

Metody eksperymentalne w fizyce wysokich energii

prof. dr hab. A.F.Żarnecki

Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych IFD

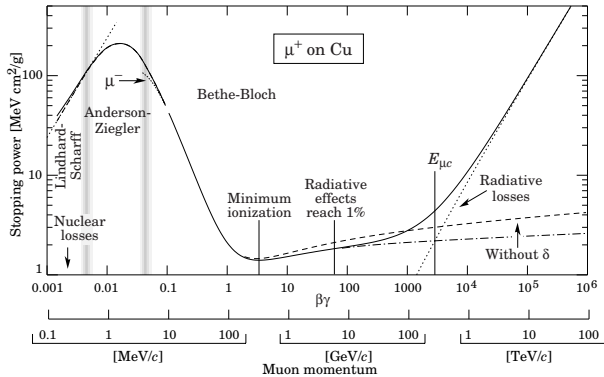
Wykład III

- Detektory gazowe
- Liczniki scyntylicyjne

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).

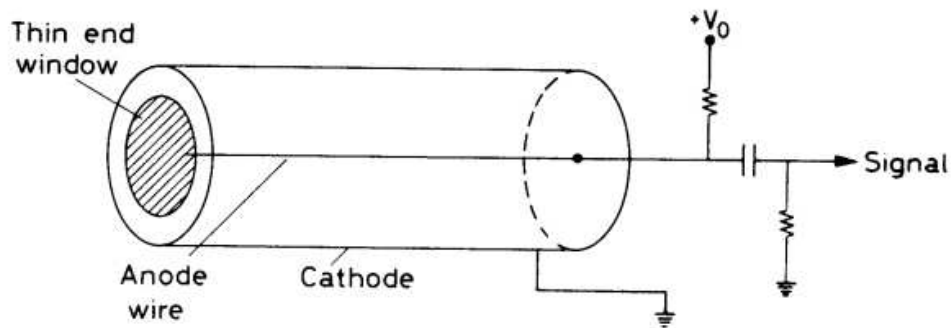
Jonizacja cząstki minimalnej jonizacji (MIP) na 1 cm gazu:

	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

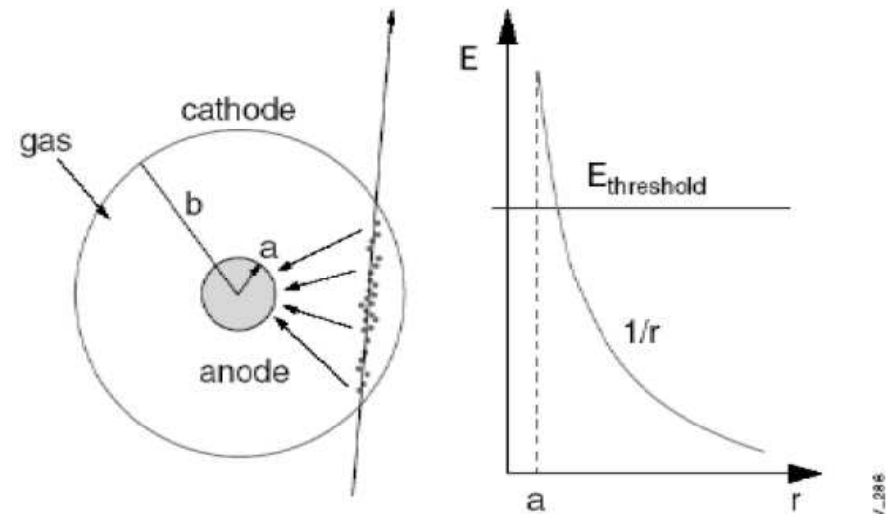


np. licznik Geigera-Mülera

Wpadająca cząstka jonizuje gaz między elektrodami.

Przyłożone napięcie + swobodne nośniki

⇒ mierzymy przepływ prądu
(impuls ładunku)

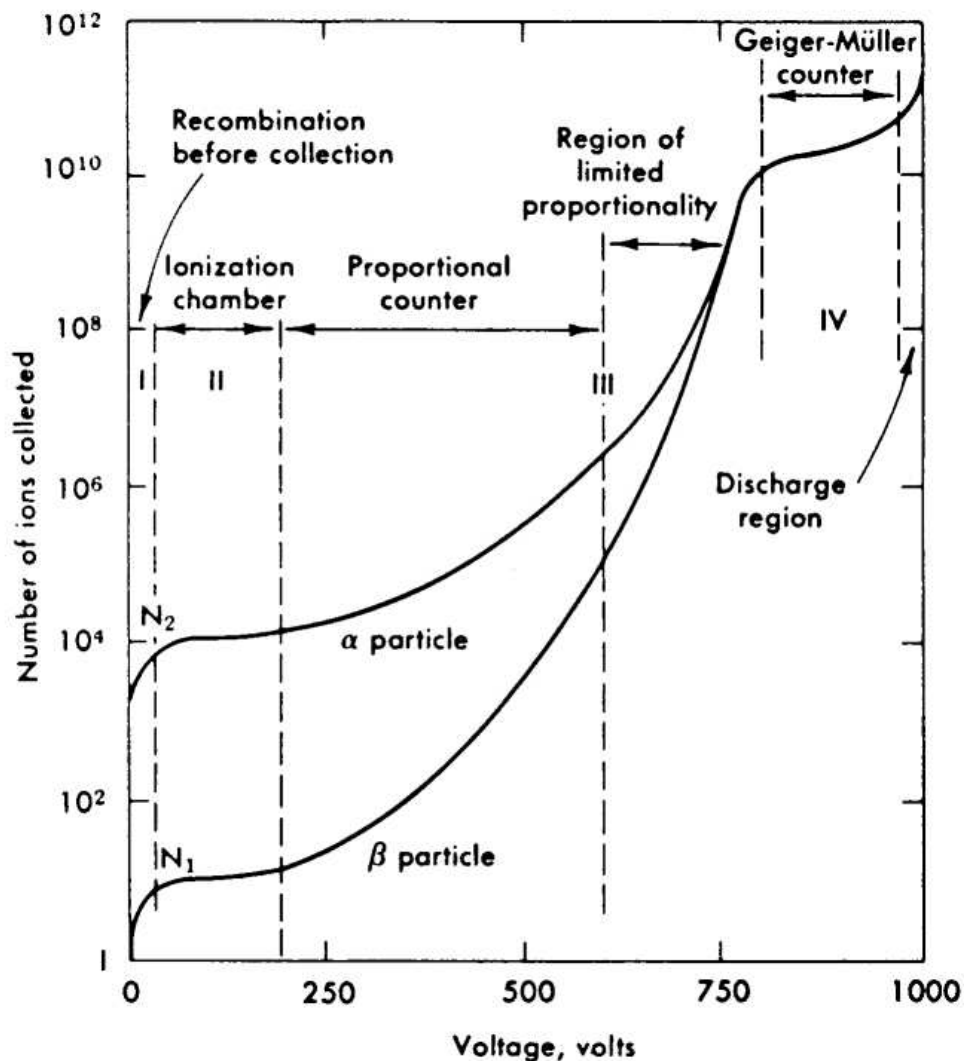


W geometrii cylindrycznej pole elektryczne zależy od odległości od drutu

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.

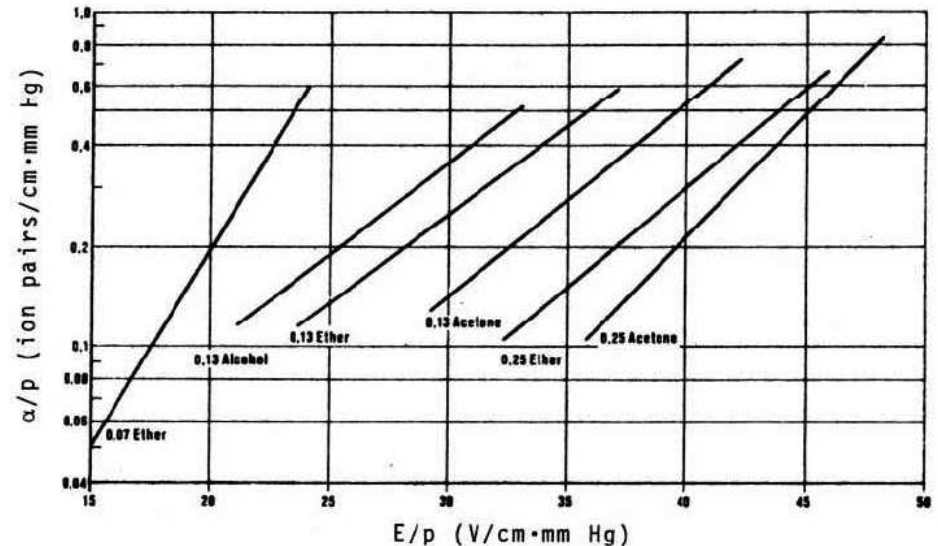
Pierwszy **współczynnik Townsend'a** określa ile nowych elektronów powstaje na jednostkę drogi:

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

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

w jednorodnym polu

Proporcjonalność załamuje się dla $\alpha x \sim 20$



W pierwszym przybliżeniu otrzymujemy eksponencjalną zależność od napięcia

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

Liczniki gazowe

Wzmocnienie gazowe

Przybliżenie Korff'a

$$\alpha = p \cdot A \cdot \exp\left(-\frac{B p}{E}\right)$$

p - ciśnienie

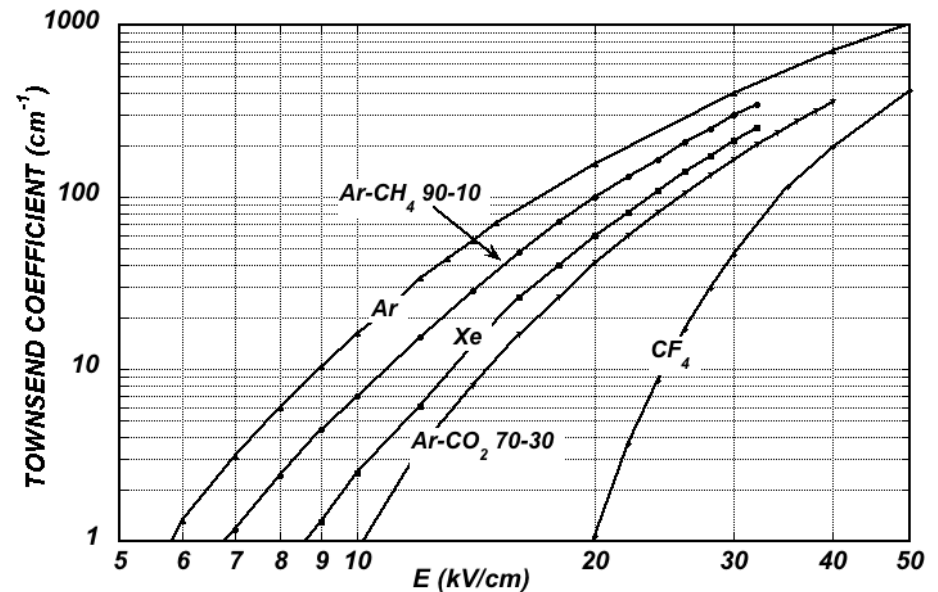
E - natężenie pola

A i B - współczynniki zależne od gazu

Dla argonu:

$$A = 14 \frac{1}{\text{mm Hg} \cdot \text{cm}}$$

$$B = 180 \frac{V}{\text{mm Hg} \cdot \text{cm}}$$

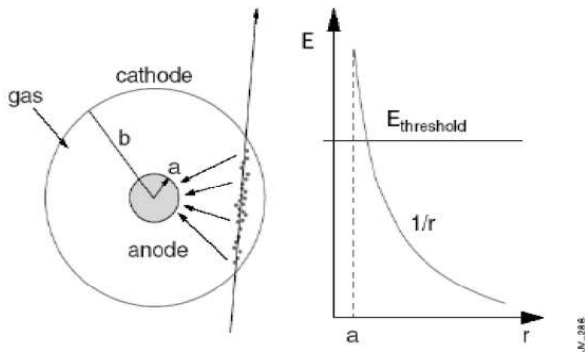


Wzmocnienie gazowe:

$$M = \exp\left(\int_{r_1}^{r_2} \alpha(r) dr\right)$$

Liczniki gazowe

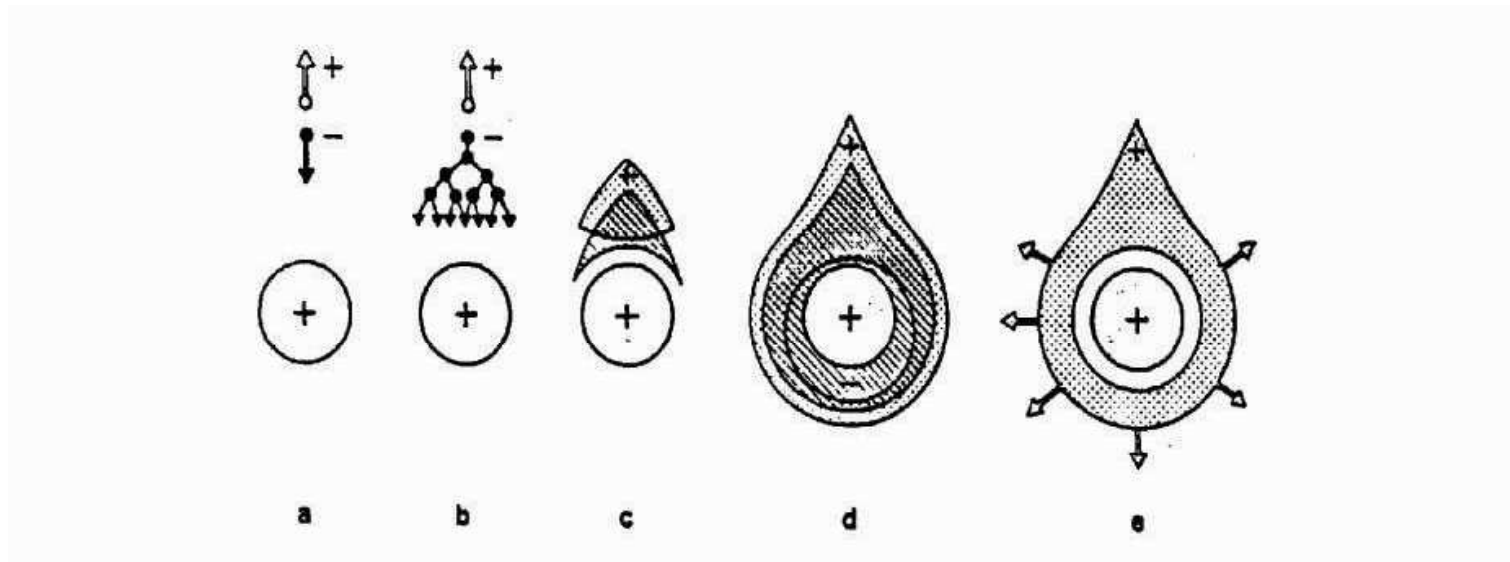
Wzmocnienie gazowe



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 .

Aby liczniki dobrze pracowały muszą być szczelne. Nawet śladowa domieszka powietrza (tlenu) lub pary wodnej "gasi" licznik - jest to wynikiem wychwytywania elektronów przez cząsteczki tlenu.

Liczniki gazowe

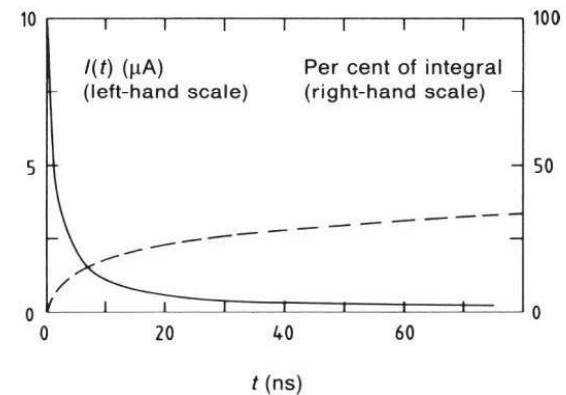
Odczyt

W wyniku przejścia cząstki cząstki rejestrowany jest impuls ładunku.

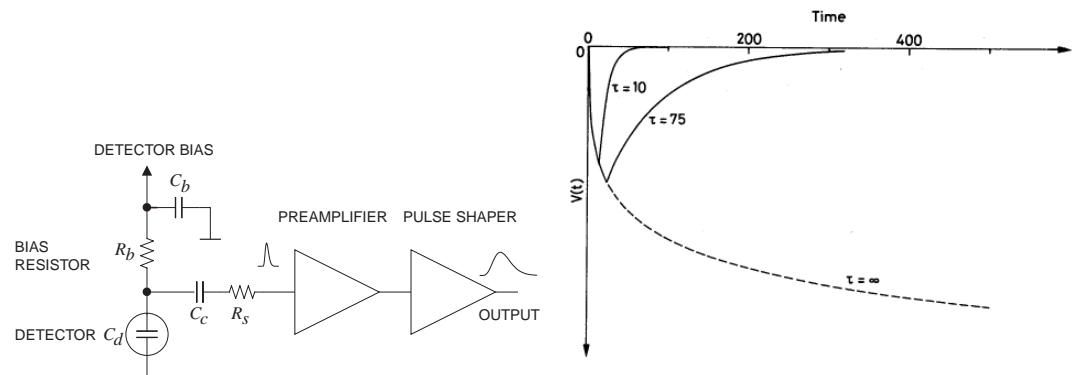
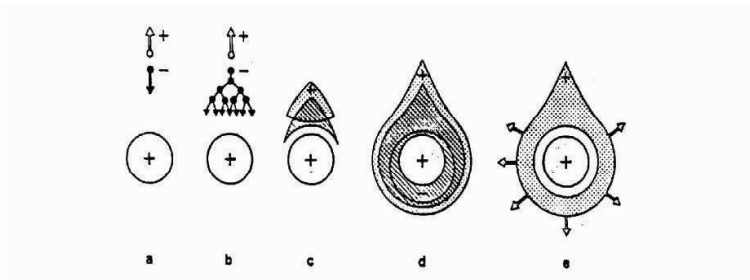
Jedynie $\sim 1 - 2\%$ tego impulsu powstaje w momencie gdy elektrony z kaskady otaczającej drut docierają do jego powierzchni.

Większość rejestrowanego ładunku indukuje się w wyniku dryfu jonów.

Oczekiwany przepływ ładunku:



Typowy układ i kształt impulsu:

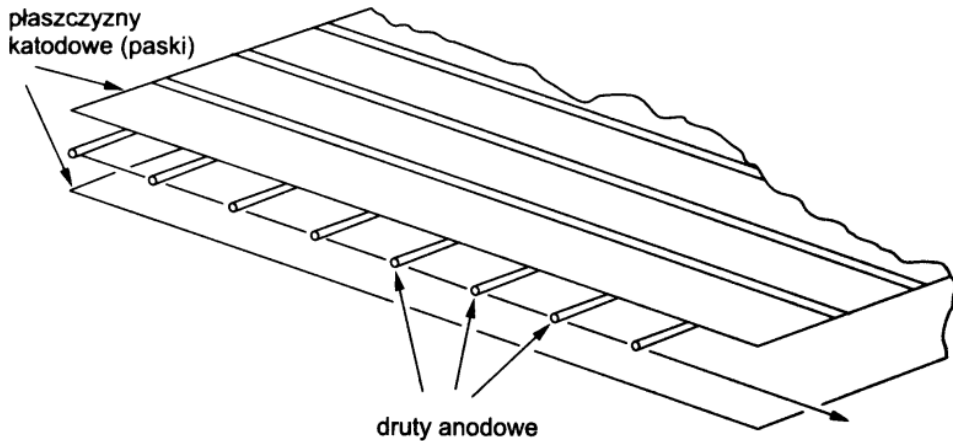


Liczniki gazowe

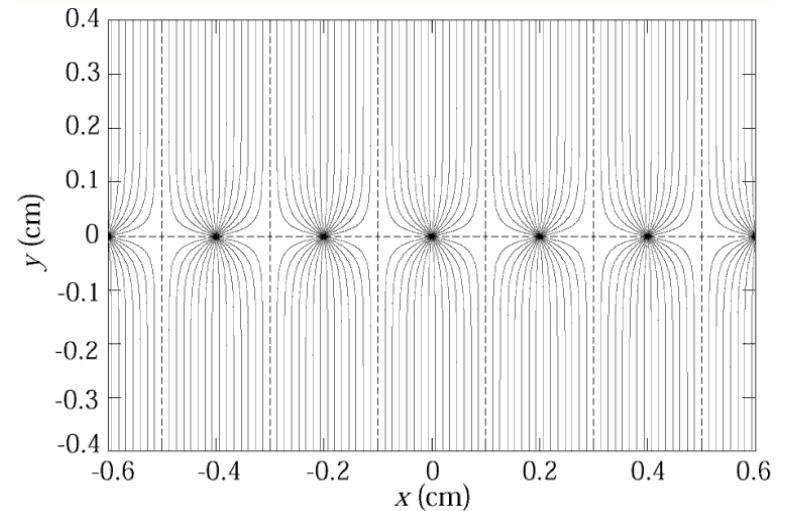
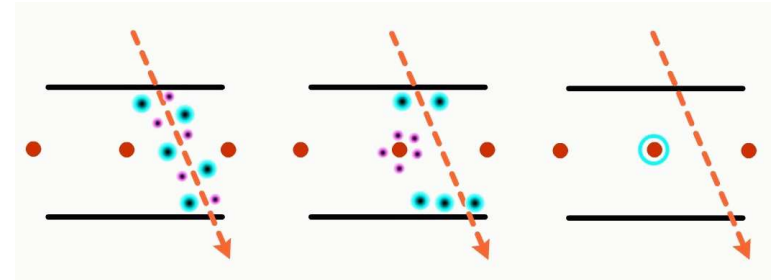
Komory wielodrutowe

MWPC - Multi Wire Proportional Chamber

Wiele równoległych drutów (anod) pomiędzy dwoma płaszczyznami katodowymi.



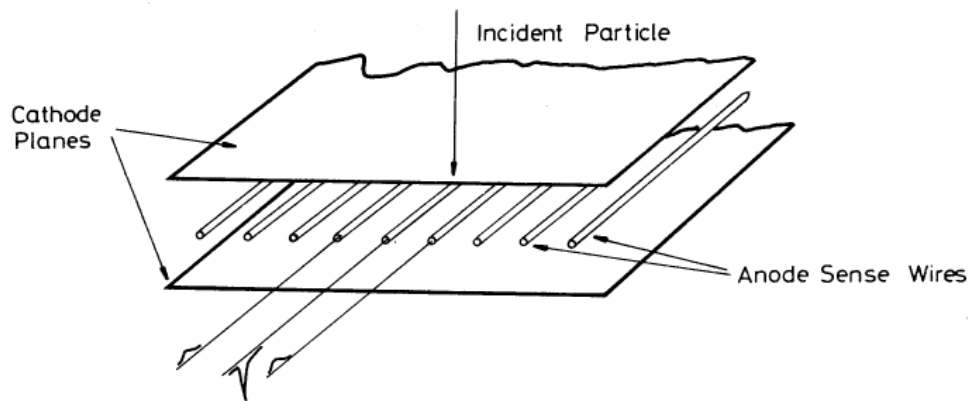
Działa tak samo jak szereg pojedynczych komór



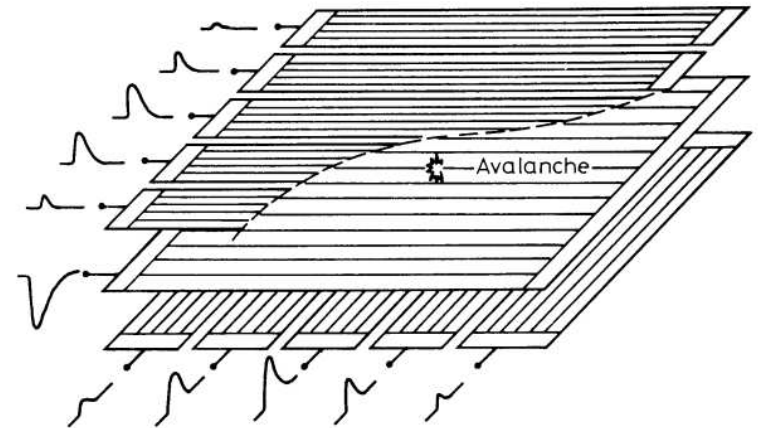
Liczniki gazowe

MWPC

Można rejestrować impulsy z poszczególnych drutów.



Można też rejestrować ładunki indukowane na katodzie.

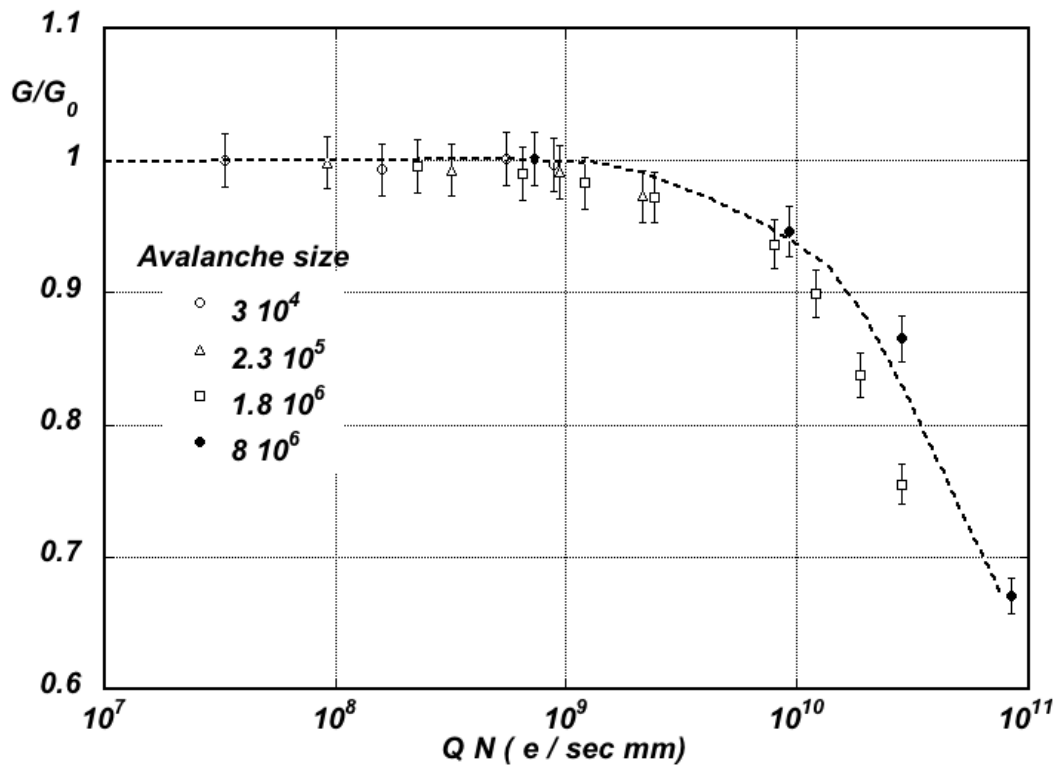


Możliwy jest podział dwóch płaszczyzn w prostopadłych kierunkach
⇒ dwuwymiarowy odczyt pozycji.

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.

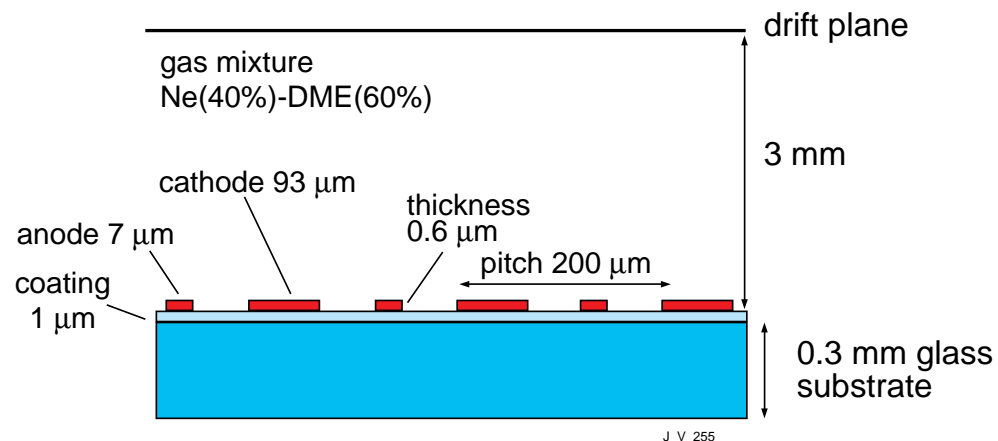
Liczniki gazowe

Nowe rozwiązania MSGC - Micro Strip Gas Chamber

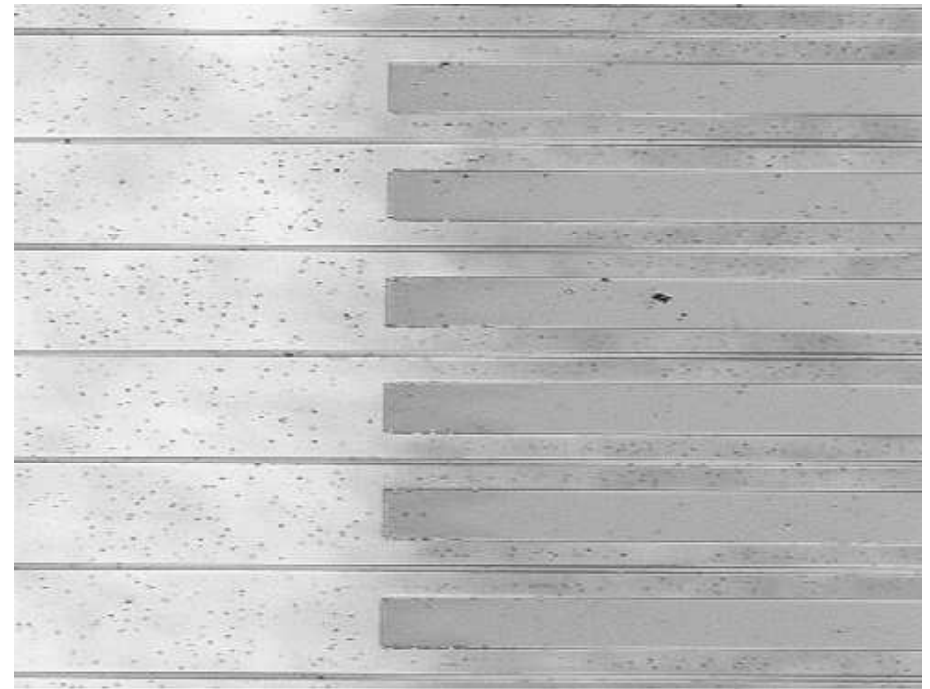
Druty są słabym punktem MWPC.

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

Można je zastąpić ścieżkami drukowanymi:



Brak drutów \Rightarrow łatwiejszy montaż, stabilność mechaniczna.



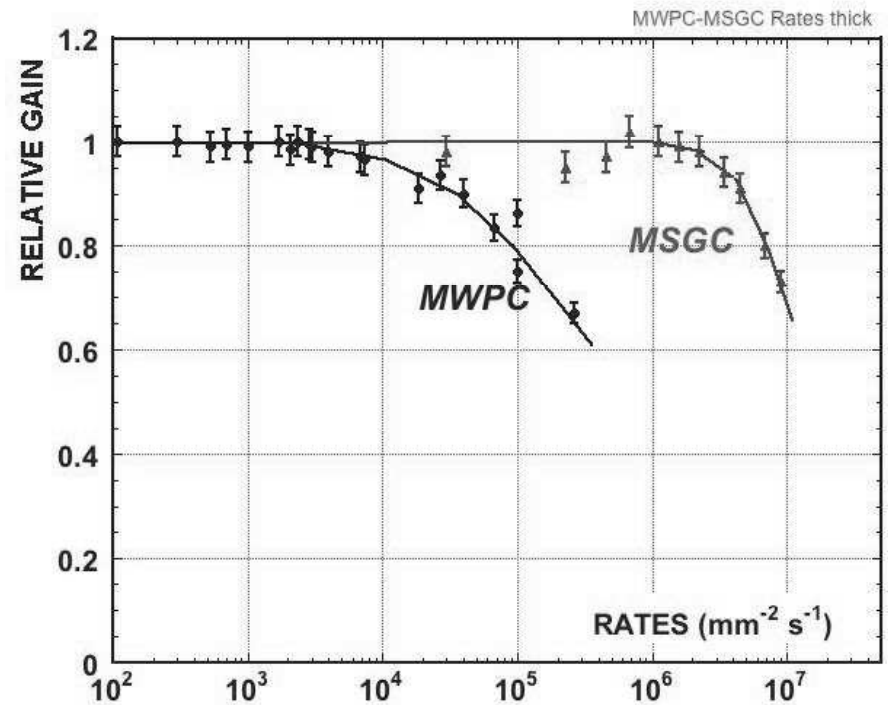
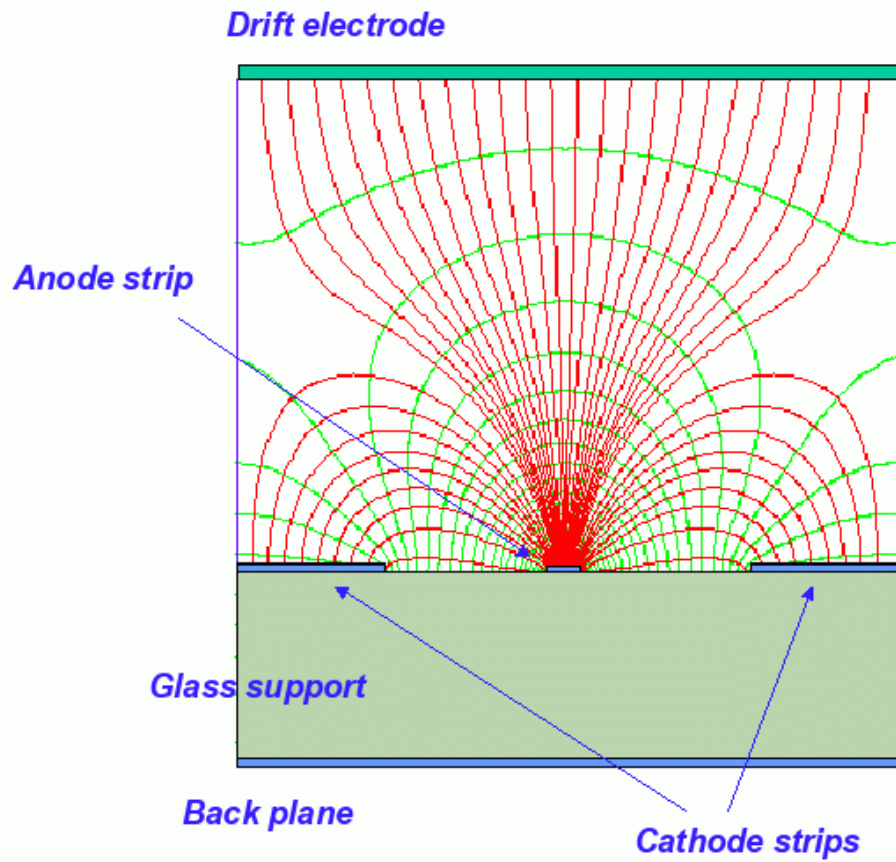
Liczniki gazowe

Nowe rozwiązania

MSGC - Micro Strip Gas Chamber

Pole elektryczne:

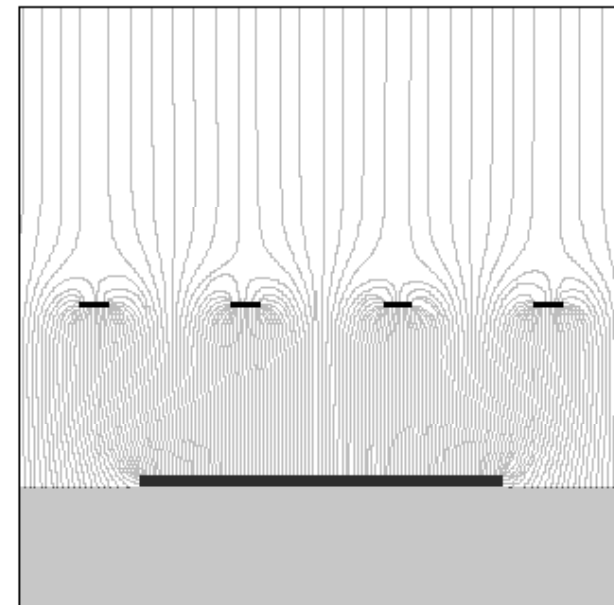
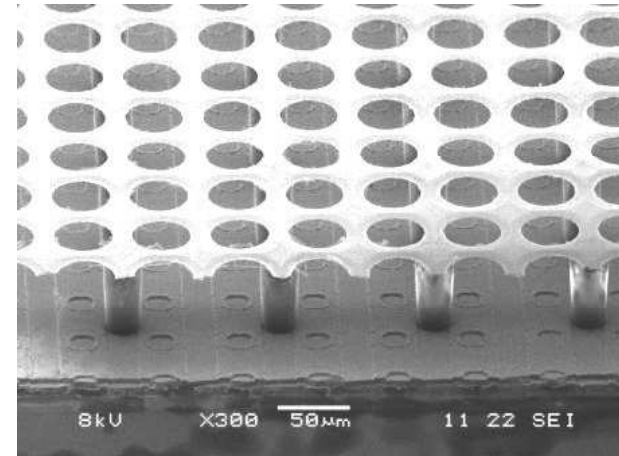
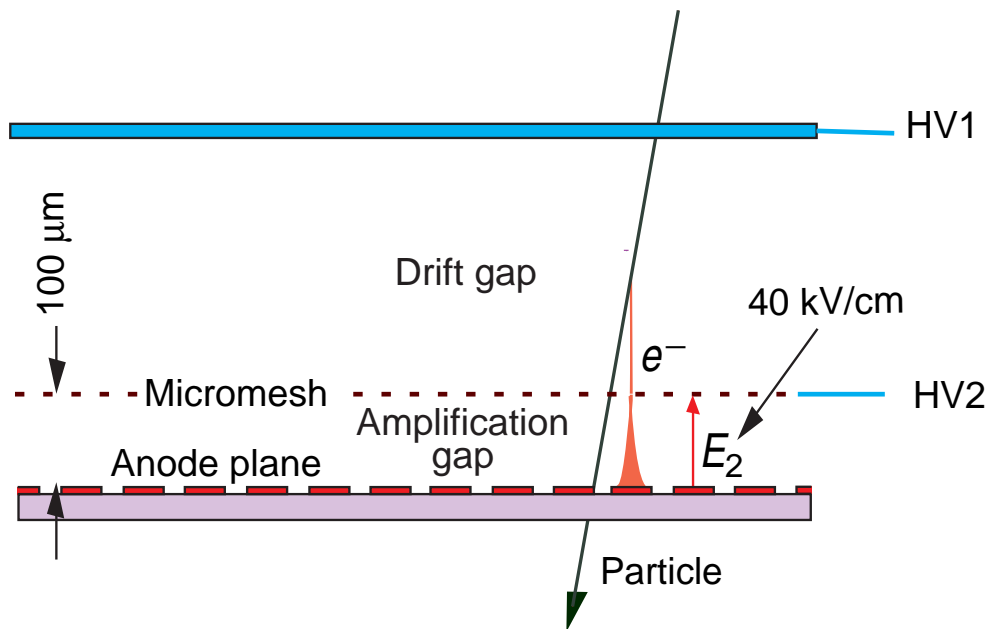
Więcej “drutów” - możliwy wyższy rate:



Liczniki gazowe

Micromegas

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

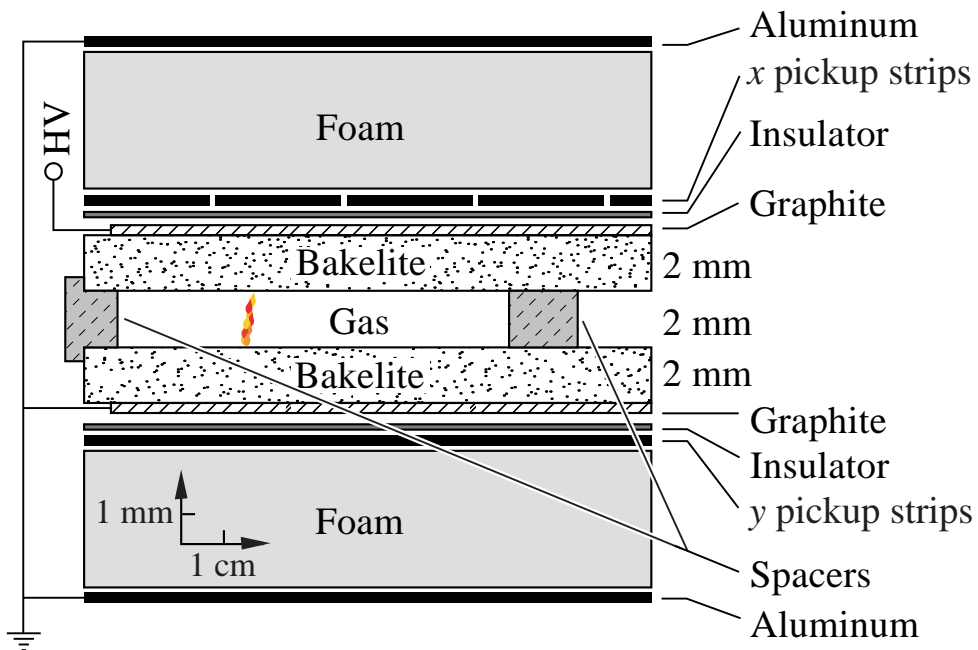


Płaszczyzna anodowa może być podzielona na dowolnie małe elementy odczytu.

Liczniki gazowe

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

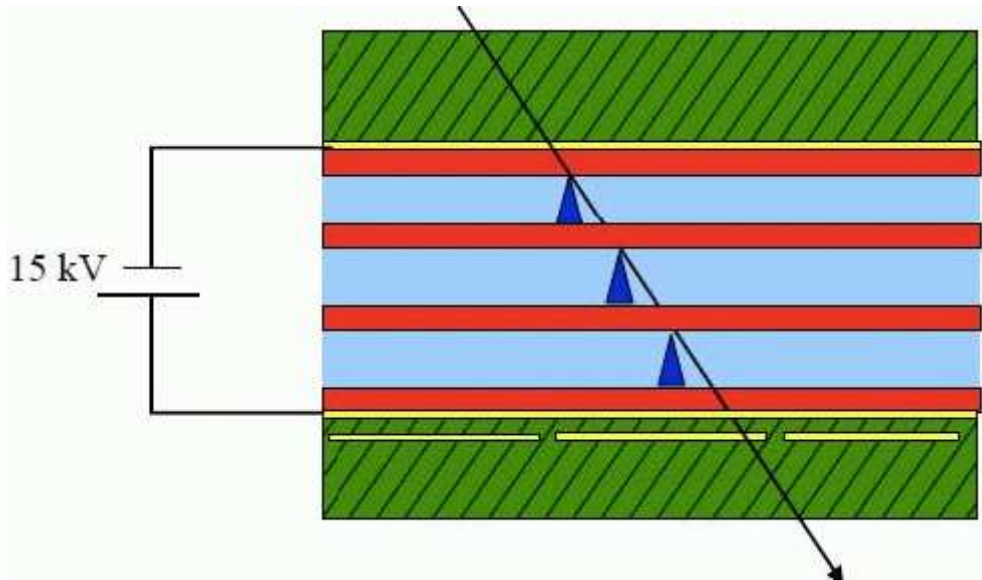
Wyładowanie obniża lokalną efektywność rejestracji.

Czas relaksacji rzędu $\mu s - s$

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

Liczniki gazowe

RPC Resistive Plate Chambers



Wielowarstwowe komory RPC

Pozwalają na zwiększenie efektywności i zmniejszenie dyspersji czasowej.

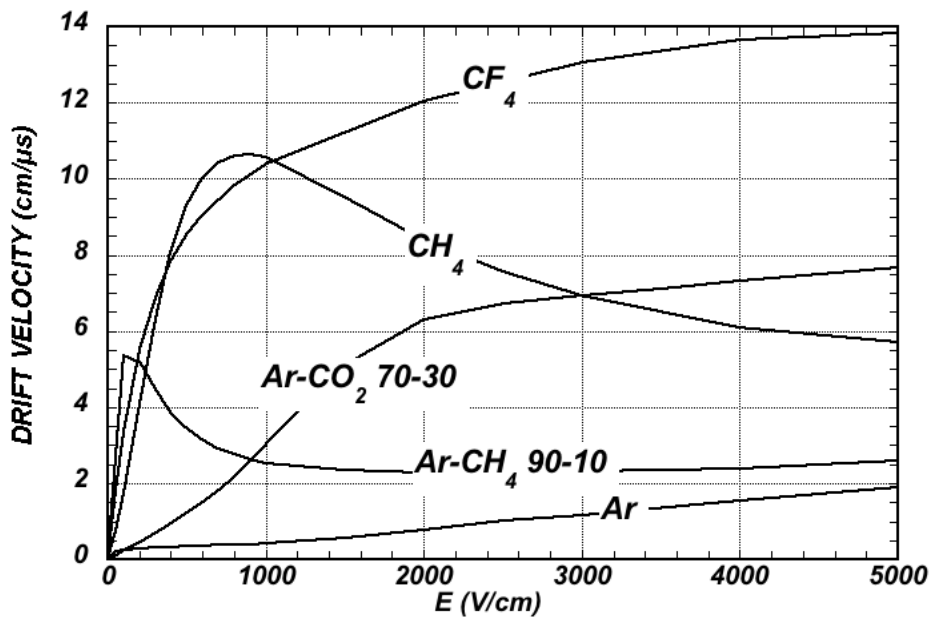
Uzyskiwane dokładności $\Delta t \sim 1 \text{ ns}$

Ograniczona dokładność wyznaczania pozycji, ale bardzo dobre do celów **wyzwalania**.

Liczniki gazowe

Dryf ładunków

Prędkość dryfu elektronów w gazie
w funkcji natężenia pola:



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

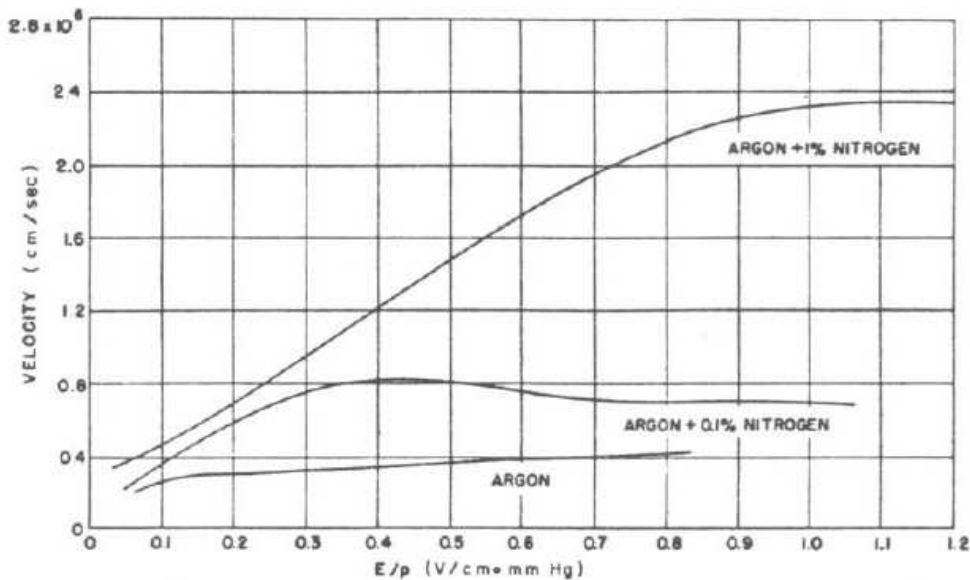
Dla niektórych mieszanek prędkość dryfu bardzo słabo zależy od napięcia (w pewnym przedziale wartości) ⇒ korzystny wybór dla układów o niejednorodnym polu

Liczniki gazowe

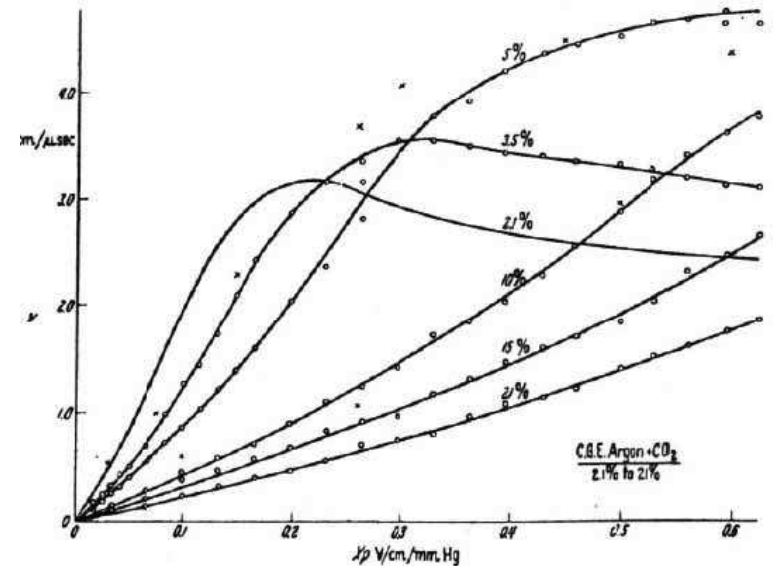
Dryf ładunków

Prędkość dryfu elektronów w gazie jest bardzo czuła na skład mieszanki i ewentualne domieszki (lub zanieczyszczenia).

Wpływ domieszki azotu na dryf w argonie:



Wpływ domieszki dwutlenku węgla



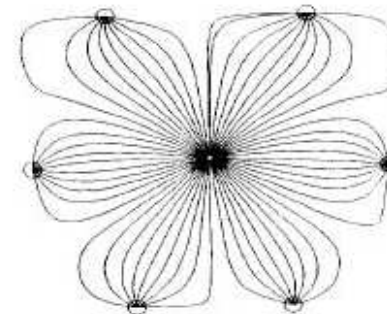
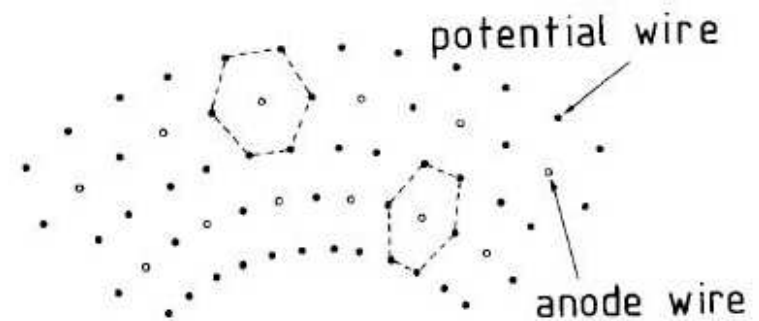
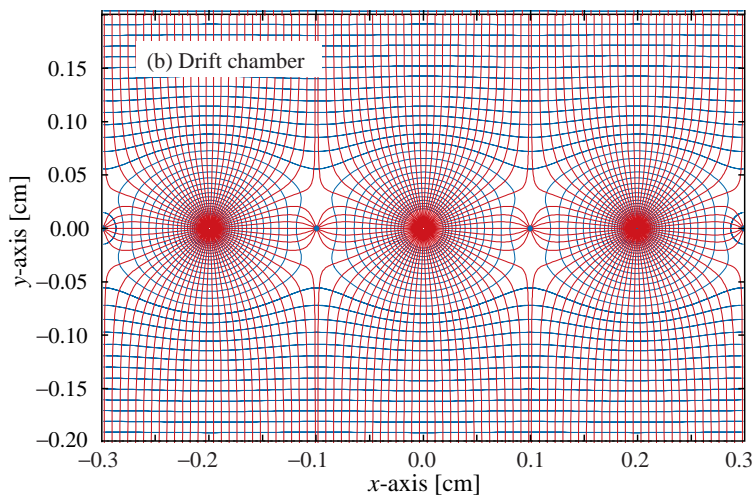
Liczniki gazowe

Komora dryfowa

Pomiar czasu dryfu elektronów umożliwia rekonstrukcję pozycji przechodzącej cząstki.

Możliwe jest to nawet w przypadku zwykłych komór typu MWPC

Struktura komory tryfowej z celami sześciokątymi:

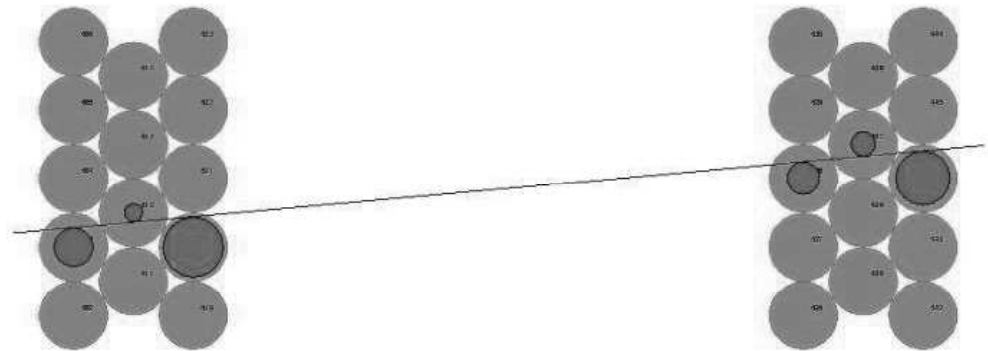
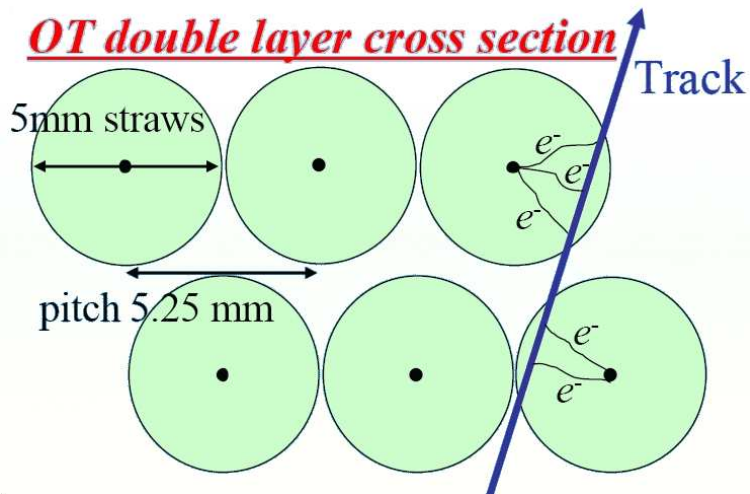


dodatkowe druty zwiększają efektywność zbierania ładunku

Liczniki gazowe

Komora dryfowa

Ostatnio często stosowane jako tania technologia dla detektorów o dużej powierzchni są tzw. komory słomkowe (straw tubes)



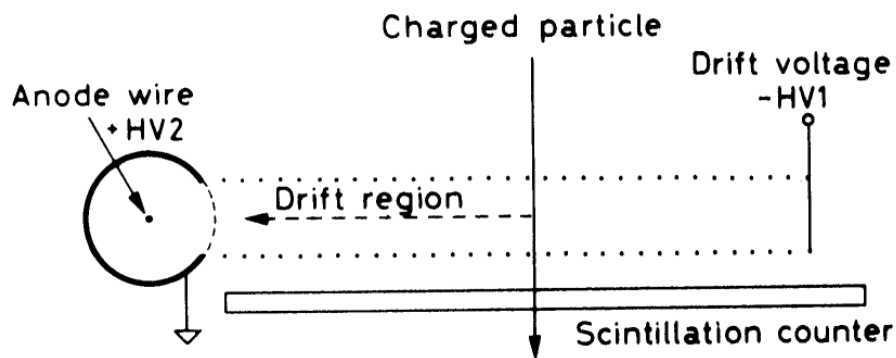
Komory mionowe dla eksperymentu ATLAS

Liczniki gazowe

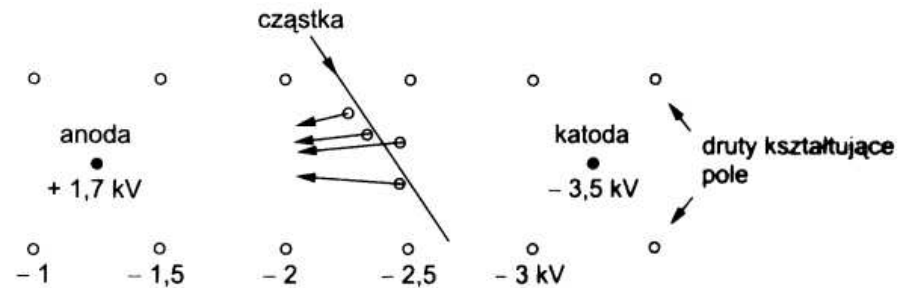
Komora dryfowa

Ale najczęściej spotykamy konstrukcje dedykowane do pomiaru czasu dryfu

Konstrukcja pojedynczej komory



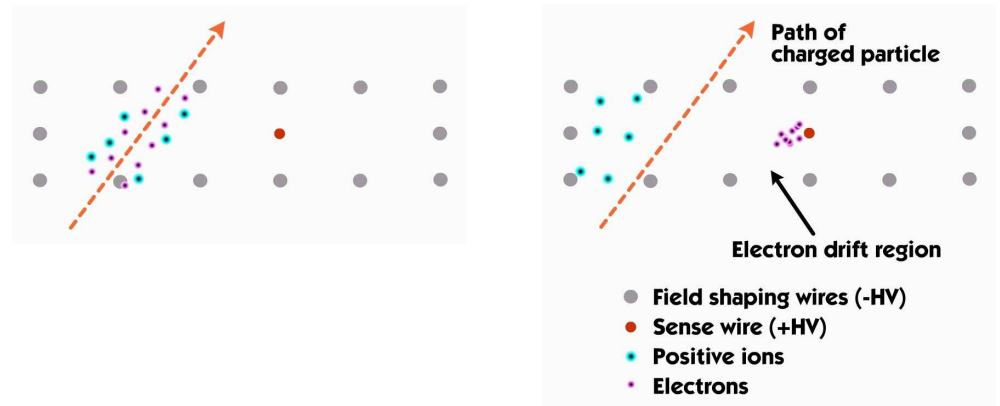
Wersja uproszczona:



Wysoka jednorodność pola.

Możliwe długości dryfu do kilku cm.

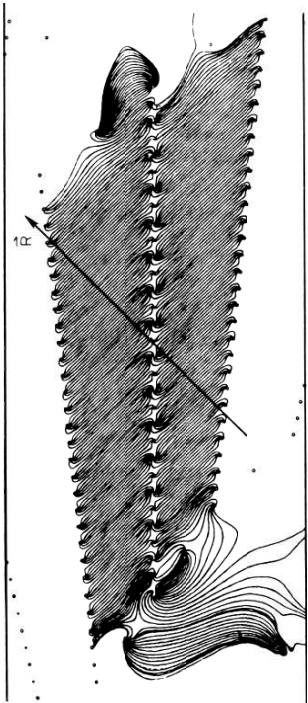
Pomiar czasu dryfu "wyzwalany" innym detektorem



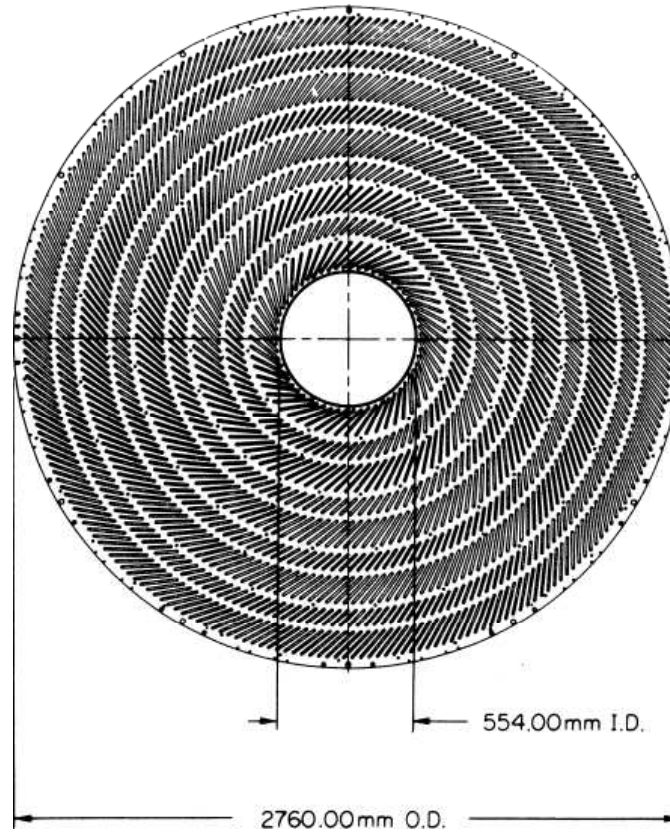
Liczniki gazowe

Komora dryfowa

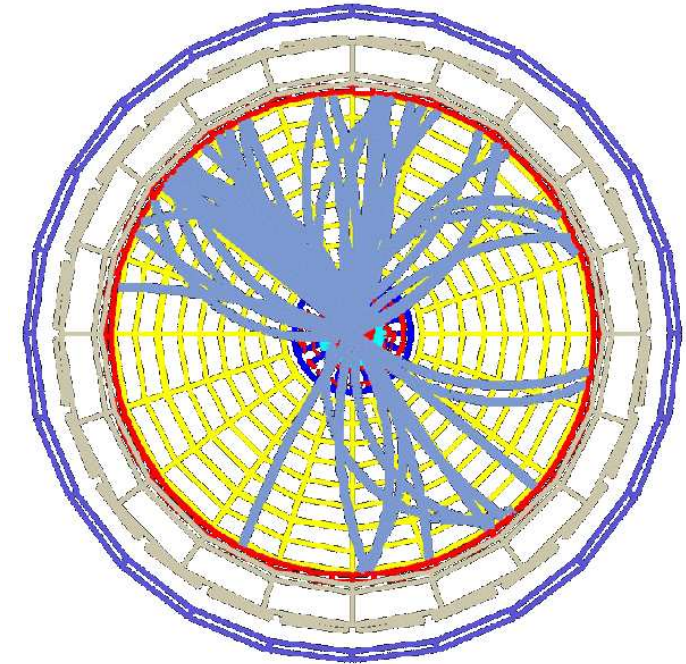
Pojedyncza cela komory dryfowej detektora CDF przy Tevatronie:



Pełen detektor



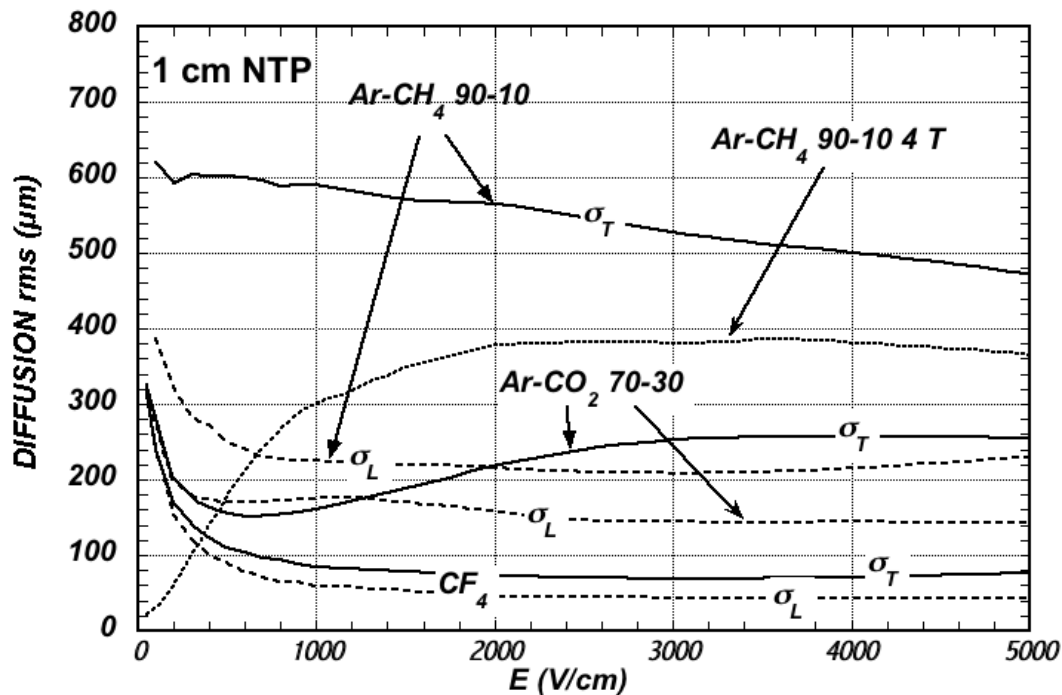
Rekonstruowany przypadek



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

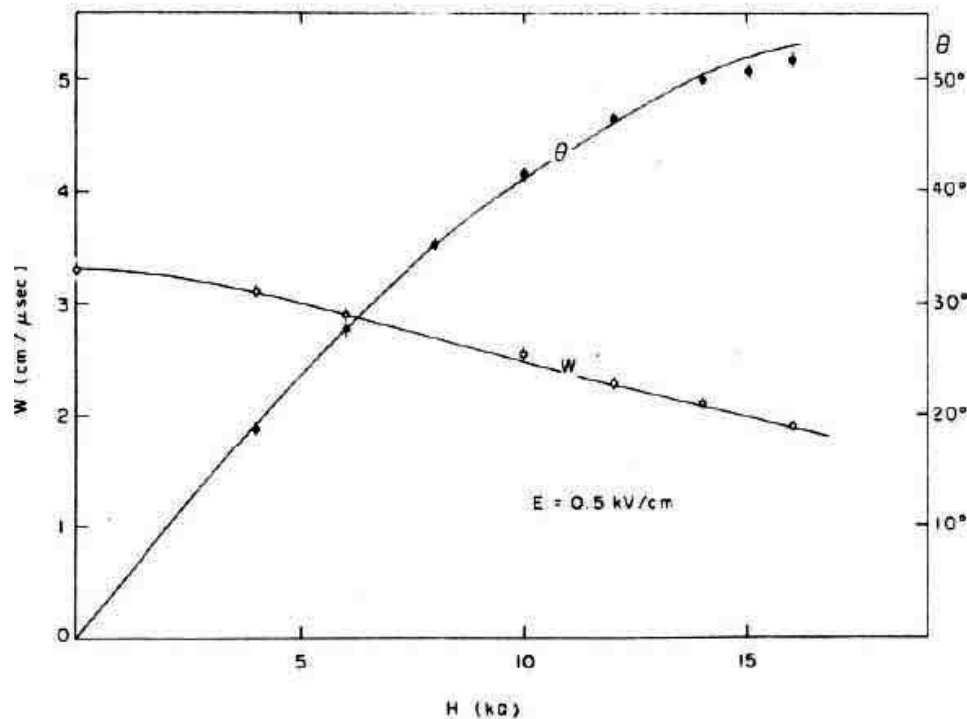
Liczniki gazowe

Komora dryfowa

Pole magnetyczne prostopadłe do kierunku pola elektrycznego powoduje odchylenie kierunku dryfu elektronów (kąąt Lorentza).

Trzeba to brać pod uwagę budując detektory pracujące w polu magnetycznym.

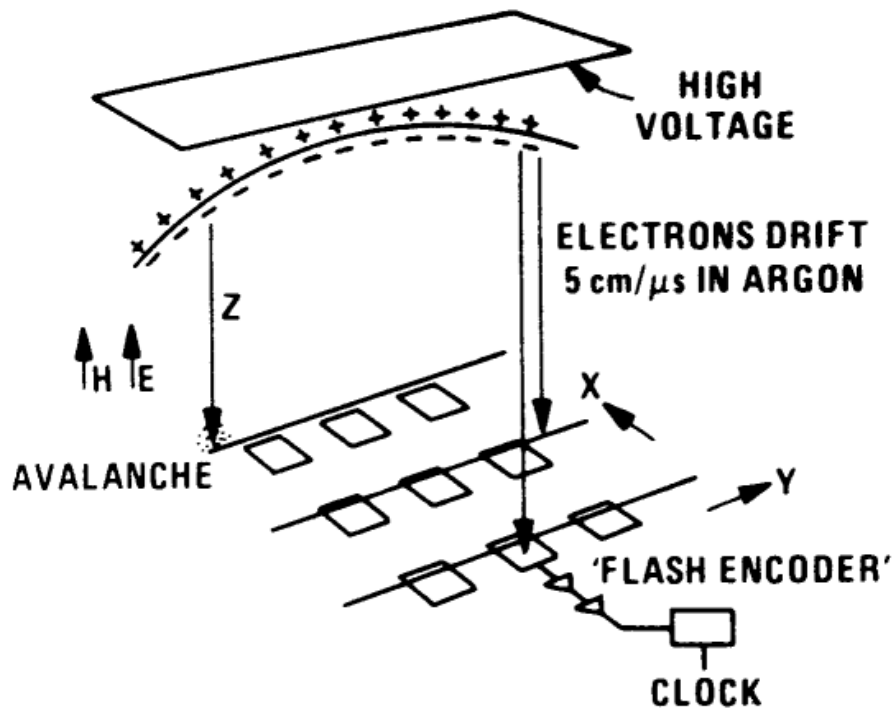
Pole magnetyczne zmniejsza też prędkość dryfu.



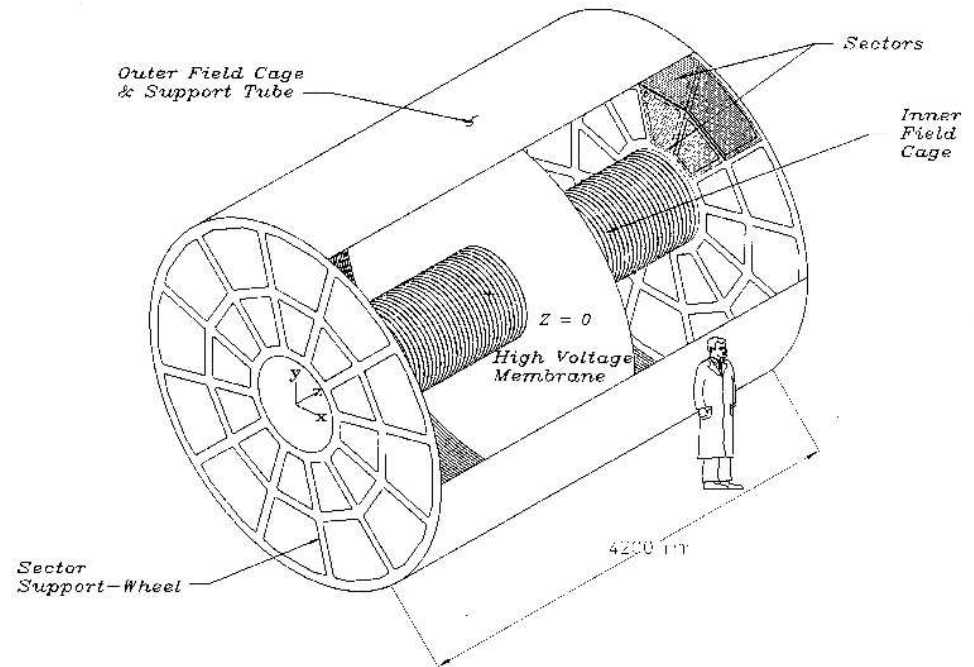
Liczniki gazowe

Komora projekcji czasowej TPC

Idea: komora wielodrutowa z bardzo długim obszarem dryfu



Typowa konstrukcja



ALICE TPC (5m długości, 5m średnicy)

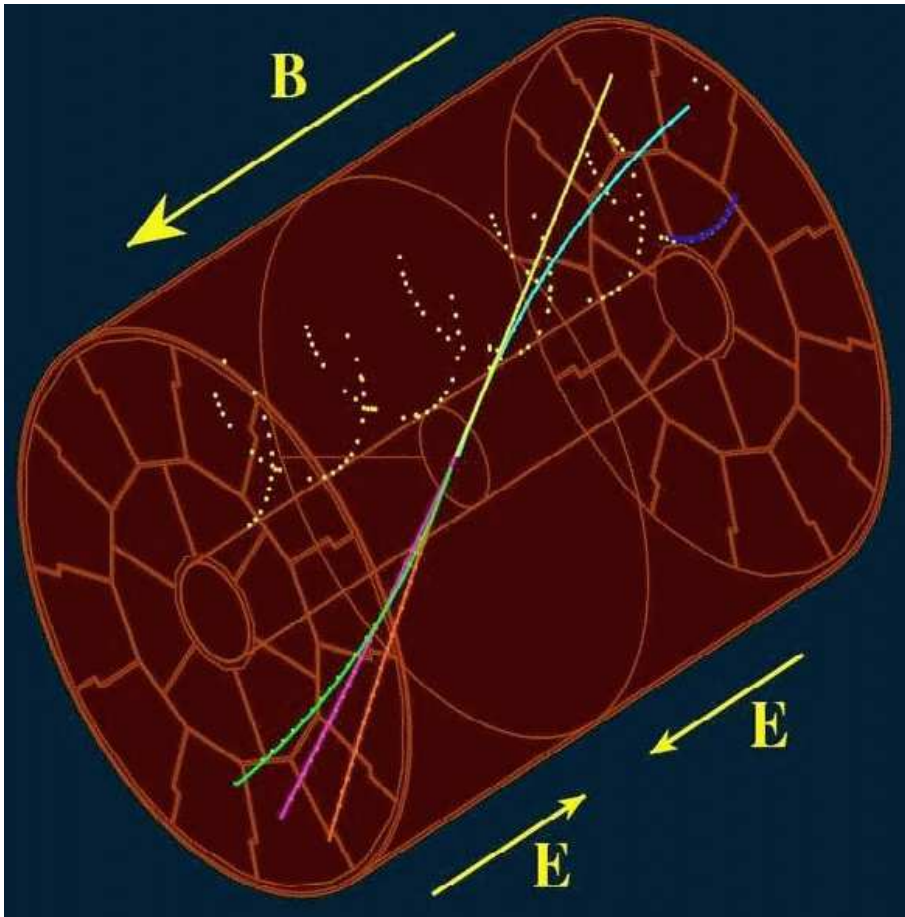
Długa droga dryfu

⇒ duże opóźnienie sygnału (10 – 100μs)

Liczniki gazowe

Komora projekcji czasowej TPC

Schemat:



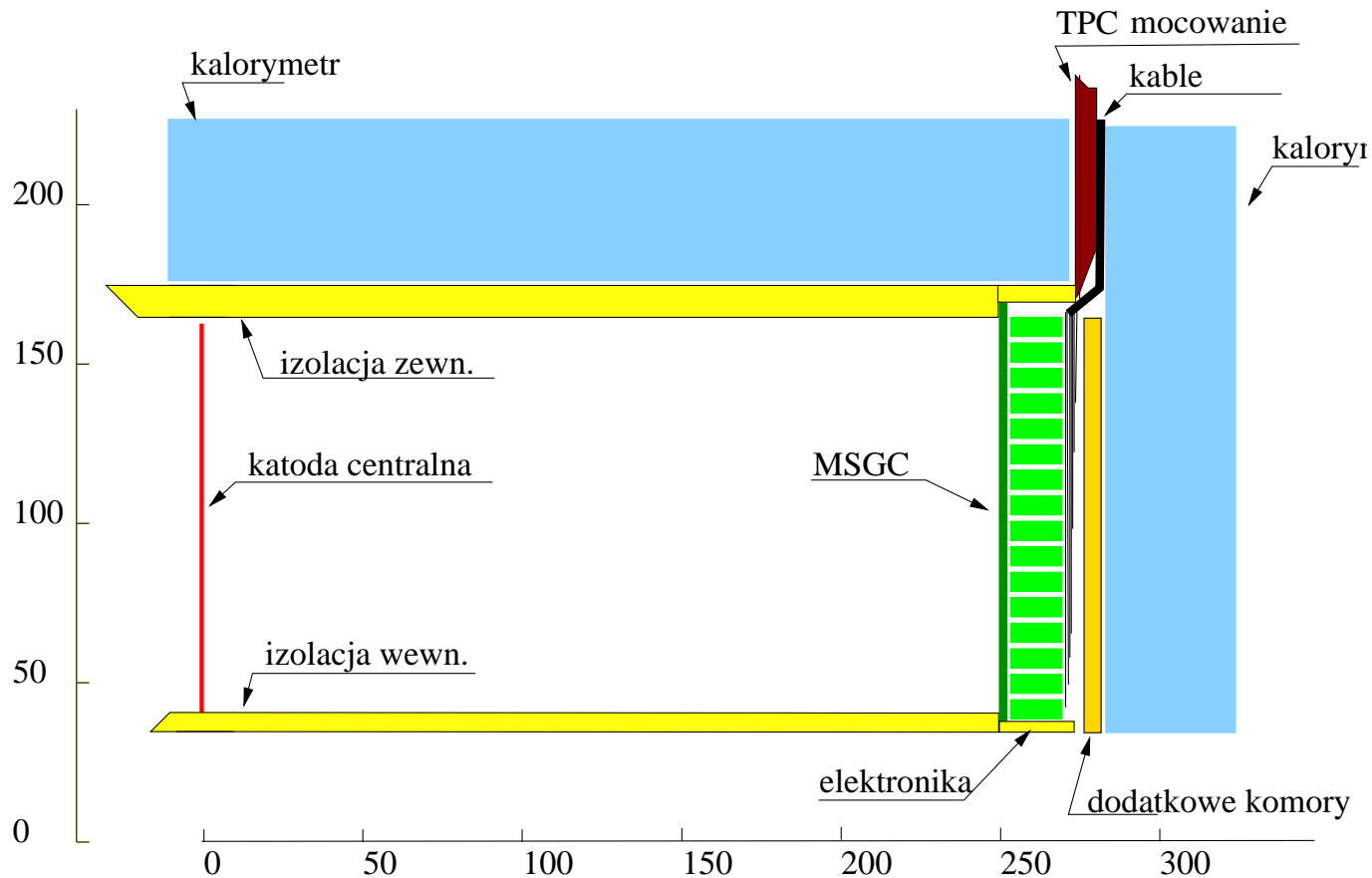
ALICE:



Liczniki gazowe

Komora projekcji czasowej TPC

Przekrój poprzeczny 1/4 komory



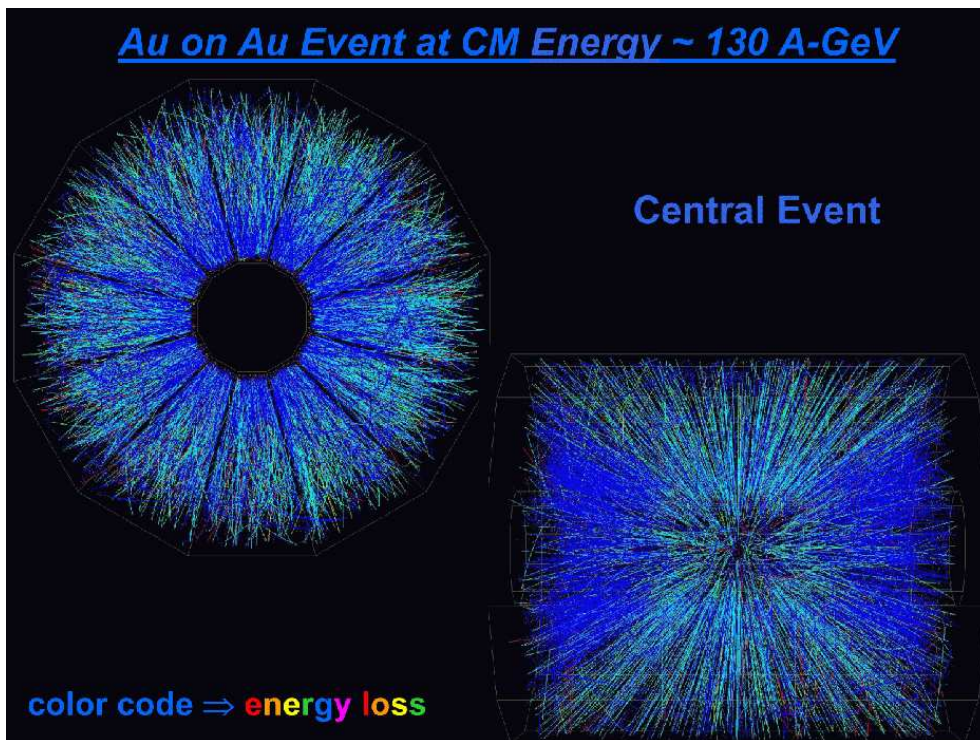
Ogromna zaleta: bardzo mało materiału (tylko gaz) - cząstki nie oddziałują

Liczniki gazowe

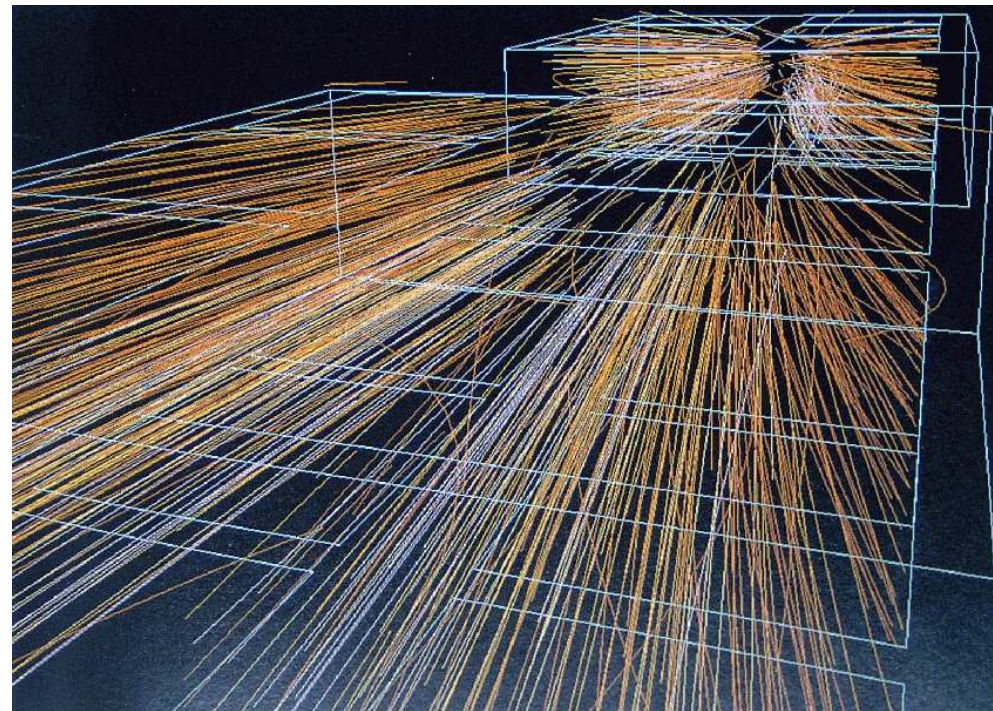
Komora projekcji czasowej TPC

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

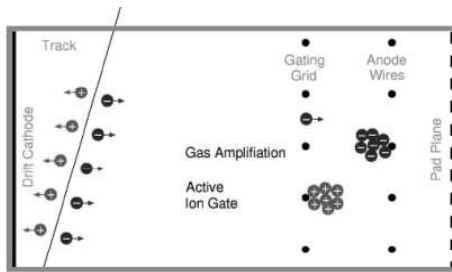
TPC są powszechnie używane w FWE

Zasada ich działania praktycznie się nie zmieniła

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

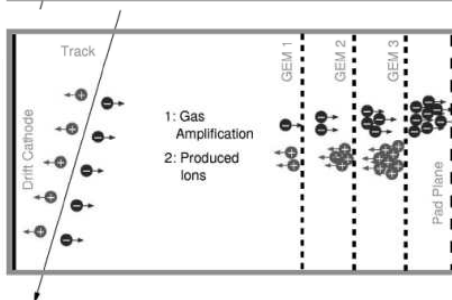
Ion Back-Drift

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

Liczniki scyntylacyjne

Scyntylatory

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

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

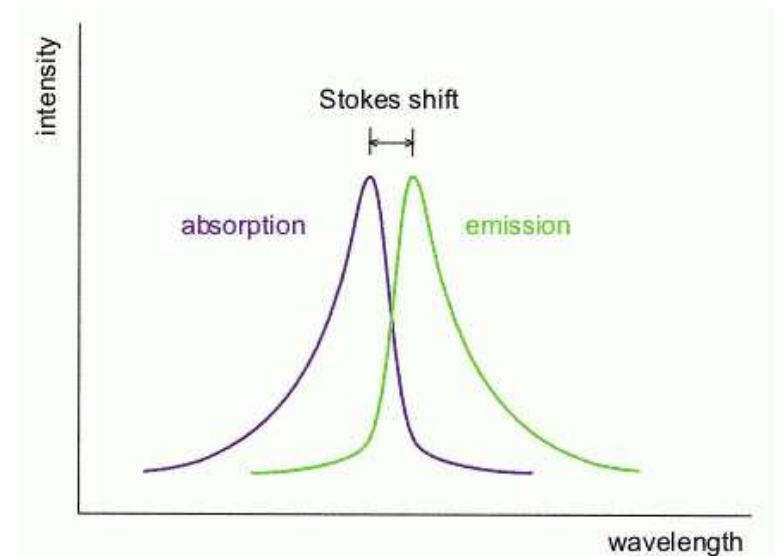
\Rightarrow mamy możliwość detekcji produkowanych fotonów

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

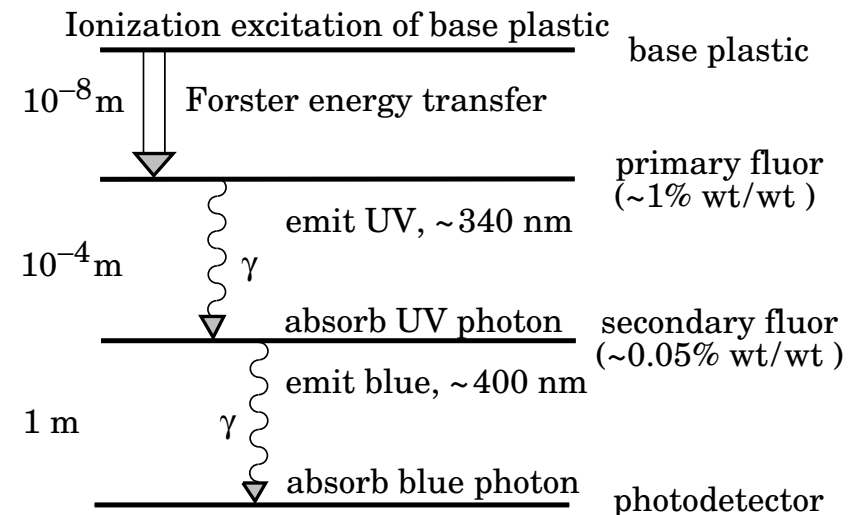
Absorpcja i reemisja fotonów przez domieszki powoduje przesunięcie długości fali do obszaru gdzie materiał jest przezroczysty.

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

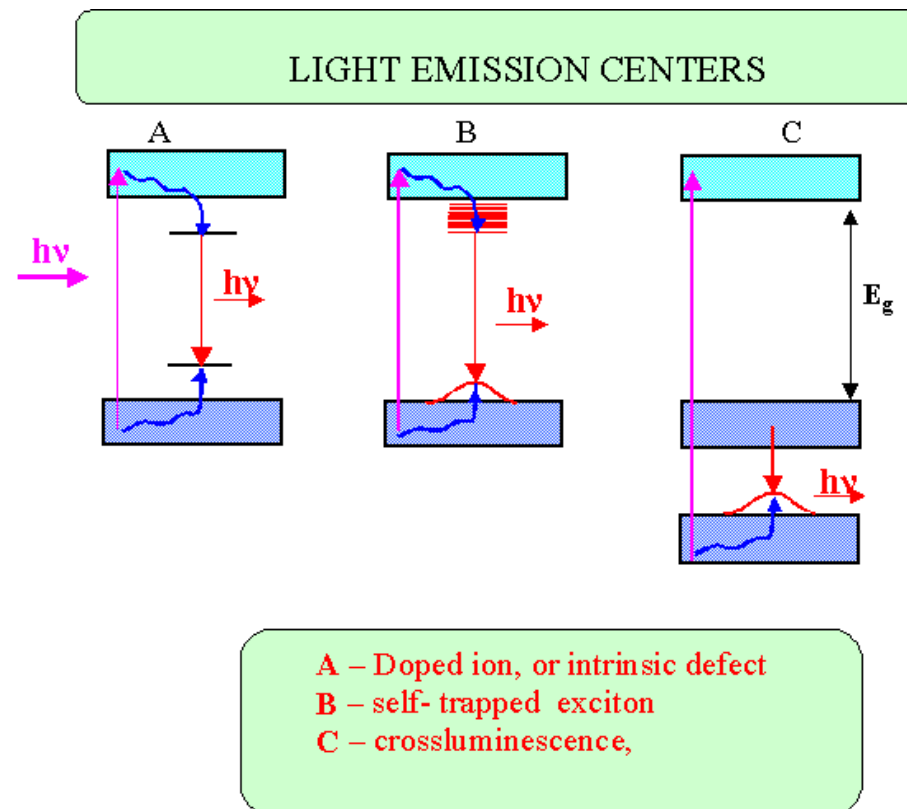
Kryształy nieorganiczne dużo gęstsze ($4-8\text{g/cm}^3$) niż scyntylatory organiczne ($\sim 1\text{g/cm}^3$)

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

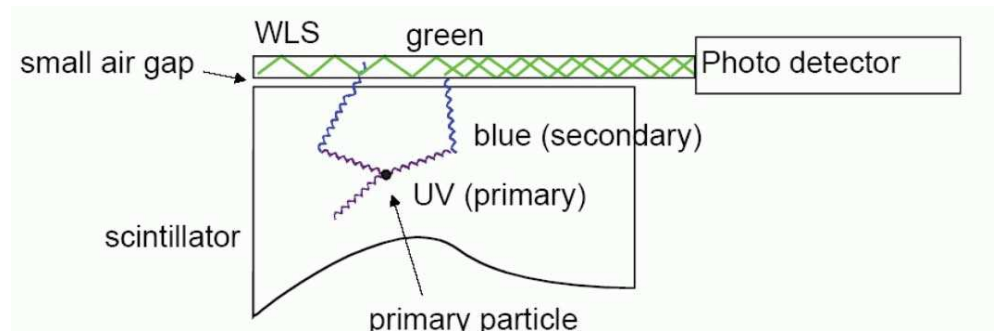
Przesunięcie długości fali

WLS - Wave Length Shifter

Materiał, który absorbuje jedną długość fali (np. ultrafiolet) i emituje w innej.

Używany, aby dopasować widmo scyntylatora do zakresu czułości detektora.

Pozwala na efektywniejsze zbieranie światła ze scyntylatora.



Minos:



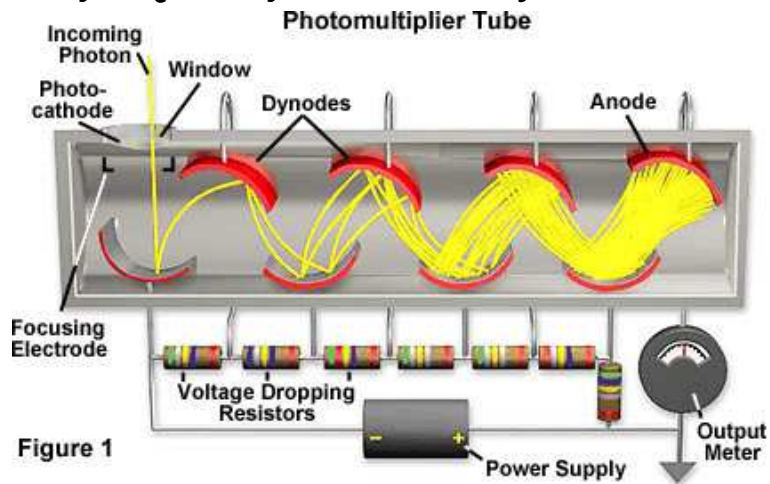
Liczniki scyntylicyjne

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



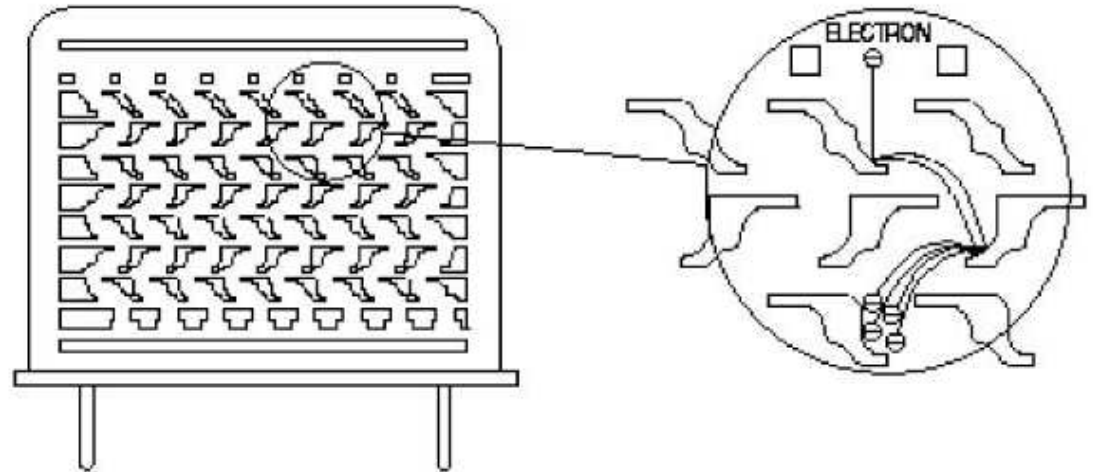
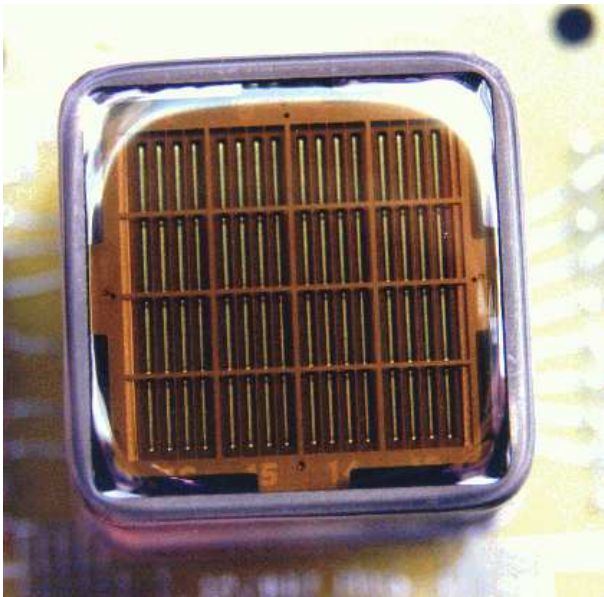
Zapewniają szeroki zakres pomiarowy (115-1100 nm), wysokie wzmocnienie (10^3 - 10^7) i szybką odpowiedź (0.7-10 ns)

Liczniki scyntylicyjne

Detekcja fotonów

Fotopowielacze są dobrze ugruntowaną technologią o szerokim zakresie zastosowań. Łączą dużą czułość z wysoką liniowością i bardzo małymi szumami.

Fotopowielacze wielokanałowe wykorzystywane w eksperymencie MINOS



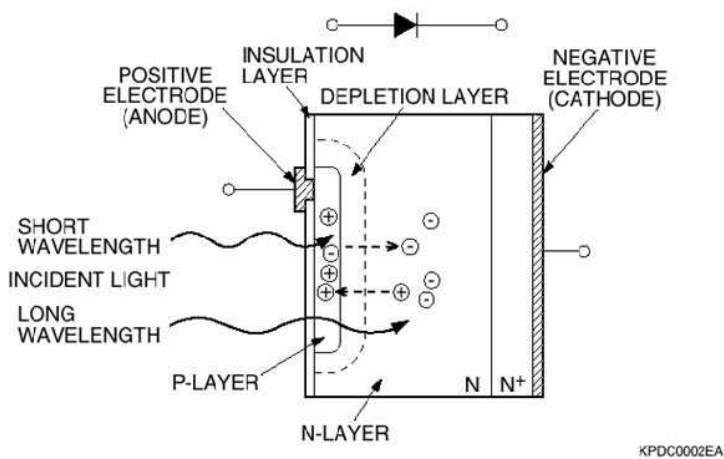
Liczniki scyntylacyjne

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

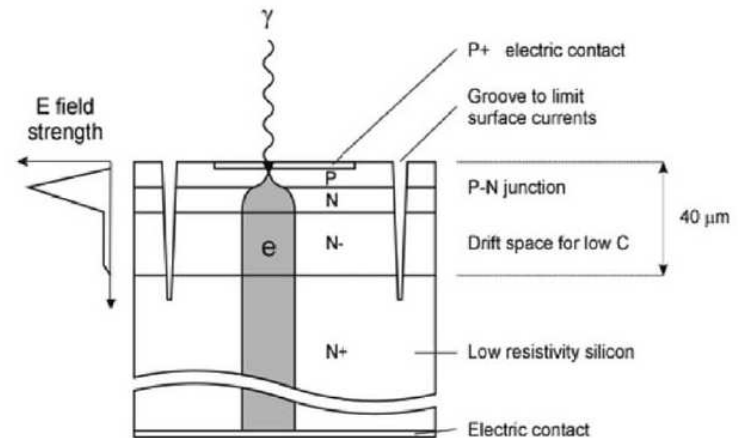
Fotodioda (Photodiode: PD)

Każdy foton powoduje powstanie tylko **jednej pary** elektron-dziura.

Bardzo dobra do mierzenia dużych sygnałów, ale brak czułości na pojedyncze fotony.



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



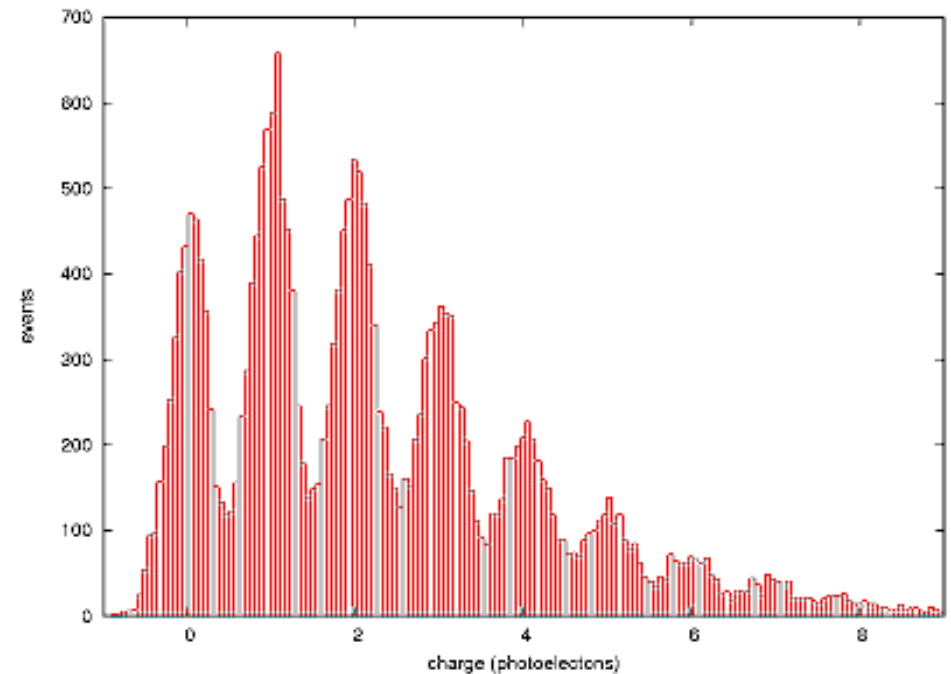
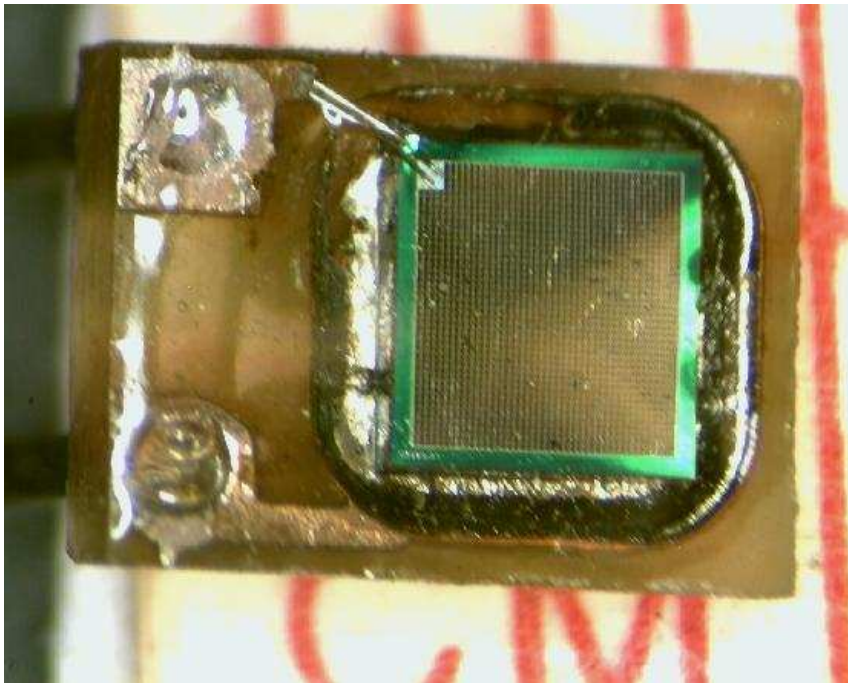
Podstawowa wada:
brak możliwości zliczania fotonów.

Liczniki scyntylacyjne

Pixlowy detektor fotonów ostatnio coraz powszechniej stosowany

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

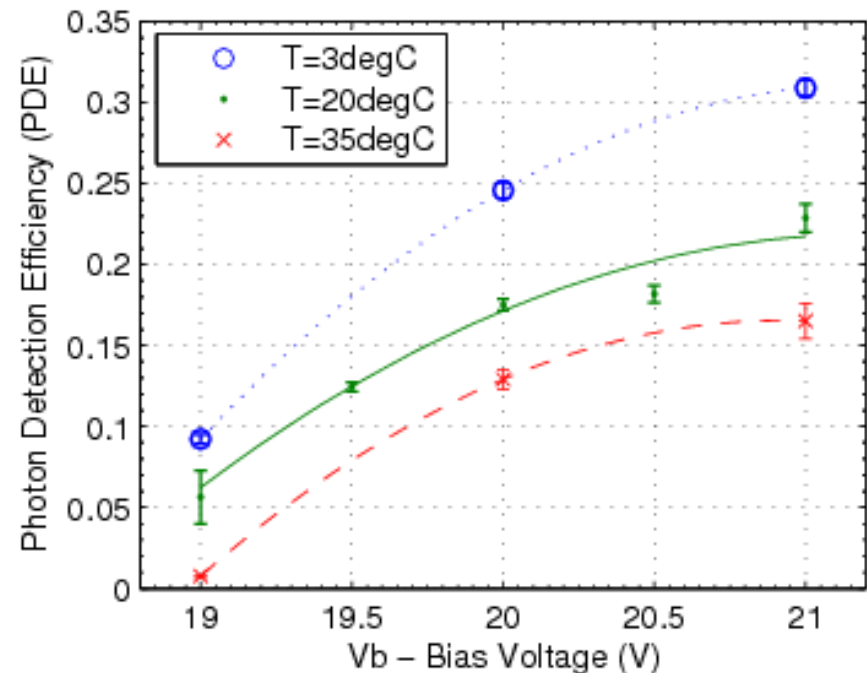
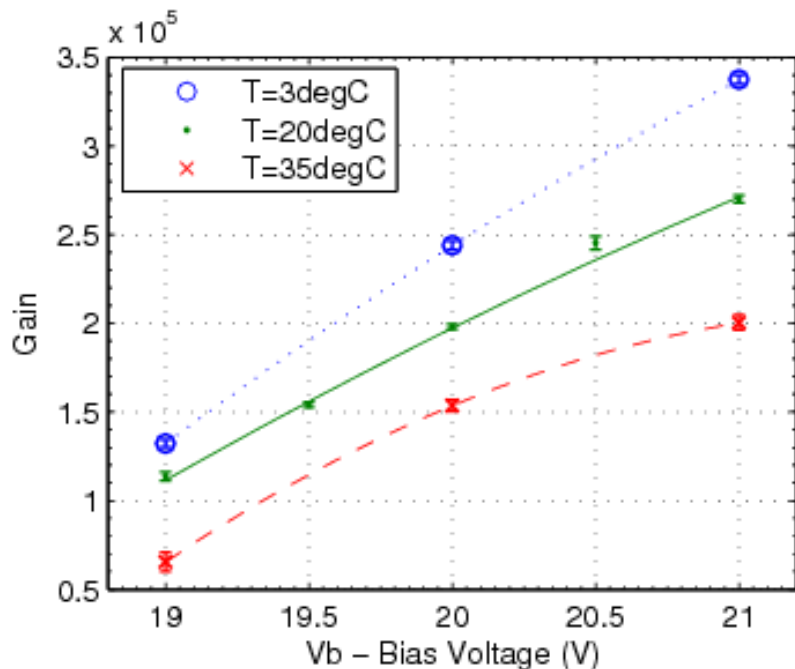
Duża ($\sim 10^3$) liczba APD na małej powierzchni ($\sim 1\text{mm}^2$) - możliwość zliczania fotonów



Liczniki scyntylicyjne

Pixlowy detektor fotonów

Wyniki pomiarów



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

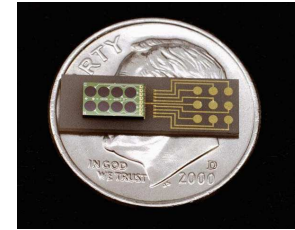
Ograniczony zakres czułości optycznej (400-550 nm), ale brak problemów z zasilaniem ($U=30$ - 60 V) i dużo mniejsze rozmiary!

Liczniki scyntylacyjne

Perspektywy

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

Dziś (eksperyment D0):



Kiedyś:

