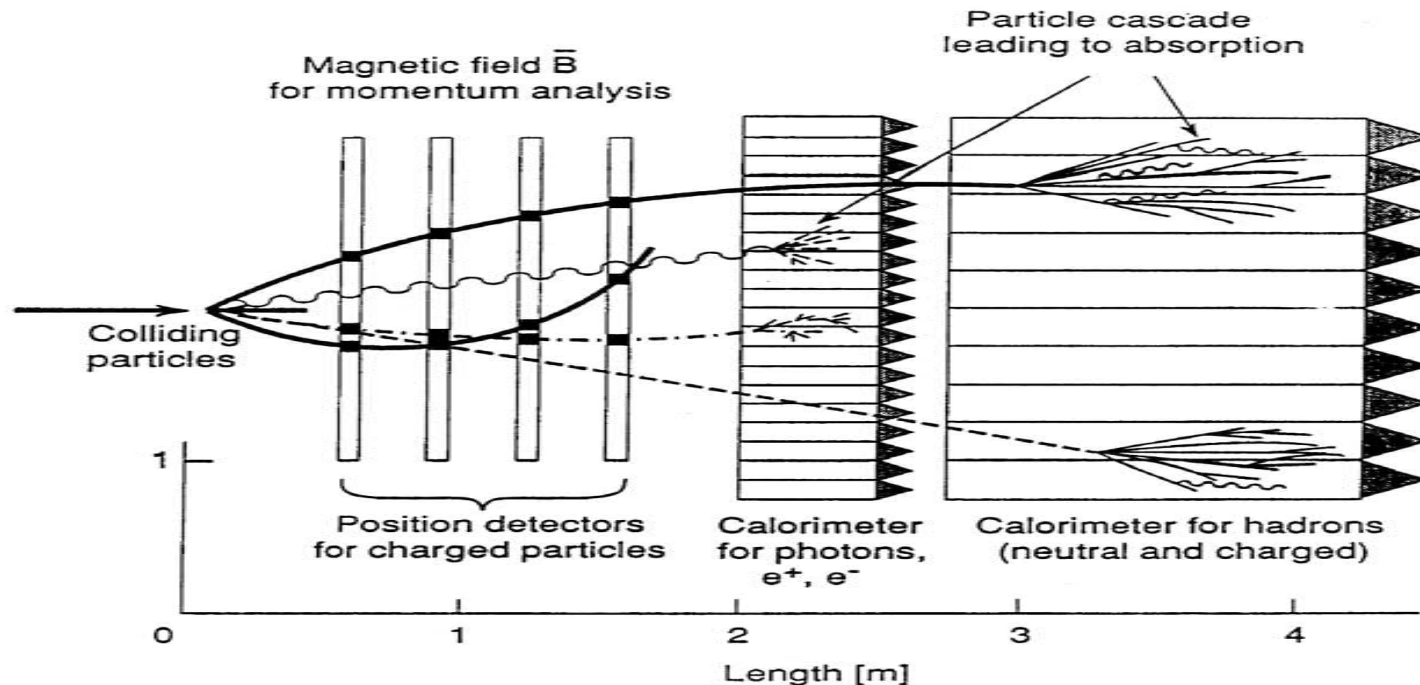


Komponenty aparatury pomiarowej eksperymentu FWE

COMPONENTS OF AN EXPERIMENT



Kalorymetry

- **Cel**
 - **Pomiar całkowitej energii cząstek**
 - Kalorymetry elektromagnetyczne
 - Kalorymetry hadronowe
 - **Pomoc w identyfikacji cząstek**
 - różny charakter oddziaływań
 - w zestawie z innymi detektorami
- **Oddziaływania**
 - Elektromagnetyczne
 - Silne
- **Detektory**
 - Detektory „destrukcyjne” – „pochłonięcie” cząstki
 - Prawie cała energia zamienia się w ciepło - tylko niewielka jej część daje sygnał

Kalorymetry

oddziaływania

- **Oddziaływania elektromagnetyczne**

- **Straty na wypromieniowanie**

$$\Delta E_{\text{rad}} = - E (\Delta x/X_0)$$

X_0 – długość radiacyjna (droga na której E spada o czynnik e);

$$X_0 \approx 180 A/Z^2 \text{ (g/cm}^2\text{)}$$

- **Straty na jonizację**

$$dE_{\text{coll}} = - E_c (dx/X_0)$$

E_c – energia krytyczna, przy której straty na wypromieniowanie równe są stratom na jonizację

$$E_c \approx 550/Z \text{ (MeV)}$$

- **Oddziaływania silne**

- **Przekroje czynne**

- Oddziaływania hadronowe – produkcja π^+ , π^0 , K^+ , p , n ,...
 - Wzbudzanie i rozpad jąder – produkcja p , n , γ ($E = 1-20 \text{ MeV}$)...

- **Średnia droga oddziaływania**

- Dotyczy wszystkich oddziaływań (σ_{tot} - całkowity przekrój czynny)

- **Średnia droga absorpcji λ**

- Dotyczy oddziaływań nieelastycznych ($\sigma_{\text{nel}} = \sigma_{\text{tot}} - \sigma_{\text{el}}$)

Kalorymetry kaskady

Rozwój kaskady EM

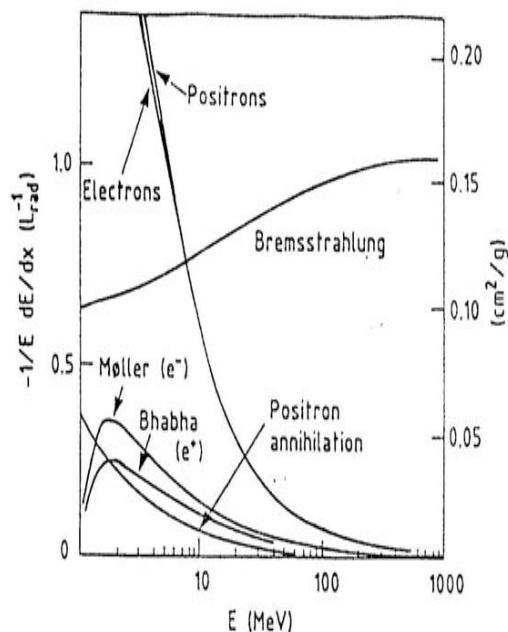


Fig. 1: Fractional energy loss per radiation length (left ordinate) and per g/cm^2 (right ordinate) in lead as a function of electron or positron energy. (Review of Particle Properties, April 1982 edition).

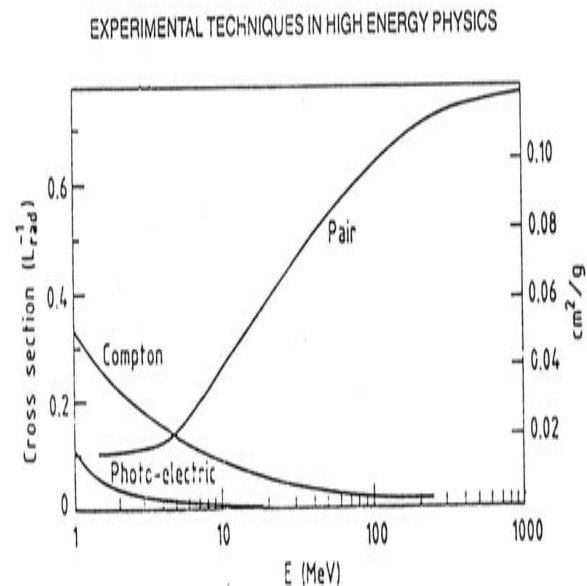
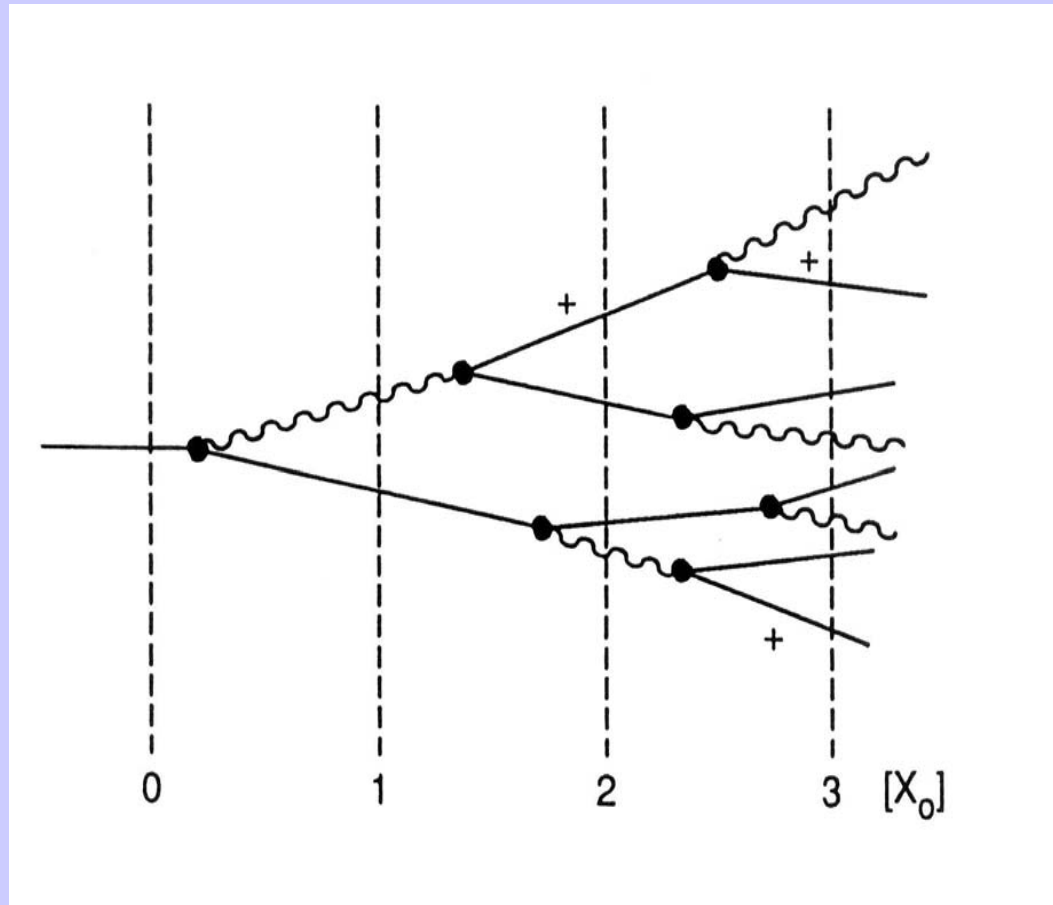


Fig. 2: Photon cross-section σ in lead as a function of photon energy. The intensity of photons can be expressed as $I = I_0 \exp(-\sigma x)$, where x is the path length in radiation lengths. (Review of Particle Properties, April 1980 edition).

Powyżej 100 MeV przekroje czynne praktycznie nie zależą od energii

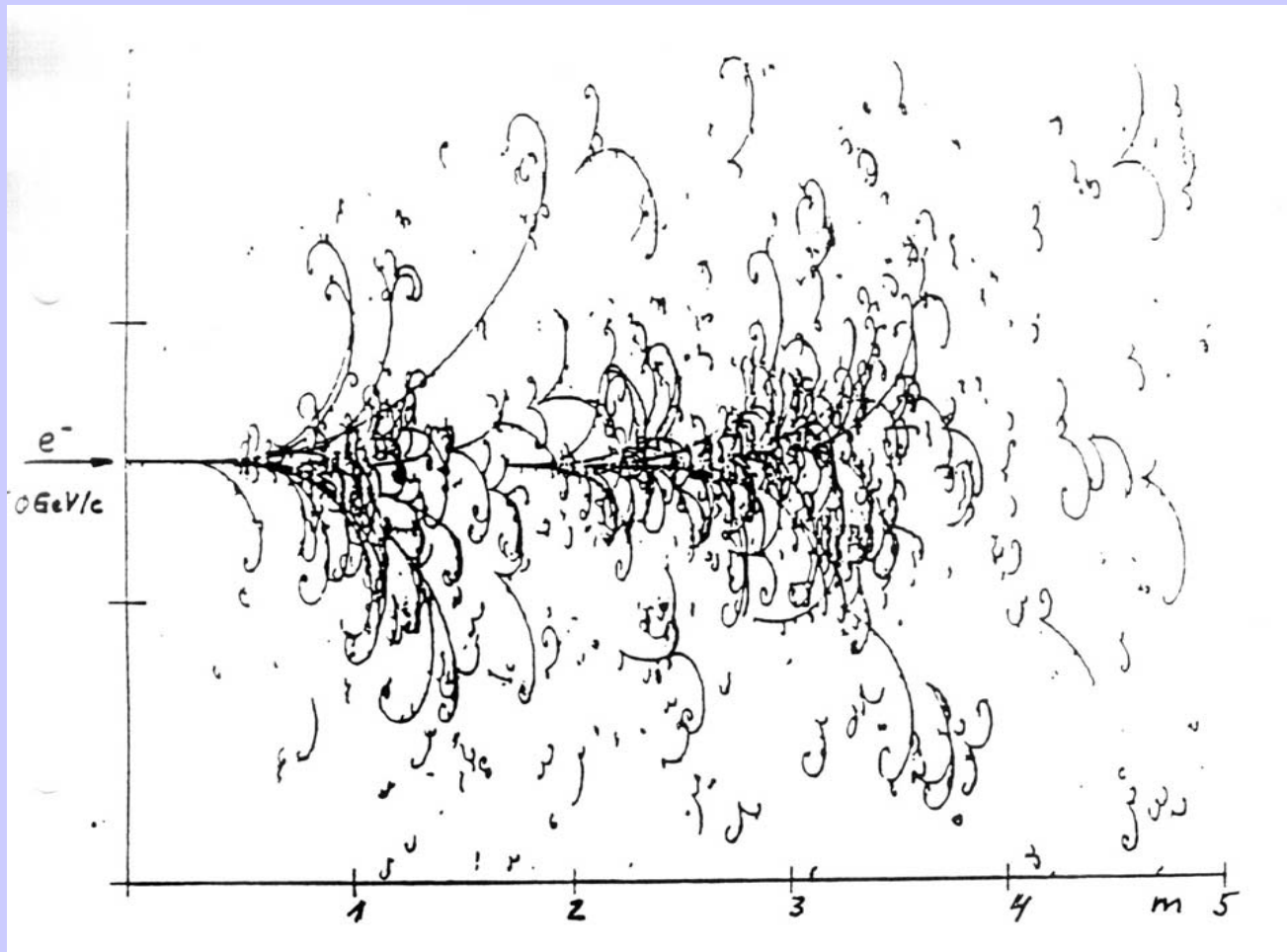
Kalorymetry kaskady

Rozwój kaskady EM - schemat



Kalorymetry kaskady

Rozwój kaskady EM – zdjęcie z komory pęcherzykowej



Kalorymetry kaskady

Rozwój kaskady EM

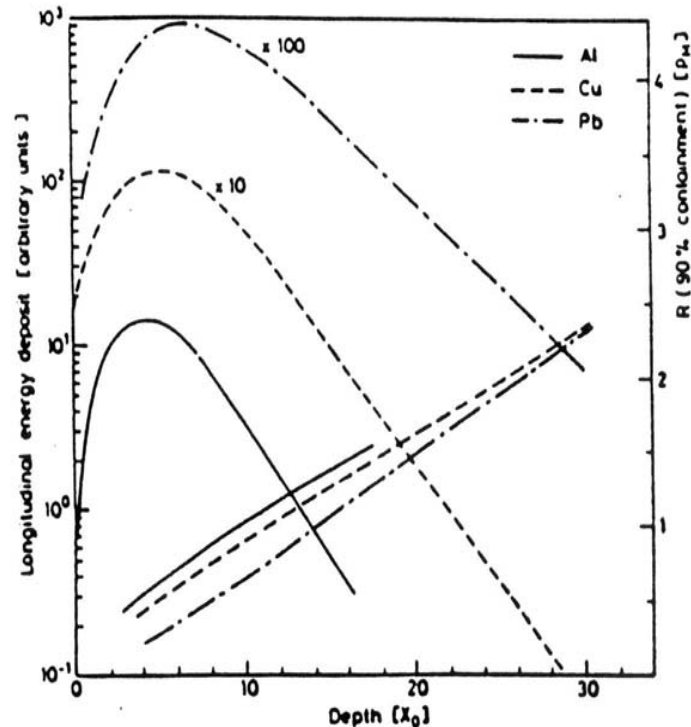


Figure 5 Longitudinal shower development (left ordinate) of 6 GeV/c electrons in three very different materials, showing the scaling in units of radiation lengths X_0 . On the right ordinate the shower radius for 90% containment of the shower is given as a function of the shower depth. In the later development of the cascade, the radial shower dimensions scale with the Molière radius $\rho_M \sim 7A/Z$ (data adapted from Bathow et al 1970).

Kalorymetry kaskady

Rozwój kaskady hadronowej

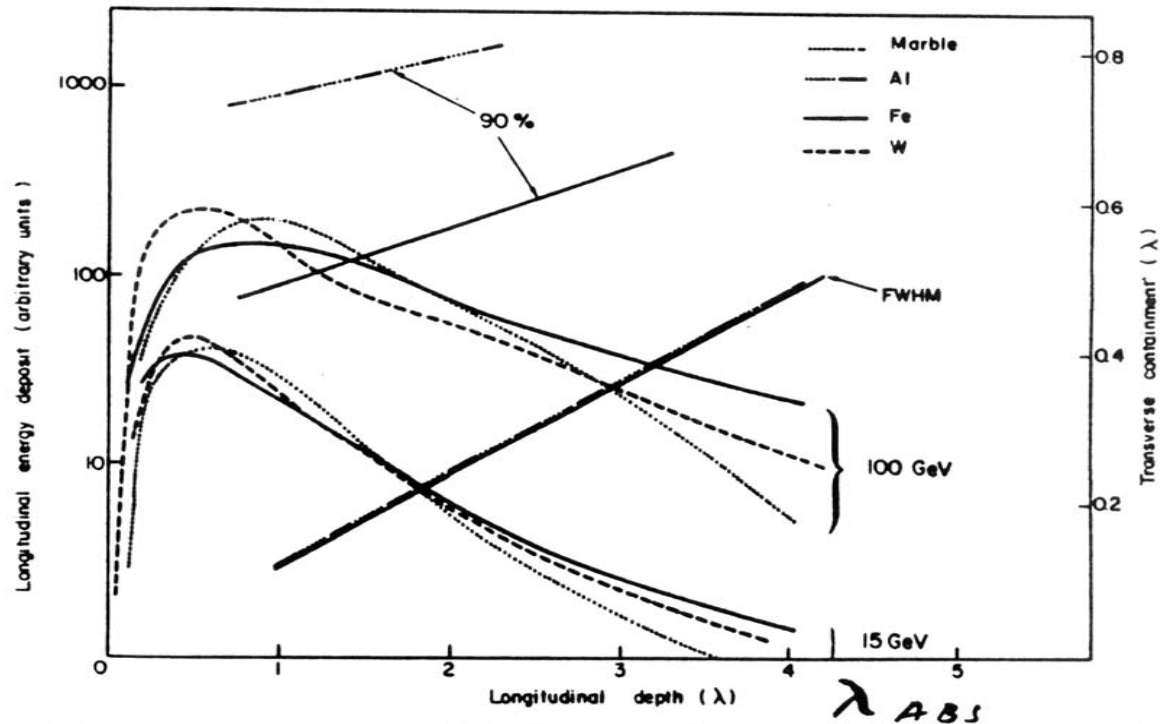
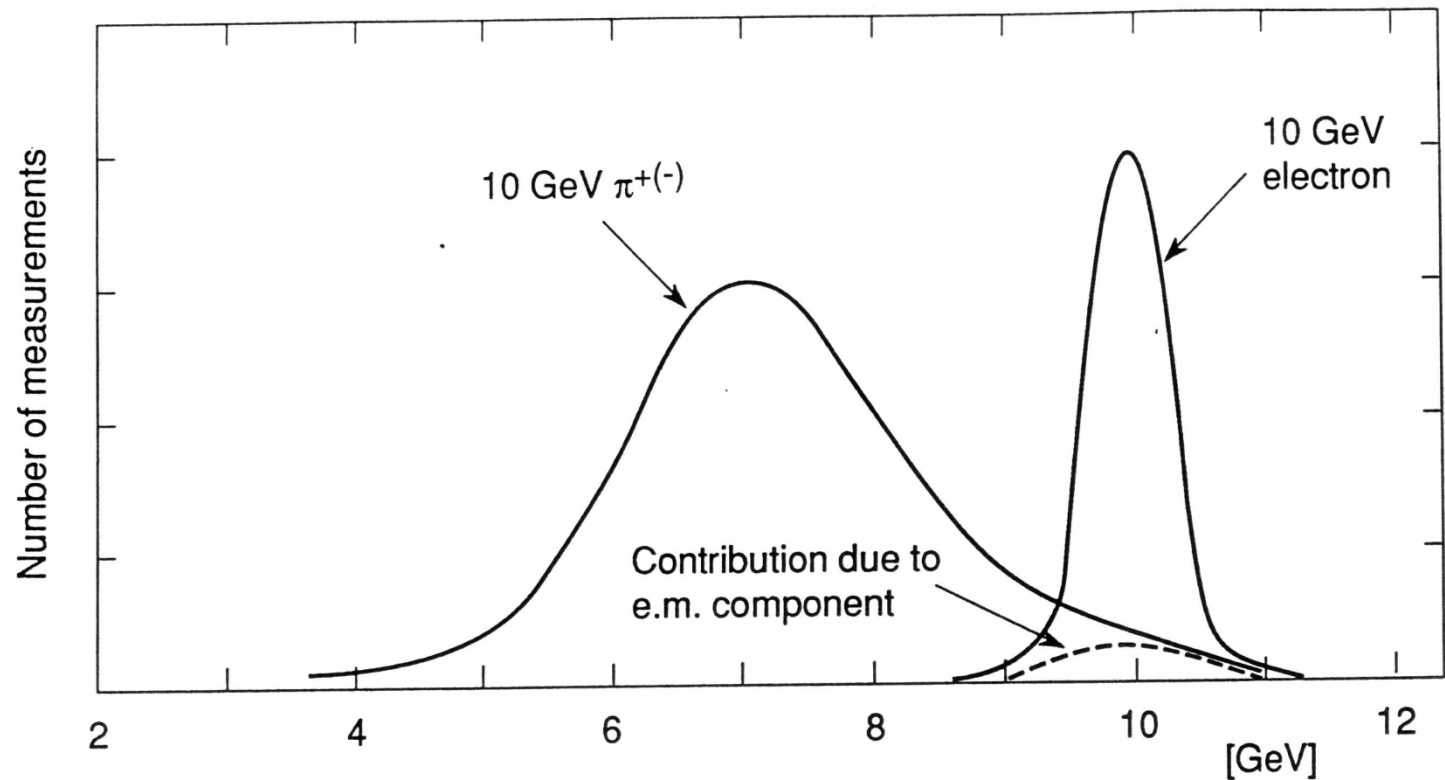


Figure 7 Longitudinal shower development (left ordinate) induced by hadrons in three different materials, showing approximate scaling in absorption length λ . The shower distributions are measured from the vertex of the shower and are therefore more peaked than those measured with respect to the face of the calorimeter. For the transverse distributions as a function of shower depth, scaling in λ is found for the narrow core (FWHM) of the showers. The radius of the cylinder for 90% lateral containment is much larger and does not scale in λ (10 GeV/c π 's; Friend et al 1976). Note that marble and aluminum have almost identical absorption and radiation length (Marble: Jonker et al 1982; Al: Friend et al 1976; Fe: Holder et al 1978; W: Cheshire et al 1977).

Kalorymetry kaskady

Różnice w kaskadach elektromagnetycznej i hadronowej

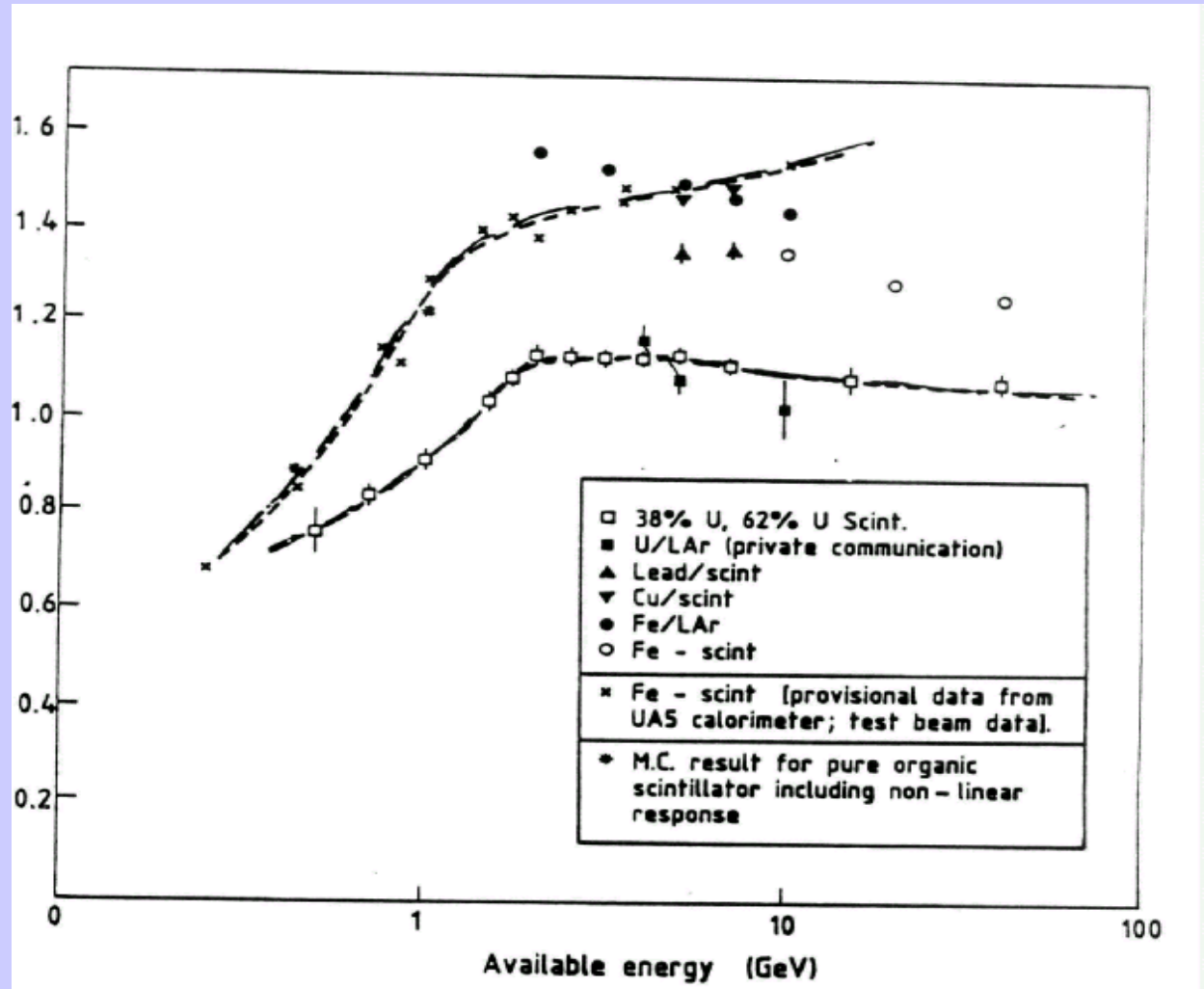


Signal (in energy units) obtained for a 10 GeV energy deposit

Kalorymetry kaskady

Różnice w
kaskadach
EM
i
hadronowej

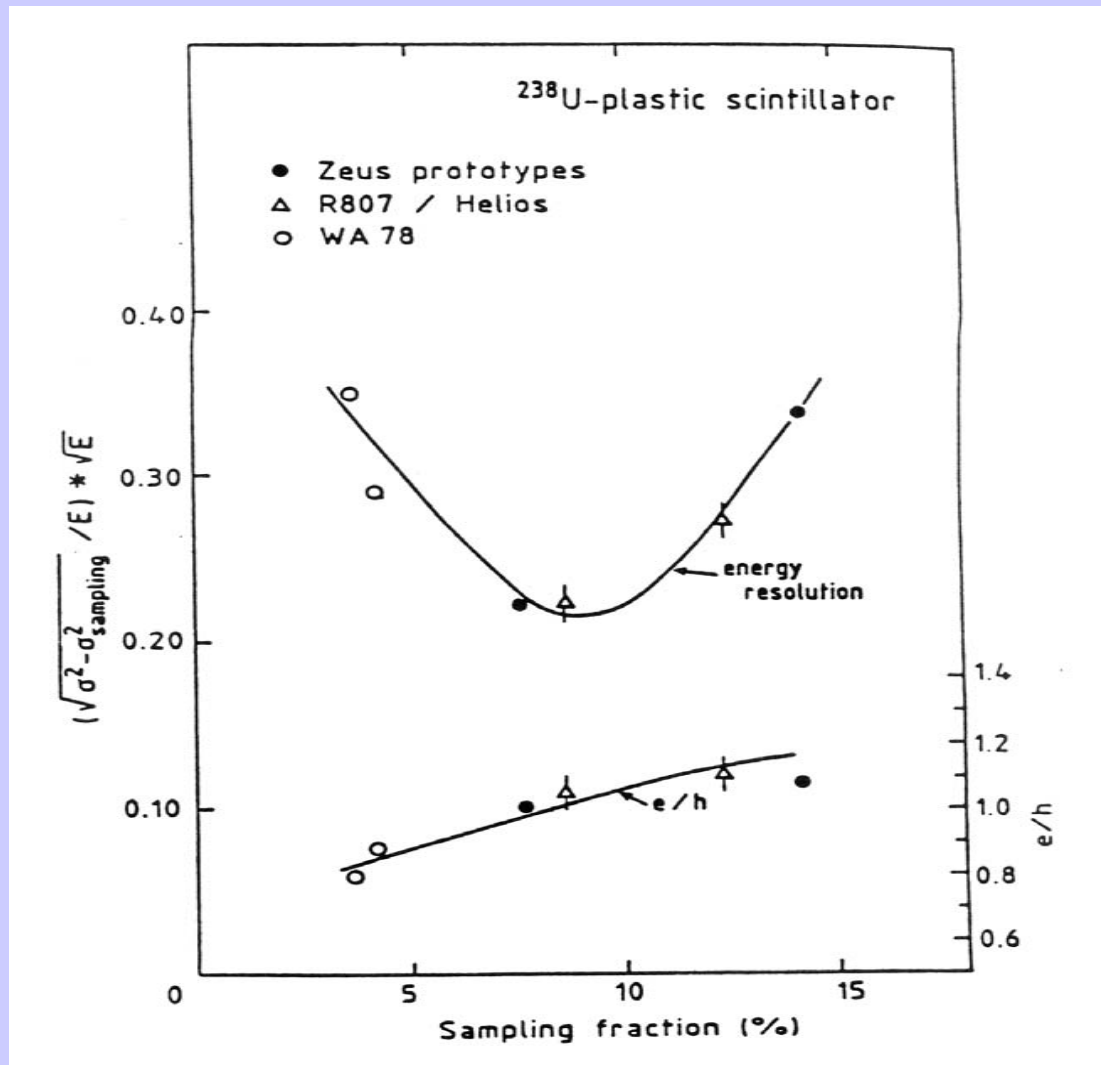
Kompensacja
przez
zastosowanie
absorbera
uranowego



Kalorymetry kaskady

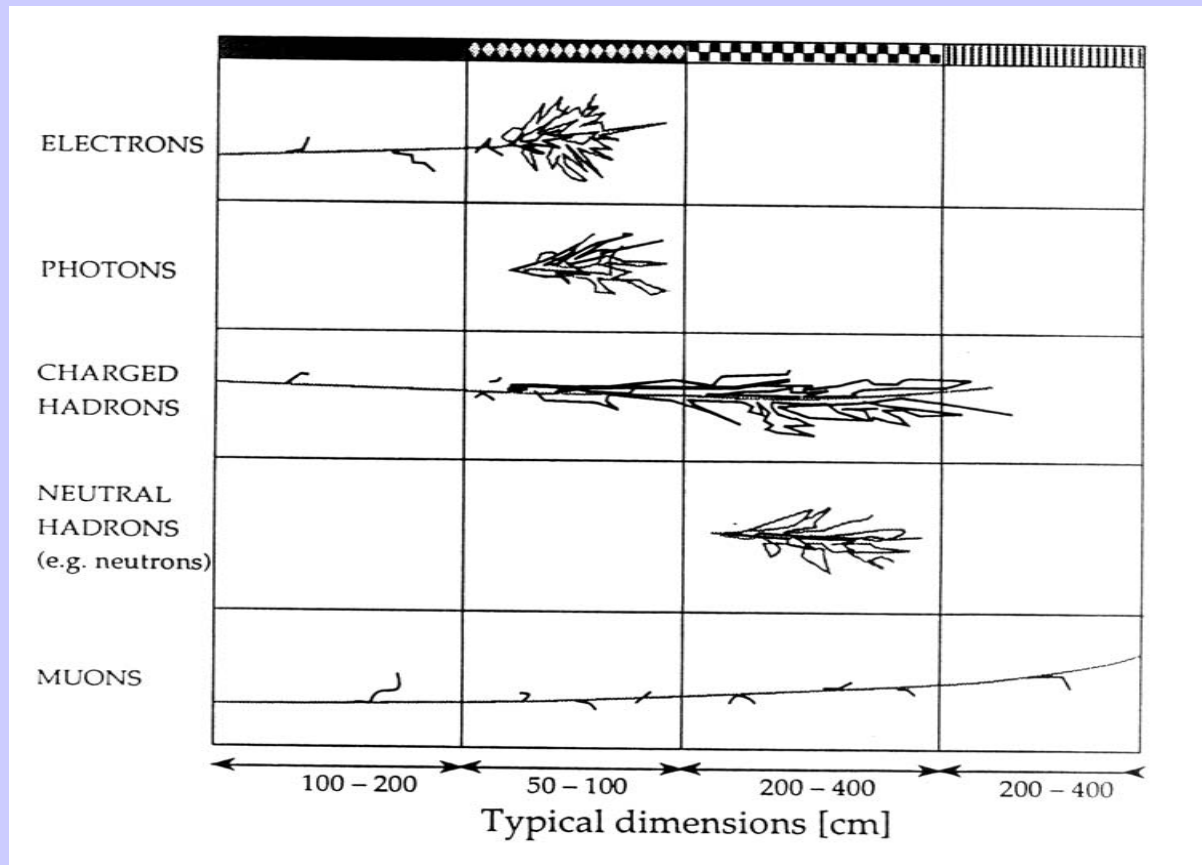
Różnice w
kaskadach
EM
i
hadronowej

Kompensacja
przez dobór
stosunku
grubości
konwertera
i detektora



Identyfikacja cząstek z udziałem kalorymetrów

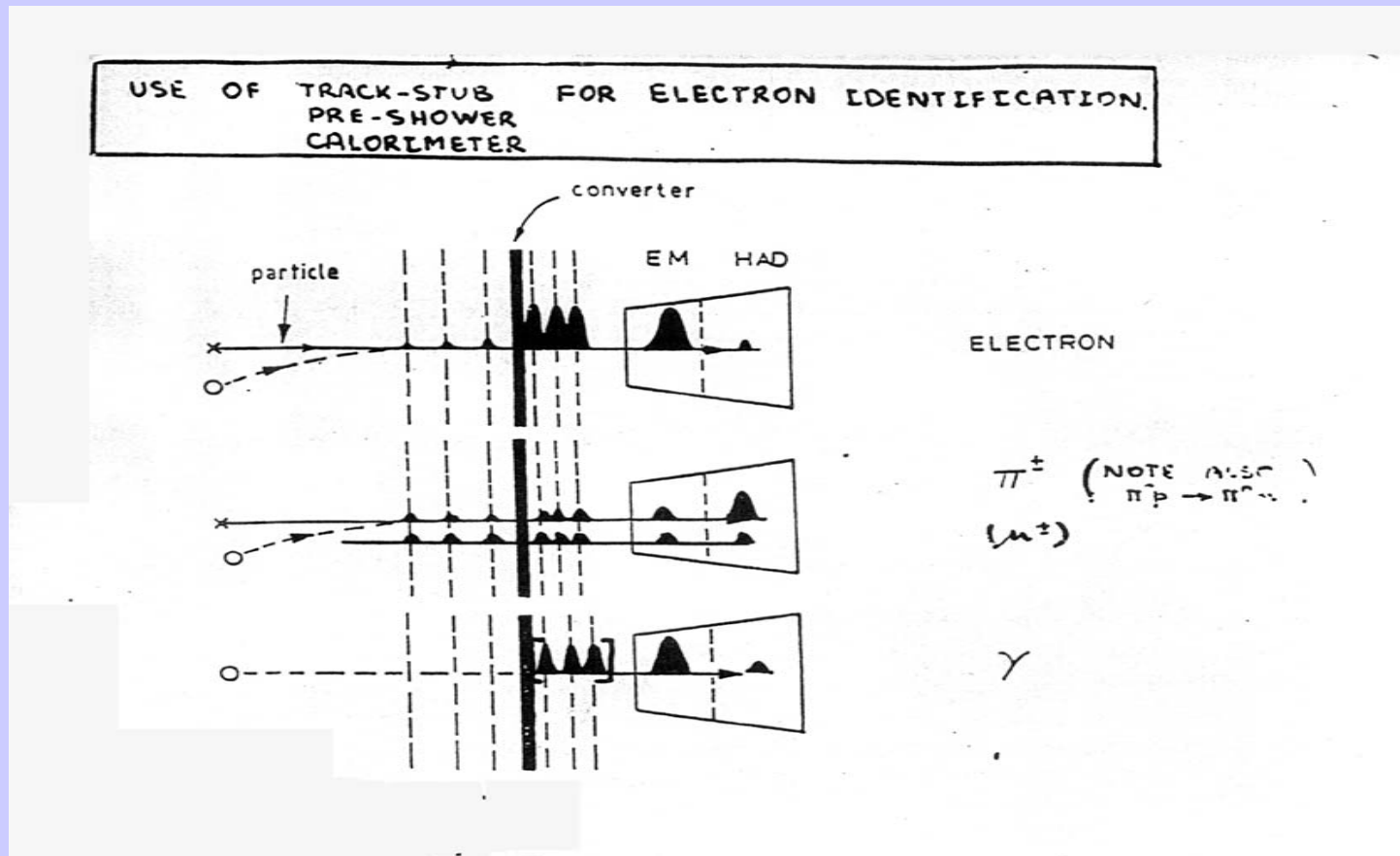
- Obserwacja cząstek w spektrometrze



- Możliwości identyfikacji

Identyfikacja cząstek z udziałem kalorymetrów

- Wykorzystanie informacji o początku rozwoju kaskady

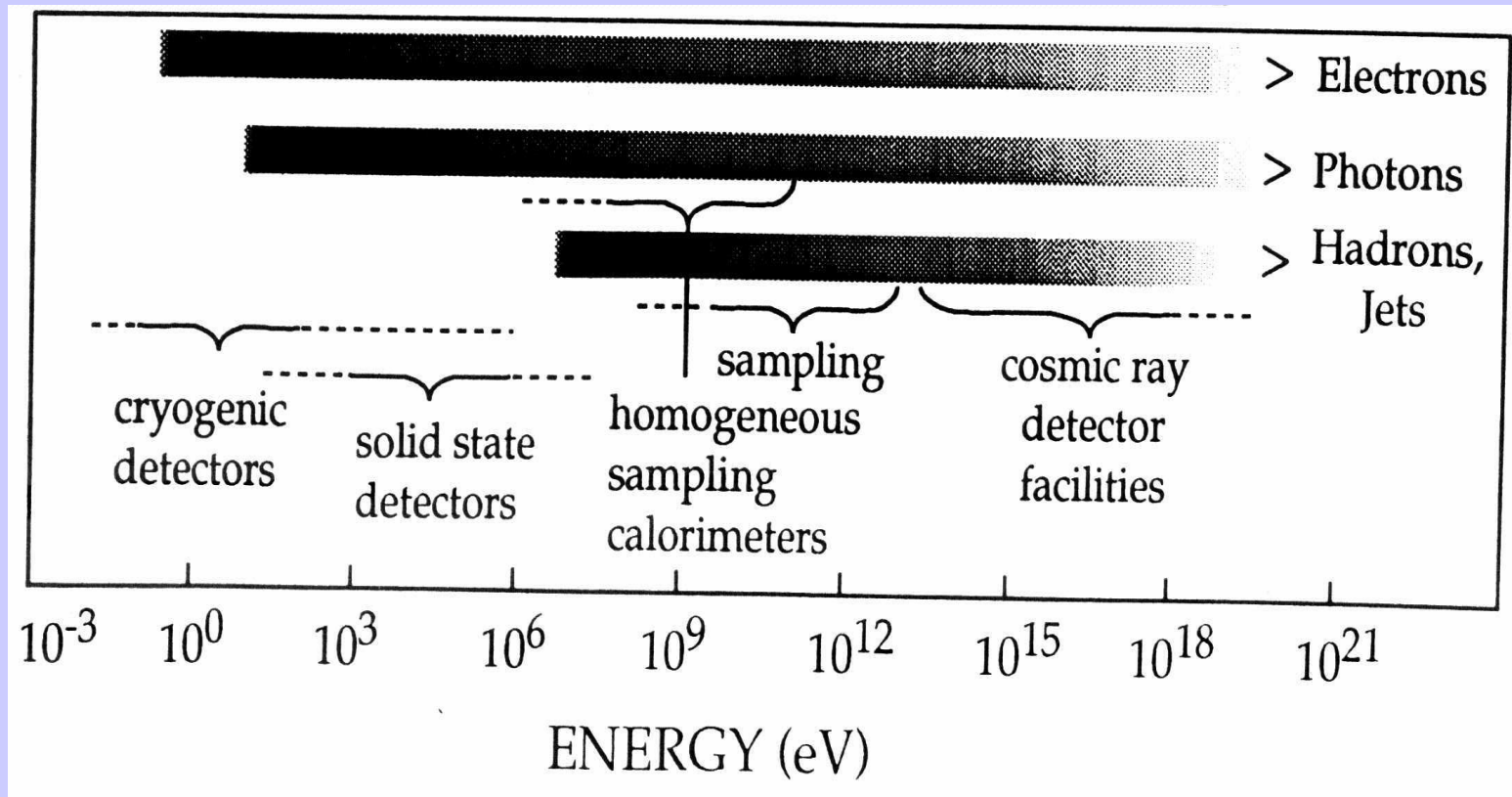


- tzw. „preshower”

Kalorymetry

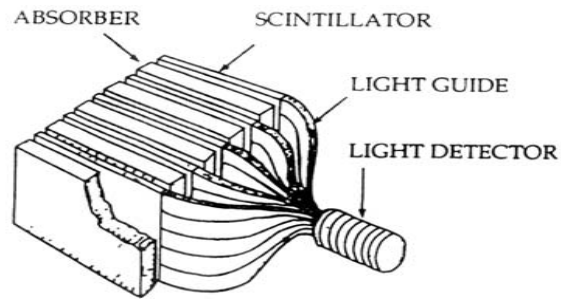
rodzaje

Rodzaje kalorymetrów

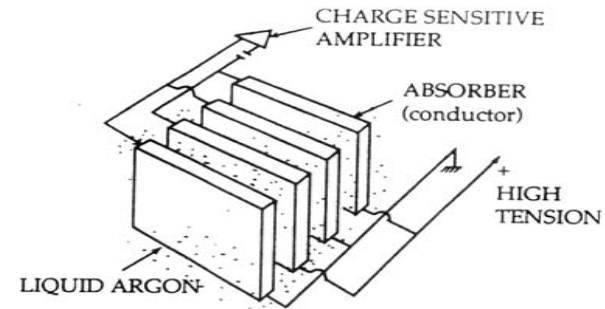


Kalorymetry rodzaje

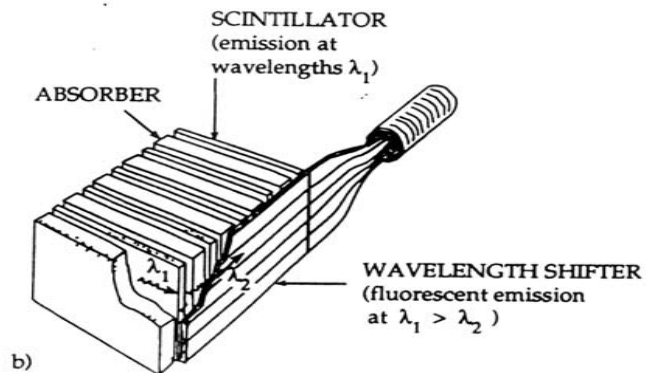
Rodzaje kalorymetrów



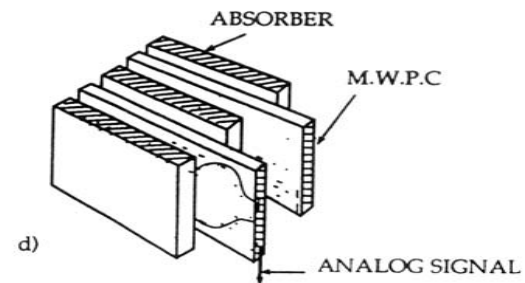
a)



c)



b)



d)

Kalorymetry

własności

- **Rodzaj**
 - elektromagnetyczne
 - hadronowe
- **Zakres energii**
 - Chodzi o to aby pochłonać całą energię
 - Rozmiary muszą być dobrane do energii
- **Liniowość**
 - W dużej mierze zależy od układów odczytu
- **Energetyczna zdolność rozdzielcza**
 - Zależy od rodzaju kalorymetru:
 - Kalorymetry czułe w całej objętości (rodzaje materiałów)
 - Kalorymetry „próbkujące” (geometria, materiały, odczyt)
 - Elektroniki odczytu i warunków pracy
 - Konstrukcji (efekty systematyczne)
 - Stabilności (kalibracji)
- **Przestrzenna zdolność rozdzielcza**
- **Czasowa zdolność rozdzielcza**

Kalorymetry

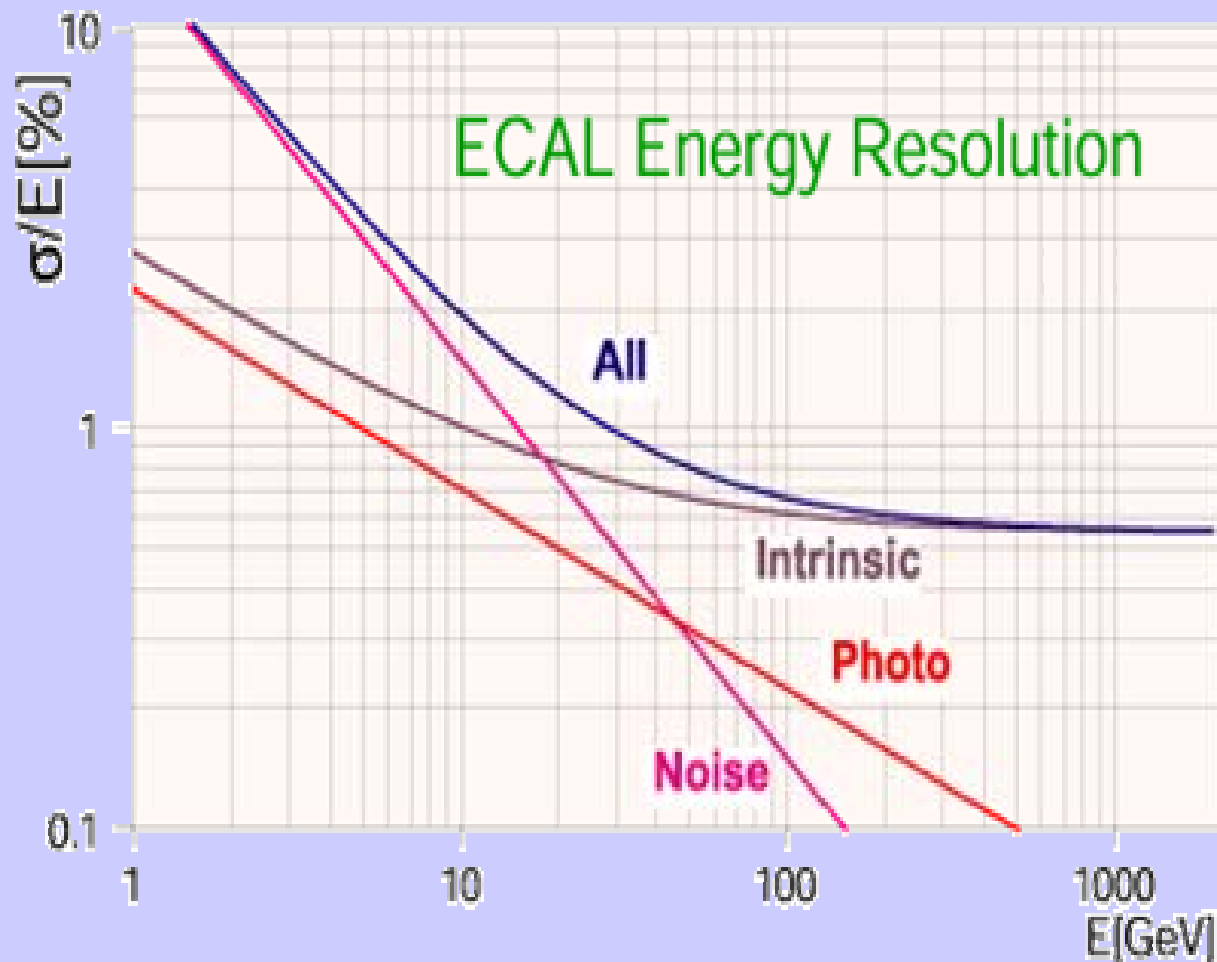
zdolność rozdzielcza

- **Energetyczna zdolność rozdzielcza**
 - **Trzy główne czynniki**
 - Wychwyt kaskady i statystyka fotonów
 - Szum elektroniki i nakładanie się sygnałów („pile-up”)
 - Efekty systematyczne związane z konstrukcją
 - **Zdolność rozdzielcza**
$$(\sigma)^2 = \sigma_{\text{stat}}^2 + \sigma_{\text{noise}}^2 + \sigma_{\text{syst}}^2$$
$$\sigma/E = \sigma_{\text{stat}}/\sqrt{E} \oplus \sigma_{\text{noise}}/E \oplus \sigma_{\text{syst}}$$
 - **Typowe wartości**
 - **kalorymetry EM**
 - Kryształy – kilka % przy 1 GeV
 - „przekładańce” – 10-20 % przy 1 GeV
 - **Kalorymetry hadronowe**
 - ok.. 30-50 % przy 1 GeV
- **Przestrzenna zdolność rozdzielcza**
 - Ważna przy dużych krotnościach i dla pomiaru dżetów
 - Zależy bardzo od materiału (R_M), konstrukcji kalorymetru i odczytu, energii
 - Typowe wartości
 - Kilka mm dla kalorymetrów EM
 - Kilka cm dla kalorymetrów hadronowych

Kalorymetry

zdolność rozdzielcza

Główne czynniki i zależność od energii



Kalorymetry

oddziaływania

Własności niektórych materiałów

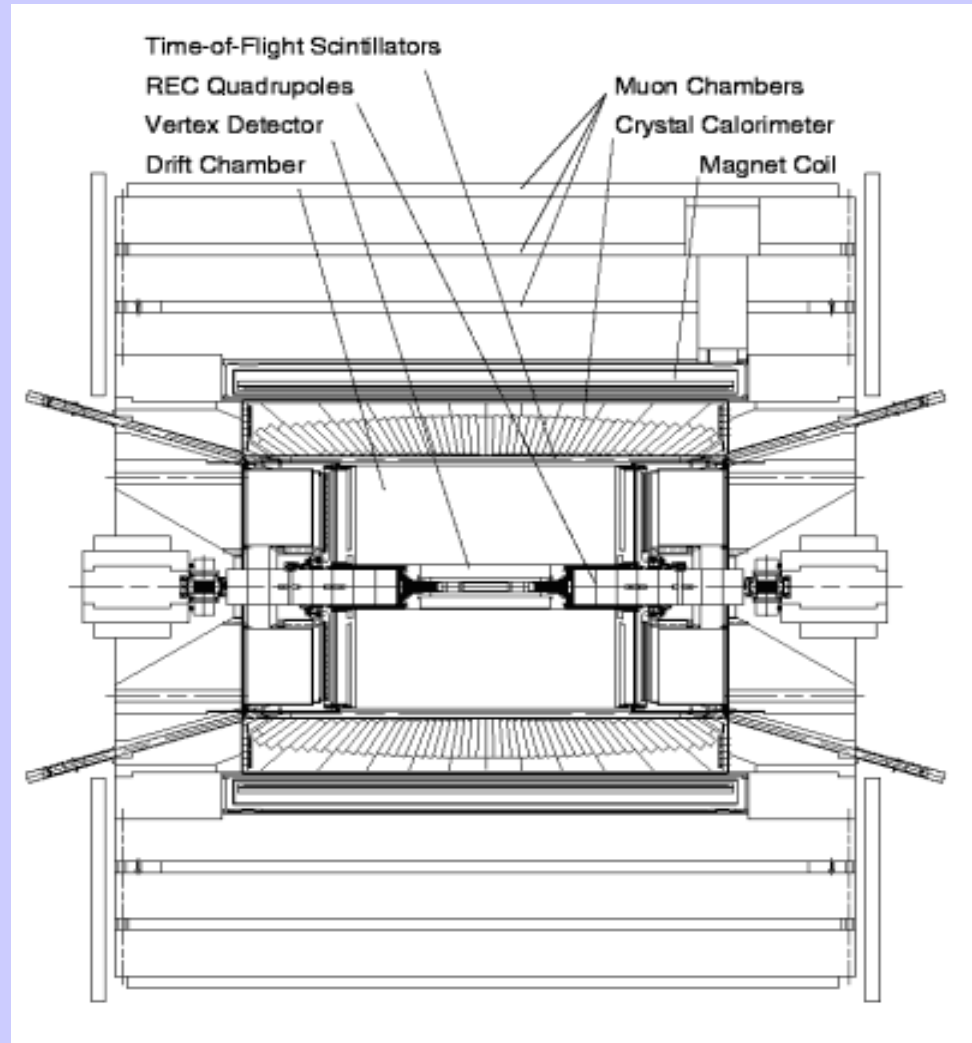
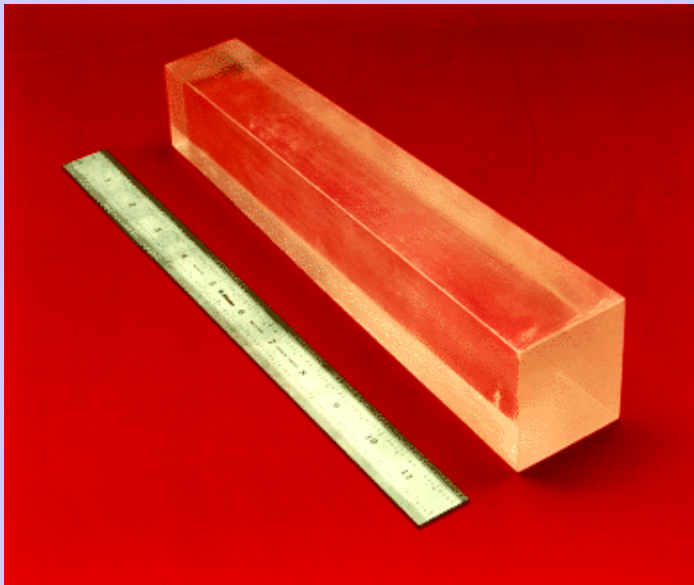
Material	ρ (g/cm ³)	L_{rad} (g/cm ³)	X_{rad} (cm)	λ_{coll} (g/cm ²)	λ_{abs} (g/cm ²)	(g/cm ²)
Powietrze		1.29 g/l	30420	36.66	62.0	90.0
Woda		1.0	36.1	36.08	60.1	84.9
Beton		2.5	10.7	26.7	67.4	99.9
Al	2.7 8.9		24.0	70.6 106.4		
Fe	7.87		1.76	13.84	82.8 131.9	
Cu	8.96		1.43	12.86	85.6 134.9	
Pb	11.35		0.56	6.37	116.2	194
W	19.3 0.35		6.76	110.3	185	
Emulsja	3.81		2.89	11.0	82.0	134
BGO	7.1		1.12	7.98	97.4	156
NaJ	3.67		2.59	9.49	94.8	152
BaF2	4.83		2.05	9.91	92.1	146
CsJ	4.51		1.86	8.39		
Scyntylator	1.03		42.4	43.8	58.4	82.0
Polietylen	0.95		48	44.8	56.9	85.7
Mylar	1.39		28.7	39.9	60.2	85.7

Kalorymetry

przykłady

**Eksperyment CLEO na
akceleratorze CESR w Cornell**
- fizyka kwarków b

**Kalorymetr z kryształów
CsJ**



Kalorymetry przykłady

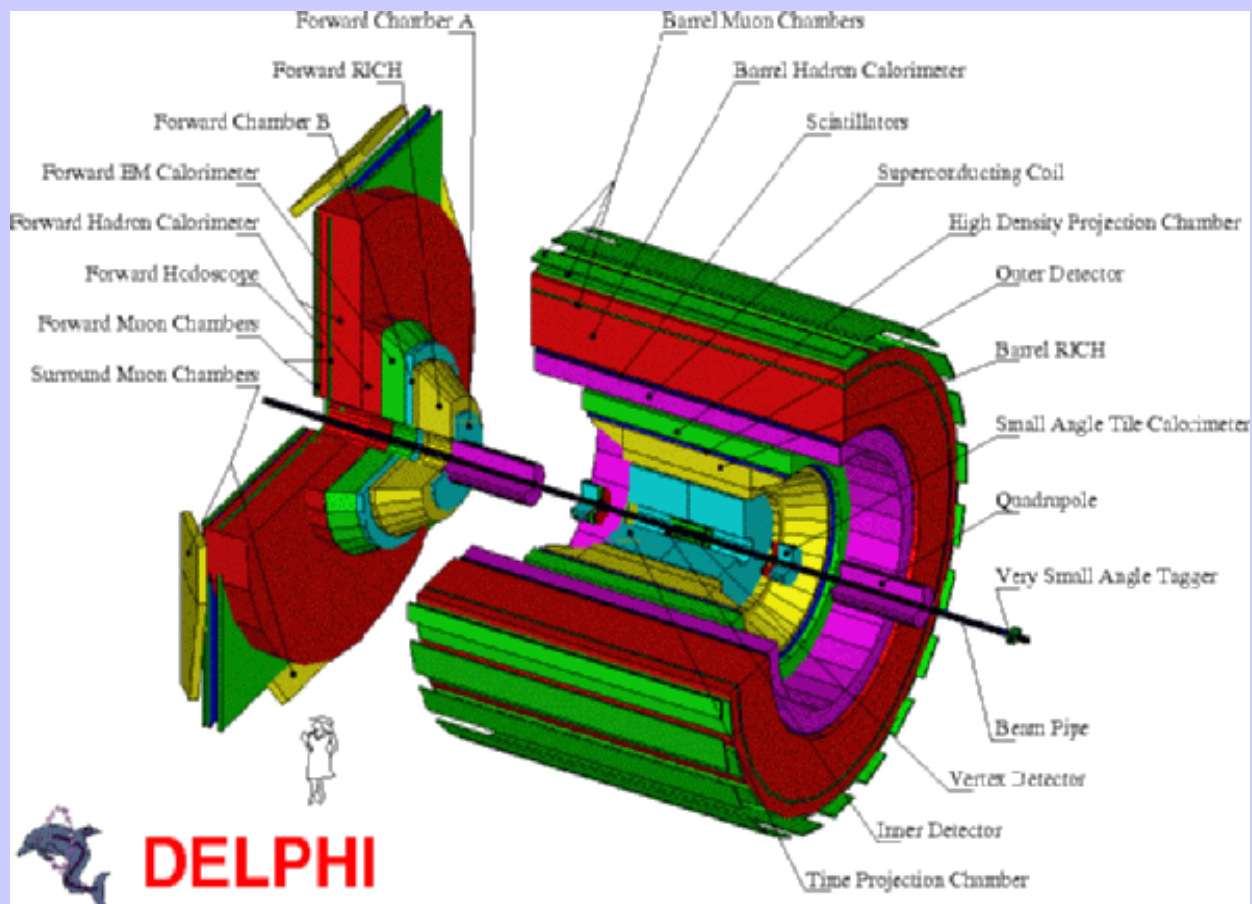
**Eksperyment
DELPHI na LEP-**
- precyzyjne
pomiaru SM

Pomiary

- e , γ , π^0
- elektrony Bhabba
(światłość)

**Kalorymetr
Wolfram- Si**

**Kalorymetr HPC
komora TPC z
olowiowym
konwerterem**

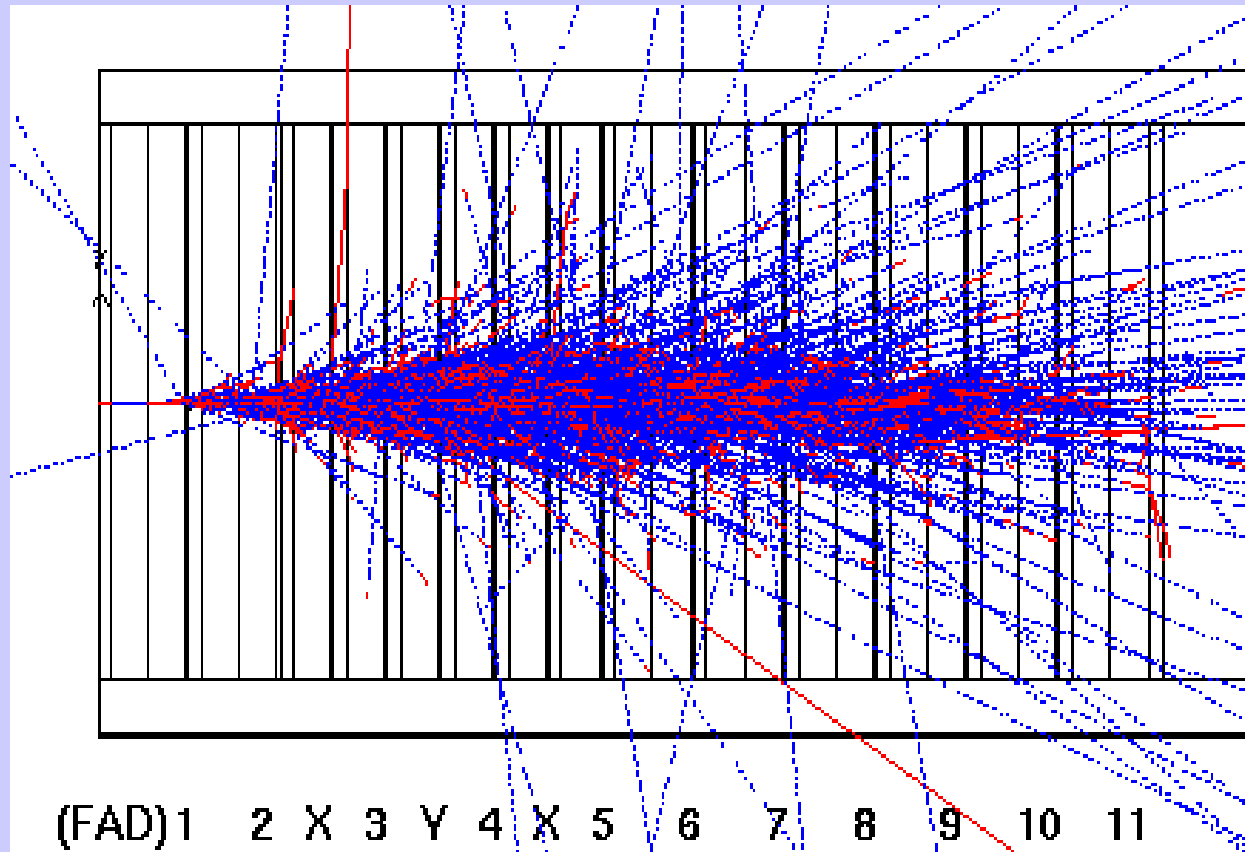


Kalorymetry

przykłady

Eksperyment DELPHI

- kalorymetr W-Si dla pomiarów świetlności - kaskada MC



Kalorymetry

przykłady

Eksperyment

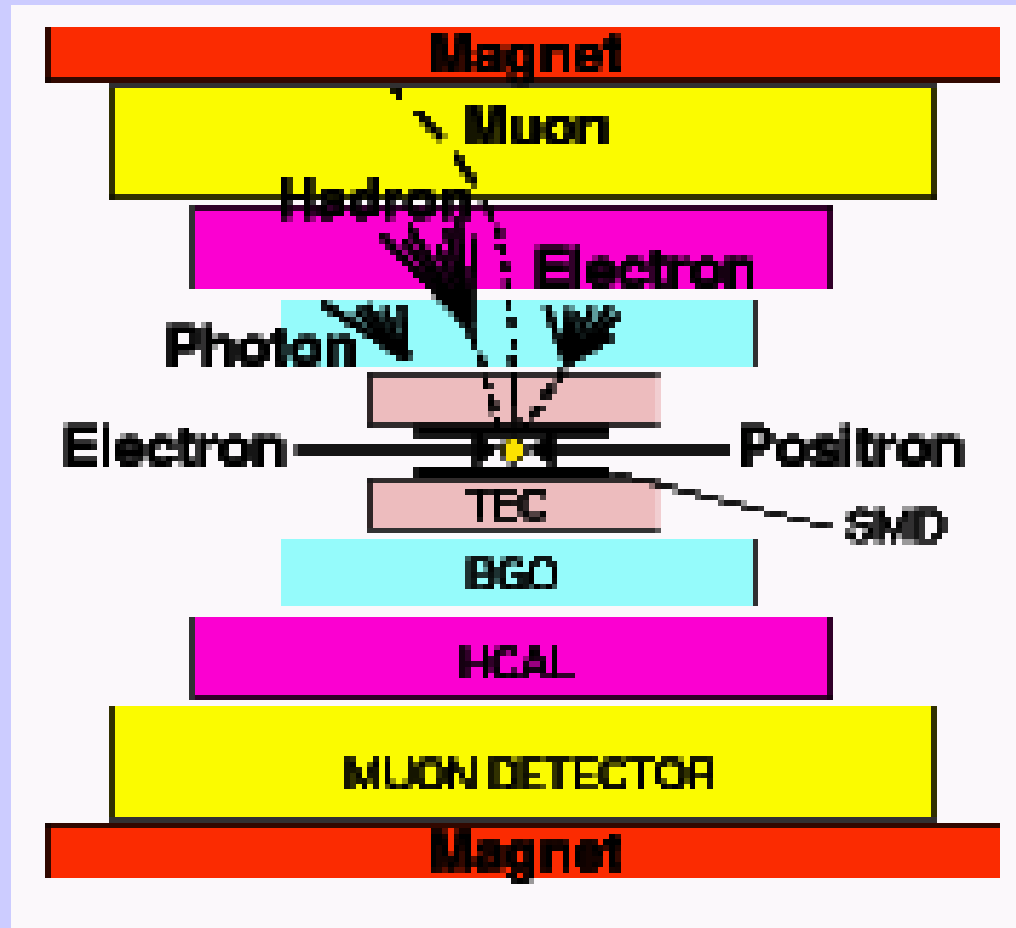
L3 na LEP

- precyzyjne pomiary SM

Pomiary

- e, γ, π^0
- elektrony Bhabba (światłość)

Kalorymetr
z kryształów
BGO

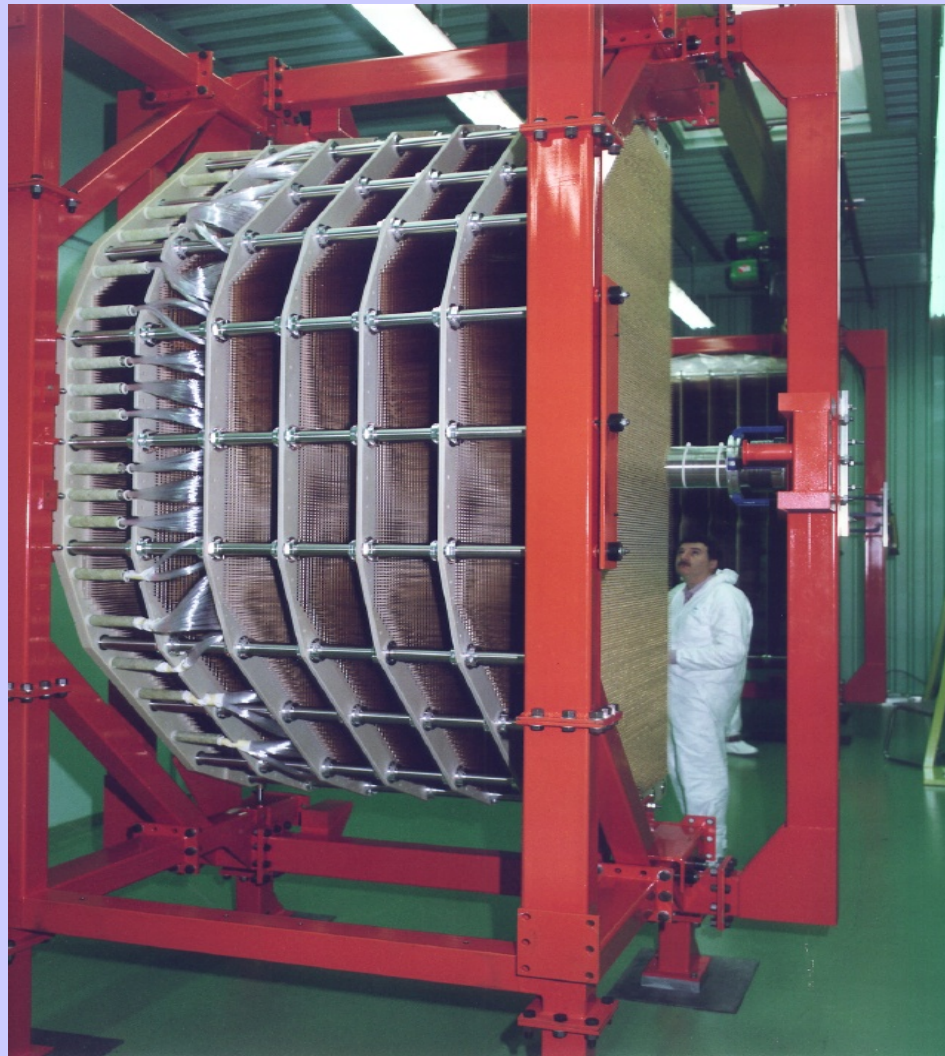


Kalorymetry przykłady

**Eksperyment
NA48 w CERN**
- precyzyjne
pomiaru CP w
rozpadach K_L , K_S

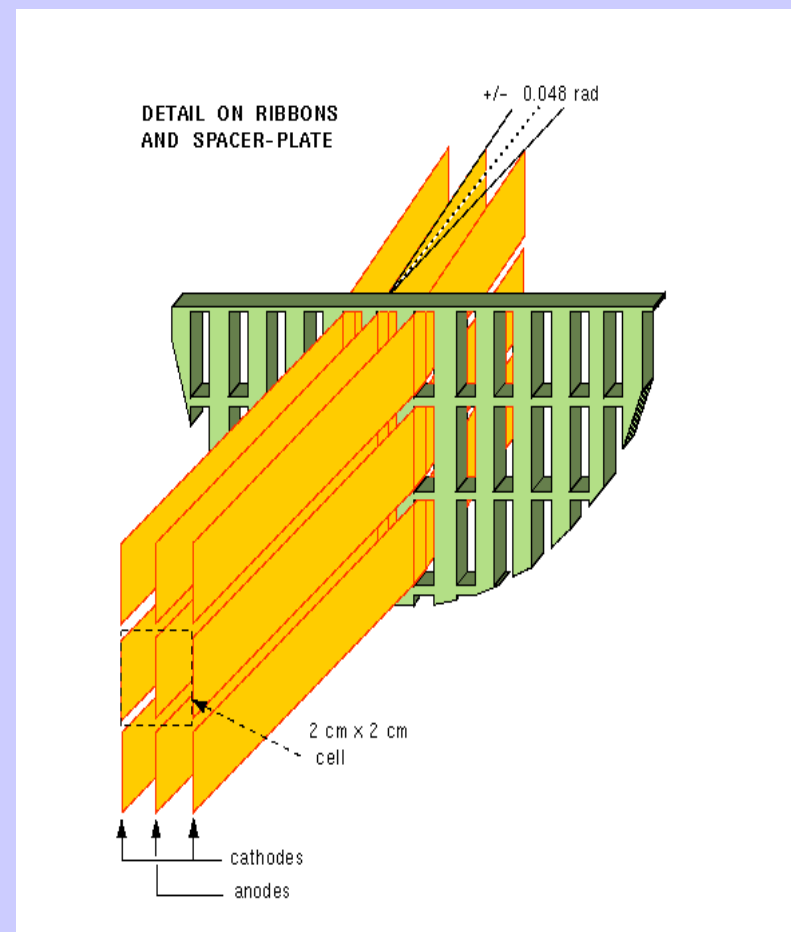
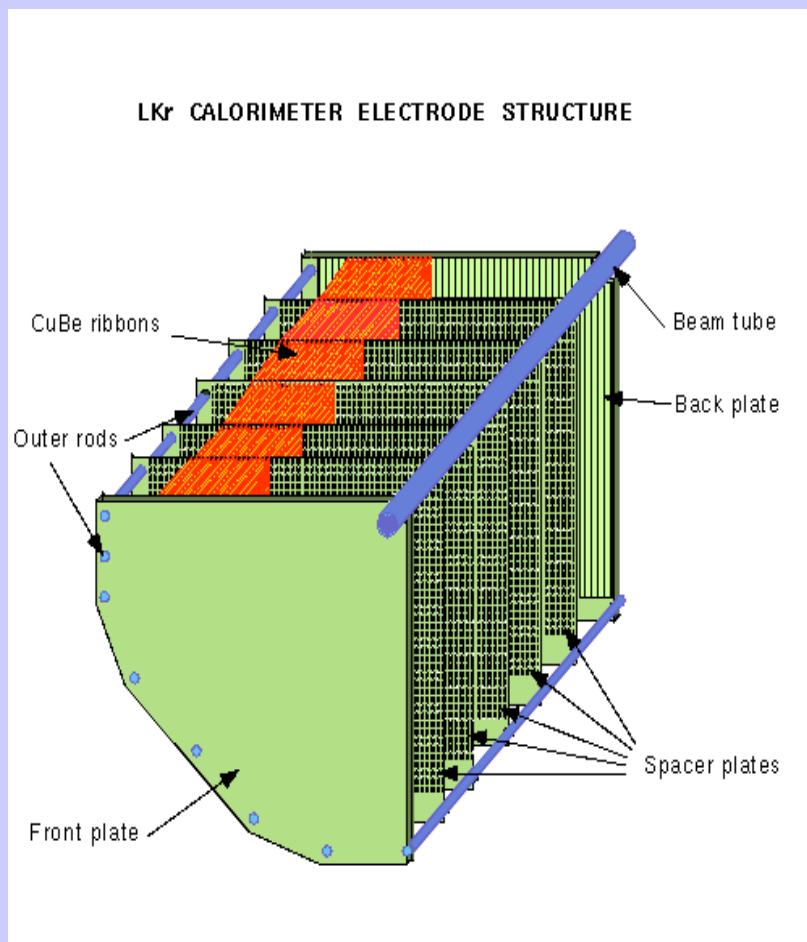
Kalorymetr EM
dla pomiarów
 e , γ , π^0

**Wypełniony
ciekłym Kr,**
b. dobra
energetyczna
i przestrzenna
zdolność
rozdzielcza



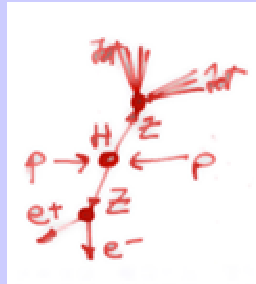
Kalorymetry przykłady

Kalorymetr EM w eksperymencie NA48

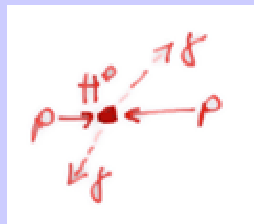
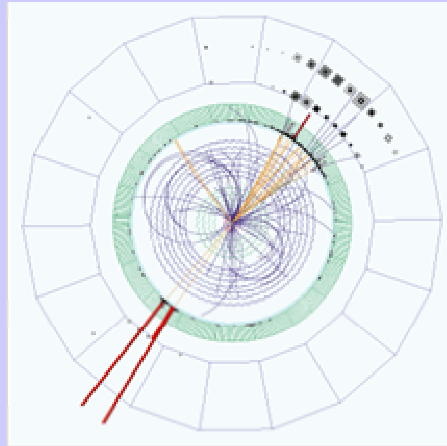


Kalorymetry przykłady

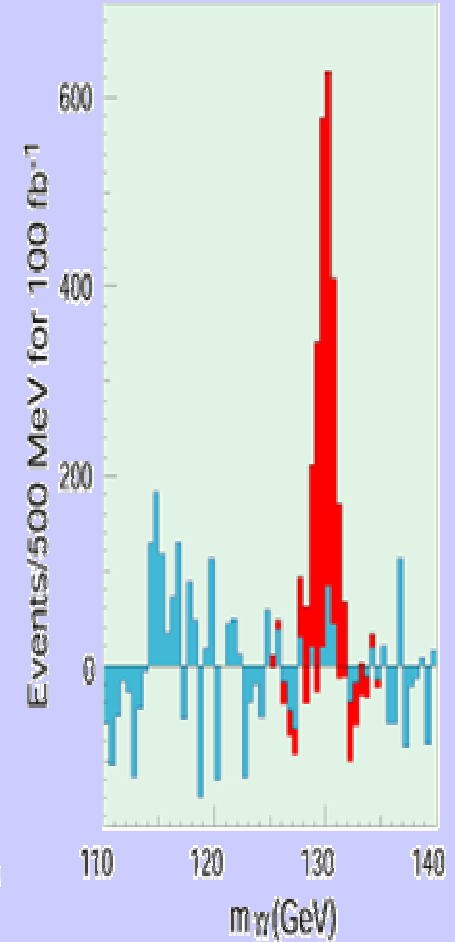
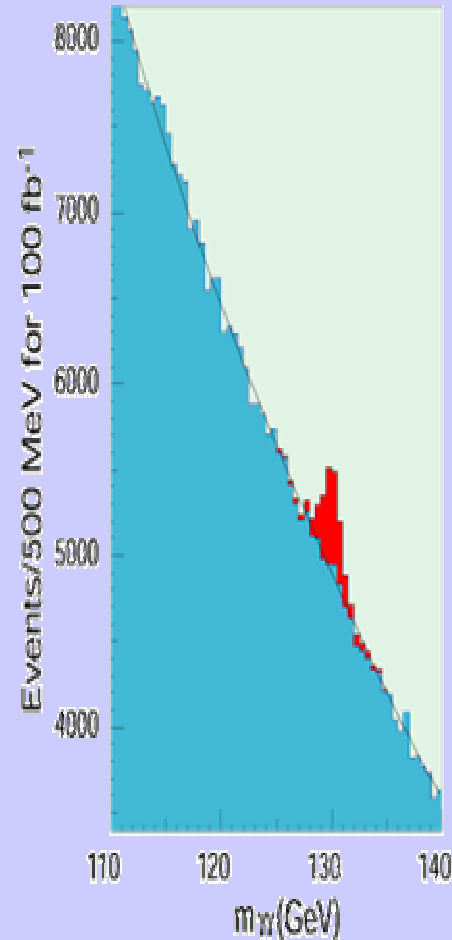
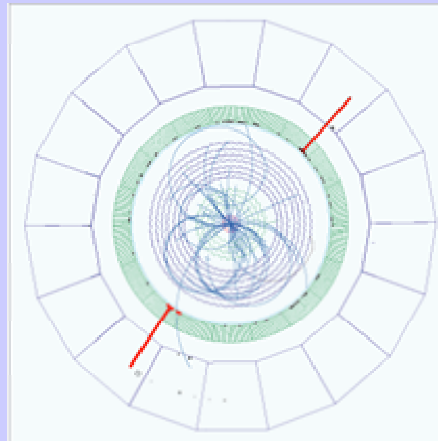
Rola kalorymetrów w eksperymentach LHC (CMS)



$pp \rightarrow H^0 \rightarrow Z Z$
 $\rightarrow$ jet jet
 $\rightarrow e^+ e^-$



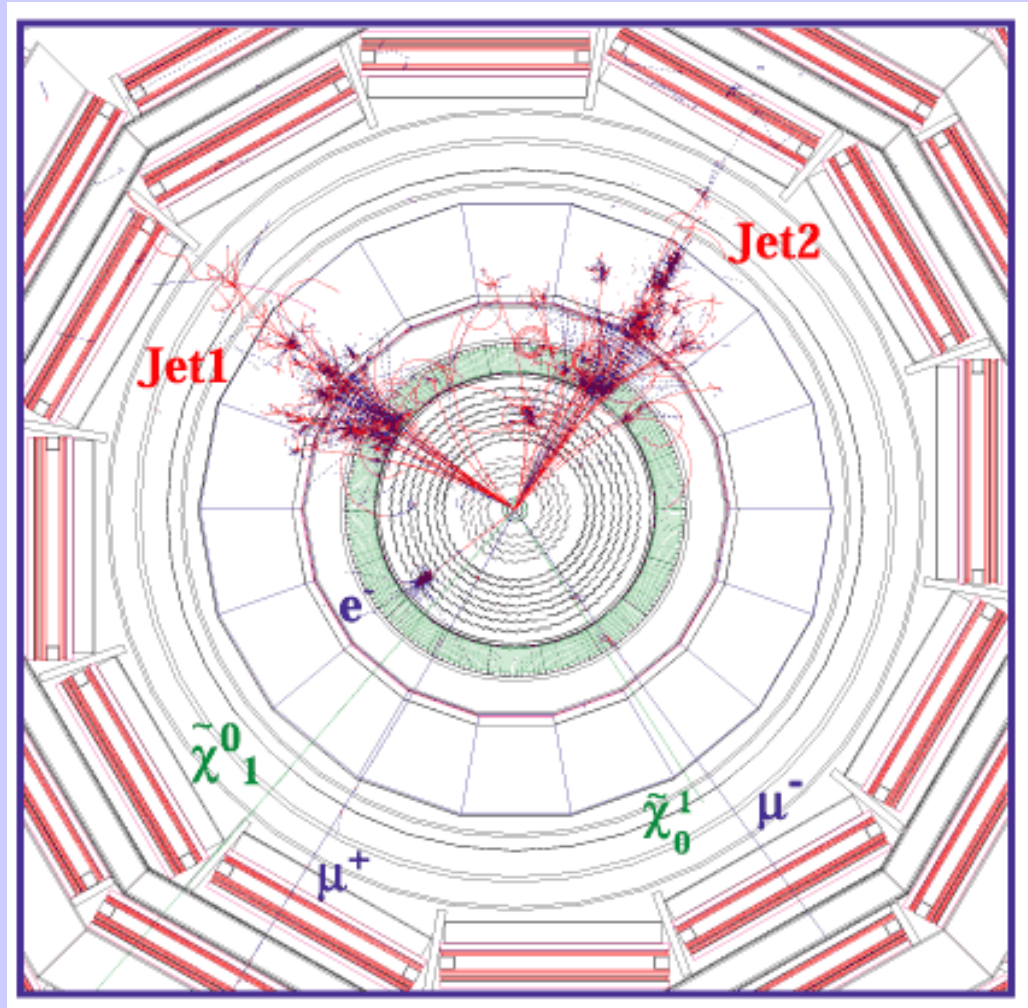
$pp \rightarrow H^0$
 $\rightarrow \gamma\gamma$



Kalorymetry

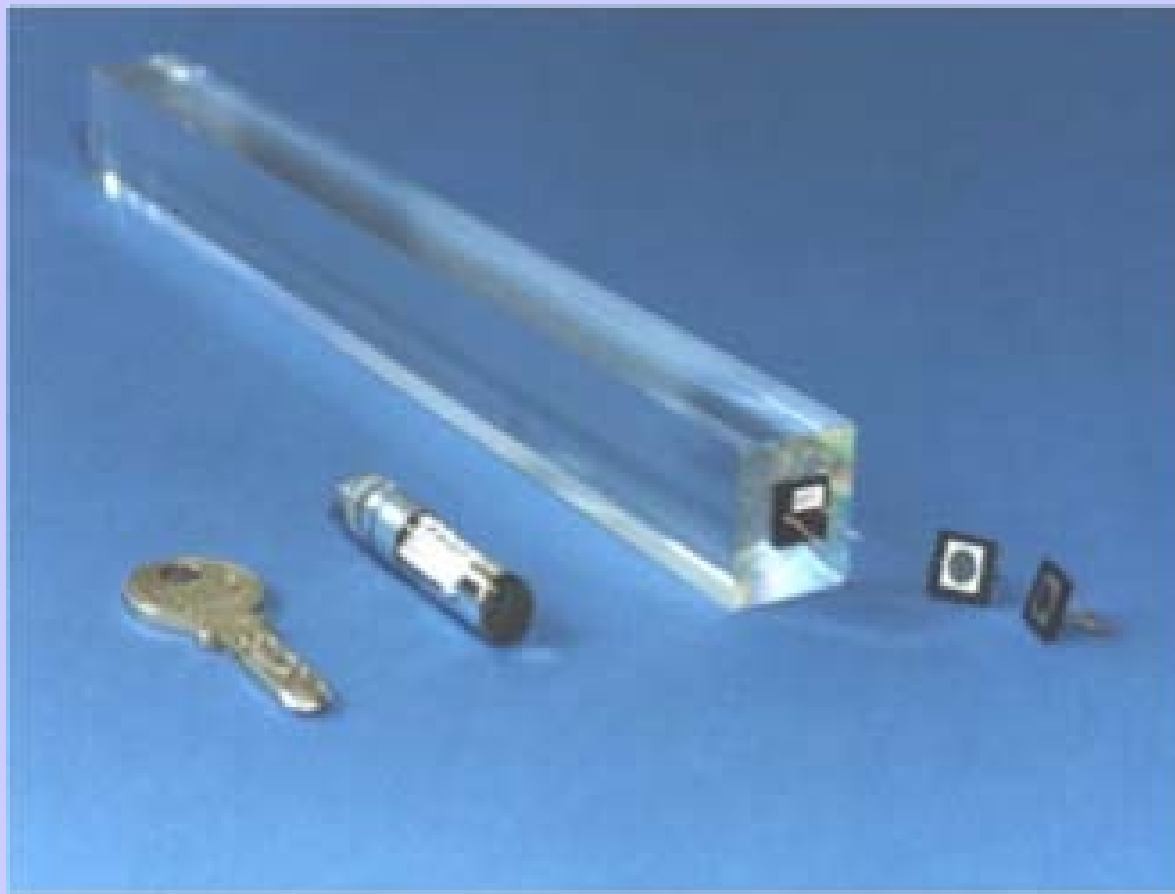
przykłady

Kalorymetry
w
eksperymentach
CMS



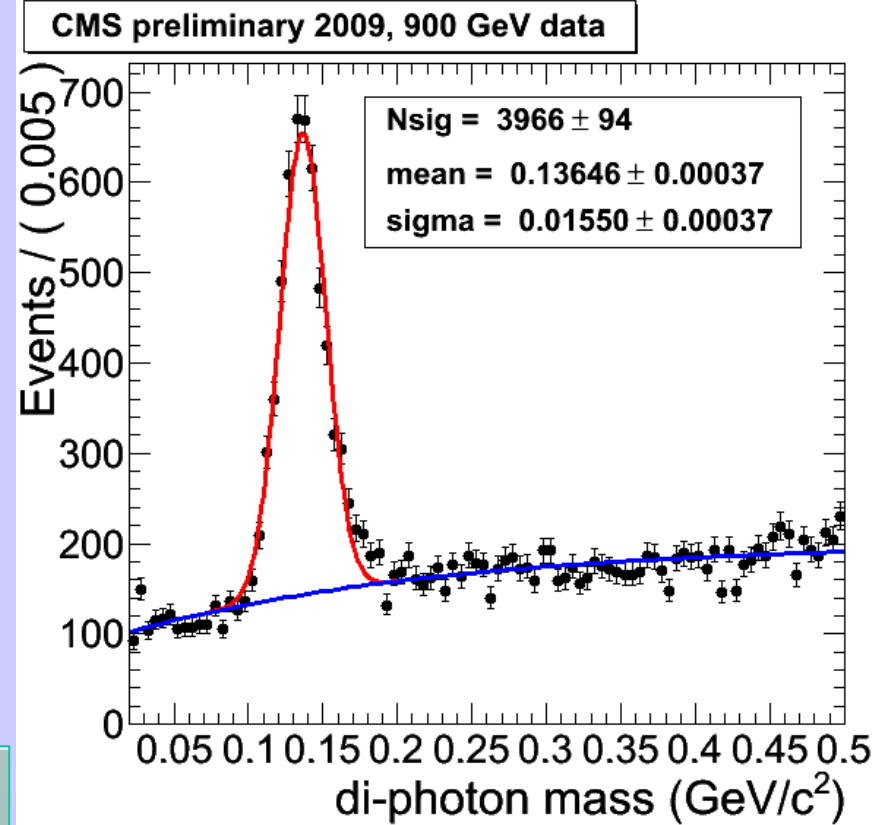
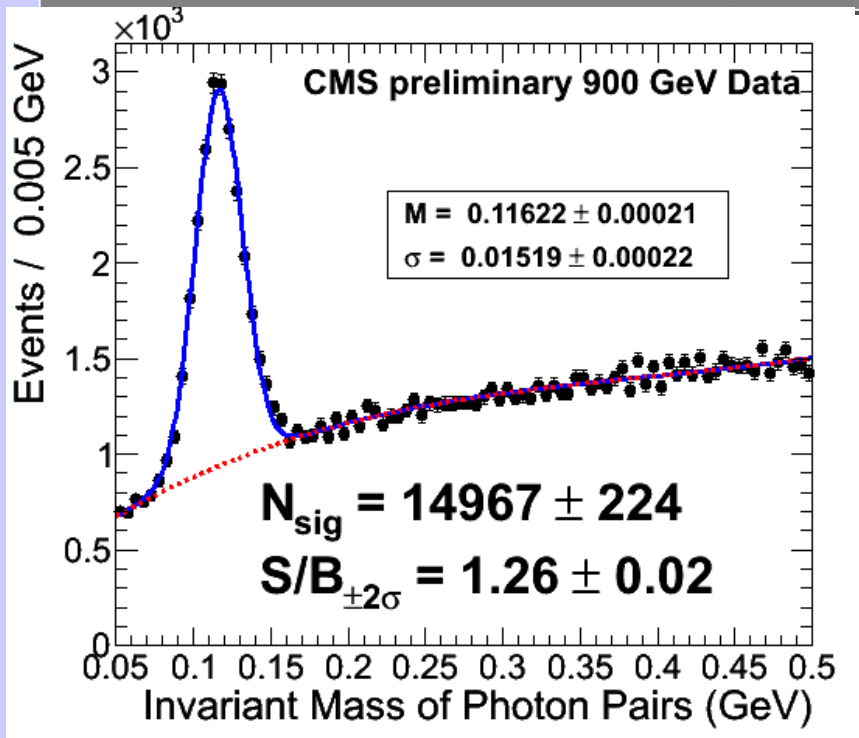
Kalorymetry przykłady

Kalorymetr EM dla eksperymentu CMS – kryształy PbWO



First Di-photon Distribution in CMS

First shown on Thur 27th Nov, Today's distributions shown below

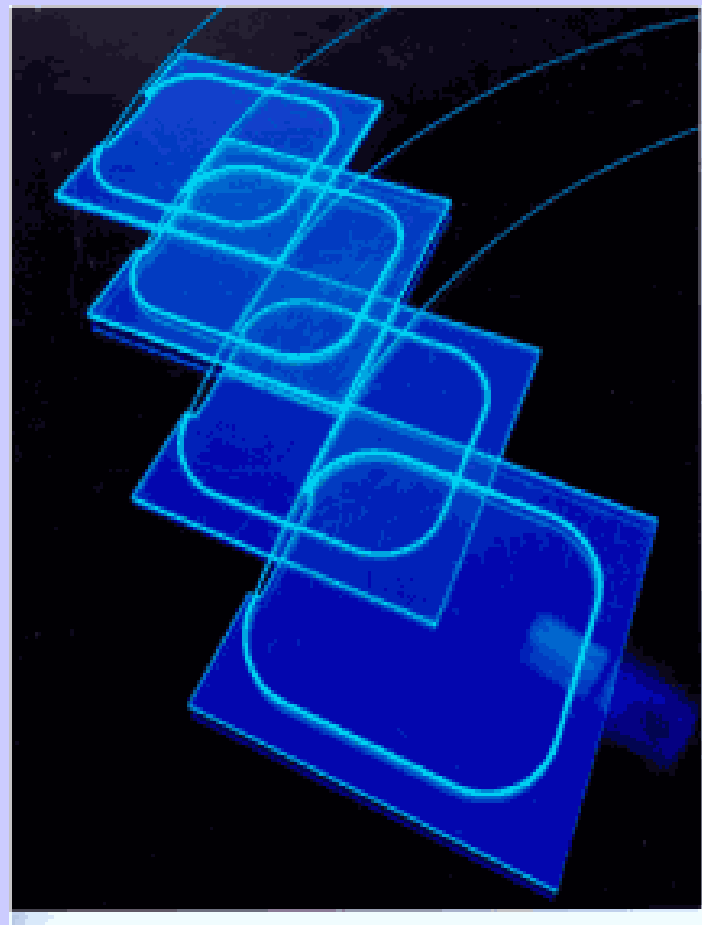
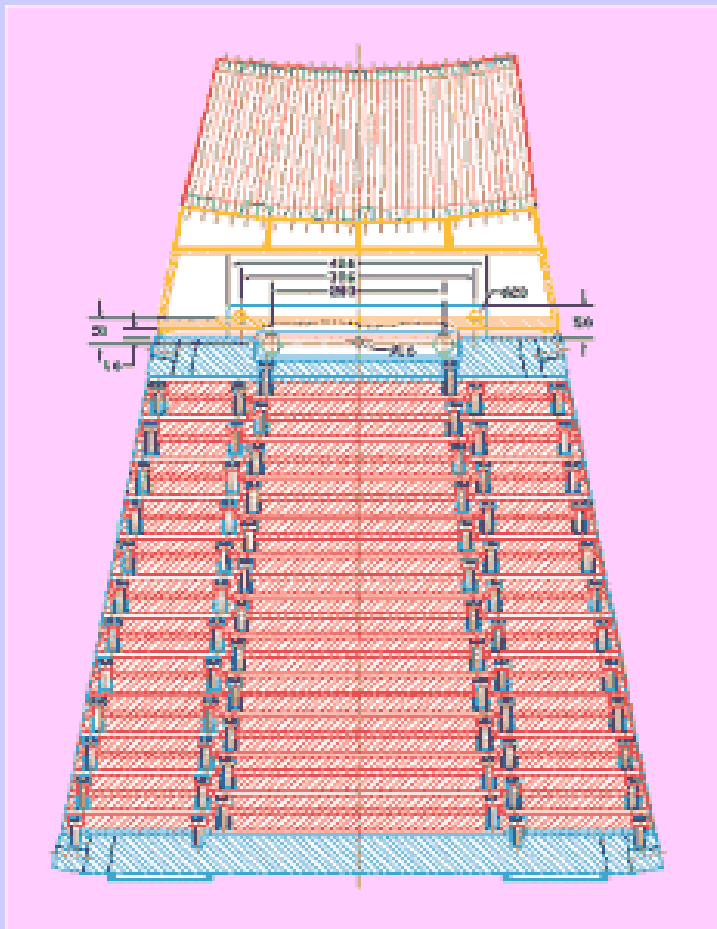


- Data and MC comparison (uncorrected distributions)
- Almost identical S/B, mass and width compatible
- $M(\pi^0)$ is low in both data and MC - Mostly due to the readout threshold (100 MeV/Crystal) and conversions

Using “out of the box” corrections

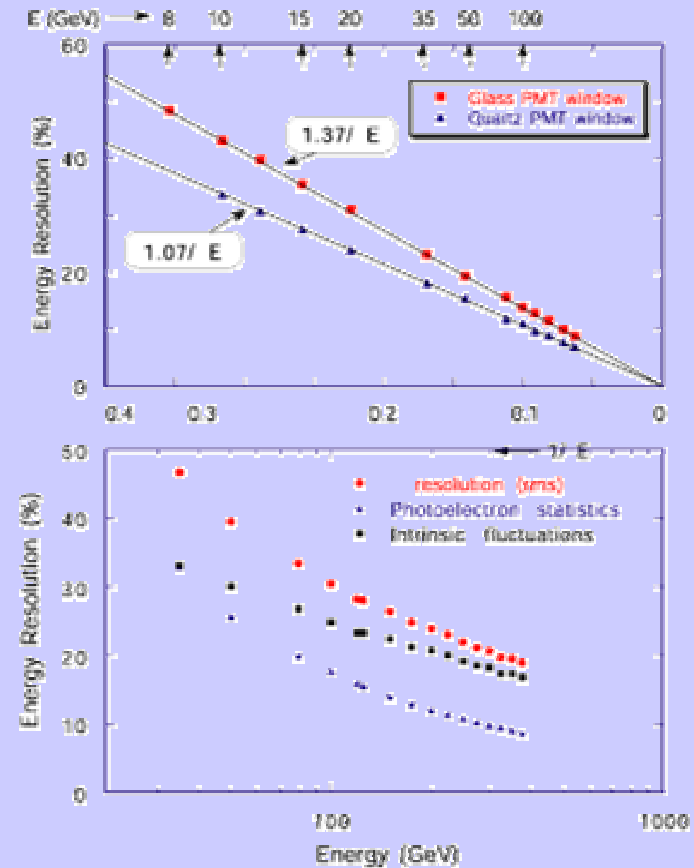
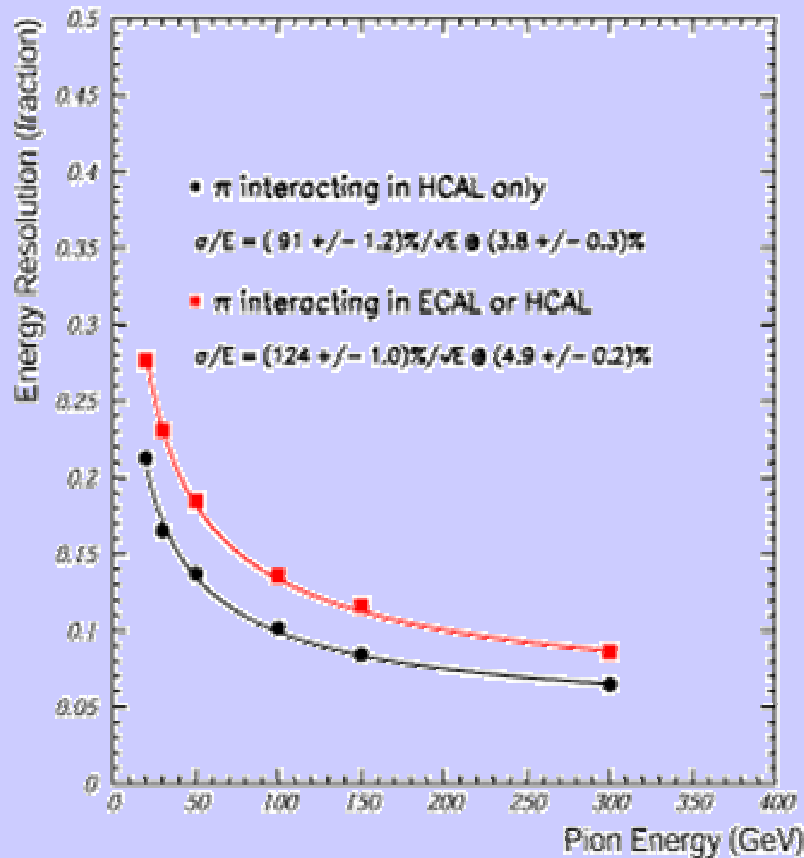
Kalorymetry przykłady

Kalorymetr hadronowy dla eksperymentu CMS – Cu/scyntylator

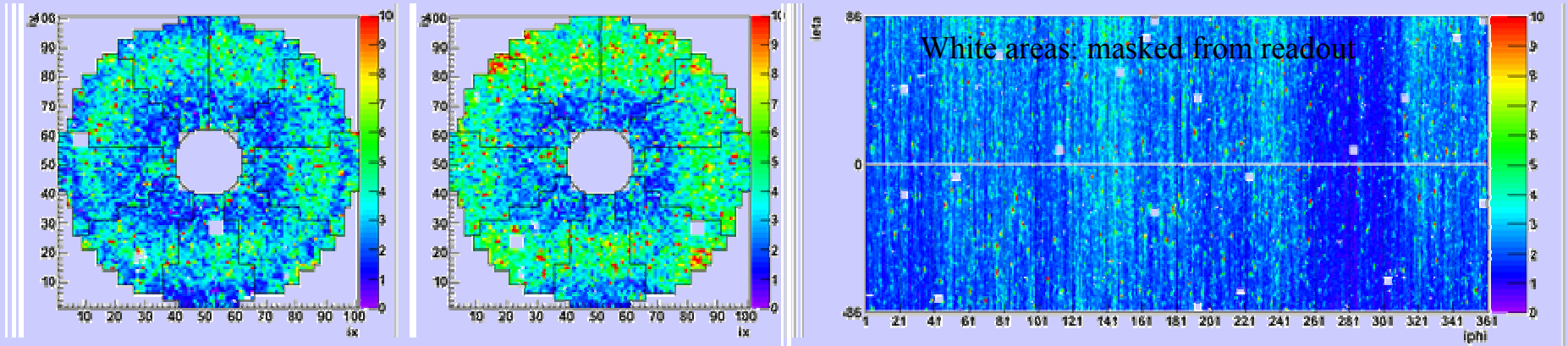


Kalorymetry przykłady

Kalorymetr hadronowy dla eksperymentu CMS – Cu/scyntylator



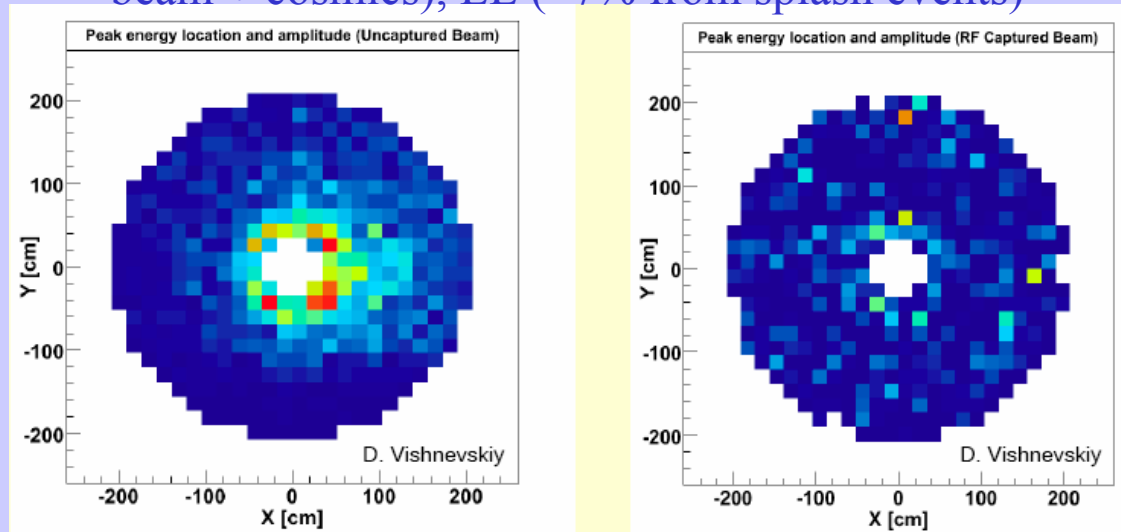
LHC Beam: Energy Deposit in Calorimeters



ECAL Endcaps (lhs), Barrel (rhs)

> 99% of ECAL channels alive, ~200 TeV energy deposited in EB+EE

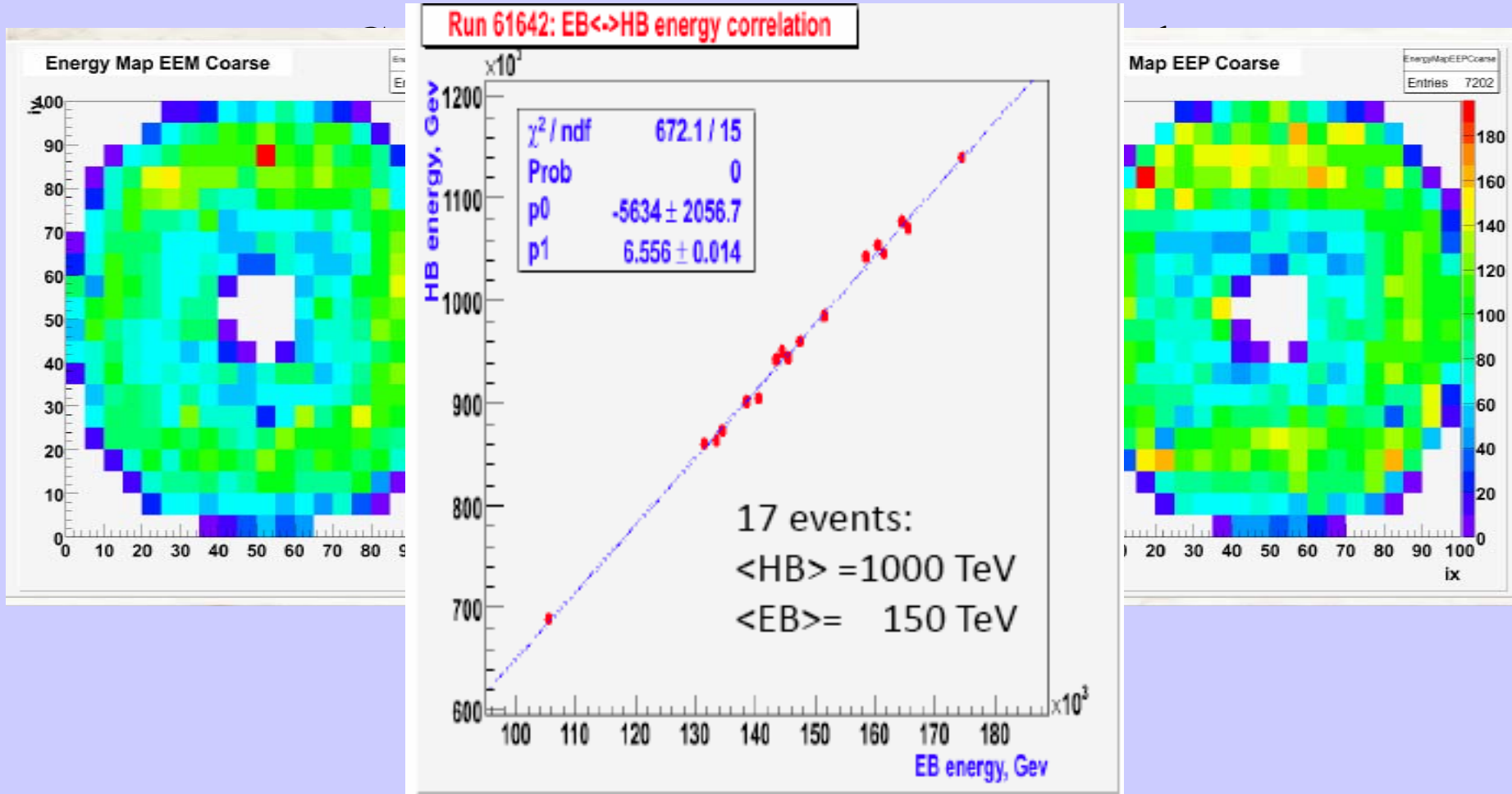
Inter-crystals timing established ($< 1\text{ ns}$), inter-crystal calibration EB (1.5-2.5% - test beam + cosmics), EE (~7% from splash events)



Michał Turała, 2009

HCAL Endcap: un-captured (lhs) and captured **circulating** beam (rhs)

CMS Calorimeters: Collimators Closed

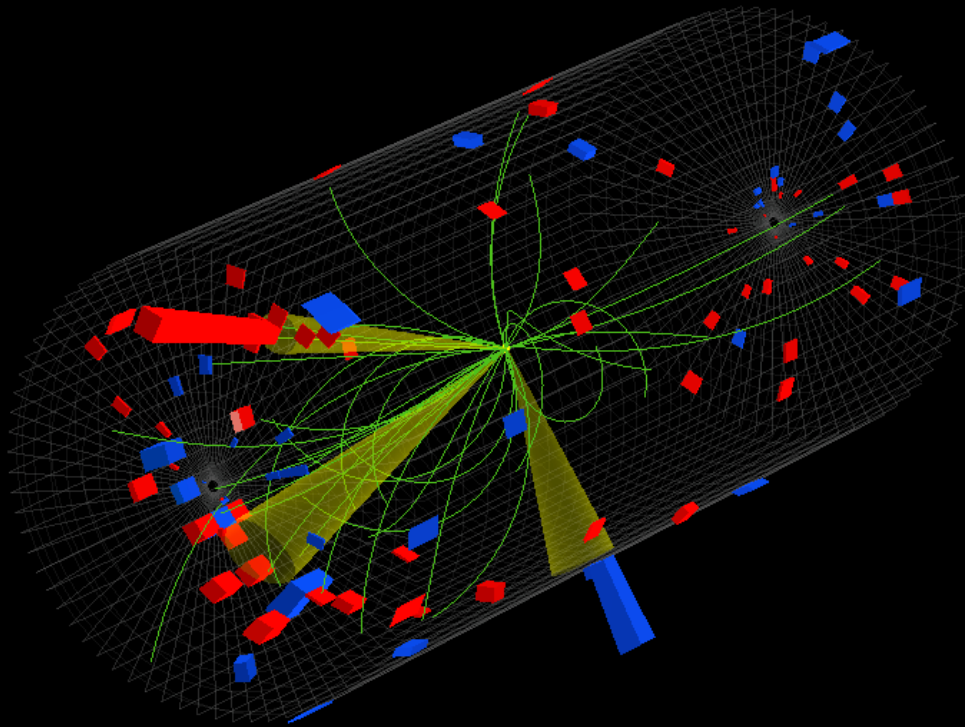


ECAL: Splash events provided a source for overall internal synchronization.
Crystals were time aligned to within 1ns !

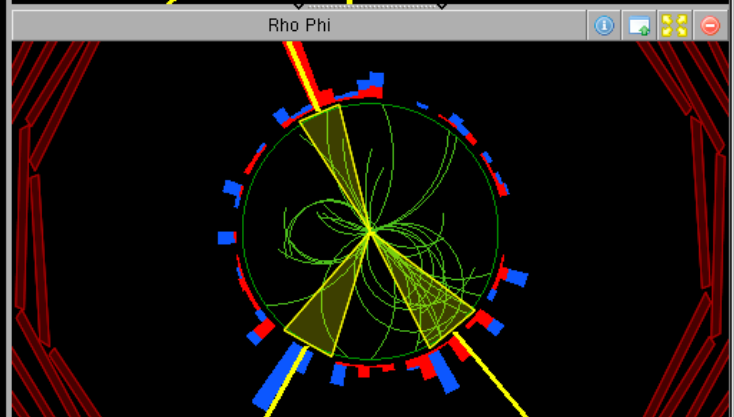
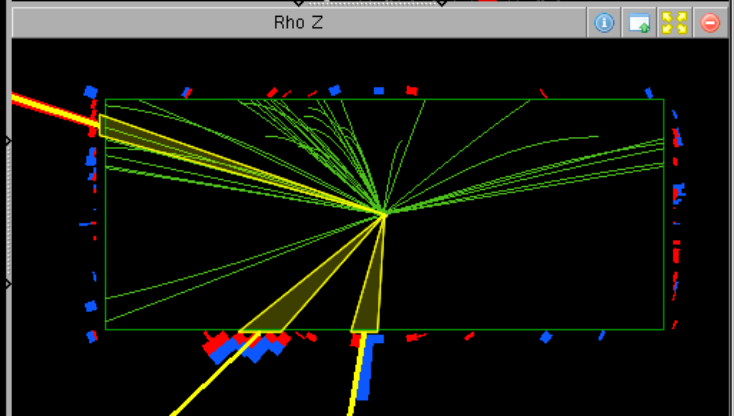
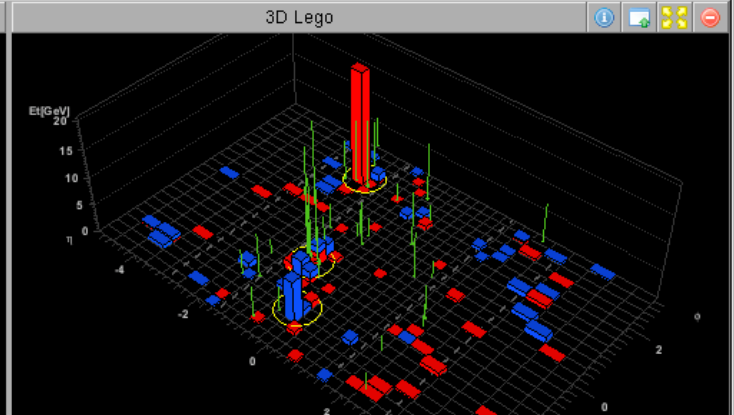
CMS Calorimeters



CMS Experiment at the LHC, CERN
Date Recorded: 2009-12-14 04:21:03 CEST
Run/Event: 124120/542515
Candidate multijet event at 2.36 TeV

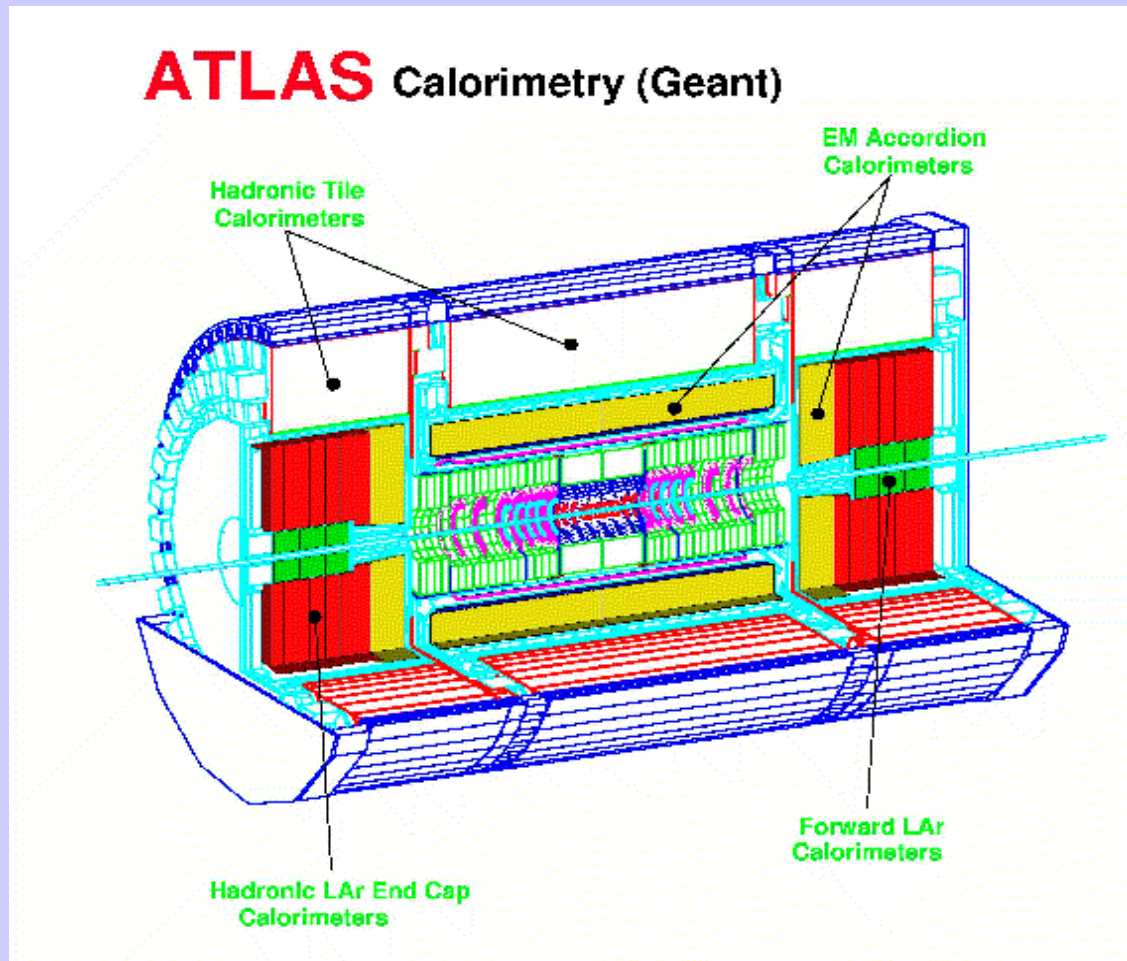


3 PFlow jets $p_T > 10$ GeV
 p_T cut on tracks displayed > 0.4 GeV



Kalorymetry przykłady

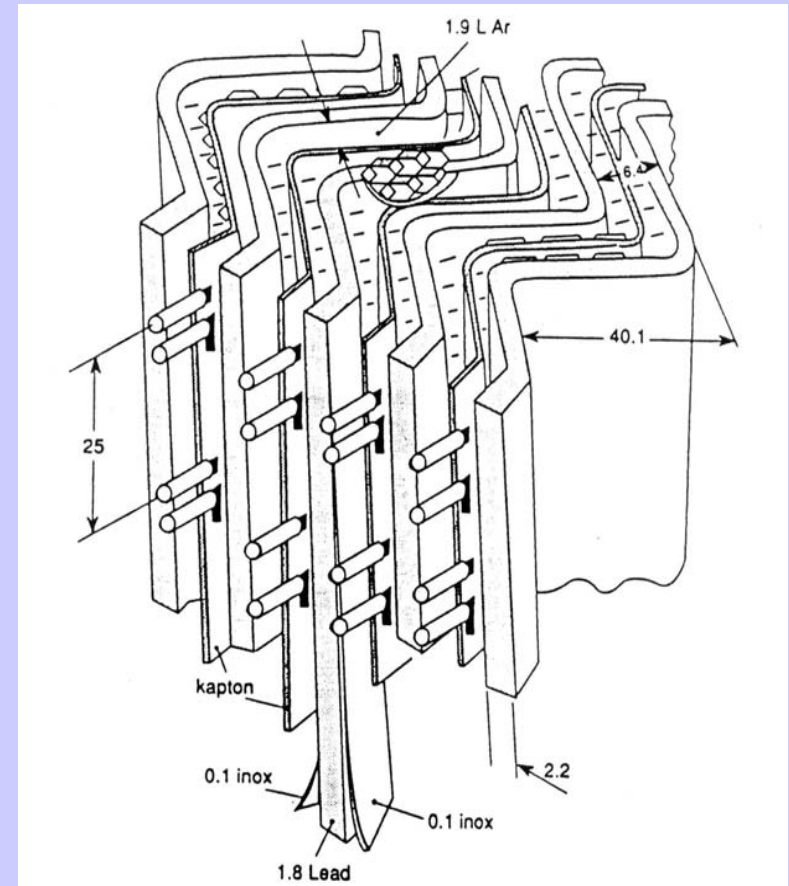
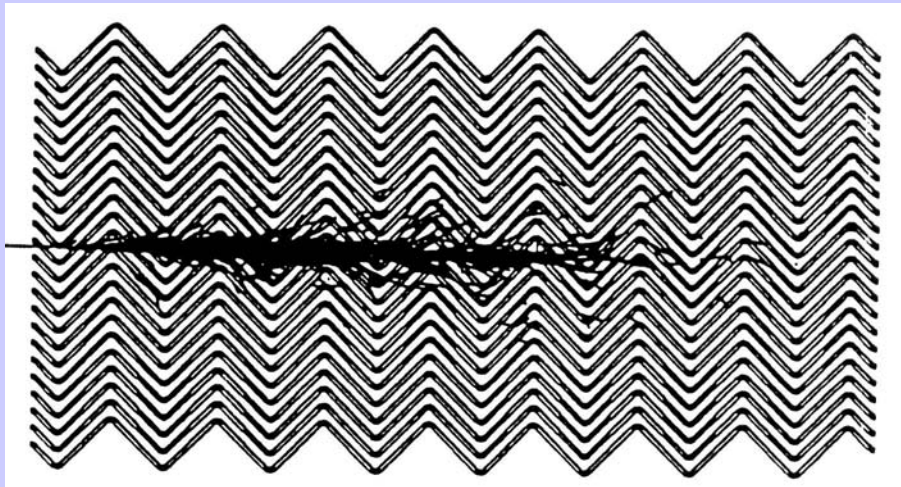
Kalorymetry w eksperymencie ATLAS



Kalorymetry przykłady

Kalorymetr EM dla
eksperymentu ATLAS

Tzw. „akordeon” – harmonijka Pb
w ciekłym argonie



Kalorymetry przykłady

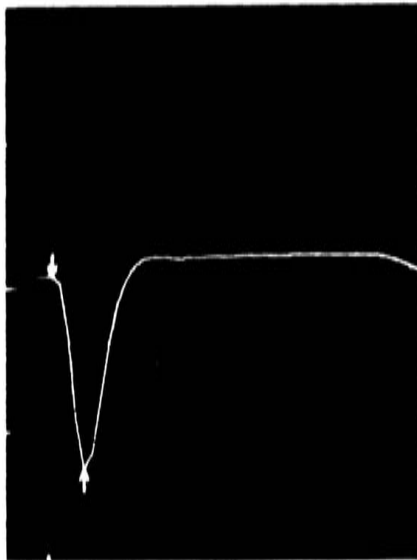
Kalorymetr EM dla eksperymentu ATLAS

Sygnały z kalorymetru

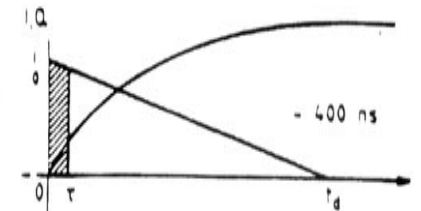
60 GeV electron
signal with

$$t_p(\delta) = 20 \text{ ns}$$

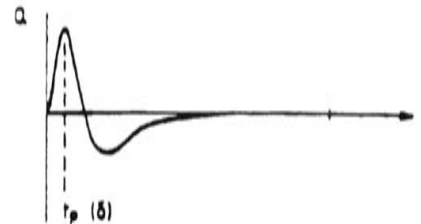
$$t_p(\text{LAr current}) = 38 \text{ ns}$$



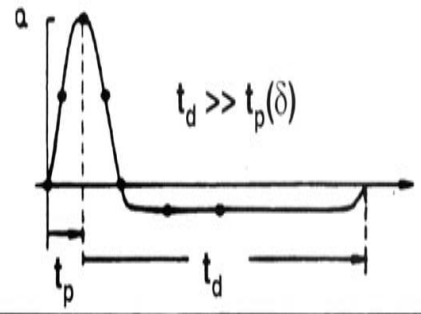
typical LAr response



bipolar shaping δ -pulse

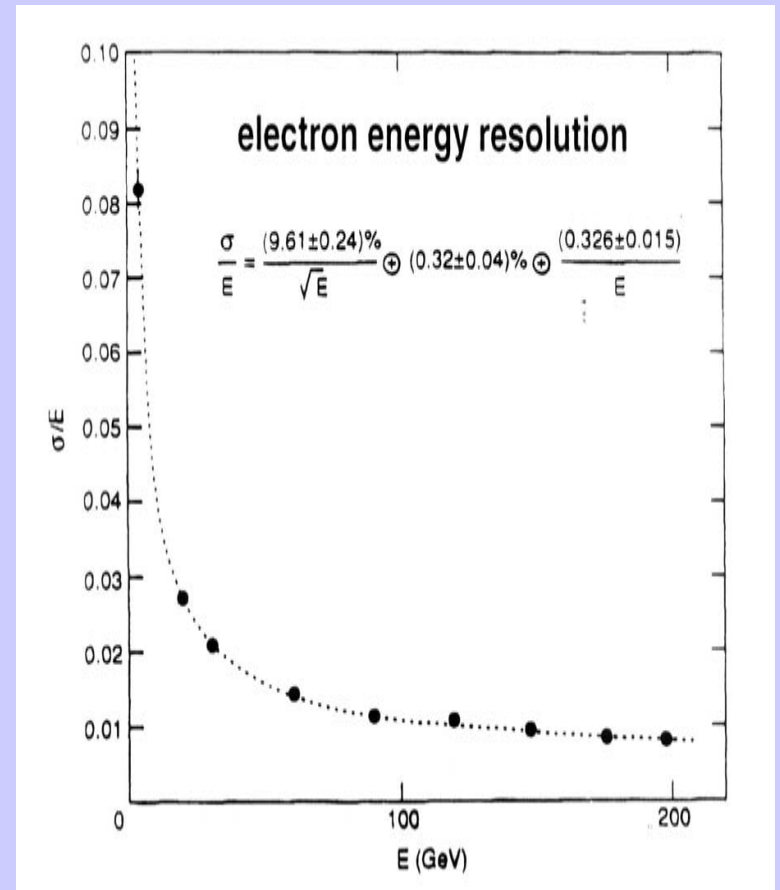
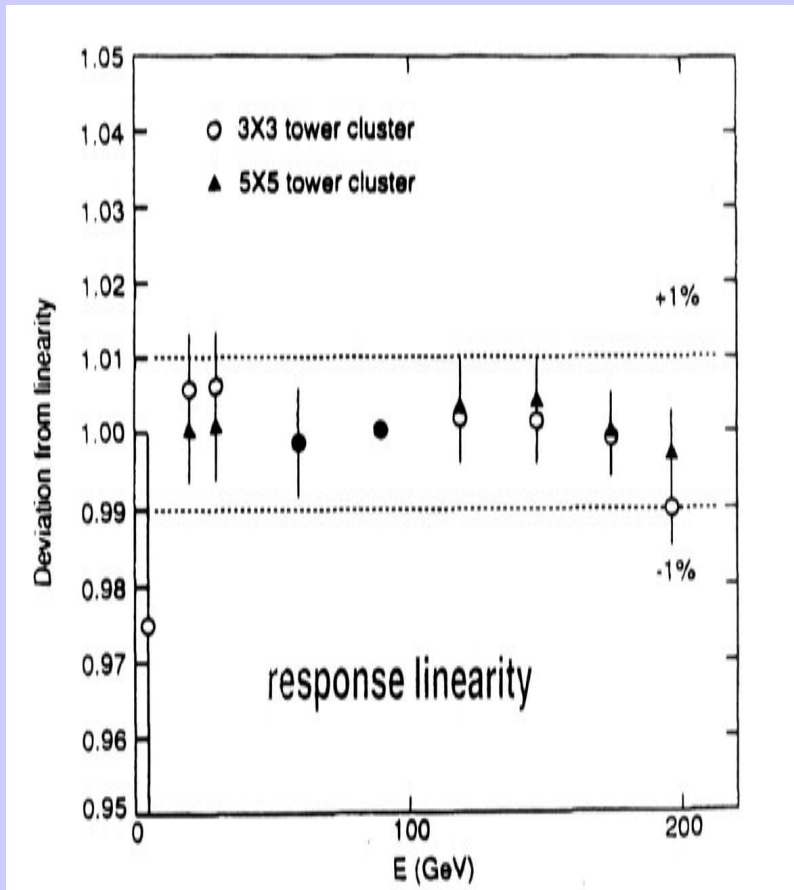


bipolar shaping LAr
pulse



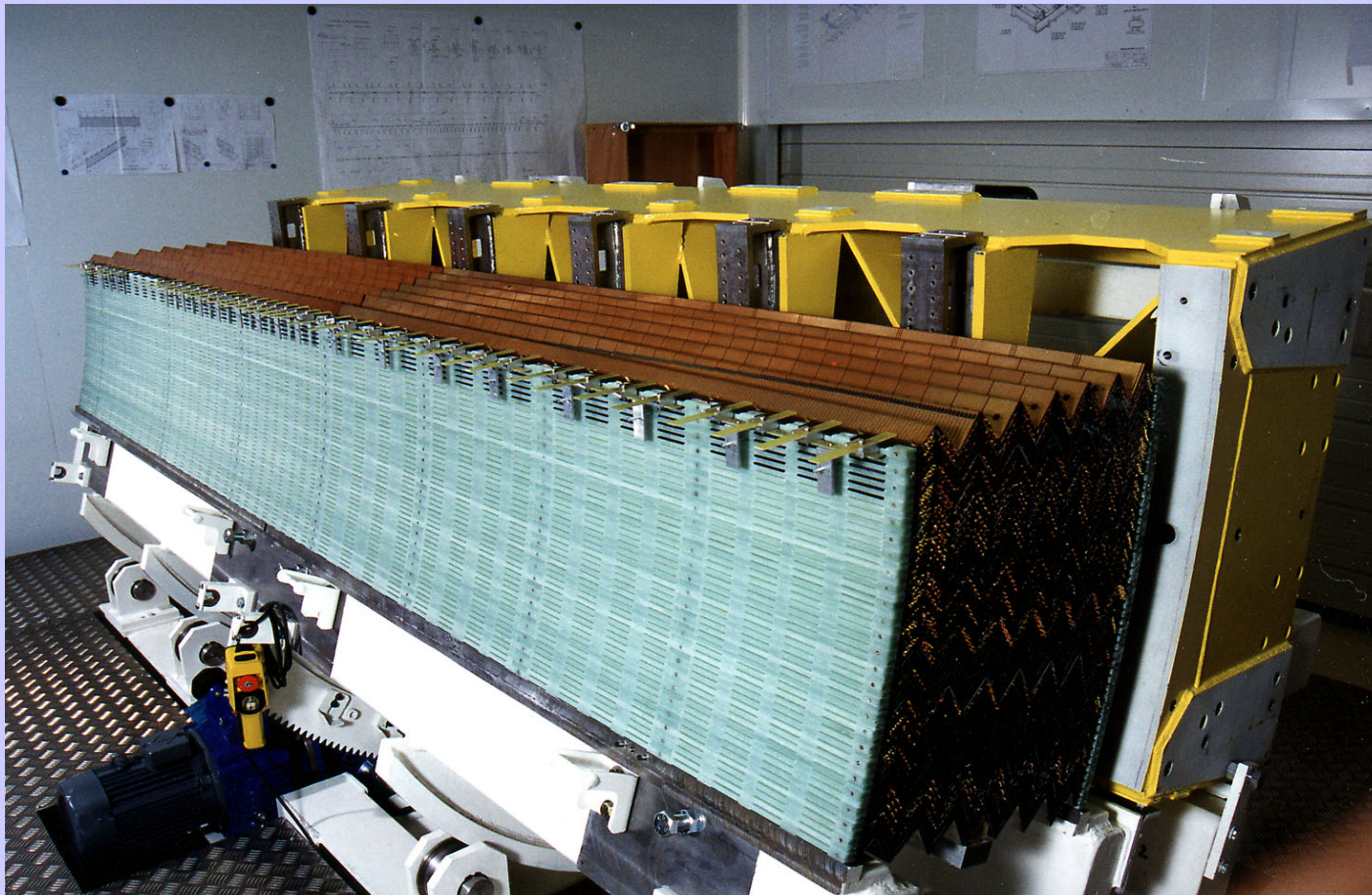
Kalorymetry przykłady

Kalorymetr EM dla eksperymentu ATLAS - parametry



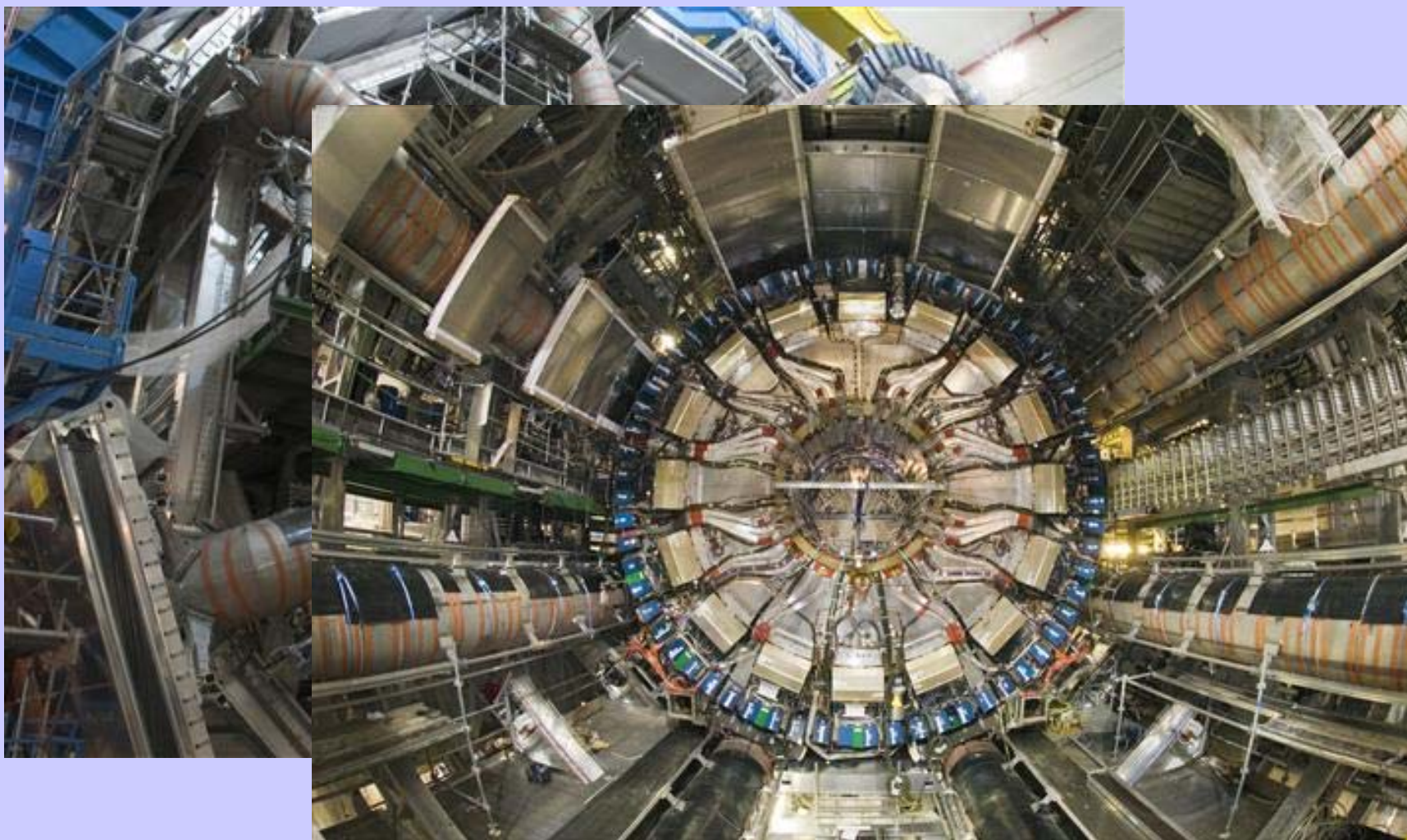
Kalorymetry przykłady

Kalorymetr EM dla eksperymentu ATLAS – część centralna



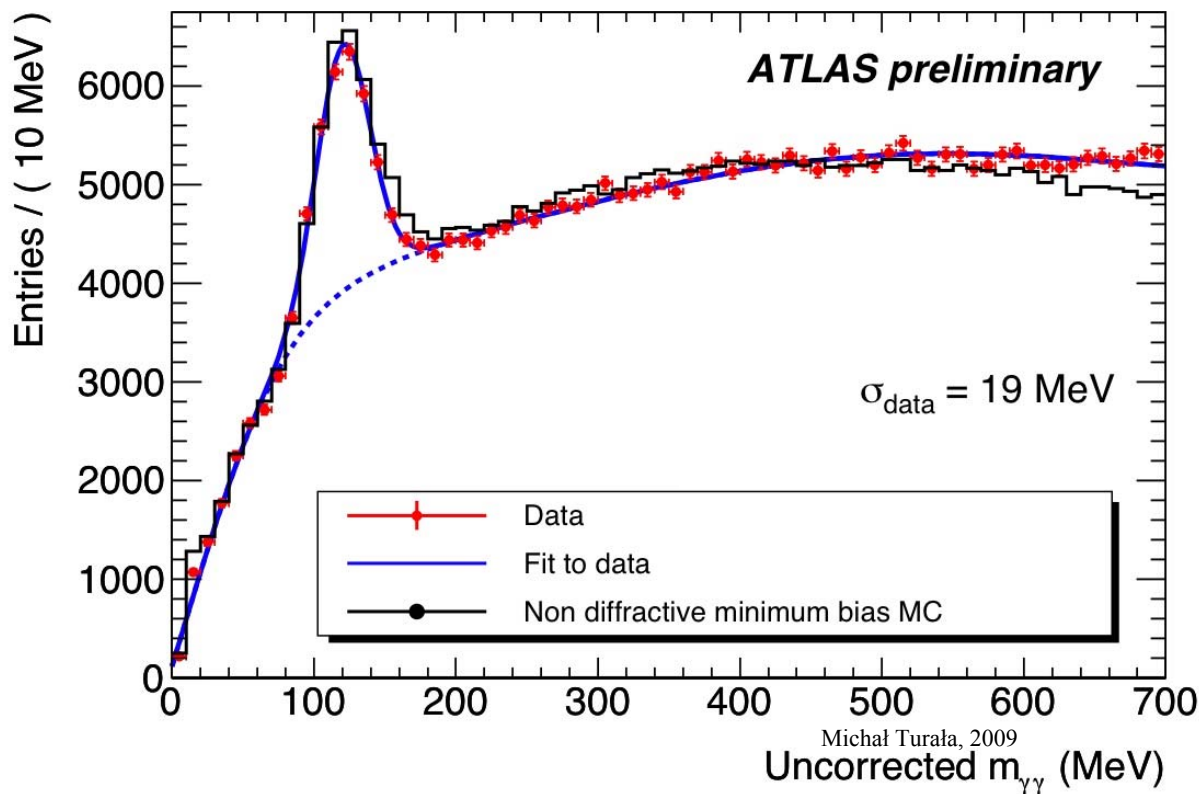
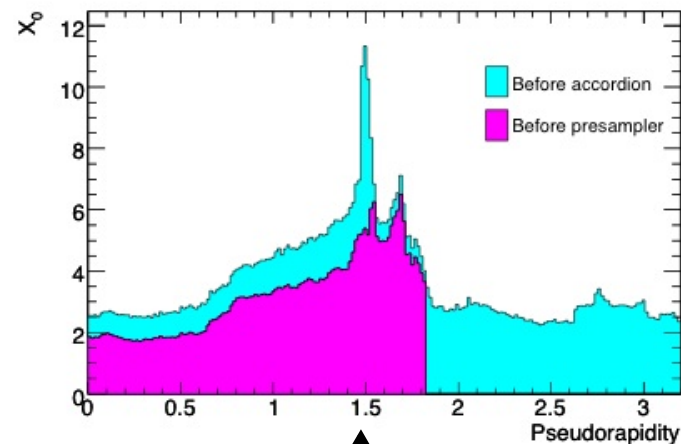
Kalorymetry przykłady

Kalorymetr EM dla eksperymentu ATLAS – część centralna



$$\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$$

- 2 photon candidates with $E_T(\gamma) > 300$
- $E_T(\gamma\gamma) > 900$ MeV
- Shower shapes compatible with photon
- No corrections for upstream material



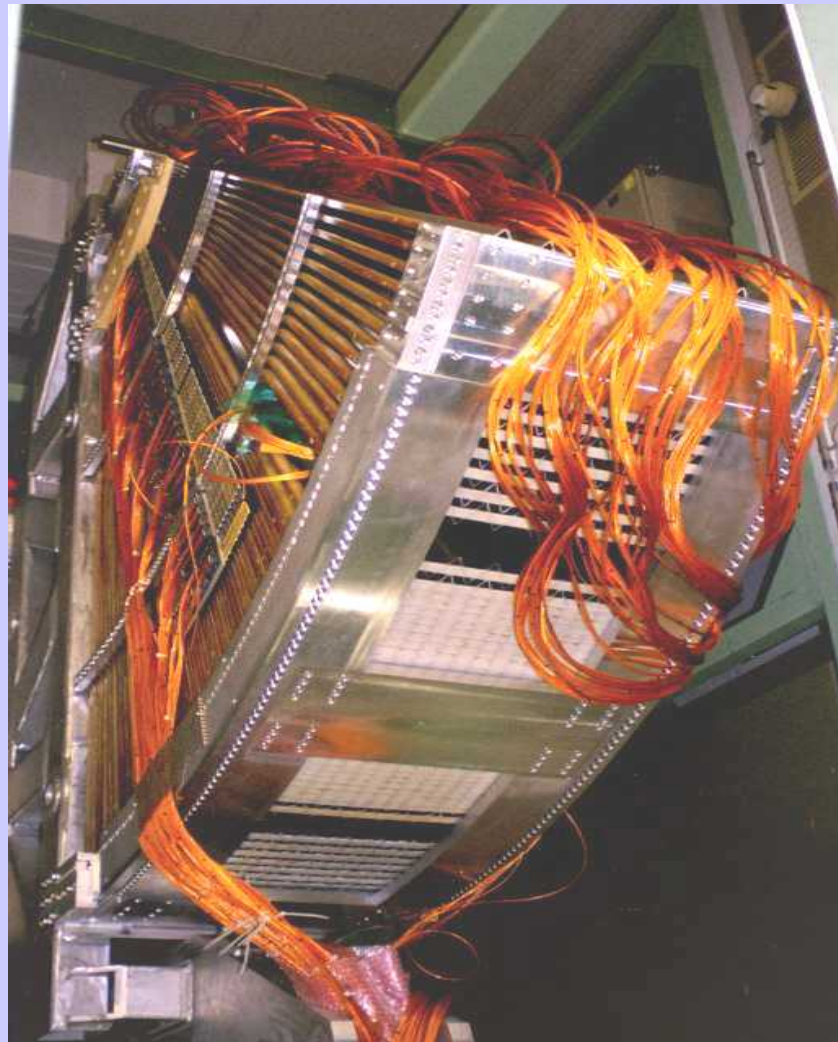
Note: soft photons are challenging because of material in front of EM calorimeter (cryostat, coil): $\sim 2.5 X_0$ at $\eta=0$

Data and MC normalised to the same area

Kalorymetry

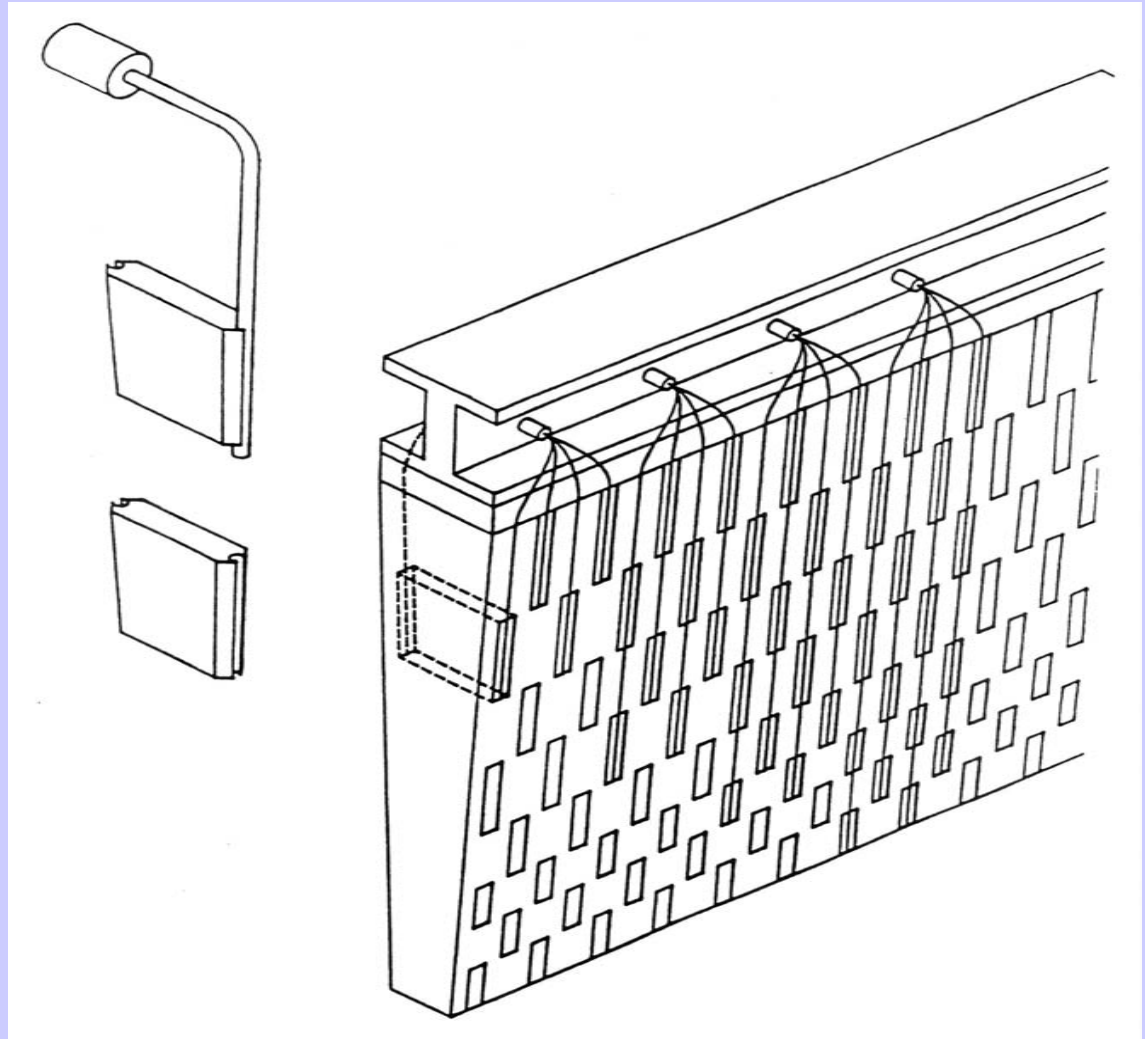
przykłady

Kalorymetr EM dla
eksperymentu
ATLAS
– część „do przodu”



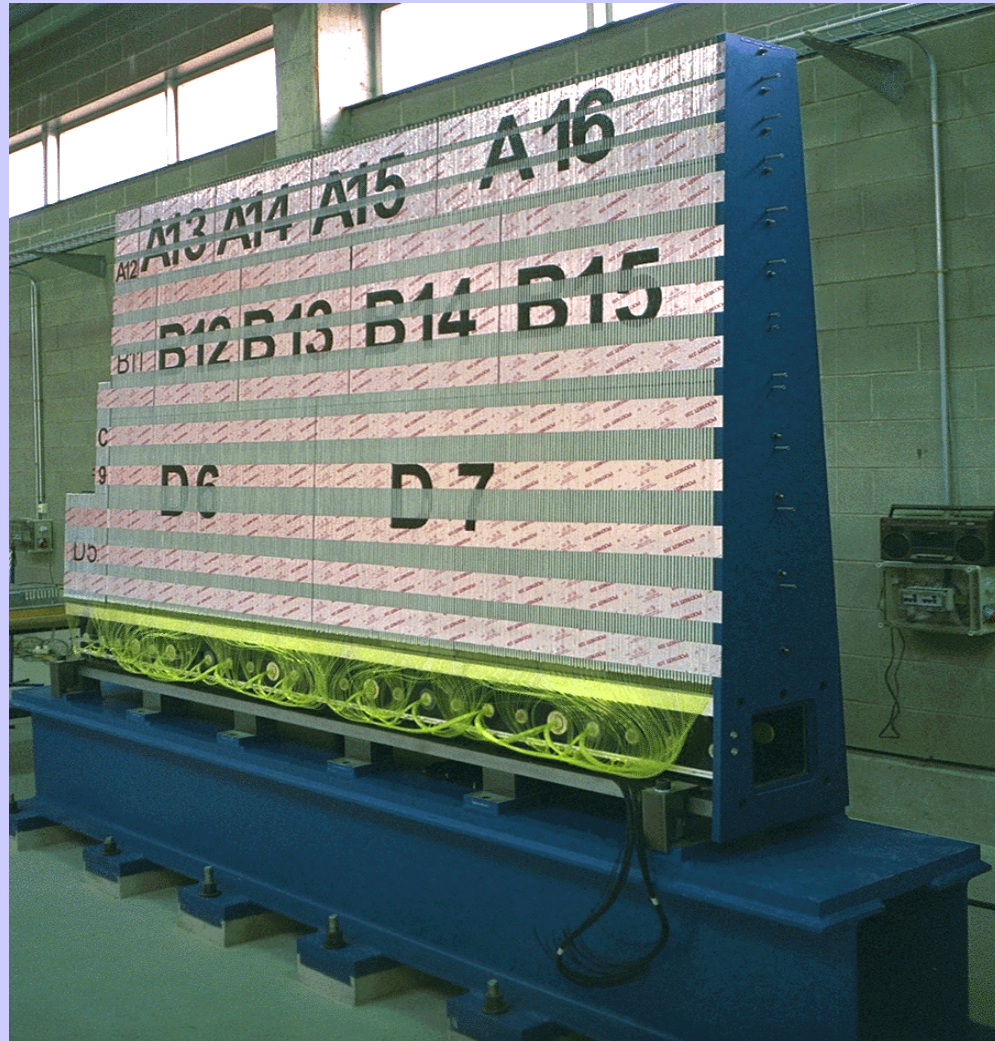
Kalorymetry przykłady

Kalorymetr
hadronowy dla
eksperymentu
ATLAS
(tzw. „tile
calorimeter”)
- schemat



Kalorymetry przykłady

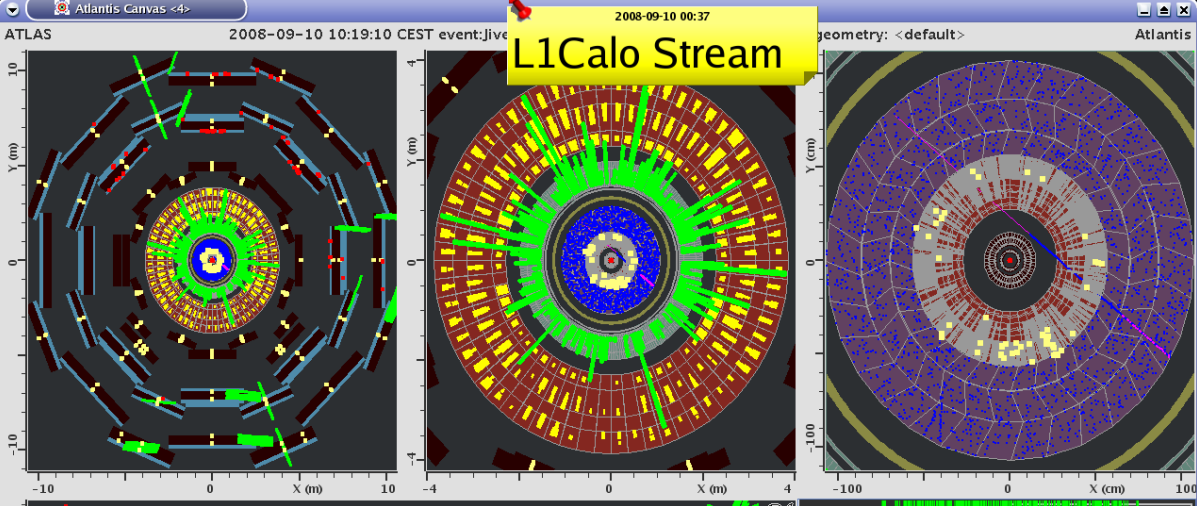
Kalorymetr
hadronowy
dla
eksperymentu
ATLAS



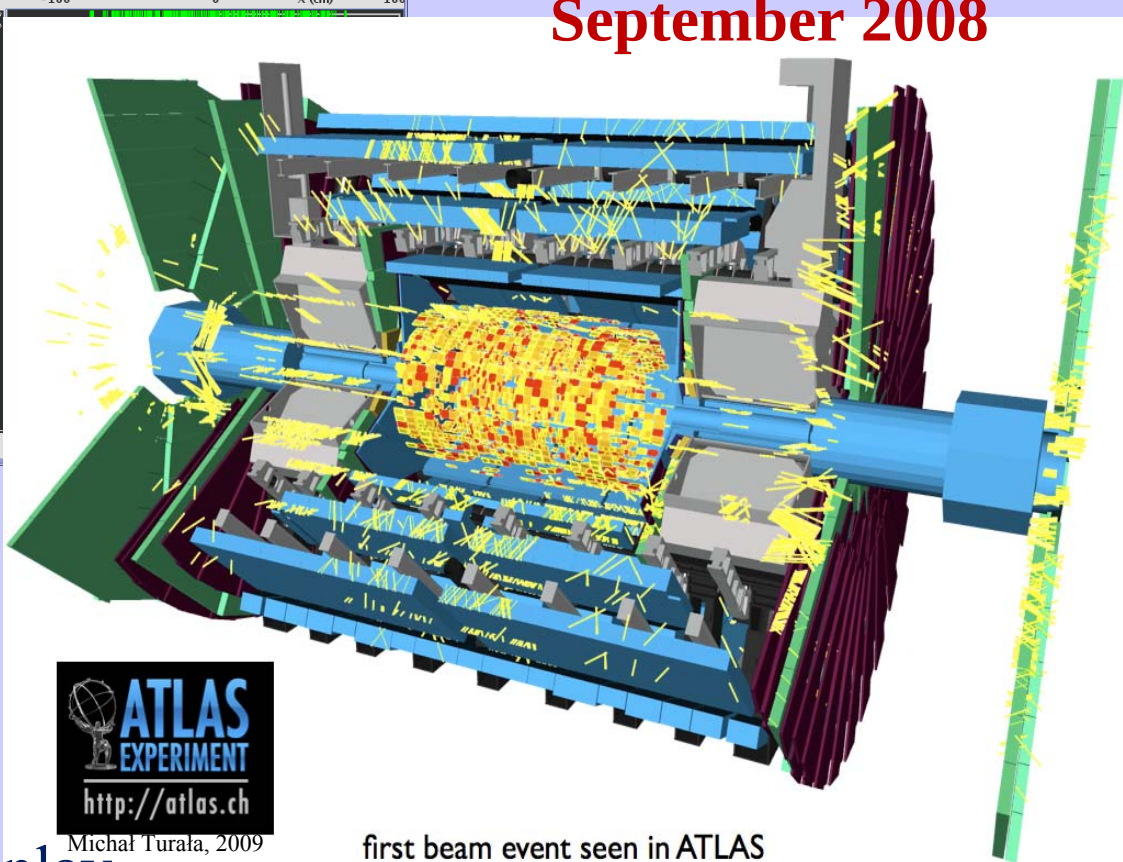
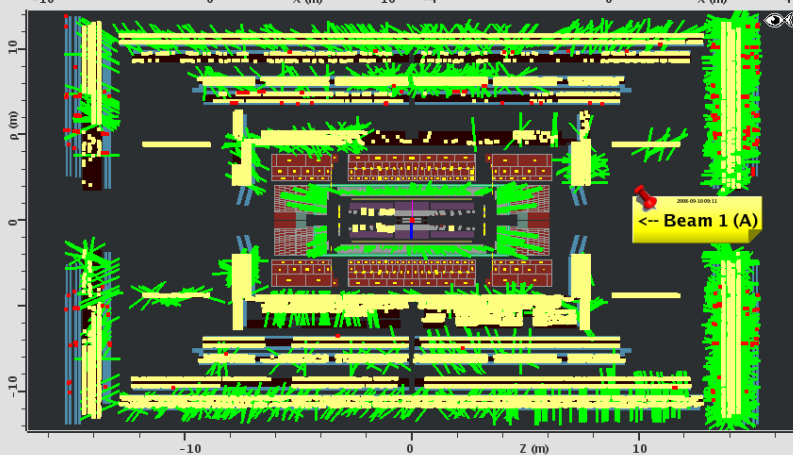
Kalorymetry przykłady

Kalorymetr hadronowy dla eksperymentu ATLAS





**The very first beam-splash
event from the LHC
in ATLAS
on 10:19, 10th
September 2008**



Online display

Offline display



Michał Turała, 2009

first beam event seen in ATLAS

Kalorymetry

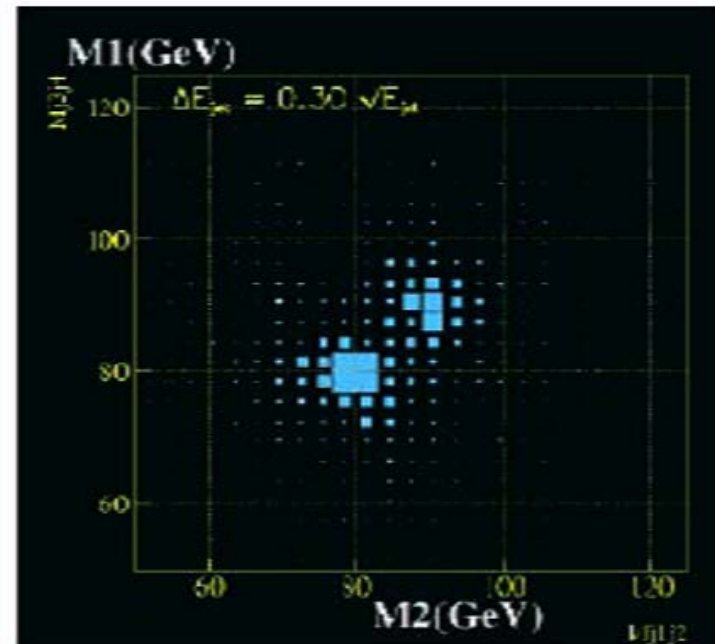
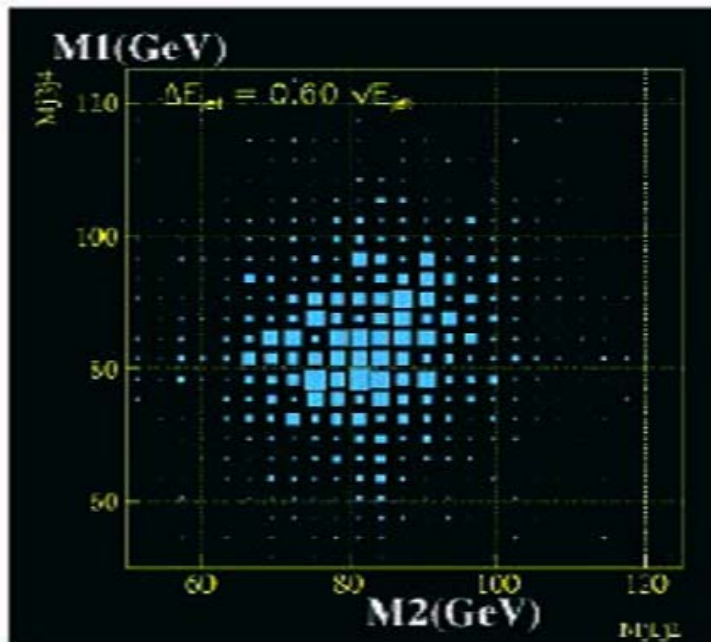
przyszłe eksperymenty ILC

e.g: Separation of WW and ZZ

$e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu}W^+W^-, \nu\bar{\nu}ZZ, \quad W, Z \rightarrow 2\text{jets}$

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{0.6}{\sqrt{E}}$$

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{0.3}{\sqrt{E}}$$



$\frac{\sigma_E}{E} \sim \frac{0.3}{\sqrt{E}}$ is 'needed'.

For jets !!!!