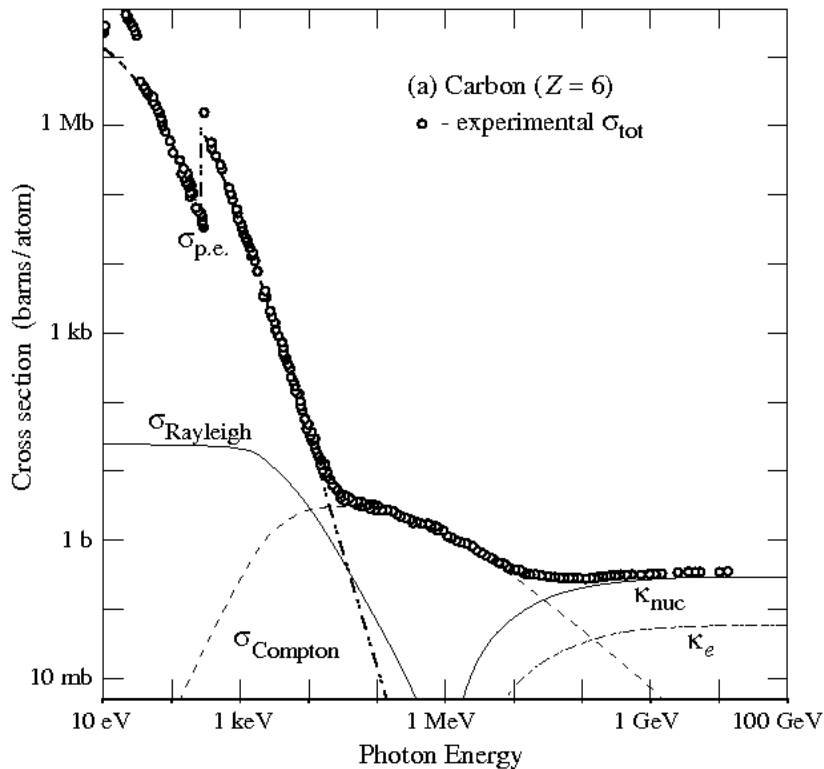
# Kalorymetry

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



# Fotony

Przekrój czynny na oddziaływanie z ośrodkiem w funkcji energii



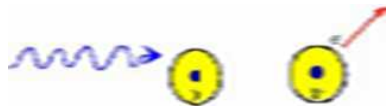
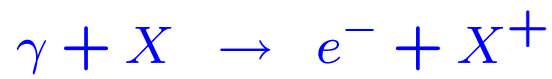
W obszarze małych energii dominuje efekt fotoelektryczny ( $\sigma_{p.e.}$ )

Dla energii rzędu 1 MeV istotny wkład od efektu Comptona ( $\sigma_{Compton}$ )

Dla energii powyżej  $\sim 10$  MeV dominuje kreacja par  $e^+e^-$  w polu jąder ( $\kappa_{nuc}$ )

# Fotony

## Efekt fotoelektryczny



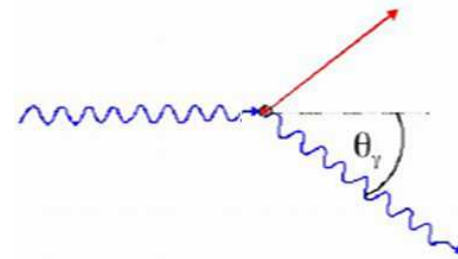
Dla  $I_K < E_\gamma \ll m_e$  oczekujemy

$$\sigma_{p.e.} \approx \sqrt{\frac{32m_e^7}{E_\gamma^7}} \alpha^4 Z^5 \sigma_{th}$$

gdzie:

$$\sigma_{th} = \frac{8}{3} \pi r_e^2 = \frac{8\pi\alpha^2}{3m_e^2}$$

## Efekt Comptona



W granicy dużych energii  $E_\gamma \gg m_e$

$$\sigma_{Compton} \approx \frac{Z \pi \alpha^2}{m_e E_\gamma} \left[ \ln \left( \frac{E_\gamma}{m_e} \right) + \frac{1}{2} \right]$$

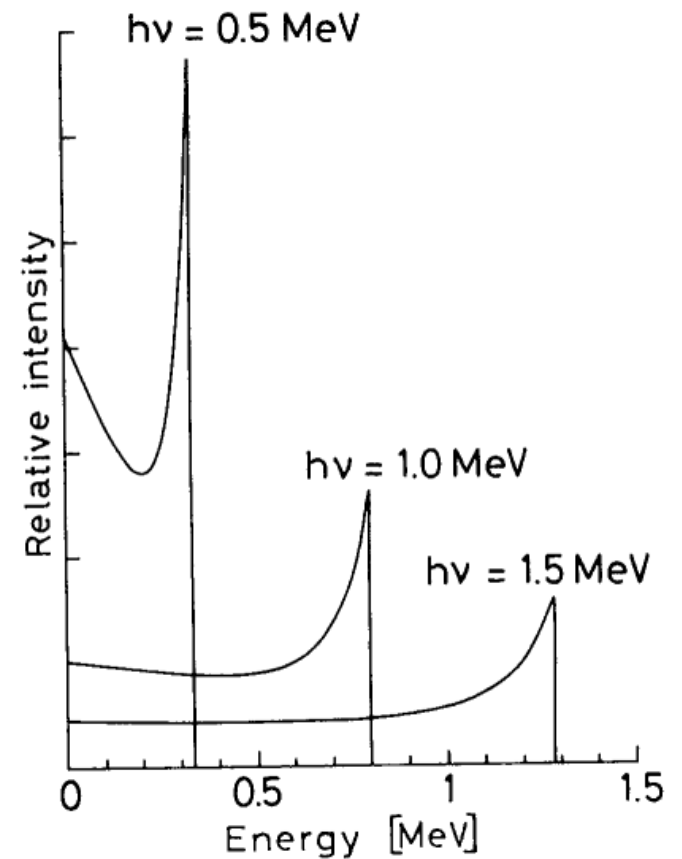
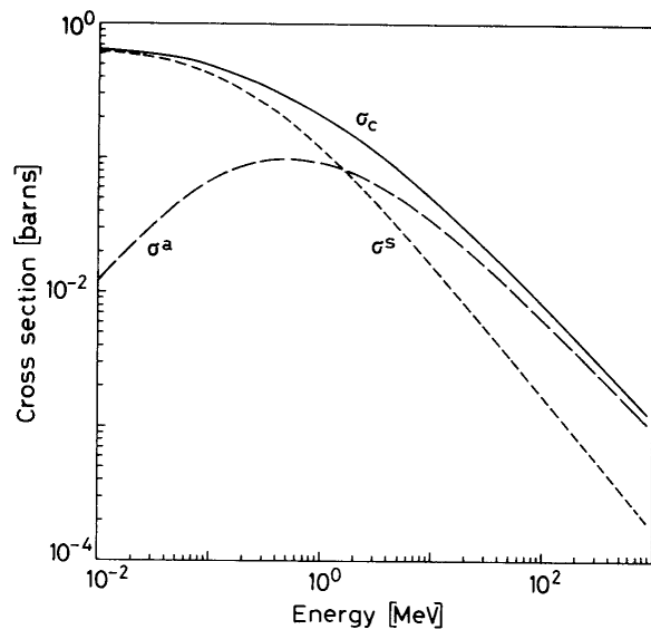
# Fotony

## Efekt Comptona

W obszarze małych energii straty energii fotonu są znikome - rozpraszanie elastyczne.

Straty energii dominują dla  $E > 2\text{MeV}$

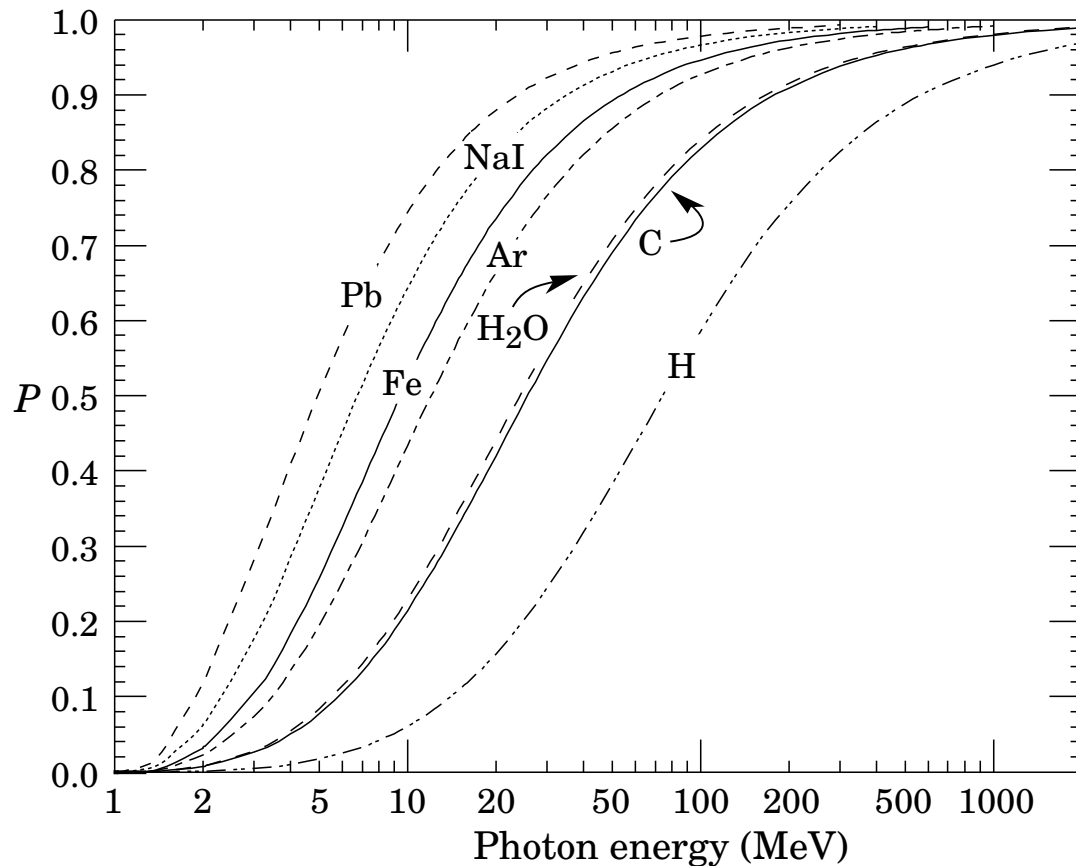
Rozkład energii elektronów:



# Fotony

## Kreacja par

Prawdopodobieństwo, że w wyniku oddziaływania fotonu powstanie para  $e^+e^-$



Powyżej  $\sim 1 \text{ GeV}$ :

praktycznie wyłącznie kreacja par.

Dla niższych energii wkład produkcji par rośnie ze wzrostem  $Z$

# Fotony

Spadek intensywności wiązki

$$I(x) = I_0 \cdot \exp\left(-\frac{x}{\lambda}\right)$$

$\lambda$  - średnia droga swobodna:

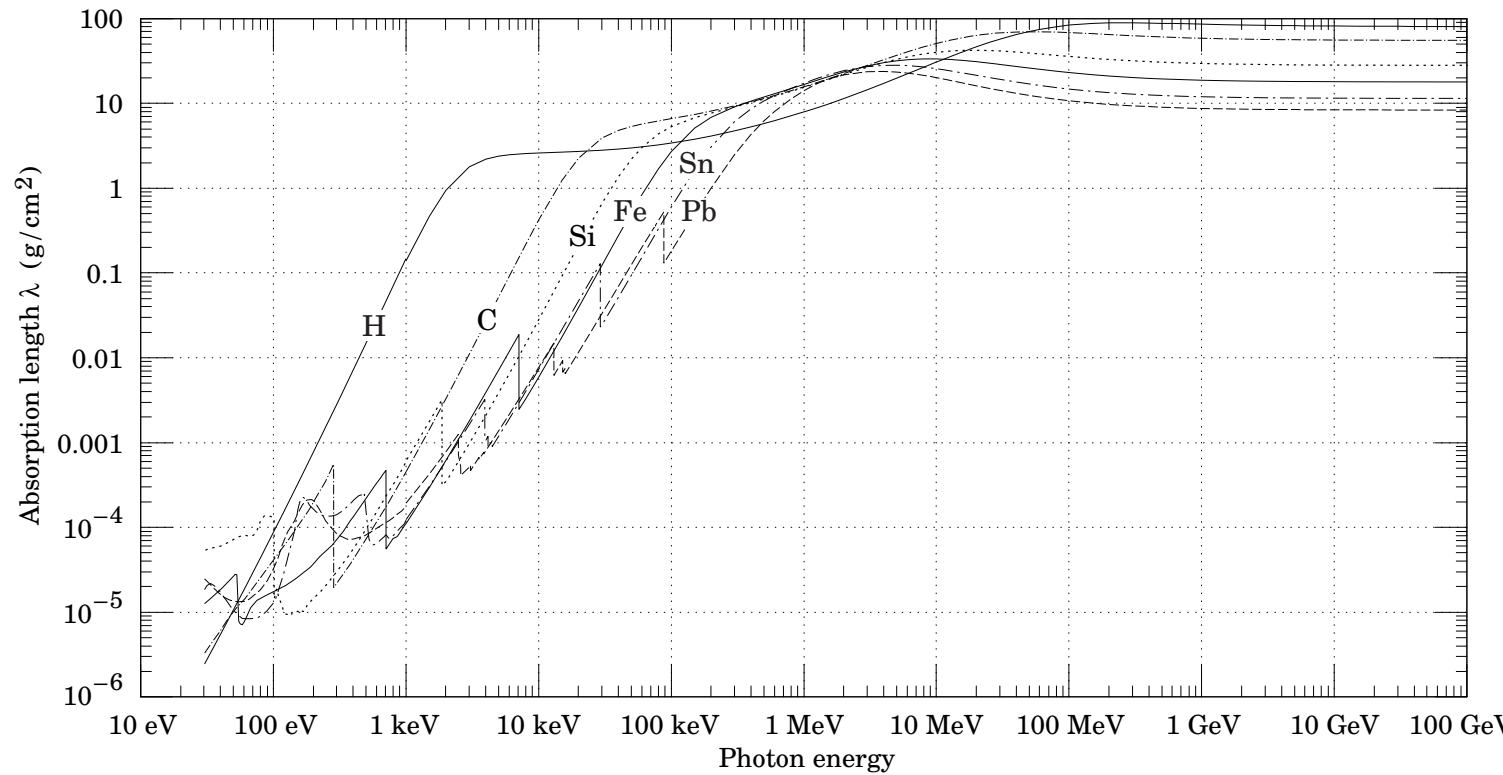
$$\lambda = \frac{1}{\sigma_{tot}} \cdot \frac{1}{n_a}$$

$n_a$  - gęstość molekuł:

$$n_a = \frac{N_A \rho}{A}$$

W obszarze dużych energii  
(dominuje kreacja par):

$$\lambda = \frac{9}{7} X_0$$





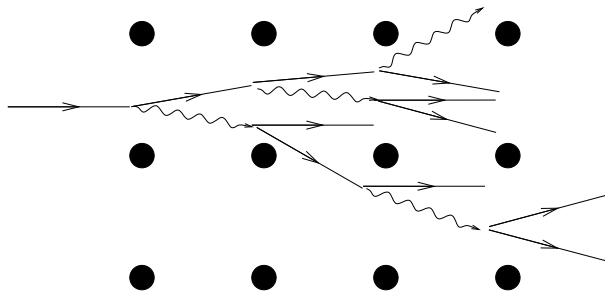
# Kaskada E-M

## Kaskada elektromagnetyczna

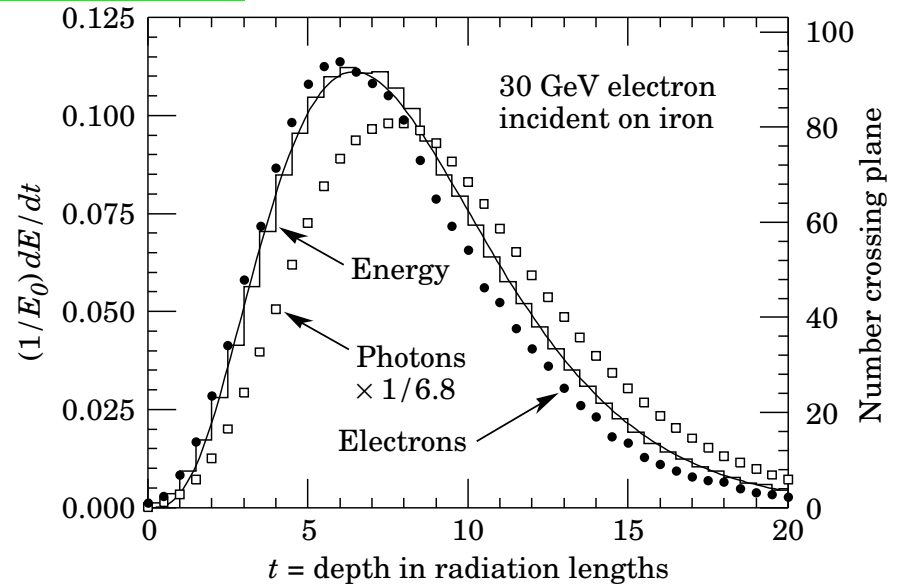
Wysokoenergetyczny foton wpadając w materię konwertuje na parę  $e^+e^-$

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



Profil podłużny - rozkład Gamma:

$$\frac{dE}{dt} = E_0 b \frac{(bt)^{a-1} e^{-bt}}{\Gamma(a)}$$

pozycja maksimum  $[X_0]$

$$t_{max} = \frac{a-1}{b} \approx \ln \frac{E}{E_c} + C_j$$

$$C_\gamma = +0.5, C_e = -0.5$$

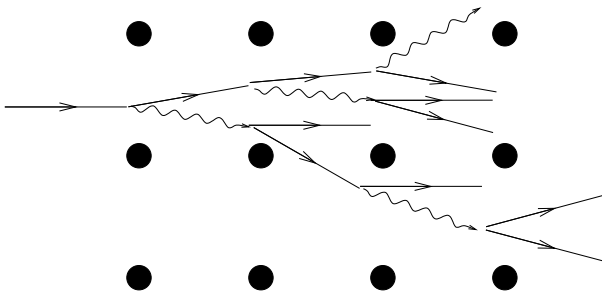
# Kalorymetry

## Kaskada elektromagnetyczna

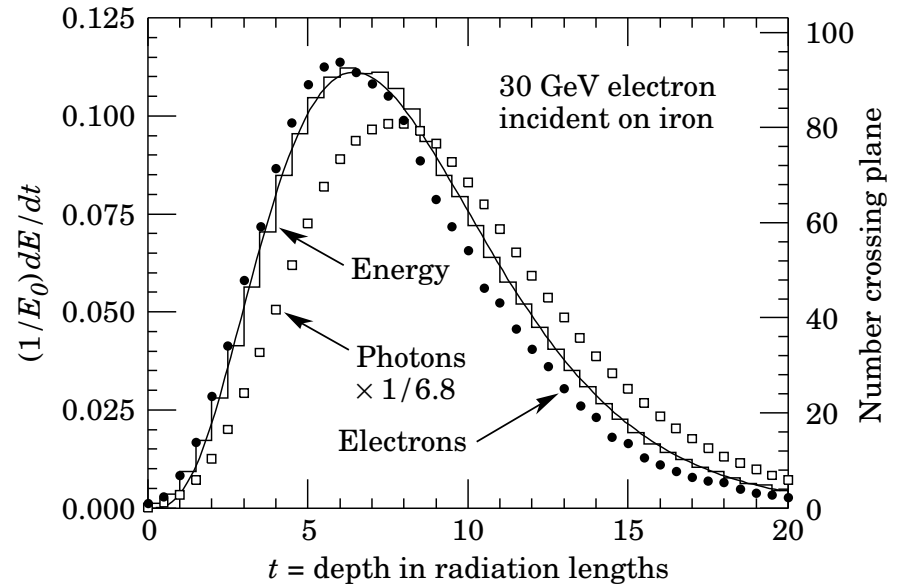
Wysokoenergetyczny foton wpadając w materię konwertuje na parę  $e^+e^-$

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:  $\sim \ln \frac{E}{E_c}$

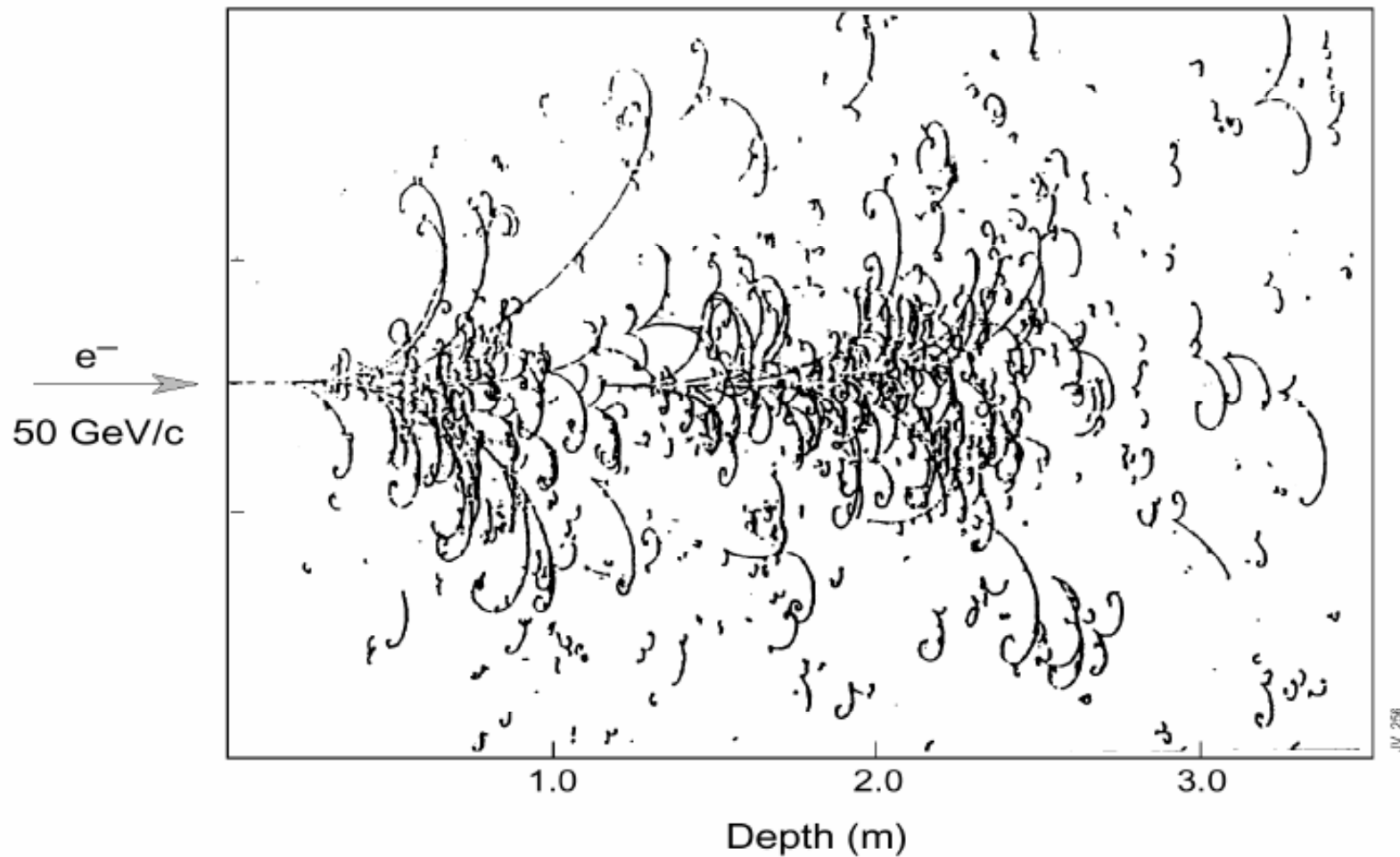
Rozmiary poprzeczne skalują się z tzw. "promieniem Molier":

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

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

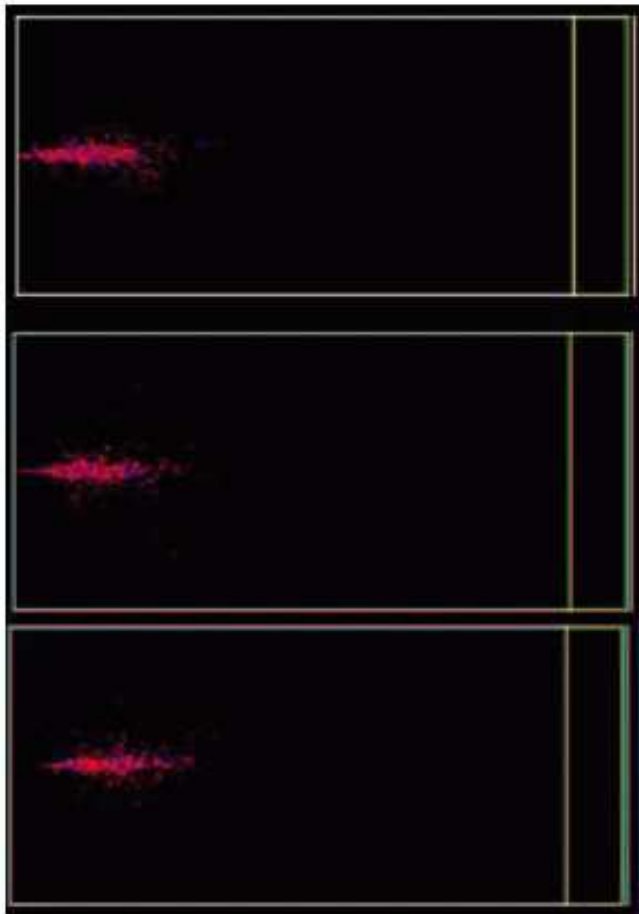


JV\_258

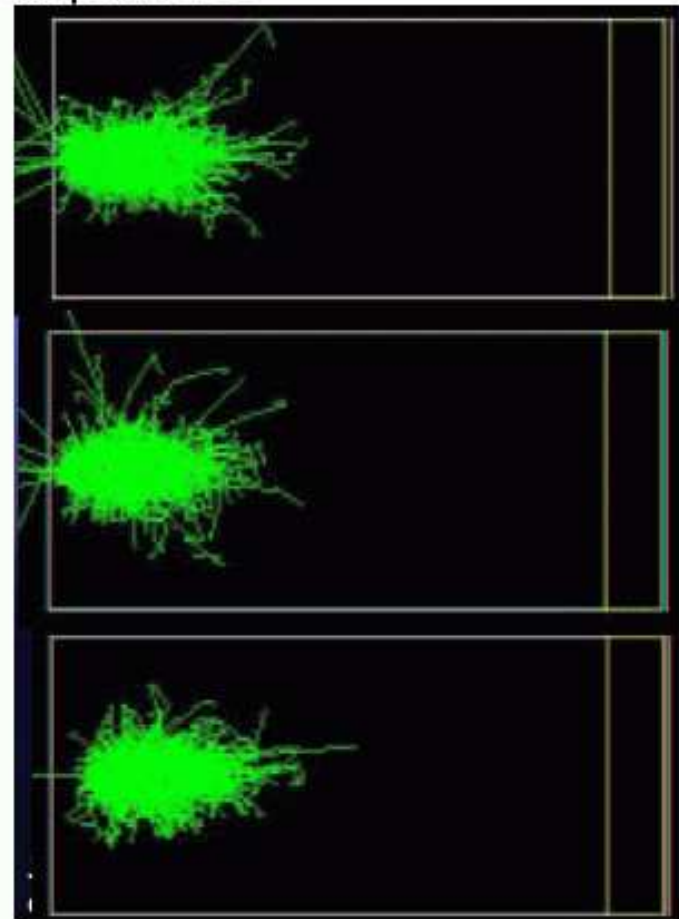
# Kalorymetry

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:

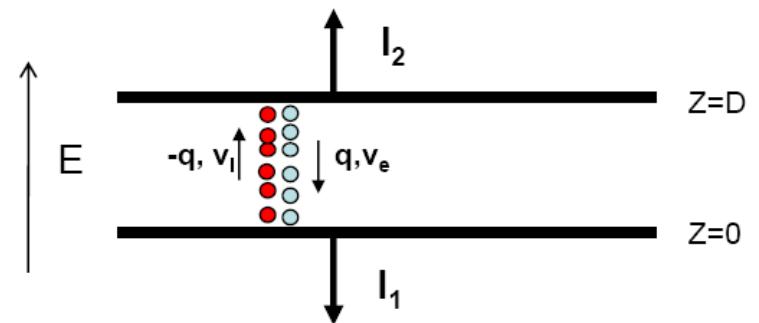
prawie połowa strat energii prowadzi do scyntylacji, druga połowa - jonizacja.

	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

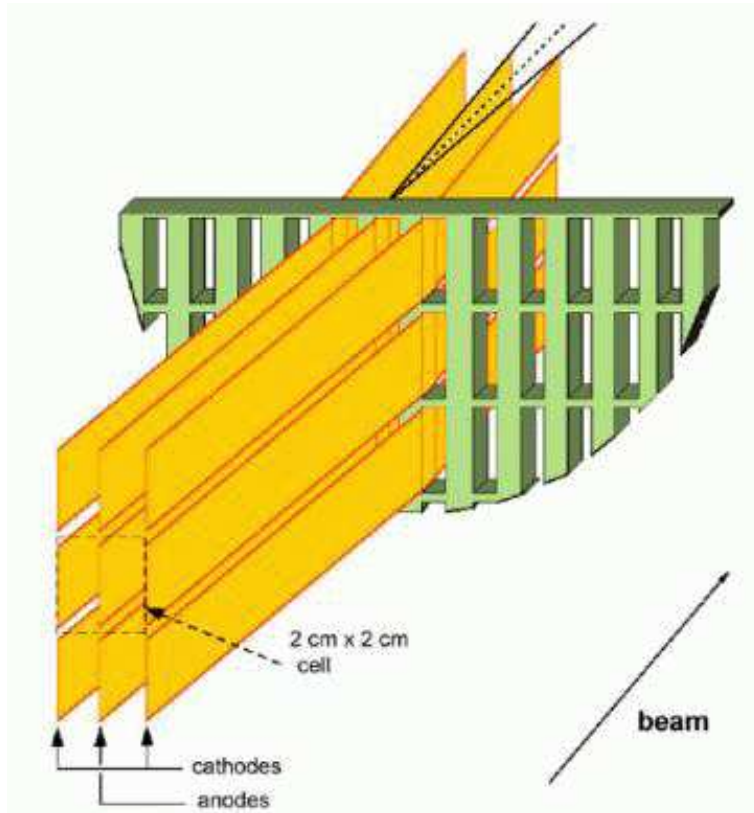


Pomiar zarówno jonizacji jak i światła  
 $\Rightarrow$  najdokładniejszy pomiar energii,  
ale trudny do uzyskania

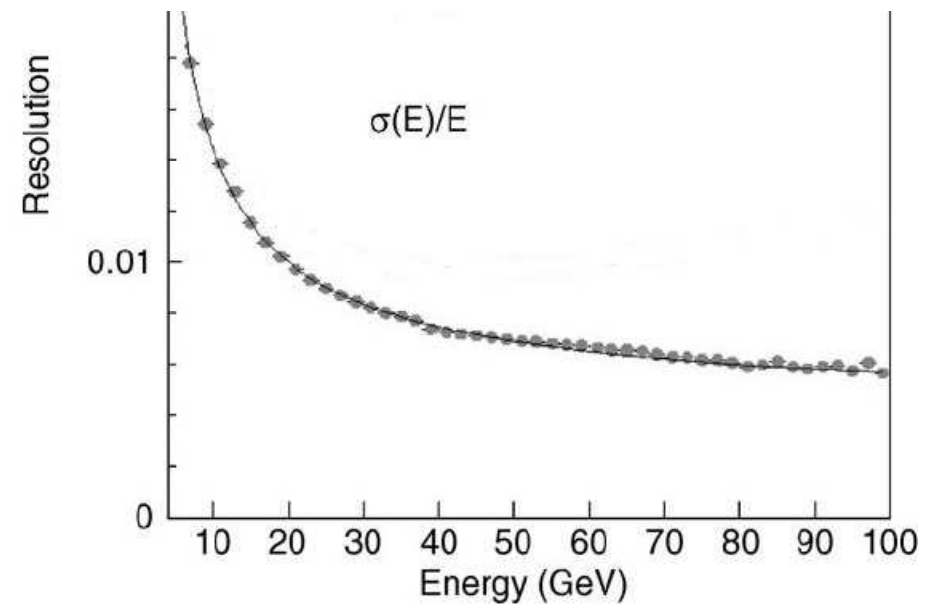
# Kalorymetry

## 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**: 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

## 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.

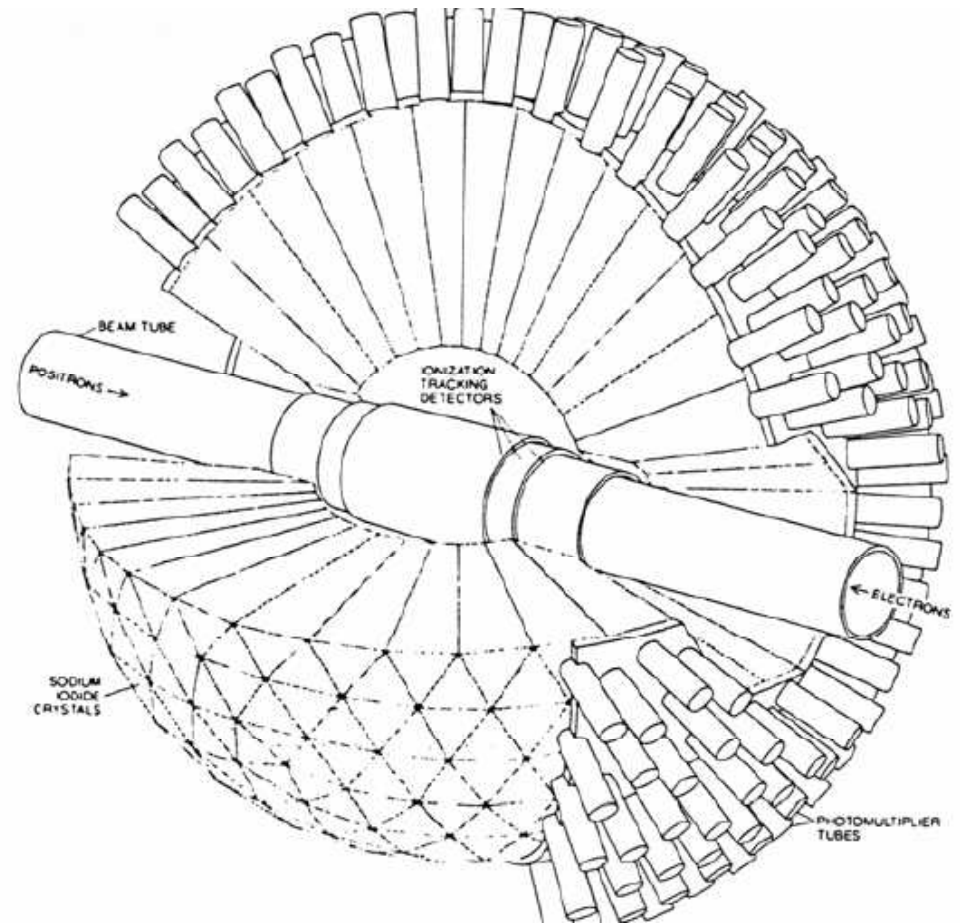
Detektor Cristal Ball (SLAC) ⇒

Odkrycie mezonu  $J/\psi$  (1974)

672 + 60 kryształów NaI(Tl)

pomiar energii fotonów 0.1-1 GeV

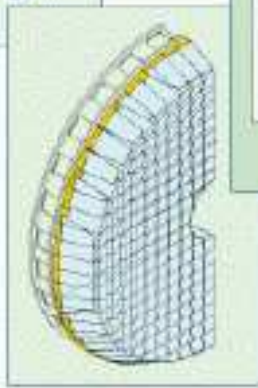
$$\frac{\sigma}{E} = 3.5 - 2.6\%$$



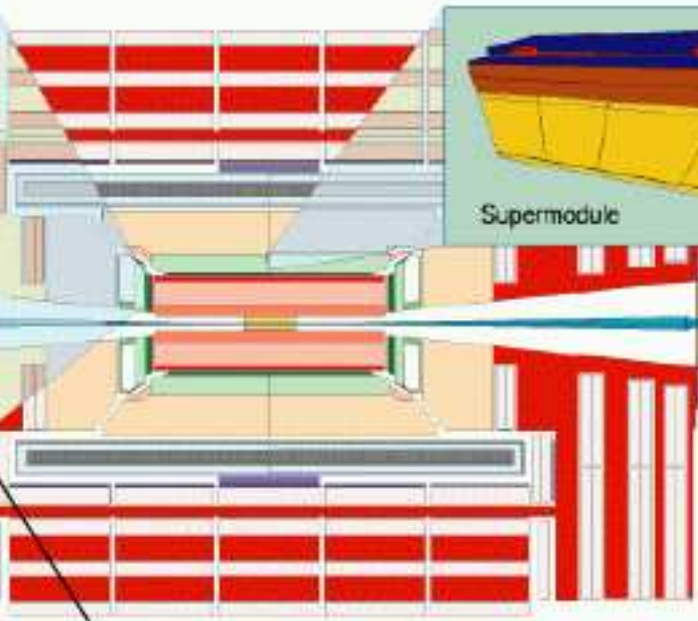
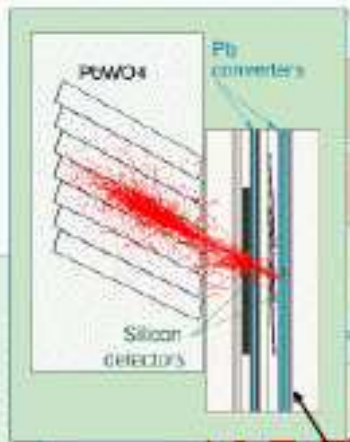
# Kalorymetry

## Kalorymetr EM detektora CMS

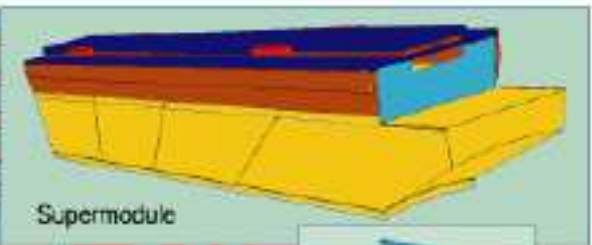
5x5 "supercrystal"



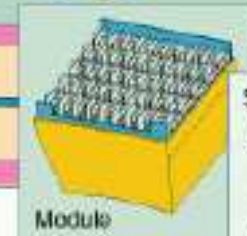
Endcap, readout with VPT



Preshower



Supermodule



Module



Sub module

Barrel, readout with APD

# Kalorymetry

## Kalorymetr EM detektora CMS

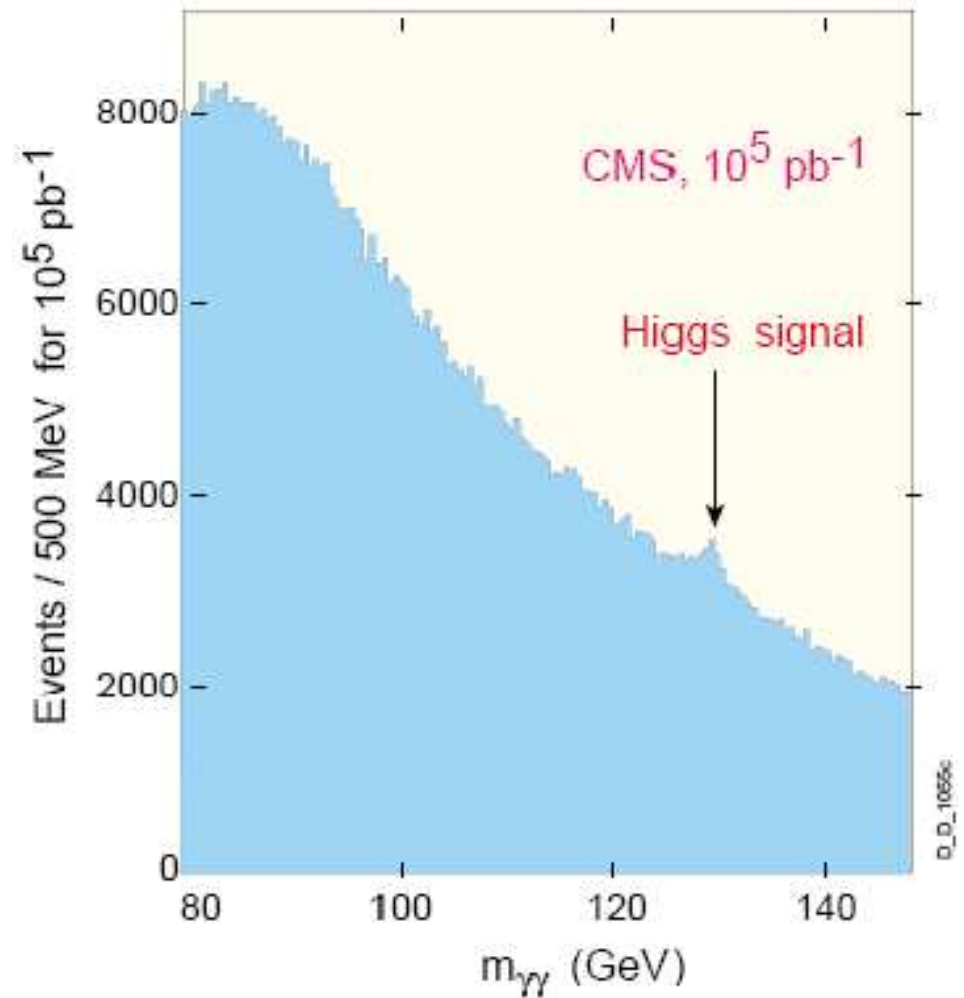
Łącznie 76 000 kryształów

Kryształ sekcji “do przodu”



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

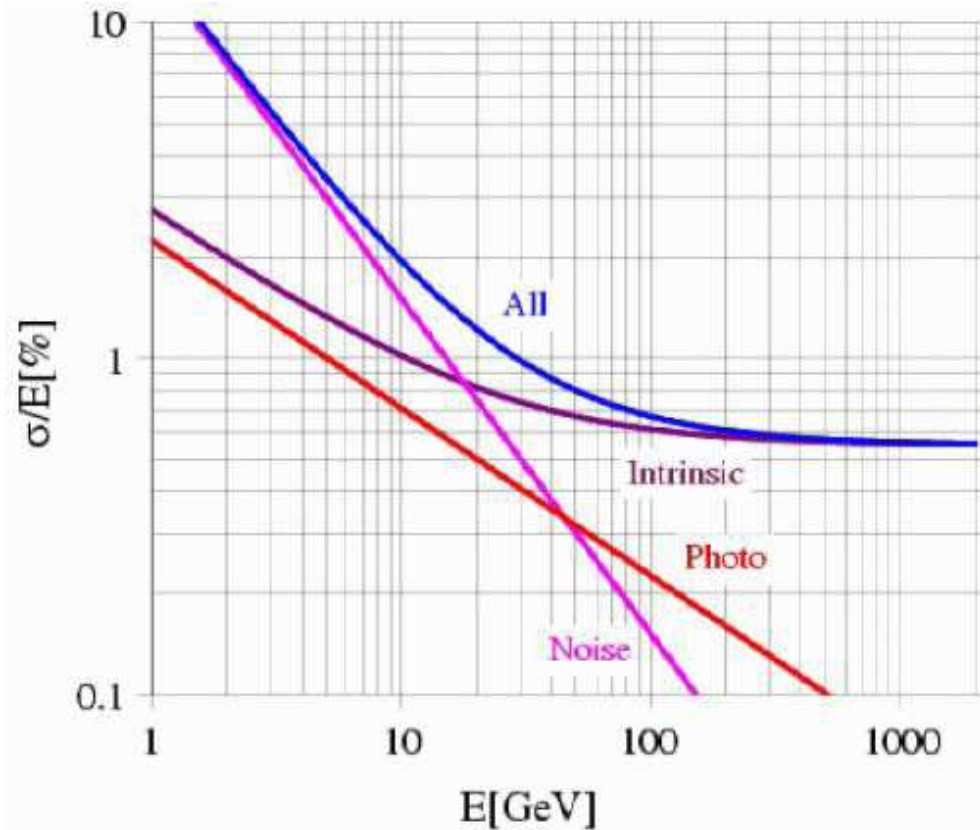
Główny kanał dla  $m_h \sim 120\text{GeV}$



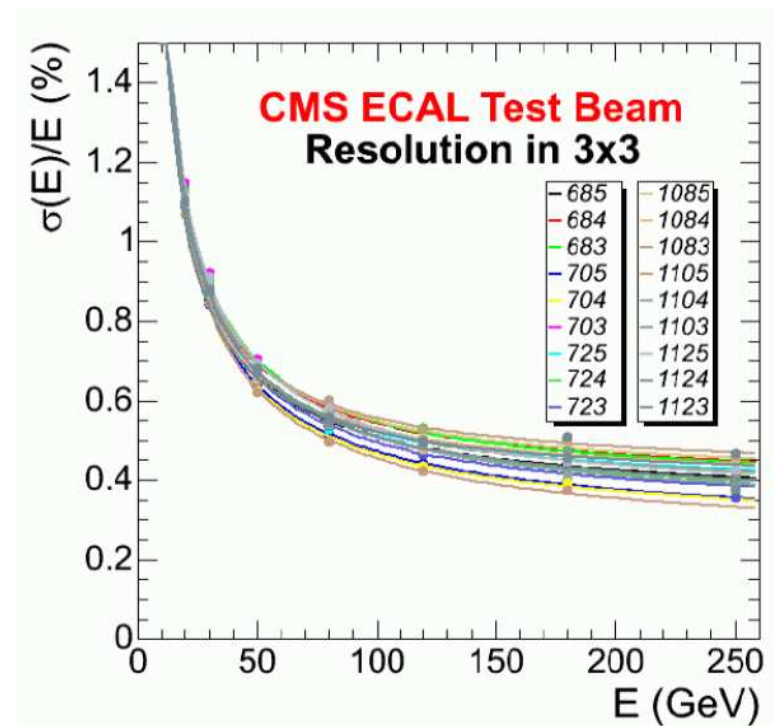
# Kalorymetry

## Kalorymetr EM detektora CMS

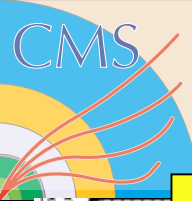
Rozdzielczość zakładana



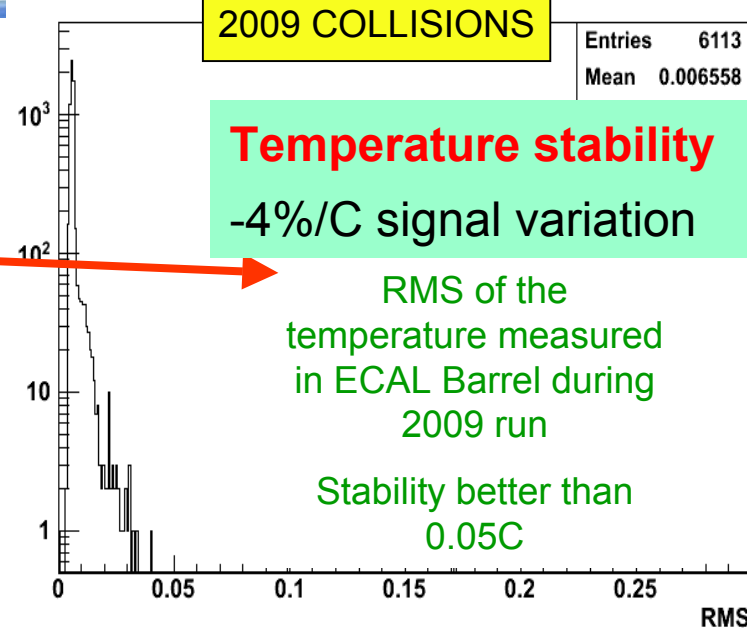
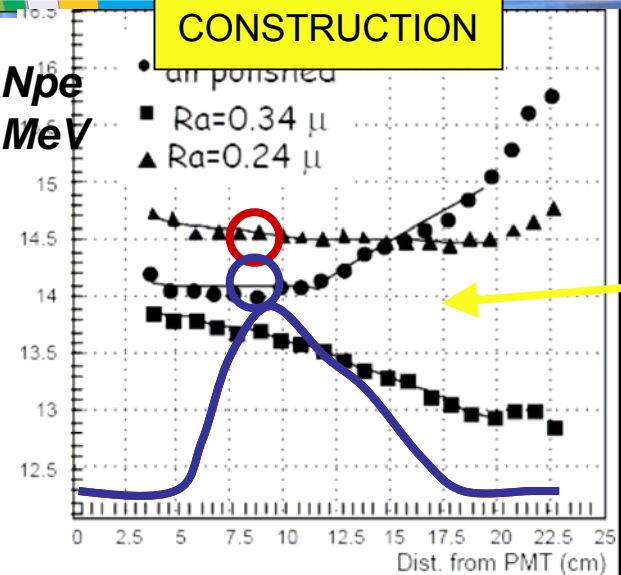
Uzyskana w testach



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

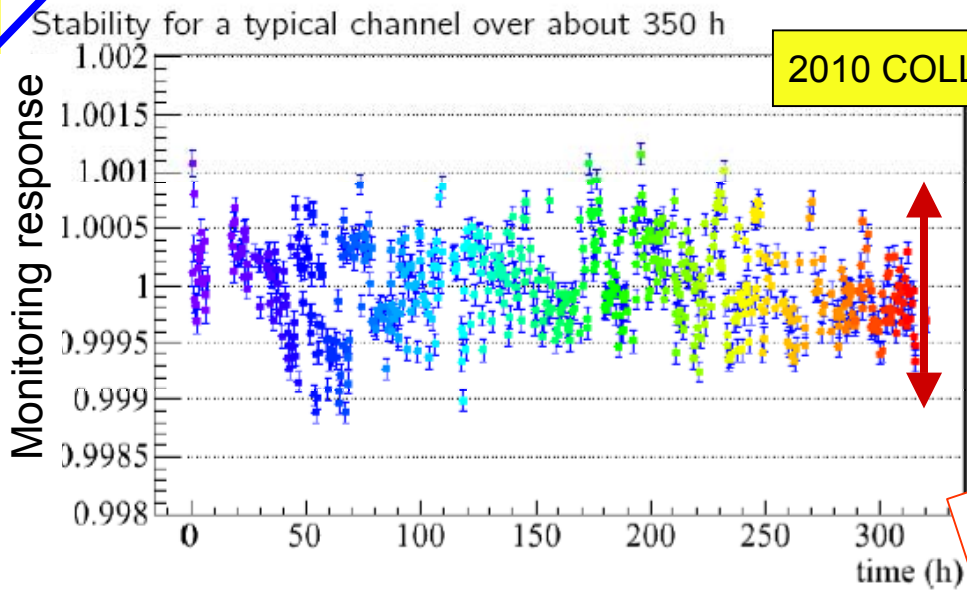


# Challenges for the ECAL constant term



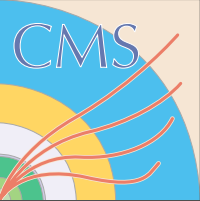
**Crystal uniformity ~0.3%**  
 $|dLY/X_0| < 0.35\%/X_0$   
 between 3 and 13  $X_0$

**Radiation damage followed by monitoring ~0.2%**



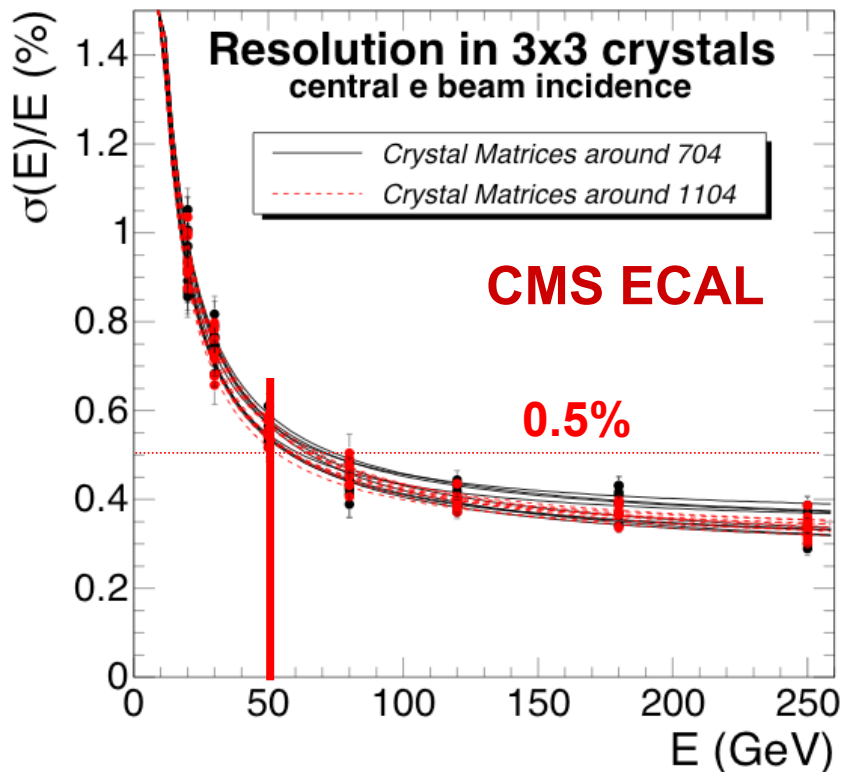
**+/- 0.1%**

TALK



# CMS ECAL test-beam performance

TEST-BEAM



$$\frac{\sigma}{E} = \frac{2.8\%}{\sqrt{E(\text{GeV})}} \oplus \frac{125}{E(\text{MeV})} \oplus 0.3\%$$

# Kalorymetry

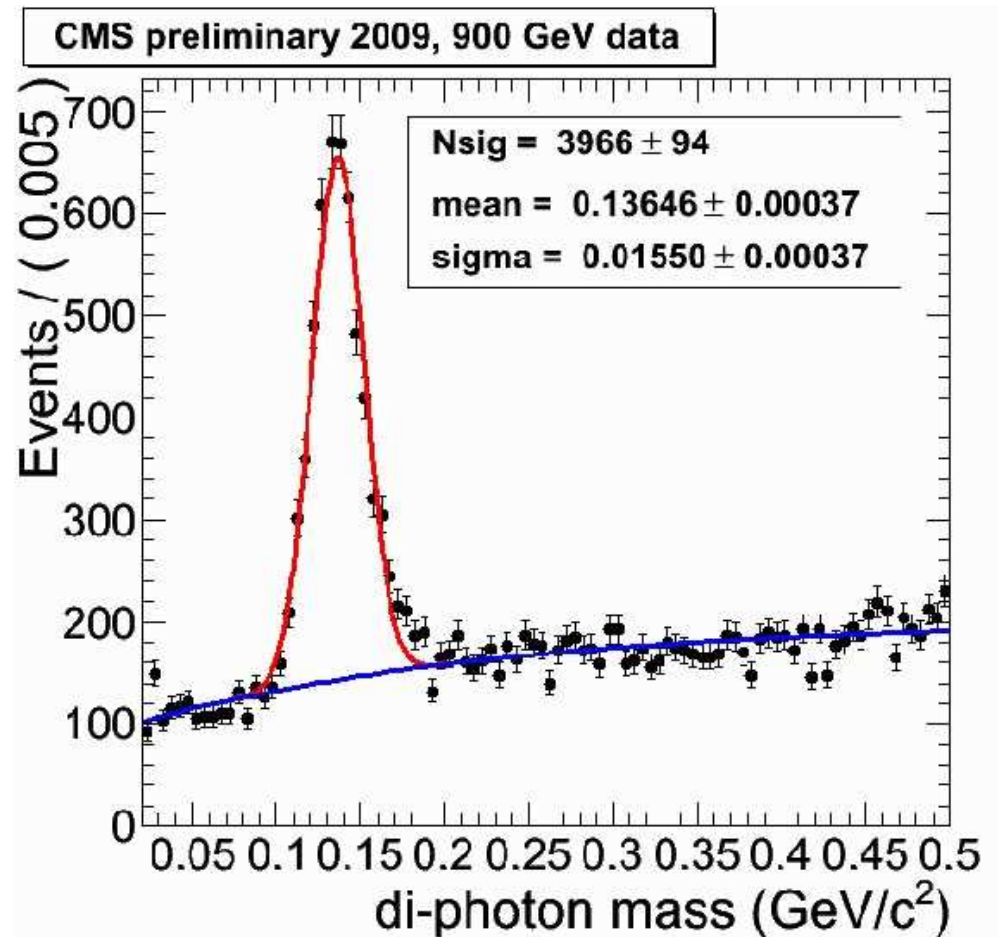
## Kalorymetr EM detektora CMS

Pierwsze wyniki z LHC.

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

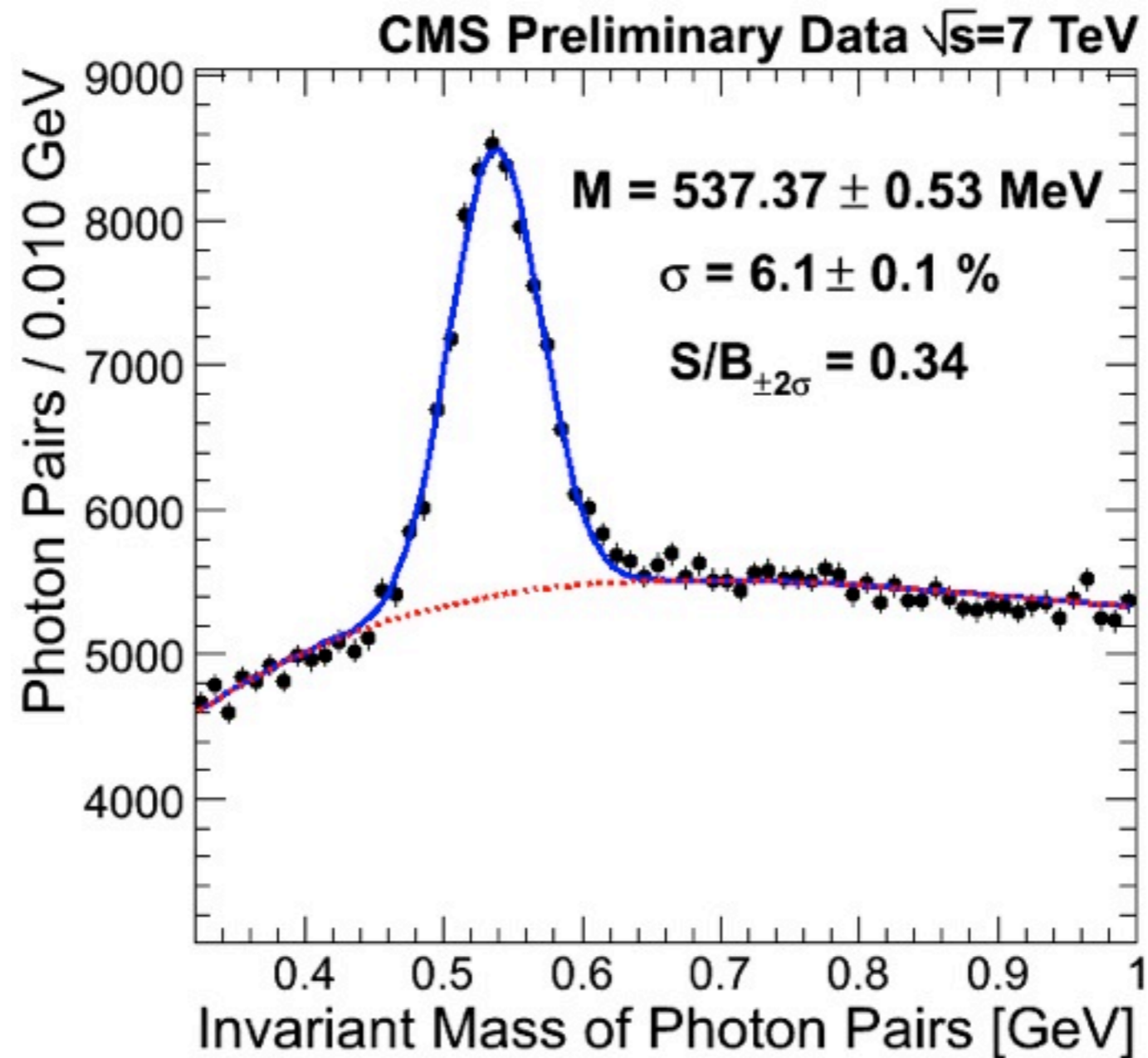
Bardzo wyraźny sygnał  $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$

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

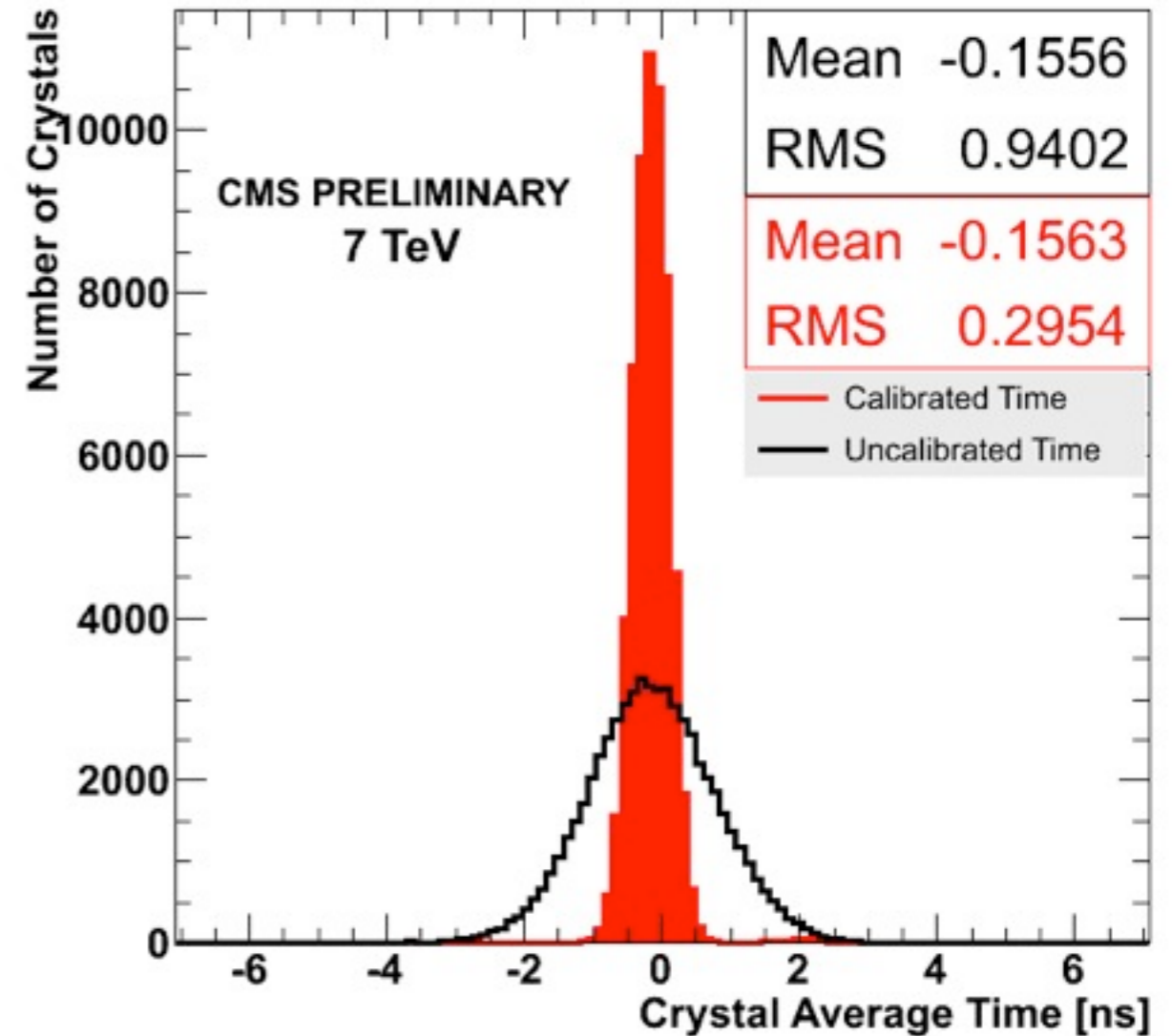
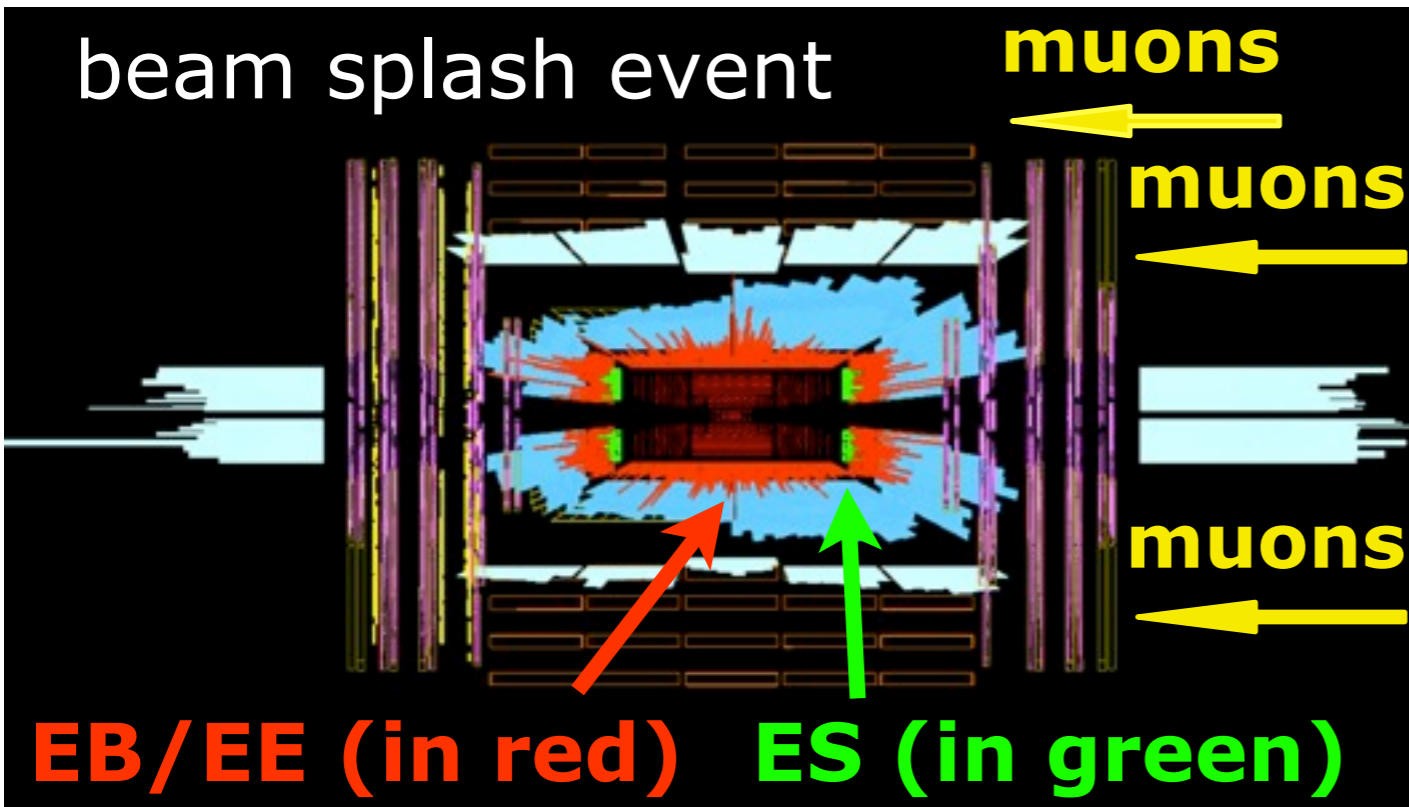




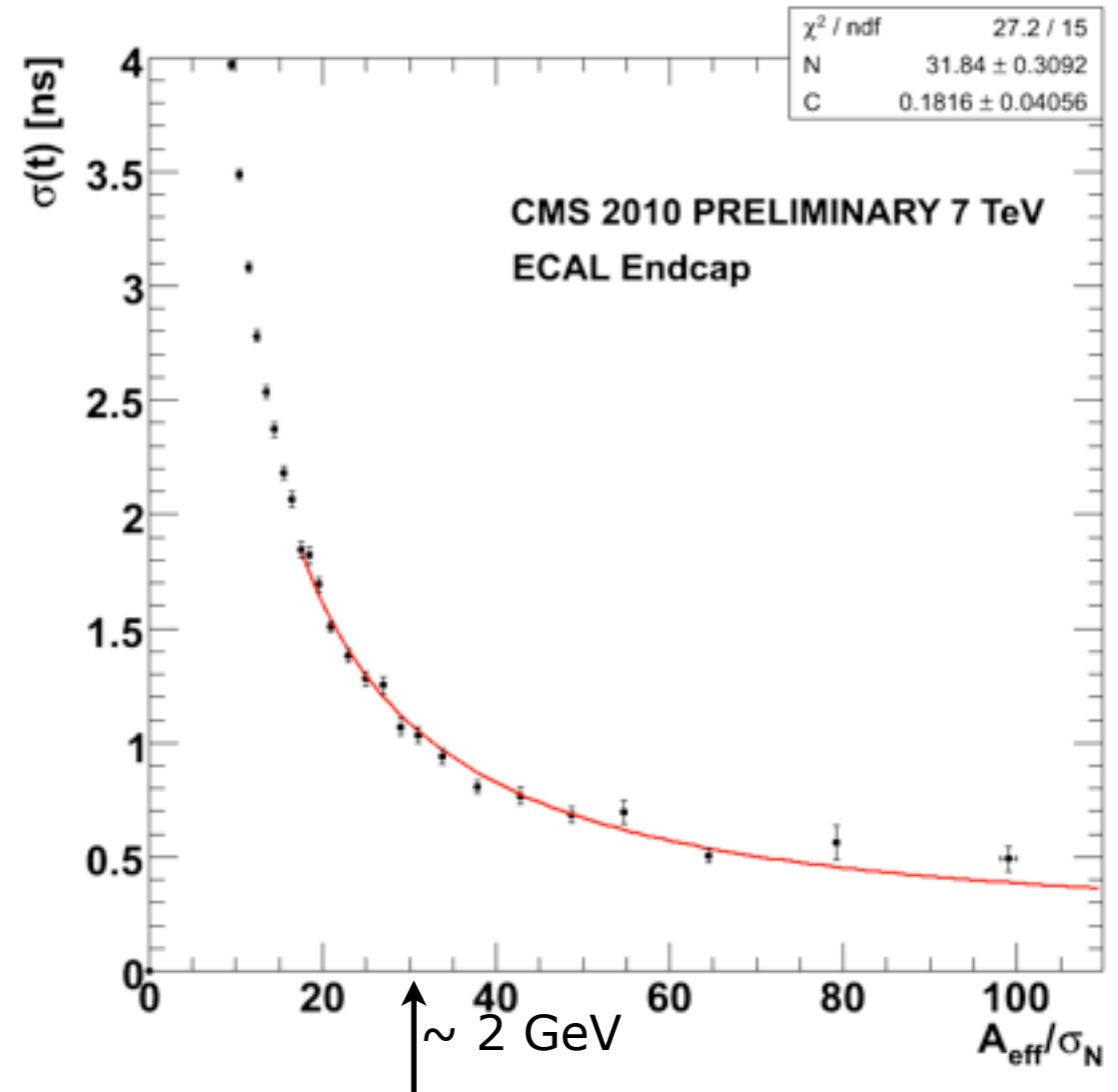
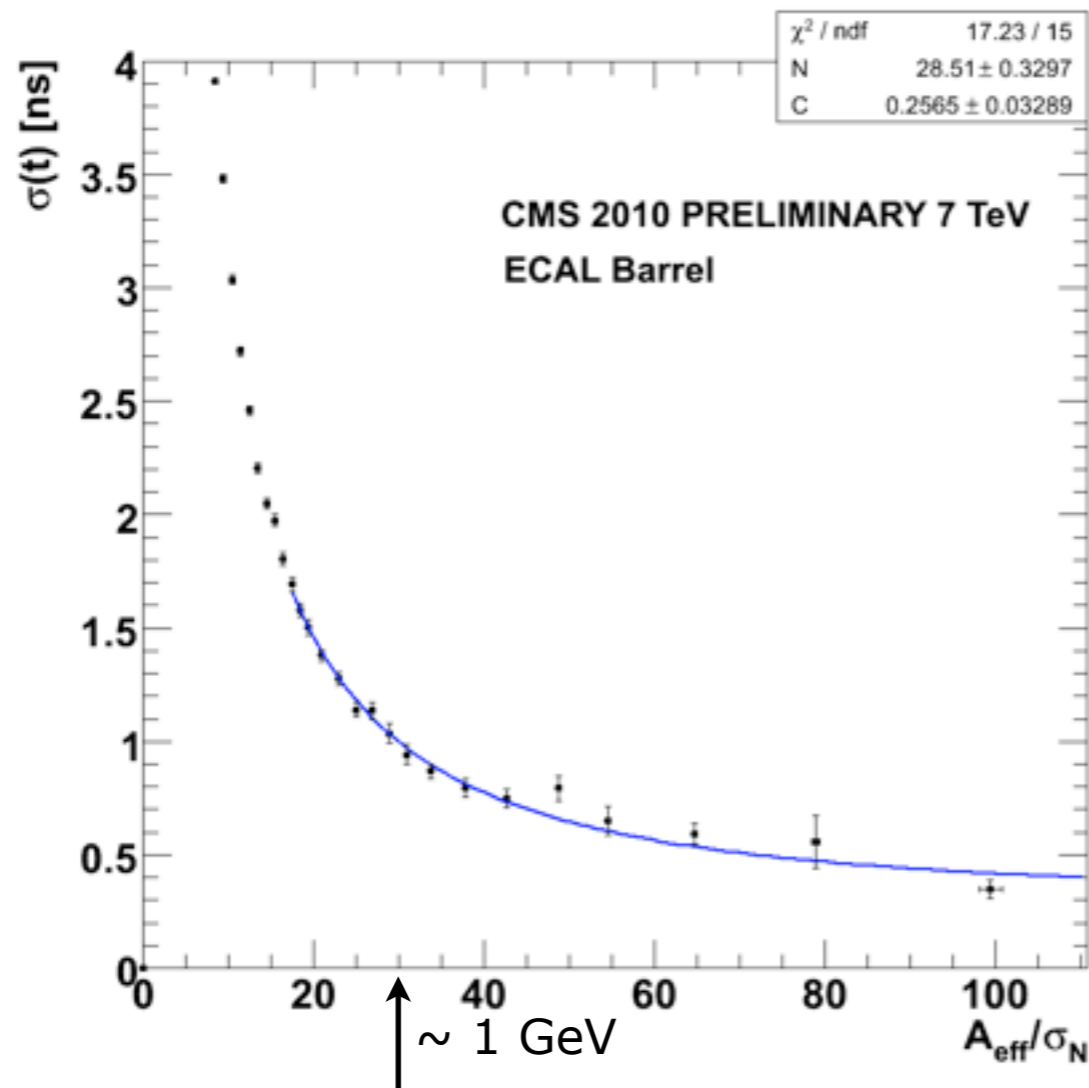
# More on Resonances



Reconstructed  $\eta \rightarrow \gamma\gamma$  peak in **7 TeV** collision data, about 25.5 thousands candidates for  $\int L = 0.43 \text{nb}^{-1}$



- Used 2009 LHC beam splashes for the online synchronisation (**black**) of the trigger towers (5x5 channels)
- Residual channel timing within a trigger tower is further improved offline (**red shaded**):  $\sim 0.3\text{ns}$  RMS spread



- **The plot shows the time resolution as a function of the effective amplitude, derived by comparing the time in nearby crystals, in the same cluster**
  - The noise and the systematic term in the time resolution are extracted from a parametric fit to data (see CFT-09-006 for a discussion of the analysis procedure)
  - The observed noise term is consistent with expectations from test beam data and measurements during Cosmic Run at 4 Tesla (2008)
  - The constant term in the time resolution due to local systematic effects is of about 200 ps

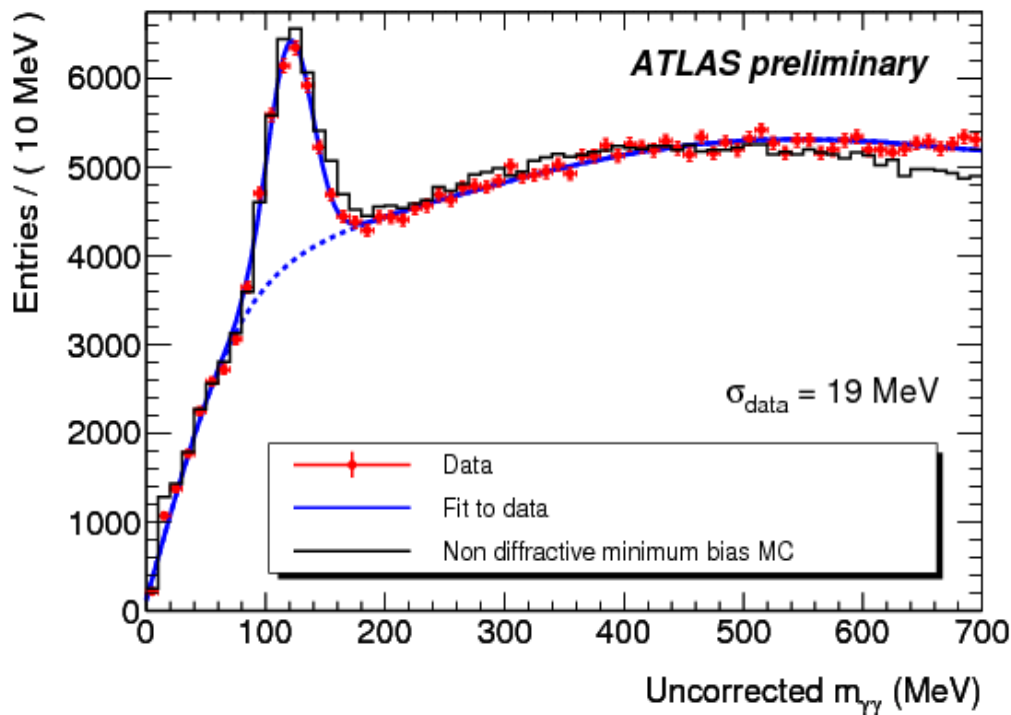


# Summary on the electromagnetic calorimeters

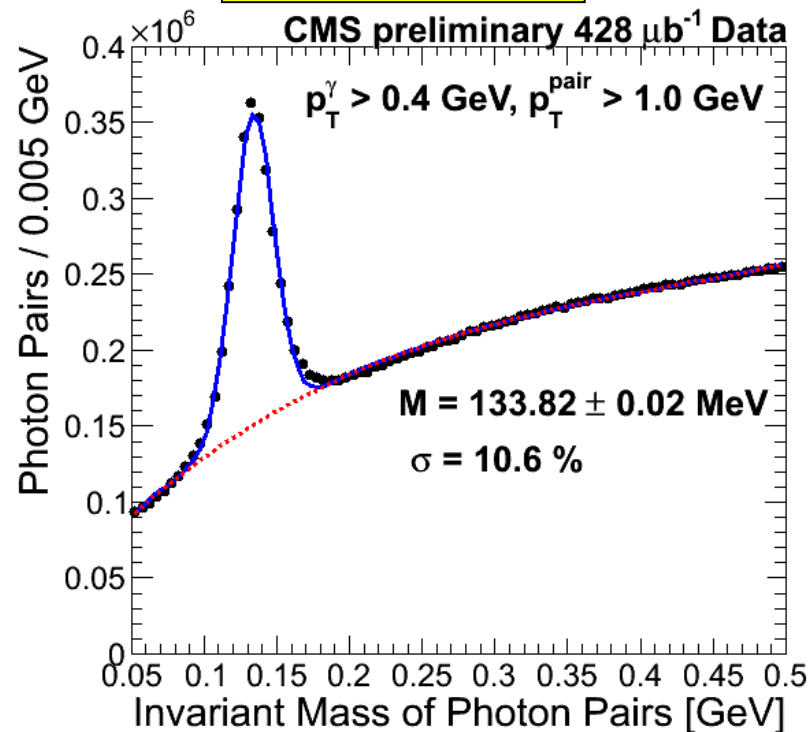


The detectors are well timed, they are used in the trigger, the design stability is reached, there is incredible level of accuracy in the MC detector description, and they are ready to do physics analysis.

2009 COLLISIONS



2010 COLLISIONS



# Kalorymetry

## Kalorymetry jednorodne

Zdolności rozdzielcze typowych kalorymetrów jednorodnych w eksperymentach HEP

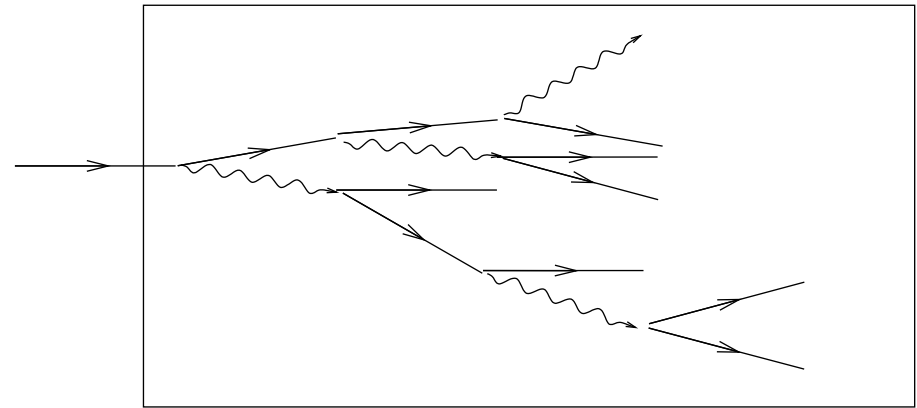
Technology (Exp.)	Depth	Energy resolution	Date
NaI(Tl) (Crystal Ball)	$20X_0$	$2.7\%/E^{1/4}$	1983
Bi <sub>4</sub> Ge <sub>3</sub> O <sub>12</sub> (BGO) (L3)	$22X_0$	$2\%/\sqrt{E} \oplus 0.7\%$	1993
CsI (KTeV)	$27X_0$	$2\%/\sqrt{E} \oplus 0.45\%$	1996
CsI(Tl) (BaBar)	$16\text{--}18X_0$	$2.3\%/E^{1/4} \oplus 1.4\%$	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

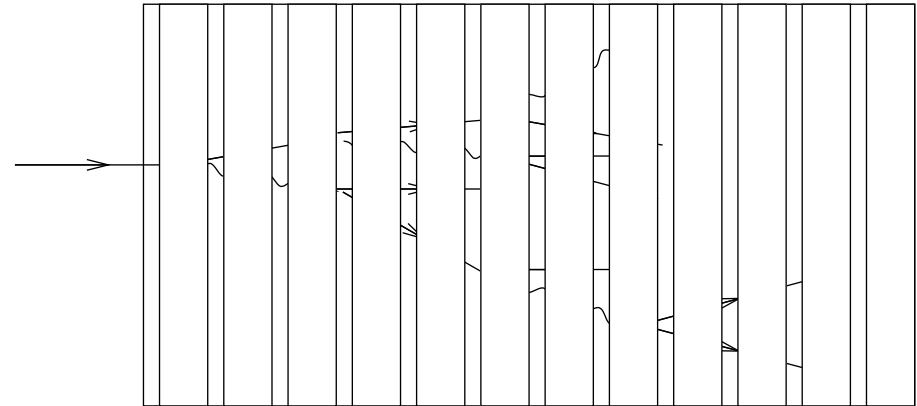
⇒ częściej wykorzystywanym w eksperymentach HEP rozwiązaniem są kalorymetry próbkujące

# Kalorymetry

## Kalorymetry próbkujące

Kaskada rozwija się w gęstym absorberze.

Rzwoj kaskady jest “próbkowany” w cienkich warstwach aktywnych.



Zalety:

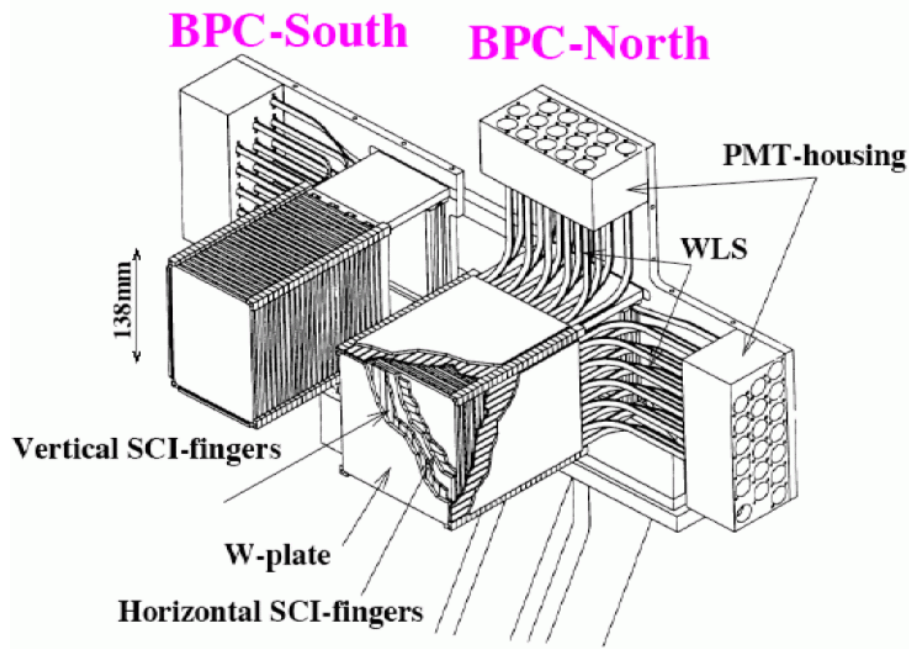
- mniejsze, można użyć bardzo gęstego absorbera
- tańsze, absorber zwykle tańszy od elementów odczytowych
- większe możliwości optymalizacji, zwłaszcza dla kaskad hadronowych

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 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.

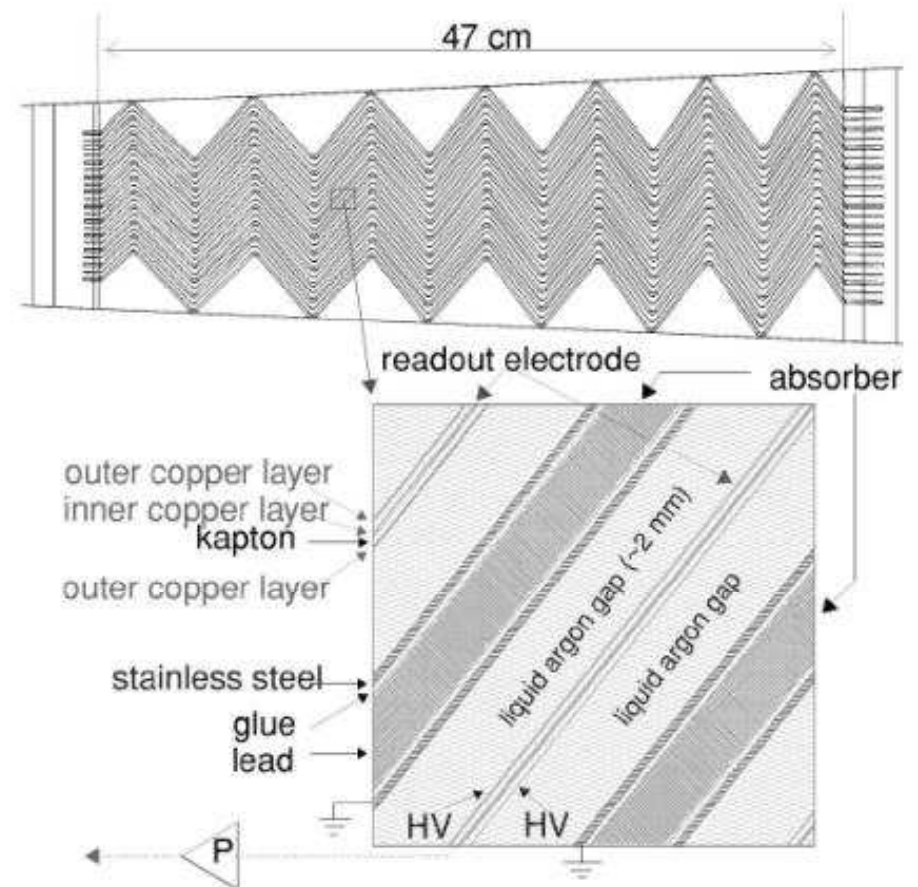
Warstwy ołowiu: 1.1 – 2.2mm (zależnie od kierunku)

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

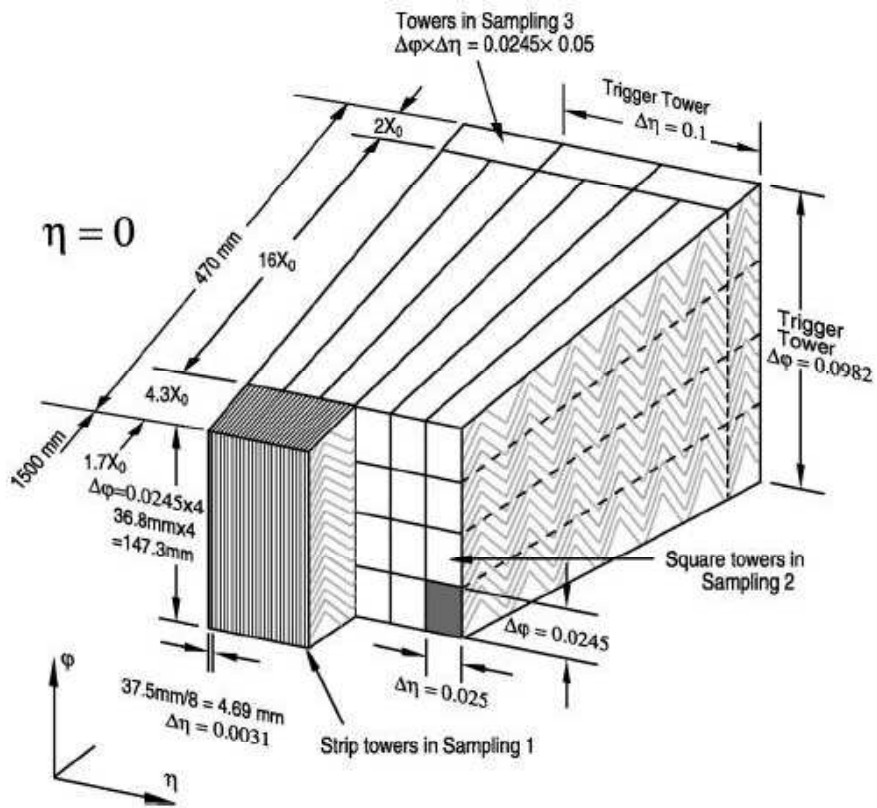
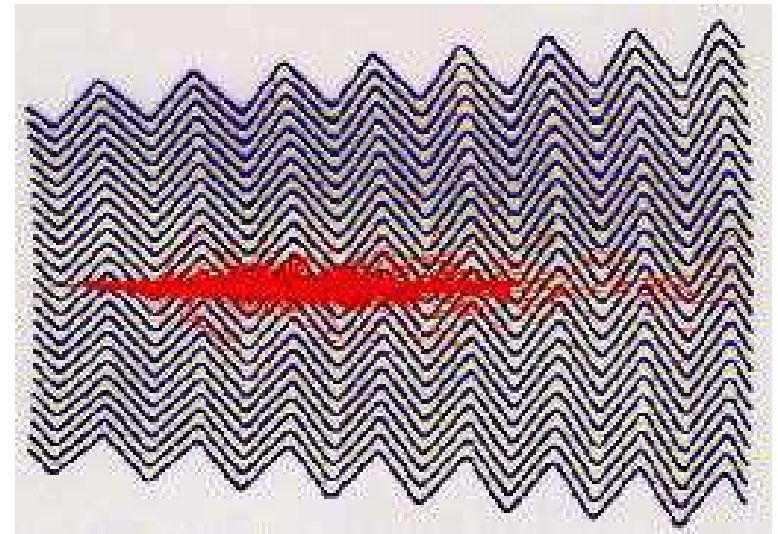


FIG. 17. Schematic view of the segmentation of the ATLAS electromagnetic calorimeter.



# 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  $t_{\text{abs}}$  - 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

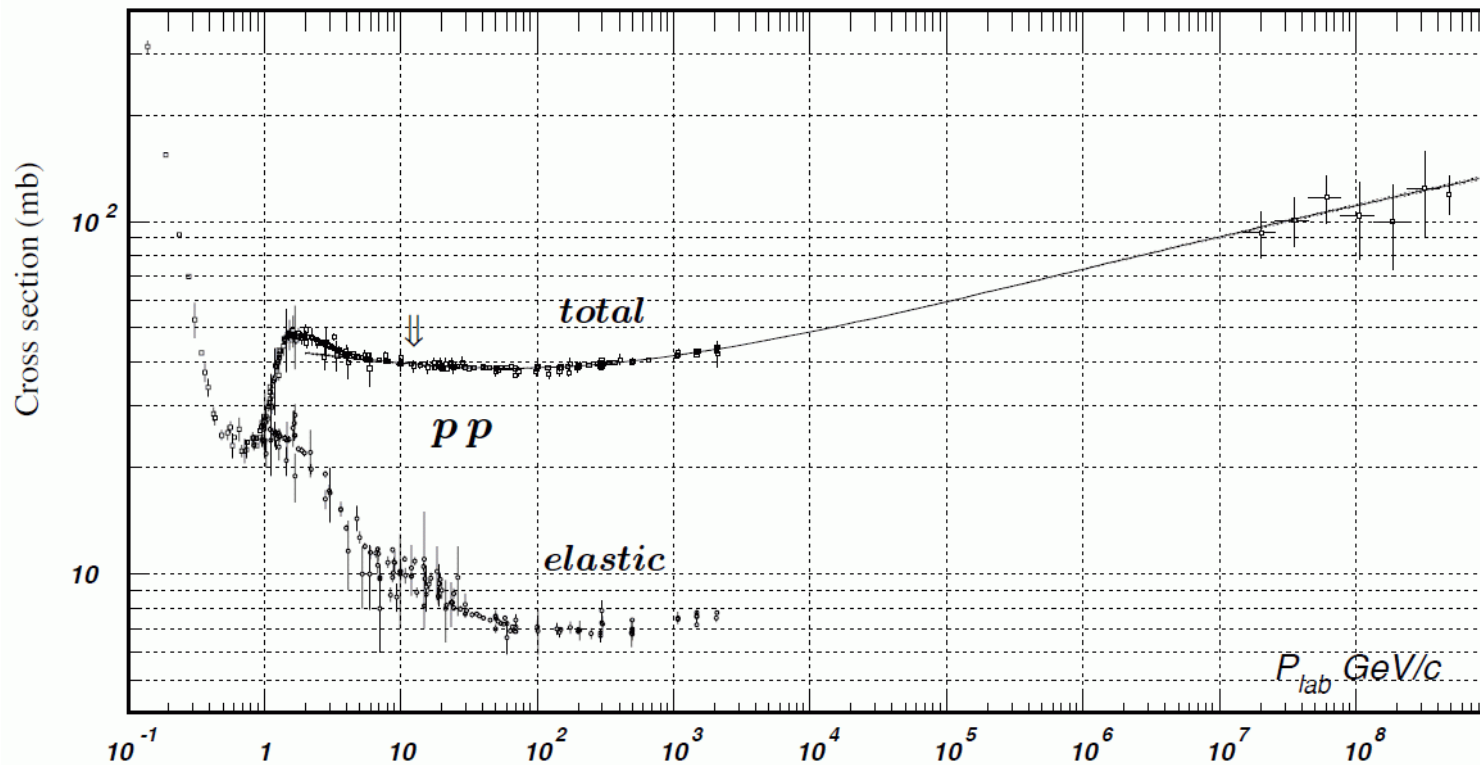
Zdolności rozdzielcze typowych elektromagnetycznych kalorymetrów próbkujących w eksperymentach HEP

Scintillator/depleted U (ZEUS)	$20-30X_0$	$18\%/\sqrt{E}$	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)	$20-30X_0$	$12\%/\sqrt{E} \oplus 1\%$	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,  $\sigma_I$  praktycznie nie zależy od energii.

# Hadrony

## Droga na oddziaływanie

Prawdopodobieństwo nieelastycznego rozproszenia w funkcji drogi w materiale:

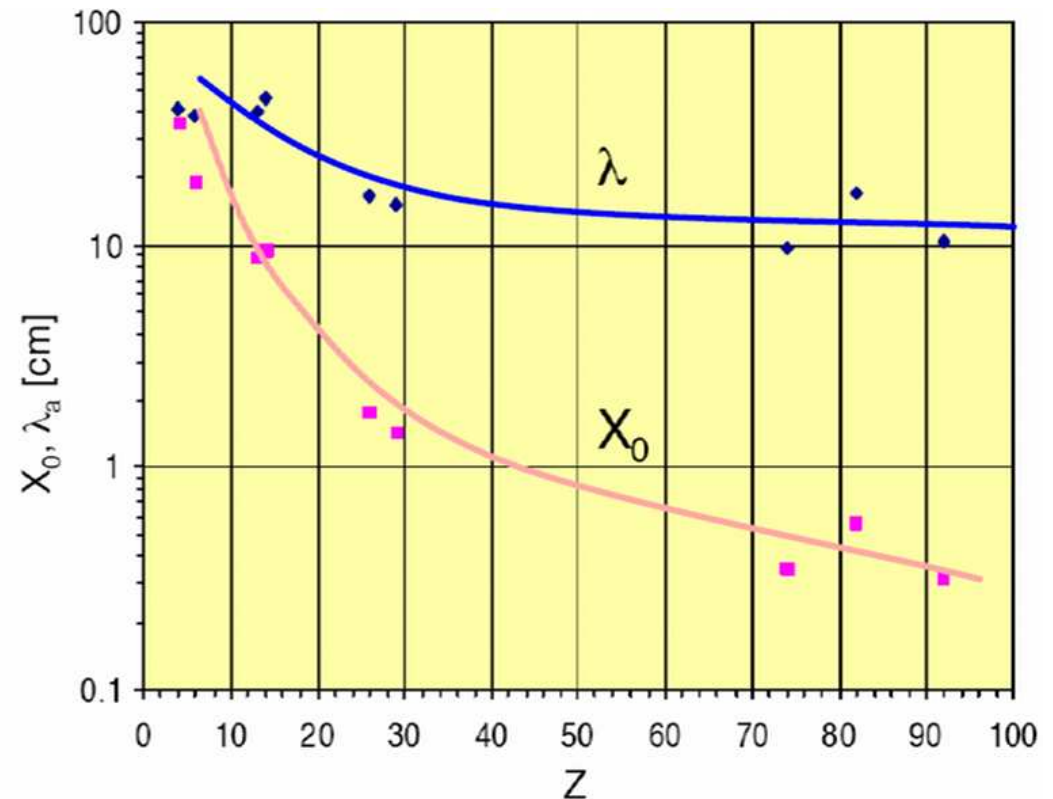
$$p(x) = \frac{1}{\lambda_I} \cdot \exp\left(-\frac{x}{\lambda_I}\right)$$

$\lambda_I$  - średnia droga na oddziaływanie w danym materiale.

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

	$\lambda_I$	$X_0$	$\lambda_I/X_0$
$_{13}\text{Al}$	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  $X_0$



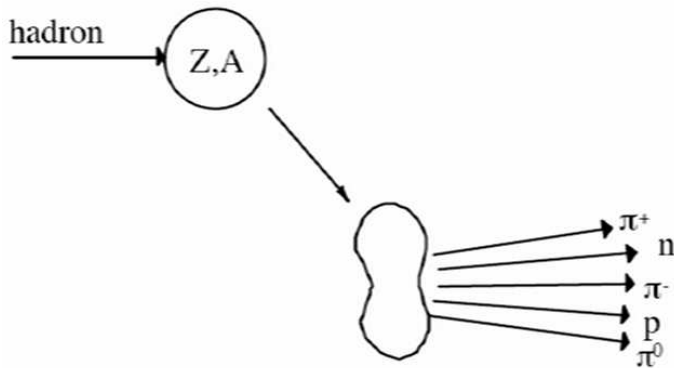
# Hadrony

## Kaskada hadronowa

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

Produkowane są cząstki wtórne.

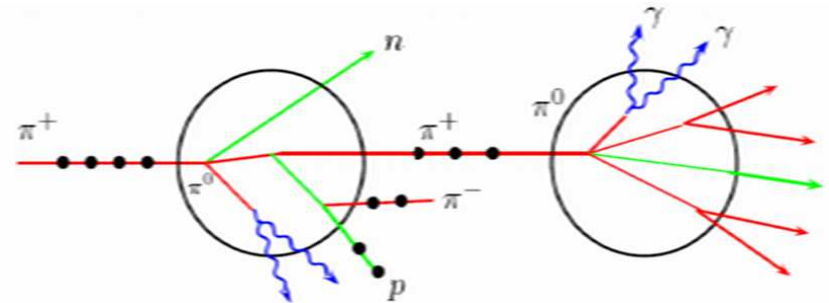
Krotność cząstek  $N \sim \ln E$



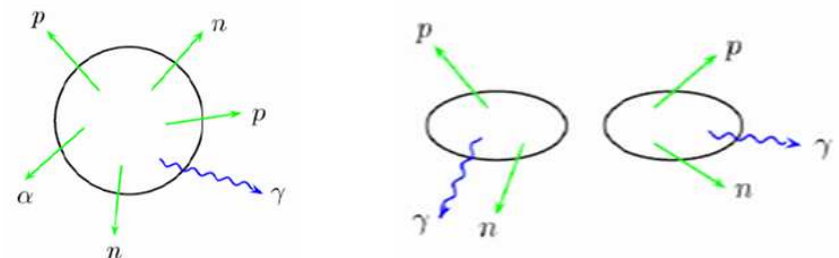
Cząstki wtórne mogą powodować kolejne reakcje  $\Rightarrow$  kaskada

Cząstki tracą także energię na wzbudzenia jąder i jonizację.

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



Deekscytacja jąder - opóźniona emisja cząstek



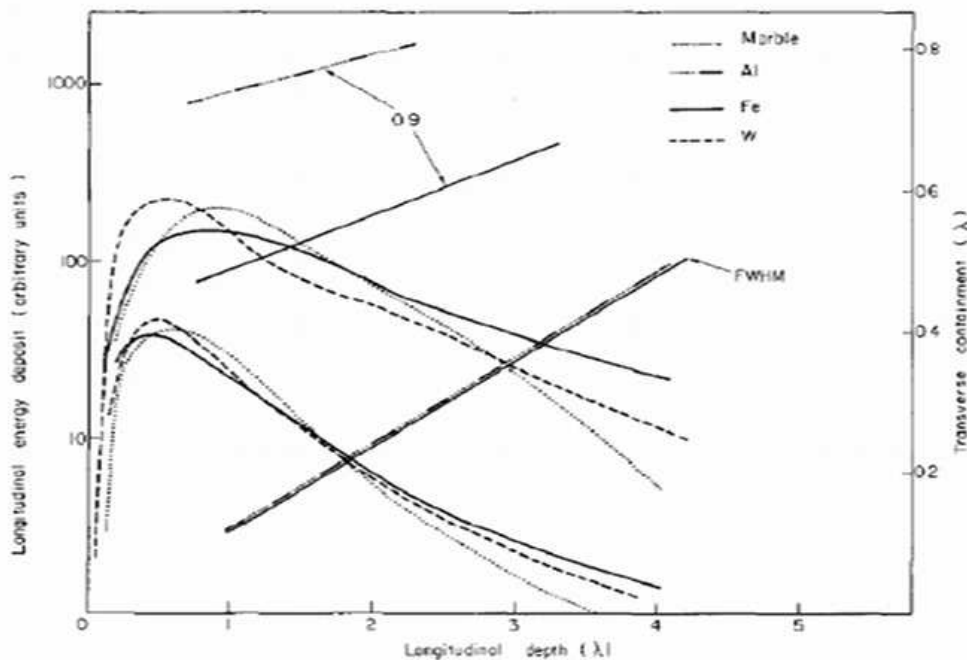
# Hadrony

## Kaskada hadronowa

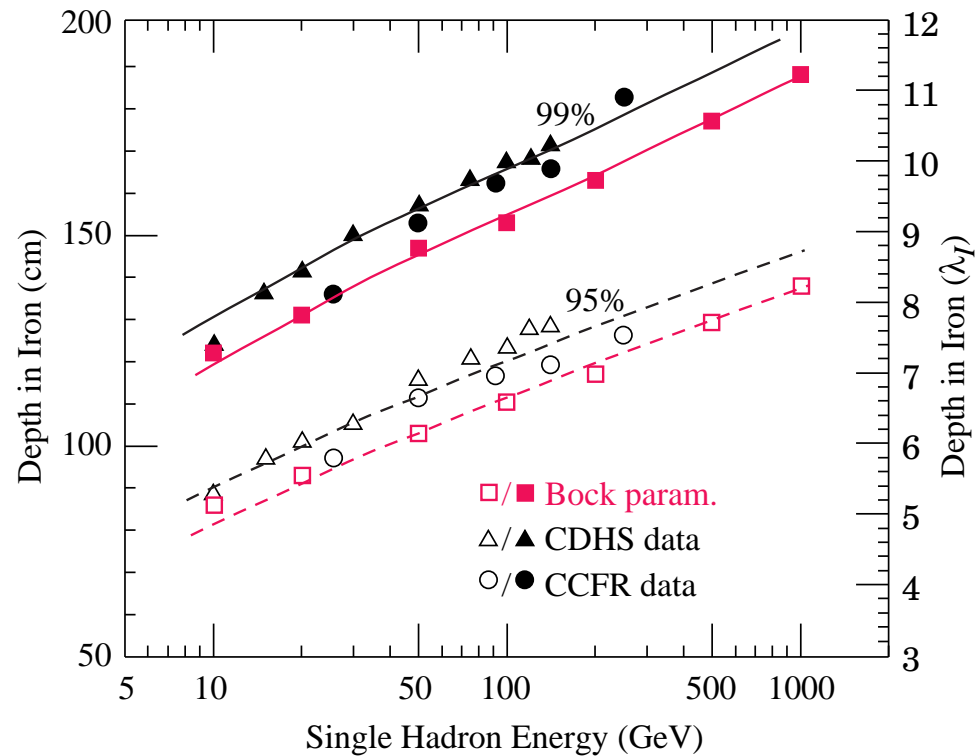
Długość kaskady skaluje się w  $\lambda_I$

Pozycja maksimum [ $\lambda_I$ ]:

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



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



również rośnie logarytmicznie z energią