

Metody eksperymentalne w fizyce wysokich energii

prof. dr hab. A.F.Żarnecki

Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych IFD

Wykład V

- Liczniki scyntylacyjne
- Kalorymetry

Liczniki scyntylacyjne

Scyntylatory

W szeregu materiałów atomy wzbudzone na skutek jonizacji emitują fotony światła.

Jeśli materiał jest przezroczysty dla emitowanej długości światła \Rightarrow **scyntylator**

\Rightarrow mamy możliwość detekcji produkowanych fotonów

Aby fotony miały długą drogę swobodną w materiale, muszą być emitowane z poziomu do którego przejście ze stanu podstawowego jest **wzbronione**.

Inaczej byłyby bardzo szybko reabsorbowane.

Dwie podstawowe grupy materiałów:

- scyntylatory organiczne
- kryształy nieorganiczne

Liczniki scyntylacyjne

Scyntylatory organiczne

Tworzywa organiczne (plastiki) lub (dużo rzadziej) ciecze.

Generują fotony w zakresie niebieskim i zielonym, średnio 1 γ / 100 eV strat energii

⇒ w 1cm materiału cząstka minimalnej jonizacji daje $\approx 2 \times 10^4$ fotonów

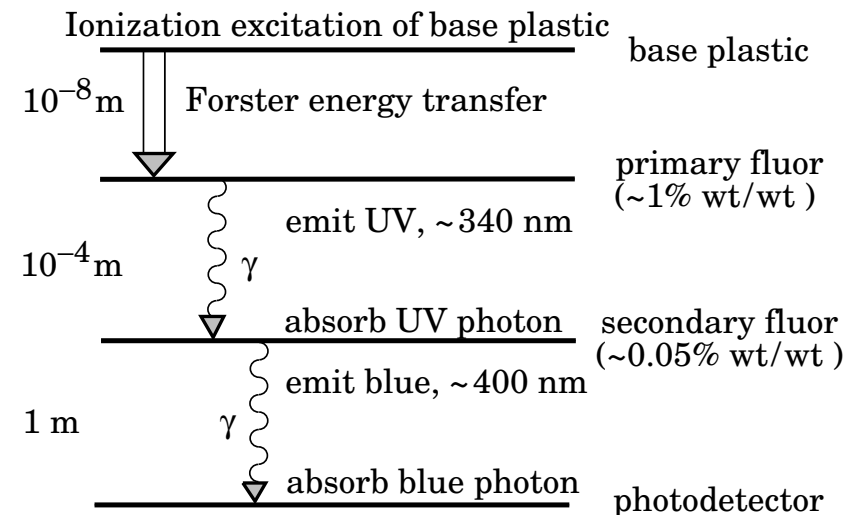
Absorpcja i reemisja fotonów przez domieszki powoduje przesunięcie długości fali do obszaru gdzie materiał jest przezroczysty.

Domieszki przyspieszają też emisję fotonów.

Nieliniowość odpowiedzi przy wysokiej jonizacji:

$$\frac{d\mathcal{L}}{dx} = \mathcal{L}_0 \frac{dE/dx}{1 + k_B dE/dx}$$

k_B - współczynnik Birks'a



Liczniki scyntylacyjne

Scyntylatory nieorganiczne

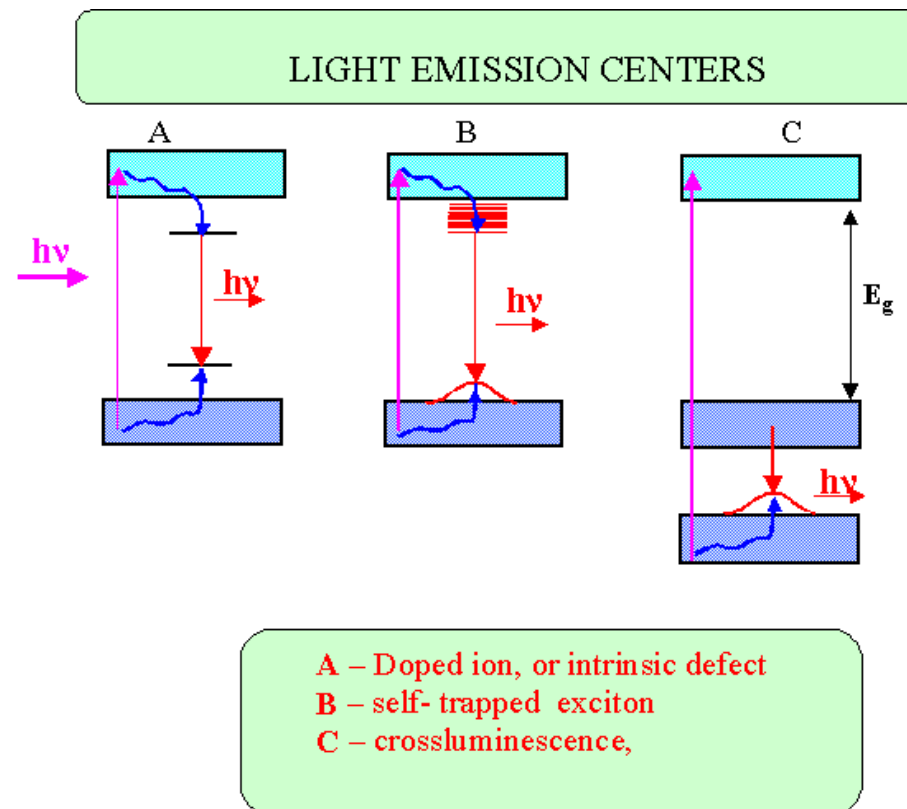
Kryształy nieorganiczne dużo gęstsze ($4-8\text{g/cm}^3$) niż scyntylatory organiczne ($\sim 1\text{g/cm}^3$)

Straty energii cząstki naładowanej powodują powstawanie par **elektron-dziura**.

Naturalne defekty lub dedykowane domieszki stanowią **“centra luminescencji”**.

Wzbudzony elektron nie wraca bezpośrednio do pasma walencyjnego, ale przechodzi przez stan metastabilny, z którego wyświecany jest foton

⇒ przesunięcie długości fali



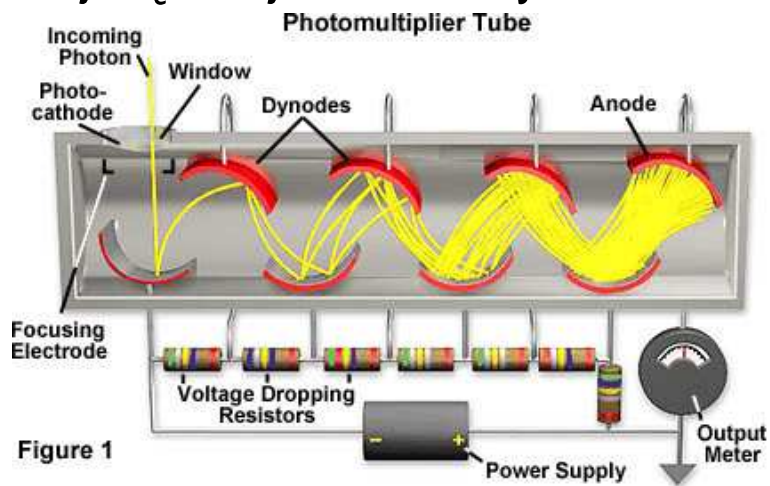
Liczniki scyntylacyjne

Detekcja fotonów

Detekcja fotonów optycznych polega na ich absorpcji w sposób prowadzący do powstania swobodnego elektronu (efekt fotoelektryczny) lub pary elektron-dziura.

Sygnał ten musi być następnie wzmacniony do mierzalnego poziomu.

Najczęściej stosowanym detektorem są fotopowielacze



Zapewniają szeroki zakres pomiarowy (115-1100 nm), wysokie wzmocnienie (10^3 - 10^7) i szybką odpowiedź (0.7-10 ns)

Liczniki scyntylacyjne

Rozwój technologii, zwłaszcza technologii półprzewodnikowych doprowadził do powstania wielu nowych detektorów fotonów.

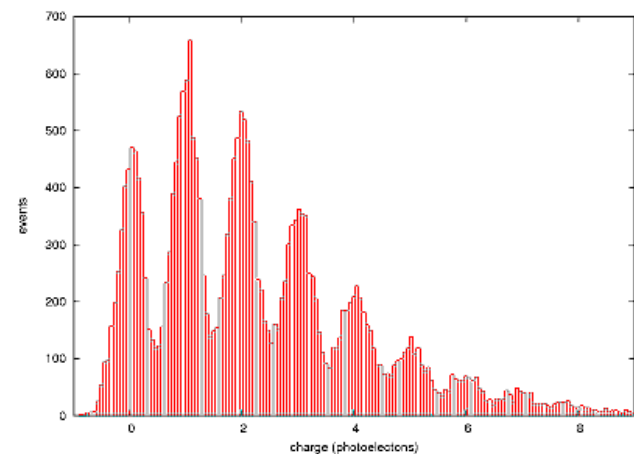
Fotodioda lawinowa (avalanche photodiode: APD) - sygnał pojedynczego fotonu jest powielany w bardzo silnie spolaryzowanym złączu (krzemowy licznik Geigera-Müllera)

Podstawowa wada: brak możliwości zliczania fotonów.

Pixlowy detektor fotonów ostatnio coraz powszechniej stosowany

Pixelized Photon Detector (PPD; kiedyś nazywany Silicon Photomultiplier SiPM)

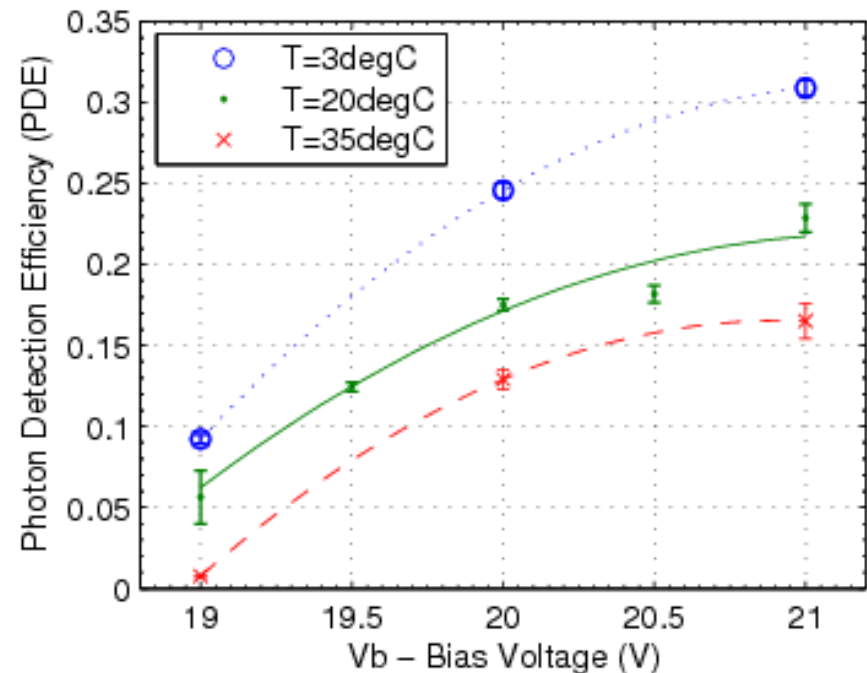
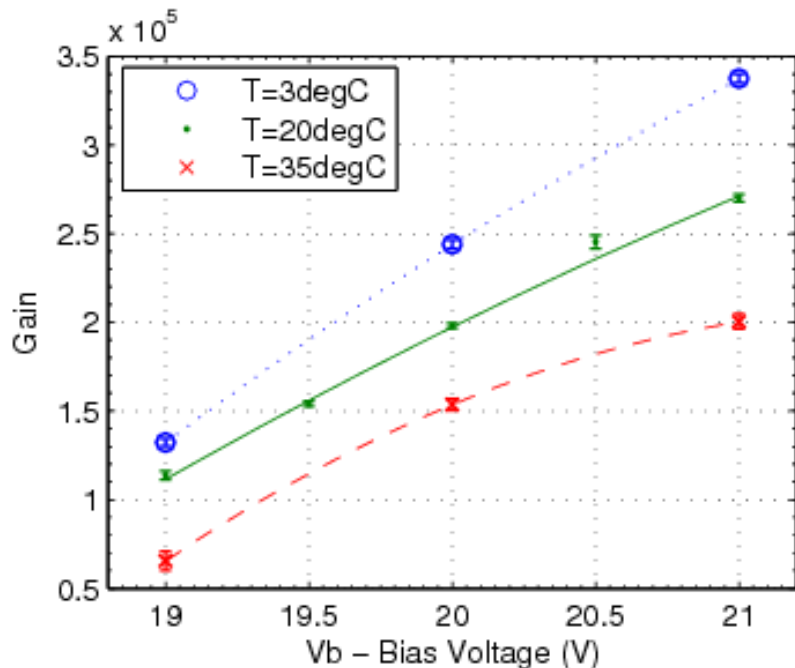
Duża ($\sim 10^3$) liczba APD na małej powierzchni ($\sim 1\text{mm}^2$) - możliwość zliczania fotonów



Liczniki scyntylicyjne

Pixlowy detektor fotonów

Wyniki pomiarów



Parametry porównywalne z PMT: wzmocnienie 10^5 - 10^6 , czas odpowiedzi ~ 1 ns.

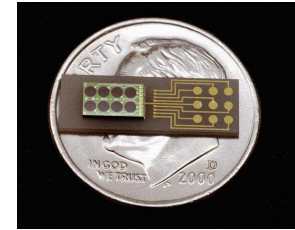
Ograniczony zakres czułości optycznej (400-550 nm), ale brak problemów z zasilaniem ($U=30$ - 60 V) i dużo mniejsze rozmiary!

Liczniki scyntylacyjne

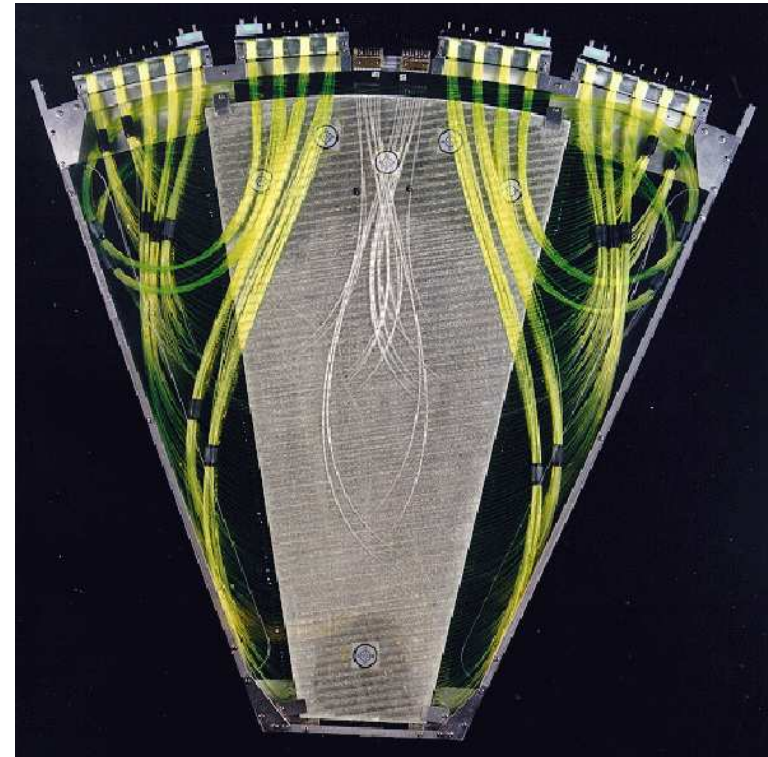
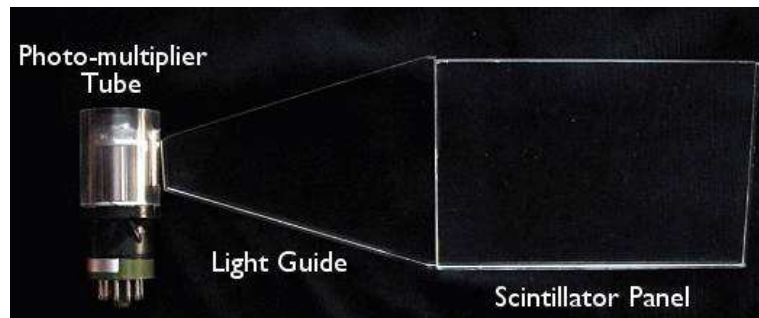
Perspektywy

Światłowody scyntylujące oraz rozwój detektorów krzemowych doprowadziły do “renesansu” detektorów scyntylacyjnych

Dziś (eksperyment D0):



Kiedyś:



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

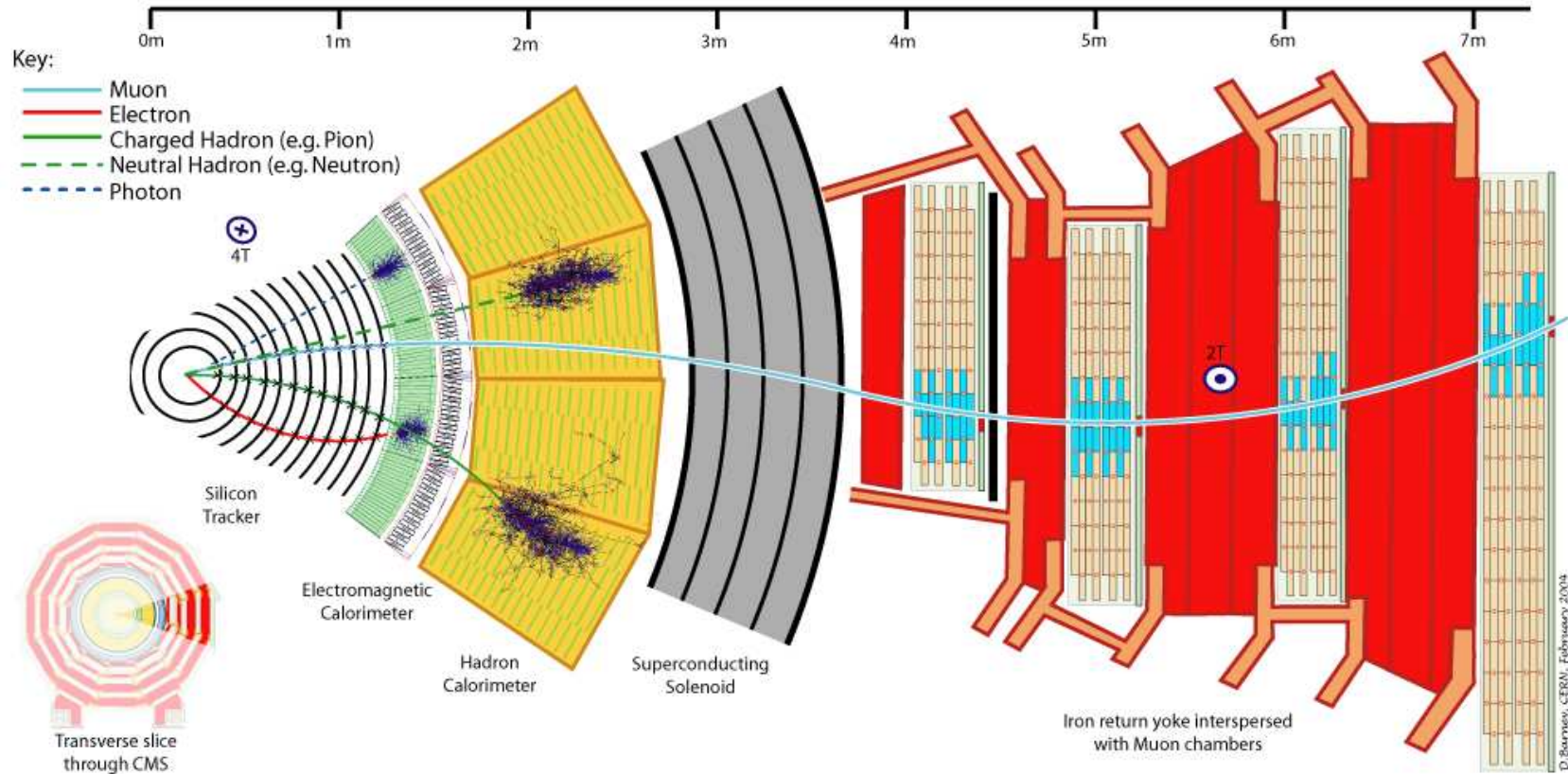
Kalorymetry: urządzenia w których wpadające cząstki lub strugi cząstek są całkowicie absorbowane, a część deponowanej energii zamieniana jest na mierzalny sygnał

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).



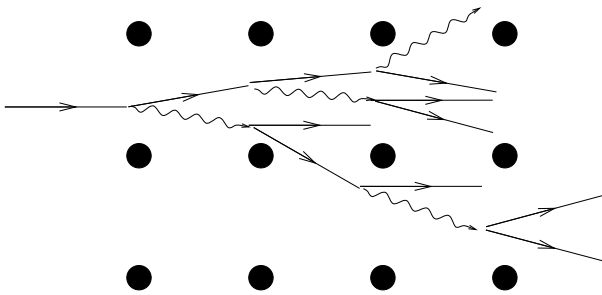
Kalorymetry

Kaskada elektromagnetyczna

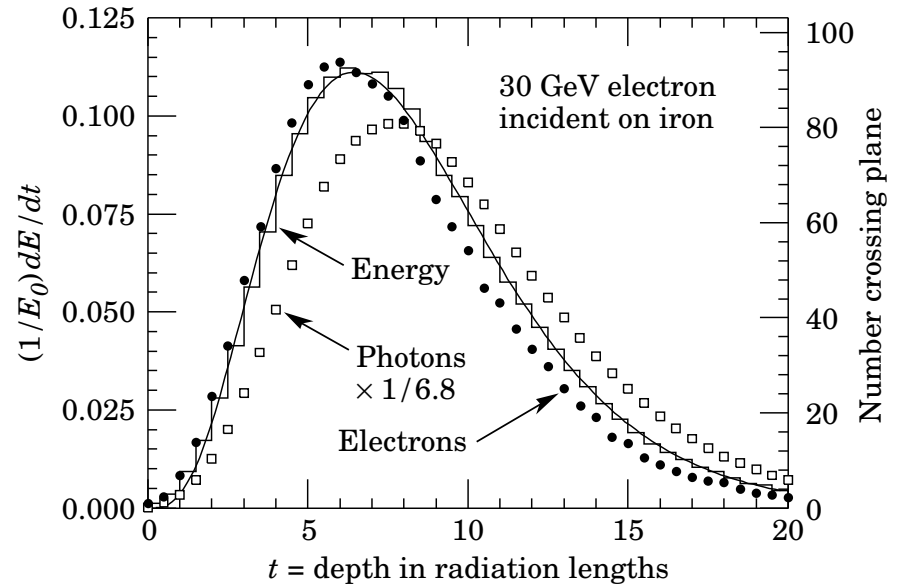
Wysokoenergetyczny foton wpadając w materię konwertuje na parę e^+e^-

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

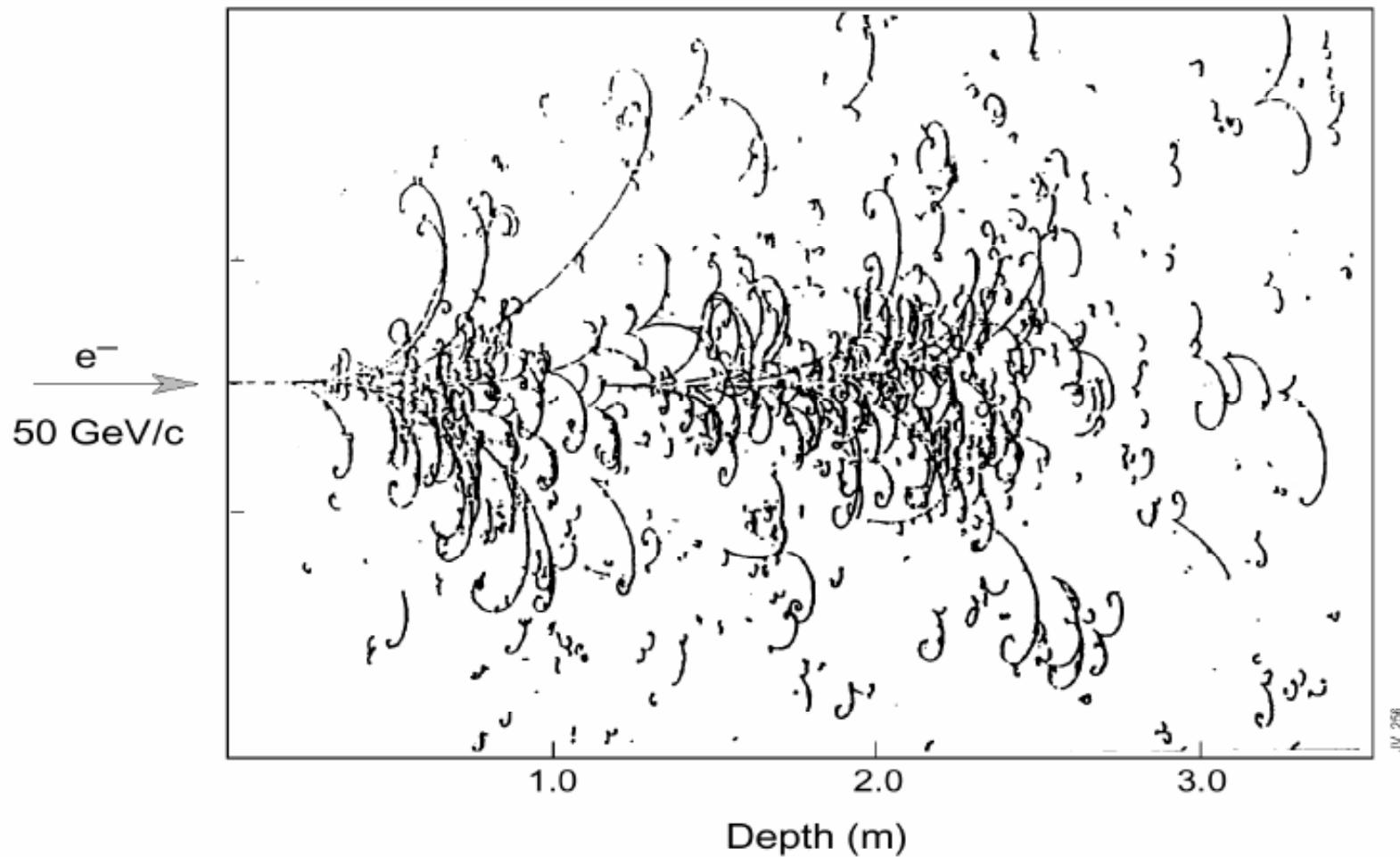
Rozmiary poprzeczne skalują się z tzw. "promieniem Molier":

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

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

Kalorymetry

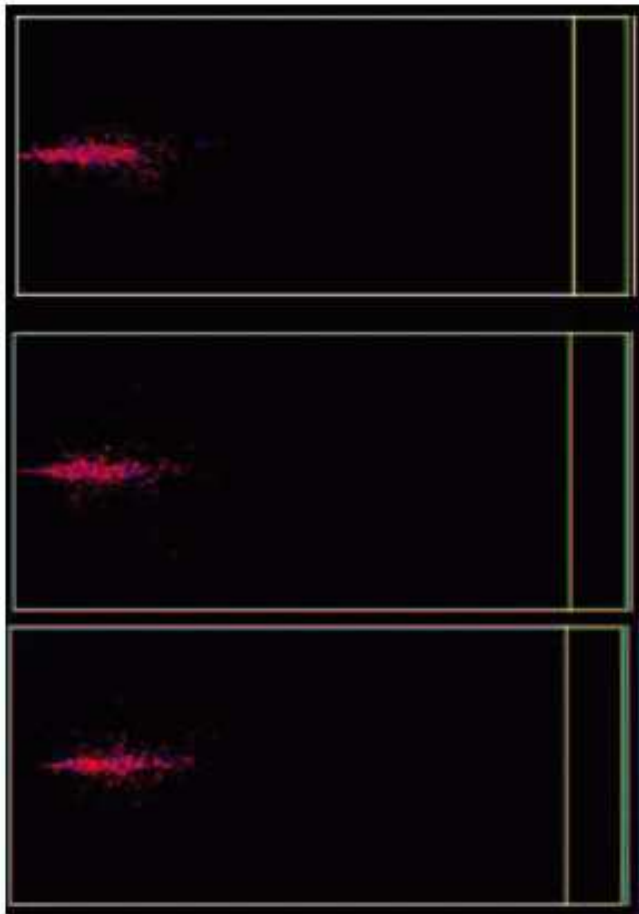
Kaskada elektromagnetyczna w komorze pęcherzykowej BEBC



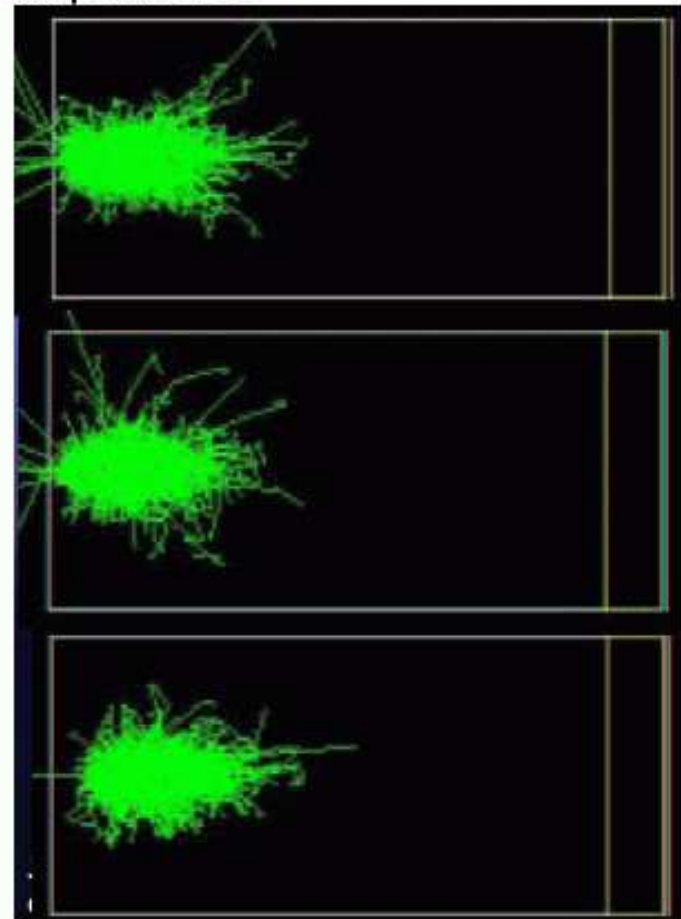
Kalorymetry

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:

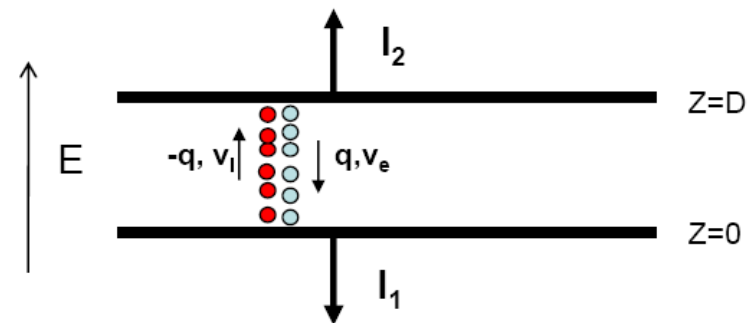
prawie połowa strat energii prowadzi do scyntylacji, druga połowa - jonizacja.

	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 ³)	1.4	2.5	3.0
Ionization energy (eV/pair)	23.3	20.5	15.6
Critical energy ϵ (MeV)	41.7	21.5	14.5
Drift velocity at saturation (mm/ μ s)	10	5	3

Kr: gęsty \Rightarrow niewielkie rozmiary detektora

Ar: tani \Rightarrow duże układy detekcyjne
także kalorymetry próbkujące

Naogół wykorzystuje się pomiar jonizacji

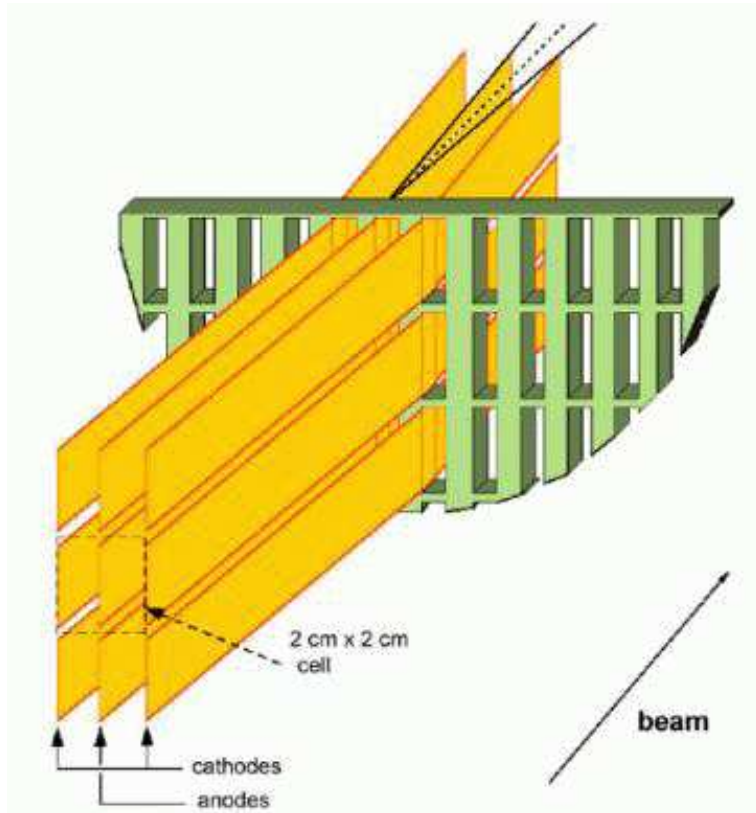


Pomiar zarówno jonizacji jak i światła
 \Rightarrow najdokładniejszy pomiar energii,
ale trudny do uzyskania

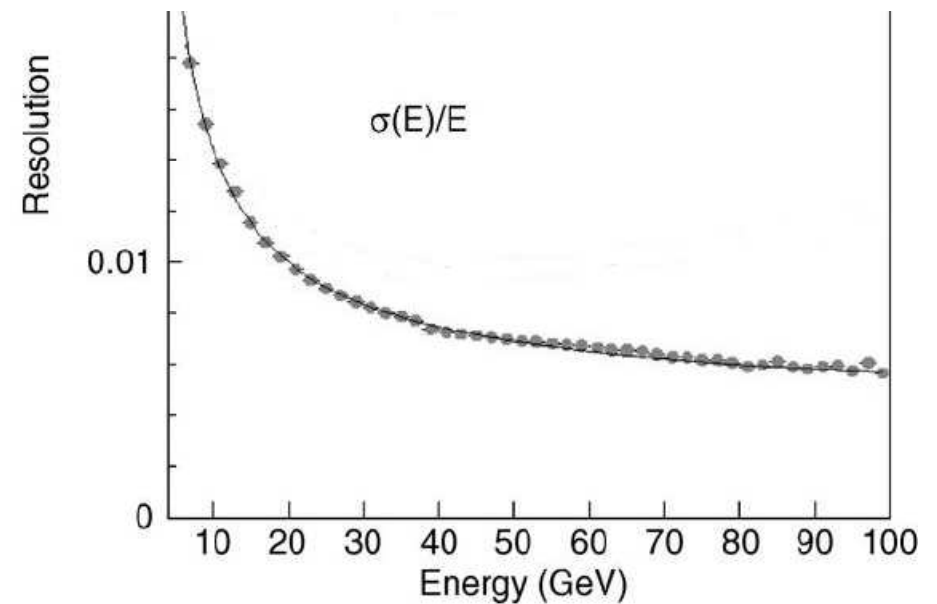
Kalorymetry

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 ₄
Density (g/cm ³)	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 γ /MeV	4×10^4	5×10^4	4×10^4	8×10^3	1.5×10^2
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.

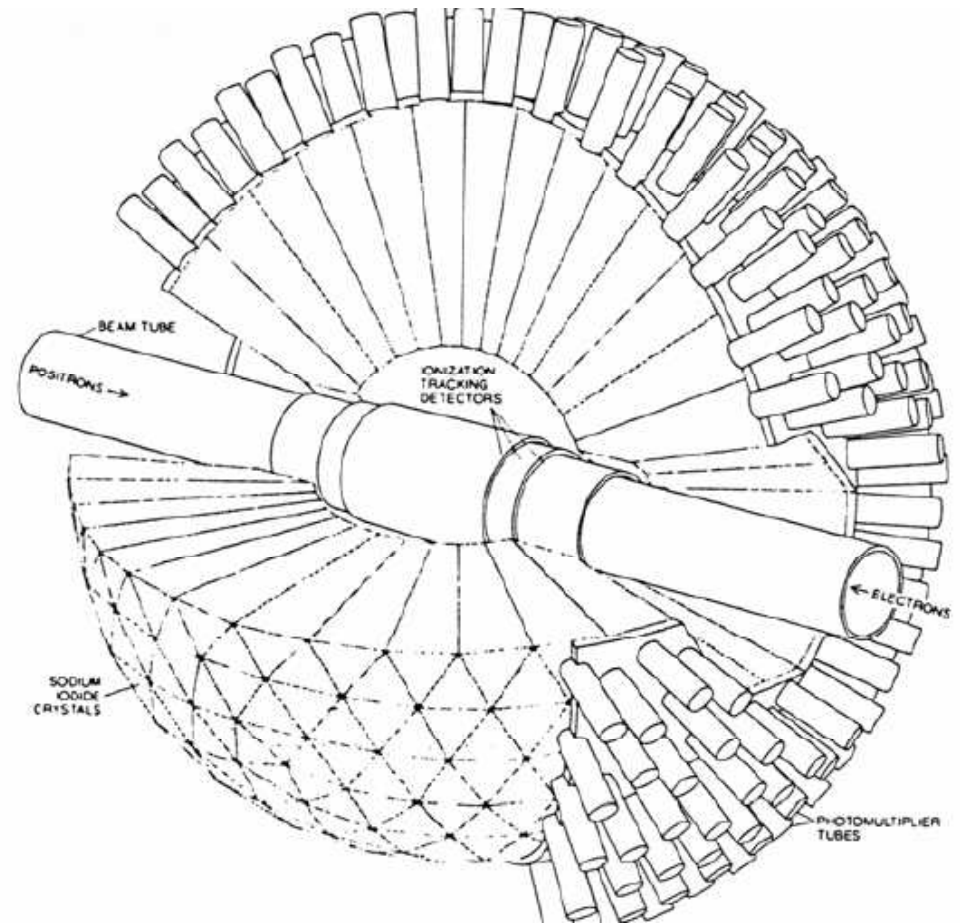
Detektor Cristal Ball (SLAC) ⇒

Odkrycie mezonu J/ψ (1974)

672 + 60 kryształów NaI(Tl)

pomiar energii fotonów 0.1-1 GeV

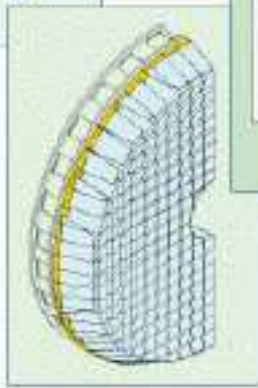
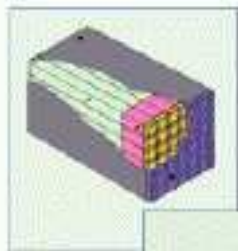
$$\frac{\sigma}{E} = 3.5 - 2.6\%$$



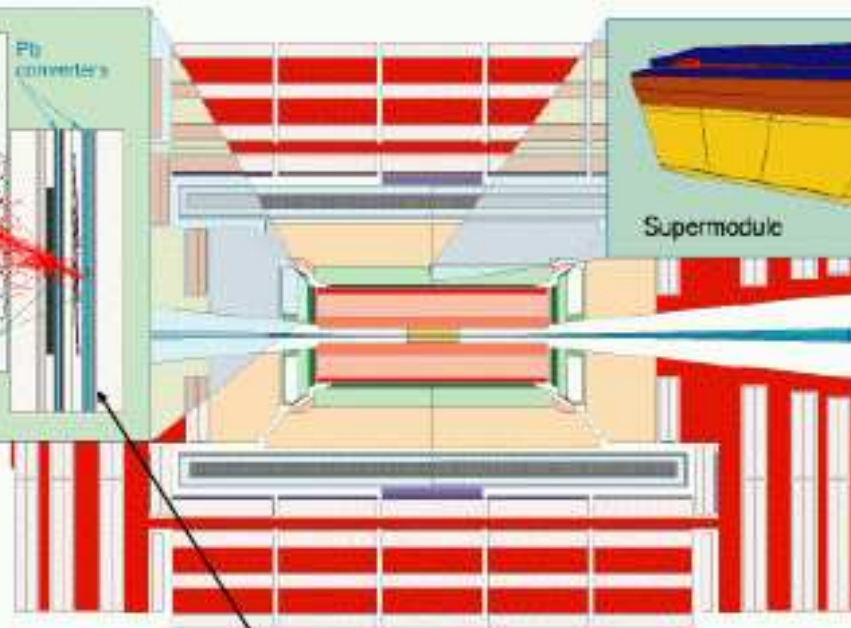
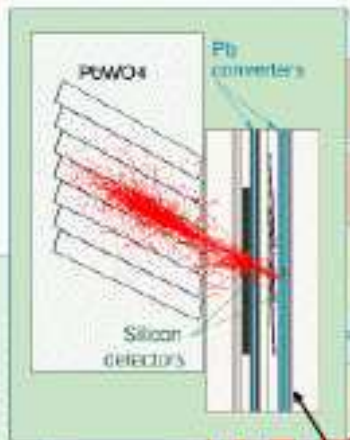
Kalorymetry

Kalorymetr EM detektora CMS

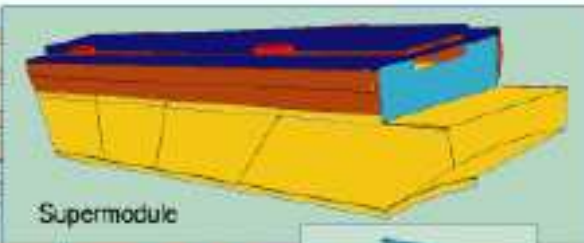
5x5 "supercrystal"



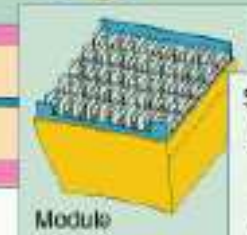
Endcap, readout with VPT



Preshower



Supermodule



Module



Sub module cooling in

Barrel, readout with APD

Kalorymetry

Kalorymetr EM detektora CMS

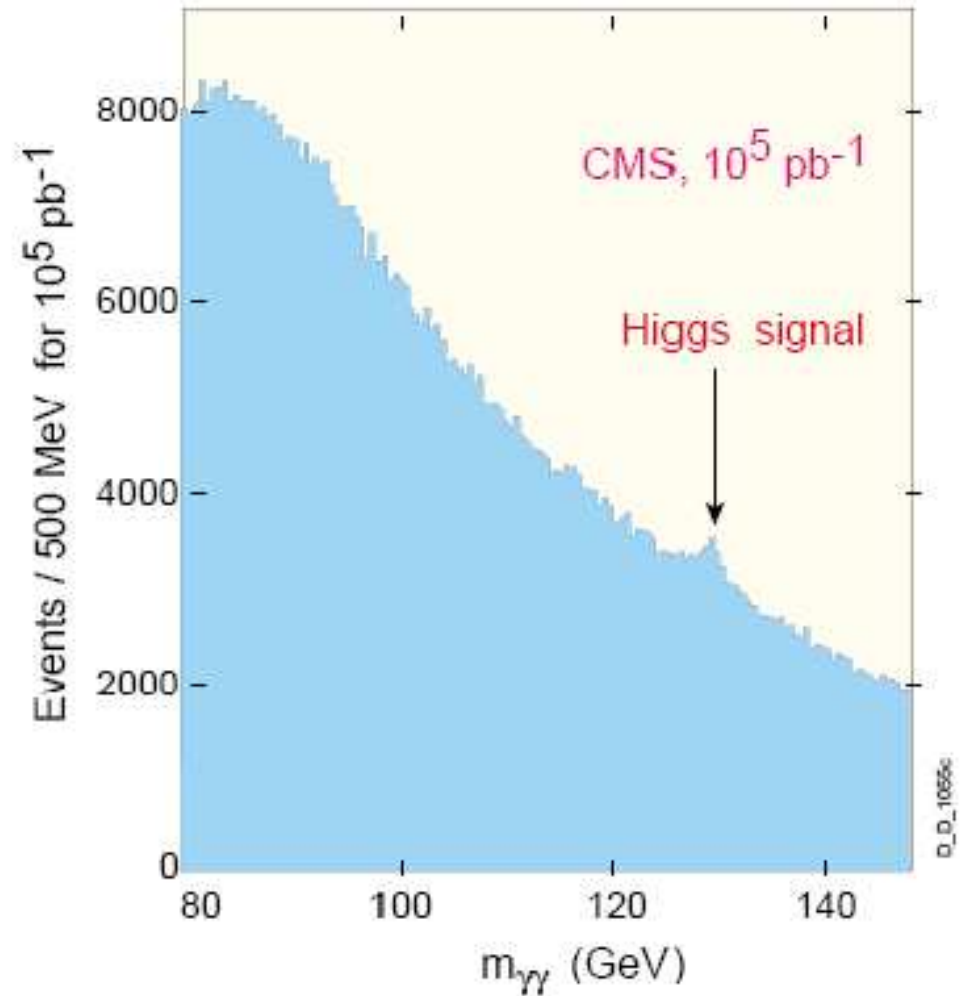
Łącznie 76 000 kryształów

Kryształ sekcji “do przodu”



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

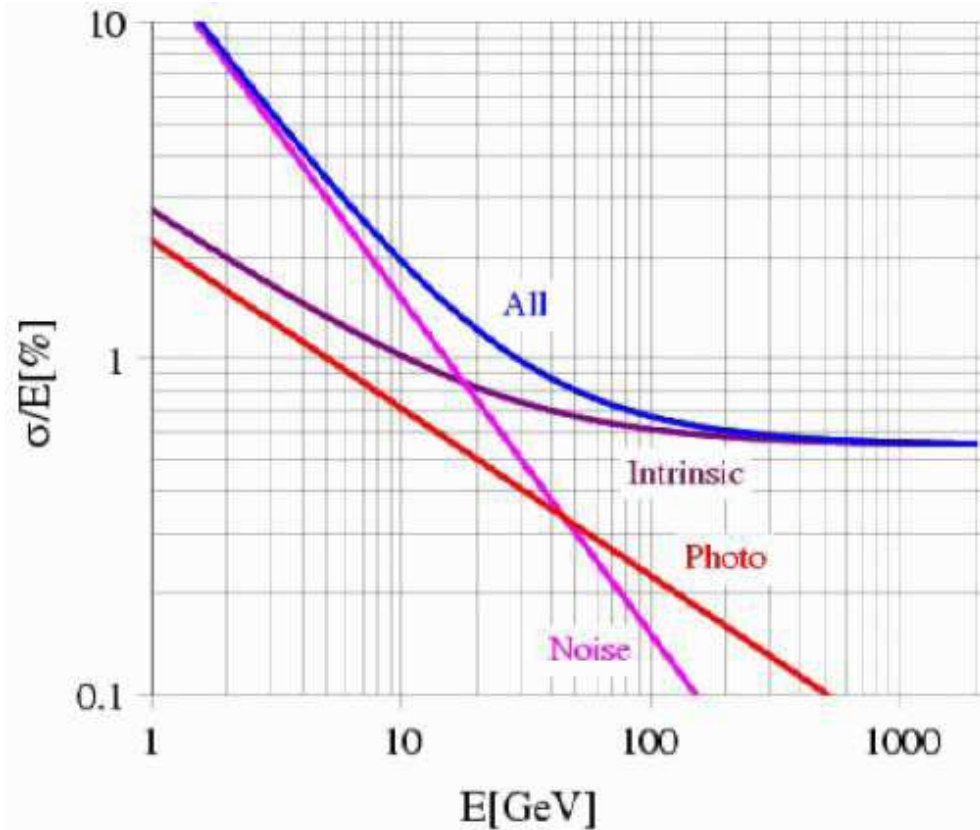
Główny kanał dla $m_h \sim 120\text{GeV}$



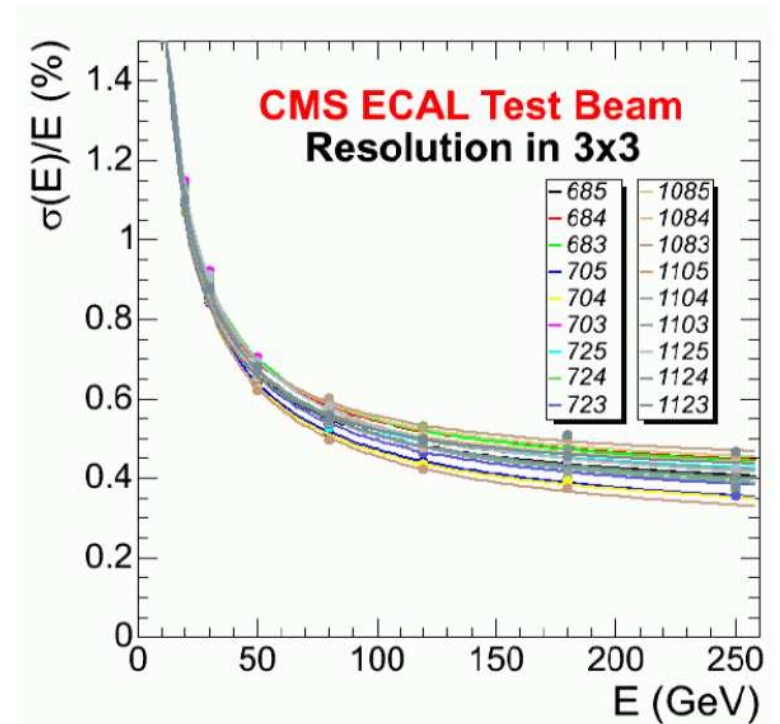
Kalorymetry

Kalorymetr EM detektora CMS

Rozdzielczość zakładana



Uzyskana w testach



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

Kalorymetry

Kalorymetry jednorodne

Zdolności rozdzielcze typowych kalorymetrów jednorodnych w eksperymentach HEP

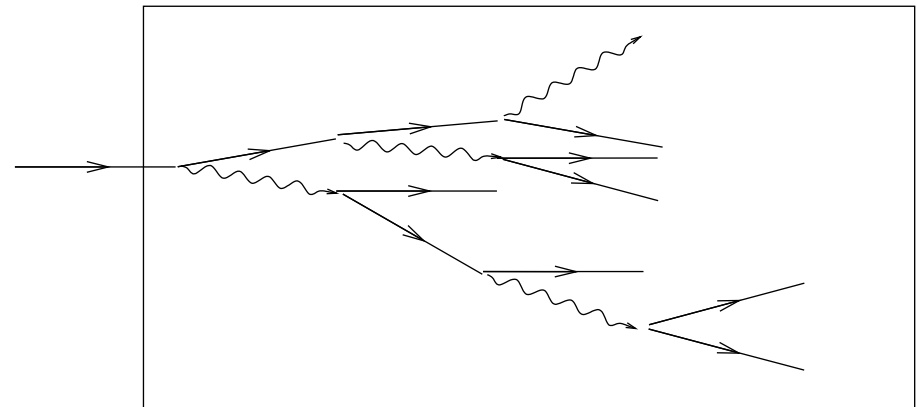
Technology (Exp.)	Depth	Energy resolution	Date
NaI(Tl) (Crystal Ball)	$20X_0$	$2.7\%/E^{1/4}$	1983
Bi ₄ Ge ₃ O ₁₂ (BGO) (L3)	$22X_0$	$2\%/\sqrt{E} \oplus 0.7\%$	1993
CsI (KTeV)	$27X_0$	$2\%/\sqrt{E} \oplus 0.45\%$	1996
CsI(Tl) (BaBar)	$16\text{--}18X_0$	$2.3\%/E^{1/4} \oplus 1.4\%$	1999
CsI(Tl) (BELLE)	$16X_0$	1.7% for $E_\gamma > 3.5$ GeV	1998
PbWO ₄ (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 poziomy sygnał
łatwy odczyt, niskie szумы



Wady:

- duże
- drogie
- pomiar tylko kaskad
elektro-magnetycznych

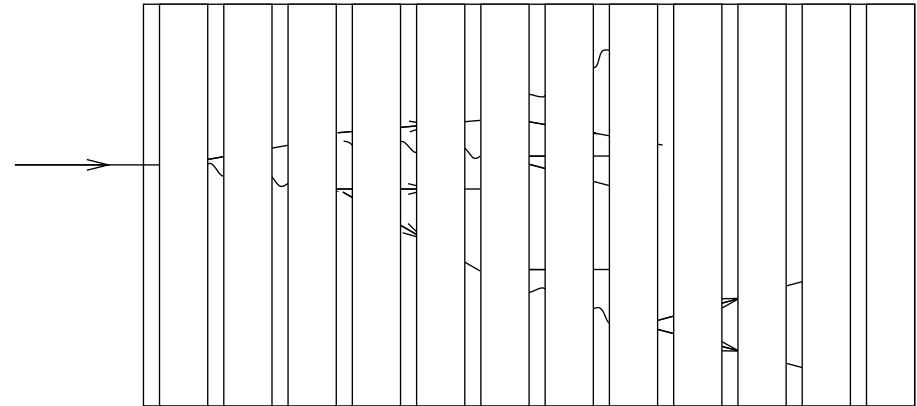
⇒ częściej wykorzystywanym w eksperymentach HEP rozwiązaniem są kalorymetry próbkujące

Kalorymetry

Kalorymetry próbkujące

Kaskada rozwija się w gęstym absorberze.

Rzwoj kaskady jest “próbkowany” w cienkich warstwach aktywnych.



Zalety:

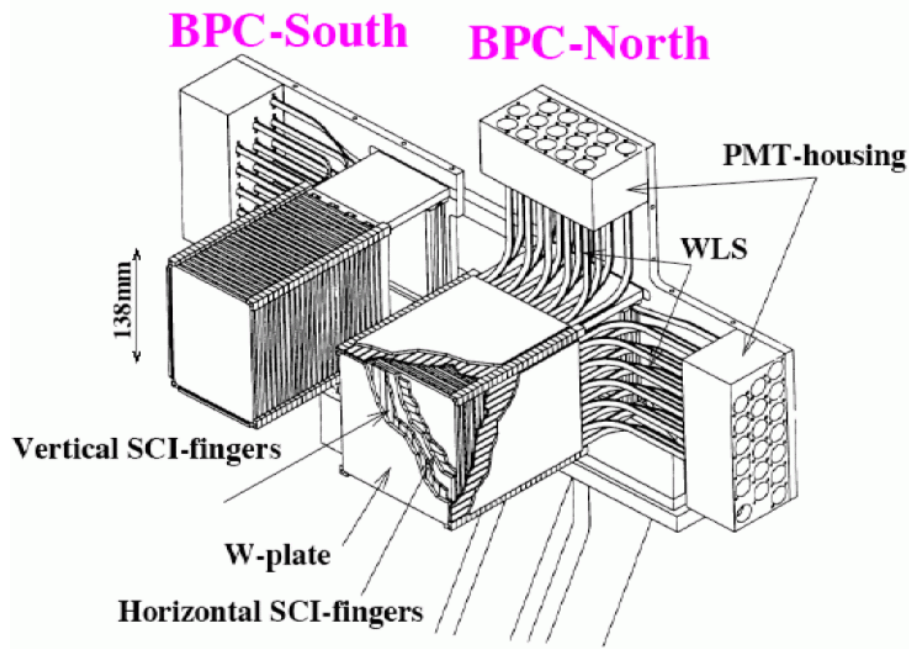
- mniejsze, można użyć bardzo gęstego absorbera
- tańsze, absorber zwykle tańszy od elementów odczytowych
- większe możliwości optymalizacji, zwłaszcza dla kaskad hadronowych

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.

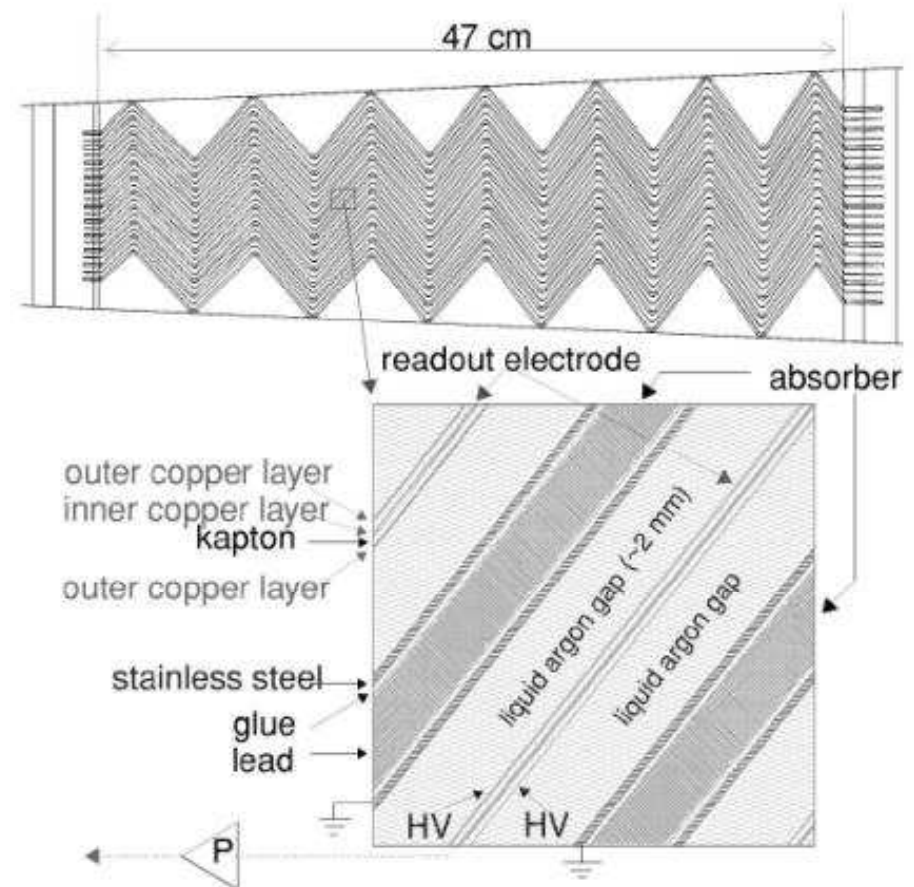
Warstwy ołowiu: 1.1 – 2.2mm (zależnie od kierunku)

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

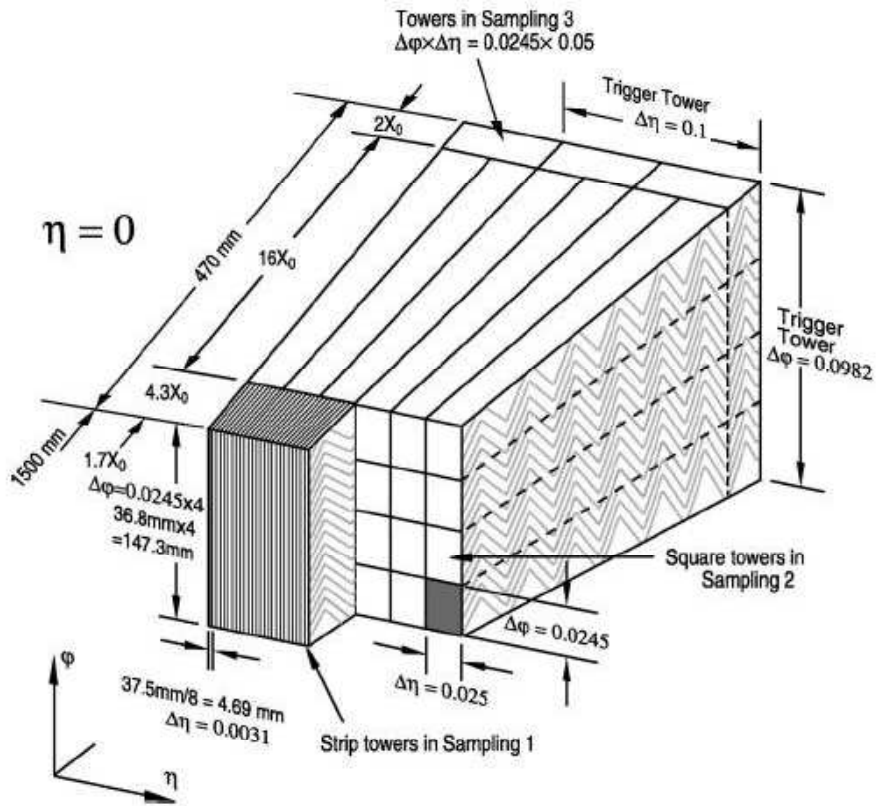
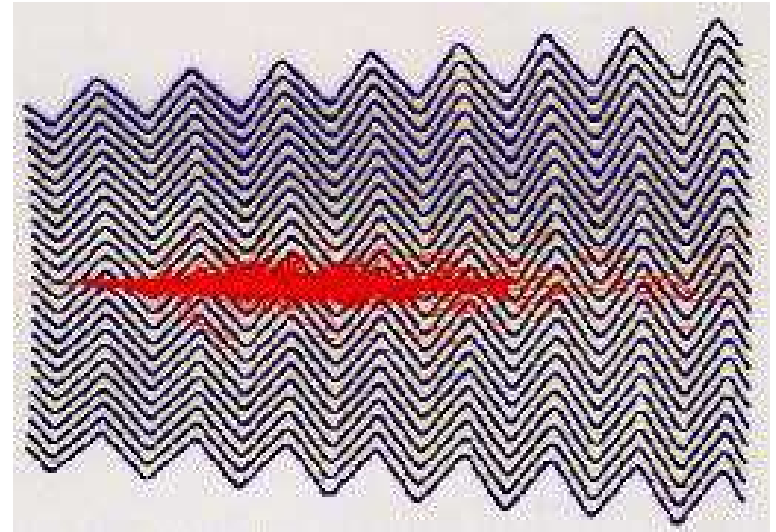


FIG. 17. Schematic view of the segmentation of the ATLAS electromagnetic calorimeter.



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 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

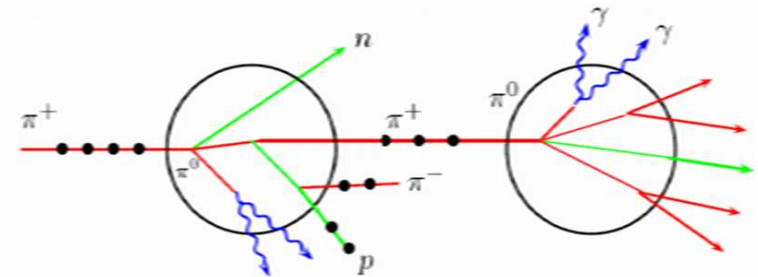
Tak jak w przypadku kaskad elektromagnetycznych, energia cząstki pierwotnej tracona jest w wielu kolejnych (silnych) oddziaływaniach z absorberem.

Zachodzące procesy są jednak dużo bardziej złożone.

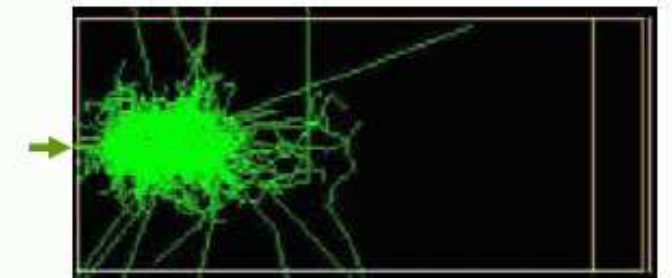
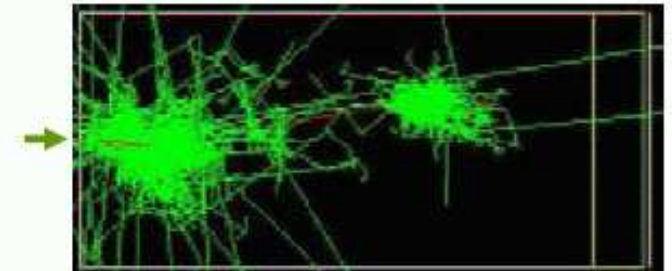
Oprócz produkcji wysokoenergetycznych cząstek wtórnych energia tracona jest na procesy jądrowe: wzbudzenia, rozszczepienia i energie odrzutu jąder.

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 π in copper (simulation)



J.P. Wellisch

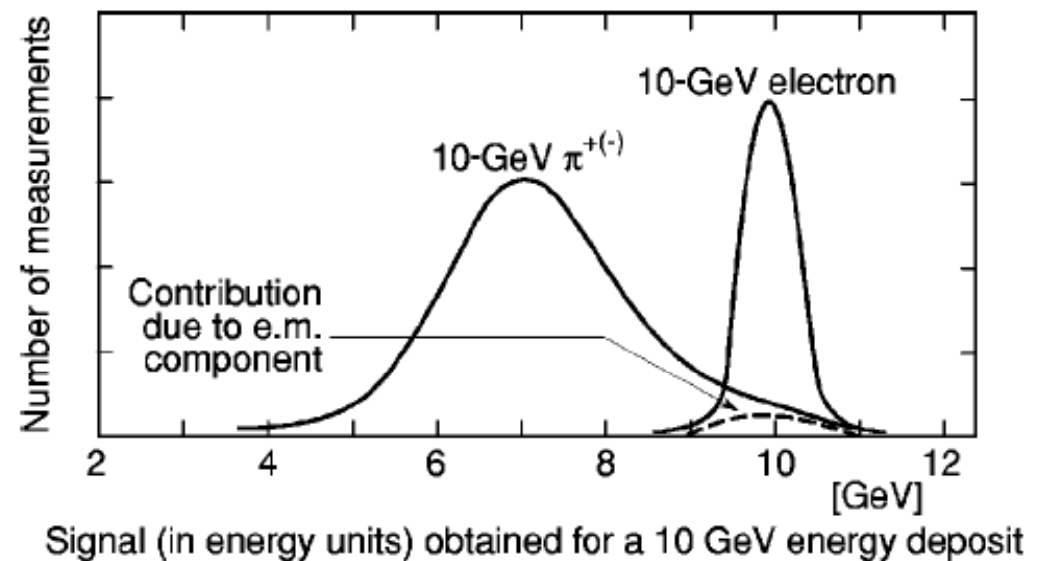
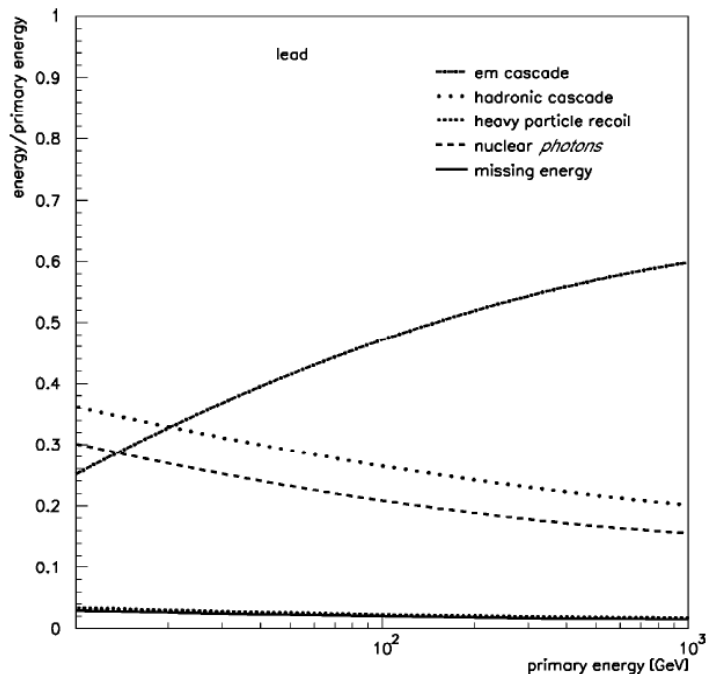
Kalorymetry

Kaskady hadronowe

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

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

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



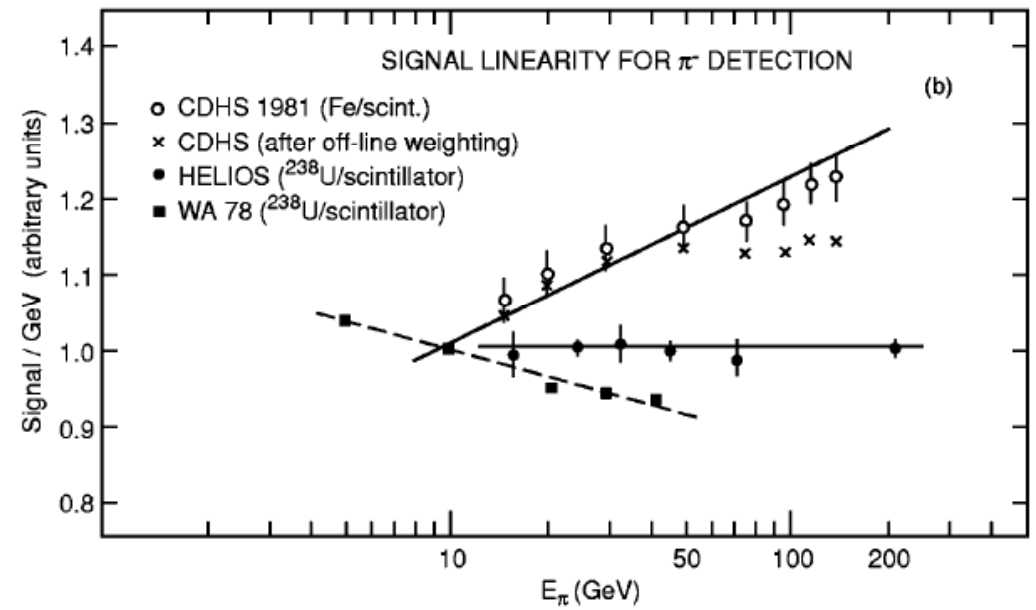
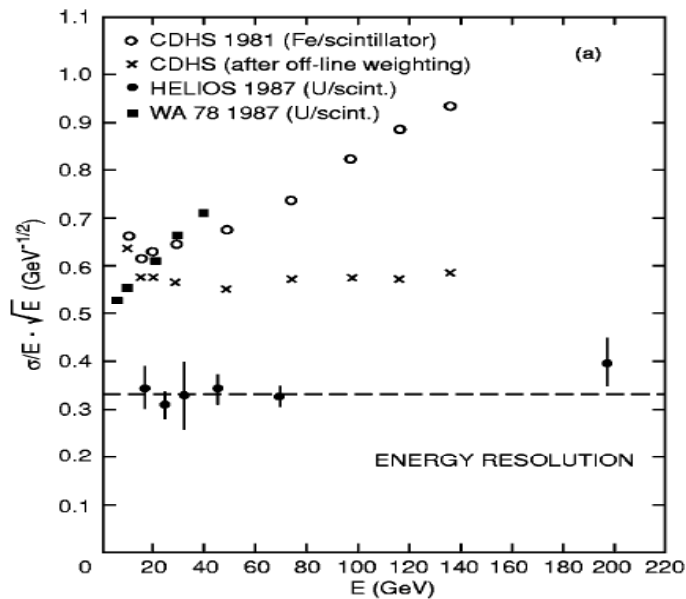
Kalorymetry

Kompensacja

Pomiar energii kaskad hadronowych można istotnie polepszyć jeśli zrównamy odpowiedź kalorymetru dla składowej hadronowej i elektromagnetycznej \Rightarrow kompensacja

Kalorymetr ma wtedy taką samą odpowiedź dla elektronów i hadronów: $e/h = 1$

Kompensację można uzyskać poprzez odpowiednią konstrukcję detektora (dobór materiału i grubości warstw)



Kalorymetry

Kompensacja

Aby uzyskać kompensację należy:

- tłumić odpowiedź detektora dla składowej E-M
- odzyskać przynajmniej część energii traconej w procesach jądrowych

Kompensujące kalorymetry próbkujące zbudowano z powodzeniem stosując uran lub ołów jako absorbery + scyntylatory organiczne jako materiał aktywny

Ciężki (duże Z) absorber i lekki (małe Z) materiał aktywny

⇒ składowa hadronowa jest efektywniej próbkowana niż składowa EM

$$U : \lambda_{int} \approx 33X_0 \qquad Sci : \lambda_{int} \approx 1.9X_0$$

$$\frac{(\Delta\lambda_{int})_{Sci}}{(\Delta\lambda_{int})_U} \approx 18 \frac{(\Delta X_0)_{Sci}}{(\Delta X_0)_U}$$

W scyntylatorze organicznym można “odzyskać” część energii licznie produkowanych w procesach jądrowych neutronów dzięki ich elastycznym rozproszeniom na protonach.

Kalorymetry

Kalorymetr detektora ZEUS

Płyty uranowe 3.3 mm
w kopertach ze stali nierdzewnej.

Płyty scyntylatora 2.6 mm

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

Podział podłużny na sekcję elektromagnetyczną
i dwie sekcje hadronowe

$$\frac{\sigma}{E} \approx \frac{18\%}{\sqrt{E}} \quad \text{dla elektronów}$$

$$\frac{\sigma}{E} \approx \frac{35\%}{\sqrt{E}} \quad \text{dla hadronów}$$

w warunkach testowych

