

Metody eksperymentalne w fizyce wysokich energii

prof. dr hab. A.F.Żarnecki

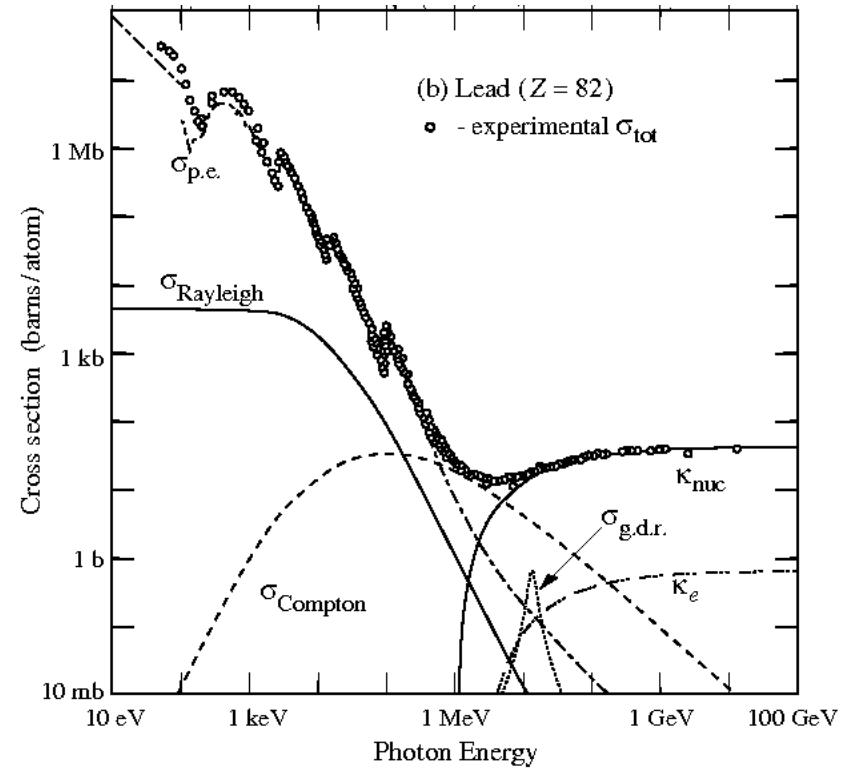
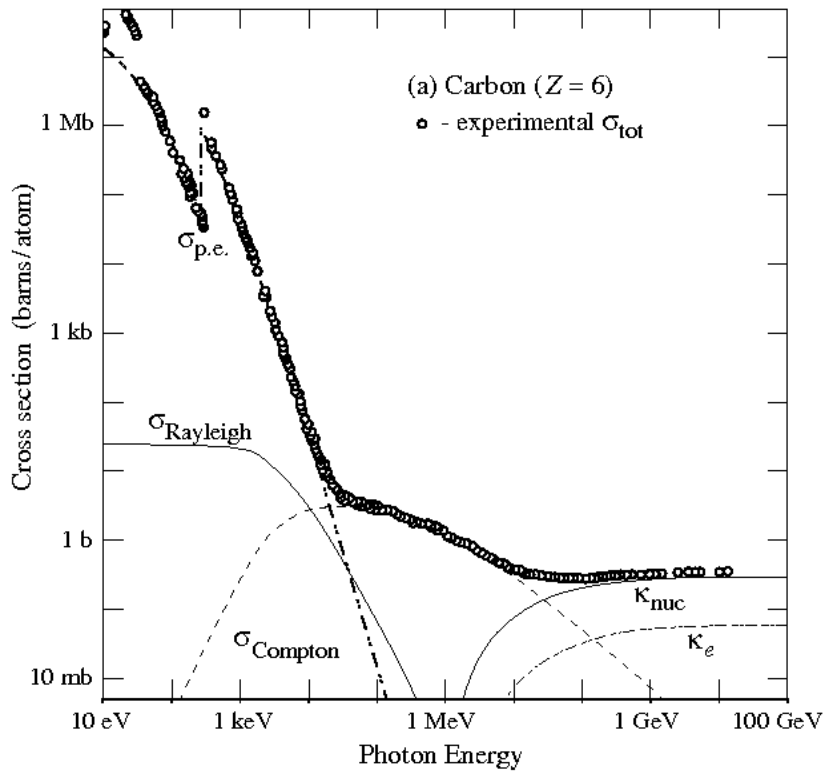
Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych IFD

Wykład III

- Oddziaływanie fotonów i hadronów
- Detektory gazowe

Fotony

Przekrój czynny na oddziaływanie z ośrodkiem w funkcji energii



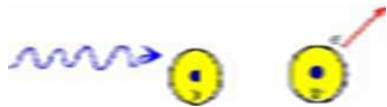
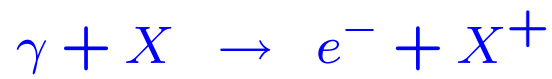
W obszarze małych energii dominuje efekt fotoelektryczny ($\sigma_{p.e.}$)

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

Dla energii powyżej ~ 10 MeV dominuje kreacja par e^+e^- w polu jąder (κ_{nuc})

Fotony

Efekt fotoelektryczny



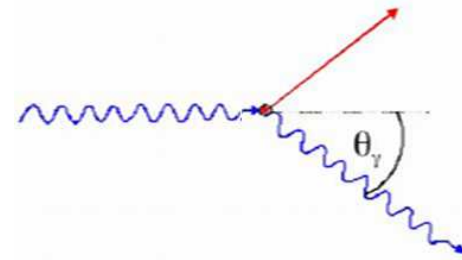
Dla $I_K < E_\gamma \ll m_e$ oczekujemy

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

gdzie:

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

Efekt Comptona



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

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

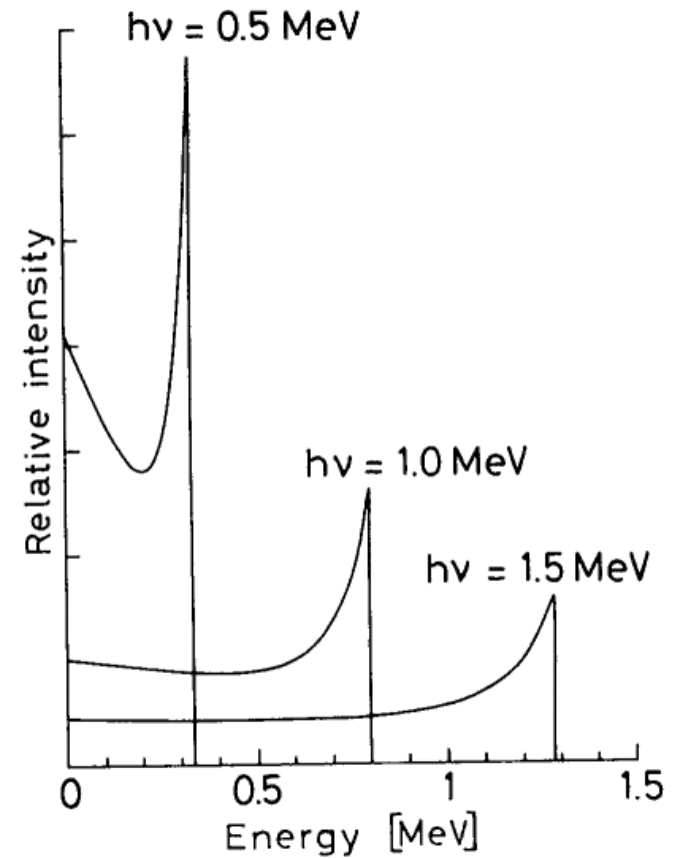
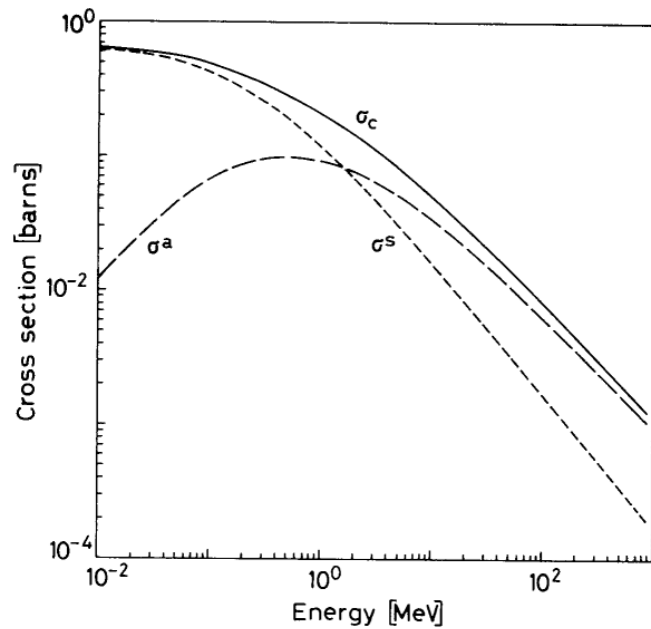
Fotony

Efekt Comptona

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

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

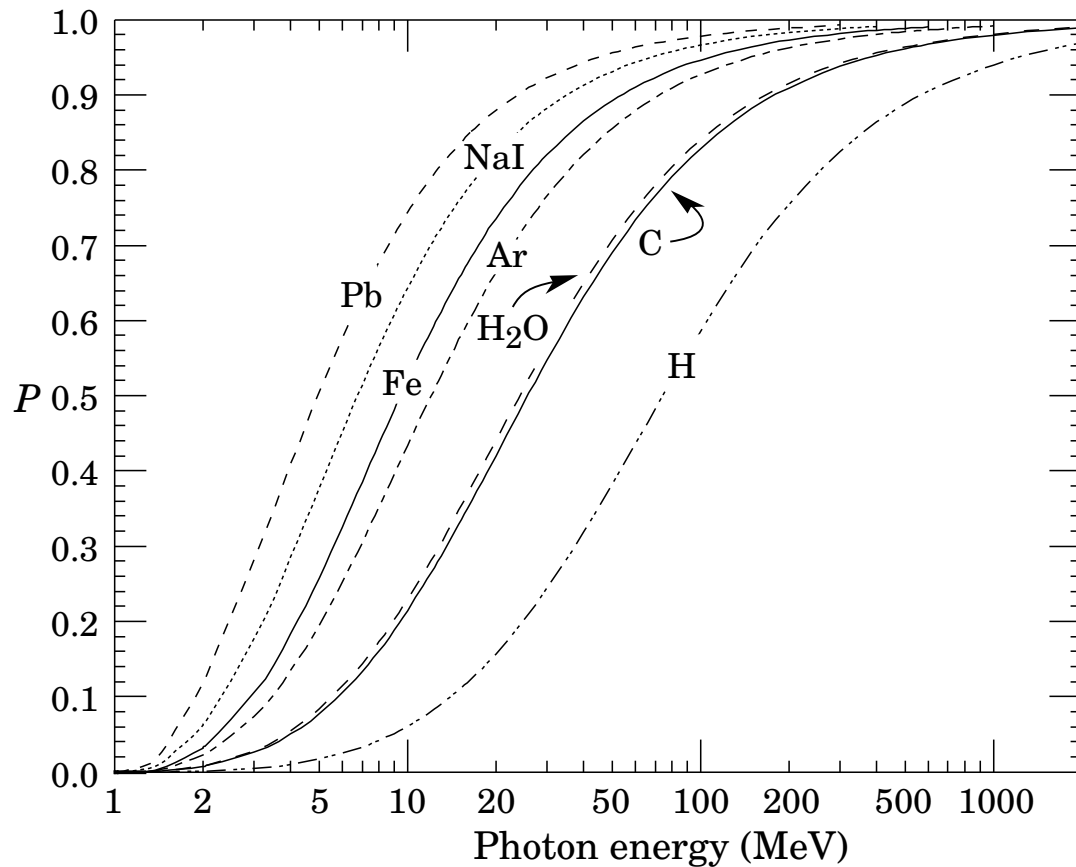
Rozkład energii elektronów:



Fotony

Kreacja par

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



Powyżej ~ 1 GeV:
praktycznie wyłącznie kreacja par.

Dla niższych energii wkład produkcji par rośnie ze wzrostem Z

Fotony

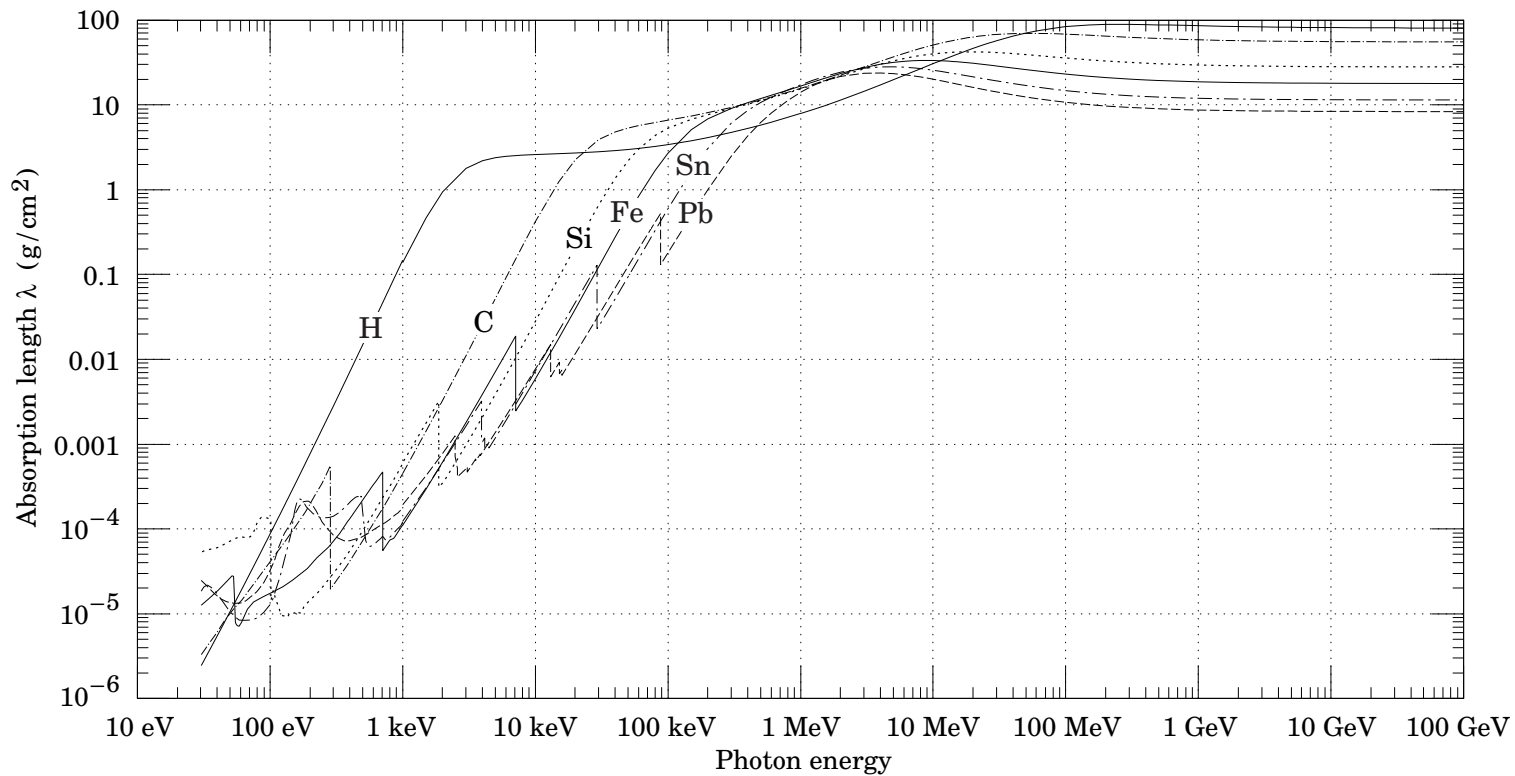
Spadek intensywności wiązki

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

λ - średnia droga swobodna

W obszarze dużych energii
(dominuje kreacja par):

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



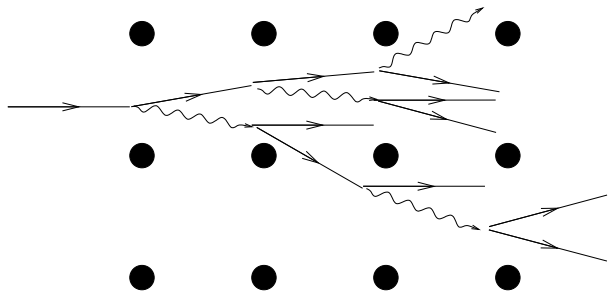
Kaskada E-M

Kaskada elektromagnetyczna

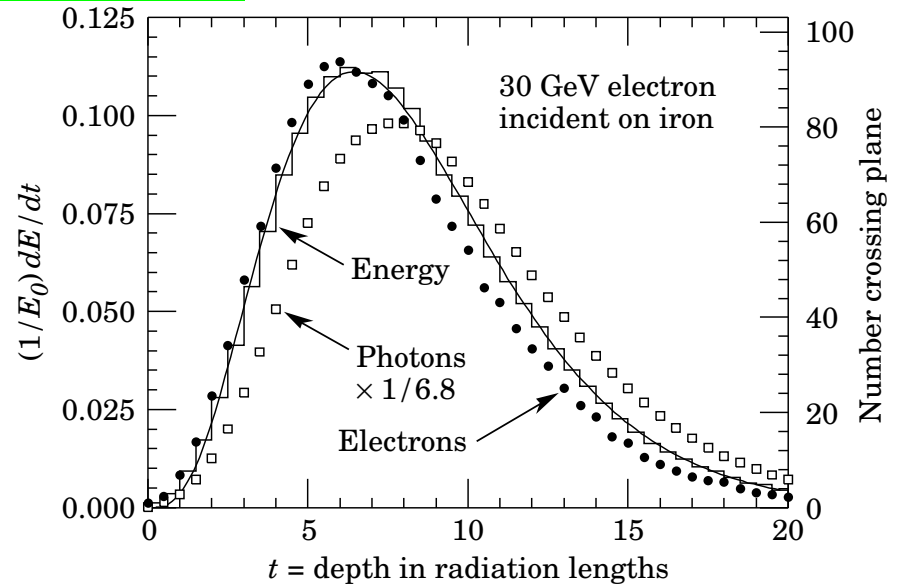
Wysokoenergetyczny foton wpadając w materię konwertuje na parę e^+e^-

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 $[X_0]$

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

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

Hadrony

Droga na oddziaływanie

Prawdopodobieństwo nieelastycznego rozproszenia w funkcji drogi w materiale:

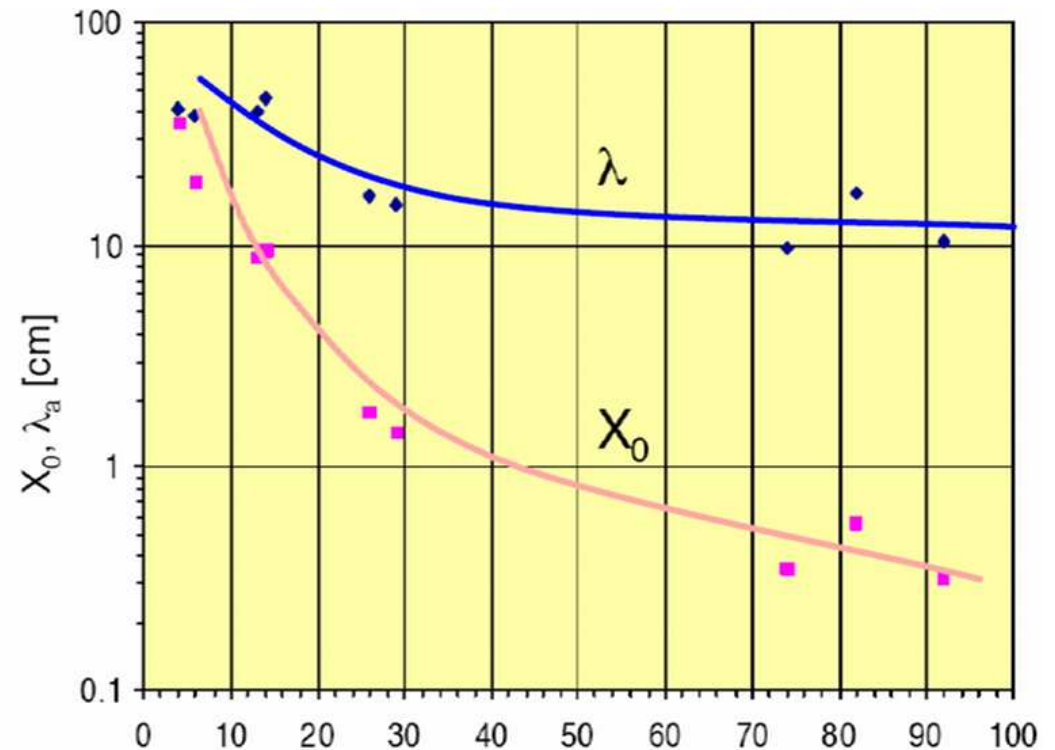
$$p(x) = \frac{1}{\lambda_I} \cdot \exp\left(-\frac{x}{\lambda_I}\right)$$

λ_I - średnia droga na oddziaływanie w danym materiale.

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

	λ_I	X_0	λ_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



Dla $E > 1\text{GeV}$ praktycznie nie zależy od energii

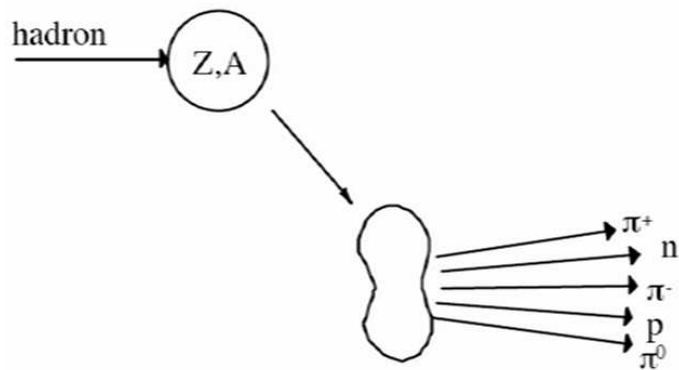
Hadrony

Kaskada hadronowa

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

Produkowane są cząstki wtórne.

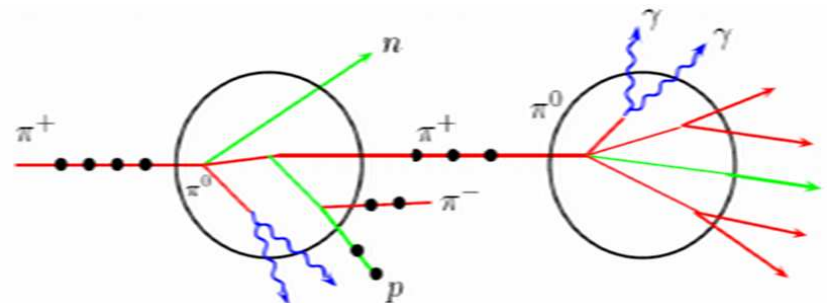
Krotność cząstek $N \sim \ln E$



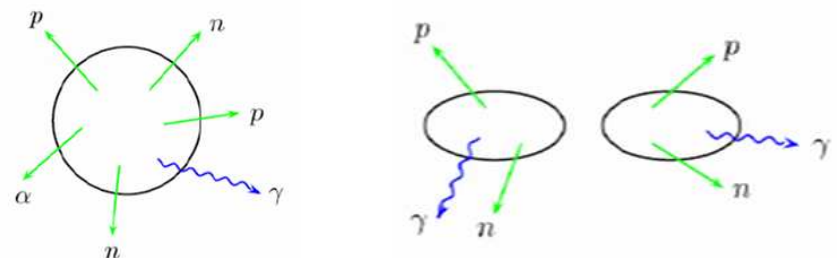
Cząstki wtórne mogą powodować kolejne reakcje \Rightarrow kaskada

Cząstki tracą także energię na wzbudzenia jąder i jonizację.

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



Deekscytacja jąder - opóźniona emisja cząstek



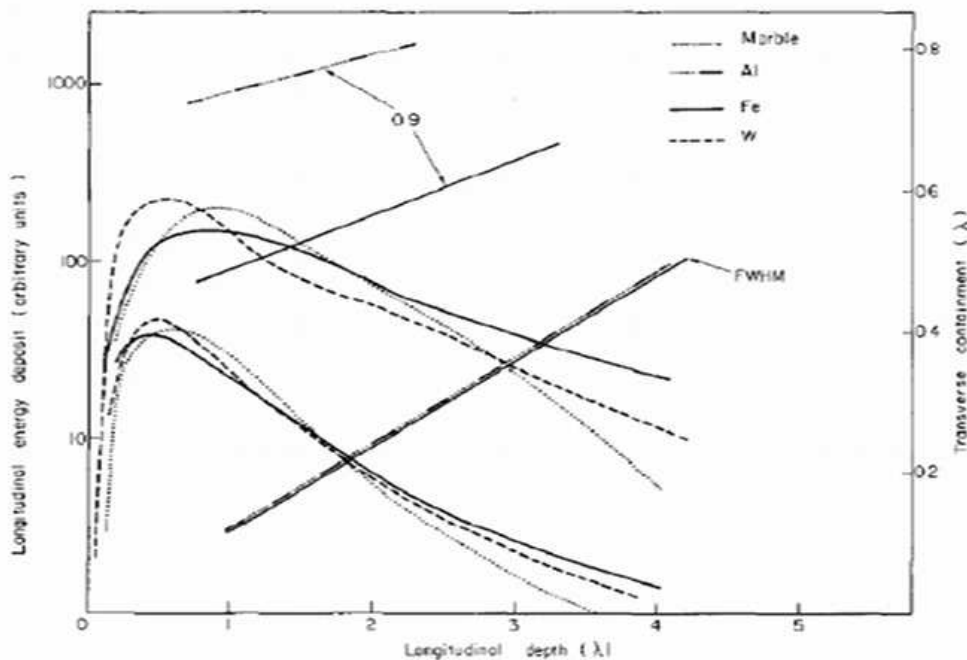
Hadrony

Kaskada hadronowa

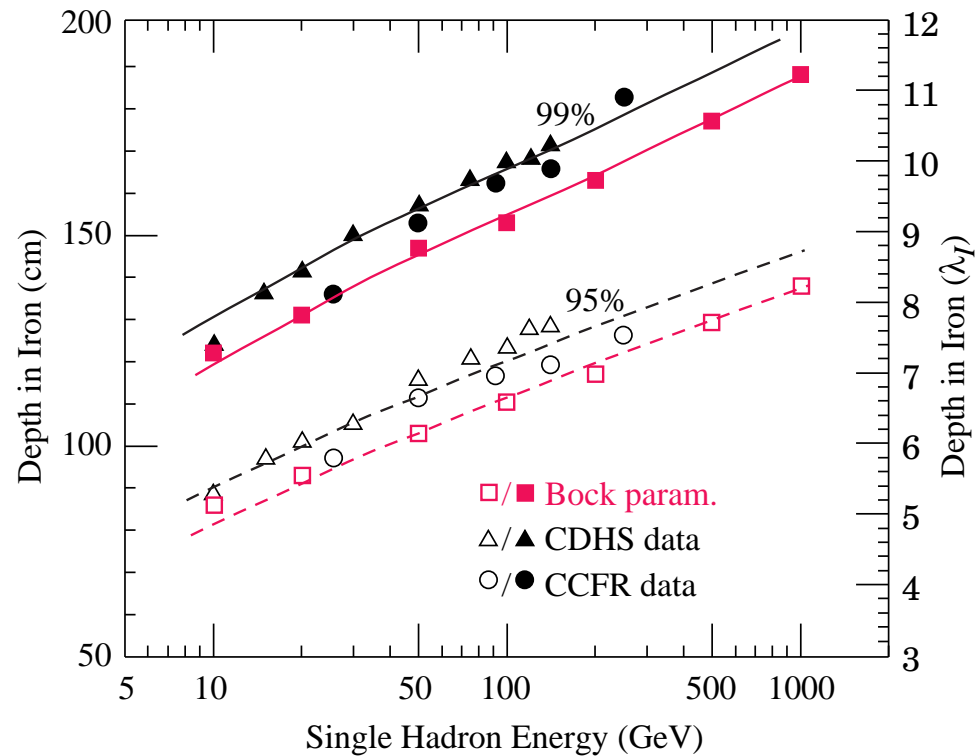
Długość kaskady skaluje się w λ_I

Pozycja maksimum [λ_I]:

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



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

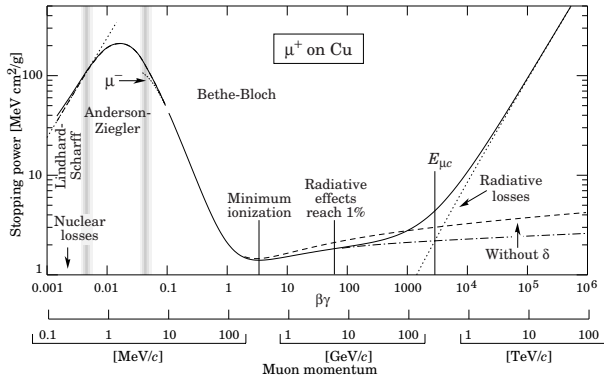


również rośnie logarytmicznie z energią

Liczniki gazowe

Jonizacja w gazach

Straty energii na jonizację mówią nam o tym ile energii traci przechodząca cząstka.



Rozkład przekazów energii

$$p(\Delta E) \sim \frac{1}{\Delta E}$$

Wybite elektrony mają często energię wystarczającą do wtórnej jonizacji

Średnio całkowita jonizacja w gazie (N_T) jest 2-3 razy większa niż jonizacja pierwotna (N_P).

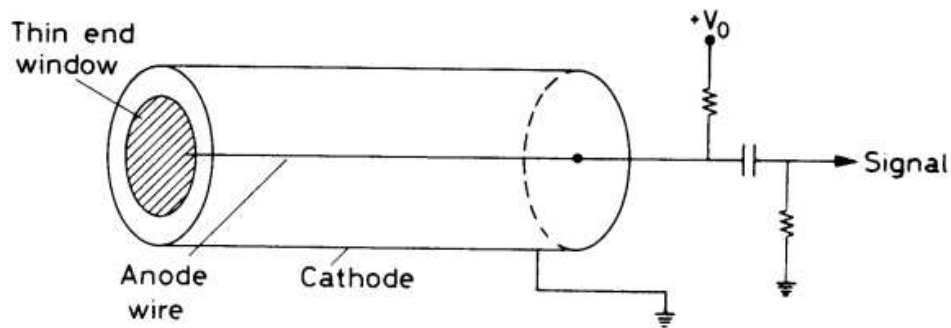
Jonizacja cząstki minimalnej jonizacji (MIP) na 1 cm gazu:

	N_P	N_T
Ne	13	50
Ar	25	106
Xe	41	312
CH ₄	37	54
CO ₂	35	100

Liczniki gazowe

Budowa

Najprostszy licznik gazowy

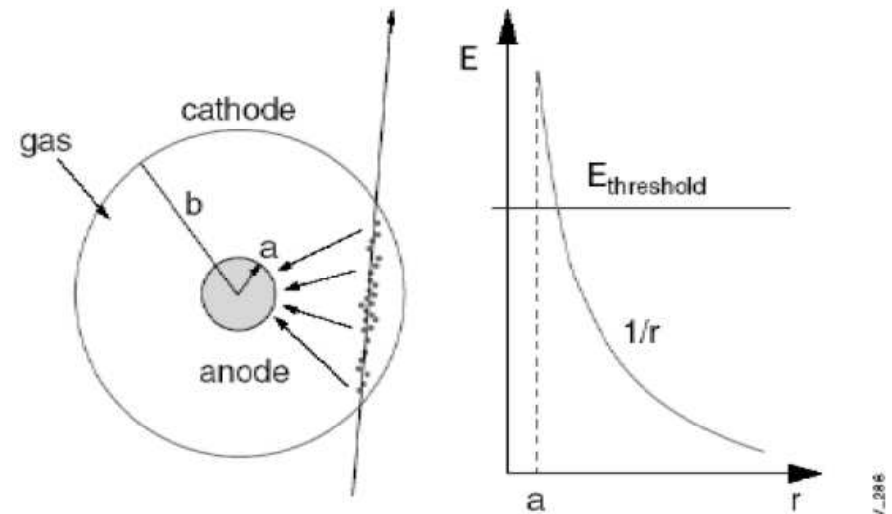


np. licznik Geigera-Mülera

Wpadająca cząstka jonizuje gaz między elektrodami.

Przyłożone napięcie + swobodne nośniki

⇒ mierzymy przepływ prądu
(impuls ładunku)

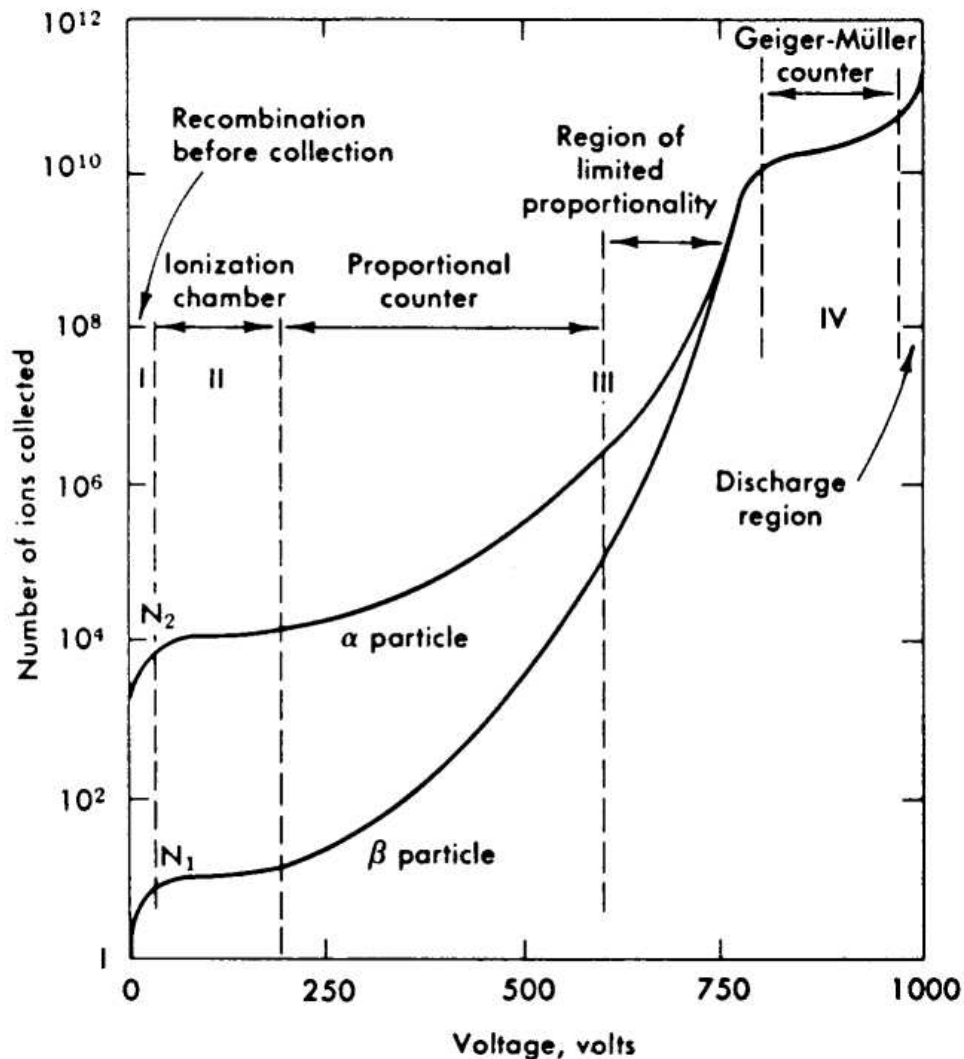


W geometrii cylindrycznej pole elektryczne zależy od odległości od drutu

Przy określonym napięciu pole przy drucie rośnie z malejącą średnicą drutu

Liczniki gazowe

Mody pracy



Tryb pracy komory zależy od przyłożonego napięcia.

Wszystkie mody pracy są wykorzystywane w praktyce.

Najczęściej wykorzystywany jest tryb licznika proporcjonalnego, gdyż pozwala na pomiar początkowej jonizacji.

Liczniki gazowe

Wzmocnienie gazowe

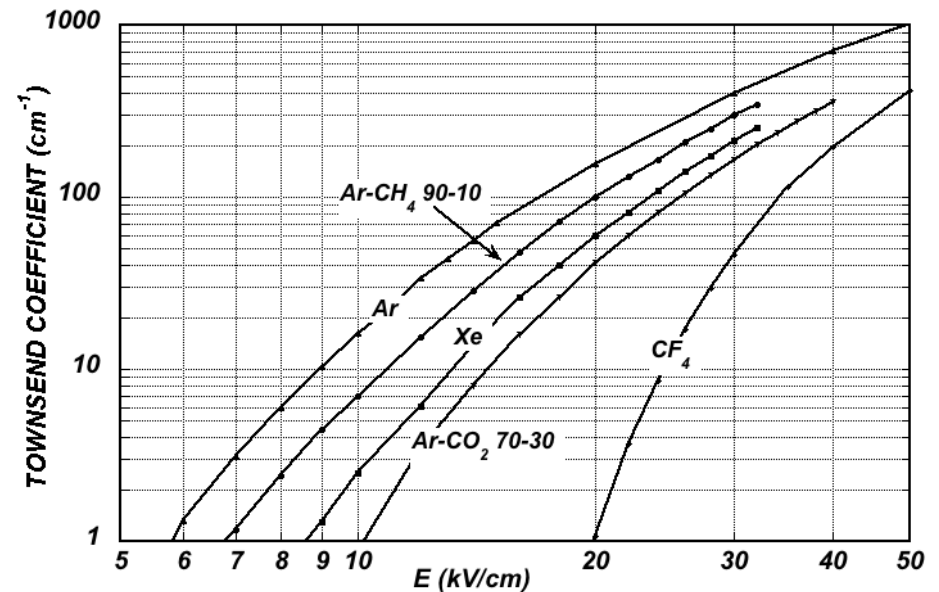
Elektron dryfujący w polu elektrycznym, jeśli jest ono wystarczająco silne, może między kolejnymi zderzeniami zyskać energię wystarczającą do jonizacji kolejnych atomów.

Pierwszy **współczynnik Townsend'a** określa ile nowych elektronów powstaje na jednostkę drogi:

$$dn = \alpha \cdot n_0 dx$$

$$\Rightarrow n = n_0 e^{\alpha x}$$

w jednorodnym polu



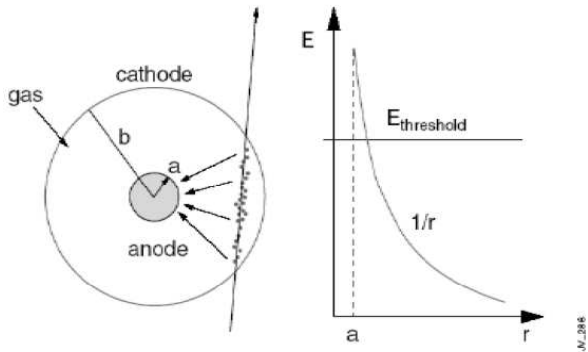
W pierwszym przybliżeniu otrzymujemy eksponencjalną zależność od napięcia

$$n = n_0 e^{\eta(V-V_0)}$$

wzmocnienie gazowe

Liczniki gazowe

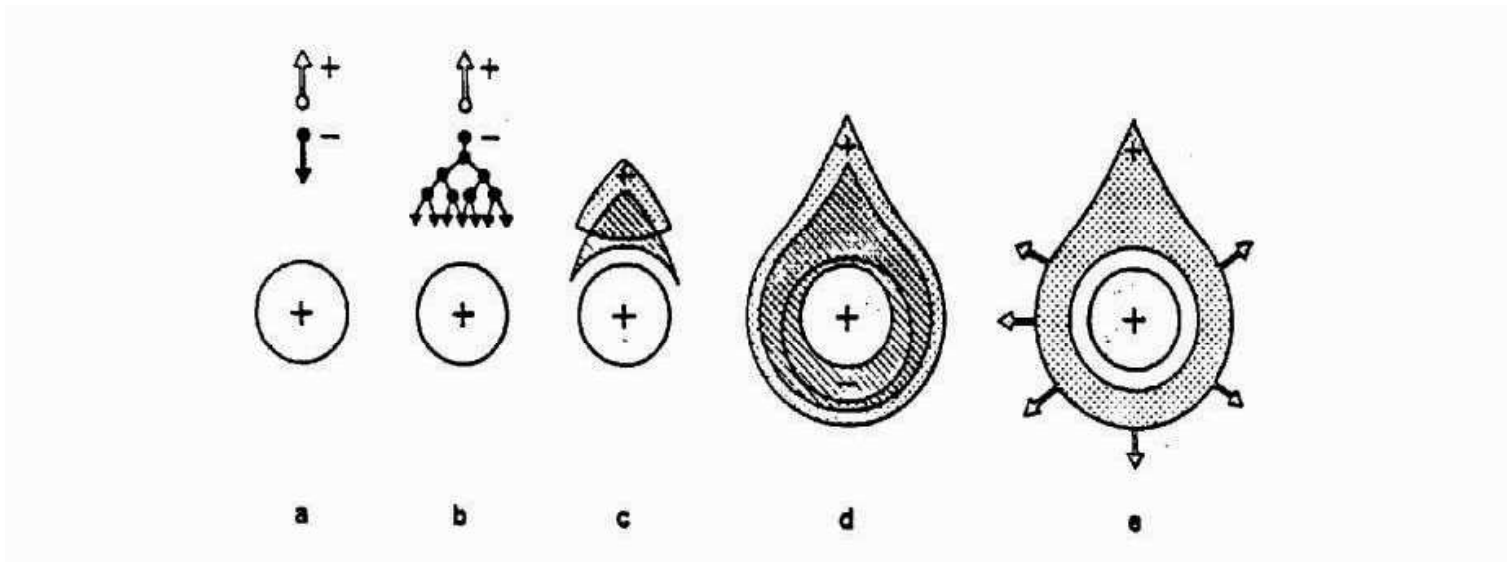
Wzmocnienie gazowe



Warunki odpowiednie do wzmocnienia gazowego najłatwiej wytworzyć w bezpośrednim sąsiedztwie **cienkiego drutu**

Możliwe jest powielenie ładunku o czynnik $10^4 - 10^5$

W modzie ograniczonej proporcjonalności nawet do 10^{10}



Liczniki gazowe

Dobór gazu

Najlepszy wybór powinien zapewnić:

- niskie napięcie pracy
- wysokie wzmocnienie gazowe
- proporcjonalny mod pracy
- krótki czas martwy

Ze względu na wysoką jonizację często używany jest argon (Ar)

Wzbudzone atomy Ar ($\Delta E = 11.6eV$) emitują fotony, które mogą wybijać elektron z katody.

Może to prowadzić do wyładowania.

W czystym argonie nie można uzyskać wzmocnienia większego niż $10^3 - 10^4$

Aby zwiększyć wzmocnienie trzeba dodać inny gaz, który będzie tłumił wyładowania pochłaniając fotony.

Są to cząsteczki wieloatomowe (pochłanianie wzbudza mody rotacyjne): metan, alkohole, BF_3 , CO_2 .

Wystarczy niewielka domieszka.

Typowa mieszanka $90\%Ar + 10\%CH_4$
 \Rightarrow wzmocnienie do 10^6 .

Liczniki gazowe

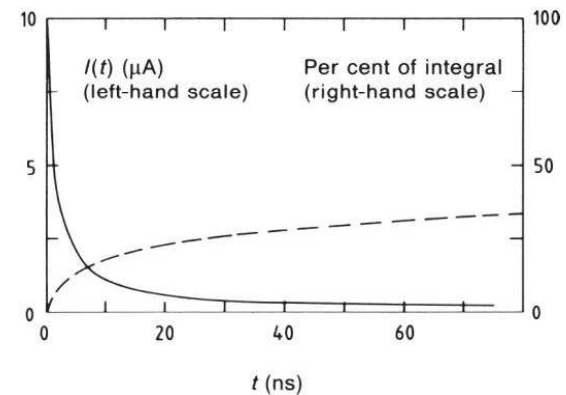
Odczyt

W wyniku przejścia cząstki cząstki rejestrowany jest impuls ładunku.

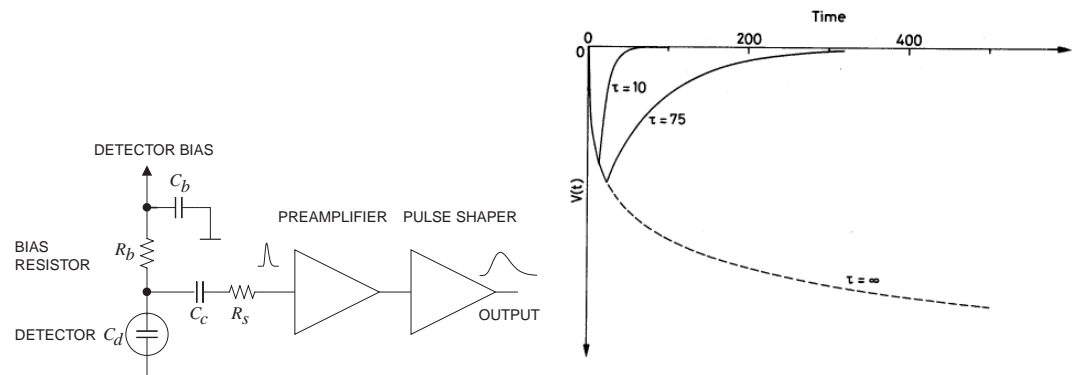
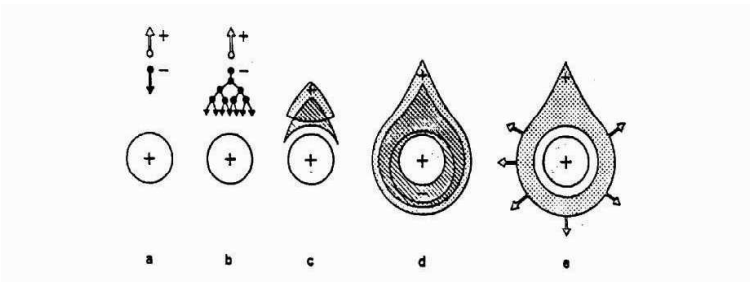
Jedynie $\sim 1 - 2\%$ tego impulsu powstaje w momencie gdy elektrony z kaskady otaczającej drut docierają do jego powierzchni.

Większość rejestrowanego ładunku indukuje się w wyniku dryfu jonów.

Oczekiwany przepływ ładunku:



Typowy układ i kształt impulsu:

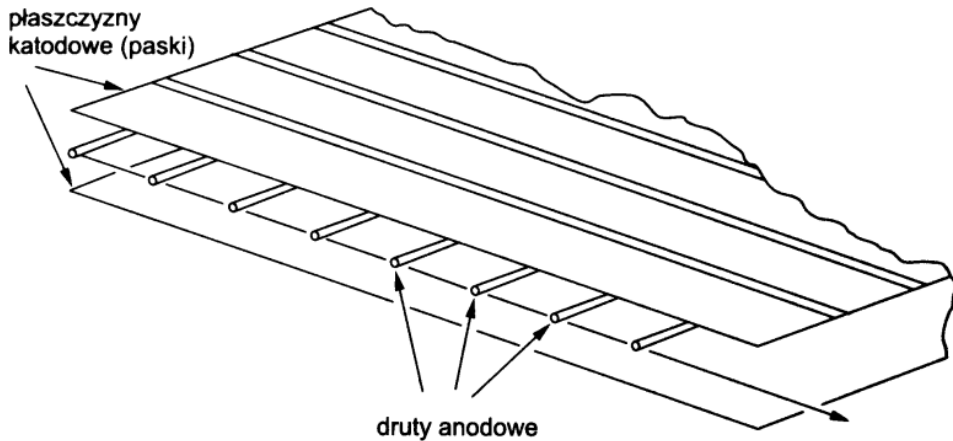


Liczniki gazowe

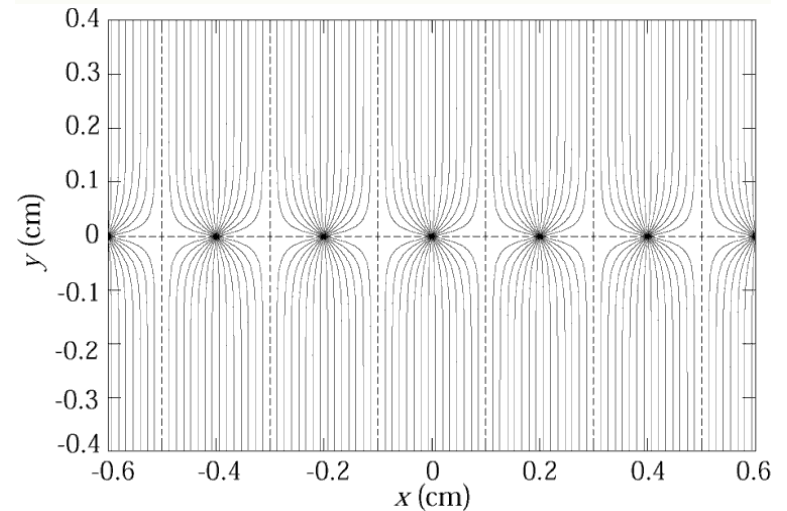
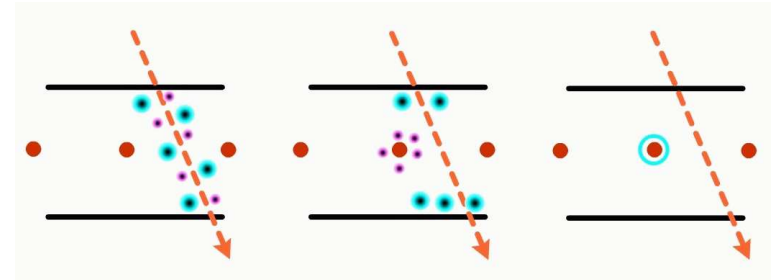
Komory wielodrutowe

MWPC - Multi Wire Proportional Chamber

Wiele równoległych drutów (anod) pomiędzy dwoma płaszczyznami katodowymi.



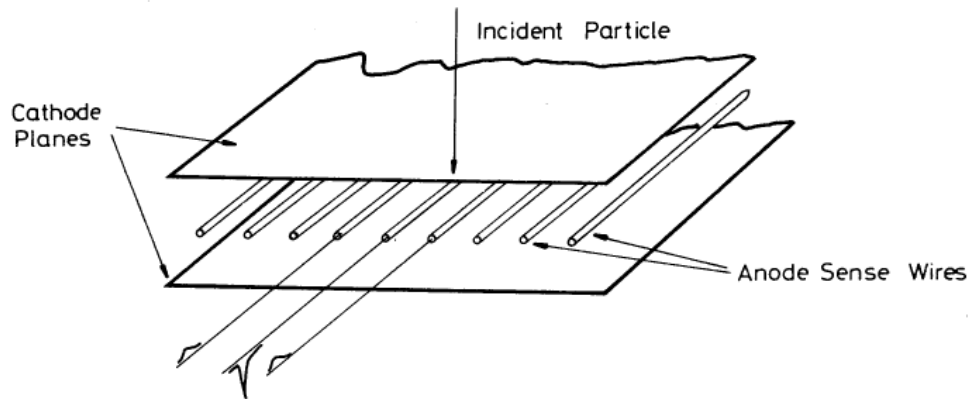
Działa tak samo jak szereg pojedynczych komór



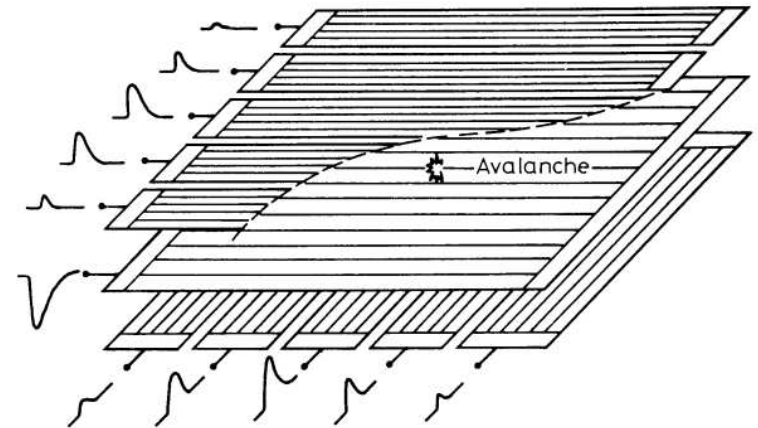
Liczniki gazowe

MWPC

Można rejestrować impulsy z poszczególnych drutów.



Można też rejestrować ładunki indukowane na katodzie.

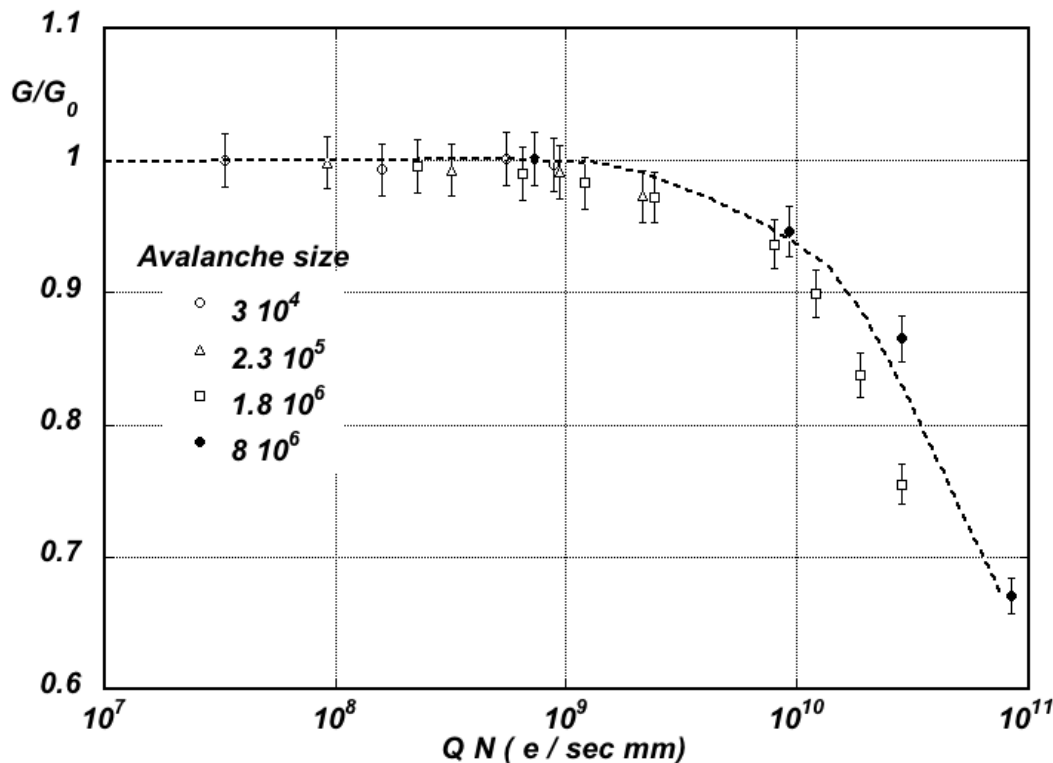


Możliwy jest podział dwóch płaszczyzn w prostopadłych kierunkach
⇒ dwuwymiarowy odczyt pozycji.

Podział ładunku pomiędzy sąsiednie paski (strips) ⇒ pozycja wyznaczana metodą środka ciężkości (CoG) może być znacznie dokładniejsza niż szerokość paska.

Liczniki gazowe

MWPC



Efektywność komór wielodrutowych spada przy wysokich strumieniach cząstek.

Wiąże się to z małą mobilnością (prędkością dryfu) powstających w wyniku wzmocnienia gazowego jonów.

“Zalegające” w pobliżu drutu jony obniżają pole elektryczne i zmniejszają wzmocnienie gazowe.

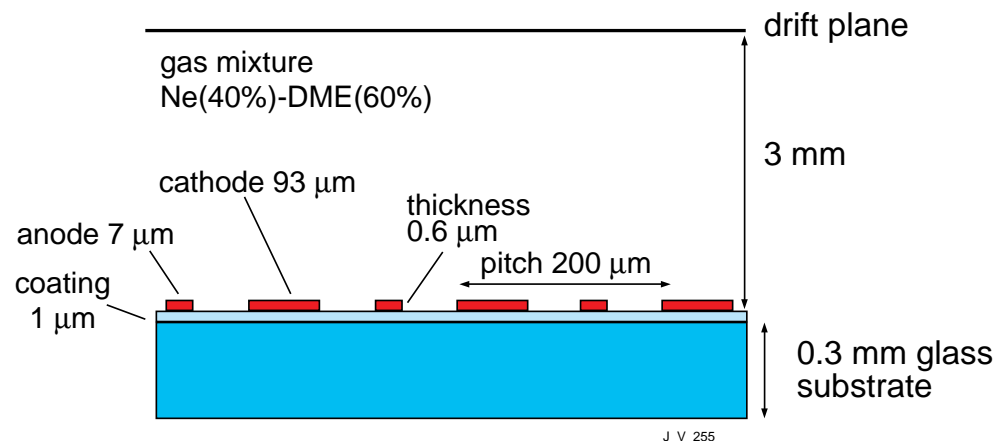
Liczniki gazowe

Nowe rozwiązania MSGC - Micro Strip Gas Chamber

Druty są słabym punktem MWPC.

Bardzo komplikują produkcję, są delikatne i nie mogą być zbyt blisko siebie - ogranicza to dokładność pomiaru.

Można je zastąpić ścieżkami drukowanymi:



Brak drutów ⇒ łatwiejszy montaż, stabilność mechaniczna.



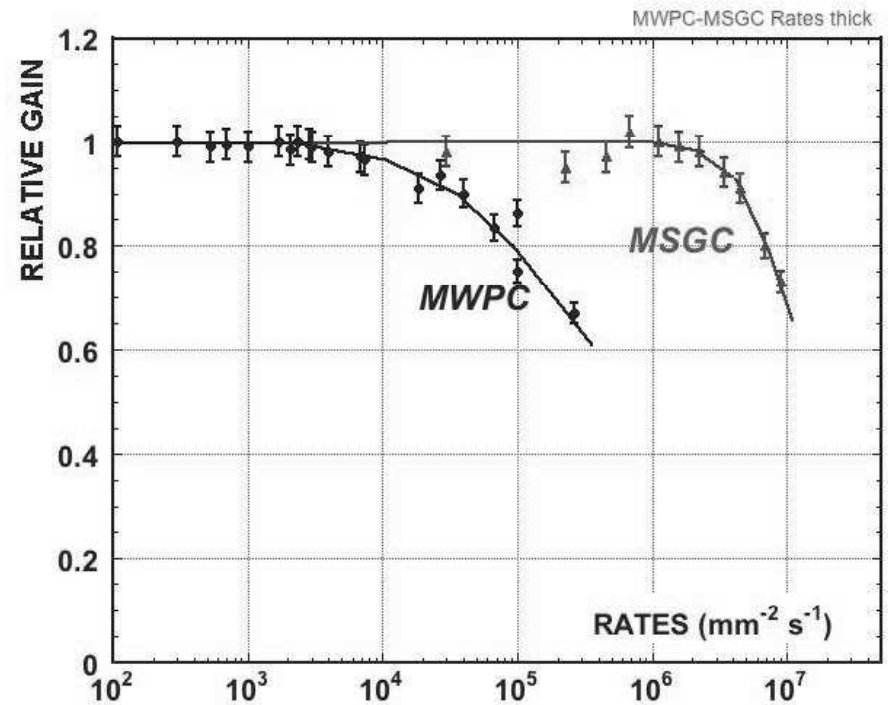
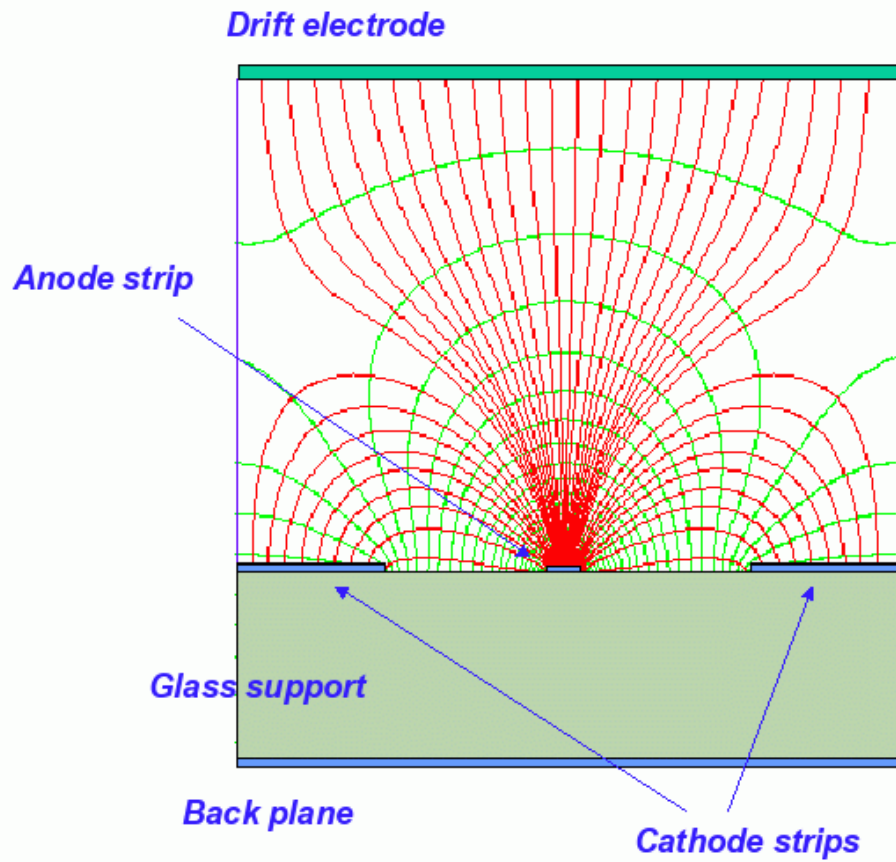
Liczniki gazowe

Nowe rozwiązania

MSGC - Micro Strip Gas Chamber

Pole elektryczne:

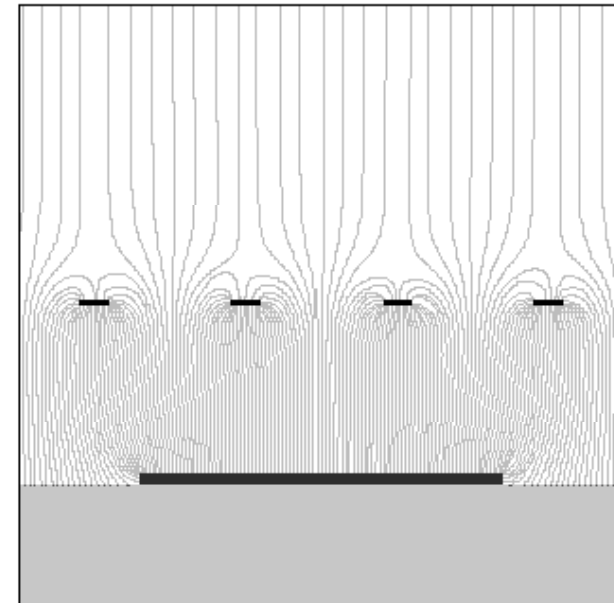
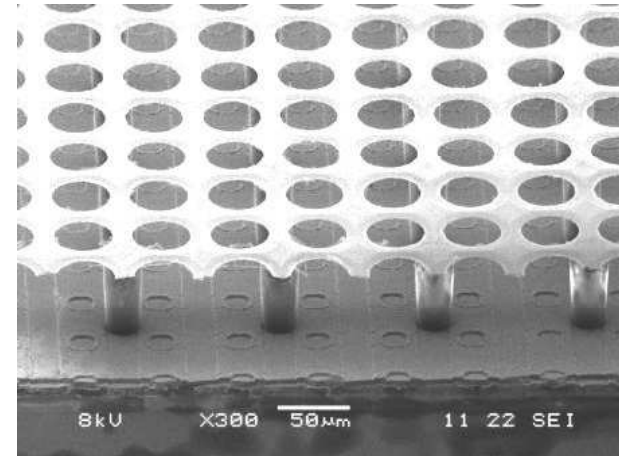
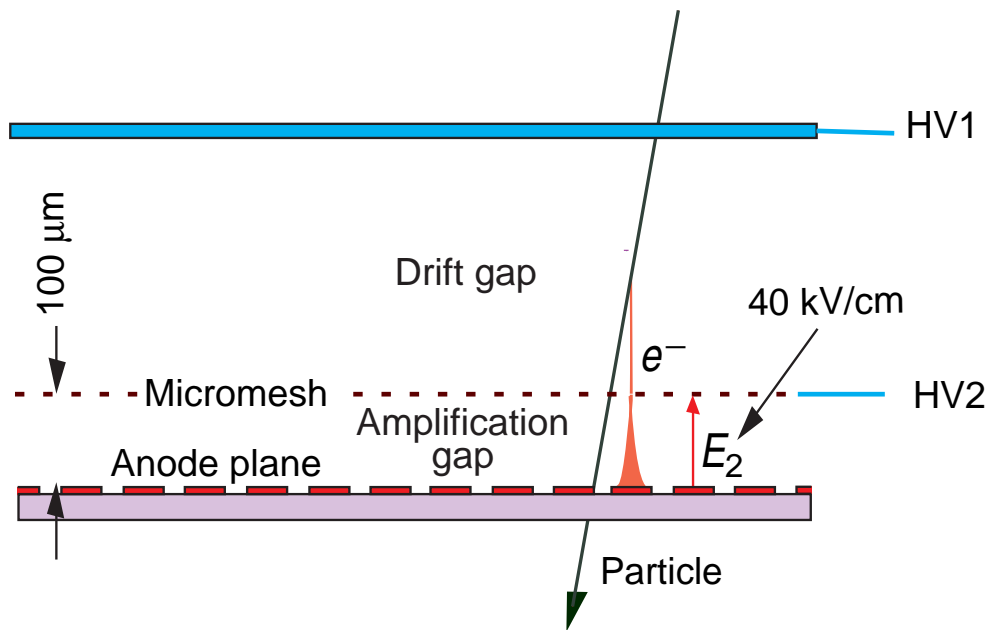
Więcej “drutów” - możliwy wyższy rate:



Liczniki gazowe

Micromegas

Wąski obszar, oddzielony siatką, w którym następuje powielanie ładunku.

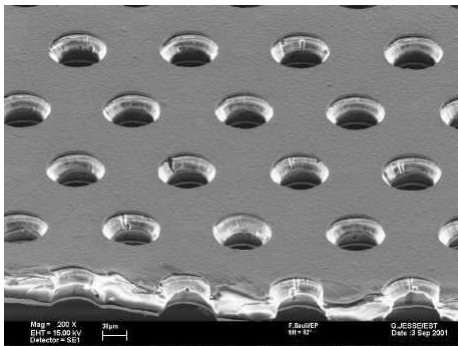
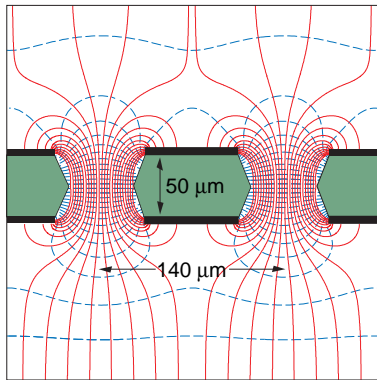


Płaszczyzna anodowa może być podzielona na dowolnie małe elementy odczytu.

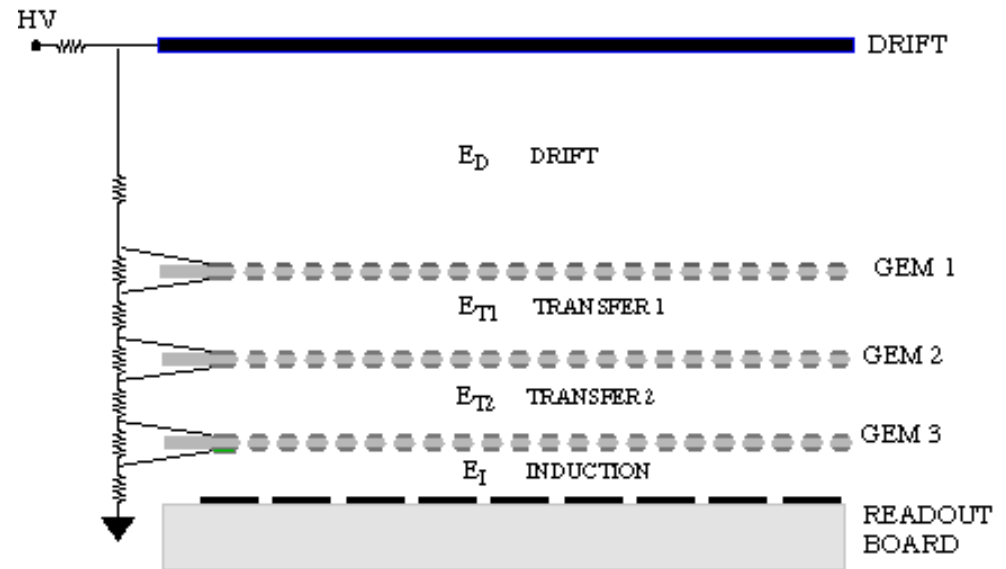
Liczniki gazowe

GEM Gas Electron Multiplier

Obszar wysokiego pola elektrycznego można też uzyskać w małych otworach dwustronnie metalizowanego izolatora



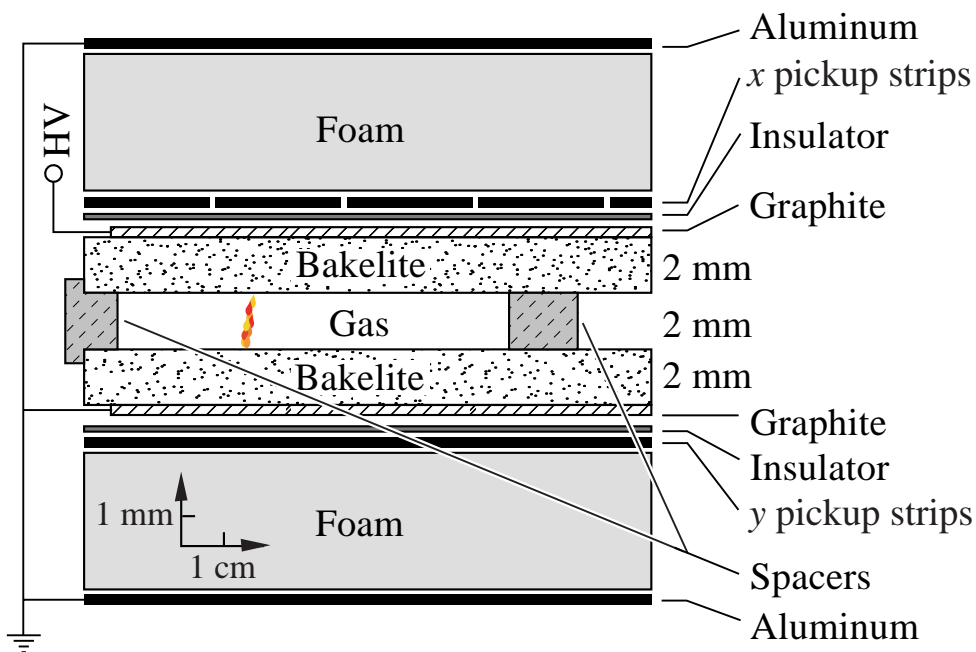
Bardzo wysokie wzmocnienie (powielenie ładunku) można uzyskać stosując kilka warstw GEM



Liczniki gazowe

RPC Resistive Plate Chambers

Współczesna wersja “komory iskrowej”



Napięcie między równoległymi płytami jest na tyle duże, że przejście cząstki powoduje wyładowanie.

Warstwa izolatora ogranicza zakres przestrzenny wyładowania.

bakielit ($\rho = 10^{10} - 10^{12} \Omega cm$)
lub szkło ($\rho = 10^{12} - 10^{13} \Omega cm$)

Wyładowanie obniża lokalną efektywność rejestracji.

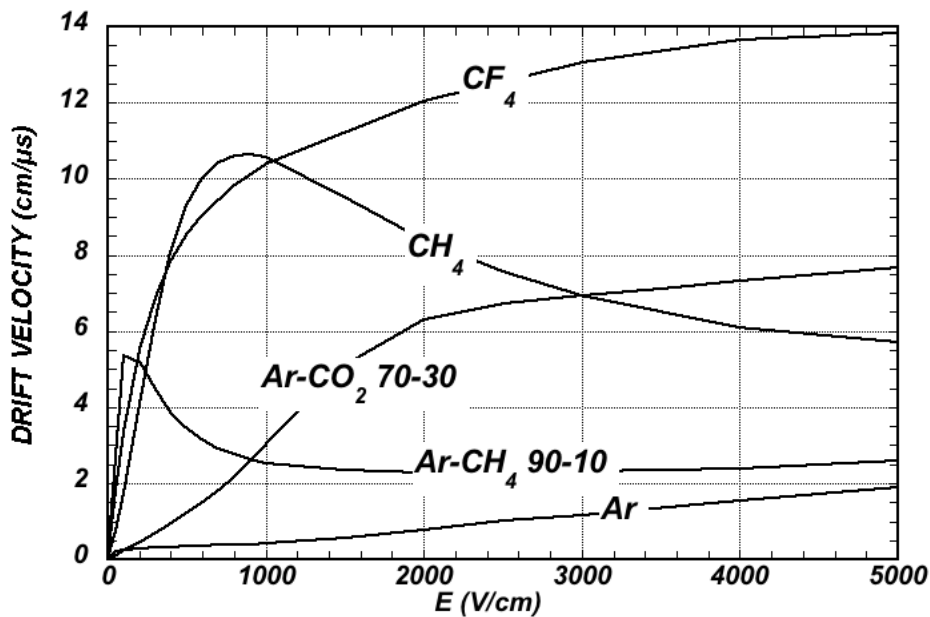
Czas relaksacji rzędu $\mu s - s$

\Rightarrow ograniczenie do $\sim kHz/cm^2$

Liczniki gazowe

Dryf ładunków

Prędkość dryfu elektronów w gazie
w funkcji natężenia pola:



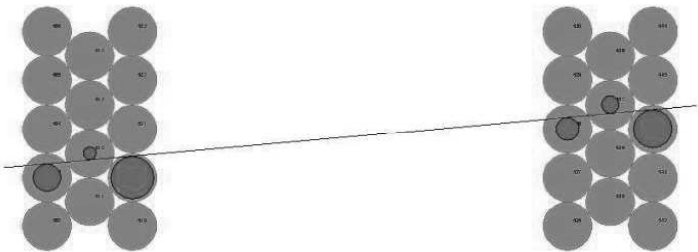
Prędkość dryfu bardzo zależy do mieszanki gazowej i od przyłożonego napięcia.

Dla niektórych mieszanek prędkość dryfu bardzo słabo zależy od napięcia (w pewnym przedziale wartości) ⇒ korzystny wybór dla układów o niejednorodnym polu

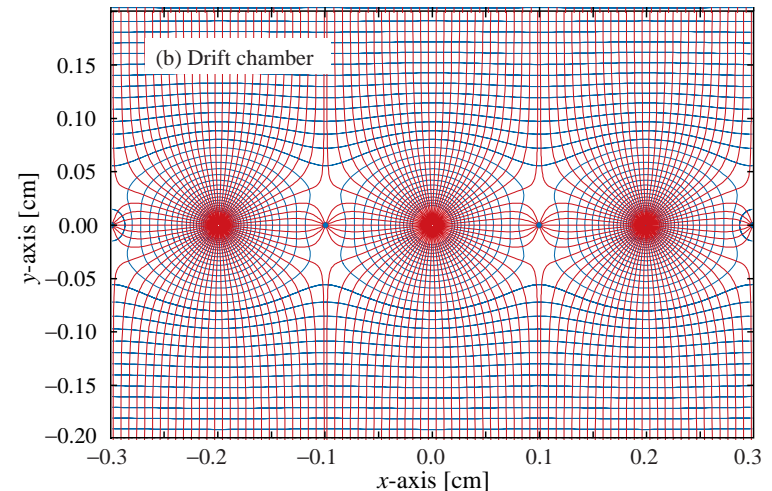
Liczniki gazowe

Komora dryfowa

Pomiar czasu dryfu elektronów umożliwia rekonstrukcję pozycji przechodzącej cząstki. Możliwe jest to nawet w przypadku zwykłych komór A także w przypadku komór typu MWPC



Komory mionowe dla eksperymentu ATLAS



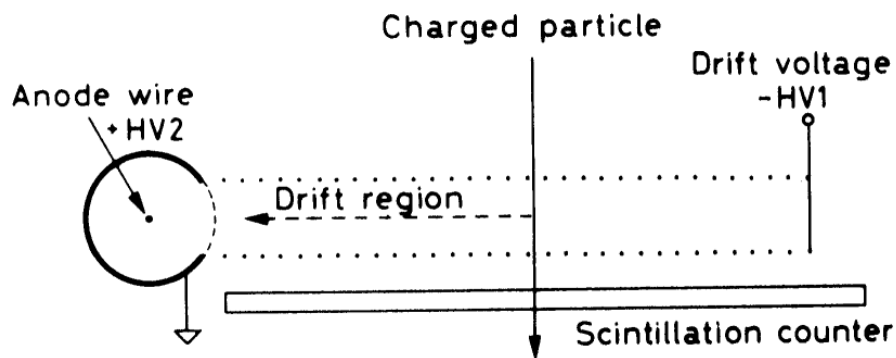
dodatkowe druty zwiększają efektywność zbierania ładunku

Liczniki gazowe

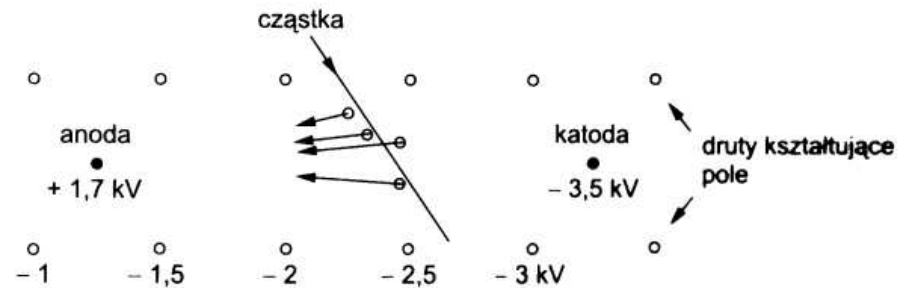
Komora dryfowa

Ale najczęściej spotykamy konstrukcje dedykowane do pomiaru czasu dryfu

Konstrukcja pojedynczej komory



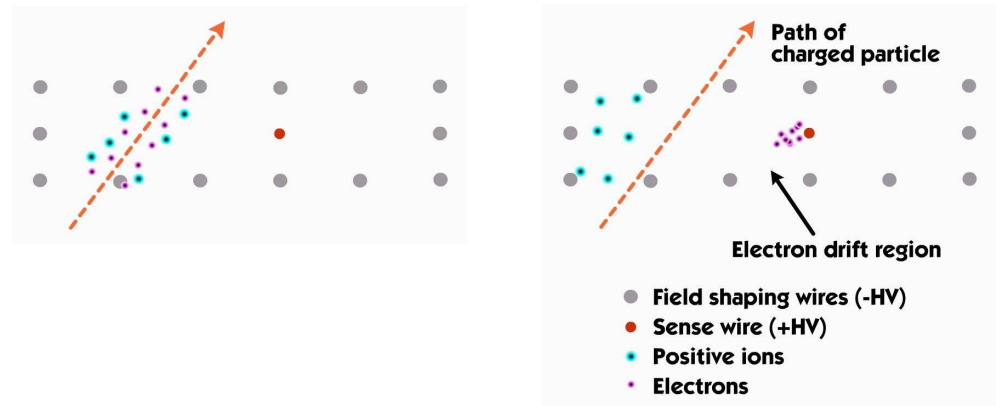
Wersja uproszczona:



Wysoka jednorodność pola.

Możliwe długości dryfu do kilku cm.

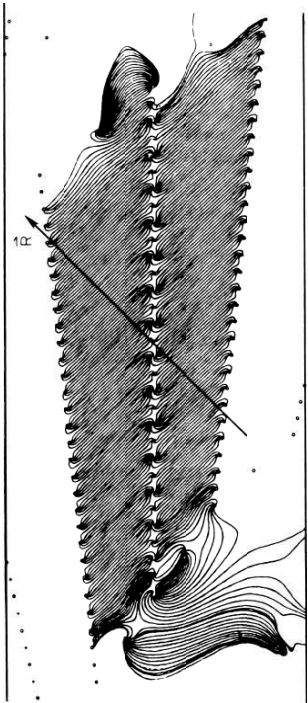
Pomiar czasu dryfu "wyzwalany" innym detektorem



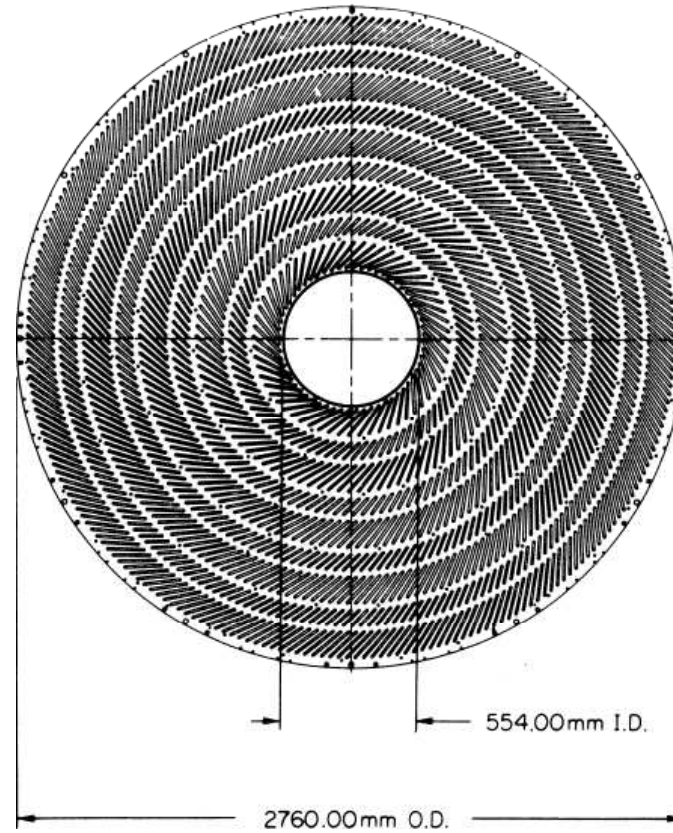
Liczniki gazowe

Komora dryfowa

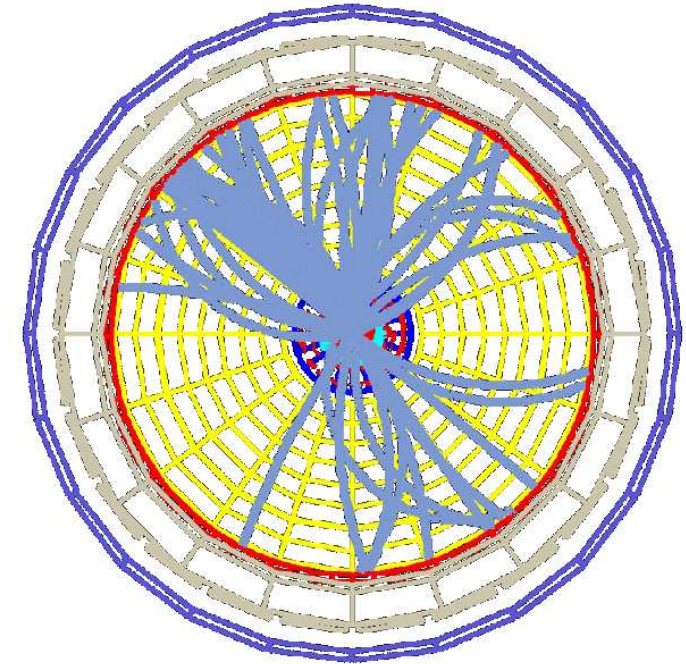
Pojedyncza cela komory dryfowej detektora CDF przy Tevatronie:



Pełen detektor



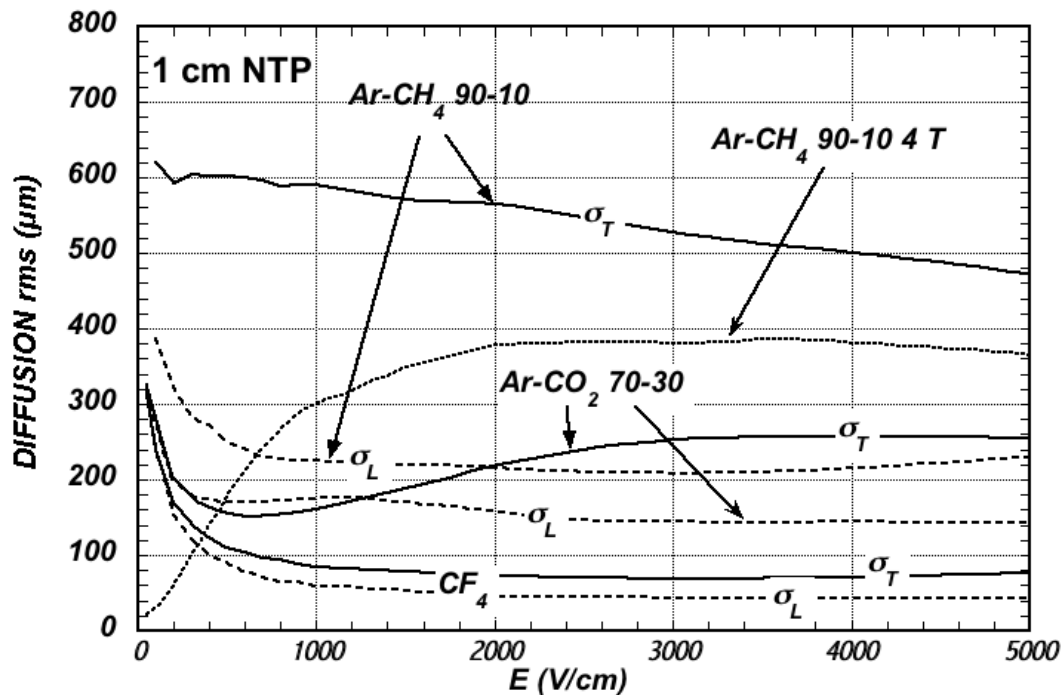
Rekonstruowany przypadek



Liczniki gazowe

Komora dryfowa

Dokładność pomiaru pozycji cząstki jest ograniczona przez dyfuzję ładunku



Dyfuzja w kierunku poprzecznym do kierunku dryfu (σ_T) większa niż wzdłuż kierunku dryfu (σ_L)

Pole magnetyczne wzdłuż kierunku dryfu zmniejsza dyfuzję ładunku

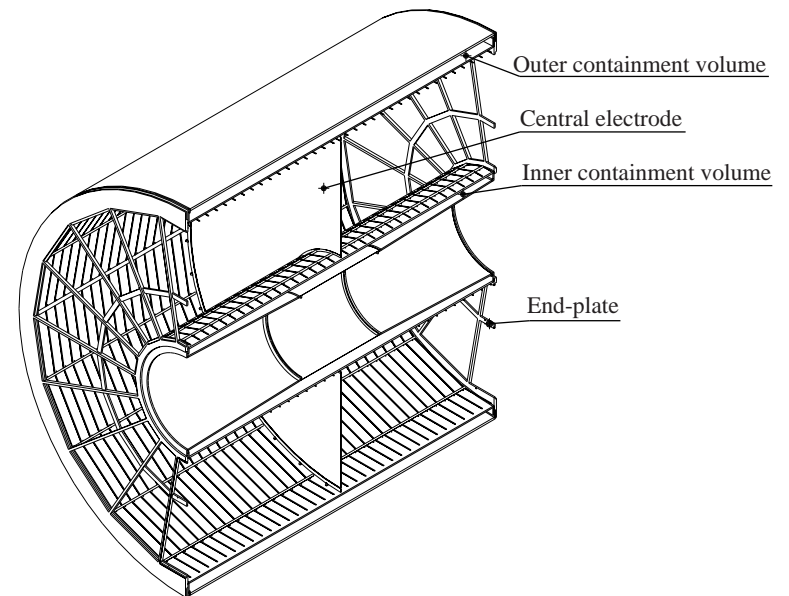
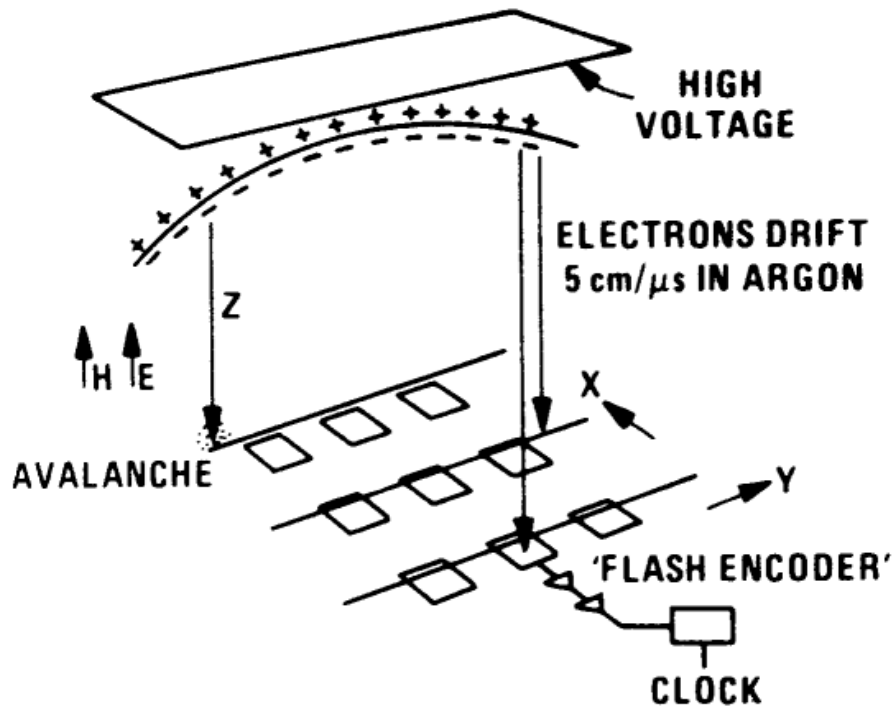
Możliwe zmniejszenie dyfuzji nawet o czynnik ~ 10

Liczniki gazowe

Komora projekcji czasowej TPC

Idea: komora wielodrutowa z bardzo długim obszarem dryfu

Typowa konstrukcja



ALICE TPC (5m długości, 5m średnicy)

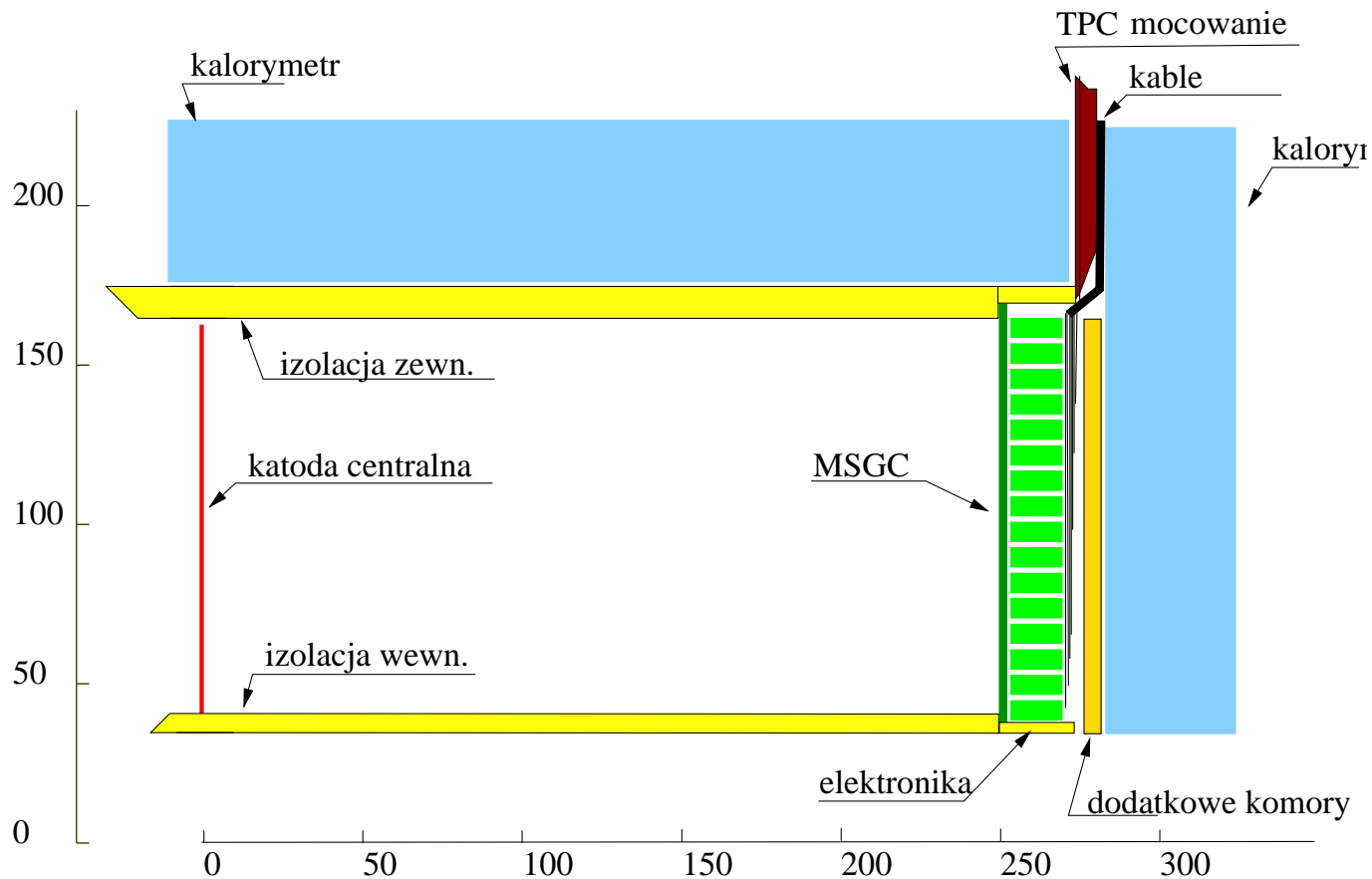
Długa droga dryfu

⇒ duże opóźnienie sygnału (10 – 100μs)

Liczniki gazowe

Komora projekcji czasowej TPC

Przekrój poprzeczny 1/4 komory



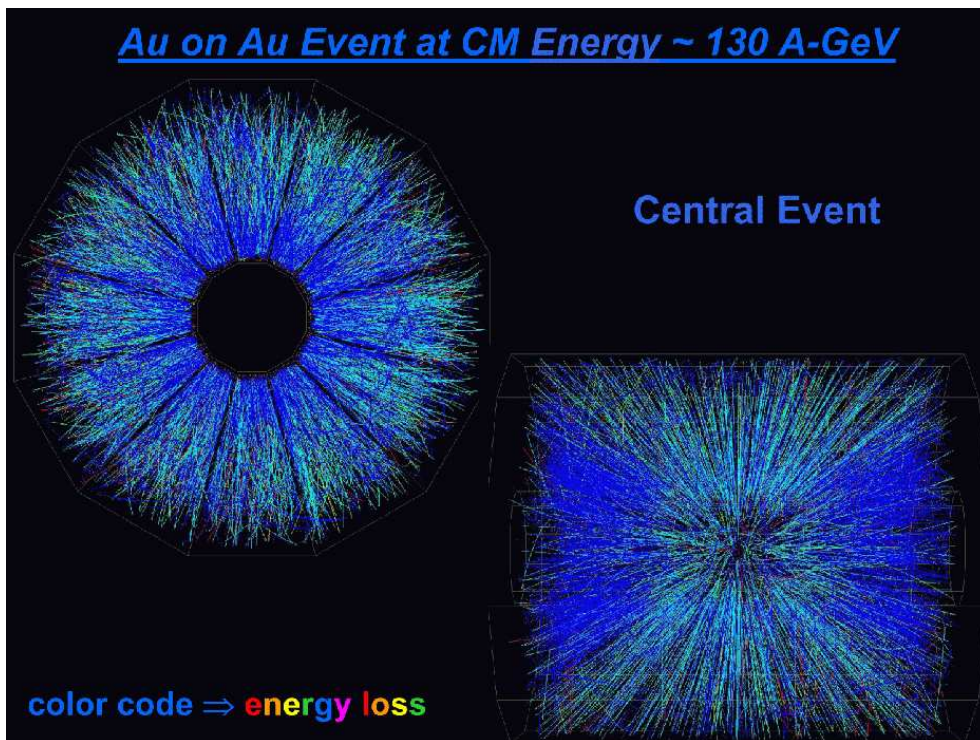
Ogromna zaleta: bardzo mało materiału (tylko gaz) - cząstki nie oddziałują

Liczniki gazowe

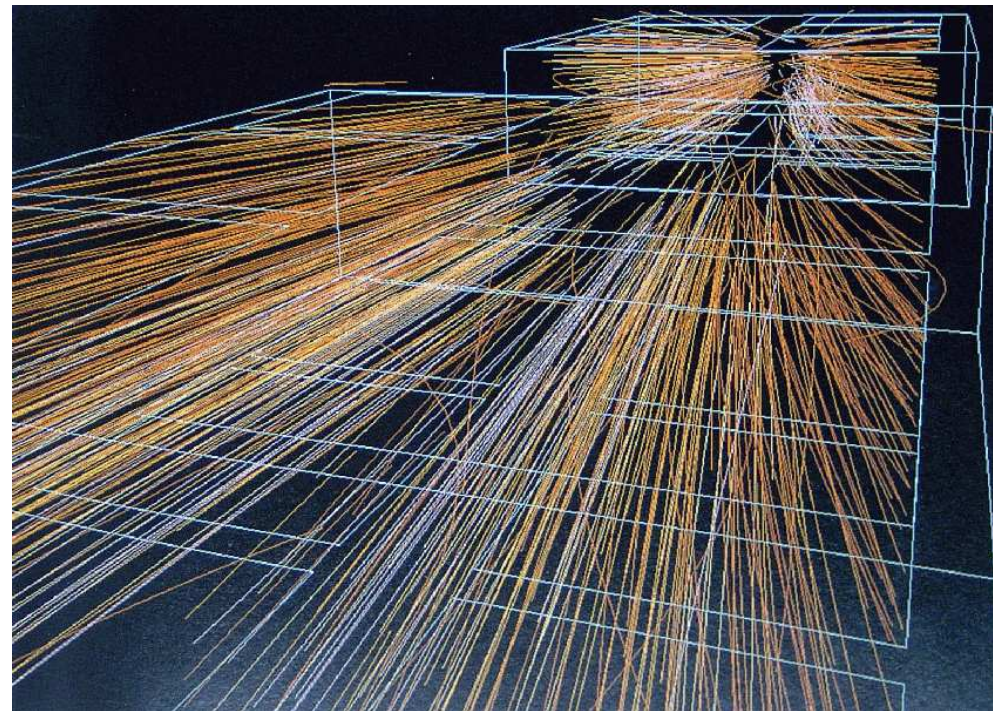
Komora projekcji czasowej TPC

TPC zapewnia bardzo dokładną rekonstrukcję torów także przy wysokiej krotności
Możliwy też dokładny pomiar jonizacji (identyfikacja cząstek)

STAR



NA49



Liczniki gazowe

Komora projekcji czasowej TPC

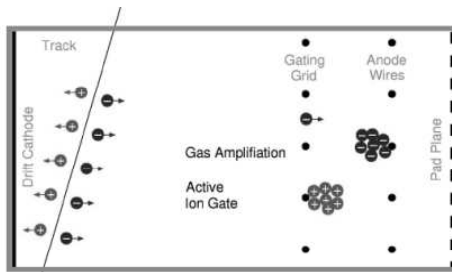
TPC są powszechnie używane w FWE

Zasada ich działania praktycznie się nie zmieniła

Zmieniają się wciąż metody odczytu - można stosować wszystkie technologie detektorów gazowych: MSGC, Micromegas, GEM...

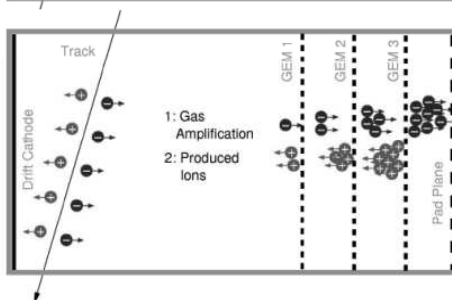
Ion Back-Drift

LEP: Gating between bunches
 $\Delta t = 22 \mu\text{s}$



ILC: Length of bunch train
 $2820 \times 337 \text{ ns} = 950 \mu\text{s}$

Drift time is about $50 \mu\text{s}$,
no Gating between
individual events possible



Istotnym ograniczeniem, podobnie jak w przypadku innych detektorów gazowych są gromadzące się jony dodatnie.

Niezbędne efektywne oddzielenie obszaru aktywnego od obszaru powielania ładunku