

Detektory

- oddziaływanie cząstek i promieniowania z materią
- Identyfikacja cząstek (dE / dx)
- Detektory śladowe :
 - wielodrutowe komory proporcjonalne
 - komory dryfowe
 - śladowe detektory krzemowe
- Kalorymetry :
 - rozwój kaskady
 - kalorymetr elektromagnetyczny
 - kalorymetr hadronowy
 - budowa kalorymetru

Lidia.Goerlich@ifj.edu.pl

Instytut Fizyki Jądrowej PAN

Detektory fizyki cząstek służą do rejestracji:

- **położenia cząstki** (detektory śladowe cząstek naładowanych)
 - **tor / trajektoria cząstki**
 - **ładunek i pęd,**
jeżeli detektor jest umieszczony w polu magnetycznym
- **czasu pojawienia się cząstki**
- **energii cząstki**
- **pozwalają na identyfikację cząstek**
np. poprzez jednoczesny pomiar prędkości i pędu
(definiujący masę spoczynkową cząstki);
na podstawie ich oddziaływań silnych, elektromagnetycznych
lub słabych z materią

**Metody detekcji cząstek opierają się
na fizyce oddziaływania cząstek z materią**

**Postęp w badaniach fizyki cząstek elementarnych jest ściśle powiązany
z rozwojem technik przyspieszania oraz detekcji cząstek, jak również
stowarzyszonej z nimi elektroniki.**

Detekcja cząstek jest możliwa dzięki ich oddziaływaniu z materią, efekt takiego oddziaływania musi być w jakiś sposób obserwowany / zmierzony.

Bardzo ważną rolę w procesach oddziaływania cząstek z materią odgrywają oddziaływania elektromagnetyczne :

- **jonizacja ośrodka przez cząstki naładowane** (tory cząstek w detektorach śladowych)

ciężkie cząstki o masie $m > m_{\text{elektron}}$
elektrony i pozytony

- **promieniowanie hamowania** (bremsstrahlung)

elektrony i pozytony

- **oddziaływanie fotonów z materią** (kalorymetry elektromagnetyczne) :

- efekt fotoelektryczny
- rozpraszanie Comptona
- kreacja par e^+e^-

- **inne ważne procesy elektromagnetyczne :**

- zjawisko luminescencji (scyntytacji)
- rozpraszanie wielokrotne (rozpraszanie kulombowskie)
- promieniowanie Czerenkowa

Cząstka naładowana przechodząc przez ośrodek przekazuje mu energię w procesach :

- jonizacji - wybijanie elektronów od atomów ośrodka
- wzbudzenia atomów/cząsteczek ośrodka → rejestracja światła scyntylacji, promieniowania Czerenkowa , sygnałów od par elektron-dziura w licznikach półprzewodnikowych.

Jonizacyjne straty energii cząstek naładowanych

$$-\frac{dE}{dx} = \left(0.307 \frac{MeV}{\frac{g}{cm^2}} \right) z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\ln \frac{2m_e \beta^2 \gamma^2}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right]$$

Wzór Bethego-Blocha – średnia strata energii cząstki na jednostkę przebytej drogi

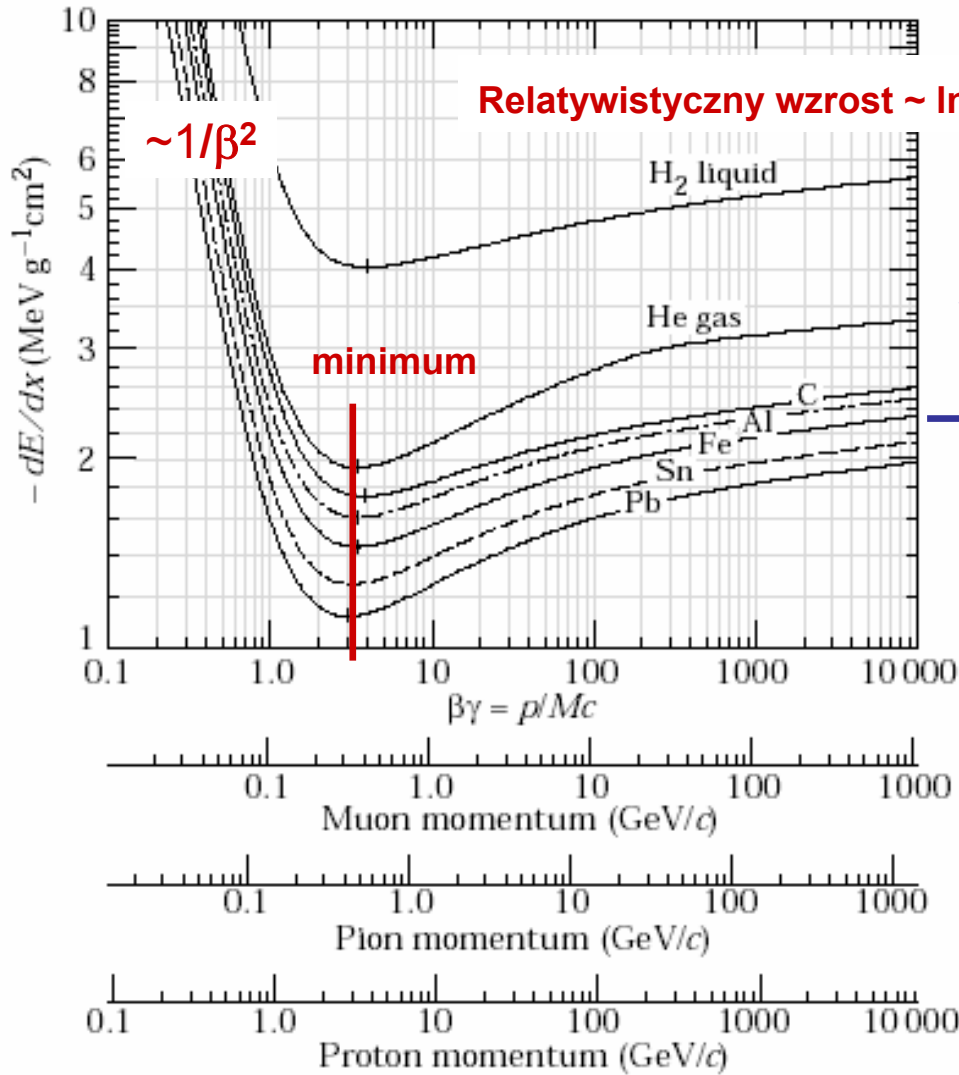
Z, A – liczba atomowa i masowa atomów ośrodka;

I – potencjał jonizacji (dla większości materiałów ~ (10eV) · Z;

δ – poprawka związana z polaryzacją ośrodka, opisująca jak pole elektryczne cząstki jest ekranowane przez rozkład gęstości ładunku elektronu w ośrodku;

z – ładunek cząstki, $\beta = v / c$ – jej prędkość

Jonizacyjne straty energii w różnych ośrodkach



$$\beta = p / E$$

Dla ciężkich cząstek ($m \gg m_e$)
straty jonizacyjne zależą prędkości β

$$-\frac{dE}{dx} \propto \frac{1}{\beta^2} \left[\ln(\beta\gamma) - 2\beta^2 + K_1 \right]$$

↑
stała

Człon $1/\beta^2$ – dominuje dla małych p
straty energii maleją szybko z rosnącą
prędkością

Człon $\ln(\beta\gamma)$ – dominuje przy dużych pędach
"relatywistyczny wzrost"



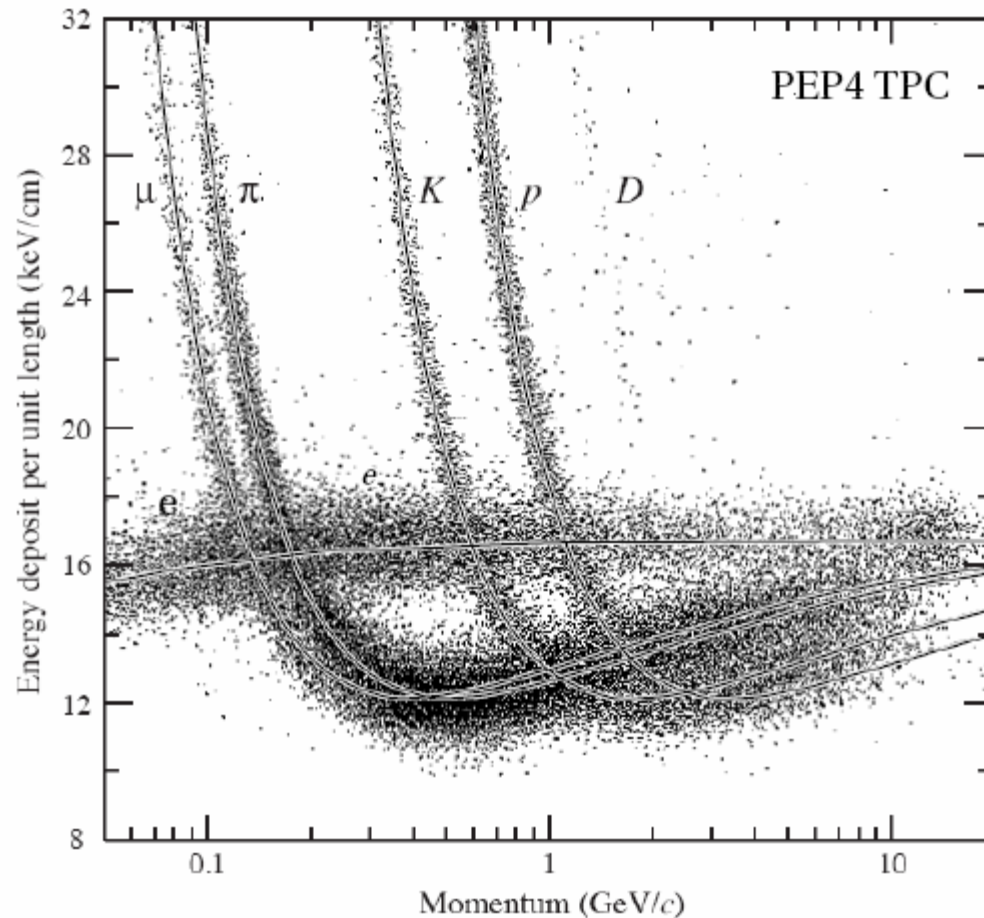
poprzeczne pole elektryczne cząstki $\sim \gamma$

Minimum jonizacji dla $\beta\gamma = p/m \sim 3.5$
dla wszystkich cząstek

Położenie minimum jonizacji mało zależy
od rodzaju ośrodka.

$(dE/dx)_{\min} \sim 1-2 \text{ MeV g}^{-1} \text{ cm}^2$ (oprócz H_2)

Identyfikacja cząstek poprzez dE/dx

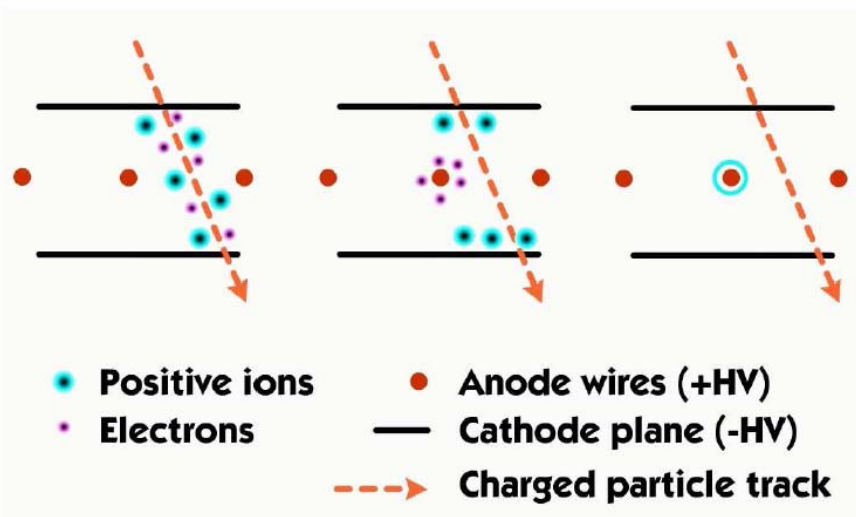


- Jonizacyjne straty energii dE/dx zależą tylko od β , są niezależne od masy cząstki
- cząstki o danym pędzie i różnych masach mają różne dE/dx
- **pomiar pędu cząstki**
(z zakrzywienia jej toru w polu magnetycznym)
+ **pomiar dE/dx** (prędkość cząstki)
definiuje masę cząstki
- **metoda identyfikacji cząstek**
efektywna dla niezbyt dużych pędów

Rozkłady dE/dx dla mionów (μ), pionów (π), kaonów (K), protonów (p) i deuteru (D) uzyskane w komorze projekcji czasowej (Time Projection Chamber, TPC)

$$\beta = p / E$$

wielodrutowe komory proporcjonalne



Typowe parametry

- druty anodowe: średnica = $20\ \mu\text{m}$ rozmieszczone co 2 mm
- płaszczyzny katodowe odległe o $\sim 12\ \text{mm}$
- różnica potencjałów $\sim 5\ \text{kV}$,
- gaz : mieszanina argonu i izobutanu
- przestrzenna zdolność rozdzielcza : $\sim 1\ \text{mm}$
- paskowe katody $\sim 0.050\ \text{mm}$

Detektor składa się z dwóch płaszczyzn katodowych między którymi rozmieszczonych jest wiele drutów anodowych. Elektrody znajdują się w ośrodku gazowym.

- naładowana cząstka przechodząc przez licznik gazowy powoduje **jonizację** ośrodka $\rightarrow$ jony dodatnie i e^- poruszają się w polu elektrycznym w kierunku odpowiednich elektrod
- **jony dodatnie dryfują w kierunku katody**
- **uwolnione elektrony podążają do anody**
- przy odpowiednio dużej różnicy potencjałów energia uzyskana w polu elektrycznym przez pierwotne elektrony prowadzi do wtórnych jonizacji i kaskadowego powielania ładunku rejestrowanego przez anodę
wzmocnienie gazowe $\sim 10^3 - 10^6$

Położenie cząstki wyznacza się z pozycji drutów, do których dotarła kaskada wtórnej jonizacji

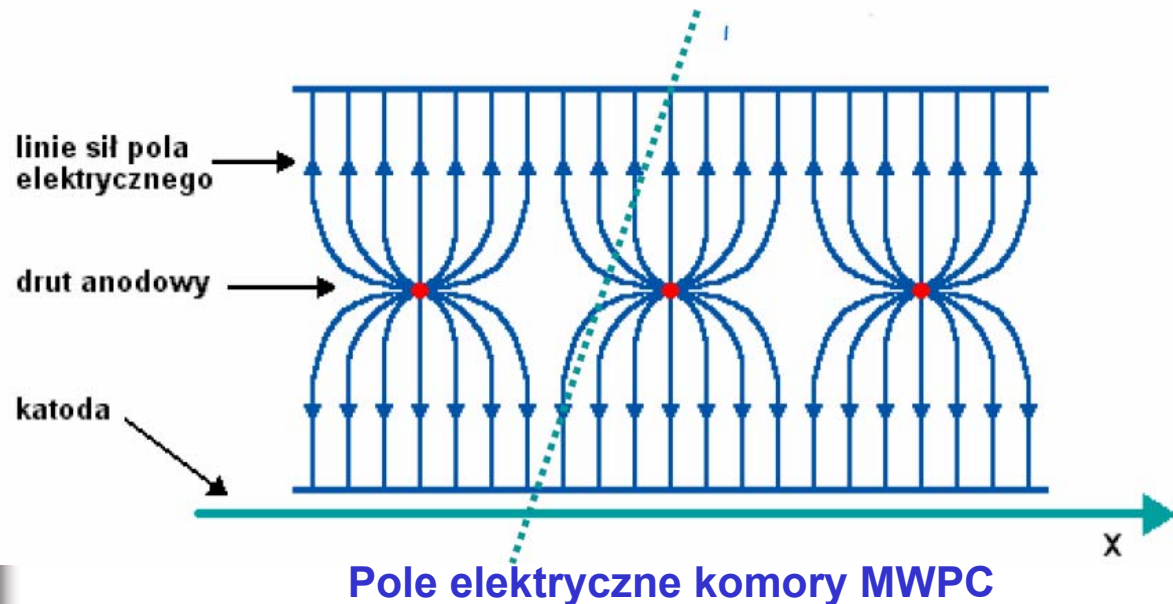
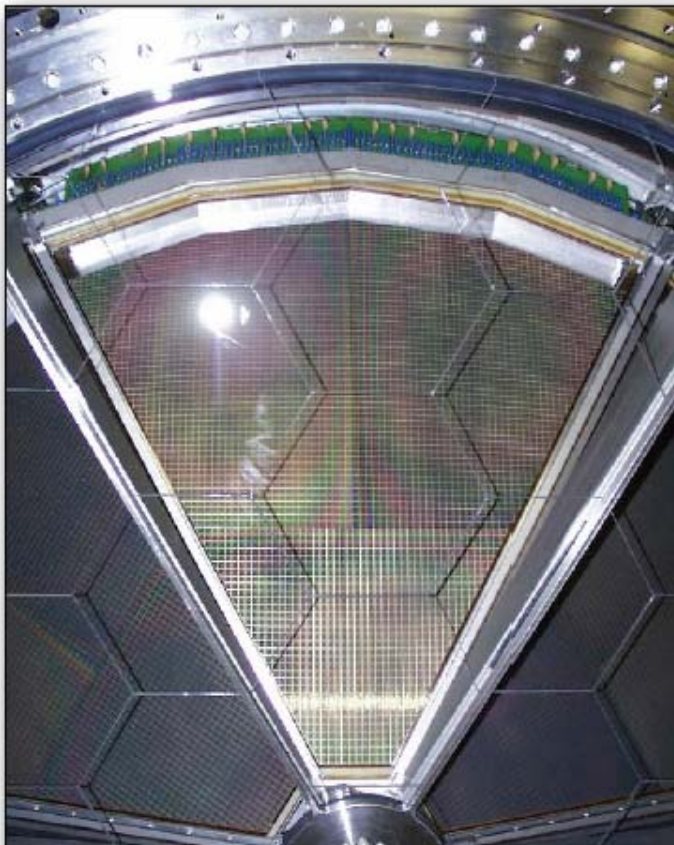
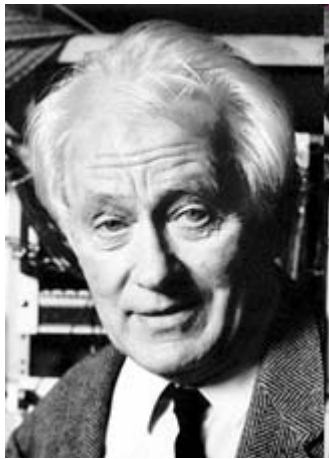
wielodrutowe komory proporcjonalne

Georges Charpak

1968 – konstrukcja wielodrutowej komory proporcjonalnej

1992 – Nagroda Nobla

” for his invention and development of particle detectors,
in particular the multiwire propotional chamber (MWPC) ”



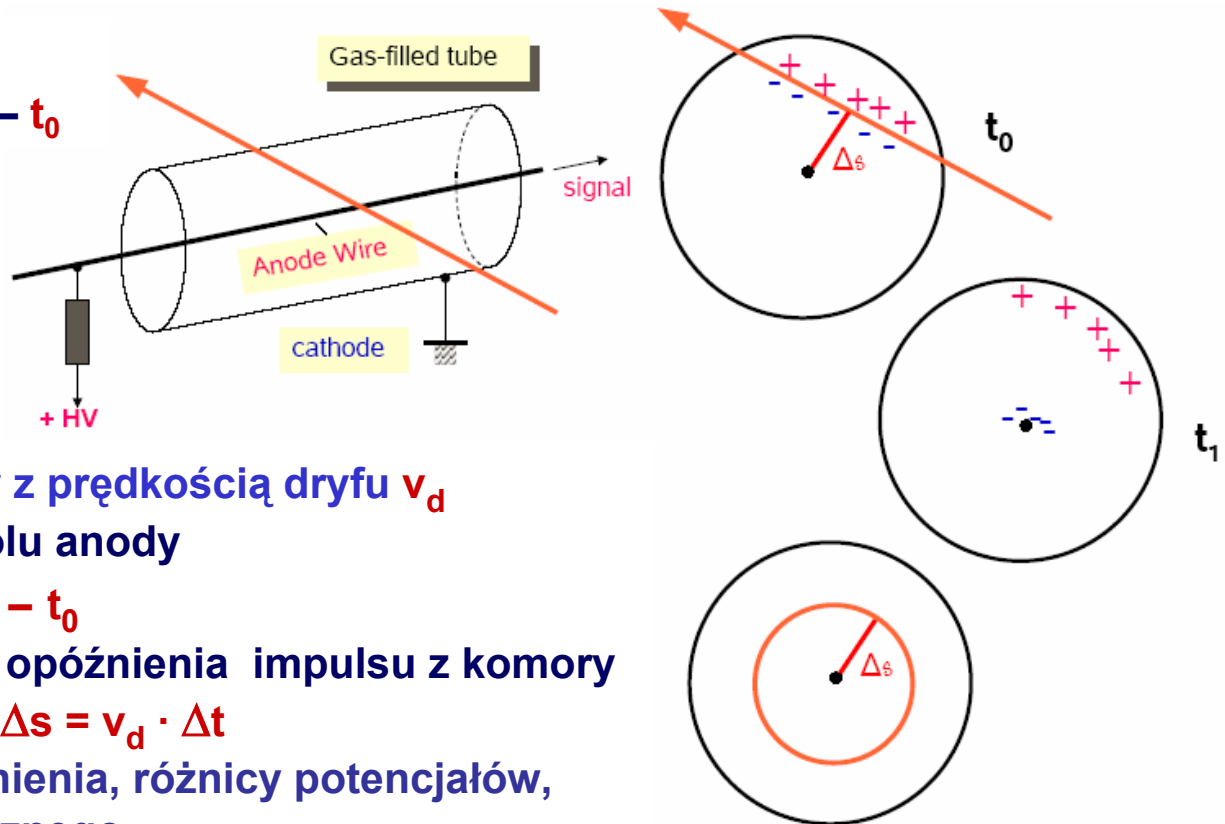
Obecnie MWPC są rzadko stosowane

Wysoka rozdzielczość przestrzenna wymagałaby dużej liczby drutów (ze wzmacniaczami) umieszczonych blisko siebie → problemy techniczne i finansowe

Komora dryfowa – komora proporcjonalna, w której elektrony z pierwotnej jonizacji dryfują na dłuższym odcinku w obszarze słabego pola elektrycznego zanim osiągną obszar wzmocnienia z silnym polem w pobliżu anody.

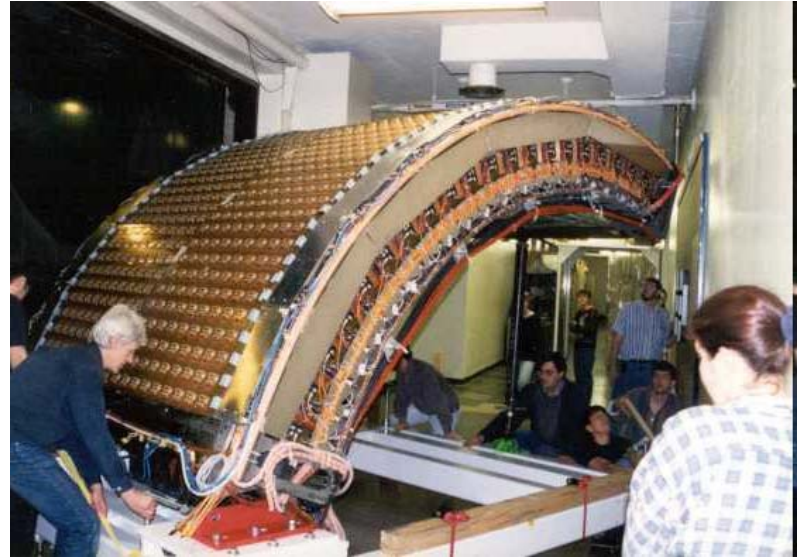
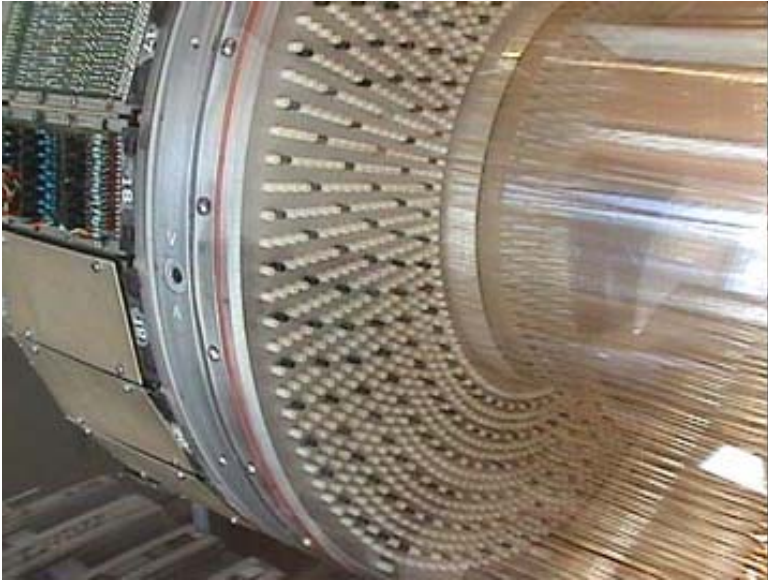
Rejestracja czasu dryfu elektronów → wyznaczenie położenia cząstki

- Cząstka przechodzi przez komorę i jonizuje ośrodek – t_0

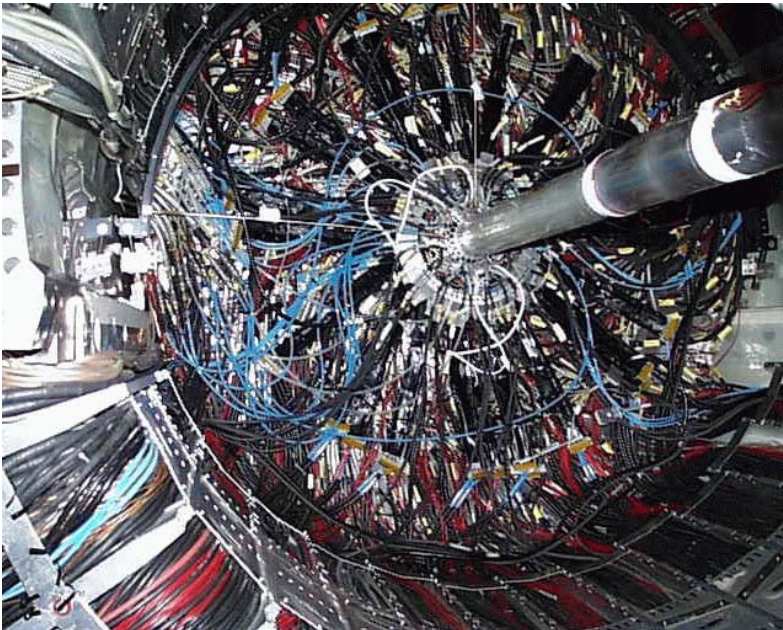


- Elektrony dryfują do anody z prędkością dryfu v_d
- Wzmocnienie sygnału w polu anody
- Pomiar czasu dryfu $\Delta t = t_1 - t_0$
- Pomiar położenia cząstki z opóźnienia impulsu z komory Δt i znanej prędkości dryfu $\Delta s = v_d \cdot \Delta t$
- v_d zależy od gazu, jego ciśnienia, różnicy potencjałów, temperatury, pola elektrycznego
- druty polowe kształtujące pole pomagają uzyskać **stałe** v_d

Pomiar czasu dryfu - poprawa przestrzennej zdolności rozdzielczej o czynnik 10 w porównaniu z MWPC : **1mm → 100 μm**

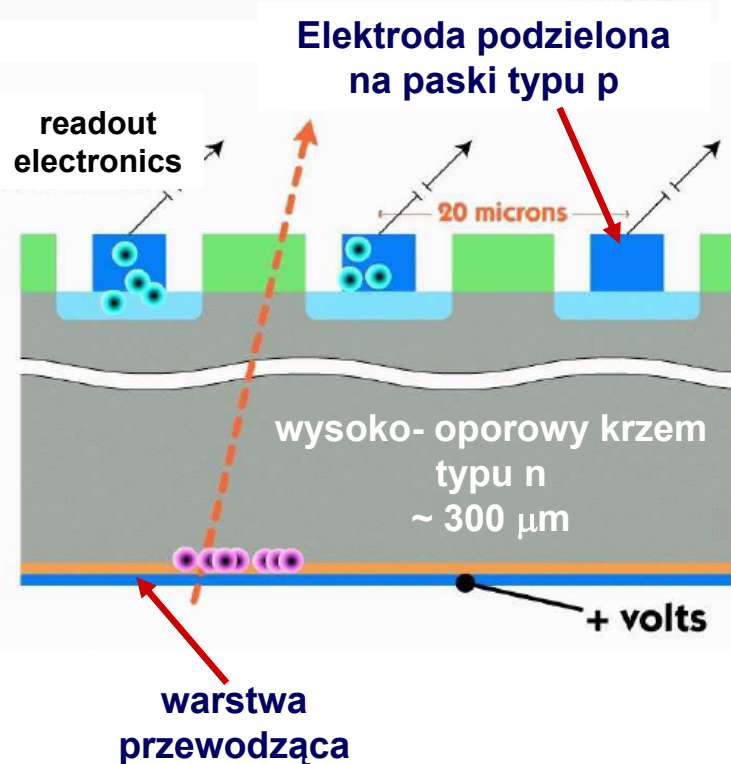
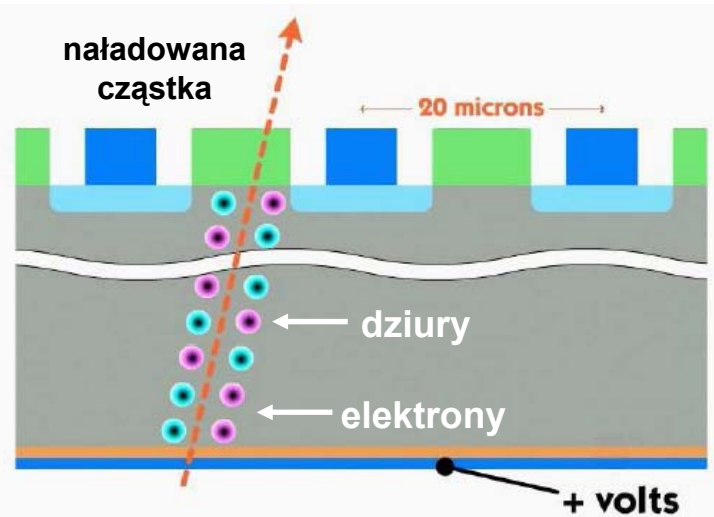


Komora dryfowa eksperymentu PHENIX na zderzaczu ciężkich jonów w Brookhaven National Laboratory (USA)



Komora dryfowa eksperymentu H1 na zderzaczu elektron-proton w ośrodku DESY w Hamburgu

Śladowe detektory krzemowe



Paskowy detektor krzemowy

(Silicon Strip Detector)

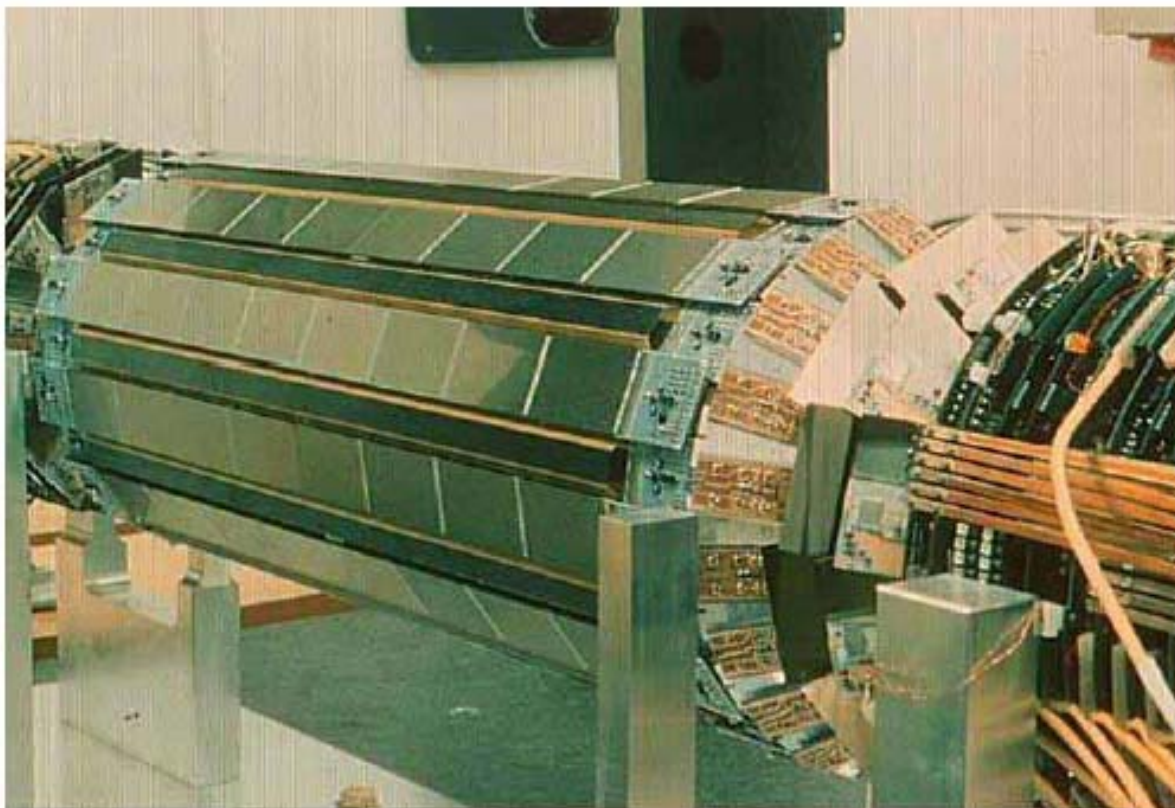
licznik półprzewodnikowy

- cienka płytki krzemu typu n – warstwa wysoko-oporowego krzemu o grubości $\sim 300 \mu\text{m}$
 - jedna z elektrod detektora jest podzielona na wąskie paski materiału typu p odległości między paskami $\sim 20 \mu\text{m}$
 - po drugiej stronie płytki krzemowej jest warstwa przewodząca
 - spolaryzowane w kierunku zaporowym złącze pn działa jak dioda
-
- Naładowana cząstka przechodząca przez zubożony obszar **wysoko-oporowego krzemu** generuje pary **elektron-dziura**
 - Dziury dryfują w kierunku katody
 - Elektrony dryfują w kierunku anody
 - Średnia energia potrzebna do wytworzenia w krzemie pary elektron-dziura tylko **3.6 eV !!** (jonizacja gazu wymaga 20 – 40 eV)
- **Pomiar ładunku jonizacji na cienkich paskach**

- **Przestrzenna zdolność rozdzielcza $< 10 \mu\text{m}$**
(sygnał zbierany z wąskich pasków)
 - pomiar pierwotnego wierzchołka oddziaływań
 - pomiar wierzchołków wtórnych
badania cząstek składających się z ciężkich kwarków c i b
(o czasach życia $10^{-12} \text{ } 10^{-13} \text{ s}$, mezony B $c\tau \sim 0.5$)
- czas dryfu elektronów $\sim 10 \text{ ns}$, dziur $\sim 25 \text{ ns}$ (parametry dla licznika o grubości $\sim 300 \mu\text{m}$)

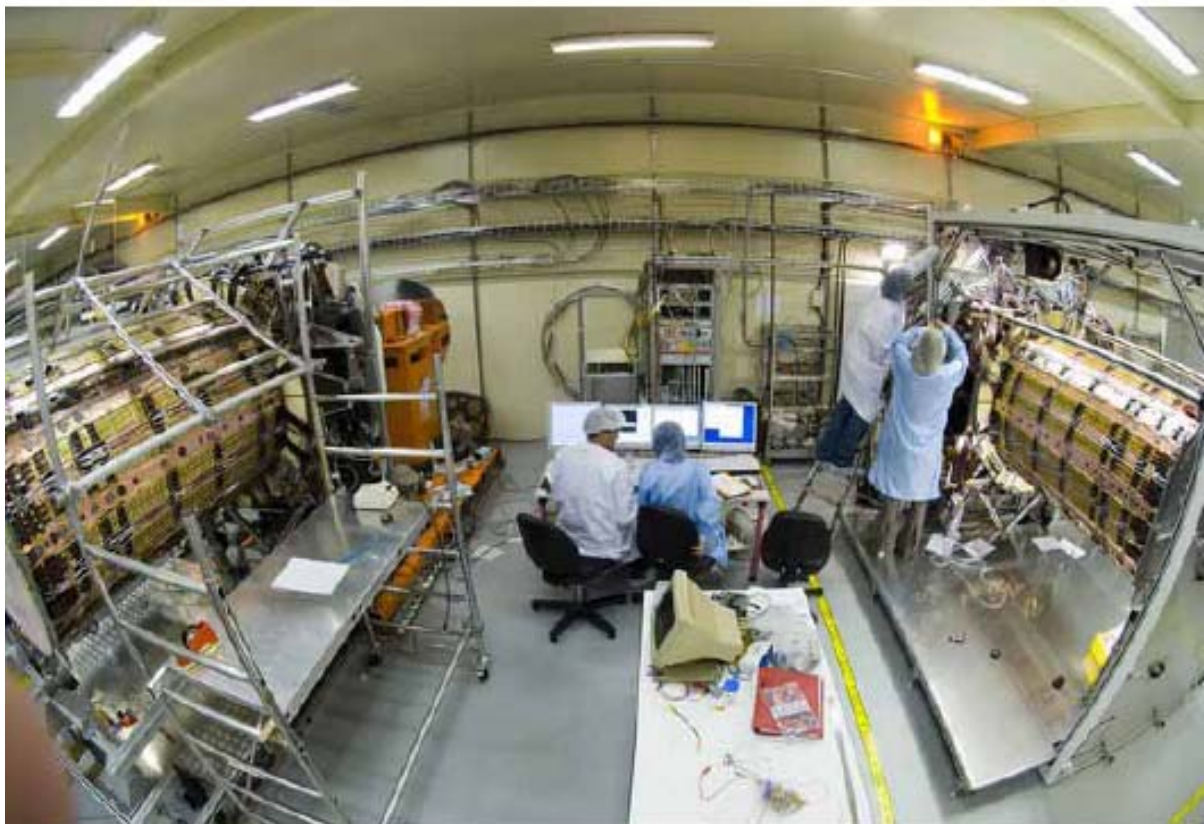
Detektory krzemowe są szybkimi detektorami o b. dobrej przestrzennej zdolności rozdzielczej

Eksperyment DELPHI na zderzaczu e^+e^- LEP w CERNie



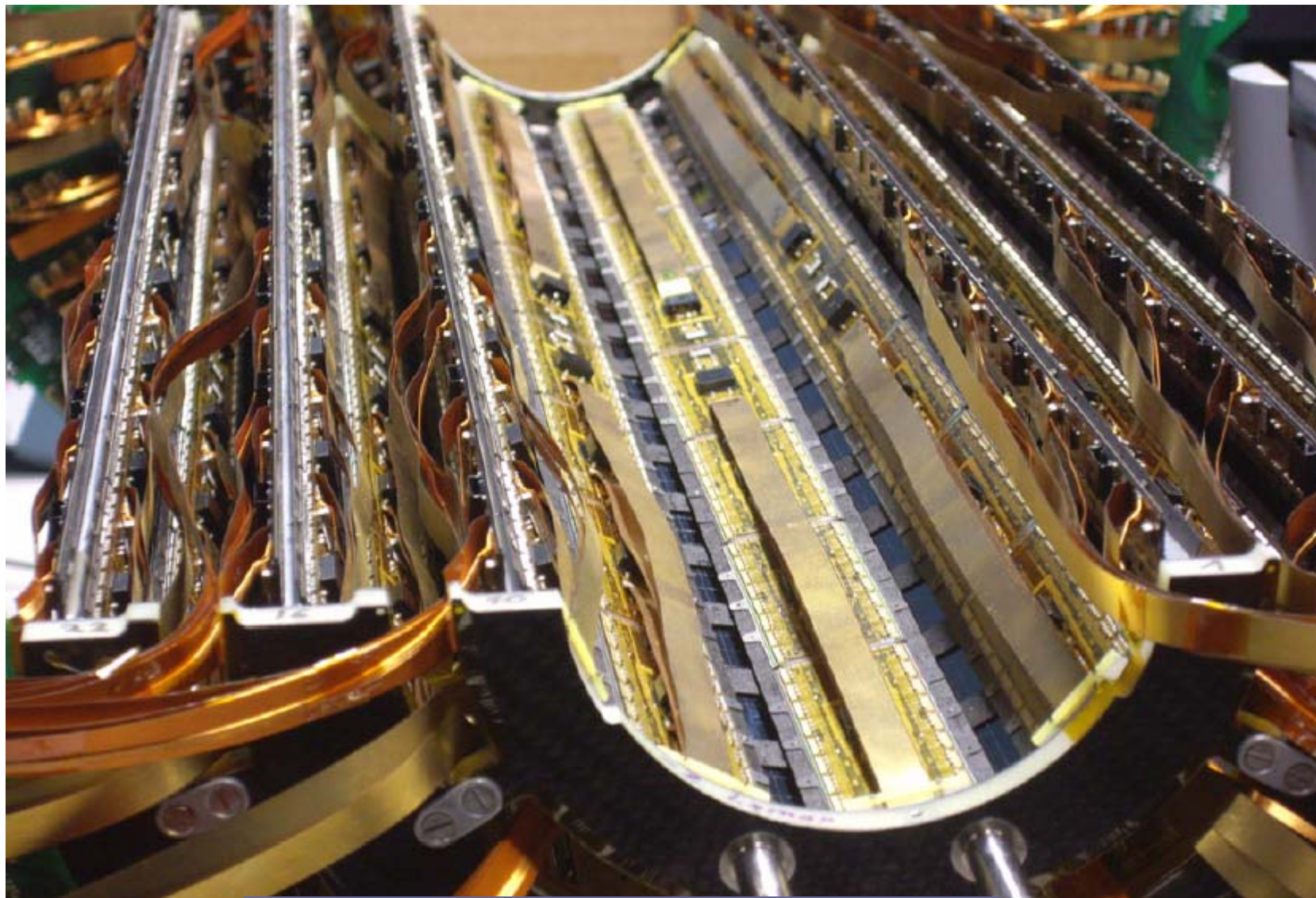
Fotografia przedstawia krzemowy detektor wierzchołka DELPHI przed zamontowaniem w eksperymencie w 1997 roku

Eksperyment ATLAS na zderzaczu LHC w CERNie



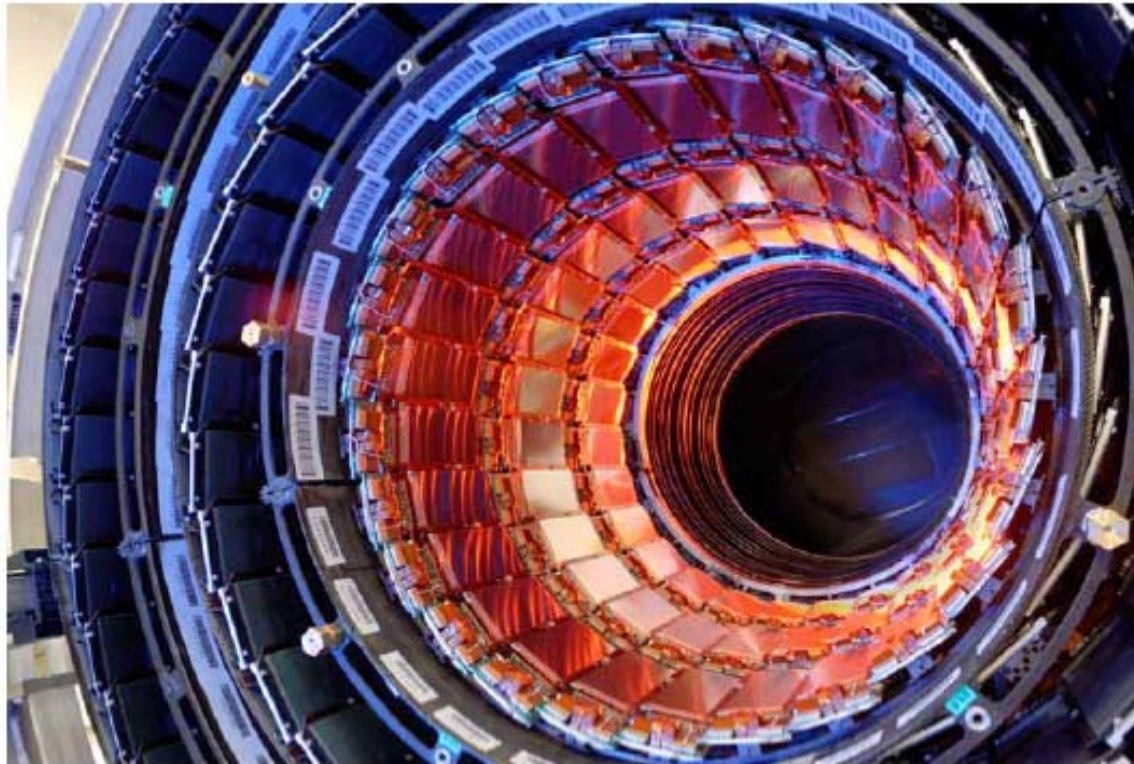
Krzemowy detektor eksperymentu ATLAS ma powierzchnię ok. 80 m² aktywnego krzemu

Detektor krzemowy w eksperymencie CMS na zderzacz LHC



CMS silicon pixel detector

Eksperyment CMS na zderzaczu LHC w CERNie



Krzemowy detektor eksperymentu CMS ma powierzchnię ponad 200 m² aktywnego krzemu

Rozwój technologii → budowa coraz większych i tańszych detektorów

Metoda pomiaru :

Pełna absorpcja energii padającej cząstki pierwotnej

(destruktywna metoda pomiaru energii – cząstka pierwotna nie istnieje po zakończeniu pomiaru)

Cząstka pierwotna oddziałuje z materiałem detektora, wytwarzając kolejne generacje cząstek wtórnych, które w procesach jonizacji / wzbudzenia ośrodka generują mierzalny sygnał proporcjonalny do energii cząstki padającej.

Kalorymetry :

- Pomiar energii cząstek neutralnych i naładowanych
- Identyfikacja cząstek (np. elektronów, fotonów)
- Optymalizacja kalorymetrów do pomiaru kaskad elektromagnetycznych i hadronowych
- Pomiar współrzędnych przestrzennych cząstki (pole magnetyczne nie jest potrzebne)
- Sygnały z kalorymetru - ważna informacja dla układów wyzwalania (trygerów) pozwalających na selekcję wybranych procesów
- redukcja przypadków tła

Pomiar energii - kalorymetria

- **Detektory śladowe + pole magnetyczne → pomiar pędu naładowanych cząstek**

Pomiar pędu naładowanej cząstki z jej zakrzywienia w polu magnetycznym nie zawsze jest wystarczająco precyzyjny

$$p = 0.3 B r$$

pęd cząstki p [GeV / c], indukcja magnetyczna B [T], promień r [m]

Ważny wkład do zdolności rozdzielczej w pędzie jest proporcjonalny do pędu cząstki

Precyzyjny pomiar zakrzywienia toru cząstki o dużym pędzie jest trudny → trudność określenia znaku ładunku cząstki

- **cząstki neutralne nie pozostawiają śladów w detektorach śladowych**
(praktycznie nie oddziałują z materiałem detektora)

Kalorymetry - pomiar energii i pędu cząstek neutralnych

Kalorymetry - pomiar energii i pędu dżetów,

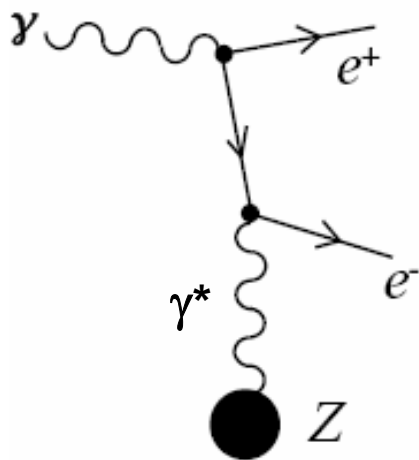
skolimowanych pęków cząstek neutralnych i naładowanych powstających w oddziaływaniach przy wysokich energiach

Kaskady elektromagnetyczne

- Elektrony, pozytony, fotony, neutralne mezony π^0 generują **elektronowo - fotonowe kaskady elektromagnetyczne**
- główne procesy prowadzące do rozwoju kaskady elektromagnetycznej

**Kreacja pary e^+e^-
przez foton w polu jądra**

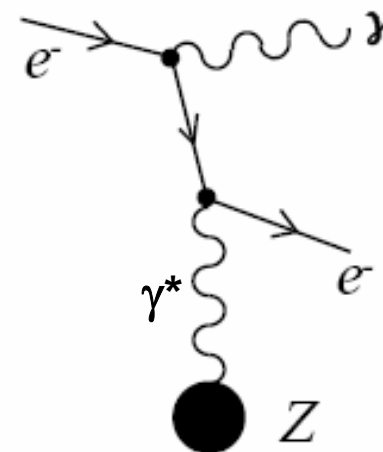
$$\gamma + \text{jądro} \rightarrow e^+ + e^- + \text{jądro}$$



W polu jądra foton może konwertować na parę elektron-pozyton.
Wymiana wirtualnego fotonu z jądrem zapewnia zachowanie czteropędu.

**Promieniowanie hamowania
(bremsstrahlung)**

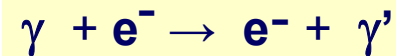
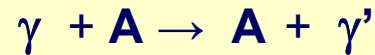
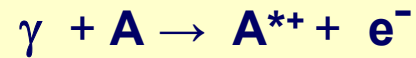
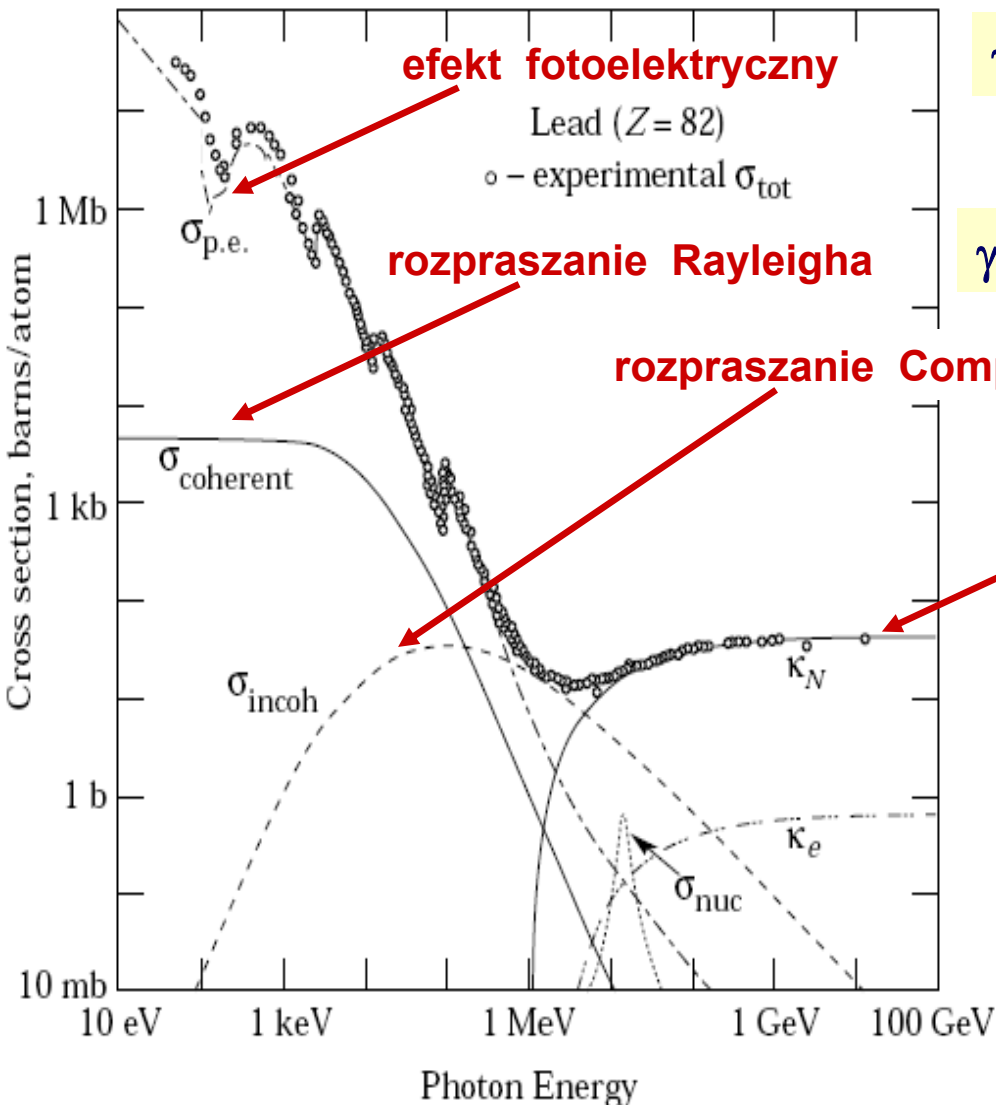
$$e^- + \text{jądro} \rightarrow e^- + \gamma + \text{jądro}$$



Emisja rzeczywistego fotonu przez elektron wyhamowany w polu jądra o ładunku Ze

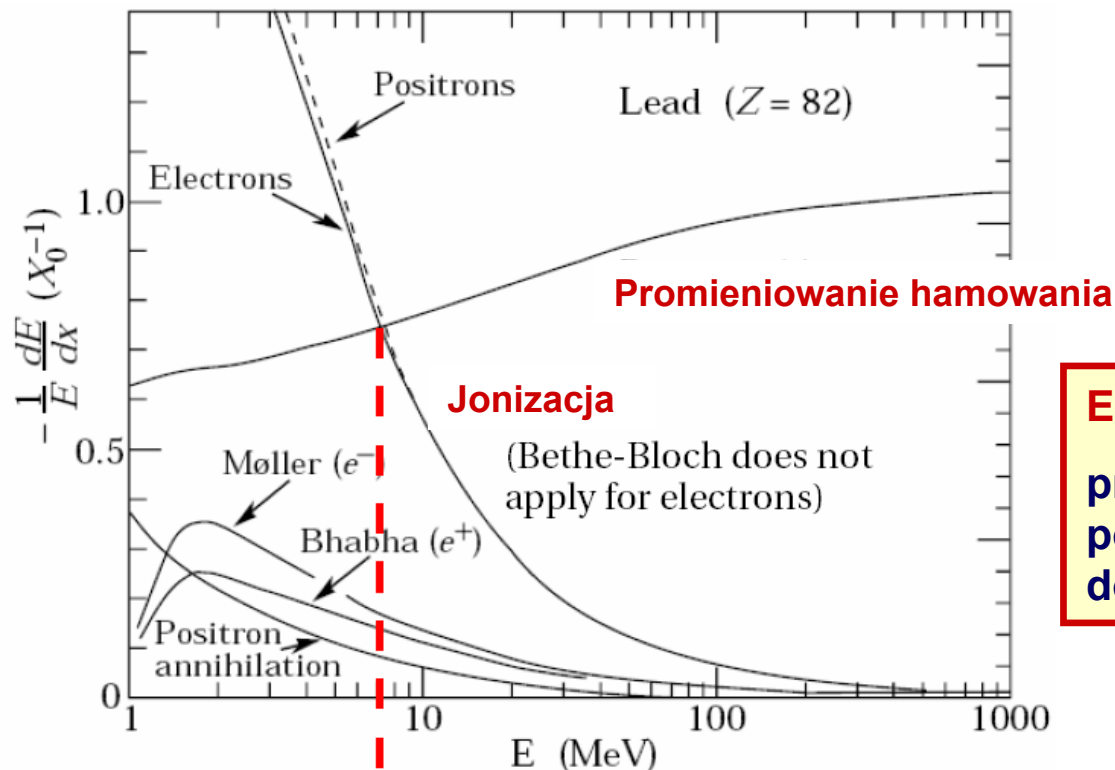
Oddziaływanie fotonów z materią

Przekroje czynne na oddziaływanie fotonów z materią (dla ołowiu) w funkcji energii fotonu



W oddziaływaniach fotonów z materią proces produkcji par $e^{+}e^{-}$ dominuje w obszarze wysokich energii ($E > 10$ MeV)

Względne straty energii elektronów w różnych procesach

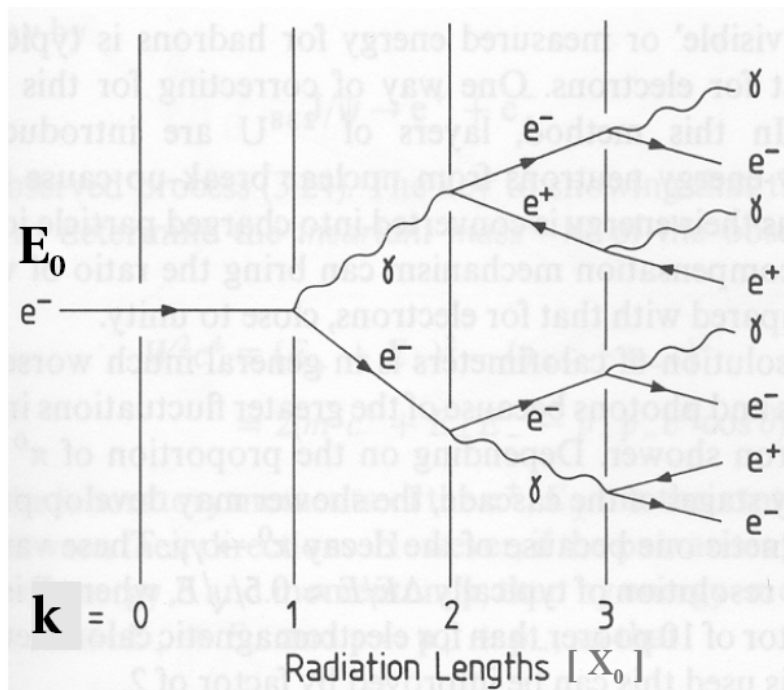


Elektrony i pozytony w ołowiu

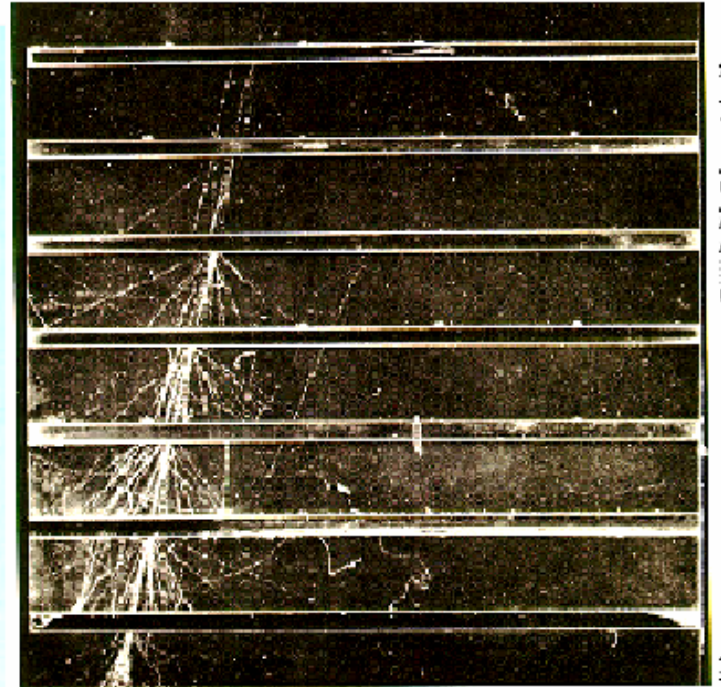
proces wypromieniowania fotonu
poprzez promieniowania hamowania
dominuje już przy energii 10 MeV

Energia krytyczna E_k odp. energii elektronów,
przy której straty energii na promieniowanie są
równe stratom energii na jonizację

Kaskada elektromagnetyczna



Kaskada w komorze mgłowej z ołowianymi płytami



Rozwój kaskady elektromagnetycznej :

Wysokoenergetyczny początkowy elektron $\rightarrow$ promieniowanie hamowania $\rightarrow$ kreacja par $\rightarrow$ promieniowanie hamowania itd.

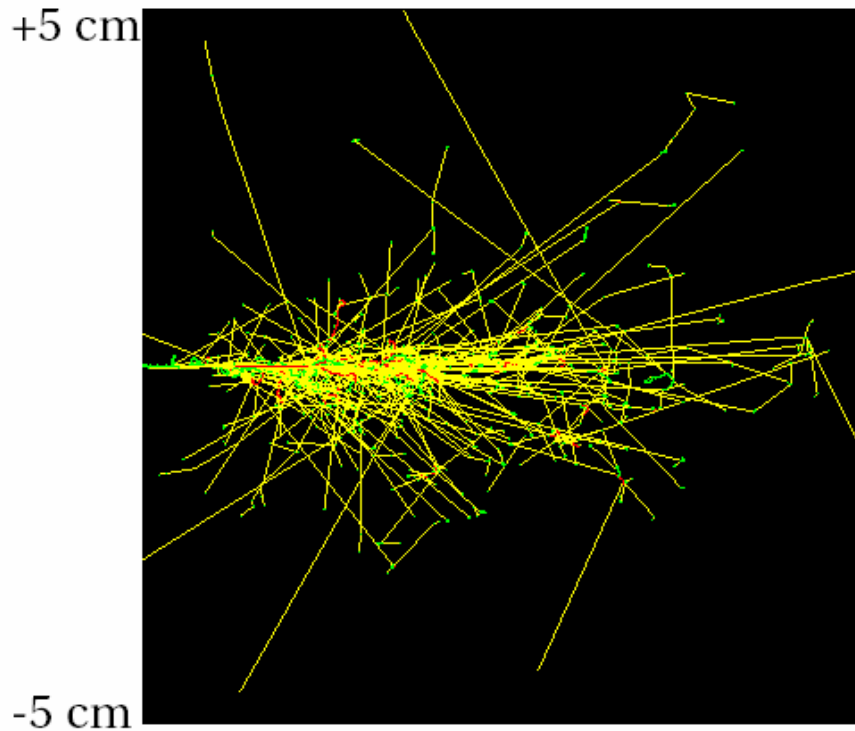
Kaskada wygasa, kiedy średnia energia cząstek elektromagnetycznych spada poniżej energii krytycznej .

Liczba cząstek w kaskadzie zapoczątkowanej przez wysokoenergetyczny foton lub elektron $N \sim E / E_k$. Cała energia cząstki początkowej rozdzielona na cząstki wtórne w ostatnim etapie tracona jest na jonizację ośrodka.

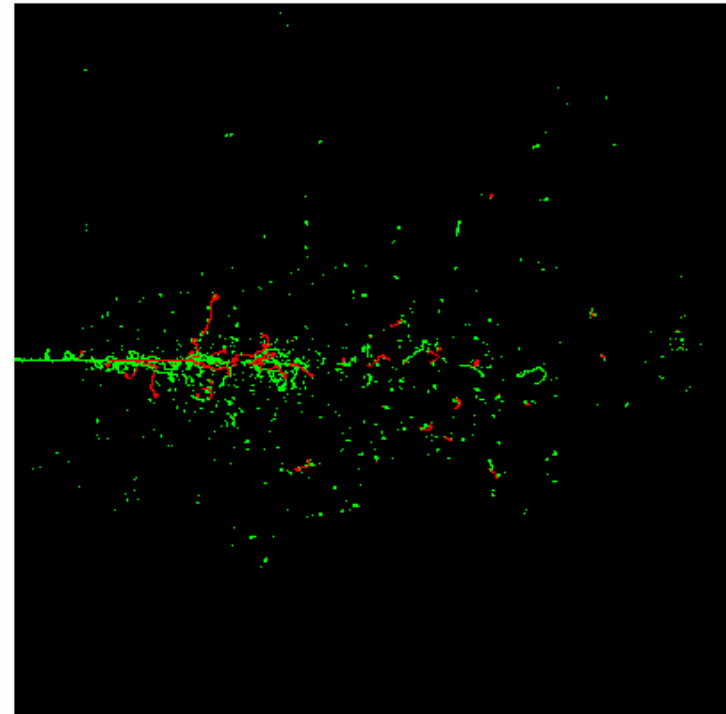
$\rightarrow$ **bardzo dokładny pomiar energii**

Symulacja kaskady elektromagnetycznej

Początkowy elektron o energii 1 GeV w ołowiu

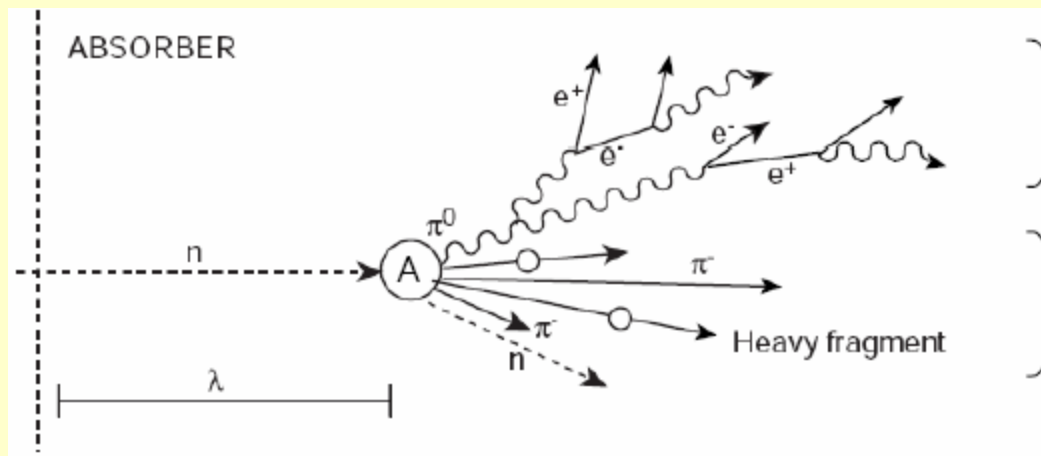


photons
electrons
positrons



electrons
positrons

• Rozwój kaskady hadronowej



Składowa elektromagnetyczna
kaskady hadronowej

Składowa hadronowa
kaskady hadronowej

- Padający hadron oddziałuje silnie z jądrami ośrodka → produkcja wtórnych hadronów (głównie neutralnych i naładowanych pionów, π^0 i $\pi^\pm$, oraz kaonów, K^0 i $K^\pm$)
- Wyprodukowane hadrony ponownie oddziałują silnie i produkują następną generację hadronów
w miarę degradacji energii hadronów zaczynają dominować oddziaływania elektromagnetyczne → większość energii początkowego hadronu pojawia się w postaci jonizacji → mierzalny sygnał
- ~ 15 - 35% energii początkowego hadronu jest tracone na rozbitcie jąder, wzbudzenia jądrowe oraz umyka z neutrinami produkowanymi w rozpadach → te procesy nie dają mierzalnego sygnału
- produkcja neutralnych pionów rozpadających się na fotony, $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$, prowadzi do lokalnych kaskad elektromagnetycznych

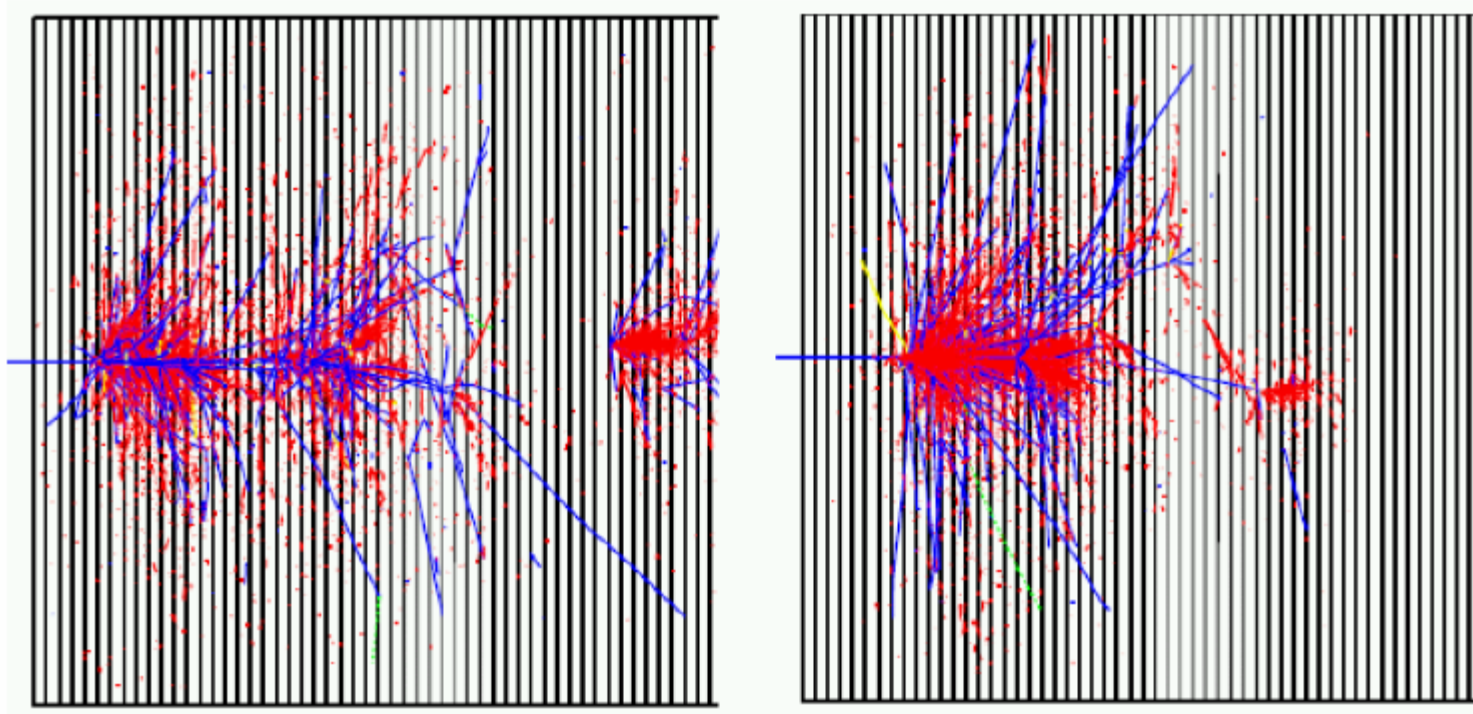
- duże fluktuacje w rozwoju kaskady hadronowej :

fluktuacje krotności cząstek produkowanych w zderzeniach hadronów, neutrina unoszące część energii i nieoddziałujące w detektorze, składowa elektromagnetyczna kaskady związana z produkcją mezonów π^0 , energia wiązania w zderzeniach z jądrami, ...



- duże niepewności pomiaru energii $\sigma_E/E \sim 0.5 / \sqrt{E}$, E [GeV]
- metody kompensacji energii traconej w oddziaływaniach jądrowych, poprzez użycie odpowiednich materiałów do budowy detektora (np. uranu)
→ poprawa energetycznej zdolności rozdzielczej kalorymetru

Symulacje kaskady hadronowej



Kolor niebieski – składowa hadronowa kaskady,

Kolor czerwony – składowa elektromagnetyczna kaskady

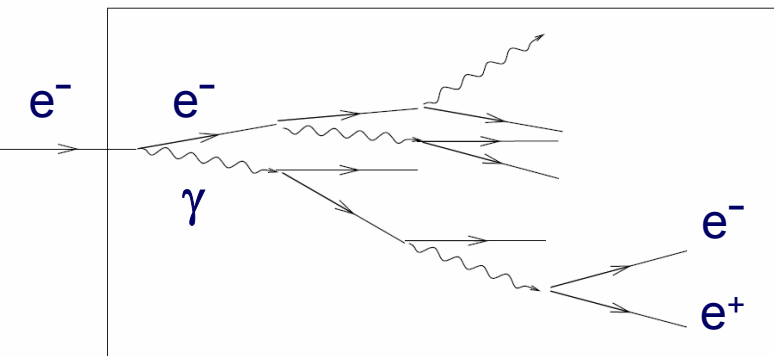
Odpowiedź dobrego kalorymetru hadronowego na przejście elektronu i naładowanego pionu o takiej samej energii powinna być jednakowa.

Kalorymetr kompensujący – zastosowanie odpowiednich materiałów (uran)

Kalorymetr o dużej segmentacji – programowalne metody analizy sygnałów z kalorymetru wykorzystujące różnice w rozwoju elektromagnetycznej i hadronowej składowej dla kaskady zainicjowanej przez hadron

Kalorymetry jednorodne

Rozwój kaskady i proces
służący detekcji zachodzą w tym
samym aktywnym materiale.



Materiały aktywne mają małą
gęstość → detektory są duże
i drogie

Kalorymetry elektromagnetyczne

Materiał aktywny : kryształy NaJ, CsJ

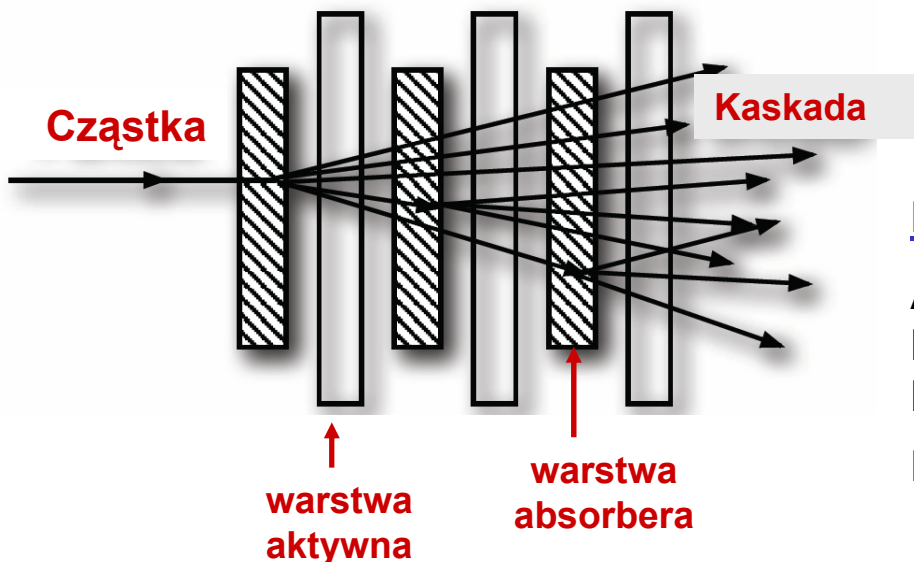
Szkło ołowiowe (55%PbO, 45%SiO₂)

Materiały o dużej liczbie Z

Precyzyjny pomiar energii

Kalorymetry próbujące

Naprzemienne warstwy gęstego absorbera (materiału w którym rozwija się kaskada) i aktywnego materiału detekcyjnego, próbującego kaskadę.



Kalorymetry hadronowe

Absorber : żelazo

Materiał aktywny : scyntylator, ciekły argon

Materiał aktywny i absorber – szkło ołowiowe

Materiały o dużej liczbie A

Kalorymetry elektromagnetyczne

Absorber : ołów

Materiał aktywny : ciekły argon
scyntylator plastikowy

Duża gęstość absorbera → detektory są mniejsze i tańsze

Fluktuacje wpływające na pomiar energii maleją ze wzrostem energii cząstki