

Detektory

- oddziaływanie cząstek i promieniowania z materią
- Identyfikacja cząstek (dE / dx)
- Detektory śladowe :
 - wielodrutowe komory proporcjonalne
 - komory dryfowe
 - śladowe detektory krzemowe

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

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

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

Z, A – liczba atomowa i masowa atomów ośrodka;

liczba masowa A – liczba nukleonów w jądrze danego pierwiastka

liczba atomowa Z – liczba protonów w jądrze

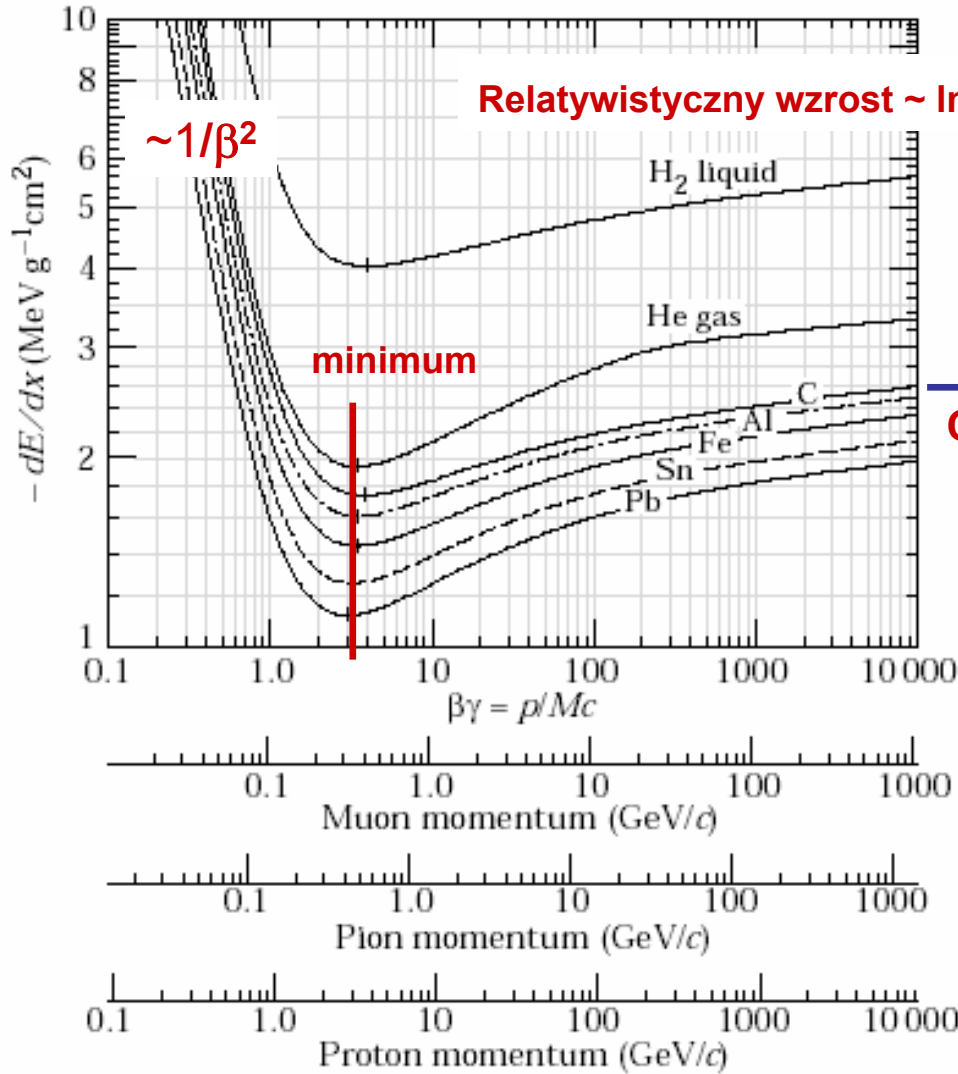
I – potencjał jonizacji (dla większości materiałów ~ (10eV) · Z;

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

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

Jonizacyjne straty energii w różnych ośrodkach

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



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

↑
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 $\sim \gamma$
ze wzrostem energii ważne odległe zderzenia

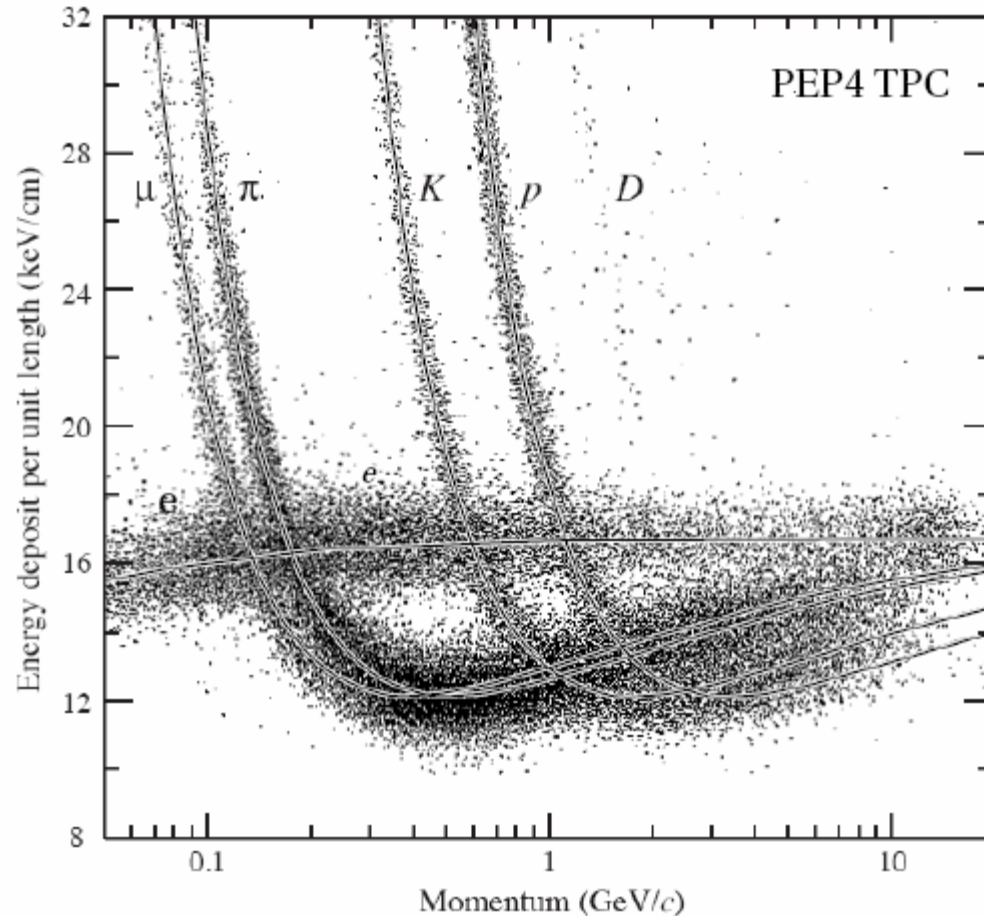
Minimum jonizacji dla $\beta\gamma = p/m \sim 3.5$
dla wszystkich cząstek

Położenie minimum jonizacji mało zależy od rodzaju ośrodka.

$(dE/dx)_{\min} \sim 1-2 \text{ MeV g}^{-1} \text{ cm}^2$ (oprócz H₂)

$$\beta = p / E, \gamma = E / m, \beta\gamma = p / m$$

Identyfikacja cząstek poprzez dE/dx



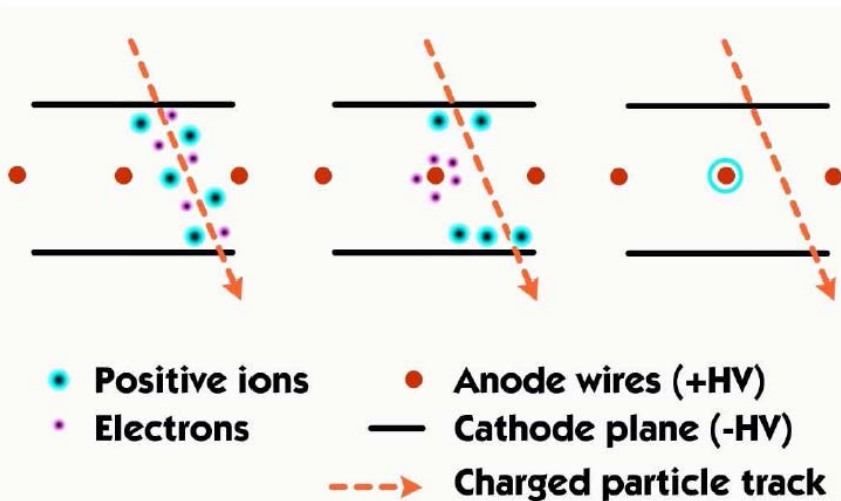
- Jonizacyjne straty energii dE/dx zależą tylko od β , są niezależne od masy cząstki
- cząstki o danym pędzie i różnych masach mają różne dE/dx
- **pomiar pędu cząstki**
(z zakrzywienia jej toru w polu magnetycznym)
+ **pomiar dE/dx** (prędkość cząstki)
definiuje masę cząstki
- **metoda identyfikacji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

$$\beta = p / E$$

Detektory pojedynczych cząstek naładowanych

wielodrutowe komory proporcjonalne



Typowe parametry

- druty anodowe: średnica = 20 μm rozmieszczone co 2 mm
- odległości płaszczyzn katodowych ~ 12 mm
- różnica potencjałów ~ 5 kV,
- gaz : mieszanina argonu i izobutanu
- przestrzenna zdolność rozdzielcza : ~ 1 mm
- paskowe katody ~ 0.050 mm
(pomiar środka ciężkości impulsu katodowego)

Detektor składa się z dwóch płaszczyzn katodowych m-dzy 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

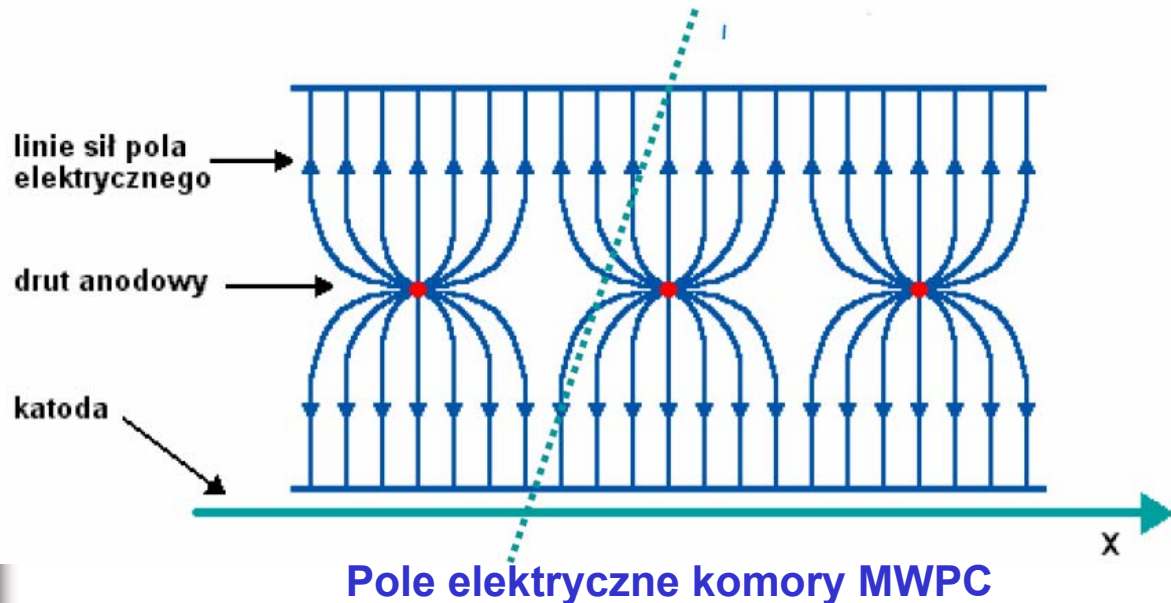
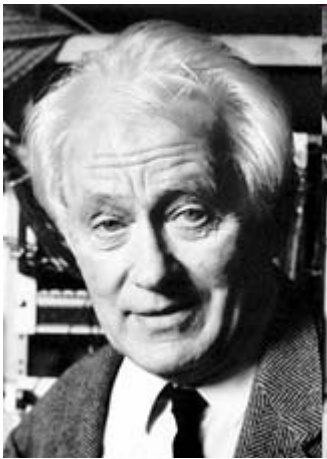
wielodrutowe komory proporcjonalne

Georges Charpak

1968 – konstrukcja wielodrutowej komory proporcjonalnej

1992 – Nagroda Nobla

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



Obecnie MWPC są rzadko stosowane

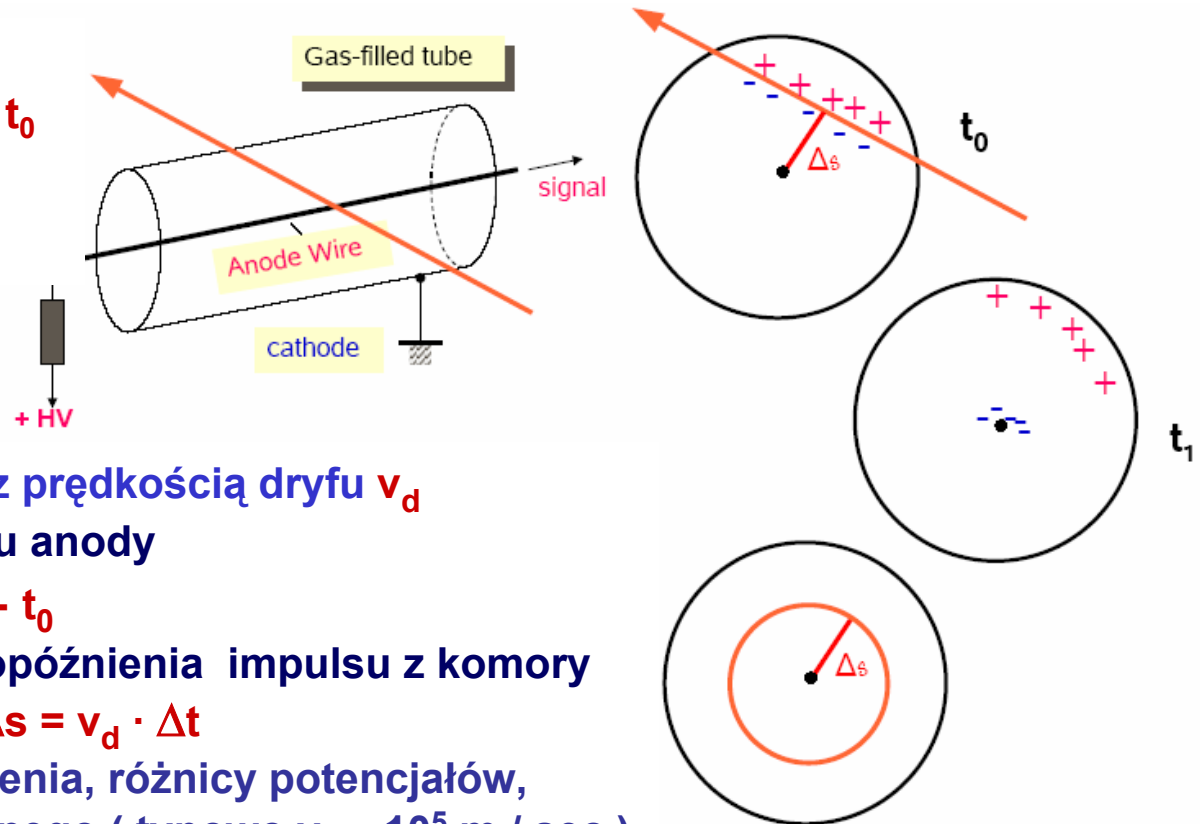
Wysoka rozdzielczość przestrzenna wymagałaby dużej liczby drutów (ze wzmacniaczami) umieszczonych blisko siebie → problemy techniczne i finansowe

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

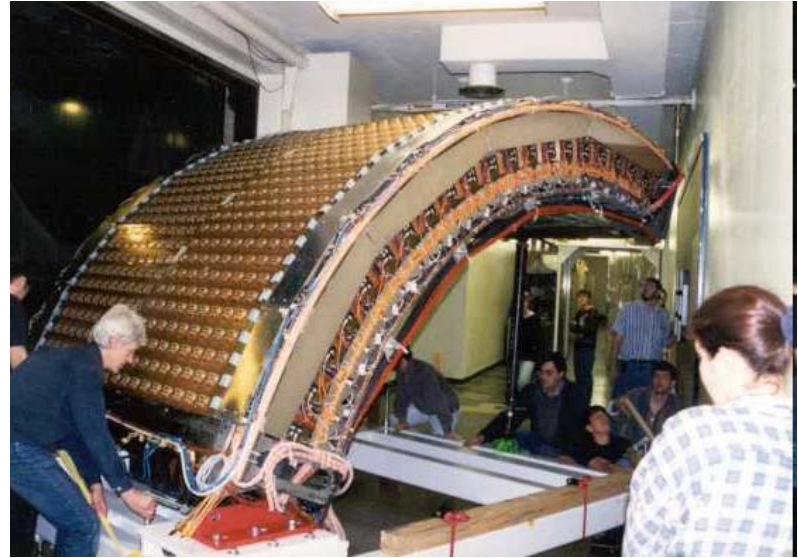
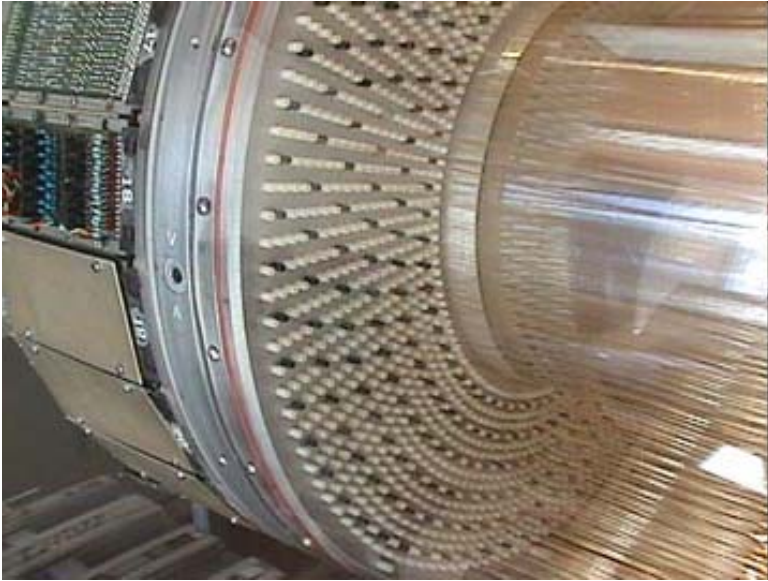
- Cząstka przechodzi przez komorę i jonizuje ośrodek – t_0

pomiar t_0
z licznika scyntylacyjnego

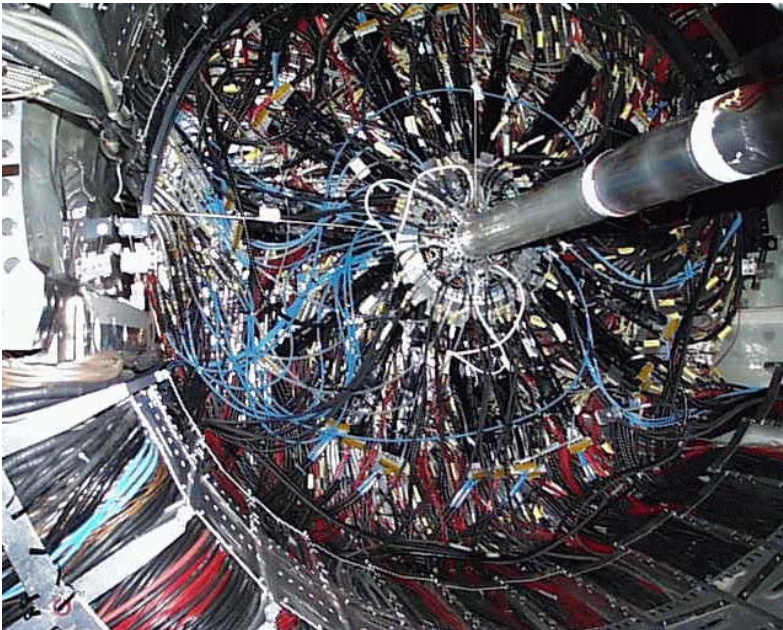


- Elektrony dryfują do anody z prędkością dryfu v_d
- Wzmocnienie sygnału w polu anody
- Pomiar czasu dryfu $\Delta t = t_1 - t_0$
- Pomiar położenia cząstki z opóźnienia impulsu z komory Δt i znanej prędkości dryfu $\Delta s = v_d \cdot \Delta t$
- v_d zależy od gazu, jego ciśnienia, różnicy potencjałów, temperatury, pola elektrycznego (typowo $v_d \sim 10^5$ m / sec)
- 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 μ m**

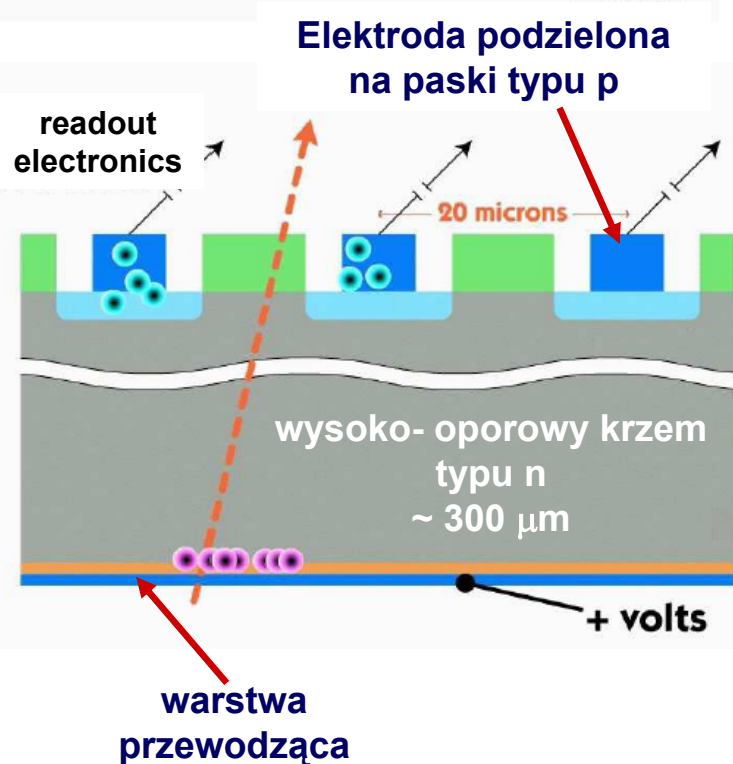
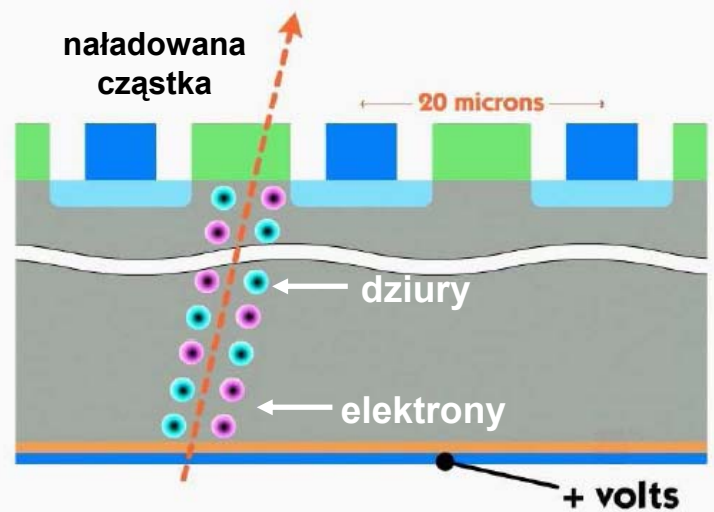


Komora dryfowa eksperymentu PHENIX na zderzacz ciężkich jonów w Brookhaven National Laboratory (USA)



Komora dryfowa eksperymentu H1 na zderzacz 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

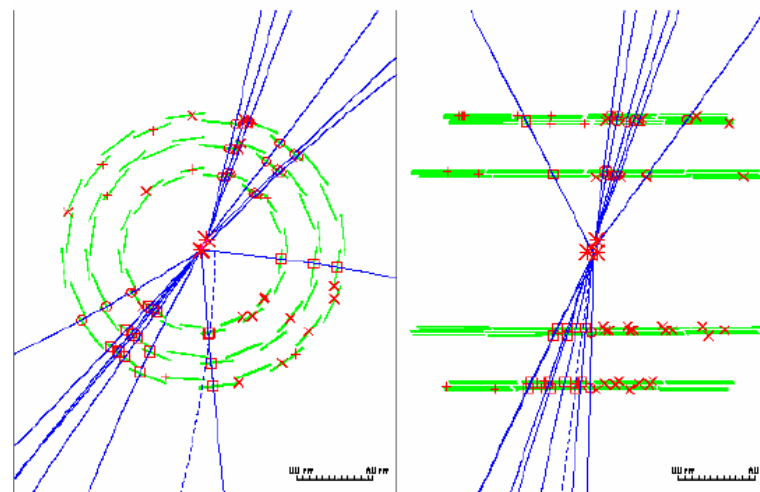
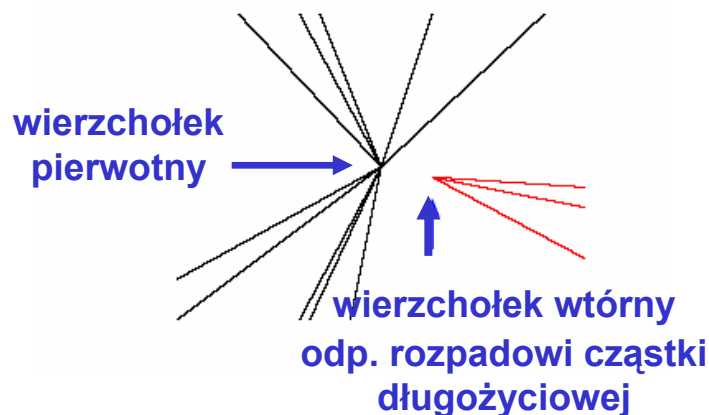
- Średnia energia potrzebna do wytworzenia w krzemie pary elektron-dziura tylko **3.6 eV !!**

(jonizacja gazu wymaga 20 – 40 eV)

→ **Pomiar ładunku jonizacji na cienkich paskach**

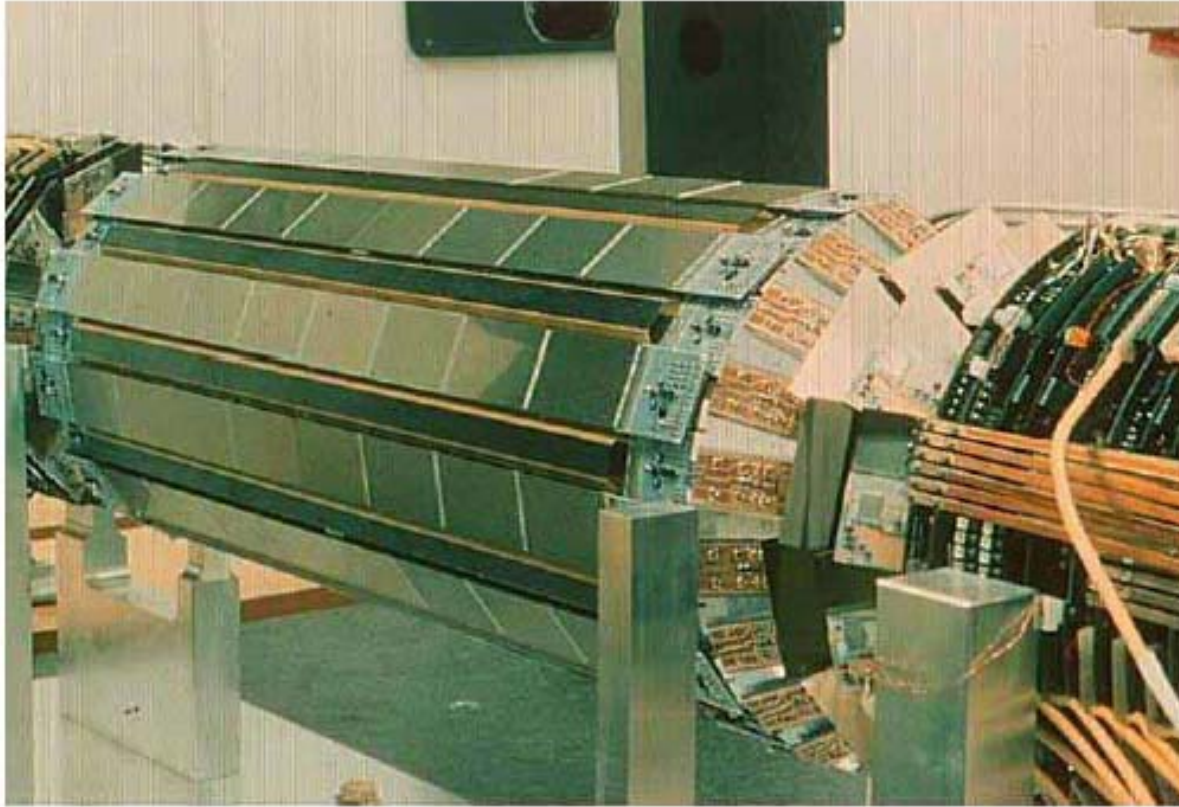
Detektory krzemowe są szybkimi detektorami o b. dobrej przestrzennej zdolności rozdzielczej

- 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 $10^{-12} - 10^{-13} \text{ s}$, mezony B $c\tau \sim 0.5 \text{ mm}$)
- czas dryfu elektronów $\sim 10 \text{ ns}$, dziur $\sim 25 \text{ ns}$ (parametry dla licznika o grubości $\sim 300 \mu\text{m}$)



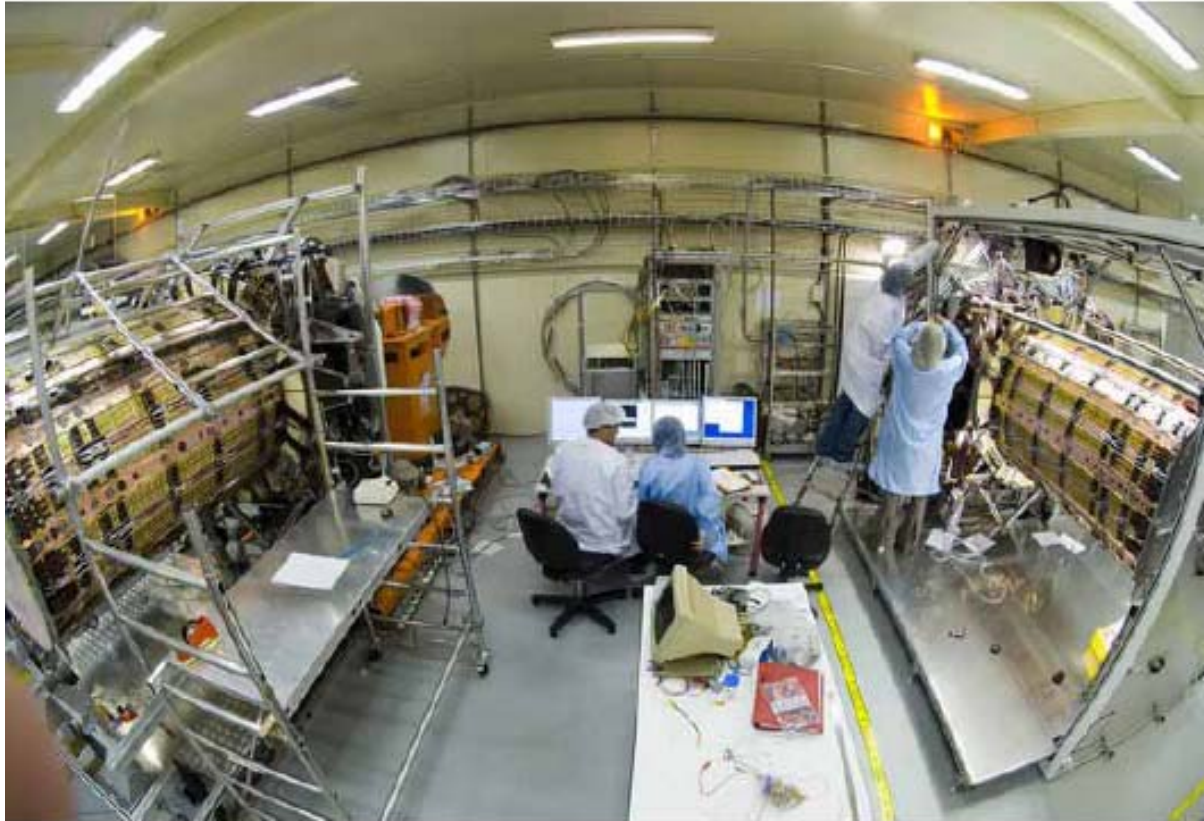
Sygnaly w detektorze wierzchołka eksp. DELPHI na zderzacz e^+e^-

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



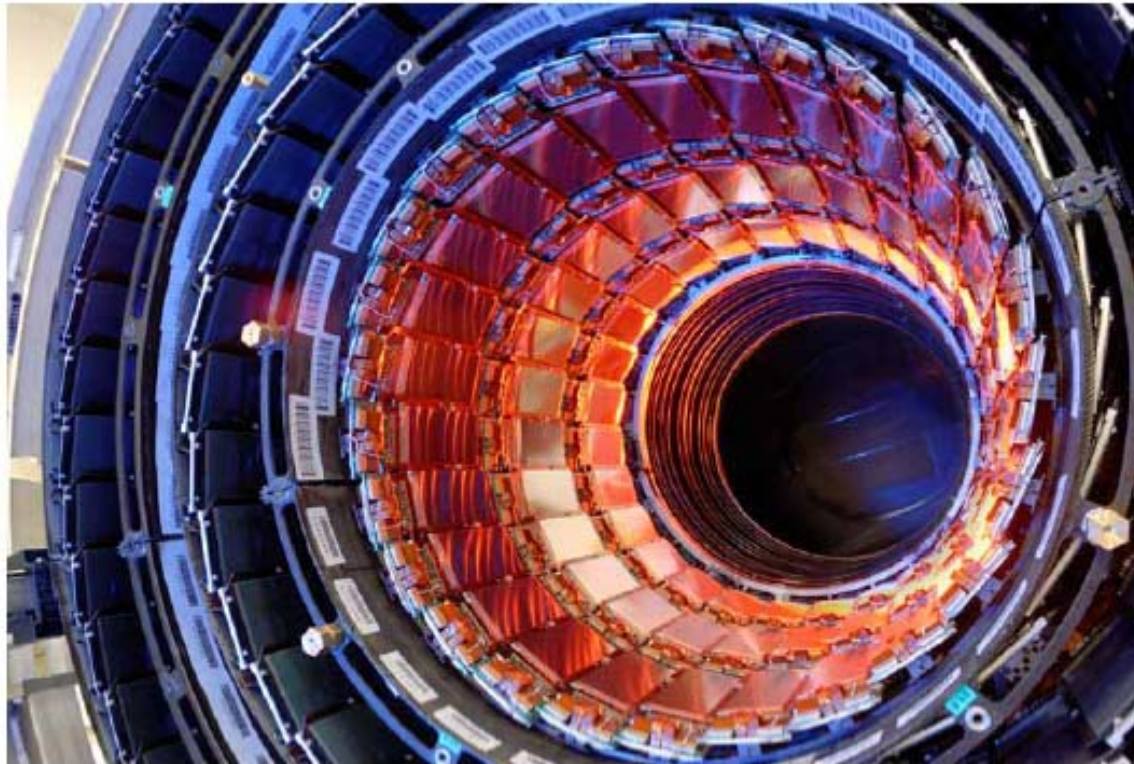
Fotografia przedstawia krzemowy detektor wierzchołka DELPHI przed zamontowaniem w eksperymencie w 1997 roku

Eksperyment ATLAS na zderzaczu LHC w CERNie



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

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